



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Κ. ΣΑΚΚΑ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΣΑΚΚΑ Κ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή: Κλαδάς Αντώνιος (Επιβλέπων Καθηγητής)
Παπαθανασίου Σταύρος (Καθηγητής)
Αντωνόπουλος Αντώνιος (Αναπληρωτής Καθηγητής)

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 04 Δεκεμβρίου 2024

Κλαδάς Αντώνιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παπαθανασίου Σταύρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κορρές Γεώργιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Προυσαλίδης Ιωάννης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μαδεμλής Χρήστος
Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2024



Γεώργιος Κ. Σακκάς

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Γεώργιος Κ. Σακκάς, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το έργο υλοποιείται στα πλαίσια της Δράσης «ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ» (Β' Κύκλος) που συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) με κωδικό έργου: Τ2ΕΔΚ-00421



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκά Διαρθρωτικά
και Επενδυτικά Ταμεία


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΑνΕΚ

ΕΠΑνΕΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή μελετά σε βάθος τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα τα οποία διέπουν τη συμπεριφορά των μόνιμων μαγνητών στα πλαίσια ανάπτυξης αντίστοιχων ηλεκτρικών κινητήρων για Υβριδικά/Ηλεκτρικά οχήματα. Το πεδίο εφαρμογής των υπό μελέτη υλικών μόνιμων μαγνητών και των αντίστοιχων κινητήρων είναι τα συστήματα ηλεκτροκίνησης, τα οποία περιλαμβάνουν τροφοδοσίες από μη ημιτονοειδείς πηγές προερχόμενες από μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Η ορθή αναπαράσταση αυτών των φαινομένων αναδεικνύει τις κατάλληλες σχεδιαστικές επιλογές, όσον αφορά το είδος των υλικών, την τελική σχεδίαση της γεωμετρίας τους, και τα χαρακτηριστικά τους στη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση της τεχνολογίας και των ιδιοτήτων των σκληρών μαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται στους μόνιμους μαγνήτες. Αναλύονται βιβλιογραφικά τα χαρακτηριστικά τους, οι επιπτώσεις της απομαγνήτισης και η μοντελοποίηση που συχνά υιοθετείται στη σχεδίαση εύρωστων ηλεκτρικών κινητήρων. Η εφαρμογή των χαρακτηριστικών καμπυλών και η επέκταση των υφιστάμενων μεθόδων μοντελοποίησης έχει πραγματοποιηθεί και παρουσιάζεται σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση κατάλληλης τοπολογίας μαγνητικού κυκλώματος ηλεκτρικής μηχανής, η οποία σχεδιάζεται έτσι ώστε να εμφανίζει ανοχή σε σφάλματα απομαγνήτισης.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η μοντελοποίηση των απωλειών εξ αιτίας του φαινομένου των δινορευμάτων. Η τρισδιάστατη φύση αυτών των φαινομένων και η θεώρηση του μαγνητικού πεδίου αντίδρασης των δινορευμάτων στη συνολική μοντελοποίηση των ηλεκτρικών κινητήρων αποτελούν τον κύριο στόχο της ανάλυσης. Η βιβλιογραφική διερεύνηση του σχετικού επιστημονικού πεδίου, καθώς επίσης και η επιλογή κατάλληλης μεθοδολογίας μοντελοποίησης, αποσκοπούν στη μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος δημιουργώντας ισοδύναμους μηχανισμούς περιγραφής των φαινομένων.

Αρχικό στάδιο της μοντελοποίησης, αποτελεί η διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών καμπυλών, που έχουν ως στόχο την μακροσκοπική περιγραφή των ιδιοτήτων των υλικών τόσο στα σκληρά μαγνητικά υλικά, όσο και στα μαλακά μαγνητικά υλικά, και διεξάγεται πειραματικά. Η περιγραφή και η διαμόρφωση χαρακτηριστικών μαγνητικών κυκλωμάτων τύπου C-Core αποτελεί σημαντική συμβολή στον πειραματικό υπολογισμό των απωλειών των μόνιμων μαγνητών. Επίσης διερευνώνται οι επιπτώσεις στις απώλειες από επιταξιακή τοποθέτηση στην επιφάνεια των μαγνητών κατάλληλων μικροστροφωμάτων με κόκκους σιδηρομαγνητικών, αγώγιμων και υψηλής διαπερατότητας υλικών. Τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν επέτρεψαν την περαιτέρω βελτίωση και λεπτομερέστερη αναπαράσταση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν τα υπό μελέτη φαινόμενα. Η πειραματική επιβεβαίωση των αριθμητικών και αναλυτικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων εργαστηριακών μετρήσεων σε μαγνητικά κυκλώματα με συναφή με την τελική ηλεκτρική μηχανή διαμόρφωση, όπως στην περίπτωση μίας πρότυπης γραμμικής ηλεκτρικής μηχανής.

Στη συνέχεια, μελετάται η συζευγμένη ανάλυση διαφορετικών φυσικών φαινομένων (ηλεκτρομαγνητικών, θερμικών, μηχανικών) με κατάλληλες τεχνικές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων καθώς και η σημασία θεώρησης των αλληλεπιδράσεων σε μηχανές που περιλαμβάνουν μόνιμους μαγνήτες, αναπαριστώντας λεπτομερώς την συμπεριφορά τους σε λειτουργικές συνθήκες υψηλών ταχυτήτων. Η διαφοροποίηση και η λεπτομερής μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των μαγνητικών υλικών όταν σε αυτά επιδρούν μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις, συνιστούν επίσης σημαντικό ενδιαφέρον διερεύνησης. Παρουσιάζεται, μία μέθοδος ανάλυσης που αναπτύχθηκε, ενώ παράλληλα αναδεικνύεται η αποτελεσματικότητα και η περιορισμένη αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεων.

Συμπερασματικά η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στη διερεύνηση των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών των μόνιμων μαγνητών καθώς και στην ανάπτυξη αλγορίθμων ανάλυσης και μοντελοποίησής τους, στα πλαίσια διαμόρφωσης αντίστοιχων μεθοδολογιών σχεδιασμού ηλεκτρικών μηχανών. Η πειραματική επιβεβαίωση των μεθόδων που αναπτύχθηκαν, πραγματοποιείται σε μαγνητικά κυκλώματα με κατάλληλες διατάξεις μέτρησης. Τέλος, παρουσιάζεται η συνολική εκτίμηση της συμβολής των εμπλεκόμενων φαινομένων και της μεθοδολογίας ανάλυσής τους που προτάθηκε στο γενικότερο πεδίο εφαρμογών της ηλεκτροκίνησης καθώς και οι δυνατότητες αξιοποίησής τους στο σχεδιασμό ηλεκτρικών μηχανών.

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

ABSTRACT

The present doctoral dissertation undertakes a detailed analysis of the electromagnetic phenomena governing the behavior of permanent magnets and their interaction with ferromagnetic materials composing the rotor magnetic circuits within the scope of developing design optimization tools for electric motors implemented in Hybrid/Electric Vehicles. The field of application of the studied permanent magnet materials and the corresponding motors concerns electric propulsion systems involving non-sinusoidal waveform supplies provided by power electronic devices. A correct analysis of these phenomena necessitates appropriate design choices for the representation of the type of materials, their final geometry configuration, and their characteristics in the operation of the respective electric machines.

Initially, a brief overview of the technology and properties of hard magnetic materials constituting permanent magnets of different types is presented. Their macroscopic characteristics, the effects of demagnetization, and the modeling procedures often followed in the design of robust electric motors reported in the literature are analyzed. The implementation of appropriate characteristic curves and the extensions of existing modeling techniques have been performed in conjunction with optimization procedures leading to appropriate topologies of the magnetic circuits of electric machines, designed to exhibit fault tolerance and reduced demagnetization risks.

Subsequently, an important effort is devoted to model the losses in permanent magnets originated by eddy currents generated by higher frequency harmonics due to stator slotting and to non-sinusoidal waveforms supplied by inverters. The three-dimensional nature of these phenomena and the complexity of the reaction field representation in the overall modeling of electric motors are the main targets of this analysis. Following a literature survey in this field, a modeling methodology has been developed, aiming to reduce the required computational means by creating equivalent mechanisms enabling accurate representation of the involved phenomena.

In an initial modeling stage, adequate characteristic curves describing the properties of both hard and soft magnetic materials have been recorded experimentally. The description and configuration of appropriate C-Core magnetic circuits constitute a key contribution in the experimental investigation of permanent magnet losses caused by higher harmonic components of the magnetic field in electrical machines. Additionally, the effects on losses by suitable microlayer shields placed on magnets' surface, containing iron-magnetic, conductive, and/or high-permeable materials have been investigated. Detailed experimental results enabled further precision improvements and restructuring of the aforementioned modeling procedures in order to accurately represent the physical mechanisms governing the phenomena under study. Experimental validation of the developed numerical and analytical methodologies accuracy is performed through appropriate laboratory measurements on small scale magnetic circuits with configurations similar to respective high power electric machines, such as in a prototype linear motor case.

In a next step, appropriate coupling between different multiphysics phenomena (electromagnetic, thermal, mechanical) has been considered by using adequate techniques based on finite element method while the importance of their interdependence in electric machines involving permanent magnets is analyzed in detail, in particular examining their behavior under high-speed operating conditions. The variations and modeling of the behavior of magnetic materials when subjected to mechanical and thermal stresses constitute an important target of this analysis. The methodologies proposed offer sufficient accuracy, while they necessitate reduced additional computational requirements.

In conclusion, this doctoral dissertation focuses on the investigation of the properties and characteristics of permanent magnets, including the impact of temperature variations and mechanical stresses, as well as on the development of algorithms for their analysis and modeling in the frame of optimizing the geometry of the corresponding electric machines. The proposed methodologies are validated experimentally on prototype magnetic circuits by using appropriate measurement arrangements. Finally, the overall impact assessment of the involved phenomena and the developed advanced methodologies enabling detailed analysis are presented, along with the possibilities of their utilization in high efficiency electric machines design, within the framework of transportation electrification initiative.

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

Στην Οικογένειά μου...

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με σεβασμό και ευγνωμοσύνη θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους αμέριστα βοήθησαν για την εξέλιξη και την εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω ευχαριστίες σε όλους του καθηγητές και επιστημονικούς συνεργάτες του ΕΜΠ οι οποίοι σταδιακά με οδήγησαν στην απόκτηση και κατάρτιση της εξειδικευμένης γνώσης των ηλεκτρικών μηχανών καθ' όλη τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών.

Πρωτίστως, ευχαριστώ θερμά, τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την αδιάλειπτη και ακούραστη καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής. Θα ήθελα ακόμη να τον ευχαριστήσω για τις ακαδημαϊκές γνώσεις που με ιδιαίτερο ζήλο μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας τόσο στα προπτυχιακά χρόνια όσο και στην μετέπειτα πορεία του διδακτορικού. Επιπλέον, ευχαριστίες εκφράζω στα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής κ. Σταύρο Παπαθανασίου και κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο που με προθυμία και ενδιαφέρον βοήθησαν στην διεύρυνση της επιστημονικής μου γνώσης.

Ευχαριστώ, για την συμμετοχή τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή τον καθηγητή κ. Ιωάννη Γκόνο που υπήρξε παράλληλα και αρωγός στην δράση της ομάδας «Προμηθέας» και τον καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου ο οποίος συνέβαλε έμπρακτα στην προσπάθεια της παρούσης διατριβής. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους καθηγητές ΕΜΠ κ. Γεώργιο Κορρέ και Ιωάννη Προυσαλίδη, καθώς και στον καθηγητή ΑΠΘ Χρήστο Μαδεμλή για τη συμμετοχή τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες είναι απαραίτητο να εκφράσω σε όλη την ελληνική ομάδα της Tesla και ξέχωρα στους φίλους, συνεργάτες κ. Αντώνης Χανιώτης, κ. Μίνως Μπενιακάρ, κ. Χάρης Βασιλόπουλος, κ. Παναγιώτης Πουραΐμης, των οποίων οι συζητήσεις σε θέματα ηλεκτρικών μηχανών αποτέλεσαν φάρο γνώσης για πλείστα πεδία καινοτομίας έρευνας στο συγκεκριμένο πεδίο. Παράλληλα οι συμβουλές τους υπήρξαν πολύτιμες και άκρως απαραίτητες για την εξέλιξη της διατριβής. Επίσης, θερμά ευχαριστώ τους κ. Ιάκωβο Μανωλά και κ. Κωνσταντίνο Μπούρχα για την έμπρακτη συνεισφορά τους στην διεκπεραίωση της διατριβής.

Θερμά θέλω να ευχαριστήσω και τα μέλη του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών κ. Παναγιώτη Ροβολή, κ. Κώστα Τάτη, κ. Θέμη Κεφάλα, κα. Μαρίνα Τσίλη για την συνεργασία τους τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και στην διδακτική διαδικασία της σχολής. Ιδιαίτέρως ευχαριστώ τον κ. Παναγιώτη Ζάννη για την ουσιαστική βοήθεια του σε όλα τα κατασκευαστικά ζητήματα και την αξιοθαύμαστη υπομονή του.

Επιπλέον, ευχαριστίες εκφέρω στους συναδέλφους διδάκτορες κα. Μαρία – Σοφία Πεχλιβανίδου, κ. Βασίλειο Βλάχου, κ. Αντώνιο Σιδέρη και κ. Ιωάννη Αλωνιστιώτη για την εξαίρετη συνεργασία μας. Στους κ. Κωνσταντίνο Μάνο και κα. Κωνσταντίνα Καραϊνδρου εκφράζω τις ευχαριστίες μου για την συμβολή τους σε τεχνικά θέματα μετατροπών ισχύος.

Ακόμη, ευχαριστώ τους Διπλωματούχους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς ΕΜΠ κ. Δημήτριο Γκίτσο, κ. Ιωάννης Γιαννόπουλος, κ. Φώτης – Παναγιώτης Ξηνταρόπουλος, κ. Σαββάς Μαϊόπουλος, κ. Δημήτριος Δελδήμος, κ. Παναγιώτης Σιαλάκας, κ. Χριστόφορος Ποιητάρης, για τη συνεργασία μας στα πλαίσια εκπόνησης των διπλωματικών τους εργασιών.

Για όλες τις ευχάριστες στιγμές γεμάτες χαρά, αγωνία και προσπάθεια, ευχαριστώ τον καθένα χωριστά όλα τα μέλη της ομάδας «Προμηθέας». Οι πολυποίκιλες ιδέες νέων επιστημόνων διαφορετικών πεδίων αποτέλεσε μια ξεχωριστή για μένα εμπειρία.

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

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου οι οποίοι στάθηκαν πολύτιμοι αρωγοί καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, δίνοντας μου την ακούραστη ηθική συμπαράσταση που ήταν καθοριστικής σημασίας στην μακρά αυτή πορεία. Βαθύτατα θέλω να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Δημήτριο Σακκά ο οποίος στάθηκε δίπλα μου πάντα, υποστηρικτικός, ακούραστος γεμάτος κατανόηση κάνοντας πολλές προσωπικές θυσίες.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	11
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1 Τα Σύγχρονα Προβλήματα Ηλ. Μηχανών Ηλεκτροκίνησης.....	19
1.2 Αντικείμενο και Ερευνητικοί Στόχοι.....	20
1.3 Δομή Εργασίας.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	25
2.1 Εξισώσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων.....	25
2.2 Αριθμητική Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	26
2.3 Ανάλυση Συγκεντρωμένων Παραμέτρων	27
2.4 Αριθμητικοί Μέθοδοι Υπολογισμού Φαινομένων Μονίμων Μαγνητών	27
2.5 Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση Σχεδίαση και Μοντελοποίηση	29
2.5.1 Θεωρία Προκαταρκτικής Σχεδίασης	29
2.5.2 Αναλυτικές Μέθοδοι Σχεδίασης.....	30
2.5.3 Ηλεκτρική, Μαγνητική, Μηχανική Φόρτιση	30
2.5.4 Δυναμικά Μοντέλα Συγκεντρωμένων Παραμέτρων ΣΜΜΜ.....	34
2.6 Μελέτη Σφαλμάτων Ηλ. Μηχανών	36
2.7 Ανάλυση Μηχανικών Φαινομένων	40
2.8 Ανάλυση Θερμικών Φαινομένων	42
2.9 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	53
3.1 Μόνιμοι Μαγνήτες	53
3.1.1 Μόνιμοι μαγνήτες Σαμάριου-Κοβάλτιου (SmCo)	54
3.1.2 Θερμοκρασιακή Μεταβολή Μαγνήτισης Μονίμων Μαγνητών	54
3.1.3 Θερμικά Μοντέλα Μονίμων Μαγνητών	56
3.1.4 Απομαγνήτιση: Προσανατολισμός του Μαγνήτη και της Γωνίας Εξωτερικού Πεδίου	61
3.1.5 Τεχνολογική Εξέλιξη Υλικών Μονίμων Μαγνητών	62
3.1.6 Προηγμένα Υλικά Μονίμων Μαγνητών NdFeB και SmCo.....	64
3.1.7 Δεσμευμένοι Μαγνήτες (Bonded PM)	65
3.1.8 Μαγνήτες Υψηλής Μαγνήτισης που Δεν Είναι Εμπορικά Διαθέσιμοι	66
3.2 Μαλακά Σιδηρομαγνητικά Υλικά	67
3.2.1 Ιδιότητες και Μακροσκοπική Συμπεριφορά	67
3.2.2 Μηχανισμοί Απωλειών και Μοντελοποίηση.....	69
3.2.3 Επίπτωση DC Bias Πεδίου στις Απώλειες	70
3.2.4 Κατασκευαστικές Καταπονήσεις	73
3.2.5 Μηχανική Καταπόνηση Ηλεκτρικού Χάλυβα.....	77
3.2.6 Μεθοδολογία Μέτρησης των Χαρακτηριστικών Καμπυλών	80
3.2.7 Προοπτικές στα Μαγνητικά Υλικά Ηλεκτροκίνησης	81
3.3 Αγωγή Υλικά Ηλ. Μηχανών	83
3.3.1 Επιδερμικό Φαινόμενο και Φαινόμενο Γειτνίασης	84

3.3.2	Είδη Τυλιγμάτων Ηλεκτρικών Μηχανών.....	86
3.3.3	Μοντελοποίηση Απωλειών Τυλίγματος.....	91
3.4	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ: ΕΞΑΛΕΙΨΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....		99
4.1	Περίληψη Κεφαλαίου.....	99
4.2	Εισαγωγή Κεφαλαίου.....	99
4.3	Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικής Μηχανής.....	100
4.4	Ψηφιακό Δίδυμο με Βάση τα Πεπερασμένα Στοιχεία.....	101
4.5	Συγκεντρωμένες Παράμετροι του Δυναμικού Μοντέλου.....	102
4.6	Βέλτιστη Οδήγηση Μηχανής από Αντιστροφή.....	106
4.7	Αποτελέσματα Κεφαλαίου.....	110
4.8	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	112
4.9	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου.....	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ.....		113
5.1	Μέθοδοι Ανάλυσης Απομαγνήτισης Μαγνητικών Υλικών.....	113
5.2	Μοντελοποίηση Καμπυλών Επαναφοράς Μαγνήτισης.....	118
5.3	Εφαρμογή Αλγορίθμων Απομαγνήτισης σε Ηλεκτρική Μηχανή.....	120
5.4	Πρακτική Εφαρμογή Αλγορίθμων Απομαγνήτισης.....	121
5.5	Επιλογή υλικών.....	122
5.5.1	Μηχανή με Μαγνήτες ND52.....	122
5.5.2	Μηχανή με Μαγνήτες ND50H.....	124
5.5.3	Μηχανή με Μαγνήτες ND42UH.....	126
5.5.4	Μηχανή με Συνδυασμό Μαγνητών: ND42UH (S&V-TYPE), ND50H (I-TYPE).....	127
5.6	Βελτιστοποίηση Τοπολογίας Δρομέα.....	129
5.6.1	Επιδόσεις και Χαρακτηριστικά Λειτουργίας.....	131
5.6.2	Εκτίμηση της Απομαγνήτισης.....	132
5.7	Βελτιστοποίηση Μείωσης Όγκου Μαγνητικού Υλικού.....	133
5.7.1	Επιδόσεις και Χαρακτηριστικά Λειτουργίας.....	134
5.7.2	Εκτίμηση της Απομαγνήτισης.....	135
5.8	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	137
5.9	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου.....	137
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ.....		139
6.1	Εισαγωγή Κεφαλαίου:.....	139
6.2	Πειραματική Διάταξη C-Core.....	140
6.3	Απώλειες Πυρήνα C- Core.....	140
6.4	Απώλειες Μαγνήτη.....	143
6.5	Προσομοίωση 3D.....	143
6.6	Απώλειες MM σε Συνθήκες Ομοιόμορφης Κατανομής Πεδίου.....	145
6.7	2D Μοντελοποίηση με Εξωτερικά Κυκλώματα.....	145
6.8	Εκτίμηση Συγκεντρωμένων Παραμέτρων στις Περιοχές Άκρων Τυλίγματος....	146

6.9	Δημιουργία 2D ΠΣ με Ολόκληρωτικοδιαφορικές Εξισώσεις.....	148
6.10	Συγκριτική Μελέτη Μεταξύ Πειράματος και – 3D ΠΣ.....	149
6.11	Απώλειες MM σε Μη Ομοιόμορφη Κατανομή Πεδίου	151
6.12	Μεθοδολογία Εικονικής Τμηματοποίησης Μαγνήτη.....	152
6.13	Σύζευξη 2D ΠΣ με Εξωτερικά Κυκλώματα Τερματικών Περιοχών.....	152
6.14	Συνδετικότητα των Εξωτερικών Κυκλωμάτων των Ακραίων Περιοχών.....	153
6.15	Επαλήθευση της Μεθόδου με Πρότυπο C-Core	153
6.16	Μεθοδολογία Ανάλυσης 2D ΠΣ.....	154
6.17	Μέτρηση Χαρακτηριστικών Μαγνητικού Κυκλώματος	155
6.18	Σύγκριση 2D ΠΣ με 3D ΠΣ.....	156
6.19	Μέτρηση Απωλειών MM για Διαφορές Διαμόρφωσης της Διάταξης	157
6.20	Σύγκριση Μετρούμενων και Προσομοιωμένων Απωλειών	158
6.21	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	162
6.22	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	162
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ.....		165
7.1	Εισαγωγή Κεφαλαίου	165
7.2	Υπολογισμός απωλειών πυρήνα.....	166
7.2.1	Απώλειες πυρήνα χωρίς προϋπάρχον πεδίο πόλωσης	166
7.2.2	Απώλειες πυρήνα με προϋπάρχον πεδίο πόλωσης	169
7.3	Μέτρηση Απωλειών σε Μαγνητικό Κύκλωμα C-Core	172
7.4	Διαδικασία διαχωρισμού απώλειας	172
7.5	Μείωση Απωλειών Μόνιμου Μαγνήτη μέσω Θωράκισης.....	173
7.6	Εξέταση κινδύνου απομαγνητισμού μόνιμου μαγνήτη	177
7.7	Παρατηρήσεις για τις Απώλειες Μόνιμου Μαγνήτη.....	178
7.8	Επικύρωση μέσω 3D ΜΠΣ	178
7.9	Μοντελοποίηση απώλειας σιδήρου	179
7.10	Σύζευξη Μοντέλου 2D FEA με Εξισώσεις Κυκλώματος.....	180
7.11	Πειραματική Επιβεβαίωση	181
7.12	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	182
7.13	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	183
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....		185
8.1	Πειραματική Διάταξη	185
8.2	Μέτρηση Ροής και Δύναμης.....	186
8.3	Μέτρηση Απωλειών Μαγνητών	189
8.4	Διαχωρισμός Απωλειών Με Ανάλυση Συχνότητας	189
8.5	Σύγκριση μετρούμενων και προσομοιωμένων απωλειών	189

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΗΧΑΝΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	193
9.1 Περίληψη Κεφαλαίου.....	193
9.2 Εισαγωγή Κεφαλαίου	193
9.3 Ανάλυση 2D Πεπερασμένων Στοιχείων.....	195
9.3.1 Γεωμετρία και Δημιουργία Πλέγματος	196
9.3.2 Στατική Μηχανική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων	198
9.3.3 Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων	200
9.4 Μηχανική Βελτιστοποίηση	201
9.5 Επίδραση Μηχανικών Τάσεων στον Ηλεκτρικό Χάλυβα	203
9.6 Επίδραση Μηχανικής Τάσης και Παραμόρφωσης.....	207
9.6.1 Επίδραση Μηχανικών Φαινομένων στην Διαπερατότητα.....	208
9.6.2 Αρμονικές πυκνότητας ροής στο διάκενο αέρα	210
9.7 Πειραματική Επιβεβαίωση	212
9.8 Αποτελέσματα Κεφαλαίου	214
9.9 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	217
9.10 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	217
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ	221
10.1 Περίληψη Κεφαλαίου.....	221
10.2 Εισαγωγή Κεφαλαίου	221
10.3 Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση	223
10.4 Φυσικό Ηλεκτρομαγνητικό Μοντέλο του Κινητήρα.....	223
10.5 Οδήγηση από Αντιστροφέα με FOC	225
10.6 Στατική Μηχανική Ανάλυση υπό Φυγόκεντρες Δυνάμεις	226
10.7 Εφαρμογή Μηχανικού Συστήματος Μετάδοσης.....	227
10.8 Επιπτώσεις της Μέγιστης Ταχύτητας στην Ικανότητα Ισχύος.....	229
10.9 Ανάλυση Θερμικής Συμπεριφοράς.....	230
10.10 Θερμικοί Περιορισμοί στην Επίδοση	231
10.11 Επίδραση Στρατηγικών Ψύξης στην Ικανότητα Ισχύος.....	232
10.12 Αποτελέσματα Κεφαλαίου	233
10.13 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	233
10.14 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	234
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΗΜΕΙΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ,.....	235
11.1 Κύρια Συμπεράσματα.....	235
11.1.1 Δημιουργία Ψηφιακού Δίδυμου Ηλεκτρικών Μηχανών.....	235
11.1.2 Απομαγνήτιση Μονίμων Μαγνητών.....	236
11.1.3 Αρμονικές Απώλειες Μονίμων Μαγνητών.....	236
11.1.4 Τεχνικές Θωράκισης Μονίμων Μαγνητών	237
11.1.5 Μηχανές Υψηλής Ταχύτητας.....	237
11.1.6 Δυνατότητες Επαύξησης της Πυκνότητας Ισχύος με Ανάλυση Multi-Physics	238
11.2 Συνεισφορά στην Επιστήμη	238

11.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση	239
ΛΕΞΙΚΟ - ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ.....	241
ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ.....	245
Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά μετά από κρίση	245
Δημοσιεύσεις σε πρακτικά επιστημονικών συνεδρίων μετά από κρίση	245
Πατέντες	245
ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	247
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	249
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	257

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τα Σύγχρονα Προβλήματα Ηλ. Μηχανών Ηλεκτροκίνησης

Οι στόχοι των ανθρώπων για βελτίωση της ποιότητας της ζωής τους δίνουν συνεχώς νόημα και έναυσμα σε προσπάθειες νέων ανακαλύψεων ή/και βελτιστοποίησης των ήδη υπαρχόντων μεθόδων και διαδικασιών. Η σημερινή πραγματικότητα της ηλεκτροκίνησης, είναι και αυτή αποτέλεσμα των στόχων αυτών. Με σχετική ευκολία έχει υπάρξει εδραίωση των απαιτήσεων του καταναλωτή – πολίτη στην άνεση, στις επιδόσεις, στην οικονομία, στην ευχρηστία που τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν. Σε πλήρη αντιστοιχία με την ηλεκτροκίνηση βρίσκονται και οι διαρκώς πρωτοεμφανιζόμενες νέες καταναλωτικές εφαρμογές (Robotics, UAV...) οι οποίες δημιουργούν και αυτές επιπρόσθετη ανάγκη για εξέλιξη των συστημάτων κίνησης. Στη διαρκή αυτή προσπάθεια εξέλιξης των διαδικασιών σχεδίασης και κατασκευής των ηλεκτρικών μηχανών, τοποθετείται και η παρούσα διδακτορική διατριβή.

Οι ολοένα, μεγαλύτερες απαιτήσεις για αύξηση της πυκνότητας ισχύος και της απόδοσης με παράλληλη μείωση του βάρους και του κόστους κατασκευής, οδηγούν σε σχεδιαστικές και κατασκευαστικές προκλήσεις, όσον αφορά τον τομέα των ηλεκτρικών μηχανών. Η παράλληλη πρόοδος σε τομείς, όπως τα ηλεκτρονικά ισχύος, οι μικροϋπολογιστές, τα νέα συνθετικά υλικά, οι προηγμένοι αλγόριθμοι, τα μεγάλα υπολογιστικής ισχύος κέντρα (data centers) δημιουργούν πρόσφορο έδαφος εξέλιξης των ηλεκτρικών συστημάτων κίνησης, σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον με ραγδαία ανάπτυξη.

Ο κάθε τομέας ξεχωριστά, συνεισφέρει με τον τρόπο του στην διαδικασία κατασκευής ηλεκτρικών κινητήρων. Η αρχική σχεδίαση στην σημερινή πραγματικότητα γίνεται με αποδοτικούς αλγορίθμους σε υψηλής υπολογιστικής ισχύος υπολογιστικά συστήματα. Στόχος των αλγορίθμων αυτών είναι η αποδοτική περιγραφή της συμπεριφοράς των ηλεκτρικών κινητήρων σε όλο το φάσμα της λειτουργίας τους ακόμη και σε καταστάσεις σφάλματος. Σημαντικός ωστόσο είναι και ο τρόπος αλληλεπίδρασης του ηλεκτρικού κινητήρα με τα υπόλοιπα μέρη και υποσυστήματα του οχήματος.

Οι εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος δίνουν χώρο μεγαλύτερης και αποδοτικότερης οδήγησης στις ηλεκτρικές μηχανές. Ο πλέον εύρωστος έλεγχος θέσης του δρομέα, η κατάλληλη οδήγηση με στόχο την διαρκή βέλτιστη λειτουργία του συστήματος, προσφέρουν μεγάλο προβάδισμα στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτροκίνησης. Η ταχύτατη απόκριση των ηλεκτρονικών ισχύος σε σφάλματα, δίνει το περιθώριο στην χρήση χαμηλότερου κόστους μονίμων μαγνητών (χαμηλής αντοχής στην απομαγνήτιση), μειώνοντας το κόστος κατασκευής του συστήματος. Η ανάλυση αυτού του είδους των μηχανών με γνώμονα την εξάντληση του κόστους των σπανίων γαιών είναι σύνθετη, ενώ ελλοχεύει κινδύνους μείωσης της ποιότητας κατασκευής, και δημιουργεί πρόκληση στην εύρεση κατάλληλων μεθόδων περιγραφής των φυσικών φαινομένων. Μια ακόμη πτυχή των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η αυξημένη ικανότητα υψηλής διακοπτικής συχνότητας με στόχο την περαιτέρω μείωση των απωλειών του συστήματος. Η συγκομιδή – εκμετάλλευση της δυνατότητας αυτής, δεν μπορεί να γίνει με εύκολο τρόπο στις ηλεκτρικές μηχανές καθώς υπάρχει η απαίτηση κατάλληλου σχεδιασμού τόσο στην επιλογή των υλικών όσο και στην κατάλληλη σχεδίαση της γεωμετρίας της. Επιπρόσθετα η φυσική μοντελοποίηση των φαινομένων στο πλέον υπαρκτό εύρος συχνοτήτων του αντιστροφέα, απαιτεί σύνθετες θεωρήσεις που συχνά αποτυγχάνουν.

Η ανάπτυξη συνθετικών υλικών (composites) δίνει χώρο στην σχεδίαση λεπτού μανδύα επικάλυψης του δρομέα, επιτρέποντας τον να λειτουργεί με ασφάλεια σε υψηλές ταχύτητες, δημιουργώντας παράλληλα χώρο για περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας ισχύος την οποία ο κινητήρας μπορεί να αποδώσει. Μια ακόμη εφαρμογή των συνθετικών υλικών είναι η σύνθεση κατάλληλων ελαίων ψύξης τα οποία καταφέρνουν την κατάλληλη διαχείριση των θερμικών

απωλειών, επιτρέποντας την κάποτε λειτουργία υπερφόρτισης να θεωρείται πια κανονική λειτουργία μόνιμης κατάστασης. Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των υλικών αυτών, η κατάλληλη τοποθέτηση και δημιουργία εύρωστου συστήματος για την αποδοτική αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρονται, αποτελεί αντικείμενο μελέτης και έρευνας της κατασκευής ηλεκτρικών μηχανών.

Οι παραπάνω προκλήσεις με στόχο την προσπάθεια δημιουργίας βέλτιστων ηλεκτρικών μηχανών αντιμετωπίζουν προβλήματα οποίων η λύση μπορεί να οδηγήσει σε νέους ορίζοντες στον τομέα της κατασκευής ηλεκτρικών μηχανών.

Ουσιαστικά προβλήματα στην μοντελοποίηση των απωλειών των μονίμων μαγνητών είναι η κατάλληλη διεξαγωγή – κατάστρωση πειράματος με στόχο τον υπολογισμό των απωλειών μονίμων μαγνητών όταν υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικές, μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις. Οι μόνιμοι μαγνήτες υψηλής μαγνητικής επαγωγής είναι ένα αγωγίμο μέσω, στο οποίο η μεταβολή του πεδίου στο εσωτερικό τους αναπτύσσει δινορεύματα και συνεπώς απώλειες. Επιπρόσθετα η σκληρή μαγνητική συμπεριφορά τους δημιουργεί ακόμη πιο σύνθετες απώλειες αντίστοιχες των απωλειών υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών. Η εξαγωγή των χαρακτηριστικών απωλειών στους μαγνήτες, όταν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις πεδίου στο εσωτερικό τους δεν αποτελεί ένα εύκολο πρόβλημα. Για την παραγωγή ισχυρού εναλλασσόμενου πεδίου, απαιτείται διάταξη με υψηλό μαγνητικό κορεσμό της οποίας οι απώλειες οφείλουν να μπορούν να χαρακτηριστούν και να απομονωθούν με σιγουριά. Ωστόσο, η φύση των φαινομένων στην πρόβλεψη των απωλειών σιδήρου για εναλλασσόμενο πεδίο σε προ υπάρχουσα μαγνητική φόρτιση δημιουργεί επιπλέον πολυπλοκότητα. Η τροποποίηση της συμπεριφοράς του σιδήρου και του μαγνήτη με βάση τη θερμοκρασία και τις μηχανικές πιέσεις είναι ακόμη ένα σύνθετο πρόβλημα στο οποίο δεν υπάρχουν εδραιωμένες δοκιμές χαρακτηρισμού.

Προκλήσεις ακόμη υπάρχουν όσον αφορά την συμπεριφορά των απωλειών ενός ορθογωνικού μαγνήτη στην περίπτωση ενός στρεφόμενου πεδίου στο εσωτερικό του. Η περιγραφή και η μέτρηση των στρεφόμενων δινορευμάτων στο εσωτερικό του μαγνήτη αποτελούν σύνθετες διαδικασίες ενώ πραγματική είναι η ύπαρξη των φαινομένων αυτών στο εσωτερικό της μηχανής.

Στον τομέα των απωλειών των μονίμων μαγνητών σημαντική θεωρείται η μοντελοποίηση των φαινομένων με τρόπο ορθό, γρήγορο και αποδοτικό, χωρίς την χρήση πολύπλοκων αριθμητικών μεθόδων. Σε αντιστοιχία με το πρόβλημα των απωλειών των μονίμων μαγνητών βρίσκεται και η μοντελοποίηση των απωλειών των συνθετικών υλικών όπως των ανθρακονημάτων όταν αυτά χρησιμοποιούνται στην περιτύλιξη του δρομέα.

Ακόμη, ο ακριβής υπολογισμός του πάχους των ανθρακονημάτων που απαιτείται και η μηχανική καταπόνηση του σιδήρου στις μηχανές υψηλών στροφών είναι ένα ακόμη πρόβλημα που βρίσκεται υπό συνεχή μελέτη. Η αλλαγή των μαγνητικών ιδιοτήτων του σιδήρου με βάση την μηχανική φόρτιση σε συνδυασμό με την μεταβολή της γεωμετρίας του μαγνητικού κυκλώματος λόγω μηχανικής παραμορφώσεις οδηγεί σε τροποποίηση της επίδοσης και της απόδοσης της ηλεκτρικής μηχανής.

Τέλος, ο συνδυασμός μοντελοποίησης σε πολλαπλά φυσικά στρώματα (ηλεκτρικό μηχανικό και θερμικό) οδηγεί μέσω διαδικασιών αποδοτικής βελτιστοποίησης στην σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών με αυξημένη πυκνότητα ισχύος, διευρυμένο προσδόκιμο ζωής και ταυτόχρονα αντοχή σε σφάλματα.

1.2 Αντικείμενο και Ερευνητικοί Στόχοι

Αντικείμενο της διατριβής είναι η βελτίωση της μεθοδολογίας σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης έτσι ώστε να προβλέπονται τα χαρακτηριστικά των απωλειών των μονίμων μαγνητών με μεγαλύτερη ακρίβεια με βάση κατάλληλης μοντελοποίησης σε διαφορετικά φυσικά επίπεδα και φαινόμενα (θερμικά και

μηχανικά) με στόχο την ανάδειξη των αυτών επιπτώσεων, στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μηχανών υψηλών ταχυτήτων.

Αρχικά, στην παρούσα διατριβή επιχειρείται βιβλιογραφική διερεύνηση των νέων τάσεων των ηλεκτρικών μηχανών στον τομέα της ηλεκτροκίνησης. Στην συνέχεια ακολουθεί η βασική θεωρία των φαινομένων που διέπουν την λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών. Απαραίτητη είναι ακόμη και η ενδελεχής πρωθύστερη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Επιπλέον, ωφέλιμη κρίνεται η επισκόπηση μεθοδολογιών σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων μόνιμων μαγνητών, τόσο με αναλυτικούς τύπους όσο και με τη μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό τη στόχευση του θεωρητικού αντικειμένου στην πρακτική εφαρμογή των κινητήρων.

Σημαντικές συνιστώσες στην σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών είναι η επίπτωση της μεταβολής μαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών στις ηλεκτρικές μηχανές από σφάλματα. Παράλληλα μελετάται και η μοντελοποίηση και η μέτρηση των ιδιοτήτων των υλικών και των τεχνικών υπολογισμού απωλειών δινορευμάτων. Πιο συγκεκριμένα διερευνώνται και αξιολογούνται οι υφιστάμενες μεθοδολογίες και προτείνονται βελτιωμένες εκδοχές τους όσον αφορά την περιγραφή των απωλειών των μόνιμων μαγνητών που οφείλονται στη διακοπτική συχνότητα από την οδήγηση μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος. Ακολουθεί, η εφαρμογή της δυνατότητας θωράκισής των απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες με κατάλληλες επιστρώσεις ηλεκτρικών ή και μαγνητικών υλικών. Σε κάθε περίπτωση θωράκισης αναλύονται σε βάθος τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Σημαντική ακόμη είναι η μελέτη της μεταβολής των χαρακτηριστικών των μηχανών μόνιμων μαγνητών από την παραμόρφωση των μαγνητικών υλικών σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Η ανάγκη μείωσης της ροής σκέδασης των μαγνητών προκαλεί στην βελτιστοποιημένη μηχανή αισθητές μηχανικές ελαστικές παραμορφώσεις διακένου, μεταβάλλοντας την επίδοση της μηχανής.

Εξίσου σημαντική είναι η πειραματική επιβεβαίωση των προσομοιωμένων χαρακτηριστικών μέσω ιδιοκατασκευασμένων δοκιμών, πρότυπων κινητήρων ή διατάξεων μέτρησης C- Core , που επιτρέπουν την ανάδειξη της ακρίβειας των προτεινομένων τεχνικών υπολογισμού των απωλειών.

Τέλος, ο η αποδοτική μοντελοποίηση των ηλεκτρικών, μηχανικών και θερμικών φαινομένων οδηγεί μέσω διαδικασιών αλγοριθμικής βελτιστοποίησης την σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών με αυξημένη πυκνότητα ισχύος, διευρυμένο προσδόκιμο ζωής και ταυτόχρονα αντοχή σε σφάλματα.

Οι βασικοί στόχοι της διατριβής και οι αντίστοιχες φάσεις της ερευνητικής δραστηριότητας με βάση τα κίνητρα που αναφέρθηκαν είναι οι εξής:

- 1) Βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθοδολογιών σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων μόνιμων μαγνητών, η ενδελεχής πρωθύστερη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρικούς κινητήρες και των τεχνικών υπολογισμού απωλειών στους μόνιμους μαγνήτες.
- 2) Ανάπτυξη αλγορίθμων υπολογισμού απομαγνήτισης και μελέτη της επίπτωσης της μεταβολής μαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών στις ηλεκτρικές μηχανές από σφάλματα με στόχευση τη σχεδίαση εύρωστης μηχανής.
- 3) Μοντελοποίηση και μέτρηση των ιδιοτήτων των υλικών και των τεχνικών υπολογισμού απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες.
- 4) Εφαρμογή της δυνατότητας θωράκισής των απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες με κατάλληλες επιστρώσεις ηλεκτρικών ή και μαγνητικών υλικών
- 5) Μελέτη της μεταβολής των χαρακτηριστικών των μηχανών μόνιμων μαγνητών από την παραμόρφωση των μαγνητικών υλικών σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας
- 6) Πειραματική επιβεβαίωση των προσομοιωμένων χαρακτηριστικών μέσω ιδιοκατασκευασμένων δοκιμών, πρότυπων κινητήρων ή διατάξεων μέτρησης C- Core , που επιτρέπουν την ανάδειξη της ακρίβειας των προτεινομένων τεχνικών υπολογισμού των απωλειών

- 7) Κατάλληλη μοντελοποίηση ηλεκτρικών, μηχανικών και θερμικών φαινομένων η οποία οδηγεί μέσω διαδικασιών αλγοριθμικής βελτιστοποίησης στη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών με αυξημένη πυκνότητα ισχύος.

1.3 Δομή Εργασίας

Η διατριβή πραγματεύεται, όπως γίνεται έκδηλο και από τον τίτλο, συμβολή στην θεώρηση των απωλειών στις ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Το κείμενο της διατριβής περιλαμβάνει συνολικά δεκατρία (13) κεφάλαια στα οποία προσεγγίζονται και οι επιμέρους στόχοι.

Αρχικά, το **πρώτο κεφάλαιο** αποτελεί την εισαγωγή της διατριβής όπου περιγράφεται το πρόβλημα προς επίλυση, παρατίθενται τα ερευνητικά κίνητρα και θέτονται οι βασικοί στόχοι έρευνας και μελέτης.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφονται οι εξισώσεις των φυσικών φαινομένων που έχουν παρουσία στις ηλεκτρικές μηχανές μαζί με την κλασική μεθοδολογία σχεδίασης. Σχολιάζονται ακόμη οι αριθμητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση των φαινομένων. Στην συνέχεια δίνεται μια πιο ολοκληρωμένη αποτύπωση του σχεδιαστικού προβλήματος περιγράφοντας την ηλεκτρομαγνητική, την μηχανολογική- μηχανική και την θερμική πρόκληση που οι ηλεκτρικές μηχανές οχημάτων έχουν να αντιμετωπίσουν. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού αναγράφεται η τοποθέτηση της διατριβής στο προαναφερθέν περιβάλλον.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η εις βάθος βιβλιογραφική ανασκόπηση των υλικών κατασκευής ηλεκτρικών μηχανών. Πιο συγκεκριμένα αποδίδεται η φαινομενολογία των σκληρών και μαλακών μαγνητικών υλικών καθώς και των αγωγικών υλικών μέσα από ερευνητικά άρθρα καταδεικνύοντας την περιοχή τοποθέτησης της διατριβής και παρέχει την απαραίτητη πρωθύστερη γνώση στον αναγνώστη. Παράλληλα, παρουσιάζεται ο ρόλος που τα υλικά αυτά έχουν σε ειδικές εφαρμογές και σε νέες τάσεις ηλεκτρικών κινητήρων. Στο κεφαλαίο αυτό ακόμη εμπεριέχονται οι επιπλοκές που ορισμένες ιδιότητες των υλικών αυτών προκαλούν στην σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** προτείνεται μια αποτελεσματική μεθοδολογία για την σύσταση ψηφιακού διδύμου μιας σύγχρονης μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών επιτρέποντας την εξάλειψη των αρμονικών ρευμάτων εξαιτίας οδήγησης PWM του αντιστροφέα. Η μεθοδολογία είναι βασισμένη στην ανάλυση πολλών λειτουργικών σημείων του κινητήρα με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων με στόχο τον καθορισμό κατάλληλων δυναμικών μεταβλητών συγκεντρωμένων παραμέτρων. Λαμβάνονται υπόψη τόσο οι αρμονικές χώρου όσο και η επίδραση της αντίδρασης οπλισμού στον τοπικό κορεσμό. Αυτή η τεχνική επιτυγχάνει σημαντική μείωση κυματώσεων της ροπής και μείωση των απωλειών. Η εισαχθείσα αυτή μέθοδος έχει επιβεβαιωθεί με μετρήσεις σε ένα κατασκευασμένο πρωτότυπο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** προτείνονται αποδοτικοί αλγόριθμοι υπολογισμού την απομαγνήτισης με βάση την συνάρτηση περιγραφής της καμπύλης επαναφοράς. Πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση μεταξύ των μεθόδων αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στη συνέχεια αναλύεται ως προς την αντοχή σε σφάλματα αντιστροφέα και φάσματα τριφασικού βραχυκυκλώματος μια πρότυπη μηχανή μονίμων μαγνητών που ο δρομέας της περιέχει τρεις διαφορετικές τοπολογίες τοποθέτησης των μαγνητών. Η μηχανή αυτή βελτιστοποιείται με βάση την ευρωστία, την επίδοση και την ποιότητα ισχύος που αυτή αποδίδει. Παράλληλα αναλύεται και το είδος της βαθμίδας (ποσόστωση σε Dy) των μονίμων μαγνητών, κάνοντας σαφές πως με κατάλληλη επιλογή είδους μαγνήτη και με γνώση της συμπεριφοράς στην απομαγνήτιση είναι εφικτή η επίτευξη μείωσης κόστους παραγωγής και αύξησης της αξιοπιστίας.

Στο **έκτο κεφάλαιο** προτείνεται ένα μοντέλο αποδοτικής θεώρησης απωλειών λόγω διακοπτικής συχνότητας σε δρομέα επιφανειακών μονίμων μαγνητών για περιπτώσεις τροφοδοσίας με παλμούς διακοπόμενου πλάτους. Το μοντέλο βασίζεται σε δισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμένο με εξισώσεις κυκλώματος-πεδίου σε περιοχές των

μονίμων μαγνητών. Η ανάλυση λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο των άκρων (end effect), το οποίο μοντελοποιείται συνυπολογίζοντας τη διακοπτική συχνότητα, η οποία με τη σειρά της είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο μέρος απωλειών δινορευμάτων στους μαγνήτες. Η εικονική τμηματοποίηση των μονίμων μαγνητών επιτρέπει την αποτελεσματική εξέταση των δινορευμάτων που ρέουν σε καλώς ορισμένες διαδρομές των ακραίων περιοχών του μαγνήτη, ακόμη και κάτω από ασύμμετρες συνθήκες μέσω κατάλληλης σύζευξης ισοδύναμων κυκλωμάτων. Η ακρίβεια του μοντέλου επικαιροποιείται μέσω πειραματικών μετρήσεων σε πρότυπο μαγνητικό κύκλωμα με σχήμα C με στόχο να απεικονιστεί η αποτελεσματικότητα της γενικευμένης μεθόδου. Τέλος, η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών απωλειών και των απωλειών που προβλέφθηκαν από το προτεινόμενο μοντέλο ανέδειξε την κυριαρχία των απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες λόγω της διακοπτικής συχνότητας.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** εισάγεται μεθοδολογία σχεδιασμού για κινητήρες ηλεκτροκίνησης μόνιμου μαγνήτη, επιτρέποντας συνδυασμό των τυπικών κριτηρίων απόδοσης και πυκνότητας ισχύος παράλληλα με την αποφυγή κινδύνων απομαγνητισμού σε περίπτωση σφαλμάτων. Παράλληλα μελετώνται διάφορες τεχνικές θωράκισης μονίμων μαγνητών από μεταβαλλόμενα πεδία που περιλαμβάνουν αγωγή και υψηλής διαπερατότητας φύλλα και επιστρώσεις και αξιολογούνται ως προς την αποτελεσματικότητά τους στη μείωση των τοπικών διακυμάνσεων του πεδίου και των αντίστοιχων απωλειών. Τα χαρακτηριστικά και οι τεχνικές του υλικού που εισήχθησαν έχουν επιβεβαιωθεί εκτενώς με μετρήσεις σε πρότυπο πλαίσιο Epstein και σε δείγματα σπειροειδούς πυρήνα καθώς και σε μαγνητικά κυκλώματα C-Core. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε επιτυγχάνει επαρκή μοντελοποίηση των απωλειών υψηλών συχνοτήτων.

Στο **όγδοο κεφάλαιο** περιγράφεται μέθοδος πειραματικής επαλήθευσης των προτεινομένων μεθοδολογιών των δύο προηγούμενων κεφαλαίων σε μια διαμόρφωση ιδιοκατασκευασμένου πρότυπου γραμμικού τριφασικού κινητήρα. Η πειραματική μέθοδος μέτρησης βασίζεται σε πηνία αναζήτησης τα οποία τοποθετούνται στις υποδοχές του στάτη σε συνδυασμό με τις κύριες περιελίξεις του στάτη και επιτρέπουν την άμεση μέτρηση της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου μέσω της επαγόμενης ΜΕΔ, αποφεύγοντας τη μέτρηση των απωλειών χαλκού.

Στο **ένατο κεφάλαιο** περιγράφεται μεθοδολογία, βασισμένη σε μια ασθενή σύζευξη των αλληλεξαρτώμενων μηχανικών και ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, επιτρέποντας την εξέταση της επίδρασης της παραμόρφωσης του δρομέα στα χαρακτηριστικά κινητήρα εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη σε περιοχές υψηλών ταχυτήτων χωρίς την ανάγκη μεγάλης υπολογιστικής ισχύος. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε διαδικασίες σχεδιασμού κινητήρων και να προσφέρει εξαιρετικές υπηρεσίες σε αυτήν την κατηγορία εφαρμογών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται και η πειραματική επιβεβαίωση της προαναφερθείσας μεθόδου επιδεικνύοντας καλή ταύτιση της κυματομορφής της ροής ακόμη και σε ευρύ φάσμα αρμονικών.

Στο **δέκατο κεφάλαιο** περιγράφεται μεθοδολογία σχεδίασης ηλεκτρικών συστημάτων κίνησης υψηλής πυκνότητας ισχύος μέσω αύξησης της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής και της ικανότητας ψύξης του ηλεκτρικού κινητήρα. Με αυτή τη στόχευση στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι επιμέρους συνιστώσες των μηχανικών φαινομένων καθώς και των θερμικών που οφείλουν να συνυπολογιστούν για την σωστή συνολική σχεδίαση. Η αύξηση της μέγιστης ταχύτητας οδηγεί σε επαύξηση της πυκνότητας ισχύος μόνο στην περίπτωση που οι μόνιμοι μαγνήτες ψύχονται επαρκώς. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν η ψύξη των μαγνητών δεν είναι επαρκής, η αύξηση της ταχύτητας μπορεί να οδηγήσει και σε μείωση της πυκνότητας ισχύος που ο κινητήρας αποδίδει. Συμπερασματικά λοιπόν, στο κεφάλαιο αυτό, αναδεικνύεται η αξία του ταυτόχρονου συνυπολογισμού των μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρομαγνητικών αναλύσεων στο σημερινό ανταγωνιστικό περιβάλλον της ηλεκτροκίνησης.

Τέλος, στο **ενδέκατο κεφάλαιο** συνοψίζονται οι μεθοδολογίες περιγραφής των φυσικών φαινομένων που αναπτύχθηκαν. Σχολιάζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα και το αντίκτυπο των μεθοδολογιών που παρουσιάστηκαν, στην επιστήμη της σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών. Διατυπώνονται τα σημεία προαγωγής της επιστήμης και συζητούνται οι προοπτικές των

εφαρμογών που αναπτύχθηκαν. Εν κατακλείδι προτείνονται και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

2.1 Εξισώσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων

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

Νόμος Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Νόμος Ampere:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

Νόμος Gauss για τον ηλεκτρισμό:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.4)$$

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

Νόμος Ampere:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.5)$$

Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.6)$$

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

Έτσι λαμβάνουμε την σχέση:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (2.7)$$

Στην συνέχεια για να γίνει μια απλοποίηση και ενοποίηση των σχέσεων (2.5) και (2.6) εισάγεται η έννοια του διανυσματικού δυναμικού $\mathbf{A}$.

Η εξίσωση (2.6) ικανοποιείται ταυτοτικά όταν το πεδίο $\mathbf{B}$ μπορεί να γραφεί σαν στροβιλισμός (rot ή $\nabla \times$) μιας διανυσματικής συνάρτησης $\mathbf{A}$ εξαιτίας της ταυτότητας $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$.

Έτσι το πεδίο $\mathbf{B}$ με το διανυσματικό δυναμικό συνδέεται ως:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.8)$$

Συνεπώς, το πρόβλημα μεταφέρεται στην ικανότητα εύρεσης μιας διανυσματικής συνάρτησης που ικανοποιεί την εξίσωση (2.5) όταν αντικαταστήσουμε το $\mathbf{H}$ πεδίο από τη σχέση (2.7) υποθέτοντας πως δεν υπάρχει μαγνήτιση 'Μ'.

Η σχέση 2.5 τροποποιείται ως εξής:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{B} \right) = \mathbf{J} \quad (2.9)$$

Και στη συνέχεια με χρήση της (2.9) και της ταυτότητας $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ προκύπτει:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) + \mu \mathbf{J} = 0 \quad (2.10)$$

Η υπόθεση πως η σχέση (2.10) ισχύει για κάθε διανυσματική συνάρτηση $\mathbf{A}$ δεν μας στερεί το δικαίωμα να βρούμε μόνο τις συναρτήσεις που έχουν απόκλιση (div ή $\nabla \cdot$) μηδενική σύμφωνα με το θεώρημα Helmholtz. Η επιλογή αυτή ονομάζεται συνθήκη Coulomb και η εφαρμογή της μας δίνει την εξίσωση του Poisson.

Συνθήκη Coulomb

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (2.11)$$

Εξίσωση Poisson

$$\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \times \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (2.12)$$

Υπολογίζοντας το διανυσματικό δυναμικό μπορεί κανείς εύκολα να εξάγει τα πεδία $\mathbf{B}$ και $\mathbf{H}$ από τις σχέσεις (2.8) και στη συνέχεια (2.7). Στην γενική περίπτωση το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από τρεις μεταβλητές ενώ η μαγνητική διαπερατότητα είναι μια δοσμένη συνάρτηση εξαρτώμενη από το υλικό με μεταβλητή το πεδίο $\mathbf{B}$. Η αναλυτική λύση της εξίσωσης Poisson είναι γενικά δύσκολη και εμπεριέχει πολλές φορές και υποθέσεις για την τιμή της διαπερατότητας 'μ'. Ωστόσο, η δημιουργία αλγορίθμου και η εφαρμογή της θεωρίας της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων μπορεί εύκολα να λειτουργήσει με μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματά της.

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

2.2 Αριθμητική Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

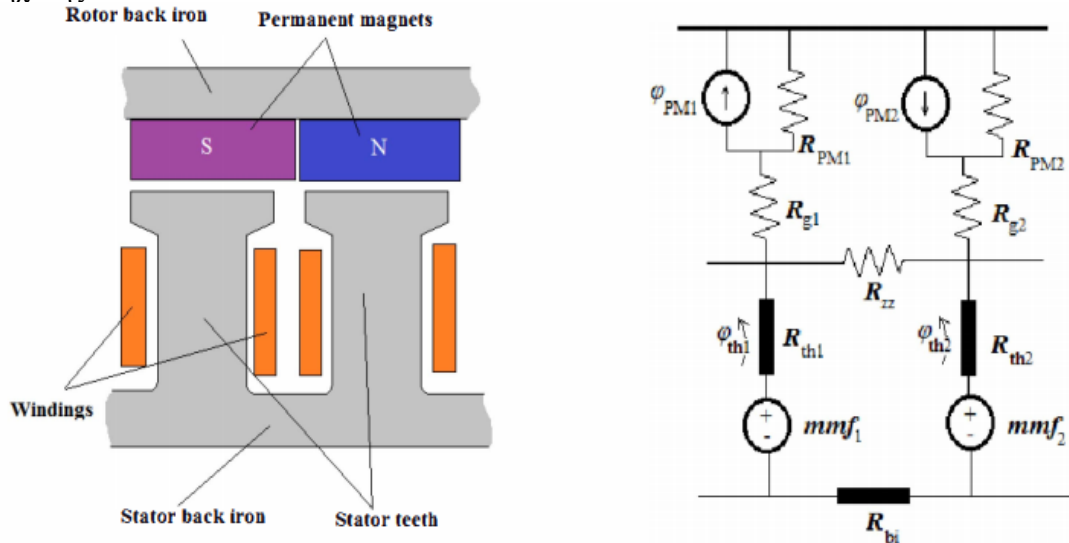
Γενικά στοιχεία της μεθόδου: Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος επίλυσης για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων (ΜΔΕ). Η μέθοδος αυτή δίνει την ικανότητα ύπαρξης αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε προβλήματα τα οποία η αναλυτική επίλυση είναι πολύ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

Τέλος, η κυρίαρχη μέθοδος ανάλυσης μηχανών σε επίπεδο σχεδίασης και προχωρημένου ελέγχου, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί απλή ενώ η ακρίβεια της είναι πολύ μεγάλη και εξαρτάται από το πλήθος και την πυκνότητα των στοιχείων που χρησιμοποιούμε (πυκνότητα πλέγματος ή mesh size). Σε αυτή τη μέθοδο μπορούμε να εξετάσουμε πολλά φαινόμενα όπως η θερμική και η μηχανική ανάλυση. Το μειονέκτημα της είναι η απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό των μεγεθών σε κάθε στοιχείο. Μια ηλεκτρική μηχανή, σε μια βασική ανάλυση ηλεκτρομαγνητικού

πεδίου χρησιμοποιεί συνήθως από 5.000 έως 50.000 κόμβους, το οποίο μεταφράζεται σε απαίτηση 2-5 δευτερολέπτων για κάθε στιγμιότυπο όταν η επεξεργασία γίνεται από έναν συμβατικό υπολογιστικό πυρήνα. Η μέθοδος από μαθηματική και πεδιακή σκοπιά θα μελετηθεί διεξοδικά πιο κάτω αφού αποτελεί το κύριο εργαλείο πεδιακής ανάλυσης κινητήρων στην παρούσα διατριβή.

2.3 Ανάλυση Συγκεντρωμένων Παραμέτρων

Περεταίρω ανάλυση των κινητήρων μπορεί να γίνει με το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα. Η μέθοδος (EMEC) αυτή, χρησιμοποιεί μία πιο λεπτομερή ανάλυση του πεδίου που υπάρχει στο εσωτερικό του κινητήρα και διαφέρει ανάλογα με τη γεωμετρία που έχει επιλεγεί. Η ακρίβεια της μεθόδου αυτής, μεταβάλλεται σύμφωνα με τις παραδοχές, και την συνεισφορά που έχουν στο τελικό αποτέλεσμα τα φαινόμενα που αγνοούμε (πχ τριβές, απώλειες, επιπτώσεις των χωρικών αρμονικών πεδίου κλπ.). Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στην δημοσίευση [2.3.1] στην οποία γίνεται μια σύγκριση ανάμεσα στο μοντέλο ισοδυνάμου μαγνητικού κυκλώματος, στην ανάλυση μέσω μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και στην πραγματικότητα. Η παραπάνω δημοσίευση πραγματοποιεί σύγκριση με βάση την ηλεκτρεγερτική δύναμη που παράγεται στα τυλίγματα της μηχανής.



Σχ. 2.1 Μια ενδεικτική παρουσίαση μορφής ανάλυσης με τη μέθοδο του ισοδυνάμου μαγνητικού κυκλώματος για σύγχρονη μηχανή επιφανειακών μαγνητών. Η εικόνα εμπεριέχεται στη δημοσίευση [3.2.1].

2.4 Αριθμητικοί Μέθοδοι Υπολογισμού Φαινομένων Μονίμων Μαγνητών

Οι μόνιμοι μαγνήτες συνήθως αναπαρίστανται στις ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method FEM). Συχνά, ο συνδυασμός της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με άλλες μεθόδους για τον υπολογισμό παραμέτρων και την ανάλυση φαινομένων σε μηχανές Μονίμων Μαγνητών (MM) ή σε απλές διατάξεις μόνιμων μαγνητών έχει εφαρμοστεί εκτενώς από τους ερευνητές για να ξεπεραστούν τα προβλήματα της υπολογιστικής πολυπλοκότητας (τα οποία τίθενται κυρίως από την τρισδιάστατη πεδιακή ανάλυση) αλλά και για να βελτιωθεί η ακρίβεια της μεθόδου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές σχετικές εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες.

Στην αναφορά [2.4.1] πραγματοποιείται θερμική ανάλυση ανεμογεννήτριας MM με μοντέλο FEM και μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων. Στην αναφορά [2.4.2] πραγματοποιείται κυκλωματική ανάλυση συγχρόνων μηχανών με παραμέτρους που υπολογίστηκαν μέσω FEM.

Μέθοδος που συνδυάζει αποτελέσματα 2DFEM κατά μήκος ακτινικών τομών της γεωμετρίας, που ονομάζεται οιωνεί-3D (quasi 3D) FEM προτείνεται για την ανάλυση κινητήρων MM στην εργασία [2.4.3]. Στην αναφορά [2.4.4] πραγματοποιείται συνδυασμός FEM και ασυμπτωτικών οριακών συνθηκών για την ανάλυση συμμετρικών συστημάτων MM.

Συνδυασμός κυκλωματικής και πεδιακής ανάλυσης πραγματοποιείται από τους Schmidt και Ellenberger για τον υπολογισμό της επαγωγής σε σύγχρονες μηχανές MM στην εργασία [2.4.5], από τους Trosteretal. για την ανάλυση ανεμογεννήτριας MM στην εργασία [2.4.6] και τους Huangetal. για την ανάλυση γραμμικής γεννήτριας MM που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κυματικής ενέργειας στην εργασία [2.4.7]. Συνδυασμός FEM και Response Surface Methodology για τη βελτιστοποίηση της ροπής σε κινητήρες MM πραγματοποιείται στις εργασίες [2.4.8], [2.4.9] και για την ανάλυση μονοφασικού κινητήρα MM στην εργασία [2.4.10] ενώ η εργασία [2.4.11] υιοθετεί συνδυασμό FEM και Dual Response Surface Methodology σε κινητήρες MM. Οι Hu, Niu και Fu χρησιμοποιούν υβριδική circuit-field-motion και time-stepping FEM για την ανάλυση καινοτομικού τύπου κινητήρα MM στην εργασία [2.4.12].

Η αναφορά [2.4.13] συνδυάζει μέθοδο Taguchi με FEM για την ανάλυση κινητήρων MM, ενώ στις αναφορές [2.4.14] και [2.4.15] χρησιμοποιούνται μοντέλα Preisach σε συνδυασμό με FEM για την ανάλυση απωλειών σε μόνιμους μαγνήτες. Οι Farood et al. συνδυάζουν αναλυτικές εξισώσεις με FEM για τον εντοπισμό σφαλμάτων στο μαγνητικό υλικό των κινητήρων MM [2.4.16]. Οι Jeong et al. παρουσιάζουν συνδυασμένη ανάλυση ελέγχου ρεύματος d-q με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση απωλειών κινητήρα MM [2.4.17]. Οι Schmidt και Susic [2.4.18] και οι de Assis et al. [2.4.19] χρησιμοποιούν τη μέθοδο Frozen Permeability Method (FPM), με την οποία γίνεται διακριτή ανάλυση των πεδίων που προκαλούνται από διαφορετικές πηγές διέγερσης, σε συνδυασμό με FEM για τον υπολογισμό παραμέτρων μηχανών MM. Η μέθοδος αυτή προτείνεται και από τους Walker et al. για τον υπολογισμό της πεπλεγμένης ροής συναρτήσει του ρεύματος ή της θέσης του δρομέα σε κινητήρες MM [2.4.20].

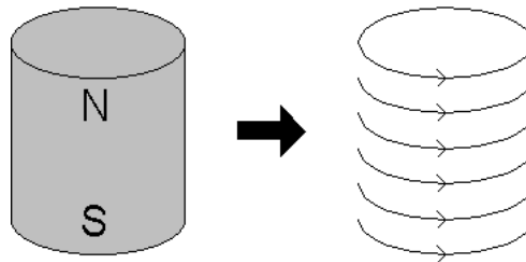
Σύζευξη αναλυτικών τεχνικών και FEM πραγματοποιείται στην αναφορά [2.4.21] για την ελαχιστοποίηση της ροπής στρέψης σε κινητήρες MM. Αναλυτικά μοντέλα που εξάγονται με άμεσους και έμμεσους υπολογισμούς της μεθόδου FEM παρουσιάζονται από τους Wang et al. για τη βελτιστοποίηση του ελέγχου μηχανών MM στην αναφορά [2.4.22]. Σύζευξη αναλυτικού μοντέλου και FEM προτείνεται και από τους Zhong et al. στην αναφορά [2.4.23] για την ανάλυση απωλειών γραμμικών κινητήρων MM και από τους Schmidtetal. για τον υπολογισμό δινορευμάτων σε σύγχρονες μηχανές MM [2.4.24]. Αντίστοιχη προσέγγιση υιοθετούν οι Paula et al. στην ανάλυση κινητήρων MM [2.4.25]. Οι Xie et al. χρησιμοποιούν σύζευξη αναλυτικών μοντέλων, FEM και CFD για την ηλεκτρομαγνητική και θερμική ανάλυση κινητήρων MM χαμηλής ταχύτητας στην αναφορά [2.4.26] ενώ οι Chen et al. την εφαρμόζουν σε κινητήρες τράινινγκ υψηλής ταχύτητας [2.4.27].

Η εργασία [2.4.28] παρουσιάζει μέθοδο που επιλύει ταυτόχρονα κυκλωματικές εξισώσεις με 2D πεπερασμένα στοιχεία σε πολλαπλές τομές (network field coupled multi slice time-stepping FEM) για την ανάλυση απωλειών δινορευμάτων σε κινητήρες MM. Σύζευξη πεδιακής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και κυκλωματικές εξισώσεις εφαρμόζεται επίσης σε κινητήρες MM από τους Ho και Li [2.4.29] και από τους Ruifang et al. [2.4.30]. Οι Patsios et al. προτείνουν τη χρήση 2D και 3D FEM που ενσωματώνουν κατανομές ΗΕΔ και αρμονικών χώρου για την ανάλυση της εκκεντρότητας και του πεδίου σκέδασης των τυλιγμάτων σε γεννήτριες MM [2.4.31]. Συνδυασμός FEM και μεθόδου Schwarz-Cristofel χρησιμοποιείται για την ανάλυση γραμμικών κινητήρων MM στην αναφορά [2.4.32], ενώ οι εργασίες [2.4.33] - [2.4.36] προτείνουν συνδυασμό FEM και γενετικών αλγορίθμων για τη σχεδίαση κινητήρων MM.

Οι Candela et al. συνδυάζουν γεωμετρικό προγραμματισμό με FEM για τη βελτιστοποίηση σύγχρονων κινητήρων MM έκτυπων πόλων στην εργασία [2.4.37]. Οι Liu και Ye προτείνουν βελτιστοποίηση σχεδίασης γραμμικών γεννητριών MM σε σταθμούς μετατροπής κυματικής ενέργειας με συνδυασμό FEM και αλγόριθμου σμήνους σωματιδίων (Improved Particle Swarm Optimization) στην αναφορά [2.4.38]. Σύζευξη FEM με μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης και

βελτιστοποίηση με αλγόριθμους σμήνους σωματιδίων χρησιμοποιείται και στην αναφορά [2.4.39] σε γεννήτριες MM. Στην αναφορά [2.4.40] συνδυάζεται πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με μέθοδο Pareto και FEM για τη βελτιστοποίηση κινητήρων MM σε ηλεκτρικά ποδήλατα.

Η συνήθης περιγραφή της μαγνήτισης των μονίμων μαγνητών στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων δεν μπορεί να ανιχνεύσει την αντοχή των μαγνητών στην απομαγνήτιση, καθώς αδυνατεί να περιγραφεί η θέση λειτουργίας στην μη γραμμική καμπύλη B-H καθώς και η ‘μνήμη’ της προηγούμενης κατάστασης μαγνήτισης. Η διαδικασία – αλγόριθμοι υπολογισμού του πεδίου στην μηχανή με το πρόγραμμα (Finite element method magnetics (FEMM)) δεν λαμβάνει υπόψιν της, την καμπύλη BH, ενώ αντικαθιστά τους μαγνήτες με μία ισοδύναμη μορφή τους. Η ισοδύναμη αυτή μορφή υποθέτει πως ο μαγνήτης είναι ένα υλικό με γραμμική διαπερατότητα ‘μ’ χωρίς μαγνήτιση ‘M’, που στα άκρα του υπάρχουν επιφανειακά ρεύματα τα οποία δημιουργούν ένταση μαγνητικού πεδίου H_c . Η τιμή του H_c είναι αυτή που απαιτείται για να μετατοπιστεί η καμπύλη B-H του μαγνήτη στο μηδέν. Μια εικόνα που δείχνει σχηματικά τα παραπάνω είναι:



Σχ. 2.2 Θεώρηση λειτουργίας μαγνήτη στο πρόγραμμα FEMM. Το σχέδιο εμπεριέχεται στον οδηγό χρήσης του προγράμματος που βρίσκεται στην σελίδα: "femm.info" (tinyurl.com/ygl7uol)

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

2.5 Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση Σχεδίαση και Μοντελοποίηση

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

2.5.1 Θεωρία Προκαταρκτικής Σχεδίασης

Με τον όρο προκαταρκτική σχεδίαση, εννοούμε την διαστασιολόγηση των βασικών μεγεθών της μηχανής ώστε να μπορεί ο σχεδιαστής να έχει μια αρχική ιδέα για την τάξη μεγέθους των διαστάσεων του κινητήρα. Η ακρίβεια των αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό, προκύπτει από την διάθεση του σχεδιαστή να προσθέτει ολοένα και πιο σύνθετα μοντέλα ικανά να περιγράφουν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του κινητήρα. Η εξέλιξη των αναλυτικών μεθόδων, έγινε κυρίως στον περασμένο αιώνα, όταν η λεπτομερής εξέταση μέσω αναλυτικών μεθόδων αποτελούσε και την οριστική σχεδίαση των κινητήρων. Σε

κάθε περίπτωση οι αναλυτικές μέθοδοι έφθαναν αναπόφευκτα σε πάρα πολύ σύνθετα μοντέλα τα οποία εμπεριείχαν ακόμα και πειραματικές σταθερές, χωρίς να βελτιώνουν ιδιαίτερα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Πλέον, η λεπτομερής διερεύνηση γίνεται από τον υπολογιστή με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ενώ η αναλυτική μέθοδος χρησιμοποιείται στην απλή της μορφή για την πρόχειρη διαστασιολόγηση.

2.5.2 Αναλυτικές Μέθοδοι Σχεδίασης

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

2.5.3 Ηλεκτρική, Μαγνητική, Μηχανική Φόρτιση

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

$$a_c = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_\phi \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} \quad (2.13)$$

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

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (2.14)$$

Ως μηχανική φόρτιση ορίζεται η έννοια των τάσεων που υπάρχουν στο διάκενο. Συχνά αναφέρεται και ως «Οριακή Τάση Διακένου» Δίνει μια αρχική εκτίμηση της μηχανικής καταπόνησης, λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων, που δέχονται τα υλικά στήριξης της μηχανής. Ένα τυπικό όριο αυτής της τιμής είναι να μην ξεπερνά τους 10 tn/cm².

$$\sigma_{max} = \frac{m \cdot \omega_r}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (2.15)$$

Στις παραπάνω σχέσεις τα μεγέθη συμβολίζουν:

I_{rms} :	Ενεργός τιμή ρεύματος μηχανής	D, L :	Διαστάσεις διακένου
N_ϕ :	Αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση	P :	Αριθμός πόλων μηχανής
Φ :	Μαγνητική ροή ανά πόλο	ω_r, m :	Γωνιακή ταχύτητα και μάζα δρομέα

2.5.3.1 Σχεδίαση Αύλακας και οι Επιπτώσεις στα Θερμικά Φαινόμενα

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

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

$$ff = \frac{A_{cu}}{A_{slot}} \quad (2.16)$$

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

$$J_{cu} = \frac{N_{slot} I_{rms|cable}}{A_{cu}} \quad \text{και} \quad J_{slot} = \frac{N_{slot} I_{rms|cable}}{A_{slot}} \quad (2.17)$$

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

A) Σε σειρά:

$$N_{\phi} = \frac{P}{2} \cdot q \cdot N_{slot} \quad (2.18)$$

Παράλληλα:

$$N_{\phi} = q \cdot N_{slot} \quad (2.19)$$

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

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

A) Σε σειρά:

$$N_{\phi} = \frac{P}{2} \cdot q \cdot N_{slot} \cdot \text{Layers} \quad (2.20)$$

B) Παράλληλα:

$$N_{\phi} = q \cdot N_{slot} \cdot \text{Layers} \quad (2.21)$$

Στις παραπάνω σχέσεις το q είναι ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} \quad (2.22)$$

m: Αριθμός φάσεων μηχανής

P: Αριθμός πόλων μηχανής

Q: Αριθμός αυλάκων μηχανής

2.5.3.2 Επαγόμενη Τάση, Ηλεκτρική Ισχύς και Ηλεκτρομαγνητική Ροπή

Η κίνηση του δρομέα στο χρόνο προκαλεί μεταβολή ροής στα τυλίγματα του στάτη. Η ροή στον δρομέα εξαιτίας της ύπαρξης των μαγνητών είναι σταθερή για έναν παρατηρητή στον δρομέα της μηχανής. Για το λόγο αυτό το σημείο λειτουργίας στην καμπύλη B-H του σιδήρου του δρομέα δεν μετακινείται σύμφωνα με την θεμελιώδη συχνότητα λειτουργίας αλλά μόνο από αρμονικές

πεδίου. Από την άλλη πλευρά ένας παρατηρητής στον στάτη, παρατηρεί την ροή του δρομέα να μεταβάλλεται με βάση τη συχνότητα περιστροφής του. Τα τυλίγματα του στάτη, υποβάλλονται σε αυτή την ημιτονική μεταβολή της ροής, όμως η συγκέντρωσή τους στις αύλακες και η γεωμετρία του δρομέα προκαλούν και επιπρόσθετες αρμονικές ροής. Η επίδραση στην ημιτονικότητα της ροής που προκαλεί το τυλίγμα του στάτη συνήθως περιγράφεται από τον συντελεστή τυλίγματος K_w . Η ροή στα τυλίγματα του στάτη δίνεται παρακάτω:

$$\Phi(t, \theta) = \sum_{\text{Harmonics}} \left[\Phi_{PM}(\theta) \cdot K_{w, \text{Harm}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{e, \text{Harm}} \cdot t) \right] \quad (2.23)$$

$$\Phi(t) \approx \Phi \cdot K_w \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_e) \quad (2.24)$$

Η θ είναι μεταβλητή που δηλώνει τη κατανομή στις μαγνητικές ροής του μαγνήτη στο χώρο. Η πεπλεγμένη ροή και η RMS τιμή της επαγόμενης τάσης:

$$\lambda(t) = N_\phi \cdot \Phi(t) \quad (2.25)$$

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(T)} \left(-\frac{d\lambda(\tau)}{d\tau} \right)^2 dt} \quad (2.26)$$

$$E_{\text{rms}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot K_w \cdot \Phi \cdot f_e \cdot N_\phi \quad (2.27)$$

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

$$S = 3 \cdot E_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \quad (2.28)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.14) και (2.27) ενώ τροποποιώντας κατάλληλα τη σχέση (2.13). Προκύπτει:

$$E_{\text{rms}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot K_w \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \frac{\bar{B}}{P} \cdot f_e \cdot N_\phi \quad (2.29)$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{\pi \cdot D}{3 \cdot 2 \cdot N_\phi} \cdot ac \quad (2.30)$$

Με τις σχέσεις (2.29) και (2.30) στην (2.28) έχουμε πως η ισχύς δίνεται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ως εξής:

$$S = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot 2} \right) \cdot K_w \cdot D^2 \cdot L \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot \left(2\pi \cdot \frac{f_e}{P/2} \right) \quad (2.31)$$

$$S = \left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \cdot K_w \cdot D^2 \cdot L \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot \omega_m \quad (2.32)$$

Σημαντικό είναι να σχολιαστεί πως η ηλεκτρική ισχύς μιας μηχανής ακτινικής ροής εξαρτάται από το τετράγωνο της διαμέτρου επί το μήκος της. Ακόμη, η ισχύς της μηχανής εξαρτάται άμεσα από την ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση που επιτυγχάνεται σε αυτή και από το είδος του τυλίγματος σύμφωνα με το K_w . Ωστόσο δεν διαθέτει εξάρτηση από το είδος της συνδεσμολογίας

των τυλιγμάτων μεταξύ ζευγών πόλων, όμως, η συνδεσμολογία αυτή, πρακτικά καθορίζει το αν η μηχανή θα λειτουργεί με υψηλό ρεύμα και μικρή τάση ή το ανάστροφό. Τέλος, η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς που σχεδιάζεται η μηχανή να αποδίδει, είναι γραμμική σε σχέση με την ονομαστική μηχανική ταχύτητα της.

Η ροπή που η μηχανή αποδίδει σύμφωνα με την σχέση (2.32) και την υπόθεση ύπαρξης απωλειών είναι:

$$T_{em} = \left(\pi \cdot \frac{D}{2} \right) \cdot \left(\eta \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot K_w \right) \cdot D \cdot L \cdot \bar{B} \cdot ac \quad (2.33)$$

Η δύναμη στο διάκενο συνεπώς είναι:

$$F_g = \left(\eta \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot K_w \right) \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot D \cdot L \cdot \bar{B} \cdot (\mu_0 \cdot ac) \quad (2.34)$$

Η σχέση (2.34) περιέχει κάποιες σταθερές οι οποίες συνολικά αποδίδουν συνήθως τιμή κοντά στην μονάδα. Για παράδειγμα αν απόδοση “ η ” είναι 0.95 και ο συντελεστής τυλίγματος “ K_w ” είναι 0.95 τότε έχουμε: $0.95 \cdot 0.95 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,0024$.

Τελικά η δύναμη στο διάκενο μπορεί να γραφεί:

$$F_g = \frac{1}{\mu_0} \cdot D \cdot L \cdot \bar{B} \cdot (\mu_0 \cdot ac) \quad (2.35)$$

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

$$T_{em} = \oint_S \mathbf{r} \times \vec{\nabla} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_S \mathbf{r} \times \left\{ \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}}) \mathbf{B} - \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \mathbf{B}^2 \hat{\mathbf{n}} \right\} d\mathbf{S} \quad (2.36)$$

$$T_{em} = \iint_{S_g} \mathbf{r} \left\{ \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}_n \cdot \mathbf{B}_t \right\} d\mathbf{S} \quad (2.37)$$

$$\frac{dT_{em}}{dLength} = \oint_{c_g} \left[\mathbf{r} \left\{ \frac{1}{\mu_0} \bar{\mathbf{B}}_n \cdot \bar{\mathbf{B}}_t \right\} \right]_{r=D/2} d\mathbf{l} \quad (2.38)$$

$$\frac{dT_{em}}{dLength} = \pi D \cdot \frac{D}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{\mu_0} \bar{\mathbf{B}}_n \cdot \bar{\mathbf{B}}_t \right\} \quad (2.39)$$

$$T_{em} = L \cdot \left(\pi \frac{D}{2} \right) \cdot D \cdot \frac{1}{\mu_0} \bar{\mathbf{B}}_n \cdot \bar{\mathbf{B}}_t \quad (2.40)$$

$$F_g = \frac{1}{\mu_0} \cdot D \cdot L \cdot \bar{\mathbf{B}}_n \cdot \bar{\mathbf{B}}_t \quad (2.41)$$

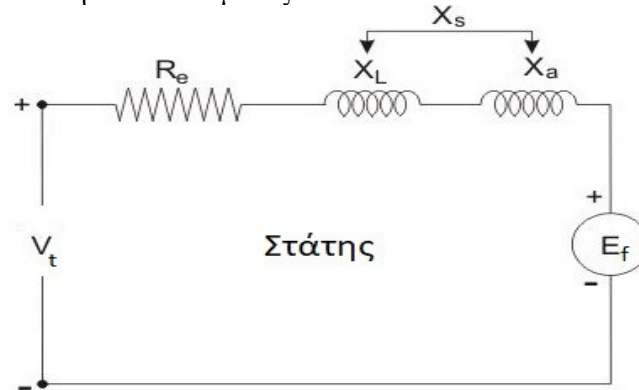
Η τιμή του B_n μπορεί να θεωρηθεί ως το πεδίο $\mathbf{B}$ λόγω μαγνητικής φόρτισης ενώ το B_t μπορεί να θεωρηθεί το πεδίο που δημιουργείται εξαιτίας της της ηλεκτρικής φόρτισης « ac », και συνεπώς η τιμή του είναι « ac » επί τη διαπερατότητα « μ_0 ». Σε αυτή τη περίπτωση λαμβάνουμε την (2.35). Συνεπώς, αυτοί οι μέθοδοι είναι ισοδύναμοι.

Γενικότερα το συνολικό πεδίο διακένου δεν απαρτίζεται από ίσα πεδία στάτη δρομέα. Για παράδειγμα στην μηχανή συνεχούς ρεύματος κατά τον έλεγχο της από ηλεκτρονικά ισχύος, γίνεται προσπάθεια, σε δεύτερη μοίρα, τα πεδία διέγερσης και τυμπάνου να γίνουν σχεδόν ίσα μεταξύ

τους. Ο λόγος που εφαρμόζεται αυτή η τεχνική είναι η μείωση των ολικών απωλειών χαλκού αλλά και του πυρήνα, διότι στα μαγνητικά κυκλώματα ο κορεσμός επέρχεται ομοιόμορφα.

2.5.4 Δυναμικά Μοντέλα Συγκεντρωμένων Παραμέτρων ΣΜΜΜ

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



Σχ. 2.3 Απεικόνιση ισοδύναμου κυκλώματος στάτη σύγχρονης μηχανής.

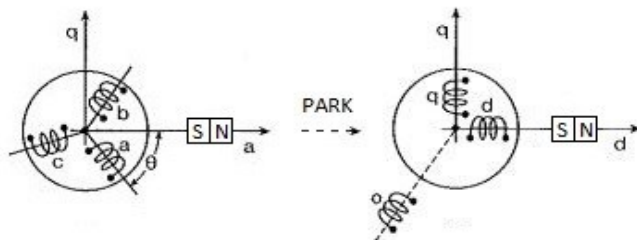
Στο σχήμα 2.3 διακρίνουμε δύο αντιδράσεις την αντίδραση σκέδασης X_a και την αντίδραση μαγνήτισης X_L που συνθέτουν την ολική αντίδραση του στάτη X_s , ακόμα δίνεται και η φορά της Back EMF που απεικονίζεται με το σύμβολο E_f .

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

$$\begin{pmatrix} f_d \\ f_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

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

Ο μετασχηματισμός Park δεν είναι τίποτα άλλο από ένα μαθηματικό εργαλείο στροφής και προβολής του τριφασικού συστήματος abc σε ένα πλαίσιο (επίπεδο) δύο αξόνων που στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου. Μεγάλη και καθοριστική είναι η χρησιμότητα του στον έλεγχο των σύγχρονων και ασύγχρονων τριφασικών μηχανών. Η γενίκευση του μετασχηματισμού υπάρχει στο άρθρο [2.5.1].



Σχ. 2.4 Μετασχηματισμός Park στα τυλίγματα μιας Σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών. Στο σχήμα ο άξονας a είναι ο άξονας της 'διέγερσης', μετά τον Μετασχηματισμό Park μετατρέπεται σε άξονα d .

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$u_d = R i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \quad (2.43)$$

$$u_q = R i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \quad (2.44)$$

Όπου:

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{Mag} \quad (2.45)$$

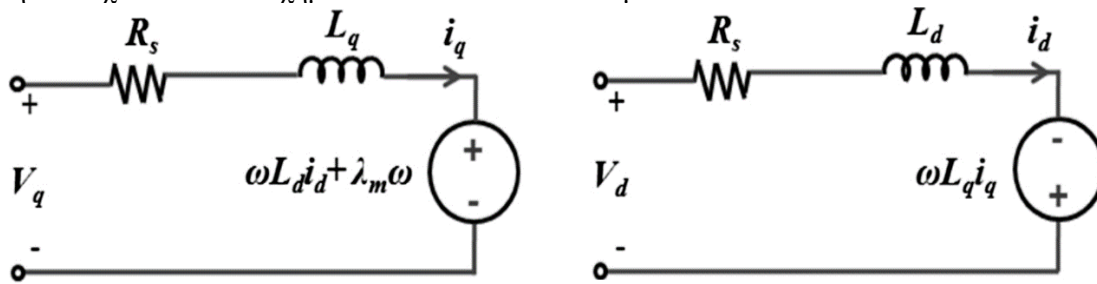
$$\lambda_q = L_q i_q \quad (2.46)$$

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

$$u_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot L_q i_q \quad (2.47)$$

$$u_q = R i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot (\lambda_{Mag} + L_d i_d) \quad (2.48)$$

Στην συνέχεια δίνονται σχηματικά τα δύο αυτά κυκλώματα:



Σχ. 2.5 Απεικόνιση των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών με θεώρηση μικρών απωλειών πυρήνα.

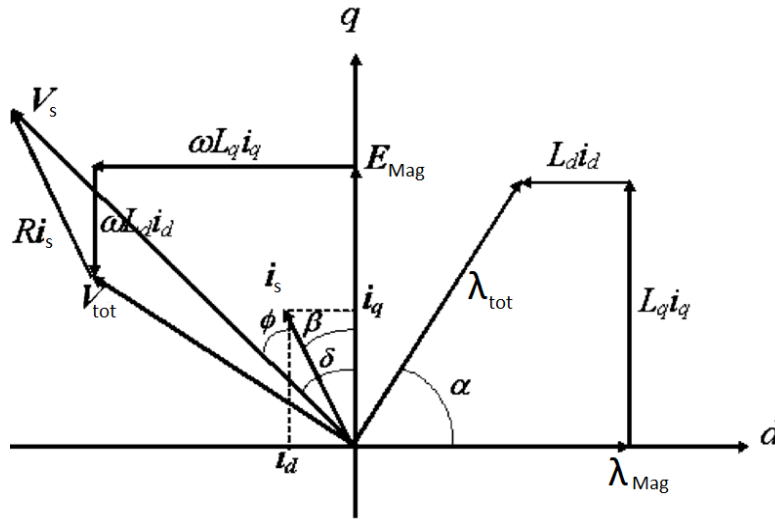
Τέλος, με τη βοήθεια αυτών των κυκλωμάτων μπορεί να σχεδιαστεί και το λειτουργικό διανυσματικό διάγραμμα της μηχανής. Το διάγραμμα αυτό δείχνει γραφικά την θέση των φασιθετών του ρεύματος, της τάσης και της ροής του μαγνήτη στο επίπεδο dq. Η μεταφορά των μεγεθών αυτών σε τριφασικά μεγέθη γίνεται με την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

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

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} [(L_d - L_q) \cdot i_d i_q + \lambda_{Mag} i_q] \quad (2.49)$$

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

του στάτη, για την παραγωγή του οποίου οφείλεται το ρεύμα του άξονα q. Πιο κάτω δίνεται μια ενδεικτική εικόνα αυτού του διαγράμματος.



Σχ. 2.6 Δομή διανυσματικού διαγράμματος σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών.

2.6 Μελέτη Σφάλματων Ηλ. Μηχανών

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

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

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

Η ανάλυση των μεγεθών της μηχανής στο τριφασικό βραχυκύκλωμα γίνεται με τις σχέσεις (2.43),(2.44),(2.45) και (2.46). Στην συνέχεια, οι σχέσεις (2.47) και (2.48) υποθέτουν ανεξαρτησία των μεγεθών L_d και L_q με τον χρόνο και συνεπώς δεν μπορούν να γραφούν με την ίδια μορφή.

Οι τελικές σχέσεις δίνονται από τον συνδυασμό των παραπάνω:

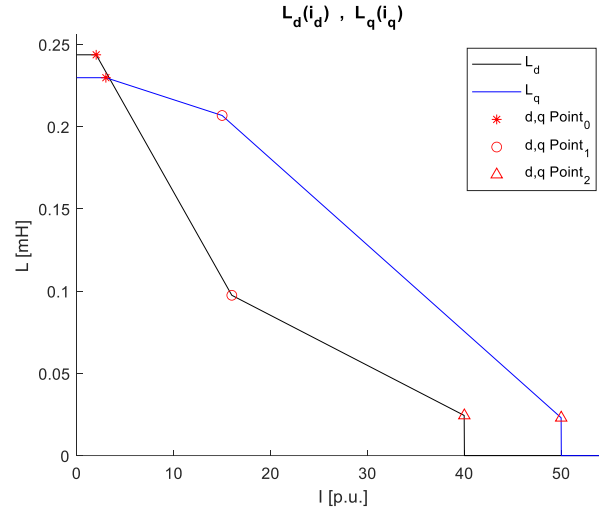
$$u_d = R i_d + (i_d \cdot \frac{dL_d}{di_d} + L_d) \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (2.50)$$

$$u_q - \omega_r \lambda_{Mag} = R i_q + (i_q \cdot \frac{dL_q}{di_q} + L_q) \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d \quad (2.51)$$

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

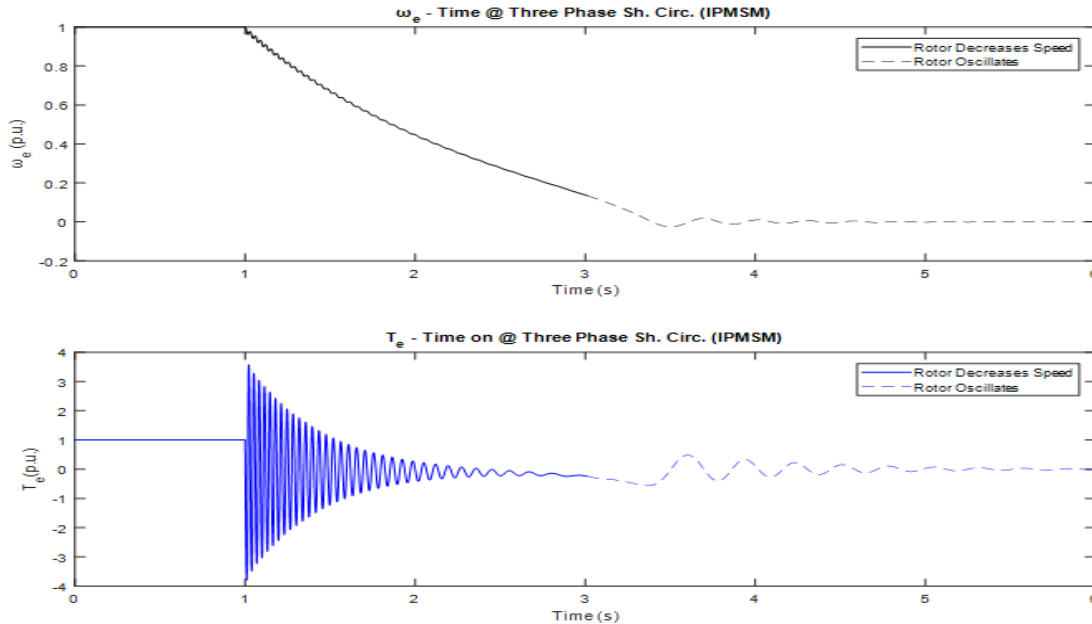
$$T_e - T_L = J \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + B \frac{2}{P} \omega_r \quad (2.52)$$

Οι εξαρτήσεις των L_d και L_q με τα ρεύματα i_d και i_q μπορούν να βρεθούν με προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Ένα τέτοιο παράδειγμα εξάρτησης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.7:

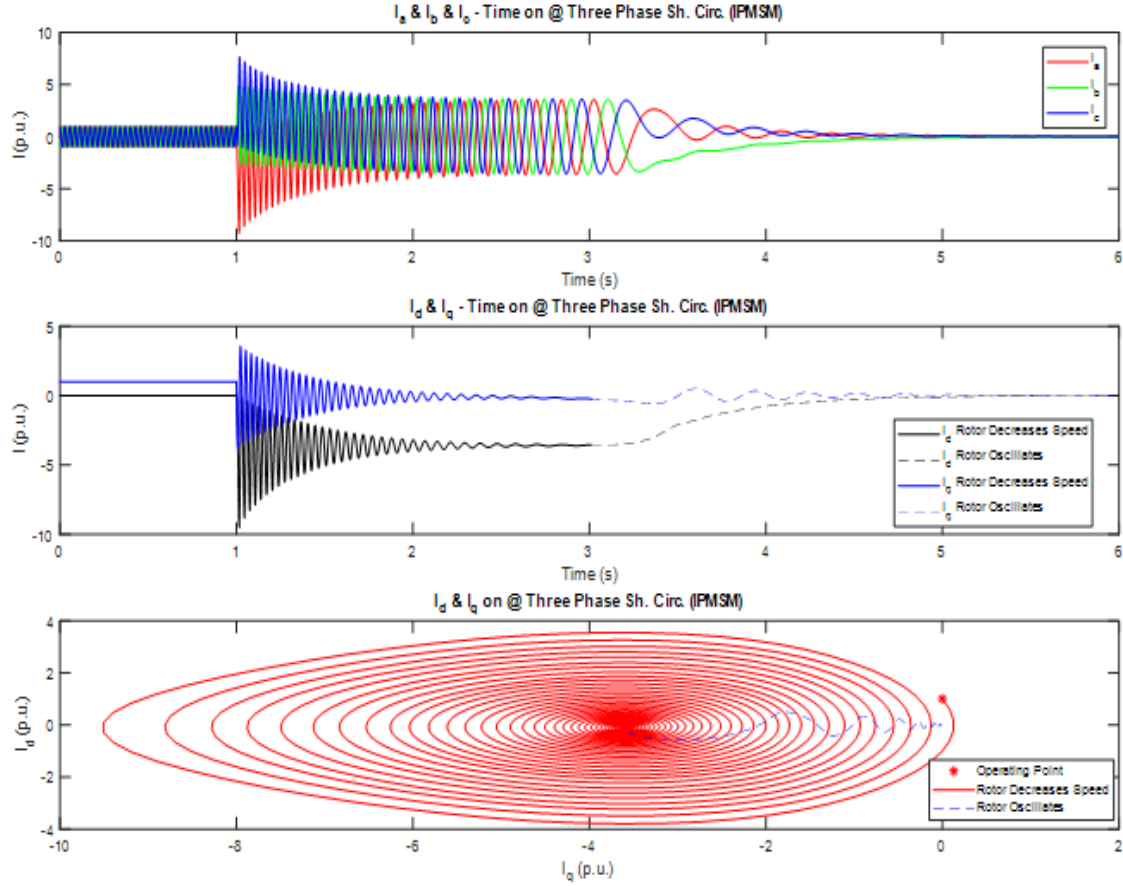


Σχ. 2.7 Εξάρτηση των L_d και L_q με τα ρεύματα i_d και i_q

Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (2.50), (2.51) (2.52) που συνδέονται με τη βοήθεια της (5.37) συνθέτουν την λειτουργία της μηχανής σε συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος όταν το $U_d=U_q=0$. Πιο κάτω λύνεται το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που σχηματίστηκε για μηχανή εσωτερικών μαγνητών.



Σχ. 2.8 Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της μηχανής κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος τριών φάσεων στους ακροδέκτες της μηχανής, όταν αρχικά η μηχανή στρέφεται στις ονομαστικές στροφές με παράγοντας μέγιστη ροπή.



Σχ. 2.9 Ανάλυση ρευμάτων στο πλαίσιο d-q κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος τριών φάσεων στους ακροδέκτες της μηχανής, όταν αρχικά η γωνία ρευμάτων ήταν 90ο ηλ. μοίρες ($I_q=I_N$, $I_d=0$).

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

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

$$I_{d,shc} = -\frac{\omega^2 \cdot L_q \cdot \lambda_{Mag}}{R^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} \quad (2.53)$$

$$I_{q,shc} = -\frac{\omega \cdot \lambda_{Mag} \cdot R}{R^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} \quad (2.54)$$

$$I_{d,min} = -\frac{\lambda_{Mag}}{L_d} - \sqrt{\left(I_{d0} + \frac{\lambda_{Mag}}{L_d}\right)^2 + \left(\frac{L_q}{L_d} \cdot I_{q0}\right)^2} \quad (2.55)$$

$$T_{Brk} = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot R \cdot \lambda_{Mag}^2 \cdot \omega \cdot \frac{R^2 + \omega^2 \cdot L_q^2}{(R^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q)^2} \quad (2.56)$$

$$I_{shc} = \frac{\sqrt{(\omega^2 \cdot L_q \cdot \lambda_{Mag})^2 + (\omega \cdot R \cdot \lambda_{Mag})^2}}{R^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} \quad (2.57)$$

$$\xi = \frac{L_q}{L_d} \quad (2.58)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot (\xi - 1) + \sqrt{9 \cdot (\xi - 1)^2 + 4 \cdot \xi} \right] \quad (2.59)$$

$$f(\xi) = \sqrt{\chi} \cdot \frac{1 + \chi}{\left(1 + \frac{\chi}{\xi}\right)^2} \quad (2.60)$$

$$\omega^* = \frac{R}{L_q} \cdot \sqrt{\chi} \quad (2.61)$$

$$T^*_{Brk} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{\lambda_{Mag}^2}{L_q} \cdot f(\xi) \quad (2.62)$$

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

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

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

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

$$i_d(t) = -\omega \lambda_{Mag} \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] + \frac{\omega \lambda_{Mag}}{X''_d} e^{-a \cdot t} \cos(\omega t) \quad (2.63)$$

$$i_q(t) = \frac{\omega \lambda_{Mag}}{X''_q} e^{-a \cdot t} \sin(\omega t) \quad (2.64)$$

Η ανάλυση της επίδρασης των βραχυκυκλωμάτων αποτελεί βασικό μέλημα για την οριστικοποίηση της σχεδίασης των μηχανών. Μάλιστα, η θέση που διακατέχει ο υπό μελέτη κινητήρας στην εφαρμογή που χρησιμοποιείται, καθορίζει την σημαντικότητα της εύρωστης λειτουργίας του. Για παράδειγμα, κινητήρες καίριων υποσυστημάτων αεροπορικής τεχνολογίας δεν μπορούν να εκλείψουν λόγω σφάλματος. Μια τέτοια ανάλυση για κινητήρα υποβοήθησης ηλεκτρικού τιμονιού γίνεται στην δημοσίευση [2.6.1].

2.7 Ανάλυση Μηχανικών Φαινομένων

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

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

Ο σκοπός της μηχανικής ανάλυσης του κινητήρα είναι βελτίωση της μηχανικής δομής του δρομέα. Για να μπορέσει ο κινητήρας να κατασκευαστεί απαραίτητο είναι να υπάρχει βεβαιότητα για τη μηχανική αντοχή του. Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης το σύστημα μετάδοσης (κιβώτιο – ημιαξόνια – ακτίνα τροχών) καθορίζουν μέσω της επιθυμητής μέγιστης ταχύτητας του οχήματος, την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Ακόμη η ανάγκη ανάπτυξης μεγάλης δύναμης επιτάχυνσης καθορίζει την μέγιστη ροπή του κινητήρα.

Η ύπαρξη του κιβωτίου δίνει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας για την εξαγωγή της κατάλληλης καμπύλης ροπής - ταχύτητας της μηχανής. Ένας κινητήρας που μπορεί να στραφεί σε μεγάλες ταχύτητες μπορεί ακολουθηθεί από ένα κιβώτιο, τέτοιο ώστε να πολλαπλασιάζει την ροπή του σε μεγάλο βαθμό, διατηρώντας τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του οχήματος. Στην περίπτωση που ο κινητήρας δεν μπορεί να στραφεί σε τόσο υψηλές ταχύτητες η αύξηση της ροπής μέσω του κιβωτίου αναγκαστικά περιορίζεται. Το όφελος σε αυτή την περίπτωση είναι πως το ονομαστικό σημείο ισχύος του κινητήρα μπορεί να μετατοπιστεί, μέσω της μείωσης του αριθμού των ενεργών ελιγμάτων, σε μεγαλύτερη ταχύτητα και συνεπώς για την ίδια μάζα επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ισχύ.

Σε θεωρητική βάση η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας ισχύος. Η μέγιστη ισχύς που αποδίδει ο κινητήρας προέρχεται από τον πολλαπλασιασμό της μέγιστης ροπής επί την μέγιστη ταχύτητα στην οποία η ροπή είναι σταθερή και μέγιστη. Η δυσκολία στην επαύξηση της ισχύος είναι η μέγιστη μηχανική τάση διακένου η οποία εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των πεδίων στάτη και δρομέα δεν μπορεί να υπερβεί τα μερικά MPa καθώς η τιμή του πεδίου είναι σχετικά δύσκολο να υπερβεί τα 2T. Για το λόγο αυτό οι ηλεκτρικές μηχανές αυξημένης πυκνότητας ισχύος προσπαθούν να αυξήσουν τον πολλαπλασιαστικό όρο της ταχύτητας. Τέλος, το εύρος ταχύτητας της εφαρμογής εξασφαλίζεται με την ύπαρξη κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο ως συσκευή είναι μεγάλης πυκνότητας ροπής, εφόσον το όριο διαρροής των γραναζιών μπορεί να αγγίζει το 1GPa.

Η κύρια πρόκληση της αύξησης της ταχύτητας περιστροφής στους ηλεκτρικούς κινητήρες είναι η μηχανική αντοχή του δρομέα. Η διαμόρφωση της γεωμετρίας του δρομέα και η χρήση υλικών, με στόχο την αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής επίδοσης πολλές φορές ενεργούν ενάντια στην δημιουργία υψηλής μηχανικής αντοχής.

Η μηχανική ανάλυση σε υψηλές ταχύτητες είναι ακόμη άμεσα συνδεδεμένη με την αποφυγή ιδιοσυντονισμών – κανονικών ρυθμών ταλάντωσης. Οι μεταβολές του πεδίου στην μηχανή κατά την περιστροφή ασκούν μηχανικές δυνάμεις στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Οι μηχανικές αυτές δυνάμεις επιφέρουν περιοδικές παραμορφώσεις και κοποτικές φορτίσεις. Το πλούσιο φάσμα των

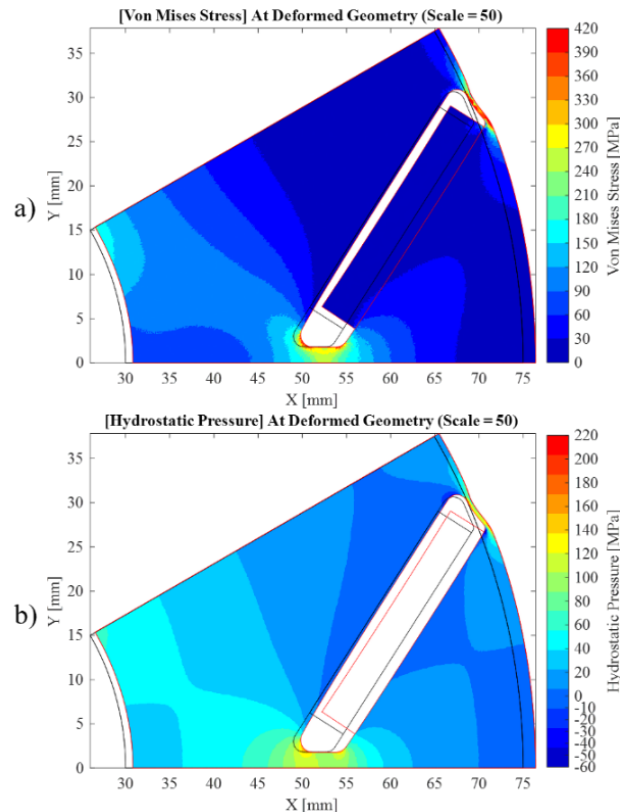
παραμορφώσεων αυτών ενδέχεται να συμπίπτει με κανονικούς ρυθμούς ταλάντωσης, που υπάρχουν λόγω του σχήματος. Οι συχνότητες αυτές παρατηρούνται στην πράξη μέσω της ακοής.

Οι κύριες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της μηχανής είναι τριών ειδών.

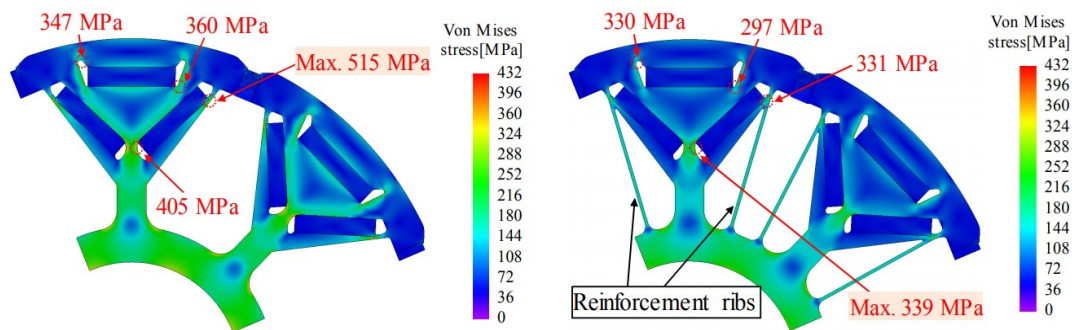
- 1) Ηλεκτρομαγνητικές: Δυνάμεις εξαιτίας ύπαρξης Ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ή μαγνητοσυστολής.
- 2) Θερμικής διαστολής: Δυνάμεις εξαιτίας της θερμικής διαστολής των υλικών.
- 3) Φυγόκεντρες: Δυνάμεις εξαιτίας της περιστρεφόμενης μάζας.
- 4) Ύπαρξη πρωθύστερων μηχανικών πιέσεων: Shrink Fitting, Rotor Shaft Stabbing, Interlock.

Οι δυνάμεις αυτές δεν επηρεάζουν ούτε στον ίδιο βαθμό ούτε με το ίδιο πρόσημο την αντοχή της μηχανής σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Οι δυνάμεις θερμικής διαστολής επηρεάζουν αρνητικά την αντοχή της μηχανής, όμως είναι αρκετά ασθενείς σε μικρές -ονομαστικές θερμοκρασίες. Οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις επηρεάζουν θετικά την αντοχή της μηχανής όμως είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερες σε σχέση με τις φυγόκεντρες δυνάμεις. Στην περίπτωση που χρειάζεται μια υποεκτίμηση της ανοχής της μηχανής, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, μπορούν να μην ληφθούν υπόψιν.

Η εκτίμηση της μηχανικής αντοχής γίνεται με την εκτίμηση των ισοδύναμων τάσεων κατά Von-Mises. Η φόρτιση που αναλύουμε αφορά τις δυνάμεις που ασκούνται εξαιτίας της περιστροφής του δρομέα. Στην συνέχεια, για την μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής, εξετάζονται όλα τα σημεία του δρομέα ώστε να είναι βέβαιο πως η μηχανική τους τάση δεν είναι μεγαλύτερη του ορίου διαρροής του υλικού. Στην συνέχεια δίνεται μια εκτίμηση της κατανομής τάσεων Von-Mises για τον κινητήρα που αναλύθηκε ηλεκτρομαγνητικά για ταχύτητα περιστροφής 15kRPM.



Σχ. 2.10 Αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης στην παραμορφωμένη γεωμετρία, υπό συνθήκες μέγιστης ταχύτητας (15kRPM) αντιπροσωπεύουν: (α) Κατανομή τάσης Von-Mises. (β) Κατανομή υδροστατικής τάσης.



Σχ. 2.11 Μηχανική ανάλυση μηχανής πριν και μετά τη δημιουργία νέων προσθέτων στηριγμάτων. Η εικόνα είναι μέρος της δημοσίευσής [2.7.1].

2.8 Ανάλυση Θερμικών Φαινομένων

Η θερμική ανάλυση του κινητήρα, παρουσιάζει ιδιαίτερο κατασκευαστικό, αλλά και σχεδιαστικό ενδιαφέρον. Είναι φανερό πως η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει πολλές παραμέτρους όπως πχ. τις απώλειες χαλκού. Ακόμη η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις όπως η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας στην επίδοση των μόνιμων μαγνητών και η συμβολή της θερμοκρασίας στην απομαγνήτιση. Επιπλέον, η αντοχή της μονωτικής ικανότητας των αγωγών τυλίγματος στο χρόνο, και κατ' επέκταση η ορθή λειτουργία του κινητήρα εξαρτάται από την θερμοκρασία λειτουργίας. Επιπρόσθετα, στα περισσότερα υλικά, υφίσταται ισχυρή θερμοκρασιακή εξάρτηση των χαρακτηριστικών τους και συνήθως η αύξηση της θερμοκρασίας έχει αρνητικές συνέπειες σε αυτά (με εξαίρεση των απωλειών δινορευμάτων σε δεδομένη τιμή μεταβολής πεδίου). Καθίσταται λοιπόν σαφές, πως η θερμική ανάλυση είναι μια σημαντική διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει είτε σε μεταβολές μεγεθών ή ακόμα και σε πιθανή αλλαγή του τρόπου ψύξης της μηχανής. Αν και η θερμική ανάλυση, αφορά κατά κύριο λόγο στην ονομαστική λειτουργία, ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να ληφθούν υπόψη και άλλες καταστάσεις καθώς και καταστάσεις σφαλμάτων. Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως, καθώς η σταθερά χρόνου των θερμικών φαινομένων είναι αρκετά μεγάλη (της τάξης των αρκετών λεπτών), οι μεταβατικές ηλεκτρικές καταστάσεις δεν έχουν ιδιαίτερη συνεισφορά στη θερμική ανάλυση και κατά κανόνα αγνοούνται. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή την ανεξάρτητη ανάλυση της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς του κινητήρα, αλλά και τη θεώρηση στατικών μοντέλων.

Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στις απώλειες που λαμβάνουν χώρα στα διάφορα κατασκευαστικά μέρη του κινητήρα. Έχοντας λοιπόν προσδιορίσει τις απώλειες μέσω της επίλυσης του μαγνητικού προβλήματος, μπορούν να καθοριστούν οι ισοδύναμες πηγές θερμότητας. Οι κύριες πηγές θερμότητας ή θερμικών απωλειών, είναι τα τυλίγματα στις αύλακες του κινητήρα, λόγω των απωλειών χαλκού, τα τμήματα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας με υψηλό κορεσμό, όπως τα δόντια, λόγω των υψηλών απωλειών πυρήνα και το σώμα των μόνιμων μαγνητών λόγω των απωλειών δινορευμάτων. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της ανάλυσης, απαιτείται καλή γνώση των μηχανισμών ανταλλαγής θερμότητας, των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών (συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητα), καθώς και των οριακών συνθηκών.

Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας είναι οι εξής:

Με θερμική αγωγή (conduction): αφορά στη διάδοση της θερμότητας από μόριο σε μόριο σε στερεά, υγρά ή αέρια σώματα. Περιγράφεται από τη σχέση:

$$\nabla(k\nabla T) + q = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.65)$$

Όπου k είναι συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε $W/m \cdot K$, q είναι η χωρική πυκνότητα ενέργειας σε W/m^3 , C_p είναι η ειδική θερμότητα σε $J/kg \cdot K$ και ρ η πυκνότητα σε kg/m^3 .

Με συναγωγή ή συναγωγιμότητα (thermal convection): Ορίζεται, ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός γειτονικού κινούμενου ρευστού (υγρού ή αερίου). Διέπεται από την σχέση:

$$q = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = h(T - T_0) = 0 \quad (2.66)$$

Ή εναλλακτικά:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + h(T - T_0) = 0 \quad (2.67)$$

Όπου q_s είναι η επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας σε W/m^2 , h ο συντελεστής συναγωγιμότητας σε $W/m^2 \cdot K$ που είναι χαρακτηριστικός του κάθε υλικού και T_0 η θερμοκρασία του ρευστού (ψυκτικού μέσου). Η συναγωγή χωρίζεται σε φυσικής ροής και εξαναγκασμένης ροής.

Μέσω ακτινοβολίας (radiation): Ορίζεται ως η ανταλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ επιφανειών στερεών σωμάτων που βρίσκονται σε απόσταση. Διέπεται από την σχέση:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \beta \cdot k_{sb} \cdot (T^4 - T_0^4) = 0 \quad (2.68)$$

Όπου β είναι ο συντελεστής ακτινοβολίας $0 < \beta < 1$, k_{sb} η σταθερά του Boltzmann ($k_{sb} = 5.6 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$) και T_0 η θερμοκρασία του ρευστού (ψυκτικού μέσου). Για $T < 273 K$ η μετάδοση μέσω ακτινοβολίας είναι πρακτικά αμελητέα.

Παρακάτω, στον πίνακα 2.5 παρατίθενται οι τυπικές τιμές του συντελεστή k για υλικά ενδιαφέροντος στη σχεδίαση ηλεκτρικών κινητήρων:

Υλικό	Τιμή k (W/mK)
Αέρας	0.024 – 0.026
Χαλκός	385 - 400
Στερεοί μονωτές	0.035 – 0.16
Mica	0.71
Χαρτί	0.05
Πλαστικό	0.03
Μαγνήτης	5 - 15
Σίδηρος	60 - 80
Ατσάλι	36 - 54
Αλουμίνιο	225 - 250

Πίν. 2.1 Τυπικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας

Παρακάτω, παρατίθενται οι τυπικές τιμές του συντελεστή συναγωγιμότητας h ανάλογα με τον τύπο ψύξης:

- 1) Φυσική ροή αέρα: $5-25 W/m^2 \cdot K$
- 2) Φυσική ροή νερού: $20-100 W/m^2 \cdot K$
- 3) Εξαναγκασμένη ροή αέρα: $10-200 W/m^2 \cdot K$
- 4) Εξαναγκασμένη ροή νερού: $50-10000 W/m^2 \cdot K$

Για την επίλυση του θερμικού προβλήματος καθορίζονται αρχικά οι πηγές της θερμότητας βάσει των απωλειών που έχουν ήδη υπολογιστεί, με συγκεκριμένη ειδική ισχύ εκφρασμένη σε $W/m^3 \cdot K$. Έπειτα καθορίζονται οι οριακές συνθήκες, δηλαδή ο τύπος μετάδοσης της θερμότητας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_0 , καθώς και τυχούσες περιοδικές συνθήκες. Τέλος καθορίζονται οι θερμικές ιδιότητες των υλικών του κινητήρα. Κατά την υλοποίηση των μοντέλων δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στη σωστή και πλήρη μοντελοποίηση των μονώσεων του κινητήρα, καθώς αυτές συνήθως αμελούνται, αλλά και στον υπολογισμό της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας των τυλιγμάτων και

του διακένου της μηχανής, καθώς η μη λεπτομερής και απλουστευτική μοντελοποίηση τους αποτελεί συνήθως την Αχίλλειο πτέρνα των θερμικών μοντέλων.

Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για τον αέρα του διακένου εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα στάτη και δρομέα, ω_m , και από το μήκος του διακένου g . Υπολογίζεται ως εξής:

$$\lambda_{\text{gap}} = 0.0019 \cdot \eta^{-2.9084} \cdot \text{Re}^{0.4614 \cdot \ln(3.3361 \cdot \eta)} \quad (2.69)$$

Όπου

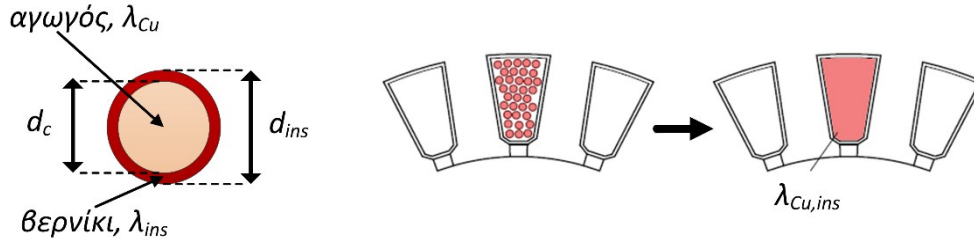
$$\eta = \frac{D_i - 2 \cdot g}{D_i} \quad (2.70)$$

Και

$$\text{Re} = \frac{\omega_m \cdot g}{\nu} \quad (2.71)$$

όπου ν είναι το ιξώδες του αέρα. Όταν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος η θερμική αγωγιμότητα του διακένου ταυτίζεται με τη στατική τιμή της αγωγιμότητας του αέρα.

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας του τυλίγματος στην αύλακα, το κάθε πηνίο μοντελοποιείται ως ένα ισοδύναμο ομογενές υλικό που χαρακτηρίζεται από μια καινούρια τιμή αγωγιμότητας, όπως φαίνεται παρακάτω, στο σχήμα 2.12:



Σχ. 2.12 Ισοδύναμο θερμικό μοντέλο της αύλακας

Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από το λόγο της διαμέτρου του χαλκού του αγωγού προς τη διάμετρο του μονωμένου με βερνίκι αγωγού, και υπολογίζεται ως εξής:

$$\lambda_{\text{Cu-ins}} = F \cdot \lambda_{\text{ins}} \quad (2.72)$$

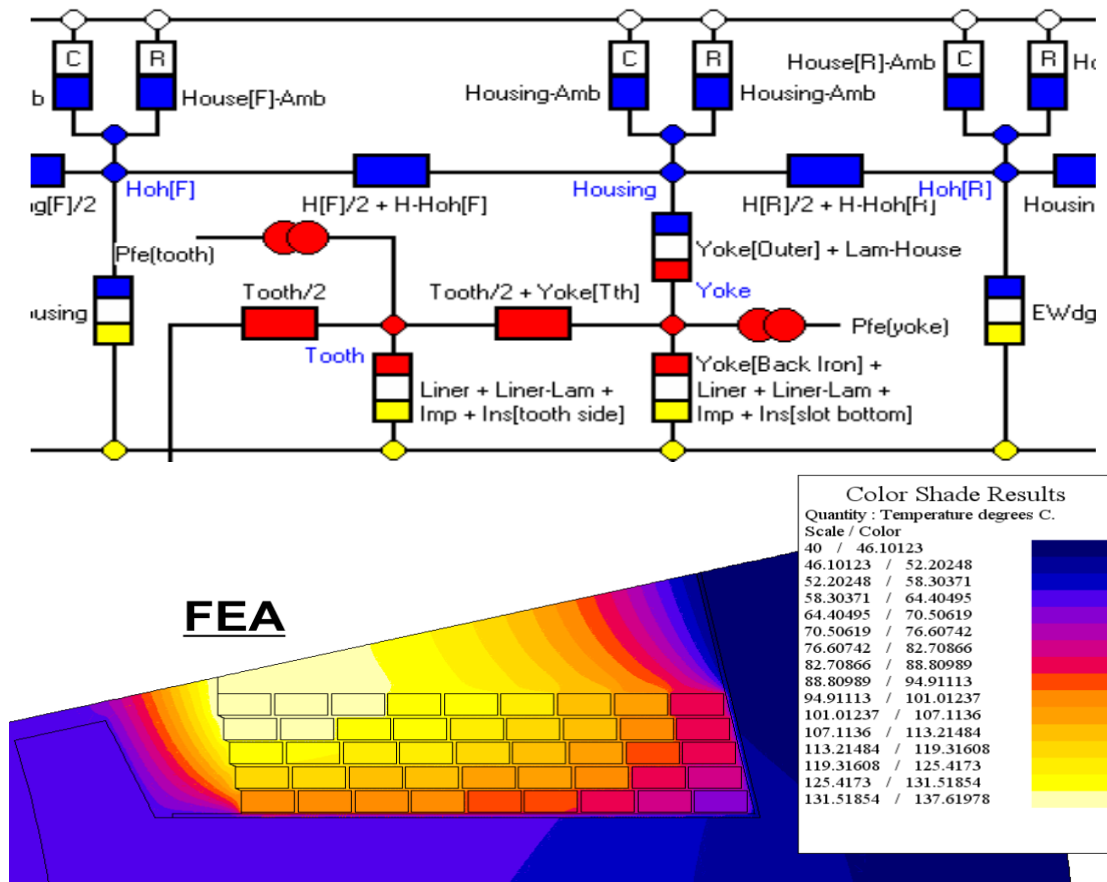
Όπου

$$F = 37.5 \cdot \left(\frac{d_c}{d_{\text{ins}}} \right)^2 - 43.75 \cdot \left(\frac{d_c}{d_{\text{ins}}} \right) + 14 \quad (2.73)$$

Και λ_{ins} είναι η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού βερνικιού.

Η ανάλυση των θερμικών φαινομένων γίνεται κυρίως με επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης της διάχυσης. Η επίλυση της συγκεκριμένης εξίσωσης γίνεται με αριθμητικό τρόπο εφαρμόζοντας τη μέθοδο των διακριτών διαφορών (FDM, Finite Differences Method). Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως παρουσιάζει ρεαλιστικά αποτελέσματα ακόμη και σε αρκετά αραιό πλέγμα (Mesh) και αραιά χρονικά βήματα. Η δυνατότητα του αραιού πλέγματος ουσιαστικά μπορεί να εξομαλύνει την ανάγκη ακριβούς προσδιορισμού της θέσης των θερμών πηγών ή ισοδυνάμως της θέσης που παράγονται απώλειες. Παρόλα αυτά η θέση των ισοδυνάμων πηγών μπορεί να προσδιοριστεί αφού πρώτα γίνει διαμοιρασμός των απωλειών σε απώλειες χαλκού, σιδήρου δρομέα, σιδήρου στάτη και μαγνητών για κάθε λειτουργική κατάσταση που είναι απαραίτητη η θερμική ανάλυση. Ο προσδιορισμός και ο διαχωρισμός των απωλειών είναι εφικτός αφού πρώτα γίνει η αντιστοίχιση των ρευμάτων και εσωτερικών γωνιών ροπής για κάθε

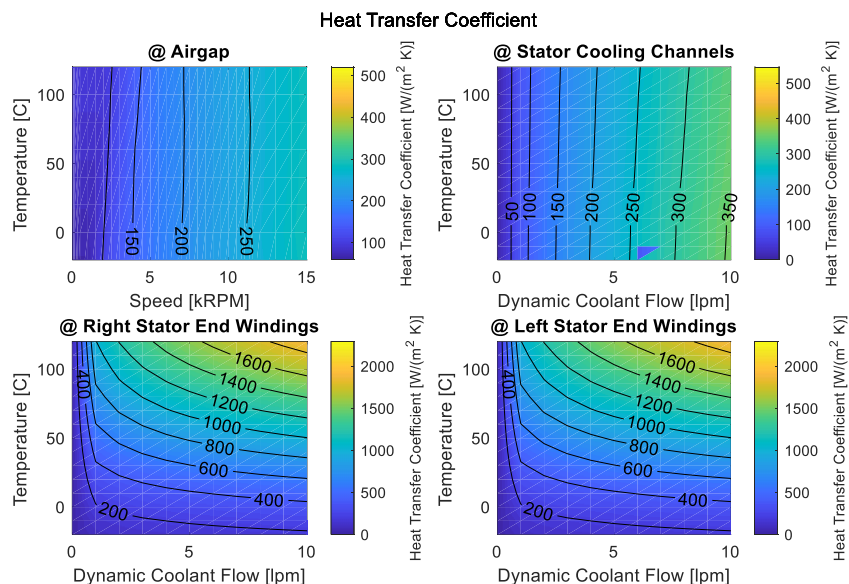
λειτουργική κατάσταση, ροπής – ταχύτητας, σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση που έχει προηγηθεί.



Σχ. 2.13 Θερμική ανάλυση στην περιοχή του στάτη μηχανής. Στην πάνω εικόνα γίνεται μέσω των ισοδύναμων κυκλωμάτων (TLCM) ενώ κάτω μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Οι εικόνες αποτελούν μέρος παρουσίασης του συνεδρίου ICEM σε διάλεξη του κ. David Staton [2.8.1].

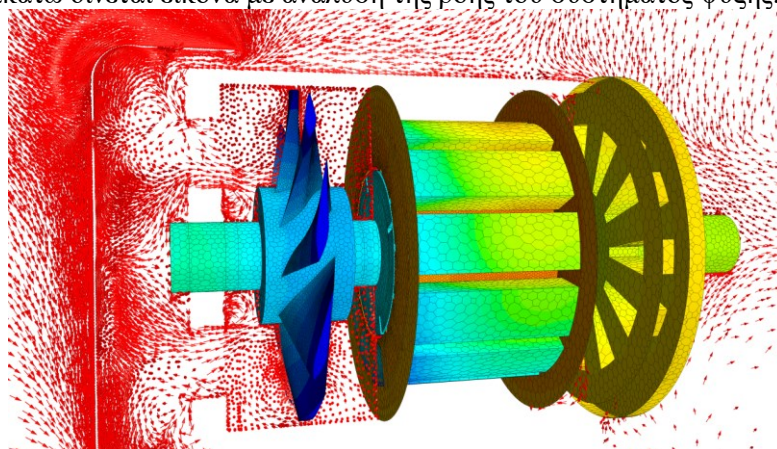
Εκτός από την τοποθέτηση θερμών πηγών απαραίτητη είναι και η τοποθέτηση και η περιγραφή της λειτουργίας των διαύλων ψύξης της μηχανής. Σε αυτό το σημείο οφείλουμε να κάνουμε την υπόθεση πως η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού στην είσοδο είναι ίση με την θερμοκρασία που επιθυμούμε. Η παραδοχή αυτή είναι σημαντική και συνάμα ρεαλιστική, καθώς η διαδικασία ελάττωσης της θερμοκρασίας του ψυκτικού, από την έξοδο του κινητήρα (υψηλή θερμοκρασία) στο ψυγείο και στην συνέχεια στην είσοδό του κινητήρα (επιθυμητή θερμοκρασία) είναι συνήθως τυπική και εξαρτάται από την ικανότητα του ψυγείου.

Για την επίτευξη της θερμικής ανάλυσης απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός συντελεστών μεταφοράς θερμότητας (HTC, Heat Transfer Coefficient) ανάμεσα στα διάφορα υλικά που υπάρχουν εντός της μηχανής. Για τη διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν η γεωμετρία του εκάστοτε υποσυστήματος, καθώς επίσης και η περιορισμένη δυνατότητα της περιγραφής την ακριβής θέσης του. Για παράδειγμα στην μέθοδο πεπερασμένων διαφορών μπορούμε να τοποθετήσουμε ως σειρές από κυκλικούς αγωγούς (χαλκού) και ενδιάμεσα τους μόνωση και αέρα για την περιγραφή της περιοχή των τυλιγμάτων ή ισοδυνάμως μπορούμε να τοποθετήσουμε ένα ενιαίο υλικό εντός της αύλακας με HTC τέτοιο ώστε να μιμείται την συμπεριφορά των τυλιγμάτων (Αέρας - Μόνωση και Χαλκός) . Ένα διάγραμμα των συντελεστών διάδοσης θερμότητας σύμφωνα με τη θερμοκρασία δίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχ. 2.14 Heat Transfer Coefficients.

Σημαντικό ωστόσο για τη θερμική ανάλυση είναι και η συμπεριφορά του ψυκτικού υγρού κατά μήκος των διαύλων ψύξης. Πρακτικά γίνεται μία ανάλυση ροής του ψυκτικού μέσα στο εκάστοτε δίαυλο (αυλάκι) ψύξης. Η συγκεκριμένη ανάλυση έχει στόχο να προβλέψει την δυναμική ροή του υγρού για διάφορες θερμοκρασίες του υγρού και διαφορετικές τιμές ροής στην είσοδο (inlet). Η ανάλυση της ροής του ψυκτικού υγρού ωστόσο είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου μηχανής που περιλαμβάνει και τους διαύλους ψύξης, σε προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστό-δυναμικής (CFD, Computational Fluid Dynamics). Παρακάτω δίνεται εικόνα με ανάλυση της ροής του συστήματος ψύξης.



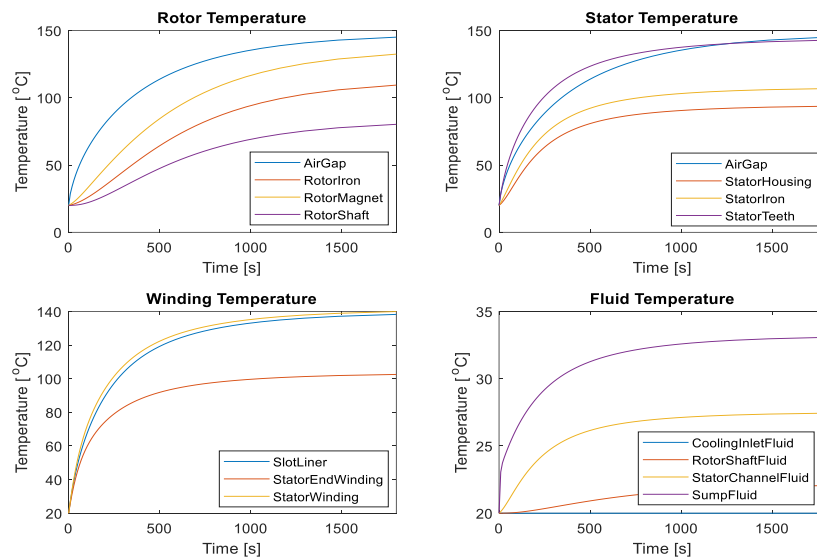
Σχ. 2.15 Ανάλυση ροής (CFD) του συστήματος ψύξης μιας ηλεκτρικής μηχανής. Η εικόνα αυτή βρέθηκε στην ιστοσελίδα: "siemens.com" (tinyurl.com/y4ug8pl8)

Η δημιουργία του θερμικού μοντέλου τέλος ολοκληρώνεται με την εισαγωγή των απωλειών ή την δημιουργία των ισοδύναμων Θερμικών πηγών. Για να μπορέσει αυτό να επιτευχθεί αρχικά λαμβάνουμε από την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση την θέση που εμφανίζονται απώλειες σε κάθε μία λειτουργική κατάσταση ροπής – ταχύτητας. Στην συνέχεια οι απώλειες του εκάστοτε στοιχείου, κατανέμονται στην επιφάνεια του, ομοιόμορφα ή σύμφωνα με κάποια χωρική κατανομή που έχουν την τάση να ακολουθούν (πχ. οι απώλειες πυρήνα στάτη συχνά είναι μεγαλύτερες στα δόντια παρά στο σώμα).

Η θερμική ανάλυση του κινητήρα είναι κυρίως ένα πρόβλημα με εγγενή χρονική εξάρτηση. Αυτό σημαίνει πως σε αντίθεση με τα μηχανικά ή τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που μπορούν να αναλυθούν σε ημιτονικές μόνιμες καταστάσεις (HMK) και χρονοστατικές καταστάσεις, τα θερμικά φαινόμενα συνήθως μπορούν να αναλυθούν ως προς τον χρόνο βήμα-βήμα (Time step Analysis).

Για την ανάλυση του κινητήρα ως προς της συμπεριφορά του στα θερμικά φαινόμενα οριοθετούμε τρία στάδια.

Το πρώτο στάδιο είναι η ανάλυση μίας μόνιμης λειτουργικής κατάστασης ($Torque_0$, $Speed_0$). Σε αυτό το στάδιο μελετάται ουσιαστικά η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας σε ορισμένα σημεία του κινητήρα όπως στα τυλίγματα στο διάκενο, στην λαμαρίνα, στο κέλυφος κλπ. Στην συνέχεια δίνεται ένα τέτοιο ενδεικτικό διάγραμμα για την μόνιμη λειτουργία της μηχανής.



Σχ. 2.16 Θερμική ανάλυση μεταβατικής κατάστασης, αποτελεί το πρώτο στάδιο εκτίμησης της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα. (First Stage of Thermal Analysis)

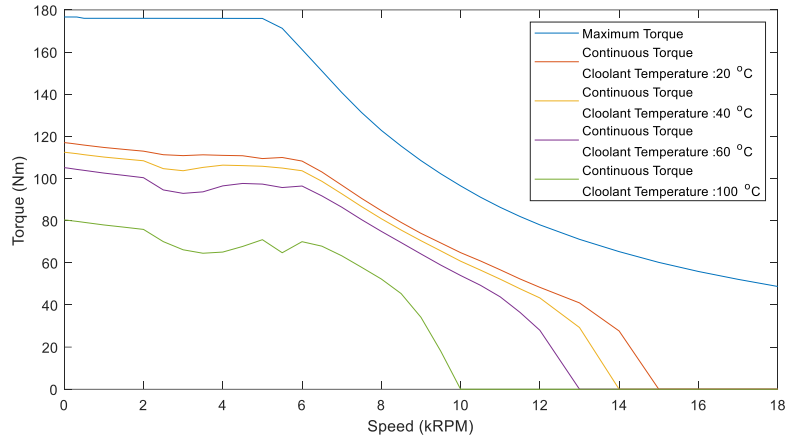
Το δεύτερο στάδιο είναι η χρήση του τρόπου ανάλυσης του πρώτου σταδίου σε όλα τα λειτουργικά σημεία της μηχανής με στόχο την διεξαγωγή χωρίου λειτουργικών καταστάσεων που η μηχανή μπορεί να λειτουργεί μόνιμα σε αυτές τις καταστάσεις χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης. Σε αυτό το στάδιο κύριας σημασίας είναι η ροή και η θερμοκρασία λαδιού στην είσοδο. Ουσιαστικά η απεικόνιση του χωρίου γίνεται με υπολογισμό, της μέγιστης ροπής που μπορεί να λειτουργεί μόνιμα ο κινητήρας στην εκάστοτε ταχύτητα. Τέλος, για να εκτιμηθεί ή όχι το αν μπορεί ο κινητήρας να λειτουργεί στην εκάστοτε λειτουργική κατάσταση απαραίτητο είναι να τεθούν όρια θερμοκρασίας στα διάφορα μέρη και υλικά του κινητήρα. Στην συνέχεια δίνεται ο πίνακας των μέγιστων θερμοκρασιών για τα διάφορα σημεία και υλικά του κινητήρα.

Υλικό	Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)
Χαλκός	Άκρα Τυλίγματος	150
Χαλκός	Αυλάκια Στάτη	150
Μονωτικό Χαρτί	Αυλάκια Στάτη	180
Πυρήνας	Στάτης	180
Πυρήνας	Δρομέας	180
Μαγνήτης	Θέσεις Δρομέα	115
Χάλυβας	Άξονας Δρομέα	180
Λάδι	Αύλακες Ψύξης	180

Πίν. 2.2 Μέγιστες θερμοκρασίες του κινητήρα.

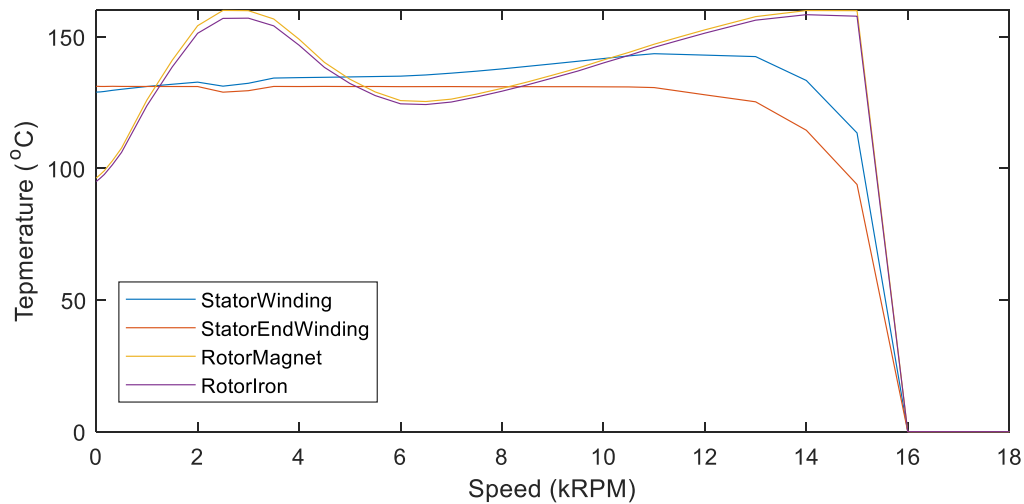
Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα μπορεί να υπολογιστεί ποια είναι η καμπύλη (Ροπή, Ταχύτητας) στην οποία η μηχανή μπορεί να λειτουργεί για χρονικό διάστημα 1800 δευτερολέπτων ή ισοδυνάμως για μισή ώρα.

Στο σχήμα 2.17 δίνονται διαγράμματα μέγιστης συνεχής ισχύος για διαφορετικές θερμοκρασίες ψυκτικού λαδιού στην είσοδο της μηχανής.



Σχ. 2.17 Καμπύλες Μέγιστης και Συνεχούς ροπής για θερμοκρασία ψυκτικού 20C έως 100C.

Στην παραπάνω ανάλυση μπορεί να ερευνηθεί και πιο από τα θερμικά όρια τείνει να ξεπεραστεί όταν η μηχανή λειτουργεί ακριβώς πάνω στο όριο συνεχούς ισχύος. Στο σχήμα 5.6 δίνεται η θερμοκρασία των διαφόρων υλικών της μηχανής κατά μήκος της καμπύλης μέγιστης συνεχούς ισχύος. Παρατηρείται πως στις χαμηλές ταχύτητες το όριο στην μέγιστη συνεχή ροπή υπεισέρχεται λόγω της θερμοκρασίας στα άκρα του τυλίγματος ενώ στην περιοχή υψηλής ταχύτητας το όριο θέτεται από τη θερμοκρασία του μαγνήτη ή/και τη θερμοκρασία του δρομέα.

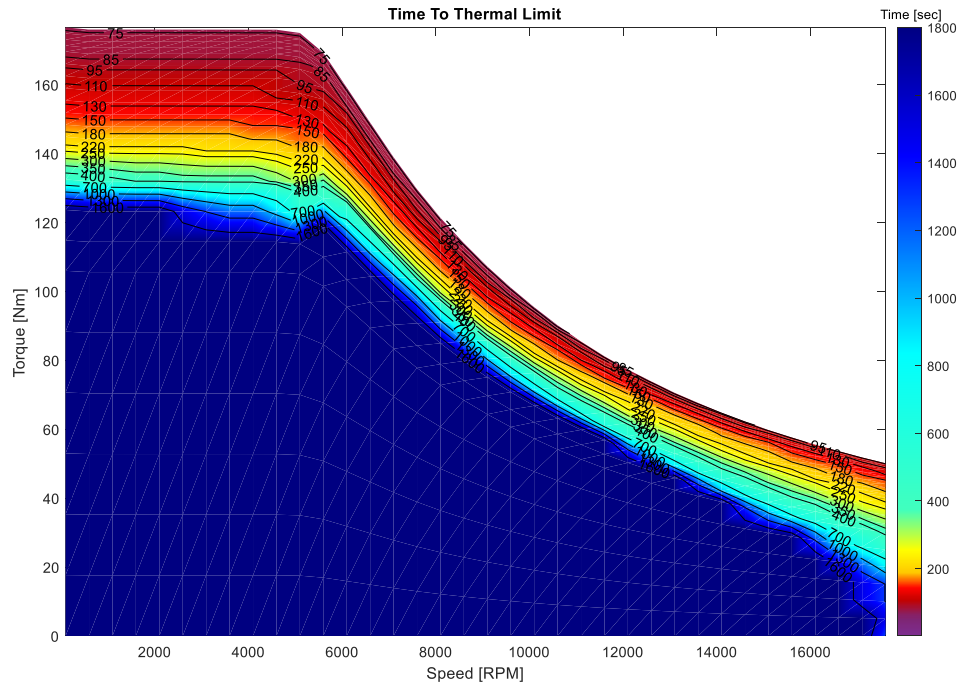


Σχ. 2.18 Μέγιστη θερμοκρασία σημείων του κινητήρα κατά μήκος της καμπύλης συνεχούς ροπής - Θερμοκρασία ψυκτικού 20C.

Το τρίτο στάδιο της θερμικής ανάλυσης αφορά τον υπολογισμό του μέγιστου χρόνου που μπορεί η μηχανή να λειτουργεί σε κάποια ορισμένη λειτουργική κατάσταση. Ο υπολογισμός του χρόνου αυτού είναι σημαντικός καθώς η μηχανή οφείλει να μπορεί για ορισμένα δευτερόλεπτα να αποδώσει τη μέγιστη ισχύ της χωρίς να υπάρχει κίνδυνος βλάβης και υπέρβασης των θερμοκρασιακών ορίων που έχουν τεθεί.

Αρχικά υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε το εκάστοτε υλικό να φτάσει στο θερμικό του όριο και στη συνέχεια λαμβάνεται υπόψιν μόνο ο μικρότερος χρόνος που οδηγεί έστω ένα σημείο της μηχανής στα θερμικά του όρια. Ένα τέτοιο διάγραμμα δίνεται στο σχήμα 2.19.

Σημαντικό είναι να τονιστεί πως η μηχανή θεωρείται πως ξεκινά από θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C) και παραμένει στην ίδια λειτουργική κατάσταση μόνιμα. Στην πράξη η θερμική ανάλυση της μηχανής μπορεί να γίνει σύμφωνα με την λειτουργία που της ανατίθεται να εκτελεί. Για παράδειγμα, ένας κινητήρας ρομποτικού βραχίονα διαπερνά πολλές λειτουργικές καταστάσεις ροπής – ταχύτητας με περιοδικό τρόπο. Σε μία τέτοια μηχανή η θερμική ανάλυση της μπορεί να γίνει σε συνδυασμό με τις συναρτήσεις $T(t)$, $Speed(t)$.



Σχ. 2.19 Χρόνος λειτουργίας έως την υπέρβαση των θερμικών ορίων της μηχανής. (Time to thermal limit)

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

2.9 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [2.3.1] Si, Jikai, Song He, Wenping Cao, Xiaozhuo Xu, and Gaoming Feng. "Electromagnetic Characteristics Analysis of Surface-Mounted and Interior Hybrid Pmsm Based on Equivalent Magnetic Circuit Method." 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS): IEEE, 2014.
- [2.4.1] Deshpande, Yateendra, Hamid A Toliyat, and Xiaoyan Wang. "Standstill Position Estimation of Spmsm." IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society: IEEE, 2012
- [2.4.1] W. Tong, S. Wu, Z. An and R. Tang, "Thermal Analysis of Direct-Drive Permanent Magnet Wind Generator using both Lumped Parameter Network and Finite Element Method," 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010, pp. 1-4.
- [2.4.2] S. Stanton, D. Lin and Z. Tang, "Interior permanent magnet machine analysis using finite element based equivalent circuit model," 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009, pp. 291-294.
- [2.4.3] H. -J. Park, J. -G. Lee, H. -K. Jung and D. -K. Woo, "Improved Quasi-3D finite element method for an axial flux permanent magnet motor," 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2016, pp. 1-1.
- [2.4.4] Q. Hu, W. Chen, Y. Hu, X. Zhu and B. Li, "Asymptotic boundary conditions for the finite element modeling of axisymmetric period permanent magnet structures," 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2017, pp. 1-2.
- [2.4.5] E. Schmidt and A. Eilenberger, "Calculation of Position-Dependent Inductances of a Permanent Magnet Synchronous Machine With an External Rotor by Using Voltage-Driven Finite Element Analyses," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 3, pp. 1788-1791, March 2009.
- [2.4.6] E. Troster, M. Sperling and T. Hartkopf, "Finite element analysis of a permanent magnet induction machine," International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006., 2006.
- [2.4.7] L. Huang, H. Yu, M. Hu, J. Zhao and Z. Cheng, "A Novel Flux-Switching Permanent-Magnet Linear Generator for Wave Energy Extraction Application," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 5, pp. 1034-1037, May 2011.
- [2.4.8] B. -H. Lee, J. -P. Hong and J. -H. Lee, "Optimum Design Criteria for Maximum Torque and Efficiency of a Line-Start Permanent-Magnet Motor Using Response Surface Methodology and Finite Element Method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 863-866, Feb. 2012.
- [2.4.9] J. H. Lee, S. M. Jang, B. D. Lee and H. S. Song, "Optimum design criteria for maximum torque density & minimum current density of a line-start permanent-magnet motor using response surface methodology & finite element method," 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011.
- [2.4.10] K. Kurihara, T. Ito, Y. Imaizumi and T. Kubota, "Efficiency maximization of a single-phase capacitor-run permanent-magnet motor using response surface methodology," 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009.
- [2.4.11] X. Liu and W. N. Fu, "A Dynamic Dual-Response-Surface Methodology for Optimal Design of a Permanent-Magnet Motor Using Finite-Element Method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 3, pp. 1-4, March 2016.
- [2.4.12] S. L. Ho, S. Niu and W. N. Fu, "Transient Analysis of a Magnetic Gear Integrated Brushless Permanent Magnet Machine Using Circuit-Field-Motion Coupled Time-Stepping Finite Element Method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6, pp. 2074-2077, June 2010.
- [2.4.13] Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Y. Hur and Yeon-Hwan Jung, "Optimization for reduction of torque ripple in interior permanent magnet motor by using the Taguchi method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 5, pp. 1796-1799, May 2005.
- [2.4.14] D. Xie, W. Zhang, B. Bai, L. Zeng and L. Wang, "Finite Element Analysis of Permanent Magnet Assembly With High Field Strength Using Preisach Theory," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, no. 4, pp. 1393-1396, April 2007.
- [2.4.15] Baodong Bai, Jianbin Zeng, Lisheng Wang and DexinXie, "Finite element analysis of high field permanent magnet mechanism using vector Preisach hysteresis model," 2008 World Automation Congress, 2008
- [2.4.16] J. A. Farooq, A. Djerdir and A. Miraoui, "Analytical Modeling Approach to Detect Magnet Defects in Permanent-Magnet Brushless Motors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 12, pp. 4599-4604, Dec. 2008.
- [2.4.17] T. -C. Jeong et al., "Current Harmonics Loss Analysis of 150-kW Traction Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Through Co-Analysis of d-q Axis Current Control and Finite Element Method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 5, pp. 2343-2346, May 2013.
- [2.4.18] E. Schmidt and M. Sušić, "Parameter evaluation of permanent magnet synchronous machines with tooth coil windings using the frozen permeabilities method with the finite element analyses," 2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2012.

- [2.4.19] L. F. de Assis, C. -C. Lemes Filho, G. Teixeira de Paula and B. Pinheiro de Alvarenga, "Comparative Analysis of Different Methods Associated to the Frozen Permeability Method for On-Load Cogging Torque Evaluation in Permanent Magnet Synchronous Machines," in IEEE Latin America Transactions, vol. 19, no. 02, pp. 199-207, February 2021.
- [2.4.20] J. A. Walker, D. G. Dorrell and C. Cossar, "Flux-linkage calculation in permanent-magnet motors using the frozen permeabilities method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 10, pp. 3946-3948, Oct. 2005.
- [2.4.21] Yubo Yang, Xiuhe Wang, Rong Zhang, Tingting Ding and Renyuan Tang, "The optimization of pole arc coefficient to reduce cogging torque in surface-mounted permanent magnet motors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 1135-1138, April 2006.
- [2.4.22] A. Wang, H. Li and C. -T. Liu, "Assessments of magnetic cross-coupling impacts on interior permanent magnet machine controls for electric vehicles," 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2009, pp. 1435-1438.
- [2.4.23] H. Zhong, B. Peng, A. Chen and Y. Wang, "Primary Iron Loss Analysis on Tubular Permanent Magnet Linear Motor," 2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2018.
- [2.4.24] E. Schmidt, M. Kaltenbacher and A. Wolfschluckner, "Eddy current losses in permanent magnets of permanent magnet synchronous machines — Analytical calculation methods and high order finite element analyses," 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014.
- [2.4.25] P. P. de Paula, S. I. Nabeta and A. Foggia, "An aspect of modelling a permanent magnet motor by using the finite-element method coupled with circuit equations," IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No.99EX272), 1999, pp. 135-137.
- [2.4.26] B. Xie, Y. Zhang, J. Wang, B. Liang, F. Zhang, "An efficient multidisciplinary design research for the integrated low speed permanent magnet motor system based on analytical and numerical hybrid analysis", Energy Reports, Vol. 8, Supp. 5, 2022, pp. 199-208.
- [2.4.27] Y. Chen, J. Zhou, Y. Fang, Y. Gao and Y. Xia, "Multi-field coupling finite-element analysis of the temperature rise in permanent magnet synchronous motor applied for high speed train," 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.
- [2.4.28] W. N. Fu and Z. J. Liu, "Estimation of eddy-current loss in permanent magnets of electric motors using network-field coupled multislice time-stepping finite-element method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, no. 2, pp. 1225-1228, March 2002.
- [2.4.29] S. L. Ho and H. L. Li, "Dynamic modeling of permanent magnet synchronous machines using direct-coupled time stepping finite element method," IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No.99EX272), 1999, pp. 113-115.
- [2.4.30] Liu Ruifang, Zhang Yihuang, Hu Minqiang and Yan Dengjun, "Field circuit coupled time stepping finite element analysis on permanent magnet brushless DC motors," 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005, pp. 2105-2108 Vol. 3.
- [2.4.31] C. Patsios, A. Chaniotis, E. Tsampouris and A. Kladas, "Particular Electromagnetic Field Computation for Permanent Magnet Generator Wind Turbine Analysis," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 8, pp. 2751-2754, Aug. 2010.
- [2.4.32] D. Fu, Y. Xu, F. Gillon, J. Gong and N. Bracikowski, "Presentation of a Novel Transverse-Flux Permanent Magnet Linear Motor and Its Magnetic Field Analysis Based on Schwarz–Christoffel Mapping Method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 3, pp. 1-4, March 2018.
- [2.4.33] S. L. Ho, N. Chen and W. N. Fu, "An Optimal Design Method for the Minimization of Cogging Torques of a Permanent Magnet Motor Using FEM and Genetic Algorithm," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 861-864, June 2010.
- [2.4.34] T. Nakata, M. Sanada, S. Morimoto and Y. Inoue, "Automatic design of IPMSMs using a GA coupled with the coarse-mesh finite element method," 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.
- [2.4.35] D. Iles-Klumpner, M. Risticvic, I. Serban and I. Boldea, "Topology Optimization of an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Using a Coupled Finite Elements ! Genetic Algorithms Technique," 2006 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, 2006, pp. 501-501.
- [2.4.36] S. Sun, F. Jiang, T. Li and K. Yang, "Optimization of Cogging Torque in A Hybrid Axial and Radial Flux Permanent Magnet Machine," 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.
- [2.4.37] C. Candela, M. Morin, F. Blazquez and C. A. Platero, "Optimal design of a salient poles permanent magnet synchronous motor using geometric programming and finite element method," 2008 18th International Conference on Electrical Machines, 2008.
- [2.4.38] C. Liu, R. Dong, B. Ye, "Comprehensive sensitivity analysis and multi-objective optimization on a permanent magnet linear generator for wave energy conversion", Renewable Energy, Vol. 8, 2022, pp. 841-850.

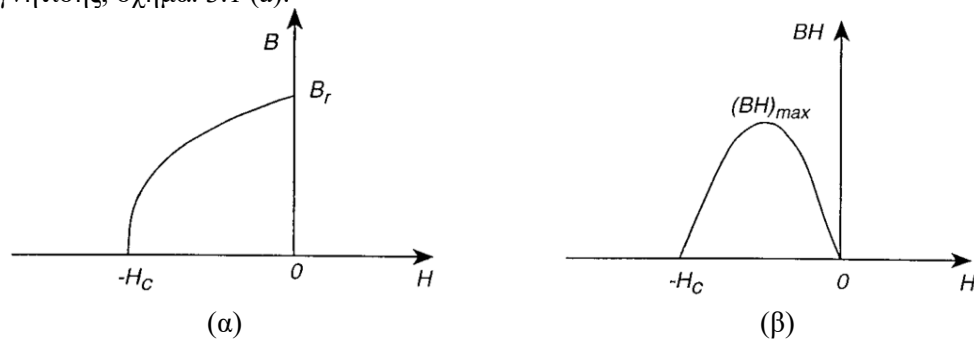
- [2.4.39] S. Meo, A. Zohoori, A. Vahedi, "Optimal design of permanent magnet flux switching generator for wind applications via artificial neural network and multi-objective particle swarm optimization hybrid approach", *Energy Conversion and Management*, Vol. 110, 2016, pp. 230-239.
- [2.4.40] D.K. Lim, Y.S. Cho, J.S. Ro, S.Y. Jung and H.K. Jung, "Optimal Design of an Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for the Electric Bicycle," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 3, pp. 1-4, March 2016.
- [2.5.1] Janaszek, Michał. "Extended Clarke Transformation for N-Phase Systems." *Proceedings of Electrotechnical Institute* 63, no. 0 (2016): 5-26.
- [2.6.1] Bianchi, Nicola, Silverio Bolognani, and Michele Dai Pre. "Design of a FaultTolerant Ipm Motor for Electric Power Steering." 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference: IEEE, 2005.
- [2.7.1] Tsunata, Ren, Masatsugu Takemoto, Satoshi Ogasawara, and Koji Orikawa. "A Proposal of a Delta-Type Salient Pole Variable Flux Memory Motor Having Large Flux Barrier for Traction Applications." 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE): IEEE.
- [2.8.1] Staton, David. "Improving Motor Efficiency and Motor Miniaturization The Role of Thermal Simulation." 2019 22th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS): IEEE, 2019.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

3.1 Μόνιμοι Μαγνήτες

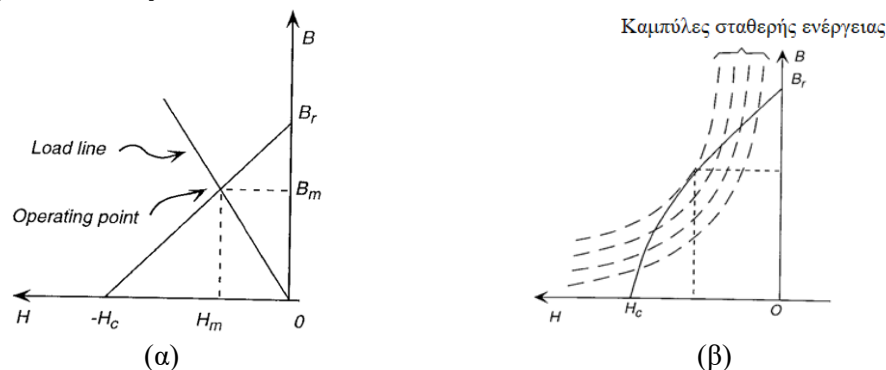
Όπως προαναφέρθηκε τα σκληρά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από χαμηλή διαπερατότητα και υψηλή τιμή συνεκτικού πεδίου. Η τελευταία ιδιότητα τα κάνει δύσκολα να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν. Αυτά τα υλικά καλούνται μόνιμοι μαγνήτες καθώς όταν μαγνητιστούν τείνουν να παραμένουν μαγνητισμένα. Οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται ως πηγές πεδίου σε μία ευρεία γκάμα ηλεκτρομηχανικών διατάξεων.

Οι ιδιότητες πρωταρχικής σημασίας στην επιλογή ενός μαγνητικού υλικού είναι αυτές που ορίζουν το μέγεθος και τη σταθερότητα του πεδίου που μπορούν να παρέχουν. Αυτά συμπεριλαμβάνουν την τιμή του συνεκτικού πεδίου H_c , την τιμή μαγνήτισης κορεσμού M , την παραμένουσα μαγνήτιση B_r , όπως και την μορφή του βρόχου υστέρησης στο δεύτερο τεταρτημόριο. Το τμήμα αυτό του βρόχου υστέρησης αποκαλείται χαρακτηριστική απομαγνήτισης, σχήμα. 3.1 (α).



Σχ. 3.1 B - H καμπύλη δεύτερου τεταρτημόριου (α) καμπύλη απομαγνήτισης και (β) $B \cdot H$ συνάρτηση του H .

Τα σημεία (B, H) στην χαρακτηριστική απομαγνήτισης ορίζουν ένα ενεργειακό γινόμενο $B \cdot H$ το οποίο παίρνει μια μέγιστη τιμή $(B \cdot H)_{max}$ στο διάστημα $-H_c < H < 0$ όπως φαίνεται και στο εικόνα 3.1 (β). Όταν ένας μόνιμος μαγνήτης χρησιμοποιείται σαν πηγή πεδίου τότε πολώνεται σε ένα λειτουργικό σημείο (B_m, H_m) της χαρακτηριστικής απομαγνήτισης του. Το λειτουργικό σημείο εξαρτάται από το κύκλωμα στο οποίο χρησιμοποιείται. Μπορεί να προσδιοριστεί από τη γραμμή φορτίου του κυκλώματος. Αυτή τέμνει την χαρακτηριστική απομαγνήτισης στο σημείο (B_m, H_m) όπως φαίνεται στο εικόνα 3.2 (α). Είναι επιθυμητό να πολωθεί ο μαγνήτης στο σημείο μέγιστης ενέργειας $(B \cdot H)_{max}$. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του όγκου του μαγνήτη και της μείωσης του κόστους του.



Σχ. 3.2 (α) Χαρακτηριστική απομαγνήτισης και γραμμή φορτίου. (β) Καμπύλες σταθερής ενέργειας στο δεύτερο τεταρτημόριο.

Το γινόμενο ενέργειας για ένα δεδομένο υλικό και κύκλωμα μπορεί να προσδιοριστεί από καμπύλες σταθεράς ενέργειας του δεύτερου τεταρτημορίου όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2 (β). Αυτές συνήθως απεικονίζονται στις καμπύλες απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών από τους κατασκευαστές.

3.1.1 Μόνιμοι μαγνήτες Σαμάριου-Κοβάλτιου (SmCo)

Η ανάπτυξη των μονίμων μαγνητών σαμάριου-κοβάλτιου (SmCo) ξεκίνησε το 1960. Το σαμάριο είναι μία από τις σπάνιες γαίες που αποτελούν μία μεταβατική ομάδα με ατομικούς αριθμούς από 58 (Ce) έως 71 (Lu). Η ανάπτυξη των μονίμων μαγνητών SmCo από έρευνα η οποία κατευθυνόταν στον σχηματισμό κραμάτων των σπάνιων γαιών με τους σιδηρομαγνήτες της σειράς μετάβασης, σίδηρο, κοβάλτιο και νικέλιο. Οι δύο πιο κοινοί τύποι μαγνητών SmCo είναι οι SmCo₅ και Sm₂Co₁₇. Οι πρώτοι μαγνήτες σαμάριου-κοβάλτιου κατασκευάστηκαν με τη δέσμευση κονιορτοποιημένου SmCo₅ σε ρητίνη. Η επακόλουθη παραγωγή συνεπαγόταν το σχηματισμό του κράματος βάσης χρησιμοποιώντας είτε μια διαδικασία αναγωγής/τήξης είτε αναγωγής/διάχυσης. Στη διαδικασία αναγωγής/τήξης Sm και Co αναμειγνύονται και τήκονται με επαγωγή για να σχηματιστεί το κράμα. Το χυτό κράμα είναι εύθραυστο και αλέθεται εύκολα σε σκόνη λεπτού κόκκου. Στη διαδικασία αναγωγής/διάχυσης το οξείδιο του σαμάριου (Sm₂O₃) και το κονιοποιημένο κοβάλτιο αντιδρούν με το ασβέστιο (Ca) περίπου στους 1150 °C για να σχηματίσουν την παρακάτω ένωση:



Το CaO διαχωρίζεται από την ένωση μέσω μιας αλληλουχίας σταδίων ξεκινώντας με αντίδραση με νερό, ακολουθούμενο από βαρυμετρικό διαχωρισμό του υδροξειδίου, ακολουθούμενο από έκπλυση με οξύ και στη συνέχεια ξήρανση. Μόλις σε μορφή σκόνης, χρησιμοποιούνται μεταλλουργικές μέθοδοι σκόνης για να σχηματιστεί το επιθυμητό εικόνα μαγνήτη. Οι μαγνήτες σαμάριου-κοβάλτιου χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές συνεκτικού πεδίου και σχεδόν γραμμικές χαρακτηριστικές απομαγνήτισης δεύτερου τεταρτημορίου. Αυτό υποδηλώνει ότι ο κυρίαρχος μαγνητικός μηχανισμός για αυτό το υλικό είναι η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία. Ωστόσο, οι κόκκοι στις σκόνες SmCo έχουν τυπικά διάμετρο 5-10 μm, που είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από το μέγεθος ενός τομέα. Αυτό το σχετικά μεγάλο μέγεθος κόκκου το καθιστά ενεργειακά ευνοϊκό για το σχηματισμό τοιχωμάτων τομέων μέσα σε κάθε κόκκο. Έτσι, κάθε κόκκος μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλούς τομείς. Στο SmCo₅, τα τοιχώματα των μαγνητικών τομέων κινούνται με σχετική ευκολία μέσα σε κάθε κόκκο. Η υψηλή τιμή συνεκτικού πεδίου αυτών των μαγνητών μπορεί να εξηγηθεί από τις περιορισμένες θέσεις πυρήνων για τα τοιχώματα της περιοχής και την παγίδευση των τοιχωμάτων της περιοχής στα όρια των κόκκων που εμποδίζει την ανάπτυξη των τομέων από κόκκο σε κόκκο. Στο Sm₂Co₁₇, οι υψηλές τιμές συνεκτικού πεδίου αποδίδονται στην παγίδευση των τοιχωμάτων των μαγνητικών τομέων. Οι ιδιότητες των SmCo₅ και Sm₂Co₁₇ δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.1.

Quantity	Units	SmCo ₅	Sm ₂ Co ₁₇
B _r	T	0.83	1
H _c	kA/m	600	480
jH _i	kA/m	1440	558
BH _{max}	kJ/m ³	128	192
μ _r		1.05-1.1	1.05
ρ	kg/m ³	8200	8100
T _C	°C	700	750

Πίν. 3.1 Ιδιότητες μόνιμων μαγνητών σαμάριου-κοβάλτιου

3.1.2 Θερμοκρασιακή Μεταβολή Μαγνήτισης Μόνιμων Μαγνητών

Το σημείο λειτουργίας ενός μόνιμου μαγνήτη εξαρτάται από την γραμμή φορτίου του και από την χαρακτηριστική απομαγνήτισης του. Η βέλτιστη σχεδίαση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις

μεταβολές στο περιβάλλον έτσι ώστε η επίδοση του μόνιμου μαγνήτη να παραμένει εντός αποδεκτών ορίων σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του. Το παραπάνω αφορά στην ευστάθεια.

Η χαρακτηριστική φορτίου ενός μόνιμου μαγνήτη είναι συνάρτηση του μαγνητικού κυκλώματος. Άρα η ευστάθεια της χαρακτηριστικής φορτίου λαμβάνεται υπόψη ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Πάραυτα η ευστάθεια της χαρακτηριστικής απομαγνήτισης εξαρτάται από παράγοντες που είναι κοινοί για όλες τις εφαρμογές.

Οι μαγνητικές ιδιότητες και συνεπώς η χαρακτηριστική απομαγνήτισης εξαρτάται από πολλές μεταβλητές συμπεριλαμβανομένου της θερμοκρασίας, της πίεσης και του εφαρμοζόμενου πεδίου. Οι μαγνητικές ιδιότητες αλλάζουν λόγω μεταβολών των παραπάνω μεταβλητών και οι αλλαγές αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν ως αντιστρέψιμες, μη αντιστρέψιμες και δομικές. Αντιστρέψιμες αλλαγές λαμβάνουν χώρα όταν οι μαγνητικές ιδιότητες αλλάζουν με την μεταβολή της τιμής μίας μεταβλητής, αλλά επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση όταν η συγκεκριμένη μεταβλητή επιστρέψει στην αρχική της τιμή. Για παράδειγμα ο βρόχος υστέρησης ενός μαγνήτη αλλάζει με την θερμοκρασία και για ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών οι αλλαγές αυτές είναι αντιστρέψιμες και γραμμικές. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να περιγραφούν από αντιστρέψιμους θερμοκρασιακούς συντελεστές για την παραμένουσα μαγνήτιση B_r , την τιμή του συνεκτικού πεδίου H_c και την εσωτερική τιμή συνεκτικού πεδίου jH_c . Οι συντελεστές αυτοί περιγράφονται ως ποσοστιαίες αλλαγές ανά $^{\circ}\text{C}$. Όλοι οι μόνιμοι μαγνήτες παρουσιάζουν μείωση στην παραμένουσα μαγνήτιση καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Πάραυτα η αλλαγή στην τιμή του συνεκτικού πεδίου μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με τον πρωταρχικό μηχανισμό ανισοτροπίας του υλικού. Οι περισσότεροι μαγνήτες παρουσιάζουν μείωση του H_c με την αύξηση της θερμοκρασίας, δηλαδή αρνητικός συντελεστής για το H_c . Πάραυτα οι κεραμικοί μαγνήτες έχουν θετικό συντελεστή της τάξης του $0.02\% / ^{\circ}\text{C}$. Ένας σχεδιαστής πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτές τις αλλαγές προκειμένου να διασφαλίσει ότι το λειτουργικό σημείο ενός μόνιμου μαγνήτη κυμαίνεται μεταξύ αποδεκτών ορίων με τις μεταβολές της θερμοκρασίας λειτουργίας. Στον πίνακα 3.2 φαίνονται οι θερμοκρασιακοί συντελεστές για διάφορους μόνιμους μαγνήτες, ενώ στο σχήμα 3.3 απεικονίζονται χαρακτηριστικές απομαγνήτισης μόνιμων μαγνητών SmCo σε διάφορες θερμοκρασίες.

Quantity	Units	Alnico 5	Ferrite	SmCo ₅	NdFeB
α coef. (B_r)	%/ $^{\circ}\text{C}$	-0.02	-0.2	-0.04	-0.12
β coef. (jH_i)	%/ $^{\circ}\text{C}$	-0.03	+0.4	-0.3	-0.6
$T_{\text{Max Op.}}$	$^{\circ}\text{C}$	520	400	250	150
T_c	$^{\circ}\text{C}$	720	450	725	310

Πίν. 3.2 Θερμοκρασιακοί συντελεστές για διάφορους μόνιμους μαγνήτες.

Σε μια μη αναστρέψιμη αλλαγή στη μαγνήτιση, οι μαγνητικές ιδιότητες αλλάζουν ως απόκριση σε μια μεταβολή σε μια μεταβλητή και παραμένουν αλλαγμένες ακόμα και όταν η μεταβλητή επιστρέψει στην αρχική της τιμή. Για να αποκατασταθούν οι αρχικές ιδιότητες ο μαγνήτης πρέπει να επαναμαγνητιστεί. Για παράδειγμα, ένα σιδηρομαγνητικό δείγμα υφίσταται μια μη αναστρέψιμη αλλαγή όταν η θερμοκρασία αυξηθεί πάνω από τη θερμοκρασία Curie. Μόλις υπερβεί τη θερμοκρασία Curie, το δείγμα γίνεται παραμαγνητικό. Οι τομείς του διατηρούν έναν τυχαίο προσανατολισμό καθώς ψύχεται, γεγονός που το καθιστά μη μαγνητισμένο. Το δείγμα μπορεί να επαναμαγνητιστεί στην αρχική του κατάσταση με την προϋπόθεση ότι δεν έχει αλλοιωθεί η μεταλλουργική του δομή.

Οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν επίσης να προκαλέσουν αλλαγές στη δομή των μαγνητικών τομέων. Αμέσως μετά τη μαγνήτιση, το δείγμα υφίσταται μια χρονοβόρα διαδικασία κατά την οποία οι ασταθείς μαγνητικοί τομείς μεταβαίνουν σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση μέσω διάφορων μηχανισμών, συμπεριλαμβανομένης της κίνησης των τοιχωμάτων των μαγνητικών τομέων. Τέτοια μη αναστρέψιμα αποτελέσματα είναι γνωστά ως μαγνητικό ιξώδες τα οποία μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Ένα άλλο παράδειγμα μη αναστρέψιμης αλλαγής είναι όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό πεδίο απομαγνήτισης H που υπερβαίνει το εσωτερικό συνεκτικό πεδίο

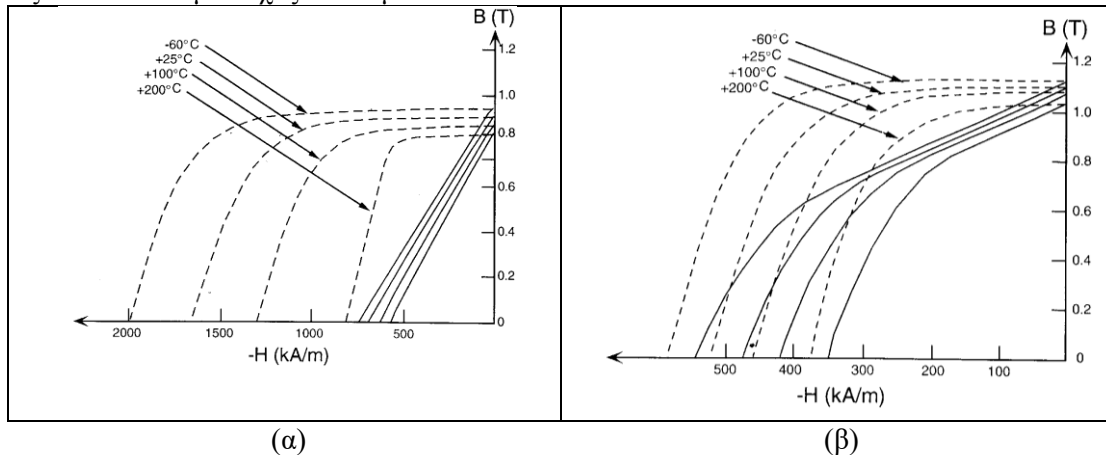
j_H του δείγματος. Η μαγνήτιση περιστρέφεται μη αναστρέψιμα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Και πάλι, το δείγμα μπορεί να επαναμαγνητιστεί στην αρχική του κατάσταση.

Οι δομικές αλλαγές συνεπάγονται μια μόνιμη αλλαγή στη μεταλλουργική κατάσταση ενός μαγνήτη. Τέτοιες αλλαγές δεν μπορούν να αναιρεθούν με επαναμαγνητισμό. Η διάβρωση και η οξείδωση είναι παραδείγματα δομικών αλλαγών. Οι μόνιμοι μαγνήτες σαμάριου-κοβαλτίου, οι κεραμικοί και οι τύπου Alnico είναι ανθεκτικοί στην οξείδωση, αλλά οι μαγνήτες σπάνιων γαιών δεν είναι. Η οξείδωση είναι σημαντική σε μόνιμους μαγνήτες $Nd_2Fe_{14}B$. Το οξυγόνο διαχέεται σε αυτό το υλικό σε υψηλές θερμοκρασίες, προκαλώντας τη δημιουργία ενός οξειδωμένου στρώματος. Το πάχος του οξειδωμένου στρώματος d αυξάνεται ανάλογα με τη σχέση:

$$d = f(T)\sqrt{t} \quad (3.1)$$

όπου $f(T)$ εκφράζει μη γραμμική θερμοκρασιακή συνάρτηση.

Το οξειδωμένο στρώμα έχει χαμηλότερη τιμή εσωτερικού συνεκτικού πεδίου από το σώμα του μαγνήτη και απομαγνητίζεται πιο εύκολα από το εσωτερικό πεδίο του μαγνήτη. Αυτό το στρώμα υποβαθμίζει την απόδοση επειδή: (α) μειώνει τον ενεργό όγκο του μαγνήτη και (β) εκτρέπει το πεδίο από το εσωτερικό του μαγνήτη. Η οξείδωση μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας τη σύνθεση του υλικού ή/και επικαλύπτοντας τον μαγνήτη. Κοινά υλικά επιστροφής περιλαμβάνουν το νικέλιο, τον ψευδάργυρο (Zn) και το αλουμίνιο (Al) με πάχος 10-20 μm ή εποξειδικά υλικά με πάχος 20-30 μm .



Σχ. 3.3 Χαρακτηριστικές απομαγνήτισης πυρροσυσσωματωμένων SmCo μαγνητών: (α) SmCo5 και (β) Sm2Co17. Οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν χαρακτηριστικές μορμ. $\vec{M}$.

3.1.3 Θερμικά Μοντέλα Μόνιμων Μαγνητών

Η εξάρτηση της μαγνήτισης από τη θερμοκρασία είναι μη γραμμική αλλά υπάρχουν προσεγγιστικά μοντέλα [3.1.4]. Η πιο κοινή προσέγγιση είναι η περιγραφή της συνάρτησης θερμοκρασίας με ένα γραμμικό μοντέλο [3.1.5], [3.1.6], [3.1.7]. Αυτό απεικονίζεται στο εικόνα 4.14 όπου η γραμμικότητα δημιουργείται για ένα τοπικό διάστημα της θερμοκρασίας, $T_i - T_{i-1}$. Σε αυτή την τεχνική μπορεί να θεωρηθεί ότι η παραμένουσα μαγνήτιση σε μακροσκοπικό επίπεδο μπορεί να συσχετίζεται προσεγγιστικά με την αυθόρμητη μαγνήτιση σε μικροσκοπικό επίπεδο.

Η μαγνήτιση μοντελοποιείται από μία γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας η οποία μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας T [3.1.8]. Ανάλογα η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r μοντελοποιείται από μία γραμμική συνάρτηση [3.1.9], [3.1.10]. Συνήθως εκφράζεται σαν ποσοστό επί τοις εκατό ανά βαθμό Κελσίου όπως αναφέρθηκε παραπάνω (% / °C) [3.1.11] και δίνεται από την εξίσωση (4.2).

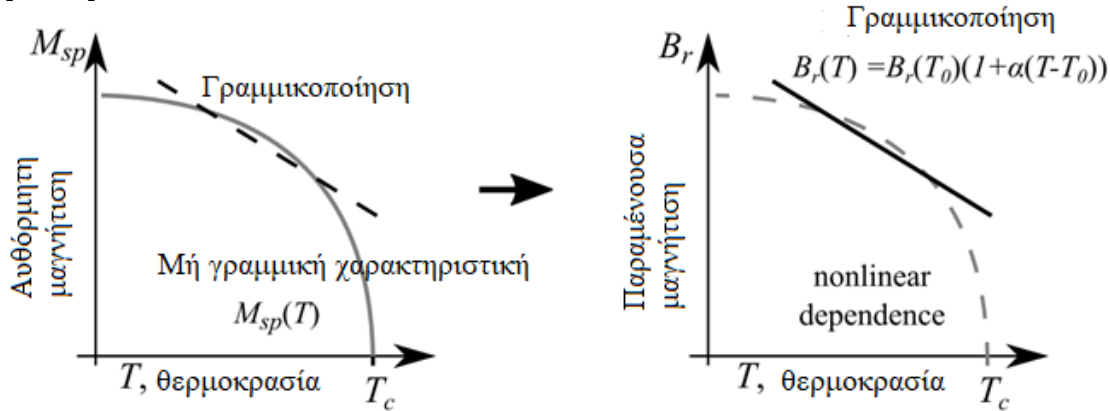
$$B_r(T) = B_r(T_0) \cdot (1 + a_{coef} \cdot (T - T_0)) \quad (3.2)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις εκφράζουν ένα διάστημα της γραμμικότητας σε μια θερμοκρασία T που σχετίζεται με μια θερμοκρασία αναφοράς T_0 , η οποία συνήθως είναι 20 °C. Εφόσον η κλίση της γραμμικής συνάρτησης αλλάζει για διαφορετικά διαστήματα θερμοκρασίας, το διάστημα $T_i - T_{i-1}$ πρέπει να καθοριστεί εκ νέου.

Ένα ανάλογο μοντέλο χρησιμοποιείται για την περιγραφή του συνεκτικού πεδίου σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.

$${}_jH_c(T) = {}_jH_c(T_0) \cdot (1 + \beta_{coef} \cdot (T - T_0)) \quad (3.3)$$

Οι παράμετροι της κλίσης της γραμμικής συνάρτησης στα δύο μοντέλα είναι αντίστοιχα οι α , β [3.1.7], [3.1.12]. Δεδομένου ότι το πρότυπο IEC χρησιμοποιεί και για τα δύο μοντέλα το ίδιο σύμβολο α , είναι απαραίτητο να γίνεται η ακόλουθη διάκριση για τα δύο μοντέλα, $\alpha(B_r)$ και $\alpha(H_c)$ [3.1.12].



Σχ. 3.4 Μη γραμμική σχέση μεταξύ αυθόρμητης μαγνήτισης και μαγνητικής επαγωγής με την θερμοκρασία

Καθώς η κλίση είναι διαφορετική για διαφορετικά διαστήματα θερμοκρασίας $T_i - T_{i-1}$ ένα μη γραμμικό μοντέλο θα ήταν πιο κατάλληλο σε σχέση με το γραμμικό. Ένα τέτοιο εναλλακτικό μοντέλο έχει προταθεί με δευτέρου βαθμού πολυώνυμα [3.1.13], [3.1.14] για την παραμένουσα μαγνητική επαγωγή και το συνεκτικό πεδίο.

$$B_r(T) = B_r(T_0) \cdot (1 + \alpha_{coef1} \cdot (T - T_0) + \alpha_{coef2} \cdot (T - T_0)^2) = B_r(T_0) \cdot P(T) \quad (3.4)$$

$${}_jH_c(T) = {}_jH_c(T_0) \cdot (1 + \beta_{coef1} \cdot (T - T_0) + \beta_{coef2} \cdot (T - T_0)^2) = {}_jH_c(T_0) \cdot Q(T) \quad (3.5)$$

Τα μοντέλα των μόνιμων μαγνητών δεν βασίζονται μόνο στην απομαγνητίζουσα δύναμη και την παραμένουσα μαγνητική επαγωγή και δεν είναι πλήρη χωρίς την μοντελοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας. Για παράδειγμα στους μόνιμους μαγνήτες NdFeB ενώ η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας [3.1.8]. Ένα μοντέλο για την διαπερατότητα ανάκρουσης μπορεί να αναπτυχθεί το οποίο λαμβάνει υπόψη την θερμοκρασία. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ένα παρόμοιο γραμμικό μοντέλο που αναπτύχθηκε αρχικά για τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά [3.1.15].

$$\mu(T) = \mu(T_0) (1 + \alpha_{coef} \cdot \mu(T_0) (T - T_0)) \quad (3.6)$$

Το παραπάνω θερμικό μοντέλο της παραμένουσας μαγνήτισης, απομαγνητίζουσας δύναμης και διαπερατότητας βασίζεται στην αλλαγή των κυρίων παραμέτρων. Το μοντέλο μπορεί να γίνει πιο περίπλοκο αν χρησιμοποιηθεί σιγμοειδής συνάρτηση, όπως για παράδειγμα η συνάρτηση $\tanh$.

Μπορεί να μοντελοποιηθεί η χαρακτηριστική $B-H$ χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση όπως στις αναφορές [3.1.2], [3.1.3] και [3.1.5].

$$B_i(H,T)=P(T) \cdot \left(b_0 \cdot \tanh\left(\frac{H+Q(T) \cdot j \cdot H_c(T_0)}{Q(T) \cdot h_0}\right) + b_1 \cdot \tanh\left(\frac{H+Q(T) \cdot j \cdot H_c(T_0)}{Q(T) \cdot h_1}\right) \right) \quad (3.7)$$

όπου η συνάρτηση $P(T)$ εκφράζει το κάθετο τμήμα του βρόχου το σχετιζόμενο με την παραμένουσα μαγνήτιση και η συνάρτηση $Q(T)$ το οριζόντιο τμήμα του βρόχου που σχετίζεται με την απομαγνητίζουσα δύναμη.

Το γραμμικό θερμικό μοντέλο είναι κατάλληλο για να εφαρμοστεί σε μικρά διαστήματα θερμοκρασίας $T_i - T_{i-1}$. Πάραυτα δεν είναι κατάλληλο για μεγάλα θερμοκρασιακά διαστήματα καθώς η μαγνήτιση μειώνεται απότομα σε υψηλές θερμοκρασίες, ειδικά σε μόνιμους μαγνήτες NdFeB.

Η ενσωμάτωση των παραπάνω θερμικών μοντέλων σε συζευγμένες αριθμητικές τεχνικές συμπεριλαμβανομένου των πεπερασμένων στοιχείων έχει μελετηθεί στις εργασίες [3.1.17], [3.1.18], [3.1.19] ενώ εφαρμογή αυτών στην ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών δίνεται στις εργασίες [3.1.20], [3.1.21], [3.1.22], [3.1.23].

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

Αρχικά, για την μελέτη των μαγνητών πρέπει να γίνει ένας λεπτομερής προσδιορισμός της καμπύλης του μαγνήτη $B-H$ στο δεύτερο τεταρτημόριο. Για το σκοπό αυτό σύμφωνα με τη δημοσίευση [3.1.24] αναφέρεται το εκθετικό μοντέλο υπολογισμού της καμπύλης $B-H$. Σύμφωνα με την παραπάνω δημοσίευση η συνάρτηση που περιγράφει την καμπύλη αποτελείται από δύο όρους τον γραμμικό και τον εκθετικό. Για την επίτευξη της σωστής τοποθέτησης της, απαραίτητο είναι να προσδιοριστούν οι τιμές δύο σταθερών. Παρακάτω δίνεται ο τύπος της συνάρτησης και η μέθοδος υπολογισμού των σταθερών

$$B(H) = B_r + \mu_0 \mu_r \cdot H - E \cdot e^{K_1(K_2+H)} \quad (3.8)$$

Το E δηλώνει τις μονάδες μέτρησης του εκθετικού όρου (πχ 1 T ή 1 kGauss). Το μ_r δηλώνει την σχετική μαγνητική διαπερατότητα. Το B_r δίνεται από τον κατασκευαστή και δηλώνει την παραμένουσα μαγνήτιση. Το K_1 δηλώνει την οξύτητα του γονάτου ενδεικτική τιμή είναι $-4 \cdot 10^{-5}$ m/A για μαγνήτες Νεοδυμίου NdFeB κλασικής βαθμίδας (regular grade magnet).

Το K_2 υπολογίζεται από τον τύπο:

$$K_2 = \frac{\ln \left[(B_r + (\mu_r - 1) \cdot \mu_0 \cdot j H_c) \cdot \frac{1}{E} \right]}{K_1} - j H_c \quad (3.9)$$

Στον τύπο (3.9) το $j H_c$ δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι η τιμή της intrinsic coercivity.

Βάση του συγκεκριμένου μοντέλου, μπορούμε να εξάγουμε μία ικανοποιητική ως προς την ακρίβεια καμπύλη B-H για τη τιμή της B_r, jH_c που δίνει ο κατασκευαστής. Για να γίνει αυτό απαιτείται να επιλεγεί μία ικανοποιητική τιμή για το K_1 . Γενικά, ο κατασκευαστής παρέχει μόνο μία τιμή για τα B_r, jH_c (συνήθως αυτή που έχει ο μαγνήτης στους 20°C) ενώ παρέχονται και δύο συντελεστές της γραμμικής εξάρτησης που έχουν οι τιμές των B_r, jH_c με τη θερμοκρασία. Η εξάρτηση των B_r και jH_c από τη θερμοκρασία, περιγράφονται από τους παρακάτω τύπους, οι οποίοι προκύπτουν από την εφαρμογή των (3.2) και (3.3) για $T_0 = 20^\circ\text{C}$:

$$B_r(\text{temp}) = \frac{B_r^{@20^\circ\text{C}}}{100} \cdot [100 + (\text{temp} - 20) \cdot \alpha_{B_r}] \quad (3.10)$$

$$jH_c(\text{temp}) = \frac{jH_c^{@20^\circ\text{C}}}{100} \cdot [100 + (\text{temp} - 20) \cdot \alpha_{jH_c}] \quad (3.11)$$

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

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

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

$$K_1(\text{temp}) = \frac{K_1^{@20^\circ\text{C}}}{100} \cdot [100 + (\text{temp} - 20) \cdot \alpha_{K_1}] \quad (3.12)$$

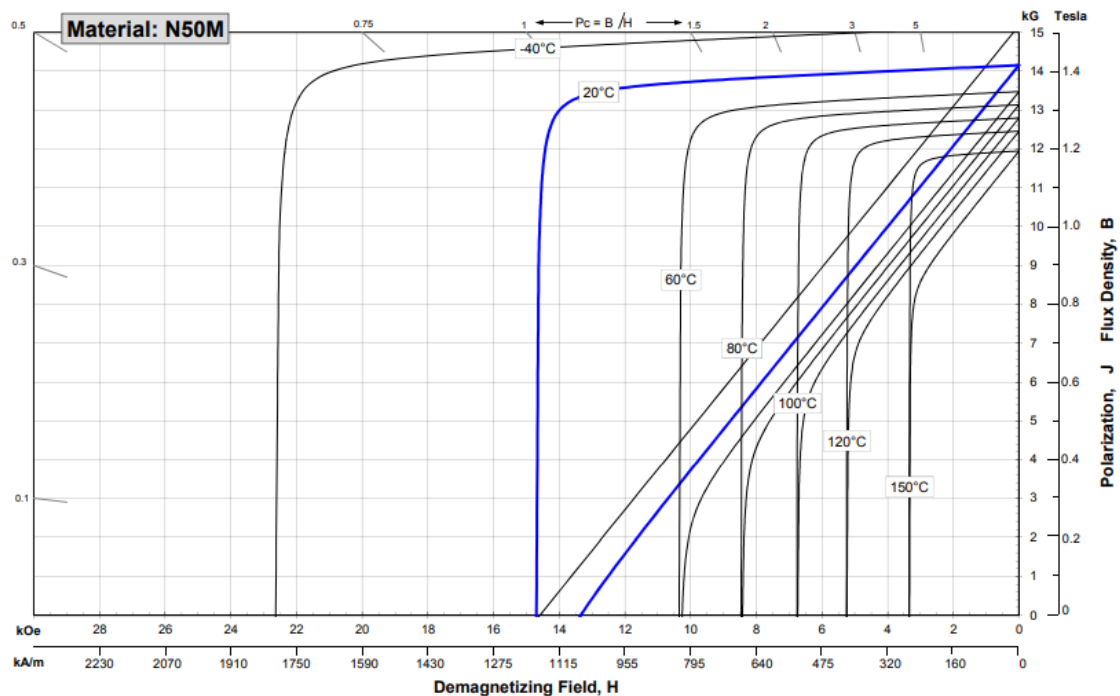
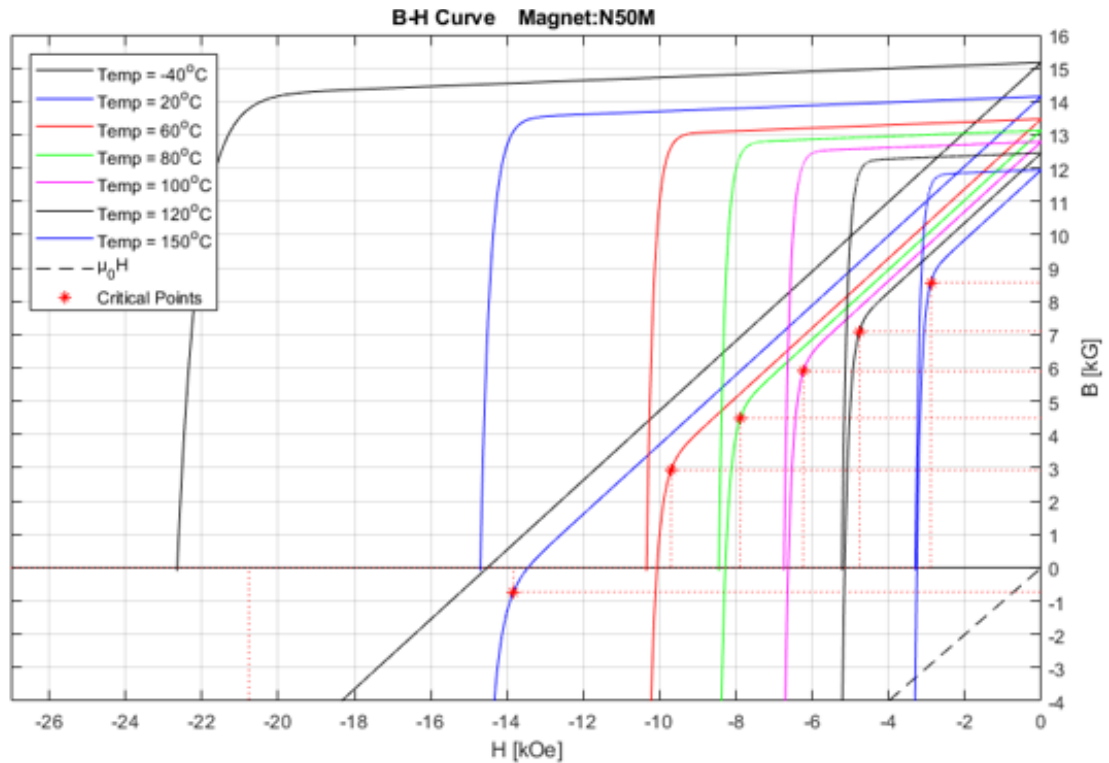
Η τιμή του α_{K_1} έχει εμπειρικά βρεθεί κοντά στο 0.5 έως 1.3 για μαγνήτες Νεοδυμίου.

Η προσθήκη του $\alpha_{jH_c}^{temp^2}$ γίνεται επειδή η περιγραφή του jH_c από τον κατασκευαστή δίνεται με γραμμική σχέση για απλότητα. Ωστόσο είναι καθοριστικής σημασίας η τιμή του jH_c σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, για την ανάλυση της απομαγνήτισης και κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή ενός δευτεροβάθμιου πολυωνύμου για την αύξηση της ακρίβειας. Η νέα σχέση περιγραφής του jH_c δίνεται παρακάτω, ο οποίος προκύπτει από την εφαρμογή της (3.5) για $T_0 = 20^\circ\text{C}$:

$$jH_c(\text{temp}) = \frac{jH_c^{@20^\circ\text{C}}}{100} \cdot [100 + (\text{temp} - 20) \cdot \alpha_{jH_c} + (\text{temp} - 20)^2 \cdot \alpha_{jH_c}^{temp^2}] \quad (3.13)$$

Η τιμή του $\alpha_{jH_c}^{temp^2}$ και η νέα τιμή του α_{jH_c} υπολογίζονται με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ταιριάζοντας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις τιμές του jH_c των διαγραμμάτων του κατασκευαστή με την συνάρτηση (3.13).

Τέλος, η παραπάνω μελέτη σκοπό είχε την εύρεση ορισμένων διαδικασιών που οδηγούν στον αναλυτικό υπολογισμό της καμπύλης B-H για οποιαδήποτε -εντός κατασκευαστικών ορίων- θερμοκρασία των μαγνητών, σύμφωνα με τις καμπύλες που παρέχει ο κατασκευαστής. Το αποτέλεσμα της μεθόδου σε σύγκριση με της δοσμένες καμπύλες του κατασκευαστή φαίνεται πιο κάτω στο σχήμα 3.5.



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

Σχ. 3.5 Σύγκριση παραγόμενων καμπυλών της παραπάνω μεθοδολογίας σε σχέση με αυτές του κατασκευαστή. Στο άνω σχέδιο τα σημεία που είναι τονισμένα είναι τα όρια της γραμμικής περιοχής. Η κάτω εικόνα βρέθηκε στην σελίδα “arnoldmagnetics.com” (tinyurl.com/y5j2zbj6)

Περαιτέρω βελτιστοποιήσεις για τον καλύτερο υπολογισμό της συνάρτησης B-H μπορούν να γίνουν τροποποιώντας ακόμα και την μορφή της συνάρτησης. Ωστόσο, δεν είναι αποδοτικό να πραγματοποιηθούν, εφόσον το παρόν μοντέλο έχει την ικανότητα να αποδώσει σημαντική

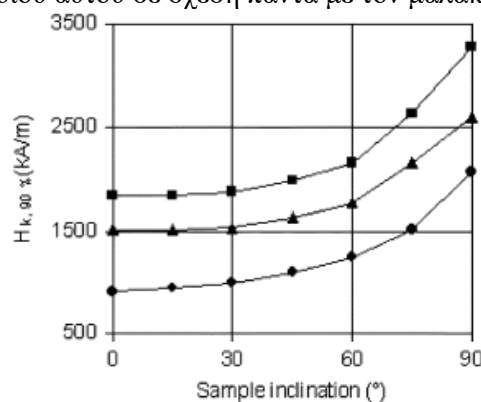
ακρίβεια στην εύρεση του γονάτου και στην εύρεση του σημείου λειτουργίας κάθε σημείου του πλέγματος. Ακόμη, για τη μελέτη φαινομένων που αφορούν μαγνητικά υλικά, απαιτείται η μέτρηση των μαγνητικών δοκιμών που χρησιμοποιούνται, προκειμένου να δημιουργηθούν συναρτήσεις που τα περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια. Συνεπώς, σύνθετες προσθήκες θεωρητικής περιγραφής, προσδίδουν θετικά αποτελέσματα όταν αυτές επαληθεύονται από πειραματικές διατάξεις.

3.1.4 Απομαγνήτιση: Προσανατολισμός του Μαγνήτη και της Γωνίας Εξωτερικού Πεδίου

Στο μικρό-κοσμό των sintered (πυροσυσσωματωμένων) μαγνητών οι κόκκοι (magnet grains) που υπάρχουν σε αυτούς αρχικά δίνονται ευθυγραμμισμένοι (στατιστικά) με τη διεύθυνση μαγνήτισης και συνάμα με τον εύκολο άξονα μαγνήτισης. Η στατιστική αυτή συμπεριφορά των κόκκων συνθέτει τη διεύθυνση του άξονα που σχηματίζεται η μαγνήτιση. Η δυνατότητα των κόκκων να ευθυγραμμίζονται στον σκληρό άξονα είναι μειωμένη, συνεπώς η απομαγνήτιση είναι σχετικά εύκολο να γίνει όταν το εξωτερικό πεδίο είναι αντιπαράλληλο στον άξονα της μαγνήτισης.

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

Για τον λόγο αυτό, διεξήχθησαν περαιτέρω μελέτες όπως η δημοσίευση [3.1.25]. Η προαναφερθείσα μελέτη, καταλήγει στο συμπέρασμα, πως για μικρές τιμές της γωνίας του μαλακού άξονα του μαγνήτη σε σχέση με το εξωτερικό πεδίο ($<45^\circ$) δεν υπάρχει ουσιαστική εξάρτηση της γωνίας στην μείωση του αρχικού πεδίου που είχε ο μαγνήτης και συνεπώς το μέτρο του εξωτερικού πεδίου B καθορίζει την απομαγνήτιση. Αντίθετα για τιμές μεγαλύτερες των 45° υπάρχει εξάρτηση της γωνίας του εξωτερικού πεδίου με τον μαγνήτη και η εξάρτηση αυτή, συνδέεται με τα εν γένει χαρακτηριστικά του κάθε μαγνήτη, όπως οι προσμείξεις Dy , την δυνατότητα προσανατολισμού των κόκκων και τις τιμές των B_r και jH_c . Στην συνέχεια δίνονται ενδεικτικές καμπύλες, στο σχήμα 3.6, που δείχνουν την εξάρτηση της έντασης του εξωτερικού πεδίου, η οποία είναι απαραίτητη για να μεταβάλει το B_r του ορθού άξονα μαγνήτη κατά 10% με τη γωνία εφαρμογής του πεδίου αυτού σε σχέση πάντα με τον μαλακό άξονα του μαγνήτη.

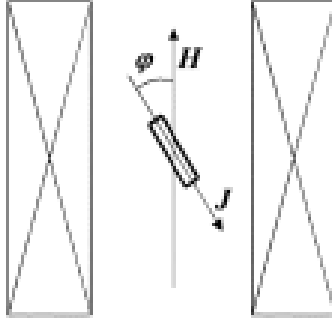


Σχ. 3.6 Ενδεικτική συμπεριφορά εξάρτησης της $jH_c \sim H_{90}$ με τη γωνία του εξωτερικού πεδίου σε σχέση με τον μαλακό άξονα του μαγνήτη. Η εικόνα αποτελεί μέρος της δημοσίευσης [3.1.26].

Επιπλέον, θεωρητικά μαθηματικά μοντέλα εισάγονται για τον τρόπο υπολογισμού της εξάρτησης - γωνίας και jH_c από την δημοσίευση [3.1.27].

Για τον σαφή προσδιορισμό της εξάρτησης της γωνίας με την τιμή του jH_c μπορούν να δημιουργηθούν συναρτήσεις με βάση τιμές μετρήσεων. Μια τέτοια πειραματική διάταξη

περιγράφεται στην δημοσίευση [3.1.26]. Στην δημοσίευση αυτή υπάρχει η δυνατότητα στροφής του άξονα του δοκιμίου μαγνήτη σε σχέση με το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Σε κάθε μία τιμή γωνίας ο μαγνήτης είναι πλήρως ορθά μαγνητισμένος, ενώ μετريέται η τιμή του εναπομείναντος μαγνητισμού κάθε φορά μετά από την έκθεσή του σε ορισμένη, από την διάταξη, τιμή του εξωτερικού πεδίου. Η διάταξη αυτή δίνεται παρακάτω στο σχήμα 3.7:



Σχ. 3.7 Διάταξη πειράματος διεξαγωγής εξάρτησης του JH_c με τη γωνία που σχηματίζει ο μαλακός άξονας του μαγνήτη με αυτή του εξωτερικού πεδίου. Η εικόνα αποτελεί μέρος της δημοσίευσης [3.1.26].

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

$$JH_c^{\text{Angle}}(\varphi) = JH_c^{\text{@}\varphi=0} \cdot (1 + \alpha_1\varphi + \alpha_2\varphi^2 + \alpha_3\varphi^3) \quad (3.14)$$

Οι τιμές των παραμέτρων α_n υπολογίζονται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με βάση τις πειραματικές μετρήσεις.

Η χρησιμότητα των συναρτήσεων ίδιου είδους με αυτή της σχέσης (3.14) συντελούν σε συνδυασμό με την μέθοδο υπολογισμού των BH καμπυλών, στην εύρεση της θέσης του γονάτου κορεσμού για οποιαδήποτε κατεύθυνση του πεδίου στην μηχανή. Σημαντική είναι ακόμα και η παρουσία μεταβολής της διαπερατότητας 'μ' που παρουσιάζεται όσο μεταβάλλεται ο άξονας της μαγνήτισης, πάρα ταύτα η μεταβολή αυτή δεν είναι ιδιαίτερος μεγάλη.

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

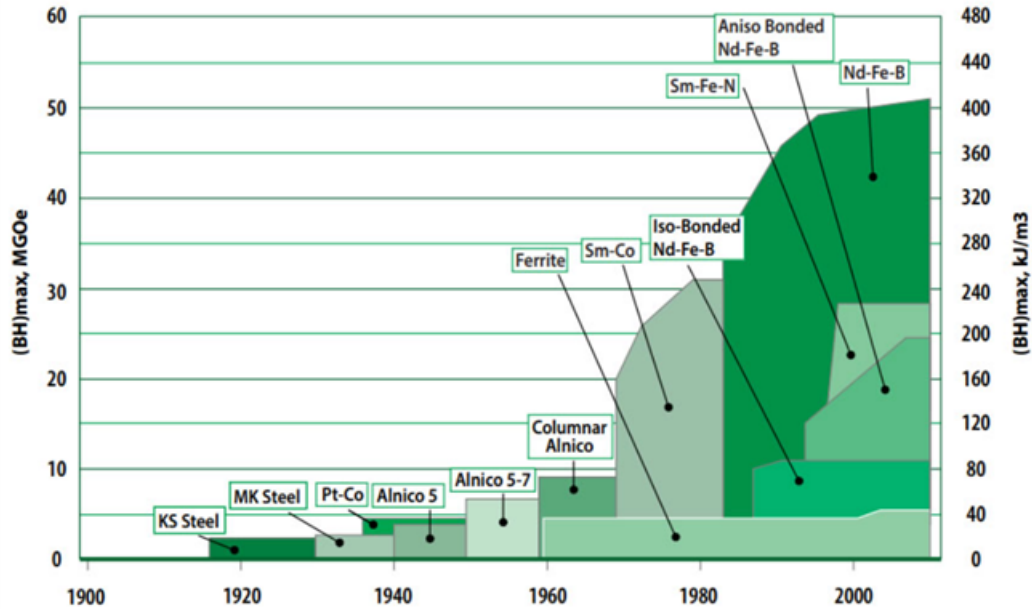
- 1) Η αύξηση της γωνίας οδηγεί στην μείωση της ικανότητας μεταβολής του Br.
- 2) Η προβολή του πεδίου στον άξονα x είναι ανάλογη του $\cos\theta$ επί το μέτρο του πεδίου.
- 3) Η χρήση λοιπόν, σταθερού σημείου JH_c και η σύγκριση μόνο της κάθετης στον μαλακό άξονα συνιστώσας, οδηγεί σε όμοια συμπεριφορά με αυτή που θα είχαμε αν λαμβάναμε υπόψιν το μέτρο του εξωτερικού πεδίου και την αύξηση της JH_c . Η παραπάνω παραδοχή έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μικρές γωνίες πεδίου με μαλακού άξονα με σημαντική μείωση της επεξεργαστικής ισχύος που απαιτεί η προσομοίωση.

3.1.5 Τεχνολογική Εξέλιξη Υλικών Μονίμων Μαγνητών

Στη δεκαετία του 1960 έγινε φανερό ότι οι προσπάθειες για περαιτέρω ενίσχυση ή βελτίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων των φερριτών και των μαγνητών Alnico είχαν εξαντληθεί. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αναζήτηση για υλικά με υψηλή μονοαξονική μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, υψηλές τιμές συνεκτικού πεδίου και υψηλές τιμές κορεσμού μαγνήτισης. Τα κράματα μαγνητών σπάνιων γαιών αντιπροσώπευαν τους πιο υποσχόμενους υποψήφιους και η πρόοδος στην ανάπτυξη αυτών των μαγνητικών υλικών τα τελευταία χρόνια είχε μια σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών.

Κατά προσέγγιση κάθε 12 χρόνια ένα νέο μαγνητικό υλικό αναπτυσσόταν. Το σχήμα 3.8 δείχνει πώς έχει αυξηθεί η μέγιστη ενεργειακή πυκνότητα. Δείχνει επίσης ότι υλικά με χαμηλότερες ενεργειακές πυκνότητες ειδικά ο φερρίτης, μπορούν να είναι εμπορικά επιτυχημένα. Ο φερρίτης,

που εισήχθη το 1961, παραμένει το υλικό μόνιμου μαγνήτη με τις μεγαλύτερες πωλήσεις κυρίως λόγω της σχετικά χαμηλής τιμής του.



Σχ. 3.8 Χρονολογική εξέλιξη υλικών μόνιμων μαγνητών

Τα νέα υλικά δεν έχουν αντικαταστήσει τα παλαιότερα καθώς το κάθε υλικό έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του. Το Alnico, αν και μαγνητικά πιο αδύναμο από τους μαγνήτες σπάνιων γαιών, είναι πολύ πιο σταθερό στη θερμοκρασία. Οι εφαρμογές που απαιτούν σταθερότητα σε μεγάλα εύρη θερμοκρασιών εξακολουθούν να βασίζονται στο Alnico. Όμως τα νεότερα υλικά (φερρίτης, σαμάριου-κοβάλτιο σαμάριου, νεοδύμιο-σίδηρος-βόριο) έχουν όλα ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, μια εγγενή τετραγωνική καμπύλη απομαγνήτισης στο δεύτερο τεταρτημόριο η οποία επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών που δεν ήταν εφικτές προγενέστερα.

Ο πίνακας 3.3 απεικονίζει τα εμπορικά διαθέσιμα υλικά και τις μεθόδους επεξεργασίας τους. Πριν την ανάπτυξη του SmFeN για χρήση σε δεσμευμένους μαγνήτες, το νεότερο υλικό στον πίνακα ήταν το NdFeB. Προγενέστερα υλικά μόνιμων μαγνητών συνεχίζουν να αναπτύσσονται τεχνολογικά. Βελτιώσεις στη σύνθεση και την επεξεργασία κόνεως NdFeB για δεσμευμένους μόνιμους μαγνήτες έχουν αυξήσει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας από τους 110°C στους 200°C.

MATERIAL	CAST	EXTRUDED OR ROLLED	SINTERED FULLY DENSE	BONDED			
				INJECTION MOLDED	COMPRESSION BONDED	FLEXIBLE	RIGID EXTRUDED
ALNICO	Y		Y	Y			
IRON-CHROME- COBALT		Y					
CuNiFe		Y					
SmCo			Y	Y	Y		
SmFe(N,C)				Y			
NdFeB			Y	Y	Y	Y	Y
FERRITE			Y	Y		Y	
HYBRIDS				Y	Y	Y	

Πίν. 3.3 Εμπορικά διαθέσιμα υλικά μόνιμων μαγνητών.

Το νεότερο υλικό μόνιμων μαγνητών για εμπορική χρήση το οποίο αναπτύχθηκε είναι το νιτρίδιο σαμάριου-σιδήρου (SmFeN). Η εταιρία Asahi έλαβε διπλώματα ευρεσιτεχνίας στις ΗΠΑ το 1987 για το υλικό και τη μέθοδο επεξεργασίας του. Η Siemens, η Hitachi και η Sumitomo έχουν κάνει εκτενή έρευνα για την κατασκευή SmFeN. Η παραγωγή του υλικού είναι δύσκολη καθώς όταν το αέριο νιτρίδιο ωθείται στο κρυσταλλικό πλέγμα του κράματος βάσης σαμάριου-σιδήρου, το κράμα τείνει να αποσυντεθεί σε νιτρίδιο σαμάριου και άλφα-σίδηρο. Το άζωτο είναι διάμεσο, επομένως μπορεί να εκτιναχθεί από τη θέση του στο πλέγμα προκαλώντας αποσύνθεση. Αυτό επισπεύδεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από τους 450°C, η αποσύνθεση είναι ταχεία. Τα πλεονεκτήματα αυτού του νέου υλικού περιλαμβάνουν τη βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση και τη βελτιωμένη σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες έναντι του νεοδύμιου-σιδήρου-βορίου.

3.1.6 Προηγμένα Υλικά Μονίμων Μαγνητών NdFeB και SmCo

Το σαμάριο-κοβάλτιο είναι υλικό σπάνιων γαιών που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στην οξείδωση, έχει υψηλότερη μαγνητική αντοχή από το κεραμικούς μαγνήτες και τύπου Alnico και καλύτερη αντοχή στη θερμοκρασία από του νεοδύμιου. Οι μαγνήτες σαμάριου-κοβάλτιου που εισήχθησαν στην αγορά τη δεκαετία του 1970 συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται σήμερα και χωρίζονται σε δύο κύριες ομάδες, SmCo₅ και Sm₂Co₁₇, κοινώς αναφέρονται ως 1-5 και 2-17). Η πυκνότητα ενέργειας για τη σειρά 1-5 είναι από 15 έως 22 MGOe, ενώ της σειράς 2-17 κυμαίνεται μεταξύ 22 και 32 MGOe. Οι συγκεκριμένοι μαγνήτες προσφέρουν τα καλύτερα θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά από όλους τους μαγνήτες σπάνιων γαιών και λειτουργούν σε θερμοκρασίες έως και 350°C. Οι μαγνήτες από πυροσυσσωματωμένο σαμάριο-κοβάλτιο είναι εύθραυστοι και επιρρεπείς σε θρυμματισμό και ρωγμές και μπορεί να σπάσουν όταν εκτεθούν σε θερμικό σοκ. Λόγω του υψηλού κόστους του υλικού σαμάριου οι μαγνήτες SmCo χρησιμοποιούνται για εφαρμογές όπου η υψηλή θερμοκρασία και η αντοχή στη διάβρωση είναι κρίσιμης σημασίας.

Το NdFeB είναι το πιο προηγμένο εμπορικά διαθέσιμο υλικό μόνιμου μαγνήτη. Αυτό το υλικό έχει παρόμοιες ιδιότητες με το SmCo εκτός από το ότι οξειδώνεται πιο εύκολα και γενικά δεν έχει την ίδια επίδοση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, οι μαγνήτες NdFeB έχουν τις υψηλότερες πυκνότητες ενέργειας που πλησιάζουν τα 52 MGOe και είναι μηχανικά ισχυρότεροι από τους μαγνήτες SmCo. Το NdFeB είναι πιο δαπανηρό κατά βάρος από τους κεραμικούς μαγνήτες ή τύπου Alnico αλλά παράγει την υψηλότερη ποσότητα μαγνητικής ροής ανά μονάδα όγκου ή μάζας καθιστώντας το οικονομικό για πολλές εφαρμογές.

Οι μαγνήτες NdFeB χωρίς κατάλληλες επικαλύψεις υπόκεινται σε διάβρωση. Έχουν αναπτυχθεί επιφανειακές επεξεργασίες που επιτρέπουν τη χρήση τους στις περισσότερες εφαρμογές. Αυτές οι επεξεργασίες περιλαμβάνουν επικάλυψη με χαλκό, ασήμι, χρυσό, νικέλιο, ψευδάργυρο και κασσίτερο ή επίστρωση εποξειδικής ρητίνης. Τα πλεονεκτήματα των μαγνητών NdFeB περιλαμβάνουν την πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας, την πολύ υψηλή τιμή συνεκτικού πεδίου και την αποδεκτή επίδοση σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.

Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την χαμηλότερη μηχανική αντοχή και την χαμηλή αντοχή στη διάβρωση όταν δεν είναι σωστά επικαλυμμένα ή επιμεταλλωμένα. Ο παρακάτω πίνακας 3.4 συνοψίζει μερικές από τις μαγνητικές ιδιότητες των πιο κοινών υλικών ενώ απεικονίζει την υπεροχή των κραμάτων SmCo και NdFeB.

	<i>B_{hmax}</i> (MGOe)	<i>Br</i> (G)	<i>H_c</i> (Koe)	°C
Ceramic 5	3.4	3950	2400	400
Sintered Alnico 5	3.9	10900	620	540
Cast Alnico 8	5.3	8200	1650	540
Samarium Cobalt 20 (1,5)	20	9000	8000	260
Samarium Cobalt 28 (2,17)	28	10500	9500	350
Neodymium N45	45	13500	10800	80
Neodymium 33UH	33	11500	10700	180

Πίν. 3.4 Ιδιότητες υλικών μόνιμων μαγνητών.

Οι ποιότητες των μονίμων μαγνητών σχετίζονται άμεσα με την μέγιστη πυκνότητα ενέργειας ενεργειακό προϊόν του υλικού που συνθέτει τον μαγνήτη. Δεν αναφέρεται δηλαδή στις φυσικές ή μηχανικές ιδιότητες του μόνιμου μαγνήτη. Η ποιότητα χρησιμοποιείται γενικά για να περιγράψει πόσο «ισχυρός» είναι ένας μόνιμος μαγνήτης ενώ η πυκνότητα ενέργειας προϊόν καθορίζεται με μονάδες Gauss Oersted.

Ο πίνακας 3.5 παρουσιάζει τις διαθέσιμα εμπορικά ποιότητες κάθε τύπου μαγνητικού υλικού σπάνιων γαιών με τις αντίστοιχες τιμές παραμένουσας πυκνότητα ροής και συνεκτικού πεδίου.

Υλικό	Τύπος	Br	Hcb	(BH) _{max}
		KGs	KOe	MGOe
Nd ₂ Fe ₁₄ B	N35	12.1	11.4	35
	N38	12.6	11.7	38
	N40	12.9	11.9	40
	N42	13.3	12.3	42
	N45	13.6	12.1	45
	N48	14	12.1	48
	N50	14.3	12.3	50
	38M	12.6	12.2	38
	40M	12.9	12.3	40
	42M	13.3	12.4	42
	45M	13.6	12.1	45
	48M	13.9	12.9	50
	30H	11.2	10.7	30
	35H	12.1	11.6	35
	38H	12.6	12.1	38
	40H	13	12	40
	42H	13.1	12	42
	44H	13.5	12	45
	46H	13.7	13	46
	30SH	11.2	10.7	30
	35SH	12	11.6	35
	38SH	12.6	12.1	38
	40SH	13	12.3	40
	42SH	13.1	12.4	42
	44SH	13.5	12.8	44
	28UH	10.9	10.4	28
	30UH	11.2	10.3	30
	33UH	11.5	10.8	33
	35UH	12	11.6	35
	38UH	12.6	12.1	38
	40UH	13	12.3	40
	42UH	13.1	12.4	42
	30EH	11.2	10.3	30
	33EH	11.5	10.8	33
	35EH	12	11.6	35
Sm ₁ Co ₅	18	8.5	8	18
	20	9	8	20
Sm ₂ Co ₁₇	24	10	8.5	24
	26	10.5	9.2	26
	28	10.5	9.5	28
	30	11	9.5	30
	32	12	11	32

Πίν. 3.5 Εμπορικά διαθέσιμες ποιότητες μαγνητικών υλικών σπάνιων γαιών.

3.1.7 Δεσμευμένοι Μαγνήτες (Bonded PM)

Οι μόνιμοι μαγνήτες κατασκευασμένοι από πυκνά υλικά τείνουν να είναι σκληροί και εύθραυστοι. Κατά συνέπεια, απαιτείται σημαντική μηχανική κατεργασία για τη διαμόρφωση αυτών των υλικών σε τελικούς μαγνήτες με μικρές ανοχές. Μια οικονομικά αποδοτική λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση δεσμευμένων μαγνητών. Αυτοί οι μαγνήτες κατασκευάζονται με την ανάμειξη μιας μαγνητικής σκόνης με ένα συνδετικό υλικό για να σχηματιστεί μια ένωση και στη συνέχεια χυτεύοντας ή εξωθώντας την ένωση στο επιθυμητό εικόνα. Τα τυπικά συνδετικά υλικά περιλαμβάνουν καουτσούκ, ρητίνες και πλαστικά. Οι δεσμευμένοι μαγνήτες κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας χύτευση με συμπίεση ή χύτευση με έγχυση και εξώθηση.

Οι χυτευμένοι με συμπίεση μαγνήτες κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας ένα θερμοσκληρυνόμενο συνδετικό όπως η εποξική ρητίνη, ενώ οι χυτευμένοι με έγχυση μαγνήτες

σχηματίζονται χρησιμοποιώντας ένα θερμοπλαστικό συνδετικό όπως το νάιλον. Οι εξωθημένοι μαγνήτες παράγονται χρησιμοποιώντας ένα ελαστομερές όπως το καουτσούκ. Οι δεσμευμένοι μαγνήτες μπορούν να γίνουν άκαμπτοι ή εύκαμπτοι ανάλογα με το κλάσμα όγκου του κονιορτοποιημένου υλικού που χρησιμοποιείται. Τα τυπικά κλάσματα όγκου είναι 80-85% για χύτευση με συμπίεση, 60-65% για χύτευση με έγχυση και 55-60% για εξώθηση.

Οι δεσμευμένοι μαγνήτες κατασκευάζονται επίσης χρησιμοποιώντας υλικά σαμάριου-κοβαλτίου SmCo_5 και $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Αυτοί οι μαγνήτες έχουν μειωμένη απόδοση σε σχέση με τους συντηγμένους ομολόγους τους, αλλά είναι λιγότερο ψαθυροί και κατεργάζονται πιο εύκολα. Κονιορτοποιημένο SmCo_5 προσφέρεται για τις διεργασίες χύτευσης με έγχυση και εξώθηση όπου τα μεγέθη πύλης περιορίζουν τα μεγέθη σωματιδίων στα 5-10 μm . Με αυτούς τους μαγνήτες επιτυγχάνονται ενεργειακά προϊόντα της τάξης των $(BH)_{\text{max}} = 60 \text{ kJ/m}^3$ (7,5 MG Oe). Τα σωματίδια $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ υφίστανται μείωση στις μαγνητικές ιδιότητες εάν η διάμετρός τους μειωθεί πολύ κάτω από 40 μm . Αυτό το υλικό είναι καταλληλότερο για χύτευση με συμπίεση όπου επιτυγχάνονται ενεργειακά προϊόντα της τάξης των $(BH)_{\text{max}} = 130 \text{ kJ/m}^3$ (16 MG Oe). Πρόσθετες ιδιότητες των δεσμευμένων μαγνητών SmCo δίνονται στον πίνακα 3.6. Οι δεσμευμένοι μαγνήτες μπορούν επίσης να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας κονιορτοποιημένο NdFeB . Το υλικό *Magnequench MQ I* είναι ένα παράδειγμα αυτού.

Quantity	Units	Bonded SmCo_5	Bonded $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
B_r	T	0.65	0.86
H_c	kA/m	460	497
jH_i	kA/m	620	800
BH_{max}	kJ/m^3	80	130
μ_r		1.1	1.1

Πίν. 3.6 Ιδιότητες δεσμευμένων μόνιμων μαγνητών SmCo

3.1.8 Μαγνήτες Υψηλής Μαγνήτισης που Δεν Είναι Εμπορικά Διαθέσιμοι

Έχουν αναπτυχθεί επίσης αρκετοί ακόμη συγκεκριμένοι τύποι μόνιμων μαγνητών εξαιρετικά υψηλής μαγνήτισης που δεν είναι ακόμη εμπορικά διαθέσιμοι, είτε επειδή βρίσκονται ακόμη στη φάση έρευνας και ανάπτυξης είτε επειδή η παραγωγή τους δεν είναι ακόμη οικονομικά εφικτή [3.1.23] και [3.1.28]-[4.1.35]. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα:

Μαγνήτες NdFeB με προϊόν εξαιρετικά υψηλής ενέργειας. Οι μαγνήτες NdFeB είναι επί του παρόντος οι ισχυρότεροι διαθέσιμοι μόνιμοι μαγνήτες, αλλά οι ερευνητές διερευνούν τρόπους για να αυξήσουν ακόμη περισσότερο το ενεργειακό τους προϊόν. Ορισμένοι πειραματικοί τύποι μαγνητών NdFeB που έχουν αναπτυχθεί σε ερευνητικά εργαστήρια έχουν ενεργειακά προϊόντα που υπερβαίνουν τα 80 MGOe (mega gauss- oersteds), σε σύγκριση με τις τυπικές εμπορικές ποιότητες που έχουν ενεργειακά προϊόντα 50-55 MGOe.

Μαγνήτες SmCo με εξαιρετικά υψηλή καταναγκαστική ικανότητα: Οι μαγνήτες SmCo είναι ένας άλλος τύπος μαγνήτη σπάνιων γαιών που έχει προϊόν υψηλής μαγνητικής ενέργειας και εξαιρετική θερμική σταθερότητα, αλλά η καταναγκαστική τους ικανότητα είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή των μαγνητών NdFeB . Οι ερευνητές διερευνούν τρόπους για να αυξήσουν την καταναγκαστική ικανότητα των μαγνητών SmCo για να τους καταστήσουν ακόμη πιο κατάλληλους για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες. Ορισμένοι πειραματικοί τύποι μαγνητών SmCo που έχουν αναπτυχθεί σε ερευνητικά εργαστήρια έχουν καταναγκασμό άνω των 30 kOe (kilo-oersteds), σε σύγκριση με τους τυπικούς εμπορικούς βαθμούς που έχουν καταναγκασμό 25-30 kOe.

Μαγνητοθερμικά υλικά με εξαιρετικά υψηλή αλλαγή μαγνητικής εντροπίας: Τα μαγνητολογικά υλικά είναι ένας τύπος μαγνητικού υλικού που παρουσιάζουν μεγάλη αλλαγή στην εντροπία όταν υποβάλλονται σε μαγνητικό πεδίο, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα για μαγνητική ψύξη και άλλες εφαρμογές ψύξης. Οι ερευνητές διερευνούν τρόπους για να αυξήσουν τη μεταβολή της μαγνητικής εντροπίας των μαγνητοθερμικών υλικών βελτιστοποιώντας την κρυσταλλική

δομή, τη χημική τους σύνθεση και τις συνθήκες επεξεργασίας. Ορισμένοι πειραματικοί τύποι μαγνητοθερμιδικών υλικών που έχουν αναπτυχθεί σε ερευνητικά εργαστήρια έχουν αλλαγές μαγνητικής εντροπίας που υπερβαίνουν τα 20 J/kg K, σε σύγκριση με τις τυπικές εμπορικές ποιότητες που έχουν αλλαγές μαγνητικής εντροπίας 2-5 J/kg K.

Αυτοί οι μόνιμοι μαγνήτες εξαιρετικά υψηλής μαγνήτισης υπόσχονται σημαντικές βελτιώσεις στις εφαρμογές των ηλεκτρικών μηχανών, αλλά η εμπορευματοποίησή τους θα εξαρτηθεί από την ανάπτυξη οικονομικών μεθόδων παραγωγής και τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών.

3.2 Μαλακά Σιδηρομαγνητικά Υλικά

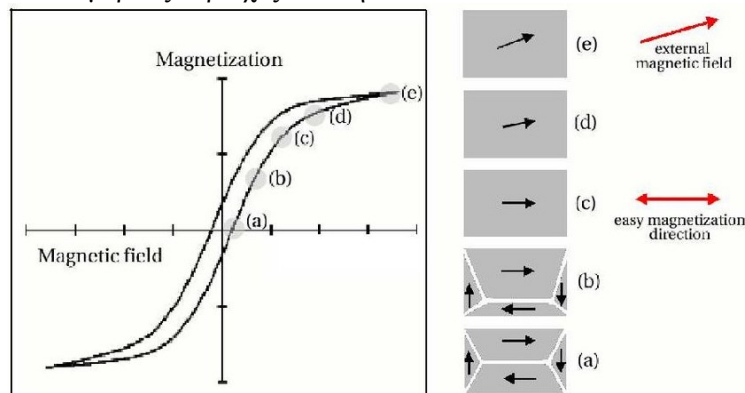
Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά ανήκουν και αυτά στην κατηγορία υλικών τα οποία ευθυγραμμίζουν εύκολα τις μαγνητικές τους ροπές υπό την επίδραση ενός εξωτερικού πεδίου. Η ιδιότητα αυτή παύει να εμφανίζεται εξαιτίας της έντονης κινητικότητας της δομής τους, όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τη θερμοκρασία Curie (Curie Temperature). Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται ως επί τω πλείστον στην κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών συσκευών, όπως στον πυρήνα μετασχηματιστών, στους πυρήνες στάτη και δρομέα ηλεκτρικών μηχανών, με σκοπό την ενίσχυση της μαγνητικής ροής της εξωτερικής διέγερσης. Η υψηλή μαγνητική διαπερατότητα των υλικών αυτών είναι αρωγός στην σχεδίαση ηλεκτρικών κινητήρων και άλλων ηλεκτρομαγνητικών μερών. Σε εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων, παρατηρούμε την χρήση απλού συμπαγούς σιδήρου στα μαγνητικά μέρη της συσκευής. Ωστόσο, σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων – συχνοτήτων, ο σίδηρος ελασματοποιείται ενώ η συνολική διάταξη αποτελείται από πολλά λεπτά φύλλα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας, με σκοπό την μείωση των επαγόμενων δινορευμάτων στον εσωτερικό όγκο του, μειώνοντας έτσι τις θερμικές απώλειες του πυρήνα.

3.2.1 Ιδιότητες και Μακροσκοπική Συμπεριφορά

Ορισμένες βασικές μακροσκοπικές ιδιότητες των μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών που τα καθιστούν κατάλληλα για κατασκευή υψηλών επιδόσεων και αποδόσεων ηλεκτρικών μηχανών:

- 1) Υψηλή μαγνητική διαπερατότητα
- 2) Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού
- 3) Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης
- 4) Σχετικά καλή (μεγάλη) ηλεκτρική αντίσταση

Οι ιδιότητες αυτές αποδίδουν μειωμένες απώλειες στον πυρήνα, περιορίζοντας έτσι το θερμικό φορτίο του ηλεκτρικού κινητήρα, με σημαντική διευκόλυνση στις απαιτήσεις ψύξης της μηχανής. Στο σχήμα 3.9 διαφαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης ενός μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού, καθώς και οι επιμέρους περιοχές που την αποτελούν.



Σχ. 3.9 Τυπικός βρόχος μαγνήτισης για μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό. Στη δεξιά πλευρά σκιαγραφούνται οι δομές πεδίου μαγνήτισης που αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικές περιοχές του βρόχου υστέρησης, υποθέτοντας ότι υπάρχει μόνο ένα τοίχωμα πεδίου (domain wall).[3.2.1]

Στο σχήμα 3.9 φαίνεται η μικροσκοπική δομή των κόκκων σε διαφορετικές καταστάσεις μαγνήτισης εντός ενός τοιχώματος πεδίου (domain wall) . Το (α) αντιστοιχεί σε μια διαμόρφωση μηδενικής μαγνήτισης. Το τοίχωμα της περιοχής διαιρεί το δείγμα σε δύο περιοχές αντίθετης μαγνήτισης, προσανατολισμένες κατά μήκος των κατευθύνσεων εύκολης μαγνήτισης του υλικού. Οι δύο μικρές τριγωνικές περιοχές είναι οι λεγόμενες περιοχές κλεισίματος. Αυξάνοντας το εφαρμοζόμενο πεδίο, το τοίχωμα πεδίου κινείται όπως στο (β) προκειμένου να αυξηθεί το μέγεθος του πεδίου που μαγνητίζεται πιο κοντά στην κατεύθυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου. Σε αυτή την περιοχή ο βρόχος υστέρησης είναι γραμμικός. Αυτή η κίνηση προχωρά καθώς αυξάνεται το εξωτερικό πεδίο, έως ότου ο τοίχος καλύψει ολόκληρο το δείγμα όπως στη διαμόρφωση (γ). Σε αυτό το σημείο το δείγμα μαγνητίζεται όλο στην ίδια κατεύθυνση, η οποία όμως δεν συμπίπτει γενικά με την κατεύθυνση του εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου. Από εδώ και πέρα, αυξάνοντας περαιτέρω το πεδίο, η μαγνήτιση προχωρά με συνεκτική περιστροφή των σπιν (δ), μέχρι να επιτευχθεί η μαγνήτιση κορεσμού (ε), όπου όλα τα σπιν ευθυγραμμίζονται όλα παράλληλα με την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου.

Στα μαλακά φερρομαγνητικά υλικά με την επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H σε ένα αρχικά αμαγνήτιστο υλικό, η μαγνητική επαγωγή B του υλικού αυξάνεται σύμφωνα με τη μεταβλητή τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας μ του υλικού όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση (3.15):

$$B = \mu_0 \mu(B) H \quad (3.15)$$

Όπου $\mu(B)$ η μαγνητική διαπερατότητα που εκφράζει τις εγγενείς ιδιότητες του σιδηρομαγνητικού υλικού δεδομένου λεπτού βρόχου υστέρησης.

Για την πιο λεπτομερή περιγραφή των φαινομένων ορίζεται η μαγνητική πόλωση (magnetic polarization) $\mathbf{J}$, και κατ' επέκταση το σημείο κορεσμού της μαγνητικής πόλωσης $\mathbf{J}_{sat}$. Έστω ότι σε μια περιοχή σιδηρομαγνητικού υλικού όγκου V η μαγνήτιση $\mathbf{M}$ της περιοχής ισούται με το άθροισμα όλων των μαγνητικών δίπολων προς τον όγκο V :

$$\mathbf{M} = \frac{1}{V} \sum \vec{m}_i \quad (3.16)$$

Αντίστοιχα, η μαγνητική πόλωση ορίζεται ως το γινόμενο της μαγνήτισης του υλικού με την μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

$$\mathbf{J} = \mu_0 \cdot \mathbf{M} \quad (3.17)$$

Η σχέση της μαγνητικής πόλωσης με την πυκνότητα της μαγνητικής ροής είναι η εξής:

$$\mathbf{B} = \mathbf{J} + \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.18)$$

Χρησιμοποιώντας την μαγνητική πόλωση που εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του υλικού έχουμε καλύτερη κατανόηση για τα μαγνητικά χαρακτηριστικά και τις ειδικές απώλειες πυρήνα της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας.

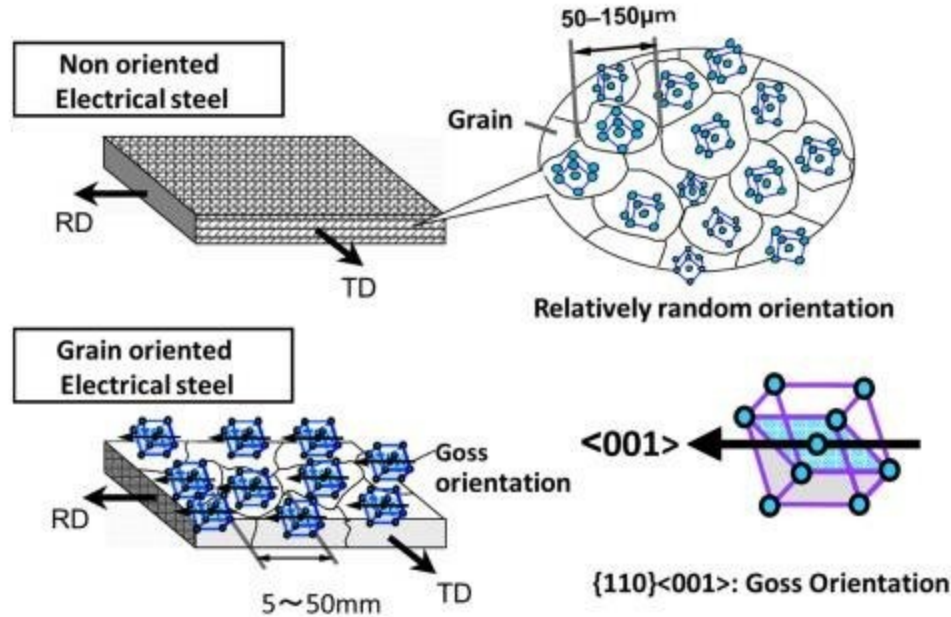
Η γραμμική αύξηση της μαγνητικής επαγωγής με την αύξηση του εξωτερικού πεδίου, συνεχίζει να υφίσταται έως το γόνατο κορεσμού, δηλαδή έως ότου το υλικό εισέλθει στην περιοχή κορεσμού, όπου η αύξηση του εξωτερικού πεδίου δεν επιδρά σημαντικά στην αναπτυσσόμενη μαγνητική επαγωγή, επομένως εκεί μεταβάλλεται η τιμή της διαπερατότητας του υλικού ως:

$$\mu_0 \mu_r(B) = \frac{dB}{dH} \quad (3.19)$$

Οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση της εξωτερικής διέγερσης, όσο το υλικό βρίσκεται στην περιοχή κορεσμού, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών χαλκού (λόγω της αύξησης της

πυκνότητας ρεύματος από την οποία εξαρτάται το εξωτερικό πεδίο $\mathbf{H}$), και των απωλειών pinning χωρίς σχεδόν καμία μεταβολή στην μαγνητική επαγωγή.

Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά στις εφαρμογές ηλεκτρικών κινητήρων διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την ύπαρξη κατευθυντικότητας ή ισοδυνάμως ανισοτροπίας. Στο παρακάτω σχήμα 3.10 διαφαίνεται η διαφορά της κατηγορίας προσανατολισμένων κόκκων με την κατηγορία μη προσανατολισμένων κόκκων σε μικροσκοπικό επίπεδο.



Σχ. 3.10 Μικροσκοπική δομή φερρομαγνητικού υλικού με και χωρίς προσανατολισμένους κόκκους. tinyurl.com/5n8p2395

3.2.2 Μηχανισμοί Απωλειών και Μοντελοποίηση

Οι απώλειες των φερρομαγνητικών υλικών, οφείλονται κυρίως στη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό τους. Στα υλικά αυτά υπάρχουν τρεις βασικές συνιστώσες απωλειών: οι απώλειες υστέρησης (hysteresis), οι απώλειες δινορευμάτων (eddy currents) και οι δυναμικές ανώμαλες απώλειες (excess, anomalous losses). Στο κεφάλαιο αυτό σχολιάζονται οι δύο πρώτες κατηγορίες ως οι κυρίαρχες των απωλειών σιδήρου στις ηλεκτρικές μηχανές.

3.2.2.1 Απώλειες Υστέρησης

Για γίνουν κατανοητές οι απώλειες υστέρησης θα πρέπει να εξεταστεί η μαγνητική συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών και πιο συγκεκριμένα η δομή τους σε μικροσκοπική κλίμακα. Το εσωτερικό του σιδήρου, του κοβαλτίου, του νικέλιου και κραμάτων τους, αποτελείται από ομοιόμορφα μαγνητισμένες περιοχές, που ονομάζονται τομείς (domains). Σε ένα αμαγνήτιστο κομμάτι υλικού, το πλήθος των μικροσκοπικών τομέων του είναι τυχαία προσανατολισμένο, ή αντίστοιχα, το στατιστικό άθροισμα της μαγνήτισης όλων των τομέων είναι μηδενικό. Οι γειτονικοί τομείς, χωρίζονται από τα τοιχώματα μαγνητικών τομέων ή περιοχών (domain walls). Τα τοιχώματα των τομέων είναι στην πραγματικότητα ενεργειακές ζώνες μέσω των οποίων η μαγνήτιση αλλάζει κατεύθυνση. Αντίθετα, με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι τομείς που είναι προσανατολισμένοι στην κατεύθυνση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, διευρύνονται εις βάρος των υπολοίπων που είναι προσανατολισμένοι σε άλλες κατευθύνσεις.

Με την αύξηση της έντασης του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου, οι τομείς του μαγνητικού υλικού που είχαν διαφορετικό προσανατολισμό, ευθυγραμμίζονται τελικά προς τη διεύθυνση του πεδίου. Στην πραγματικότητα όμως, εντός του σιδηρομαγνητικού υλικού, υπάρχουν προσμίξεις με άλλα μη μαγνητικά στοιχεία (άνθρακας, θείο) τα οποία παρεμβαίνουν της διεύρυνσης των τοιχωμάτων, προκαλώντας το φαινόμενο Barkhausen: καθώς το μαγνητίζον πεδίο μεταβάλλεται,

η μαγνήτιση αλλάζει σε χιλιάδες μικροσκοπικά ασυνεχή άλματα, αφού η προσανατολισμένη κίνηση των τοιχωμάτων εμποδίζεται αρχικά από τέτοια μη-μαγνητικά μικροσκοπικά στοιχεία (γνωστά ως σημεία αγκυρώσεως - pinning sites), τα οποία τείνουν τελικά να ξεπεραστούν με την περαιτέρω αύξηση του εξωτερικού πεδίου. Η ενέργεια που απαιτείται για την εδραίωση του προσανατολισμού του πεδίου ορίζεται ως απώλεια υστέρησης.

Το φαινόμενο Barkhausen είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την μορφή της καμπύλης υστέρησης των μαγνητικών υλικών, αφού οι τομείς δεν επιστρέφουν στην αρχική ελάχιστη ενεργειακή τους διαμόρφωση όταν αφαιρείται το εξωτερικό πεδίο επειδή τα τοιχώματα περιοχής τείνουν να «πιαστούν» σε ελαττώματα του κρυσταλλικού πλέγματος (λόγω των προσμίξεων), διατηρώντας την υπάρχουσα μαγνήτιση τους (παραμένουσα μαγνήτιση) [3.2.2]. Όσον αφορά τον υπολογισμό των απωλειών υστέρησης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού και στην ειδική περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τη συχνότητα διέγερσης f και με μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο υλικό B_{peak} οι απώλειες υστέρησης P_h υπολογίζονται ως:

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_{peak}^a \quad (3.20)$$

3.2.2.2 Απώλειες Δινορευμάτων

Όταν ένα αγωγίμο υλικό βρίσκεται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου μεταβαλλόμενου με τον χρόνο, τότε σε αυτό επάγονται τάσεις σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Οι επαγόμενες τάσεις παράγουν ρεύματα που ρέουν σε κλειστούς βρόχους, κάθετα στο επίπεδο της κατεύθυνσης της μαγνητικής ροής προσπαθώντας να διατηρήσουν σταθερό το μαγνητικό πεδίο που έχει αναπτυχθεί στο υλικό (νόμος Lenz). Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται δινορεύματα, λόγω του σχηματισμού δινών κατά την κυκλοφορία τους και προκαλούν τις θερμικές απώλειες μέσα στον μαγνητικό πυρήνα των ηλεκτρικών μηχανών. Η παρουσία δινορευμάτων οδηγεί σε διεύρυνση της καμπύλης υστέρησης και επομένως σε αύξηση της μαγνητικής αντίστασης.

Οι απώλειες δινορευμάτων εξαρτώνται από την συχνότητα και το πάχος της μαγνητικής λαμαρίνας, επομένως, για την εξάλειψη των απωλειών που προκαλούν, ο μαγνητικός πυρήνας των ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος κατασκευάζεται από λεπτά ελάσματα του σιδηρομαγνητικού υλικού τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους.

Η κυκλοφορία των δινορευμάτων εντός του υλικού έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του επιδερμικού φαινομένου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται σταδιακή μείωση της μαγνητικής επαγωγής σε μεγαλύτερα βάθη και ως εκ τούτου περιορισμός της μαγνητικής ροής σε μια μικρή περιοχή κοντά στην επιφάνεια του υλικού. Το πάχος των ελασμάτων του πυρήνα επιλέγεται μικρότερο από το μισό του βάθους διείσδυσης των δινορευμάτων δηλαδή για συχνότητα 50 Hz και συμβατικό σιδηρομαγνητικό υλικό το πάχος πρέπει να είναι μικρότερο από 0.5mm, επιτρέποντας έτσι στη μαγνητική ροή να διεισδύσει πλήρως σε κάθε φύλλο λαμαρίνας. Όσον αφορά τον υπολογισμό των απωλειών δινορευμάτων ενός σιδηρομαγνητικού υλικού με ειδική αντίσταση ρ και στην ειδική περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τη συχνότητα διέγερσης f και με μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο υλικό B_{peak} , οι απώλειες δινορευμάτων P_c υπολογίζονται ως:

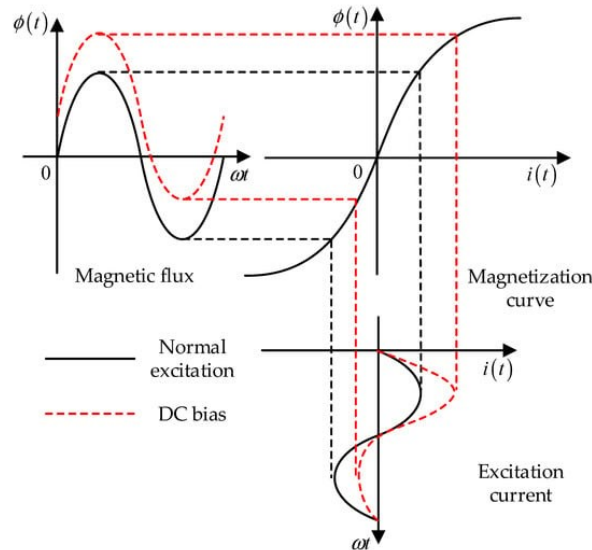
$$P_c = \frac{\pi^2}{6 \cdot \rho} \cdot f^2 \cdot B_{peak}^2 \quad (3.20)$$

3.2.3 Επίπτωση DC Bias Πεδίου στις Απώλειες

Όλα τα αποτελέσματα μετρήσεων των μαγνητικών ιδιοτήτων των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών (καμπύλη μαγνήτισης – διαπερατότητα, απώλειες υστέρησης και απώλειες πυρήνα) αφορούν την μέτρηση μέσω επιβολής πεδίου σε ένα αρχικά αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό υλικό. Στην περίπτωση όμως που ένα σιδηρομαγνητικό υλικό είναι ήδη μαγνητισμένο, είτε λόγω παραμένουσας μαγνήτισης, είτε λόγω ύπαρξης μόνιμων μαγνητών εντός του μαγνητικού κυκλώματος, τότε οι μαγνητικές του ιδιότητες διαφοροποιούνται. Κατά τη συνολική

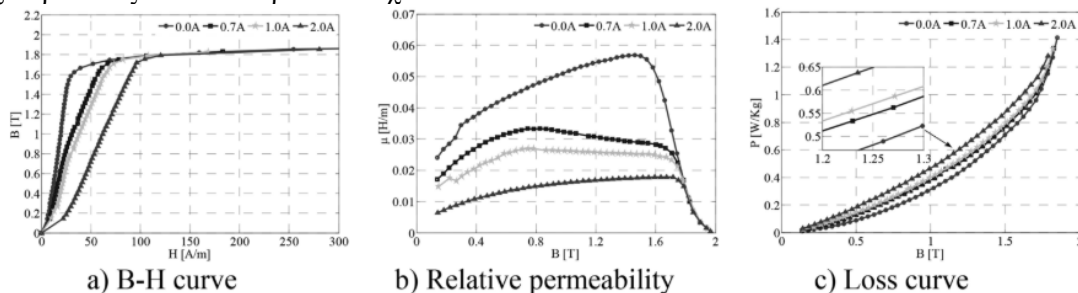
βιβλιογραφική έρευνα ιδιοτήτων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών, προκύπτει πως η προμαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών υλικών (όπως συμβαίνει σε ένα μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό με την παρουσίαση μόνιμου μαγνήτη στο μαγνητικό κύκλωμα), διαφοροποιεί σε μεγάλο βαθμό τους ελάσσονες βρόχους υστέρησης (minor hysteresis loops) και τα eddy currents λόγω υφιστάμενης μαγνήτισης και επιφανειακών ρευμάτων (skin effect).

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η μελέτη των ιδιοτήτων των σιδηρομαγνητικών υλικών υπό την επίδραση μιας DC συνιστώσας μαγνήτισης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της έγχυσης DC ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα διέγερσης, την δημιουργία του εξωτερικού πεδίου διέγερσης H_{dc} και κατ' επέκταση την ανάπτυξη της μαγνητικής επαγωγής B_{dc} στο σιδηρομαγνητικό υλικό, καθιστώντας το πλέον προ-μαγνητισμένο. Το Σχ. 3.11 περιγράφει την ύπαρξη DC ροής σε συνδυασμό με την εναλλασσόμενη ροή διέγερσης.



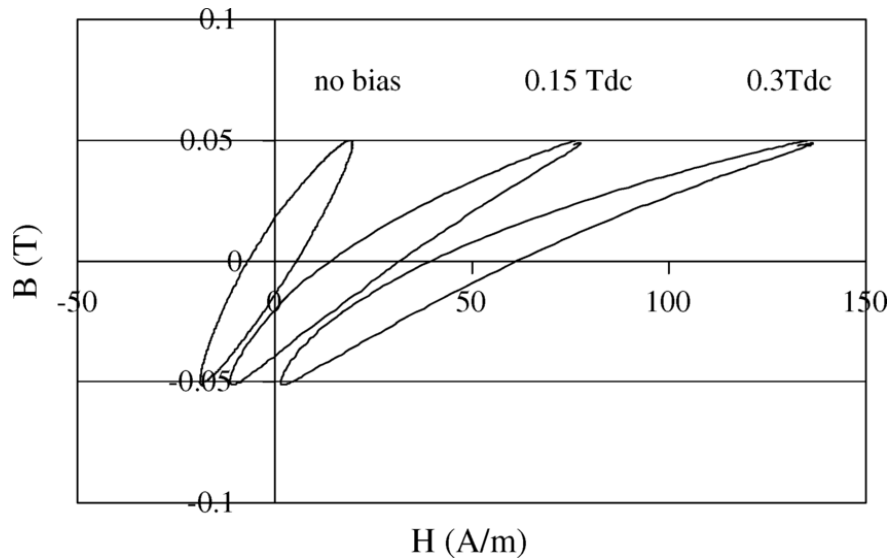
Σχ. 3.11 Περιγραφή διαδικασίας διέγερσης με DC Bias[3.2.3]

Στο υλικό, όσο τα ρεύματα συνεχούς μαγνήτισης αυξάνονται, η εναλλασσόμενη λειτουργεία πλησιάζει το γόνατο κορεσμού στην καμπύλη μαγνήτισης, επομένως απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερο εναλλασσόμενο ρεύμα για την επίτευξη της ίδιας μεταβολής του πεδίου B . Η παραπάνω παρατήρηση είναι σε αρμονία με την συμπεριφορά της μαγνητικής διαπερατότητας όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχ. 3.12.



Σχ. 3.12 Καμπύλη B - H , σχετική διαπερατότητα και απώλεια υπό διαφορετικό DC Bias σε 40°C [3.2.5]

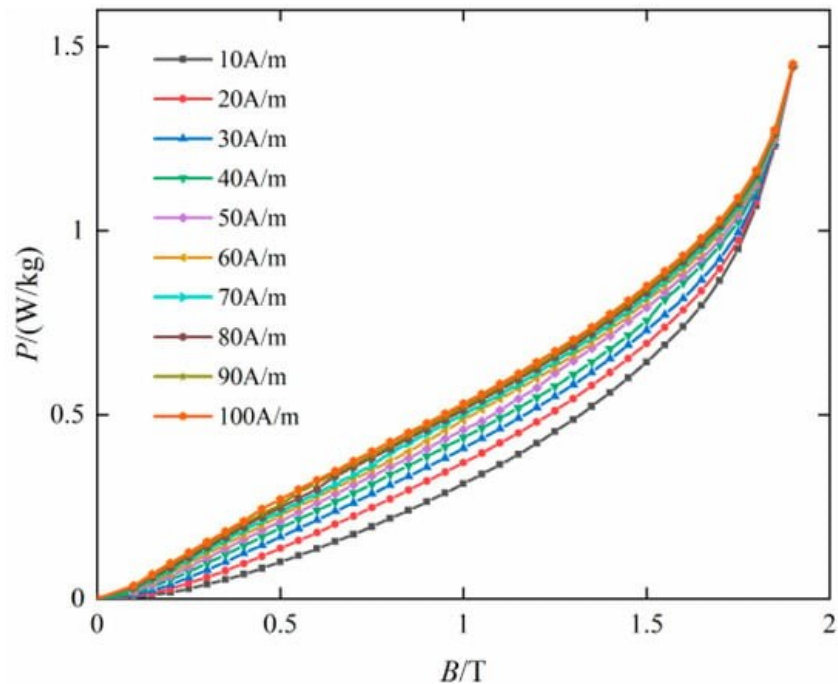
Πιο συγκεκριμένα φαίνεται πως η δυνατότητα του υλικού να φέρει μαγνητική ροή μειώνεται με την αύξηση της προ-υπάρχουσας μαγνήτισης, γεγονός που εξηγεί την ανάγκη αύξησης του ρεύματος διέγερσης. Ενδιαφέρον έχει η επίδραση της προμαγνήτισης του υλικού στο σχήμα και το μέγεθος των βρόχων υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 3.13



Σχ. 3.13 Διαφοροποίηση ελάσσωνων βρόχων υστέρησης για διαφορετικές τιμές προ υπάρχοντος πεδίου. [3.2.4]

Όπως παρατηρείται, ο βρόχος υστέρησης ενός εναλλασσόμενου πεδίου πλάτους 0.05T αλλάζει εντελώς σχήμα και μέγεθος, ανάλογα με το προϋπάρχον πεδίο στο υλικό. Πιο συγκεκριμένα, όσο το προϋπάρχον πεδίο «σπρώχνει» το υλικό στο γόνατο κορεσμού (1.5-1.6T) τόσο πλατύτερος και μεγαλύτερος φαίνεται ο βρόχος υστέρησης του. Δεδομένου πως το εμβαδό του βρόχου υστέρησης συνδέεται άμεσα με τις απώλειες υστέρησης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, αναμενόμενη είναι η μεταβολή των απωλειών πυρήνα του υλικού υπό το ίδιο εναλλασσόμενο πεδίο αλλά «υψωμένο» σε διαφορετική DC συνιστώσα πεδίου.

Εκτός από την μείωση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, σημαντική είναι και η επίδραση της ύπαρξης DC συνιστώσας του πεδίου στις απώλειες σιδήρου που αναπτύσσονται κατά την επίδραση ενός εναλλασσόμενου πεδίου σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Καμπύλες των ιδικών απωλειών του φερρομαγνητικού υλικού για διαφορετικές τιμές DC Bias δίνονται στο Σχ. 3.14.

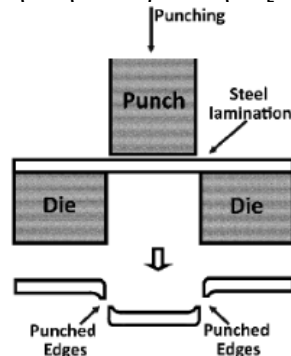


Σχ. 3.14 Χαρακτηριστικά απώλειας κάτω από διαφορετικά ρεύματα πόλωσης. [3.2.6]

3.2.4 Κατασκευαστικές Καταπονήσεις

3.2.4.1 Κοπή με Διάτρηση (Punching)

Η κοπή με διάτρηση είναι μια κοινή μέθοδος κοπής για την παραγωγή ηλεκτρομηχανικών πυρήνων από ηλεκτρικά φύλλα χάλυβα με χαμηλό κόστος. Αυτή η τεχνική δημιουργεί πλαστική παραμόρφωση κοντά στις άκρες και, ως εκ τούτου, δημιουργεί κατεστραμμένες περιοχές σε υλικά με αυξημένη σκληρότητα λόγω παραμένουσων μηχανικών τάσεων εξαιτίας της καταπόνησης, ενώ παράλληλα στις άκρες κοπής υπάρχει γρέζι. Αυτά τα φαινόμενα, μαζί με αλλαγές στην μικροδομή των κόκκων, προκαλούν υποβάθμιση των μαγνητικών ιδιοτήτων, όπως αυξημένες απώλειες πυρήνα και μειωμένη μαγνητική διαπερατότητα [3.2.9].



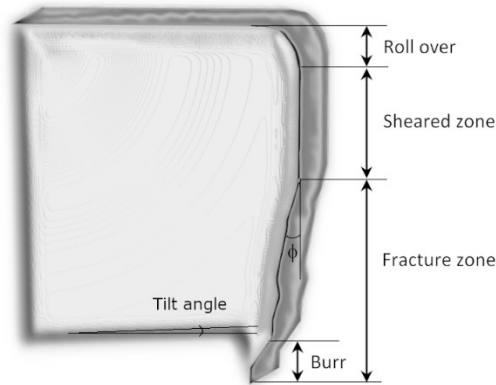
Σχ. 3.15 Σχηματική απεικόνιση του σχεδιασμού της λαμαρίνας με διάτρηση, υποδεικνύοντας το σχηματισμό γρέζιου κοντά στις διάτρητες άκρες. [3.2.9]

Η αιχμηρότητα του εργαλείου κοπής επηρεάζει την ποιότητα της κοπής και το μέγεθος των παραγόμενων γρεζιών. Η αιχμηρότητα του εργαλείου καθώς και το διάκενο του δεν είναι σταθερό σε βάθος χρόνου εξαιτίας της λειτουργίας του και τη φθορά που επέρχεται μετά την κοπή πολλών δειγμάτων. Καθοριστικός παράγοντας της φθοράς είναι η σκληρότητα των λαμαρινών που κόβονται καθώς και η σκληρότητα του ίδιου του εργαλείου. Η ποιότητα των λαμαρινών που απαιτείται στην δημιουργία ηλεκτρικών μηχανών είναι υψηλή και συνεπώς δεν μπορούν να υπάρξουν καθόλου γρέζια. Λύση σε αυτό το πρόβλημα την αύξησης ποιότητας κοπής είναι η αύξηση της σκληρότητας της μήτρας κοπής (κοπτικού εργαλείου) με μειονέκτημα την αύξηση του κόστους της διαδικασίας ή την εισαγωγή διαδικασιών αφαίρεσης των γρεζιών. Η τελευταία διαδικασία είναι και αυτή σχετικά κοστοβόρα. [3.2.13]. Μικροσκοπικά, το βάθος της κατεστραμμένης περιοχής προσδιορίζεται ως η απόσταση από την άκρη του δείγματος μέχρι το σημείο όπου εξαφανίζεται το περίγραμμα της κάμψης.

Οι πιο βασικές παράμετροι που επηρεάζουν το κατά πόσο θα υπάρξει υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού είναι:

- 1) Το διάκενο του εργαλείου κοπής, το οποίο επηρεάζει τις μηχανικές τάσεις και κατά συνέπεια το μέγεθος της περιοχής θραύσης [3.2.10]
- 2) Η σκληρότητα της αιχμής κοπής του εργαλείου, καθορίζει την ποιότητα της κομμένης επιφάνειας και γρεζιών καθώς και το μέγεθος της παραμορφωμένης ζώνης [3.2.10]
- 3) Το πάχος της λαμαρίνας και η μαγνητική μικροδομή του υλικού, σχετίζεται με την διάδοση της μηχανικής τάσης στο εσωτερικό του υλικού [3.2.11]

Η ελαστική παραμόρφωση εμφανίζεται τη στιγμή που το κοπτικό εργαλείο συναντά το φύλλο χάλυβα. Καθώς το εργαλείο εισέρχεται περαιτέρω στο υλικό, δημιουργείται τοπική πλαστική παραμόρφωση. Όταν η μηχανική τάση στο εσωτερικό του υλικού υπερβεί τη διατμητική αντοχή του υλικού, δημιουργούνται ρωγμές και τοπικές θραύσεις, οι οποίες κατευθύνονται προς κάθετες ακμές κοπής. Στο Σχ. 3.16, διακρίνονται τέσσερις χαρακτηριστικές περιοχές της μηχανικά κομμένης άκρης: ζώνη κύλισης, ζώνη διάτμησης, όλκιμη θραύση, και burr (γρέζι) [3.2.12]



Σχ. 3.16 Περιοχές άκρης της κομμένης λαμαρίνας με τη μέθοδο της διάτρησης (Punching) [3.2.7]

Ορισμένες μακροσκοπικές ιδιότητες που τροποποιούνται εξαιτίας της διαδικασίας κοπής με διάτρηση είναι η μαγνητική διαπερατότητα, οι ιδικές απώλειες, η ποιότητα της λαμαρίνας στο άκρο και σχετική μείωση της μηχανικής αντοχής. Παρατηρείται πτώση της μαγνητικής διαπερατότητας στην άκρη κοπής του υλικού όπως φαίνεται στην [3.2.13]. Παρατηρείται αύξηση των ειδικών απωλειών στην άκρη κοπής του υλικού, συνήθως της τάξης των 10-20% όπως φαίνεται στην [3.2.14]. Το μέγεθος της υποβαθμισμένης επιφάνειας του υλικού καταγράφεται συνήθως στα 100-400μm, ωστόσο μπορεί να φτάσει και τα 10 mm από το σημείο κοπής [3.2.15], [3.2.11]. Παρατηρείται αύξηση στο πεδίο απομαγνήτισης. Αυτό κυρίως οφείλεται στην αύξηση των σημείων αγκύρωσης (pinning sites) [3.2.15] [3.2.17]. Παρατηρείται μείωση της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του υλικού που προκαλούνται από την κοπή εαν χρησιμοποιηθεί η διαδικασία της ανόπτησης του δείγματος χάλυβα [3.2.18]. Σκληρομετρήσεις κατά Vickers παρουσιάζουν αύξηση της σκληρότητας στα πρώτα 1000 μm έως και σχεδόν 2000 μm από την άκρη της κοπής [3.2.19].

3.2.4.2 Κοπή με ψαλίδι λαμαρίνας Γκιλοτίνα (Guillotine Cutting)

Η γκιλοτίνα αποτελείται από ένα αντιμάχαιρο που στηρίζει το μεταλλικό φύλλο και μια κινούμενη λεπίδα. Λειτουργεί, με την συγκράτηση του υλικού με έμβολο και σε συνέχεια η κινούμενη λεπίδα προκαλεί διάτμηση του υλικού καθώς αυτή συγκλίνει στο αντιμάχαιρο, φτάνοντας το υλικό στη διατμητική αντοχή του. Η γκιλοτίνα επιτρέπει μόνο την κοπή ευθύγραμμου προφίλ, επομένως δεν χρησιμοποιείται για την κατασκευή μηχανών, αλλά λόγω του χαμηλότερου κόστους κοπής προτιμάται σε σχέση με την προετοιμασία των ελασμάτων που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο Epstein. Η κοπή της ακμής και οι διατμητικές τάσεις είναι παρόμοιες με αυτές που λαμβάνονται στην κοπή με διάτρηση και οι επιδράσεις των δύο τεχνικών είναι σχεδόν οι ίδιες. Η ποιότητα της τεχνικής επηρεάζεται από την αιχμηρότητα του κοπτικού εργαλείου και από την γωνία διακένου του. Συγκεκριμένα, το διάκενο επιλέγεται μεταξύ 2% και 10% του πάχους του φύλλου [3.2.20].

Ορισμένες μακροσκοπικές ιδιότητες που τροποποιούνται εξαιτίας της διαδικασίας κοπής με διάτρηση είναι η μαγνητική διαπερατότητα, οι ιδικές απώλειες, η ποιότητα της λαμαρίνας στο άκρο και σχετική μείωση της μηχανικής αντοχής. Παρατηρείται μείωση της διαπερατότητας στην άκρη κοπής του υλικού [3.2.21], [3.2.22]. Παρατηρείται αύξηση των ειδικών απωλειών στην άκρη κοπής του υλικού, συνήθως της τάξης των 10-50% ([3.2.18], [3.2.13], [3.2.8]). Το μέγεθος της υποβαθμισμένης επιφάνειας του υλικού καταγράφεται στα 5-10mm [3.2.23], [3.2.24]. Παρατηρείται μείωση της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του υλικού που προκαλούνται από την κοπή εαν χρησιμοποιηθεί η διαδικασία της ανόπτησης του δείγματος χάλυβα [3.2.23] και την κατάλληλη επιλογή διακένου στο εργαλείο κοπής [3.2.8]. Μετρήσεις μικροσκληρότητας παρουσιάζουν μια σκληρυμένη ζώνη στα πρώτα 0.5- 1 mm από την άκρη της κοπής, η οποία μειώνεται ομαλά μέχρι τα 8mm [3.2.8].

3.2.4.3 Κοπή με Λείζερ (Laser Cutting)

Η κοπή με λείζερ χρησιμοποιεί μια συσκευή εκπομπής ενέργειας κατά την οποία μια δέσμη υπέρυθρου υψηλής ενέργειας εστιάζει σε ένα πολύ μικρό σημείο, συνήθως 0.1-1.0 mm και προκαλεί τήξη του μετάλλου. Στη συνέχεια, ο μηχανισμός φυσάει το λιωμένο υλικό από την περιοχή της κοπής. Τα λείζερ είναι συνήθως ελεγχόμενα από υπολογιστή και έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν εξαιρετικά ακριβείς κοπές. Η κοπή με λείζερ είναι πιο αργή από τη διάτρηση, επομένως, χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή πρωτοτύπων ή για την παραγωγή μικρών παρτίδων [3.2.25].

Δύο κύριες τεχνολογίες λείζερ για την κοπή μεταλλικών φύλλων είναι το λείζερ CO₂ και το λείζερ Nd:YAG. Ορισμένες παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την κοπή, είναι η εισερχόμενη ενέργεια, η ταχύτητα κοπής και η ροή όγκου του αδρανούς αερίου. Κατά την κοπή με λείζερ δεν παράγονται τόσο έντονες διατμητικές τάσεις ή γρέζια μεγάλου ύψους, όπως στις προηγούμενες μεθόδους μηχανικής κοπής. Επιπλέον, το φαινόμενο υποβάθμισης της μικροδομής είναι οπτικά λιγότερο εμφανές, συγκριτικά με την εικόνα που δίνουν οι μηχανικές τεχνικές κοπής [3.2.14].

Ωστόσο η υψηλή θερμοκρασία η οποία απαιτείται ώστε το μέταλλο να φτάσει το σημείο τήξης του, προκαλεί έντονη θερμική καταπόνηση, η οποία δημιουργεί υπολειπόμενες θερμικές τάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την βίαιη μετατόπιση των κόκκων στο σημείο της κοπής. Αν ένας κόκκος «γλιστρήσει» σε κάποιον διπλανό του, τότε δημιουργούνται μικρορωγμές στο υλικό. Αυτές οι μικροδομικές αλλαγές επηρεάζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του χάλυβα. Συγκεκριμένα, αλλαγές στην κρυσταλλογραφική υφή του υλικού μπορούν να δημιουργήσουν σημεία αγκυρώσεως (pinning sites) τα οποία τροποποιούν την δομή και την κίνηση του μαγνητικού τοιχώματος [3.2.9].

Ορισμένες μακροσκοπικές ιδιότητες που τροποποιούνται εξαιτίας της διαδικασίας κοπής με διάτρηση είναι η μαγνητική διαπερατότητα, οι ιδικές απώλειες, η ποιότητα της λαμαρίνας στο άκρο. Παρατηρείται πτώση της διαπερατότητας στην άκρη κοπής του υλικού [3.2.11]. Παρατηρείται αύξηση των ειδικών απωλειών στην άκρη κοπής του υλικού [3.2.26]. Το μέγεθος της υποβαθμισμένης επιφάνειας του υλικού καταγράφεται περίπου στα 10mm [3.2.11].

3.2.4.4 Κοπή με Ηλεκτροδιάβρωση Σύρματος (Wire Electrical Discharge Machine Cutting)

Η κοπή με ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (Wire Electrical Discharge Machine Cutting) σχετίζεται με τη διάβρωση που εμφανίζεται όταν σχηματίζεται σπινθήρας μεταξύ του κοπτικού σύρματος και της πρώτης ύλης. Όπως και το λείζερ, αυτή η μέθοδος δεν οδηγεί σε διατμητική παραμόρφωση στις ακμές κοπής και δεν σχηματίζονται γρέζια. Το βάθος της παραμόρφωσης της μικροδομής του υλικού είναι μικρότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο που προκύπτει από την κοπή με λείζερ. Είναι μια πολύ καλή μέθοδος για την αποφυγή της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του υλικού στις ακμές κοπής.

Λόγω της τεράστιας αύξησης της θερμοκρασίας στο επιφανειακό στρώμα, η επιφάνεια που δημιουργείται κατά τη διαδικασία EDM περιλαμβάνει μικροσκοπικούς κρατήρες. Αυτό συμβαίνει διότι μέρος του μετάλλου εξατμίζεται και τήκεται. Συνήθως οι κρατήρες που δημιουργούνται είναι διαμέτρου 5μm και βάθους 50μm. Επειδή αυτή η επιφάνεια δεν είναι αποδεκτή σε αρκετές περιπτώσεις, πραγματοποιείται κατεργασία φινιρίσματος. Το μέγεθος των κρατήρων και η ταχύτητα επιφάνειας έχουν σχέση με την ενέργεια παλμού, καθώς οι παλμοί μεγάλης διάρκειας επιτρέπουν τη διεύρυσή της θερμότητας στον κρατήρα δημιουργώντας ανομοιόμορφη μορφολογία.

Κατά τη διαδικασία της ηλεκτρικής εκκένωσης, η αποβολή υλικού λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 8000oC έως 12000oC. Η εμφάνιση αυτών των εκκενώσεων επηρεάζει τη δομή του υλικού που κατεργάζεται [3.2.27]. Η επήρεια ποικίλλει, ανάλογα με το υλικό. Μερικά υλικά δεν παρουσιάζουν μεταβολές στη δομή τους.

Ορισμένες μακροσκοπικές ιδιότητες που τροποποιούνται εξαιτίας της διαδικασίας κοπής με διάτρηση είναι η μαγνητική διαπερατότητα και η ποιότητα της λαμαρίνας στο άκρο. Η

συγκεκριμένη μέθοδος κοπής παρουσιάζει μικρή υποβάθμιση της μαγνητικής διαπερατότητας και αμελητέα αύξηση των απωλειών. Μερικές φορές, μάλιστα, θεωρείται ότι τα δείγματα που έχουν κοπεί με ηλεκτροδιάβρωση (Wire EDM) δεν έχουν καταστραφεί καθόλου [3.2.28]. Το μέγεθος της υποβαθμισμένης επιφάνειας που καταγράφεται είναι μικρότερο συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους κοπής, περίπου μέχρι τα 200 μm [3.2.28].

Συγκριτικές μελέτες στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων ανάλογα με τη μέθοδο κοπής δείχνουν πως η διαδικασία της ανόπτησης μετά από κοπή με EDM αποδίδουν το καλύτερο δυνατό συνολικό αποτέλεσμα. [3.2.29] [3.2.30].

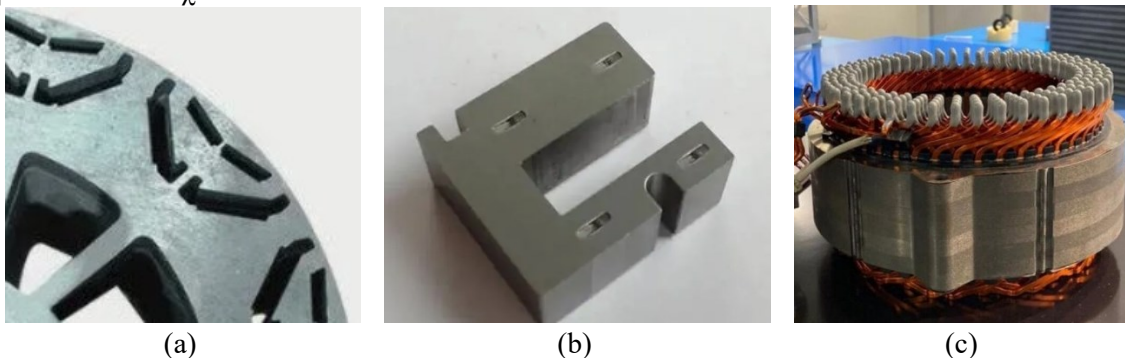
3.2.4.5 Υδροκοπή (Water Jet Cutting)

Η τεχνολογία υδροκοπής πραγματοποιείται με την εκτόξευση μιας πολύ λεπτής δέσμης νερού με λειαντικά σωματίδια υπό πολύ υψηλή πίεση. Η υψηλή πίεση εξασφαλίζει την πολύ μεγάλη ταχύτητα, η οποία είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να αναπτυχθεί τοπικά η αναγκαία δύναμη αποβολής του υλικού. Συχνά, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση της διαδικασίας, οι μηχανές υδροκοπής εμπλουτίζονται με κόκκους ψαθυρών υλικών ως πρόσθετο λειαντικό για την κοπή πολύ σκληρών υλικών. Η κοπή επιτυγχάνεται με τη διάβρωση του υλικού, οδηγώντας σε μια καλή γενικά ποιότητα κοπής για την επάνω πλευρά, αλλά παράγοντας ταυτόχρονα γρέζια στην άλλη πλευρά. Η χαμηλή θερμοκρασία επεξεργασίας της υδροκοπής, λόγω της επίδρασης της ψύξης του νερού, έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη θερμική καταπόνηση του υλικού. Επιπροσθέτως, η μέθοδος αυτή δεν προκαλεί διατμητικές τάσεις. Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόζεται σε ποικιλία υλικών με διάφορα πάχη στρώματος.

Ωστόσο, σε κοπή μεγάλου βάθος, πιθανόν να υπάρξει μετακίνηση της δέσμης και σφάλματα. Η χαμηλή ταχύτητα κοπής της συγκεκριμένης τεχνικής οδηγεί στη χρήση της μόνο για πρωτότυπα και συνιστάται ιδίως για ηλεκτρικές μηχανές με χαμηλό και μεσαίο εύρος πυκνότητας ροής. Ειδικές απώλειες: Συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους κοπής, η υδροκοπή παράγει την μικρότερη αύξηση των ειδικών απωλειών [3.2.19].

3.2.4.6 Συγκράτηση Ελασμάτων

Η χρήση ελασμάτων για την μείωση των απωλειών δινορευμάτων φέρνει ως ανάγκη την χρήση κάποιων τεχνικών για την συγκράτηση των ελασμάτων με σκοπό την δημιουργία του τελικού σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία φαίνονται στο Σχ. 3.17.



Σχ. 3.17 Μέθοδοι συγκράτησης λαμαρινών: (α) Με συγκολλητική ρητίνη, επίστρωση πάνω απο τη λαμαρίνα. (β) Με μηχανισμό μανδύλωσης, μηχανική τοπική παραμόρφωση σε συγκεκριμένα σημεία. (c) Με συγκόλληση κατά μήκος της σύστασης του στάτη. <https://tinyurl.com/yytjh5z6>

1) Συγκράτηση με χρήση ρητίνης

Για την πρώτη τεχνική σε κάθε έλασμα τοποθετείται ομοιόμορφα ειδική ρητίνη η οποία επιλέγεται έτσι ώστε να αντέχει σε όλες τις θερμικές φορτίσεις που μπορεί να υποστεί μια μηχανή. Αφού τοποθετηθεί η ρητίνη τα ελάσματα τοποθετούνται έτσι ώστε να δημιουργήσουν τον

σιδηρομαγνητικό πυρήνα και κρατούνται υπό πίεση μέχρι να περάσει ο απαραίτητος χρόνος για την σκλήρυνση της ρητίνης, κάτι το οποίο μπορεί να γίνει και υπό κάποια υψηλή θερμοκρασία ώστε να επιταχυνθεί ο χρόνος σκλήρυνσης. Ο πυρήνας κρατιέται υπό πίεση ώστε να μεγιστοποιήσουμε τον συντελεστή πληρότητας δηλαδή το ποσοστό του ενεργού μήκους στο οποίο έχουμε σιδηρομαγνητικό υλικό. Αυτή η τεχνική δεν επηρεάζει καθόλου τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του πυρήνα.

2) Συγκράτηση με χρήση μηχανισμού μανδάλωσης

Η συγκράτηση με μηχανισμό ανάλωσης είναι η πιο φθηνή από όλες τις τεχνικές συγκράτησης. Κατά την διάρκεια του Punching κόβονται αντιδιαμετρικά έναν αριθμό κοιλοτήτων όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [3.2.31]. Παρόλο που αυτή η τεχνική είναι πολλή φθηνή αυξάνει τις ειδικές απώλειες πυρήνα της μηχανής καθώς κάθε έλασμα βραχυκυκλώνεται τοπικά καθ' όλου του ενεργού μήκους της μηχανής με αποτέλεσμα να έχουμε επαγόμενη τάση λόγω του μεταβλητού πεδίου και την δημιουργία δινορευμάτων τα οποία με την σειρά τους αυξάνουν τις απώλειες [45][46]. Επιπλέον, αυτή η τεχνική παρουσιάζει το μικρότερο συντελεστή πληρότητας.

3) Συγκράτηση με ηλεκτρική συγκόλληση

Τέλος, η τεχνική με ηλεκτρική συγκόλληση είναι μια ακόμα φθηνή τεχνική σε σχέση με την χρήση ρητίνης. Εδώ τα ελάσματα συγκροτούνται είτε με κλασσικές μεθόδους είτε με Λέιζερ τεχνικές σε διάφορα αντιδιαμετρικά σημεία στην εξωτερική επιφάνεια του σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Εδώ επίσης έχουμε την δημιουργία δινορευμάτων καθώς δημιουργούνται αγωγίμες διαδρομές [3.2.31]. Σε σύγκριση με τον μηχανισμό μανδάλωσης εδώ η απώλειες είναι μικρότερες σε ένα στάτη καθώς τα βραχυκυκλώματα δημιουργούνται στο εξωτερικού του οποίου έχουμε μικρότερη πυκνότητα μαγνητικής ροής και αρά η επαγόμενη τάση είναι μικρότερη.

3.2.5 Μηχανική Καταπόνηση Ηλεκτρικού Χάλυβα

3.2.5.1 Αλλαγή Ηλεκτρομαγνητικών Ιδιοτήτων

Η κατασκευή του αξονικά ελασματοποιημένου δρομέα, αποτελείται από συναρμολόγηση μιας στοίβας ελασμάτων χάλυβα με ενδιάμεσες στρώσεις μονωτικών φύλλων. Προκειμένου να ενισχυθεί η αναλογία μαγνητικής απροθυμίας (Reluctance) στους διαφορετικούς άξονες (ορθό και κάθετο). Η συναρμογή των λαμαρινών του δρομέα είναι ένα δύσκολο εγχείρημα, ενώ παράλληλα γίνεται ολοένα και πιο δύσκολο καθώς η αύξηση της πυκνότητας ισχύος απαιτεί την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Ως λύσεις στο πρόβλημα μηχανικής στερέωσης προτείνονται τα μη μαγνητικά μπουλόνια και πλαστικές βάσεις πόλων εκτυπότητας της μηχανής που τοποθετούνται κατάλληλα. Σε περίπτωση που ο δρομέας παρουσιάσει υψηλές φυγόκεντρες δυνάμεις, συνήθως εξοπλίζεται με ένα χιτώνιο συγκράτησης (Sleeve).

Η στοίβα ελασμάτων χάλυβα μπορεί να αποτελείται από μη προσανατολισμένων κόκκων χάλυβα ή από χάλυβα με προσανατολισμένους κόκκους. Η αναλογία εκτυπότητας αυτών των μηχανών επηρεάζεται από τη μαγνητική διαπερατότητα των αξονικά ελασματοποιημένων φύλλων που βρίσκονται υπό την επίδραση των μηχανικών φορτίων όπως δυνάμεις θερμικής διαστολής και φυγόκεντρες δυνάμεις. Ωστόσο, αυτή η απροθυμία (reluctance) τείνει να αυξάνεται σημαντικά όταν το τα φύλλα υφίστανται θλιπτική και υψηλή εφελκυστική τάση [3.2.1]-[3.2.43]. Επιπλέον, η υστέρηση και οι υπερβολικές απώλειές τους επίσης επηρεάζονται από μηχανικά φορτία [3.2.44]-[3.2.46]. Κατά συνέπεια, η μαγνητομηχανική αλληλεπίδραση στα ελάσματα επηρεάζουν τη ροπή, την απόδοση και την ηλεκτροκινητική δύναμη σε αυτές τις σύγχρονες μηχανές απροθυμίας υψηλών ταχυτήτων.

Πρόσφατα, αυτές οι μαγνητο-μηχανικές επιδράσεις των ηλεκτρικών ατσαλιών είναι αντικείμενο έρευνας με εφαρμογή σε κινητήρες απροθυμίας (reluctance) [3.2.44], [3.2.47], μηχανές μόνιμου μαγνήτη [3.2.46], [3.2.48] και κινητήρες επαγωγής υψηλής ταχύτητας [3.2.45], [3.2.46].

Η ανάλυσή τους βασίζεται σε παρόμοια μέθοδο ανάλυσης με βάση τη μέθοδο 2D πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για τη μαγνητική ανάλυση, ενώ ανερχόμενος είναι ο φορμαλισμός ενός μαγνητομηχανικού μοντέλου που περιγράφει την συμπεριφορά στην περιοχή του σιδήρου.

Στο [3.2.47], ο καταστατικός νόμος περιγράφει ένα δισδιάστατο πολλαπλής κλίμακας μοντέλο βασισμένο σε μακροσκοπικό επίπεδο. Η μαγνήτιση και η μηχανική τάση λαμβάνονται από μια περιγραφή ενέργειας που εισάγει η μαγνητοστατική και μαγνητοσυστολική ενέργεια που οφείλεται σε ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και ένα φορτίο μηχανικής τάσης. Η ανάλυσή τους αποκαλύπτει μια μικρή πτώση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων.

Στο [3.2.44], η έρευνα διευρύνεται στις μαγνητικές απώλειες λόγω συρρίκνωσης και του στάτη και του δρομέα. Το τρισδιάστατο μοντέλο πολλαπλής κλίμακας είναι συζευγμένο με το μοντέλο Jiles-Atherton το οποίο αποδίδει την ανυστερητική μαγνήτιση υπό μηχανική τάση. Το μαγνητοστατικό πρόβλημα λύνεται με το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό. Αυτή η ανάλυση προβλέπει κάποια αύξηση των απωλειών σιδήρου λόγω συρρίκνωσης κατά 5 έως 10 % ενώ αυτές οι απώλειες μπορεί να αυξηθούν κατά 50 % στο πίσω μέρος του στάτη.

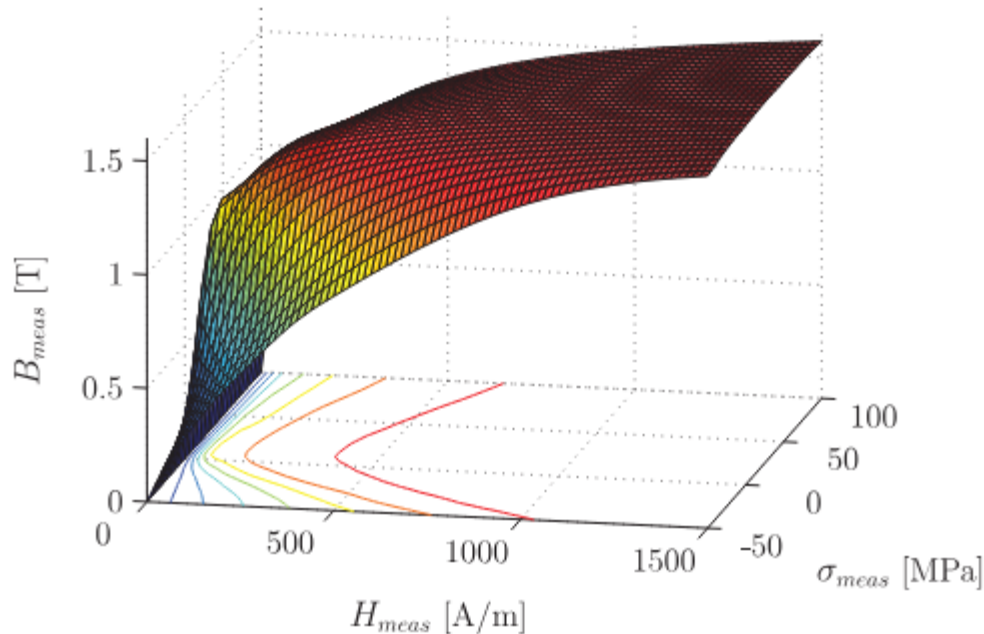
Στα [3.2.45], [3.2.48], εκτιμώνται οι δισδιάστατες μαγνητικές ιδιότητες με ένα σύνολο μαγνητομηχανικών μονοαξονικών μετρήσεων και μια ισοδύναμη μονοαξονική μηχανική τάση που ισοδυναμεί με 2D και 1D μαγνητοσυστολική ενέργεια που προέρχεται από [3.2.49].

Στο [3.2.46], οι μαγνητομηχανικοί συστατικοί νόμοι προέρχονται από ένα πολυαξονικό θερμοδυναμικό μοντέλο συζευγμένο με ένα μοντέλο Jiles-Atherton για να εξηγήσει την υστέρηση στα αποτελέσματα του [3.2.43]. Τα μηχανικά και τα μαγνητοδυναμικά προβλήματα επιλύονται ταυτόχρονα για την εξέταση τυχόν αλλαγών της μηχανικής συρρίκνωσης εξαιτίας μαγνητικών μηχανικών τάσεων τόσο στον στάτη όσο και στον δρομέα, οι φυγόκεντρες δυνάμεις και πιέσεις του τανυστή Maxwell συνυπολογίζονται. Η έρευνα αποκαλύπτει αύξηση των μαγνητικών απωλειών κατά 3,5 έως 18 % στην περιοχή του στάτη για μία μηχανή σύγχρονου μόνιμου μαγνήτη 2,2 kW και κατά 3,2 % για την περίπτωση που μόνο η φυγόκεντρος δύναμη λαμβάνεται υπόψη σε μηχανή επαγωγής 50 kW συμπαγούς δρομέα υψηλής ταχύτητας.

Η σύζευξη της μηχανικής καταπόνησης και του μαγνητικού πεδίου εκτελείται στους υλικούς συστατικούς νόμους που διέπουν τον ηλεκτρικό χάλυβα. Η μαγνητική τους διαπερατότητα αλλάζει όχι μόνο με το πλάτος πεδίου, αλλά και με το αποκλίνον μέρος της μηχανικής τάσης ενώ παράλληλα επηρεάζεται και με τη συσχέτιση των διευθύνσεων των μηχανικών τάσεων με τον προσανατολισμό του πεδίου. Ως εκ τούτου, ακόμη και αν η μηχανική καταπόνηση αξιολογείται μόνο μία φορά για μια δεδομένη κατάσταση, αυτή η ισοδύναμη κατανομή πεδίου αλλάζει κατά την επαναληπτική διαδικασία λόγω της διαφοροποίησης της διεύθυνσης του πεδίου.

Οι δισδιάστατες μαγνητομηχανικές ιδιότητες των ηλεκτρικών φύλλων χάλυβα εξάγονται από μονοαξονικές μετρήσεις [3.2.42] ενώ η ισοδύναμη μηχανική τάση που εξισώνει το πλάτος της μαγνήτισης από πολυαξονική σε μονοαξονική περιγράφεται αναλυτικά στο [3.2.50]. Αυτό το ισοδύναμο μοντέλο είναι ο μαγνητομηχανικός χαρακτηρισμός που χρησιμοποιείται στα [3.2.45], [3.2.48].

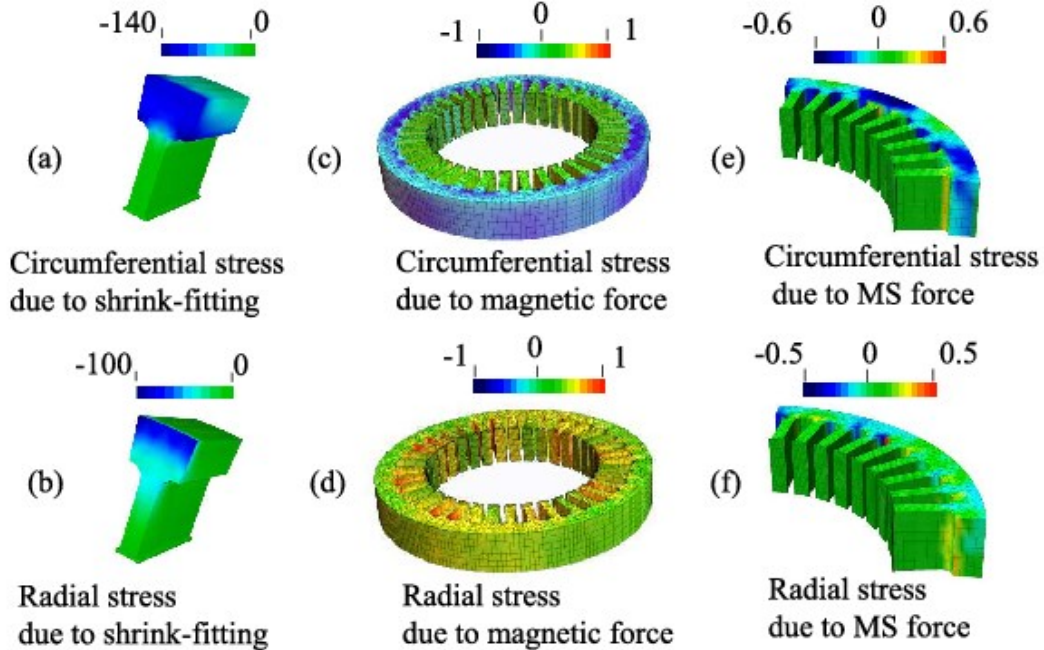
Μία εναλλακτική ισοδύναμη μηχανική τάση που παρουσιάζει καλύτερη ακρίβεια της διαπερατότητας αφού στοχεύει στη διατήρηση της πλάτος της μαγνήτισης παρά τη διατήρηση της μαγνητοελαστικής ενέργειας [3.2.40]. Η ανάλυση του μηχανικού προβλήματος στον δρομέα πραγματοποιείται προκειμένου να αξιολογηθεί η διακύμανση της καταπόνησης στα ελάσματα χάλυβα. Η ανάλυση αναπτύσσεται με βάση ένα μαγνητοστατικό 2D FEM που χρησιμοποιεί μικτό φορμαλισμό στην περιγραφή των ιδιοτήτων του υλικού, ενώ παράλληλα υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο με βάση πεπερασμένα στοιχεία ακμής. Η σύνθεση αυτή, προσδίδει ακρίβεια στις συνθήκες διεπαφής μεταξύ των ελασμάτων αφού χρησιμοποιούνται 2D Whitney/Ned'elec' τριγωνικά στοιχεία. Η ροπή υπολογίζεται σε μια προκαθορισμένη επιφάνεια και οι απώλειες υστέρησης υπολογίζονται με βάση το εξαρτημένο μοντέλο Jiles-Atherton που παρουσιάζεται στο [3.2.42]. Τέλος, η μαγνητομηχανική ανάλυση παρουσιάζει αύξηση της μαγνητικής απώλειες κατά 4,1 % και μικρή μείωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και οι δύο κυρίως λόγω της συρρίκνωσης του στάτη.



Σχ. 3.18 Αναπαράσταση της καμπύλης BH ως επιφάνεια για διάφορες μονοαξονικές πιέσεις. Οι γραμμές στο επίπεδο αναπαριστούν ισοσταθμικές καμπύλες διαπερατότητας σε σχέση με την μηχανική τάση και του H πεδίου [3.2.40]

3.2.5.2 Σφικτή Συναρμογή (Shrink fitting)

Οι απώλειες πυρήνα στον στάτη αποτελούν μία από τις κύριες πηγές απωλειών και μπορούν να περιοριστούν όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρικός χάλυβας με καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες ή με βελτίωση του σχεδιασμού της μηχανής και των κατασκευαστικών διεργασιών. Στις δύο αυτές περιπτώσεις απαιτείται ακριβής υπολογισμός και μοντελοποίηση των απωλειών πυρήνα με στόχο την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του κινητήρα πριν την κατασκευή του.



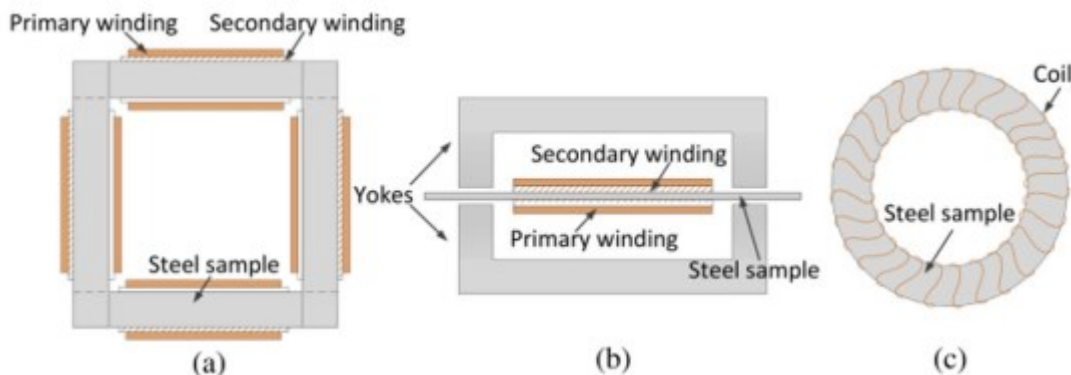
Σχ. 3.19 Κατανομή Von Mises Stress στον στάτη ηλεκτρικής μηχανής υπό διαφορετικά φαινόμενα. (α) Σφικτή Συναρμογή (β) Μαγνητικές Πιέσεις (γ) Μαγνητοσυστολή [3.2.32]

Η μηχανική καταπόνηση μπορεί να αλλάξει τις μαγνητικές ιδιότητες του ηλεκτρικού χάλυβα, συμπεριλαμβανομένης της μαγνητικής διαπερατότητας, τη μαγνητοσυστολή και των απωλειών πυρήνα [3.2.34]–[3.2.37]. Οι απώλειες του πυρήνα συνήθως αυξάνονται έντονα με τη θλιπτική τάση ενώ κατ’ επέκταση η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται [3.2.38]. Εκτός από τις απώλειες, η εκπομπή ακουστικού θορύβου σε κινητήρες PM είναι επίσης ένα θέμα ανησυχίας [3.2.33], καθώς οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος PM συνήθως κινούνται με μετατροπέα με διακόπτη συχνότητα πολλών kHz, η οποία μπορεί να προκαλέσει ενοχλητικούς ακουστικούς θορύβους. Η συναρμολόγηση με σφιχτή συναρμογή των φύλλων λαμαρίνας του στάτη με το εξωτερικό κέλυφος-περιβλήματος του κινητήρα δημιουργεί υψηλά επίπεδα θλιπτικής μηχανικής καταπόνησης στο εξωτερικό μέρος του σιδήρου του στάτη [3.2.37], και μπορεί να αυξήσει τις απώλειες καθώς και την μαγνητοσυστολή στις υπό μελέτη περιοχές.

Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο προκαλεί ηλεκτρομαγνητική δύναμη και μαγνητοσυστολή, και τα δύο προκαλούν μηχανικές πιέσεις στον πυρήνα. Η επιστημονική κοινότητα έχει καταβάλει προσπάθεια για ακριβή ανάλυση απωλειών και ηχητικών θορύβων των κινητήρων [3.2.33]–[3.2.37], [3.2.39]. Ακόμη μεθοδολογίες για μαγνητομηχανική ανάλυση αναπτύσσονται για τη διερεύνηση της επίδρασης των μηχανικών ιδιοτήτων και των μηχανικών τάσεων στις απώλειες πυρήνα και στη δόνηση των κινητήρων. [3.2.32]

3.2.6 Μεθοδολογία Μέτρησης των Χαρακτηριστικών Καμπυλών

Σημαντικό μέρος της σωστής μοντελοποίησης των φαινομένων των ηλεκτρικών μηχανών είναι η δυνατότητα αναπαραγωγής των καταστάσεων λειτουργίας του ηλεκτρικού σιδήρου σε απλές διατάξεις μέτρησης με στόχο τον πλήρη χαρακτηρισμό των μαλακών μαγνητικών υλικών. Μερικές τέτοιες απλές σχετικά διατάξεις μέτρησης είναι οι ακόλουθες:



Σχ. 3.20 (a) The Epstein frame, (b) the single sheet tester and (c) A Ring core topology. [3.2.51]

3.2.6.1 Μέτρηση σε Διάταξη Πλαισίου Epstein (Epstein Frame)

Η διαδικασία μέτρησης των δοκιμών με τη μέθοδο Epstein, βασίζεται κατά κύριο λόγο στο φαινόμενο του μετασχηματιστή με ίσο αριθμό σπειρών σε πρωτεύον και δευτερεύον, με τη μόνη διαφορά ότι στο δευτερεύον ρέει αμελητέο ρεύμα (πολύ μεγάλη εσωτερική αντίσταση μετρητικών οργάνων). Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχηματικό, το κύκλωμα του πρωτεύοντος αποτελείται από ένα μετρητικό ρεύματος εν σειρά, ένα βαττόμετρο και ένα μετρητικό συχνότητας, ενώ το δευτερεύον από μετρητικά τάσης. Κατά την διαδικασία μέτρησης, το σύστημα παροχής ισχύος, τροφοδοτεί με εναλλασσόμενη τάση το πρωτεύον του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα εναλλασσόμενο ρεύμα να ρέει στον βρόχο της διάταξης. Το ρεύμα πρωτεύοντος, δημιουργεί ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο επάνω στα δοκίμια των λαμαρινών που ουσιαστικά αποτελούν τον πυρήνα των πηνίων. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο με τη σειρά του, μέσω του νόμου της επαγωγής του Faraday, δημιουργεί μία ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον τύλιγμα της διάταξης ανάλογη με την μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα. Με την χρήση των

μετρητικών διατάξεων, είναι δυνατή η μέτρηση τόσο του ρεύματος του πρωτεύοντος τυλίγματος (είσοδος), όσο και της τάσης του δευτερεύοντος (έξοδος) με αποτέλεσμα να υπάρχει όλη η πληροφορία του αιτίου - μαγνητική ένταση **H** και του αποτελέσματος - μαγνητική επαγωγή **B**. Μέσω της χρήσης του αμοιβαίου πηνίου εξάγεται τελικά η πληροφορία της μαγνητικής πόλωσης του υλικού **J**. Στην διάταξη αυτή είναι απαραίτητη η ημιτονοειδής μαγνητική επαγωγή σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60404-2. Για το λόγο αυτό ένας ηλεκτρονικός ελεγκτής είναι υπεύθυνος για την κατάλληλη ρύθμιση του ρεύματος στο πρωτεύον κύκλωμα, έτσι ώστε η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον να είναι ημιτονοειδής.

3.2.6.2 Μέτρηση με Χρήση μεμονωμένων Φύλλων Λαμαρίνας (Single Sheet Test – SST)

Η αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια με αυτή της διάταξης Epstein, με τη μόνη διαφορά ότι το μαγνητικό πεδίο εκτελεί μία λιγότερο περίπλοκη διαδρομή, με αποτέλεσμα αφενός η διαδικασία της μέτρησης να είναι πιο απλή, αφετέρου να μην είναι τόσο αντιπροσωπευτική με τη λειτουργία του μαγνητικού υλικού όταν αυτό υπόκειται στο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Έτσι, κατά πλήρη αντιστοιχία, το ρεύμα στο κύκλωμα του πρωτεύοντος είναι υπεύθυνο για την δημιουργία της διέγερσης, συνεπώς για τη δημιουργία ημιτονικού μαγνητικού πεδίου στο δοκίμιο, η τάση στο δευτερεύον οφείλει να είναι ημιτονοειδής. Η ρύθμιση της τάσης αυτής γίνεται με ηλεκτρονικό ελεγκτή.

3.2.6.3 Μέτρηση σε Πυρήνα δακτυλίου (Ring Core Measurements)

Σε αυτήν την διάταξη, χρησιμοποιείται ένας πυρήνας σε σχήμα δακτυλίου ο οποίος έχει κατασκευαστεί με πολλαπλές λαμαρίνες που στοιβάζονται η μία επάνω στην άλλη ενώ γύρω από τον δακτύλιο τυλίγονται διαδοχικά δύο τυλίγματα που αποτελούν το πρωτεύον και το δευτερεύον κύκλωμα. Έτσι, η αρχή λειτουργίας συνεχίζει να είναι ίδια όπως και στις άλλες δύο διατάξεις, μόνο που στην συγκεκριμένη περίπτωση, η επιλογή τόσο των απαιτούμενων τυλιγμάτων, όσο και των διαστάσεων του πυρήνα δακτυλίου μπορεί να γίνει κατά κρίση. Με οποιονδήποτε συνδυασμό των παραπάνω μεγεθών, μπορεί κανείς να μετρήσει διαφορετικά λειτουργικά σημεία καθώς η ίδια η γεωμετρία καθορίζει την κατανομή του πεδίου και τις ανάγκες ηλεκτρικής φόρτισης.

3.2.7 Προοπτικές στα Μαγνητικά Υλικά Ηλεκτροκίνησης

Η επιλογή του κατάλληλου σιδηρομαγνητικού υλικού σε μια ηλεκτρική μηχανή παύει να αποτελεί μια μονοσήμαντη επιλογή, αφού η βέλτιστη σχεδίαση μιας μηχανής για μια περιοχή εφαρμογών, εξαρτάται άμεσα από τις μαγνητικές ιδιότητες του πυρήνα της. Πιο συγκεκριμένα, υψηλό σημείο κορεσμού και υψηλή διαπερατότητα για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, συνεπάγεται και χαμηλότερες απώλειες πυρήνα, και επομένως υψηλότερο βαθμό απόδοσης, αφού σε περίπτωση συνεχούς λειτουργίας στα 1.5T, η μηχανή θα λειτουργεί σε σημείο χαμηλότερου του κορεσμού, απαιτώντας έτσι και μικρότερη ηλεκτρική φόρτιση, άρα μικρότερη πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα. Έτσι η επιλογή του βέλτιστου υλικού για την εκάστοτε εφαρμογή είναι κομβικής σημασίας αφού ο υψηλός βαθμός απόδοσης θα οδηγήσει σε μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, η οποία όπως προβλέπεται για μια μηχανή που λειτουργεί σε βιομηχανικό περιβάλλον, ξεπερνά το 90% του συνολικού κόστους στον κύκλο ζωής της μηχανής [3.2.52].

3.2.7.1 Κράμα πυριτιούχου σιδήρου (Silicon Iron)

Τα κράματα πυριτίου (Si) – σιδήρου (Fe) αποτελούν το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σιδηρομαγνητικό υλικό στις ηλεκτρικές μηχανές και είναι διαθέσιμο σε δύο τύπους ελασμάτων: με κατευθυνόμενους κόκκους (grain-oriented, GO) ή χωρίς (non-oriented, NO).

Τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ισотροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, λόγω της αλλαγής της μεταβλητότητας της κατεύθυνσης της μαγνητικής ροής, με την περιστροφή του πεδίου. Αντιθέτως, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους είναι ανισοτροπικά, παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών και όταν απαντώνται υψηλές συχνότητες. Σε ελάσματα μη

κατευθυνόμενων κόκκων, η περιεκτικότητα σε σίδηρο διαμορφώνεται από 99% σε κράματα χαμηλής περιεκτικότητας πυριτίου με χρήση σε συμβατικές εφαρμογές, έως και 97% σε κράματα υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο με χρήση σε απαιτητικές εφαρμογές.

Υψηλής περιεκτικότητας πυριτιούχοι χάλυβες (SiFe 6.5%) χρησιμοποιούνται κυρίως σε μηχανές υψηλών ταχυτήτων λόγω της μεγάλης ηλεκτρικής αντίστασης που προσφέρουν, περιορίζοντας έτσι τα δινορεύματα που αναπτύσσονται στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας. Συγκεκριμένα, παρά το χαμηλότερο σημείο κορεσμού που εμφανίζουν σε σχέση με τα κράματα κοβαλτίου – σιδήρου, φαίνεται πως σε εφαρμογές πολύ υψηλών ταχυτήτων, όπως οι αεροπορικές εφαρμογές, είναι προτιμότερες, λόγω των χαμηλών απωλειών πυρήνα που εμφανίζουν σε οδήγηση υψηλών συχνοτήτων [3.2.53]. Παρόλα αυτά, τα μειονεκτήματα του εξωτικού αυτού υλικού συναντώνται στη μείωση της μαγνητικής επαγωγής και της μαγνητικής διαπερατότητας, λόγω του αυξημένου περιεχόμενου σε πυρίτιο, η οποία επίσης καθιστά το κράμα πιο εύθραυστο και σκληρό οδηγώντας σε πολυπλοκότερες και πολύ ακριβότερες διεργασίες κατασκευής και επεξεργασίας, σε σχέση με τις προηγούμενες προσμίξεις [3.2.54].

Τα πλεονεκτήματα της πρόσμιξης Si:

- 1) ευκολότερη μαγνήτιση και απομαγνήτιση του υλικού
- 2) αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση που οδηγεί σε μείωση των επαγόμενων δινορευμάτων
- 3) βελτίωση τη σταθερότητας των μαγνητικών ιδιοτήτων στο χρόνο

Τα μειονεκτήματα της πρόσμιξης Si:

- 1) μείωση της θερμοκρασίας Curie (θερμοκρασία στην οποία το μαγνητικό υλικό χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες)
- 2) μείωση του σημείου κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής
- 3) ευθραυστότητα σε κράματα με περιεκτικότητα πάνω από 2% πυρίτιο.

Αντίστοιχα η προσθήκη αλουμινίου αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση αλλά μειώνει την μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης μαγγανίου σχηματίζει μεγαλύτερους κόκκους στην επιφάνεια του ελάσματος, με αποτέλεσμα την αύξηση της διαπερατότητας, υπό το κόστος όμως αυξημένων απωλειών [3.2.55].

3.2.7.2 Κράμα Κοβαλτιούχου Σιδήρου (Cobalt Iron)

Το κράμα κοβαλτίου (Co) και σιδήρου (Fe), αποτελεί το ακριβότερο σιδηρομαγνητικό υλικό, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης σε κοβάλτιο, το οποίο είναι εξωτικό υλικό. Το κράμα αυτό, παρουσιάζει το υψηλότερο σημείο κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά, φτάνοντας έως τα 2.43T. Μια τυπική σύνθεση του κράματος αποτελείται από 48-50% κοβάλτιο, περίπου 48% σίδηρο και 2% βανάδιο (V). Μέσω κατάλληλων προσμίξεων, όπως με το νιόβιο (Nb), αλλά και μέσω κατάλληλης θερμικής κατεργασίας, όπως ανόπτηση σε υψηλότερη θερμοκρασία [3.2.56], είναι δυνατό να επιτευχθούν χαμηλότερες απώλειες πυρήνα και μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα ή να ενισχυθεί η μηχανική αντοχή της λαμαρίνας. Το υψηλό σημείο μαγνητικής φόρτισης στο οποίο μπορεί να φτάσει, το καθιστά ιδανική επιλογή σε εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος, αφού επιτρέπει το σχεδιασμό μηχανών μικρότερου μεγέθους και βάρους σε σχέση με τη συμβατική λαμαρίνα. Τέτοιες εφαρμογές είναι κυρίως αεροναυπηγικές, στρατιωτικές και εφαρμογές μηχανοκίνητου αθλητισμού όπου το μικρότερο βάρος αντισταθμίζει την υψηλότερη τιμή.

Το σοβαρότερο μειονέκτημα αυτού του υλικού είναι η υψηλή τιμή του, ειδικότερα όταν πρόκειται για υψηλές συγκεντρώσεις κοβαλτίου, ενώ πρόσφατα έχει αναπτυχθεί ενδιαφέρον στη χρήση λαμαρινών κοβαλτίου σιδήρου με συγκέντρωση 15-30% κοβαλτίου, που παρουσιάζουν μεν ελαφρώς μικρότερο σημείο κορεσμού, αλλά επιτυγχάνεται δε μείωση του συνολικού κόστους.

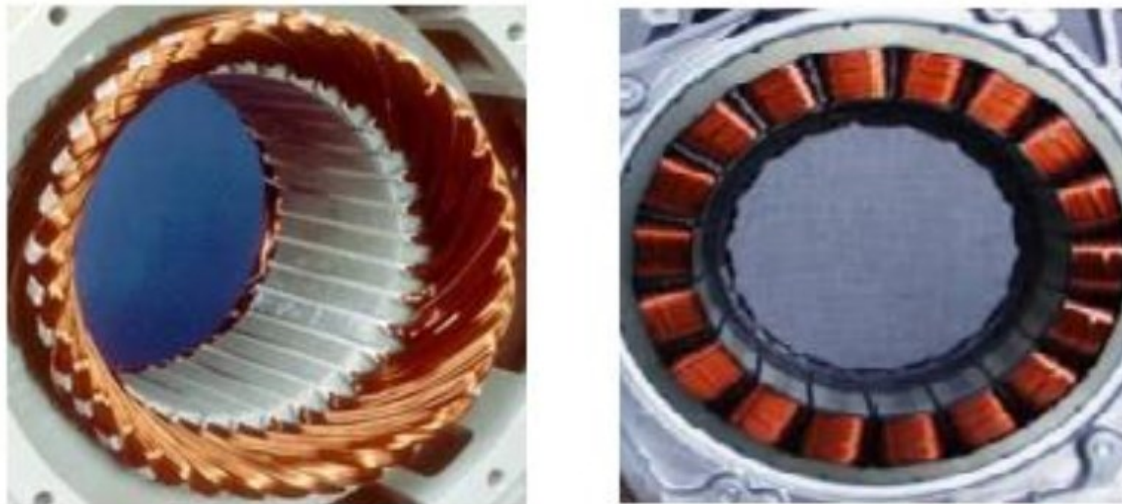
3.2.7.3 Κράμα νικελιούχου σιδήρου (Nickel Iron)

Οι λαμαρίνες από κράμα νικελίου (Ni) και σιδήρου (Fe), έχουν βέλτιστη χρήση σε εφαρμογές όπου οι απώλειες πυρήνα αποτελούν κομβικό παράγοντα. Τυπικές προσμίξεις του κράματος

περιέχουν 40 – 50% νικέλιο, η αύξηση της συγκέντρωσης του οποίου, οδηγεί σε μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα, εις βάρος όμως της ηλεκτρικής αντίστασης η οποία μειώνεται, οδηγώντας έτσι σε αύξηση των δινορευμάτων [3.2.52]. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτού του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι η πολύ χαμηλή μαγνητική αντίσταση και η κατ' επέκταση πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες λαμαρίνες CoFe και SiFe, ενώ κύριο μειονέκτημα αποτελεί το χαμηλό σημείο κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής. Βάση των παραπάνω μαγνητικών ιδιοτήτων, οι λαμαρίνες NiFe 45-50%, βρίσκουν συχνή χρήση σε εφαρμογές μηχανές χαμηλής ισχύος και υψηλής ταχύτητας, όπου κύριος παράγοντας είναι οι χαμηλές απώλειες, όπως σε εργαλειομηχανές ιατρικής χρήσης και αεροδιαστημικές εφαρμογές [3.2.54].

3.3 Αγωγή Υλικά Ηλ. Μηχανών

Το τυλίγμα του στάτη φροντίζει κάθε φορά να δημιουργεί μια ημιτονική κατανομή μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Η παραγωγή ροπής στον δρομέα οφείλεται στην αλληλεπίδραση του πεδίου του στάτη με το πεδίο του δρομέα. Η ανάλυση των επιμέρους αρμονικών των δύο πεδίων αυτών και η συσχέτιση της εκάστοτε αρμονικής του πεδίου του δρομέα με αυτές του στάτη, δημιουργούν την κύρια και τις επιμέρους αρμονικές ροπής. Η συσχέτιση αρμονικών στάτη δρομέα γίνεται χρησιμοποιώντας την χωρική τους ανάλυση συνυπολογίζοντας την σχετική χρονική ταχύτητα που έχουν. Ένας από τους κύριους στόχους, λοιπόν των δύο αυτών σχεδιασμών είναι η μείωση των αρμονικών των δύο πεδίων. Η ανάπτυξη ροπής ωστόσο δεν είναι απαραίτητο να γίνεται με βάση τη θεμελιώδη αρμονική του στάτη. Σ' αυτή την περίπτωση, αρκετές φορές, είναι διακριτή στην ανάλυση πεδίου η θεμελιώδης αρμονική του στάτη που «διασχίζει» τον δρομέα. Συνήθως αυτό γίνεται στην κατηγορία των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων. Μια ακόμη κατηγορία τυλίγματος είναι και αυτή των κατανεμημένων τυλιγμάτων, η οποία έχει ως στόχο την βελτίωση της κύριας αρμονικής του πεδίου (μειώνοντας τις δευτερεύουσες αρμονικές), η οποία και παράγει την κύρια ροή της μηχανής.



Σχ. 3.21 Στάτης μηχανής με κατανεμημένα (αριστερά) και συγκεντρωμένα (δεξιά) τυλίγματα. Οι εικόνες

Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους όσον αφορά το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος. Πιο αναλυτικά περιγράφονται πιο κάτω.

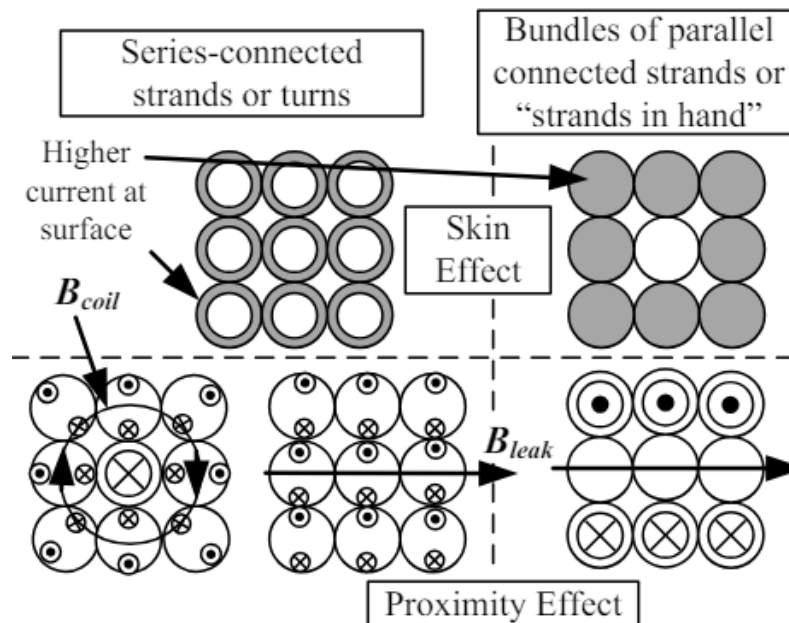
Επικαλυπτόμενα, διανεμημένα: Αυτού του είδους τα τυλίγματα παράγουν μία πιο ημιτονική κατανομή της ΜΕΔ στο διάκενο. Για το λόγο αυτό είναι και τα πιο ευρέως διαδεδομένα τυλίγματα σε μηχανές μονίμων μαγνητών. Η έλλειψη αρμονικών βοηθά στη μείωση της ταλάντωσης ροπής και στις περαιτέρω απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι το μήκος των αγωγών στα άκρα του τυλίγματος το οποίο αυξάνει τις απώλειες χαλκού, η αύξηση του

συνολικού βάρους και η μη ύπαρξη δυναμικής συμπεριφοράς σε σφάλματα. Σε αυτού του είδους τυλίγματος, υπάρχει η δυνατότητα να μεταβάλλεται ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση, καθώς και ο αριθμός των αυλάκων που επικαλύπτει η μία φάση την άλλη. Επιμέρους κατηγοριοποίηση γίνεται και ως προς τον τρόπο σύνδεσης των άκρων τυλίγματος (μεταξύ συστάδων) σε κυματοειδή και βροχοειδή.

Μη επικαλυπτόμενα συγκεντρωμένα: Αυτή η κατηγορία έχει εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια με στόχο την αύξηση της πυκνότητας ισχύος και την περαιτέρω μείωση των απωλειών χαλκού. Ωστόσο το κύριο μειονέκτημα είναι το ευρύ φάσμα αρμονικών που εμπεριέχονται στην ροπή. Σε υψηλές ταχύτητες εξαιτίας των αρμονικών του πεδίου αναπτύσσονται πρόσθετες απώλειες δινορευμάτων στον δρομέα και στους μόνιμους μαγνήτες. Η σχεδίαση του κάθε είδους συγκεντρωμένου τυλίγματος είναι σύνθετη, επειδή ανάλογα με τους πόλους που διαθέτει η μηχανή, επιτρέπονται συγκεκριμένοι συνδυασμοί αριθμού αυλάκων. Οι συνδυασμοί αριθμών αυλάκων και πόλων δημιουργούν συγκεκριμένο συντελεστή τυλίγματος, ο οποίος είναι καθοριστικός στην σχεδίαση των μηχανών. Ουσιαστική μελέτη που αφορά τους συνδυασμούς αυτούς και την συμπεριφορά των αρμονικών σε αυτού του είδους τυλίγματος έχει γίνει στην διδακτορική διατριβή [3.3.9].

3.3.1 Επιδερμικό Φαινόμενο και Φαινόμενο Γειτνίασης

Για λόγους αύξησης της πυκνότητας ισχύος οι ταχύτητες των μηχανών μόνιμου μαγνήτη στο πεδίο της ηλεκτροκίνησης αυξάνονται διαρκώς. Παραδοσιακά οι περισσότερες μηχανές με περιελίξεις κοντά στο διάκενο θεωρούνταν ότι υπόκειται σε έντονες απώλειες δινορευμάτων εξαιτίας της έντονης μεταβλητότητας του πεδίου, εξ ου και η χρήση του σύρματος Litz, παρά το αυξημένο κόστος κατασκευής. Ωστόσο, με την ανάπτυξη μαγνητών από σπάνιες γαίες υψηλής μαγνήτισης, δημιουργήθηκαν μηχανές, οι οποίες έχουν πολύ μεγάλα εύρη στροφών. Σε αυτές τις μηχανές οι περιελίξεις στις σχισμές τείνουν να είναι επιρρεπείς σε πρόσθετες απώλειες χαλκού εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτές οι μηχανές βρίσκονται συνήθως σε εφαρμογές όπως υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα. Συχνά χρησιμοποιούνται παράλληλοι κλώνοι επιπροσθέτως με την χρήση σύρματος τύπου Litz [3.3.1]. Η χρήση παράλληλων κλάδων συχνά οδηγεί σε κυκλοφορία κυκλικών ρευμάτων μεταξύ των παράλληλων κλάδων [3.3.2]. Εάν υπάρχουν πολλοί παράλληλοι κλάδοι που χρησιμοποιούνται τότε αυτό το γεγονός μπορεί να μειώσει τον συντελεστή πλήρωσης της αύλακας και να αυξήσει τις απαιτήσεις ψύξης.



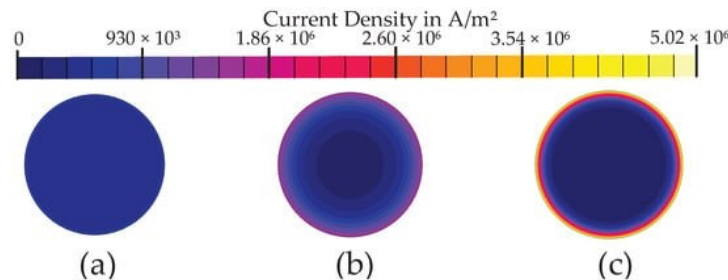
Σχ. 3.22 Επιδράσεις δέρματος και εγγύτητας στις σπείρες της αύλακας[3.3.1]

Επιπλέον, όταν οι παράλληλες διαδρομές της ίδιας σπείρας ενός πηνίου τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία της αύλακας τότε μεταξύ των παράλληλων αυτών κλάδων αναπτύσσεται το φαινόμενο εγγύτητας (ή Proximity) και συνεπώς αναπτύσσεται ρεύμα κυκλοφορίας μεταξύ των παράλληλων κλώνων. Ακόμη αναπτύσσονται και δινορεύματα στον εκάστοτε μεμονωμένο κλώνο αφού μπορεί να υπάρχει εναλλασσόμενη ροή που δημιουργείται από τους μαγνήτες του δρομέα ενώ παράλληλα υπάρχουν και φαινόμενα ηλεκτρικής χωρητικής ζεύξης και αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων.

Το Σχ. 3.22 απεικονίζει τις μεμονωμένες επιδράσεις σε κλώνους (φαινόμενο δέρματος) και τις επιδράσεις σε δέσμες παράλληλων κλώνων (εγγύτητα). Ακόμα και με λεπτό σύρμα που στοχεύει στην εξάλειψη του επιδερμικού φαινομένου, τα φαινόμενα εγγύτητας δεν μπορούν να εκλείψουν.

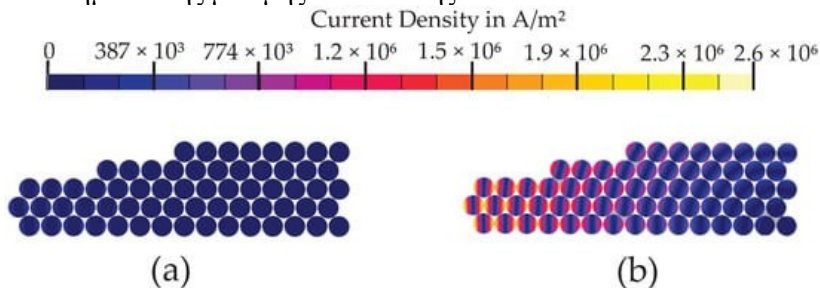
Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζεται η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος σε χάλκινο αγωγό, όταν αυτός βρίσκεται ελεύθερος στον αέρα και διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Είναι φανερό πως η διατομή του αγωγού για την αποφυγή υψηλής ανομοιομορφίας ρεύματος οφείλει να είναι μικρότερη από το μισό του επιδερμικού βάθους το οποίο δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

Η συνάρτηση που δίνει την κατανομή του ρεύματος εντός του αγωγού περιγράφεται με συναρτήσεις Bessel, ωστόσο στην εφαρμογή των ηλεκτρικών μηχανών η κοντινή παρουσία υψηλής διαπερατότητας μέσου όπως ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας, αλλοιώνει δραστικά την μορφή των ρευμάτων εντός του αγωγού. Επιπλέον πολυπλοκότητα στην εκτίμηση των φαινομένων γειτνίασης δημιουργείται από την χωρητική ζεύξη των φαινομένων στο φάσμα των υψηλών αρμονικών της οδήγησης του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, ενώ παράλληλα το εναλλασσόμενο πεδίο στην περιοχή του τυλώματος δεν δημιουργείται μόνο από ρεύματα των ίδιων αγωγών.



Σχ. 3.23 Skin effect σε αγωγό διαμέτρου 2 mm. (α) 1 kHz. (β) 100 kHz. (γ) 1 MHz. [3.3.3]

Στην [3.3.3], παρουσιάζεται πως τα ενεργά ελίσματα μπορούν να διαιρεθούν σε δέσμες που αποτελούνται από παράλληλα σύρματα (κλώνοι στο χέρι). Σε αυτή την περίπτωση τα ενεργά ελίσματα είναι στοιβαγμένα στην αύλακα ενώ οι παράλληλοι κλάδοι διασπείρονται στο μέγεθος τις αύλακας, μειώνοντας αποτελεσματικά τις απώλειες από τον συνδυασμό των δύο φαινομένων. Το τυλίγμα τελικώς είναι σφιχτό και οι κλώνοι δεν μπορούν να αλλάζουν θέση μεταξύ των πλευρών του πηνίου. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μείωση των απωλειών τυλίγματος. Μία τέτοια διαρρύθμιση τυλίγματος φαίνεται στο σχήμα 3.24 στο οποίο η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος υπολογίζεται με ΜΠΣ ημιτονικής μόνιμης κατάστασης.



Σχ. 3.24 Proximity Effect στην αύλακα μιας μηχανής. (α) 1 kHz (β) 10 kHz. [3.3.3]

3.3.2 Είδη Τυλιγμάτων Ηλεκτρικών Μηχανών

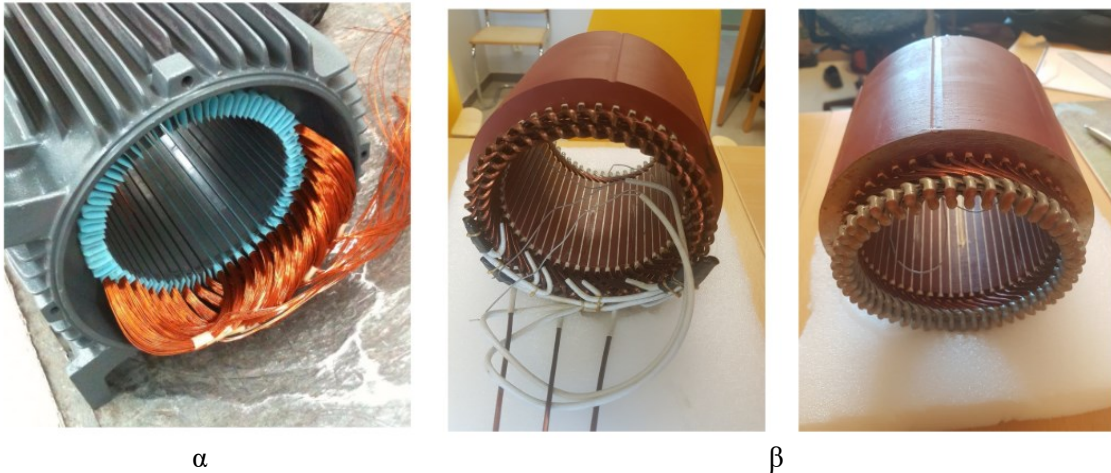
Το τυλίγμα των ηλεκτρικών μηχανών στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης όπως ήδη αναφέρθηκε είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την υψηλή απόδοση όσο και για την αύξηση των επιδόσεων ανά μονάδα όγκου. Ένας ακόμη παράγοντας είναι το κατά πόσο η διαδικασία κατασκευής τυλίγματος είναι εύκολο να επαναληφθεί και να γίνει μαζική παραγωγή. Συνήθης τακτική αύξησης της παραγωγής είναι η αύξηση των παράλληλων γραμμών παραγωγής. Κάτι τέτοιο συνηθιζόταν στην παραγωγή ηλεκτρικών μηχανών έως τα τέλη της δεκαετίας του 2000 καθώς οι μηχανές περιείχαν τυλίγματα μικρής κυκλικής διατομής αγωγών σύνθετα να περαστούν τις αύλακες του κινητήρα και συχνά με χαμηλή πληρότητα αύλακος. Μία τεχνική στην επίτευξη υψηλής πληρότητας ήταν η κατασκευή με το χέρι ή η χρήση προδιαμορφωμένων τυλιγμάτων.

Η ανάπτυξη των αυτοματισμών και των ρομποτικών διατάξεων έφερε στο προσκήνιο την χρήση μπαρών χαλκού ορθογωνικής διατομής που επιτυγχάνεται με σωστό σχεδιασμό πληρότητα αύλακος της τάξης το 85% ενώ λόγω του επιδερμικού φαινομένου και επαγόμενων δινορευμάτων σε συνδυασμό με την ανάγκη χρήση μη παράλληλων δοντιών η πληρότητα αυτή αντιστοιχεί σε μία πληρότητα της τάξης του 70% σε μία θεωρητική αντίστοιχη μηχανή με τυχαίο τύλιγμα.

Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι μία σειριακή γραμμή παραγωγής η οποία παράγει πιο γρήγορα τυλιγμένους στάτες ηλεκτρικών μηχανών, εφόσον η συνολική διαδικασία αποτελείται από τέσσερα στάδια σειράς που το καθένα εκτελείται ταχύτατα. Το πρώτο είναι η δημιουργία κατάλληλων φουρκετών από μπάρες χαλκού, το δεύτερο είναι η κατάλληλη τοποθέτηση στην αύλακα, το τρίτο η κάμψη των αγωγών στην άλλη άκρη και το τέταρτο η συγκόλληση των κεφαλών.

Η κατασκευαστική διαδικασία των τυλιγμάτων από μπάρες συνεχώς εξελίσσεται με μόνα εμπόδια την κατάλληλη συγκόλληση των κεφαλών χαλκού με laser και την μείωση του ύψους των τερματικών περιοχών.

Στο [3.3.8] παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές τυλίγματος μηχανών με τυχαίο τύλιγμα.



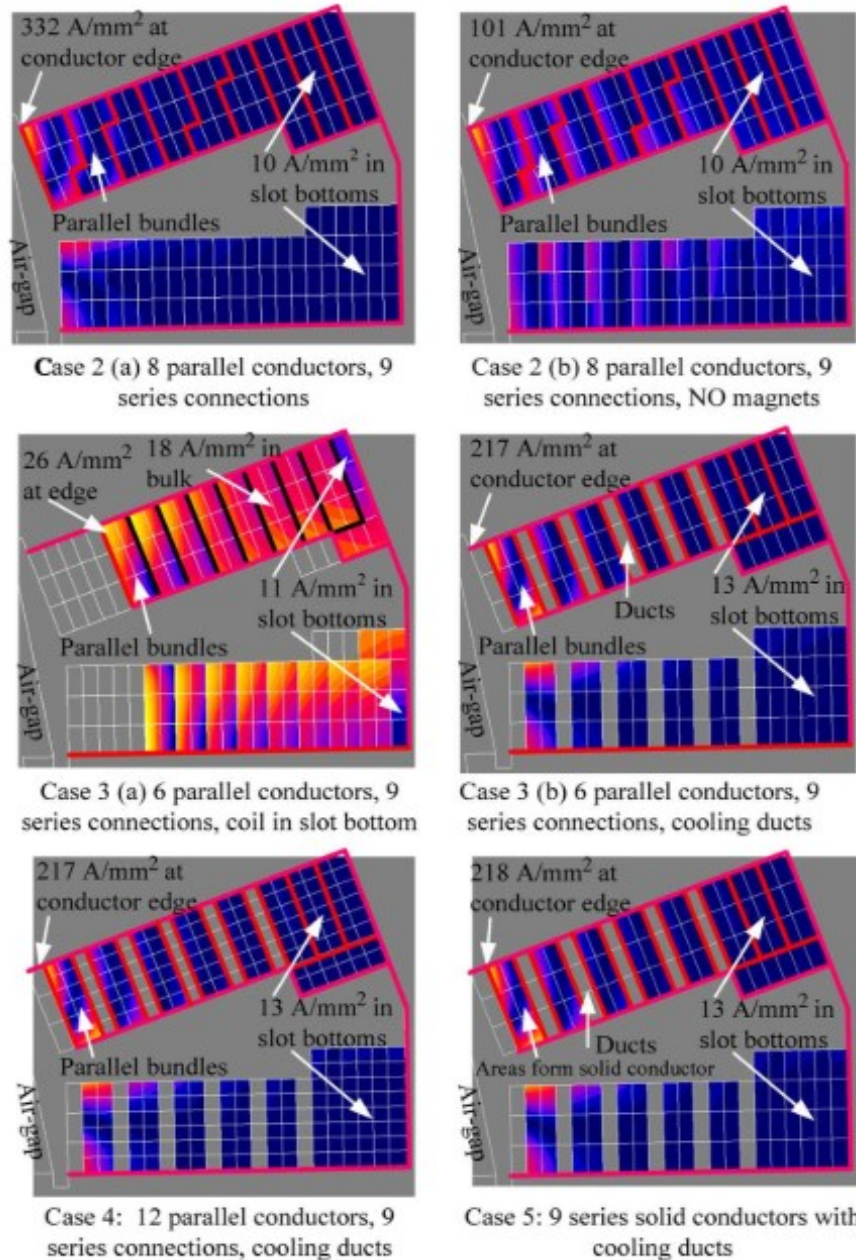
Σχ. 3.25 (α)εικόνα κατανομημένου τυλίγματος με λεπτό σύρμα (Random Winding) (β) Μπροστά και πίσω εικόνα κατανομημένου τυλίγματος με χρήση μπαρών (Bar Winding) [3.3.2]

Συνήθως οι πολύστροφες μηχανές μεγάλης μαγνήτισης μονίμου μαγνήτη έχουν πρόβλημα ορίου τάσης. Το πρόβλημα αυτό δημιουργείται από την μεταβολή του πεδίου στην μεγάλη ταχύτητα το οποίο αναπόφευκτα δημιουργεί μεγάλη ΗΕΔ. Συνεπώς, τα ενεργά ελίσματα στο τύλιγμα της μηχανής ολοένα και μικραίνουν, δημιουργώντας ανάγκη για χρήση παράλληλων κλάδων. Μία λύση είναι η παραλληλία των ελιγμάτων μεταξύ των διάφορων πόλων της μηχανής, είτε η παραλληλία των τυλιγμάτων της ίδιας αύλακας. Τελευταία επιλογή είναι η σύνδεση των φάσεων σε τρίγωνο αντί του αστέρα.

Η τεχνική παραλληλίας μεταξύ διαφόρων πόλων είναι ευάλωτη στις κατασκευαστικές ανομοιομορφίες καθώς τυχών διαφοροποιήσεις στη ροή του μαγνήτη στον εκάστοτε πόλο

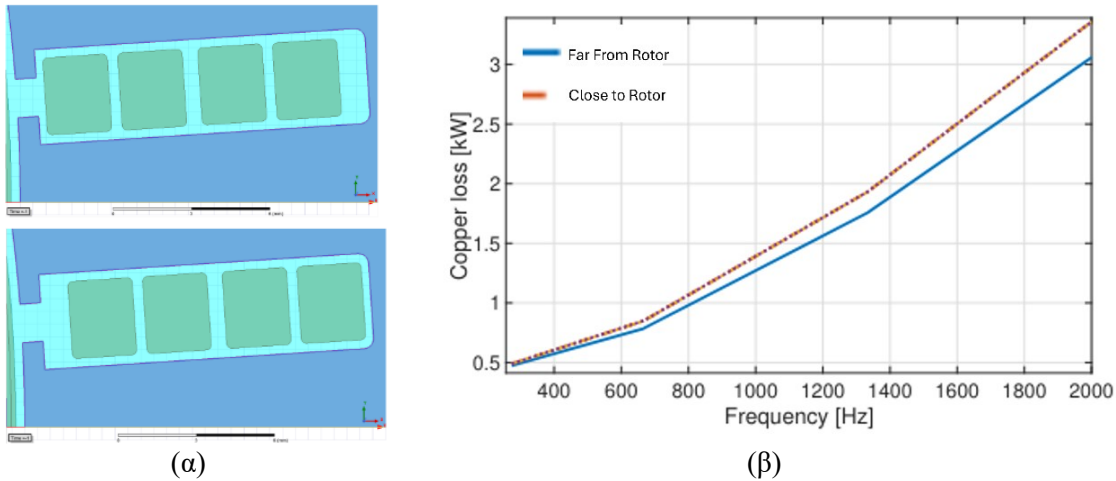
προκαλεί κυκλικά ρεύματα. Ωστόσο δίνει την δυνατότητα μείωσης των απωλειών γειτνίασης που υπάρχουν όταν η παραλληλία πραγματοποιηθεί σε αγωγούς που βρίσκονται στην ίδια αύλακα. Με στόχο την κατάλληλη τοποθέτηση των παράλληλων κλάδων (Strands) και των εν σειρά ελιγμάτων μια ανάλυση ευαισθησίας για διάφορα σενάρια πραγματοποιείται στο [3.3.4].

Η χρήση του τριγώνου σύνδεσης των φάσεων εμπεριέχει περισσότερα μειονεκτήματα και κινδύνους παρά τα συνολικά οφέλη, και για το λόγο αυτό δεν συναντάται συχνά. Η σύνδεση αυτή επιτρέπει κυκλικά ρεύματα τρίτης αρμονικής - όλων των πολλαπλάσιων της 3^{ης} τάξης - προκαλώντας κορεσμό στο μαγνητικό κύκλωμα και πρόσθετες απώλειες χαλκού. Στην περίπτωση που η σχεδίαση της μηχανής γίνει με δεδομένο την χρήση τριγώνου, προκύπτουν σοβαροί περιορισμοί, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει και πρόκληση για την κατάλληλη δημιουργία οδήγησης της από μετατροπέα ισχύος.



Σχ. 3.26 Διάφορες τεχνικές τοποθέτησης των παράλληλων και των εν σειρά ελιγμάτων εντός αύλακας μηχανής, Η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος αφορά την λειτουργία της μηχανής στις 12kRPM με μέγιστο φορτίο [3.3.4]

Η πραγματικότητα του σήμερα καταδεικνύει πως οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στην κατασκευή τυλιγμάτων από μπάρες χαλκού. Στις μηχανές με τύλιγμα κυλινδρικής διατομής αγωγών οι προκλήσεις των φαινομένων γειννίασης ήταν κυρίαρχες, δεδομένης της υψηλής ταχύτητας λειτουργίας. Στις μηχανές με ορθογωνικής διατομής μπαρών οι απώλειες των δινορευμάτων εντός της εκάστοτε μπάρας είναι οι κυρίαρχες. Ωστόσο η επιστημονική κοινότητα έχει προτείνει αρκετές ενδιαφέρουσες λύσεις με ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα η κάθε μία. Στο σχήμα 3.27 παρουσιάζεται μια λύση για την μείωση των απωλειών που προκαλεί το μεταβαλλόμενο πεδίο εξαιτίας της περιστροφής του δρομέα στον χαλκό. Η λύση αυτή αν και αντιτίθεται στην προσπάθεια αύξησης της πληρότητας της αύλακας είναι πάραυτα αποδοτική εφόσον μειώνει τις συνολικές απώλειες χωρίς να επηρεάζει σοβαρά την επίδοση της μηχανής ενώ παράλληλα διατηρεί την κατασκευαστική πολυπλοκότητα σε χαμηλό επίπεδο.



Σχ. 3.27 Ανάλυση ευαισθησίας απωλειών με βάση την απόσταση των μπαρών από την άκρη του δρομέα (α) οι δύο διαφορετικές τοποθετήσεις των μπαρών (β) Οι απώλειες ισχύος στην εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας για ονομαστικό ρεύμα. Οι Εικόνες βρέθηκαν στην δημοσίευση, ενώ παράλληλα έχουν τροποποιηθεί ελάχιστα. [3.3.2]

Ο σχεδιασμός μηχανών με μπάρες έχει αρκετές προκλήσεις εξαιτίας των περιορισμών που υπάρχουν σε επιλογές, όπως ο αριθμός των αυλάκων ανά φάση και πόλο και το μικρό φάσμα επιλογών των εν σειρά και παράλληλων κλάδων του τυλίγματος. Οι περιορισμοί αυτοί υπάρχουν ένεκα απαίτησης της κατασκευαστικής ευκολίας.

Μια προσπάθεια για την διεύρυνση των σχεδιαστικών επιλογών έχει φέρει στο προσκήνιο την κατασκευή μηχανών καταναμημένων τυλιγμάτων κλασματικού αριθμού αυλάκων ανά πόλο και φάση (Slots per Pole per Phase $> 1 = z/t : z, t \in \mathbb{N}$) όπως φαίνεται στην δημοσίευση [3.3.5].

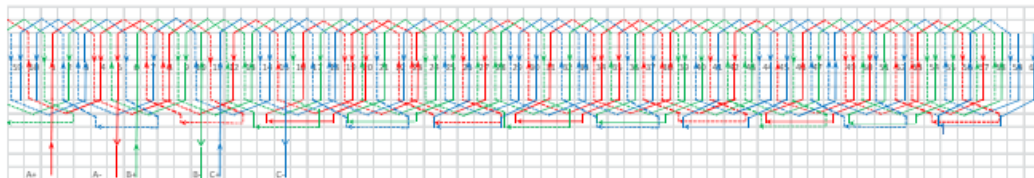


Fig. 1 16 Pole 60 Slot Winding Diagram SPP = 1 1/4

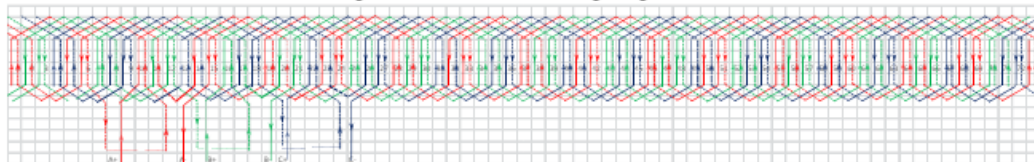


Fig. 2 16 Pole 72 Slot Winding Diagram SPP = 1 1/2

Σχ. 3.28 Καταναμημένο τύλιγμα μπαρών με κλασματική αύλακα [3.3.5]

Επιπρόσθετη προσπάθεια επέκτασης των σχεδιαστικών περιορισμών παρουσιάζεται στο άρθρο [3.3.7] το οποίο προτείνει μια πρωτότυπη διαρρύθμιση εξισορρόπησης ενός μη ζυγισμένου (unbalanced) τυλίγματος με την χρήση μη ισοπαχών μπαρών. Η τεχνική αυτή αποδίδει αρτιότερη συμπεριφορά στις απώλειες δινορευμάτων εξ αιτίας της μεταβολής του πεδίου που προκαλεί ο δρομέας. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί πως στην περίπτωση ύπαρξης χρήσης κοινής αύλακας από δύο διαφορετικές φάσεις οι τερματικές συνδέσεις των μπαρών στα άκρα της μηχανής καθορίζουν την εναλλασσόμενη τοποθέτηση των φάσεων στην αύλακα, δημιουργώντας απαιτήσεις διηλεκτρικής μόνωσης. Η τοπολογία του τυλίγματος αυτού, διαφαίνεται στο σχήμα 3.29.

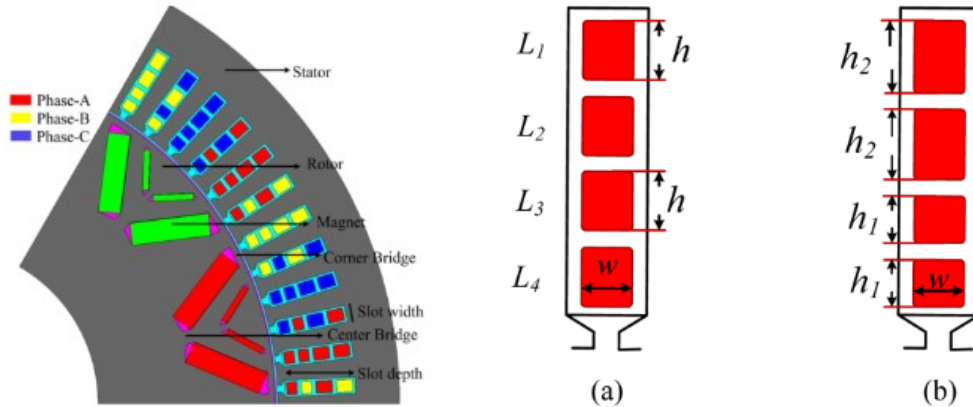
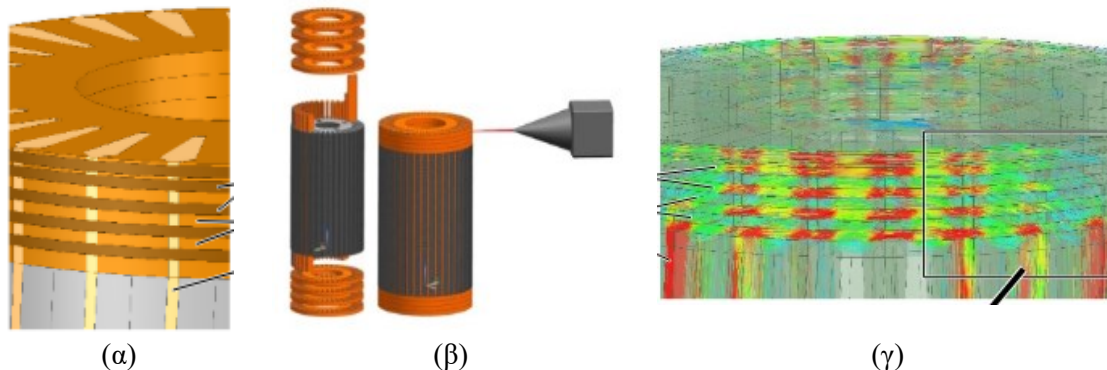


Fig. 3. 100 kW, 72S/12P IPM FEA machine model.

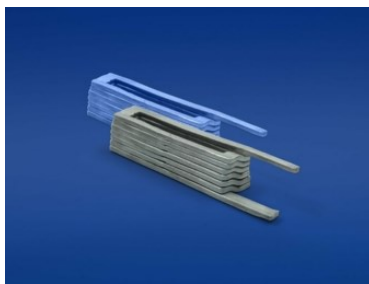
Σχ. 3.29 Τύλιγμα Ηλ. Μηχανής με μη ισοπαχείς μπάρες και χρήση κοινής αύλακας από διαφορετικές φάσεις.[3.3.7]

Περαιτέρω προτάσεις για την τερματική σύνδεση των μπαρών χαλκού έχουν προταθεί κυρίως στην περιοχή του βραχυκυκλωμένου κλωβού των ασύγχρονων μηχανών. Στην [3.3.6] παρουσιάζεται μια λύση συγκόλλησης των μπαρών του δρομέα σε προ διαμορφωμένους δίσκους με κατάλληλη τοπολογία και κατάλληλα σημεία για laser συγκόλλησης (laser welding).



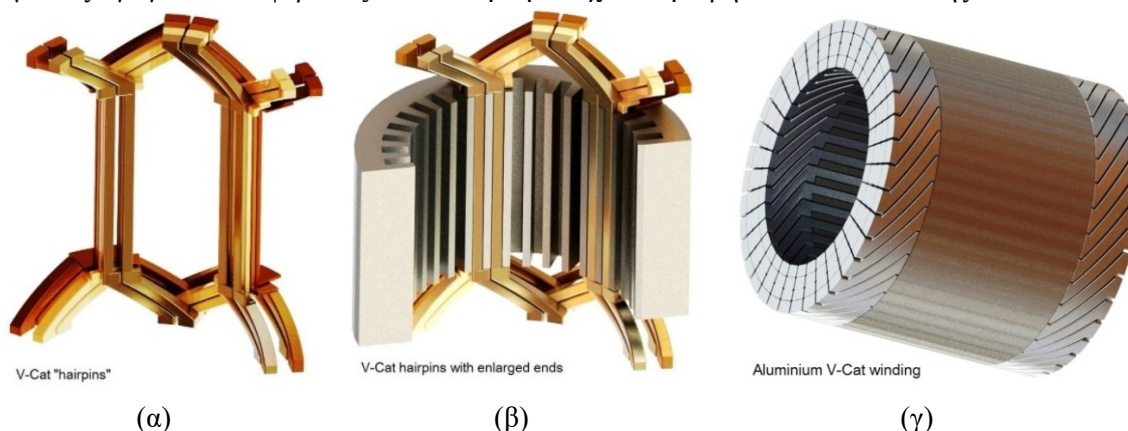
Σχ. 3.30 Πρωτότυπη τεχνική συγκόλλησης χαλκού με βάση προ διαμορφωμένους δακτυλίους. (α) Τοποθέτηση των δακτυλίων (β) Laser Welding (γ) Ανάλυση κατανομής πυκνότητας ρεύματος[3.3.6]

Τις πρωθύτερες δυσκολίες, όπως η συγκόλληση των τερματικών περιοχών, το μεγάλο ύψος στα άκρα τυλίγματος και η ανάγκη για διαφορετικού πάχους μπαρών, έρχεται να επιλύσει η χρήση αλουμινίου με μορφή χύτευσης, με στόχο την δημιουργία τυλιγμάτων με σύνθετα ανταγωνιστικά σχήματα, που επιτρέπουν την μείωση του κόστους παραγωγής και την μείωση βάρους της εφαρμογής. Η εφαρμογή του αλουμινίου στην πλευρά του στάτη θεωρείται πρόκληση, τόσο για τους ερευνητές όσο και τη βιομηχανία, καθώς μειώνει δραματικά το κόστος παραγωγής ενώ δίνει την δυνατότητα δημιουργίας εξωτικών διαμορφώσεων ηλεκτρικών μηχανών ανοίγοντας έτσι ερευνητικούς ορίζοντες.



Σχ. 3.31 Πηνία χυτού αλουμινίου για αποδοτικούς ηλεκτρικούς κινητήρες. <https://tinyurl.com/4jrmyrfv>

Το αλουμίνιο είναι ο πιο οικονομικός αγωγός ηλεκτρικής ενέργειας που διατίθεται. Μπορεί να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα για λιγότερο από το 15% του κόστους μεταφοράς του ίδιου ρεύματος, χρησιμοποιώντας χαλκό. Ωστόσο, το αλουμίνιο έχει χαμηλότερη αγωγιμότητα από τον χαλκό και οι αγωγοί αλουμινίου πρέπει να είναι 1,6 φορές μεγαλύτεροι από αυτό που θα χρειαζόταν ο χαλκός προκειμένου να διατηρηθεί η ίδια απόδοση και επίδοση. Για το λόγο αυτό, ο χαλκός είναι το προτιμώμενο υλικό για τους περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες και σχεδόν για όλους τους κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, όταν ο χαλκός αντικαθίσταται από αλουμίνιο σε έναν κινητήρα με μπάρες χαλκού, θεωρείται ότι οι απώλειες εναλλασσόμενου ρεύματος στο αλουμίνιο είναι σχετικά μικρότερες από τις απώλειες AC στον χαλκό. Σε έναν κινητήρα με μπάρες χαλκού οι απώλειες AC συχνά υπερβαίνουν τις απώλειες DC με αποτέλεσμα η χρήση αλουμινίου σε ίδιου μεγέθους αγωγού να επιφέρει ως αποτέλεσμα μια σχετικά μικρή απώλεια απόδοσης.



Σχ. 3.32 Στάδια κατασκευής τυλίγματος στάτη από αλουμίνιο (α) Χύτευση μπαρών (β) Τοποθέτηση στον στάτη (γ) Συνολικό τυλίγμα μηχανής. <https://tinyurl.com/yc6ubrd6>

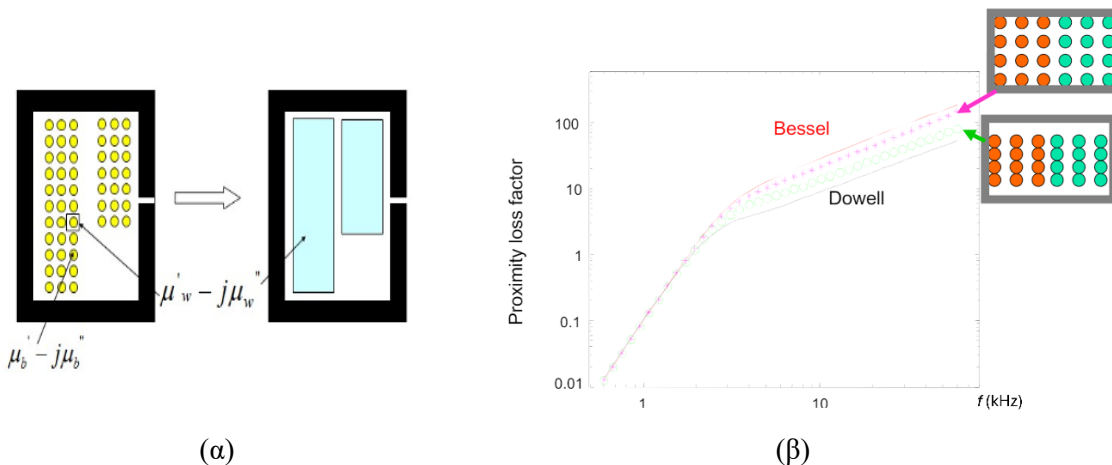
Μια πρόσφατη εξέλιξη που ονομάζεται Variable Conductor Area Technology (V-Cat) (Σχ. 3.32) επιτρέπει την αντικατάσταση του χαλκού από αλουμίνιο στους κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων με ακόμα μικρότερες απώλειες απόδοσης εξοικονομώντας σε αρκετό βαθμό το κόστος κατασκευής. Το V-Cat είναι μια μορφή περιέλιξης με μπάρες στην οποία οι περιελίξεις των τερματικών περιοχών καθώς και οι αγωγοί της αύλακας σχηματίζονται από αλουμίνιο χρησιμοποιώντας συμβατική χύτευση. Οι περιελίξεις των τερματικών περιοχών που αποτελούν μέρος αυτού του αγωγού είναι σχεδιαστικά αρκετά μεγαλύτερες σε διατομή από τους αγωγούς εντός της αύλακας. Οι αγωγοί εντός της αύλακας παραμένουν στο ίδιο μέγεθος με τον χαλκό που αντικαθιστούν. Αυτό επιτρέπει στη συνολική συνδυασμένη αγωγιμότητα DC και AC των περιελίξεων να είναι ανταγωνιστικές με τις αρχικές απώλειες χαλκού και έτσι δεν προκαλεί μεγάλη απόκλιση στην απόδοση ή την επίδοση του κινητήρα.

Ένας τυπικός κινητήρας με μπάρες χαλκού καταναλώνει περίπου 8 κιλά. χαλκού που κοστίζει πάνω από \$80,00 και αυτό μπορεί να αντικατασταθεί από 2,5kg αλουμινίου που κοστίζει \$7,00. Η κατασκευή αλουμινίου έχει σημαντικά μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή χαλκού.

3.3.3 Μοντελοποίηση Απωλειών Τυλίγματος

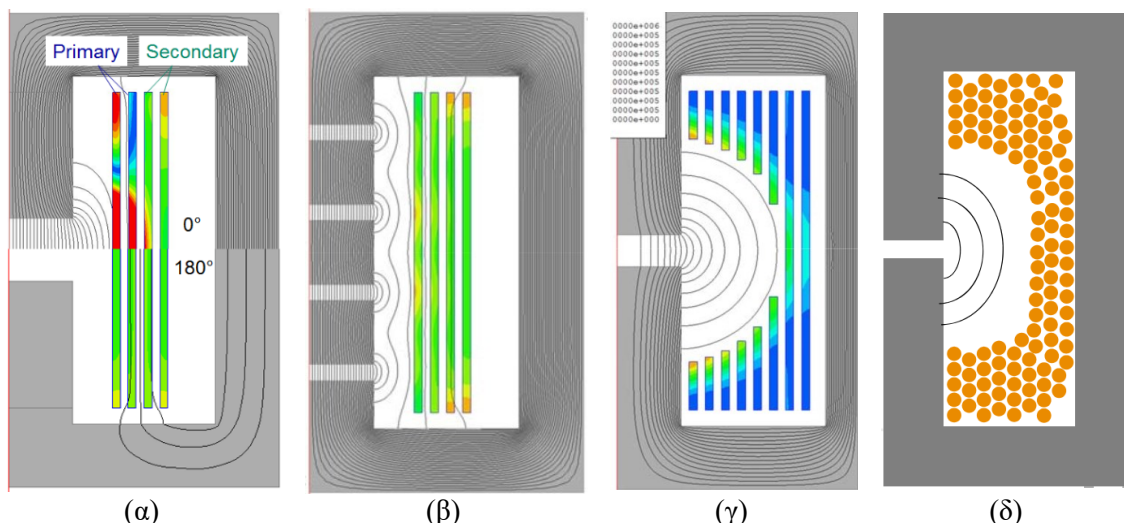
Η μοντελοποίηση των φαινομένων στο εσωτερικού του αγωγού είναι ένα σύνθετο πρόβλημα στο επίπεδο της μοντελοποίησης απωλειών μηχανής. Η συνθετότητα του πρόβλημα κυρίως έγκειται στην πληθώρα των αγωγών εντός της αύλακας, γεγονός που καθιστά δύσκολο να μοντελοποιηθεί ο κάθε κλώνος με ακρίβεια. Η τελική θέση του κάθε κλώνου στις μηχανές με αγωγούς κυλινδρικής διατομής, είναι δύσκολο επίσης να προσδιοριστεί και εν συνεχεία να αναλυθεί με λεπτομέρεια η πεδιακή κατανομή εντός του κλώνου. Το είδος της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την περιγραφή της ολότητας των φαινομένων αυτών είναι η δυναμική – μεταβατική (transient). Το είδος αυτό ανάλυσης είναι αρκετά σύνθετο στην υλοποίηση του από πλευράς υπολογιστικής ισχύος και απαιτήσεων μνήμης. Ο συνδυασμός του είδους αυτού ανάλυσης με μία λεπτομερή περιγραφή της κυλινδρικής γεωμετρίας του εκάστοτε κλώνου, οδηγεί σε αύξηση της πολυπλοκότητας και του χρόνου εκτέλεσης, με αποτέλεσμα συχνά τα μειονεκτήματα αυτά να υπερτερούν των πλεονεκτημάτων.

Μια πιο απλή εκδοχή περιγραφής της συνολικής συμπεριφοράς των παράλληλων κλάδων όσον αφορά το πεδίο δίνεται στις [3.3.10] [3.3.11] στις οποίες οι παράλληλες συστάδες αγωγών μοντελοποιούνται με μιγαδική διαπερατότητα. Η μοντελοποίηση αυτή επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στον χρόνο υπολογισμού και παράλληλα αποδίδει σωστές τιμές απωλειών του τυλίγματος. Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται στην ακριβή μοντελοποίηση που οι αναλυτικές τύποι προσφέρουν ως λύσεις. Οι μαθηματικές συναρτήσεις λύσεων της κατανομής της ρευματικής πυκνότητας των αγωγών είναι συναρτήσεις Bessel και Dowell ([3.3.27]). Στο σχήμα 4.3.13 φαίνονται σχηματικά οι μοντελοποιήσεις αυτές.



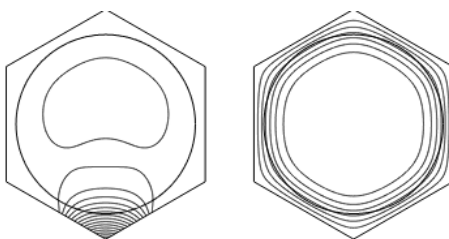
Σχ. 3.33 (α) Μοντελοποίηση Συστάδων παράλληλων κλάδων με μιγαδική διαπερατότητα (β) συντελεστής απωλειών σε διαφορετικού είδους τοποθέτησης συστάδων και η μαθηματική μοντελοποίηση [3.3.26]

Στην βιβλιογραφία σημαντική μοντελοποίηση έχει γίνει και για αγωγούς [3.3.12] Litz, ενώ αντικείμενο έρευνας είναι και η μοντελοποίηση των απωλειών αγωγών αλουμινίου όπως παρουσιάζονται στα [3.3.13] [3.3.14]. Ένα ουσιαστικό πρόβλημα της μοντελοποίησης των απωλειών στους αγωγούς είναι η θυσάνωση (fringe field) που υπάρχει ενδιάμεσα από δύο υψηλής διαπερατότητας υλικά. Μια εργασία που περιγράφει τις πρόσθετες απώλειες εξαιτίας αυτού του φαινομένου σε μία διάταξη E core είναι [3.3.15]. Στην παρούσα διατριβή έχει γίνει μελέτη σε διατάξεις C-Core με την παρουσία έντονων αντίστοιχων φαινομένων κοντά στο διάκενο – μέρος τοποθέτησης των μαγνητών. Πρωθύστερη ανάλυση των απωλειών στον χαλκό και των επιπτώσεων στο συνολικό πεδίο έχει γίνει στις δημοσιεύσεις [3.3.16] - [3.3.25]. Στο σχήμα 4.3.14 παρουσιάζονται προτάσεις των δημοσιεύσεων για την απομείωση των απωλειών χαλκού σε πηνία υψηλών συχνοτήτων σε χρήση DC-DC μετατροπών.



Σχ. 3.34 Φαινόμενα Fringe Field και οι επιπτώσεις στις συνολικές απώλειες χαλκού. (α) Μοντελοποίηση συστάδων (Bundle) με ισοδύναμη μιγαδική διαπερατότητα (β) Πρόταση διάσπασης μεγάλου διακένου σε περισσότερα μικρότερα διακένα γ) Μετακίνηση του τυλίγματος σε απόσταση από το διάκενο δ) Λεπτομερής γεωμετρία όλων των κλώνων [3.3.26]

Η ακριβής μοντελοποίηση του μαγνητικού πεδίου στο σύρμα πηνίου μιας ηλεκτρικής μηχανής γίνεται συχνά μια σημαντική πρόκληση: με τον υψηλό αριθμό στρωφών και το μικρό βάθος διείσδυσης, ο αριθμός βαθμών ελευθερίας υπερβαίνει τα λογικά όρια σε οποιαδήποτε τυπική μέθοδο προσέγγισης. Η ακριβής προσέγγιση, ωστόσο, είναι κρίσιμη, π.χ., για την αξιόπιστη εκτίμηση της απώλειας πηνίου. Ως εκ τούτου, υπάρχει έκκληση για εξειδικευμένες προσεγγιστικές μεθόδους. Η [3.3.28] παρουσιάζει μια μέθοδο για υπολογισμούς πεδίου καλωδίου χρονο-αρμονικού πηνίου σε προβλήματα 2-D με βάση την μέθοδο αποσύνθεσης γεωμετρίας. Το πηνίο σε αυτή τη δημοσίευση αντικαθίσταται με ένα πλέγμα πολυγωνικών επιπέδων πλήρωσης και μοντελοποιείται ως ένας χώρος συνάρτησης χαμηλής διάστασης που εκτείνεται στα όρια του πολυγώνου. Για την αξιοπιστία των εκτιμήσεων των απωλειών, απαιτούνται ακριβείς υπολογισμοί των αποκρίσεων στις διεγέρσεις στο όριο της διεπαφής αυτού του χώρου. Οι αποκρίσεις αποτελούν έναν χάρτη Dirichlet-to-Neumann για την αποτελεσματική σύζευξη πληρωτικών επιπέδου μεταξύ τους και σε μια τυπική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) έξω από τις περιοχές του πηνίου. Το συνολικό αποτέλεσμα, είναι σημαντικά ταχύτερο από μία τυπική ΜΠΣ. Η μέθοδος αυτή αποδίδει σχετικά αξιόλογα αποτελέσματα όσον αφορά την ακρίβεια, σε σύγκριση με μια ανάλυση ΜΠΣ.

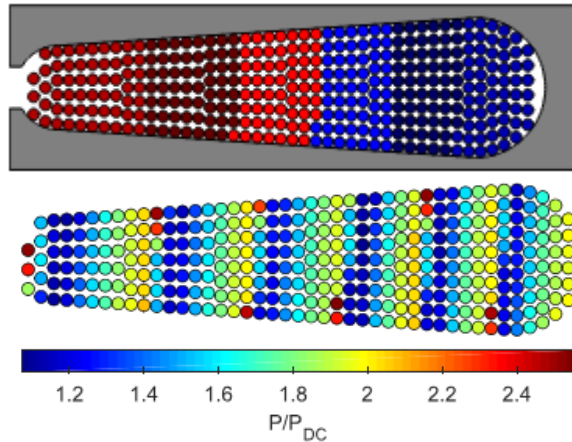


Σχ. 3.35 Πραγματικό μέρος μιας απάντησης στη συνάρτηση βάσης Dirichlet (αριστερά) και το Πρόβλημα καθαρού ρεύματος μονάδας (δεξιά) για 12 HN και 500 Hz. [3.3.28]

Monte carlo simulations

Οι ηλεκτρικές μηχανές με τυχαίες πολύκλωνες περιελίξεις συχνά υποφέρουν από σημαντικές απώλειες ρευμάτων κυκλοφορίας (ανάμεσα στους παράλληλους κλάδους). Αυτές οι απώλειες έχουν έχει μελετηθεί ελάχιστα λόγω της δυσκολίας εξαιτίας του υπολογιστικού κόστους της μοντελοποίησης των περιελίξεων και της στοχαστικής φύσης του το πρόβλημα λόγω των αβέβαιων θέσεων των κλώνων. Η [3.3.29] προτείνει δύο μεθόδους για τη μοντελοποίηση των τυχαίων κλώνων περιελίξεων αυθαίρετης πολυπλοκότητας. Αρχικά, παρουσιάζεται ένα μοντέλο

κυκλώματος που λαμβάνει υπόψη ολόκληρη την κύρια διαδρομή ροής ενώ παράλληλα συζητούνται και οι αναγκαίες θεωρήσεις για ορισμένες πρακτικές εφαρμογές. Στη συνέχεια στη δημοσίευση αυτή παρουσιάζεται και μια υλοποίηση πεπερασμένων στοιχείων που είναι υπολογιστικά αποδοτική βασισμένη σε μη συμμορφούμενο (non-conforming) πλέγμα. Τέλος, στο άρθρο αυτό προτείνεται μια μέθοδος για τη μοντελοποίηση της επίπτωσης στην επίδοση και την απόδοση της μηχανής που έχει η τυχαία διαδικασία τοποθέτησης των κλώνων μέσα στην αύλακα κάνοντας χρήση Monte Carlo. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι περιορισμένη καθώς μεταξύ των διαφόρων προσομοιώσεων δεν απαιτείται καμία επανασύνδεση ή επανυπολογισμός της επαγωγής στα τυλίγματα (κλώνους). Η δημοσίευση παρουσιάζει επαρκώς θετικά αποτελέσματα συγκρινόμενα με τις μέσες τιμές πολλών πειραμάτων σε επαγωγικές μηχανές υψηλής ταχύτητας σε πειράματα όπου ο δρομέας δεν είναι παρόν.



Σχ. 3.36 Ακριβής μοντελοποίηση κατανομής ρευμάτων σε κάθε κλώνο εντός της αύλακας. [3.3.29]

3.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [3.1.1] Bao-Min Ma and K. Narasimhan, "NdFeB magnets with higher Curie temperature," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 22, no. 5, pp. 916-918, September 1986, doi: 10.1109/TMAG.1986.1064527.
- [3.1.2] A. G. Clegg, I. M. Coulson, G. Hilton and H. Y. Wong, "The temperature stability of NdFeB and NdFeBCo magnets," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, no. 5, pp. 1942-1944, Sept. 1990, doi: 10.1109/20.104578.
- [3.1.3] P. Tenaud, F. Vial and M. Sagawa, "Improved corrosion and temperature behaviour of modified Nd-Fe-B magnets," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, no. 5, pp. 1930-1932, Sept. 1990, doi: 10.1109/20.104574.
- [3.1.4] G. Mörée, J. Sjölund and M. Leijon, "A Review of Permanent Magnet Models Used for Designing Electrical Machines," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 11, pp. 1-19, Nov. 2022, Art no. 2102719, doi: 10.1109/TMAG.2022.3200150.
- [3.1.5] O. Craiu, N. Dan, and E. Badea, "Numerical analysis of permanent magnet DC motor performances," IEEE Trans. Magn., vol. 31, no. 6, pp. 3500-3502, Nov. 1995.
- [3.1.6] T. J. E. Miller, Brushless Permanent Magnet Reluctance Motor Drives, 1st ed. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, Jul. 1989, ch. 3.
- [3.1.7] D. R. Gauder, M. H. Froning, R. J. White, and A. E. Ray, "Elevated temperature study of Nd-Fe-B-based magnets with cobalt and dysprosium additions," J. Appl. Phys., vol. 63, no. 8, pp. 3522-3524, Apr. 1988.
- [3.1.8] S. Hamidzadeh, N. Alatawneh, R. R. Chromik, and D. A. Lowther, "Comparison of different demagnetization models of permanent magnet in machines for electric vehicle application," IEEE Trans. Magn., vol. 52, no. 5, pp. 1-4, May 2016.
- [3.1.9] S. S. Moosavi, A. Djerdir, Y. A. Amirat, and D. A. Khaburi, "Demagnetization fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors: A review of the state-of-the-art," J. Magn. Magn. Mater., vol. 391, pp. 203-212, Oct. 2015.
- [3.1.10] J. H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao, P. Liebmman, and J. Valainis, "Nonlinear transformer model for circuit simulation," IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr., vol. 10, no. 4, pp. 476-482, Apr. 1991.
- [3.1.11] Rare Earth Sintered Magnets Stability of the Magnetic Properties at Elevated Temperatures, document IEC, TC 68, ICS 29.030, TR 62518:2009, 2009.

- [3.1.12] L. Uršič and M. Nemec, "Permanent magnet synchronous machine demagnetisation prevention and torque estimation control considering rotor temperature," *IET Power Electron.*, vol. 12, no. 9, pp. 2161–2169, Aug. 2019.
- [3.1.13] N. Leuning, S. Elfgen, B. Groschup, G. Bavendiek, S. Steentjes, and K. Hameyer, "Advanced soft- and hard-magnetic material models for the numerical simulation of electrical machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, pp. 1–8, Nov. 2018.
- [3.1.14] P. Zhou, D. Lin, Y. Xiao, N. Lambert, and M. A. Rahman, "Temperature-dependent demagnetization model of permanent magnets for finite element analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 2, p. 1031, Feb. 2012.
- [3.1.15] Terms and Nomenclature for Cores Made of Magnetically Soft Ferrites—Part 3: Guidelines on the Format of Data Appearing in Manufacturers Catalogues of Transformer and Inductor Cores, document IEC 60401-3:2015, 2015.
- [3.1.16] R. Gozdur, P. G. ebara, and K. Chwastek, "A study of temperature dependent hysteresis curves for a magnetocaloric composite based on La(Fe, Mn, Si)13-H type alloys," *Energies*, vol. 13, no. 6, p. 1491, Mar. 2020.
- [3.1.17] C. R. H. Bahl, M. A. Eder, G. Boland and A. B. Abrahamsen, "A Simple Method for Demagnetizing Large NdFeB Permanent Magnets," in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 56, no. 8, pp. 1-6, Aug. 2020, Art no. 2100906, doi: 10.1109/TMAG.2020.3002098.
- [3.1.18] D. Huger and D. Gerling, "The effects of thermal cycling on aging of Neodymium-Iron-Boron magnets," 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2015, pp. 389-392, doi: 10.1109/PEDS.2015.7203464.
- [3.1.19] S. Horita, T. Yanai, M. Nakano and H. Fukunaga, "Prediction of Flux Loss in a Nd-Fe-B Bonded Magnet Under an External Magnetic Field," in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, July 2016, Art no. 7403404, doi: 10.1109/TMAG.2016.2529648.
- [3.1.20] S. Hamidzadeh, N. Alatawneh, R. R. Chromik and D. A. Lowther, "Comparison of Different Demagnetization Models of Permanent Magnet in Machines for Electric Vehicle Application," in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 52, no. 5, pp. 1-4, May 2016, Art no. 2100304, doi: 10.1109/TMAG.2015.2513067.
- [3.1.21] T. Z. Htet, Z. Zhao and K. Li, "PM material analysis of permanent magnet synchronous generator in wind turbines," 2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), 2017, pp. 332-336, doi: 10.1109/ICSRS.2017.8272844.
- [3.1.22] D. -W. Kim, D. H. Kang, C. -H. Kim, J. -S. Kim, Y. -J. Kim and S. -Y. Jung, "Operation Characteristic of IPMSM Considering PM Saturation Temperature," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 4, pp. 1-4, June 2020, Art no. 5207204, doi: 10.1109/TASC.2020.2989799.
- [3.1.23] J. Hu, et al. "Low-temperature synthesis and enhanced magnetic properties of rare earth-free Mn-Cu-In magnets." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 517, 2021, 167463.
- [3.1.24] Ruoho, Sami, Emad Dlala, and Antero Arkkio. "Comparison of Demagnetization Models for Finite-Element Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Machines." *IEEE Transactions on Magnetism* 43, no. 11 (2007): 3964-68
- [3.1.25] Katter, M. "Angular Dependence of the Demagnetization Stability of Sintered Nd-Fe-B Magnets." *IEEE Transactions on Magnetism* 41, no. 10 (2005): 3853-55.
- [3.1.26] Ruoho, S., and A. Arkkio. "Partial Demagnetization of Permanent Magnets in Electrical Machines Caused by an Inclined Field." *IEEE Transactions on Magnetism* 44, no. 7 (2008): 1773-78.
- [3.1.27] Givord, D, P Tenaud, and T Viadieu. "Angular Dependence of Coercivity in Sintered Magnets." *Journal of magnetism and magnetic materials* 72, no. 3 (1988): 247-52.
- [3.1.28] M. Venkatesan, et al. "Approaches to develop high-performance rare-earth-free permanent magnets." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 521, 2021, 1 67602.
- [3.1.29] R. Zhang, et al. "Ultra-high magnetic energy product of a two-phase NdFe12-type magnet at high temperatures." *Nature Communications*, vol. 12, no. 1, 2021, pp. 1-8.
- [3.1.30] R. Islam, et al. "Enhanced magnetic properties of MnBi-based rare-earth-free magnets via nanostructuring and doping." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 852, 2021, 156994.
- [3.1.31] J. Li, et al. "Ultra-high coercivity rare-earth-free FeNi magnets with magnetic properties enhanced by anisotropic grain growth." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 857, 2021, 157650.
- [3.2.1] Colaiori, Francesca. (2008). Exactly solvable model of avalanches dynamics for Barkhausen crackling noise. *Advances In Physics*. 57. 287-359. 10.1080/00018730802420614.
- [3.2.2] A. Krings, "Iron Losses in Electrical Machines- Influence of Material Properties, Manufacturing Processes and Inverter Operation," PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2014
- [3.2.3] Fang, Qikai, Zhihao Ye, and Cheng Chen. 2024. "A Review of Power Transformer Vibration and Noise Caused by Silicon Steel Magnetostriction" *Electronics* 13, no. 5: 968. <https://doi.org/10.3390/electronics13050968>

- [3.2.4] Baguley, Craig & Madawala, Udaya & Carsten, Bruce. (2009). Unusual Effects Measured Under DC Bias Conditions on MnZn Ferrite Material. *Magnetics, IEEE Transactions on*. 45. 3215 - 3222. 10.1109/TMAG.2009.2022629.
- [3.2.5] Chen, Dezhi & Fang, Liwei & Kwon, Byung-il & Bai, Baodong. (2017). Measurement research on magnetic properties of electrical sheet steel under different temperature, harmonic and dc bias. *AIP Advances*. 7. 056682. 10.1063/1.4979490.
- [3.2.6] Zhang, C.; Li, H.; Tian, Y.; Li, Y.; Yang, Q. Harmonic and DC Bias Hysteresis Characteristics Simulation Based on an Improved Preisach Model. *Materials* 2023, 16, 4385. <https://doi.org/10.3390/ma16124385>
- [3.2.7] Nunes, Cristiana & Silva Neto, Almir & Miranda, Vinicius & Matos, Lucas & Favarato, Luciana & Rocco, Daniel. (2021). Influence of the cutting process, heat treatment, and maximum magnetic induction on the magnetic properties of highly oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 537. 168211. 10.1016/j.jmmm.2021.168211.
- [3.2.8] P. Baudouin, M. De Wulf, L. Kestens, and Y. Houbaert, "The effect of the guillotine clearance on the magnetic properties of electrical steels," *J.Magn. Magn. Mater.*, vol. 256, pp. 32–40, 2003.
- [3.2.9] Saleem, Aroba & Goldbaum, Dina & Brodusch, Nicolas & Gauvin, Raynald & Chromik, Richard. (2018). Microstructure and Mechanical Property Connections for a Punched NonOriented Electrical Steel Lamination. *Materials Science and Engineering: A*. 725.
- [3.2.10] G. Bertotti, "General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 24, 1988
- [3.2.11] R. Siebert, J. Schneider, E. Beyer, "Laser Cutting and Mechanical Cutting of Electrical Steels and its Effect on the Magnetic Properties", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 50, No.4, 2014.
- [3.2.12] M. Bali and A. Muetze, "The Degradation Depth of Non-grain Oriented Electrical Steel Sheets of Electric Machines Due to Mechanical and Laser Cutting: A State-of-the-Art Review," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 366-375, Jan.-Feb. 2019.
- [3.2.13] W. M. Arshad, T. Ryckebush, A. Broddefalk, F. Magnussen, H. Lendenmann, M. Lindenmo, "Characterization of electrical steel grades for direct application to electrical machine design tools", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, pp. 2538-2541, 2008.
- [3.2.14] Luca Salvador, "Influence of Cutting Process on Magnetic Properties of Electrical Steel", *Universita Degli Studi Di Padova, Department of Industrial Engineering*, 2016.
- [3.2.15] A. Boglietti, "A First Approach for the Iron Losses Building Factor Determination", *IEEE Industry Applications Conference*, Vol. 1, Oct. 1999.
- [3.2.16] A. Saleem, N. Alatawneh, R.R. Chromik, D.A. Lowther, "Effect of Shear Cutting on Microstructure and Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Steel", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 52, No. 5, 2016.
- [3.2.17] H. Naumoski, B. Riedmüller, A. Minkow, U. Herr, "Investigation of the influence of different cutting procedures on the global and local magnetic properties of non-oriented electrical steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 392, pp. 126-133, 2015.
- [3.2.18] M. Hofmann, H. Naumoski, U. Herr, H. Herzog, "Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets in Respect of Cutting: Micromagnetic Analysis and Macromagnetic Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 52, No.2, 2016
- [3.2.19] Wenmin S., Jing L., Changyi L., "Effect of Cutting Techniques on the Structure and Magnetic Properties of a High-grade Non-oriented Electrical Steel", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, Vol. 29, Dec. 2014.
- [3.2.20] G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, SI Metric Edition, 1988, p. 657.
- [3.2.21] S. Steentjes, G. von Pöngsten, K. Hameyer, "An Application-Oriented Approach for Consideration of Material Degradation Effects Due to Cutting on Iron Losses and Magnetizability", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 11, Nov. 2014.
- [3.2.22] Hiroaki Toda, "Iron Loss Deterioration by Shearing Process in Non-Oriented Electrical Steel with Different Thicknesses", *IEEE Journal of Industry Applications*, Vol. 3, No. 1, pp. 55-61, 2014.
- [3.2.23] Y. Kurosaki, H. Mogi, H. Fujii, T. Kubota, M. Shiozaki, "Importance of punching and workability in non-oriented electrical steel sheets", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, 2008.
- [3.2.24] E.G. Araujo, J. Schneider, K. Verbeken, G. Pasquarella, Y. Houbaert, "Dimensional Effects on Magnetic Properties of Fe-Si Steels Due to Laser and Mechanical Cutting", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, No. 2, Feb. 2010.
- [3.2.25] H. M. S. Harstick, M. Ritter, W. Riehemann, "Influence of Punching and Tool Wear on the Magnetic Properties of Nonoriented Electrical Steel", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, No. 4, April 2014.
- [3.2.26] M. Emura, F.J.G. Landgraf, W. Ross, J.R. Barreta, "The influence of cutting technique on the magnetic properties of electrical steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 254- 255, pp. 358-360, 2003.
- [3.2.27] Emini Ndzinga Alain Desire, «Η Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machine, EDM) και Νεότερες Εφαρμογές της, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, 2008.

- [3.2.28] H. Naumoski, D. Ulm, A. Maucher, L. Vandenbossche, S. Jacobs, "Magneto-optical and fieldmetric evaluation of the punching effect on magnetic properties of electrical steels with varying alloying content and grain size", Electric Drives Production Conference (EDPC), 2014 4th International, Oct. 2014.
- [3.2.29] R. Sundaria, D. G. Nair, A. Lehtikoinen, A. Arkkio and A. Belahcen, "Effect of Laser Cutting on Core Losses in Electrical Machines—Measurements and Modeling," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 9, pp. 7354–7363, Sept. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2942564.
- [3.2.30] N. Boubaker, D. Matt, P. Enrici, F. Nierlich and G. Durand, "Measurements of Iron Loss in PMSM Stator Cores Based on CoFe and SiFe Lamination Sheets and Stemmed From Different Manufacturing Processes," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2019, Art no. 8100309, doi: 10.1109/TMAG.2018.2877995.
- [3.2.31] E. Lamprecht, M. Hömme and T. Albrecht, "Investigations of eddy current losses in laminated cores due to the impact of various stacking processes," 2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2012, pp. 1–8, doi: 10.1109/EDPC.2012.6425097.
- [3.2.32] Ebrahimi, Hassan, Yanhui Gao, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Takashi Okitsu and Daiki Matsushashi. "Effects of Stress and Magnetostriction on Loss and Vibration Characteristics of Motor." IEEE Transactions on Magnetics 52 (2016): 1–4.
- [3.2.33] D. Y. Kim, J. K. Nam, and G. H. Jang, "Reduction of magnetically induced vibration of a spoke-type IPM motor using magnetomechanical coupled analysis and optimization," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 9, pp. 5097–5105, Sep. 2013.
- [3.2.34] K. Yamazaki and Y. Kato, "Iron loss analysis of interior permanent magnet synchronous motors by considering mechanical stress and deformation of stators and rotors," IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 2, pp. 909–912, Feb. 2014.
- [3.2.35] C. A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, and A. C. Smith, "Estimating rotational iron losses in an induction machine," IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 6, pp. 3527–3533, Nov. 2003.
- [3.2.36] M. Oka, T. Ogasawara, N. Kawano, and M. Enokizono, "Estimation of suppressed iron loss by stress-relief annealing in an actual induction motor stator core by using the excitation inner core method," IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2014.
- [3.2.37] D. M. Ionel, M. Popescu, S. J. Dellinger, T. J. E. Miller, R. J. Heideman, and M. I. McGilp, "On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42, no. 3, pp. 658–667, May/Jun. 2006.
- [3.2.38] H. Ebrahimi, Y. Gao, A. Kameari, H. Dozono, and K. Muramatsu, "Coupled magneto-mechanical analysis considering permeability variation by stress due to both magnetostriction and electromagnetism," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 5, pp. 1621–1624, May 2013.
- [3.2.39] H. Ebrahimi, Y. Gao, H. Dozono, and K. Muramatsu, "Comparison of time integration methods in magnetomechanical problems," IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 3, Mar. 2015, Art. ID 7208404.
- [3.2.40] F. Martin et al., "Magneto-mechanical analysis of an axially laminated synchronous reluctance machine," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 1861–1867, doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732777.
- [3.2.41] L. Daniel, M. Rekik, and O. Hubert, "A multiscale model for magnetoelastic behaviour including hysteresis effects," Archive of Applied Mechanics, vol. 84, no. 9, pp. 1307–1323, 2014.
- [3.2.42] D. Singh, F. Martin, P. Rasilo, and A. Belahcen, "Magneto-mechanical model for hysteresis in electrical steel sheet," IEEE Trans. Magn., 2016, in press.
- [3.2.43] P. Rasilo, D. Singh, U. Aydin, F. Martin, R. Kouhia, A. Belahcen, and A. Arkkio, "Modeling of hysteresis losses in ferromagnetic laminations under mechanical stress," IEEE Trans. Magn., vol. 52, no. 3, pp. 1–4, March 2016.
- [3.2.44] L. Bernard and L. Daniel, "Effect of stress on magnetic hysteresis losses in a switched reluctance motor: Application to stator and rotor shrink fitting," IEEE Trans. on Magn., vol. 51, no. 9, pp. 1–13, Sept 2015.
- [3.2.45] K. Yamazaki and W. Fukushima, "Loss analysis of induction motors by considering shrink fitting of stator housings," IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 3, pp. 1–4, March 2015.
- [3.2.46] P. Rasilo, U. Aydin, D. Singh, F. Martin, R. Kouhia, A. Belahcen, and A. Arkkio, "Multiaxial magneto-mechanical modelling of electrical machines with hysteresis," in The 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2016, in press.
- [3.2.47] L. Bernard, X. Mininger, L. Daniel, G. Krebs, F. Bouillault, and M. Gabsi, "Effect of stress on switched reluctance motors: A magnetoelastic finite-element approach based on multiscale constitutive laws," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 9, pp. 2171–2178, Sept 2011.
- [3.2.48] K. Yamazaki and Y. Kato, "Iron loss analysis of interior permanent magnet synchronous motors by considering mechanical stress and deformation of stators and rotors," IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 2, pp. 909–912, Feb 2014.
- [3.2.49] L. Daniel and O. Hubert, "An equivalent stress for the influence of multiaxial stress on the magnetic behavior," Journal of Applied Physics, vol. 105, no. 7, p. 07A313, 2009.

- [3.2.50] O. Hubert and L. Daniel, "Energetical and multiscale approaches for the definition of an equivalent stress for magneto-elastic couplings," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 323, no. 13, pp. 1766–1781, 2011.
- [3.2.51] Bitsi, Konstantina & Kowal, Damian & Moghaddam, Reza. (2017). Novel approach in investigating the rotor lamination iron losses. 1-8. 10.1109/IEMDC.2017.8002042.
- [3.2.52] A. Krings, A. Boglietti, A. Cavagnino and S. Sprague, "Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2405-2414, March 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2613844.
- [3.2.53] N. Fernando, G. Vakil, P. Arumugam, E. Amankwah, C. Gerada and S. Bozhko, "Impact of Soft Magnetic Material on Design of High-Speed Permanent-Magnet Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2415-2423, March 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2587815
- [3.2.54] A. Krings, M. Cossale, A. Tenconi, J. Soular, A. Cavagnino and A. Boglietti, "Magnetic Materials Used in Electrical Machines: A Comparison and Selection Guide for Early Machine Design," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 23, no. 6, pp. 21-28, Nov.-Dec. 2017, doi: 10.1109/MIAS.2016.2600721.
- [3.2.55] E. A. Starke, "Aluminum Alloys: Properties and Applications," *Encycl. Mater. Sci. Technol.*, pp. 114–116, 2001.
- [3.2.56] R. H. Yu et al., "High temperature soft magnetic materials: FeCo alloys and composites," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 3388-3393, Sept 2000, doi: 10.1109/20.908809.
- [3.3.1] Popescu, Mircea & Dorrell, David. (2013). Skin effect and proximity losses in high speed brushless permanent magnet motors. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013. 3520-3527. 10.1109/ECCE.2013.6647164.
- [3.3.2] Deurell, David & Josefsson, Viktor (2019). "FEA study of proximity effect in hairpin windings of a PMSM for automotive applications", Department of Electrical Power Engineering CHALMERS University of Technology, Gothenburg, Sweden 2019, URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/300115>
- [3.3.3] Moreno, Yerai, Gaizka Almandoz, Aritz Egea, Beñat Arribas, and Ander Urdangarin. 2021. "Analysis of Permanent Magnet Motors in High Frequency—A Review" *Applied Sciences* 11, no. 14: 6334. <https://doi.org/10.3390/app11146334>
- [3.3.4] M. Popescu and D. G. Dorrell, "Proximity Losses in the Windings of High Speed Brushless Permanent Magnet AC Motors With Single Tooth Windings and Parallel Paths," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 3913-3916, July 2013, doi: 10.1109/TMAG.2013.2247382.
- [3.3.5] L. Hao, "Design and analysis of IPM machine with bar wound fractional slot distributed winding for automotive traction application," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA, 2013, pp. 598-605, doi: 10.1109/ECCE.2013.6646756.
- [3.3.6] P. Harnisch et al., "Optimized Manufacturing Process and Modelling of Squirrel-Cage Induction Machines with Copper Cage and Axially Segmented End Rings for High-Speed Applications," 2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Ludwigsburg, Germany, 2020, pp. 1-8, doi: 10.1109/EDPC51184.2020.9388213.
- [3.3.7] M. S. Islam, I. Husain, A. Ahmed and A. Sathyan, "Asymmetric Bar Winding for High-Speed Traction Electric Machines," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 3-15, March 2020, doi: 10.1109/TTE.2019.2962329.
- [3.3.8] M. Masoumi, K. Rajasekhara, D. Parati and B. Bilgin, "Manufacturing Techniques for Electric Motor Coils With Round Copper Wires," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 130212-130223, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3229024.
- [3.3.9] Μ. Μπενιακάς, "Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
- [3.3.10] D. C. Meeker, "An improved continuum skin and proximity effect model for hexagonally packed wires," *Journal of Computational and App. Mathematics*, vol. 236, no. 18, pp. 4635–4644, 2012
- [3.3.11] Xi Nan and C. R. Sullivan, "Simplified high-accuracy calculation of eddy-current loss in round-wire windings," in *IEEE Pow. Electr. Spec. Conf.*, 2004
- [3.3.12] C. R. Sullivan, "Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding," *IEEE Trans. on Pow. Electr.*, vol. 14, no. 2, pp. 283–291, 1999.
- [3.3.13] C. R. Sullivan, "Aluminum windings and other strategies for high-frequency magnetics design in an era of high copper and energy costs," *IEEE Trans. on Pow. Electr.*, vol. 23, no. 4, pp. 2044–2051, 2008..
- [3.3.14] "Aluminum: The material of choice for transformers," 2014, Siemens Industry, Inc
- [3.3.15] A. F. Hoke and C. R. Sullivan, "An Improved Two-Dimensional Numerical Modeling Method for E-Core Transformers", in *IEEE App. Pow. Electr. Conf.*, 2002.
- [3.3.16] M. Chen, K. Afridi, S. Chakraborty, and D. Perreault. "A high-power-density wide-input-voltage-range isolated dc-dc converter having a multitrack architecture," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015

- [3.3.17] Y. Han, G. Cheung, A. Li, C. R. Sullivan and D. J. Perreault, "Evaluation of Magnetic Materials for Very High Frequency Power Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 425-435, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2159995.
- [3.3.18] Jiankun Hu, C. R. Sullivan, "AC Resistance of Planar Power Inductors and the Quasidistributed Gap Technique", *IEEE Tran. on Power Electr.*, 16(4), pp. 558-567, 2001. <https://engineering.dartmouth.edu/inductor/papers/qdgj.pdf>
- [3.3.19] Jiankun Hu, C. R. Sullivan, "Analytical Method for Generalization of Numerically Optimized Inductor Winding Shapes", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 568-573, June 1999.
- [3.3.20] Jiankun Hu, C. R. Sullivan, "Optimization of Shapes for Round Wire, High Frequency Gapped Inductor Windings", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 907-911, Oct. 1998.
- [3.3.21] C. R. Sullivan, J. D. McCurdy, R. A. Jensen, "Analysis of Minimum Cost in Shape-Optimized Litz-Wire Inductor Windings", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, June 2001.
- [3.3.22] J. D. Pollock, C. R. Sullivan, "Loss Models for Shaped Foil Windings on Low-Permeability Cores", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 3122-3128, June 2008.
- [3.3.23] J. D. Pollock, C. R. Sullivan, "Modelling Foil Winding Configurations with Low AC and DC Resistance", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1507-1512, June 2005.
- [3.3.24] J. Pollock, C. R. Sullivan, "Gapped-Inductor Foil Windings with Low AC and DC Resistance", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 557-663, Oct. 2004.
- [3.3.25] Lundquist, Weyman, Vivien Yang, and Carl Castro. "Low AC resistance foil cut inductor." *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014 IEEE. IEEE, 2014.
- [3.3.26] Presentation: by Prof. Charles R. Sullivan "High-Frequency Magnetism Design: Overview and Winding Loss", Dartmouth Magnetism and Power Electronics Research Group, info: chrs@dartmouth.edu
- [3.3.27] P. L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer windings," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 113, no. 8, pp. 1387-1394, Aug. 1966.
- [3.3.28] L. Lehti, J. Keränen, S. Suuriniemi and L. Kettunen, "Coil Winding Losses: Decomposition Strategy," in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 52, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2016, Art no. 7000106, doi: 10.1109/TMAG.2015.2474304.
- [3.3.29] A. Lehtikoinen, N. Chiodetto, E. Lantto, A. Arkkio and A. Belahcen, "Monte Carlo Analysis of Circulating Currents in Random-Wound Electrical Machines," in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 52, no. 8, pp. 1-12, Aug. 2016, Art no. 8205112, doi: 10.1109/TMAG.2016.2535332

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ: ΕΞΑΛΕΙΨΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

4.1 Περίληψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται μια μεθοδολογία για την κατασκευή ψηφιακού διδύμου ενός σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, το οποίο επιτρέπει την εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος όταν τροφοδοτείται με μετατροπέα διαμόρφωσης πλάτους παλμών. Η μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση των διαφόρων συνθηκών λειτουργίας του κινητήρα μέσω πεπερασμένων στοιχείων με στόχο τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς κατάλληλων συγκεντρωμένων παραμέτρων. Η συνολική συμπεριφορά του ψηφιακού διδύμου βασίζεται στην ενσωμάτωση των παραμέτρων αυτών, σε κατάλληλη τοπολογία δυναμικού ηλεκτρικού κυκλώματος. Οι αρμονικές εξαιτίας της χωρικής κατανομής πεδίου, της διακοπτικής λειτουργίας οδήγησης, καθώς και οι επιπτώσεις της αντίδρασης οπλισμού στον τοπικό κορεσμό λαμβάνονται υπόψη στην αυτή μοντελοποίηση. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει σημαντική μείωση κυμάτων ροπής και μείωση των απωλειών. Τέλος παρουσιάζεται και η επιβεβαίωση της μεθόδου με μετρήσεις σε κατασκευασμένο πρωτότυπο κινητήρα, ενώ η εφαρμογή της έχει υλοποιηθεί στο πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα της εθελοντικής φοιτητικής ομάδας «Προμηθέας».

4.2 Εισαγωγή Κεφαλαίου

Στα ηλεκτρικά οχήματα συνήθως υπάρχει απευθείας κίνηση με απουσία μηχανικού κιβωτίου ταχυτήτων. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα, σε αυτή την περίπτωση, συμπίπτει με την ταχύτητα του τροχού, με αποτέλεσμα τη σχετικά χαμηλή μηχανική γωνιακή ταχύτητα. Για το λόγο αυτό στις εφαρμογές αυτές, προτείνονται υψηλής πυκνότητας ροπής και χαμηλού όγκου πολύ-πολικές μηχανές, παρέχοντας ικανοποιητική ποιότητα ισχύος. Στις πολυπολικές μηχανές κλασματικής περιέλιξης η ηλεκτρική συχνότητα αυξάνεται αισθητά, οδηγώντας σε σημαντικές δυναμικές απώλειες, όπως απώλειες σιδήρου και απώλειες εγγύτητας περιελίξεων. Από την άλλη πλευρά, οι υψηλές αντιδράσεις παρέχουν αποτελεσματικό φιλτράρισμα στις αρμονικές ροής και ρεύματος, επομένως σπάνια χρειάζεται ενεργή εξάλειψη αρμονικών ρεύματος.

Στους σύγχρονους κινητήρες επιφανειακών μόνιμων μαγνητών με κατανομημένο τύλιγμα (SPMSM), οι αρμονικές του ρεύματος δημιουργούνται είτε λόγω μη ημιτονικής τροφοδοσίας (διέγερσης) είτε λόγω της παραμόρφωσης του σχήματος της αντί- ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Back - EMF) από το πεδίο αντίδρασης οπλισμού. Οι αρμονικές της ΗΕΔ επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη μεταβλητότητα της γεωμετρίας της μηχανής κοντά στο διακένον σε συνδυασμό με την περιστροφή του δρομέα και τη μη γραμμική συμπεριφορά των χαρακτηριστικών κορεσμού του ηλεκτρικού χάλυβα. Όπως αναφέρεται στην πρόσφατη βιβλιογραφία [4.1]-[4.4], προκειμένου να επιτευχθεί μια κυματομορφή ημιτονοειδούς ρεύματος και να μειωθεί ο κυματισμός της ροπής, οι αρμονικές ΗΕΔ του κινητήρα εγχέονται με κατάλληλο τρόπο στη στρατηγική ελέγχου του μετατροπέα, δημιουργώντας παρόμοιες κυματομορφές τάσης τροφοδοσίας με αυτή της ΗΕΔ του.

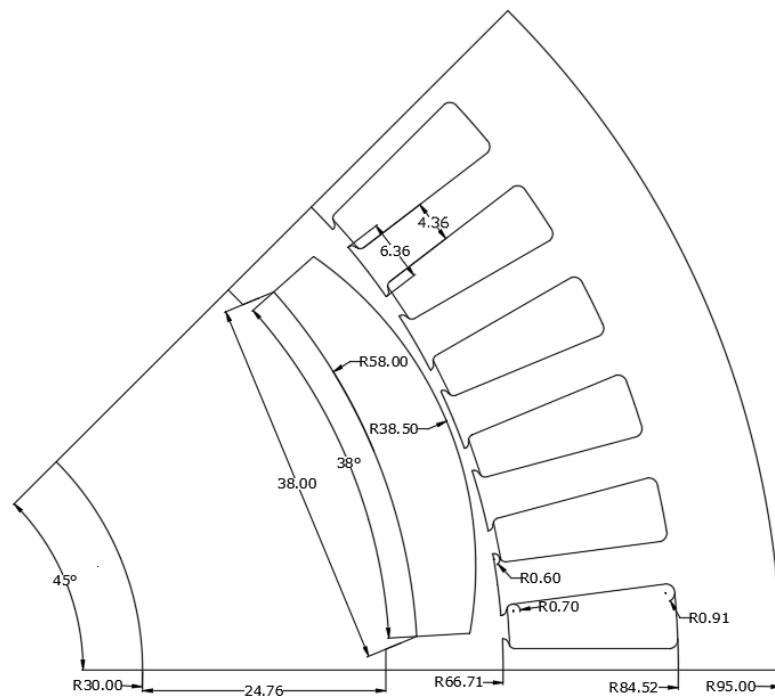
Η παρούσα εργασία εισάγει συστηματική μεθοδολογία σχεδιασμού ψηφιακού διδύμου για μηχανές επιφανειακών μόνιμων μαγνητών επιτρέποντας την εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος κάτω από όλες τις συνθήκες λειτουργίας όταν ο κινητήρας οδηγείται με τεχνικές PWM. Το ψηφιακό δίδυμο αποτελείται από ένα δυναμικό μοντέλο κινητήρα βασισμένο στην ανάλυση δύο αξόνων. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από μεταβλητές συγκεντρωμένες παραμέτρους που έχουν προσδιοριστεί από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ). Οι μεταβλητές αυτές τροποποιούνται πολύ γρήγορα κατά τη λειτουργία του ψηφιακού ελέγχου, εφόσον είναι προ- αποθηκευμένες σε μορφή πινάκων αναζήτησης (Look Up Tables).

Επίσης, η επίτευξη ακρίβειας στη δημιουργία ροπής απαιτεί σχολαστική εξέταση των χρονικών καθυστερήσεων που εισάγονται από βρόχους ανάδρασης, που περιλαμβάνουν αισθητήρες ρεύματος και θέσης. Επιπλέον, η λεπτομερής αναπαράσταση των δυναμικών χαρακτηριστικών του κινητήρα επιτρέπει τον κατάλληλο χρονισμό των παλμών τάσης στις λειτουργίες διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM), διασφαλίζοντας αποτελεσματικές διαδικασίες ελέγχου [4.5]. Οι ηλεκτρικές σταθερές χρόνου είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με τις μηχανικές με συνέπεια οι αρμονικές ρεύματος να συμβάλλουν κυρίως στις απώλειες αντί να επηρεάζουν την ταχύτητα και την επίδοση του κινητήρα [4.6]. Ωστόσο, η εξέταση της διακύμανσης των χαρακτηριστικών του κινητήρα αναλόγως των συνθηκών λειτουργίας και τροφοδοσίας προβλέπεται μέσω ανάλυσης πεδίου και μπορεί να προσφέρει μη αμελητέες βελτιώσεις τόσο στα χαρακτηριστικά απόδοσης όσο και στα χαρακτηριστικά αξιοπιστίας [4.7]-[4.9].

Η προτεινόμενη διαδικασία μοντελοποίησης περιλαμβάνει πολύ περιορισμένα υπολογιστικά μέσα που διευκολύνουν την εφαρμογή της στον ελεγκτή παρέχοντας τόσο μείωση απωλειών όσο και εξάλειψη κυματισμών ροπής.

4.3 Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικής Μηχανής

Ο υπό μελέτη κινητήρας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών του ΕΜΠ με στόχο την λειτουργία του σε πρότυπο ηλεκτρικό όχημα πόλης. Η κατασκευή αυτή είναι λειτουργική και δίνει την ζωή στο όχημα της ομάδας «Προμηθέας» που έχει παρουσία στον διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας Shell Eco Marathon. Η μελέτη της σχεδίασης και κατασκευής αποτέλεσε μια συνεργατική πράξη τόσο υπονήφγιων διδασκόντων του εργαστηρίου ηλεκτρικών μηχανών όσο και εθελοντών - φοιτητών μελών της ομάδας ενώ έχει αναλυθεί σε τουλάχιστον δύο διπλωματικές εργασίες του εργαστηρίου. Η σχεδίαση και η τοπολογία του κατασκευασμένου κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. με την διαρρύθμιση του τυλίγματος και την επιλογή υλικών να δίνεται στον πίνακα 4.1.

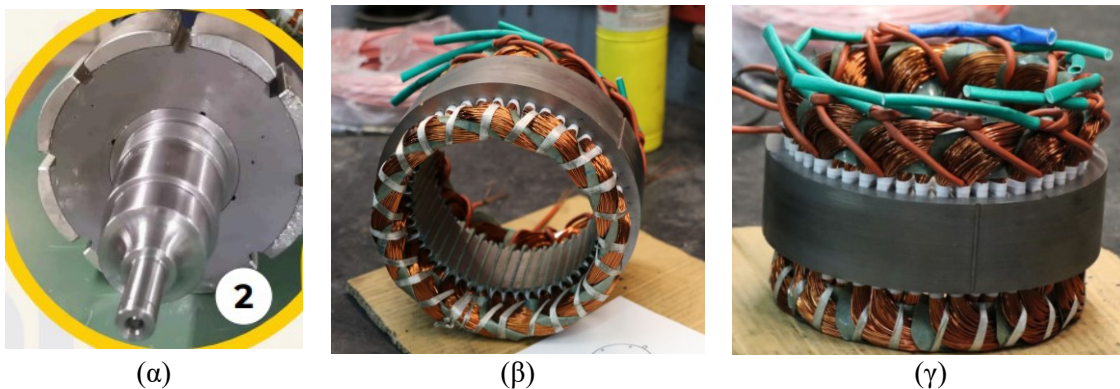


Σχ. 4.1 Σχέδιο λαμαρίνας, μαγνητών και αυλάκων της υπό μελέτη ηλεκτρικής μηχανής. Οι διαστάσεις είναι σε mm ενώ οι γωνίες σε μοίρες.

Ενεργά τυλίγματα σε κάθε αύλακα	13
Παράλληλοι κλώνοι σε κάθε τύλιγμα	5
Σύνδεση ίδιας φάσης μεταξύ ζευγών πόλων	Σε σειρά
Σύνδεση ακροδεκτών φάσεων	Σε αστέρα
Είδος Λαμαρίνας	M235-23A
Είδος Μαγνητών	ND50 (Br = 1.4196T)

Πίν. 4.1 Διαρρύθμιση τυλίγματος και είδη υλικών κατασκευής.

Η τελική κατασκευή αποδίδει τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις, και παρέχει τη βέλτιστη συνολική λειτουργία του πρότυπου οχήματος στην διάρκεια της πίστας αγώνων. Το γεγονός αυτό, είναι αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του συνολικού συστήματος κίνησης του οχήματος. Στην ακόλουθο σχήμα 4.2 είναι φανερή η εσωτερική δομή του κινητήρα που αποτελείται από τον δρομέα με τους επιφανειακούς μαγνήτες, τα ελάσματα του μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού του στάτη και την διαμόρφωση του κατανεμημένου τυλίγματος.



Σχ. 4.2(α) Κατασκευασμένος Δρομέας (β) Στάτης με κατανεμημένο τύλιγμα (γ) Τερματικές περιοχές τυλιγμάτων.

Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα αποτυπώνονται στον πίνακα 4.2. Η ροπή ανά ρεύμα είναι μια κρίσιμη ποσότητα και καταδεικνύει την κατάσταση κορεσμού της μηχανής. Στον πίνακα παρουσιάζεται πως σε μικρά ρεύματα είναι σχετικά πιο εύκολη η ανάπτυξη ροπής από ότι σε υψηλά/ στην περιοχή των 6.6 Ampere η ροπή είναι 6Nm αποδίδοντας 0.91Nm/A ενώ στην περιοχή των 45Ampere η ροπή είναι 40Nm αποδίδοντας 0.89Nm/A. Στον ίδιο πίνακα η αντίσταση του τυλίγματος κάθε φάσης παρουσιάζει μια μικρή ανομοιομορφία ενώ τέλος δίνεται και η ροή του μαγνήτη ή αντίστοιχα η ΗΕΔ σε κενό φορτίο.

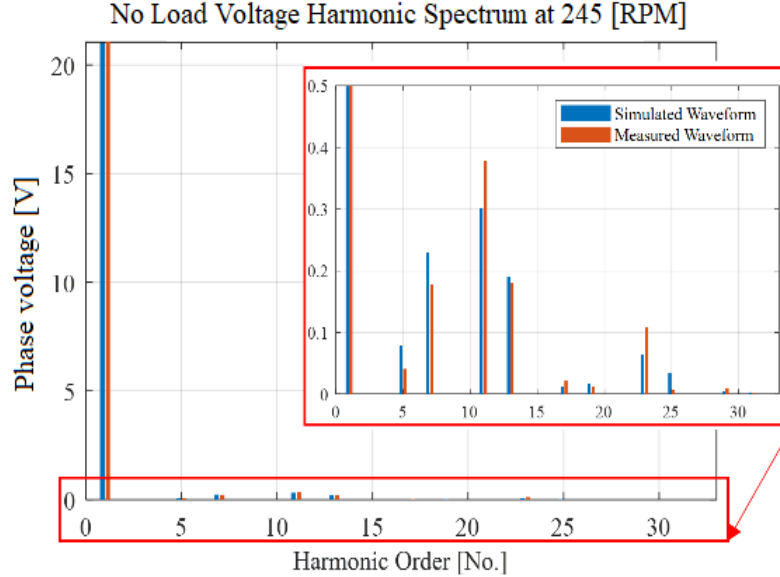
Ροπή ανά Ρεύμα (Q axis)	T_{Shaft}/I_{Peak}	40 / 45	Nm/A
	T_{Shaft}/I_{Peak}	6 / 6.4	Nm/A
Αντίσταση Τυλίγματος	$\Delta V_{dc}/I_{dc}$	0.1940 (A-n)	Ω
	$\Delta V_{dc}/I_{dc}$	0.1995 (B-n)	Ω
	$\Delta V_{dc}/I_{dc}$	0.1947 (C-n)	Ω
Ροή Μαγνήτη	$\Delta V_{peak}/f_e$	0.2046 (A,B,C-n)	Wb

Πίν. 4.2 Πειραματικές μετρήσεις και χαρακτηριστικά του κινητήρα

4.4 Ψηφιακό Δίδυμο με Βάση τα Πεπερασμένα Στοιχεία

Στην γενική περίπτωση δημιουργίας ψηφιακού διδύμου, απαιτείται η χρήση πεπερασμένων στοιχείων μεταβατικής κατάστασης με στόχευση την ακριβή προσομοίωση των δινορευμάτων που αναπτύσσονται στους μόνιμους μαγνήτες καθώς και η εκτίμηση της μεταβολής του πεδίου που αυτά επιφέρουν. Συνήθως, η διαδικασία μοντελοποίησης αυτή, είναι χρονοβόρα ενώ σε σύγκριση με τη στατική ανάλυση τα αποτελέσματα της διαφοροποιούνται μόνο σε λίγα σημεία λειτουργίας υψηλής ταχύτητας [4.5].

Ο υπό εξέταση κινητήρας έχει ονομαστική ταχύτητα περιστροφής 320 σ.α.λ. συνεπώς η στατική 2D Ανάλυση ΠΣ παρέχει επαρκή ακρίβεια για την εκτίμηση των συγκεντρωμένων παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου στις περισσότερες συνθήκες λειτουργίας. Έτσι, στη συγκεκριμένη περίπτωση του συστήματος, η μεταβολή των παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου έχει μικρή υπολογιστική απαίτηση, τόσο σε χώρο μνήμης όσο και σε χρόνο εκτέλεσης.



Σχ. 4.3 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένου και πειραματικού φάσματος τερματικής τάσης στάτη χωρίς φορτίο στις συνθήκες λειτουργίας 245 σ.α.λ..

Το ψηφιακό δίδυμο του κινητήρα δημιουργείται με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του υλικού, όπως η παραμονή του PM (Br) και τα χαρακτηριστικά κορεσμού του ηλεκτρικού χάλυβα (καμπύλες BH) στη μέθοδο ΠΣ, λαμβάνοντας υπόψη και κατασκευαστικούς παράγοντες με βάση τα αντίστοιχα δεδομένα που παρέχουν οι κατασκευαστές. Στο σ

χήμα 4.3 απεικονίζεται το φάσμα της τάσης ακροδεκτών σε κατάσταση μηδενικού φορτίου στις 245 σ.α.λ. επιδεικνύοντας ικανοποιητική ταύτιση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και των πειραμάτων.

Επιπλέον, η λειτουργία του κινητήρα προσομοιώνεται περαιτέρω με τη μέθοδο ΠΣ για κάθε συνδυασμό της τιμής ρεύματος του στάτη I_s , της εσωτερικής γωνίας φορτίου LA καθώς και της γωνίας θ και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα ω_e . Οι αντίστοιχες απώλειες για κάθε σημείο λειτουργίας αξιολογούνται εξίσου μέσω αυτής της διαδικασίας.

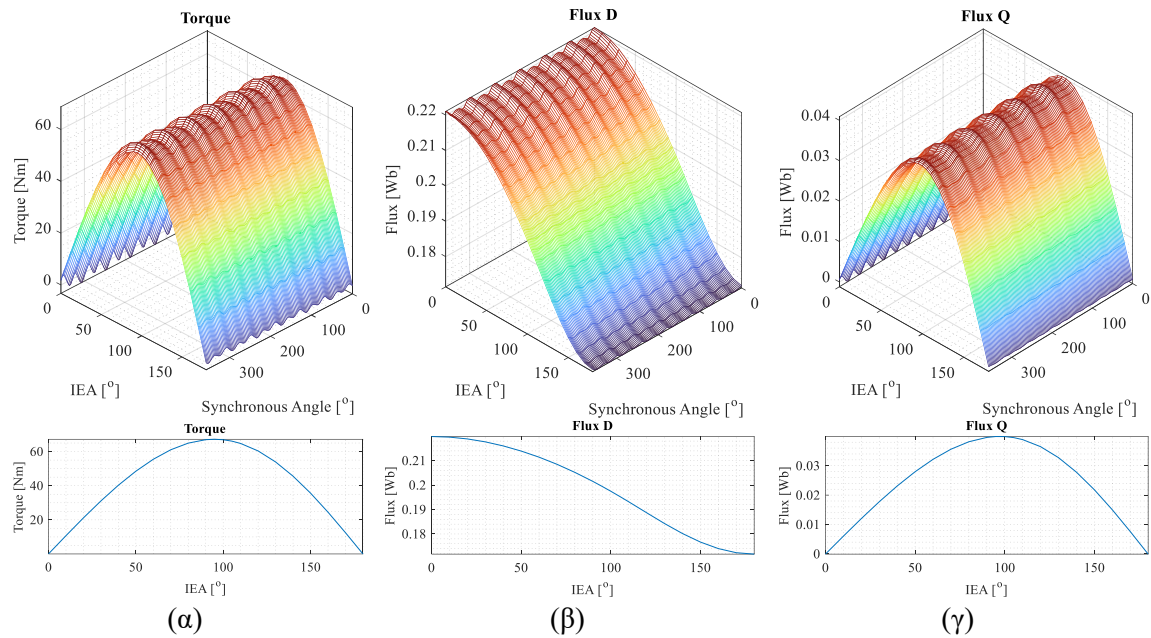
4.5 Συγκεντρωμένες Παράμετροι του Δυναμικού Μοντέλου

Το δυναμικό μοντέλο κινητήρα βασίζεται στη θεωρία δύο αξόνων και στις αντίστοιχες εξισώσεις για τα στοιχεία τάσης ευθέως άξονα (V_d) και ρεύματος (I_d), καθώς και στοιχεία τάσης καθέτου άξονα (V_q) και ρεύματος (I_q) που περιλαμβάνουν μεταβλητές συγκεντρωμένων παραμέτρων, που προσδιορίζονται μέσω της διαδικασία που παρουσιάστηκε προηγουμένως και έχουν τη μορφή:

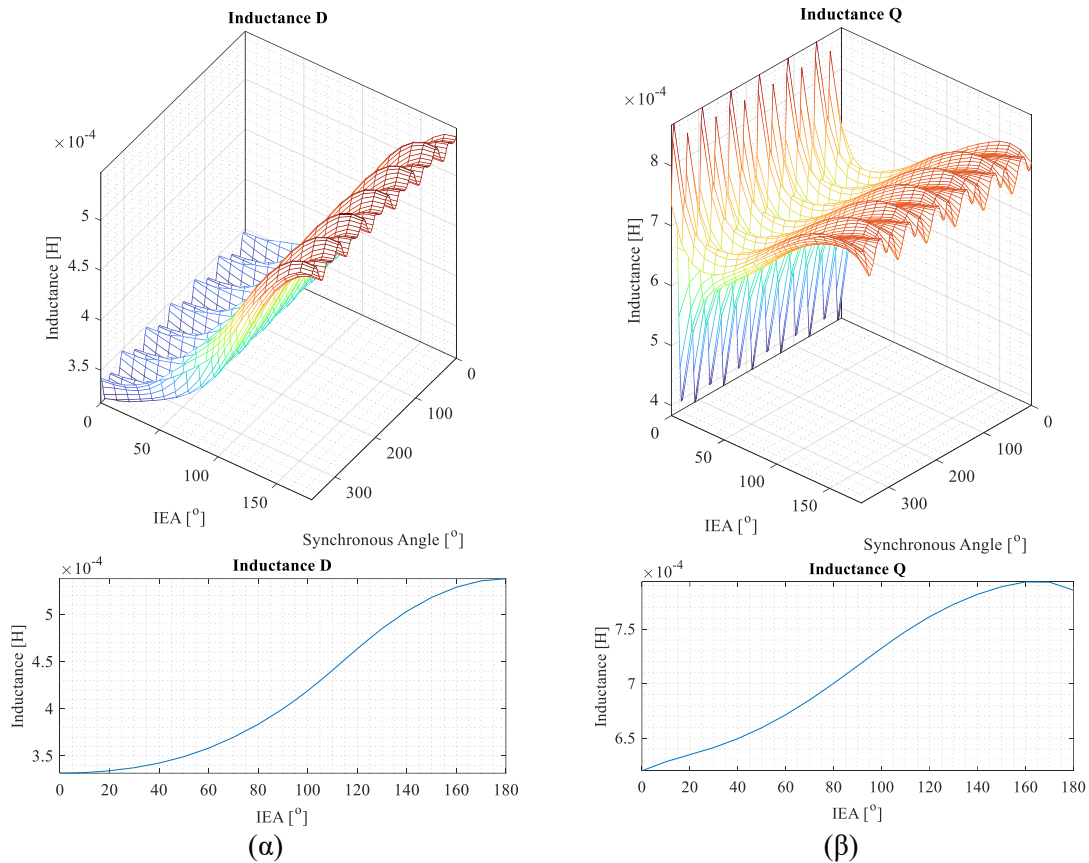
$$V_d = I_d R_s + L_d(I_s, LA, \theta) \frac{dI_d}{dt} - \omega_e \frac{\partial \lambda_d(I_s, LA, \theta)}{\partial \theta} \quad (4.1)$$

$$V_q = I_q R_s + L_q(I_s, LA, \theta) \frac{dI_q}{dt} + \omega_e \left(\frac{\partial \lambda_q(I_s, LA, \theta)}{\partial \theta} + \lambda_{pm} \right) \quad (4.2)$$

όπου τα λ_d , λ_q αντιπροσωπεύουν τον ευθύ και κάθετο άξονα ροής ζεύξης αντίστοιχα, ενώ L_d , L_q είναι οι επαγωγές του ευθύ και του καθέτου άξονα και R_s η αντίσταση του στάτη που είναι επίσης συνάρτηση της ηλεκτρικής γωνιακής ταχύτητας ω_e λόγω φαινομένου εγγύτητας.



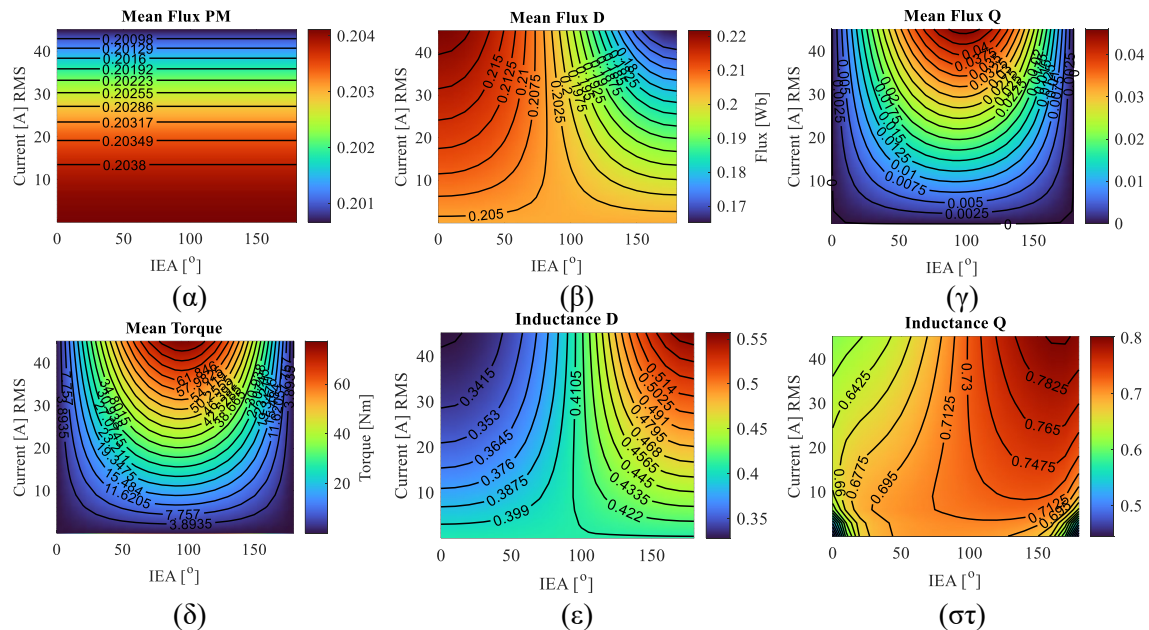
Σχ. 4.4 Ροπή(α), Πεπλεγμένη Ροή D(β) και Q(γ), ως συνάρτηση της γωνίας ροπής και της σύγχρονης γωνίας περιστροφής (Πάνω μέρος). Μέση τιμή της Ροπής, Πεπλεγμένης Ροής D και Q ως συνάρτηση της γωνίας ροπής (Κάτω μέρος). Τα διαγράμματα αναφέρονται σε λειτουργία με ρεύμα στάτη 39Amp.



Σχ. 4.5 Αντεπαγωγή ορθού D(α) και καθέτου Q(β) άξονα, ως συνάρτηση της γωνίας ροπής και της σύγχρονης γωνίας περιστροφής (Πάνω μέρος). Μέση τιμή της αντεπαγωγής ορθού D και καθέτου Q άξονα ως συνάρτηση της γωνίας ροπής (Κάτω μέρος). Τα διαγράμματα αναφέρονται σε λειτουργία με ρεύμα στάτη 39Amp.

Ο υπολογισμός του αρμονικού φάσματος τόσο στην προσομοίωση όσο και στην πειραματική επιβεβαίωση έχει πραγματοποιηθεί σε συνιστώσες πλαισίου τριών φάσεων abc και όχι σε στρεφόμενους άξονες dq. Η παρούσα υλοποίηση περιορίζεται στις 5, 7, 11 και 13 τάξεις αρμονικών, οι οποίες έχουν εισαχθεί στα σήματα αναφοράς του μετατροπέα. Κάθε αρμονικό πλάτος και γωνία έχει προκύψει εφαρμόζοντας FFT στις αντίστοιχες κυματομορφές.

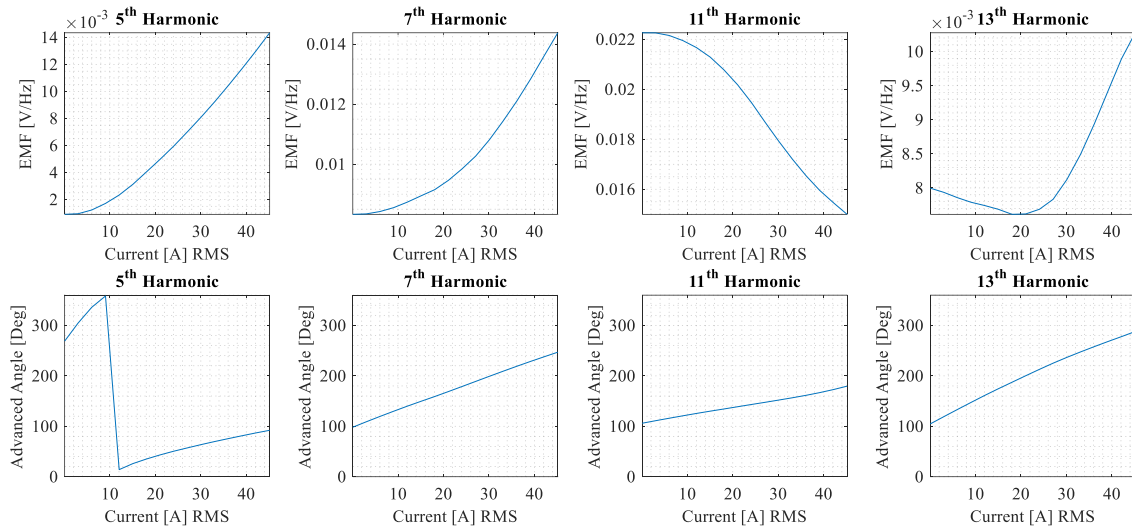
Στα σχήματα 4.4 και 4.5 φαίνεται η εξάρτηση των χαρακτηριστικών της ροπής, των ροών και αυτεπαγωγών ορθού και καθέτου άξονα του υπό μελέτη κινητήρα με την γωνία ροπής (IEA) και τη σύγχρονη γωνία περιστροφής (θ). Παράλληλα δίνονται και οι παράμετροι υποβαθμισμένης τάξης μοντέλου που αγνοεί την μεταβολή των παραμέτρων με την γωνία περιστροφής. Τα παραπάνω διαγράμματα αναφέρονται σε λειτουργία της μηχανής με ρεύμα μαγνητικού κυκλώματος 39A rms. Όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό το δυναμικό κύκλωμα του ψηφιακού διδύμου λαμβάνει υπόψη την μεταβλητότητα των παραμέτρων κατά τη μεταβολή της σύγχρονης γωνίας. Ωστόσο για την βολική απεικόνιση των χαρακτηριστικών ροής μαγνήτη, πεπλεγμένων ροών, των αυτεπαγωγών των αξόνων και της ροπής ως συνάρτηση του ρεύματος και της γωνίας ροπής στο σχήμα 4.6 χρησιμοποιείται η μέση τιμή αυτών, ως προς τη σύγχρονη γωνία.



Σχ. 4.6 Χάρτες (α) Ροής μόνιμου μαγνήτη, (β) Πεπλεγμένης ροής ορθού άξονα D, (γ) Πεπλεγμένης ροής καθέτου άξονα Q, (δ) Ροπής, (ε) Αυτεπαγωγή ορθού άξονα D, (στ) Αυτεπαγωγή καθέτου άξονα Q, ως συνάρτηση του ρεύματος εισόδου (rms) και της γωνίας ροπής.

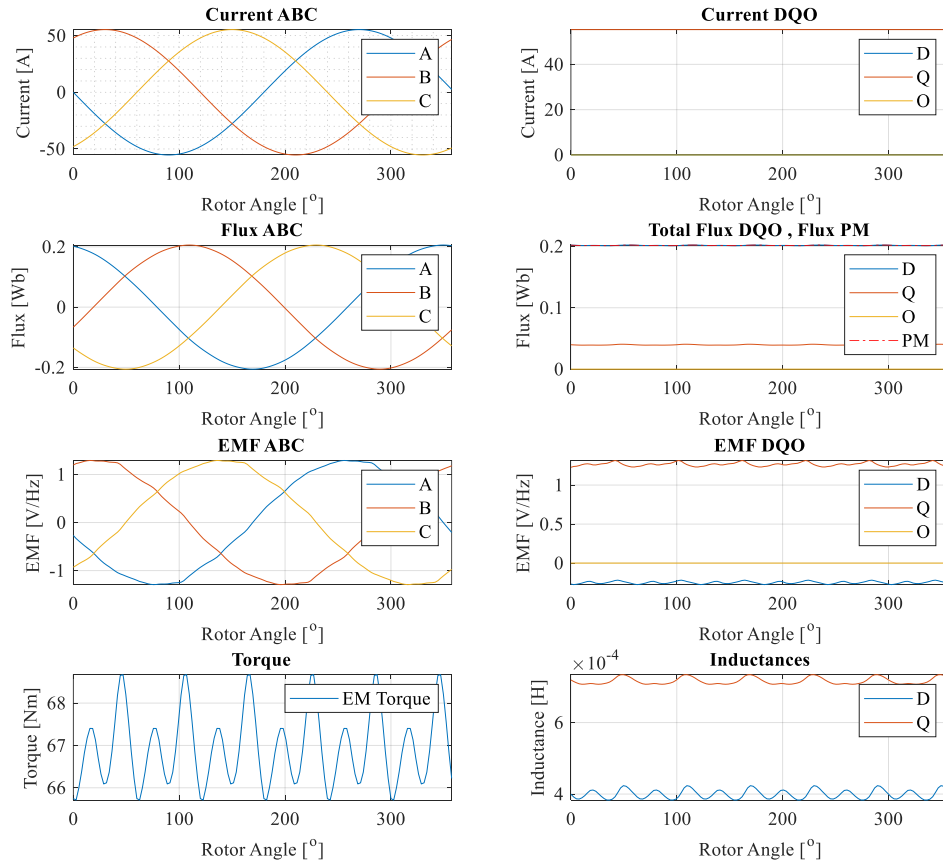
Όπως περιεγράφηκε, με σκοπό την εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος, η οδήγηση του αντιστροφέα απαιτεί την αναπαραγωγή της εσωτερικής ΗΕΔ του κινητήρα σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας. Για την πειραματική εφαρμογή, ο έλεγχος του αντιστροφέα προσθέτει ορισμένες αρμονικές στα σήματα αναφοράς του, σύμφωνα με πίνακες αναζήτησης. Η πρόσθεση αυτή γίνεται στο τριφασικό πλαίσιο ανάλυσης ABC. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται το πλάτος και η γωνία των αρμονικών συνιστωσών 5,7,11,13 τάξης με αναφορά την γωνία της φάσης A. Στο σχήμα αυτό οι αρμονικές έχουν δοθεί μόνο για μία τιμή της γωνίας ροπής, τις 90 μοίρες, ενώ διαφαίνεται η εξάρτηση των εγχύσεων ως προς την τιμή του ρεύματος που λειτουργεί ο κινητήρας, αφενός στο πλάτος και αφετέρου στη φάση τους. Στο σχήμα 4.8 διαφαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ρευμάτων, ροών, ΗΕΔ και ροπής μετά την έγχυση των αρμονικών, χωρίς την ύπαρξη αρμονικών της διαμόρφωσης πλάτους παλμών.

Harmonic Analysis On Back EMF (Phase A -n)
@Internal Electrical Angle = 90[Deg]



Σχ. 4.7 Πλάτος και γωνία των 5,7,11,13 τάξεις των αρμονικών της HEΔ

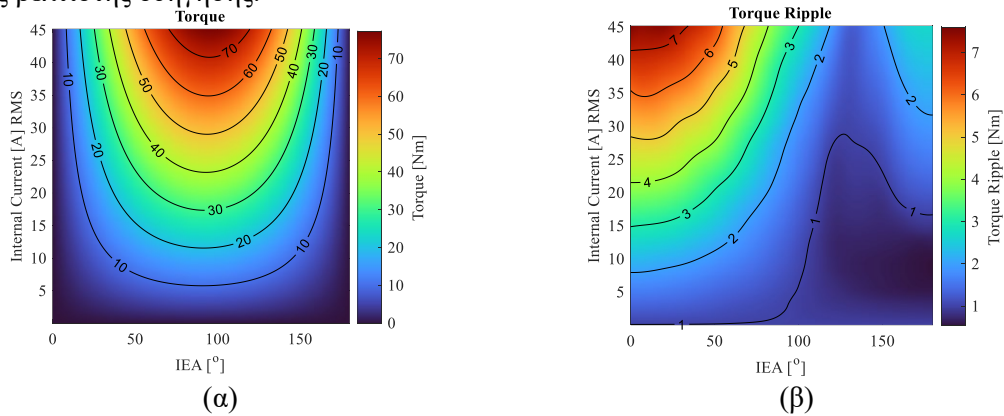
Current Amplitude= 39[A] RMS
Internal Electric Angle = 90.00°



Σχ. 4.8 Αποτελέσματα της προσομοίωσης των ρευμάτων, ροών, HEΔ και ροπής μετά την έγχυση των αρμονικών.

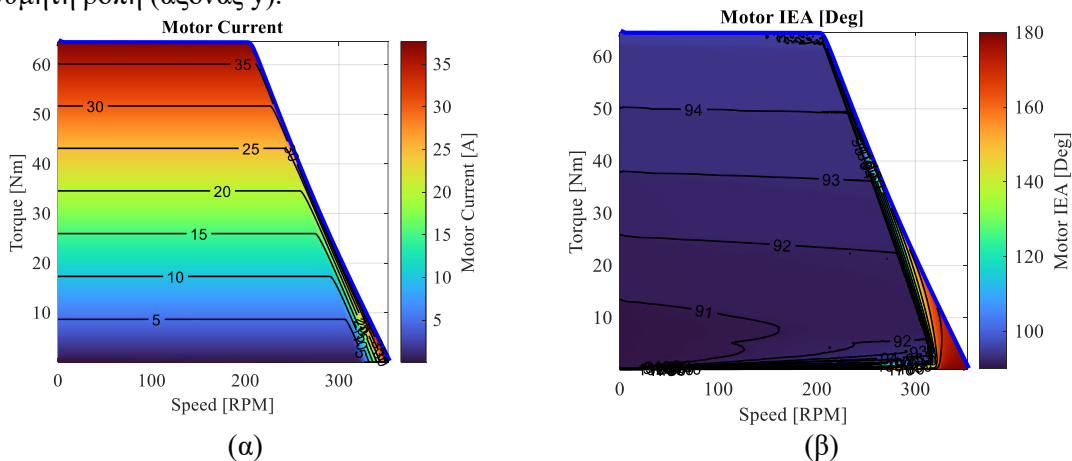
4.6 Βέλτιστη Οδήγηση Μηχανής από Αντιστροφέα

Με στόχο την βέλτιστη λειτουργία της μηχανής από τον αντιστροφέα εξάγονται χάρτες που αντιστοιχίζουν την επιθυμητή ροπή για την τρέχουσα ταχύτητα με τον κατάλληλο συνδυασμό ρεύματος και γωνίας ροπής. Η μη μονοσήμαντη αντιστοίχιση της ροπής με σημεία ρεύματος και γωνίας ροπής είναι εμφανής στο σχήμα 4.9 (α). Για την τιμή πχ 20Nm υπάρχει μια ολόκληρη ισοστάθμική καμπύλη σημείων ρευμάτων και γωνιών I(IEA). Η καμπύλη αυτή ωστόσο κατά μήκος της παρουσιάζει διαφορετική απόδοση. Η εύρεση του σημείου της καμπύλης στο οποίο η απόδοση μεγιστοποιείται αποτελεί μέρος των χαρτών οδήγησης της μηχανής από τον αντιστροφέα. Το πρόβλημα αυτό ωστόσο δεν είναι μονοσήμαντα λυμένο, καθώς μπορεί κανείς να βελτιστοποιήσει και άλλα χαρακτηριστικά όπως η ταλάντωση ροπής (Σχ. 4.9 (β)) ή συνδυασμό χαρακτηριστικών. Στην περίπτωση που επιθυμείται η μείωση μόνο DC των απωλειών χαλκού τότε η λύση του προβλήματος περιγράφεται από τις καμπύλες MTPA και MTPV. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί δεν είναι πάντα εφικτό ο αντιστροφέας να μπορέσει να οδηγήσει τη μηχανή σε όλα τα σημεία της καμπύλης I(IEA). Οι κυρίαρχοι λόγοι είναι ο περιορισμός τάσης και ρεύματος, ενώ πιθανότατα να εμφανίζονται περιορισμοί για λόγους αποφυγής μηχανικών συντονισμών ή κινδύνους απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών. Στην περίπτωση ύπαρξης περιορισμών το πρόβλημα βελτιστοποίησης οφείλει να σεβαστεί τους περιορισμούς αυτούς, διαμορφώνοντας κατάλληλους χάρτες βέλτιστης οδήγησης.

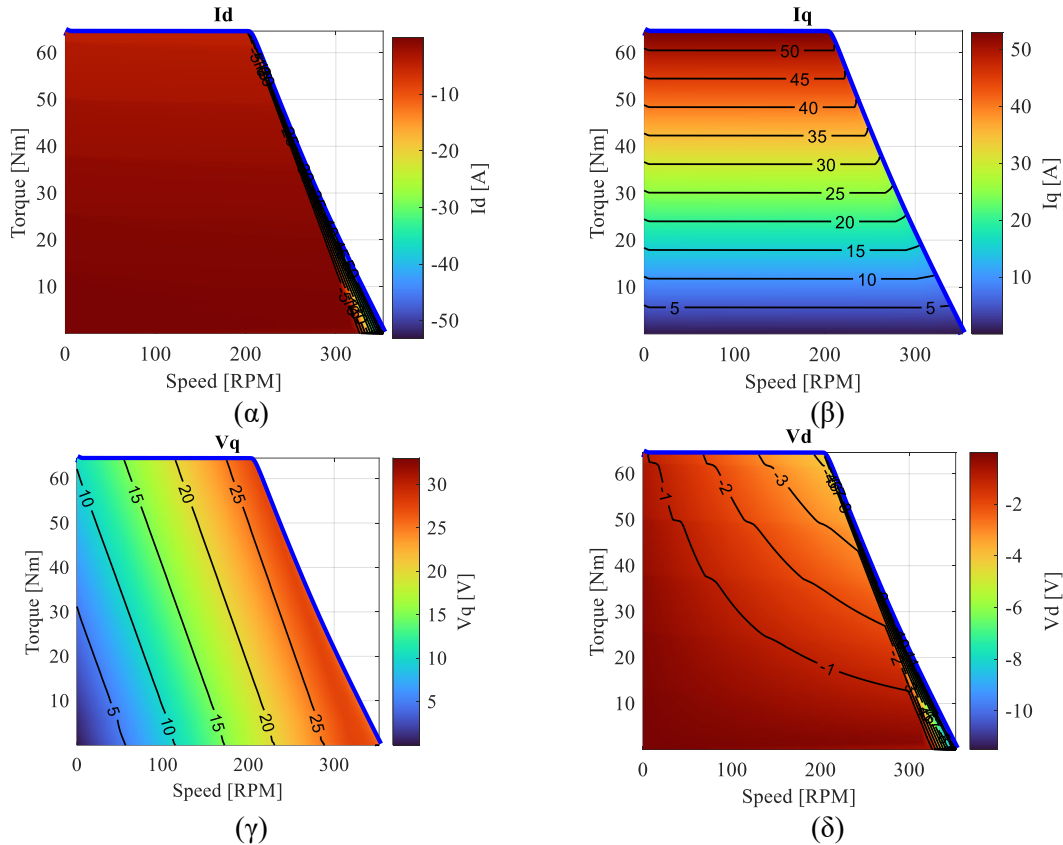


Σχ. 4.9 Αντιστοίχιση ρεύματος και γωνίας ροπής με την: (α) Ροπή του κινητήρα (β) την ταλάντωση ροπής.

Οι χάρτες οδήγησης, οι οποίοι υπολογίστηκαν για την συγκεκριμένη μηχανή δίνονται στο σχήμα 4.10, περιγράφοντας την γωνία ροπής και το πλάτος ρεύματος, που οφείλει ο αντιστροφέας να επιτυγχάνει στην μηχανή, όταν αυτή λειτουργεί σε ορισμένη ταχύτητα ω (άξονας x) για την επιθυμητή ροπή (άξονας y).

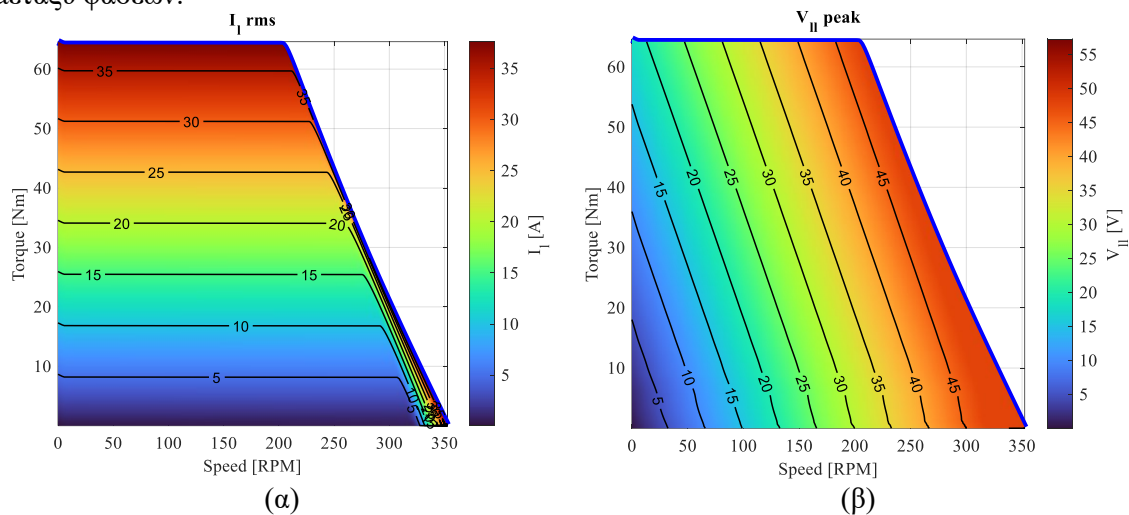


Σχ. 4.10 Χάρτες βέλτιστης οδήγησης του κινητήρα: (α) Τιμή ρεύματος εισόδου (β) Εσωτερική γωνία ροπής.

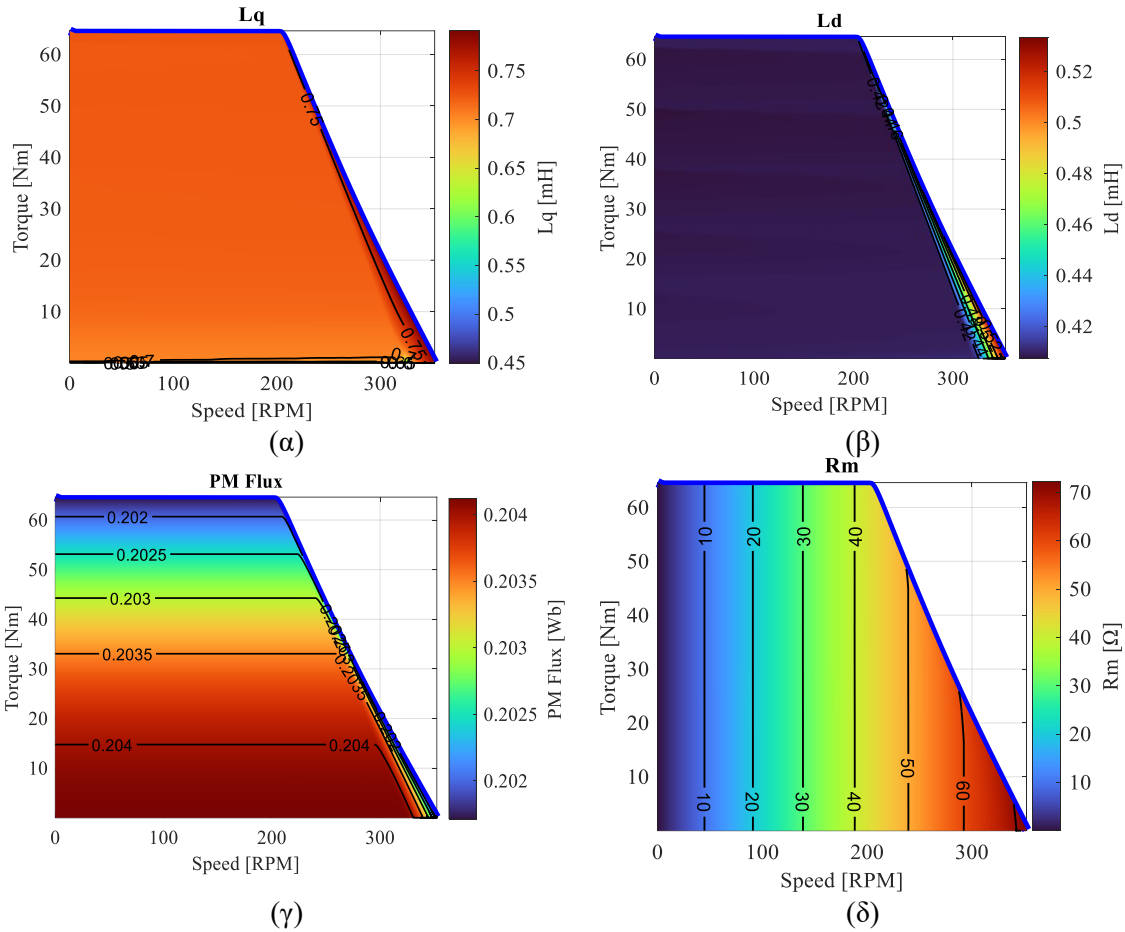


Σχ. 4.11 Περιγραφή των ρευμάτων και τάσεων στην είσοδο του κινητήρα στο κινούμενο πλαίσιο DQ με στόχο την βέλτιστη οδήγηση (α) Ρεύμα ορθού άξονα D , (β) Ρεύμα καθέτου άξονα Q , (γ) Τάση ορθού άξονα D , (δ) Τάση καθέτου άξονα Q .

Μια εναλλακτική ερμηνεία των χαρτών βέλτιστης οδήγησης που αποτυπώθηκαν προώστερα στο σχήμα 4.10, δίνονται στο σχήμα 4.11 στο οποίο τα ρεύματα και οι έχουν αποδοθεί στο στρεφόμενο πλαίσιο. Οι τάσεις ακροδεκτών υπολογίζονται με βάση το δυναμικό κύκλωμα του ψηφιακού διδύμου. Στο σχήμα 4.12 δίνεται η πρακτική απεικόνιση των μεγεθών αυτών, υπό την έννοια των μεγεθών που μπορούν να μετρηθούν στην πράξη όπως το ρεύμα γραμμής και η τάση μεταξύ φάσεων.

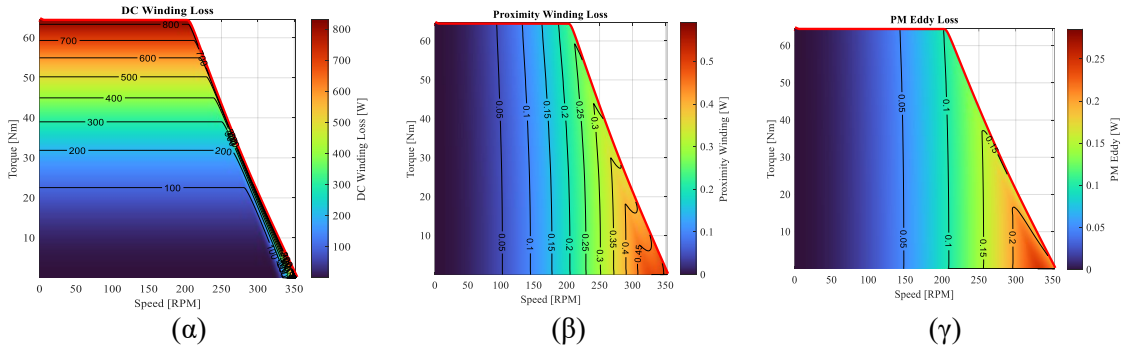


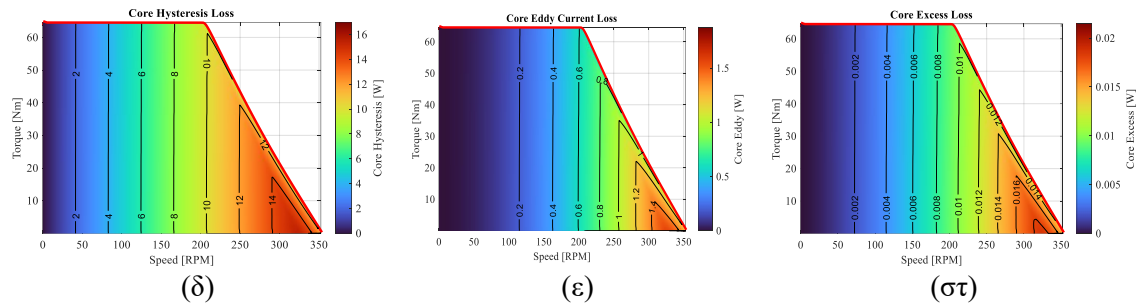
Σχ. 4.12 Ρεύμα και τάση κινητήρα υπό βέλτιστη λειτουργία. (α) Ρεύμα γραμμής κινητήρα και (β) Πολική τάση.



Σχ. 4.13 Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος περιορισμένης τάξης. (α) Αυτεπαγωγή ορθού άξονα (β) Αυτεπαγωγή καθέτου άξονα. (γ) Ροή μόνιμου μαγνήτη (δ) Αντίσταση κλάδου μαγνήτισης.

Στις λειτουργικές καταστάσεις που ο αντιστροφέας οδηγεί τον κινητήρα οι ισοδύναμες παράμετροι του δυναμικού ηλεκτρικού κυκλώματος περιορισμένης τάξης (αγνοώντας την μεταβολή χαρακτηριστικών με τη σύγχρονη γωνία περιστροφής) δίνονται στο σχήμα 4.12. Παρατηρούμε πως, οι αυτεπαγωγές και η ροή του μαγνήτη του κινητήρα δεν έχουν μεγάλη μεταβλητότητα όσο η μηχανή λειτουργεί μακριά από την περιοχή εξασθένισης πεδίου. Όταν μεταβούμε στην περιοχή εξασθένισης του πεδίου, τότε η ροή του μαγνήτη καταπιέζεται – μειώνεται ενώ η τάση λειτουργίας παραμένει σταθερή εξ αιτίας της αύξησης του άεργου ρεύματος και κατά συνέπεια της ωμικής πτώσης τάσης. Η μεταβολή της κατανομής του κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος εξαιτίας των υψηλών ρευμάτων μεταβάλλει την αυτεπαγωγή των αξόνων.

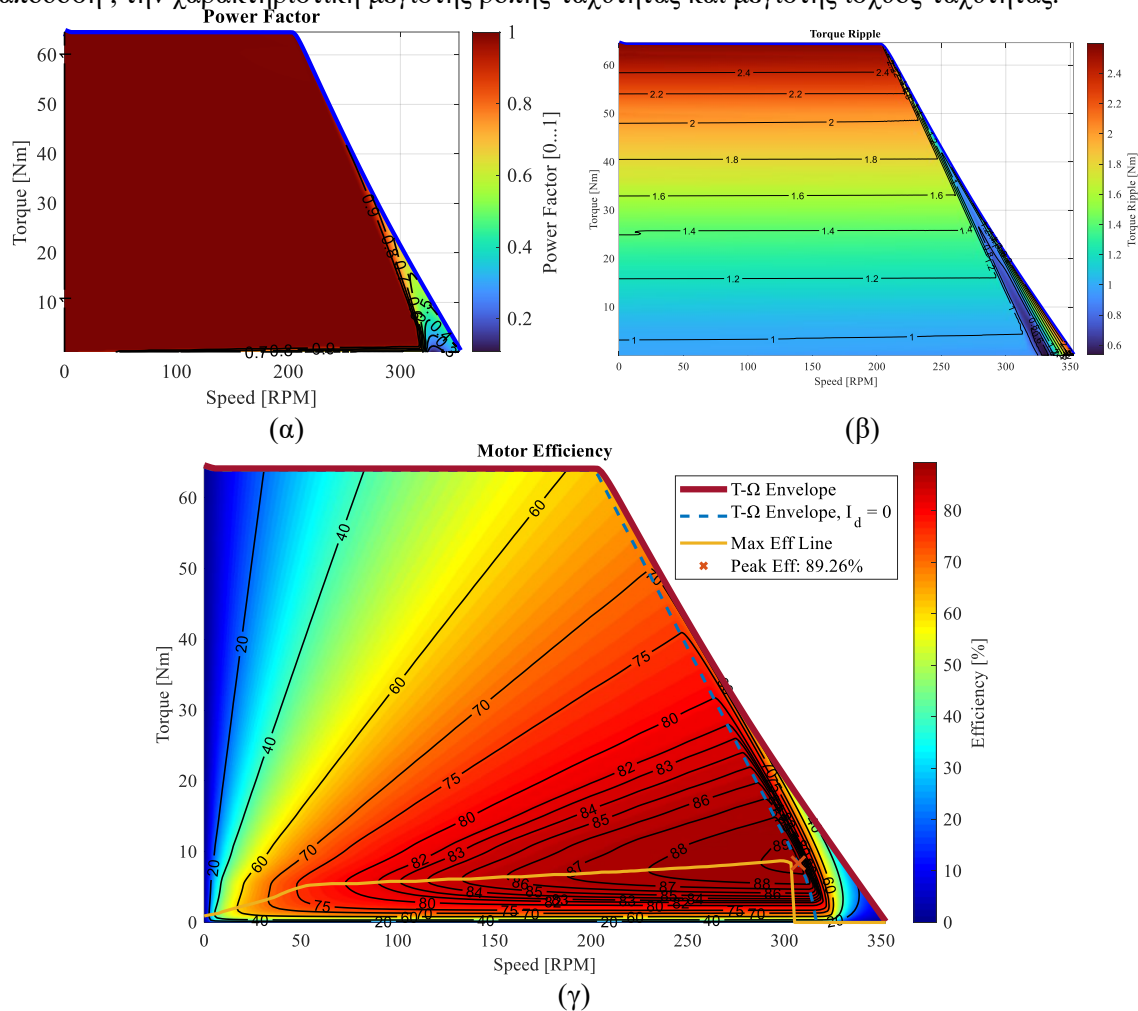


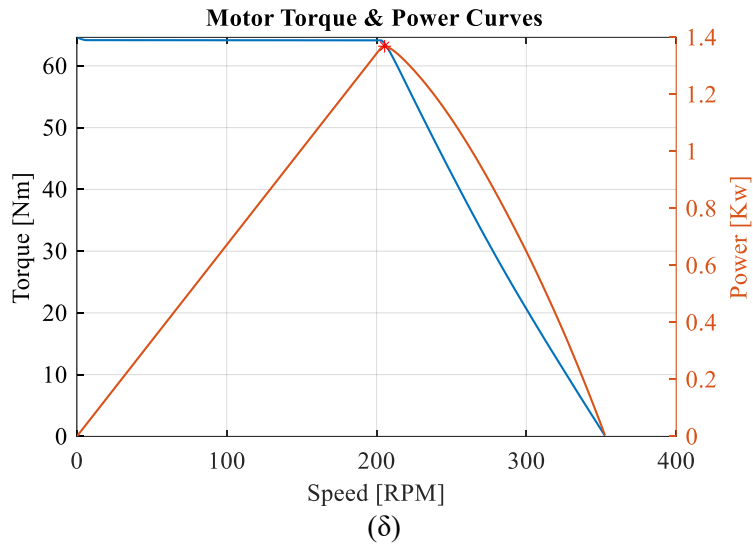


Σχ. 4.14 Συνιστώσες απώλειών κινητήρα. (α) DC απώλειες τυλίγματος. (β) AC απώλειες τυλίγματος. (γ) Απώλειες μόνιμου μαγνήτη. (ε) Απώλειες υστέρησης πυρήνα (ε) Απώλειες δινορευμάτων πυρήνα (ε) Ανώμαλες απώλειες πυρήνα.

Στο παραπάνω σχήμα (4.13) μπορούμε ακόμη να παρατηρήσουμε την αντίσταση μαγνήτισης η οποία αυξάνεται με την ταχύτητα και περιγράφει αποδοτικά τις απώλειες μόνιμου μαγνήτη και πυρήνα, όπως αυτές φαίνονται στο σχήμα 4.14 (γ),(δ),(ε),(στ). Σημαντικό είναι να αναφερθεί, πως η κύρια πηγή απωλειών του κινητήρα αυτού, είναι οι απώλειες χαλκού, διότι οι ταχύτητες που λειτουργεί είναι πρακτικά πολύ μικρές, δίνοντας μάλιστα την δυνατότητα αγνόησης των απωλειών γειτνίασης και επιδερμικού φαινομένου στο τυλίγμα όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 4.14 (β).

Η συνολική αποτίμηση της οδήγησης του κινητήρα υπό τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας δίνεται στο σχήμα 4.15 παρουσιάζοντας τον συντελεστή ισχύος, την ταλάντωση ροπής, την απόδοση, την χαρακτηριστική μέγιστης ροπής-ταχύτητας και μέγιστης ισχύος-ταχύτητας.



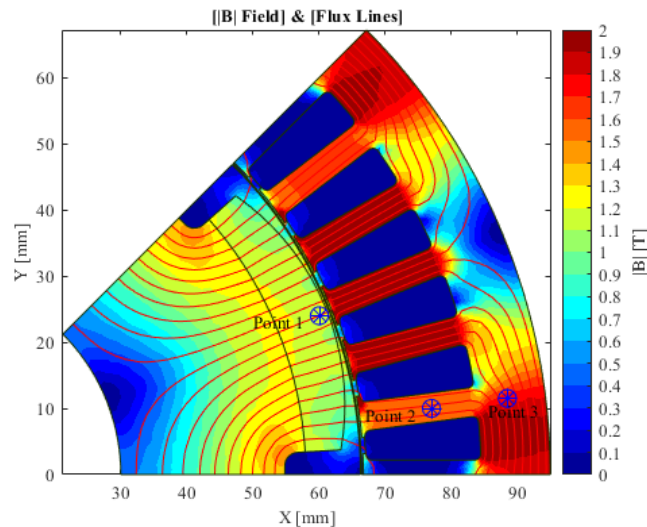


Σχ. 4.15 (α) Χάρτης συντελεστή ισχύος, (β)Ταλάντωση ροπής, (γ)Απόδοση, (δ)Χαρακτηριστική μέγιστης ροπής-ταχύτητας και μέγιστης ισχύος-ταχύτητας.

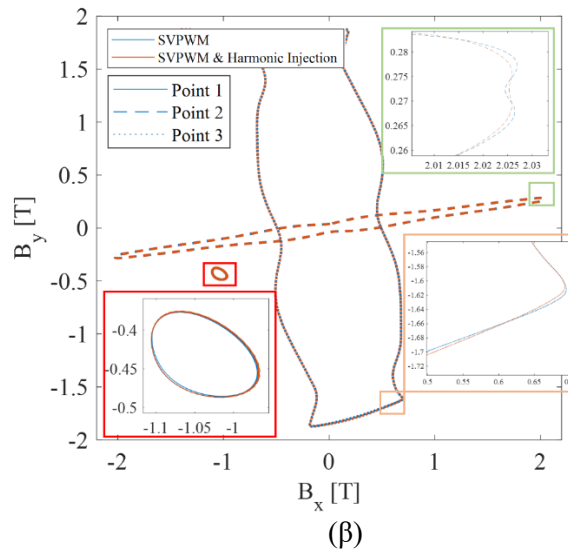
4.7 Αποτελέσματα Κεφαλαίου

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία, ένας κινητήρας επιφανειακών μονίμων μαγνητών (SPMSM) οκτώ πόλων ονομαστικής ισχύος 1.4 kW και ονομαστικής ταχύτητας 320 RPM με κατανεμημένες περιελίξεις έχει κατασκευαστεί για ένα πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα «urban concept». Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από ελάσματα σιδήρου ποιότητας M235-35A ενώ το υλικό μαγνήτη είναι πυροσυσσωματωμένο κράμα NdFeB βαθμίδας N50. Ο μετατροπέας είναι επίσης χειροποίητος και χρησιμοποιεί SiC Mosfets με τον ελεγκτή του να βασίζεται στο Texas Instruments MCU τύπου F28379D.

Το τμήμα ενός πόλου του κινητήρα και η αντίστοιχη κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής όταν λειτουργεί με ταχύτητα 295 rpm σε κατάσταση παροχής ροπής 6 Nm φαίνονται στο σχήμα 4.16(α). Στο σχήμα 4.16(β) ο γεωμετρικός τύπος πυκνότητας ροής B στο επίπεδο (x,y) σχεδιάζεται σε ορισμένα σημεία τόσο στον στάτη όσο και στον δρομέα, που υποδεικνύονται στην 4.16 (α). Τέλος, το σχήμα 4.16(β) απεικονίζει τις διακυμάνσεις του ταλαντούμενου και περιστρεφόμενου τοπικού μαγνητικού πεδίου στα εξεταζόμενα σημεία.

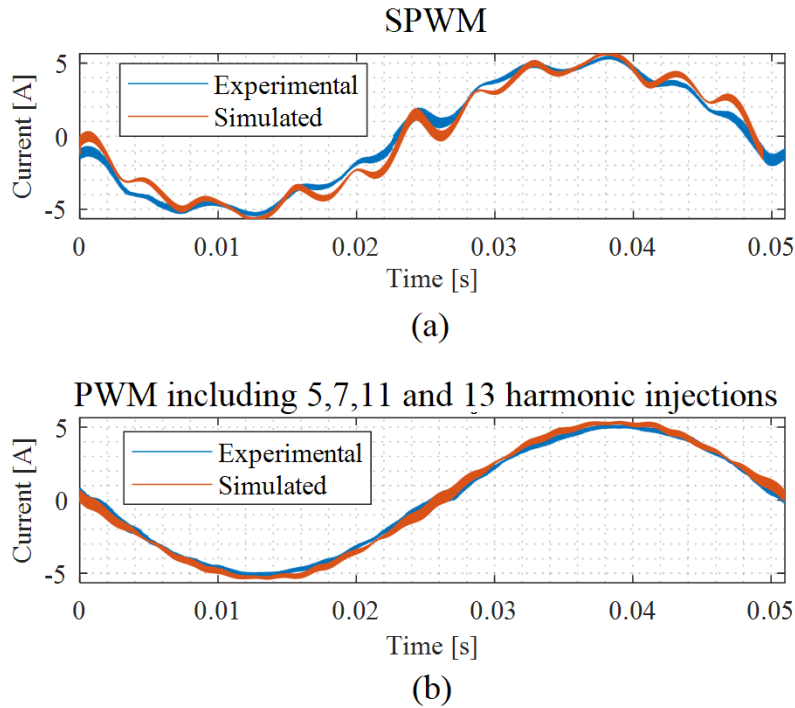


(α)



Σχ. 4.16 Μαγνητικό πεδίο που υπολογίζεται όταν ο κινητήρας λειτουργεί με ταχύτητα 295 rpm, και παρέχει ροπή 6 Nm. (α) Κατανομή πυκνότητας ροής. (β) Γεωμετρικός τόπος B_x vs B_y σε συγκεκριμένα σημεία και στα δύο μέρη του δρομέα και του στάτη.

Η σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων και πειραματικών διακυμάνσεων του ρεύματος κάτω από τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 4.17. Αρχικά παρουσιάζεται η περίπτωση του SPWM (α) ενώ στο σχήμα 4.17(β) παρουσιάζεται η περίπτωση της έγχυσης των αρμονικών τάξεων 5, 7, 11 και 13 στην κυματομορφή της τάσης αναφοράς του αντιστροφέα, προκειμένου να εξαλειφθούν οι αρμονικές του ρεύματος και ο αντίστοιχος κυματισμός ροπής. Αυτό το σχήμα δείχνει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.



Σχ. 4.17 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων και πειραματικών διακυμάνσεων του ρεύματος όταν ο κινητήρας λειτουργεί με ταχύτητα 295 rpm, φορτωμένος με ροπή 6 Nm. (α) SPWM (β) PWM συμπεριλαμβανομένης της εξάλειψης των αρμονικών ρεύματος.

4.8 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η διαδικασία κατασκευής ενός αποδοτικού ψηφιακού διδύμου για ηλεκτρικό κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών. Οι παράμετροι εξάγονται μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ενώ η χρήση πινάκων αναζήτησης επιτρέπει την γρήγορη και εύχρηστη ανάλυση της συμπεριφοράς του κινητήρα. Η αποτελεσματική λειτουργία του επιτρέπει την εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος. Η μέθοδος αυτή, μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε ψηφιακούς ελεγκτές επειδή βασίζεται σε δυναμικά μοντέλα που περιλαμβάνουν μεταβλητές συγκεντρωμένες παραμέτρους χρησιμοποιώντας κατάλληλους πίνακες αναζήτησης. Η προτεινόμενη τεχνική έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά με μετρήσεις και παρέχει σημαντική μείωση των απωλειών και μείωση του κυματισμού της ροπής. Τέλος, η ευστάθεια των βρόχων ελέγχου ρεύματος ενισχύεται, επειδή μειώνονται οι ταλαντώσεις που εισάγονται μέσω της ανάδρασης – μέτρησης μη ημιτονικών ρευμάτων.

4.9 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [4.1] Qiongwen Liang, Fan Wei, Zongyang Li, Yongting Deng and Yong Wang "Torque Ripple Suppression of Permanent Magnet Synchronous Motor Based On Robust Current Injection" 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 782 032082
- [4.2] H. Kim and S. Bhattacharya, "A Novel Current Control Strategy Based on Harmonic Voltage Injection for Power Losses Reduction of PMSMs with Non-Sinusoidal Back-EMF," 2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/IAS.2019.8912372
- [4.3] I L. Wu and Z. Lyu, "Harmonic Injection-Based Torque Ripple Reduction of PMSM with Improved DC-Link Voltage Utilization," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 7, pp. 7976-7981, July 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3262574
- [4.4] M. Bremer, A. Langheck and M. Doppelbauer, "A Novel Control Method to Reduce Torque Harmonics Using Harmonic Current Injection," 2023 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Francisco, CA, USA, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEMDC55163.2023.10239095
- [4.5] L. Mengoni, O. Ilina, B. Wrzecionko, J. Mayer, M. Füchtner and R. W. De Doncker, "PMSM and Inverter Efficiency Calculation Including Current Ripple, AC Loss and PM Segmentation for a High Performance Powertrain," 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022
- [4.6] O. Wallmark and K. Bitsi, "Iron-Loss Computation Using Matlab and Comsol Multiphysics," 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 916-920, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270824.
- [4.7] E. Schmidt and M. Sušić, "Parameter evaluation of permanent magnet synchronous machines with tooth coil windings using the frozen permeabilities method with the finite element analyses," 2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/CCECE.2012.6334827.
- [4.8] Jun Lu, Jianguo Yang, Yinchun Ma and Ruirong Ren, "Compensation for harmonic flux and current of permanent magnet synchronous motor by harmonic voltage," 2015 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), Fukuoka, 2015, pp. 1-5.
- [4.9] Zha-Hong Qiu and Yen-Shin Lai, "New On-Line MTPA Angle Search and Control Methods Based on Digital Twins for IPM Synchronous Motor Drives Considering Motor Non-Linearity," IEEE Access, vol. 11, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3341356.

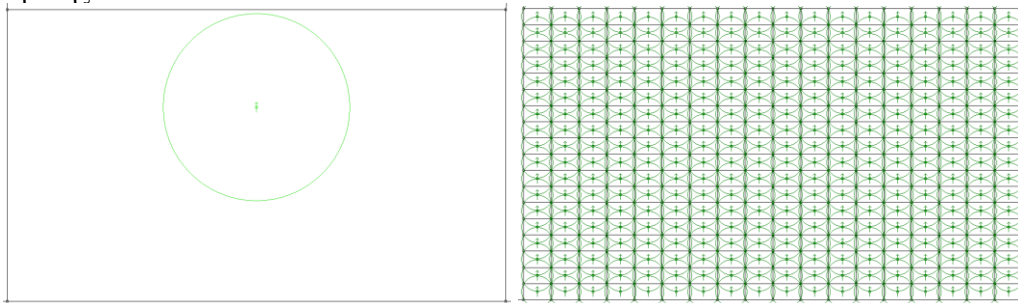
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

5.1 Μέθοδοι Ανάλυσης Απομαγνήτισης Μαγνητικών Υλικών

Οι προσομοιώσεις της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού FEMM, όπως αναφέρθηκε, δεν εξασφαλίζουν την παραμονή των στοιχείων του μαγνήτη εντός της καμπύλης B-H. Οι λόγοι που δεν γίνεται αυτό είναι εξαιτίας της αμφίβολης ύπαρξης αριθμητικής ευστάθειας των υπολογισμών, η οποία είναι απαραίτητη για τη βεβαίωση της περάτωσης του αλγορίθμου σε πεπερασμένο χρόνο. Ωστόσο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μοντέλα λειτουργίας των μαγνητικών υλικών τα οποία δεν επηρεάζουν την αριθμητική ευστάθεια των υπολογισμών του προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Παράλληλα μπορεί να αποδοθεί και η δυνατότητα μνήμης της κατάστασης μαγνήτισης του εκάστοτε σημείου του μαγνήτη.

Για να γίνει αυτό σε κάθε στοιχείο του πλέγματος του μαγνήτη, απαραίτητο είναι να προσδιορίζεται η τιμή του H_c , δηλαδή η κατ' αντιστοιχία παραμένουσα μαγνήτιση. Στο πρόγραμμα αυτό υπάρχει ακόμη η δυσκολία χωρισμού της τιμής H_c σε κάθε σημείο του μαγνήτη εφόσον το πρόγραμμα σε όλα τα στοιχεία του πλέγματος εντός του υλικού μαγνήτη ανατίθεται η ίδια τιμή. Αυτό διαπιστώνεται στον πηγαίο κώδικα του προγράμματος, ο οποίος ελευθέρα παρέχεται στην ιστοσελίδα του. Σε κάθε επανάληψη η τιμή H_c της εκάστοτε κλάσης που ανήκουν τα στοιχεία του πλέγματος έχει σταθερή τιμή. Η προσπάθεια να αλλάξει ο πηγαίος κώδικας ώστε η τιμή του H_c να αποτελεί μέρος της κλάσης του πλέγματος, και η εισαγωγή της καμπύλης B-H του μαγνήτη θα ήταν δαιδαλώδης.

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

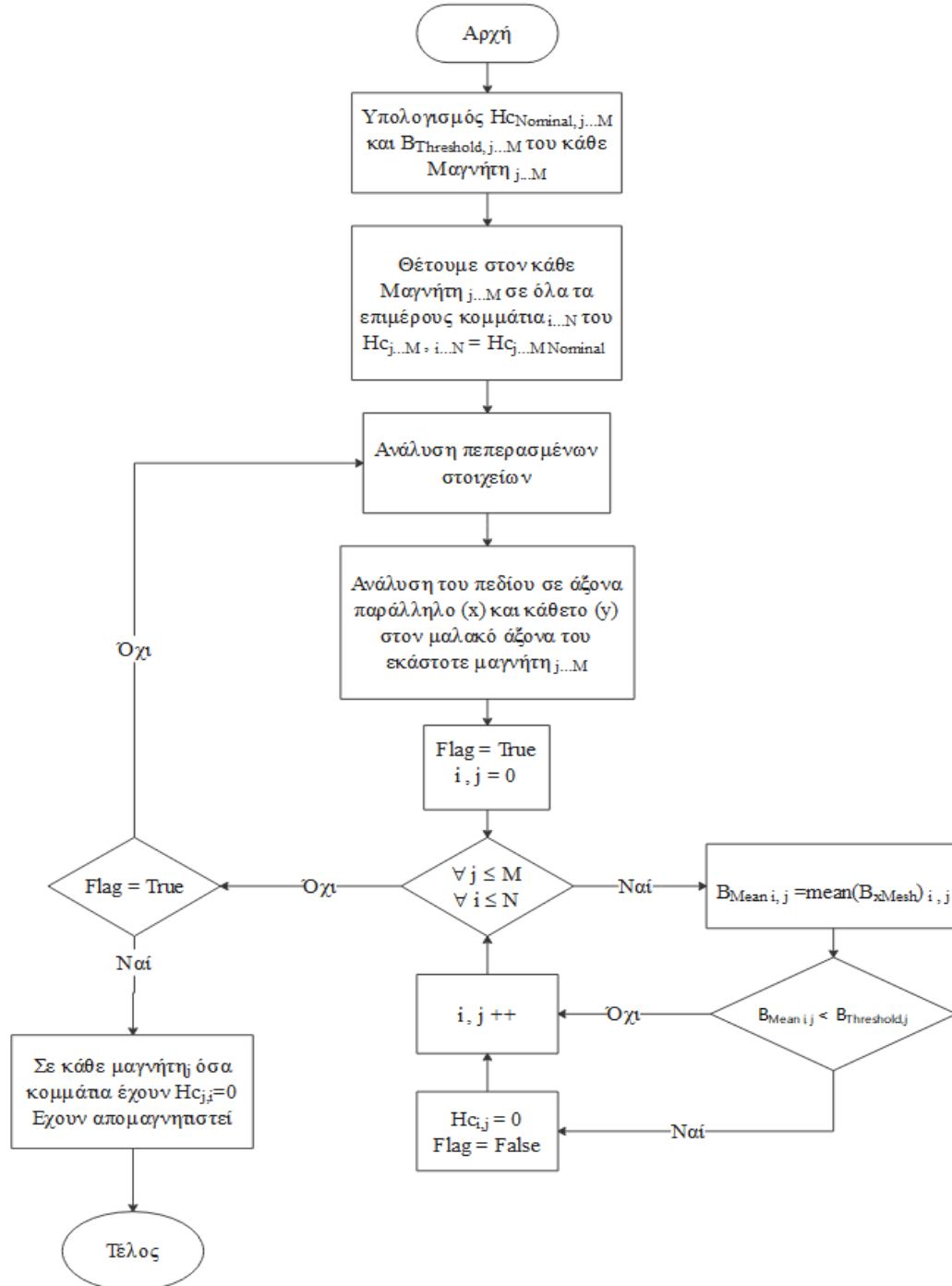


Σχ. 5.1 Αριστερά είναι η εικόνα μαγνήτη μηχανής στο πρόγραμμα προσομοίωσης FEMM για συνήθη ανάλυση. Δεξιά ο είναι ο ίδιος μαγνήτης της μηχανής στο ίδιο πρόγραμμα προσομοίωσης, για ανάλυση της απομαγνήτισης αποτελούμενος από επιμέρους κομμάτια.

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

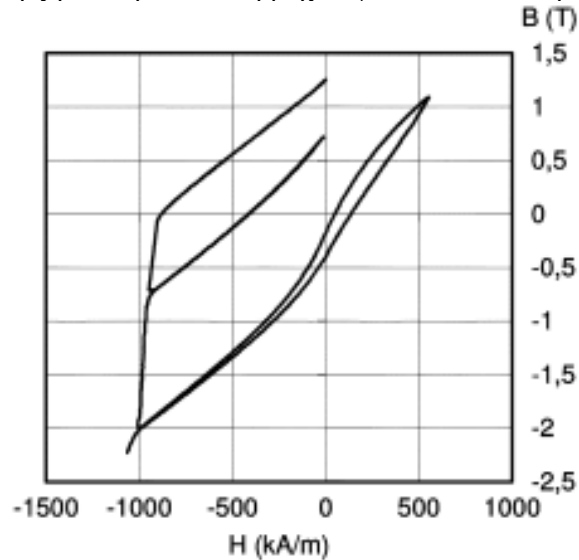
Το περιοριστικό μοντέλο δίνει μία αρχική και γρήγορη εκτίμηση της απομαγνήτισης των μαγνητών. Το μοντέλο αρχικά θεωρεί μηδενική απομαγνήτιση των μαγνητών και υπολογίζει με βάση αυτό το δεδομένο την τιμή του πεδίου στο πλέγμα. Στη συνέχεια, εκτελεί έλεγχο στο πλέγμα των μαγνητών ως προς τη τιμή του πεδίου B στον μαλακό άξονα του μαγνήτη. Την τιμή αυτή του

πεδίου, τη συγκρίνει με βάση την τιμή του γονάτου της καμπύλης B-H ($B_{Threshold}$) του υπό μελέτη μαγνήτη. Σε περίπτωση που τα περισσότερα στοιχεία του πλέγματος μέσα στο εκάστοτε κομμάτι του μαγνήτη είναι εκτός της τιμής γονάτου, το κομμάτι αυτό απομαγνητίζεται πλήρως θέτοντας την τιμή H_c μηδενική. Στην συνέχεια υπολογίζεται εκ νέου το πεδίο στην μηχανή και επαναλαμβάνεται ο παραπάνω έλεγχος, έως ότου να βρεθεί επανάληψη η οποία να μην μεταβάλει καμία τιμή H_c . Το διάγραμμα ροής της παραπάνω μεθόδου είναι:



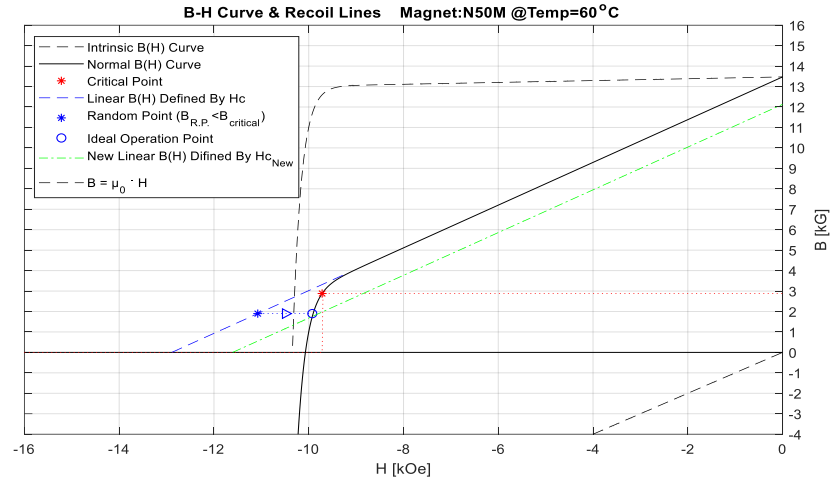
Σχ. 5.2 Διάγραμμα ροής του περιοριστικού μοντέλου υπολογισμού απομαγνήτισης.

Η μέθοδος αυτή δεν είναι υψηλής ακρίβειας αφού δεν περιγράφει πλήρως τη συμπεριφορά της απομαγνήτισης ούτε ως προς την συμπεριφορά κατά τη διάρκεια που υφίσταται το εξωτερικό πεδίο και ούτε ως προς την επαναφορά των σημείων της καμπύλης όταν αποχωρίσει το πεδίο αυτό. Ωστόσο, δίνει ασφαλή αποτελέσματα ως προς την αντοχή στην απομαγνήτιση. Η πρώτη απόκλιση της μεθόδου στη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια του πεδίου είναι εμφανής, επειδή υπάρχει μηδενισμός του H_c πεδίου του μαγνήτη ενώ στην πράξη το πεδίο H έχει τιμή κοντά σε αυτή του γονάτου. Η δεύτερη απόκλιση οφείλεται στην ύπαρξη δευτερευόντων βρόχων (minor loops) στην καμπύλη $B-H$ κατά την εφαρμογή - αποχώρηση του ισχυρού εξωτερικού πεδίου και την ελαφριά μεταβολή στην κλίση που έχει η καμπύλη μερικής απομαγνήτισης $B-H$, όσο πλησιάζει κανείς στον άξονα B . Η κλίση και η ύπαρξη δευτερευόντων βρόχων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

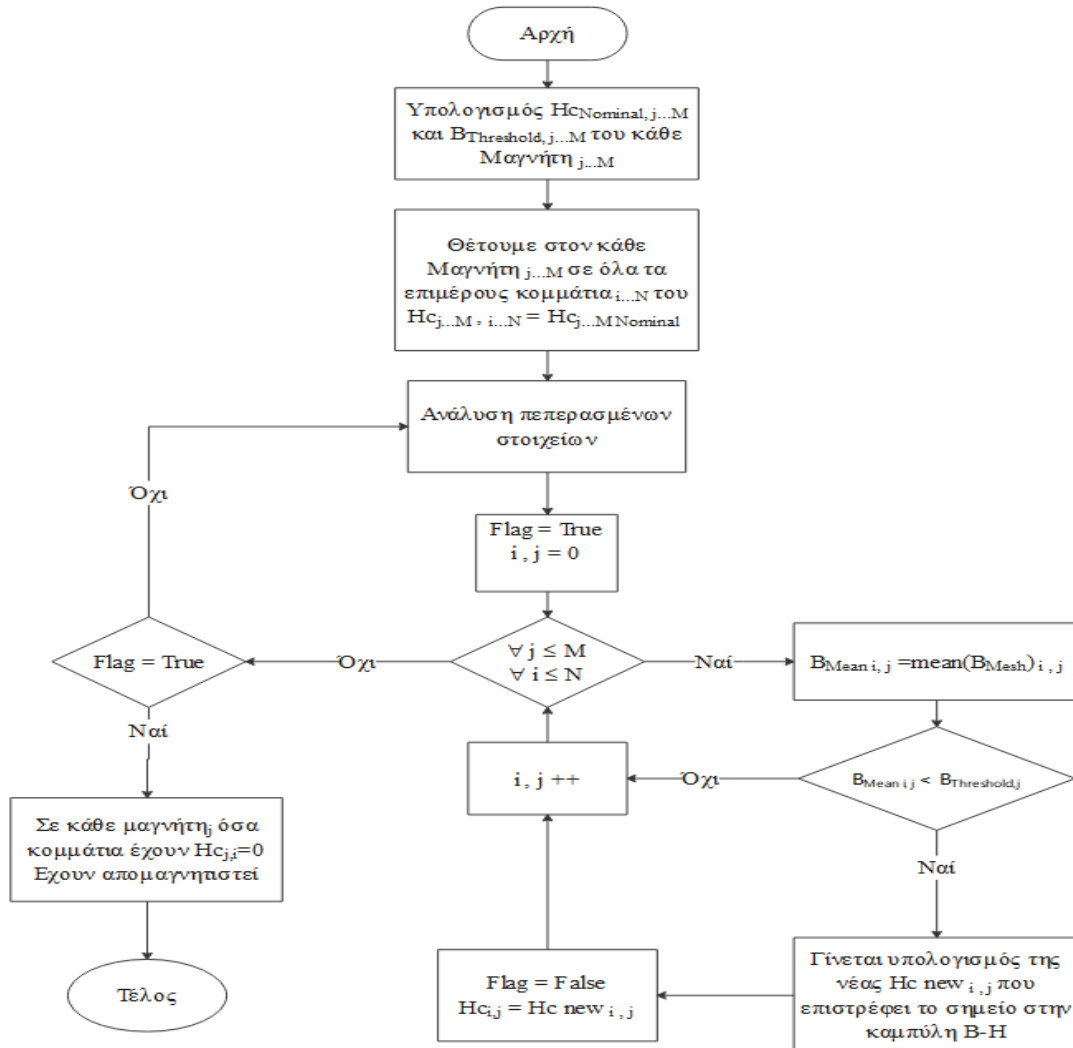


Σχ. 5.3 Μια τυπική συμπεριφορά απομαγνήτισης για μαγνήτες NdFeB. Φαίνονται τα φαινόμενα των δευτερευόντων βρόχων και της ελαφριάς μεταβλητής κλίσης, κοντά στον B άξονα, που διαθέτει η καμπύλη όταν αποχωρεί το εξωτερικό πεδίο. Η εικόνα αυτή είναι μέρος της δημοσίευσης [6.13].

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

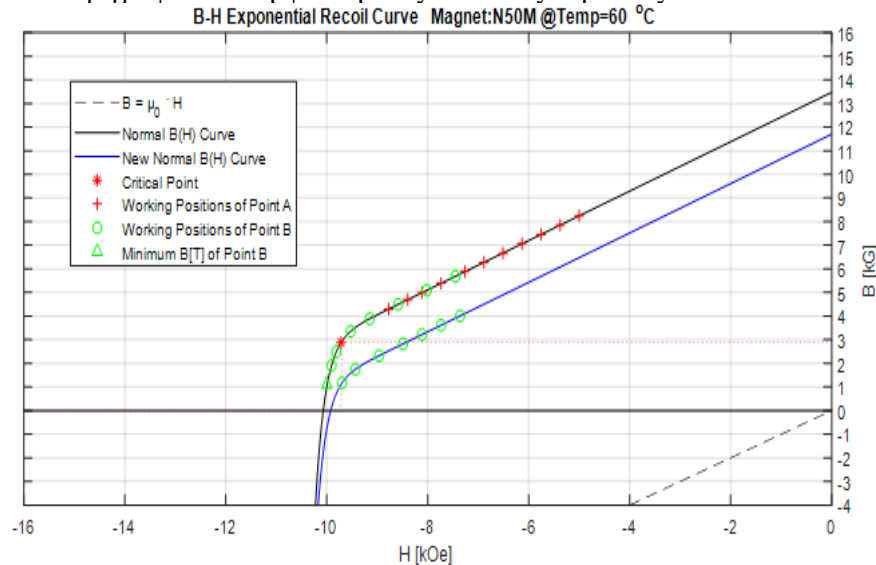


Σχ. 5.4 Η γραμμική μέθοδος επαφοράς σημείων στην καμπύλη B-H. Η παραπάνω καμπύλη είναι από τον μαγνήτη Νεοδυμίου N50M σε θερμοκρασίες 60°C. Το τυχαίο σημείο βρίσκεται εκτός της καμπύλης B-H ενώ μετακινώντας την γραμμή λειτουργίας B-H βρίσκεται και πάλι στην καμπύλη B-H. Με αυτή τη μέθοδο η λειτουργική του καμπύλη έχει μόνιμα αλλάζει.



Σχ. 5.5 Διάγραμμα ροής του γραμμικού μοντέλου υπολογισμού απομαγνήτισης.

Το εκθετικό μοντέλο διαφέρει σε σχέση με τα άλλα δύο, επειδή η συνάρτηση η οποία περιγράφει την συμπεριφορά της απομαγνήτισης είναι εκθετική. Το μοντέλο αυτό δεν μπορεί με ευκολία να ενταχθεί στο FEMM όμως μπορεί να γίνει αριθμητικός υπολογισμός μέσω άλλων προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (πχ. 'time-stepping analysis'). Η πολυπλοκότητα της μεθόδου την καθιστά την πιο αργή στην σύγκλιση και συνάμα την πιο ακριβείας επειδή τα αποτελέσματα υπολογίζονται εξ αρχής με βάση το εκθετικό μοντέλο που περιεγράφηκε παραπάνω, (3.8) μεταβάλλοντας σε κάθε σημείο την B_r ανάλογα με το πόσο βρέθηκε το εκάστοτε σημείο στον κορεσμό. Η ακρίβεια αυτή ωστόσο δεν διαφέρει πολύ από την ακρίβεια που προσδίδει το γραμμικό μοντέλο. Σε αυτή τη περίπτωση η μετατόπιση της εκθετικής καμπύλης γίνεται με βάση την θέση που βρέθηκε το κάθε σημείο στον κορεσμό όπως και στο γραμμικό μοντέλο. Τέλος, το εκθετικό μοντέλο έχει γραμμική συμπεριφορά μακριά από τον κορεσμό. Συνεπώς, τα οφέλη είναι σχεδόν ίδια με αυτά του γραμμικού μοντέλου. Γενικά, σ' αυτή τη μέθοδο τα σημεία δεν χρειάζονται επαναφορά στην καμπύλη B-H, αφού η επαναληπτική μέθοδος λειτουργεί με βάση την εκθετική καμπύλη. Παρακάτω δίνεται η συμπεριφορά δύο σημείων μαγνήτη πάνω στο επίπεδο B-H σε κατάσταση υψηλής φόρτισης και αποφόρτισης. Οι καμπύλες B-H των σημείων περιγράφονται σύμφωνα με τις εκθετικές καμπύλες.



Σχ. 5.6 Καμπύλες B-H εκθετικού μοντέλου που περιγράφουν την συμπεριφορά δύο σημείων του μαγνήτη όταν το εξωτερικό αντιπαράλληλο πεδίο μεγαλώνει και στην συνέχεια μικραίνει.

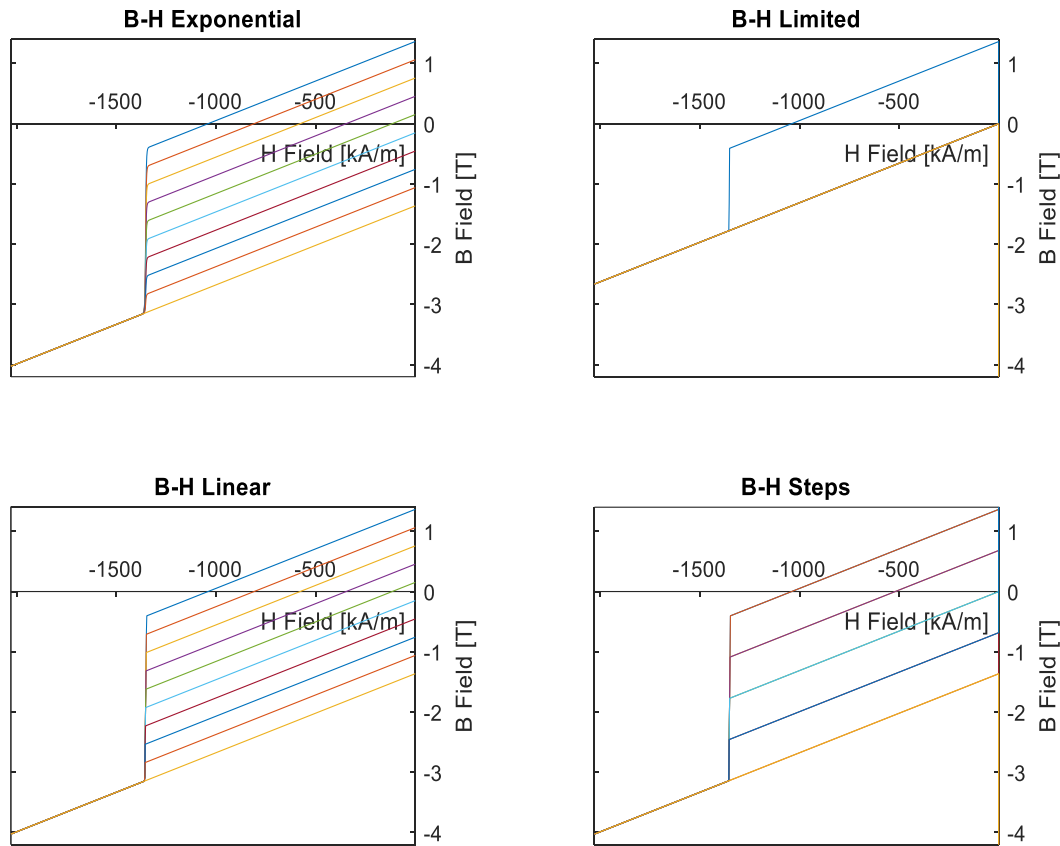
Τα παραπάνω μοντέλα συμπληρώνονται με άλλα μοντέλα υστέρησης με ή χωρίς εξάρτηση από προηγούμενες φορτίσεις. Μια συγκριτική ανάλυση των μεθόδων - μοντέλων απομαγνήτισης φαίνεται και στη δημοσίευση [6.13].

Το βηματικό μοντέλο αποτελεί μια ενδιάμεση λύση στο περιοριστικό και στο γραμμικό μοντέλο. Ουσιαστικά τοποθετεί την καμπύλη επαναμαγνήτισης σε προκαθορισμένες γραμμικές ευθείες. Ο αριθμός των καμπύλων αυτών μπορεί να είναι σχετικά μικρός με στόχο την μείωση του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου. Η ακρίβεια ωστόσο είναι περιορισμένη σε σύγκριση με το γραμμικό μοντέλο που ουσιαστικά επιτρέπει την δημιουργία ευθειών απομαγνήτισης χωρίς να εμπλέκει τον περιορισμό της διακριτής απόστασης μεταξύ τους, κάτι το οποίο συμβαίνει στο βηματικό μοντέλο.

Στην παραπάνω μοντελοποίηση αναφέρεται η περιοχή στην οποία οι μαγνήτες απομαγνητίζονται. Αντίστοιχα όμως φαινόμενα συμβαίνουν και στην προσπάθεια μαγνήτισης των υλικών. Για την επέκταση αυτή της μοντελοποίησης δυκλαδικές συνάρτησης μπορούν να δημιουργηθούν με βάση τη φιλοσοφία διατήρησης την περιττής συμμετρίας.

Τα παραπάνω μοντέλα συμπληρώνονται με άλλα μοντέλα υστέρησης με ή χωρίς εξάρτηση από προηγούμενες φορτίσεις. Μια συγκριτική ανάλυση των μεθόδων - μοντέλων απομαγνήτισης φαίνεται και στη δημοσίευση [6.3].

Στη συνέχεια δίνεται ένα συγκεντρωτικό σχήμα περιγραφής των καμπύλων επαναμαγνήτισης.



Σχ. 5.7 Καμπύλες B-H και καμπύλες επαναφοράς για τα διάφορα μοντέλα, στην περίπτωση του μαγνήτη ND50H σε θερμοκρασία 20°C.

Τα προτεινόμενα μοντέλα υπολογισμού απομαγνήτισης υποθέτουν πως το πεδίο απομαγνήτισης είναι μόνο η συνιστώσα του πεδίου που έχει διεύθυνση παράλληλη στον μαλακό άξονα μαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη. Σύμφωνα με αυτά, κατά τη διάρκεια φορμαλισμού των πεπερασμένων στοιχείων, είναι σχετικά απλό, να ενσωματωθεί το εκάστοτε μοντέλο στο συνολικό υπολογιστικό σχήμα.

5.2 Μοντελοποίηση Καμπυλών Επαναφοράς Μαγνήτισης

Στο υπό κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται συγκριτική μελέτη που αφορά τις καμπύλες επαναφοράς μερικής μαγνήτισης και των ποιοτικών αποτελεσμάτων που η εκάστοτε παράγει. Για τον λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί μεθοδολογία με στόχο την σύγκριση μεταξύ των μοντέλων εκτίμησης της απομαγνήτισης όσον αφορά τα αποτελέσματα, την πολυπλοκότητα και τις ανάγκες σε υπολογιστική ισχύ. Από τα πιο απλά μοντέλα στα πιο πολύπλοκα και πιο ακριβή. Σε αυτή την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι μαγνήτες τύπου ND50H με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά, όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1

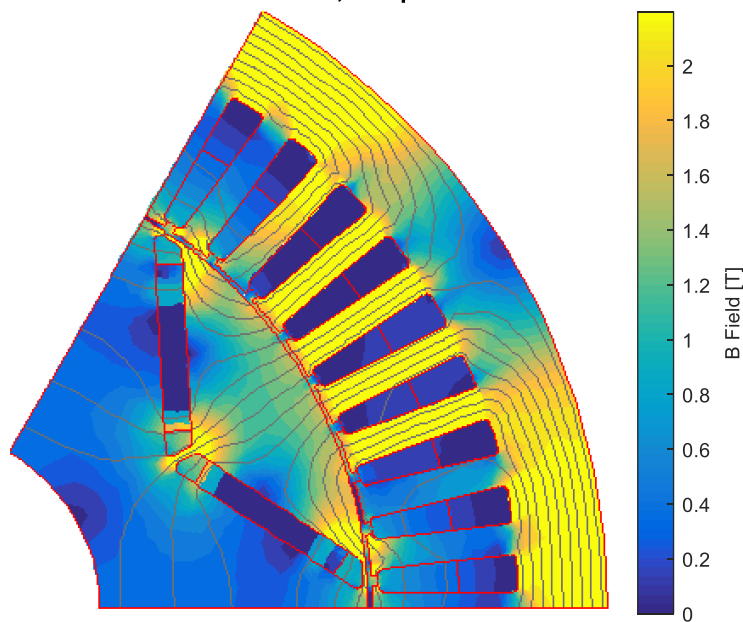
Μαγνητικές ιδιότητες ND50H

Characteristic (at 20° C)	Units	ND50H
Remanence B_r	T	1.40
Coercivity H_c	kA/m	995
Intrinsic Coercivity H_{ci}	kA/m	1353
Max. Energy BH_{max}	MGOe	50
Permeability μ_r	Free	1.045
Temp. Coef. of B_r	%/°C	-0.11
Temp. Coef. of H_{ci}	%/°C	-0.65
Max Working Temp.	°C	120

Πίν. 5.1 Μαγνητικές Ιδιότητες ND50H

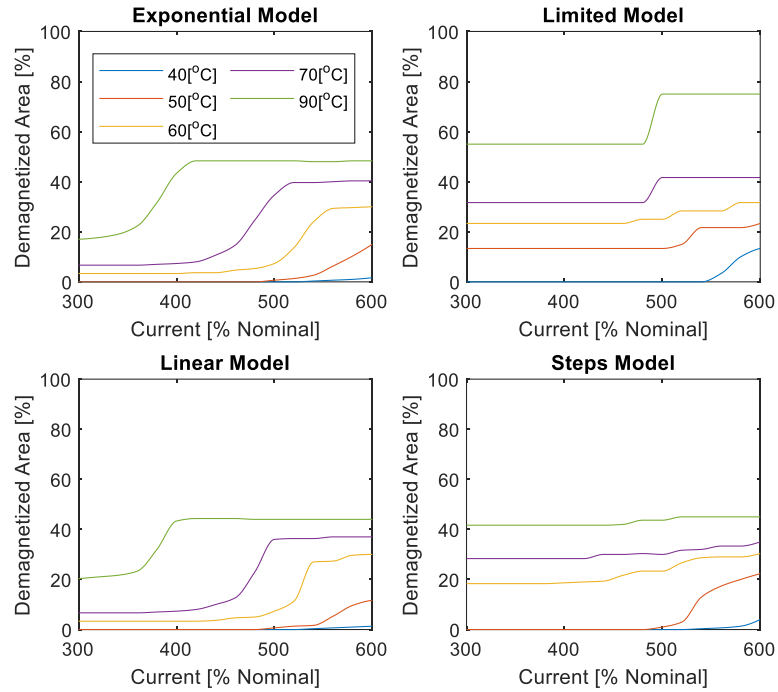
Οι προτεινόμενες τεχνικές παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στον υπολογιστικό χρόνο και παρέχουν διαφορετική ακρίβεια ανάλογα με την πολυπλοκότητα της εξεταζόμενης περίπτωσης. Στην παρούσα εργασία, προτείνεται μια συγκεκριμένη επαναληπτική μέθοδος στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, που επιτρέπει την υπολογιστική αποτελεσματικότητα σε συνδυασμό με την ακρίβεια υπολογισμού των φαινομένων απομαγνήτισης για όλες τις εξεταζόμενες συνθήκες, η οποία εφαρμόζεται στην περίπτωση μηχανής εσωτερικών μόνιμων μαγνητών V. Η γεωμετρία μηχανής που χρησιμοποιήθηκε για την συγκριτική μελέτη των μοντέλων απομαγνήτισης δίνεται στο παρακάτω σχήμα.

**Demagnetizing Field,
Current = 600%*Nominal, Temperature =60°C**



Σχ. 5.8 Κατανομή Μαγνητικού πεδίου μαζί με συνυπολογισμό της απομαγνήτισης για μηχανή εσωτερικών μόνιμων μαγνητών εικόνας V στη λειτουργική κατάσταση 60oC όταν η πυκνότητα ρεύματος του στάτη είναι 600% του ονομαστικού.

Η μέθοδος υπολογισμού της απομαγνήτισης είναι ιδιαίτερα εξαρτημένη από το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη συμπεριφορά της καμπύλης B-H. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το ποσοστό απομαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη που εκτιμάται από τα διάφορα μοντέλα που εφαρμόστηκαν στην περίπτωση της βαθμίδας μαγνήτη ND50H. Στο σχήμα 5.9 απεικονίζεται ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες τα απλούστερα μοντέλα για απομαγνήτιση μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική υπερεκτίμηση του ποσοστού απομαγνήτισης του μαγνήτη.



Σχ. 5.9 Καμπύλες B-H και καμπύλες επαναφοράς για τα διάφορα μοντέλα, στην περίπτωση του μαγνήτη ND50H σε θερμοκρασία 20oC.

Από την άποψη αυτή το περιορισμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει μια γρήγορη, προκαταρκτική εκτίμηση της συμπεριφοράς στην απομαγνήτιση, επειδή συνήθως υπερεκτιμά την απομαγνητισμένη περιοχή που εμφανίζεται σε συνθήκες υψηλότερης θερμοκρασίας και ρεύματος. Στην περίπτωση που εκτιμάται μηδενικό ρίσκο απομαγνήτισης, δεν απαιτείται περαιτέρω ανάλυση.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του βιωματικού μοντέλου είναι ο σχετικά σύντομος χρόνος υπολογισμού και η αποφυγή της δυαδικής παραδοχής απομαγνήτισης, παρέχοντας ενδιάμεσες τιμές μαγνήτισης - διακριτές ωστόσο - καταστάσεις στην απομαγνητισμένη περιοχή.

Τα γραμμικά και εκθετικά μοντέλα έχουν έναν πιο ακριβή τρόπο να προβλέψουν τη συμπεριφορά του μαγνήτη υπό διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και συνεπώς να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της απομαγνήτισης. Αυτά τα μοντέλα έχουν αυξημένες ανάγκες σε υπολογιστικά μέσα, καθώς και στη σύγκλιση του αλγορίθμου η οποία μπορεί να απαιτήσει σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης.

Model	Exponential	Limited	Linear	Steps
Duration (p.u.)	1	0.4	1.02	0.6

Πίν. 5.2 Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμων απομαγνήτισης

5.3 Εφαρμογή Αλγορίθμων Απομαγνήτισης σε Ηλεκτρική Μηχανή

Ο υπολογισμός των φαινομένων απομαγνήτισης σύμφωνα με τον αλγόριθμο του περιορισμένου μοντέλου πραγματοποιείται εύκολα και γρήγορα όταν αναλύεται μόνο η θεμελιώδης συχνότητα του ρεύματος, η οποία είναι πρακτικά χαμηλή. Στην περίπτωση αυτή οι διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες περιγράφονται με βάση τη γωνία των ρευμάτων ως προς το πλαίσιο dq και το πλάτος του ρεύματος. Κάθε τέτοια κατάσταση λειτουργίας περιλαμβάνει επίσης μια πλήρη περιστροφή του δρομέα και των ρευμάτων του στάτη δηλαδή μία σύγχρονη περιστροφή.

Ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόζεται αντί της κοινής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με στόχο να λαμβάνει επίσης υπόψιν και τον κορεσμό σε σκληρά μαγνητικά υλικά. Σε κάθε κατάσταση λειτουργίας, το ποσοστό της απομαγνητισμένης περιοχής προς ολόκληρη την επιφάνεια του μαγνήτη υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέση απομαγνητισμένη επιφάνεια κατά τη διάρκεια της σύγχρονης περιστροφής του δρομέα.

Ο ίδιος αλγόριθμος δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα σε χαμηλό πλάτος ρεύματος, ενώ επιτρέπει την εκτίμηση των ορίων σχεδιασμού του κινητήρα όσον αφορά την ανθεκτικότητα στην απομαγνήτιση.

Περαιτέρω μοντελοποίηση των φαινομένων απομαγνήτισης στους κινητήρες αποτελεί ένα πολύπλοκο ζήτημα. Προκειμένου να ενισχυθεί η ακρίβεια στην απομαγνήτιση, απαιτούνται πιο λεπτομερή μοντέλα υπολογισμού, τα οποία μπορούν επίσης να λάβουν υπόψη την αρμονική φόρτιση που μπορεί να υπάρχει στους μαγνήτες.

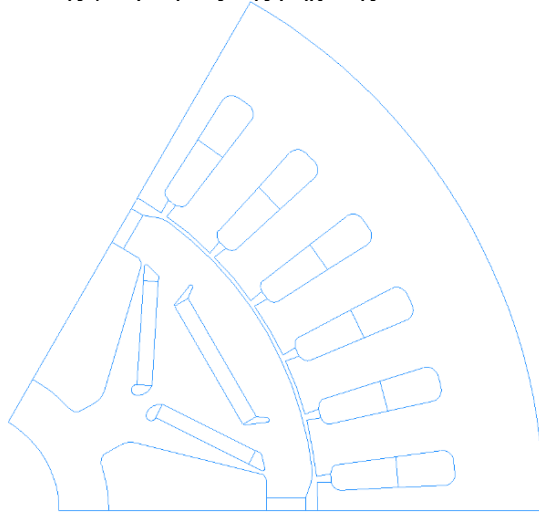
5.4 Πρακτική Εφαρμογή Αλγορίθμων Απομαγνήτισης

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

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

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

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



Σχ. 5.10 Εικόνα της γεωμετρίας ενός πόλου της μηχανής που χρησιμοποιείται για την ανάλυση διάφορων ειδών μαγνητών.

5.5 Επιλογή υλικών

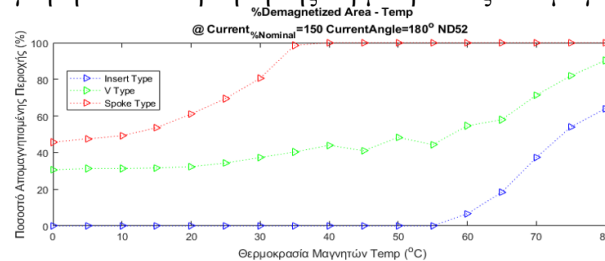
5.5.1 Μηχανή με Μαγνήτες ND52

Η πρώτη μηχανή που αναλύεται είναι η μηχανή η οποία έχει μόνο μαγνήτες τύπου ND52.

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

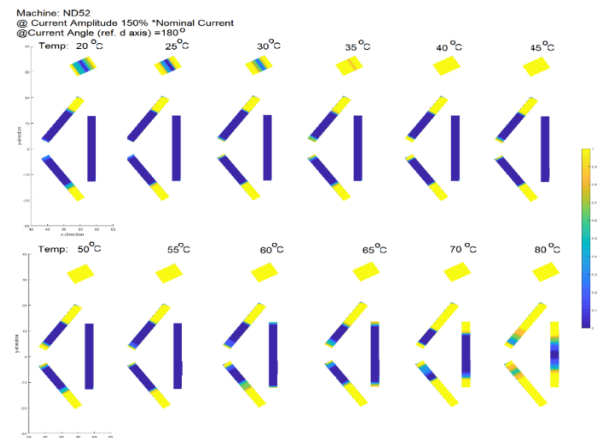
5.5.1.1 Συμπεριφορά στην απομαγνήτιση με ρεύμα 1,5 φορά το ονομαστικό

Η μηχανή αυτή, παρουσιάζει, σύμφωνα με το περιοριστικό μοντέλο απομαγνήτισης, μεγάλη ευαισθησία ως προς τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου απομαγνήτισης έδειξαν πως ακόμα και για τη δοκιμή που εφαρμόζεται ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό με γωνία 180°, με αναφορά τον άξονα d, η συμπεριφορά της μηχανής δεν είναι επαρκής στο να μην απομαγνητιστεί. Στη συνέχεια παρατίθεται η γραφική παράσταση της απομαγνήτισμένης περιοχής ως ποσοστό της ολικής περιοχής του μαγνήτη σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας των μαγνητών.



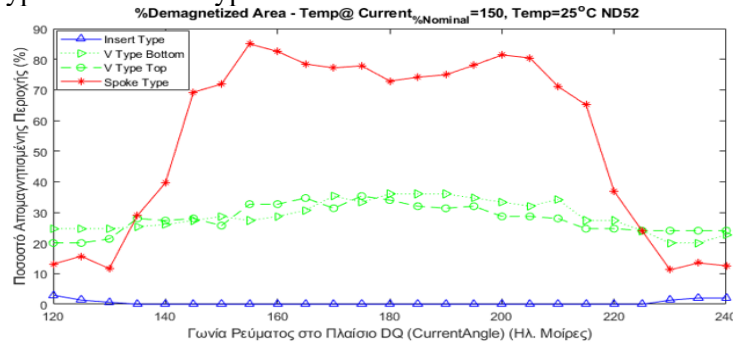
Σχ. 5.11 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

Επιπρόσθετα, παρέχεται και η απεικόνιση της θέσης που καταλαμβάνει η απομαγνήτιση. Για να γίνει αυτό κατά τη σύγχρονη περιστροφή επιλέγεται να αποθηκεύεται η θέση των σημείων που απομαγνητίστηκαν. Μετα την σύγχρονη περιστροφή μπορεί να εξάχθει η πιθανότητα του κάθε σημείου να απομαγνητιστεί. Αυτό γίνεται με τη διαιρέση των φορών που υπέστη το κάθε σημείο απομαγνήτιση προς τα συνολικά βήματα της σύγχρονης περιστροφής. Μια πιο αναλυτική εικόνα που δείχνει και τη θέση των σημείων που απομαγνητίζονται δίνεται παρακάτω σαν εξελικτικό διάγραμμα.



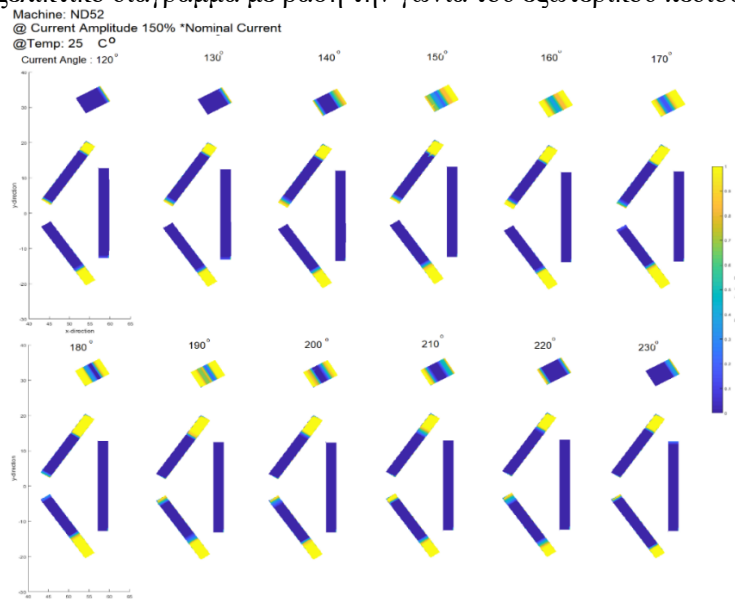
Σχ. 5.12 Πιθανότητα απομαγνήτισης εκάστοτε σημείου μαγνήτη και η εξέλιξη με βάση τη Θερμοκρασία για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή τύπου ND52.

Η απομαγνήτιση ωστόσο εξαρτάται άμεσα και από τη γωνία του ρεύματος. Πιο κάτω γίνεται μια προσπάθεια απεικόνισης αυτής της εξάρτησης για μία σταθερή θερμοκρασία ενώ το ρεύμα διατηρείται στην τιμή που είχε πρότερα (1.5 φορές το ονομαστικό). Στην γραφική παράσταση εξαιτίας της μη ύπαρξης συμμετρίας των πεδίων η απομαγνήτιση μελετάται ξεχωριστά και για τον κάθε μαγνήτη. Οι μαγνήτες στην παρούσα γεωμετρία είναι τέσσερις ανά πόλο: οι δύο μαγνήτες V Type , ο Spoke Type και ο Insert Type.



Σχ. 5.13 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 20oC, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

Μια πιο αναλυτική εικόνα που δείχνει και τη θέση των σημείων που απομαγνητίζονται δίνεται παρακάτω σαν εξελικτικό διάγραμμα με βάση την γωνία του εξωτερικού πεδίου.

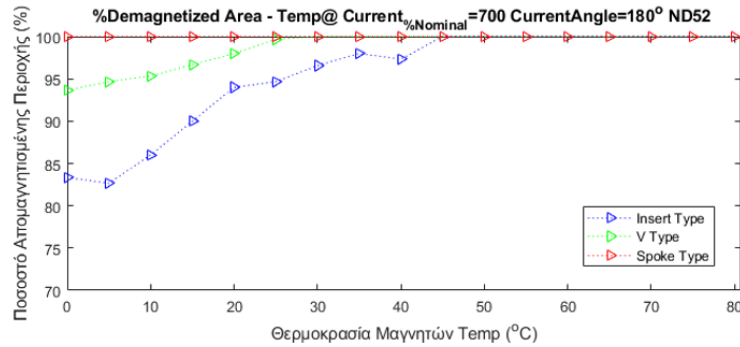


Σχ. 5.14 Πιθανότητα απομαγνήτισης εκάστοτε σημείου μαγνήτη και η εξέλιξη με βάση τη γωνία ρεύματος για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε θερμοκρασία 25oC , για την μηχανή τύπου ND52.

5.5.1.2 Συμπεριφορά στην απομαγνήτιση με ρεύμα 7-πλάσιο του ονομαστικού

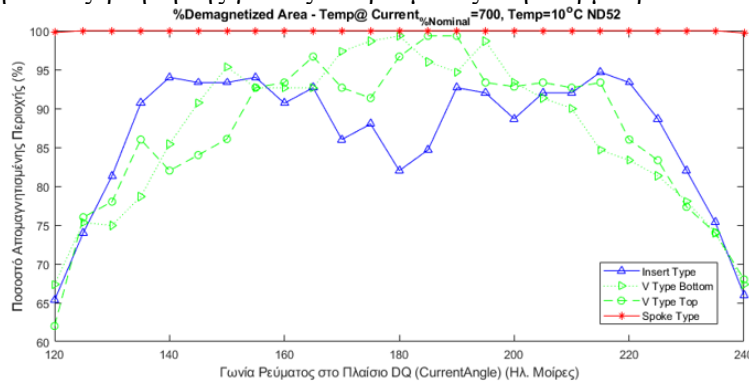
Στην μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52 παρατηρείται μια έντονη ευαισθησία στην απομαγνήτιση ακόμη και όταν το ρεύμα του στάτη είναι αρκετά μικρό. Συνεπώς, η επίπτωση της αύξησης του ρεύματος αναμένεται να ελαττώνει την αντοχή της μηχανής. Αυτό μπορεί να γίνει εμφανές κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης της απομαγνήτισης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

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



Σχ. 5.15 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

Η απομαγνήτωση σαν εξάρτηση της γωνίας του ρεύματος στην θερμοκρασία των 10°C δίνεται:



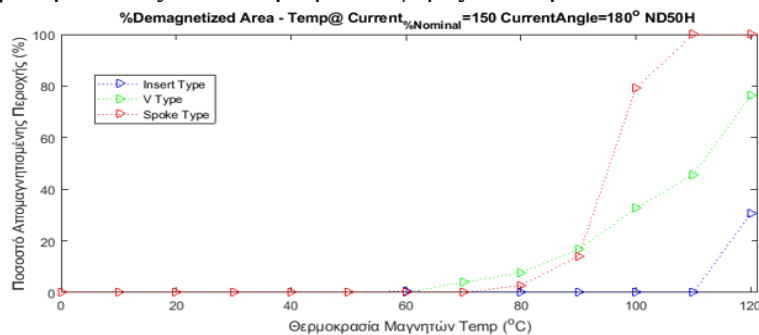
Σχ. 5.16 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10oC, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

5.5.2 Μηχανή με Μαγνήτες ND50H

Στην μηχανή τοποθετήθηκαν στη συνέχεια μαγνήτες τύπου ND50H. Οι μαγνήτες αυτού του τύπου, έχουν μεγαλύτερη τιμή j_{Hc} και συνεπώς απομαγνητίζονται πιο δύσκολα σε σχέση με τους μαγνήτες τύπου ND52. Η επίδοση της μηχανής στην ροπή για να παραμείνει ίδια, το μήκος την μηχανής οφείλει να αυξηθεί, εφόσον η τιμή B_r των μαγνητών μειώνεται.

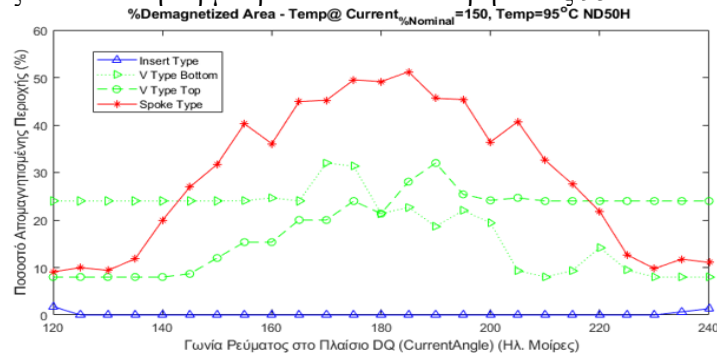
5.5.2.1 Συμπεριφορά στην απομαγνήτωση με ρεύμα 1.5 φορά το ονομαστικό

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



Σχ. 5.17 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

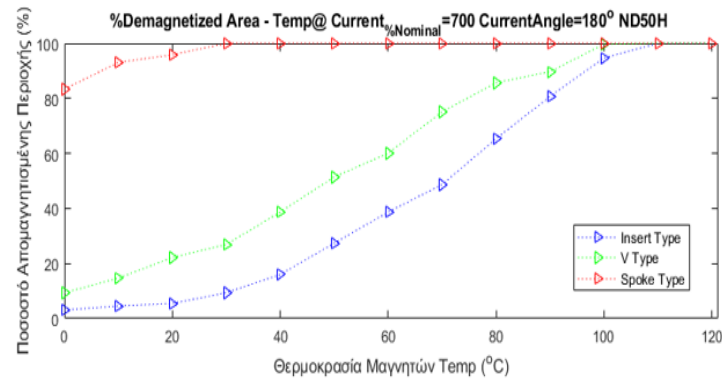
Σε αυτή τη τιμή του ρεύματος δίνεται και η εξάρτηση της απομαγνήτισης από τη γωνία του ρεύματος με τον άξονα δόταν η θερμοκρασία είναι σταθερή στους 95°C.



Σχ. 5.18 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 200C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

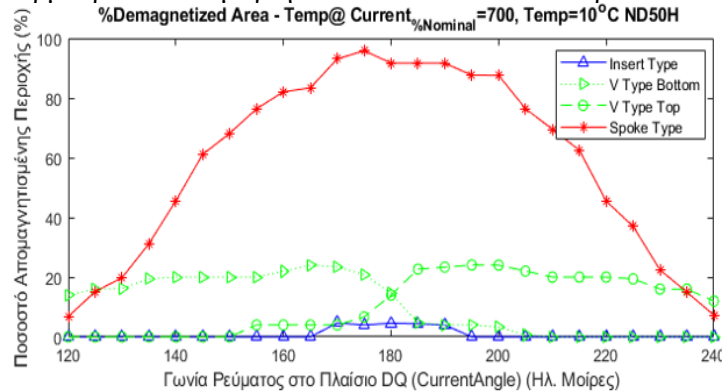
5.5.2.2 Συμπεριφορά στην απομαγνήτιση με ρεύμα 7-πλάσιο του ονομαστικού

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



Σχ. 5.19 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

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



Σχ. 5.20 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

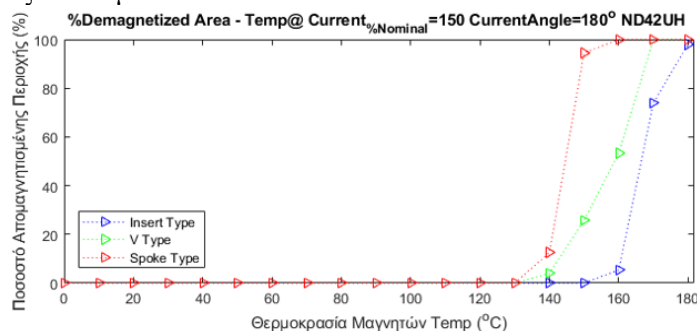
5.5.3 Μηχανή με Μαγνήτες ND42UH

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

5.5.3.1 Συμπεριφορά στην απομαγνήτιση με ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό

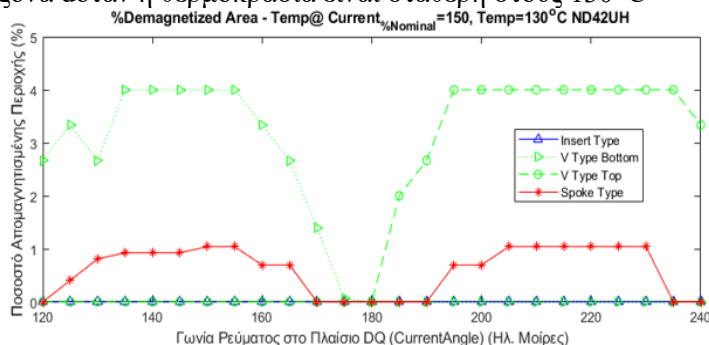
Όσον αφορά τη συμπεριφορά στην απομαγνήτιση αυτής της μηχανής με μαγνήτες ND42UH, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα, είναι πολύ πιο ανθεκτική σε σχέση με τις προηγούμενες δύο μηχανές. Αυτό είναι εμφανές καθώς παρουσιάζει έντονη αντίσταση στην απομαγνήτιση, δηλαδή σχεδόν μηδενική απομαγνήτιση,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

Πιο κάτω φαίνεται ένα διάγραμμα με το ποσοστό της απομαγνητισμένης περιοχής ως συνάρτηση της θερμοκρασίας όταν τα ρεύματα του στάτη έχουν γωνία 180° μοιρών με τον άξονα d και μέτρο 1.5 φορές το ονομαστικό.



Σχ. 5.21 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοιρές με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND42UH.

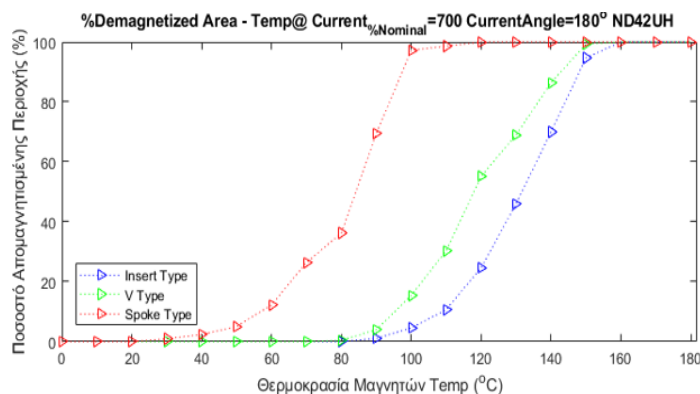
Σε αυτή τη τιμή του ρεύματος δίνεται και η εξάρτηση της απομαγνήτισης από τη γωνία του ρεύματος με τον άξονα d όταν η θερμοκρασία είναι σταθερή στους 130°C



Σχ. 5.22 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 130°C , για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

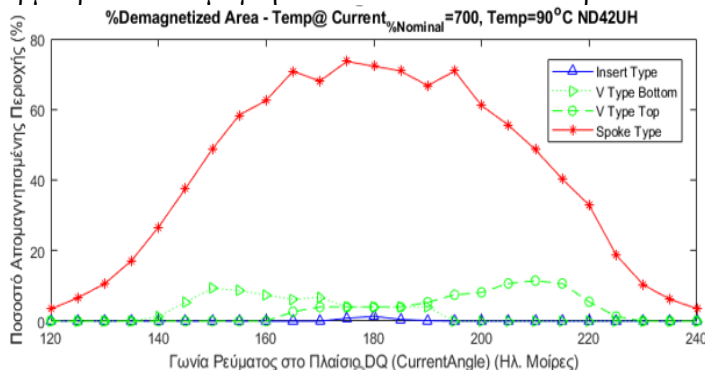
5.5.3.2 Συμπεριφορά στην απομαγνήτιση με ρεύμα 7-πλάσιο του ονομαστικού

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



Σχ. 5.23 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία, για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

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



Σχ. 5.24 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H

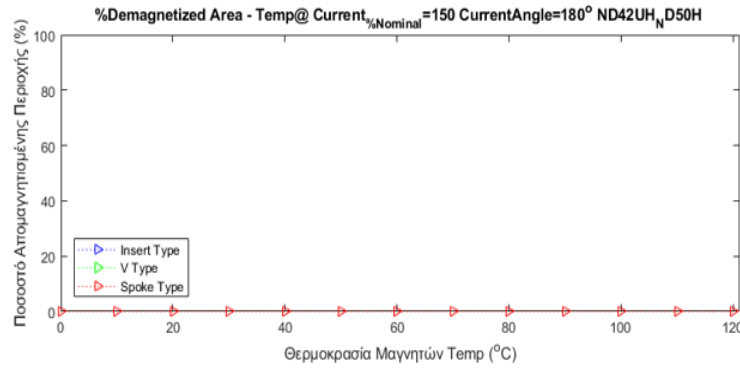
5.5.4 Μηχανή με Συνδυασμό Μαγνητών: ND42UH (S&V-TYPE), ND50H (I-TYPE)

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

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

5.5.4.1 Συμπεριφορά στην απομαγνήτιση με ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό

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

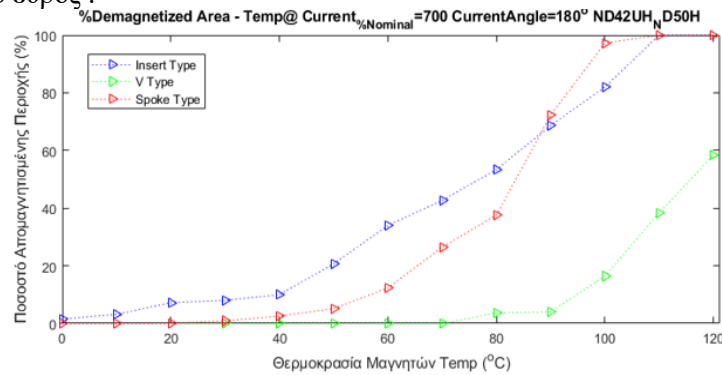


Σχ. 5.25 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND42UH & ND50H.

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

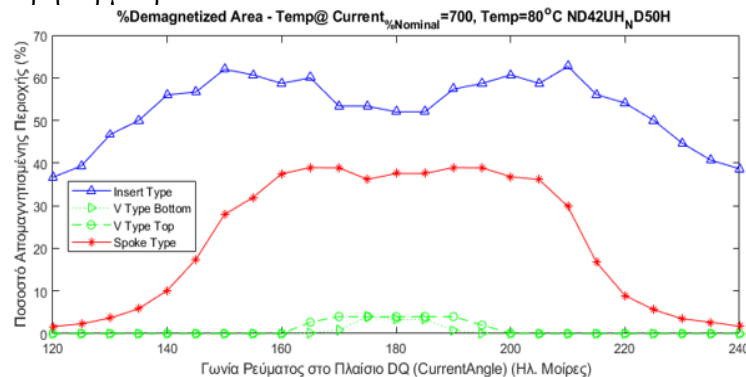
5.5.4.2 Συμπεριφορά στην απομαγνήτιση με ρεύμα 7-πλάσιο του ονομαστικού

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



Σχ. 5.26 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H & ND42UH.

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



Σχ. 5.27 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

Η μηχανή αυτή, δίνει συνδυασμένα χαρακτηριστικά των μηχανών που χρησιμοποιούν εξ ολοκλήρου μαγνήτες τύπου ND50H και ND42UH. Το μήκος της μηχανής συνδυασμού μαγνητών που απαιτείται για την παραγωγή ροπής 35Nm είναι σχεδόν ίδιο με αυτό της μηχανής ND42UH όπως και η συμπεριφορά της μηχανής στην απομαγνήτιση. Βελτίωση αποτελεί η ομοιομορφία που παρουσιάζει στην απομαγνήτιση στους μαγνήτες της. Αυτό σημαίνει πώς όλοι οι μαγνήτες απομαγνητίζονται στο ίδιο ποσοστό ασχέτως της θερμοκρασίας που επικρατεί. Στην συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια βελτίωσης αυτής της ομοιομορφίας ακόμη περισσότερο και συνάμα την αύξηση της απαιτούμενης θερμοκρασίας για την μέγιστη απομαγνήτιση των μαγνητών της μηχανής στο 10% όταν το ρεύμα είναι 7 φορές το ονομαστικό και η γωνία του με τον άξονα d είναι 180° μοίρες.

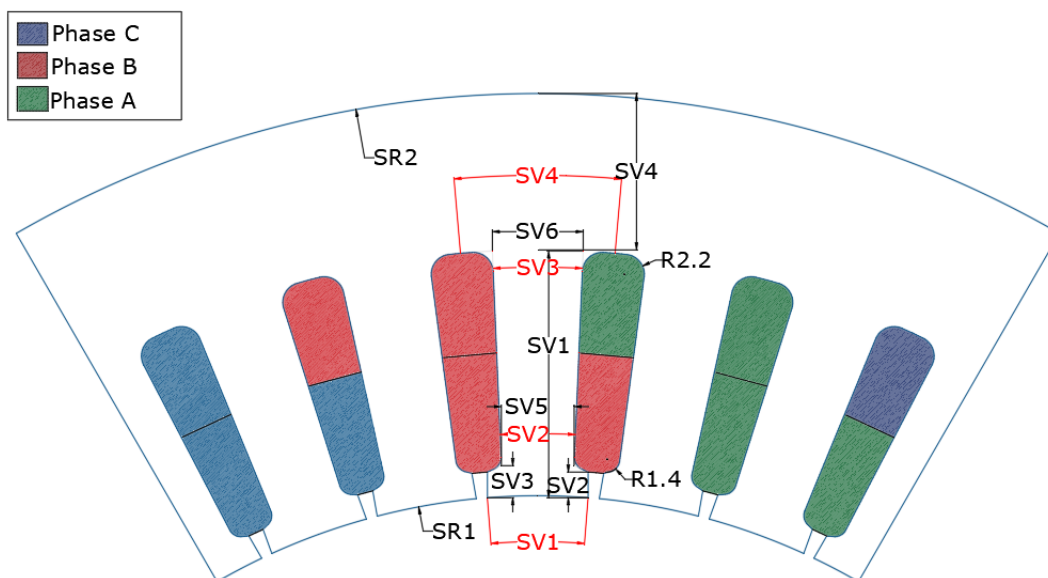
5.6 Βελτιστοποίηση Τοπολογίας Δρομέα

Η μελετώμενη γεωμετρία παραμετροποιείται σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα και τις ακόλουθες εικόνες περιγραφής γεωμετρίας. Η παραμετροποίηση πραγματοποιείται με βάση τις απόλυτες τιμές. Για τη διατήρηση του εικόνας και την περαιτέρω μελέτη της ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών, έχουν ενδιαφέρον οι σχετικές τιμές των εν λόγω χαρακτηριστικών.

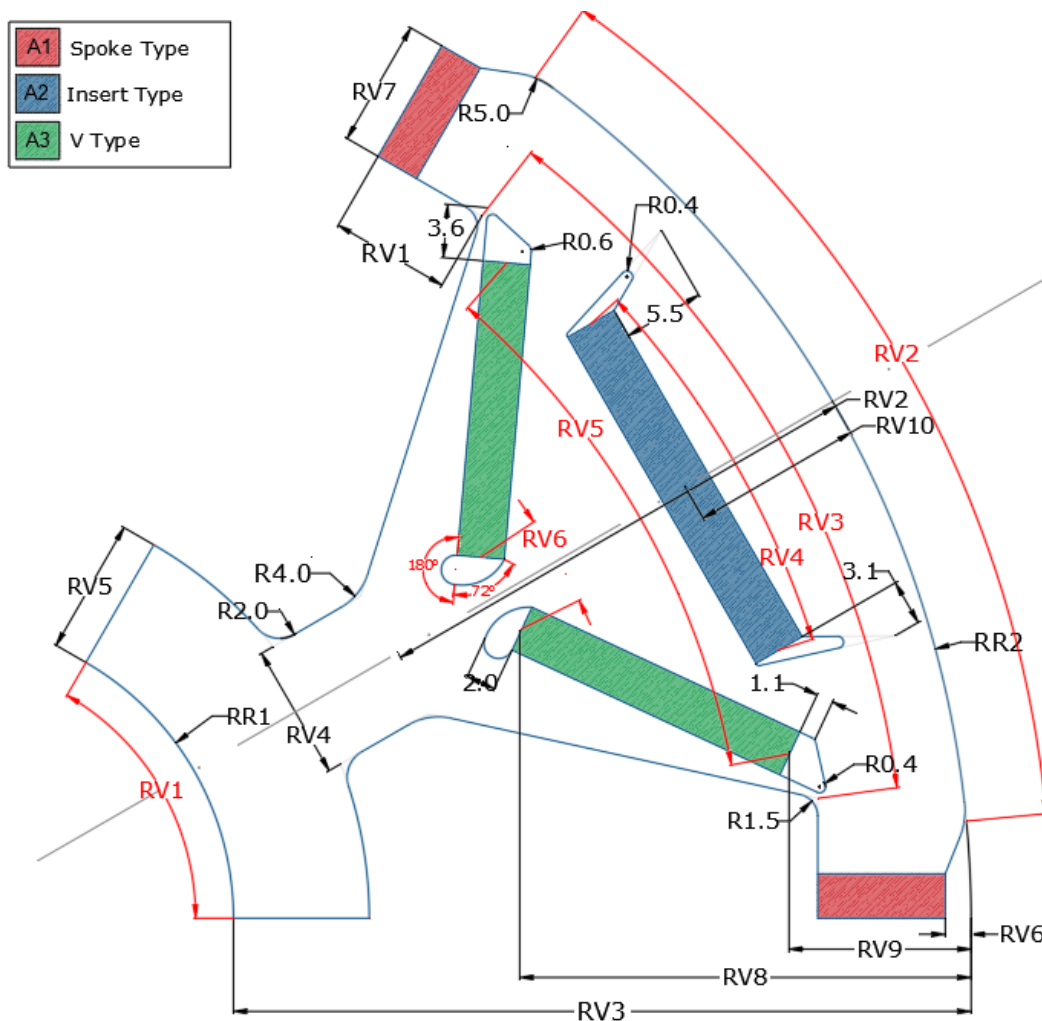
Πιο συγκεκριμένα, οι αναλογίες Spoke πλάτους καναλιού προς το μήκος του ενεργού πόλου (RV7/RV2) και του ζυγού ακτίνας προς το μήκος του καναλιού του ζυγού (RV3/RV1) μελετώνται, δεδομένου ότι η μεταβολή τους επηρεάζει άμεσα την κατανομή της ροής μεταξύ των μαγνήτη τύπου Spoke και του μαγνήτη τύπου Delta.

Name	Type	Variable Name	Opt. Value	Units
RV1	Angle	Polar Angle	60,00	deg
RV2	Angle	Saliency Angle	47,70	deg
RV3	Angle	Active Angle	45,00	deg
RV4	Angle	Insert Type PM	25,00	deg
RV5	Angle	V Type PM Top	38,00	deg
RV6	Angle	V Type PM Bottom	7,00	deg
RV1	Length	Spoke Channel Length	8,10	mm
RV2	Length	Active Pole Length	34,00	mm
RV3	Length	Rotor Yoke Radius	50,00	mm
RV4	Length	Channel Width	9,17	mm
RV5	Length	Inner Yoke Radius	9,20	mm
RV6	Length	Saliency Depth	1,75	mm
RV7	Length	Spoke Channel Width	8,64	mm
RV8	Length	V Type PM Bottom Depth	30,60	mm
RV9	Length	V Type PM Top Depth	12,34	mm
RV10	Length	Insert Type PM Depth	11,56	mm
RR1	Length	Rotor Inner Radius	20,00	mm
RR2	Length	Rotor Outer Radius	70,00	mm
A1	Area	Spoke Type Magnet Area	52,00	mm ²
A2	Area	Insert Type Magnet Area	92,00	mm ²
A3	Area	V Type Magnet Area	128,00	mm ²
SV1	Length	Tooth Length	27,17	mm
SV2	Length	Parallel Tip Length	2,83	mm
SV3	Length	Total Tip Length	3,53	mm
SV4	Length	Stator Yoke Length	17,22	mm
SV5	Length	Tooth Inner Opening	8,02	mm
SV6	Length	Tooth Outer Opening	10,01	mm
SR1	Length	Rotor Inner Radius	70,70	mm
SR2	Length	Rotor Outer Radius	115,00	mm
SV1	Angle	Tooth Tip Angle	9,00	deg
SV2	Angle	Tooth Inner Angle	5,00	deg
SV3	Angle	Tooth Outer Angle	5,00	deg
SV4	Angle	Slot Angle	10,00	deg

Πίν. 5.3 Πίνακας Γεωμετρικών Παραμέτρων σχεδίασης Ηλ. Κινητήρα



Σχ. 5.28 Σχεδιασμός παραμετρικής γεωμετρίας Στάτη (διαστάσεις σε mm).



Σχ. 5.29 Σχεδιασμός παραμετρικής γεωμετρίας Δρομέα (διαστάσεις σε mm).

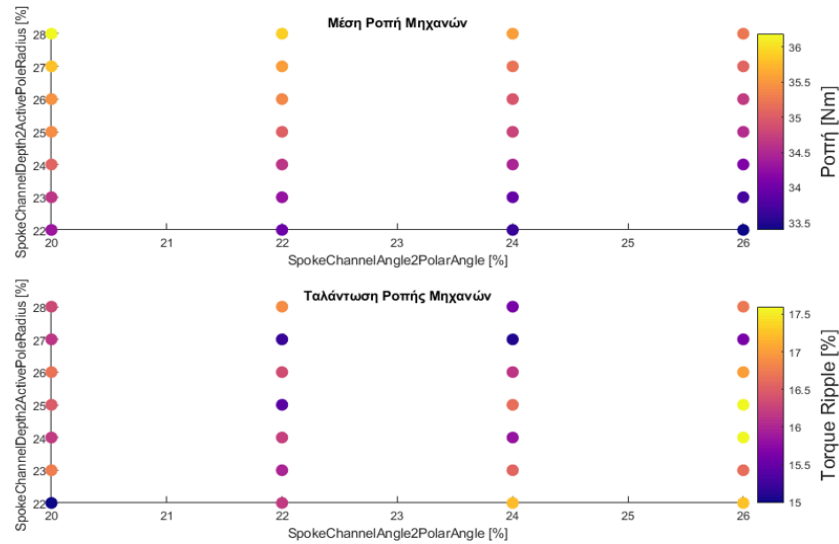
Η ανάλυση ευαισθησίας στις γεωμετρικές παραμέτρους του δρομέα πραγματοποιήθηκε με βάση τον παρακάτω πίνακα.

Spoke Channel Width 2 Active Pole Length (%)	22	23	24	25	26	27	28
Spoke Channel Length 2 Yoke Radius (%)	20	22	24	26			

Πίν. 5.4 Τιμές παραμέτρων ανάλυσης ευαισθησίας γεωμετρικών μεγεθών

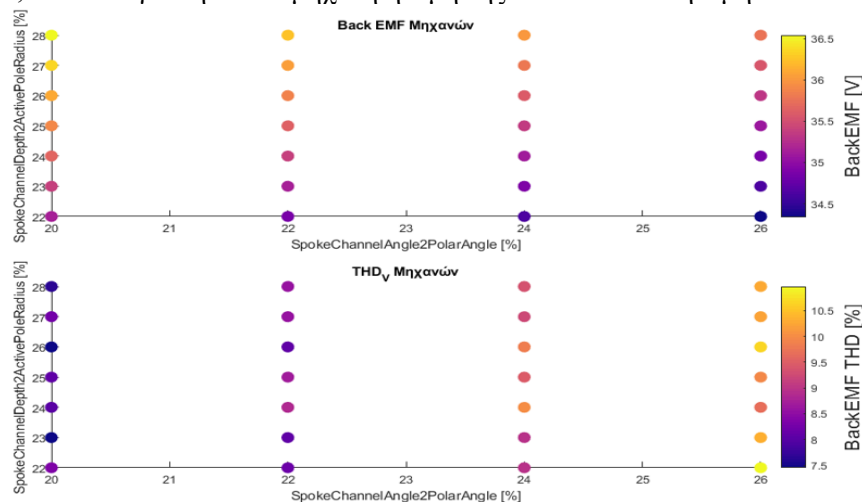
5.6.1 Επιδόσεις και Χαρακτηριστικά Λειτουργίας

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



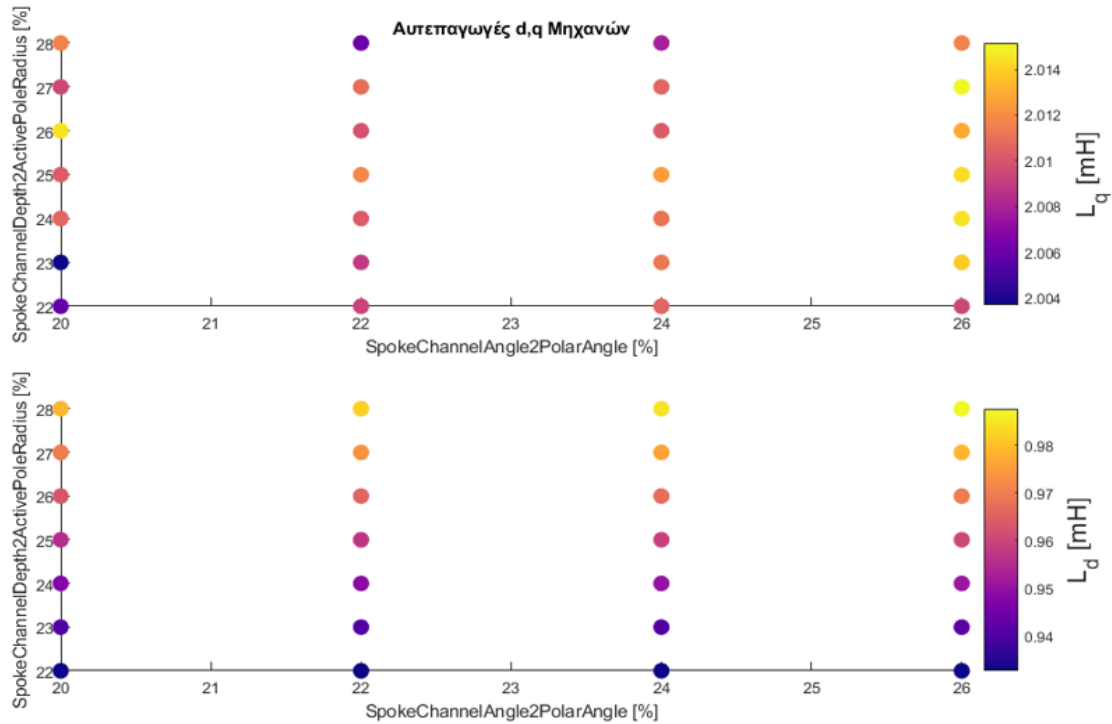
Σχ. 5.30 Ροπή και ταλάντωση ροπής των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθείσες μεταβλητές.

Στη συνέχεια, δίνονται για την κάθε μηχανή η τιμή της BackEMF και η τιμή του THDV:



Σχ. 5.31 Back EMF και η τιμή του THDV των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθείσες μεταβλητές.

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

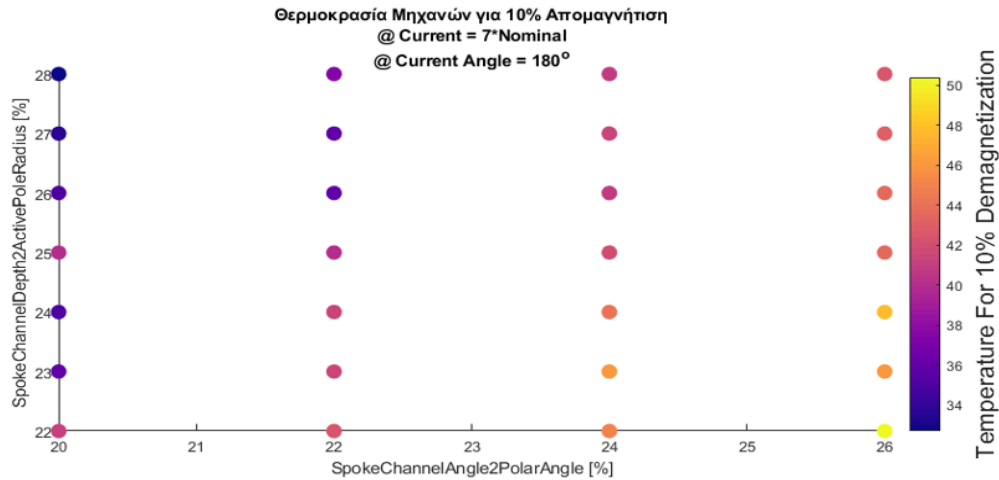


Σχ. 5.32 Οι τιμές των αυτεπαγωγών των αξόνων d,q των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθήσες μεταβλητές.

Παρατηρούμε πως κυρίως η ροπή μεταβάλλεται, από τη διαφοροποίηση αυτών των γεωμετρικών μεταβλητών. Ορισμένες μηχανές έχουν ροπή πάνω από 35.5Nm ενώ άλλες είναι κάτω από 34Nm. Ακόμη αλλάζει και το ποσοστό της ταλάντωσης ροπής. Η τιμή των αυτεπαγωγών ωστόσο δεν τροποποιείται πολύ, όπως και η τιμή της Αντι-HEΔ (Back EMF). Η βελτιστοποίηση ως προς τις επιδόσεις αποτελεί ένα αρκετά ενδιαφέρον αντικείμενο το οποίο χρησιμοποιεί και ερευνητικά αντικείμενα άλλων κλάδων όπως εξελικτικοί αλγόριθμοι ,αλγόριθμοι εύρεσης αρχικού πεδίου ορισμού (gridsearch) κλπ. Η επεξεργαστική ισχύς απαιτείται να είναι αρκετά μεγάλη και η παραλληλοποίηση εκτέλεσης κώδικα είναι αναγκαία.

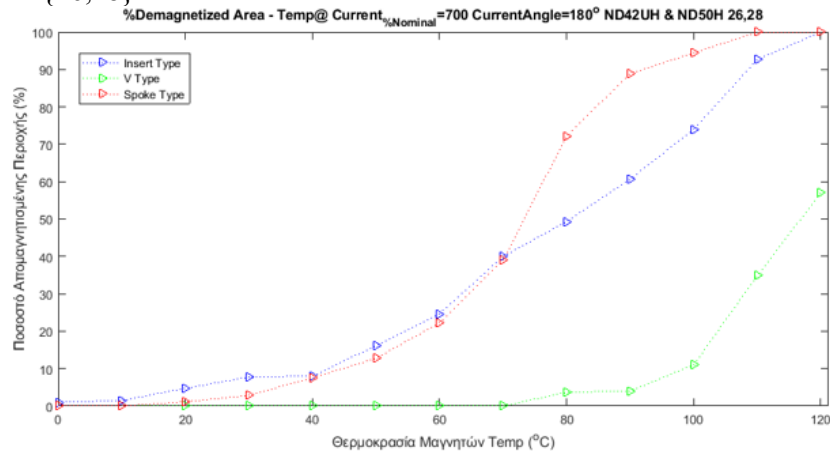
5.6.2 Εκτίμηση της Απομαγνήτισης

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



Σχ. 5.33 Διάγραμμα της θερμοκρασίας που οδηγεί σε 10% μέγιστη απομαγνήτιση των μαγνητών της κάθε μηχανής που εξετάστηκε με βάση την τροποποίηση των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας.

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



Σχ. 5.34 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H&ND42UH {26,28}

5.7 Βελτιστοποίηση Μείωσης Όγκου Μαγνητικού Υλικού

Η προηγούμενη μηχανή που επιλέχθηκε ({Spoke_Channel_Angle_2_Polar_Angle, Spoke_Channel_Depth_2_Active_Pole-Radius} = {26%, 28%}) διερευνάται ως προς την εξάρτηση των επιδόσεων και της συμπεριφορά της στην απομαγνήτιση από το πάχος του εκάστοτε μαγνήτη. Όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι σταθερές και δίνονται στον πίνακα γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Οι μεταβλητές, που μεταβάλλουμε, είναι τρεις και για αυτό τα διαγράμματα δίνονται σε τρισδιάστατη μορφή.

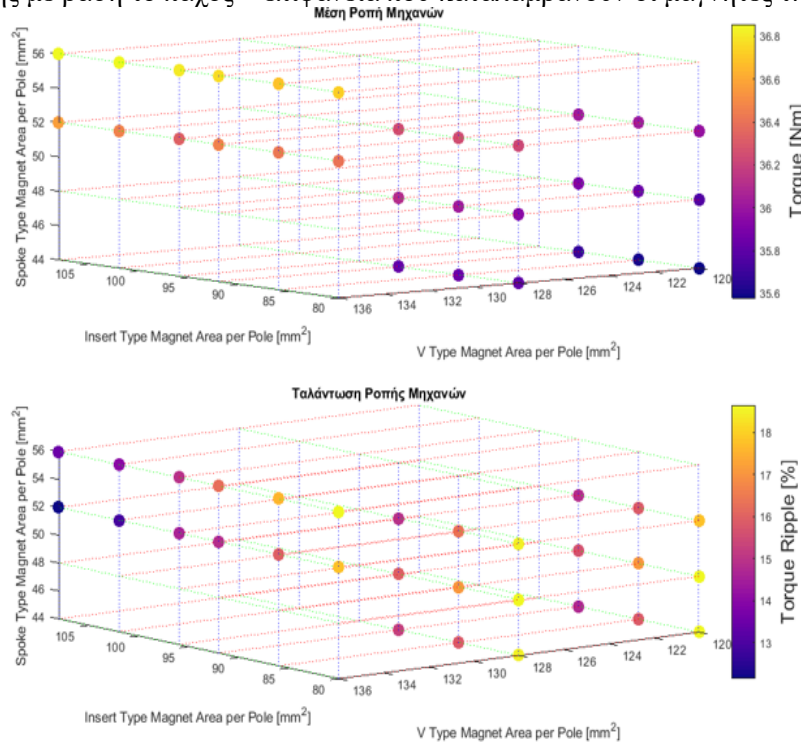
Οι τιμές των μεταβλητών δίνονται σε πίνακα:

Area (mm ²)	Pack 1 (Tot. 18)				Pack 2 (Tot. 12)			
Spoke Type	44	48	52		52		56	
Insert Type	80	86	92	80	86	92	96	102 108
V Type		120	128			136		

Πίν. 5.5 Παράμετροι βελτιστοποίησης όγκου μαγνητικού υλικού.

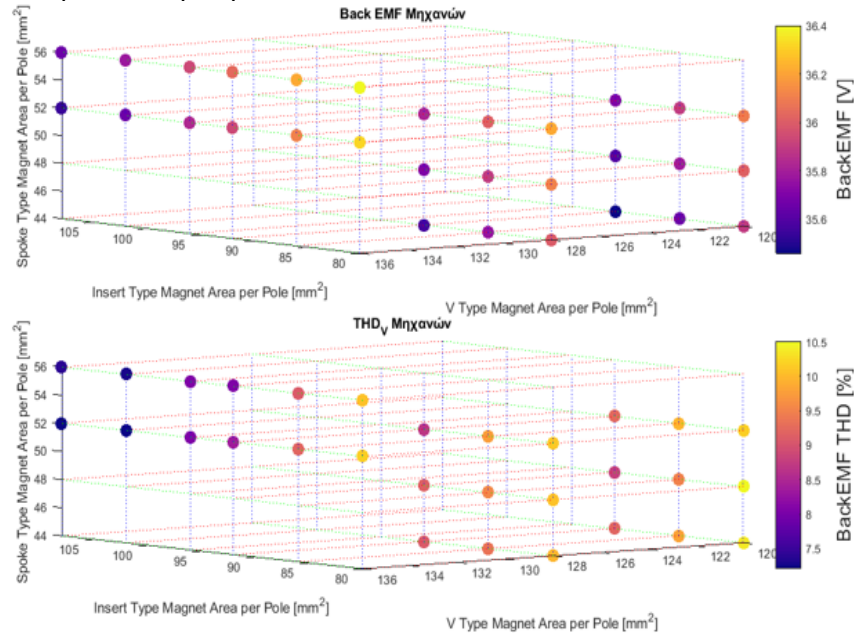
5.7.1 Επιδόσεις και Χαρακτηριστικά Λειτουργίας

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



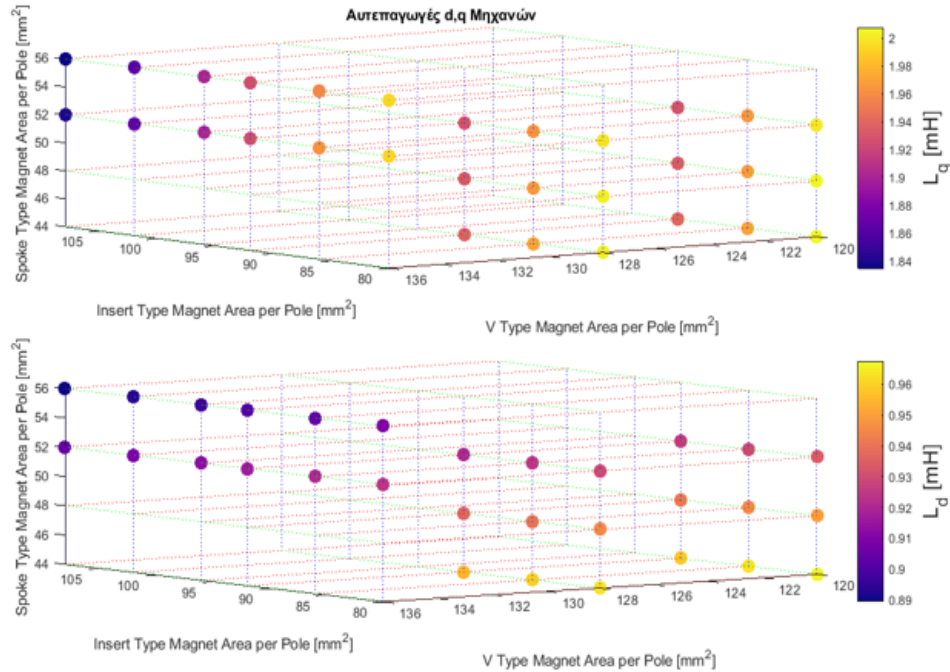
Σχ. 5.35 Ροπή και ταλάντωση ροπής των 30 μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο

Ακολουθεί η επίπτωση στην BackEMF και στο THD_v:



Σχ. 5.36 Αντι ΗΕΔ (back EMF) και τιμή συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD) των 30 τοπολογιών μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο

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

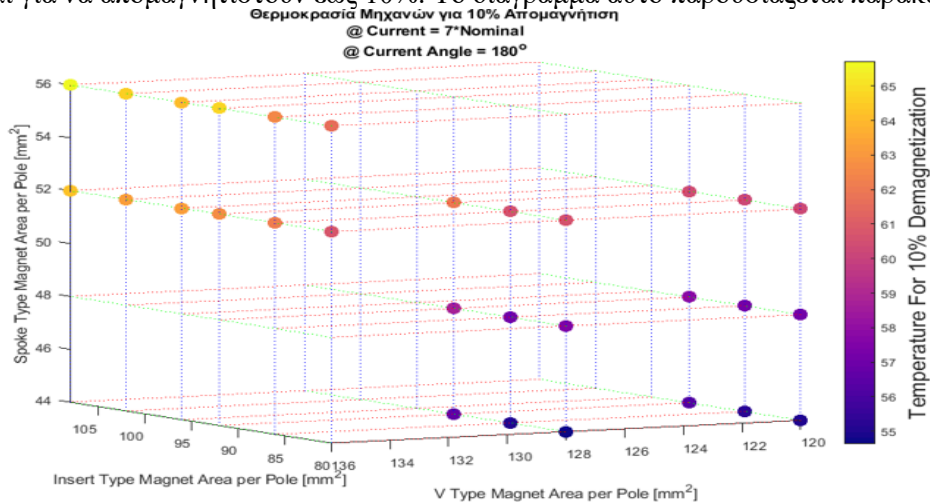


Σχ. 5.37 Οι τιμές των αυτεπαγωγών των αξόνων d, q των 30 μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια ανά πόλο των μαγνητών

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

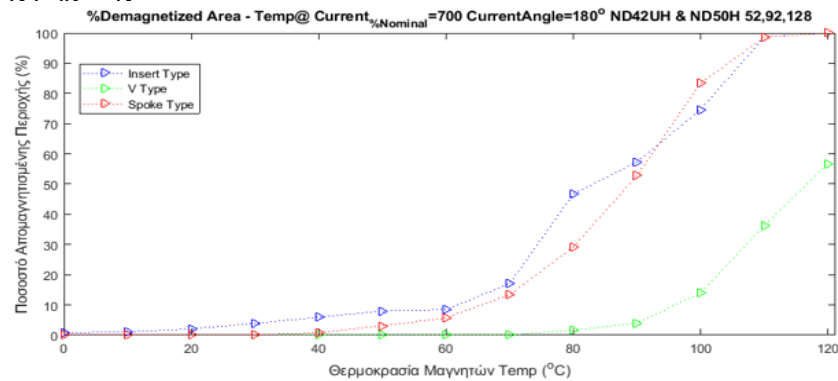
5.7.2 Εκτίμηση της Απομαγνήτισης

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



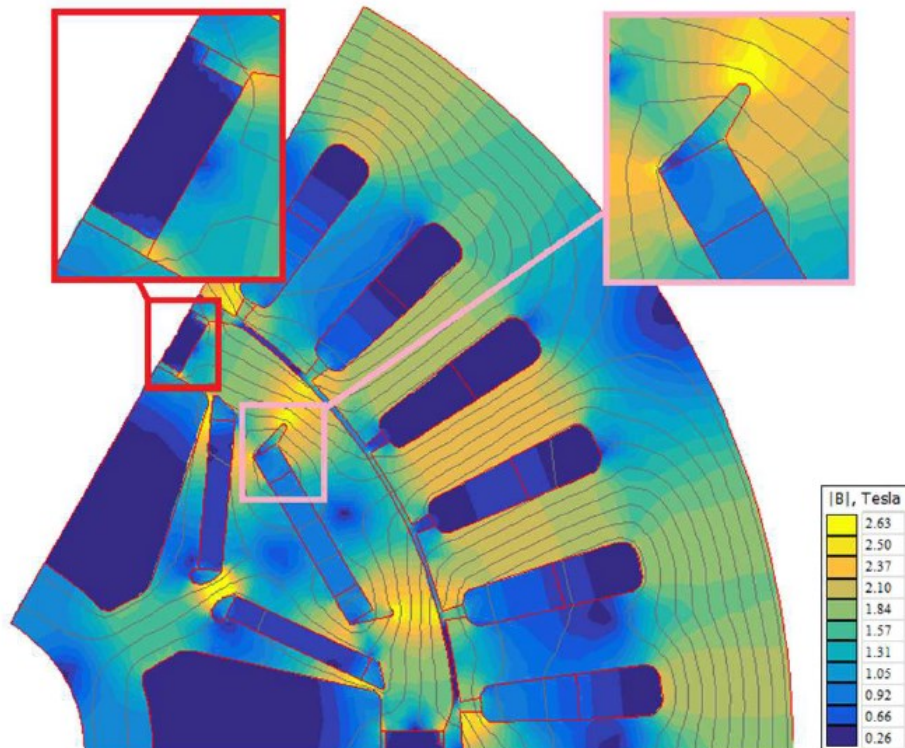
Σχ. 5.38 Διάγραμμα της θερμοκρασίας που οδηγεί σε 10% μέγιστη απομαγνήτιση των μαγνητών της κάθε μηχανής που εξετάστηκε με βάση την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο.

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



Σχ. 5.39 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H & ND42UH {52,92,128}.

Η επιλογή της παραπάνω μηχανής έγινε με στόχο την εύρεση της γεωμετρίας που μπορεί να είναι ανθεκτική σε ακραίες συνθήκες σφάλματος με το ελάχιστο δυνατό όγκο μαγνητών χωρίς την υπέρμετρη απόκλιση από τις αρχικές τιμές ροπής και χαρακτηριστικών. Συμπερασματικά, λοιπόν, καταλήγουμε στη σημασία που έχει τόσο το είδος του μαγνήτη όσο και το πάχος και η θέση του σε μία γεωμετρία μηχανής στο φαινόμενο της απομαγνήτισης. Αυτό υποστηρίζεται μέσα από τις παραπάνω προσομοιώσεις και αποτελέσματα. Τέλος δίνεται η τελική γεωμετρία της μηχανής μετά τα στάδια βελτιστοποίησης.



Σχ. 5.40 Κατανομή μαγνητικού πεδίου στους 65°C με ρεύμα $I=7 \cdot I_N$ τοποθετημένο σε 180° στο πλαίσιο dq. Στην εικόνα αυτή, τα εστιασμένα πλαίσια απεικονίζουν τις απομαγνητισμένες περιοχές των μαγνητών.

5.8 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία του κεφαλαίου αυτού είναι :

- Η μέθοδος, που αναλύθηκε και χρησιμοποιήθηκε, δίνει τη δυνατότητα εύκολης και γρήγορης ανάλυσης απομαγνήτισης οποιασδήποτε διαμόρφωσης εσωτερικών μόνιμων μαγνητών καθώς και κάθε είδους τυλίγματος και γεωμετρίας στάτη.
- Η αύξηση της πυκνότητας ισχύος της μηχανής, όταν οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται έχουν υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση. Αυτό γίνεται εμφανές, αφού καθώς αλλάζουμε το είδος των μαγνητών, προκύπτει η ανάγκη για μεταβολή του ενεργούς μήκους της μηχανής με σκοπό τη διατήρηση των επιδόσεων. Με αυτόν τον τρόπο, μεταβάλλουμε έμμεσα την πυκνότητα ισχύος της μηχανής.
- Η απομαγνήτιση μεταβάλλεται έντονα με την αύξηση της θερμοκρασίας και καθοριστικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζουν οι συντελεστές θερμοκρασίας του J_H των μαγνητών.
- Δευτερεύον αλλά όχι αμελητέο ρόλο στην απομαγνήτιση έχει η γωνία των ρευμάτων του στάτη, επειδή η μέγιστη απομαγνήτιση δεν απαντάται σε όλους τους μαγνήτες στις 180° μοίρες.
- Η γεωμετρία του δρομέα και ο κορεσμός του πυρήνα του δίνουν την ικανότητα στο σχεδιαστή ομοιόμορφης κατανομής της απομαγνήτισης.
- Ο σχεδιασμός φραγμάτων ροής στα άκρα των μαγνητών είναι απαραίτητος για την αύξηση της αντοχής της απομαγνήτισης μέσω της μείωσης του πεδίου B κοντά στο μαγνήτη.
- Σημαντική συνεισφορά στην αύξηση αντοχής σε συνθήκες απομαγνήτισης δίνει και το πάχος των μαγνητών , αφού όσο αυξάνεται τόσο πιο πολύ αντιστέκονται οι μαγνήτες στην απομαγνήτιση.
- Οι βελτιώσεις των χαρακτηριστικών που πραγματοποιήθηκαν για την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του μαγνητικού κυκλώματος εσωτερικών μόνιμων μαγνητών, προσοιωνίζουν σημαντική επίπτωση της επιλογής της γεωμετρίας στον κίνδυνο απομαγνήτισης σε περιπτώσεις σφάλματος.

5.9 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [6.1] I. Manolas, A. Kladas, D. Svehkarenko and R. Chin, "Magnetization Regulation in Variable Flux PM-Assisted Synchronous Reluctance Machines," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018, pp. 2224-2228, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506745.
- [6.2] R. Tsunata, M. Takemoto, S. Ogasawara and K. Orikawa, "A Proposal of a Delta-Type Salient Pole Variable Flux Memory Motor Having Large Flux Barrier for Traction Applications," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 6054-6061, doi: 10.1109/ECCE.2019.8913191
- [6.3] S. Ruoho, E. Dlala and A. Arkkio, "Comparison of Demagnetization Models for Finite-Element Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Machines," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, no. 11, pp. 3964-3968, Nov. 2007, doi: 10.1109/TMAG.2007.906749.
- [6.4] M. Katter, "Angular dependence of the demagnetization stability of sintered Nd-Fe-B magnets," 2005 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG), Nagoya, 2005, pp. 945-946, doi: 10.1109/INTMAG.2005.1463901.
- [6.5] S. Ruoho and A. Arkkio, "Partial Demagnetization of Permanent Magnets in Electrical Machines Caused by an Inclined Field," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 7, pp. 1773-1778, July 2008, doi: 10.1109/TMAG.2008.921951.
- [6.6] S. S. Nair, V. I. Patel, J. Wang, "Post-Demagnetization Performance Assessment for Interior Permanent Magnet AC Machines" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 4, April 2016, doi: 10.1109/TMAG.2015.2505245.
- [6.7] Chae-Lim Jeong and Jin Hur, "Optimization Design of PMSM with Hybrid-Type Permanent Magnet Considering Irreversible Demagnetization" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 11, Nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2707102.
- [6.8] J. Faiz and E. Mazaheri-Tehrani, "Demagnetization Modeling and Fault Diagnosing Techniques in Permanent Magnet Machines Under Stationary and Nonstationary Conditions: An Overview" in IEEE

- Transactions on Industry Application, vol. 53, no. 3, pp. 2772-2785, May-June 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2608950
- [6.9] J. De Bisschop, P. Sergeant, A. Hemeida, H. Vansompel, L. Dupré, "Analytical Model for Combined Study of Magnet Demagnetization and Eccentricity Defects in Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 9, Sept. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2709267.
 - [6.10] D. Reigosa, D. Fernández, M. Martínez, Y. Park, S .B. Lee and F. Briz, "Permanent Magnet Synchronous Machine Non-Uniform Demagnetization Detection Using Zero-Sequence Magnetic Field Density" in IEEE Transactions on Industry Application, vol. 55, no. 4, July-Aug. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2914892.
 - [6.11] Bianchi, Nicola, Silverio Bolognani, and Michele Dai Pre. "Design of a Fault-Tolerant Ipm Motor for Electric Power Steering."2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference: IEEE, 2005.
 - [6.12] Givord, D, P Tenaud, and T Viadieu. "Angular Dependence of Coercivity in Sintered Magnets." Journal of magnetism and magnetic materials 72, no. 3 (1988): 247-52.
 - [6.13] Ruoho, Sami, Emad Dlala, and Antero Arkkio. "Comparison of Demagnetization Models for Finite-Element Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Machines." IEEE Transactions on Magnetics 43, no. 11 (2007): 3964-68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

6.1 Εισαγωγή Κεφαλαίου:

Οι επιφανειακά τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες παρουσιάζουν σχεδιαστικά πλεονεκτήματα εξαιτίας της δημιουργίας ισχυρού μαγνητικού πεδίου στο διάκενο των ηλεκτρικών μηχανών αλλά είναι ευαίσθητοι στην ανάπτυξη δινορευμάτων. Τα δίνορρευματα αυτά δημιουργούνται εξαιτίας της περιστροφής του πεδίου του στάτη και των αρμονικών που σχηματίζονται από την τροφοδοσία τύπου διαμόρφωσης εύρους παλμών [6.1]. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνικές εκτίμησης απωλειών σε μόνιμους μαγνήτες [6.2], μέσα από τις οποίες αναδεικνύεται η κυριαρχία των απωλειών λόγω δινορευμάτων σε σχέση με τις απώλειες που δημιουργούνται λόγω υστέρησης στις πρακτικές εφαρμογές ηλεκτρικών μηχανών [6.3]-[6.5].

Με σκοπό τη μείωση των απωλειών λόγω δινορευμάτων, έχει εφαρμοστεί η μέθοδος τμηματοποίησης των μαγνητών. Ωστόσο, ακόμα και σε τμηματοποιημένους μαγνήτες, οι αρμονικές που δημιουργούνται από την τροφοδοσία συνήθως εμφανίζουν βάθη διείσδυσης μικρότερα από το μέγεθος των τμημάτων. Με γνώμονα αυτό, χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη η 3^η διάσταση του μαγνήτη στη μοντελοποίηση των δινορευμάτων που δημιουργούνται. Όταν γίνεται προσπάθεια υπολογισμού μέσω της χρήσης δισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων η ικανότητα αυτή δεν υπάρχει. Το παρόν κεφάλαιο παρέχει λύση στην μοντελοποίηση της τρίτης διάστασης σε 2D αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων μέσω θεώρησης διασύνδεσης των αναλύσεων αυτών με αναλυτικούς τύπους.

Μία μεθοδολογία που είναι βασισμένη στη μέθοδο τρισδιάστατης θεώρησης Μετασχηματισμών Fourier (3D FFT) έχει ήδη περιγράψει στη βιβλιογραφία [6.6]. Ακόμα, στη βιβλιογραφία έχει προταθεί μία τεχνική για τον υπολογισμό της κατανομής των απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες, η οποία κάνει χρήση της Δισδιάστατης Μοντελοποίησης Πεπερασμένων Στοιχείων μαζί με την ανάπτυξη διαφορικής αντίστασης κατά μήκος της 3ης Διάστασης [6.7].

Στη συγκεκριμένη μελέτη, αναλύεται μία ορισμένη μεθοδολογία αναπαράστασης των δινορευμάτων που αναπτύσσονται μέσα από σαφώς ορισμένα μονοπάτια σε επιφανειακά τοποθετημένους μόνιμους μαγνήτες. Η παρούσα μεθοδολογία βασίζεται στον συνδυασμό Δισδιάστατης Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων με τις δυναμικές εξισώσεις κυκλώματος. Ο συνδυασμός αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα φαινόμενα ακραίων περιοχών στους μαγνήτες (end effect) λόγω δινορευμάτων. Η μέθοδος αυτή εισάγει τη χρήση εμπεδήσεων συγκεντρωμένων παραμέτρων (lumped parameter impedances) αναπτύσσοντας μία ήδη εδραιωμένη μεθοδολογία θεώρησης της περιοχής των άκρων του τυλίγματος απόσβεσης του δρομέα [6.8]. Το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) κατά μήκος της 3ης διάστασης του μαγνήτη λαμβάνεται υπόψη μέσα από την ανάπτυξη τεχνικών αξιολόγησης των αμοιβαίων επαγωγών στις συγκεντρωμένες παραμέτρους.

Η εισαγωγή εκ νέου ορισμένων αυτεπαγωγών και αμοιβαίων επαγωγών στις εξισώσεις μαγνητικού κυκλώματος δίνει ευελιξία στη μέθοδο αρμονικής ανάλυσης πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία (harmonic 2D FEA) όπως και στις μεθόδους FDTD 2D FEA, σε περιπτώσεις όπου η χρονική μεταβολή έχει μη ημιτονοειδή μορφή. Επιπλέον, οι χωρικές αρμονικές μπορούν να ληφθούν υπόψη αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της συνδεσιμότητας των συγκεντρωμένων παραμέτρων. Μία τέτοια τεχνική μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια υπολογισμού του πεδίου αντίδρασης.

Αρχικά, μελετάται συγκεκριμένη διάταξη υπολογισμού των απωλειών δινορευμάτων με πειραματικό τρόπο. Στη διάταξη αυτή ένα μαγνητικό κύκλωμα τύπου C-Core με στόχο την ενίσχυση του πεδίου στην περιοχή του μαγνήτη μοντελοποιείται μέσω τρισδιάστατης και

δισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ενώ στη συνέχεια κατασκευάζεται και τίθεται προς μέτρηση.

Επισημαίνεται ότι για τις ανάγκες της αναπαράστασης των μαγνητικών λαμαρινών στη διάταξη C-Core απαιτήθηκαν πρόσθετες διερευνήσεις σε μαγνητικά κυκλώματα με διάκενα σε σχέση με αυτές των τυπικών μαγνητικών κυκλωμάτων χωρίς διάκενα τύπου Epstein και τοροειδούς γεωμετρίας.

Επιπλέον η ανάλυση των απωλειών στους μόνιμους μαγνήτες πραγματοποιήθηκε με βάση μεθοδολογία για το διαχωρισμό των απωλειών του πυρήνα και του μαγνήτη σε σχέση με τις συνολικές απώλειες της διάταξης που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

6.2 Πειραματική Διάταξη C-Core

Προκειμένου να μοντελοποιηθούν κατάλληλα οι απώλειες στους μόνιμους μαγνήτες, κατασκευάστηκε ένα συγκεκριμένο απλό μαγνητικό κύκλωμα. Αυτό το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από δύο τμήματα μορφής U με τυλιγμένα ελάσματα πυρήνα από μαλακό μαγνητικό υλικό που χωρίζονται από δύο μαγνήτες κράματος Νεοδυμίου και περιελίσσονται δύο πηνία χαλκού γύρω από τη θέση εναπόθεσης των μαγνητών. Τα τυλίγματα αυτά χρησιμοποιούνται για λόγους διέγερσης και για την ανίχνευση της επαγόμενης τάσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε ένα πρώτο βήμα έγινε η μέτρηση των απωλειών του πυρήνα χωρίς την παρουσία των μόνιμων μαγνητών. Σε ένα δεύτερο βήμα τοποθετήθηκαν οι μαγνήτες στο μαγνητικό κύκλωμα και μετρήθηκαν οι συνολικές απώλειες σε διάφορες συχνότητες. Αυτή η διαδικασία δύο βημάτων επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες.



Σχ. 6.1 Πειραματική διάταξη C-Core. Παρατηρούνται τα τυλίγματα διέγερσης και πηνίων ανίχνευσης ροής ενώ ανάμεσα από τα δύο C- Core τοποθετείται το δοκίμιο του μαγνήτη.

6.3 Απώλειες Πυρήνα C- Core

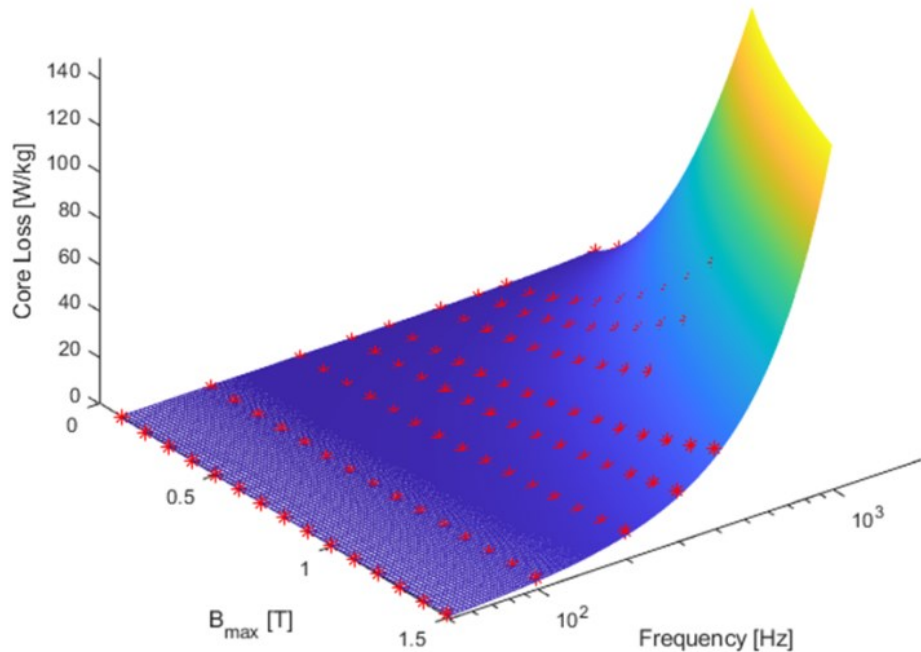
Το μοντέλο απωλειών πυρήνα βασίζεται στην τεχνική διαχωρισμού των απωλειών του Bertotti [6.14], η οποία εκφράζεται από την εξίσωση (6.1).

$$P_{\text{Core}} = K_H B^2 f + K_C B^2 f^2 + K_E B^{1.5} f^{1.5} \quad (6.1)$$

όπου $K_H = 1.05 \cdot 10^{-2} [\text{W}/(\text{kgT}^2\text{Hz})]$ υποδηλώνει τον συντελεστή απωλειών υστέρησης, $K_C = 7.91 \cdot 10^{-5} [\text{W}/(\text{kgT}^2\text{Hz}^2)]$ υποδηλώνει τον συντελεστή απωλειών δινορευμάτων, ενώ $K_E = 3.16 \cdot 10^4 [\text{W}/(\text{kgT}^{1.5}\text{Hz}^{1.5})]$ υποδηλώνει τον συντελεστή απωλειών excess.

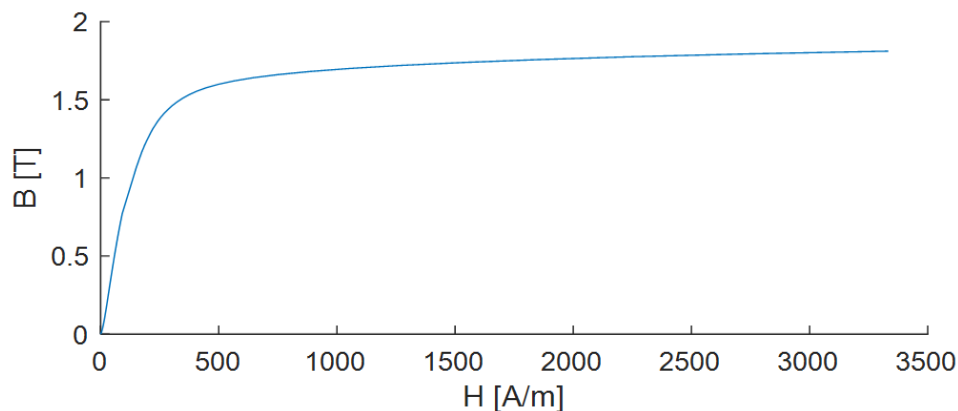
Το πηνίο διέγερσης του μαγνητικού κυκλώματος περιλαμβάνει 24 στρόφες και οι μαγνήτες απουσιάζουν κατά τη διάρκεια αυτού του πειράματος. Οι συντελεστές K_H , K_C , K_E προέκυψαν από τη μέτρηση των απωλειών υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι μετρημένες απώλειες για διάφορες συχνότητες και μέγιστες τιμές πυκνότητας ροής ($B_{\max}$), καθώς και η αντίστοιχη προσαρμοσμένη επιφάνεια που προέκυψε.



Σχ. 6.2 Μετρήσεις απωλειών πυρήνα και η προσαρμοσμένη επιφάνεια του μοντέλου απωλειών πυρήνα με διακυμάνσεις της συχνότητας και της πυκνότητας ροής.

Η αρχική καμπύλη B-H που λαμβάνεται με την εφαρμογή διέγερσης συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα



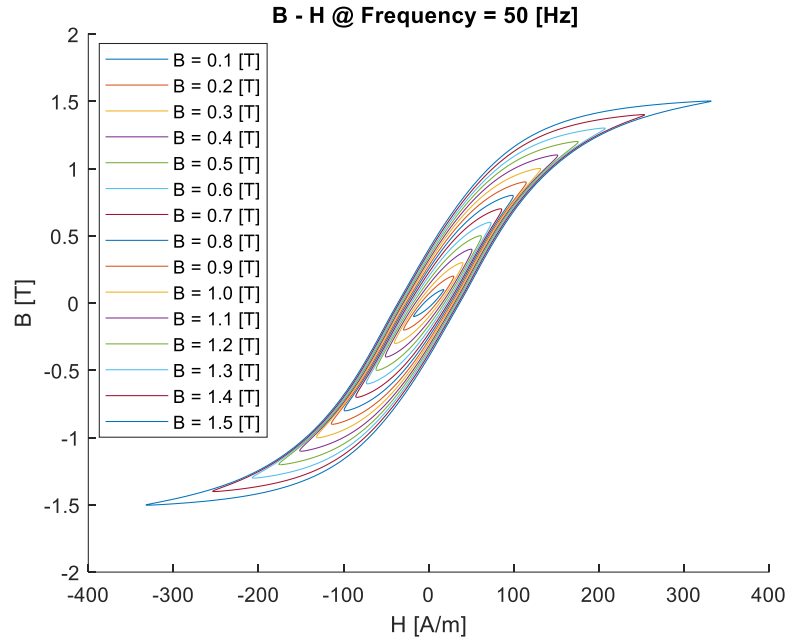
Σχ. 6.3 Αρχική καμπύλη μαγνήτισης του υπό μελέτη μαλακού μαγνητικού υλικού

Οι μετρημένες και οι προσομοιωμένες τιμές των απωλειών που αντιστοιχούν στη θεμελιώδη συχνότητα των 50 Hz και στη διακοπτική συχνότητα των 10 kHz συγκρίνονται στον πίνακα 6.1.

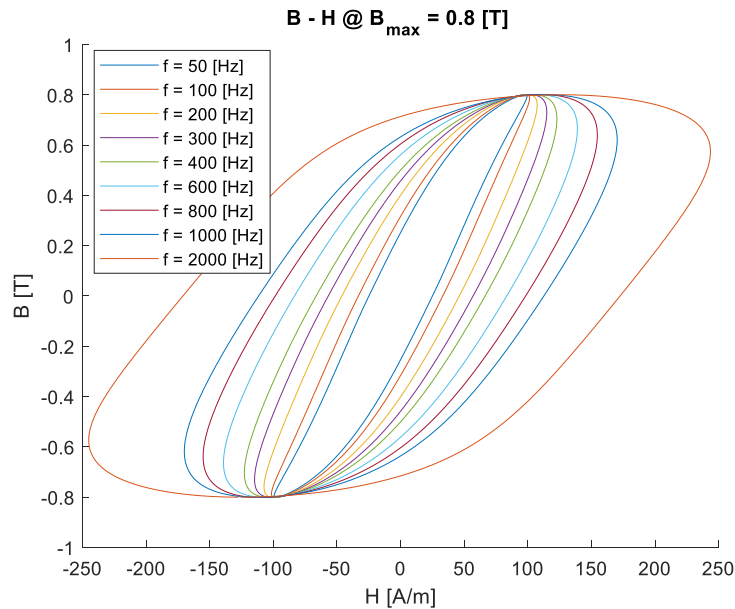
Μπορεί να σημειωθεί ότι οι αντίστοιχες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου (20°C) βρίσκονται σε σχετικά καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου που υιοθετήθηκε.

$B_{\max}$ (T)	Frequency (Hz)	$P_{\text{meas.}}$ (W/kg)	$P_{\text{sim.}}$ (W/kg)	Error (%)
1.416	50	1.536	1.491	2.92
0.057	10,000	18.91	20.59	8.84

Πίν. 6.1 Πίνακας διαπίστευσης μοντέλου απωλειών πυρήνα και πειραματικής μέτρησης



Σχ. 6.4 Πειραματική εκτίμηση του βρόχου υστέρησης του μαλακού μαγνητικού υλικού. Οικογένεια καμπυλών σε συγκεκριμένη συχνότητα 50Hz ως συνάρτηση μεταβολής του μαγνητικού πεδίου



Σχ. 6.5 Πειραματική εκτίμηση του βρόχου υστέρησης του μαλακού μαγνητικού υλικού. Οικογένεια καμπυλών σε συγκεκριμένο πλάτος μαγνητικού πεδίου 0.8T ως συνάρτηση της συχνότητας διέγερσης.

6.4 Απώλειες Μαγνήτη

Οι απώλειες των μόνιμων μαγνητών αξιολογήθηκαν με την αφαίρεση των απωλειών των ελασμάτων πυρήνα, από τις συνολικές απώλειες του μαγνητικού κυκλώματος παρουσία μόνιμων μαγνητών. Ο αριθμός των ελιγμάτων των πηνίων σε αυτό το στάδιο έχουν αυξηθεί σε 200 λόγω της αυξημένης μαγνητικής αντίστασης. Η σύγκριση μεταξύ των μετρούμενων και των προσομοιωμένων απωλειών αναφέρεται στον παρακάτω πίνακα, όπου καταδεικνύεται μια σχετικά μικρή απόκλιση στην αξιολόγηση των συνολικών απωλειών που παρέχει η διαδικασία μοντελοποίησης που αναπτύχθηκε. Το σημαντικότερο σχετικό σφάλμα τοποθετείται στη συχνότητα 50Hz και μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλή τιμή απώλειας που συναντάται σε αυτή την περίπτωση. Η αξιολόγηση των απωλειών της προτεινόμενης τεχνικής γίνεται μέσω του πίνακα 6.2 όπου αναδεικνύονται οι απώλειες των δινορευμάτων στον μόνιμο μαγνήτη σε σχέση με τη συχνότητα και τη μέγιστη τιμή της τοπικής διακύμανσης της πυκνότητας ροής.

	Quantity	Units	Fundamental Frequency	Switching Frequency
Evaluation technique	Frequency	Hz	50	10000
	Prim. Current	A(rms)	1.008	0.059
Measured	Sec. Voltage	V(rms)	1.83	14.6
	Total Loss	mW	18.7	453
Simulated	Sec. Voltage	V(rms)	1.51	14.62
	Hysteresis Loss	mW	9.02	1.70
	Eddy Current	mW	4.31	64.25
	Excess Loss	mW	4.48	57.41
	PM Eddy Current	mW	3.92	321.62
	Total Loss	mW	21.72	444.97
Comparison	Error	%	17.39	1.73

Πίν. 6.2 Απώλειες μαγνητικού κυκλώματος παρουσία μαγνήτη

6.5 Προσομοίωση 3D

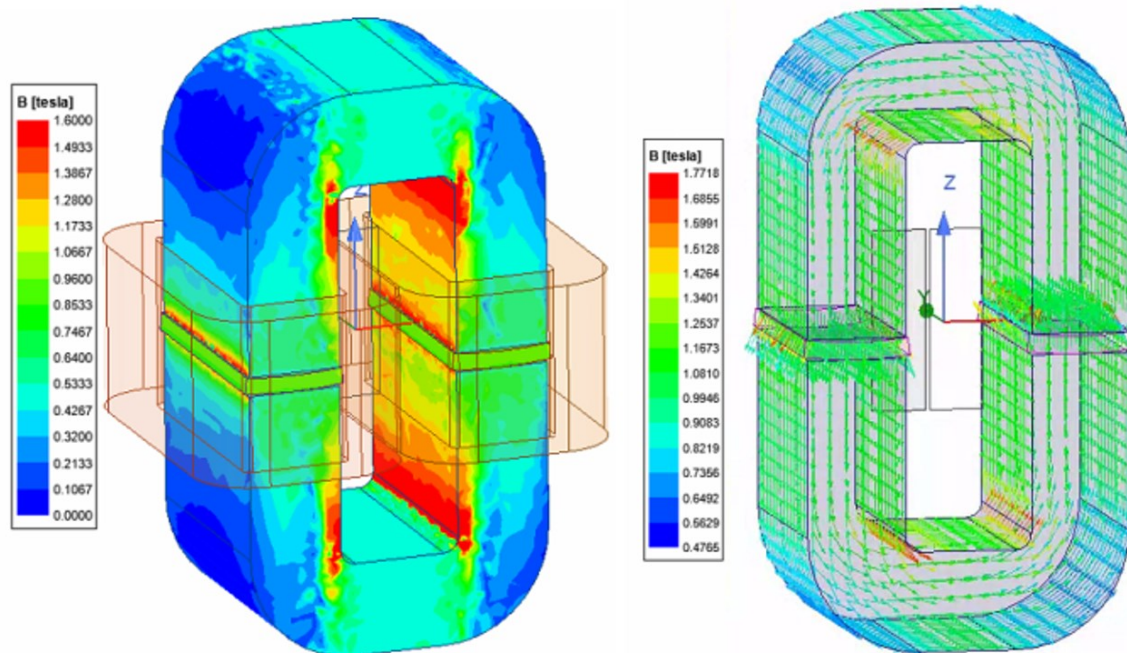
Η διαδικασία μοντελοποίησης FEA απαιτεί την εξέταση της τρισδιάστατης διαμόρφωσης λόγω των γεωμετριών των εφαρμοζόμενων μόνιμων μαγνητών και των τροχιών των αναπτυσσόμενων δινορευμάτων. Επιπλέον, τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των ελασμάτων απαιτούν μια τεχνική ανάλυσης βήμα προς βήμα στο πεδίο του χρόνου. Το αριθμητικό αυτό σχήμα ανάλυσης είναι απαιτητικό, όσον αφορά τις απαιτήσεις χώρου μνήμης, χρόνου εκτέλεσης και υπολογιστικής ισχύος.

Το πρώτο μέρος των προσομοιώσεων χωρίς την παρουσία μόνιμου μαγνήτη είχε ως αποτέλεσμα την επιβεβαίωση του μοντέλου απωλειών σιδήρου. Η διερεύνηση αυτή έγινε στην περίπτωση μέγιστης πυκνότητας ροής 0.8T, στην οποία έχει μετρηθεί η μεταβολή του βρόχου υστέρησης με τη συχνότητα. (σχήμα 6.5)

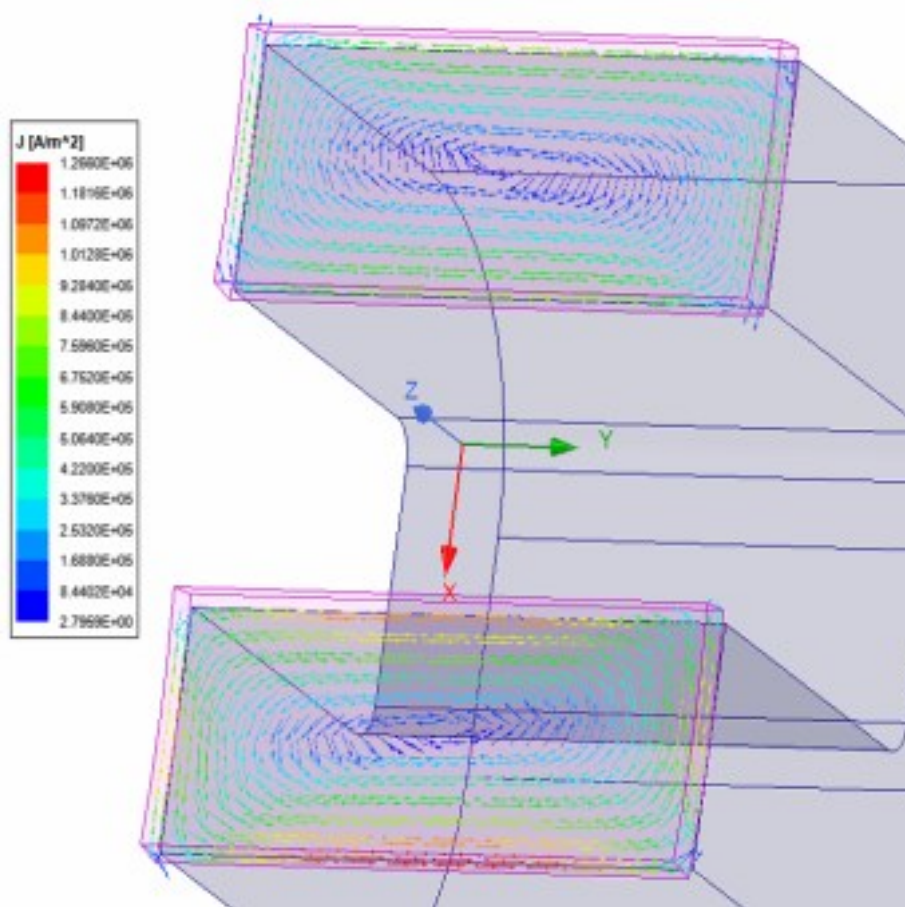
Στο δεύτερο μέρος των προσομοιώσεων με την παρουσία μόνιμων μαγνητών στο μαγνητικό κύκλωμα, οι εκτιμώμενες απώλειες συγκρίνονται καλά με τις αντίστοιχες μετρήσεις, όπως φαίνεται στον πίνακα 6.2.

Η προσομοιωμένη κατανομή της πυκνότητας ροής στην περίπτωση ρεύματος διέγερσης 0,06A στα 10kHz παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες, καθώς και η κατανομή των δινορευμάτων.

Μπορεί να σημειωθεί ότι η προσομοίωση του μόνιμου μαγνήτη δεν περιλαμβάνει καμία εξέταση βρόχου υστέρησης, καθώς οι αντίστοιχοι μικροί βρόχοι υστέρησης είναι αμελητέοι και οι εκτιμώμενες απώλειες στους μόνιμους μαγνήτες οφείλονται μόνο σε δινορεύματα.



Σχ. 6.6 Αριστερά: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικού πεδίου για DC ρεύμα 1Α. Δεξιά: Κατανομή μαγνητικού πεδίου σε AC ρεύμα 1Α $f = 1\text{kHz}$



Σχ. 6.7 Κατανομή δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες για ρεύμα 0.06Α στα 10kHz

6.6 Απώλειες MM σε Συνθήκες Ομοιόμορφης Κατανομής Πεδίου

Στη συγκεκριμένη ενότητα προτείνεται ένα μοντέλο αποδοτικής θεώρησης απωλειών λόγω διακοπτικής συχνότητας σε δρομέα επιφανειακών μονίμων μαγνητών για περιπτώσεις τροφοδοσίας με παλμούς διακοπόμενου πλάτους. Το μοντέλο βασίζεται σε Δισδιάστατη Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων συνδυασμένο με εξισώσεις κυκλώματος-πεδίου σε περιοχές των μονίμων μαγνητών. Η ανάλυση λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο ακραίων περιοχών (end effect), το οποίο σχετίζεται με τη διακοπόμενη συχνότητα, η οποία με τη σειρά της είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο μέρος απωλειών δινορευμάτων στους μαγνήτες. Η ακρίβεια του μοντέλου επιβεβαιώνεται μέσω πειραματικών μετρήσεων σε μαγνητικό κύκλωμα. Η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών απωλειών και των απωλειών που προβλέφθηκαν από το προτεινόμενο μοντέλο έγινε με την εφαρμογή μίας βασικής ανάλυσης διαχωρισμού των απωλειών και ανέδειξε την κυριαρχία των απωλειών εξαιτίας δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες λόγω της διακοπτικής συχνότητας.

6.7 2D Μοντελοποίηση με Εξωτερικά Κυκλώματα

Τα δινορεύματα των μονίμων μαγνητών υπάγονται στην ακόλουθη εξίσωση διαχύσεως σε ότι αφορά τους όρους του διανυσματικού δυναμικού μαγνητικού πεδίου $\mathbf{A}$.

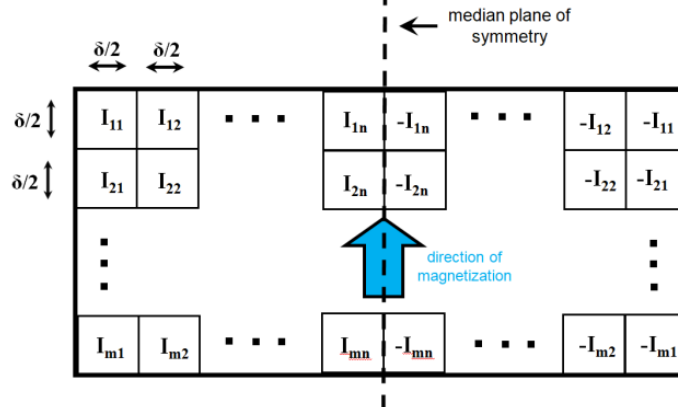
$$\nabla^2 \bar{A} = \mu \sigma \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \quad (6.2)$$

Όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα, σ ηλεκτρική αγωγιμότητα και V βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό.

Μπορεί να σημειωθεί, πως στη περίπτωση Δισδιάστατης Καρτεσιανής διαμόρφωσης, το μόνο υπάρχον συστατικό A_z του διανυσματικού δυναμικού μαγνητικού πεδίου $\mathbf{A}$ βρίσκεται κατά μήκος του άξονα z , ενώ ο όρος ∇V ενεργοποιεί το συνδυασμό του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με τις κατάλληλες εξισώσεις κυκλώματος, όπως επεξηγείται παρακάτω.

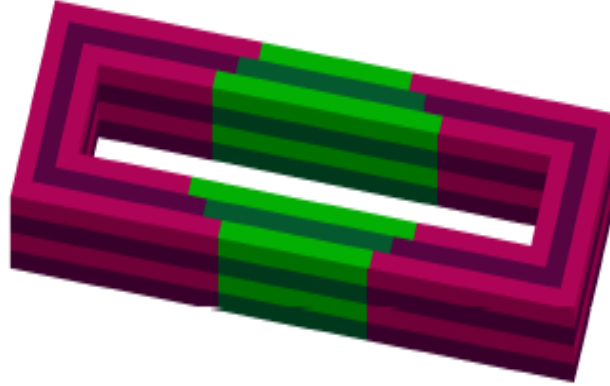
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega_s}} \quad (6.3)$$

Αρχικά, ο μαγνήτης σε δισδιάστατη διαμόρφωση διαιρείται σε ορθογώνιες διατομές με διαστάσεις ίσες με το μισό του βάθους διείσδυσης δ ανταποκρινόμενο στη μέγιστη συχνότητα (Σχήμα 6.8), ενώ οι πυκνότητες δινορευμάτων στους μαγνήτες θεωρούνται προσανατολισμένες κατά μήκος του άξονα z και είναι κατανεμημένες ομοιογενώς στις ορθογώνιες διατομές. Μία τέτοια διακριτοποίηση αποτελεί έναν αποδεκτό συμβιβασμό ανάμεσα στην υπολογιστική πολυπλοκότητα και την ακρίβεια υπολογισμού απωλειών λόγω δινορευμάτων, περιορίζοντας με τον τρόπο αυτό, την πιθανότητα λάθους σε ποσοστό μικρότερο του 5%.



Σχ. 6.8 Υποδιαίρεση του μόνιμου μαγνήτη σε ίσες ορθογώνιες διατομές πλάτους $\delta/2$ με αντι συμμετρική θεώρηση της κατανομής δινορευμάτων λαμβάνοντας υπόψη την κατοπτρική συμμετρία.

Με γνώμονα τα άνωθι, η μέση τιμή της πυκνότητας δινορευμάτων σε κάθε περιοχή είναι συνδεδεμένη με τη συμμετρική της όπως φαίνεται στην Σχ. 6.9, με στόχο τη συσχέτιση αντίθετων ρευμάτων λόγω της διαδρομής του ρεύματος στις άκρες του μαγνήτη. Ο υπολογισμός της αντίστασης στις ακραίες περιοχές των διατομών που βρίσκονται συμμετρικά τοποθετημένες, βασίζεται στην αγωγιμότητα του μαγνήτη, στο μήκος του εικονικού κυκλώματος και στο εμβαδόν της διατομής.



Σχ. 6.9 Υπόθεση συνδετικότητας εικονικών κυκλωμάτων τερματικών περιοχών.

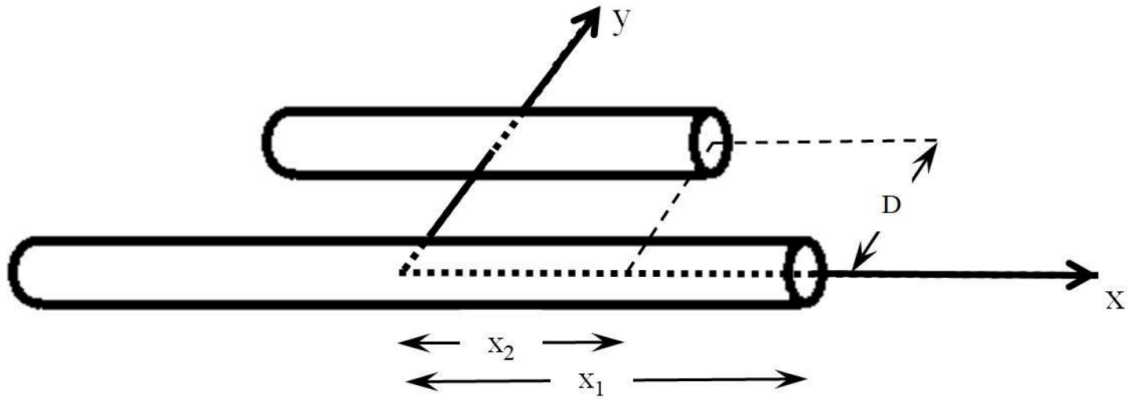
6.8 Εκτίμηση Συγκεντρωμένων Παραμέτρων στις Περιοχές Άκρων Τυλίγματος

Οι αυτεπαγωγές και οι αμοιβαίες επαγωγές ανάμεσα στις διατομές αξιολογούνται με τη θεώρηση της γραμμικοποιημένης σταδιακής διαπερατότητας του μόνιμου μαγνήτη, η οποία ισούται με τη διαπερατότητα κενού χώρου [6.9]. Μία τέτοια προσέγγιση παρέχει επαρκή αναπαράσταση των στοιχείων μαγνήτισης κοντά στη περιοχή παραμένουσας μαγνήτισης ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει σημαντικές ασυμφωνίες στις λειτουργικές περιοχές συμπεριλαμβανόμενης και της μόνιμης απομαγνήτισης, η οποία μπορεί να αποφευχθεί με τον κατάλληλο γεωμετρικό σχεδιασμό. Σε κάθε διατομή, η ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος θεωρείται μία επιπρόσθετη μεταβλητή που εκφράζεται με τον όρο $\sigma \nabla V$, ενώ οι ακόλουθες εξισώσεις παρουσιάζουν την πτώση τάσης της εμπέδησης των συγκεντρωμένων παραμέτρων των εικονικών κυκλωμάτων των ακραίων περιοχών, οι οποίες εκφράζονται ακολούθως:

$$V_i - V_j = (R_{ij} + L_{ij} \frac{d}{dt}) i(t)_{ij} - \sum_{km, km \neq ij}^{[seg \times seg]} M_{ij,km} \frac{d}{dt} i(t)_{km} \quad (6.4)$$

Όπου $i(t)_{ij}$ είναι το διατρέχον ρεύμα των ακραίων περιοχών των διατομών i και j , R_{ij} η αντίσταση και L_{ij} η αυτεπαγωγή της πορείας του εικονικού κυκλώματος που συνδέει τις ακραίες περιοχές i και j των διατομών και $M_{ij,km}$ είναι η αμοιβαία επαγωγή που δημιουργείται από τα εικονικά κυκλώματα μεταξύ των ακραίων περιοχών ij και km των διατομών αντίστοιχα.

Οι αυτεπαγωγές και οι αμοιβαίες επαγωγές των ρευματοφόρων αγωγών με ορθογώνιες διατομές και ομοιογενή κατανομή, τοποθετημένων κοντά σε επίπεδα – άπειρης διαπερατότητας υλικών – μπορούν να υπολογιστούν με αναλυτικό τρόπο [6.10]. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν απλούστερες λύσεις κλειστής μορφής που βασίζονται σε παρόμοια ανάλυση για αγωγούς ίσης κυκλικής διατομής [6.11], οι οποίες παρέχουν επαρκή ακρίβεια μειώνοντας το υπολογιστικό έργο. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται με την έκφραση της συνολικής ενέργειας W της έντασης του μαγνητικού πεδίου $\mathbf{H}$ στο χώρο V που δημιουργείται από δύο ευθύγραμμες διατομές αγωγού άνισου μήκους $l_1 = 2x_1$ και $l_2 = 2x_2$ αντίστοιχα, τοποθετημένες παράλληλα σε απόσταση D , μεταφέροντας ρεύματα i_1 και i_2 όπως φαίνεται στο σχήμα 6.12 σε σχέση με τις αυτεπαγωγές L_{StrW1} , L_{StrW2} και τις αμοιβαίες αυτεπαγωγές M_{UneqW} :



Σχ. 6.10 Δύο τμήματα αγωγών που μεταφέρουν ρεύμα με μήκος $l_1 = 2 x_1$ και $l_2 = 2 x_2$ αντίστοιχα, με κυκλικές διατομές, τοποθετημένοι παράλληλα σε απόσταση D .

$$W = \frac{1}{2} L_{Str} i_1^2 + \frac{1}{2} L_{Str} i_2^2 + M_{UneqW} i_1 i_2 = \int_V \frac{1}{2} \mu_0 H^2 dv \quad (6.5)$$

Εφαρμόζοντας την αρχή της υπέρθεσης για τα τμήματα κυκλικής διατομής r των δύο αγωγών, η συγκεντρωμένη παράμετρος της αυτεπαγωγής του κάθε αγωγού L_{StrW} και της αμοιβαίας επαγωγής M_{UneqW} μπορεί να εκτιμηθεί στο μH ως προς τις διαστάσεις εκφρασμένες σε mm ως εξής:

$$L_{StrW} = 0.002 \left[1 \cdot \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1^2 + r^2}}{r} \right) - \sqrt{1^2 + r^2} + \frac{1}{4} + r \right] \quad (6.6)$$

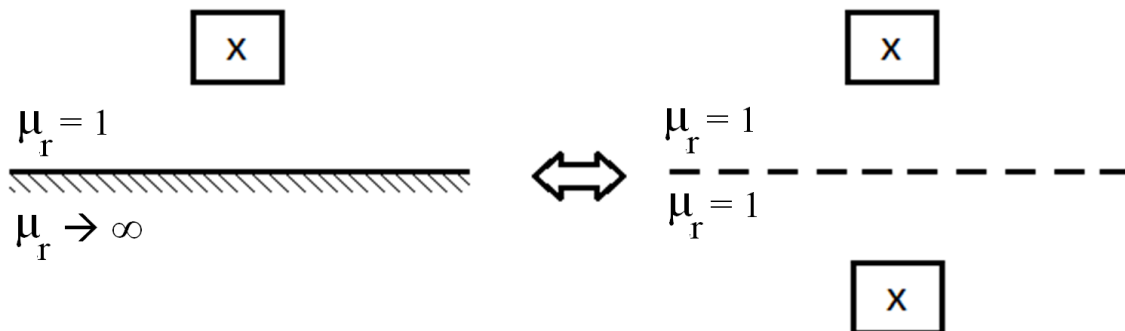
$$M_{UneqW} = 0.002 \left[2 x_1 \cdot \ln \left(\frac{C_1}{D} \right) + (x_1 - x_2) \cdot \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) + C_2 - C_1 + 2 x_2 \right] \quad (6.7)$$

Όπου:

$$C_1 = (x_1 + x_2) + \sqrt{(x_1 + x_2)^2 + D^2} \quad (6.8)$$

$$C_2 = (x_1 - x_2) + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + D^2} \quad (6.9)$$

Σημειώνεται ότι η επίδραση μίας επίπεδης επιφάνειας σιδήρου, αντιστοιχεί πρακτικά σε ένα απείρως διαπερατό υλικό που βρίσκεται κοντά σε ένα τμήμα που μεταφέρει ρεύμα στην κατανομή του μαγνητικού πεδίου και μπορεί να αναπαρασταθεί με την κατάλληλη εφαρμογή της θεωρίας της εικόνας όπως φαίνεται στην εικόνα 6.11.



Σχ. 6.11 Εφαρμογή της θεωρίας εικόνας για την αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου ενός ρευματοφόρου αγωγού που βρίσκεται κοντά σε επίπεδη επιφάνεια σιδήρου.

Όταν υπάρχουν περισσότερες από μία επιφάνειες, άπειρης διαπερατότητας, όπως στο παράδειγμα που μελετάται παρακάτω, πρέπει να εξεταστούν διαδοχικά είδωλα, ενώ η συμπερίληψη στους υπολογισμούς περίπου δέκα ειδώλων παρέχει επαρκή ακρίβεια, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [6.10]. Επιπλέον, οι αντίστοιχοι πρόσθετοι όροι των αμοιβαίων αυτεπαγωγών των συγκεντρωμένων παραμέτρων, εξαιτίας των ειδώλων, πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να περιγραφεί σωστά η συμπεριφορά στις τερματικές περιοχές.

Οι τιμές της αντίστασης των συγκεντρωμένων παραμέτρων αξιολογούνται λαμβάνοντας υπόψη την ειδική αντίσταση του υλικού του μόνιμου μαγνήτη και το εμβαδόν της διατομής του τμήματος καθώς και το μήκος της ακραίας περιοχής του εικονικού κυκλώματος.

6.9 Δημιουργία 2D ΠΣ με Ολόκληρωτικοδιαφορικές Εξισώσεις.

Η προτεινόμενη συνδυαστική μεθοδολογία Πεπερασμένων Στοιχείων με Κυκλώματα ακραίων περιοχών, η οποία λαμβάνει υπόψη τα δινορεύματα των μόνιμων μαγνητών, δημιουργήθηκε με τη χρήση αρμονικής ανάλυσης πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία (harmonic 2D FEA), η οποία περιλαμβάνει μιγαδικές μεταβλητές καθώς και με τη χρήση FDTD 2D FEA, η οποία περιλαμβάνει τεχνικές με χρονικές βαθμίδες.

Για λόγους απλότητας των εκφράσεων, η διατύπωση της αρμονικής χρονικής αναπαράστασης με βάση τις μιγαδικές μεταβλητές, οι οποίες συμβολίζονται με έντονα γράμματα στις ακόλουθες εξισώσεις και τις χρονικές παραγώγους που αναπαρίστανται μέσω των όρων $j\omega$. Μπορεί να σημειωθεί ότι η αντίστοιχη διατύπωση σχετικά με την αναπαράσταση FDTD δύναται να προκύψει με τη χρήση παρόμοιων αναπτυγμάτων. Η συναρμολόγηση των υπο πινάκων σύμφωνα με τις τεχνικές που εισάχθηκαν, οδηγεί στην ακόλουθη μορφή της συνολικής εξίσωσης του γενικού πίνακα:

$$\begin{bmatrix} S + j\omega D & -F_{V_{mag}}/L_z & 0 & -F_{I_{exc}}N & 0 \\ j\omega R_{exc} & F_{V_{exc}}N & 0 & -1 & R_{exc} & 0 \\ j\omega R_{mag} & F_{V_{mag}} & -1 & 0 & 0 & R_{mag} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & L_{V_{mag}} & 0 & 0 & 0 & L_{I_{mag}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ V_{mag} \\ V_{exc} \\ I_{exc} \\ I_{mag} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{exc}^{sou} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Όπου S ο πίνακας σκληρότητας, D ο πίνακας αποσβέσεων, F_V ο πίνακας αγωγιμότητας, F_I ο πίνακας εμβαδού, R ο πίνακας αντιστάσεων, $\mathbf{1}$ ο μοναδιαίος διαγώνιος πίνακας, L_z το μήκος του ενεργού μαγνητικού κυκλώματος κατά τη διεύθυνση z , N ο αριθμός στροφών του τυλίγματος διέγερσης ενώ οι δείκτες exc και mag υποδηλώνουν το τύλιγμα διέγερσης και το μόνιμο μαγνήτη αντίστοιχα, ενώ το «sou» (source) υποδηλώνει το τύλιγμα πηγής.

Οι υπό πίνακες L_{Imag} και L_{Vmag} δημιουργούνται με βάση την εξίσωση (6.4) και λαμβάνουν υπόψη τις συμμετρίες των μονοπατιών ρεύματος:

$$L_{Imag} = \begin{bmatrix} [1, 0]^{N_{seg} \times (\frac{N_{seg}}{2})} & LINK(i,j) \\ R + j\omega LM & 0 \end{bmatrix}_{N_{seg} \times N_{seg}} \quad (6.11)$$

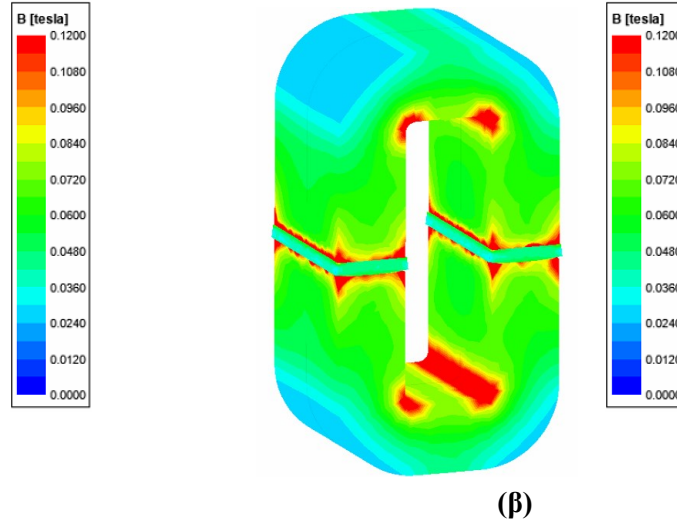
$$L_{Vmag} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ [-1, 0]^{N_{seg} \times (\frac{N_{seg}}{2})} & LINK(i,j) \end{bmatrix}_{N_{seg} \times N_{seg}} \quad (6.12)$$

Όπου $LINK_{(i,j)}$ δηλώνει τον πίνακα συνδέσεων μεταξύ των τμημάτων, δηλαδή για συμμετρικά τμήματα που μοιράζονται το ίδιο ρεύμα οι όροι $LINK_{(i,j)}$ και $LINK_{(i,i)}$ είναι ίσοι με 1.

6.10 Συγκριτική Μελέτη Μεταξύ Πειράματος και – 3D ΠΣ

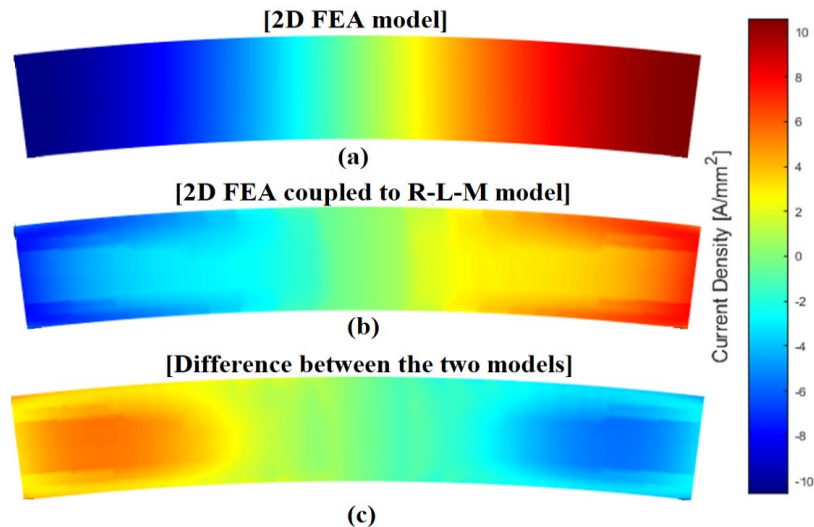
Το μαγνητικό κύκλωμα τροφοδοτείται από ρεύμα ημιτονοειδούς κυματομορφής με στόχο την τιμή του 1 A στα 50 Hz και της τιμής 0.06 A στα 10kHz, οι οποίες αντιστοιχούν στη θεμελιώδη και διακοπτική συχνότητα τροφοδοσίας μίας SPWM σε λογική τιμή κορεσμού στα ελάσματα σιδήρου. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτά έχουν λεπτομερώς εξεταστεί στα παραπάνω κεφάλαια με συγκεντρωτικό πίνακα αποτελεσμάτων τον Πίν. 6.2.

Οι προσομοιωμένες κατανομές πυκνότητας ροής με την προτεινόμενη μεθοδολογία έχουν συγκριθεί με εκείνες του τρισδιάστατου μοντέλου FEA για ρεύμα διέγερσης 1A στα 10 kHz, όπως φαίνεται στις εικόνες του σχήματος 6.12. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν την επαρκή ταύτιση των μεθόδων.



Σχ. 6.12 Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής στο μαγνητικό κύκλωμα για ρεύμα διέγερσης από 1 A στα 10 kHz, (α) προτεινόμενο μοντέλο 2D με το ισοδύναμο κύκλωμα R-L-M. (β) 3D FEA.

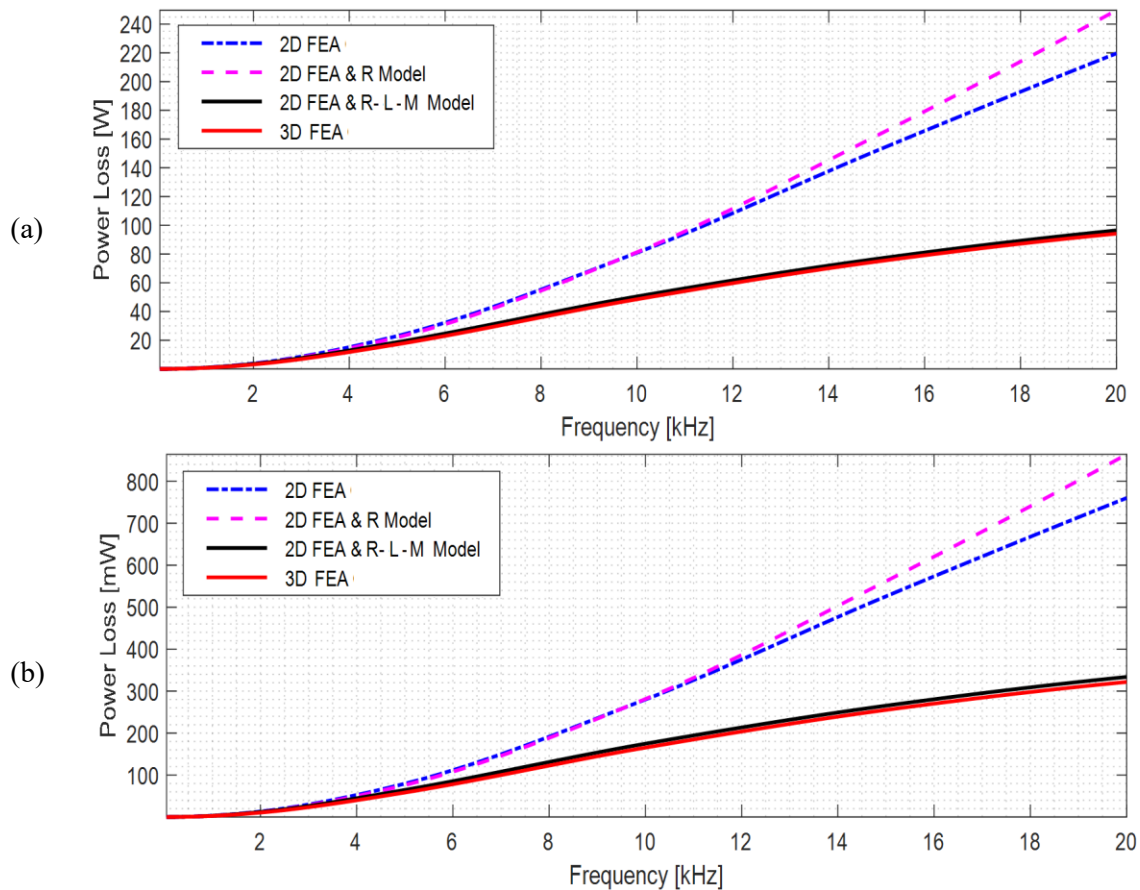
Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζεται σύγκριση της πυκνότητας κατανομής δινορευμάτων στο μαγνήτη για ρεύμα διέγερσης 1 A στα 10 kHz ανάμεσα στο τυπικό μοντέλο 2D FEA και το προτεινόμενο συζευγμένο 2D FEA με το ισοδύναμο κύκλωμα τερματικών περιοχών. Τα αποτελέσματα δείχνουν εξαιρετική διαφορά, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.13 (c).



Σχ. 6.13 Σύγκριση της προσομοιωμένης κατανομής πυκνότητας δινορευμάτων στο μαγνήτη για ρεύμα διέγερσης 1 A στα 10 kHz με τη χρήση διαφορετικών τεχνικών μοντελοποίησης, α: τυπικό μοντέλο 2DFEA, β: προτεινόμενο συζευγμένο 2DFEA με το ισοδύναμο κύκλωμα R-L-M, γ: διαφορά μεταξύ των μοντέλων

Η εφαρμογή της συζευγμένης προτεινόμενης τεχνικής στο εξεταζόμενο κύκλωμα, ανέδειξε σημαντική μείωση της υπολογιστικής προσπάθειας που απαιτείται σε σχέση με την τρισδιάστατη FEA, τόσο σε χώρο μνήμης όσο και σε χρόνο υπολογισμού. Συγκεκριμένα στο 2D μοντέλο, η διακριτοποίηση περιλάμβανε 60.000 στοιχεία, απαιτώντας 28 MB RAM με τη χρήση τεχνικών αραιών πινάκων και 0,35 sec χρόνο εκτέλεσης, ενώ το 3D μοντέλο περιλάμβανε 800.000 στοιχεία που απαιτούσαν 4,6 GB RAM και 264 sec χρόνου εκτέλεσης σε υπολογιστή με CPU Intel i7-4770 @ 3,40 GHz.

Η παρουσία των μαγνητών στο μαγνητικό κύκλωμα και οι απώλειες δινορευμάτων σε συνδυασμό με τη μεταβολή συχνότητας έχουν υπολογιστεί με τη χρήση διαφορετικών μεθοδολογιών μοντελοποίησης για ρεύματα διέγερσης 1A και 0,06 A που παρουσιάζονται στο σχήμα 6.14. Στις εικόνες του σχήματος παρατηρείται σημαντική υπερεκτίμηση των απωλειών ρεύματος μέσω της τυποποιημένης δισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων χωρίς τη σύζευξη με τις εξισώσεις κυκλώματος που αφορούν τις ακραίες περιοχές του μαγνήτη, ενώ, η εξέταση μόνο των αντιστάσεων των ακραίων τμημάτων των μαγνητών δεν μειώνει αποτελεσματικά το περιθώριο λάθους. Στον αντίποδα, η προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει πρακτικά τα ίδια αποτελέσματα απωλειών δινορευμάτων με το τρισδιάστατο μοντέλο. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην καλή ακρίβεια της εκτίμησης της κυριαρχίας των απωλειών δινορευμάτων που αφορά τις συνολικές απώλειες. Αυτή η κυριαρχία καθώς και η καλή ακρίβεια έχει επικυρωθεί μέσω σύγκρισης με πειραματικά αποτελέσματα για τον στόχο που τέθηκε στην τροφοδοσία διέγερσης



Σχ. 6.14 Σύγκριση της προσομοίωσης μεταβολής των απωλειών δινορευμάτων με τη συχνότητα σε μόνιμους μαγνήτες με τη χρήση διαφορετικών μεθοδολογιών: α ρεύμα διέγερσης 1 A, β ρεύμα διέγερσης 0.06 A.

Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι η διαδικασία μοντελοποίησης που προτάθηκε στο παρόν κεφάλαιο είναι πολλά υποσχόμενη για αποδοτική και αποτελεσματική προσομοίωση των απωλειών δινορευμάτων των μαγνητών, οι οποίες δημιουργούνται από τη διακοπτόμενη συχνότητα του φέροντος σήματος που χρησιμοποιείται στη διαμόρφωση πλάτους παλμών σε αντιστροφέα που οδηγεί μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών [6.13].

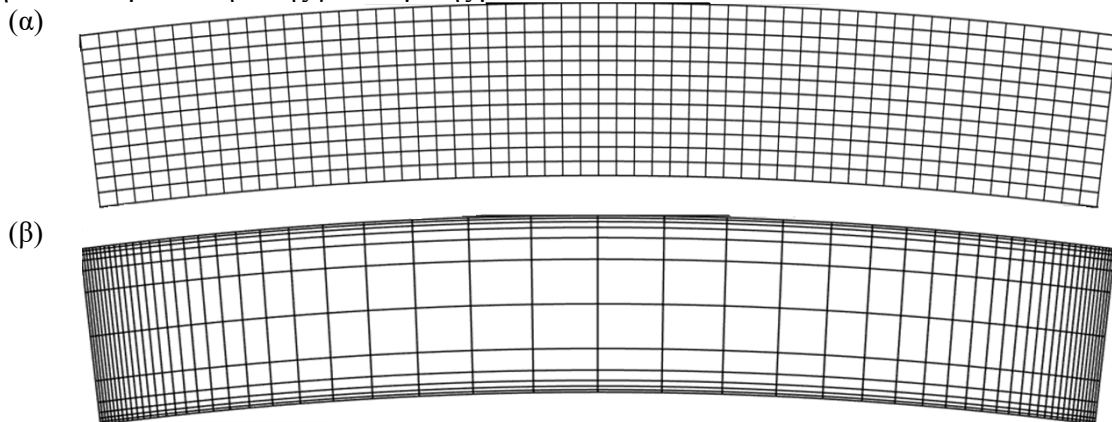
Μία νέα καινοτόμα μεθοδολογία παρουσιάστηκε, η οποία είναι βασισμένη στη σύζευξη του τυπικού 2D FEA και των καινοτόμων εξισώσεων πεδίου συγκεντρωμένων παραμέτρων, οι οποίες με τη σειρά τους περιλαμβάνουν τους όρους αντίστασης, αυτεπαγωγής και αμοιβαία επαγωγής για των ρευμάτων στις ακραίες περιοχές των επιφανειακών μαγνητών.

Η προτεινόμενη τεχνική, η οποία προσφέρει ακριβή αξιολόγηση των απωλειών στους μαγνήτες λόγω της διακοπτόμενης συχνότητας των αντιστροφών και προσφέρει μειωμένο υπολογιστικό φόρτο. Μπορεί επίσης να έχει μεγάλες εφαρμογές στο σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση μηχανών μονίμων μαγνητών υψηλών ταχυτήτων.

6.11 Απώλειες MM σε Μη Ομοιόμορφη Κατανομή Πεδίου

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζεται μία συγκεκριμένη μεθοδολογία που βασίζεται στην προσέγγιση συζευγμένου πεδίου και κυκλώματος για την αναπαράσταση μονίμων μαγνητών στις ηλεκτρικές μηχανές, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών δινορευμάτων εξ αιτίας της διακοπτικής συχνότητας που δημιουργείται από την τροφοδοσία αντιστροφέα PWM. Η εξίσωση που διέπει τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, είναι η εξίσωση διάχυσης η οποία μπορεί να εκφραστεί σε καρτεσιανές συντεταγμένες για την επίλυση του δισδιάστατου προβλήματος. Η χρήση του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, στην εξίσωση διάχυσης με ταυτόχρονη χρήση της κλίσης (grad) του ηλεκτρικού βαθμωτού δυναμικού, παρέχει τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα των άκρων στην περιοχή των μονίμων μαγνητών. Η κατάλληλη τμηματοποίηση των μονίμων μαγνητών επιτρέπει την αποτελεσματική εξέταση των δινορευμάτων που ρέουν σε καλώς ορισμένες διαδρομές στην περιοχή των άκρων του μαγνήτη, ακόμη και κάτω από ασύμμετρες συνθήκες μέσω κατάλληλης σύζευξης ισοδύναμων κυκλωμάτων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί εξωτερικά κυκλώματα τα οποία λαμβάνουν υπόψη τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα των περιοχών των άκρων στις αγωγίμες περιοχές όπως του μαγνήτη και των πηνίων, και συνδυάζονται με την δισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στην Τρισδιάστατη Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων και της προαναφερθείσας μεθοδολογίας πάνω σε πειραματική διάταξη με πυρήνα σχήματος C ανέδειξε την ακρίβεια και την σκοπιμότητα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Μία διαμόρφωση σιδηροπυρήνα σε σχήμα C χρησιμοποιήθηκε για να απεικονιστεί η αποτελεσματικότητα της γενικευμένης μεθόδου.



Σχ. 6.15 Μέθοδοι τμηματοποίησης του Μαγνήτη. (α) Ομοιόμορφη τμηματοποίηση. (β) Τμηματοποίηση με τη χρήση της συνάρτησης του τόξου εφαπτομένης. Ο συνολικός αριθμός των μαγνητικών τμημάτων παραμένει ο ίδιος.

6.12 Μεθοδολογία Εικονικής Τμηματοποίησης Μαγνήτη

Η εικονική τμηματοποίηση του μόνιμου μαγνήτη αρχικά έγινε για την εισαγωγή εξωτερικών κυκλωμάτων με συζευγμένες παραμέτρους, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τις επιδράσεις της 3ης διάστασης. Προκειμένου να αναπαρασταθούν τα δινορεύματα που ρέουν σε καλά καθορισμένες διαδρομές στις περιοχές των άκρων του μαγνήτη, μπορεί να πραγματοποιηθεί εικονική τμηματοποίηση του μόνιμου μαγνήτη κατά μήκος της 2-D τομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.15 (α). Με στόχο την καλύτερη προσαρμογή της τμηματοποίησης στο αντίστοιχο βάθος του επιδερμικού φαινομένου με βάση την εκάστοτε συχνότητα, υιοθετήθηκε μια μη ομοιόμορφη κατάτμηση βασισμένη στη συνάρτηση τόξου εφαπτομένης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.15 (β).

6.13 Σύζευξη 2D ΠΣ με Εξωτερικά Κυκλώματα Τερματικών Περιοχών

Στη γενική περίπτωση των μη συμμετρικών ρευμάτων, η εξίσωση του κύριου κυκλώματος της πτώσης τάσης στα τμήματα μαγνητών έχει την μορφή που περιγράφεται από την εξίσωση (6.4). Εξαιτίας της μη ύπαρξης συμμετρίας, η συνδετικότητα των τμημάτων του μαγνήτη είναι πλήρης. Δηλαδή όλα τα τμήματα συνδέονται και εν δυνάμει μπορεί να κυκλοφορεί ρεύμα μεταξύ τους. Η εξίσωση (6.4) υποστηρίζει αυτή τη συνδετικότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει. Αλλαγές παρουσιάζονται στις εξισώσεις (6.11), (6.12) που καλύπτουν την ικανότητα σύνδεσης των τμημάτων μέσω χρήσης θεωρίας δικτύων σε ηλεκτρικά κυκλώματα.

Για την αντιμετώπιση της εξίσωσης διάχυσης σε συνδυασμό με ενσωματωμένες ποσότητες τάσεων και ρευμάτων, έχει επινοηθεί ένα συγκρότημα μήτρας πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία συναρμολόγησης αποδίδει μια δομή μπλοκ μήτρας, όπως απεικονίζεται στο (7.13). Οι μη διαγώνιες υπομήτρες σε αυτόν τον σχηματισμό αντιστοιχούν στις διασυνδέσεις μεταξύ των στοιχείων πεδίου με τις κυκλωματικές ποσότητες του ρεύματος και της τάσης για τα πηνία διέγερσης, τα πηνία σκίασης (Shading Coils) και τις κυκλωματικές τερματικές συνδέσεις στην τερματική περιοχή του μόνιμου μαγνήτη. Ταυτόχρονα, τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας περικλείουν εκτιμήσεις των απαραίτητων τιμών συγκεντρωμένων παραμέτρων κυκλώματος, όπως η αντίσταση, η αυτεπαγωγή και η αμοιβαία επαγωγή (κυκλωματικών τερματικών συνδέσεων του μόνιμου μαγνήτη). Αυτή η αναπαράσταση δημιουργεί αποτελεσματικά μια σύνδεση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και των συγκεντρωμένων παραμέτρων, επιτρέποντας την επίδραση των τερματικών επιδράσεων του μαγνήτη στην αναπαράσταση του πεδίου 2-D.

Ο συνυπολογισμός των δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες εκτελείται χρησιμοποιώντας μια εξίσωση διάχυσης που εκφράζεται στην καρτεσιανή 2-D διαμόρφωση σε όρους μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, ενώ η κλίση του όρου ηλεκτρικού κλιμακωτού δυναμικού επιτρέπει την εξέταση των τελικών αποτελεσμάτων.

Η συγκέντρωση των υπό-πινάκων χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες τεχνικές, οδηγεί στην ακόλουθη μορφή της συνολικής εξίσωσης πίνακα:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S} + j\omega \mathbf{D} & -\mathbf{F}_{\text{VPM}}/L_z & \mathbf{0} & -\mathbf{F}_{\text{ICu}}N & \mathbf{0} \\ j\omega \mathbf{R}_{\text{Cu}}\mathbf{F}_{\text{VCu}}N & \mathbf{0} & -\mathbf{1} & \mathbf{R}_{\text{Cu}} & \mathbf{0} \\ j\omega \mathbf{R}_{\text{PM}}\mathbf{F}_{\text{VPM}} & -\mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{\text{PM}}\mathbf{L}_{\text{PM}}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_{\text{PM}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & (\mathbf{R} + j\omega \mathbf{LM})_{\text{PMcirc}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{V}_{\text{PM}} \\ \mathbf{V}_{\text{Cu}} \\ \mathbf{I}_{\text{Cu}} \\ \mathbf{I}_{\text{PMcirc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{\text{exc}}^{\text{sou}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

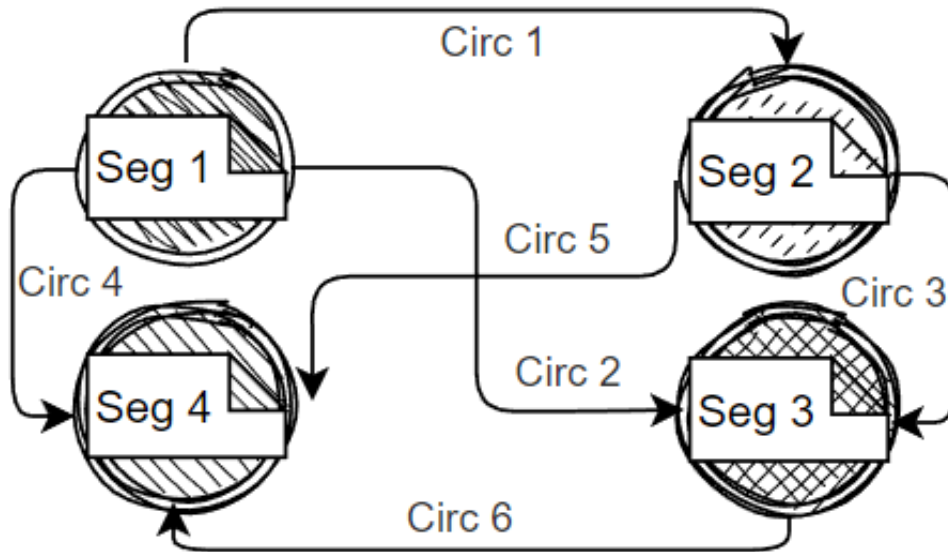
Όπου $\mathbf{S}$ ο πίνακας σκληρότητας, $\mathbf{D}$ ο πίνακας αποσβέσεων, $\mathbf{F}_V$ ο πίνακας αγωγιμότητας, $\mathbf{F}_I$ ο πίνακας εμβαδού, $\mathbf{R}$ ο πίνακας αντιστάσεων, $\mathbf{1}$ ο μοναδιαίος διαγώνιος πίνακας, L_z το μήκος του ενεργού μαγνητικού κυκλώματος κατά τη διεύθυνση z , N ο αριθμός στροφών του τυλίγματος διέγερσης ενώ οι δείκτες Cu και PM υποδηλώνουν το τύλιγμα διέγερσης και το μόνιμο μαγνήτη αντίστοιχα, ενώ το «sou» (source) υποδηλώνει το τύλιγμα πηγής.

6.14 Συνδετικότητα των Εξωτερικών Κυκλώματων των Ακραίων Περιοχών

Η συμβολή των τάσεων αυτεπαγωγής και αμοιβαίας επαγωγής κάθε τμήματος i στην πτώση τάσης σε κάθε κύκλωμα km θεωρείται ως εξής:

$$L_{PM(circ_{km}, seg_i)} = \begin{cases} 1 & \text{if } k=i \\ -1 & \text{if } m=i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.14)$$

Το Σχήμα 6.16 δείχνει μια οπτική αναπαράσταση της διασύνδεσης των θεωρούμενων πλασματικών κυκλωμάτων στην περίπτωση τεσσάρων τμημάτων μαγνητών. Αυτό το διάγραμμα παρέχει μια επισκόπηση των συνολικών διαδρομών ρεύματος μεταξύ των υπό εξέταση τμημάτων.

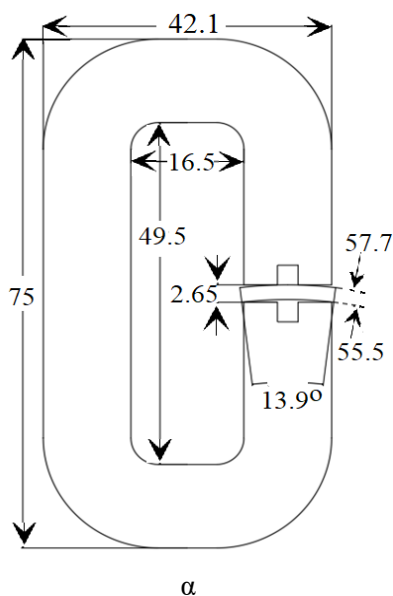


Σχ. 6.16 Αναπαράσταση της διασύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του μαγνήτη με τα αντίστοιχα κυκλώματα, στην περίπτωση τεσσάρων τμημάτων.

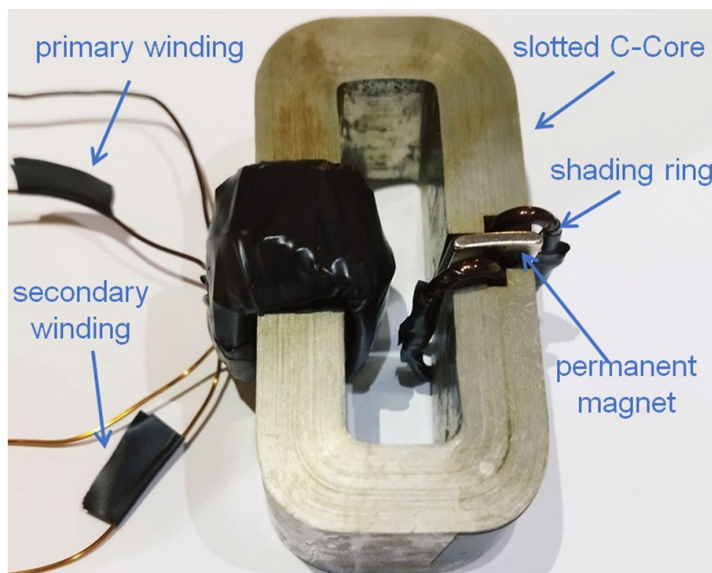
Η θεώρηση της δημιουργίας ενός αυστηρά τριγωνικού δισδιάστατου πίνακα με γραμμές και στήλες τον αριθμό των τμημάτων, επιτρέπει την εκχώρηση μοναδικού δείκτη κυκλώματος σε όλες τις πιθανές διασυνδέσεις μεταξύ των περιοχών. Αυτή η αναπαράσταση πίνακα επιτρέπει σε κάθε τμήμα i , να δημιουργεί συνδέσεις με όλα τα άλλα τμήματα j , καταλήγοντας σε αντίστοιχη μορφή ενός πλήρως συνδεδεμένου μη κατευθυντικού γράφου. Η προτεινόμενη αλγοριθμική υλοποίηση επιτρέπει την επίλυση του δικτύου – κυκλώματος των τερματικών περιοχών με αποδοτικό τρόπο. Ο συνολικός αριθμός ακμών - κυκλωμάτων σε αυτό το γράφημα είναι $(N^2 - N)/2$ όροι, όσα και τα μη μηδενικά στοιχεία του αυστηρά τριγωνικού πίνακα. Σε αυτή τη θεώρηση το N υποδηλώνει τον αριθμό των κόμβων του γραφήματος που αντιστοιχούν στα αντίστοιχα πλασματικά τμήματα μαγνήτη.

6.15 Επαλήθευση της Μεθόδου με Πρότυπο C-Core

Η γεωμετρία και οι κύριες διαστάσεις του κυκλώματος C-Core που εξετάζονται φαίνονται στο Σχ. 6.17(α), ενώ η διαμόρφωση της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο Σχ. 6.17(β). Στη γενική περίπτωση των μη συμμετρικών ρευμάτων, η εξίσωση του κύριου κυκλώματος της πτώσης τάσης στα τμήματα μαγνητών έχει την ακόλουθη μορφή:



α



β

Σχ. 6.17 (α) Εξεταζόμενη γεωμετρία και κύριες διαστάσεις του μαγνητικού κυκλώματος C-core. (β) Διαμόρφωση πειραματικών στοιχείων μαγνητικού κυκλώματος.

6.16 Μεθοδολογία Ανάλυσης 2D ΠΣ

Έχει γίνει η υπόθεση πως η διεύθυνση της πυκνότητας ρεύματος είναι παράλληλη στον άξονα z, στη περίπτωση της απλής δισδιάστατης απεικόνισης πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απουσία πτώσης τάσης των στοιχείων εξ αιτίας του σχηματισμού κλειστού βρόχου δινορευμάτων μέσα στο υλικό. Συνέπεια αυτών, η αύξηση της πυκνότητας ρεύματος μαζί με την αύξηση των απωλειών του μαγνήτη. Στην αντίθετη πλευρά, η τρισδιάστατη απεικόνιση πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια την κατανομή των δινορευμάτων στο μόνιμο μαγνήτη και αυτό το γεγονός επιβεβαιώνεται από τη παρούσα μελέτη.

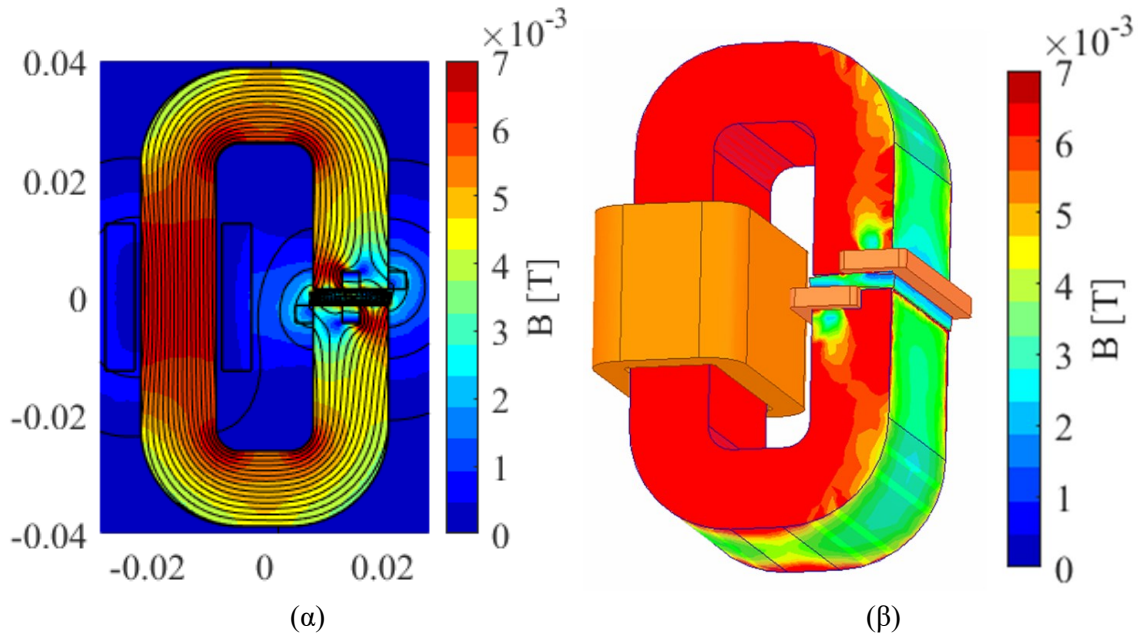
Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει μια διαδικασία δύο σταδίων:

Στο πρώτο βήμα, το πεδίο μόνιμου μαγνήτη αναλύεται μέσω του 2-D μη γραμμικού μαγνητοστατικού FEA στο μαγνητικό κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 6.18(α).

Σε δεύτερο βήμα, τα δινορεύματα που αναπτύσσονται στους μαγνήτες και τους δακτυλίους σκίασης αξιολογούνται χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη συζευγμένη δισδιάστατη αρμονική ανάλυση FEA με εξισώσεις κυκλώματος που αντιστοιχούν στις τερματικές περιοχές του μαγνήτη και στα μέρη του δακτυλίου σκίασης που βρίσκονται έξω από το μαγνητικό κύκλωμα. Σε αυτό το δεύτερο βήμα, λαμβάνονται υπόψιν οι τοπικές διαφορικές διαπερατότητες στα μέρη του πυρήνα, οι οποίες έχουν υπολογιστεί κατά το πρώτο βήμα.

Με βάση αυτή τη θεώρηση οι σχετικά μικρές διακυμάνσεις του πεδίου εξαιτίας της τροφοδοσίας ημιτονοειδούς ρεύματος στο πηνίο διέγερσης, μπορούν να υπολογιστούν όπως φαίνεται στο σχήμα 6.18.

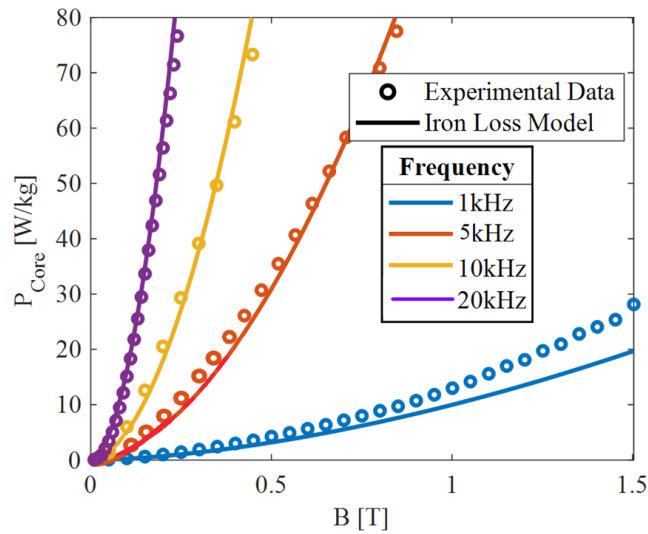
Η ενίσχυση της δισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με τα προτεινόμενα εξωτερικά κυκλώματα, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας ρεύματος των δινορευμάτων λόγω της προστιθέμενης εμπεδησης στα εξωτερικά ηλεκτρικά κυκλώματα. Εκτός αυτού, η αμοιβαία επαγωγή βοηθά στην ψευδο-ανακατασκευή της πυκνότητας του ρεύματος κοντά στις ακραίες περιοχές του μαγνήτη.



Σχ. 6.18 Το υπό μελέτη μαγνητικό κύκλωμα με τους δακτυλίους σκίασης, όταν το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από ρεύμα $I_{exc} = 1 \text{ A}$ με $f = 20 \text{ kHz}$. (α) Κατανομή πεδίου υπολογισμένη με την προτεινόμενη δισδιάστατη συζευγμένη μέθοδο. (β) Κατανομή πεδίου υπολογισμένη από 3D FEA.

6.17 Μέτρηση Χαρακτηριστικών Μαγνητικού Κυκλώματος

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των ελασμάτων πυρήνα, κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο μαγνητικό κύκλωμα που αποτελείται από δύο πανομοιότυπους πυρήνες C αμόρφου σιδήρου πυριτίου χωρίς διάκενο αέρα. Δύο διαφορετικά πηνία που αποτελούνται από 20 σπείρες ακολουθώντας τις ίδιες τροχιές έχουν κατασκευαστεί και τοποθετηθεί ώστε το καθένα να περιβάλλει το μαγνητικό κύκλωμα με στόχο να εφαρμοστούν ως πηνία διέγερσης και ανίχνευσης της επαγόμενης τάσης αντίστοιχα. Όταν το πηνίο διέγερσης τροφοδοτείται από μια ημιτονοειδή πηγή ρεύματος τότε οι μετρούμενες απώλειες πυρήνα για διάφορες συχνότητες και διάφορα επίπεδα πυκνότητας ροής παρουσιάζονται στο σχήμα 6.19.



Σχ. 6.19 Ειδικές απώλειες αμόρφου σιδήρου για διάφορες τιμές μέγιστης πυκνότητας ροής υπό ημιτονοειδή διέγερση σε διάφορες συχνότητες. Τα πειραματικά δεδομένα είναι διακεκομμένα, ενώ η αναπαράσταση απωλειών σύμφωνα με τον τύπο Bertotti σχεδιάζεται με συμπαγείς γραμμές.

Μια τεχνική ελαχιστοποίησης του τετραγωνικού σφάλματος επέτρεψε την αξιολόγηση των αντίστοιχων συντελεστών K_h που αντιστοιχεί σε απώλειες υστέρησης, K_e που αντιστοιχεί σε απώλειες δινορευμάτων και K_c που αντιστοιχεί σε απώλειες ανώμαλων δινορευμάτων (Excess). Με στόχο την αναπαράσταση του αμόρφου πυρήνα που συνθέτει το μαγνητικό κύκλωμα, σύμφωνα με το μοντέλο Bertott. Οι τιμές αυτές παρέχονται στον παρακάτω πίνακα 6.3.

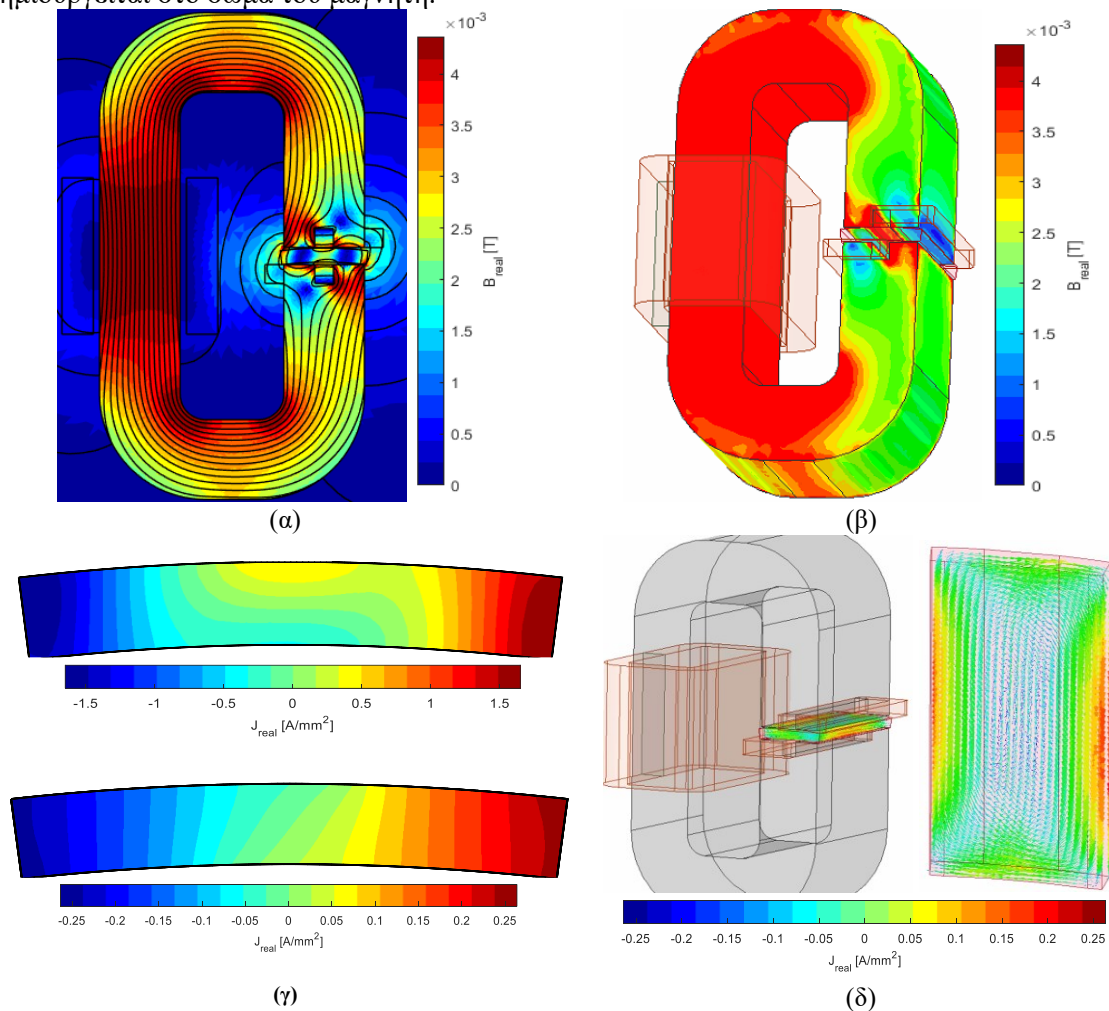
$$P_{\text{core}} = K_h \cdot f |B^a| + K_e \cdot (f |B|)^2 + K_c \cdot (f |B|)^{1.5} \quad (6.15)$$

	a	K_h	K_e	K_c
Units	-	W/(kg·Hz·T ^a)	W/(kg·(Hz·T) ²)	W/(kg·(Hz·T) ^{1.5})
Values	1.514	$7.003 \cdot 10^{-3}$	$2.984 \cdot 10^{-6}$	$5.287 \cdot 10^{-10}$

Πίν. 6.3 Υπολογισμένοι παράγοντες ειδικών απωλειών αμόρφου σιδηρού

6.18 Σύγκριση 2D ΠΣ με 3D ΠΣ

Η προτεινόμενη προσέγγιση συγκρίνεται με την τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε ένα πρωτότυπο σιδηροπυρήνα τύπου C για την επιβεβαίωση της διαδικασίας. Μία μη συμμετρική κατανομή ρευμάτων (ως προς τον άξονα του κέντρο του μαγνήτη) αναμένεται από την υπό μελέτη διάταξη, εφόσον, με την τοποθέτηση της αγωγίμης - βραχυκυκλωμένης σπείρας (πηνίο σκίασης) στο σώμα του πυρήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.20 μία ανομοιόμορφη κατανομή ροής δημιουργείται στο σώμα του μαγνήτη.



Σχ. 6.20 Μαγνητικό κύκλωμα με πηνία σκίασης: Κατανομή πεδίου B στα $I_{\text{exc}}=6\text{mA}$ με $f=10\text{kHz}$ (α)2D. (β)3D. Κατανομή πυκνότητας ρεύματος (γ)2D στα $I_{\text{exc}}=6\text{mA}$ με $f=10\text{kHz}$ (πάνω) και $I_{\text{exc}}=1\text{A}$ με $f=50\text{Hz}$ (κάτω)(δ)3D στα $I_{\text{exc}}=1\text{A}$ με $f=50\text{Hz}$.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της σύγκρισης ανάμεσα στην προτεινόμενη μέθοδο και στην τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δίνονται στον παρακάτω πίνακα 6.4. Τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο μεθόδων βρίσκονται σε αρκετά καλή ταύτιση.

	Quantity	Units	Fundamental Frequency	Switching Frequency
Evaluation technique	Frequency	Hz	50	10000
	Prim. Current (rms)	A	1	0.06
3D FEA	PM Loss With Shading Rings	mW	4.17	12.03
3D FEA	PM Loss Without Shading Rings	mW	4.49	248.4
2D FEA	PM Loss With Shading Rings	mW	5.81	42.54
2D FEA	PM Loss Without Shading Rings	mW	5.92	604.2
2D FEA + RLM	PM Loss With Shading Rings	mW	4.22	14.6
2D FEA + RLM	PM Loss Without Shading Rings	mW	4.73	272.4

Πίν. 6.4 Σύγκριση μοντέλων απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες

6.19 Μέτρηση Απωλειών MM για Διαφορές Διαμόρφωσης της Διάταξης

Η χρήση των δύο μερών του πυρήνα C - που φαίνονται στο σχήμα 6.17 (β) - επιτρέπει τη δημιουργία μιας τοπολογίας που περιλαμβάνει διάκενο αέρα στο οποίο τοποθετούνται οι μαγνήτες, καθώς και κενές σχισμές στις οποίες τοποθετούνται οι αγωγίμοι δακτύλιοι (πηνία σκίασης).

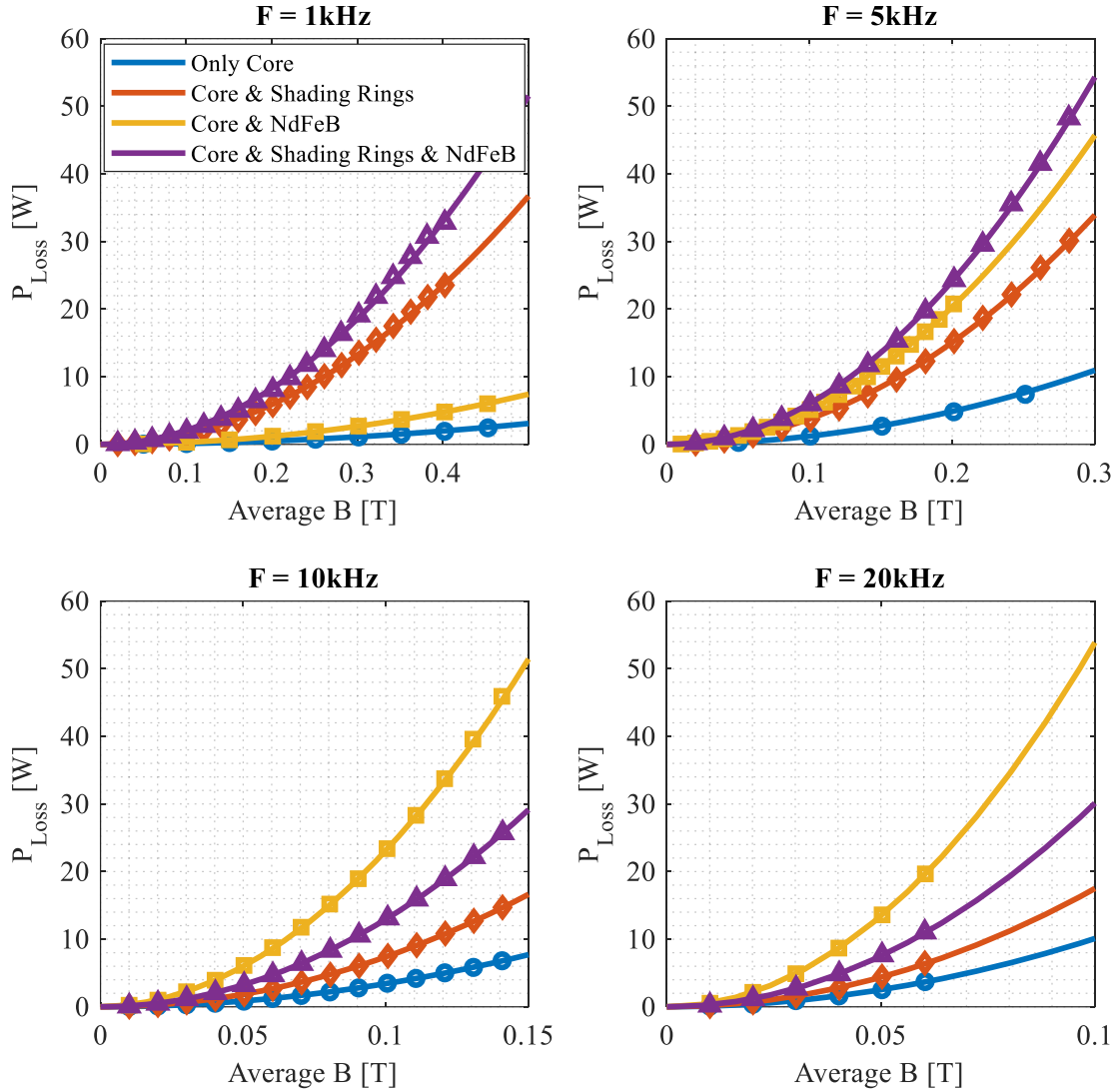
Μετά το χαρακτηρισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων του αμόρφου πυρήνα, έχουν διεξαχθεί πειράματα που περιλαμβάνουν τέσσερις διακριτές διαμορφώσεις μαγνητικού κυκλώματος:

- 1) Η πρώτη διαμόρφωση αποτελείται μόνο από τα δύο μέρη του πυρήνα C.
- 2) Τα δύο μέρη του πυρήνα C και τους αγωγίμους δακτυλίους χωρίς μαγνήτες.
- 3) Τα δύο μέρη του πυρήνα C και τους μαγνήτες χωρίς αγωγίμους δακτυλίους.
- 4) Τα δύο μέρη του πυρήνα C, τους αγωγίμους δακτυλίους και τους μαγνήτες.

Αυτές οι διαμορφώσεις μαγνητικού κυκλώματος σκοπεύουν να τεκμηριώσουν έναν πειραματικό διαχωρισμό των συνεισφορών απώλειας του πυρήνα, των αγωγίμων δακτυλίων και των μαγνητών. Με αυτή τη στόχευση, όταν υπάρχει απουσία μαγνητών μία αντίστοιχη τιμή ρεύματος διέγερσης DC (συνεχούς) υπερτίθεται στο εναλλασσόμενο ρεύμα, προκειμένου να παρέχεται η πόλωση πεδίου στο μαγνητικό κύκλωμα που σε άλλη περίπτωση θα είχε δημιουργηθεί από τους μόνιμους μαγνήτες.

Οι απώλειες που μετρήθηκαν για συχνότητες 1, 5, 10 και 20 kHz ως συνάρτηση της μέσης διακύμανσης της πυκνότητας ροής στο μαγνητικό κύκλωμα φαίνονται στο σχήμα 6.21. Τα γραφήματα στο σχήμα αυτό, δείχνουν ότι τα αποτελέσματα των απωλειών στον πυρήνα, στους μαγνήτες, και στους αγωγίμους δακτυλίους πρακτικά υπερτίθενται σε χαμηλές συχνότητες.

Στις υψηλότερες συχνότητες, δηλαδή σε συχνότητες 10 και 20 kHz (Σχ 6.21), η ανάπτυξη δινορευμάτων στον αγωγίμους δακτυλίους (Shading coil – τυλίγματα σκίασης) περιορίζεται λόγω επιδερμικού φαινομένου. Η ύπαρξη των αγωγίμων δακτυλίων αυξάνει τη ροή σκέδασης (fringe effect) και παράλληλα αναγκάζει τη διέλευση της ροής, διαμέσου της διαγώνιου του μαγνήτη ή ισοδύναμα διαμέσου της μεσαίας κάθετης επιφάνειας του. Η συνολική συμπεριφορά αυτών των φαινομένων μειώνει τις απώλειες που αναπτύσσονται τόσο στους μαγνήτες όσο και στα πηνία σκίασης, με αποτέλεσμα μικρότερες συνολικές απώλειες από ό,τι στην περίπτωση χωρίς πηνία σκίασης.



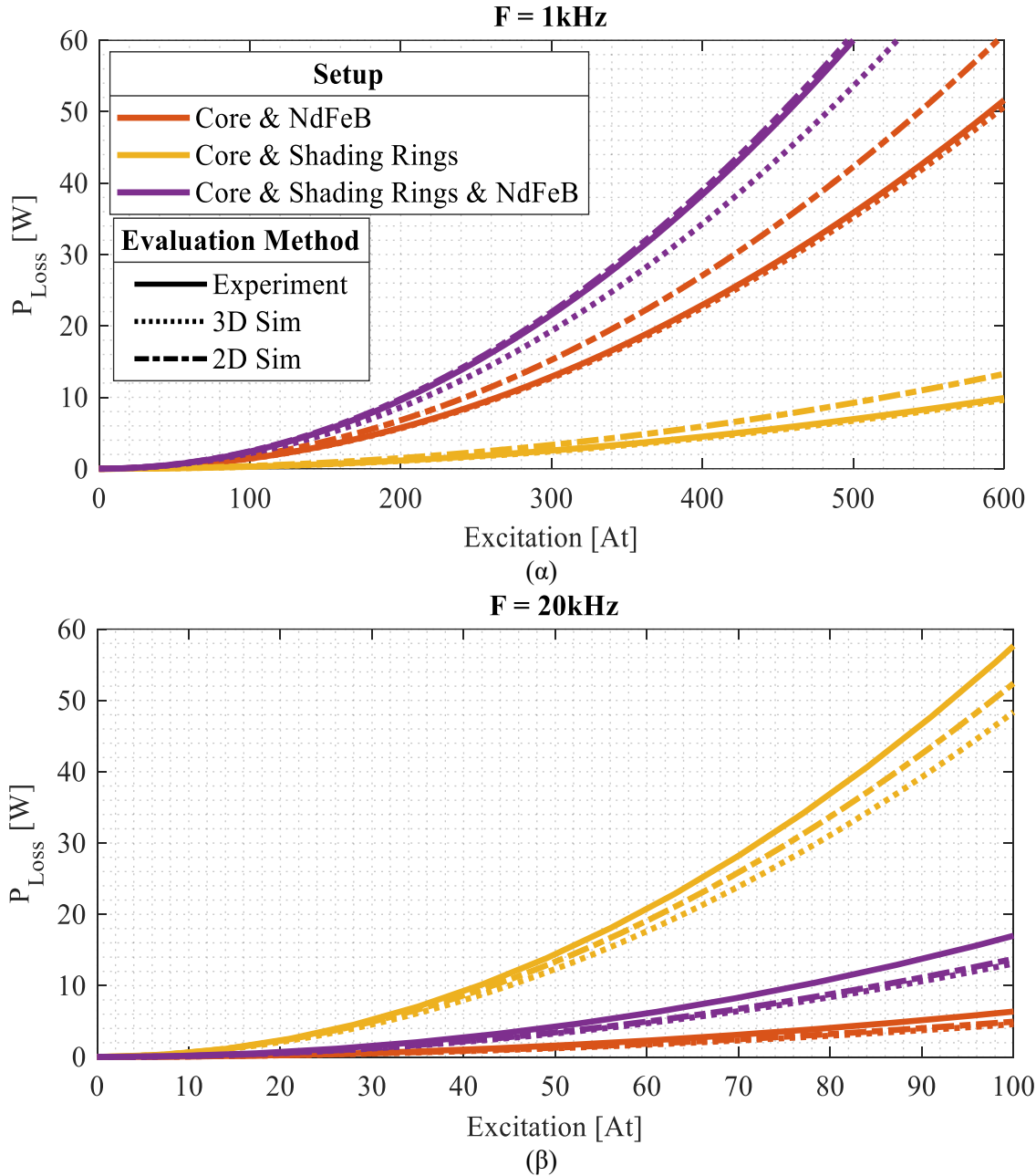
Σχ. 6.21 Συνολικές μετρούμενες απώλειες με μέση πυκνότητα ροής στο μαγνητικό κύκλωμα για διαφορετικές συχνότητες τροφοδοσίας και διαμορφώσεις μαγνητικού κυκλώματος.

6.20 Σύγκριση Μετρούμενων και Προσομοιωμένων Απωλειών

Οι προσομοιωμένες απώλειες στις διαφορετικές διαμορφώσεις μαγνητικού κυκλώματος που προέκυψαν με την προτεινόμενη τεχνική και μία προσομοίωση 3D FEA συγκρίθηκαν με τις μετρούμενες απώλειες στις συχνότητες 1 και 20 kHz όπως φαίνεται στο σχήμα. 6.22 (α) και (β), αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, επιδεικνύεται μια σχετικά καλή ακρίβεια που παρέχεται από τη μεθοδολογία που προτείνεται ακόμη και σε περιοχές υψηλών συχνοτήτων.

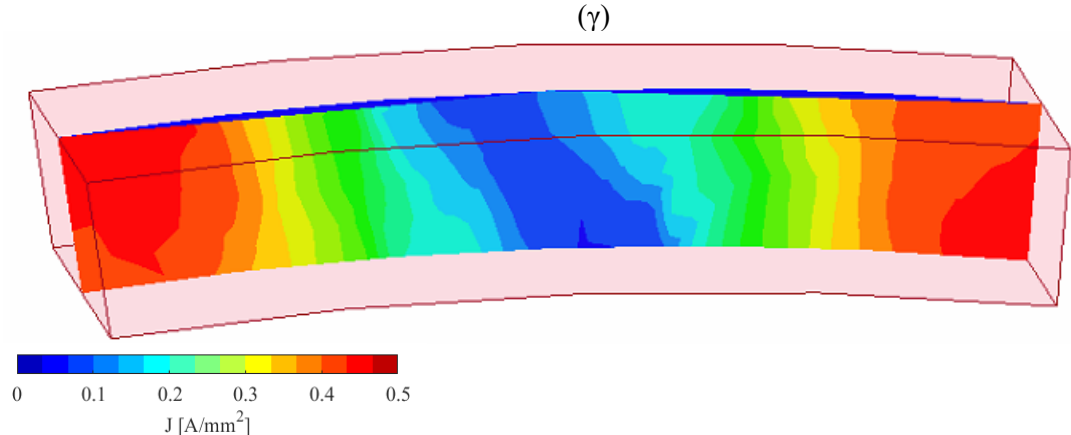
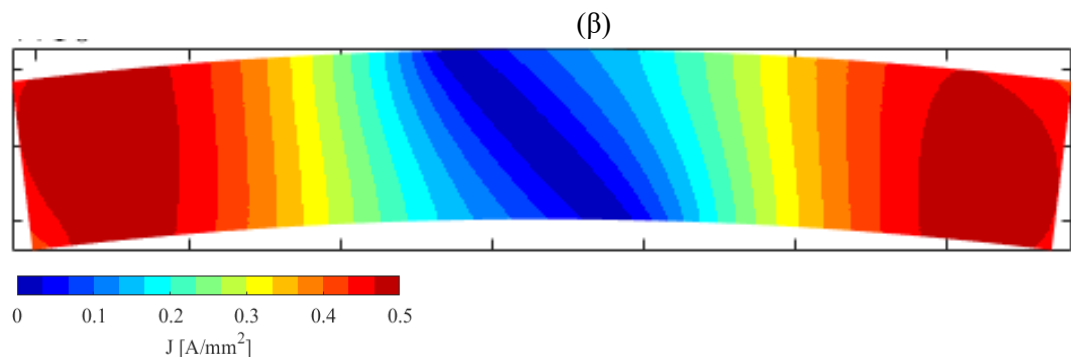
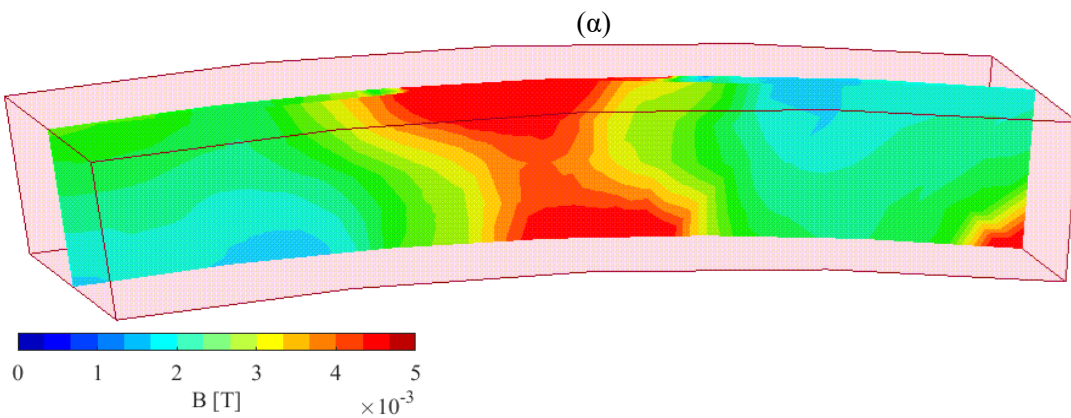
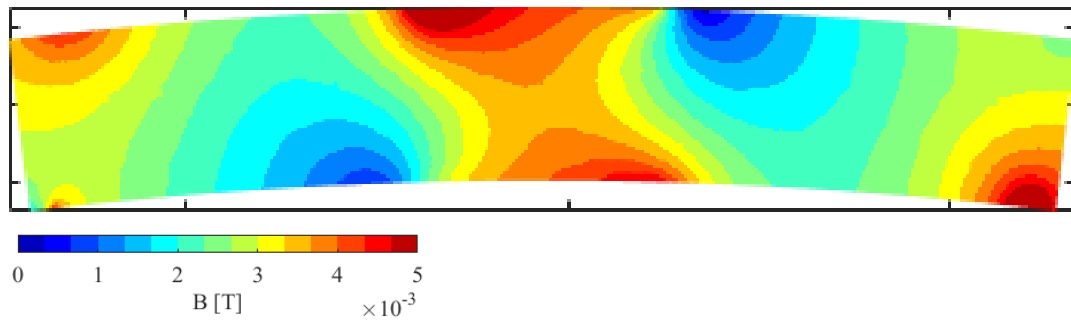
Μπορεί να σημειωθεί ότι η υπερεκτίμηση των απωλειών της προτεινόμενης μεθοδολογίας (2D), που παρατηρείται στην 6.22 (α) για την εκδοχή πειράματος με πυρήνα και μόνιμου μαγνήτη στη συχνότητα 1 kHz μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός πως οι διαδρομές δινορευμάτων σε χαμηλότερες συχνότητες στους μαγνήτες είναι καμπυλόγραμμες ενώ η προτεινόμενη μεθοδολογία υιοθετεί υπόθεση ορθογώνιων διαδρομών.

Η σχετικά χαμηλότερη συχνότητα 1 kHz μπορεί να αντιπροσωπεύει φαινόμενα που σχετίζονται με τις αρμονικές αυλάκων των μηχανών στην περίπτωση της έκτης αρμονικής πεδίου, ενώ η υψηλότερη συχνότητα των 20 kHz μπορεί να αντιπροσωπεύει το εύρος των διακοπτικών συχνοτήτων που σχετίζονται με την τροφοδότηση PWM.



Σχ. 6.22 Συνολικές απώλειες ως συνάρτηση του ρεύματος διέγερσης για τις τρεις διαφορετικές πειραματικές διαμορφώσεις. (α) $f=1\text{kHz}$. (β) $f=20\text{kHz}$. Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν με βάση την 3-D προσομοίωση FEA και την προτεινόμενη τεχνική 2-D συζευγμένης προσομοίωσης.

Μπορεί να σημειωθεί ότι σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, οι απώλειες χαλκού του πηνίου διέγερσης παραλείπονται, εφόσον ως τάση της ισχύος απωλειών λαμβάνεται η ΗΕΔ που επάγεται στο πηνίο ανίχνευσης τάσης - το οποίο διασχίζει μια παρόμοια διαδρομή με το πηνίο διέγερσης - και πολλαπλασιάζεται με το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο διέγερσης. Με αυτόν τον τρόπο, η ίδια μέση πυκνότητα ροής αναπτύσσεται σε όλες τις εξεταζόμενες διαμορφώσεις του μαγνητικού κυκλώματος, καθώς γίνεται ακριβής ρύθμιση του πρωτεύοντος ρεύματος διέγερσης, με βάση τη διακύμανση ροής που μετρείται στο δευτερεύον πηνίο ανίχνευσης.



Σχ. 6.23 Προσομοιωμένα αποτελέσματα στους μαγνήτες που αφορούν το μαγνητικό κύκλωμα με αγώγιμους δακτυλίους και διέγερση 20A στα $f=20$ kHz. (α) Κατανομή πεδίου υπολογισμένη με την προτεινόμενη μέθοδο 2D. (β) Κατανομή πεδίου υπολογισμένη από 3D FEA. (γ) Κατανομές πυκνότητας δινορευμάτων που υπολογίζονται με την προτεινόμενη μέθοδο 2D. (δ) Κατανομές πυκνότητας δινορευμάτων που υπολογίζονται από 3D FEA.

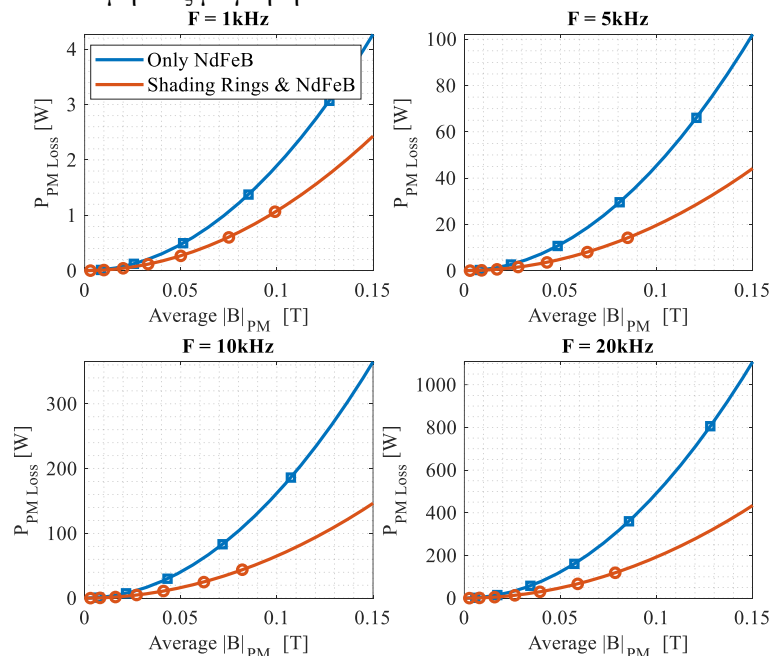
Η παρουσία των αγωγικών δακτυλίων, επιτρέπει την εξέταση ενός στρεφόμενου χωρικά πεδίου και την επίδρασή του στις απώλειες μόνιμου μαγνήτη. Τα τοπικά φαινόμενα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.23 καταδεικνύοντας τις κατανομές της πυκνότητας ροής και των επαγόμενων ρευμάτων στους μαγνήτες για διέγερση 20A στα 20kHz, και συγκρίνονται μεταξύ της προτεινόμενης 2D τεχνικής σύζευξης πεπερασμένων στοιχείων και κυκλωμάτων, με μία τρισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (3D FEA). Παρατηρείται πως τα αποτελέσματα είναι σε καλή συμφωνία τόσο μεταξύ των αριθμητικών μεθόδων όσο και του πειράματος. Αυτά τα σχήματα δείχνουν ότι ένα σημαντικό τμήμα ροής ακολουθεί μια διαγώνια κατεύθυνση, ενώ οι πυκνότητες δινορευμάτων αναπτύσσονται κυρίως κατά μήκος των άκρων του μαγνήτη.

Η εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής 2D στο υπό εξέταση μαγνητικό κύκλωμα είχε ως αποτέλεσμα μια ουσιαστική μείωση της υπολογιστικής προσπάθειας σε σύγκριση με την 3D FEA, όσον αφορά τόσο τον χώρο μνήμης όσο και τον χρόνο υπολογισμού που απαιτείται. Συγκεκριμένα, το 2D μοντέλο περιελάμβανε μια διακριτοποίηση 13092 στοιχείων (με 6587 κόμβους και 1776 εξισώσεις κυκλώματος για 60 τμήματα μαγνητών). Αυτό απαιτούσε 11 MB μνήμης RAM χρησιμοποιώντας τεχνικές αραιής μήτρας και πέτυχε χρόνο εκτέλεσης 0,3 s. Σε αντίστοιχία, το 3D πλέγμα περιλάμβανε 83.374 στοιχεία, με απαίτηση μνήμης RAM 615 MB και απαιτήθηκε χρόνος εκτέλεσης 1393s σε υπολογιστή εξοπλισμένο με CPU Intel i7-4770 @ 3,40 GHz.

Η παρουσία βραχυκυκλωμένων δακτυλίων στο μαγνητικό κύκλωμα προκαλεί μείωση της διακύμανσης ροής στον μαγνήτη και αυξάνει τη ροή σκέδασης. Κατά συνέπεια, η σύγκριση των απωλειών μαγνητών μεταξύ των διαφορετικών διαμορφώσεων μαγνητικού κυκλώματος υπό το ίδιο ρεύμα διέγερσης δεν είναι απολύτως δίκαιη.

Για το λόγο αυτό, το ρεύμα διέγερσης ρυθμίζεται ώστε και στις δύο περιπτώσεις η μέση πυκνότητα ροής στον μαγνήτη να διατηρείται ίδια. Δημιουργώντας μια πιο τίμια σύγκριση απωλειών στους μαγνήτες όταν υπάρχει παρουσία ή απουσία βραχυκυκλωμένων δακτυλίων. Οι απώλειες αυτές παρατίθενται στο σχήμα 6.24 για διάφορες συχνότητες ως συνάρτηση του μέσου μαγνητικού πεδίου στον μαγνήτη.

Τα διαγράμματα σε αυτό το σχήμα δείχνουν ότι το στρεφόμενο χωρικά πεδίο περιλαμβάνει σχεδόν τις μισές απώλειες στους μαγνήτες από το παλμικό πεδίο της ίδιας τιμής σε όλες τις θεωρούμενες συχνότητες, το οποίο είναι συμβατό λαμβάνοντας υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο για τη γεωμετρία του διαμήκους μαγνήτη.



Σχ. 6.24 Προσομοιωμένη διακύμανση απώλειας μαγνήτη με μέση πυκνότητα ροής στον όγκο του μαγνήτη υπό παλμικό και περιστρεφόμενο πεδίο για διαφορετικές συχνότητες.

6.21 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό εισάγεται μια εκτεταμένη μεθοδολογία σύζευξης εξισώσεων κυκλώματος και 2D πεπερασμένων στοιχείων με στόχο την ανάλυση των απωλειών δινορευμάτων στην περίπτωση του ασύμμετρου πεδίου διέγερσης στους μόνιμους μαγνήτες, επιτρέποντας την αποτελεσματική εξέταση των απωλειών οι οποίες σχετίζονται με τις αρμονικές αυλάκων στάτη καθώς και με τη διακοπτική συχνότητα των μετατροπέων ισχύος που τροφοδοτούν ηλεκτρικές μηχανές σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας.

Η προτεινόμενη μέθοδος επιβεβαιώθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με εκείνα που προέκυψαν από τη τρισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων καθώς και με πειραματικές μετρήσεις σε κατάλληλα μαγνητικά κυκλώματα που επιτρέπουν την παρουσία τόσο παλμικού όσο και περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

6.22 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [6.1] Zhaokai Li et al., “Nonlinear Analytical Model for Predicting Magnet Loss in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 8, p. 8203705, Aug. 2022.
- [6.2] Ouamara and F. Dubas, “Permanent-Magnet Eddy-Current Losses: A Global Revision of Calculation and Analysis,” *Mathematical and Computational Applications*, vol. 24, no. 3, p. 67, Jul. 2019.
- [6.3] Egorov et al., “Hysteresis Loss in NdFeB Permanent Magnets in a Permanent Magnet Synchronous Machine,” *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, vol. 69, no. 1, pp. 121–129, Jan. 2022.
- [6.4] L.J. Wu et al., “Analytical Model for Predicting Magnet Loss of Surface-Mounted Permanent Magnet Machines Accounting for Slotting Effect and Load,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 1, pp. 107–117, Jan. 2012.
- [6.5] J. Pyrhonen et al., “Hysteresis Losses in Sintered NdFeB Permanent Magnets in Rotating Electrical Machines,” *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, vol. 62, no. 2, pp. 857–865, Feb. 2015.
- [6.6] S. Nair, et al., “Experimental Validation of 3-D Magnet Eddy Current Loss Prediction in Surface-Mounted Permanent Magnet Machines,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 5, pp. 4380–4388, Sep. 2017.
- [6.7] P. Zhang et al., “Calculation of magnet losses in concentrated-winding permanent magnet synchronous machines using a Computationally Efficient – Finite Element method,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 6, pp. 2534–2532, Nov.-Dec. 2013.
- [6.8] Kladas and A. Razek, “Eddy currents modelling in synchronous machines during starting accounting for the nature of damper end connections,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 1, pp. 186–189, 1988.
- [6.9] Y. Cheng and Y. Shu, “A New Analytical Calculation of the Mutual Inductance of the Coaxial Spiral Rectangular Coils,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 4, pp. 1–6, Apr. 2017.
- [6.10] M. Lambert, et al., “Analytical Calculation of Leakage Inductance for Low-Frequency Transformer Modeling,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 507–515, Jan. 2013.
- [6.11] K.J. Binns, P.J. Lawrenson, *Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems*, Pergamon press, 1973, 344 pages.
- [6.12] Dong-Min Kim et al., “Estimation Method for Rotor Eddy Current Loss in Ultrahigh-Speed Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 2, p. 8103205, Feb. 2021.
- [6.13] K. Yamazaki and Y. Takaki, “Iron Loss Analysis of Permanent Magnet Motors by Considering Minor Hysteresis Loops Caused by Inverters,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, no. 6, p. 1300304, June 2019.
- [6.14] G. Bertotti, “General properties of power losses in soft ferromagnetic materials,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 1, pp. 621–630, Feb. 1988.
- [6.15] G. Sakkas and A. Kladas, “Particular Model for Efficient Switching Frequency Loss Consideration in Surface Mounted Permanent Magnets,” in *2022 IEEE 20th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, Oct. 2022, doi: 10.1109/CEFC55061.2022.9940696
- [6.16] H. Zhang, G. Y. Sizov, J. He, D. M. Ionel, and N. A. O. Demerdash, “Calculation of magnet losses in concentrated-winding permanent- magnet synchronous machines using a computationally efficient finite-element method,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 6, pp. 2524–2532, Nov. 2013.
- [6.17] F. Dubas and A. Rahideh, “Two-dimensional analytical permanent- magnet eddy-current loss calculations in slotless PMSM equipped with surface-inset magnets,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 3, pp. 54–73, Mar. 2014.
- [6.18] Y. Benmessaoud, F. Dubas, and M. Hilairret, “Combining the magnetic equivalent circuit and Maxwell-Fourier method for eddy-current loss calculation,” *Math. Comput. Appl.*, vol. 24, no. 2, p. 60, Jun. 2019.
- [6.19] B. Pan, D. Tao, B. Ge, L. Wang, and P. Hou, “Analysis of eddy current loss of 120-kW high-speed permanent magnet synchronous motor,” *Machines*, vol. 10, no. 5, p. 346, May 2022.

- [6.20] H. Talleb and Z. Ren, "Multiphysics modeling of thin-layer magneto- electric laminate composites using shell element," IEEE Trans. Magn., vol. 52, no. 3, pp. 1-4, Mar. 2016.
- [6.21] Z. Badics, H. Komatsu, Y. Matsumoto, K. Aoki, F. Nakayasu, and K. Miya, "A thin sheet finite element crack model in eddy current NDE," IEEE Trans. Magn., vol. 30, no. 5, pp. 3080-3083, Sep. 1994.
- [6.22] Z. Deng, Z. Yu, Z. Yuan, X. Song, and Y. Kang, "Mechanism of magnetic permeability perturbation in magnetizing-based eddy current nondestructive testing," Sensors, vol. 22, no. 7, p. 2503, Mar. 2022,
- [6.23] Y. Gotoh and N. Takahashi, "Evaluation of detecting method with AC and DC excitations of opposite-side defect in steel using 3-D nonlinear FEM taking the minor loop into account," IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 6, pp. 1622-1625, Jun. 2008.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ

7.1 Εισαγωγή Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μεθοδολογία η οποία συνεισφέρει στον εύρωστο σχεδιασμό ηλεκτρικών μηχανών μόνιμων μαγνητών καθώς θεωρούνται το πιο επιλέξιμο είδος μηχανών σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, εφόσον μπορούν να λειτουργούν αποδοτικά σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Η κατάλληλη επιλογή σε βαθμίδα (grade) μαγνητών και η σχεδίαση της γεωμετρίας του δρομέα με στόχο την ικανοποίηση των κλασικών κριτηρίων σχεδιασμού, όπως η υψηλή απόδοση και η μεγάλη πυκνότητα ισχύος σε μεγάλο εύρος λειτουργικών καταστάσεων, λαμβάνονται υπόψη, καθώς και η ικανότητα αντοχής σε σφάλματα αποδίδοντας βελτιωμένη ευρωστία και διάρκεια ζωής του κινητήρα.

Τα υψηλής τάξης αρμονικά φαινόμενα εισάγουν αυξημένες απώλειες σε λειτουργία υψηλής ταχύτητας όπως οι απώλειες των δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες όταν αυτοί είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα. Η προσέγγιση υπολογισμού των απωλειών αυτών στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται με κατάλληλη προσέγγιση συζευγμένου κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων με τις αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου.

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη αποτελούν μια προτιμώμενη επιλογή σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης - υπό την πραγματική εμφάνιση των πρωτοβουλιών εξ ηλεκτρικής των μεταφορών - λόγω της στιβαρότητάς τους που απορρέει, από την απουσία απαιτήσεων διέγερσης του δρομέα, καθώς και την υψηλότερη απόδοσή τους σε σύγκριση με την εναλλακτική εφαρμογή μηχανών τυλιγμένου δρομέα στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας. Περαιτέρω ιδιαίτερα πλεονεκτήματα, όπως η ευκολότερη θερμική διαχείριση του δρομέα και η ύπαρξη απλοϊκών μηχανισμών που χρησιμοποιούνται για μηχανική στήριξη δρομέα, συνθέτουν την PMSM ως προτιμώμενη επιλογή για περιοχές υψηλής ταχύτητας [7.1]. Ωστόσο, τα υψηλά ρεύματα σφάλματος και οι συνακόλουθοι κίνδυνοι που υπάρχουν στους μόνιμους μαγνήτες, όπως η απομαγνήτιση και το αντίκτυπο της στη συμπεριφορά του κινητηρίου συστήματος, μετά από σφάλμα, είναι συνθήκες που εγείρουν σημαντικές ανησυχίες σχετικά με την κατάλληλη διαμόρφωση, για κάθε κατηγορία εφαρμογών ηλεκτρικής κίνησης [7.2], [7.3].

Τα υψηλότερα αρμονικά φαινόμενα εισάγουν αυξημένες απώλειες σε υψηλές ταχύτητες, όπως απώλειες δινορευμάτων, στις μηχανές επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, οι οποίες απώλειες πρέπει να συνυπολογιστούν και να εξεταστούν [7.4], [7.5]. Οι μηχανές εσωτερικών μόνιμων μαγνητών επιτρέπουν τη μείωση των απωλειών δινορευμάτων, ωστόσο για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας εμφανίζονται περιορισμοί εξαιτίας της μηχανικής δυναμικής συμπεριφοράς του δρομέα [7.6]. Επιπρόσθετα οι αρμονικές συχνότητες της διακοπτικής διαμόρφωσης τροφοδότησης, είναι υπαίτιες σημαντικού μέρους των απωλειών, στους κινητήρες μόνιμων μαγνητών που οδηγούνται από μετατροπείς PWM υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων [7.7], [7.8]. Ομοίως, υψηλές αρμονικές λόγω της γεωμετρίας (αρμονικές αυλακώσεων) και των συνθηκών οδήγησης (αρμονικές PWM), καθώς και η προϋπαρξη DC συνιστώσας πεδίου, λόγω της ροής των μόνιμων μαγνητών, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις απώλειες του πυρήνα κατά τη λειτουργία του κινητήρα. [7.10], [7.16].

Σε αυτό το κεφάλαιο, αναπτύσσεται μεθοδολογία που βασίζεται στα τυπικά κριτήρια σχεδιασμού σε συνδυασμό με τους περιορισμούς της ικανότητας ανοχής σφαλμάτων. Η ανάλυση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέποντας την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη. Υπάρχει θεώρηση των απωλειών εξαιτίας των διακοπτικών φαινομένων μέσω κατάλληλης σύζευξης των εξισώσεων πεδίου και κυκλωμάτων επιτυγχάνοντας κατάλληλο διαχωρισμό των απωλειών σιδήρου των απωλειών μόνιμων μαγνητών στις περιοχές υψηλών συχνοτήτων [7.9]. Μια τέτοια τεχνική

προσφέρει βελτιωμένη υπολογιστική απόδοση της πρόβλεψης απωλειών δινορευμάτων σε μόνιμους μαγνήτες, χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη 2D ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Επιπλέον, η αρχή της υπέρθεσης με τη χρήση της διαφορικής διαπερατότητας του σιδήρου επιτρέπει τον συνυπολογισμό των φαινομένων χαμηλής συχνότητας προσφέροντας ενισχυμένη ακρίβεια υπολογισμών στις απώλειες που σχετίζεται με την υψηλή διακοπτική συχνότητα PWM. Η υπόθεση αυτή, επιτρέπει γρήγορους υπολογισμούς συμβατούς με τη διαδικασία βελτιστοποίησης που υιοθετήθηκε στο [7.10].

Επιπλέον, προτείνεται και επιβεβαιώνεται ένα μοντέλο απωλειών σιδήρου που ισχύει υπό ημιτονοειδή μαγνήτιση, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της προ υπάρχουσας DC συνιστώσας πεδίου και των επιδράσεων υψηλής συχνότητας, όπως το επιδερμικό φαινόμενο. Ένας εκτενής χαρακτηρισμός τόσο σε δείγματα λωρίδων Epstein όσο και σε δακτυλιοειδείς πυρήνες επιτρέπει την εξαγωγή ενός παράγοντα της συνεισφοράς που έχει το προ υπάρχον DC πεδίο, σύμφωνα με την παρατήρηση της αύξησης των απωλειών σιδήρου στις μετρήσεις. Παράλληλα ένας παράγοντας αντιστάθμισης επιδερμικού φαινομένου, υιοθετείται για να ληφθούν υπόψη φαινόμενα υψηλής συχνότητας [7.15]. Με αυτόν τον τρόπο, η αποσύνθεση απωλειών του μαγνητικού κυκλώματος σε απώλειες σιδήρου και μαγνήτη είναι έγκυρη και επιτρέπει δίκαιη σύγκριση των υπολογισμένων και μετρούμενων απωλειών μόνιμου μαγνήτη.

Οι κίνδυνοι απομαγνητισμού λόγω σημαντικών ρευμάτων σφάλματος και αντίστοιχων θερμικών φορτίων αποφεύγονται και εξετάζονται ζητήματα ικανότητας εξασθένησης της ροής σε υψηλές ταχύτητες με την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών σχεδίασης πολλών επιπέδων.

7.2 Υπολογισμός απωλειών πυρήνα

Κύριος στόχος για την ύπαρξη ακριβούς υπολογισμού των απωλειών πυρήνα είναι η εξασφάλιση της ακρίβειας του διαχωρισμού των απωλειών μεταξύ πυρήνα – μαγνήτη.

7.2.1 Απώλειες πυρήνα χωρίς προϋπάρχον πεδίο πόλωσης

Στη διαδικασία σχεδιασμού ηλεκτρικών κινητήρων και γεννητριών, οι απώλειες ισχύος του πυρήνα του στάτη υπολογίζονται τυπικά χρησιμοποιώντας συντελεστές απώλειας που προκύπτουν με βάση τα δεδομένα του προμηθευτή ελασμάτων σίδηρο-πυρήνα από την τυπική μαγνητική μέθοδο μέτρησης μέσω ενός πλαισίου Epstein, που ρυθμίζεται από το Διεθνές Πρότυπο IEC 60404-2 [7.11].

Η αρχή αυτής της μετρητικής διαδικασίας βασίζεται στην αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή κατασκευασμένου από ελάσματα τύπου Epstein, με μήκος 300 mm (± 20 mm) και πλάτος 30 mm ($\pm 0,2$ mm), όταν αυτός λειτουργεί σε κενό φορτίο. Η δημιουργία του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος πραγματοποιείται από την εισαγωγή των ελασμάτων στα τέσσερα σκέλη του πλαισίου Epstein.

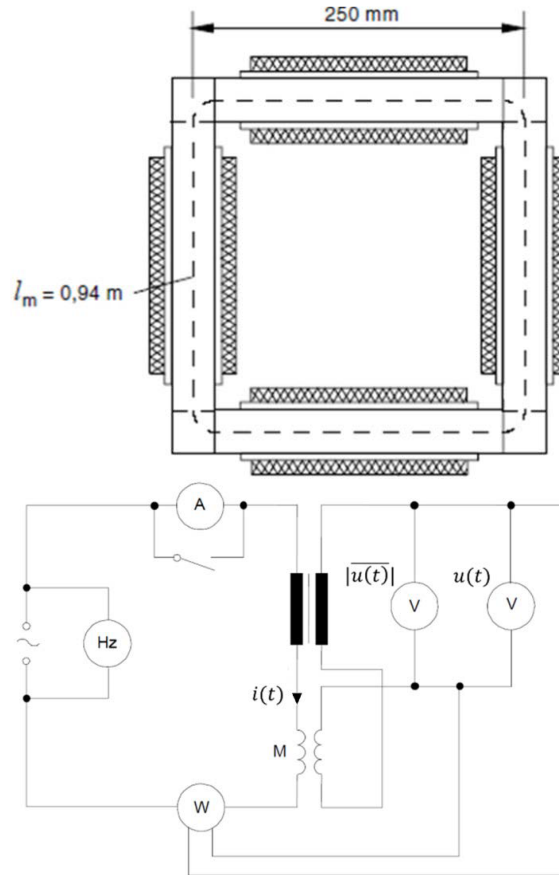
Σε κάθε σκέλος του πλαισίου, υπάρχουν σει πρωτογενών περιελίξεων διεγερμένων με εναλλασσόμενο ρεύμα για να μαγνητίζουν τα δείγματα και δευτερεύουσες περιελίξεις για την ανίχνευση της επαγόμενης τάσης ανάλογη με τη μαγνητική πόλωση των μετρούμενων δειγμάτων, σύμφωνα με τον νόμο επαγωγής του Faraday όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1.

Οι συνθήκες μέτρησης που περιγράφονται στο IEC 60404-2 προσδιορίζουν ότι το σχήμα της κυματομορφής πόλωσης, πρέπει να είναι ημιτονοειδές και να μην ασκείται εξωτερική πίεση στα δείγματα [7.11]. Ένας εμπορικά διαθέσιμος εξοπλισμός δοκιμής φύλλων ηλεκτρικού χάλυβα που παρουσιάζει προηγμένες δυνατότητες, και είναι κατάλληλος για δύο είδη μέτρησης: των λωρίδων Epstein καθώς και των δειγμάτων δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης, χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων των δειγμάτων.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση δοκιμών Epstein και δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης πυρήνα έγιναν στο εύρος 0.01-1.9T όσον αφορά την πόλωση του μαγνητικού πεδίου, με τη συχνότητα της ημιτονοειδούς διέγερσης να είναι έως τα 20 kHz. Το συγκεκριμένο σύστημα τροφοδοσίας ρυθμίζει το ρεύμα διέγερσης έτσι ώστε να ληφθεί μια ημιτονοειδής

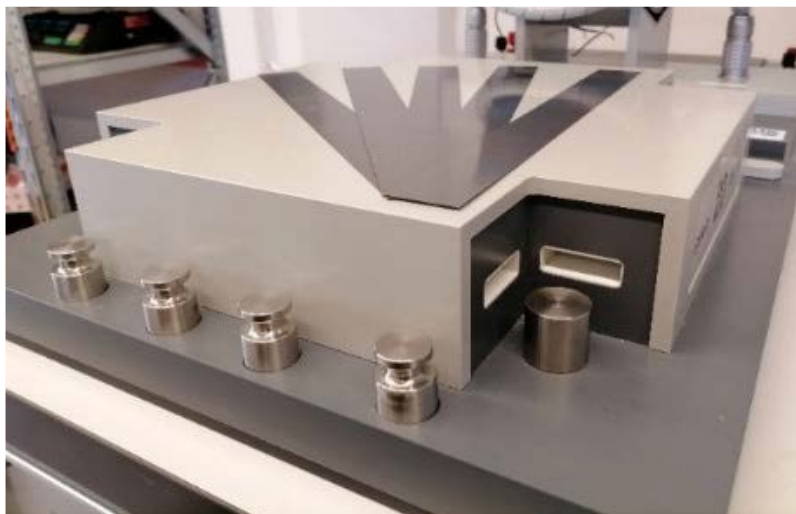
κυματομορφή πόλωσης (πυκνότητα μαγνητικού πεδίου) σύμφωνα στο IEC 60404-2. Το εύρος συχνοτήτων των μετρήσεων δεν υπερβαίνει τα 200 kHz, όπως προτείνεται σε αυτό το πρότυπο, ενώ διασφαλίζεται πιστοποιημένη ακρίβεια καθώς χρησιμοποιείται εμπορικά διαθέσιμος εξοπλισμός. Το σχήμα 7.2 δείχνει το πλαίσιο Epstein μαζί με τα δείγματα χάλυβα Epstein τοποθετείται πάνω του.

α



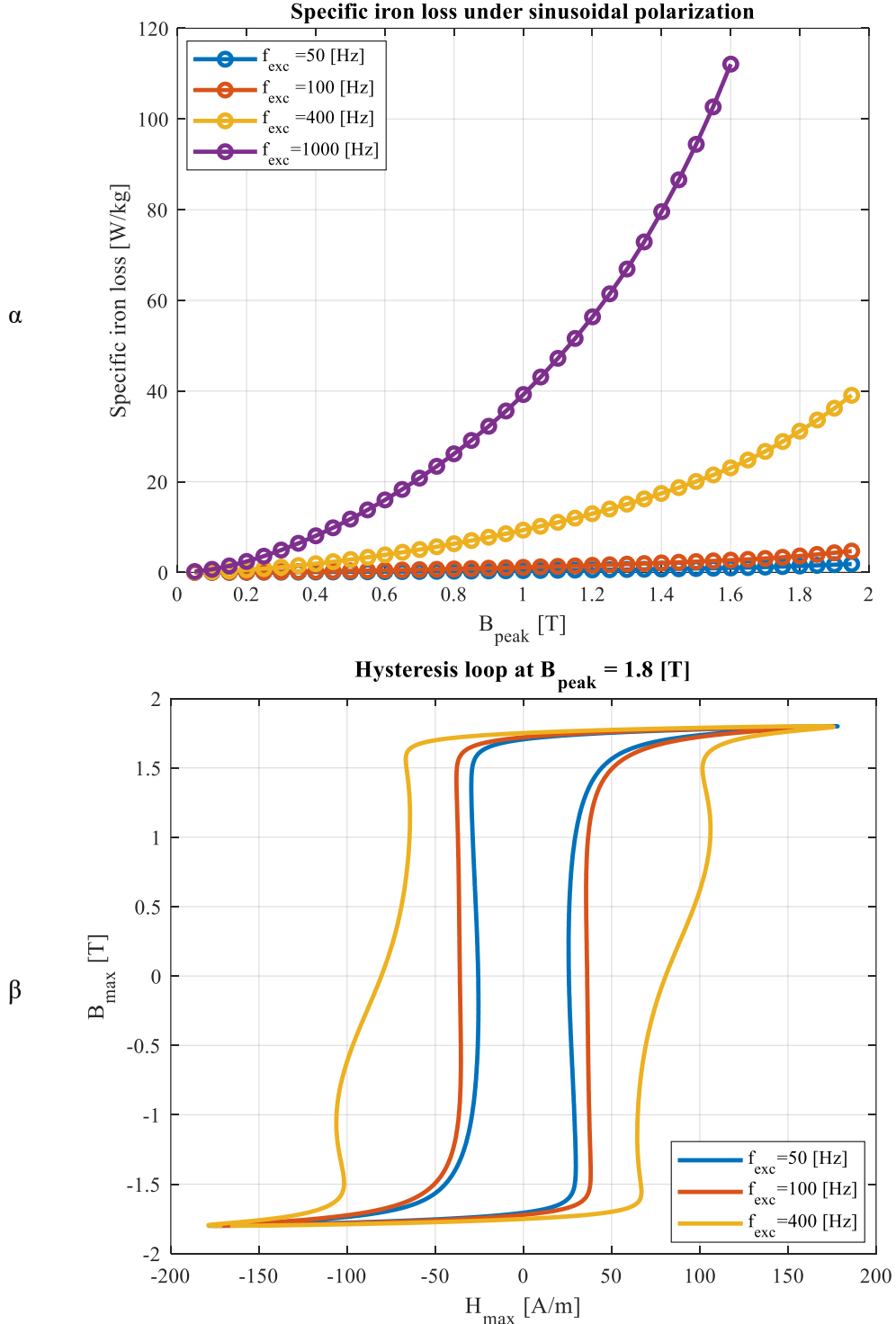
β

Σχ. 7.1 (α) Διαστάσεις διάταξης Epstein μέτρησης απωλειών πυρήνα (β) Διάγραμμα ισodύναμον ηλεκτρικού κυκλώματος της διάταξης αυτής.



Σχ. 7.2 Η πειραματική τράπεζα Epstein και λωρίδες ηλεκτρικού χάλυβα.

Το υπό διερεύνηση δείγμα πυρήνα είναι ένας ηλεκτρικός χάλυβας προσανατολισμένων κόκκων (GO) 0,27 mm, ο οποίος μετριέται μέχρι το σημείο κορεσμού ($J_{sat} = 1.98$ T) και έως τα 20 kHz. Το σχήμα 7.3(α) δείχνει τις μετρούμενες ειδικές απώλειες σιδήρου, για ημιτονοειδείς διακυμάνσεις διαφόρων μεγεθών πόλωσης και διαφόρων συχνοτήτων. Οι μετρούμενες μεταβολές των αντίστοιχων βρόχων υστέρησης δίνονται σχήμα 7.3 (β).



Σχ. 7.3 Διαστάσεις ελασμάτων από ηλεκτρικό χάλυβα GO 0,27 mm. (α) ειδικές απώλειες σιδήρου σε δείγματα Epstein. (β) Αντίστοιχοι βρόχοι υστέρησης στους 1.8 T. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

7.2.2 Απώλειες πυρήνα με προϋπάρχον πεδίο πόλωσης

Η δοκιμή πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Πρώτον, το δείγμα τροφοδοτείται από την εναλλασσόμενη τάση και το ρεύμα χωρίς πυκνότητα ροής DC Bias. Η ένταση πεδίου $\mathbf{H}(t)$ και η πυκνότητα ροής $\mathbf{B}(t)$ μπορούν να ληφθούν ως:

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i(t)}{l_m} \quad (7.1)$$

$$B(t) = A \cdot \frac{\int u(t) dt}{N_2} \quad (7.2)$$

όπου N_1 είναι ο αριθμός ενεργών τυλιγμάτων του πρωτεύοντος πηνίου (διέγερσης), N_2 είναι ο αριθμός ενεργών τυλιγμάτων του δευτερεύοντος πηνίου (ανίχνευσης), $i(t)$ είναι το στιγμιαίο ρεύμα του πηνίου διέγερσης, l_m είναι το μέσο μήκος μαγνητικής διαδρομής της διαμόρφωσης του δείγματος, $u(t)$ είναι η στιγμιαία τάση του πηνίου ανίχνευσης και το A είναι η ενεργός επιφάνεια της διατομής του δείγματος.

Για την παροχή μιας πυκνότητας ροής DC στο δείγμα, προστίθεται ένα ρεύμα πόλωσης συνεχούς ρεύματος ως παράλληλη μετατόπιση συνεχούς ρεύματος στο ρεύμα διέγερσης εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτήν την περίπτωση, η μέγιστη ένταση πεδίου $\mathbf{H}_{\max}$ μπορεί να ληφθεί ως:

$$H_{\max} = H_{dc} + \max(H(t)) = \frac{N_1 \cdot I_{DC} + \max(N_1 \cdot i(t))}{l_m} \quad (7.3)$$

Για κάθε δοκιμή, με ή χωρίς πυκνότητα ροής DC Bias, οι απώλειες σιδήρου μπορούν να ληφθούν με βάση τη συσχέτιση του εναλλασσόμενου ρεύματος και τάσης ως εξής:

$$P_{fe} = \frac{1}{\rho \cdot V \cdot T} \int_0^T i(t) \cdot u(t) dt \quad (7.4)$$

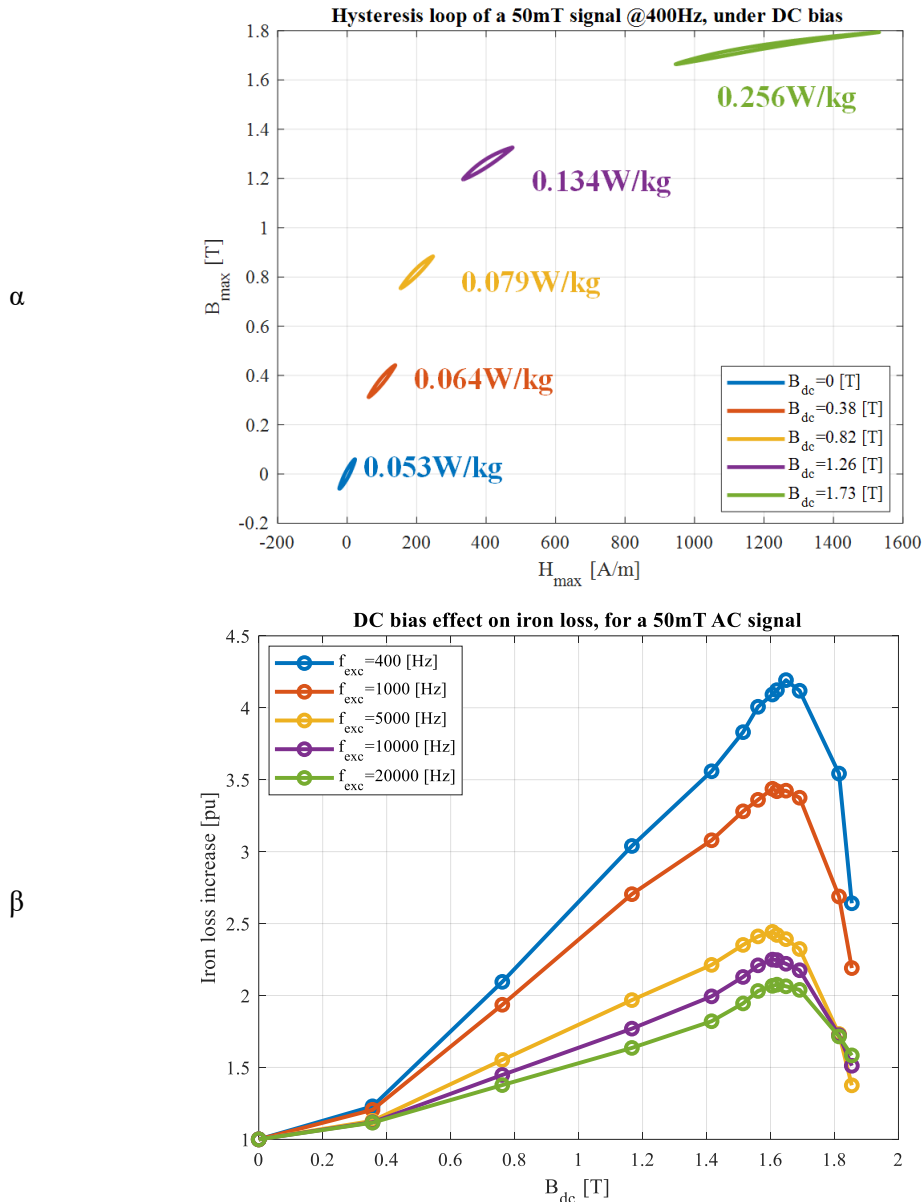
όπου ρ είναι η πυκνότητα του δοκιμίου, V είναι ο όγκος του δοκιμίου και T είναι η περίοδος του ρεύματος και της τάσης.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο που περιγράφεται παραπάνω, μπορούν να μετρηθούν οι απώλειες του σιδήρου υπό διαφορετικές πυκνότητες ροής DC Bias (προϋπάρχουν πεδίο DC). Κάθε μέτρηση επαναλήφθηκε τρεις φορές, με το σφάλμα επανάληψης να είναι κάτω από 0,3% σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Η θερμοκρασία του μετρούμενου δείγματος παρακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων χρησιμοποιώντας ένα θερμοστοιχείο τύπου K συνδεδεμένο στο δείγμα, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι απώλειες σιδήρου δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία του δείγματος ή του πηνίου. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου.

Στο σχήμα 7.4(α) καταδεικνύονται οι μετρούμενοι βρόχοι υστέρησης σε ελάσματα σιδήρου για διέγερση εναλλασσόμενου ρεύματος 50 mT, κάτω από διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας ροής πόλωσης συνεχούς ρεύματος ($\mathbf{B}_{DC}$) σε συχνότητα 400 Hz ενώ η μετρούμενες διακυμάνσεις των ειδικών απωλειών σιδήρου για διάφορες τιμές $\mathbf{B}_{DC}$ και διάφορες συχνότητες παρουσιάζονται στο σχήμα 7.4(β). Στα σχήματα αυτά απεικονίζεται να έφτνει η σχετική διαπερατότητα του ηλεκτρικού χάλυβα καθώς η προστιθέμενη πυκνότητα ροής DC Bias αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω της συνθήκης προ-μαγνητισμού που μετακινεί τα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών στην μικροδομή του υλικού, πριν από την εφαρμογή του πεδίου εναλλασσόμενου ρεύματος.

Το πεδίο της προ υπάρχουσας συνεχούς διέγερσης επηρεάζει τις απώλειες υστέρησης στις δοκιμές εναλλασσόμενου ρεύματος. Καθώς το πεδίο διέγερσης εναλλασσόμενου ρεύματος αυξάνεται, η προ υπάρχουσα συνεισφορά του DC πεδίου γίνεται λιγότερο σημαντική, με αποτέλεσμα σχεδόν αμελητέα επίδραση του φαινομένου DC Bias πάνω από 1,6 T. Οι απώλειες σιδήρου υπό DC Bias αυξήθηκαν έως και 12 φορές, σε σύγκριση με ένα απομαγνητισμένο δείγμα,

και η μέγιστη τιμή του λόγου αύξησης των σχετικών απωλειών σιδήρου $P_{\text{Fe(DC)}} / P_{\text{Fe}}$ βρίσκεται συνήθως σε μια τιμή όπου το προ υπάρχον πεδίο είναι κοντά στο γόνατο μαγνήτισης.



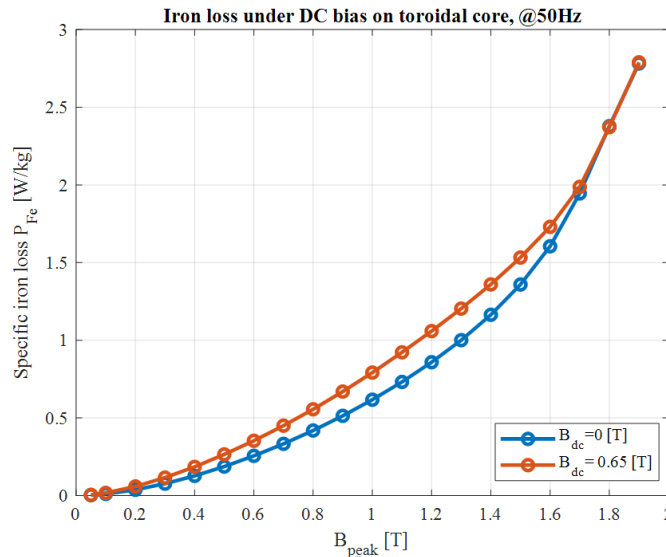
Σχ. 7.4 Μετρήσεις σε ελάσματα για ένα σήμα AC 50 mT υπό πυκνότητα ροής πόλωσης DC B_{dc} . α) Βρόχοι υστέρησης για διαφορετικά B_{dc} σε συχνότητα 400 Hz β) Διακύμανση ειδικής απώλειας σιδήρου για διαφορετικές B_{dc} και διαφορετικές συχνότητες. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πάνω από το σημείο του γόνατος, όλες οι μαγνητικές περιοχές (Magnetic Domains) ευθυγραμμίζονται με τον κύριο άξονα μαγνήτισης και συμβαίνει μόνο περιστροφή της μαγνητικής ροπής με στόχο την περαιτέρω ευθυγράμμιση της μαγνήτισης με τη γωνία του πεδίου διέγερσης. Το αποτέλεσμα του μηχανισμού αυτού είναι οι λιγότερες απώλειες σε περιοχές έντονου κορεσμού. Το φαινόμενο προ-μαγνήτισμού (DC Bias) επηρεάζει κυρίως την κατανομή των μαγνητικών περιοχών, με αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στις απώλειες εξαιτίας της υστέρησης.

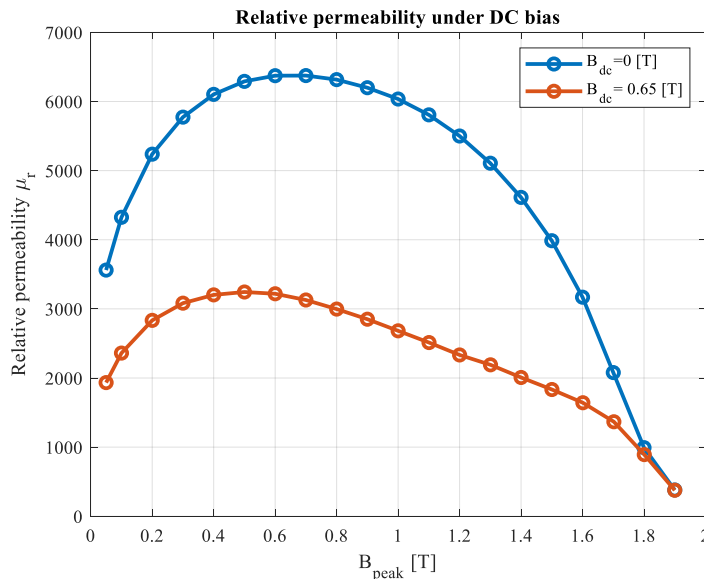
Το σχήμα 7.4 (β) δείχνει την αναλογία σχετικής αύξησης των ειδικών απωλειών σιδήρου υπό προ υπάρχουσας ροής DC Bias σε σχέση με τις απώλειες του δείγματος με μηδενικό πεδίο

συνεχούς ρεύματος. Η τιμή αιχμής φαίνεται να μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται ένεκα της αύξησης της κυριαρχίας – των σχετικά ανεπηρέαστων από ύπαρξη ή μη συνεχούς ροής – δυναμικών απωλειών στις περιοχές υψηλών συχνοτήτων. Παρόμοια ευρήματα σχετικά με τις μετρήσεις απώλειας σιδήρου υπό DC Bias έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία [7.13], [7.14]

Σε επόμενο βήμα, παρουσιάζονται οι μετρούμενες απώλειες σιδήρου σε δείγμα δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης μαγνητικού πυρήνα, το οποίο κατασκευάστηκε με χρήση των ίδιων ελασμάτων χάλυβα. Οι ειδικές απώλειες σιδήρου που μετρήθηκαν σε συχνότητα 50 Hz με ή χωρίς την ύπαρξη συνεχούς πεδίου 0.65 T φαίνονται στο σχήμα 7.5. Η αντίστοιχη σχετική αύξηση των απωλειών ως συνάρτηση του πλάτους διακύμανσης της μαγνητικής επαγωγής δίνεται στο ίδιο σχήμα.



Σχ. 7.5 Μετρημένες απώλειες σιδήρου σε έναν πυρήνα δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης ελασμάτων σιδήρου υπό ημιτονοειδή διέγερση 50 Hz με και χωρίς πυκνότητα ροής πόλωσης DC ($B_{dc}=0,65T$). Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.



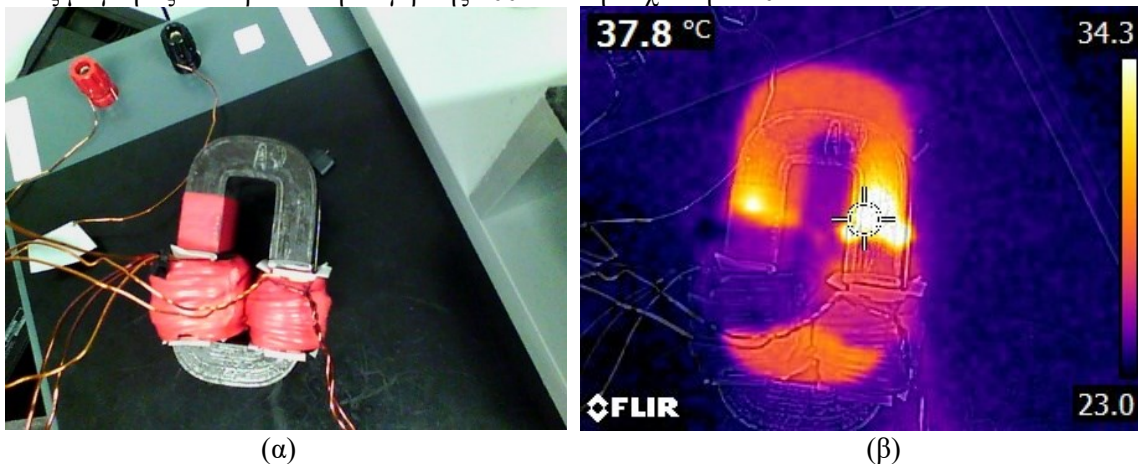
Σχ. 7.6 Σχετική διακύμανση αυξητικής διαπερατότητας που μετράται σε πυρήνα δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης ελασμάτων σιδήρου με και χωρίς πυκνότητα ροής πόλωσης DC ($B_{dc}=0,65T$). Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

Τέλος, οι διακυμάνσεις της σχετικής διαπερατότητας για DC Bias 0.65 T αναγράφονται στο σχήμα 7.6. Τα σχήματα αποτελεσμάτων μετρήσεων για την περίπτωση της δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης δείχνουν παρόμοια επίδραση της προϋπάρχουσας πυκνότητας ροής, στις απώλειες σιδήρου με αυτή που παρατηρήθηκε προηγουμένως σε μετρήσεις στο πλαίσιο Epstein. Οι απώλειες στην δακτυλιοειδή διαμόρφωση πυρήνα αυξάνονται αντιστοίχως σημαντικά σε ένα ευρύ φάσμα τιμών πυκνότητας ροής. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, η παράβλεψη της επίδρασης της προϋπάρχουσας ροής στην απώλεια σιδήρου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση των απωλειών σιδήρου σε ελάσματα χάλυβα.

7.3 Μέτρηση Απωλειών σε Μαγνητικό Κύκλωμα C-Core

Οι απώλειες δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες μπορεί να είναι σημαντικές σε δρομέα μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών στις εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης και οι επιπτώσεις-επιδράσεις της διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα οδήγησης, οφείλουν να ληφθούν υπόψη για να διασφαλιστεί η ευρωστία του κινητήρα, ιδίως σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας [7.7]. Για τον πειραματικό προσδιορισμό των απωλειών αυτών, έχει δημιουργηθεί ένα κατάλληλο μαγνητικό κύκλωμα τύπου C-Core, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7(α). Το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από δύο λαμιναρισμένους πυρήνες σιδήρου γεωμετρίας U που περιβάλλονται από δύο τυλίγματα χαλκού. Το ένα χρησιμεύει ως πρωτεύον τύλιγμα διέγερσης και το άλλο ως δευτερεύον τύλιγμα ανίχνευσης της επαγόμενης τάσης, και τα δύο έχουν τον ίδιο αριθμό στρωφών. Επιπλέον, δύο πανομοιότυποι μόνιμοι μαγνήτες παρεμβάλλονται μεταξύ των πυρήνων. Το βάρος του ελασματοποιημένου τμήματος ηλεκτρικού χάλυβα είναι 540 g, ενώ το συνολικό βάρος του υλικού μόνιμου μαγνήτη είναι 9,4 g.

Ο σκοπός μιας τέτοιας διαμόρφωσης είναι να επιτευχθούν παρόμοιες πυκνότητες μαγνητικού πεδίου στις περιοχές του μόνιμου μαγνήτη με αυτές που συναντώνται στους δρομείς επιφανειακών μόνιμων μαγνητών και στη συνέχεια να μετρηθούν οι απώλειες δινορευμάτων στους μαγνήτες. Το σχήμα 7.7(β) δείχνει την κατανομή θερμοκρασίας που καταγράφεται στην πειραματική ρύθμιση κατά τη διάρκεια αυτών των μετρήσεων, υποδεικνύοντας μια σημαντική αύξηση θερμοκρασίας στους μαγνήτες σε περίπτωση διέγερσης 200 At στη συχνότητα 10 kHz.



Σχ. 7.7 Μαγνητικό κύκλωμα δομής C-Core που περιλαμβάνει δύο ενδιάμεσους μόνιμους μαγνήτες ποιότητας NdFeB42UH. α) Βρόχοι υστέρησης για διαφορετικά Bdc σε συχνότητα 400 Hz β) Θερμική κάμερα Εικόνα του μαγνητικού κυκλώματος υπό διέγερση 200 At στα 10 kHz. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

7.4 Διαδικασία διαχωρισμού απώλειες

Οι συνολικές μετρούμενες απώλειες συστήματος, οι οποίες περιλαμβάνουν τις απώλειες χαλκού περιέλιξης, τις απώλειες σιδήρου και τις απώλειες μόνιμου μαγνήτη, διαχωρίζονται στις προαναφερθείσες συνιστώσες απωλειών, σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία.

1) Απώλειες χαλκού: Ο διαχωρισμός των απωλειών χαλκού μπορεί να επιτευχθεί μέσω της υλοποίησης δύο πηνίων περιελίξεων. Το πρωτεύον τύλιγμα χρησιμοποιείται ως τύλιγμα διέγερσης, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα χρησιμοποιείται για ανίχνευση επαγόμενης τάσης. Η ισχύς που υπολογίζεται συνδυάζοντας το ρεύμα του πηνίου διέγερσης με τη επαγόμενη τάση του πηνίου ανίχνευσης, παρέχει μια καλή προσέγγιση των απωλειών του σιδήρου και των απωλειών του μόνιμου μαγνήτη. Η ισχύς εισόδου του πρωτεύοντος τυλίγματος περιλαμβάνει επίσης τις απώλειες χαλκού του πηνίου διέγερσης. Αυτή η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν με παρόμοιο τρόπο στις μετρήσεις του πλαισίου Epstein με στόχο να διαχωρίσει τις απώλειες χαλκού από τις απώλειες του ελασματοποιημένου σιδήρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του μαγνητικού κυκλώματος C-Core, η θέση της περιέλιξης του πηνίου ανίχνευσης έχει μεγάλη σημασία. Στην περίπτωση των μετρήσεων απωλειών με τη μέθοδο του πλαισίου Epstein, το δευτερεύον πηνίο βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στον πυρήνα του σιδήρου, καθώς οι ροές σκέδασης είναι αμελητέες λόγω της απουσίας διακένων. Σε αντιστοιχία, στο μαγνητικό κύκλωμα C-Core, οι ροές σκέδασης μπορεί να είναι σχετικά σημαντικές λόγω των υπάρχοντων διακένων αέρα που είναι απαραίτητα για την τοποθέτηση των μαγνητών.

Από αυτή την άποψη, οι σπείρες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά για να μειωθούν οι σκεδάσεις ροής, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με την ταυτόχρονη περιέλιξη των δύο πηνίων.

2) Απώλειες ελασματοποιημένου σιδήρου: Για να διαχωριστούν οι απώλειες του ελασματοποιημένου σιδήρου από τις απώλειες μόνιμου μαγνήτη, δημιουργείται μια κατάλληλη προϋπάρχουσα συνεχής μαγνήτιση από το πηνίο διέγερσης όταν δεν υπάρχει παρουσία των μόνιμων μαγνητών, παρέχοντας παρόμοια κατανομή μαγνητικού πεδίου στα τμήματα του ελασματοποιημένου σιδήρου με αυτό που υπάρχει υπό την παρουσία των μαγνητών.

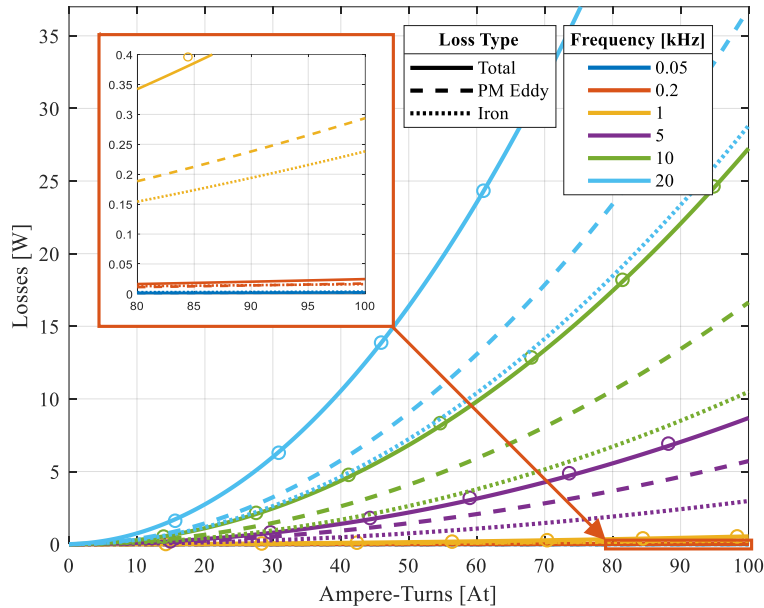
Από αυτή την άποψη, και σύμφωνα με τη διαδικασία που εξηγήθηκε προηγουμένως, η ισχύς που υπολογίζεται με συνδυασμό του ρεύματος διέγερσης και της επαγόμενης τάσης στο δευτερεύον τυλίγμα, παρέχει μια καλή προσέγγιση των απωλειών του ελασματοποιημένου σιδήρου.

3) Απώλειες μόνιμου μαγνήτη: Παρουσία των μόνιμων μαγνητών εφαρμόζοντας μόνο εναλλασσόμενο ρεύμα διέγερσης, η ισχύς που υπολογίζεται από το ρεύμα διέγερσης σε συνδυασμό με την επαγόμενη τάση του δευτερεύοντος πηνίου, αντιστοιχεί στις απώλειες του ελασματοποιημένου σιδήρου και στις απώλειες του μόνιμου μαγνήτη. Μέσω αφαίρεσης των δύο αυτών συνιστωσών απωλειών, ο διαχωρισμός των απωλειών του μόνιμου μαγνήτη επιτυγχάνεται.

7.5 Μείωση Απωλειών Μόνιμου Μαγνήτη μέσω Θωράκισης

Η διαμόρφωση δρομέα επιφανειακών μόνιμων μαγνητών παρουσιάζει πλεονεκτήματα στην εδραίωση πεδίου στο διάκενο και είναι ιδιαίτερα υποσχόμενη σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης υψηλής ταχύτητας. Ωστόσο, σε μια τέτοια διαμόρφωση, οι μαγνήτες είναι περισσότερο εκτεθειμένοι στα υψηλότερα αρμονικά φαινόμενα που εμφανίζονται στο πεδίο του διακένου, λόγω των αρμονικών που προκαλούνται από την περιέλιξη του στάτη, των αυλακώσεων του μαγνητικού κυκλώματος και των επιδράσεων της διακοπτικής συχνότητας του μετατροπέα, σε σύγκριση με μία διαμόρφωση εσωτερικών μόνιμων μαγνητών.

Κατά συνέπεια, οι απώλειες δινορευμάτων, οι οποίες είναι σχετικά μικρές σε περιοχές χαμηλών συχνοτήτων, μπορούν να αυξηθούν σημαντικά λόγω υψηλότερων τάξεων αρμονικών με αποτέλεσμα όχι μόνο τη συνολική μείωση της απόδοσης του κινητήρα αλλά και την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλώντας κινδύνους απομαγνήτισης. Οι μετρημένες απωλείες της διάταξης του ελασματοποιημένου σιδήρου με την ύπαρξη μόνιμου μαγνήτη κράματος SmCo βαθμίδας 28 χωρίς θωράκιση για διάφορες συχνότητες διάφορα ρεύματα διέγερσης φαίνεται στο σχήμα 7.8. Η απότομη αύξηση στις απώλειες παρατηρείται σε περιοχές συχνοτήτων μεγαλύτερων των 5 kHz και οφείλεται κυρίως στις απωλειών δινορευμάτων του μόνιμου μαγνήτη.



Σχ. 7.8 Μετρημένη διακύμανση συνολικών απωλειών με ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης, καθώς και διαχωρισμός σε ελασματοποιημένο σίδηρο και απώλειες μόνιμου μαγνήτη για μαγνήτη SmCo βαθμού 28 χωρίς θωράκιση για διαφορετικές συχνότητες με ρεύμα διέγερσης

Για την αποφυγή προβλημάτων που προκύπτουν λόγω των απωλειών των μόνιμων μαγνητών στις περιοχές υψηλών συχνοτήτων, είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί, η πιθανή θωράκιση στα υψηλότερα αρμονικά φαινόμενα και η επίπτωση αυτής στις αντίστοιχες απώλειες δινορεύματων των μαγνητών. Η θωράκιση αυτή μπορεί να προέλθει με κατάλληλη επίστρωση των μαγνητών ή την εναπόθεση κατάλληλων φύλλων υψηλής αγωγιμότητας στην κοντινή περιοχή τους. Η γνώση της αποτελεσματικότητας, της ικανότητας και των επιπτώσεων της θωράκισης είναι σημαντική στο στάδιο σχεδιασμού του κινητήρα.

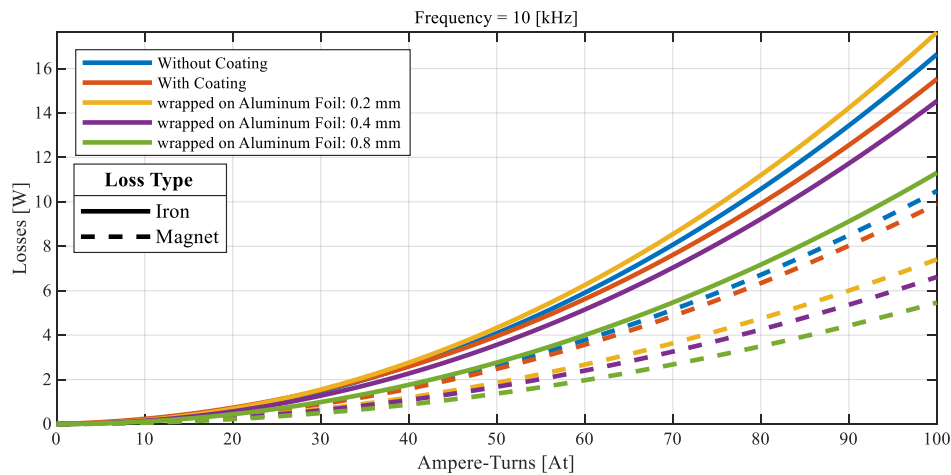
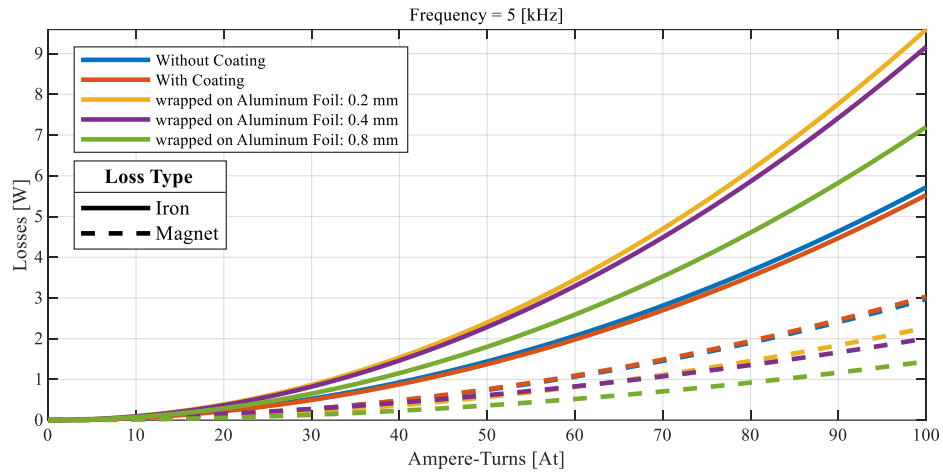
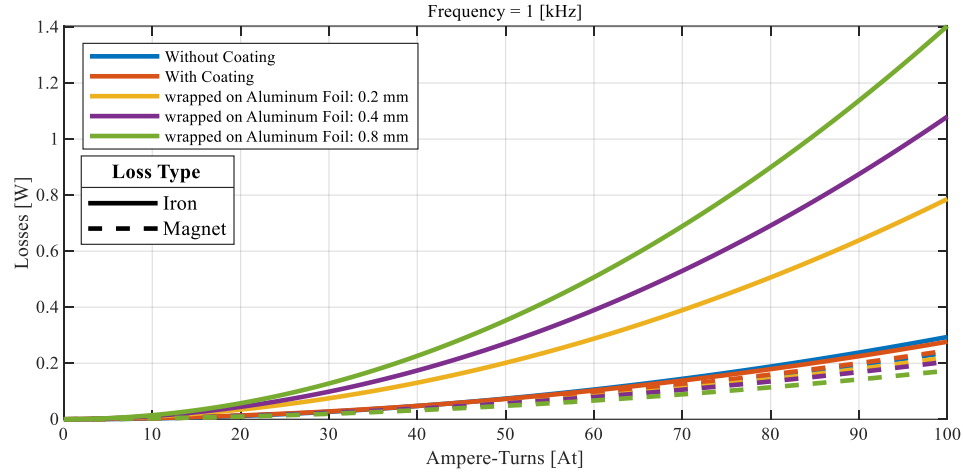
Χρησιμοποιώντας το μαγνητικό κύκλωμα C-Core, εξετάστηκαν οι ακόλουθες περιπτώσεις θωράκισης:

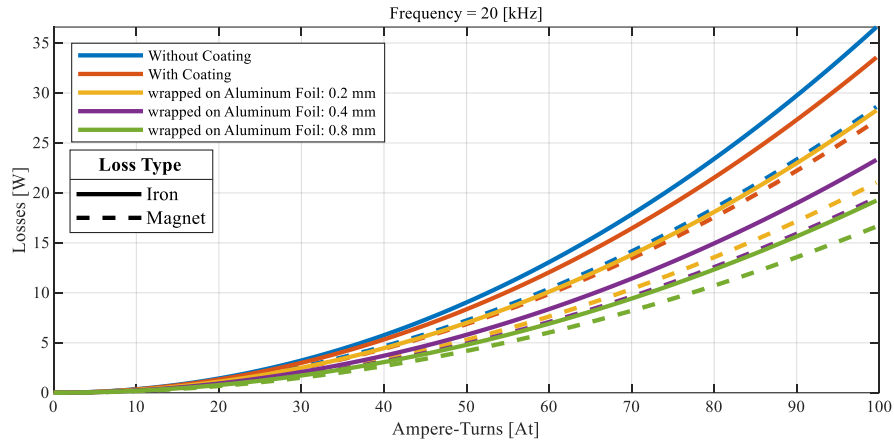
1) Αλουμινόχαρτο: Σε αυτή την περίπτωση, ο μόνιμος μαγνήτης είναι καλυμμένος με ταινία αλουμινίου. Τα δινορεύματα που αναπτύχθηκαν στο αλουμινόχαρτο μειώνουν τη διακύμανση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του μαγνήτη. Ωστόσο, σε χαμηλή συχνότητα 1 kHz, ο συνολικός αντίκτυπος στις απώλειες δεν είναι ενεργητικός, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.9(α). Η αποτελεσματικότητα θωράκισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα λόγω του επιδερμικού φαινομένου και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των απωλειών σε περιοχές υψηλών συχνοτήτων, απαιτώντας, ωστόσο, σημαντικό πάχος των φύλλων αλουμινίου, γεγονός που μπορεί να είναι ασύμβατο με το διάκενο αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.9 (δ).

2) Φύλλο υψηλής διαπερατότητας: Παρόμοιες μετρήσεις απωλειών έχουν πραγματοποιηθεί για μαγνήτη NdFeB42 βαθμίδας UH με διακύμανση του ρεύματος διέγερσης για διαφορετικές τεχνικές θωράκισης και συχνότητες, και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 7.10. Εκτός από ένα αλουμίνιο πλάτους 0.4 mm αλουμινόχαρτο, έχουν εξεταστεί τα αποτελέσματα θωράκισης των μαγνητών που καλύπτονται από ένα υψηλής διαπερατότητας φύλλο χάλυβα ηλεκτρικού σιδήρου πλάτους 0.2 mm τοποθετημένο κάθετα προς την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και από μια επικάλυψη τύπου NiCuNi 5 μm. Τα ληφθέντα αποτελέσματα δείχνουν ότι το φύλλο αλουμινίου παρέχει την πιο αποτελεσματική θωράκιση.

3) Μαγνητική επίστρωση: Η πρόληψη της διάβρωσης και η θωράκιση του πεδίου διαταραχών μπορούν να επιτευχθούν με την εισαγωγή μιας επικάλυψης υψηλής διαπερατότητας στον μόνιμο μαγνήτη. Σε αυτή την περίπτωση, το πεδίο παραμονής του μαγνήτη μπορεί να μειωθεί ελαφρώς λόγω των βραχυκυκλωμένων γραμμών πεδίου στα πλευρικά μέρη της υψηλής διαπερατής

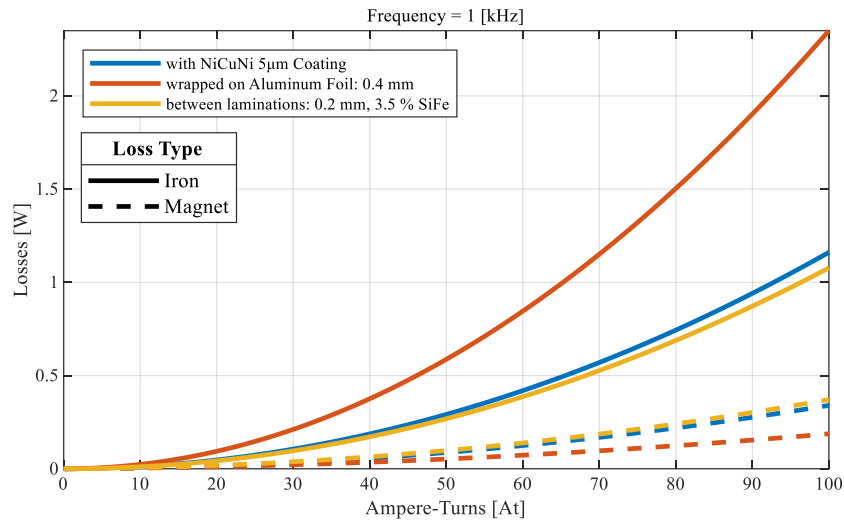
επίστρωσης. Η μοντελοποίηση μιας τέτοιας επίστρωσης μπορεί να αποτελέσει πρόκληση, λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων σε σύγκριση με τον συνολικό όγκο μαγνήτη. Ωστόσο, αποτελεσματική προσεγγιστική μοντελοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί μέσω κατάλληλων βηματικών αλλαγών στο μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό στη θέση επίστρωσης, με την εφαρμογή τεχνικών μοντελοποίησης λεπτής στρώσης [7.18].



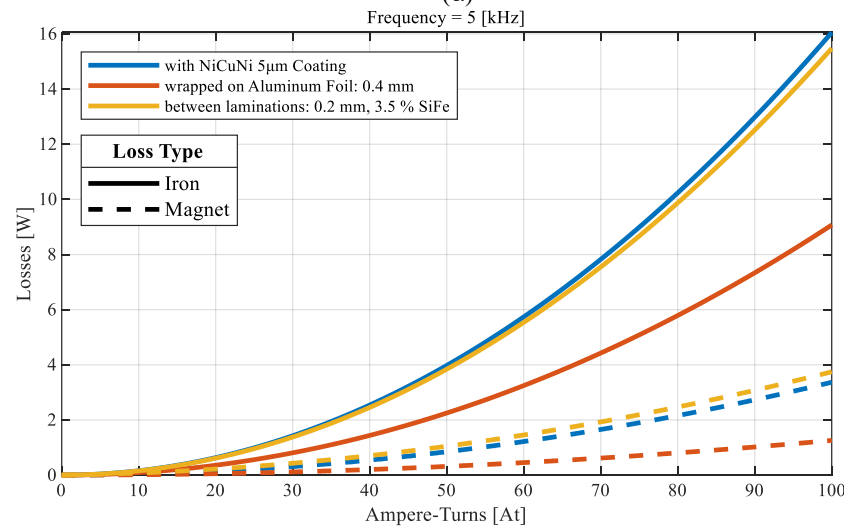


(δ)

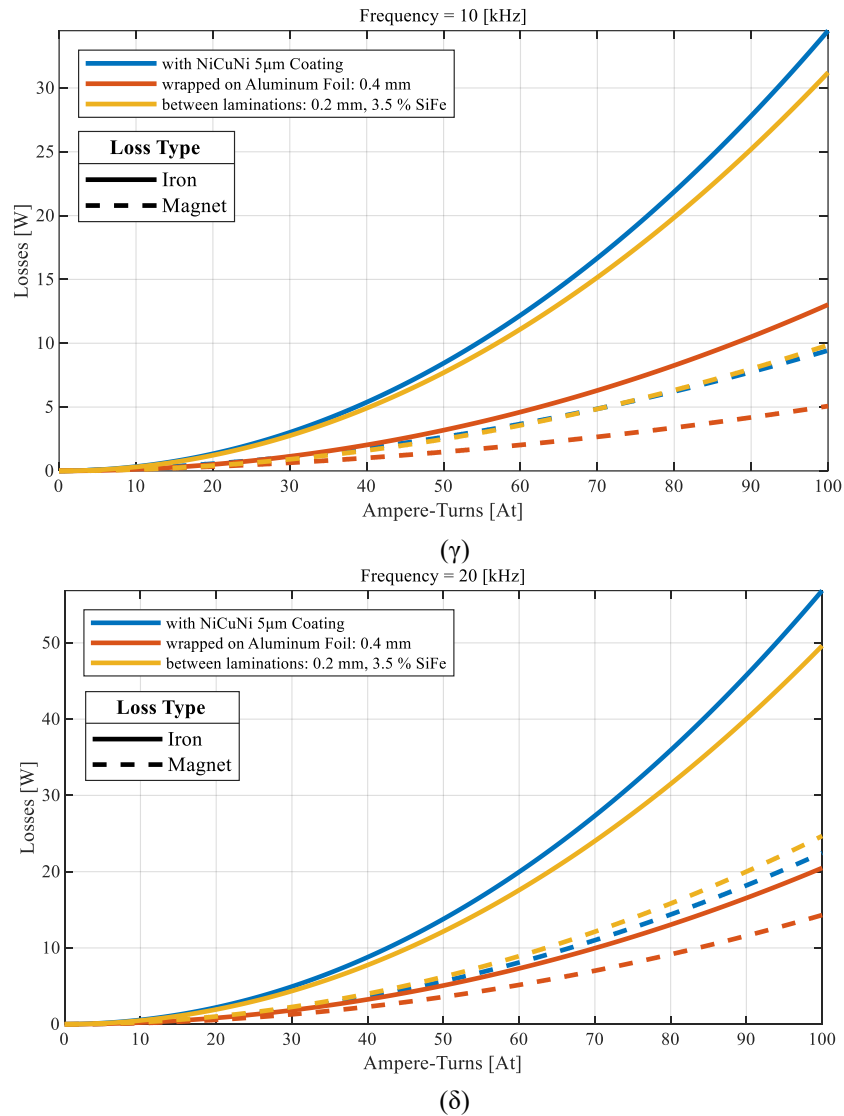
Σχ. 7.9 Μετρημένες απώλειες ελασματοποιημένου σιδήρου και μόνιμου μαγνήτη σε ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης για μαγνήτες SmCo βαθμού 28 σε διαφορετικές μεθόδους θωράκισης και συχνότητες. (α) $f = 1$ kHz. (β) $f = 5$ kHz. (γ) $f = 10$ kHz. (δ) $f = 20$ kHz. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.



(α)



(β)



Σχ. 7.10 Μετρήσεις απωλειών ελασματοποιημένου σιδήρου και μόνιμου μαγνήτη για διάφορα ρεύματα διέγερσης στην περίπτωση του μαγνήτη NdFeB42 βαθμίδας UH για διαφορετικές τεχνικές θωράκισης και συχνότητες. α) $f=1\text{kHz}$, β) $f=5\text{kHz}$, γ) $f=10\text{kHz}$, δ) $f=20\text{kHz}$. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

7.6 Εξέταση κινδύνου απομαγνητισμού μόνιμου μαγνήτη

Οι κίνδυνοι απομαγνητισμού των μόνιμων μαγνητών σε περίπτωση σφάλματος λειτουργίας της μηχανής λόγω των υψηλών ρευμάτων που αναπτύσσονται, ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία υψηλής ταχύτητας, αποτελούν ιδιαίτερο προβληματισμό. Μία κατάλληλη τεχνική εκτίμησης αυτού του ρίσκου πραγματοποιείται με την κατάλληλη αξιολόγηση των σημείων λειτουργίας της μηχανής στα οποία οι μαγνήτες είναι πιο ευάλωτη στην απομαγνήτιση. Η τεχνική αυτή απαιτεί την σωστή αναπαράσταση των θερμικών φαινομένων και της μεταβατικής συμπεριφοράς του κινητήρα.

Η μείωση αυτού του ρίσκου γίνεται με κατάλληλη επιλογή της βαθμίδας μαγνήτη και τη προσαρμογή των παραμέτρων σχεδίασης της μηχανής. Επιπλέον, η εισαγωγή της κατάλληλης θωράκισης μαγνητών επιδρά στην στα μεταβατικά χαρακτηριστικά της μηχανής καθώς στην απομείωση του θερμικού φορτίου. Απαραίτητο είναι να υπάρχει ενσωμάτωση της εκτίμησης της μεταβατικής συμπεριφοράς του κινητήρα και της ανάλυσης του ρίσκου απομαγνήτισης κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού [7.3].

7.7 Παρατηρήσεις για τις Απώλειες Μόνιμου Μαγνήτη

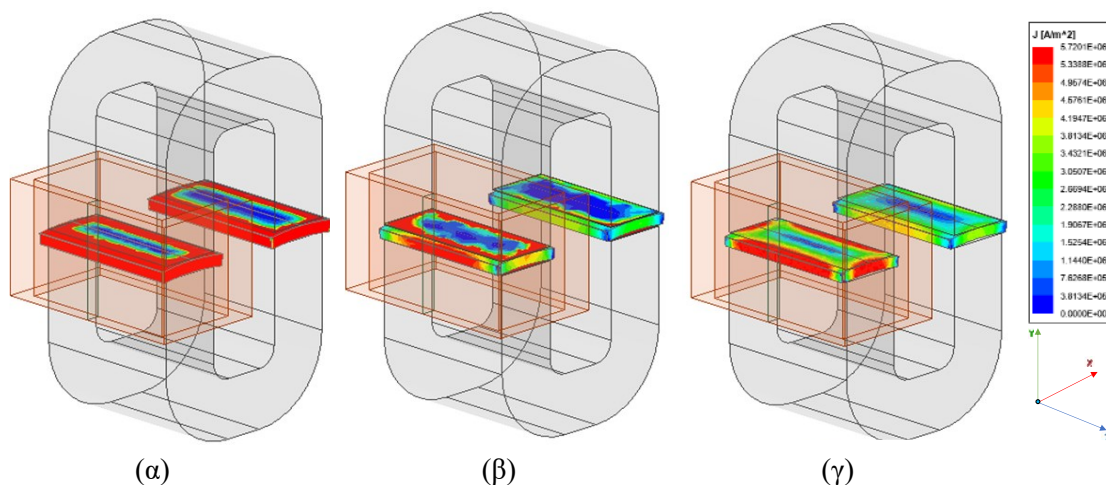
Οι μετρήσεις στο μαγνητικό κύκλωμα C-Core επέτρεψαν την αξιολόγηση των απωλειών σε μόνιμους μαγνήτες σε ευρεία περιοχή συχνοτήτων έως 20 kHz, τηρώντας τους περιορισμούς τάσης και ρεύματος του ενισχυτή τροφοδοσίας μέσω κατάλληλης ρύθμισης του αριθμού ελιγμάτων του πηνίου διέγερσης. Το υπο μελέτη κράμα SmCo βαθμίδας 28, παρουσιάζει σχετικά χαμηλότερη παραμένουσα μαγνήτιση, ανέπτυξε τις χαμηλότερες απώλειες δινορευμάτων (όπως φαίνεται στο σχήμα 7.9), ενώ το πυροσυσσωματωμένο κράμα NdFeB 42 βαθμίδας UH, με μεγαλύτερη μαγνήτιση, παρουσίασε τις μεγαλύτερες απώλειες σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις (όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10).

Σε ό,τι αφορά την αποτελεσματικότητα θωράκισης, η επίστρωση NiCuNi πλάτους 5 μm μειώνει τις απώλειες των δινορευμάτων περίπου κατά 10% σχεδόν σε όλο το μήκος του φάσματος συχνοτήτων, ενώ το έλασμα υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας πλάτους 0.2 mm έχει παρόμοιο αντίκτυπο στις απώλειες στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων και είναι πιο αποτελεσματικό σε υψηλότερες περιοχές συχνοτήτων. Η αποτελεσματικότητα της αγωγίμης θωράκισης από φύλλα αλουμινίου ποικίλλει σε σχέση με το πλάτος και το εύρος συχνοτήτων λόγω της διακύμανσης του επιδερμικού φαινομένου. Ειδικότερα, επιδεινώνει τις απώλειες σε χαμηλές συχνότητες, ενώ σε υψηλότερες περιοχές συχνοτήτων είναι πιο αποτελεσματικό από τις υπόλοιπες τεχνικές θωράκισης που εξετάζονται, απαιτώντας ωστόσο σημαντικό πάχος στο φύλλο, το οποίο μπορεί να είναι ασύμβατο με το ήδη σχεδιασμένο πάχος του διακένου της ηλεκτρικής μηχανής.

Για την κατάλληλη μοντελοποίηση και σχεδιασμό, αναπτύχθηκαν σε 2D FEA μοντέλα που επιτρέπουν την αποτελεσματική εφαρμογή των όσων μελετήθηκαν τόσο σε αυτό το κεφάλαιο όσο και σε προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιώντας υπολογιστικά μέσα ελάχιστων απαιτήσεων. Η εγκυρότητα των προτεινόμενων τεχνικών ελέγχεται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά που λαμβάνονται με τη χρήση ενός εμπορικού λογισμικού 3D FEA, επιτρέποντας λεπτομερή αναπαράσταση των γεωμετριών και των χαρακτηριστικών των εμπλεκόμενων υλικών.

7.8 Επικύρωση μέσω 3D ΜΠΣ

Για να ληφθεί μια λεπτομερής αναπαράσταση της κατανομής δινορευμάτων και των αντίστοιχων απωλειών των μόνιμων μαγνητών, εξαιτίας της οδήγησης, με ή χωρίς την παρουσία υλικών θωράκισης, η μετρούμενη χρονική διακύμανση του ρεύματος στην περιέλιξη διέγερσης του C-Core έχει εισαχθεί σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο FEA (ΜΠΣ) που περιλαμβάνει χρονομεταβλητή, βήμα προς βήμα ανάλυση.



Σχ. 7.11 Τρισδιάστατη αναπαράσταση FEA (ΜΠΣ) της κατανομής δινορευμάτων σε μαγνήτη κράματος NdFeB42 βαθμίδας UH σε συχνότητα 20 kHz για ημιτονοειδή διέγερση 100 A. (α) Χωρίς Θωράκιση. (β) Θωράκιση από μαγνητικό χάλυβα πλάτους 0.2 mm. (γ) Θωράκιση από φύλλο αλουμινίου πλάτους 0.4 mm.

Η περίπτωση του μαγνήτη πυροσυσσωματωμένου κράματος NdFeB42 βαθμίδας UH και τα προσομοιωμένα δινορεύματα στον μαγνήτη σε συχνότητα 20 kHz για ΜΕΔ διέγερσης 100 At φαίνονται στο σχήμα 7.11. Ειδικότερα, η εικόνα 7.11(α) δείχνει την κατανομή του δινορευμάτων στους μαγνήτες απουσία θωράκισης, ενώ η εικόνα 7.11(β) παρουσιάζει τα ίδια αποτελέσματα στην περίπτωση μαγνητικής θωράκισης από χάλυβα πλάτους 0.2 mm και η εικόνα 7.11(γ) δείχνει την προκύπτουσα κατανομή δινορευμάτων σε περίπτωση θωράκισης από φύλλο αλουμινίου πλάτους 0.4mm. Σε αυτά τα σχήματα, παρατηρείται μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην περίπτωση της θωράκισης από φύλλο αλουμινίου.

7.9 Μοντελοποίηση απώλειας σιδήρου

Μια μέθοδος διαχωρισμού των απωλειών πυρήνα που βασίζεται στην ανάλυση του μικροσκοπικού μηχανισμού δημιουργίας απωλειών πυρήνα έχει προταθεί από τον Bertotti [7.12], ορίζοντας την εξίσωση απώλειας σιδήρου υπό ημιτονοειδή διέγερση ως εξής:

$$P_{fe} = P_h + P_{ec} + P_{exc} = k_h B^2 f + k_{ec} B^2 f^2 + k_{exc} B^{1.5} f^{1.5} \quad (7.5)$$

όπου P_h είναι η απώλεια ισχύος υστέρησης, P_{ec} είναι η απώλεια ισχύος δινορευμάτων, P_{exc} είναι η απώλεια ισχύος excess (ή ανώμαλου δινορευματος), k_h είναι ο συντελεστής απώλειας υστέρησης που υπολογίζεται μέσω προσαρμογής (fitting) στις απώλειες σχεδόν στατικής υστέρησης, k_{ec} είναι ο συντελεστής απώλειας δινορευμάτων, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με βάση το πάχος και την ειδική αντίσταση του χάλυβα, και το k_{exc} είναι ο συντελεστής excess απώλειας, ο οποίος μπορεί να προκύψει από επιφανειακή προσαρμογή (fitting) στις απώλειες του σιδήρου που απομείνανε.

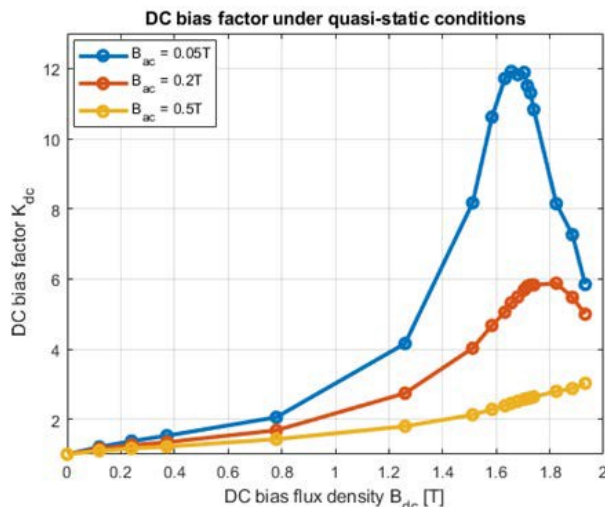
Αυτό το μοντέλο απώλειας βασίζεται στη στατιστική θεωρία απωλειών (STL) και έχει αποδειχθεί ότι έχει πολύ καλή ακρίβεια υπό ημιτονοειδή πόλωση σε εύρος χαμηλών έως μεσαίων συχνοτήτων. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο δεν μπορεί να αντιπροσωπεύει την επίδραση του προϋπάρχοντος στατικού πεδίου στις απώλειες σιδήρου, η οποία έχει βρεθεί ότι συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση των απωλειών σιδήρου. Επίσης δεν μπορεί να αποτυπώσει τον αντίκτυπο των επιδράσεων υψηλής συχνότητας, όπως το επιδερμικό φαινόμενο, στα ελάσματα σιδήρου. Στην υπό μελέτη εφαρμογή, ο μαγνητικός πυρήνας ενίσχυσης της ροής επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το προϋπάρχον στατικό πεδίο που προκαλείται από τη μαγνητική ροή του μαγνήτη, ενώ παράλληλα λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες, δηλαδή έως και 20 kHz. Έτσι, το κλασικό μοντέλο STL δεν είναι κατάλληλο και η χρήση του θα οδηγούσε σε σημαντικές ανακρίβειες κατά την αποσύνθεση των στοιχείων απωλειών.

Για να ξεπεραστούν αυτά τα ζητήματα, προτείνεται μεθοδολογία βασισμένη σε μετρήσεις, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση της του προϋπάρχοντος στατικού πεδίου στις απώλειες σιδήρου, ενώ τα φαινόμενα υψηλής συχνότητας μπορούν να συμπεριληφθούν χρησιμοποιώντας έναν παράγοντα αντιστάθμισης με βάση το πάχος ελασματοποίησης d και τη διαπερατότητα μ [7.15].

Πιο συγκεκριμένα, για τη μοντελοποίηση της επίδρασης του προϋπάρχοντος στατικού πεδίου στις απώλειες σιδήρου, εφαρμόζεται ο παράγοντας k_{ac} , ο οποίος ορίζεται με παρόμοιο τρόπο με τις [7.10] και [7.18] ως:

$$k_{DC}(B_{DC}, B_{AC}) = \frac{P_{fe}(B_{DC}, B_{AC})}{P_{fe}(B_{AC})} \quad (7.6)$$

όπου k_{DC} είναι ο συντελεστής του προϋπάρχοντος στατικού πεδίου, $P_{fe}(B_{DC}, B_{AC})$ είναι οι μετρούμενες απώλειες σιδήρου στο σημείο λειτουργίας B_{AC} υπό την επίδραση του του προϋπάρχοντος στατικού πεδίου B_{DC} και $P_{fe}(B_{AC})$ είναι οι μετρούμενες απώλειες σιδήρου στο ίδιο σημείο λειτουργίας, ενώ το υλικό απομαγνητίζεται: $P_{fe}(B_{AC}) = P_{fe}(0, B_{AC})$. Ο χάρτης του παράγοντα του προϋπάρχοντος στατικού πεδίου παρουσιάζεται στο σχήμα 7.12, ως αποτέλεσμα μιας σειράς μετρήσεων σε ένα ευρύ φάσμα πυκνοτήτων εναλλασσόμενου ρεύματος και ροής υπό ψευδοστατικές συνθήκες [7.18].



Σχ. 7.12 Χάρτης συντελεστών πόλωσης DC με βάση μαγνητικές μετρήσεις στον υπό διερεύνηση πυρήνα C. Το k_{DC} δεν έχει μονάδες. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

Το τροποποιημένο μοντέλο απώλειας του Bertotti, το οποίο καταγράφει την επίδραση της πόλωσης συνεχούς ρεύματος και της διέγερσης υψηλής συχνότητας στις απώλειες σιδήρου, μπορεί να εκφραστεί ως εξής [7.10], [7.15], [7.18]:

$$P_{fe}(B_{DC}, B_{AC}, f) = k_{DC}(B_{DC}, B_{AC}) \cdot k_h \cdot B^2 \cdot f + k_{ec} \cdot \xi \cdot B^2 \cdot f^2 + k_{exc} \cdot B^{1.5} \cdot f^{1.5} \quad (7.7)$$

όπου ξ είναι ο παράγοντας αντιστάθμισης επιδερμικού φαινομένου με βάση το πάχος ελασματοποίησης d , f είναι η συχνότητα διέγερσης και μ είναι η διαπερατότητα, όπως περιγράφεται στο [7.15].

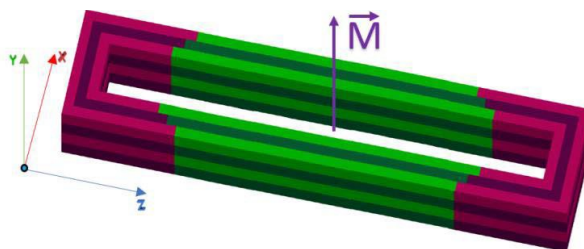
7.10 Σύζευξη Μοντέλου 2D FEA με Εξισώσεις Κυκλώματος

Τα δινορεύματα που αναπτύσσονται σε μόνιμους μαγνήτες περιγράφονται από την εξίσωση διάχυσης, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό $\vec{A}$ και ηλεκτρικό βαθμωτό δυναμικό V , ως εξής:

$$\nabla^2 \vec{A} = \mu \cdot \sigma \cdot \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \quad (7.8)$$

όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και σ υποδηλώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Όταν δινορεύματα ρέουν σε καλά καθορισμένες διαδρομές, μπορεί να επιτευχθεί επαρκής ακρίβεια χρησιμοποιώντας 2D πεπερασμένα στοιχεία (ΠΣ ή FEA) στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η πτώση τάσης κατά μήκος των τερματικών περιοχών του μαγνήτη μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω του όρου ηλεκτρικού δυναμικού λαμβάνοντας υπόψη πλασματικά τμήματα του μαγνήτη που συνδέονται με κατάλληλες εξισώσεις παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος όπως περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο στην εξίσωση (6.4).



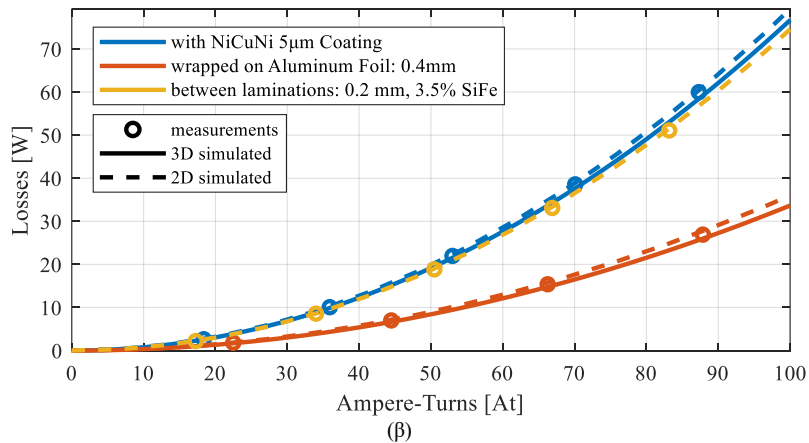
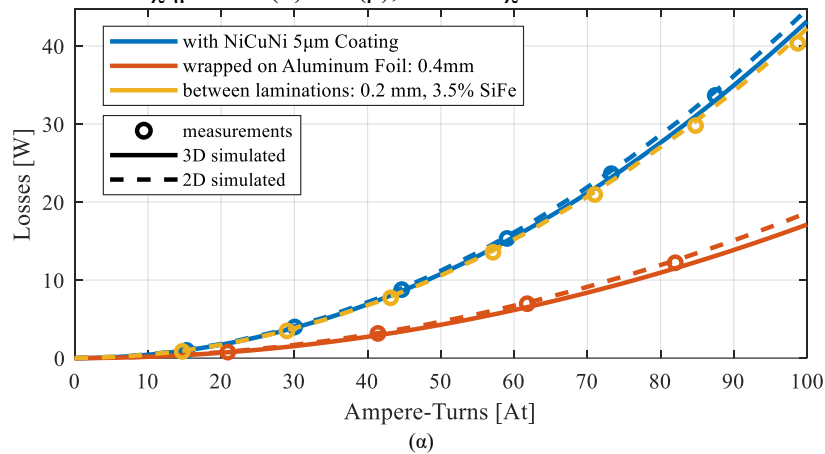
Σχ. 7.13 Μόνιμος μαγνήτης ορθογώνιας διατομής. Με πράσινο χρώμα το τμήμα που αντιπροσωπεύονται από 2D FEA και με κόκκινο χρώμα το τμήμα που μοντελοποιείται μέσω ισοδύναμων όρων παραμέτρων κυκλώματος. Η παραμένονσα μαγνήτιση $\vec{M}$ είναι κατά μήκος της διεύθυνσης y .

Ένας μόνιμος μαγνήτης ορθογώνιας διατομής φαίνεται στο σχήμα 7.13. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται με πράσινο χρώμα το τμήμα που αντιπροσωπεύεται από το 2D FEA και με κόκκινο χρώμα τα αντίστοιχα τμήματα της τερματικής περιοχής που αντιπροσωπεύονται μέσω ισοδύναμων όρων κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων. Η κατάλληλη συγκρότησή της μήτρας των πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει την άμεση σύζευξη των πεδίων και των εξισώσεων κυκλώματος εξασφαλίζοντας αποτελεσματική αναπαράσταση μόνιμου μαγνήτη [7.9].

Η παρουσία των μόνιμων μαγνητών αναγκάζει το μαγνητικό κύκλωμα να λειτουργεί υπό DC Bias. Αυτό το φαινόμενο αλλάζει δραστικά τη μη γραμμική συμπεριφορά στις μεταβολές εναλασσόμενου ρεύματος. Μια κατάλληλη υπόθεση που μπορεί να εφαρμοστεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μικρές διακυμάνσεις πεδίου είναι να υποθεθεί ως διαπερατότητα στο υλικό είναι η κατανομή της διαφορικής διαπερατότητας που μπορεί να υπολογιστεί με βάση προηγούμενη μαγνητοστατική ανάλυση FEA.

7.11 Πειραματική Επιβεβαίωση

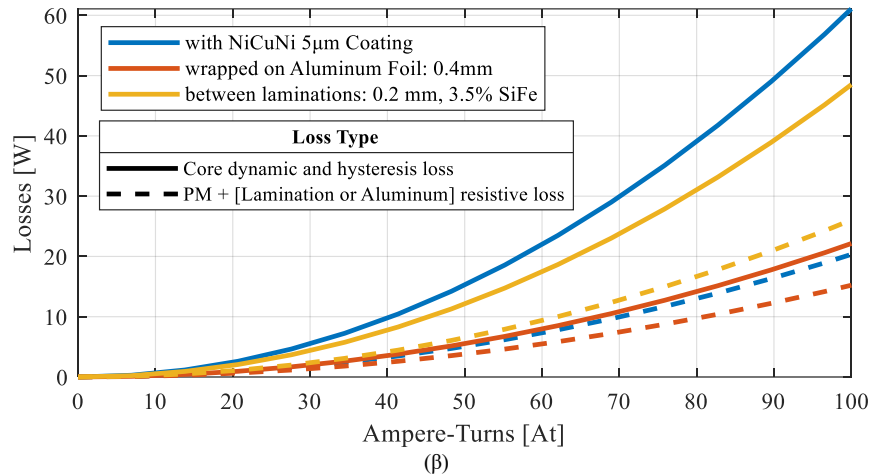
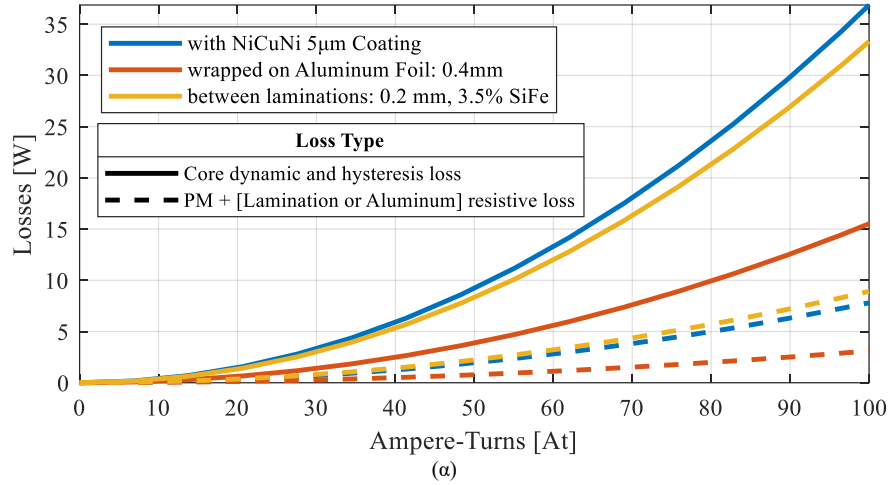
Για τη διερεύνηση της ακρίβειας της προτεινόμενης δισδιάστατης αριθμητικής μεθοδολογίας, οι υπολογισμένες απώλειες σε ελασματοποιημένο σίδηρο και μόνιμους μαγνήτες κράματος NdFeB42 βαθμίδας UH για τις διάφορες τεχνικές θωράκισης, συγκρίθηκαν με αυτές που ελήφθησαν μέσω 3D FEA και μετρήθηκαν πειραματικά όπως φαίνεται στο σχήμα 7.14. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν μια πολύ καλή συμφωνία, και στις δύο περιπτώσεις συχνότητας 10 και 20 kHz, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.14(α) και (β), αντίστοιχα.



Σχ. 7.14 Σύγκριση προσομοιωμένων απωλειών χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη 2D αριθμητική τεχνική με εκείνες που λαμβάνονται από το 3D FEA και μετρούνται στη διάταξη με ελασματοποιημένο σίδηρο και μαγνήτες NdFeB42 βαθμίδας UH υπό ημιτονοειδές ρεύματος διέγερσης, για διάφορες συχνότητες και τεχνικές θωράκισης. (α) $f = 10\text{kHz}$ (β) $f = 20\text{kHz}$. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

Επιπλέον, οι προσομοιωμένες απώλειες για ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης διαχωρισμένες σε απώλειες πυρήνα και απώλειες μόνιμων μαγνητών για τις συχνότητες 10 και 20 kHz φαίνονται στο σχήμα 7.15(α) και (β). Το σχήμα αυτό περιγράφει την περίπτωση που οι μαγνήτες είναι κράματος NdFeB42 βαθμίδας UH ενώ ακολουθούνται και διάφορες τεχνικές θωράκισης.

Αυτά τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι στις περιοχές υψηλών συχνοτήτων οι απώλειες στους μόνιμους μαγνήτες είναι συγκρίσιμες με αυτές που αναπτύσσονται στον πυρήνα σιδήρου, ακόμη και στις περιπτώσεις που υπάρχει θωράκιση.



Σχ. 7.15 Διαχωρισμός απωλειών με βάση τις προσομοιώσεις σε ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη αριθμητική τεχνική 2D στην περίπτωση μαγνητών NdFeB42 βαθμίδας UH, για διαφορετικές συχνότητες και τεχνικές θωράκισης. (α) $f = 10$ kHz. (β) $f = 20$ kHz. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

7.12 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Αυτό το κεφάλαιο εισήγαγε μια συγκεκριμένη μεθοδολογία σχεδιασμού για κινητήρες ηλεκτροκίνησης μόνιμου μαγνήτη, επιτρέποντας συνδυασμό των τυπικών κριτηρίων απόδοσης και πυκνότητας ισχύος παράλληλα με την αποφυγή κινδύνων απομαγνητισμού σε περίπτωση σφαλμάτων. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε 2D FEA και ενσωματώνει συγκεκριμένες τεχνικές για την εξέταση των απωλειών στα μέρη από ελασματοποιημένο σίδηρο εισάγοντας την κατάλληλη τροποποίηση στην μοντελοποίηση κατά Bertotti, μοντέλο που επιτρέπει τη συμπερίληψη της ύπαρξης στατικής μαγνήτισης στις διάφορες παραλλαγές του μαγνητικού πεδίου που εξετάστηκαν.

Επιπλέον, ενσωματώνεται μια συγκεκριμένη σύζευξη εξισώσεων πεδίου και κυκλώματος, διασφαλίζοντας την ακριβή αναπαράσταση των απωλειών δινορευμάτων σε μόνιμους μαγνήτες, που γίνονται σημαντικές στις περιοχές υψηλών συχνοτήτων.

Έχουν εξεταστεί διάφορες τεχνικές θωράκισης που περιλαμβάνουν αγωγίμα και υψηλής διαπερατότητας φύλλα και επιστρώσεις και έχει αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους στη μείωση των τοπικών διακυμάνσεων του πεδίου και των αντίστοιχων απωλειών.

Τα χαρακτηριστικά και οι τεχνικές του υλικού που εισήχθησαν έχουν επικυρωθεί εκτενώς με μετρήσεις στο πρότυπο πλαίσιο Epstein και σε δείγματα σπειροειδούς πυρήνα καθώς και σε μαγνητικά κυκλώματα C-Core.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε επιτυγχάνει επαρκή μοντελοποίηση των απωλειών υψηλών συχνοτήτων και διασφαλίζει την ευρωστία του σχεδιασμού, η οποία είναι μείζονος σημασίας στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης μόνιμου μαγνήτη υψηλής ταχύτητας.

7.13 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

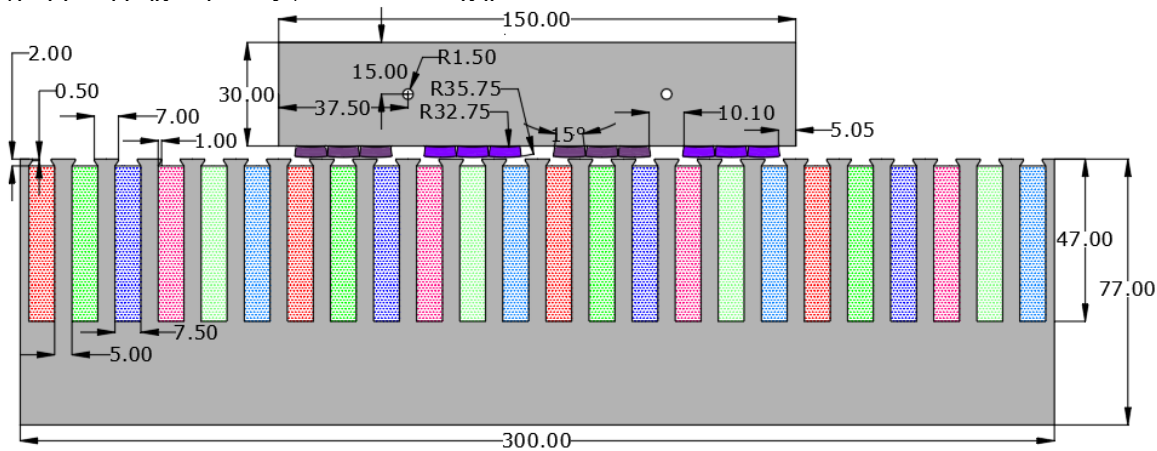
- [7.1] J.H. Woo, T.K. Bang, H.K. Lee, K.H. Kim, S.H. Shin, and J.Y. Choi, "Electromagnetic Characteristic Analysis of High-Speed Motors With Rare-Earth and Ferrite Permanent Magnets Considering Current Harmonics," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 2, p. 8201805, Feb. 2021.
- [7.2] J. Faiz and E. Mazaheri-Tehrani, "Demagnetization modeling and fault diagnosing techniques in permanent magnet machines under stationary and non-stationary conditions: an overview," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2772-2785, May-June 2017
- [7.3] G. Sakkas, and A. Kladas, "Design considerations for cost effective Radial Flux Interior Permanent Magnet Motors with increased Demagnetization Robustness," *2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, pp. 58-63, doi: 10.1109/WEMDCD51469.2021.9425629
- [7.4] S. Nair, J. Wang, T. Sun, L. Chen, R. Chin, M. Beniakar, D. Svecchikareno, and I. Manolas, "Experimental Validation of 3-D Magnet Eddy Current Loss Prediction in Surface-Mounted Permanent Magnet Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 4380–4388, Sep. 2017
- [7.5] Z. Li, X. Huang, X. Xu, Z. Chen, Z. Jiang, L. Wu, T. Shi, and J. Zhang, "Nonlinear Analytical Model for Predicting Magnet Loss in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, p. 8203705, Aug. 2022
- [7.6] E. Sayed, Y. Yang, B. Bilgin, M.H. Bakr, and A. Emadi, "A Comprehensive Review of Flux Barriers in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149168–149181, 2019
- [7.7] K. Yamazaki and Y. Takaki, "Iron Loss Analysis of Permanent Magnet Motors by Considering Minor Hysteresis Loops Caused by Inverters", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 6, p. 1300304, June 2019, doi: 10.1109/TMAG.2019.2903128
- [7.8] D.M. Kim, J.H. Kim, S.G. Lee, M.R. Park, G.H. Lee, and M.S. Lim, "Estimation Method for Rotor Eddy Current Loss in Ultrahigh-Speed Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 2, p. 8103205, Feb. 2021, doi: 10.1109/TMAG.2020.3030684
- [7.9] G. Sakkas, A. Kladas, "Particular Model for Efficient Switching Frequency Loss consideration in Surface Mounted Permanent Magnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, doi: 10.1109/TMAG.2023.3236273
- [7.10] S. Xue, J. Feng, S. Guo, Z. Chen, J. Peng, W.Q. Chu, L.R. Huang and Z.Q. Zhu, "Iron Loss Model Under DC Bias Flux Density Considering Temperature Influence," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2017
- [7.11] IEC 60404-2, "Magnetic materials – Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame", *International Electrotechnical Commission*, June 2008
- [7.12] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism, for Physicists, Material Scientists, and Engineers*. San Diego, CA, USA: Academic, 1998
- [7.13] C. W. Harrison and P. I. Anderson, "Characterization of Grain-Oriented Electrical Steels Under High DC Biased Conditions," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 5, pp. 1-4, May 2016, Art no. 2001604, doi: 10.1109/TMAG.2016.2519945.
- [7.14] L. Chang, T. M. Jahns and R. Blissenbach, "Characterization and Modeling of Soft Magnetic Materials for Improved Estimation of PWM-Induced Iron Loss," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 1, pp. 287-300, Jan.-Feb. 2020, doi: 10.1109/TIA.2019.2955055

- [7.15] C. Ragusa, H. Zhao, C. Appino, M. Khan, O. de la Barrière and F. Fiorillo, "Loss Decomposition in Non-Oriented Steel Sheets: The Role of the Classical Losses," *IEEE Magnetics Letters*, vol. 7, pp. 1-5, 2016, Art no. 5106105, doi: 10.1109/LMAG.2016.2604204
- [7.16] S. Xue, J. Feng, S. Guo, Z. Chen, J. Peng, W.Q. Chu, L.R. Huang, Z.Q. Zhu, "Iron Loss Model Under DC Bias Flux Density Considering Temperature Influence," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2017, Art no. 6100804, doi: 10.1109/TMAG.2017.2703587
- [7.17] H. Zhao, C. Ragusa, O. de la Barrière, M. Khan, C. Appino and F. Fiorillo, "Magnetic Loss Versus Frequency in Non-Oriented Steel Sheets and Its Prediction: Minor Loops, PWM, and the Limits of the Analytical Approach," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2017, Art no. 2003804, doi: 10.1109/TMAG.2017.2701299
- [7.18] L. Krahenbuhl, D. Muller, "Thin layers in electrical engineeringexample of shell models in analysing eddy-currents by boundary and finite element methods," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, no. 2, 1993, pp. 1450-1455, doi: 10.1109/20.250676
- [7.19] E. Stenglein, T. Dürbaum, "Core Loss Model for Arbitrary Excitations With DC Bias Covering a Wide Frequency Range," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 6, 2021, doi: 10.1109/TMAG.2021.3068188

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

8.1 Πειραματική Διάταξη

Με στόχο την επιβεβαίωση της μεθόδου υπολογισμού απωλειών μονίμων μαγνητών που περιεγράφηκε στο 6^ο κεφάλαιο σε μία διάταξη με συναφή ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα με αυτά μίας ηλεκτρικής μηχανής, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια πρότυπη ηλεκτρική γραμμική μηχανή. Η μέθοδος υπολογισμού απωλειών έχει επιδείξει ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο στην ταχύτητα των υπολογισμών όσο και στην ακρίβεια της περιγραφής των φαινομένων. Παράλληλα έχει επιβεβαιωθεί σε πρότυπες διατάξεις C-Core όπως ήδη έχει συζητηθεί στο 6^ο και 7^ο κεφάλαιο. Η διαφοροποίηση της επιβεβαίωσης που αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο τοποθετείται στην πολυπλοκότητα του υπό μελέτη μαγνητικού κυκλώματος, η οποία αναπόφευκτα εισάγεται για την μελέτη μίας, πιο κοντά στην ηλεκτρική μηχανή, διάταξης. Έχει σχεδιαστεί, λοιπόν, μία πρωτότυπη γραμμική μηχανή όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1.



Σχ. 8.1 Δισδιάστατη τομή κατά μήκος της γραμμικής μηχανής. Οι διαστάσεις δίνονται σε mm, ενώ το ύψος του μαγνητικού κυκλώματος στον κάθετο στη σελίδα άξονα είναι 50mm. Με πράσινο χρώμα δίνονται τα χωρία που περνούν τα πηνία της φάσης A, με μπλε τα πηνία της φάσης B, και με κόκκινο τα πηνία της φάσης C. Η διακύμανση της έντασης των χρωμάτων δηλώνει την θετική ή αρνητική φορά του ρεύματος.

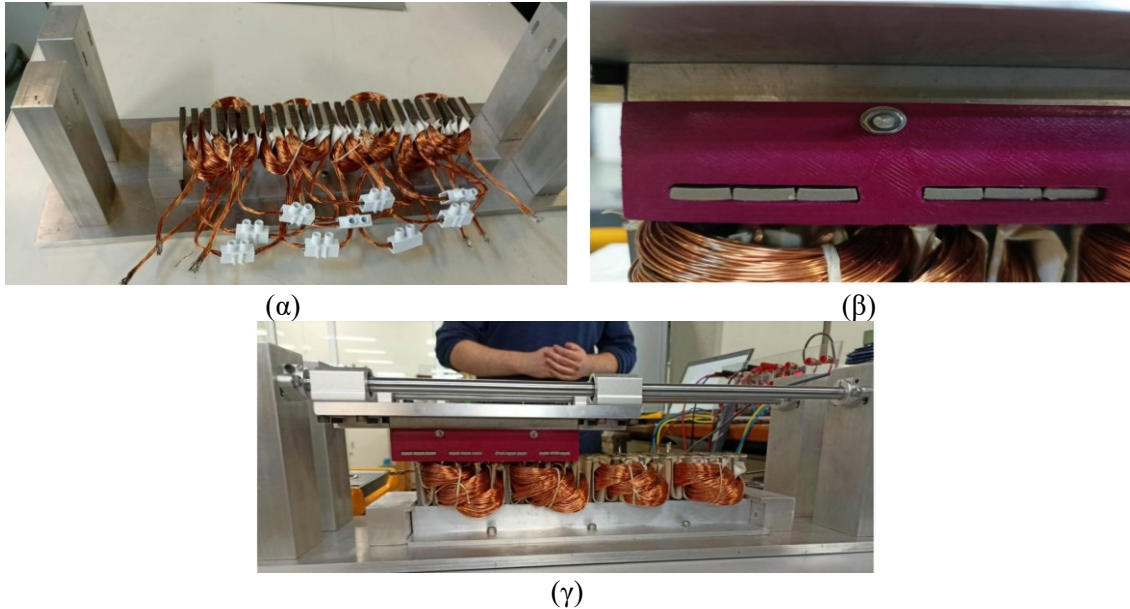
Πληροφορίες για την κατασκευή του τυλίγματος χαλκού, όσον αφορά τις σε σειρά σπείρες των τυλιγμάτων και των παράλληλων κλάδων δίνονται στον ακόλουθο πίνακα, με τις συνδέσεις των πηνίων μεταξύ των πόλων και των ακροδεκτών. Παράλληλα παρέχονται πληροφορίες για το είδος των υλικών πυρήνα και μαγνήτη.

Πηνίο Διέγερσης	Ενεργά τυλίγματα σε κάθε αύλακα	22
	Παράλληλοι κλώνοι σε κάθε τύλιγμα	14
	Σύνδεση ίδιας φάσης μεταξύ ζευγών πόλων	Σε σειρά
	Σύνδεση ακροδεκτών φάσεων	Σε αστέρα
Πηνίο Ανίχνευσης	Ενεργά τυλίγματα σε κάθε αύλακα	22
	Παράλληλοι κλώνοι σε κάθε τύλιγμα	1
	Σύνδεση ίδιας φάσης μεταξύ ζευγών πόλων	Σε σειρά
	Σύνδεση ακροδεκτών φάσεων	Σε αστέρα
Είδος Λαμαρίνας		M235-23A
Είδος Μαγνητών		SmCo17

Πίν. 8.1 Χαρακτηριστικά τυλίγματος και μαγνητικών υλικών της γραμμικής μηχανής.

Η χρήση πηνίων ανίχνευσης της επαγόμενης τάσης ΗΕΔ γίνεται με την τοποθέτηση τους στις υποδοχές του στάτη κοντά στις περιελίξεις διέγερσης, με στόχο την άμεση μέτρηση της ΗΕΔ.

Στο σχήμα 8.2 παρουσιάζεται η κατασκευασμένη πρότυπη ηλεκτρική μηχανή. Η εικόνα 8.2(α) αποτυπώνει της περιελίξεις της μηχανής στο σώμα του στάτη μαζί με την μηχανική διάταξη συγκράτησης του δρομέα. Η εικόνα 8.2(β) δείχνει την τοποθέτηση των μαγνητών στο δρομέα με χρήση κατάλληλης πλαστικής διάταξης συγκράτησης. Το σύνολο της μηχανής αποδίδεται στην εικόνα 8.2(γ).

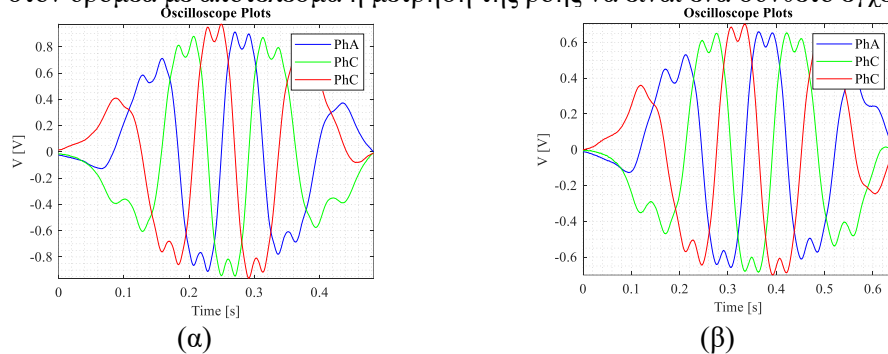


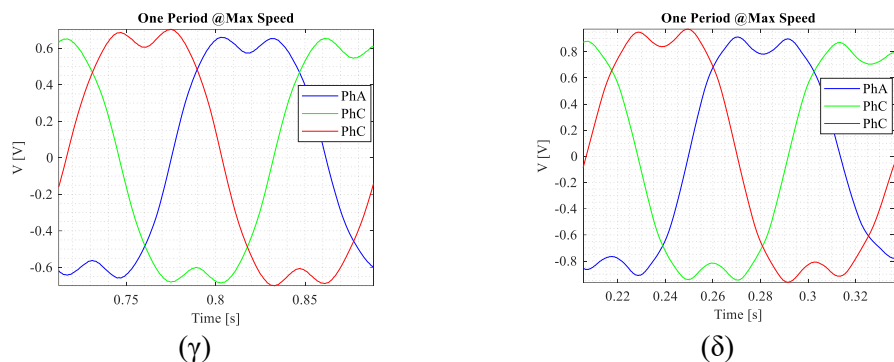
Σχ. 8.2 Κατασκευασμένη ηλεκτρική γραμμική μηχανή. (α) Στάτης και τυλίγματα (β) Δρομέας και μαγνήτες. (γ) Συνολική διάταξη με τις μηχανικές συγκρατήσεις της.

8.2 Μέτρηση Ροής και Δύναμης

Η μέτρηση της πεπλεγμένης ροής στα τυλίγματα του στάτη εξαιτίας του πεδίου του δρομέα μπορεί να μετρηθεί με βάση την κυματομορφή της ΗΕΔ που αναπτύσσεται όταν υπάρχει μεταβολή της πεδιακής κατανομής του μαγνητικού κυκλώματος λόγω της μετακίνησης του δρομέα.

Η παραπάνω διάταξη επιτρέπει την παλινδρομική κίνηση του δρομέα κατά μήκος του στατη. Η κατασκευή αποτελείται από δύο ζεύγη μαγνητικών πόλων στον δρομέα, ενώ ο στάτης εμπεριέχει καταναμημένο τύλιγμα που αποδίδει κύμα ΜΕΔ τεσσάρων περιόδων στο συνολικό μήκος της μηχανής. Συνεπώς, η συνολική διαδρομή του δρομέα είναι από τη μέση του μισού στάτη στην μέση του άλλου μισού του στάτη. Το μικρό αυτό εύρος μετακίνησης δεν επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλης ταχύτητας στον δρομέα με αποτέλεσμα η μέτρηση της ροής να είναι ένα σύνθετο εγχείρημα.

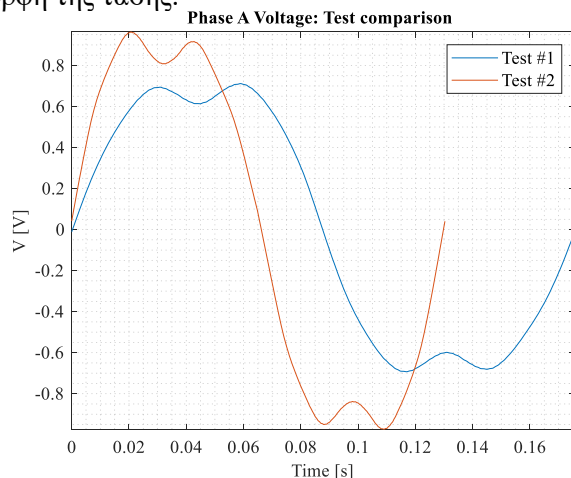




Σχ. 8.3 Κυματομορφές τάσεων κενού φορτίου της γραμμικής μηχανής για δύο διαδοχικά πειράματα μετακίνησης του δρομέα. (α), (β) Καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης. Στο (γ),(δ) παρουσιάζεται η απομόνωση μίας ηλεκτρικής περιόδου κοντά στην στιγμή μέγιστης ταχύτητας.

Στο σχήμα 8.3 παρουσιάζονται μετρήσεις των τάσεων στις φάσεις της μηχανής, σε παλμογράφο, σε μία ορισμένη κίνηση του δρομέα. Η κίνηση συντίθεται από το στάδιο της επιτάχυνσης (σπρώξιμο), της επιβράδυνσης και του σταματήματος του δρομέα. Συνεπώς είναι αναμενόμενο είναι η επαγόμενη τάση κατά τη διάρκεια της κίνησης αυτής να έχει τη μορφή των εικόνων 8.3(α) και 8.3(β) που αναφέρονται σε δύο διαδοχικά πειράματα μετακίνησης ίδιων συνθηκών. Η περιβάλλουσα των περιοδικών κυματομορφών των τάσεων ακολουθεί την εξέλιξη της ταχύτητας του δρομέα στον χρόνο.

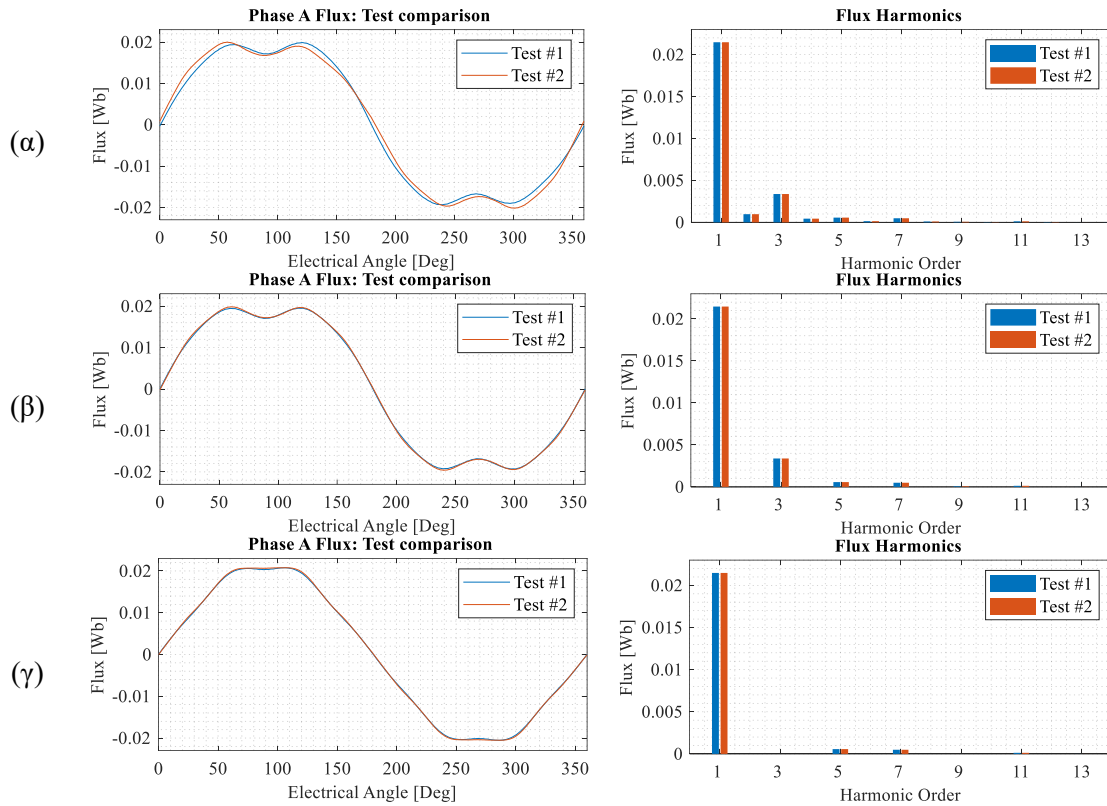
Με στόχο τη μέτρηση της ροής κενού φορτίου απομονώνεται μία ηλεκτρική περίοδο, κατά τη διάρκεια της κίνησης, κοντά στη στιγμή μέγιστης ταχύτητας. Όπως διαφαίνεται στα σχήματα 8.3 (γ) και (δ). Τα διαδοχικά πειράματα επιδεικνύουν διαφοροποιήσεις στην τάση. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στην διαφορά της μέγιστης ταχύτητας, μεταξύ των δοκιμών. Η απομόνωση της μίας εκ των τριών φάσεων, για τα δύο αυτά πειράματα και η συγκριτική απεικόνιση διαφαίνεται στο σχήμα 8.4. Στο σχήμα αυτό φαίνεται πως η περίοδος δεν είναι σταθερή μεταξύ των πειραμάτων, ενώ η μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα κατά την διάρκεια της περιόδου, επηρεάζει τη μορφή της τάσης.



Σχ. 8.4 Κυματομορφές τάσης της φάσης Α, για τα δύο πειράματα μετακίνησης του δρομέα.

Με κατάλληλη ανάλυση συχνοτήτων και ολοκλήρωση των συνιστωσών επιτυγχάνεται η εκτίμηση της κυματομορφής της ροής ως συνάρτηση της ηλεκτρικής γωνίας η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 8.5. Όπως έγινε φανερό, η κυματομορφή της τάσης δεν επιδέχονταν σύγκριση μεταξύ των διαδοχικών πειραμάτων, ωστόσο η κυματομορφή της ροής παρουσιάζει σε μεγάλο επίπεδο όμοια συμπεριφορά μεταξύ των δύο πειραμάτων εξαιτίας της ανεξαρτησίας από την ταχύτητα μετακίνησης. Στο σχήμα 8.5 (α) παρουσιάζονται οι κυματομορφές της ροής όπως προέκυψαν από την ολοκλήρωση των κυματομορφών των τάσεων καθώς και οι αρμονικές

συνιστώσες της. Στο σχήμα 8.5 (β) ενισχύεται η ταύτιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραμάτων μέσω αφαίρεσης των άρτιων αρμονικών της κυματομορφής, ενώ στο σχήμα 8.5(γ) αφαιρούνται και οι αρμονικές όλων των πολλαπλασίων τάξεων της 3^{ης} τάξης αρμονικών.



Σχ. 8.5 Κυματομορφές ροής ως προς την ηλεκτρική γωνία και οι αρμονικές συνιστώσες της. (α) Με ολοκλήρωση της κυματομορφής της τάσης. (β) ολοκλήρωση της κυματομορφής της τάσης και εξάλειψη των άρτιων αρμονικών. (γ) ολοκλήρωση της κυματομορφής της τάσης με εξάλειψη των άρτιων αρμονικών και των αρμονικών πολλαπλασίων της 3ης τάξης.

Επιπρόσθετα, στην γραμμική μηχανή μετρήθηκε η ικανότητα ανάπτυξης οριζόντιας δύναμης. Στην πειραματική διάταξη οι φάσεις B και C συνδέονται σε σειρά και τροφοδοτούνται από ρεύμα DC ίδιας τιμής και αντίθετης φοράς, ενώ η φάση A παραμένει ασύνδετη. Η σύνδεση αυτή περιγράφει ένα στιγμιότυπο, συμμετρικής τριφασικής τροφοδοσίας, στο οποίο οι φάσεις B και C διαρρέονται από ρεύμα πλάτους $\sqrt{3}/2$ του μεγίστου ρευματος, ανάστροφης μεταξύ τους πολικότητας ενώ η φάση A δεν διαρρέεται από ρεύμα. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναπτύξει η γραμμική μηχανή μετριέται με βάση την καμπύλη T-δ μίας σύγχρονης μηχανής. Στο πείραμα, μετά την επιβολή ορισμένων ρευμάτων η εξωτερικά επιβαλλόμενη δύναμη στον δρομέα αρχίζει να αυξάνεται. Όταν ο δρομέας αρχίσει να κινείται τότε η εξωτερική δύναμη είναι ίση με αυτή της μέγιστης του γραμμικού κινητήρα για την δεδομένη ένταση ρεύματος. Τα αποτελέσματα της μέτρησης δίνονται στον πίνακα 8.2, ενώ παράλληλα συγκρίνονται με αυτά της στατικής προσομοίωσης του 2D FEA που παρουσιάζεται στο σχήμα 8.8(α).

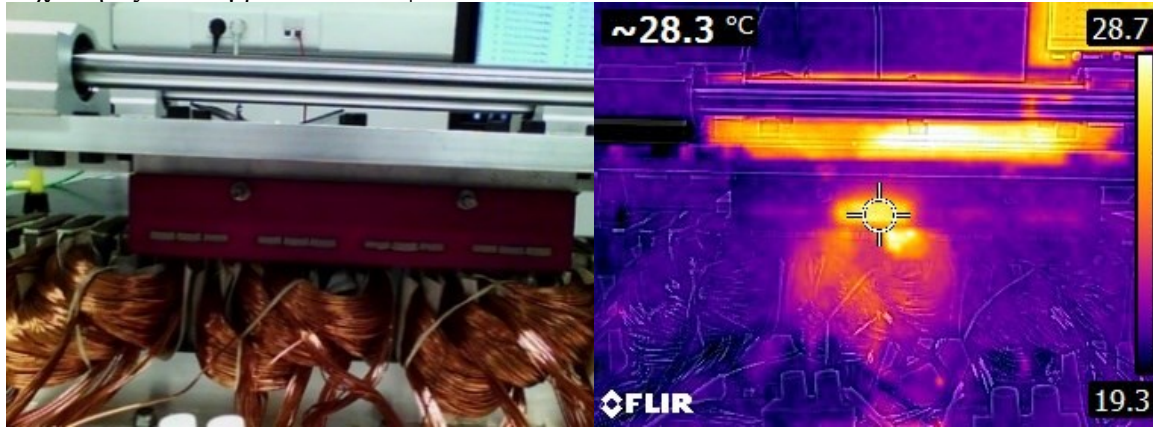
DC Ρεύμα ($I_{DC}=I_B=-I_C, I_A=0$)	Μέγιστη Οριζόντια Δύναμη	
	Μέτρηση	Προσομοίωση
0 A	24.2 N	24.4 N
5.2 A	35.0 N	33.9 N
10 A	44.0 N	42.9 N
15 A	52.0 N	52.4 N

Πίν. 8.2 Μετρήσεις μέγιστης οριζόντιας δύναμης της γραμμικής μηχανής.

8.3 Μέτρηση Απωλειών Μαγνητών

Στην κατασκευασμένη διάταξη, ο δρομέας που αποτελείται από τον σιδηροπυρήνα και τους μόνιμους μαγνήτες μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί από το πρωτότυπο, επιτρέποντας τη μέτρηση των απωλειών ελασματοποίησης του στάτη ξεχωριστά. Σε ένα πρώτο βήμα, ο δρομέας έχει διατηρηθεί σε στάση και μια μόνο περιέλιξη του στάτη έχει τροφοδοτηθεί από μια εναλλασσόμενη ημιτονοειδή πηγή που εξασφαλίζει διέγερση 1200 At σε συχνότητα 10 kHz. Η αντίστοιχη κατανομή θερμοκρασίας φαίνεται στο σχήμα 8.6(b).

Η τάση και το ρεύμα της διεγερμένης περιέλιξης και η τάση που προκαλείται στο αντίστοιχο πηνίο ανίχνευσης τάσης έχουν μετρηθεί και στις δύο περιπτώσεις παρουσία του δρομέα και απουσίας του αντίστοιχα. Με βάση αυτές τις μετρήσεις που επαναλαμβάνονται για διαφορετικές συχνότητες, οι αντίστοιχες απώλειες μπορούν να εκτιμηθούν και φαίνονται στο σχήμα 8.7. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι απώλειες σε μόνιμους μαγνήτες είναι συγκρίσιμες με αυτές που αναπτύσσονται στα ελασματοποιημένα μέρη του στάτη σε όλες τις συχνότητες που λαμβάνονται υπόψιν.



Σχ. 8.6 (α) Λεπτομέρεια μαγνητικού κυκλώματος του πρωτότυπου γραμμικού κινητήρα που κατασκευάστηκε. (β) Εικόνα που δείχνει την κατανομή θερμοκρασίας στο γραμμικό πρωτότυπο κινητήρα υπό ημιτονοειδή διέγερση μιας περιέλιξης με 1200 At στη συχνότητα 10 kHz. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

8.4 Διαχωρισμός Απωλειών Με Ανάλυση Συχνότητας

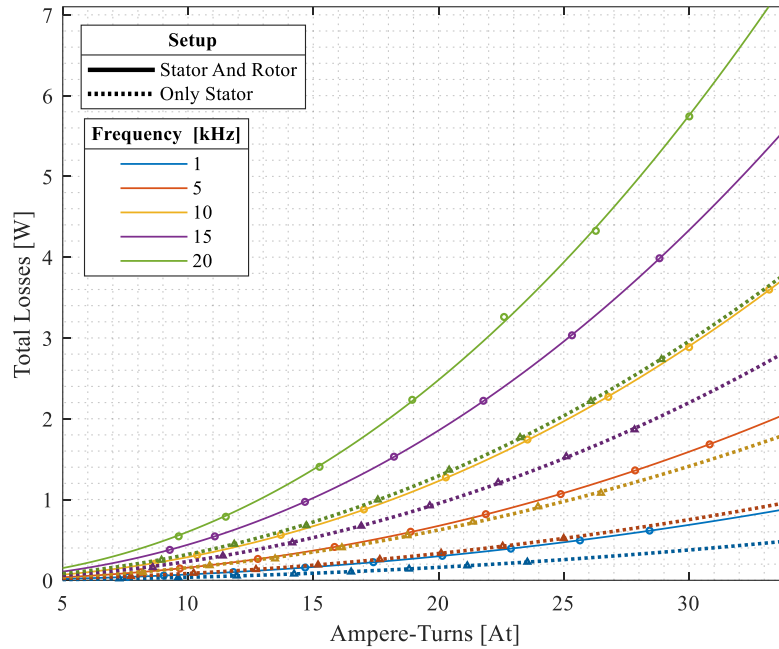
Με στόχο να ληφθούν κατάλληλα υπόψιν οι απώλειες που αναπτύσσονται εξαιτίας της διακοπτικής συχνότητας τόσο σε σίδηρο όσο και σε μαγνήτες, υιοθετήθηκε η ακόλουθη διαδικασία δύο βημάτων στο FEA: Σε ένα πρώτο βήμα, αξιολογείται ο τοπικός μαγνητικός κορεσμός των μερών του σιδήρου λόγω της θεμελιώδους συχνότητας τροφοδοσίας (εμφανίζεται στο σχήμα 8.8(α)), ενώ σε ένα δεύτερο βήμα οι παραγόμενες τοπικές διαπερατότητες παγώνουν και οι αντίστοιχες τιμές αυξητικής διαπερατότητας εφαρμόζονται σε συνδυασμό με τη διέγερση συχνότητας μεταγωγής [εμφανίζεται στο σχήμα 8.8(β)] [7.10]. Μέσω του δεύτερου βήματος μιας τέτοιας ανάλυσης, αξιολογούνται οι δυναμικές απώλειες δινορευμάτων που έχουν κυρίαρχο ρόλο με τη συνεισφορά τους στις απώλειες τόσο στα ελασματοποιημένα μέρη σιδήρου όσο και στα μέρη του μόνιμου μαγνήτη.

8.5 Σύγκριση μετρούμενων και προσομοιωμένων απωλειών

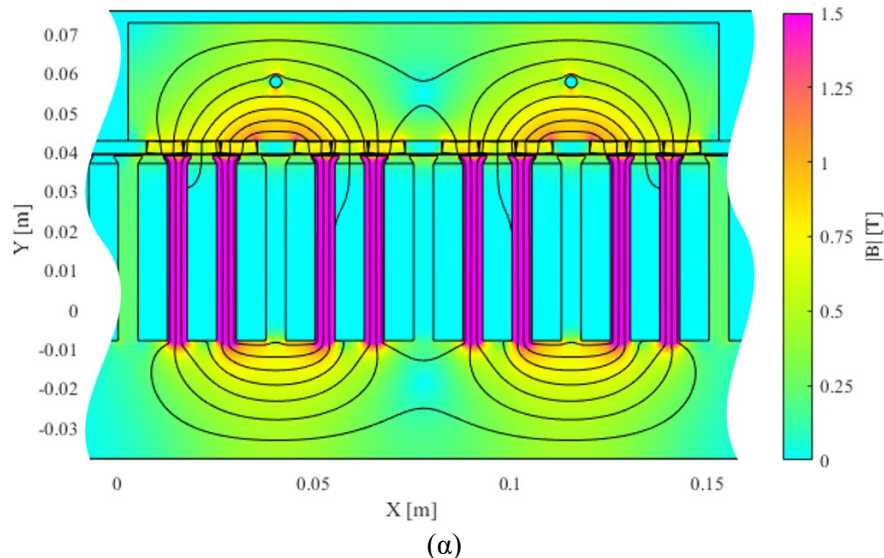
Οι προτεινόμενες τεχνικές μοντελοποίησης έχουν επιβεβαιωθεί μέσω μετρήσεων στο κατασκευασμένο πρωτότυπο γραμμικής μηχανής. Το σχήμα 8.9 δείχνει τη σύγκριση των συνολικών μετρούμενων απωλειών με τις υπολογιζόμενες μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

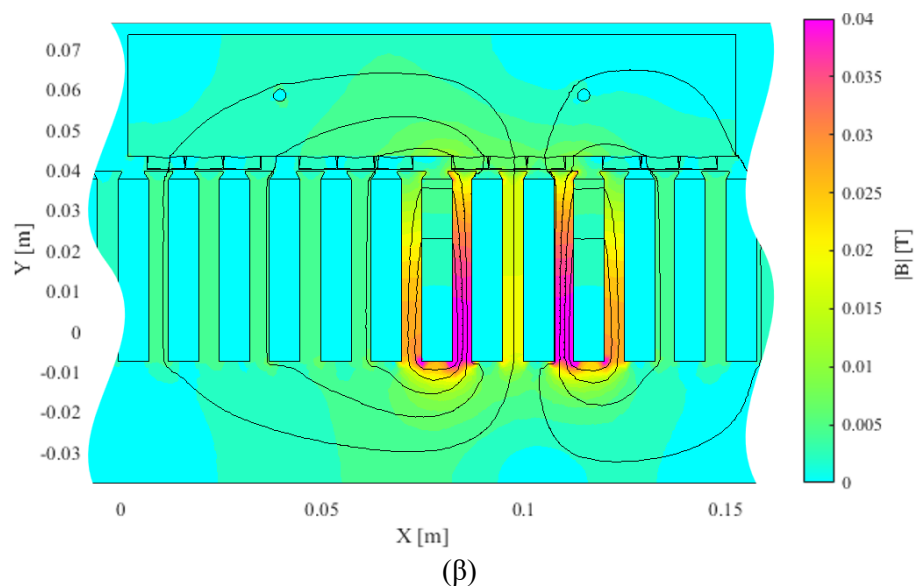
Συγκεκριμένα, το 8.9(α) δείχνει τη σύγκριση των απωλειών στην περίπτωση της διαμόρφωσης μαγνητικού κυκλώματος χωρίς το τμήμα του δρομέα, ενώ το 8.9(β) δείχνει τη σύγκριση των απωλειών στην περίπτωση της διαμόρφωσης μαγνητικού κυκλώματος συμπεριλαμβανομένου του δρομέα μόνιμου μαγνήτη.

Αυτά τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι απώλειες μόνιμου μαγνήτη είναι πρακτικά αμελητέες στις χαμηλές συχνότητες ενώ γίνονται πολύ σημαντικές στις περιοχές υψηλών συχνοτήτων. Επιπλέον, η καλή συμφωνία που παρατηρείται μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων απωλειών σε όλες τις εξεταζόμενες συχνότητες δείχνει την εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε αυτήν την κατηγορία προβλημάτων και την καταλληλότητά της να εφαρμοστεί σε διαδικασίες σχεδιασμού κινητήρα επιφανειακών μόνιμων μαγνητών υψηλής ταχύτητας.

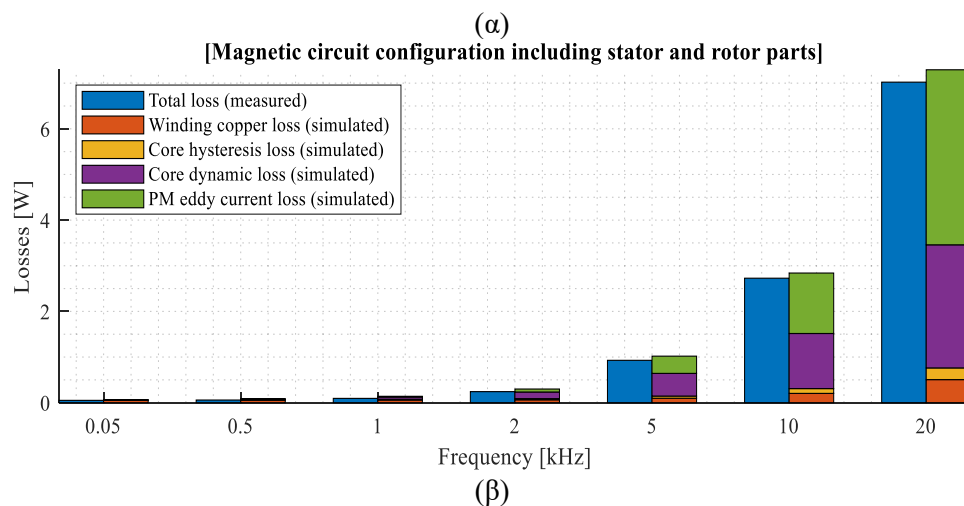
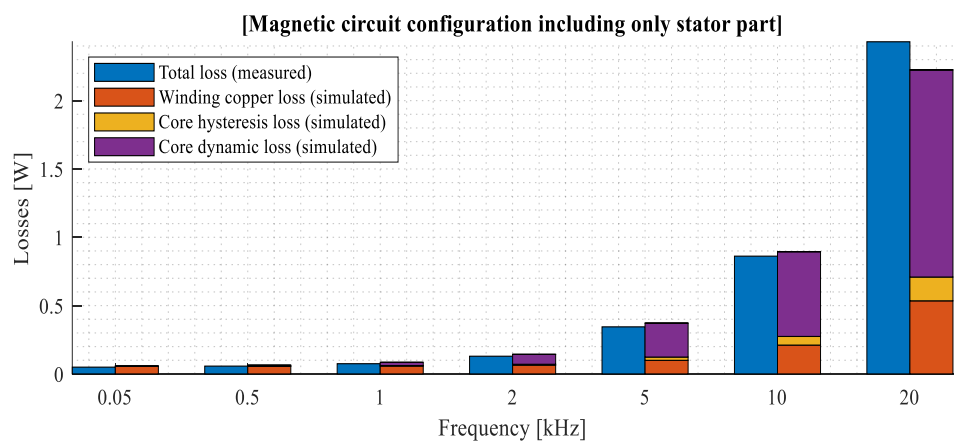


Σχ. 8.7 Μετρημένες συνολικών απωλειών υπό ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης στο πρωτότυπο γραμμικού κινητήρα για διαφορετικές συχνότητες και στις δύο περιπτώσεις παρουσίας δρομέα και απουσίας δρομέα. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.





Σχ. 8.8 (α) Κατανομή μαγνητικού πεδίου στη γραμμική μηχανή λόγω διέγερσης θεμελιωδών συχνοτήτων συμπεριλαμβανομένου μαγνητικού πεδίου μόνιμου μαγνήτη. (β) Κατανομή μαγνητικού πεδίου λόγω διέγερσης συχνότητας μεταγωγής εξαιρουμένου του μόνιμου μαγνητικού πεδίου και χρήσης διαφορικής διαπερατότητας στα μέρη του σιδήρου.



Σχ. 8.9 Σύγκριση των συνολικών μετρούμενων απωλειών με προσομοιωμένες τις επιμέρους συνιστώσες απώλειών. (α) Περίπτωση διαμόρφωσης μαγνητικού κυκλώματος που περιλαμβάνει μόνο το μέρος του στάτη. (β) Περίπτωση διαμόρφωσης μαγνητικού κυκλώματος συμπεριλαμβανομένου του μέρους του δρομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΗΧΑΝΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

9.1 Περίληψη Κεφαλαίου

Το κεφάλαιο αυτό, μελετά τις επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη εξαιτίας της μεταβολής του διακένου που προκαλείται από μηχανικές ελαστικές παραμορφώσεις του δρομέα σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας. Ειδικότερα, αξιολογούνται και συζητούνται οι αλλαγές στις χωρικές αρμονικές της πυκνότητας ροής, στις διακυμάνσεις της πεπλεγμένης ροής – που παρατηρούνται στις περιελίξεις του στάτη – και στον κυματισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στην περίπτωση ενός σύγχρονου κινητήρα εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη τύπου V.

Οι παραμορφώσεις του δρομέα που δημιουργούνται από τις φυγόκεντρες δυνάμεις αναλύονται με τη χρήση στατικής μηχανικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του κινητήρα προσομοιώνεται μέσω μιας κατάλληλης ασθενούς σύζευξης ενός 2D FEA με ένα στατικό αριθμητικό σχήμα πεπερασμένων στοιχείων βήμα προς βήμα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιβεβαιώνεται με πειραματικές μετρήσεις και επιτρέπει την εξέταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών και μηχανικών φαινομένων, ενώ μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης σχεδιασμού.

9.2 Εισαγωγή Κεφαλαίου

Οι σύγχρονες μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών υψηλής ταχύτητας με μαγνητική αντίσταση είναι ευρέως διαδεδομένες σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, όσον αφορά την επίτευξη υψηλής πυκνότητας ισχύος, υψηλής απόδοσης, μεγάλης αντοχής, και χαμηλού κόστους συντήρησης. Οι μηχανές υψηλής ταχύτητας είναι γενικά ευάλωτες στην ανάπτυξη απωλειών δινορευμάτων και πυρίνα, γεγονός που υποδεικνύει κατάλληλη την επιλογή ελασμάτων χαμηλού πάχους ή/και υψηλής συγκέντρωσης πυριτίου κατά τον σχεδιασμό [9.1].

Σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, ο σχεδιασμός του δρομέα αποτελεί αντικείμενο βελτιστοποίησης καθώς τα χαρακτηριστικά, όπως η εξασφάλιση μειωμένης ροής σκέδασης, μειωμένων απωλειών μαγνητικών λαμαρινών, μικρότερης στρεφόμενης μάζας, αυξημένης ροπής μαγνητικής αντίστασης (reluctance torque), τα οποία δρουν ανταγωνιστικά μεταξύ τους [9.2], [9.3].

Αναμφίβολα, άμεση προτεραιότητα είναι να εξασφαλιστεί πρώτα η αντοχή στις φυγόκεντρες δυνάμεις, οι οποίες αυξάνονται υπέρμετρα σε υψηλά εύρη ταχυτήτων. Βέβαια, τα τμήματα του δρομέα επιβαρύνονται και από θερμικές δυνάμεις διαστολής, αλλά και από μηχανικές τάσεις εξαιτίας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου· ωστόσο, δεδομένης της μικρότερης σημασίας της επίδρασής τους, οι επιπτώσεις τους στην παραμόρφωση του δρομέα δεν έχουν ληφθεί υπόψιν στην παρούσα μελέτη.

Ένας άλλος καίριος στόχος είναι να επιτευχθεί μείωση της μάζας του δρομέα, ιδίως σε περιοχές όπου υπάρχει ροή σκέδασης, όπως στα στηρίγματα του μόνιμου μαγνήτη (π.χ. σε υποστυλώματα τύπου πλευρών (rib) και τύπου γέφυρας (bridge) [9.4]. Ο συνδυασμός αυτών των προκλήσεων μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες κρίσιμες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δρομέα, με αποτέλεσμα την ελάττωση του πάχους του διακένου και επιφέροντας μεταβολές των αυτεπαγωγών του ορθού (D) και κάθετου άξονα (Q), καθώς και της ταλάντωσης ροπής. Στο [9.5] τα ανταγωνιστικά χαρακτηριστικά μεταξύ της μηχανικής αντοχής του δρομέα και της ροής σκέδασης αναλύονται για μηχανές υψηλής ταχύτητας, με ένα αριθμητικό σχήμα, και εισάγεται ένα γεωμετρικό σχήμα τύπου τόξου στα φράγματα της ροής κοντά στους μαγνήτες. Μια εναλλακτική ιδέα για την εύρεση κατάλληλης ισορροπίας στα χαρακτηριστικά της μηχανής, αναλύεται και

συζητείται στο [9.6], προτείνοντας τη χρήση ενός μαγνητικού υλικού διπλής φάσης που αποτελείται από μη μαγνητικές (χρησιμοποιείται στα υποστυλώματα) και μαγνητικές περιοχές (που χρησιμοποιούνται στα υπόλοιπα μέρη του δρομέα).

Μια ενδελεχής ανάλυση η οποία υιοθετεί μια άμεση σύζευξη των μηχανικών, ηλεκτρομαγνητικών, και θερμικών φαινομένων ενδεχομένως να οδηγεί σε απαιτητικά αριθμητικά σχήματα με υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Παρόλα αυτά, επαρκής ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή της ασθενούς σύζευξης των αλληλοεξαρτώμενων φαινομένων, όπως φαίνεται από διάφορες μελέτες που συναντώνται στη βιβλιογραφία [9.1].

Οι μηχανικές καταπονήσεις και παραμορφώσεις υπό την επίδραση φυγοκέντρων δυνάμεων των ελασμάτων του δρομέα μπορούν να αναλυθούν με τη χρήση ενός διδιάστατου (2D) τριγωνικού πλέγματος [9.7] με την παραδοχή στοιχείων σταθερής τάσης (Constant strain triangles) [9.8]. Τα όρια των μηχανικών τάσεων των εξεταζόμενων υλικών βρίσκονται με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή. Στην παρούσα μελέτη, τα όρια αυτά, αξιολογούνται με τον υπολογισμό της τάσης von Mises, προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσον τα ελάσματα μπορούν να αντέξουν την καταπόνηση που αναπτύσσεται από τις ακτινικές δυνάμεις.

Στην πρόσφατη βιβλιογραφία [9.9] έχει αναπτυχθεί ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της μηχανικής καταπόνησης στα υποστυλώματα ενός ένθετου τύπου (I -Type) IPMSRM, διασφαλίζοντας την μηχανική ευρωστία του δρομέα. Στο ίδιο άρθρο παρουσιάζονται μετρήσεις των πλαστικών παραμορφώσεων που εμφανίζονται στο εξωτερικό σχήμα του δρομέα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία του κεφαλαίου, μπορεί να επεκταθεί και να χρησιμοποιηθεί ως μηχανισμός ανίχνευσης της ελαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται ο δρομέας κατά την περιστροφή.

Η μάζα του δρομέα και η ικανότητά του να μην καταστρέφεται από φυγόκεντρες δυνάμεις σε συνθήκες μέγιστης ταχύτητας μπορούν να εισαχθούν σε μια αντικειμενική συνάρτηση ενός κατάλληλου εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης όπως ο γενετικός αλγόριθμος, έτσι ώστε να υπολογιστεί -βρεθεί- προσδιοριστεί η προκαταρκτική γεωμετρία για τον σχεδιασμό του δρομέα.

Η ηλεκτρομαγνητική (EM) συμπεριφορά του κινητήρα διερευνάται με ένα σχήμα ανάλυσης βήμα προς βήμα. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιεί ένα χρονικά στατικό μη γραμμικό αριθμητικό σχήμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Στατικό FEA). Τα δύο αυτά αριθμητικά σχήματα EM και Structural FEA χρησιμοποιούν το ίδιο «δομημένο» πλέγμα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να παρέχει την κατάλληλη ακρίβεια υπολογισμού μηχανικών καταπονήσεων και της κατανομής των μηχανικών πιέσεων στο ηλεκτρομαγνητικό FEA. Ένα παρόμοιο διδιάστατο μεταβατικό μη γραμμικό αριθμητικό σχήμα – FEA για ηλεκτρομαγνητικά – δυναμικά προβλήματα, περιγράφεται στο [9.10], μέσω της ανάλυσης ενός επαγωγικού κινητήρα. Αυτοί οι αλγόριθμοι ανοιχτού κώδικα (SMEK lib) προσαρμόζονται και δημιουργείται ένα κατάλληλο χρονο-στατικό μη γραμμικό σχήμα EM FEA που συνυπολογίζει την κατανομή των μηχανικών τάσεων στο ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα.

Στις μελέτες [9.11]–[9.13] φανερώνεται η επίδραση της μηχανικής τάσης στη σχετική μαγνητική διαπερατότητα του ηλεκτρικού χάλυβα. Εφαρμογή της παρατήρησης αυτής έχει γίνει στην πλευρά του στάτη, μοντελοποιώντας τις επιπτώσεις της σφικτής συναρμογής. Στις παραπάνω μελέτες, έχει καταδειχθεί η σημασία μιας συνδυασμένης μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης, ενώ έχουν προταθεί και συγκεκριμένες τεχνικές για την ασθενή σύζευξη των αλληλεξαρτώμενων φαινομένων. Διάφοροι τύποι μηχανικών εκκεντροτήτων αναφορικά με την τοποθέτηση του δρομέα μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες και να μειώσουν την ικανότητά του να περιστρέφεται σε υψηλότερες ταχύτητες. Ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί προηγμένες τεχνικές πεπερασμένων κυματο-πακέτων (wavelets) που επιτρέπουν την ανίχνευση τέτοιων εκκεντροτήτων [9.14]. Επιπλέον, οι αρμονικές διεγέρσεις, οι δυναμικές εκκεντρότητες, και οι συχνότητες συντονισμού του άξονα του δρομέα έχουν αναλυθεί εκτενώς στην πηγή [9.15]. Ένας άξονας δρομέα μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης που λειτουργεί σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας μελετάται στην πηγή [9.16], μαζί με ορισμένα χαρακτηριστικά σχετικά με τον αντιστροφία οδήγησης της μηχανής.

Τα αποτελέσματα κοπής των ελασμάτων σιδήρου καθώς και οι αλλαγές συμπεριφοράς στις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες λόγω μηχανικής καταπόνησης έχουν μελετηθεί στο [9.17]. Η σημασία της χρήσης μιας προηγμένης μεταβλητής, η οποία εκπροσωπεί τη κατανομή των μηχανικών τάσεων, και συνδυάζει αποτελεσματικά την κατεύθυνση της μηχανικής τάσης μαζί με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου H εισάγεται στην ίδια δημοσίευση. Στην παρούσα μελέτη, η υδροστατική τάση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς του υλικού σε μια περιοχή υπό μηχανική πίεση. Μια τέτοια ανάλυση μπορεί να προσφέρει επαρκή ακρίβεια στην αξιολόγηση των αλλαγών των χαρακτηριστικών του κινητήρα εσωτερικών μόνιμων μαγνητών, λόγω παραμόρφωσης του δρομέα [9.18].

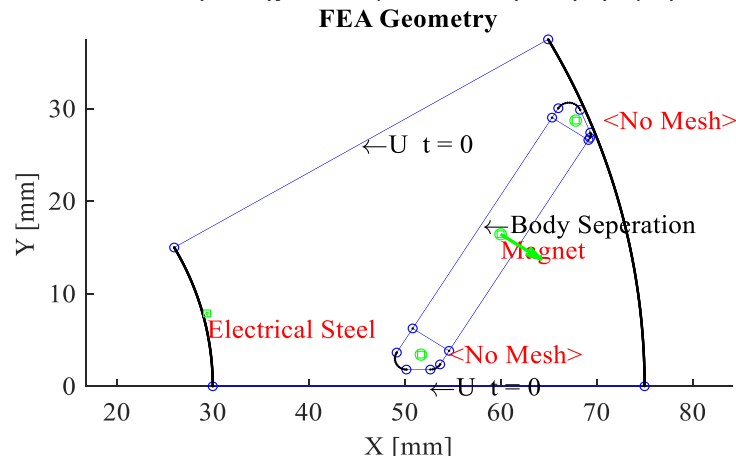
Το παρόν κεφάλαιο συμπεριλαμβάνει εκτεταμένες κατάλληλες μετρήσεις των διακυμάνσεων των μαγνητικών χαρακτηριστικών ελασματοποιημένου πυρήνα υπό μηχανική καταπόνηση, καθώς και πειραματική επιβεβαίωση των απωλειών που προκύπτουν. Αξιολογούνται ακόμη οι διακυμάνσεις της ροής διέγερσης σε ένα κινητήρα τύπου V-εσωτερικών μόνιμων μαγνητών, λόγω της παραμόρφωσης του δρομέα σε λειτουργία υψηλής ταχύτητας.

Η συνεισφορά της προτεινόμενης μεθοδολογίας βρίσκεται στην συγκεκριμένη τεχνική μοντελοποίησης ελασμάτων σιδήρου μέσω κατάλληλων μετρήσεων, επιτρέποντας την επαρκή αναπαράσταση της μηχανικής τάσης και της παραμόρφωσης του δρομέα λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων, διευκολύνοντας έτσι, την αξιολόγηση της επίδρασης στα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Η μέθοδος βασίζεται σε μια ασθενή σύζευξη μηχανικών και ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που απαιτούν μειωμένες υπολογιστικές απαιτήσεις και μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης σχεδιασμού.

Το καινοτόμο σημείο της παρούσας εργασίας έγκειται στην εισαγωγή μιας μεθοδολογίας η οποία βασίζεται σε μια συγκεκριμένη ασθενή σύζευξη μεταξύ της μηχανικής παραμόρφωσης του δρομέα λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων και των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων όσον αφορά τις αρμονικές χώρου πυκνότητας μαγνητικής ροής, τις διαφοροποιήσεις των πεπλεγμένων ροών στα τυλίγματα του στάτη, και τις ταλαντώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Αυτό διευκολύνει την ενσωμάτωση της προτεινόμενης μεθόδου σε διαδικασίες βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, παρέχοντας επαρκή ακρίβεια και απαιτώντας ελάχιστα υπολογιστικά μέσα.

9.3 Ανάλυση 2D Πεπερασμένων Στοιχείων

Προκειμένου να διερευνηθούν οι επιπτώσεις της παραμόρφωσης του δρομέα εξαιτίας φυγόκεντρων δυνάμεων, έχει δημιουργηθεί ένα μηχανικό στατικό μοντέλο, το οποίο είναι ασθενώς συζευγμένο με μία μη γραμμική ηλεκτρομαγνητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Οι παραμορφώσεις στην εξωτερική περιφέρεια του δρομέα εκτιμώνται σε ένα πρώτο βήμα με τη χρήση του μηχανικού FEA και στη συνέχεια εισάγονται στο ηλεκτρομαγνητικό αριθμητικό σχήμα.



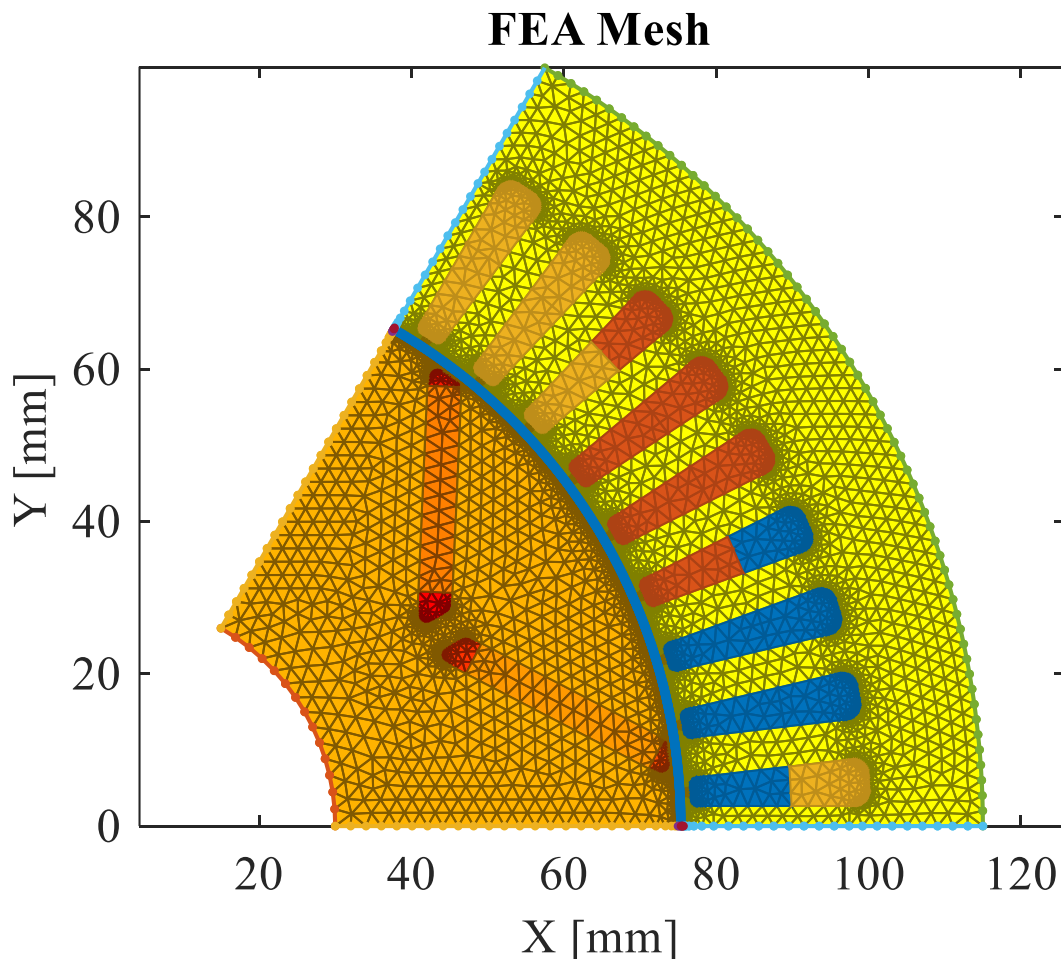
Σχ. 9.1 Γεωμετρία του δρομέα με εφαρμογή των μηχανικών οριακών συνθηκών στις κατάλληλες γραμμές.

9.3.1 Γεωμετρία και Δημιουργία Πλέγματος

Για να αποφευχθεί η ανάπτυξη αλγορίθμων χειρισμού σύνθετης γεωμετρίας, χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικά διαθέσιμο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ανοικτού κώδικα για την επεξεργασία της γεωμετρίας. Στη συνέχεια, το αρχείο που έχει δημιουργηθεί εισάγεται στο λογισμικό MATLAB και υφίσταται ανάλυση από τον αλγόριθμο πλεγματοποίησης που περιγράφεται στην πηγή [9.5], για να παραχθεί το τριγωνικό πλέγμα και να προσημειωθούν οι περιοχές που αφορούν διαφορετικά υλικά. Στο σχήμα 9.1 παρουσιάζεται η γεωμετρία του δρομέα μαζί με τις οριακές συνθήκες του μηχανικού προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων.

Το αντίστοιχο τριγωνικό πλέγμα που έχει δημιουργηθεί για την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση απεικονίζεται στο σχήμα 9.2. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στο μοντέλο μηχανικής ανάλυσης μόνο το μισό τμήμα ενός πόλου χρειάζεται να απεικονιστεί, ενώ στο ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο είναι απαραίτητο να εξεταστεί ένα τμήμα πόλου της γεωμετρίας του δρομέα. Για τον λόγο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τις υπάρχουσες γεωμετρικές συμμετρίες και συμμετρίες των πηγών, τα πεδία επίλυσης των προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής και δομικής ανάλυσης έχουν περιοριστεί μόλις στο 1/6 και στο 1/12 της συνολικής γεωμετρίας αντίστοιχα, με αποτέλεσμα σημαντικές μειώσεις στον χώρο της υπολογιστικής μνήμης και στον χρόνο υπολογισμού.

Η υπό εξέταση μηχανή διέπεται από τις παραμέτρους διαμόρφωσης γεωμετρίας που παρουσιάζονται στον πίνακα 9.1, ενώ τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των υλικών δίνονται στον πίνακα 9.2. Οι μεταβλητές μετά τη διαδικασία μηχανικής βελτιστοποίησης παρατίθενται στον πίνακα 9.3.



Σχ. 9.2 Δομημένο Ηλεκτρομαγνητικό πλέγμα ΑΠΣ που έχει διαμορφωθεί για τμήματα του στάτη και του δρομέα. Περιοχές και όρια διαφορετικών υλικών επισημαίνονται με διαφορετικά χρώματα.

Parameter		Value	Units
Winding Configuration	Phases	3	
	Poles	6	
	Slots per pole per phase	3	
	Overlap Slots	1	
	Slot Fill Factor	0.52	%
	Nominal Current Density	5	A/mm ²
Motor Geometry	Active Part Length	66	mm
	Stator Outer Radius	115	mm
	Shaft Radius	30	mm
	Air-gap Radius	75.35	mm
	Air-gap Width	0.7	mm
	Maximum Speed	15	kRPM
Performance Metrics	Maximum Torque	60	Nm
	Base Speed	4.8	kRPM
	Peak Efficiency	96.4	%
	Nominal Power	30.2	kW

Πίν. 9.1 Παράμετροι κυρίας διάταξης της μηχανής

Material	Characteristic	Value	Units
ND50H	Energy	398	kJ/m ³
	Remanence	1.4	T
	Coercivity	995	kA/m
	Intrinsic Coercivity	1353	kA/m
	Permeability	1.045	ratio
	Conductivity	0.667*10 ⁶	S/m
	Density	7400	kg/m ³
	Young Modulus	180	GPa
	Poisson Ratio	0.24	ratio
M270-35A	Resistivity	52	μΩ cm
	Density	7650	kg/m ³
	Young Modulus	195	GPa
	Poisson Ratio	0.3	ratio
	Yield Strength	450	MPa
	Tensile Strength	565	MPa

Πίν. 9.2 Χαρακτηριστικά των υλικών

Parameter Name	Value	Units
Rinner	75	mm
Router	30	mm
V bottom % Depth	40	%
V top Angle % Polar Angle	94	%
Mag Offset % Pocket	20	%
Mag Height	4.5	mm
Mag Length % Pocket Length	90	%
Rib Thickness	3.61	mm
Bridge Thickness	0.42	mm
Fillets (1,2,3,4)	1.2, 1.3, 1.2, 0.6	mm

Πίν. 9.3 Γεωμετρικές παράμετροι του δρομέα.

9.3.2 Στατική Μηχανική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

Η δομική ανάλυση διεκπεραιώνεται με την ανάπτυξη ενός μηχανικού στατικού αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να υπολογιστεί η μηχανική κατανομή των τάσεων δύο διαστάσεων με την υπόθεση ισοτροπικών υλικών. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, οι πίνακες που αντιπροσωπεύουν την Ελαστικότητα ($\mathbf{E}$), το Τρίγωνο Σταθερών Τάσεων (CST), μήτρα σχήματος ($\mathbf{B}$), μήτρα δυσκαμψίας ($\mathbf{K}$), και το διάνυσμα δύναμης ($\mathbf{F}$) προκύπτουν με τη χρήση των εξισώσεων που ακολουθούν:

$$\mathbf{E}_{\text{Elem}} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

$$\mathbf{B}_{\text{Elem}} = \frac{1}{2A_{\text{Elem}}} \begin{bmatrix} \Delta y_{23} & 0 & \Delta y_{31} & 0 & \Delta y_{12} & 0 \\ 0 & \Delta x_{32} & 0 & \Delta x_{13} & 0 & \Delta x_{21} \\ \Delta x_{32} & \Delta y_{23} & \Delta x_{13} & \Delta y_{31} & \Delta x_{21} & \Delta y_{12} \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

$$\mathbf{K}_{\text{Elem}} = A_{\text{Elem}} \mathbf{B}_{\text{Elem}}^T \mathbf{E}_{\text{Elem}} \mathbf{B}_{\text{Elem}} \quad (9.3)$$

$$\mathbf{F}_{\text{Elem}} = [F_{x_1} \quad F_{y_1} \quad F_{x_2} \quad F_{y_2} \quad F_{x_3} \quad F_{y_3}] \quad (9.4)$$

όπου το $\mathbf{E}$ αντιπροσωπεύει τον συντελεστή ελαστικότητας Young, το ν είναι ο λόγος Poisson, οι X και Y είναι οι κομβικές συντεταγμένες, $Y_{n,t} = Y_n - Y_t$, $X_{n,t} = X_n - X_t$, ενώ το A αντιπροσωπεύει το εμβαδόν του στοιχείου.

Οι πίνακες αυτοί αναφέρονται σε κάθε στοιχείο του πλέγματος και προκειμένου να επιλυθεί η εξίσωση στατικής ισορροπίας (9.5) πρέπει να αποδοθούν συνεισφορές σε κάθε κόμβο του πλέγματος σύμφωνα με τις συνδέσεις του στοιχείου:

$$\mathbf{d}(\mathbf{F}_{\text{Node}}) = [\mathbf{P}_{\text{Node}}^T \mathbf{K}_{\text{Node}} \mathbf{P}_{\text{Node}}] [\mathbf{d}(\mathbf{U}_{\text{Node}}) \mathbf{P}_{\text{Node}}^T] \quad (9.5)$$

όπου το $\mathbf{P}_{\text{Node}}$ αντιπροσωπεύει τον πίνακα διασύνδεσης μεταξύ δεσμευμένων και ελεύθερων κόμβων (DoF: Degree of Freedom).

Για τον υπολογισμό της τάσης των στοιχείων σύμφωνα με την εξίσωση (9.8) και των παραμορφώσεων σύμφωνα με την εξίσωση (9.7), ο πίνακας $\mathbf{C}$ σχηματίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (9.6):

$$\mathbf{C}_{\text{Elem}} = [U_1 \quad V_1 \quad U_2 \quad V_2 \quad U_3 \quad V_3] \quad (9.6)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{Elem}} = \mathbf{B}_{\text{Elem}} \mathbf{C}_{\text{Elem}} \quad (9.7)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{Elem}} = \mathbf{E}_{\text{Elem}} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{Elem}} \quad (9.8)$$

όπου η μεταβλητή U_n δηλώνει την παραμόρφωση του n-οστού κόμβου στον άξονα x , ενώ η μεταβλητή V_n αντιπροσωπεύει την παραμόρφωση του n-οστού κόμβου στον άξονα y .

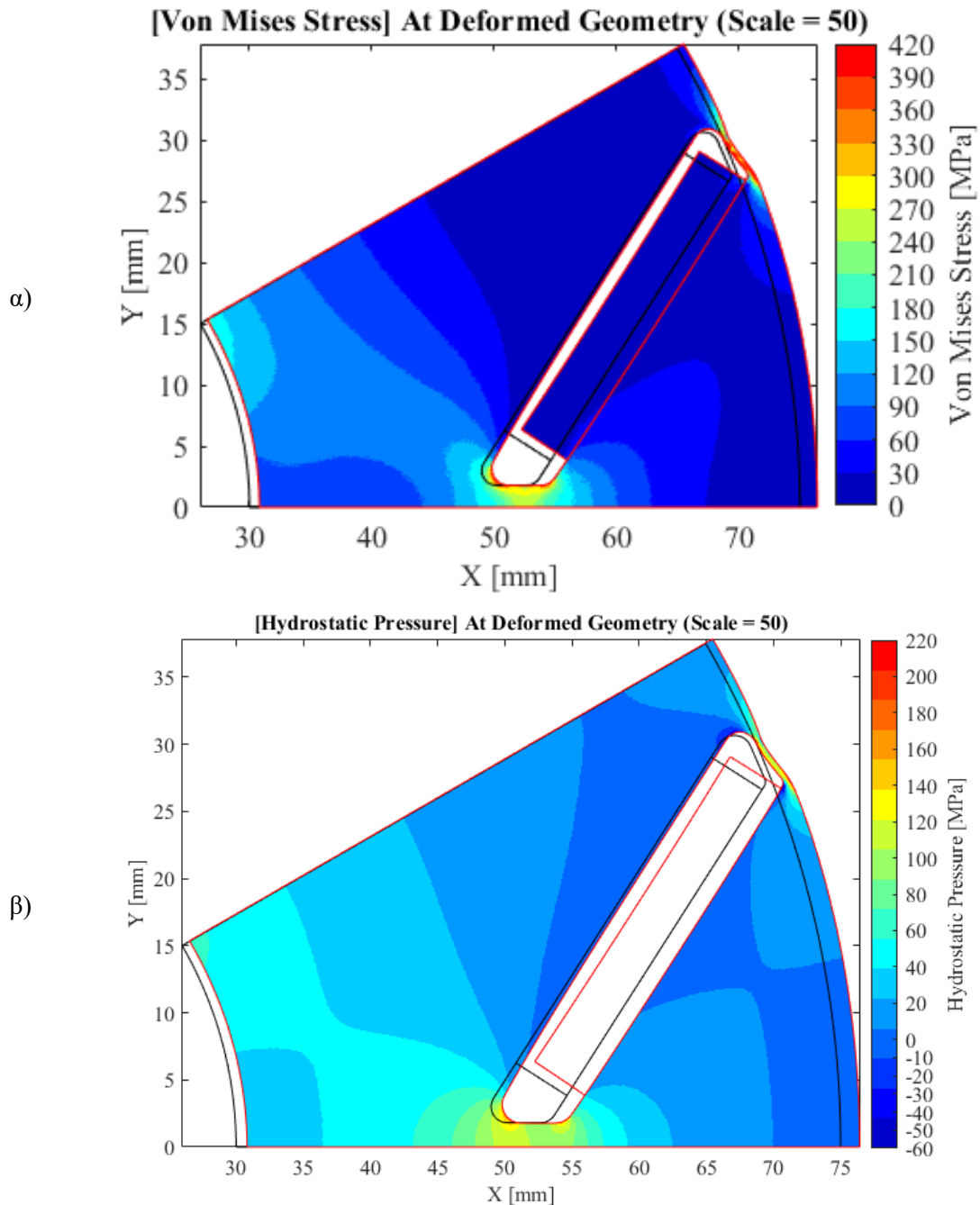
Το διάνυσμα των δυνάμεων στην περίπτωση των φυγόκεντρων δυνάμεων μπορεί στη συνέχεια να εκτιμηθεί σύμφωνα με την εξίσωση (9.9).

$$\begin{bmatrix} F_{x_i} \\ F_{y_i} \end{bmatrix}_{\text{Elem}} = A_{\text{Elem}} \rho_{\text{Elem}} \Omega^2 \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}_{\text{Elem}} \quad i = \{1,2,3\} \quad (9.9)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα της μάζας του εκάστοτε υλικού, i υποδηλώνει τον δείκτη του κόμβου σε ένα στοιχείο και Ω είναι η ταχύτητα περιστροφής.

Ένα παράδειγμα της μηχανικής ανάλυσης παρουσιάζεται στο σχήμα 9.3 (α), το οποίο δείχνει την παραμόρφωση του δρομέα μαζί με την κατανομή της τάσης von Mises. Η καταπόνηση του δρομέα είναι μικρότερη από το όριο διαρροής (ενώ το υπερβαίνει σε ταχύτητες μεγαλύτερες από

τα 15kRPM). Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης που περιγράφεται στη συνέχεια. Στο σχήμα 9.3(β) φαίνεται η κατανομή της υδροστατικής πίεσης στον ελασματοποιημένο σίδηρο του δρομέα, που χρησιμοποιείται στην ασθενή σύζευξη των ηλεκτρομαγνητικών και μηχανικών φαινομένων με στόχο την κατάλληλη εκτίμηση της συμπεριφοράς του κινητήρα σε λειτουργία υψηλής ταχύτητας.



Σχ. 9.3 Αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης στην παραμορφωμένη γεωμετρία, υπό συνθήκες μέγιστης ταχύτητας (15kRPM) αντιπροσωπεύουν: (α) Κατανομή τάσης Von-Mises. (β) Κατανομή υδροστατικής τάσης.

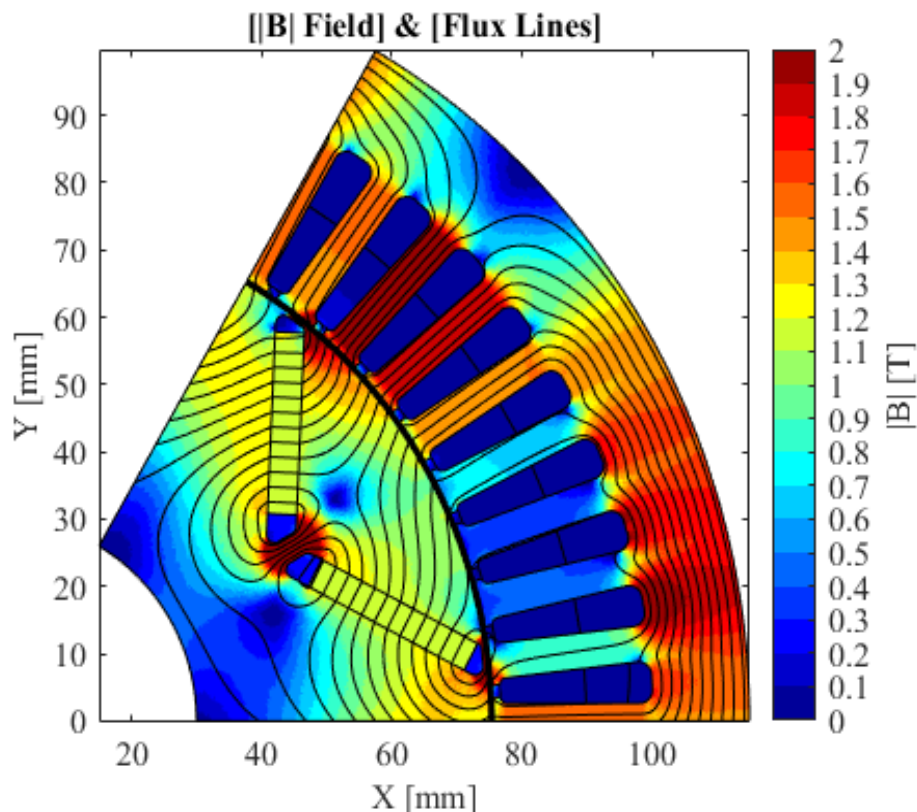
9.3.3 Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

Το προτεινόμενο ηλεκτρομαγνητικό μη γραμμικό μοντέλο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων έχει αναπτυχθεί για να λειτουργεί με 2D τριγωνικά πλέγματα, λαμβάνοντας υπόψη μια δεδομένη συνάρτηση BH – την αρχική καμπύλη μαγνήτισης – που εμπεριέχει μη γραμμικά χαρακτηριστικά της σχετικής διαπερατότητας σε κάθε στοιχείο. Η εφαρμογή του αλγορίθμου Newton – Raphson επιτρέπει επιτάχυνση της σύγκλισης προς τη λύση.

Αυτό το μοντέλο μπορεί επίσης να υποστηρίξει οριακές συνθήκες όπως η ζώνη ολίσθησης για την μοντελοποίηση του διακένου. Μια τέτοια οριακή συνθήκη επιτρέπει την αποφυγή του επανασχεδιασμού της γεωμετρίας κατά την περιστροφή του δρομέα. Οι κόμβοι τόσο στην πλευρά του στάτη όσο και στην πλευρά του δρομέα διατηρούνται σταθεροί και μια ζώνη στο διάκενο αέρα εγγυάται τον συνυπολογισμό της κίνησης. Η εν λόγω τεχνική συνιστά μια πρακτική λύση για τη συνεκτίμηση του περιστρεφόμενου πλέγματος στο διάκενο.

Επιπλέον, το συγκεκριμένο μοντέλο, μπορεί να αναπαριστά υλικά μόνιμου μαγνήτη καθορίζοντας κατάλληλες τιμές παραμένουσας μαγνήτισης B_r και σχετικής διαπερατότητας. Ωστόσο, οι βρόχοι απομαγνήτισης και επαναμαγνήτισης δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη.

Το προτεινόμενο ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης διαφορετικών καμπυλών BH σε κάθε στοιχείο πλέγματος. Αυτή η ικανότητα χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της διαφοράς στην ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά λόγω μηχανικής καταπόνησης. Για να μειωθούν οι απαιτήσεις μνήμης και να μειωθεί ελαφρώς ο υπολογιστικός χρόνος, η κατανομή της μηχανικής τάσης αρχικά κατηγοριοποιείται σε κάδους που περιέχουν παρόμοια τιμή τάσης. Τα στοιχεία πλέγματος κάθε κάδου παρόμοιας καταπόνησης αντιστοιχίζονται στην ίδια καμπύλη BH , η οποία αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά του υλικού υπό πίεση. Τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου φαίνονται στο σχήμα 9.4, απεικονίζοντας την πυκνότητα ροής του κινητήρα όταν λειτουργεί υπό συνθήκες μέγιστης ροπής.



Σχ. 9.4 Αποτελέσματα λύσης ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που δείχνουν την πυκνότητα ροής $|B|$ και τις ισοδυναμικές γραμμές υπό συνθήκες μέγιστης ροπής.

Η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του κινητήρα κάτω από μια συγκεκριμένη συνθήκη λειτουργίας προέρχεται από τη χρονικά στατική μη γραμμική ηλεκτρομαγνητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται σε πολλαπλά στιγμιότυπο. Κάθε στιγμιότυπο δημιουργείται με βάση τη θέση του δρομέα. Αυτό το σχήμα είναι μια διαδικασία βήμα προς βήμα, όπου κάθε βήμα είναι ένα καλά καθορισμένο χρονικό στιγμιότυπο της σύγχρονης περιστροφής. Με αυτόν τον τρόπο, η συμπεριφορά του κινητήρα μπορεί να εκτιμηθεί για κάθε ξεχωριστή τριάδα μεγέθους ρεύματος, ταχύτητας δρομέα και γωνία φορτίου.

Σε αυτή τη μέθοδο, η ηλεκτρομαγνητική μεταβατική συμπεριφορά όπως το φαινόμενο των δινορευμάτων, παραμελείται. Γενικά, οι εξελίξεις των δινορευμάτων στον ηλεκτρικό χάλυβα μπορούν να μειώσουν τη ροή του κινητήρα και να αυξήσουν τις απώλειες υψηλής ταχύτητας. Στον εξεταζόμενο κινητήρα, επιλέγονται λεπτές ελασματοποιήσεις με αποτέλεσμα τη μικρή μείωση της ροής από τα δινορεύματα, επιτρέποντας την παραμέληση του «πεδίου αντίδρασης». Αυτή η υπόθεση έχει επικυρωθεί στην συνέχεια και απεικονίζεται διαμέσου του σχήματος 9.9.

Η επίδραση υστέρησης στη συμπεριφορά του κινητήρα θεωρείται επίσης αμελητέα, λόγω του πολύ λεπτού βρόχου υστέρησης που παρουσιάζει το υλικό.

9.4 Μηχανική Βελτιστοποίηση

Η μηχανική βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με την ανάπτυξη ενός εξελικτικού αλγορίθμου που βελτιστοποιεί μια κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση. Συγκεκριμένα, επιστρατεύεται ένας γενετικός αλγόριθμος 1000 γενεών με μέγεθος πληθυσμού της καθεμίας 100. Το συγκεκριμένο μέγεθος πληθυσμού εξασφαλίζει, την ανίχνευση του ολικού ελαχίστου της συνάρτησης κόστους για αυτή την εφαρμογή, το οποίο συγκλίνει επίσης στις 800 γενεές κατά προσέγγιση. Αύξηση του πληθυσμού μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια, αλλά, συγχρόνως, απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό γενεών για τη σύγκλιση. Η συνολική διάρκεια βελτιστοποίησης του δρομέα ορίστηκε 30 λεπτά το μέγιστο, επομένως ο μέγιστος αριθμός γενεών που επιλέχθηκε ήταν 1000.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μάζα του δρομέα μαζί με την ικανότητα του να αντέχει έως και τα όρια της μηχανικής καταπόνησης του μέχρι την επιθυμητή μέγιστη ταχύτητα, μια αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση έχει καταστροφωθεί (9.12) με βάση το διάνυσμα μεταβλητής γεωμετρίας $\bar{v}$ που φαίνεται στο (9.10) και χρησιμοποιώντας μεγέθη βελτιστοποίησης που περιγράφονται στο (9.11). Η αντικειμενική συνάρτηση προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την περιοχή του δρομέα χρησιμοποιώντας μια αρνητική αντίστροφη συνάρτηση του μεγέθους της περιοχής του δρομέα (9.13), μόνο όταν η μέγιστη τάση του δρομέα είναι μικρότερη από το όριο διαρροής, ενώ ελαχιστοποιεί το μέγιστο επίπεδο μηχανικής καταπόνησης του δρομέα (9.13), όταν το μέγιστο επίπεδο καταπόνησης του, υπερβαίνει το όριο της τάσης διαρροής.

Η προκύπτουσα συνολική ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης πρέπει πάντα να είναι αρνητική, διασφαλίζοντας ότι τα επίπεδα της καταπόνησης της δομής του δρομέα είναι χαμηλότερα από την αντοχή διαρροής του υλικού, κατά τη λειτουργία της μέγιστης ταχύτητας. Η ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης συσχετίζεται με τη γεωμετρία που έχει τη χαμηλότερη μάζα σιδήρου και επομένως τα πιο λεπτά υποστολώματα ως εξής:

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} \text{Rotor Bridge Thickness} \\ \text{Rotor Rib Thickness} \\ \text{Fillet Radii } \mathbf{vector}_{(1 \times 4)} \end{bmatrix} \quad (9.10)$$

$$\begin{bmatrix} x(\bar{v}) \\ y(\bar{v}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \max(\text{Von-Mises Stress}(\bar{v})) \\ \text{Rotor Iron Area}(\bar{v}) \end{bmatrix} \quad (9.11)$$

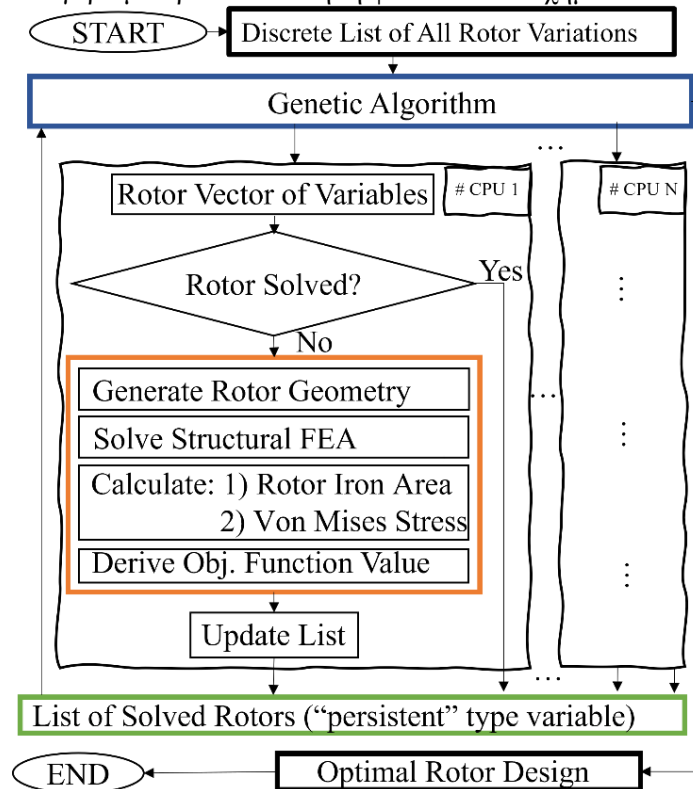
$$F_{Obj. Function}(\bar{v}) = \begin{cases} f_1(y(\bar{v})), & x(\bar{v}) < \text{Yield Strength} \\ f_2(x(\bar{v})), & x(\bar{v}) \geq \text{Yield Strength} \end{cases} \quad (9.12)$$

$$\begin{bmatrix} f_1(y(\bar{v})) \\ f_2(x(\bar{v})) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/y(\bar{v}) \\ \frac{x(\bar{v}) - Yied\ Strength}{Yied\ Strength} \end{bmatrix} \quad (9.13)$$

όπου η μέγιστη (τάση Von-Mises) και η περιοχή σιδήρου του δρομέα μπορούν να υπολογιστούν με τη μηχανική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, για ένα δεδομένο σύνολο μεταβλητών που περιγράφονται από $\bar{v}$.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι συνήθως δεν αποθηκεύουν τα αποτελέσματα των προηγούμενων διατάξεων. Αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, καθώς κάθε αξιολόγηση της αντικειμενικής συνάρτησης απαιτεί μια σχετικά υπολογιστικά πολύπλοκη ΑΠΣ. Από την άποψη αυτή, σημαντική εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή παρένθετων τεχνικών αξιολόγησης και διατηρώντας τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης από τις προηγούμενες διατάξεις για να αποφεύγεται η εκτέλεση της ΑΠΣ για παρόμοιες διατάξεις.

Συνεπώς, διατηρώντας τις «ιστορικές τιμές» της αντικειμενικής συνάρτησης και, ακολούθως, μέσω του χειρισμού των διακριτών της μείωσης για τις μεταβλητές βελτιστοποίησης, η σύγκλιση της μεθόδου μπορεί να επιταχυνθεί σε ουσιαστικό βαθμό. Επιπλέον, η παράλληλη εφαρμογή σε υπολογιστικό σύστημα μπορεί να παρέχει μεγάλη μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου βελτιστοποίησης φαίνεται στο σχήμα 9.4



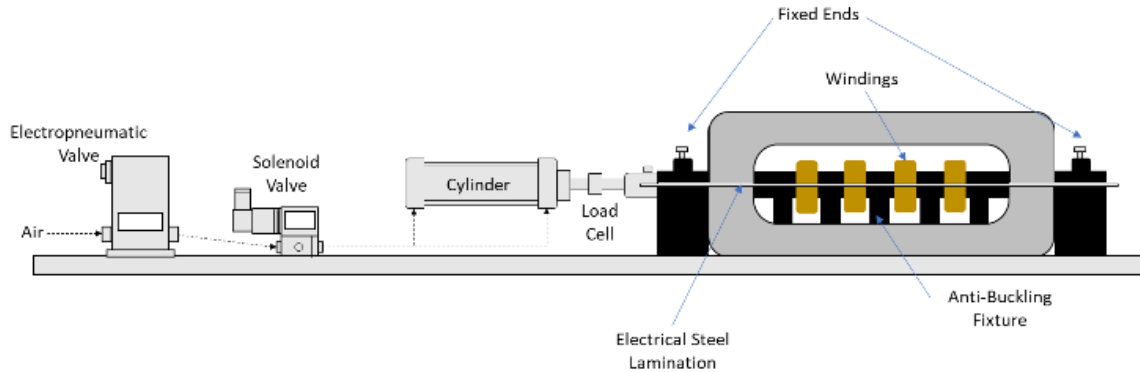
Σχ. 9.5 Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου μηχανικής βελτιστοποίησης με βάση την παράλληλη χρήση επεξεργαστών.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της δομικής ανάλυσης υιοθετήθηκε αναφέρονται στον πίνακα 9.3. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν είναι οι εξής: Πάχος Υποστυλώματος τύπου πλευρών, Πάχος Υποστυλώματος τύπου γέφυρας, Εξομαλύνσεις Γωνιών (1, 2, 3, 4).

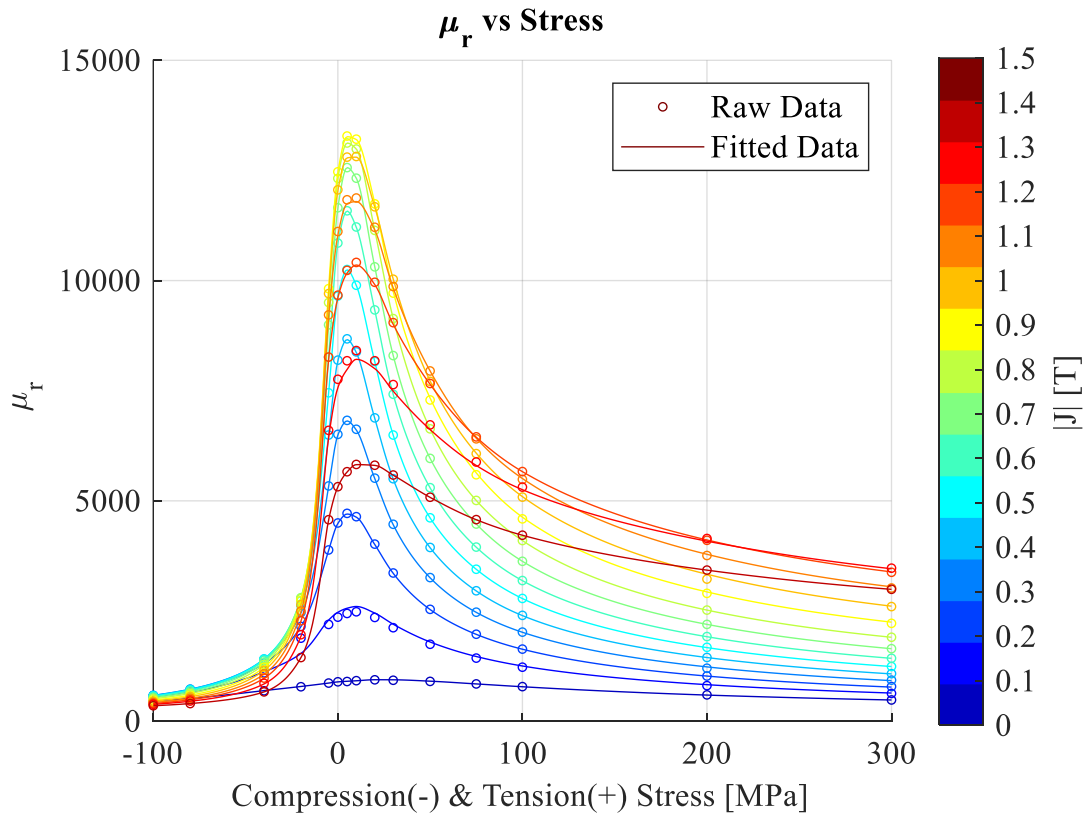
Η συνάρτηση σχήματος παραμόρφωσης του δρομέα κοντά στο διάκενο αέρα, μπορεί να εισαχθεί εξίσου ως στόχος βελτιστοποίησης. Το πλεονέκτημα της εισαγωγής αυτού του στοιχείου είναι η δυνατότητα εκούσιας τροποποίησης των τιμών L_q και L_d στο εξεταζόμενο εύρος ταχυτήτων.

9.5 Επίδραση Μηχανικών Τάσεων στον Ηλεκτρικό Χάλυβα

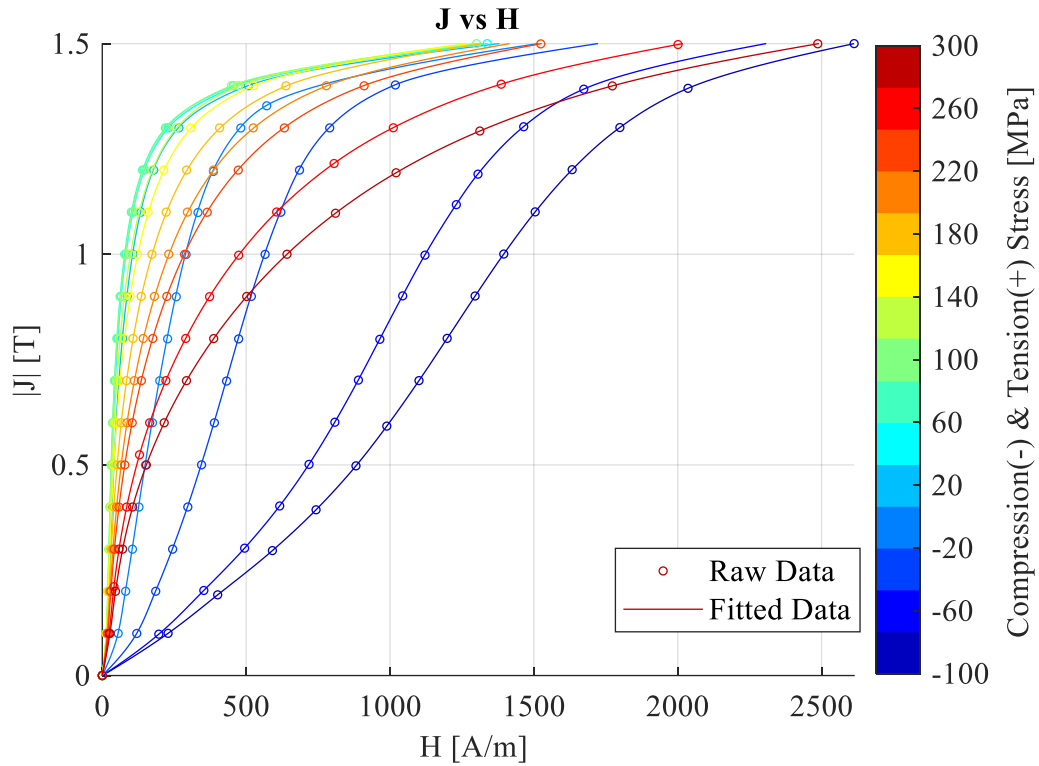
Σύμφωνα με το [9.20], σε περίπτωση μηχανικής τάσης εφελκυσμού, τα χαρακτηριστικά της καμπύλης μαγνήτισης (καμπύλη B-H) καθώς και η καμπύλη απώλειας σιδήρου ενδέχεται να βελτιωθούν, ενώ σε περίπτωση θλιπτικής τάσης, οι μαγνητικές ιδιότητες τείνουν να υποβαθμιστούν σημαντικά. Για να το αξιολογήσουν περαιτέρω, οι συγγραφείς του [9.20] - [9.24] ανέπτυξαν μια ρύθμιση για την εφαρμογή ελεγχόμενης τάσης σε ελεγχόμενο κλειστό βρόχο Single Sheet Tester (SST) για τη μέτρηση της μαγνήτισης και της πυκνότητας απώλειών σιδήρου σε ελάσματα υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.



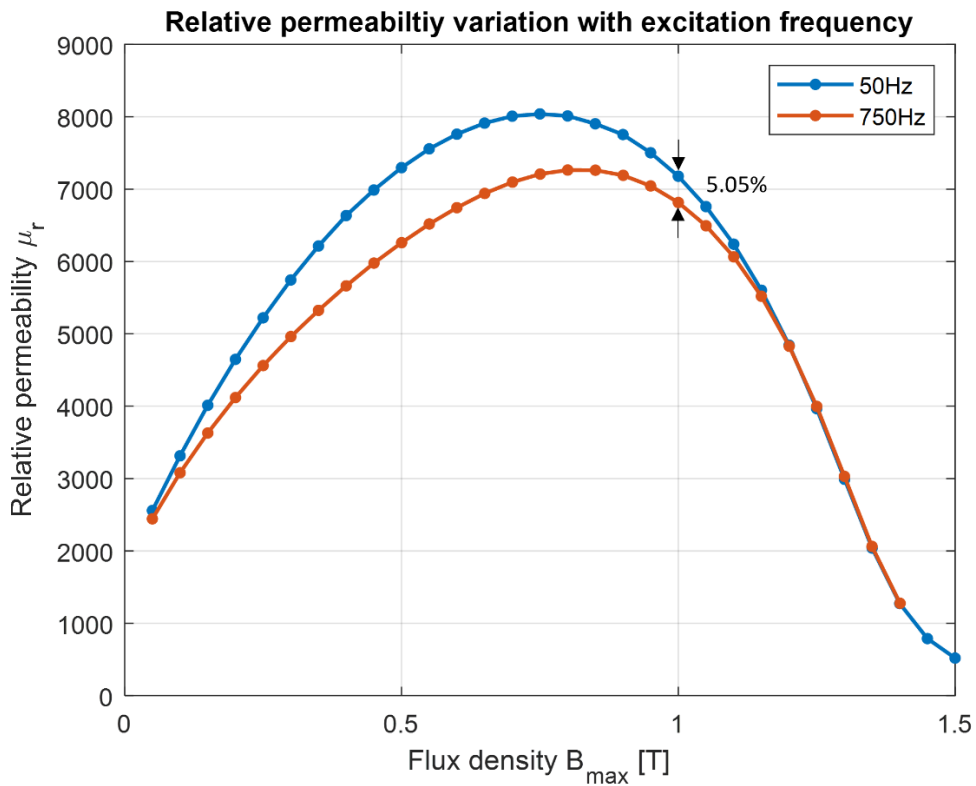
Σχ. 9.6 Ρύθμιση διαμόρφωσης Single Sheet Tester (SST) υπό τάση, που χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση των μαγνητικών ιδιοτήτων υπό τάση για το δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα M270-35A.



Σχ. 9.7 Μετρημένα αποτελέσματα της σχετικής διαπερατότητας μαγνητικού χάλυβα με εφαρμοζόμενη τάση σε διέγερση 50Hz. Η κατηγορία ηλεκτρικού χάλυβα είναι κατηγορίας M237-35A. Οι μετρήσεις αυτές προσκομίσθηκαν από την Tesla Greece.



Σχ. 9.8 Μετρημένες καμπύλες BH από μαγνητικό χάλυβα με ασκούμενη τάση υπό διέγερση συνεχούς ρεύματος. Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι ποιότητας M237-35A. Οι μετρήσεις αυτές προσκομίστηκαν από την Tesla Greece.



Σχ. 9.9 Σχετική διαπερατότητα μετρημένη σε δοκίμιο λωρίδων χάλυβα, υπό διαφορετικές συχνότητες και συχνότητες διέγερσης. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.

Μια παρόμοια εμπορικά διαθέσιμη διάταξη χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων του ηλεκτρικού χάλυβα υπό μηχανική τάση. Το συγκεκριμένο σύστημα τροφοδοσίας ρυθμίζει το ρεύμα διέγερσης για να ληφθεί μια ημιτονοειδής κυματομορφή πόλωσης σύμφωνα με το IEC 60404-3 [9.25]. Το δείγμα, το οποίο κόβεται σε λωρίδα μήκους 300 mm και πλάτους 30 mm, τοποθετείται μέσα σε ένα εξάρτημα Anti-Buckling, το οποίο αποφεύγει τον λυγισμό του ελάσματος κατά τη συμπίεση, δεδομένου του πολύ μικρού πάχους του ηλεκτρικού φύλλου χάλυβα (έλασμα). Επιλέχθηκε μια διαμόρφωση διπλού μαγνητικού ζυγού για την επίτευξη ομοιόμορφου πεδίου B (πυκνότητας ροής) μεταξύ των άκρων του ζυγού, ενώ η εφαρμογή τόσο της κύριας όσο και της δευτερεύουσας περιέλιξης γύρω από το δείγμα, μπορεί να αποτρέψει τον κορεσμό στους ζυγούς, ακόμη και σε αρκετά υψηλές τιμές ισχύος μαγνητικού πεδίου. Οι πρωτεύουσες περιελίξεις διεγείρονται με εναλλασσόμενο ρεύμα για να μαγνητίσουν τα δείγματα και οι δευτερεύουσες περιελίξεις ανιχνεύουν την επαγόμενη τάση ανάλογη με τη μαγνητική πόλωση των μετρούμενων δειγμάτων, σύμφωνα με τον νόμο επαγωγής του Faraday.

Ένα απλό σύστημα καταπόνησης που χρησιμοποιεί διάταξη βίδας και σφικτήρα έχει χρησιμοποιηθεί για την υποβολή του δοκιμίου σε θλιπτική και εφελκυστική τάση στην πειραματική διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 9.6. Οι καταγεγραμμένες τιμές καταπόνησης χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για να υπολογιστεί η μηχανική τάση, χρησιμοποιώντας τον συντελεστή Young του υλικού, και να δημιουργηθεί μια συσχέτιση με τη ροπή που εφαρμόζεται στη βίδα.

Η σχετική διαπερατότητα του ηλεκτρικού χάλυβα εξαρτάται τόσο από την μηχανική τάση όσο και από την πυκνότητα ροής, και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ποικίλλει για τάσεις εφελκυσμού και θλίψης. Στην παρούσα μελέτη, η μηχανική ανάλυση δείχνει ότι ο δρομέας υφίσταται κυρίως τάσεις εφελκυσμού λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων, επομένως οι μετρήσεις επικεντρώνονται στην εφαρμογή τάσης εφελκυσμού στο δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα. Έχουν πραγματοποιηθεί μαγνητικές μετρήσεις σε ηλεκτρικές λωρίδες χάλυβα κομμένες τόσο παράλληλα όσο και κάθετα προς την κατεύθυνση κύλισης του μητρικού πηνίου (Mother Coil) και τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν υπολογιστεί κατά μέσο όρο, έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί το φαινόμενο μηχανικής καταπόνησης λαμβάνοντας υπόψη την ανισοτροπία του υλικού.

Το σχήμα 9.7 και το σχήμα 9.8 παρουσιάζουν τα πειραματικά δεδομένα καθώς και τις καμπύλες που βασίζονται σε μοντέλα που περιγράφονται στο [9.26]. Οι πειραματικές τιμές των μηχανικών πιέσεων που εμφανίζονται σε αυτά τα σχήματα προσδιορίζονται διαιρώντας την εξωτερικά εφαρμοζόμενη δύναμη με την περιοχή διατομής της λωρίδας. Πιο συγκεκριμένα, η σχετική διαπερατότητα έναντι της εφαρμοζόμενης μηχανικής πίεσης απεικονίζεται στο σχήμα 9.7.

Ο τύπος του ηλεκτρικού φύλλου χάλυβα είναι M237-35A. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B είναι 1,0 T και 1,5 T και το δείγμα μετριέται υπό ψευδο-στατική διέγερση, όπου οι επιπτώσεις των δινορευμάτων μπορούν να παραμεληθούν [24].

Στο Σχήμα 9.9 φαίνεται η σχετική διαπερατότητα του ηλεκτρικού χάλυβα ως συνάρτηση της πυκνότητας του μαγνητικού πεδίου υπό οιονεί στατική (50Hz) και 750Hz διέγερση. Σε αυτή τη μελέτη η επίδραση της μείωσης της ροής λόγω των δινορευμάτων («πεδίο αντίδρασης») αγνοείται και θεωρείται ασήμαντη. Σε αυτό το σχήμα παρατηρείται ότι όταν η πυκνότητα της μαγνητικής ροής είναι σχεδόν 1T, η διαφορά στη σχετική διαπερατότητα είναι περίπου 5%.

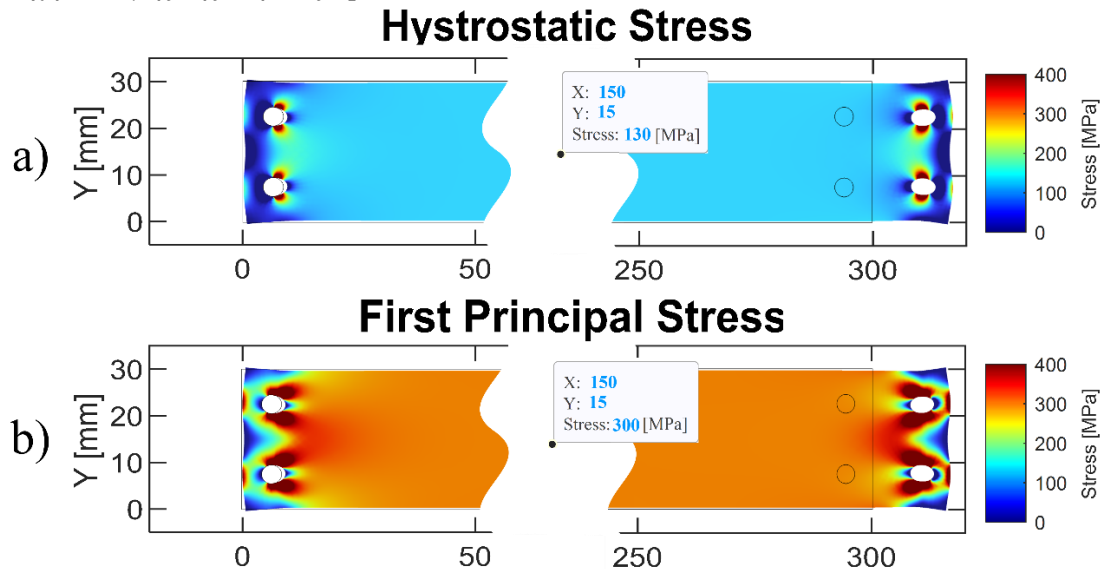
Η σχετική διαπερατότητα υπό συνθήκες πίεσης επηρεάζεται έντονα σε σχέση με την αυτή της κατάσταση μηδενικής μηχανικής πίεσης. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά υπό θλιπτική τάση, είναι χειρότερα από αυτά που βρίσκονται υπό τάση εφελκυσμού. Καθώς η πυκνότητα ροής αυξάνεται, ο λόγος μείωσης της διαπερατότητας μειώνεται. Αυτό οφείλεται κυρίως στις μαγνητικές περιοχές του ηλεκτρικού χάλυβα καθώς αυτός εισέρχεται στην περιοχή κορεσμού σε υψηλότερα επίπεδα πυκνότητας ροής πόλωσης DC, όπου η οποιαδήποτε μηχανική τάση έχει μικρή ή καθόλου επίδραση στα χαρακτηριστικά μαγνήτισης, λόγω των περιορισμένων κινήσεων των τοιχωμάτων στις μικροδομικές περιοχές.

Όσον αφορά τις μετρήσεις εναλλασσόμενου ρεύματος που έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη διάταξη SST μεταβλητής μηχανικής τάσης, έχει μετρηθεί η σχετική διαπερατότητα υπό διαφορετικές τιμές εφελκυσμού και θλίψης, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 8. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η επίδραση της μηχανικής καταπόνησης σε υψηλότερες συχνότητες τείνει να εξαφανίζεται, καθώς οι μηχανικές τάσεις επηρεάζουν κυρίως τη μικροδομή του μαλακού μαγνητικού υλικού, προκαλώντας παραμόρφωση κόκκων και περιοχών [28]. Αυτά τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη μικροδομή επηρεάζουν κυρίως την υστερητική συμπεριφορά του υλικού (απώλεια υστέρησης – καμπύλη μαγνήτισης), επομένως η σημασία αυτών των επιδράσεων τείνει να εξαφανιστεί καθώς αυξάνεται η συχνότητα και οι απώλειες δινορευμάτων γίνονται το κύριο συστατικό των απωλειών σιδήρου. Παρόμοια συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί προηγουμένως στη διακύμανση των μαγνητικών ιδιοτήτων κάτω από πυκνότητες ροής πολωμένης DC, οι οποίες σχετίζονται επίσης με τη μικροδομή του υλικού [29].

Το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται με τέτοιο τρόπο ώστε το κάθε στοιχείο πλέγματος του δρομέα να κληρονομεί τις ιδιότητες του ηλεκτρομαγνητικού υλικού με βάση την υδροστατική πίεση του στοιχείου. Έτσι, είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί και να ποσοτικοποιηθεί η υδροστατική πίεση που βιώνει η λωρίδα Epstein κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χαρακτηρισμού. Για αυτόν τον λόγο, μια βασική μηχανική - στατική ανάλυση της λωρίδας Epstein υπό πειραματικές συνθήκες απεικονίζεται στο Σχήμα 10, στο οποίο φαίνεται η ορθή τάση σ_1 και η υδροστατική πίεση στην περίπτωση που η εξωτερικά μετρούμενη πίεση είναι στα 300 MPa. Σε αυτό το συγκεκριμένο είδος μηχανικού πειράματος (λεπτή λωρίδα υπό τάση - διαστολή) ισχύει η εξίσωση (14) και εκφράζει τη μέση πειραματική υδροστατική πίεση στο δείγμα ως αναλογία της μετρούμενης εξωτερικής πίεσης.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{1+\nu}{3} P_{\text{Ext}} = \frac{1+\nu}{3} \frac{F_{l-c}}{A_{\text{strip}}} \quad (9.14)$$

όπου σ_m είναι η υδροστατική πίεση, σ_i είναι η κύρια τάση, ν είναι λόγος Poisson, P_{Ext} είναι η εξωτερική πίεση, F_{l-c} είναι η εξαναγκασμένη μέτρηση στο δυναμικό στοιχείο και A_{strip} είναι η περιοχή διατομής της λωρίδας Epstein.

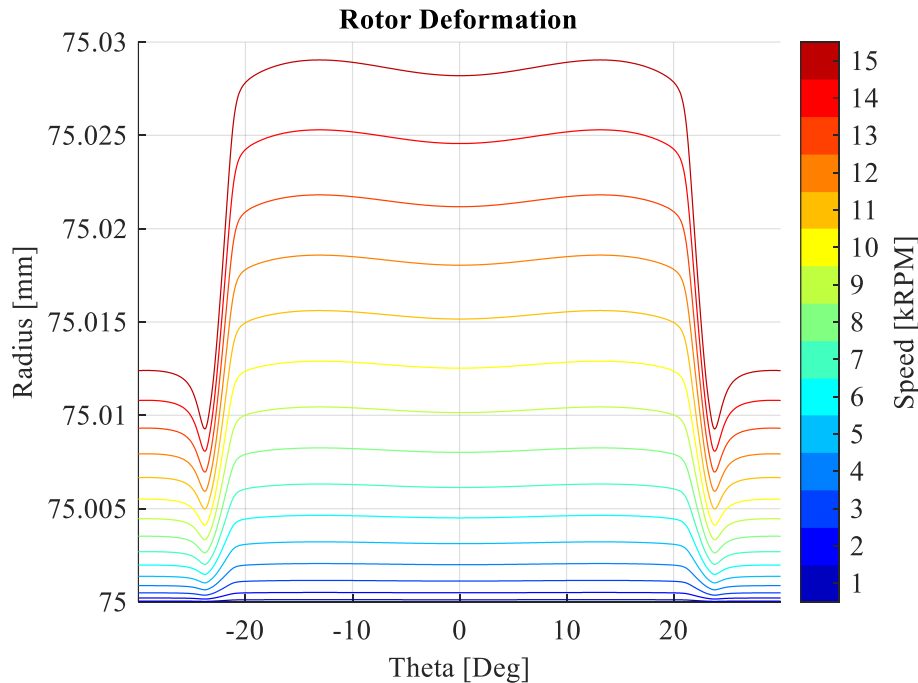


Σχ. 9.10 Προσομοιώσεις τάσεων σε λωρίδα Epstein για εξωτερική καταπόνηση 300MPa: α) Υδροστατική πίεση. β) Πίεση πρώτου κύριου άξονα. (Κλίμακα παραμόρφωσης γεωμετρίας: x 40)

9.6 Επίδραση Μηχανικής Τάσης και Παραμόρφωσης

Η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση μπορεί να λάβει υπόψη τις μηχανικές επιδράσεις στον δρομέα λαμβάνοντας υπόψη τις προκύπτουσες αλλαγές στο πλάτος του διακένου αέρα. Αυτή η συνάρτηση σχήματος παραμόρφωσης εφαρμόζεται στον αλγόριθμο σχεδίασης γεωμετρίας του δρομέα που χρησιμοποιείται ως γεωμετρία εισόδου στο ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο.

Στο σχήμα 9.11 δείχνει την ακτινική παραμόρφωση της εξωτερικής ακτίνας του δρομέα σε ποικίλες ταχύτητες περιστροφής, δείχνοντας ότι μπορούν να προκύψουν μη αμελητέες αλλαγές ακτίνας σε σύγκριση με το μικρό πλάτους του διακένου.



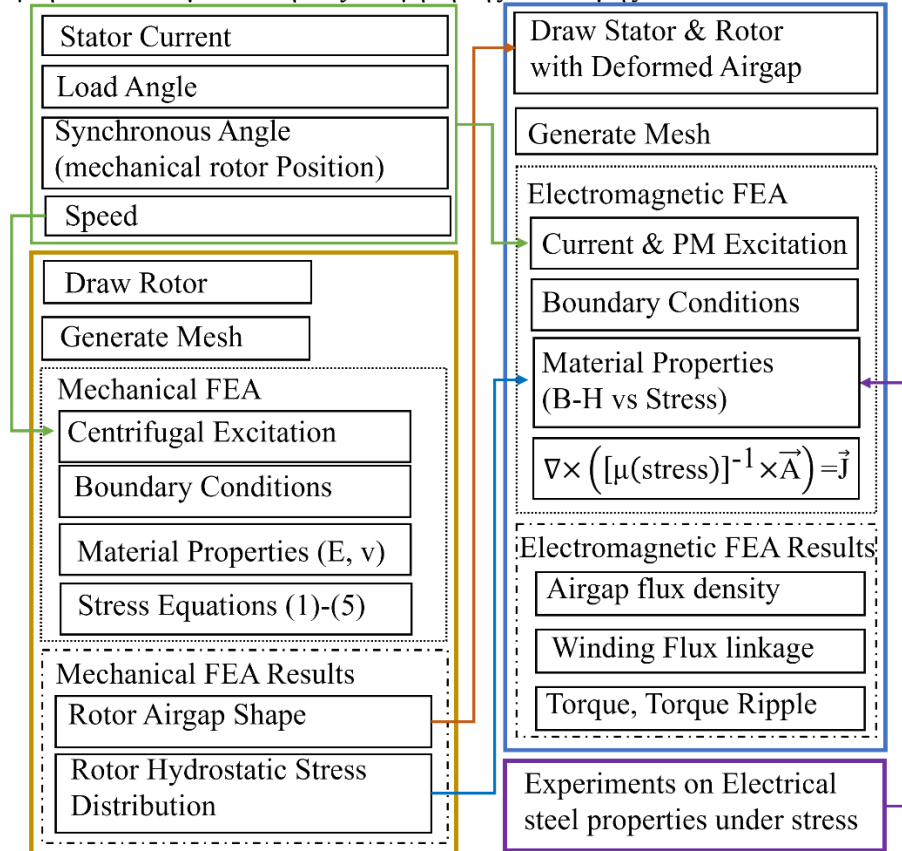
Σχ. 9.11 Ακτινική παραμόρφωση της εξωτερικής ακτίνας του δρομέα σε συνάρτηση με τη γωνία σε ποικίλες ταχύτητες περιστροφής.

Η προτεινόμενη μέθοδος εξετάζει τις επιδράσεις μηχανικών τάσεων στον ηλεκτρικό χάλυβα λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων σε κατάσταση υψηλής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Ο υπολογισμός της αλληλεπίδρασης των μηχανικών και ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων γίνεται με τον συνδυασμό μέσω ασθενούς ζεύξης του μηχανικού και του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος στο επίπεδο των πεπερασμένων στοιχείων, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 9.12. Πιο συγκεκριμένα, η προσέγγιση για την αξιολόγηση της μηχανικής τάσης και η επίδραση στα χαρακτηριστικά του κινητήρα περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- 1) Υπολογισμός της παραμόρφωσης και της κατανομής των μηχανικών τάσεων γίνεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο μηχανικής ανάλυσης. Όπως εξηγήθηκε, η ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του κάθε σημείου, αντιπροσωπεύονται μέσω της τιμής της υδροστατικής πίεσης στο σημείο αυτό.
- 2) Η δημιουργία πλέγματος για ηλεκτρομαγνητική μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με βάση τη γεωμετρία του δρομέα που λαμβάνει υπόψη την εκτιμώμενη παραμόρφωση κοντά στο διάκενο.
- 3) Η τάση που υπολογίζεται από την μηχανική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων εισάγεται στη συνέχεια μέσω κατάλληλης παρεμβολής στο πλέγμα του Ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου.

- 4) Εναπόθεση της μετρούμενης χαρακτηριστικής καμπύλης BH που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη κατανομή της υδροστατικής πίεσης για κάθε στοιχείο του πλέγματος του δρομέα.
- 5) Ανάλυση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που καθορίζει τα χαρακτηριστικά του κινητήρα (πυκνότητα ροής διάκενου αέρα, τοπικές δυνάμεις, ροπή, κυματισμός ροπής) λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της μηχανικής καταπόνησης του δρομέα.

Προβλέπεται επίσης μια επανάληψη στο πρώτο βήμα που επιτρέπει τη συμπερίληψη ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων στην αξιολόγηση της κατανομής τάσεων.

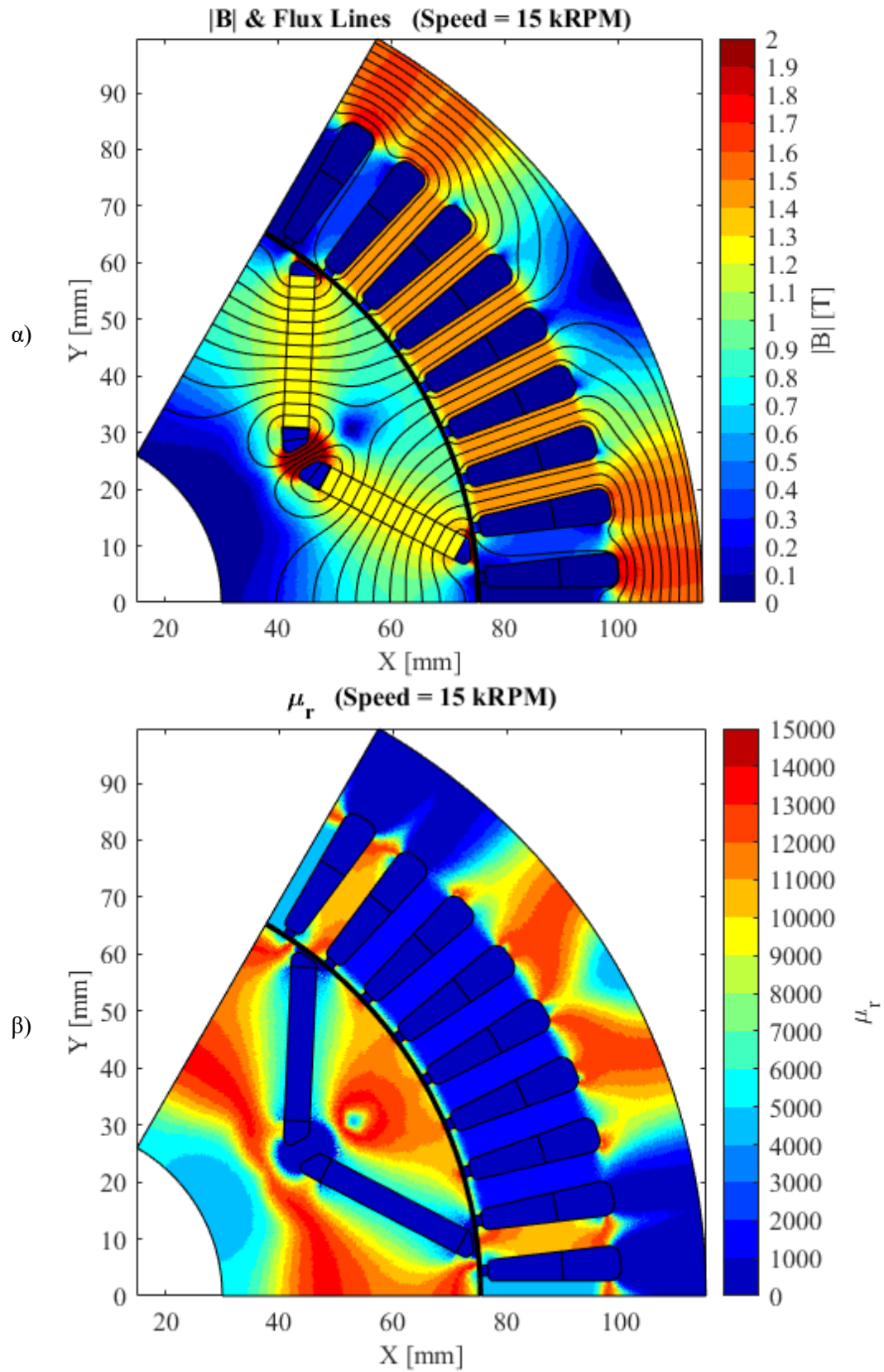


Σχ. 9.12 Διάγραμμα ροής υπολογισμού συζευγμένου μηχανικού και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που εφαρμόζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογία.

9.6.1 Επίδραση Μηχανικών Φαινομένων στην Διαπερατότητα

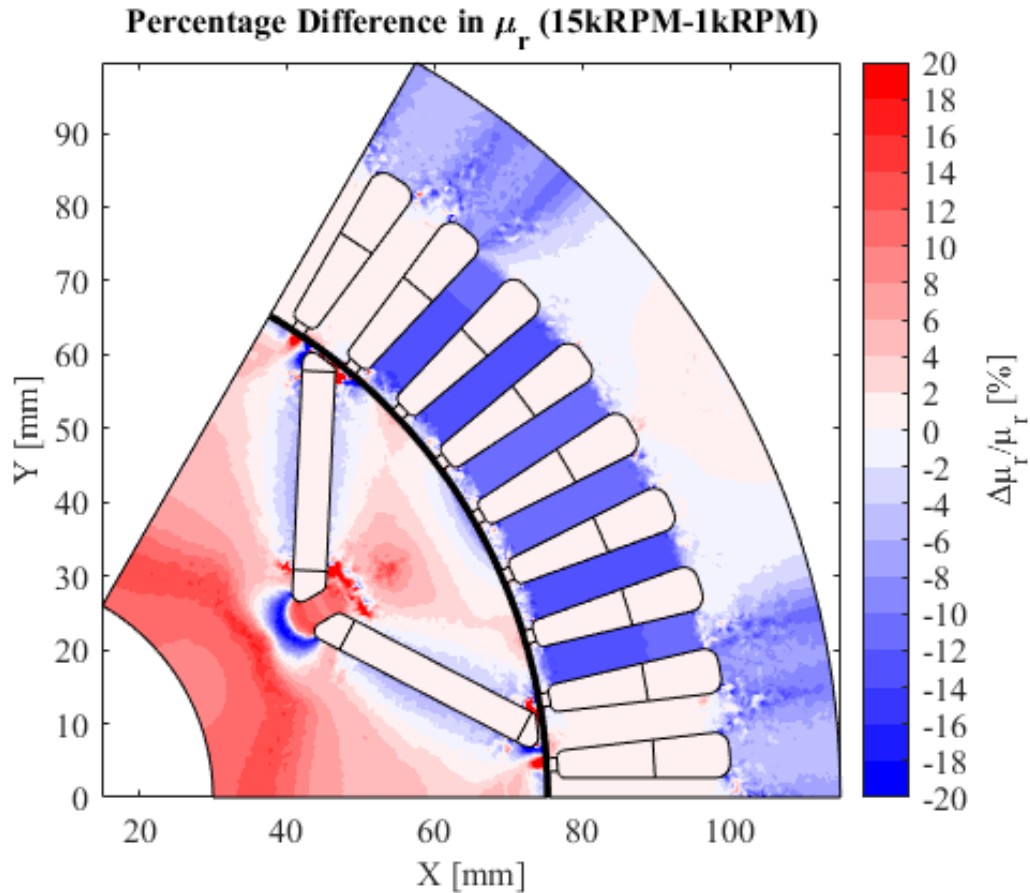
Τα προσομοιωμένα αποτελέσματα του προτεινόμενου ηλεκτρομαγνητικού σχήματος ανάλυσης για τον κινητήρα όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο σε ταχύτητα δρομέα 15 kRPM φαίνονται στο σχήμα 9.13. Το σχήμα 9.13(α) δίνει την κατανομή της πυκνότητας ροής $|B|$ ενώ το σχήμα 9.13(β) απεικονίζει την τοπική τιμή της σχετική διαπερατότητα μ ανάλογα με την κατάσταση μαγνήτισης και την κατάσταση μηχανικής τάσης σε κάθε μεμονωμένο στοιχείο.

Αυτές οι κατανομές ($|B|$, μ) υπολογίστηκαν σύμφωνα με το προφίλ της μηχανικής τάσης του δρομέα, που απεικονίζεται στο σχήμα 9.3(β), στο οποίο φαίνεται η μηχανική τάση του δρομέα σε λειτουργία με ταχύτητα περιστροφής 15kRPM. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στην προτεινόμενη τεχνική οι διακυμάνσεις των καμπυλών BH του υλικού που μετρήθηκαν κάτω από διάφορες συνθήκες μηχανικής καταπόνησης, όπως αυτές που φαίνονται στο σχήμα 9.8 είναι μείζονος σημασίας για την ακρίβεια των ηλεκτρομαγνητικών αποτελεσμάτων.



Σχ. 9.13 Προσομοιωμένα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία για συνθήκες χωρίς φορτίο κάτω από 15 kRPM: α) Πυκνότητα ροής και γραμμές ροής. β) Σχετική διαπερατότητα των ελασμάτων ηλεκτρικού χάλυβα.

Προκειμένου να απεικονιστεί η επίδραση της ταχύτητας του δρομέα στις μηχανικές τάσεις των ελασμάτων σιδήρου, τις παραμορφώσεις και τις αντίστοιχες τιμές σχετικής διαπερατότητας, ο εξεταζόμενος κινητήρας προσομοιώθηκε χωρίς φορτίο για ταχύτητες δρομέα 1kRPM και 15kRPM, αντίστοιχα, και το ποσοστό της αλλαγής της τοπικής σχετικής διαπερατότητας φαίνονται στο σχήμα. 9.14. Οι παραμορφώσεις που συμβαίνουν σε μεγαλύτερη ταχύτητα με αποτέλεσμα την αύξηση της σχετικής διαπερατότητας, απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα σε αυτό το σχήμα, ενώ οι περιοχές όπου μειώνεται η σχετική διαπερατότητα υποδεικνύονται με μπλε χρώμα. Από αυτή την άποψη, ορισμένες περιοχές που περιλαμβάνουν υψηλή τάση εντός του δρομέα, όπως τα υποστυλώματα (bridges & ribs) και ο το σώμα σιδήρου(yoke), παρουσιάζουν μια αξιοσημείωτη αύξηση στη σχετική διαπερατότητα υπό συνθήκες υψηλής ταχύτητας. Αυτό το φαινόμενο προκύπτει από τα μετρούμενα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο σχήμα 9.7.



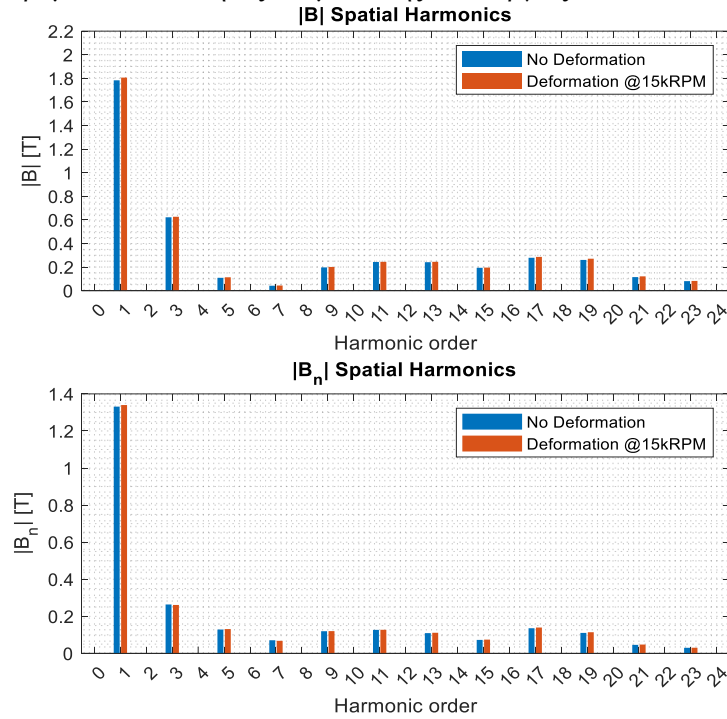
Σχ. 9.14 Ποσοστιαία διαφορά σχετικής διαπερατότητας των ελασμάτων κινητήρα με ταχύτητα. Οι θετικές τιμές ερμηνεύονται ως αύξηση της σχετικής διαπερατότητας στα 15kRPM σε σύγκριση με τη σχετική διαπερατότητα στο 1kRPM.

Στον αντίποδα, στα δόντια του στάτη παρατηρείται σημαντική μείωση της σχετικής διαπερατότητας. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η παραμόρφωση του δρομέα περιλαμβάνει μια μη αμελητέα τοπική μείωση του πάχους του διακένου και της αντίστοιχης μαγνητικής αντίστασης με αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της πυκνότητας ροής στα δόντια του στάτη και έναν αντίστοιχο τοπικό κορεσμό.

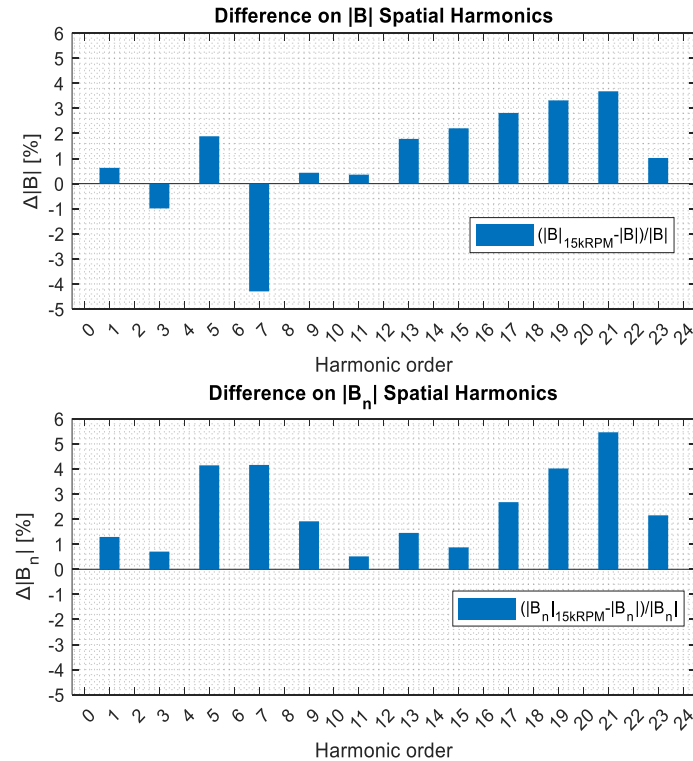
9.6.2 Αρμονικές πυκνότητας ροής στο διάκενο αέρα

Η χωρική κατανομή της πυκνότητας ροής στο διάκενο και οι αντίστοιχες χωρικές αρμονικές συνιστώσες της, έχουν μη αμελητέο αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά λειτουργίας όπως στην ταλάντωση ροπής καθώς και στην πεπλεγμένη ροή και στην ροή σκέδασης. Οι διαφορές στις

χωρικές κατανομές πυκνότητας ροής στο διάκενο καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά της διαφοράς δίνονται στο σχήμα 9.15 και 9.16. Δείχνοντας την επίδραση του συνυπολογισμού της μηχανικής παραμόρφωσης του δρομέα υπό συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας.



Σχ. 9.15 Κατανομή των χωρικών αρμονικών της ενότητας πυκνότητας ροής και η κανονική παραγωγός με και χωρίς παραμόρφωση του δρομέα υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.



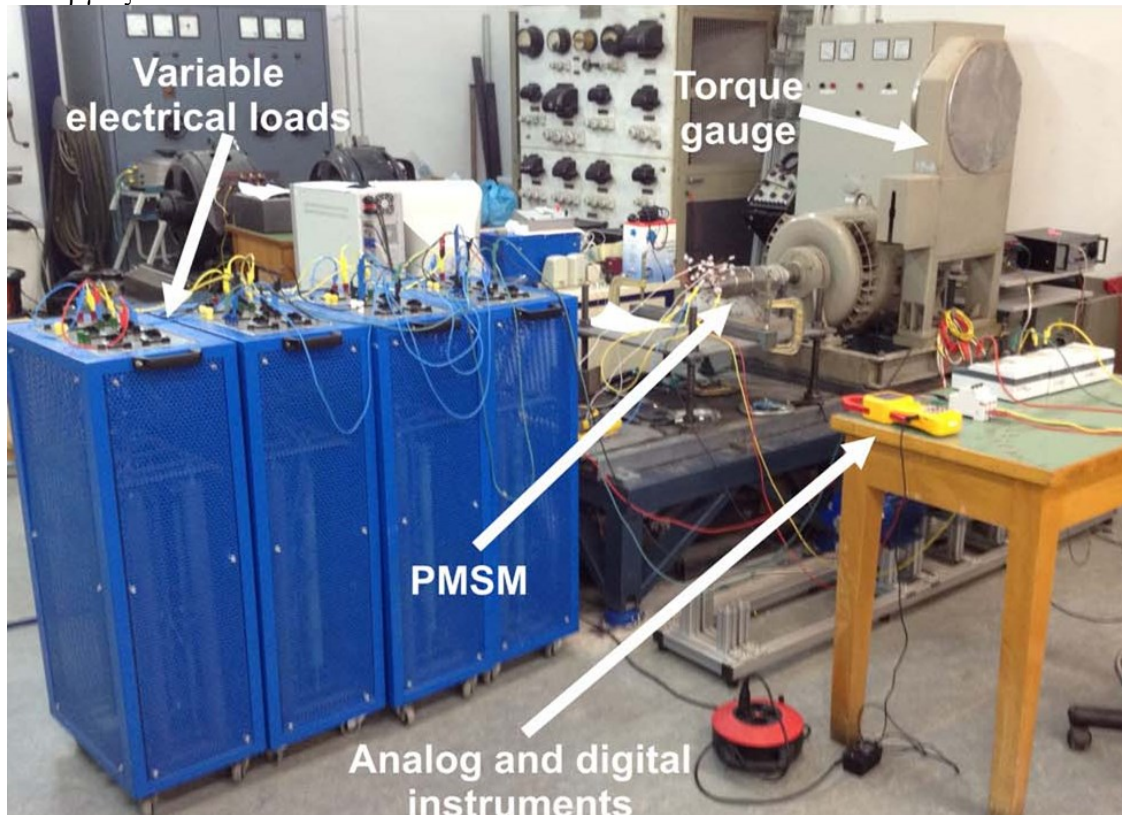
Σχ. 9.16 Ποσοστό των μεταβολών του μέτρου κατανομής των χωρικών αρμονικών της πυκνότητας ροής στο διάκενο και της ακτινικής συνιστώσας, λόγω παραμόρφωσης του δρομέα, σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

9.7 Πειραματική Επιβεβαίωση

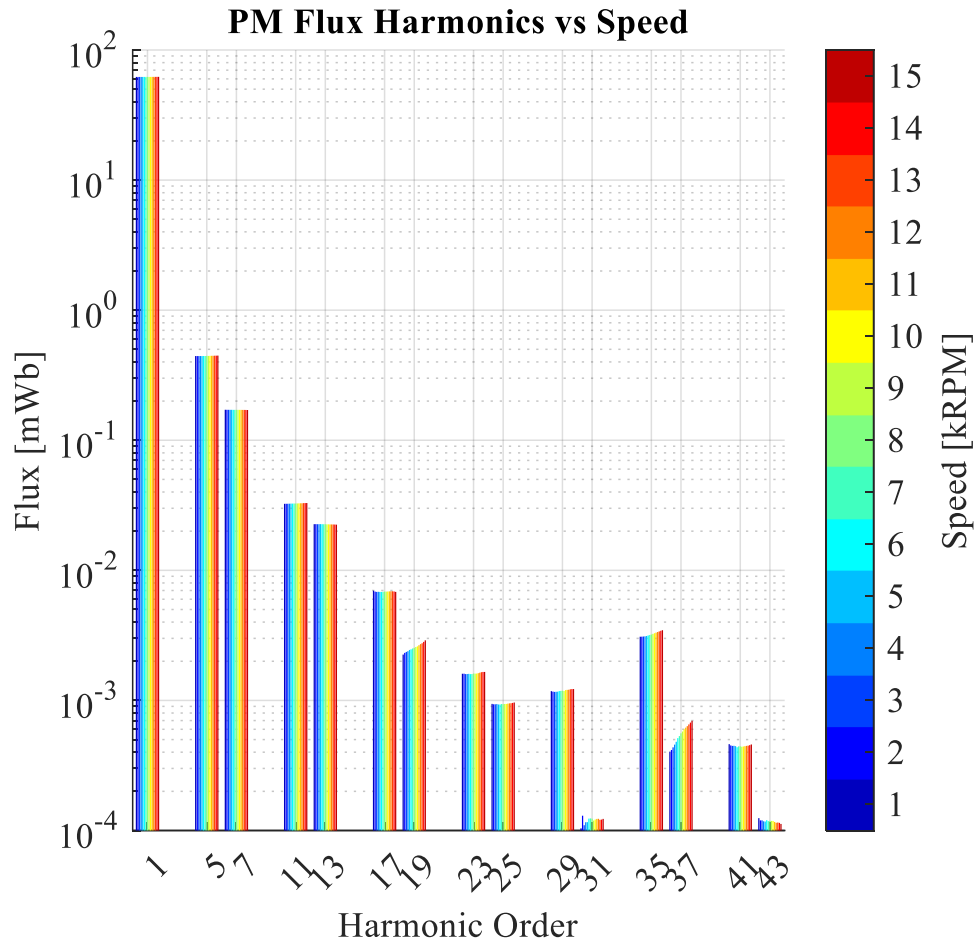
Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία, έχει κατασκευαστεί ένας τυπικός κινητήρας με δρομέα εσωτερικών μονίμων μαγνητών σε σχήμα V. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε κατά τη διαδικασία κατασκευής, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις στη γεωμετρία του διακένου και να επιτευχθεί καλή ακρίβεια στις μετρήσεις των υπό μελέτη φαινομένων. Μια μηχανή κοπής σύρματος Electrical Discharge Machining (EDM) έχει χρησιμοποιηθεί για τη διαδικασία κοπής των ελασμάτων στάτη με στόχο την ελαχιστοποίηση της υποβάθμιση του υλικού του πυρήνα. Παράλληλα, για τη συγκόλληση των ελασμάτων του στάτη χρησιμοποιείται κόλλα, όπως επίσης και για τη συγκράτηση του στάτη στο κέλυφος, αποτρέποντας έτσι οποιαδήποτε αδικαιολόγητη πίεση στα ελάσματα του. Με χρήση διαφορετικών μεθόδων συγκράτησης των ελασμάτων ενδεχόμενος να αναπτυχθούν μηχανικές πιέσεις αλλοιώνοντας την ακρίβεια της ανάλυσης. Είναι γνωστό πως η μέθοδος σφιχτής συναρμογής δημιουργεί τέτοιες πιέσεις.

Η μέθοδος σφιχτής συναρμογής γενικά εφαρμόζει μια τάση συμπίεσης στο εξωτερικό μέρος του στάτη και μπορεί να μοντελοποιηθεί με την κατάλληλη χρήση των συνθηκών επαφής μεταξύ του πυρήνα του στάτη και του κελύφους. Μετά την αξιολόγηση της μηχανικής τάσης, η επίδραση της σφιχτής συναρμογής στα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του κινητήρα μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Αν και η πίεση που προκαλείται από αυτόν τον τύπο προσαρμογής είναι ανομοιόμορφη στην τρίτη διάσταση (μήκος του κινητήρα) λόγω του σχήματος του κελύφους. Μια πιο λεπτομερής προσέγγιση αναπόφευκτα οδηγεί σε περίπλοκους υπολογισμούς με αποτέλεσμα αβέβαιη βελτίωση της ακρίβειας.

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει ένα δυναμόμετρο κινητήρα που περιλαμβάνει εναυλήτη ισχύος με τέσσερα στοιχεία Power Analyzer (PA) (Yokogawa WT5000), ένα ροτόμετρο (HBM T12), τέσσερις αισθητήρες ρεύματος (Danisense DS200UB-12V), και μια μηχανή πέδης, ικανή να παρέχει μετρήσεις ροπής και ταχύτητας σε όλο το φάσμα των σχεδιασμένων συνθηκών λειτουργίας.



Σχ. 9.17 Πειραματική διάταξη



Σχ. 9.18 Μετρημένες αρμονικές ροής μόνιμου μαγνήτη σε σχέση με την ταχύτητα. Ο κινητήρας λειτουργεί υπό μηδενικό ρεύμα (κενό φορτίο).

Λόγω της σημαντικής ευαισθησίας της θερμοκρασίας του μόνιμου μαγνήτη και της αντίστοιχης μαγνήτισης στα ρεύματα του στάτη, η επιβεβαίωση του προτεινόμενου μοντέλου έχει πραγματοποιηθεί υπό συνθήκες χωρίς φορτίο.

Επιπλέον, για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη θερμοκρασία μαγνήτη για όλες τις εξεταζόμενες ταχύτητες, έχει ακολουθηθεί μια κατάλληλη διαδικασία κατά τις μετρήσεις. Η αρχική φάση της διαδικασίας περιλαμβάνει είτε ψύξη είτε θέρμανση του κινητήρα έως ότου η ροή μόνιμου μαγνήτη (PM) υπό συνθήκες χωρίς φορτίο στο 1krpm σταθεροποιηθεί σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο στόχο 62.18 mWb, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη θερμοκρασία δρομέα 60°C. Αυτή η διαδικασία εκτελείται πριν από κάθε μέτρηση προκειμένου να αποφευχθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στη ροή PM.

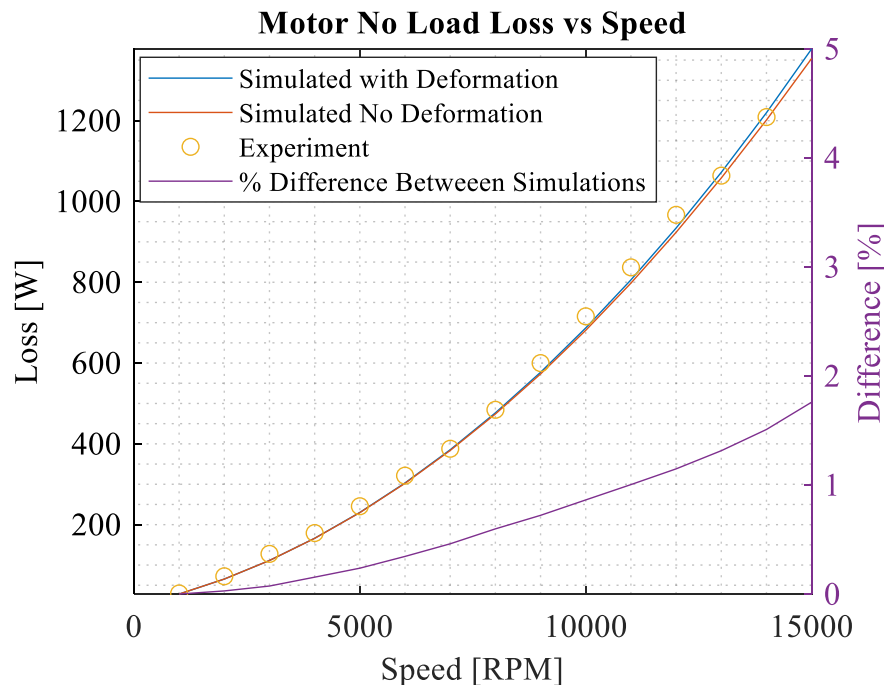
Τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων αρμονικών ροής, που ελήφθησαν μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας, απεικονίζονται στο σχήμα 9.18. Το Σχήμα 9.18 παρουσιάζει τις αρμονικές ροής μέχρι την 43η τάξη, ενώ σε κάθε σειρά η αντίστοιχη αρμονική ροής εμφανίζεται δίπλα-δίπλα καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, χρησιμοποιώντας έναν χρωματικό χάρτη που περιγράφει την ταχύτητα. Κάθε τάξη αρμονικής παρουσιάζεται ως ένα σύνολο ραβδωτών διαγραμμάτων, που υποδεικνύουν τη μεταβολή των αρμονικών με την ταχύτητα περιστροφής. Οι αρμονικές ροής του κινητήρα προέρχονται από την κυματομορφή τάσης που έχει καταγραφεί σε κάθε ταχύτητα για την περιοχή από 1kRPM έως 15kRPM, με βήμα αύξησης 1kRPM. Η συμβατότητα των μετρούμενων αρμονικών σε όλες τις εξεταζόμενες ταχύτητες δείχνει ότι η διαδικασία μέτρησης παρέχει επαρκή ακρίβεια.

9.8 Αποτελέσματα Κεφαλαίου

Η παραμόρφωση του δρομέα σε περιοχές υψηλών ταχυτήτων είναι ουσιαστικής σημασίας και πρέπει να ληφθεί υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού, προκειμένου να αποφευχθεί η παραβίαση των μέγιστων επιτρεπόμενων μηχανικών καταπονήσεων που κινδυνεύουν να θέσουν σε κίνδυνο την αξιοπιστία του κινητήρα. Επιπλέον, ακόμη και σε περιπτώσεις κατάλληλης σχεδίασης δρομέα, η «αδηφαγία» για μείωση της μάζας του δρομέα μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις που προκαλούν μη αμελητέες αλλαγές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα.

Σε ένα πρώτο βήμα έχουν μετρηθεί οι απώλειες χωρίς φορτίο. Μπορεί να σημειωθεί ότι η ισχύς που μετρίεται υπό συνθήκες κενού φορτίου περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητικές απώλειες καθώς και μηχανικές απώλειες, όπως φαινόμενα τριβής και ανεμισμού. Οι μηχανικές απώλειες έχουν αξιολογηθεί κατάλληλα και οι ηλεκτρομαγνητικές απώλειες έχουν συγκριθεί με τις προσομοιωμένες.

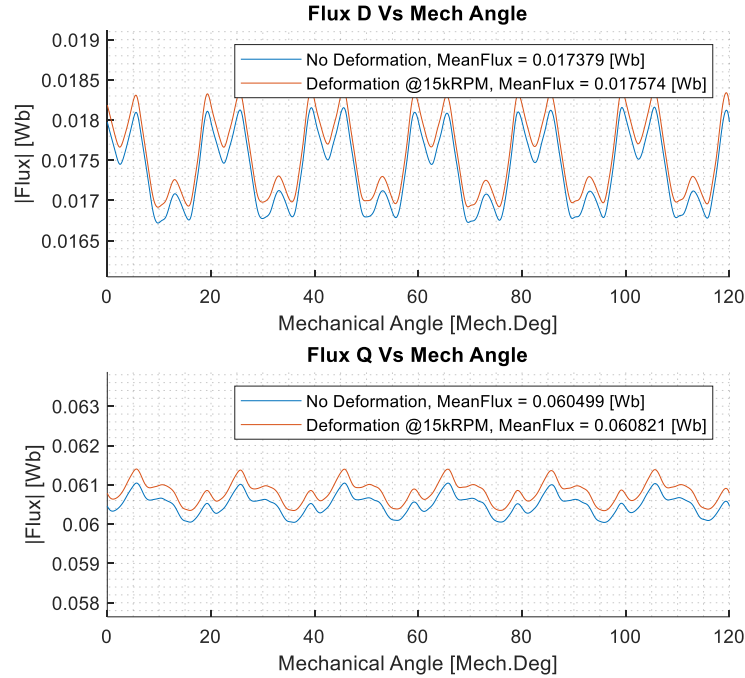
Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της παραμόρφωσης του δρομέα στον υπολογισμό των απωλειών χωρίς φορτίο έχουν προσομοιωθεί και οι δύο περιπτώσεις που εξετάζουν και παραμελούν την παραμόρφωση του δρομέα. Τα ληφθέντα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα μετρούμενα στο σχήμα 9.19 και απεικονίζουν μια καλή ταύτιση μεταξύ τους. Σε αυτό το σχήμα διαφαίνεται επιπλέον, διαφορά της τάξης του 2% μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων και μετρήσεων.



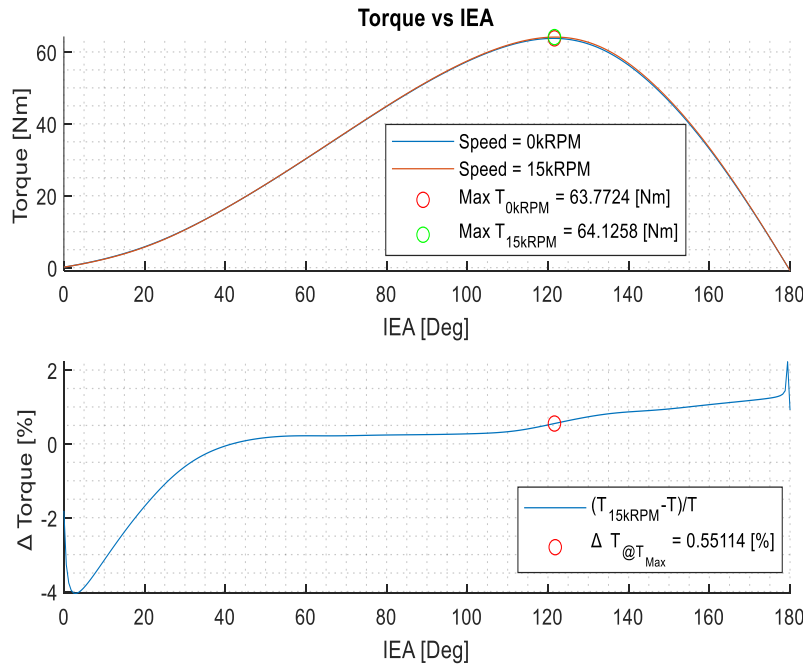
Σχ. 9.19 Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών απωλειών (κουκκίδες), Εκτίμηση απώλειας μοντέλου με παραμόρφωση δρομέα (μπλε γραμμή), εκτίμηση απώλειας μοντέλου χωρίς παραμόρφωση δρομέα (κόκκινη γραμμή) και η ποσοστιαία διαφορά στις απώλειες μεταξύ των προσομοιωμένων απωλειών (μωβ γραμμή) σε σχέση με την ταχύτητα. Ο κινητήρας λειτουργεί υπό μηδενικό ρεύμα (κενό φορτίο).

Στην εξεταζόμενη περίπτωση κινητήρα, οι προσομοιώσεις υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας σε ταχύτητα 15 kRPM υποδεικνύουν μια αλλαγή μερικών ποσοστών επί τοις εκατό στη τοις εκατό στη πεπλεγμένη ροή. Με την ανάλυση της πεπλεγμένης ροής σε ορθό (D) και κάθετο (Q) άξονα γίνεται αντιληπτές αποκλίσεις εξαιτίας της παραμόρφωσης το διακένου όπως φαίνεται στο σχήμα 20. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται στη ροπή, στις περιπτώσεις που θεωρείται ή αγνοείται η παραμόρφωση του δρομέα, όπως φαίνεται στο Σχ. 21. Αυτό το σχήμα δείχνει πως η προτεινόμενη ανάλυση υπολογίζει μια αύξηση της ροπής 0.55% όταν ο κινητήρας

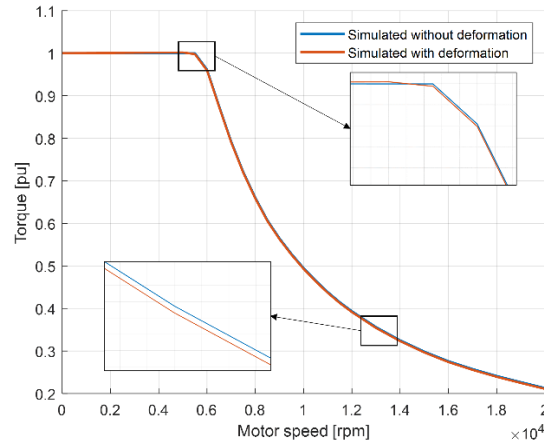
κινείται με στρατηγική MTPA. Σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας, ο κινητήρας κινείται με βάση τη στρατηγική MTPV, οδηγώντας σε μείωση της ροπής λόγω της αύξησης της επαγόμενης τάσης εξαιτίας της ροής των μαγνητών. Στο Σχ. 22 απεικονίζεται το μέγιστο όριο ροπής ως συνάρτηση της ταχύτητας του κινητήρα, δείχνοντας τη μικρή συνολική επίδραση της παραμόρφωσης στην επίδοση του κινητήρα.



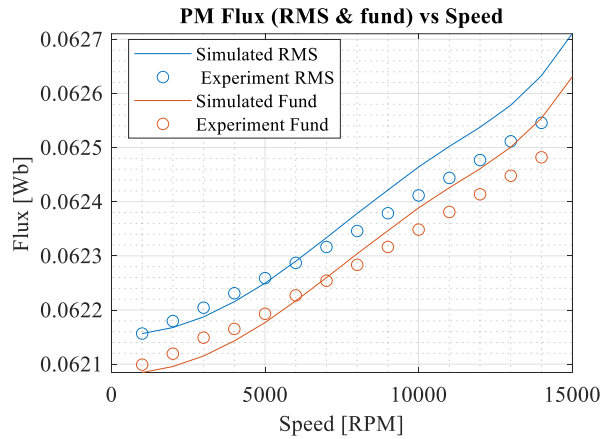
Σχ. 9.20 Ροές ορθού (D) και καθέτου (Q) άξονα υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας ως συνάρτηση της μηχανικής γωνίας περιστροφής με και χωρίς παραμόρφωση δρομέα.



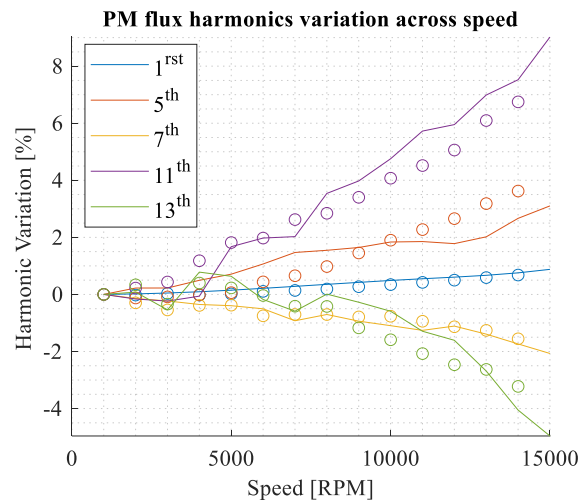
Σχ. 9.21 Μέση ροπή στρέψης σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας συναρτήσει της εσωτερικής ηλεκτρικής γωνίας φορτίου (IEA) και οι ποσοστιαίες διαφορές με και χωρίς παραμόρφωση δρομέα σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.



Σχ. 9.22 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας, παραβλέποντας και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της παραμόρφωσης του ρότορα στην υπολογιζόμενη ροπή.



Σχ. 9.23 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων αποτελεσμάτων (γραμμές) και πειραματικών αποτελεσμάτων (κουκκίδες) σχετικά με τη ροή κενού φορτίο στο εύρος στροφών (1 - 15 kRPM) ενώ ο κινητήρας λειτουργεί υπό μηδενικό ρεύμα (συνθήκη χωρίς φορτίο).



Σχ. 9.24 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων αποτελεσμάτων (γραμμές) και πειραματικών αποτελεσμάτων (κουκκίδες). Το σχήμα απεικονίζει την ποσοστιαία διαφορά στην εκάστοτε αρμονική τιμή της ροής καθώς η ταχύτητα ποικίλλει από 1k έως 15kRPM, σε σχέση με την τιμή στο 1kRPM. Οι πρώτες δεκατρείς αρμονικές ροής εμφανίζονται ενώ ο κινητήρας λειτουργεί υπό μηδενικό ρεύμα (συνθήκη χωρίς φορτίο).

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι παραβλέποντας την παραμόρφωση του δρομέα, τα θεμελιώδη και αρμονικά στοιχεία της προσομοιωμένης ροής είναι ανεξάρτητα από τη διακύμανση της ταχύτητας του δρομέα, ενώ λαμβάνοντας υπόψη την παραμόρφωση του δρομέα, οι μετρούμενες διακυμάνσεις με ταχύτητα σε λειτουργία χωρίς φορτίο αντιπροσωπεύονται σχετικά καλά, όπως φαίνεται στα σχήματα. 9.23 και 9.24.

Κατά συνέπεια, η προτεινόμενη μεθοδολογία που περιλαμβάνει μειωμένη υπολογιστική απαίτηση, επιτρέπει την αποτελεσματική αναπαράσταση των φαινομένων εξαιτίας της παραμόρφωσης του δρομέα όπως απεικονίζεται στα πειραματικά αποτελέσματα.

9.9 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η εργασία αυτή, εισήγαγε μια μεθοδολογία για την ανάλυση των επιπτώσεων στα χαρακτηριστικά ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη εξαιτίας του ανομοιόμορφου διακένου που προκαλείται από την παραμόρφωση του δρομέα και της ύπαρξης μηχανικών τάσεων σε αυτόν όταν λειτουργεί σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας.

Αυτή η τεχνική βασίζεται σε ασθενή σύζευξη της μηχανικής ανάλυσης και κατάλληλης αναπαράστασης των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που διέπουν τις ιδιότητες του ηλεκτρικού χάλυβα.

Αρχικά, η επίδραση της μηχανικής τάσης στον ηλεκτρικό χάλυβα αξιολογήθηκε μέσω πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε κατάλληλη συσκευή SST. Ο συνδυαστικός παράγοντας που χρησιμοποιείται μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών και μηχανικών μοντέλων είναι η κατανομή της υδροστατικής πίεσης. Αυτή η παράμετρος διευκολύνει την απεικόνιση των διακριτών συμπεριφορών του ηλεκτρικού χάλυβα υπό εφελκυστικές και θλιπτικές μηχανικές τάσεις στο πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης και οδηγεί στα τελικά αποτελέσματα.

Ακόμη, επιτρέπει τη λεπτομερή εξέταση των αλλαγών στις (α) χωρικές αρμονικές της πυκνότητας της ροής, (β) στις διακυμάνσεις της ροής σύνδεσης με τις περιελίξεις του στάτη και (γ) στον κυματισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

Η τεχνική αυτή έχει εφαρμοστεί σε πρότυπο κινητήρα τύπου V εσωτερικών μόνιμων μαγνητών. Η εγκυρότητα της προτεινόμενης ολοκληρωμένης προσέγγισης έχει επιβεβαιωθεί μέσω πειραμάτων, και πιο συγκεκριμένα με βάση την ανάλυση της κυματομορφής της πεπλεγμένης ροής υπό συνθήκες χωρίς φορτίο. Αυτή η επιβεβαίωση επιτυγχάνεται με την παρατήρηση συγκρίσιμης συμπεριφοράς μεταξύ των προσομοιωμένων και των πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά τις αρμονικές ροής σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, βασίζεται σε μια ιδιαίτερη ασθενή σύζευξη των αλληλεξαρτώμενων μηχανικών και ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και επιτρέπει την εξέταση της επίδρασης της παραμόρφωσης του δρομέα στα χαρακτηριστικά ενός κινητήρα εσωτερικών μόνιμων μαγνητών όταν αυτός λειτουργεί σε περιοχές υψηλών ταχυτήτων, με χρήση χαμηλών υπολογιστικών απαιτήσεων.

Κατά συνέπεια, η μεθοδολογία αυτή, μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε διαδικασίες σχεδιασμού κινητήρα και να προσφέρει εξαιρετικές υπηρεσίες σε αυτήν την κατηγορία εφαρμογών.

9.10 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [9.1] Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino, and A. Boglietti, “High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 2946–2959, Jun. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2286777.
- [9.2] M. E. Gerlach, M. Zajonc, and B. Ponick, “Mechanical stress and deformation in the rotors of a high-speed PMSM and IM,” *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 138, no. 2, pp. 96–109, Apr. 2021, doi: 10.1007/s00502-021-00866-5.
- [9.3] J.-W. Jung et al., “Mechanical Stress Reduction of Rotor Core of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 911–914, Feb. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2011.2172582.

- [9.4] Chai, Y. Li, P. Liang, and Y. Pei, "Calculation of the Maximum Mechanical Stress on the Rotor of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3420–3432, Jun. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2524410.
- [9.5] G. Chu, R. Dutta, D. Xiao, J. E. Fletcher and M. F. Rahman, "Development and Optimization of a Mechanically Robust Novel Rotor Topology for Very-High-Speed IPMSMs," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, no. 3, pp. 1781-1792, Sept. 2023, doi:10.1109/TEC.2023.3258463
- [9.6] J. Ou, J. Lin, T. Liu, Y. Liu and D. Xu, "High-speed Interior Permanent-magnet Rotor Made of Dual-phase Magnetic Materials," 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Zhuhai, China, 2023, pp. 2153-2157, doi: 10.1109/ICEMS59686.2023.10344484.
- [9.7] J. R. Shewchuk, "Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator," 1996, pp. 203–222. doi: 10.1007/BFb0014497.
- [9.8] W. Maunder, "A direct formulation of finite element models in mechanics," *Engineering Computations*, vol. 6, no. 3, pp. 248–258, Jan. 1989, doi: 10.1108/eb023780.
- [9.9] G. Chu, R. Dutta, M. F. Rahman, H. Lovatt and B. Sarlioglu, "Analytical Calculation of Maximum Mechanical Stress on the Rotor of Interior Permanent-Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 2, pp. 1321-1331, March-April 2020,doi: 10.1109/TIA.2019.2960756.
- [9.10] Lehtikoinen, T. Davidsson, A. Arkkio, and A. Belahcen, "A High- Performance Open-Source Finite Element Analysis Library for Magnetics in MATLAB," in 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Sep. 2018, pp. 486–492. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8507235.
- [9.11] R. Kouhia et al., "Multiaxial magneto-mechanical modelling of electrical machines with hysteresis," in 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), 2016, pp. 6 -6 . doi: 10.1049/cp.2016.0183.
- [9.12] M. Balluff, J. Karthaus, M. Schröder, M. Gerlach, and K. Hameyer, "Study on the Effects of Stator Segmentation on the Characteristics of an Electrical Vehicle Traction Drive," *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 135, no. 2, pp. 213–222, Apr. 2018, doi: 10.1007/s00502-018-0602-y.
- [9.13] Y. Li, F. Chai, Z. Song, and Z. Li, "Analysis of Vibrations in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Air-Gap Deformation," *Energies*, vol. 10, no. 9, 2017, doi: 10.3390/en10091259.
- [9.14] M. Ebrahimi, M. Javan Roshtkhari, J. Faiz, and S. V. Khatami, "Advanced Eccentricity Fault Recognition in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Stator Current Signature Analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 2041–2052, Apr. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2263777.
- [9.15] Mazur and M. Trojnar, "Modelling of Electrical and Mechanical Phenomena in Induction Motors with Air-Gap Electricity," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 01, pp. 296–303, Apr. 2003, doi: 10.24084/repqj01.371.
- [9.16] J. Borg Bartolo, M. Degano, J. Espina, and C. Gerada, "Design and Initial Testing of a High-Speed 45-kW Switched Reluctance Drive for Aerospace Application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 988–997, Feb. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2618342.
- [9.17] Nabil M'Zali. Modeling of the mechanical cutting effect on local magnetic properties of electric steels and implementation in a finite element computation code. Electric power. Université de Lille, 2021. English. ffnNT : 2021LILUI040ff. fftel-03475384
- [9.18] Yi Li, Yulong Pei, Zaixin Song, Feng Chai, "Effect of Rotor Deformation on Magnetic Radial Force in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with V-shaped Rotor Structure", 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2016), pp. 1906-1911, doi: 10.1109/IECON.2016.7793255
- [9.19] G.K. Sakkas, A.G. Kladas, "Rotor deformation impact on operating characteristics of IPM Motor under High-Speed conditions", 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM'2022), pp. 8-13, doi: 10.1109/ICEM51905.2022.9910878
- [9.20] K. Fujisaki and S. Satoh, "Numerical calculations of electromagnetic fields in silicon steel under mechanical stress," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no. 4, pp. 1820-1825, July 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.830509
- [9.21] K. Ali, K. Atallah, and D. Howe, "Prediction of mechanical stress effects on the iron loss in electrical machines," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, no. 8, pp. 4119–4121, Apr. 1997
- [9.22] D. Singh, P. Rasilo, F. Martin, A. Belahcen and A. Arkkio, "Effect of Mechanical Stress on Excess Loss of Electrical Steel Sheets," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015, Art no. 1001204, doi: 10.1109/TMAG.2015.2449779
- [9.23] A. Daikoku et al., "An accurate magnetic field analysis for estimating motor characteristics taking account of stress distribution in the magnetic core," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 3, pp. 668-674, May-June 2006, doi: 10.1109/TIA.2006.872952
- [9.24] K. Yamazaki and W. Fukushima, "Loss Analysis of Induction Motors by Considering Shrink Fitting of Stator Housings," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, March 2015, Art no. 8102004, doi: 10.1109/TMAG.2014.2357842

- [9.25] IEC 60404-3, "Magnetic materials – Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester", International Electrotechnical Commission, November 2022.
- [9.26] P. Diez and J. P. Webb, "A Rational Approach to B – H Curve Representation," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 3, pp. 1-4, March 2016, Art no. 7203604, doi: 10.1109/TMAG.2015.2488360
- [9.27] S. Zurek, "Characterisation of Soft Magnetic Materials Under Rotational Magnetisation". Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [9.28] P.Klimczyk, "Novel Techniques for Characterisation and Control of Magnetostriction in G.O.S.S", Ph.D. Thesis, Cardiff Univ., 2012.
- [9.29] G. K. Sakkas, C. R. C. Vasilopoulos, K. G. Bourchas and A. G. Kladas, "Advanced Design of PWM Inverter Fed Permanent Magnet Motors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 59, no. 11, pp. 1-11, Nov. 2023, Art no. 8204711, doi: 10.1109/TMAG.2023.3295374.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

10.1 Περίληψη Κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο αναλύει τις δυνατότητες επαύξησης της πυκνότητας ισχύος σε κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων EV (Electric Vehicle), χρησιμοποιώντας ανάλυση πολλαπλών φυσικών στρωμάτων (Multi-Physics). Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται η ικανότητα ενίσχυσης της πυκνότητας ισχύος ηλεκτρικών μηχανών μέσω της λειτουργίας τους σε υψηλές ταχύτητες, και κατάλληλη διαχείριση του θερμικού τους φορτίου. Για τις ανάγκες της ανάλυσης, χρησιμοποιείται ασθενής σύζευξη ηλεκτρομαγνητικών, μηχανικών και θερμικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, με στόχο την εκτίμηση των περιορισμών σχεδίασης τα οποία προκύπτουν στα διάφορα - πολλαπλά φυσικά επίπεδα. Η αλληλεξάρτηση μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς, της μηχανικής αντοχής και της θερμικής διαχείρισης αναδεικνύεται και ποσοτικοποιείται. Μέσω της συγκεκριμένης προσέγγισης, προκύπτουν πολύτιμες πληροφορίες, που επιτρέπουν την ταχύτερη στόχευση εφαρμογής, καθώς η σχεδίαση του κινητήρα ικανοποιεί εγγενώς περιορισμούς πολλαπλών φυσικών στρωμάτων (ηλεκτρομαγνητικό, μηχανικό, θερμικό) καθιστώντας, την σχεδίαση, άμεσα κατάλληλη για τη διαδικασία παραγωγής. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται αναφορικά σε έναν σύγχρονο κινητήρα IPMSRM (Internal Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor) με μαγνήτες σχήματος V και μέγιστη ικανότητα ισχύος 100kW.

10.2 Εισαγωγή Κεφαλαίου

Οι κινητήρες Εσωτερικών Μόνιμων Μαγνητών (IPM) θεωρούνται η προτιμώμενη επιλογή για συστήματα πρόωσης ηλεκτρικών οχημάτων. Η προτίμηση αυτή, προκύπτει από την ικανότητά τους να προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ροπής και ισχύος, σε συνδυασμό με εξαιρετική ενεργειακή απόδοση στην περιοχή του κύκλου φόρτισης του οχήματος. Η μεγιστοποίηση της απόδοσης καθορίζεται κυρίως από την επιλογή των υλικών και την κατάλληλη εφαρμογή των αρχών ηλεκτρομαγνητικής σχεδίασης. Παράλληλα, η πυκνότητα ισχύος και ροπής του κινητήρα μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω με την αύξηση της δυνατότητας λειτουργίας σε υψηλές στροφές, σε συνδυασμό με την εφαρμογή αποτελεσματικών συστημάτων ψύξης (θερμική διαχείριση) που στοχεύουν στρατηγικά σε περιοχές υψηλών απωλειών. Υπό αυτή την έννοια, διαφορετικά φυσικά πεδία οφείλουν να ενσωματωθούν στη διαδικασία σχεδιασμού ενός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος, ώστε να μπορούν να ερευνηθούν περιοχές του χώρου σχεδιασμού (design space). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την παράλληλη εξέταση των ηλεκτρομαγνητικών, μηχανικών και θερμικών φαινομένων της μηχανής.

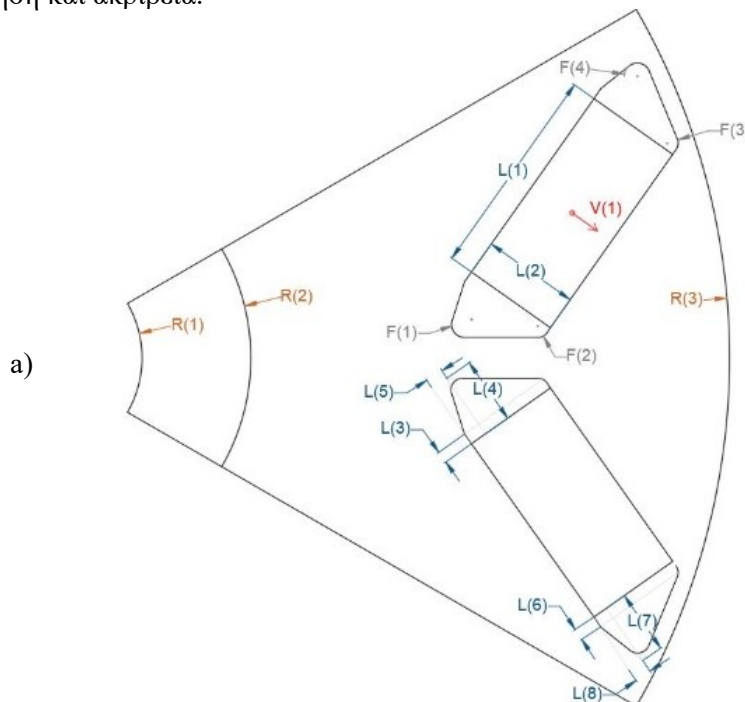
Η ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων σε μηχανές μόνιμων μαγνητών πραγματοποιείται με τη χρήση δισδιάστατων (2D) μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγχρονη περιστροφή της θεμελιώδους συνιστώσας εξετάζεται μέσω ανάλυσης βήμα προς βήμα για την αξιολόγηση της ροής και της ροπής. Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των ταχέων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων στις απώλειες, πραγματοποιείται αρμονική ανάλυση σε επιμέρους σημεία λειτουργίας, μέσω υπέρθεσης παλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων κατά τους άξονες d και q. Επιπλέον, με χρήση αξιsymμετρικής 2D ανάλυσης γίνεται η εξέταση της επίδρασης των αυτεπαγωγών των άκρων του τυλίγματος της μηχανής. Για την επιβεβαίωση της ηλεκτρομαγνητικής μοντελοποίησης της μηχανής, πραγματοποιείται σύγκριση και επαλήθευση της μεθόδου με μία τρισδιάστατη (3D) ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας εμπορικό λογισμικό. Ο σωστός προσδιορισμός των απωλειών είναι απαραίτητος καθώς έχει καθοριστικό ρόλο στην αξιολόγηση της απόδοσης της μηχανής και της θερμικής συμπεριφοράς

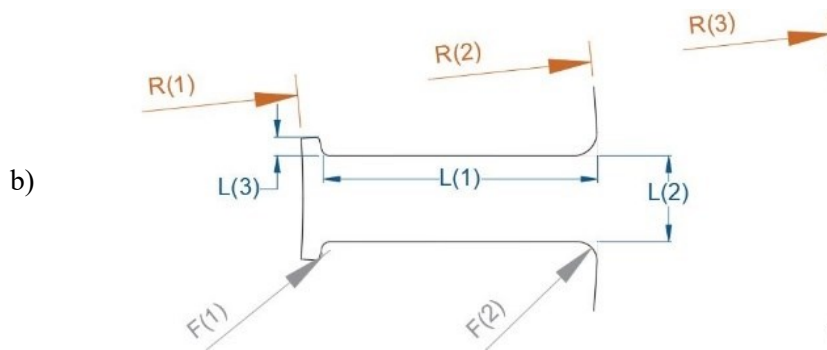
της. Μεταξύ των βασικών απωλειών σε έναν κινητήρα, οι οποίες αξιολογούνται μέσω μαγνητοστατικών και αρμονικών αναλύσεων ή αναλυτικών εργαλείων, περιλαμβάνονται οι απώλειες σιδήρου, οι απώλειες χαλκού και οι μηχανικές απώλειες [10.1], [10.2], [10.3].

Στην σχεδίαση της μηχανής, κομβικό ρόλο έχει η εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς, καθώς επηρεάζει τη λειτουργία της, και τη διάρκεια ζωής της. Η μηχανική ανάλυση περιλαμβάνει την αξιολόγηση των φαινομένων τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τη μηχανική αντοχή (Structural Integrity) καθώς επίσης και την δυνατότητα μοντελοποίησης της δυναμικής συμπεριφοράς του άξονα, με μειωμένης τάξης μοντέλα (π.χ. εκτίμηση ροπής αδράνειας). Η αξιολόγηση της μηχανικής αντοχής περιλαμβάνει τη μελέτη της στατικής συμπεριφοράς του δρομέα υπό πίεση, λαμβάνοντας υπόψη τη φυγόκεντρη διέγερση και τη θερμική διαστολή, καθώς και τα φορτία κόπωσης που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων κύκλων φόρτισης. Επιπλέον, η ροπή αδράνειας εκτιμάται βάσει της πυκνότητας μάζας των υλικών και της απόστασής τους από τον άξονα περιστροφής [10.4], [10.5], [10.6].

Η θερμική ανάλυση του κινητήρα είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατασκευή και το σχεδιασμό του. Η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει πολλές παραμέτρους, όπως οι απώλειες χαλκού, η μαγνήτιση και η αντοχή στην απομαγνήτιση των μόνιμων μαγνητών, η ακαιριότητα της μόνωσης και η μηχανική αντοχή. Η υπερβολική άνοδος θερμοκρασίας μπορεί να έχει συχνά αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση των μόνιμων μαγνητών. Επιπλέον, η μακροχρόνια ακεραιότητα της μόνωσης των αγωγών των τυλιγμάτων, η οποία επηρεάζει άμεσα την ορθή λειτουργία του κινητήρα, εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Πολλά υλικά, επίσης, εμφανίζουν έντονη εξάρτηση από τη θερμοκρασία, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να οδηγούν συχνά σε δυσμενείς συνέπειες. Συνεπώς, η θερμική ανάλυση είναι κρίσιμη, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε προσαρμογές στο μέγεθος ή σε αλλαγές στην μέθοδο ψύξης [10.7]-[10.10].

Μια προσέγγιση συνδυασμένης ανάλυσης των διάφορων φυσικών πεδίων, επιταχύνει τη διαδικασία σχεδιασμού, αποδίδοντας πιο εκλεπτυσμένα και βέλτιστα σχέδια. Αυτή η προσέγγιση φέρνει τη λύση πιο κοντά στο τελικό προϊόν και μειώνει την ανάγκη για εκτεταμένες επαναληπτικές δοκιμές, μειώνοντας χρόνο έρευνας και ανάπτυξης (R&D). Ως εκ τούτου, οδηγεί στη δημιουργία καλύτερων προϊόντων τα οποία είναι σε σημαντικό βαθμό πιο ανταγωνιστικά. Έτσι, η διαδικασία σχεδιασμού γίνεται πιο αποτελεσματική, επιτρέποντας έγκαιρες προσαρμογές με αυτοπεποίθηση και ακρίβεια.





Σχ. 10.1 (α) Παραμετροποίηση γεωμετρίας δρομέα και (β) στάτη.

Για τη διεξαγωγή ηλεκτρομαγνητικής, μηχανικής και θερμικής ανάλυσης κάθε μηχανής, είναι απαραίτητος ο αρχικός σχεδιασμός της γεωμετρίας τόσο του στάτη όσο και του δρομέα. Η γεωμετρία του στάτη αποτελείται από επαναλαμβανόμενα δόντια, ενώ η γεωμετρία του δρομέα από επαναλαμβανόμενους πόλους. Για να διευκολυνθεί η αριθμητική αναπαράσταση του δοντιού και του πόλου του δρομέα, πραγματοποιείται παραμετροποίηση της γεωμετρίας. Τα διαγράμματα του στάτη και του δρομέα που δίνονται στο Σχήμα 10.1 επιτρέπουν την παραμετρική σχεδίαση μέσω ανάθεσης αριθμητικών τιμών σε κάθε μεταβλητή.

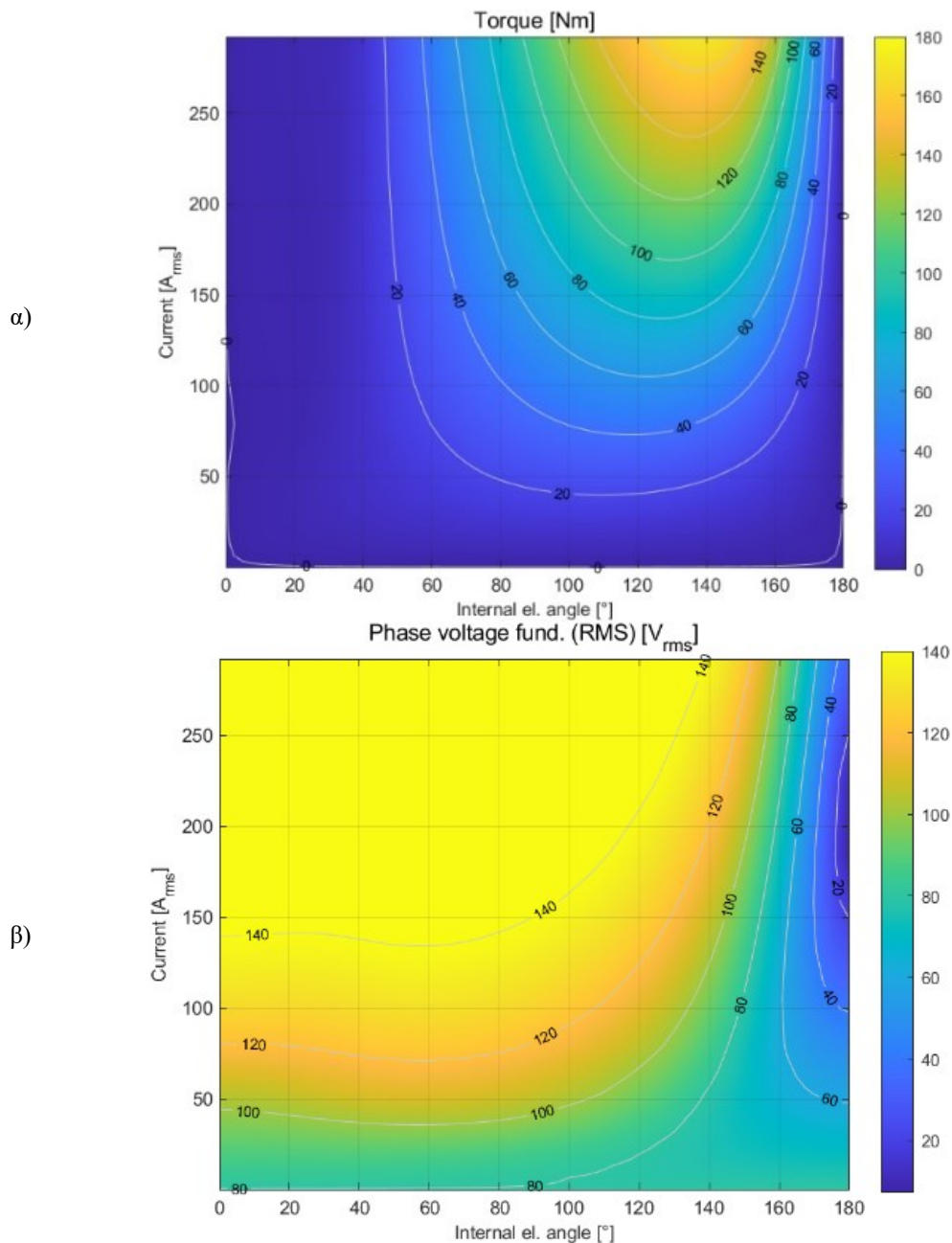
10.3 Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση

Για την αρχική εκτίμηση της εξάρτησης της απόδοσης της μηχανής, πραγματοποιείται προκαταρκτική ανάλυση του πεδίου εστιάζοντας αποκλειστικά στις θεμελιώδεις τιμές, που μπορούν να θεωρηθούν ως η θεμελιώδης συνιστώσα της κατανομής του ρεύματος. Αυτό απαιτεί την εφαρμογή διαδοχικών μαγνητοστατικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων για όλους τους συνδυασμούς θέσης του δρομέα και γωνίας του ρεύματος. Σε αυτήν την ανάλυση, η μέγιστη τιμή του ρεύματος ή, ισοδύναμα, η πυκνότητα ρεύματος στο αυλάκι του στάτη ορίζεται σε 25A/mm^2 . Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια αρχική εκτίμηση των χαρακτηριστικών επίδοσης της μηχανής και βοηθά στην κατανόηση της συμπεριφοράς της υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Οι απώλειες του κινητήρα λόγω των αυλακώσεων μπορούν να εκτιμηθούν προσεγγιστικά μέσω αυτής της ανάλυσης βήμα προς βήμα. Οι συνιστώσες των απωλειών οι οποίες οφείλονται στην τροφοδοσία PWM απαιτούν περαιτέρω ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να εκτιμηθούν οι αρμονικές απώλειες υψηλών συχνοτήτων.

Η συμπεριφορά του κινητήρα από τη πλευρά της ηλεκτρομαγνητικής φυσικής αξιολογείται με βάση την H/M ροπή και τις απώλειες κινητήρα τόσο κατά τη διάρκεια της σύγχρονης περιστροφής όσο και όταν αυτός τροφοδοτείται με διάφορα σχήματα τροφοδοσίας τάσης. Αυτή η ολοκληρωμένη εκτίμηση επιτρέπει μια διεξοδική κατανόηση του τί αποδίδει ο κινητήρας υπό διαφορετικές συνθήκες τάσης, και ρεύματος θετικής τριφασικής ακολουθίας.

10.4 Φυσικό Ηλεκτρομαγνητικό Μοντέλο του Κινητήρα

Το φυσικό μοντέλο του κινητήρα λειτουργεί ως μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση της ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης, περιλαμβάνοντας όλα τα αποτελέσματα που αφορούν τη συμπεριφορά του κινητήρα σε όρους μηχανικής ισχύος και ηλεκτρικών εισόδων. Αυτό το μοντέλο αποσκοπεί στην παροχή βασικών πληροφοριών για τη διαδικασία οδήγησης της μηχανής από τον αντιστροφέα. Για την ακριβή αποτύπωση της συμπεριφοράς του κινητήρα, δημιουργούνται αρκετοί χάρτες που παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ της ροπής και της γωνίας του εσωτερικού πεδίου, καθώς και του μέτρου της τάσης στα άκρα. Τα Σχήματα 10.2.α. και 10.2.β. απεικονίζουν τα διαγράμματα αυτά, προσφέροντας μια οπτική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών του κινητήρα και επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της απόδοσής του για διάφορες συνθήκες λειτουργίας.



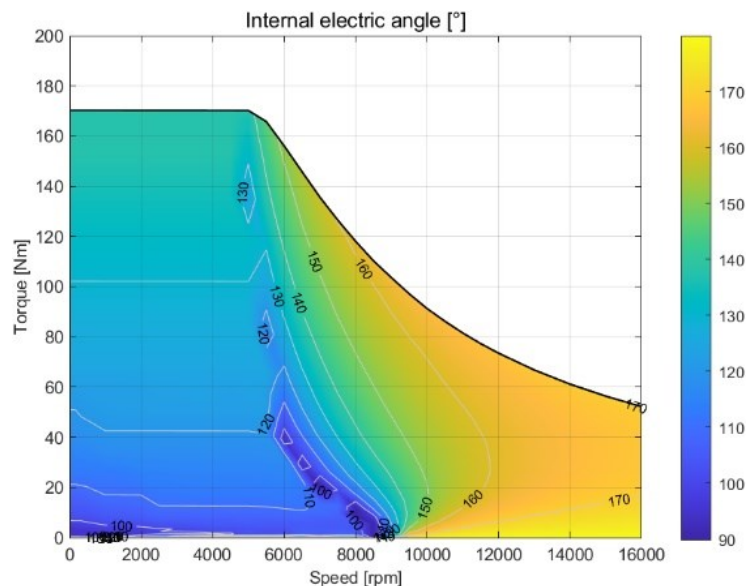
Σχ. 10.2 (α) Χάρτης ροπής και (β) Χάρτης τάσης σε σχέση με το ρεύμα και τη εσωτερική ηλεκτρική γωνία όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με 5krPM.

Στο Σχήμα 10.2.β., είναι φανερό ότι η τάση που απαιτείται στους ακροδέκτες της μηχανής εξαρτάται από την εσωτερική ηλεκτρική γωνία (γωνία πεδίων στάτη – δρομέα), και δεν είναι βέβαιο πως ο αντιστροφέας είναι ικανός να οδηγήσει την μηχανή σε όλα τα σημεία λειτουργίας του χάρτη. Όταν λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες, η μηχανή συχνά δεν μπορεί να οδηγηθεί με τη μέθοδο της Μέγιστης Ροπής ανά Αμπέρ (MTPA). Ως αποτέλεσμα, πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο, η μηχανή οδηγείται από τον αντιστροφέα χρησιμοποιώντας τη λογική της Μέγιστης Ροπής ανά Τάση (MTPV). Ο στόχος είναι να εντοπιστούν τα συγκεκριμένα σημεία στα οποία μπορεί να επιτευχθεί μέγιστη ροπή για μια δεδομένη τάση. Η προσέγγιση αυτή, λαμβάνει υπόψη ότι οι κύριες απώλειες στη μηχανή είναι οι απώλειες χαλκού, και επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει το ρεύμα, μειώνοντας επαρκώς το πεδίο ώστε να διατηρηθεί σταθερή η τάση.

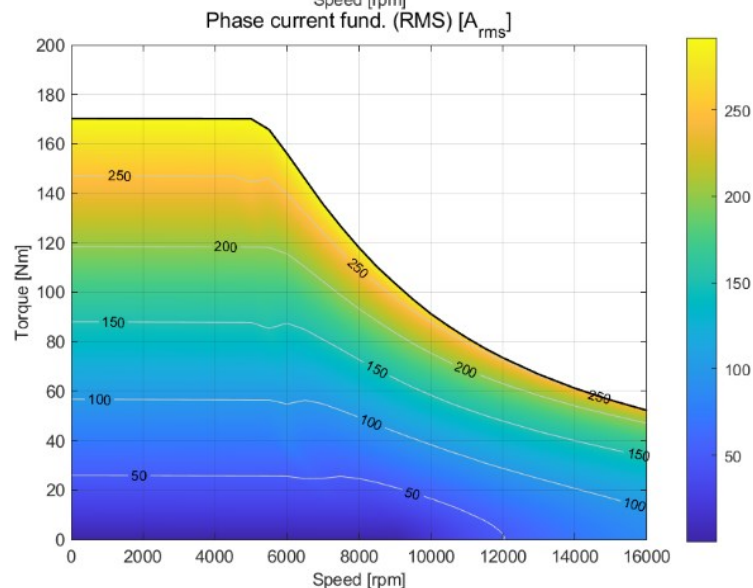
10.5 Οδήγηση από Αντιστροφέα με FOC

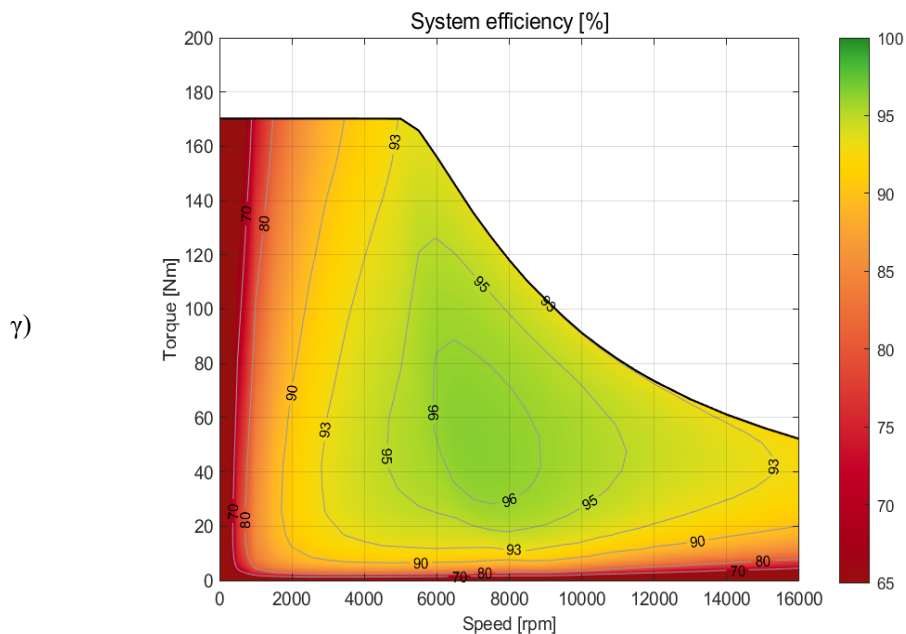
Οι παραπάνω χάρτες δημιουργούνται για διάφορες ταχύτητες και επιλέγονται σημεία από αυτούς τους χάρτες για την επίτευξη διαφορετικών τιμών εξόδου ροπής. Όπου είναι δυνατό, η επιλογή βασίζεται στη μέθοδο MTPA. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου δεν είναι εφαρμόσιμη, χρησιμοποιείται η μέθοδος MTPV. Αυτά τα επιλεγμένα σημεία για κάθε ταχύτητα σχηματίζουν συνολικά τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα για τον χάρτη απόδοσης, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά απόδοσης του κινητήρα υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Με την εφαρμογή αυτών των στρατηγικών επιλογής, δημιουργούνται οι ολοκληρωμένοι χάρτες του σχήματος Κινητήρας – Αντιστροφέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.3. Αυτοί οι χάρτες προσφέρουν μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας του κινητήρα σε συνδυασμό με τον αντιστροφέα, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τα σημεία λειτουργίας που επιτρέπουν την επίτευξη μέγιστης απόδοσης λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ρεύματος και τάσης. Η ενσωμάτωση του κινητήρα και του αντιστροφέα σε αυτούς τους χάρτες επιτρέπει μια ολιστική κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος κινητήρα – αντιστροφέα επιτυγχάνοντας τη μέγιστη ικανή απόδοση σε κάθε σημείο ροπής ταχύτητας.

α)



β)





Σχ. 10.3 (α) Χάρτης επιλεγμένης εσωτερικής ηλεκτρικής γωνίας (β) Χάρτης επιλεγμένης έντασης ρεύματος σε σχέση με τη ροπή και την ταχύτητα εξόδου. (γ) Χάρτης απόδοσης ενσωματωμένου συστήματος κινητήρα – αντιστροφέα σε σχέση με τη ροπή και την ταχύτητα.

Στο Σχήμα 10.3.α. και Σχήμα 10.3.β., είναι εμφανές ότι ο βέλτιστος συνδυασμός εσωτερικής ηλεκτρικής γωνίας και πλάτους ρεύματος επιτυγχάνει την επιθυμητή ροπή σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα. Στο Σχήμα 10.3.γ., δίνεται η συνολική απόδοση του συστήματος για αυτό το ζεύγος κινητήρα-αντιστροφέα. Ο υπό μελέτη κινητήρας έχει συμπαγές μέγεθος, καταλαμβάνοντας συνολικό όγκο 3 λίτρων, ενώ είναι ικανός να αποδίδει μέγιστη ισχύ 103 kW. Για την επίτευξη αυτής της επίδοσης, ο κινητήρας είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί με ρεύμα το οποίο οδηγεί σε συνολική πυκνότητα ρεύματος 25 A/mm² στον χαλκό της αύλακας. Ως αποτέλεσμα, η πυκνότητα ισχύος του κινητήρα υπολογίζεται σε 37 kW/lit., επιδεικνύοντας την ικανότητά του να αποδίδει υψηλή ισχύ σε σχετικά μικρό όγκο. Επιπλέον, η απόδοση του κινητήρα είναι ικανοποιητική, φτάνοντας το 96.2%. Αυτή η υψηλή απόδοση αντανακλάται και στην διαχείριση θερμοκρασίας εντός του κινητήρα, καθώς υποδεικνύει περιορισμένες απώλειες και αύξηση θερμοκρασίας σε παρατεταμένες περιόδους λειτουργίας.

Συνοπτικά, ο σχεδιασμένος κινητήρας προσφέρει έναν ευνοϊκό συνδυασμό συμπαγούς μεγέθους, υψηλής πυκνότητας ισχύος, μεγάλης απόδοσης και επίδοσης ροπής, καθιστώντας τον αξιόπιστη και αποτελεσματική επιλογή για εφαρμογές, που απαιτούν λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες και μικρή συνολική μάζα.

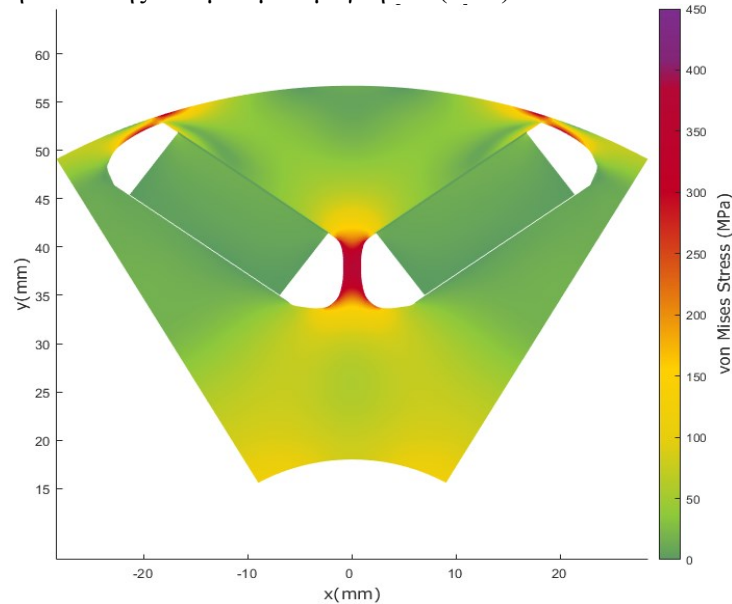
10.6 Στατική Μηχανική Ανάλυση υπό Φυγόκεντρες Δυνάμεις

Η κύρια πρόκληση στην αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων είναι η μηχανική αντοχή του δρομέα. Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του δρομέα και η επιλογή υλικών, που στοχεύουν στη βελτίωση της ηλεκτρομαγνητικής απόδοσης, συχνά δυσκολεύουν την επίτευξη υψηλής μηχανικής αντοχής. Η μηχανική ανάλυση ξεκινά με την εκτίμηση των ισοδύναμων τάσεων Von-Mises. Η ανάλυση επικεντρώνεται στις δυνάμεις που δημιουργούνται από την περιστροφή του δρομέα. Στη συνέχεια, για τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής, πραγματοποιείται μια πλήρης εξέταση όλων των σημείων του δρομέα, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι μηχανικές τους τάσεις παραμένουν κάτω από το όριο διαρροής του υλικού.

Στο Σχήμα 10.4, παρουσιάζεται μια οπτική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων Von-Mises, που δείχνει ότι η μέγιστη ταχύτητα του κινητήρα είναι 18kRPM. Σε αυτή την ταχύτητα, το

επίπεδο τάσης πλησιάζει τα 400 MPa, που είναι κοντά στο όριο διαρροής του επιλεγμένου ηλεκτρικού χάλυβα που εκτιμάται περίπου στα 420 MPa.

Το σχήμα των ελασμάτων κοντά σε περιοχές υψηλών τάσεων βελτιστοποιείται για την αποφυγή πιθανών καταστροφικών αστοχιών λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων. Οι διαστάσεις των πλευρών (ribs) και γεφυρών (bridges) επιλέγονται προσεκτικά, ώστε να επιτρέπουν την περιστροφή του δρομέα στην επιθυμητή ταχύτητα των 18kRPM, ενώ ταυτόχρονα οφείλουν να περιορίζουν τη ροή σκέδασης των μόνιμων μαγνητών (PMs).



Σχ. 10.4 Η κατανομή της τάσης Von-Mises του κινητήρα υπό φυγόκεντρες δυνάμεις στις 18kRPM.

10.7 Εφαρμογή Μηχανικού Συστήματος Μετάδοσης

Η ενσωμάτωση ενός συστήματος μετάδοσης (geartrain) αλλάζει τα χαρακτηριστικά ροπής-ταχύτητας του κινητηρίου συστήματος, δίνοντας μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό των κινητήρων. Αυτό επιτρέπει στον κινητήρα να λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες ενώ όταν συνδυάζεται με το σύστημα μετάδοσης, η ροπή και η ταχύτητα του συστήματος μπορεί να ικανοποιεί τις επιθυμητές απαιτήσεις του οχήματος. Ωστόσο, όταν ο κινητήρας δεν μπορεί να φτάσει σε υψηλές ταχύτητες, η δυνητική αύξηση της ροπής μέσω του συστήματος μετάδοσης είναι περιορισμένη. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει η δυνατότητα να μετατοπιστεί το σημείο ονομαστικής ισχύος του κινητήρα σε υψηλότερες ταχύτητες, μειώνοντας τα ενεργά τυλίγματα (effective turns), ή μειώνοντας το μήκος της μηχανής. Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις συχνά ενισχύεται η πυκνότητα ισχύος του κινητήρα. Αυτή η προσέγγιση παράλληλα ενισχύει το εύρος της περιοχής υψηλής απόδοσης του κινητήρα, ωστόσο οι απώλειες στο σύστημα μετάδοσης επιβαρύνονται.

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει ανάλυση ευαισθησίας του μήκους και των στροφών του κινητήρα. Η διαμόρφωση του φύλλου λαμαρίνας του δρομέα προσαρμόζεται αναλόγως κατά τη διάρκεια της ανάλυσης ευαισθησίας με στόχο τη διασφάλιση της μηχανικής ακεραιότητας του στην μέγιστη ταχύτητα περιστροφής

Motor	Motor Variations				
	Act. Turns [N]	Act. Length [mm]	Max Speed [RPM]	Nom. Power [kW]	Power Density [kW/L]
M.A.	24	110	18000	103.25	36.89
M.B.	22	107.5	20000	106.2	38.82
M.C.	20	107.5	22000	108.43	39.64

Πίν. 10.1 Χαρακτηριστικά Κινητήρων

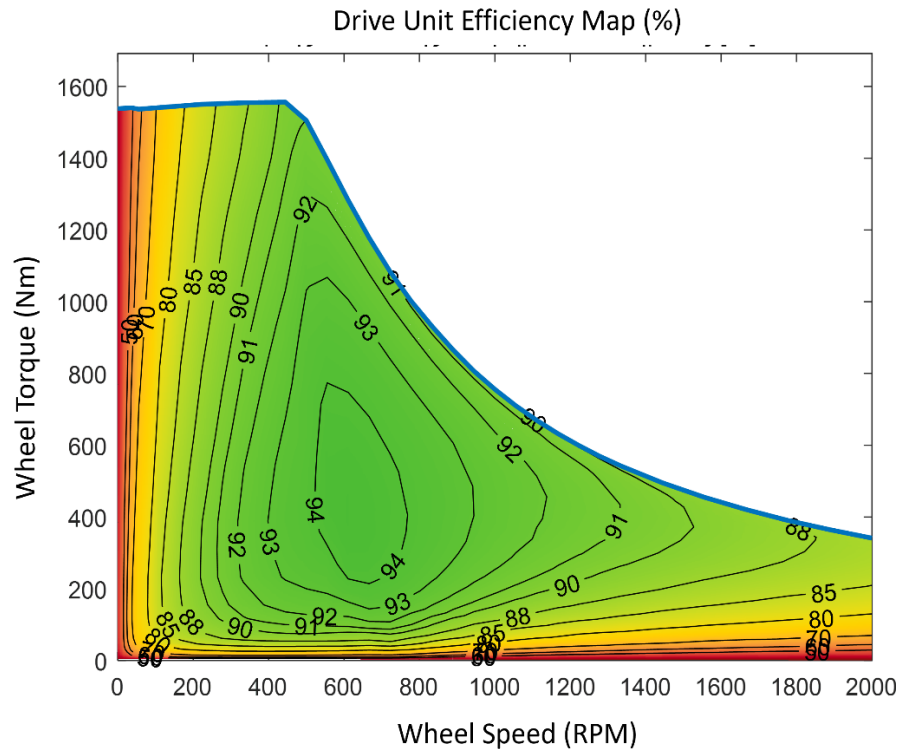
Στις εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, συνήθως επιλέγεται ένας ενιαίος λόγος μετάδοσης, σε αντίθεση με τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, τα οποία συχνά χρησιμοποιούν κιβώτια πολλαπλών σχέσεων. Τα συστήματα μετάδοσης σταθερού λόγου συμβάλλουν στη στιβαρότητα του συστήματος και μειώνουν το κόστος κατασκευής. Οι απαιτήσεις υψηλής απόδοσης των ηλεκτρικών οχημάτων συχνά οδηγούν σε απλές διατάξεις με δύο άξονες, που προσφέρουν λόγους από 1:1 έως 1:15.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκαν τρεις λόγοι μετάδοσης (1:9, 1:10 και 1:11) σε διατάξεις δύο αξόνων. Κάθε παραλλαγή του κινητήρα που αναφέρεται στον Πίνακα 1 αντιστοιχεί σε διαφορετική επιλογή λόγου μετάδοσης, με στόχο τη διατήρηση της μέγιστης ταχύτητας του οχήματος στις 2kRPM. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των τριών διαφορετικών κινητήριων μονάδων. Αξιοσημείωτο είναι ότι η μέγιστη απόδοση και η ταχύτητα εξασθένισης πεδίου πεδίου διατηρούνται.

Drive Unit	Drive Unit Variations				
	Motor	Gear Ratio [Ratio]	Max Eff. [%]	Field Weakening Speed [RPM]	Max Torque [Nm]
DU.A.	M.A.	9:1	94.65	555	1556.4
DU.B.	M.B.	10:1	94.55	550	1535.2
DU.C.	M.C.	11:1	94.55	545	1518.4

Πίν. 10.2 Χαρακτηριστικά κινητηρίου συστήματος

Οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης ενσωματώνονται κατά την μοντελοποίηση του συστήματος κίνησης το οποίο συμπεριλαμβάνει και το συνδυασμένο υπό-σύστημα αντιστροφέα κινητήρα (Inverter – Motor). Συνεπώς η κινητήρια μονάδα του ηλεκτρικού οχήματος είναι το σύστημα μετάδοσης, ο αντιστροφέας και ο ηλεκτρικός κινητήρας. Ο χάρτης απόδοσης του κινητηρίου συστήματος “DU.A” παρουσιάζεται στο σχήμα 10.5.



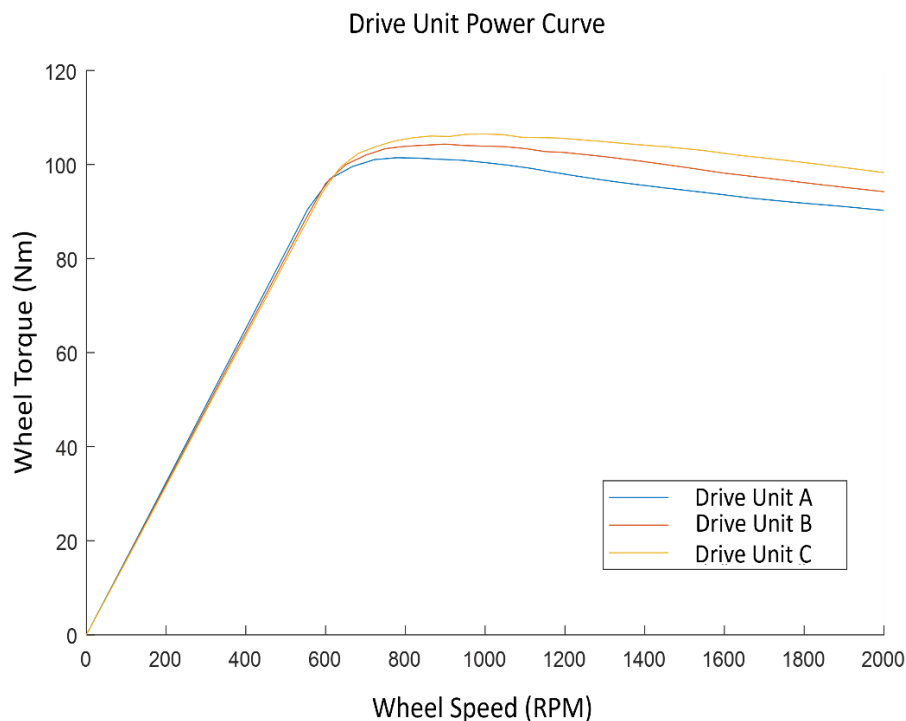
Σχ. 10.5 Απόδοση της Μονάδας Κίνησης (DU.A, λόγος μετάδοσης 1:9) σε σχέση με τη ροπή εξόδου και την ταχύτητα περιστροφής των τροχών.

10.8 Επιπτώσεις της Μέγιστης Ταχύτητας στην Ικανότητα Ισχύος

Η μηχανική ανάλυση σε συνδυασμό με μέθοδο βελτιστοποίησης μπορεί προτείνει διαμορφώσεις ικανές να αντέχουν σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής και παράλληλα να μειώνουν τη ροή σκέδασης των μαγνητών διευρύνοντας το λειτουργικό εύρος ταχυτήτων της μηχανής. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση προσαρμόζεται αναλόγως για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της μηχανής σε αυτό το υψηλό εύρος ταχυτήτων. Η τροποποίηση των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών, με σκοπό την αύξηση του εύρους ταχυτήτων λειτουργίας, περιλαμβάνει κυρίως τη μείωση του αριθμού των ενεργών στρωφών ή, ισοδύναμα, τη μείωση του μήκους της μηχανής. Η μείωση του αριθμού των ενεργών στρωφών στις περιελίξεις οδηγεί σε μείωση της πεπλεγμένης ροής του στάτη, πράγμα που με τη σειρά του μειώνει την ροπή του κινητήρα. Αυτή η σχεδιαστική προσέγγιση επιτρέπει τη βελτιωμένη απόδοση και επίδοση της μηχανής σε υψηλότερες ταχύτητες.

Η ανάλυση αυτή δείχνει την επίδραση του συνδυασμού κινητήρα-αντιστροφέα με το σύστημα μετάδοσης στη ροπή και στην ταχύτητα των τροχών του οχήματος. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η αύξηση της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής οδηγεί σε βελτίωση της ικανότητας ισχύος του κινητήρα. Ταυτόχρονα, αυτή η βελτίωση οδηγεί σε αύξηση της ροπής που εφαρμόζεται από το σύστημα πρόωσης στους τροχούς, ιδιαίτερα στο εύρος υψηλών ταχυτήτων. Αυτά τα ευρήματα καταδεικνύουν την προοπτική βελτίωσης τόσο της πυκνότητας ισχύος όσο και της πυκνότητας ροπής που παρέχεται στο σύστημα πρόωσης μέσω της βελτιστοποίησης του συνδυασμένου κινητήρα-αντιστροφέα και της αποτελεσματικής αξιοποίησης του συστήματος μετάδοσης.

Στο σχήμα 10.6 καταγράφονται ο καμπύλες ισχύος των τριών υπό μελέτη κινητηρίων μονάδων. Η αύξηση της ικανότητας ισχύος προκύπτει κυρίως από τη μείωση στον αριθμό των ενεργών τυλιγμάτων του κινητήρα. Επίσης, στην περίπτωση του DU.C, η μέγιστη ισχύς παραμένει σταθερή σε ευρύ εύρος ταχυτήτων μετά την υπέρβαση της ταχύτητας εξασθένισης πεδίου, όπως απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα.



Σχ. 10.6 Καμπύλες ισχύος της μονάδας κίνησης σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής των τροχών.

10.9 Ανάλυση Θερμικής Συμπεριφοράς

Για να πραγματοποιηθεί μια αποτελεσματική θερμική ανάλυση, αναγκαίο είναι να προσδιοριστούν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας HTC (Heat Transfer Coefficient) μεταξύ των διαφόρων υλικών εντός της μηχανής. Αυτοί οι συντελεστές είναι σημαντικοί για την εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του κινητήρα. Ωστόσο, ο υπολογισμός των HTC εμπεριέχει ορισμένες προκλήσεις, ιδιαίτερα στο να προσδιοριστεί με λεπτομέρεια η ακριβής τοποθεσία των περιοχών μεταφοράς θερμότητας. Συχνά, δεν θεωρείται προφανής ο προσδιορισμός της ακριβούς τοποθέτησης των αγωγών του χαλκού στις αυλακώσεις του στάτη, όπως επίσης και η θέση του δρομέα. Η χρήση LPTM (Lumped Parameter Thermal Network) βασισμένη σε HTC θεωρείται μια γενικευμένη αλλά ικανοποιητικής ακρίβειας προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών μηχανών.

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία των διάφορων υποσυστημάτων και αναγνωρίζοντας τις αβεβαιότητες στην περιγραφή της τοποθεσίας των περιοχών μεταφοράς θερμότητας, οι HTC μπορούν να εκτιμηθούν. Αυτή η διαδικασία εκτίμησης επιτρέπει την αποτελεσματική ενσωμάτωση της γεωμετρίας στην θερμική ανάλυση, διασφαλίζοντας ότι η ανάλυση λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως οι ιδιότητες των υλικών, οι πηγές θερμότητας και οι δυναμικές ροές του εργαζόμενου ρευστού ψύξης. Ενδεικτικά στο Κεφάλαιο 2 δόθηκαν οι τιμές των HTC για αντίστοιχη μηχανή, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.14.

Η θερμική ανάλυση του κινητήρα περιλαμβάνει τα εξής κύρια στοιχεία:

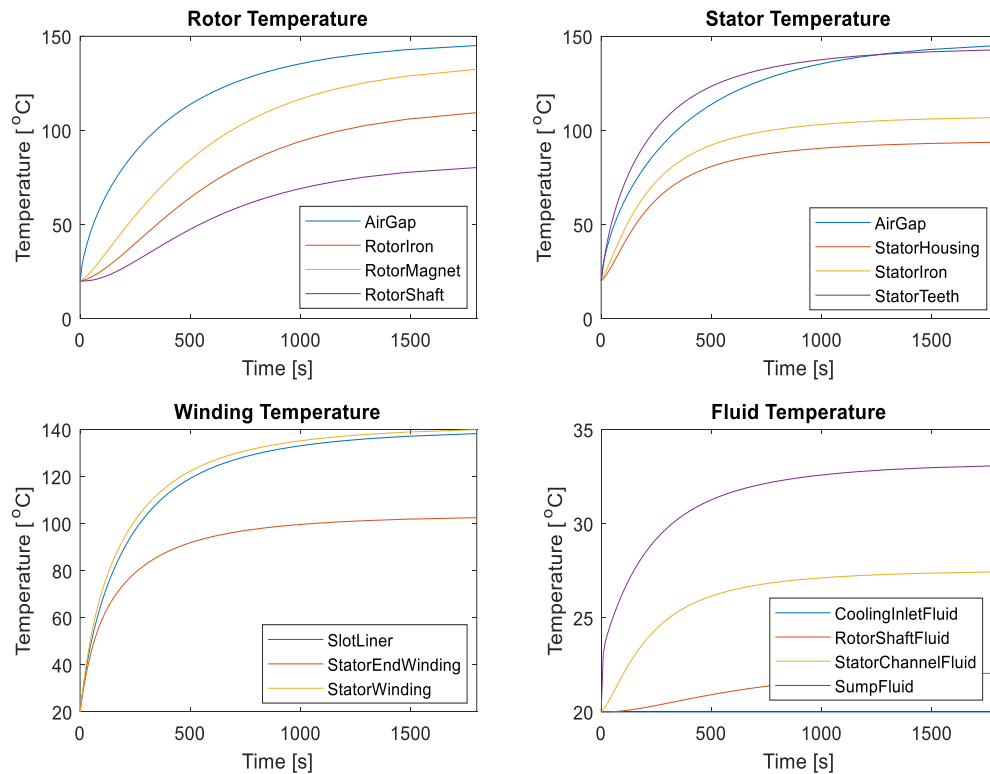
1. Δίαυλοι ψύξης στάτη (Stator Cooling Channels): Οι HTC σε αυτές τις περιοχές υπολογίζονται ως συνάρτηση της ροής του ρευστού ψύξης εντός των διαύλων.
2. Δίαυλοι ψύξης στον δρομέα (Rotor & Magnet Cooling Channels): Οι HTC σε αυτές τις περιοχές υπολογίζονται ως συνάρτηση της ροής του ρευστού ψύξης εντός του άξονα και της ταχύτητας του δρομέα.
3. Ροή στο άκρο τυλίγματος (End Winding Cooling): Χρήση εμπειρικών HTC για την εκτίμηση της ψύξης εξαιτίας ψεκασμού του ρευστού ψύξης από την περιστροφή του δρομέα και από τη ροή ψυκτικού του στάτη.
4. Επίδραση του αέρα (Windage Effect): Οι ισοδύναμοι HTC που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν εξάρτηση από την ταχύτητα περιστροφής με στόχο να ληφθεί υπόψη η επίδραση της κίνησης του αέρα κοντά στο διάκενο

Η ροή του ψυκτικού υγρού σε αυτό το σύστημα ακολουθεί δύο πορείες:

1. Ροή στάτη
 1. Είσοδος #1: Το ψυκτικό υγρό εισέρχεται από το κέντρο του ενεργού μήκους του στάτη σε μια δακτυλιοειδή αυλάκωση γύρω από το στάτη.
 2. Συμμετρική Ροή: Στη συνέχεια, το ψυκτικό υγρό ωθείται συμμετρικά κατά μήκος της μηχανής, περνώντας μέσα από τους διαύλους ψύξης και προχωρά προς τις άκρες του κινητήρα.
 3. Επαφή με τα άκρα τυλίγματος από τον στάτη: Το ψυκτικό υγρό συναντά τις άκρες των τυλιγμάτων, αλλά δεν μπορεί να έρθει σε άμεση επαφή με τον δρομέα.
2. Ροή δρομέα
 1. Είσοδος #2: Το ψυκτικό υγρό εισέρχεται με κατάλληλη σωλήνα στο εσωτερικό μέρους του άξονα του δρομέα
 2. Επαφή με τα άκρα τυλίγματος από τον δρομέα: Το ψυκτικό υγρό εκτοξεύεται στις άκρες των τυλιγμάτων του στάτη από κατάλληλες οπές του δρομέα.
 3. Επαφή με τους μαγνήτες: Το ψυκτικό υγρό οδεύει από το εσωτερικό του άξονα του δρομέα μέσω κατάλληλων οπών στην γειτονία των μαγνητών.

Αποστράγγιση: Τέλος, το ψυκτικό υγρό ρέει προς μια αυλάκωση αποστράγγισης στο κάτω μέρος του κελύφους της μηχανής και απορροφάται προς τα έξω.

Στο Σχήμα 10.7, παρουσιάζεται η μέση (χωρικά) θερμοκρασία σε κάθε περιοχή του κινητήρα, σκιαγραφώντας μια σαφή περιγραφή της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα. Αυτή η θερμική χαρτογράφηση επιτρέπει την αξιολόγηση της κατανομής θερμοκρασίας, και τον εντοπισμό περιοχών υπερθέρμανσης με στόχο την βελτιστοποίηση της στρατηγική ψύξης του κινητήρα. Η βελτιστοποίηση της ψύξης οδηγεί στην ενίσχυση της συνολικής απόδοσης και της μακροχρόνιας ανθεκτικότητας.

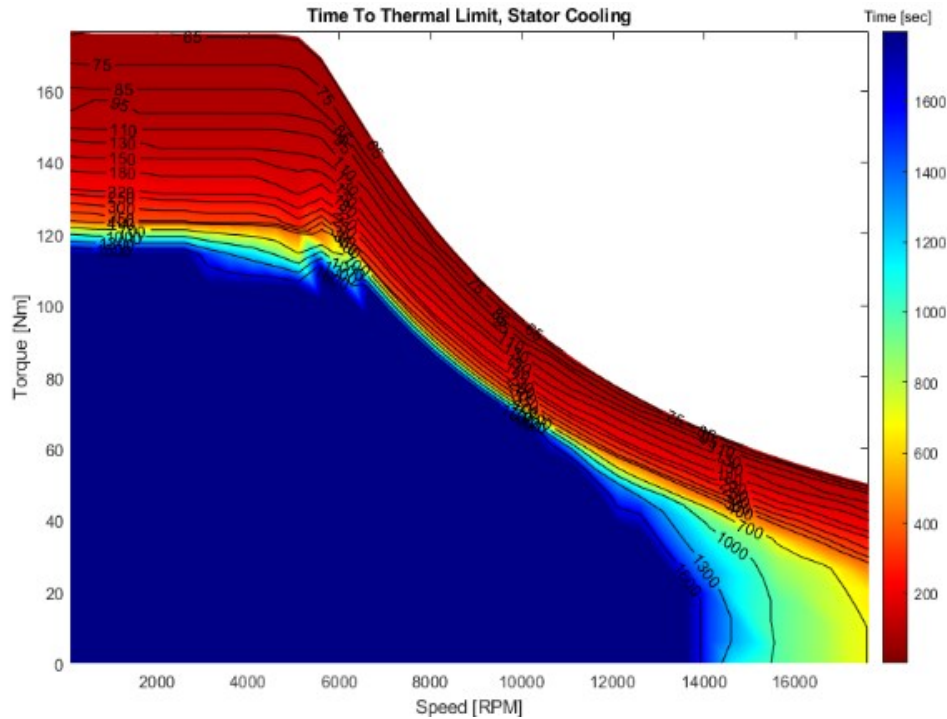


Σχ. 10.7 Μέση θερμοκρασία έναντι χρόνου σε διάφορες περιοχές του κινητήρα. Και στις τέσσερις εικόνες, ο Κινητήρας A λειτουργεί συνεχώς με 30Nm και 16kRPM, ενώ η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού είναι στους 20°C με συνολική ροή 10 lpm..

10.10 Θερμικοί Περιορισμοί στην Επίδοση

Η θερμική ανάλυση επιτρέπει ακόμη τον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου χρόνου λειτουργίας της μηχανής υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Ο υπολογισμός αυτός είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς διασφαλίζει ότι η μηχανή μπορεί να διατηρήσει τη μέγιστη ισχύ της για μια καθορισμένη διάρκεια χωρίς να αντιμετωπίσει πιθανούς κινδύνους, όπως η υπέρβαση των ορίων θερμοκρασίας.

Αρχικά, υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται για κάθε υλικό να φτάσει στο θερμικό του όριο. Στη συνέχεια, λαμβάνεται υπόψη μόνο ο μικρότερος υπολογιζόμενος χρόνος, ο οποίος αντιστοιχεί στο σενάριο όπου τουλάχιστον ένα σημείο της μηχανής φτάνει στο θερμικό του όριο. Μια γραφική αναπαράσταση αυτής της ανάλυσης παρουσιάζεται στο σχήμα 10.8. Το διάγραμμα παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τον μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο λειτουργίας και βοηθά στον καθορισμό κατάλληλων ορίων θερμοκρασίας για ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία της μηχανής. Η παρούσα ανάλυση επικεντρώνεται αποκλειστικά στο σενάριο όπου ο κινητήρας ξεκινά με αρχική θερμοκρασία 20°C και αμέσως λειτουργεί υπό μια συγκεκριμένη κατάσταση, η οποία χαρακτηρίζεται από ροπή και ταχύτητα.



Σχ. 10.8 Διάγραμμα Χρόνου έως το Θερμικό Όριο για τον Κινητήρα Α. Η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού είναι στους 20°C με συνολική ροή 10 Lpm, ενώ το λάδι ρέει μόνο στους ψυκτικούς διαύλους του στάτορα.

10.11 Επίδραση Στρατηγικών Ψύξης στην Ικανότητα Ισχύος

Με σκοπό να εξεταστεί η ενίσχυση της ισχύος που προκύπτει από την ανάλυση θερμικών φαινομένων, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές στρατηγικές ψύξης. Η πρώτη στρατηγική επικεντρώνεται στην ψύξη μόνο μέσω των καναλιών του στάτη. Η δεύτερη στρατηγική περιλαμβάνει την ψύξη τόσο του στάτη όσο και του άξονα του δρομέα. Τέλος, η τρίτη στρατηγική ενσωματώνει και την άμεση ψύξη των μαγνητών μέσα στον δρομέα.

Οι Πίνακες 3 και 4 παρέχουν σαφείς ενδείξεις ότι η αύξηση της πυκνότητας ισχύος και ροπής πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω της ακριβούς συνδυασμένης στρατηγικής υψηλών ταχυτήτων και κατάλληλης στρατηγικής ψύξης. Σε περιπτώσεις που εμπλέκονται κινητήρες υψηλών ταχυτήτων, η υιοθέτηση μιας στρατηγικής ψύξης περιορισμένης στον στάτη μόνο μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνεχούς ροπής και συνεπώς της πυκνότητας ισχύος, με μείωση της πυκνότητας ισχύος μέχρι -27,2%. Αυτή η μείωση συμβαίνει επειδή ο δρομέα πλησιάζει εύκολα τα θερμικά του όρια.

Στους ίδιους πίνακες προκύπτει μια ακόμη σημαντική παρατήρηση: η αποτελεσματικότητα των στρατηγικών ψύξης του δρομέα γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται η μέγιστη ταχύτητα του κινητήρα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του Κινητήρα Α (Μ.Α.) με μέγιστη ταχύτητα 20kRPM, η εισαγωγή ψύξης του δρομέα συμβάλλει σε αύξηση της συνεχούς πυκνότητας ισχύος κατά 6,6%. Αντίθετα, στον Κινητήρα Β (Μ.Β.), όπου η μέγιστη ταχύτητα φτάνει τα 22kRPM, η αύξηση της συνεχούς πυκνότητας ισχύος με την ψύξη του δρομέα φτάνει το +10,3%.

Continuous Power Density [kW/L]						
Cooling Type		Stator Cooling		Stator & Rotor Cooling		Stator & Rotor & Magnet Cooling
Motor	M.A.	14.81	(reference)	21.36	+44.2 %	22.08 +49.1 %
	M.B.	14.19	-4.2 %	20.73	+40.0 %	24.06 +62.5 %
	M.C.	10.68	-27.2 %	20.98	+41.7 %	25.51 +72.2 %

Πίν. 10.3 Ικανότητα μέγιστης συνεχούς ισχύος

Continuous Torque Density [Nm/L]						
Cooling Type		Stator Cooling		Stator & Rotor Cooling		Stator & Rotor & Magnet Cooling
Motor	M.A.	21.42	(reference)	32.14	+50.0 %	34.28 +60.0 %
	M.B.	20.53	-4.1 %	24.57	+14.6 %	32.16 +50.1 %
	M.C.	15.67	-26.8 %	21.42	0.0 %	32.47 +51.6 %

Πίν. 10.4 Ικανότητα μέγιστης συνεχούς ροπής

10.12 Αποτελέσματα Κεφαλαίου

Η μηχανική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε δρομέα Κινητήρα Εσωτερικών Μόνιμων Μαγνητών (IPM) έχει ιδιαίτερη σημασία. Ο κύριος σκοπός της είναι να αξιολογήσει τις ελάχιστες διαστάσεις των πλευρών (ribs) και των γεφυρών (bridges), εξασφαλίζοντας παράλληλα τη μηχανική ακεραιότητα του δρομέα. Το πάχος αυτών των χαρακτηριστικών έχει σημαντική επίδραση στη ροή σκέδασης του μόνιμου μαγνήτη. Αυτό, με τη σειρά του, δημιουργεί μια αντιστάθμιση μεταξύ της ικανότητας του κινητήρα να αποδώσει μέγιστη ροπή και υψηλή ισχύ σε υψηλές ταχύτητες. Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα καθορίζει τη σχέση μετάδοσης που είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική ενσωμάτωση ενός κινητήρα με αυξημένη πυκνότητα ισχύος, στην ηλεκτροκίνηση.

Η χωρική κατανομή των απωλειών σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα επηρεάζει σημαντικά το θερμικό προφίλ της μηχανής και την ικανότητά της να λειτουργεί συνεχώς κάτω από τα θερμικά όρια. Έτσι, το σύστημα ψύξης αποκτά ουσιαστικό ρόλο στη συνολική σχεδίαση. Το κατάλληλο σύστημα ψύξης επιτυγχάνει σωστή θερμική διαχείριση, διατηρώντας χαμηλό θερμικό προφίλ σε προσδιορισμένη κατανομή απωλειών. Αυτό, με τη σειρά του, παρέχει ευχέρεια στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση και δυνατότητες σχεδίασης μηχανών με υψηλότερες ηλεκτρικές φορτίσεις, διότι το σύστημα ψύξης μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά το αντίστοιχο θερμικό φορτίο.

Κυρίαρχο αποτέλεσμα, θεωρείται η δυνατότητα ενίσχυσης της πυκνότητας ροπής και ισχύος για τις μηχανές ηλεκτρικών οχημάτων, μέσω παράλληλης αξιολόγησης των ηλεκτρομαγνητικών, μηχανικών και θερμικών φαινομένων. Ο προσδιορισμός του κατάλληλου συστήματος ψύξης περιλαμβάνει επαναληπτικές διαδικασίες όπου οι παράμετροι σχεδίασης αξιολογούνται σε συνδυασμό με την ηλεκτρομαγνητική λύση. Παράγοντες όπως, ο αριθμός και η τοποθέτηση των αυλακώσεων ψύξης του στάτη και του δρομέα, ο τύπος και η παροχή του ψυκτικού υγρού, η ψύξη με ψεκασμό και άλλες επιλογές μπορούν να βελτιστοποιηθούν για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης.

10.13 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Το κεφάλαιο αυτό αναδεικνύει και καταδεικνύει την αξία ενσωμάτωσης της ανάλυσης πολλαπλών φυσικών στρωμάτων και των αντίστοιχων περιορισμών στη διαδικασία σχεδιασμού ενός κινητήρα Ηλεκτρικού Οχήματος (EV). Η ηλεκτρομαγνητική επίδοση και απόδοση, η μηχανική ακεραιότητα και η θερμική διαχείριση συνδέονται άρρηκτα και χρειάζεται να αντιμετωπίζονται ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, η διαδικασία σχεδιασμού γίνεται πιο αποδοτική και αποτελεσματική, επιτρέποντας συνολική αξιολόγηση των διαφόρων παραμέτρων σχεδίασης σε ένα ενοποιημένο πλαίσιο. Μέσω της εφαρμογής της μεθοδολογίας – που συζητήθηκε –, η δυνατότητα μέγιστης πυκνότητας ισχύος του κινητήρα για την εξεταζόμενη εφαρμογή ενισχύεται σημαντικά, με αύξηση 7,45%. Παρομοίως, η συνεχής πυκνότητα ισχύος παρουσιάζει σημαντική αύξηση 72,2%.

10.14 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [10.1] A. Mahmoudi, W. L. Soong, G. Pellegrino and E. Armando, "Loss Function Modeling of Efficiency Maps of Electrical Machines", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 5, pp. 4221-4231, Sept.-Oct. 2017.
- [10.2] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi and B. Boazzo, "Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, pp. 803-811, Feb. 2012
- [10.3] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcová, Design of Rotating Electrical Machines. Great Britain: John Wiley & Sons, 2008.
- [10.4] J. Zhao et al., "Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor," in IEEE Access, vol. 8, pp. 151856- 151865, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3017679.
- [10.5] Sikanen, Eerik & Nerg, Janne & Heikkinen, Janne & Gerami Tehrani, Mohammad & Sopanen, Jussi. (2018). Fatigue Life Calculation Procedure for the Rotor of an Embedded Magnet Traction Motor Taking into Account Thermomechanical Loads. Mechanical Systems and Signal Processing. 111. 36-46. 10.1016/j.ymssp.2018.03.055.
- [10.6] Sakkas, George & Kladas, Antonios (2022). Rotor deformation impact on operating characteristics of IPM Motor under High-Speed conditions. 8- 13. 10.1109/ICEM51905.2022.9910878.
- [10.7] Y. Tang, S. Sun, W. Yu, and W. Hua, "Thermal Analysis of WaterCooling Permanent Magnet Synchronous Machine for Port Traction Electric Vehicle," Electronics, vol. 12, no. 3, p. 734, Feb. 2023, doi: 10.3390/electronics12030734.
- [10.8] W. Xiao et al., "A Novel Thermal Analysis Method Based on a MultiPhysics Two-Way Coupled Method and Its Application to Submersible Permanent Magnet Synchronous Motors," Electronics, vol. 12, no. 5, p. 1155, Feb. 2023, doi: 10.3390/electronics12051155.
- [10.9] K. Rönnerberg and M. E. Beniakar, "Thermal Modelling of Totally Enclosed Fan Cooled motors," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018, pp. 2619-2625, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506824.
- [10.10] Sarigiannidis, Athanasios & Beniakar, Minos & Kakosimos, Panagiotis & Kladas, Antonios (2016). Performance Evaluation and Thermal Analysis of Interior Permanent Magnet Traction Motor over a Wide Load Range. 10.1109/ICELMACH.2016.773289.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΗΜΕΙΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ,

11.1 Κύρια Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο συγκεντρώνονται, αναλύονται και σχολιάζονται τα βασικότερα συμπεράσματα της παρούσης διατριβής καθώς και οι επιμέρους συνιστώσες της διεξαχθείσας έρευνας μαζί με τα κυριότερα αποτελέσματα αυτής.

Επιπλέον, παρουσιάζονται τα σημεία προαγωγής της επιστήμης, στον τομέα της ανάπτυξης υπολογιστικών εργαλείων, με στόχο την ανάλυση της απομαγνήτισης, των απωλειών των μόνιμων μαγνητών, των επιπτώσεων των μηχανικών καταπονήσεων στα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των υλικών για την αποτίμηση της συνολικής συμπεριφοράς του κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες.

Στην παρούσα διατριβή επιχειρήθηκε η ανάπτυξη αλγορίθμων υπολογισμού απομαγνήτισης και μελέτη της επίπτωσης της μεταβολής μαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών στις ηλεκτρικές μηχανές από σφάλματα, με κύρια στόχευση τη σχεδίαση εύρωστης μηχανής. Επιπλέον, παρουσιάστηκε μοντελοποίηση και μέτρηση των ιδιοτήτων των υλικών και των τεχνικών υπολογισμού απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε εφαρμογή της δυνατότητας θωράκισής των απωλειών δινορευμάτων με κατάλληλες επιστρώσεις ηλεκτρικών ή και μαγνητικών υλικών στους μόνιμους μαγνήτες. Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η μεταβολή των χαρακτηριστικών των μηχανών μόνιμων μαγνητών εξαιτίας της παραμόρφωσης των μαγνητικών υλικών σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας.

Τέλος, διεξήχθη πειραματική επιβεβαίωση των προσομοιωμένων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων που αναλuthήκαν στην διατριβή, μέσω ιδιοκατασκευασμένων δοκιμίων, πρότυπων κινητήρων ή διατάξεων μέτρησης C- Core , τα οποία κατέδειξαν την ακρίβεια των προτεινόμενων τεχνικών υπολογισμού των απωλειών.

Πιο συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν κατάλληλα μοντέλα για τη διερεύνηση των παρακάτω φαινομένων και καταστάσεων λειτουργίας ηλεκτρικών μηχανών μόνιμων μαγνητών:

11.1.1 Δημιουργία Ψηφιακού Δίδυμου Ηλεκτρικών Μηχανών

Η δημιουργία ψηφιακού δίδυμου για μηχανές μόνιμου μαγνήτη που υπολογίζονται με βάση τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέπει την αποτελεσματική εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος.

Η μέθοδος αυτή, μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε ψηφιακούς ελεγκτές επειδή βασίζεται σε δυναμικά μοντέλα που περιλαμβάνουν μεταβλητές συγκεντρωμένες παραμέτρους, χρησιμοποιώντας κατάλληλους πίνακες αναζήτησης.

Η προτεινόμενη τεχνική έχει επιβεβαιωθεί με μετρήσεις και παρέχει σημαντική μείωση των απωλειών και μείωση του κυματισμού της ροπής. Επιπλέον, ενισχύει την ευστάθεια των βρόχων ελέγχου ρεύματος, επειδή μειώνει τις ταλαντώσεις που εισάγονται μέσω της ανάδρασης – μέτρησης μη ημιτονικών ρευμάτων.

Η ανάλυση κινητήρα με το προτεινόμενο δυναμικό κύκλωμα του ψηφιακού δίδυμου οδηγεί στην δημιουργία κατάλληλων χαρτών οδήγησης με στόχο την βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα συνυπολογίζοντας τις απώλειες σιδήρου και των μόνιμων μαγνητών αλλά και τους περιορισμούς τάσης και ρεύματος του αντιστροφέα.

11.1.2 Απομαγνήτιση Μονίμων Μαγνητών

Εξετάστηκαν και αναλύθηκαν οι διαφορές στην εκτίμηση της απομαγνήτισης που δημιουργεί η συνάρτηση περιγραφής της καμπύλης BH στα σκληρά μαγνητικά υλικά καθώς και ο τρόπος συνυπολογισμού της προγενέστερης κατάστασης μαγνήτισης του εκάστοτε σημείου του μόνιμου μαγνήτη.

Η μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε, δίνει τη δυνατότητα εύκολης και γρήγορης εκτίμησης της απομαγνήτισης σε οποιαδήποτε διαμόρφωση μηχανής εσωτερικών μόνιμων μαγνητών καθώς και κάθε είδους τυλίγματος και γεωμετρίας στάτη.

Η απομαγνήτιση μεταβάλλεται έντονα με την αύξηση της θερμοκρασίας και καθοριστικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζουν οι συντελεστές θερμοκρασίας του J_H των μαγνητών. Δευτερεύον αλλά όχι αμελητέο ρόλο στην απομαγνήτιση έχει η γωνία των ρευμάτων του στάτη, επειδή η μέγιστη απομαγνήτιση δεν παρατηρείται για όλους τους μαγνήτες στις 180° μοίρες.

Σημαντική συνεισφορά στην αύξηση αντοχής σε συνθήκες απομαγνήτισης δίνει το πάχος των μαγνητών, αφού όσο αυξάνεται αυτό, τόσο πιο πολύ αντιστέκονται οι μαγνήτες στην απομαγνήτιση.

Ο σχεδιασμός κατάλληλων φραγμάτων ροής στα άκρα των μαγνητών είναι απαραίτητος για την αύξηση της αντοχής στην απομαγνήτιση, μέσω της μείωσης του πεδίου B κοντά στο μαγνήτη.

Η γεωμετρία του δρομέα και ο κορεσμός του πυρήνα του δίνουν την ικανότητα στο σχεδιαστή για την δημιουργία ομοιόμορφης κατανομής της απομαγνήτισης μεταξύ των διαφορετικών μαγνητών.

Ανάλογα με την εφαρμογή, τα πλεονεκτικά υλικά μόνιμων μαγνητών που ενδείκνυνται για τα μαγνητικά κυκλώματα των ηλεκτρικών μηχανών είναι βασισμένα σε κράματα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου και κράματα Σαμαρίου-Κοβαλτίου. Τα κράματα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου παρουσιάζουν υψηλότερη μαγνήτιση κορεσμού αλλά σημαντικότερη μείωσή αυτής, με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα κράματα Σαμαρίου-Κοβαλτίου εμφανίζουν ελαφρώς μικρότερη μαγνήτιση κορεσμού αλλά πιο περιορισμένη μείωσή αυτής με την αύξηση της θερμοκρασίας.

11.1.3 Αρμονικές Απώλειες Μονίμων Μαγνητών

Οι απώλειες στους μόνιμους μαγνήτες οφείλονται στο μεγαλύτερο μέρος τους στο φαινόμενο δινορευμάτων λόγω των υψηλών συχνοτήτων που προκαλούνται σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής των δρομέων και από τις ανώτερες αρμονικές συχνότητες που εισάγουν οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος που τροφοδοτούν τις ηλεκτρικές μηχανές.

Η ορθή ανάλυση των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους απαιτεί την ταυτόχρονη αναπαράσταση των μόνιμων μαγνητών και των σιδηρομαγνητικών λαμαρίνων των μαγνητικών κυκλωμάτων που τους περιβάλλουν αλλά και τη συνδυασμένη θεώρηση των εμπλεκόμενων ηλεκτρομαγνητικών, θερμικών και μηχανικών φαινομένων, και μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλες τεχνικές ασθενούς σύζευξης σε μοντέλα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η τεχνική αναπαράσταση των μόνιμων μαγνητών με χρήση συζευγμένης επίλυσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε γεωμετρία δύο διαστάσεων με εξισώσεις ισοδυναμίου κυκλώματος για τη θεώρηση των φαινομένων άκρων που αναπτύχθηκε επιτρέπει την αποδοτική ανάπτυξη μοντέλων για τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας των ηλεκτρικών μηχανών, όπως επιβεβαιώθηκε πειραματικά σε πρότυπα μαγνητικά κυκλώματα.

Η μεθοδολογία σύζευξης των πεπερασμένων στοιχείων και κυκλωμάτων επιτρέπει την αποτελεσματική εξέταση των απωλειών των μαγνητών αφενός την περίπτωση του παλμικού αφετέρου και στην περίπτωση του στρεφόμενου πεδίου. Οι απώλειες που εκτιμήθηκαν σχετίζονται με τις αρμονικές αυλάκων στάτη καθώς και με τη διακοπτική συχνότητα των μετατροπών ισχύος που τροφοδοτούν ηλεκτρικές μηχανές σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας

11.1.4 Τεχνικές Θωράκισης Μονίμων Μαγνητών

Οι τεχνικές που εισάγονται, επιτυγχάνουν επαρκή μοντελοποίηση των απωλειών υψηλής συχνότητας, όπως επικυρώθηκε από μετρήσεις σε πρωτότυπο μαγνητικό κύκλωμα και εξασφαλίζουν την ευρωστία του σχεδιασμού, η οποία είναι μείζονος σημασίας σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων. Αυτές οι υβριδικές αριθμητικές μεθοδολογίες μπορούν να προσφέρουν σημαντικές υπηρεσίες για την αναπαράσταση των εμπλεκόμενων φαινομένων υψηλής συχνότητας, επιτρέποντας αποτελεσματικό σχεδιασμό και μοντελοποίηση σε αυτήν την κατηγορία εφαρμογών.

Στους μόνιμους μαγνήτες η αποτελεσματικότητα θωράκισης, η επίστροφή NiCuNi πλάτους 5 μm μειώνει τις απώλειες των δινορευμάτων περίπου κατά 10% σχεδόν σε όλο το μήκος του φάσματος συχνοτήτων, ενώ το έλασμα υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας πλάτους 0,2 mm έχει παρόμοιο αντίκτυπο στις απώλειες σε χαμηλές συχνότητες και είναι πιο αποτελεσματικό σε υψηλότερες περιοχές συχνοτήτων.

Η αποτελεσματικότητα της αγωγίμης θωράκισης από φύλλα αλουμινίου ποικίλλει σε σχέση με το πλάτος και το εύρος συχνοτήτων λόγω της διακύμανσης του επιδερμικού φαινομένου. Ειδικότερα, επιδεινώνει τις απώλειες σε χαμηλές συχνότητες, ενώ σε υψηλότερες περιοχές συχνοτήτων είναι πιο αποτελεσματικό από τις υπόλοιπες τεχνικές θωράκισης που εξετάζονται, απαιτώντας ωστόσο σημαντικά πλάτη φύλλου, τα οποία μπορεί να είναι ασύμβατα με το σχεδιασμένο πλάτος διακένου της ηλεκτρικής μηχανής.

11.1.5 Μηχανές Υψηλής Ταχύτητας

Οι μόνιμοι μαγνήτες εμφανίζουν μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά όταν λειτουργούν στα μαγνητικά κυκλώματα των ηλεκτρικών μηχανών καθώς επηρεάζονται από τις μεταβολές θερμοκρασίας κατά κύριο λόγο αλλά και από τις μηχανικές καταπονήσεις που υφίστανται.

Αξιολογήθηκε, η επίδραση της μηχανικής τάσης στον ηλεκτρικό χάλυβα μέσω πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε κατάλληλη συσκευή SST.

Ο συνδυασμός παράγοντας που χρησιμοποιείται μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών και μηχανικών μοντέλων είναι η κατανομή της υδροστατικής πίεσης. Αυτή η παράμετρος διευκολύνει την απεικόνιση των διακριτών συμπεριφορών του ηλεκτρικού χάλυβα υπό εφελκυστικές και θλιπτικές μηχανικές τάσεις στο πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης και οδηγεί στα τελικά αποτελέσματα.

Η παραμόρφωση του δρομέα σε περιοχές υψηλών ταχυτήτων είναι σημαντικής σημασίας και λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού, προκειμένου να αποφευχθεί η παραβίαση των μέγιστων επιτρεπόμενων μηχανικών καταπονήσεων που κινδυνεύουν να θέσουν σε κίνδυνο την αξιοπιστία του κινητήρα.

Παρατηρείται, πώς η ασθενής σύζευξη των αλληλεξαρτώμενων μηχανικών και ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων επιτρέπει την εξέταση της επίδρασης της παραμόρφωσης του δρομέα στα χαρακτηριστικά ενός κινητήρα εσωτερικών μόνιμων μαγνητών όταν αυτός λειτουργεί σε περιοχές υψηλών ταχυτήτων, με χρήση χαμηλών υπολογιστικών απαιτήσεων. Η μεθοδολογία αυτή, μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε διαδικασίες σχεδιασμού κινητήρα και να προσφέρει εξαιρετικές υπηρεσίες σε αυτήν την κατηγορία εφαρμογών.

Η εγκυρότητα της προτεινόμενης προσέγγισης έχει επιβεβαιωθεί μέσω πειραμάτων, και πιο συγκεκριμένα με βάση την ανάλυση της κυματομορφής της πεπλεγμένης ροής υπό συνθήκες χωρίς φορτίο. Αυτή η επιβεβαίωση επιτυγχάνεται με την παρατήρηση συγκρίσιμης συμπεριφοράς μεταξύ των προσομοιωμένων και των πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά τις αρμονικές ροής σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων. Ο συνυπολογισμός της παραμόρφωσης του δρομέα στις απώλειες κενού φορτίου βελτιώνει την ακρίβεια της μοντελοποίησης κατά 2%.

11.1.6 Δυνατότητες Επαύξησης της Πυκνότητας Ισχύος με Ανάλυση Multi-Physics

Η μηχανική ανάλυση εξασφαλίζει τη μηχανική ακεραιότητα του δρομέα, προσδιορίζοντας τις ελάχιστες διαστάσεις των πλευρών και γεφυρών, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τη ροή σκέδασης των μόνιμων μαγνητών με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της ροπής και της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες.

Το σύστημα ψύξης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη θερμική διαχείριση του κινητήρα, επιτρέποντας την αύξηση της ηλεκτρικής φόρτισης και, κατά συνέπεια, την ενίσχυση της πυκνότητας ροπής και ισχύος.

Σε περιπτώσεις κινητήρων υψηλών ταχυτήτων, η εφαρμογή στρατηγικής ψύξης που περιορίζεται μόνο στον στάτη μπορεί να προκαλέσει μείωση της συνεχούς ροπής και, συνεπώς, της πυκνότητας ισχύος, με πτώση της πυκνότητας ισχύος έως και -27,2%. Αυτή η μείωση συμβαίνει επειδή ο δρομέας φτάνει εύκολα στα θερμικά του όρια.

Η αποτελεσματικότητα της ψύξης του δρομέα αυξάνεται όσο αυξάνεται η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Σε κινητήρα με μέγιστη ταχύτητα 20kRPM, η ψύξη του δρομέα οδηγεί σε αύξηση της συνεχούς πυκνότητας ισχύος κατά 6,6%, ενώ αντίστοιχα σε κινητήρα με μέγιστη ταχύτητα 22kRPM η αύξηση φτάνει το 10,3%. Αυτό καταδεικνύει ότι σε κινητήρες με υψηλότερες ταχύτητες, η ψύξη του δρομέα έχει ακόμα μεγαλύτερη συμβολή στη βελτίωση της πυκνότητας ροπής και ισχύος.

Η ολοκληρωμένη ανάλυση πολλαπλών φυσικών φαινομένων (ηλεκτρομαγνητική, μηχανική, θερμική) οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της πυκνότητας ισχύος του κινητήρα, με αύξηση της μέγιστης πυκνότητας κατά 7,45% και της συνεχούς πυκνότητας κατά 72,2%.

11.2 Συνεισφορά στην Επιστήμη

Τα κυριότερα σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της διατριβής είναι τα ακόλουθα:

- 1) Ανάπτυξη μεθοδολογίας κατασκευής ηλεκτρομαγνητικού ψηφιακού δίδυμου, αποδοτικού σε υπολογιστικά μέσα για την κατάλληλη μοντελοποίηση των μηχανών επιφανειακών μαγνητών, επιτρέποντας την απομείωση των αρμονικών ρεύματος.
- 2) Ανάλυση μεθόδων υπολογισμού της απομαγνήτισης με χρήση κατάλληλων καμπυλών επαναμαγνήτισης και ανάδειξη των κυρίαρχων φαινομένων που συνδράμουν στην απομαγνήτιση, με στόχο την σχεδίαση εύρωστου σε σφάλματα κινητήρα εσωτερικών μονίμων μαγνητών.
- 3) Μοντελοποίηση των δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες συνυπολογίζοντας τα φαινόμενα των τερματικών περιοχών, διαμέσω τεχνικής σύζευξης δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων και κυκλωμάτων με χρήση κατάλληλης θεώρησης συγκεντρωμένων παραμέτρων κυκλώματος.
- 4) Πειραματική επιβεβαίωση των υπολογισμών των εισαγμένων μοντέλων σε πρότυπα μαγνητικά κυκλώματα τύπου C-Core, και η κατάλληλη διαμόρφωση – τροποποίηση των διατάξεων, με στόχο την μέτρηση των δινορευμάτων σε κατάσταση στροφικού ή παλμικού πεδίου.
- 5) Μελέτη ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης στους μόνιμους μαγνήτες μέσω επιταξιακής τοποθέτησης στην επιφάνεια των μαγνητών κατάλληλων μικροστρωμάτων με κόκκους σιδηρομαγνητικών, αγωγίμων και υψηλής διαπερατότητας για την συνολική μείωση των απωλειών, ενισχύοντας την ικανότητα αντοχής στην απομαγνήτιση σε ταχεία σφάλματα βραχυκύκλωσης.
- 6) Ανάλυση της επίπτωσης των υψηλών ταχυτήτων, μέσω συνυπολογισμού της παραμόρφωσης διακένου και της τροποποίησης των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών εξαιτίας μηχανικών τάσεων σε κινητήρα εσωτερικών μονίμων μαγνητών. Επίσης

παρουσιάστηκε μία κατάστροφη κατάλληλου πειράματος μέτρησης της ροής κενού φορτίου για την επιβεβαίωση της μοντελοποίησης αυτής.

- 7) Κατασκευή και μέτρηση πρότυπων κινητήρων με στόχο την επαλήθευση των θεωρητικών υπολογισμών για την ανάδειξη νέων στόχων μελέτης.
- 8) Επίδειξη της κρίσιμης αξίας ενσωμάτωσης πολυφυσικής ανάλυσης — περιλαμβάνοντας τη ηλεκτρομαγνητική απόδοση και επίδοση, τη μηχανική ακεραιότητα και θερμική διαχείριση — στον σχεδιασμό κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση ενισχύει όχι μόνο την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού αλλά και επιτρέπει σημαντικές βελτιώσεις στην πυκνότητα ισχύος και την αξιοπιστία λειτουργίας.
- 9) Η αποτελεσματική διαχείρισης των θερμικών ορίων με στοχευμένες στρατηγικές ψύξης, ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλών ταχυτήτων, συμβάλλει στην ανάπτυξη πιο ισχυρών, αποδοτικών και βιώσιμων κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων.

11.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση

Τα κυριότερα σημεία, τα οποία αναδείχθηκαν ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης είναι :

- 1) Επέκταση της πειραματικής επιβεβαίωσης της μαγνητικής θωράκισης των μαγνητών Νεοδυμίου με φύλλο υψηλής διαπερατότητας και υψηλού μαγνητικού κορεσμού σε γεωμετρίες κινητήρων εσωτερικών μονίμων μαγνητών.
- 2) Διερεύνηση εναλλακτικών υλικών ψύξης (π.χ. συνθετικών ελαίων) με χαμηλό σημείο αλλαγής φάσης (εξάτμισης) ή/και της μεθόδου εφαρμογής (π.χ. ψεκασμός) με στόχο την ενίσχυση της ικανότητας υπερφόρτισης στους ηλεκτρικούς κινητήρες.

ΛΕΞΙΚΟ - ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

Άμεση ψύξη μαγνητών (Direct Magnet Cooling)	Σύστημα που χρησιμοποιεί ψυκτικό υγρό σε άμεση επαφή με τους μαγνήτες του δρομέα.
Ανάλυση ρευστοδυναμικής με χρήση H/Y (CFD: Computational Fluid Dynamics)	Μέθοδος υπολογιστικής ανάλυσης για την μελέτη της ροής των ρευστών και των θερμικών φαινομένων γύρω από και εντός μηχανικών συστημάτων, όπως κινητήρες και άλλες συσκευές.
Αντί ηλεκτρεγερτική δύναμη (Back Electromotive Force)	Είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη (τάση) που αναπτύσσεται στο τύλιγμα μιας ηλεκτρικής μηχανής εξαιτίας της μεταβολής πεδίου που προκαλείται από τη περιστροφή του δρομέα ή/και τη μεταβολή των ρευμάτων του στάτη.
Απώλειες πυρήνα (Core Losses)	Απώλειες ενέργειας οι οποίες συμβαίνουν στον πυρήνα ενός κινητήρα λόγω της συνεχούς αλλαγής του μαγνητικού πεδίου.
Ασθενής σύνδεση των φυσικών φαινομένων (Weak Physics Coupling)	Πρόκειται για την προσέγγιση κατά την οποία διάφορα φυσικά φαινόμενα (π.χ. ηλεκτρομαγνητισμός, θερμότητα, μηχανική) θεωρείται ότι συνδέονται μεταξύ τους, αλλά η αλληλεπίδρασή τους είναι σχετικά μικρή.
Γραμμικός κινητήρας (Linear Motor)	Κινητήρας που παρέχει ισχύ σε ευθύγραμμη κίνηση χρησιμοποιώντας μαγνητικές δυνάμεις.
Διάταξη δοκιμών μαγνητικής λαμαρίνας (SST: Single Sheet Tester)	Εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των ιδιοτήτων ενός υλικού σε επίπεδο φύλλου, όπως η μαγνητική αντίσταση και οι ειδικές απώλειες.
Δίκτυο θερμικών συγκεντρωμένων παραμέτρων (LPTM: Loomped Parameter Thermal Network)	Μοντέλο που χρησιμοποιεί συγκεντρωμένες παραμέτρους για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος, συνδυάζοντας θερμικές αντιστάσεις και χωρητικότητες.
Δινορεύματα (Eddy Currents)	Όταν ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο περνάει μέσα από ένα αγωγίσιμο υλικό, επάγονται ηλεκτρικά ρεύματα μέσα σε αυτό το υλικό. Αυτά τα ρεύματα συχνά κινούνται σε κυκλικές διαδρομές.
Έγχυση αρμονικών συνιστωσών τάσης (Harmonic Voltage Injection)	Τεχνική για τη μείωση αρμονικών συνιστωσών ρευμάτων μέσω της οδήγησης του αντιστροφέα, που δημιουργούνται εξαιτίας της μη γραμμικότητας.
Ελάσσων βρόχοι BH (Minor BH Loops)	Οι ελάσσονες βρόχοι BH εμφανίζονται όταν εφαρμόζεται ένα περιοδικό μαγνητικό πεδίο (H), αλλά η έντασή του δεν φτάνει στις ακραίες τιμές του πεδίου που προκαλεί κορεσμό του υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερους, κλειστούς βρόχους μέσα στην κύρια καμπύλη υστέρησης. Συχνά το μαγνητικό κύκλωμα είναι ήδη διεγερμένο σε μια DC κατάσταση μαγνήτισης.
Ενεργά ελίσματα (Effective Turns)	Ο συνολικός αριθμός στροφών των κλώνων τυλίγματος μίας φάσης.
Επιδερμικό φαινόμενο (Skin Effect)	Φαινόμενο όπου το ρεύμα σε έναν αγωγό περιορίζεται στην επιφάνειά του, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης σε υψηλές συχνότητες.
Έυρωστος Σχεδιασμός, Ευρωστία (Robust Design, Robustness)	Η δυνατότητα ή η σχεδίαση με στόχο να διατηρείται η ικανότητα λειτουργίας
Ηλ. μηχανές κίνησης (Traction E – Motors)	Κινητήρες που χρησιμοποιούνται για την κίνηση οχημάτων.
Ηλεκτρικό πεδίο (Electric Field)	Το πεδίο (ηλεκτρικό) που δημιουργείται γύρω από φορτισμένα σωματίδια.
Ηλεκτρομαγνητικός σχεδιασμός (Electromagnetic Design)	Σχεδίαση που αφορά τις μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του κινητήρα για την επίτευξη βέλτιστων χαρακτηριστικών.
Θερμική κατανομή (Thermal Distribution)	Η κατανομή της θερμότητας/θερμοκρασίας εντός ενός συστήματος (π.χ. κινητήρας)

Θερμοχωρητικότητα (Heat Capacity)	Η ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει θερμότητα.
Καμπύλες επαναφοράς μαγνήτισης (Recoil Curves)	Καμπύλες που δείχνουν την επιστροφή των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός υλικού μετά την αφαίρεση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.
Κινητήρες υψηλών ταχυτήτων (High Speed Motors)	Κινητήρες που έχουν σχεδιαστεί για να εύρωστα λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες.
Κλώνοι τυλίγματος (Winding Strands)	Ομάδα παράλληλα συνδεδεμένων αγωγών ή καλωδίων που περιτυλίγονται μαζί. Μία περιστροφή όλων των αγωγών αυτών, συνθέτει ένα ενεργό έλιγμα.
Κοπτικές φορτίσεις (Fatigue Stresses)	Δυνάμεις που προκαλούν φθορά σε ένα υλικό λόγω επαναλαμβανόμενων φορτίων και κυκλικών δυνάμεων.
Κυκλικές φορτίσεις (Cyclic Loads)	Φορτία που εφαρμόζονται περιοδικά σε ένα υλικό ή συστατικό, συνήθως σε σταθερές χρονικές περιόδους.
Μαγνητικά υλικά (Magnetic Materials)	Υλικά που χρησιμοποιούνται για τη ενίσχυση - δημιουργία μαγνητικών πεδίων στον κινητήρα, όπως οι μόνιμοι μαγνήτες ή ο ηλεκτρικός χάλυβας (πυρήνας).
Μαγνητική ένταση (Magnetic Intensity)	Παράμετρος που μετρά την ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τα ρεύματα.
Μαγνητική ροή (Magnetic Flux)	Ποσότητα του μαγνητικού πεδίου που διαπερνά μια επιφάνεια.
Μαγνητικό πεδίο (Magnetic Field)	Το πεδίο (μαγνητικό) που δημιουργείται από κινούμενα φορτία ή μαγνήτες.
Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (FDM: Finite Difference Method)	Μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης που χρησιμοποιεί την προσεγγιστική λύση διαφορικών εξισώσεων μέσω διακριτών διαφορών.
Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM: Finite Element Method)	Μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης που χρησιμοποιείται για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων με διακριτά πεδία και στοιχεία.
Μερικές διαφορικές εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών χρόνου (FDTD: Finite Differences Time Domain)	Μέθοδος για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων που χρησιμοποιεί διακριτές τιμές και βήματα στον χρόνο.
Μερική απομαγνήτιση (Partial Demagnetization)	Η διαδικασία μείωσης του μαγνητισμού ενός μόνιμου μαγνήτη λόγω εξωτερικών πεδίων ή μηχανικών φορτίων.
Μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτρικής μηχανής (Transient Behavior of Electric Motor)	Ανάλυση της συμπεριφοράς ενός κινητήρα κατά τη διάρκεια των πρώτων στιγμών μετά την ενεργοποίηση ή την αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας, όπως μεταβατικές καταστάσεις ρεύματος και τάσης.
Μονωτικά υλικά (Insulated Materials)	Υλικά που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική μόνωση στους ηλεκτρικούς κινητήρες, συνήθως ανάμεσα στο τύλιγμα και στα αυλάκια του στάτη.
Παραμόρφωση λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων (Deformation due to Centrifugal Forces)	Παραμόρφωση ενός αντικειμένου λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων που προκαλούνται από την περιστροφή του.
Πεδίο αντίδρασης των δινορευμάτων (Reaction Field due to Eddy Currents)	Το πεδίο αντίδρασης των δινορευμάτων αναφέρεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται ως αποτέλεσμα της ροής δινορευμάτων μέσα σε ένα αγώγιμο υλικό, όταν το υλικό αυτό εκτεθεί σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.
Πεδίο απομαγνήτισης (Demagnetizing Field)	Το πεδίο απομαγνήτισης είναι το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις ελεύθερες μαγνητικές πολώσεις (μαγνητικά φορτία) στην επιφάνεια ενός υλικού ή μαγνητικού σώματος. Το πεδίο αυτό τείνει να μειώσει ή να αντιστρέψει το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο στο ίδιο το υλικό, δρώντας αντίθετα προς την κύρια μαγνητική πόλωση.
Πυκνότητα ισχύος (Power Density)	Η ποσότητα μέγιστης ή συνεχούς ισχύος που παράγεται σε σχέση με το βάρος ή τον όγκο του κινητήρα.

Ρεύματα κυκλοφορίας (Circulating Currents)	Ηλεκτρικά ρεύματα που δημιουργούνται ακούσια μέσα σε ένα σύστημα περιελίξεων ηλεκτρικής μηχανής, εξαιτίας ασυμμετριών ή διαφορών στην τάση μεταξύ παράλληλων αγωγών ή περιελίξεων.
Σταθερό πλαίσιο DQ (DQ Frame)	Σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της δυναμικής ενός περιστρεφόμενου μηχανισμού, βασισμένο στους άξονες d (ευθεία) και q (κάθετη) για καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του κινητήρα.
Στρατηγική οδήγησης με βάση τη μέγιστη ικανότητα ρεύματος (MTPA: Maximum Torque Per Ampere)	Μέθοδος οδήγησης ηλεκτρικών κινητήρων με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών χαλκού, κατά την οποία επιτυγχάνεται η παραγωγή της μέγιστης δυνατής ροπής εξόδου για ένα δεδομένο μέγεθος ρεύματος εισόδου.
Στρατηγική οδήγησης με βάση τη μέγιστη ικανότητα τάσης (MTPV: Maximum Torque Per Volt)	Μέθοδος οδήγησης ηλεκτρικών κινητήρων με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών χαλκού, κατά την οποία επιτυγχάνεται η παραγωγή της μέγιστης δυνατής ροπής εξόδου για ένα δεδομένο μέγεθος τάσεως εισόδου.
Στρατηγική οδήγησης μέγιστης απόδοσης (Maximum Efficiency Drive Strategy)	Μέθοδος οδήγησης ηλεκτρικών κινητήρων με στόχο την ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών.
Στρατηγική προσανατολισμένου πεδίου (FOC: Field Oriented Control)	Έλεγχος – οδήγηση των ρευμάτων του κινητήρα με βάση τη θέση/ ταχύτητα του δρομέα.
Συγκεντρωμένη παράμετρος (Lumped Parameter)	Παράμετροι που περιγράφουν ολοκληρωτικά - κατανεμημένα (χωρικά) μεγέθη (π.χ. Αυτεπαγωγή, Αντίσταση, Ροή). Αποτελούν συχνά συντελεστές συναρτήσεων που περιγράφουν με απλοϊκό τρόπο πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα, χωρίς να απαιτείται απαιτητικό υπολογιστικό μοντέλο.
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Coefficient)	Παράμετρος που χαρακτηρίζει την απόδοση της μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα σε δύο σώματα (π.χ., σίδηρος, αέρας, λάδι) μέσω αγωγής, συναγωγής ή και ακτινοβολίας. Εκφράζει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται ανά μονάδα όγκου, ανά μονάδα χρόνου και θερμοκρασιακής διαφοράς.
Σύστημα μετάδοσης κίνησης (Gear Train)	Σύνολο γραναζιών που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση της κίνησης και της ροπής από μία πηγή ενέργειας σε μια έξοδο. Συνήθως, χρησιμοποιείται σε μηχανισμούς που απαιτούν αλλαγή της ταχύτητας, της κατεύθυνσης ή της ροπής
Συστήματα ελέγχου (Control Systems)	Συστήματα που ρυθμίζουν τη λειτουργία του κινητήρα, όπως το ρεύμα εισόδου, η ταχύτητα και η θέση του δρομέα.
Συστοιχία λαμινारीών (Lamination Stacking)	Διαδικασία τοποθέτησης πολλών στρωμάτων - φύλλων ηλεκτρικού χάλυβα κατάλληλης διαμόρφωσης για τη δημιουργία του μαγνητικού κυκλώματος (στάτη ή δρομέα) της ηλεκτρικής μηχανής.
Υδροστατική πίεση (Hydrostatic Pressure)	Η υδροστατική πίεση σε στερεά υλικά, με βάση τις ορθές τάσεις ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) σε τρεις διαστάσεις, μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των ορθών τάσεων που ασκούνται στον όγκο του υλικού, διαιρούμενο με το 3, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ισότιμη κατανομή των τάσεων σε όλες τις κατευθύνσεις (x, y, z)
Φαινόμενα ακραίων περιοχών (End region effects)	Επιπτώσεις στη ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του κινητήρα εξαιτίας των περιοχών στις άκρες του δρομέα και του στάτη.
Φαινόμενο εγγύτητας (Proximity Effect)	Αύξηση της αντίστασης ενός αγωγού όταν οι αγωγοί του βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας στον άλλο, επηρεάζοντας τη κατανομή της πυκνότητας ρεύματος.
Φαινόμενο της υστέρησης (Hysteresis Phenomenon)	Η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη μαγνητική ένταση, που εξαρτάται από την προηγούμενη κατάσταση του συστήματος.
Χρόνος έως το θερμικό όριο (Time to Thermal Limit of Electric Motors)	Χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη του θερμικού ορίου ενός κινητήρα, πέρα από το οποίο μπορεί να υπάρξουν βλάβες.

Ψηφιακό δίδυμο
(Digital Twin)

Ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος ή μηχανισμού, που χρησιμοποιείται για παρακολούθηση και ανάλυση της απόδοσής του σε πραγματικό χρόνο.

Ψύξη δρομέα
(Rotor Cooling)

Μέθοδος ψύξης που χρησιμοποιείται για να διατηρηθεί η θερμοκρασία του δρομέα εντός των αποδεκτών ορίων λειτουργίας, ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες.

Ψύξη ηλεκτρικών μηχανών
(Electric Motor Cooling)

Το σύστημα που χρησιμοποιείται για να διατηρηθεί η θερμοκρασία του κινητήρα σε ασφαλή επίπεδα και να αποφεύγονται υπερθέρμανση και βλάβες.

Ψύξη στάτη
(Stator Cooling)

Μέθοδος ψύξης που χρησιμοποιείται για να διατηρηθεί η θερμοκρασία του στάτη εντός των αποδεκτών ορίων λειτουργίας.

Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά μετά από κρίση

1. G. K. Sakkas, C. R. C. Vasilopoulos, K. G. Bourchas and A. G. Kladas, "Rotor deformation impact on operating characteristics of IPM Motor under High-Speed conditions," in IEEE Transactions on Industry Applications, doi: 10.1109/TIA.2024.3403975.
2. Vlachou, V.I.; Sakkas, G.K.; Xintaropoulos, F.P.; Pechlivanidou, M.S.C.; Kefalas, T.D.; Tsili, M.A.; Kladas, A.G. "Overview on Permanent Magnet Motor Trends and Developments," Energies 2024, 17, 538. <https://doi.org/10.3390/en17020538>
3. G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Coupled Field and Circuit Permanent Magnet Model for High-Speed Motor Analysis," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 60, no. 3, pp. 1-5, March 2024, Art no. 8200805, doi: 10.1109/TMAG.2023.3307683.
4. G. K. Sakkas, C. R. C. Vasilopoulos, K. G. Bourchas and A. G. Kladas, "Advanced Design of PWM Inverter Fed Permanent Magnet Motors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 59, no. 11, pp. 1-11, Nov. 2023, Art no. 8204711, doi: 10.1109/TMAG.2023.3295374.
5. G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Particular Model for Efficient Switching Frequency Loss Consideration in Surface Mounted Permanent Magnets," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 59, no. 5, pp. 1-5, May 2023, Art no. 7000505, doi: 10.1109/TMAG.2023.3236273.

Δημοσιεύσεις σε πρακτικά επιστημονικών συνεδρίων μετά από κρίση

1. A. V. Sideris, G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Efficiency improvement in Surface mounted PMSM by appropriate management of both fundamental and switching frequency Iron Losses," 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy.
2. S. Maiopoulos G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Efficiency improvement in PMSMs considering alternative Rotors for Elevator Applications," 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy.
3. A. V. Sideris, G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Efficient Digital Twin of SPM based on FEA enabling Drive Current Harmonics Elimination," 2024 IEEE 21th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2-5 June 2024, Jeju, Korea
4. G. K. Sakkas, P. G. Pouraimis, M. E. Beniakar, C. Th. Oreinos and I. S. Manolas, "Enhancing Power Density in EV Motors via Thermal Management and High-Speed Operation," 4th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE), 30-31 December 2023, Dubai, UAE. DOI: 10.1109/ICECCE61019.2023.10442106
5. G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Coupled Field and Circuit Permanent Magnet Model for High-Speed Motor Analysis," 2021 24rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields COMPUMAG 2023, Kyoto, Japan, May 22-26, 2023
6. G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Robust Design of Permanent Magnet Motors for Electric Traction Applications," 2023 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers (INTERMAG Short Papers), Sendai, Japan, 2023, pp. 1-2, doi: 10.1109/INTERMAGShortPapers58606.2023.10228414.
7. G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Particular Model for Efficient Switching Frequency Loss Consideration in Surface Mounted Permanent Magnets," 2022 IEEE 20th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), Denver, CO, USA, 2022, pp. 1-2, doi: 10.1109/CEFC55061.2022.9940696.
8. G. K. Sakkas and A. G. Kladas, "Rotor deformation impact on operating characteristics of IPM Motor under High-Speed conditions," 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 2022, pp. 8-13, doi: 10.1109/ICEM51905.2022.9910878.
9. G. Sakkas, A. Kladas, "Efficient Demagnetization Modeling in Radial Flux V-shaped Interior Permanent Magnet Motors," 2021 23rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields COMPUMAG 2021, 16-22 January, Cancun, Mexico.
10. G. Sakkas, A. Kladas, Design considerations for cost effective Radial Flux Interior Permanent Magnet Motors with Increased Demagnetization Robustness M2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis WEMDCD», 8-9 April 2021, Modena, Italy.

Πατέντες

1. A. Chaniotis, P. Pouraimis, G. Sakkas and I. Manolas, "Electric Motor with Mitigation of Electrically Induced Bearing Damage (EIBD)," Application No.: PCT/US2023/036485 (proposal stage)

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο κ. Γεώργιος Σακκάς έχει αποφοιτήσει από τη σχολή ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών του ΕΜΠ το 2020 με τίτλο διπλωματικής εργασίας «Βελτιστοποίηση γεωμετρίας για διαφορετικά υλικά μονίμων μαγνητών σε κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα» ενώ τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα κυμαίνονται στο χώρο της αλγοριθμικής σχεδίασης, μοντελοποίησης, και οδήγησης ηλεκτρικών μηχανών. Είναι μέλος του εργαστηρίου ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος από το 2020 κατέχοντας τη θέση υποψήφιου διδάκτορα με θέμα διδακτορική διατριβής «Συμβολή στη θεώρηση των απωλειών στις ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης». Η διδακτορική του διατριβή μελετά την μαθηματική μοντελοποίηση ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων όπως της απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών, τη δισδιάστατη μοντελοποίηση δινορευμάτων με χρήση αναλυτικών εξισώσεων στην τρίτη διάσταση, την ηλεκτρομαγνητική θωράκιση των μονίμων μαγνητών με στόχο την απομείωση των απωλειών, την μηχανική ελαστική παραμόρφωση δρομέα σε μηχανές υψηλών ταχυτήτων, την επίπτωση των μηχανικών πιέσεων και θερμικών καταπονήσεων στις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των μαγνητικών υλικών, καθώς και την υλοποίηση ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών χαμηλών στροφών με χρήση ψηφιακού διδύμου, στοχεύοντας στην εξάλειψη των αρμονικών ρεύματος. Κατά τη διάρκεια του διδακτορικού του έχει συμμετάσχει ως συγγραφέας ή συνσυγγραφέας σε 15 ερευνητικές δημοσιεύσεις (άρθρα) διεθνών συνεδρίων και περιοδικών. Έχει υπάρξει κριτής σε διεθνή περιοδικό το «IEEE Transactions of Industrial Electronics». Είναι μέλος του TEE και του IEEE. Εκτός της ερευνητικής του δραστηριότητας, συμμετείχε ενεργά στη διεξαγωγή πέντε (5) προπτυχιακών μαθημάτων της σχολής Ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών ονομαστικά «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)», «Ηλεκτρικές Μηχανές Ι», «Ηλεκτρικές Μηχανές ΙΙ», «Μεταβατική Κατάσταση Λειτουργίας Ηλεκτρικών Μηχανών», «Κατασκευή Ηλεκτρικών Μηχανών». Επιπλέον, συμμετείχε στην επίβλεψη για την εκπόνηση και περάτωση συνολικά έξι (6) διπλωματικών εργασιών. Ο κ. Γεώργιος Σακκάς έχει αποκτήσει εμπειρία σε έρευνα, σχεδίαση και μέτρηση ηλεκτρικών μηχανών συμμετέχοντας ο ίδιος σε ερευνητικά προγράμματα ΕΣΠΑ με τίτλο: «Βέλτιστος σχεδιασμός ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών για οχήματα μέσω της ολοκληρωμένης κατανόησης των ιδιοτήτων των ηλεκτρομαγνητικά ενεργών τμημάτων τους» (V.I.M.O) και κωδικό έργου T2EDK-0042 και «Επαύξηση της πυκνότητας ισχύος ηλεκτρικών μηχανών οχημάτων μέσω βέλτιστης θερμικής διαχείρισης και περιστροφής σε υψηλότερες μηχανικές ταχύτητες» (E.P.I.THE.P.Y.T) και κωδικό έργου T2EDK-02336. Παράλληλα, ο ίδιος, αποτέλεσε τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στο ΕΜΠ και στο ερευνητικό παράρτημα της Tesla, για την ολοκλήρωση του συνεργατικού προαναφερθέντος προγράμματος ΕΣΠΑ. Ο ίδιος εργάστηκε ως μηχανικός πλήρους απασχόλησης στην Tesla από τον 10^ο του 2020 έως τον 9^ο του 2021, και συνέχισε ως εξωτερικός συνεργάτης της Tesla έως και τον 5^ο του 2024. Πρωθύστερη εργασιακή εμπειρία, ο κ. Γεώργιος Σακκάς είχε αποκτήσει κατά τη διάρκεια της πρακτικής του άσκησης το 2018 στο «Project Kafireas -enel» με αντικείμενο την τοποθέτηση 67 ανεμογεννητριών διεσπαρμένες σε επτά αιολικά πάρκα, δημιουργώντας έτσι το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο στην Ελλάδα. Κατά τη διάρκεια της εργασίας του στο εν λόγω έργο, αποκόμισε την πρακτική εφαρμογή του Project Management. Τέλος, ο ΥΔ Σακκάς Γεώργιος υπήρξε ο κεντρικός συντονιστής (Team Manager) της ερευνητικής, φοιτητικής, εθελοντικής ομάδας «Προμηθέας» του εργαστηρίου ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος για τέσσερα συναπτά έτη. Όντας συντονιστής της ομάδας αυτής, η ομάδα κατέλαβε την 11η θέση στον παγκόσμιο διαγωνισμό Shell Eco Marathon στην κατηγορία Urban Concept το 2023, εκπροσωπώντας τόσο το εργαστήριο Ηλ. Μηχανών όσο και το ΕΜΠ στην πρότυπη ηλεκτροκίνηση.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ. 2.1 Μια ενδεικτική παρουσίαση μορφής ανάλυσης με τη μέθοδο του ισοδυνάμου μαγνητικού κυκλώματος για σύγχρονη μηχανή επιφανειακών μαγνητών. Η εικόνα εμπεριέχεται στη δημοσίευση [3.2.1].	27
Σχ. 2.2 Θεώρηση λειτουργίας μαγνήτη στο πρόγραμμα FEMM. Το σχέδιο εμπεριέχεται στον οδηγό χρήσης του προγράμματος που βρίσκεται στην σελίδα: "femm.info" (tinyurl.com/ygl7uol)	29
Σχ. 2.3 Απεικόνιση ισοδύναμου κυκλώματος στάτη σύγχρονης μηχανής.	34
Σχ. 2.4 Μετασχηματισμός Park στα τυλίγματα μιας Σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών. Στο σχήμα ο άξονας a είναι ο άξονας της 'διέγερσης', μετά τον Μετασχηματισμό Park μετατρέπεται σε άξονα d.	34
Σχ. 2.5 Απεικόνιση των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών με θεώρηση μικρών απωλειών πυρήνα.	35
Σχ. 2.6 Δομή διανυσματικού διαγράμματος σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών.	36
Σχ. 2.7 Εξάρτηση των L_d και L_q με τα ρεύματα i_d και i_q	37
Σχ. 2.8 Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς της μηχανής κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος τριών φάσεων στους ακροδέκτες της μηχανής, όταν αρχικά η μηχανή στρέφεται στις ονομαστικές στροφές με παράγοντας μέγιστη ροπή.	37
Σχ. 2.9 Ανάλυση ρευμάτων στο πλαίσιο d-q κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος τριών φάσεων στους ακροδέκτες της μηχανής, όταν αρχικά η γωνία ρευμάτων ήταν 90ο ηλ. μοίρες ($I_q=I_N$, $I_d=0$).	38
Σχ. 2.10 Αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης στην παραμορφωμένη γεωμετρία, υπό συνθήκες μέγιστης ταχύτητας (15kRPM) αντιπροσωπεύουν: (α) Κατανομή τάσης Von-Mises. (β) Κατανομή υδροστατικής τάσης.	41
Σχ. 2.11 Μηχανική ανάλυση μηχανής πριν και μετά τη δημιουργία νέων προσθέτων στηριγμάτων. Η εικόνα είναι μέρος της δημοσίευσης [2.7.1].	42
Σχ. 2.12 Ισοδύναμο θερμικό μοντέλο της αύλακας	44
Σχ. 2.13 Θερμική ανάλυση στην περιοχή του στάτη μηχανής. Στην πάνω εικόνα γίνεται μέσω των ισοδύναμων κυκλωμάτων (TLCM) ενώ κάτω μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Οι εικόνες αποτελούν μέρος παρουσίασης του συνεδρίου ICEM σε διάλεξη του κ. David Staton [2.8.1].	45
Σχ. 2.14 Heat Transfer Coefficients.	46
Σχ. 2.15 Ανάλυση ροής (CFD) του συστήματος ψύξης μιας ηλεκτρικής μηχανής. Η εικόνα αυτή βρέθηκε στην ιστοσελίδα: "siemens.com" (tinyurl.com/y4ug8pl8)	46
Σχ. 2.16 Θερμική ανάλυση μεταβατικής κατάστασης, αποτελεί το πρώτο στάδιο εκτίμησης της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα. (First Stage of Thermal Analysis)	47
Σχ. 2.17 Καμπύλες Μέγιστης και Συνεχούς ροπής για θερμοκρασία ψυκτικού 20C έως 100C.	48
Σχ. 2.18 Μέγιστη θερμοκρασία σημείων του κινητήρα κατά μήκος της καμπύλης συνεχούς ροπής - Θερμοκρασία ψυκτικού 20C.	48
Σχ. 2.19 Χρόνος λειτουργίας έως την υπέρβαση των θερμικών ορίων της μηχανής. (Time to thermal limit)	49
Σχ. 3.1 B-H καμπύλη δευτέρου τεταρτημόριου (α) καμπύλη απομαγνήτισης και (β) B•H συνάρτηση του H.	53
Σχ. 3.2 (α)Χαρακτηριστική απομαγνήτισης και γραμμή φορτίου. (β) Καμπύλες σταθερής ενέργειας στο δεύτερο τεταρτημόριο.	53
Σχ. 3.3 Χαρακτηριστικές απομαγνήτισης πυρροσυσσωματωμένων SmCo μαγνητών: (α) SmCo5 και (β) Sm2Co17. Οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν χαρακτηριστικές μομ•M.	56
Σχ. 3.4 Μη γραμμική σχέση μεταξύ αυθόρμητης μαγνήτισης και μαγνητικής επαγωγής με την θερμοκρασία.	57
Σχ. 3.5 Σύγκριση παραγόμενων καμπυλών της παραπάνω μεθοδολογίας σε σχέση με αυτές του κατασκευαστή. Στο άνω σχέδιο τα σημεία που είναι τονισμένα είναι τα όρια της γραμμικής περιοχής. Η κάτω εικόνα βρέθηκε στην σελίδα "arnoldmagnetics.com" (tinyurl.com/y5j2zbj6)	60
Σχ. 3.6 Ενδεικτική συμπεριφορά εξάρτησης της $jH_c \sim H_{90}$ με τη γωνία του εξωτερικού πεδίου σε σχέση με τον μαλακό άξονα του μαγνήτη. Η εικόνα αποτελεί μέρος της δημοσίευσης [3.1.26].	61
Σχ. 3.7 Διάταξη πειράματος διεξαγωγής εξάρτησης του JH_c με τη γωνία που σχηματίζει ο μαλακός άξονας του μαγνήτη με αυτή του εξωτερικού πεδίου. Η εικόνα αποτελεί μέρος της δημοσίευσης [3.1.26].	62
Σχ. 3.8 Χρονολογική εξέλιξη υλικών μονίμων μαγνητών	63
Σχ. 3.9 Τυπικός βρόχος μαγνήτισης για μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό. Στη δεξιά πλευρά σκιαγραφούνται οι δομές πεδίου μαγνήτισης που αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικές περιοχές του βρόχου υστέρησης, υποθέτοντας ότι υπάρχει μόνο ένα τοίχωμα πεδίου (domain wall).[3.2.1]	67
Σχ. 3.10 Μικροσκοπική δομή φερρομαγνητικού υλικού με και χωρίς προσανατολισμένους κόκκους. tinyurl.com/5n8p2395	69
Σχ. 3.11 Περιγραφή διαδικασίας διέγερσης με DC Bias[3.2.3]	71
Σχ. 3.12 Καμπύλη B-H, σχετική διαπερατότητα και απώλεια υπό διαφορετικό DC Bias σε 40°C [3.2.5]	71
Σχ. 3.13 Διαφοροποίηση ελάσσονων βρόχων υστέρησης για διαφορετικές τιμές προ υπάρχοντος πεδίου. [3.2.4]	72
Σχ. 3.14 Χαρακτηριστικά απώλειας κάτω από διαφορετικά ρεύματα πόλωσης. [3.2.6]	72
Σχ. 3.15 Σχηματική απεικόνιση του σχεδιασμού της λαμαρίνας με διάτρηση, υποδεικνύοντας το σχηματισμό γρέξιου κοντά στις διάτρητες άκρες. [3.2.9]	73
Σχ. 3.16 Περιοχές άκρης της κομμένης λαμαρίνας με τη μέθοδο της διάτρησης (Punching)[3.2.7]	74

Σχ. 3.17 Μέθοδοι συγκράτησης λαμαρινών: (α) Με συγκολλητική ρητίνη, επίστρωση πάνω απο τη λαμαρίνα. (β) Με μηχανισμό μανδάλωσης, μηχανική τοπική παραμόρφωση σε συγκεκριμένα σημεία. (c)Με συγκόλληση κατά μήκος της σύστασης του στάτη. https://tinyurl.com/ygtjh5z6	76
Σχ. 3.18 Αναπαράσταση της καμπύλης BH ως επιφάνεια για διάφορες μονοαξονικές πιέσεις. Οι γραμμές στο επίπεδο αναπαριστούν ισοσταθμικές καμπύλες διαπερατότητας σε σχέση με την μηχανική τάση και του H πεδίου [3.2.40]	79
Σχ. 3.19 Κατανομή Von Mises Stress στον στάτη ηλεκτρικής μηχανής υπό διαφορετικά φαινόμενα. (α)Σφικτή Συναρμογή (b) Μαγνητικές Πιέσεις (c) Μαγνητοσυστολή [3.2.32]	79
Σχ. 3.20 (a) The Epstein frame, (b) the single sheet tester and (c) A Ring core topology. [3.2.51]	80
Σχ. 3.21 Στάτης μηχανής με κατανεμημένα (αριστερά) και συγκεντρωμένα (δεξιά) τυλίγματα. Οι εικόνες	83
Σχ. 3.22 Επιδράσεις δέρματος και εγγύτητας στις σπείρες της αύλακας[3.3.1].....	84
Σχ. 3.23 Skin effect σε αγωγό διαμέτρου 2 mm. (α) 1 kHz. (β) 100 kHz. (γ) 1 MHz. [3.3.3].....	85
Σχ. 3.24 Proximity Effect στην αύλακα μιας μηχανής. (α) 1 kHz (β) 10 kHz. [3.3.3]	85
Σχ. 3.25 (α)εικόνα κατανεμημένου τυλίγματος με λεπτό σύρμα (Random Winding) (β) Μπροστά και πίσω εικόνα κατανεμημένου τυλίγματος με χρήση μπαρών (Bar Winding) [3.3.2].....	86
Σχ. 3.26 Διάφορες τεχνικές τοποθέτησης των παράλληλων και των εν σειρά ελιγμάτων εντός αύλακας μηχανής, Η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος αφορά την λειτουργία της μηχανής στις 12kRPM με μέγιστο φορτίο [3.3.4]	87
Σχ. 3.27 Ανάλυση ευαισθησίας απωλειών με βάση την απόσταση των μπαρών από την άκρη του δρομέα (α) οι δύο διαφορετικές τοποθετήσεις των μπαρών (β) Οι απώλειες ισχύος στην εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας για ονομαστικό ρεύμα. Οι Εικόνες βρέθηκαν στην δημοσίευση, ενώ παράλληλα έχουν τροποποιηθεί ελάχιστα.[3.3.2]	88
Σχ. 3.28 Κατανεμημένο τύλιγμα μπαρών με κλασματική αύλακα [3.3.5]	88
Σχ. 3.29 Τύλιγμα ΗΛ. Μηχανής με μη ισοπαχείς μπάρες και χρήση κοινής αύλακας από διαφορετικές φάσεις.[3.3.7].	89
Σχ. 3.30 Πρωτότυπη τεχνική συγκόλλησης χαλκού με βάση προ διαμορφωμένους δακτυλίους. (α) Τοποθέτηση των δακτυλίων (β) Laser Welding (γ) Ανάλυση κατανομής πυκνότητας ρεύματος[3.3.6]	89
Σχ. 3.31 Πηνία χυτού αλουμινίου για αποδοτικούς ηλεκτρικούς κινητήρες. https://tinyurl.com/4jmygrfv	90
Σχ. 3.32 Στάδια κατασκευής τυλίγματος στάτη από αλουμίνιο (α) Χύτευση μπαρών (β) Τοποθέτηση στον στάτη (γ) Συνολικό τύλιγμα μηχανής. https://tinyurl.com/yc6ubrd6	90
Σχ. 3.33 (α) Μοντελοποίηση Συστάδων παράλληλων κλάδων με μιγαδική διαπερατότητα (β) συντελεστής απωλειών σε διαφορετικού είδους τοποθέτησης συστάδων και η μαθηματική μοντελοποίηση[3.3.26]	91
Σχ. 3.34 Φαινόμενα Fringe Field και οι επιπτώσεις στις συνολικές απώλειες χαλκού. (α) Μοντελοποίηση συστάδων (Bundle) με ισοδύναμη μιγαδική διαπερατότητα (β) Πρόταση διάσπασης μεγάλου διακένου σε περισσότερα μικρότερα διάκενα γ) Μετακίνηση του τυλίγματος σε απόσταση από το διάκενο δ) Λεπτομερής γεωμετρία όλων των κλώνων [3.3.26].....	92
Σχ. 3.35 Πραγματικό μέρος μιας απάντησης στη συνάρτηση βάσης Dirichlet (αριστερά) και το Πρόβλημα καθαρού ρεύματος μονάδας (δεξιά) για 12 HN και 500 Hz. [3.3.28]	92
Σχ. 3.36 Ακριβής μοντελοποίηση κατανομής ρευμάτων σε κάθε κλώνο εντός της αύλακας. [3.3.29]	93
Σχ. 4.1 Σχέδιο λαμαρίνας, μαγνητών και αυλάκων της υπό μελέτη ηλεκτρικής μηχανή. Οι διαστάσεις είναι σε mm ενώ οι γωνίες σε μοίρες.....	100
Σχ. 4.2(α) Κατασκευασμένος Δρομέας (β) Στάτης με κατανεμημένο τύλιγμα (γ) Τερματικές περιοχές τυλιγμάτων... ..	101
Σχ. 4.3 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένου και πειραματικού φάσματος τερματικής τάσης στάτη χωρίς φορτίο στις συνθήκες λειτουργίας 245 σ.α.λ.....	102
Σχ. 4.4 Ροπή(α), Πεπλεγμένη Ροή D(β) και Q(γ), ως συνάρτηση της γωνίας ροπής και της σύγχρονης γωνίας περιστροφής (Πάνω μέρος). Μέση τιμή της Ροπής, Πεπλεγμένης Ροής D και Q ως συνάρτηση της γωνίας ροπής (Κάτω μέρος). Τα διαγράμματα αναφέρονται σε λειτουργία με ρεύμα στάτη 39Amp.....	103
Σχ. 4.5 Αυτεπαγωγή ορθού D(α) και καθέτου Q(β) άξονα, ως συνάρτηση της γωνίας ροπής και της σύγχρονης γωνίας περιστροφής (Πάνω μέρος). Μέση τιμή της αυτεπαγωγής ορθού D και καθέτου Q άξονα ως συνάρτηση της γωνίας ροπής (Κάτω μέρος). Τα διαγράμματα αναφέρονται σε λειτουργία με ρεύμα στάτη 39Amp.	103
Σχ. 4.6 Χάρτες (α) Ροής μόνιμου μαγνήτη, (β) Πεπλεγμένης ροής ορθού άξονα D, (γ) Πεπλεγμένης ροής καθέτου άξονα Q, (δ) Ροπής, (ε) Αυτεπαγωγή ορθού άξονα D, (στ) Αυτεπαγωγή καθέτου άξονα Q, ως συνάρτηση του ρεύματος εισόδου (rms) και της γωνίας ροπής.	104
Σχ. 4.7 Πλάτος και γωνία των 5,7,11,13 τάξεις των αρμονικών της ΗΕΔ	105
Σχ. 4.8 Αποτελέσματα της προσομοίωσης των ρευμάτων, ροών, ΗΕΔ και ροπής μετά την έγχυση των αρμονικών. ...	105
Σχ. 4.9 Αντιστοίχιση ρεύματος και γωνίας ροπής με την: (α) Ροπή του κινητήρα (β) την ταλάντωση ροπής.	106
Σχ. 4.10 Χάρτες βέλτιστης οδήγησης του κινητήρα:(α)Τιμή ρεύματος εισόδου (β) Εσωτερική γωνία ροπής.....	106
Σχ. 4.11 Περιγραφή των ρευμάτων και τάσεων στην είσοδο του κινητήρα στο κινούμενο πλαίσιο DQ με στόχο την βέλτιστη οδήγηση (α) Ρεύμα ορθού άξονα D,(β) Ρεύμα καθέτου άξονα Q, (γ) Τάση ορθού άξονα D, (δ) Τάση καθέτου άξονα Q.....	107
Σχ. 4.12 Ρεύμα και τάση κινητήρα υπό βέλτιστη λειτουργία. (α) Ρεύμα γραμμής κινητήρα και (β) Πολική τάση.	107
Σχ. 4.13 Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος περιορισμένης τάξης.(α) Αυτεπαγωγή ορθού άξονα (β) Αυτεπαγωγή καθέτου άξονα. (γ) Ροή μόνιμου μαγνήτη (δ) Αντίσταση κλάδου μαγνήτισης	108
Σχ. 4.14 Συνιστώσες απωλειών κινητήρα.(α) DC απώλειες τυλίγματος. (β) AC απώλειες τυλίγματος. (γ) Απώλειες μόνιμου μαγνήτη. (ε) Απώλειες υστέρησης πυρήνα (ε) Απώλειες δινορευμάτων πυρήνα (ε)Ανόμαλες απώλειες πυρήνα.	109

Σχ. 4.15 (α) Χάρτης συντελεστή ισχύος, (β)Ταλάντωση ροπής, (γ)Απόδοση, (δ)Χαρακτηριστική μέγιστης ροπής-ταχύτητας και μέγιστης ισχύος-ταχύτητας.....	110
Σχ. 4.16 Μαγνητικό πεδίο που υπολογίζεται όταν ο κινητήρας λειτουργεί με ταχύτητα 295 rpm, και παρέχει ροπή 6 Nm. (α) Κατανομή πυκνότητας ροής. (β) Γεωμετρικός τόπος B_x vs B_y σε συγκεκριμένα σημεία και στα δύο μέρη του δρομέα και του στάτη.	111
Σχ. 4.17 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων και πειραματικών διακυμάνσεων του ρεύματος όταν ο κινητήρας λειτουργεί με ταχύτητα 295 rpm, φορτωμένος με ροπή 6 Nm. (α) SPWM (β) PWM συμπεριλαμβανομένης της εξάλειψης των αρμονικών ρεύματος.....	111
Σχ. 5.1 Αριστερά είναι η εικόνα μαγνήτη μηχανής στο πρόγραμμα προσομοίωσης FEMM για συνήθη ανάλυση. Δεξιά ο είναι ο ίδιος μαγνήτης της μηχανής στο ίδιο πρόγραμμα προσομοίωσης, για ανάλυση της απομαγνήτισης αποτελούμενος από επιμέρους κομμάτια.	113
Σχ. 5.2 Διάγραμμα ροής του περιοριστικού μοντέλου υπολογισμού απομαγνήτισης.	114
Σχ. 5.3 Μια τυπική συμπεριφορά απομαγνήτισης για μαγνήτες NdFeB. Φαίνονται τα φαινόμενα των δευτερευόντων βρόχων και της ελαφριάς μεταβλητής κλίσης, κοντά στον Β άξονα, που διαθέτει η καμπύλη όταν αποχωρεί το εξωτερικό πεδίο. Η εικόνα αυτή είναι μέρος της δημοσίευσης [6.13].	115
Σχ. 5.4 Η γραμμική μέθοδος επαναφοράς σημείων στην καμπύλη B-H. Η παραπάνω καμπύλη είναι από τον μαγνήτη Νεοδυμίου N50M σε θερμοκρασίες 60oC. Το τυχαίο σημείο βρίσκεται εκτός της καμπύλης B-H ενώ μετακινώντας την γραμμή λειτουργίας B-H βρίσκεται και πάλι στην καμπύλη B-H. Με αυτή τη μέθοδο η λειτουργική του καμπύλη έχει μόνιμα αλλάξει.....	116
Σχ. 5.5 Διάγραμμα ροής του γραμμικού μοντέλου υπολογισμού απομαγνήτισης.	116
Σχ. 5.6 Καμπύλες B-H εκθετικού μοντέλου που περιγράφουν την συμπεριφορά δύο σημείων του μαγνήτη όταν το εξωτερικό αντιπαράλληλο πεδίο μεγαλώνει και στην συνέχεια μικραίνει.	117
Σχ. 5.7 Καμπύλες B-H και καμπύλες επαναφοράς για τα διάφορα μοντέλα, στην περίπτωση του μαγνήτη ND50H σε θερμοκρασία 20oC.....	118
Σχ. 5.8 Κατανομή Μαγνητικού πεδίου μαζί με συνυπολογισμό της απομαγνήτισης για μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών εικόνας V στη λειτουργική κατάσταση 60oC όταν η πυκνότητα ρεύματος του στάτη είναι 600% του ονομαστικού.	119
Σχ. 5.9 Καμπύλες B-H και καμπύλες επαναφοράς για τα διάφορα μοντέλα, στην περίπτωση του μαγνήτη ND50H σε θερμοκρασία 20oC.....	120
Σχ. 5.10 Εικόνα της γεωμετρίας ενός πόλου της μηχανής που χρησιμοποιείται για την ανάλυση διαφόρων ειδών μαγνητών.	121
Σχ. 5.11 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.....	122
Σχ. 5.12 Πιθανότητα απομαγνήτισης εκάστοτε σημείου μαγνήτη και η εξέλιξη με βάση τη Θερμοκρασία για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180ο μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή τύπου ND52.	122
Σχ. 5.13 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 20oC, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.	123
Σχ. 5.14 Πιθανότητα απομαγνήτισης εκάστοτε σημείου μαγνήτη και η εξέλιξη με βάση τη γωνία ρεύματος για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε θερμοκρασία 25oC , για την μηχανή τύπου ND52.	123
Σχ. 5.15 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.....	124
Σχ. 5.16 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10oC, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.....	124
Σχ. 5.17 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.	124
Σχ. 5.18 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 20oC, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.	125
Σχ. 5.19 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.	125
Σχ. 5.20 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.....	125
Σχ. 5.21 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND42UH.	126
Σχ. 5.22 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 130°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.....	126
Σχ. 5.23 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.....	127
Σχ. 5.24 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.....	127
Σχ. 5.25 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND42UH & ND50H.	128

Σχ. 5.26 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H & ND42UH.	128
Σχ. 5.27 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.	128
Σχ. 5.28 Σχεδιασμός παραμετρικής γεωμετρίας Στάτη (διαστάσεις σε mm).	130
Σχ. 5.29 Σχεδιασμός παραμετρικής γεωμετρίας Δρομέα (διαστάσεις σε mm).	130
Σχ. 5.30 Ροπή και ταλάντωση ροπής των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθείσες μεταβλητές.	131
Σχ. 5.31 Back EMF και η τιμή του THDV των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθείσες μεταβλητές.	131
Σχ. 5.32 Οι τιμές των αυτεπαγωγών των αξόνων d,q των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθείσες μεταβλητές.	132
Σχ. 5.33 Διάγραμμα της θερμοκρασίας που οδηγεί σε 10% μέγιστη απομαγνήτιση των μαγνητών της κάθε μηχανής που εξετάστηκε με βάση την τροποποίηση των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας.	133
Σχ. 5.34 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H&ND42UH {26,28}	133
Σχ. 5.35 Ροπή και ταλάντωση ροπής των 30 μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο.	134
Σχ. 5.36 Αντι ΗΕΔ (back EMF) και τιμή συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD) των 30 τοπολογιών μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο.	134
Σχ. 5.37 Οι τιμές των αυτεπαγωγών των αξόνων d,q των 30 μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια ανά πόλο των μαγνητών.	135
Σχ. 5.38 Διάγραμμα της θερμοκρασίας που οδηγεί σε 10% μέγιστη απομαγνήτιση των μαγνητών της κάθε μηχανής που εξετάστηκε με βάση την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο.	135
Σχ. 5.39 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180 μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H & ND42UH {52,92,128}	136
Σχ. 5.40 Κατανομή μαγνητικού πεδίου στους 65°C με ρεύμα $I=7-I_N$ τοποθετημένο σε 180° στο πλαίσιο dq. Στην εικόνα αυτή, τα εστιασμένα πλαίσια απεικονίζουν τις απομαγνητισμένες περιοχές των μαγνητών.	136
Σχ. 6.1 Πειραματική διάταξη C-Core. Παρατηρούνται τα τυλίγματα διέγερσης και πηνίων ανίχνευσης ροής ενώ ανάμεσα από τα δύο C- Core τοποθετείται το δοκίμιο του μαγνήτη.	140
Σχ. 6.2 Μετρήσεις απωλειών πυρήνα και η προσαρμοσμένη επιφάνεια του μοντέλου απωλειών πυρήνα με διακυμάνσεις της συχνότητας και της πυκνότητας ροής.	141
Σχ. 6.3 Αρχική καμπύλη μαγνήτισης του υπό μελέτη μαλακού μαγνητικού υλικού.	141
Σχ. 6.4 Πειραματική εκτίμηση του βρόχου υστέρησης του μαλακού μαγνητικού υλικού. Οικογένεια καμπυλών σε συγκεκριμένη συχνότητα 50Hz ως συνάρτηση μεταβολής του μαγνητικού πεδίου.	142
Σχ. 6.5 Πειραματική εκτίμηση του βρόχου υστέρησης του μαλακού μαγνητικού υλικού. Οικογένεια καμπυλών σε συγκεκριμένο πλάτος μαγνητικού πεδίου 0.8T ως συνάρτηση της συχνότητας διέγερσης.	142
Σχ. 6.6 Αριστερά: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικού πεδίου για DC ρεύμα 1A. Δεξιά: Κατανομή μαγνητικού πεδίου σε AC ρεύμα 1A $f=1\text{kHz}$	144
Σχ. 6.7 Κατανομή δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες για ρεύμα 0.06A στα 10kHz.	144
Σχ. 6.8 Υποδιαίρεση του μόνιμου μαγνήτη σε ίσες ορθογώνιες διατομές πλάτους d/2 με αντι συμμετρική θεώρηση της κατανομής δινορευμάτων λαμβάνοντας υπόψη την κατοπτρική συμμετρία.	145
Σχ. 6.9 Υπόθεση συνδετικότητας εικονικών κυκλωμάτων θερματικών περιοχών.	146
Σχ. 6.10 Δύο τμήματα αγωγών που μεταφέρουν ρεύμα με μήκος $l_1 = 2 \times l_1$ και $l_2 = 2 \times l_2$ αντίστοιχα, με κυκλικές διατομές, τοποθετημένοι παράλληλα σε απόσταση D.	147
Σχ. 6.11 Εφαρμογή της θεωρίας εικόνας για την αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου ενός ρευματοφόρου αγωγού που βρίσκεται κοντά σε επίπεδη επιφάνεια σιδήρου.	147
Σχ. 6.12 Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής στο μαγνητικό κύκλωμα για ρεύμα διέγερσης από 1 A στα 10 kHz, (α) προτεινόμενο μοντέλο 2D με το ισοδύναμο κύκλωμα R-L-M. (β) 3D FEA.	149
Σχ. 6.13 Σύγκριση της προσομοιωμένης κατανομής πυκνότητας δινορευμάτων στο μαγνήτη για ρεύμα διέγερσης 1 A στα 10 kHz με τη χρήση διαφορετικών τεχνικών μοντελοποίησης, α: τυπικό μοντέλο 2DFEA: προτεινόμενο συζευγμένο 2DFEA με το ισοδύναμο κύκλωμα R-L-M, c: διαφορά μεταξύ των μοντέλων.	149
Σχ. 6.14 Σύγκριση της προσομοίωσης μεταβολής των απωλειών δινορευμάτων με τη συχνότητα σε μόνιμους μαγνήτες με τη χρήση διαφορετικών μεθοδολογιών: α ρεύμα διέγερσης 1 A, b ρεύμα διέγερσης 0.06 A.	150
Σχ. 6.15 Μέθοδοι τμηματοποίησης του Μαγνήτη. (α) Ομοιόμορφη τμηματοποίηση. (β) Τμηματοποίηση με τη χρήση της συνάρτησης του τόξου εφαπτομένης. Ο συνολικός αριθμός των μαγνητικών τμημάτων παραμένει ο ίδιος.	151
Σχ. 6.16 Αναπαράσταση της διασύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του μαγνήτη με τα αντίστοιχα κυκλώματα, στην περίπτωση τεσσάρων τμημάτων.	153
Σχ. 6.17 (α) Εξεταζόμενη γεωμετρία και κύριες διαστάσεις του μαγνητικού κυκλώματος C-core. (β) Διαμόρφωση πειραματικών στοιχείων μαγνητικού κυκλώματος.	154
Σχ. 6.18 Το υπό μελέτη μαγνητικό κύκλωμα με τους δακτυλίους σκίασης, όταν το τυλίγμα διέγερσης διαρρέεται από ρεύμα $I_{exc} = 1\text{ A}$ με $f = 20\text{ kHz}$. (α) Κατανομή πεδίου υπολογισμένη με την προτεινόμενη δισδιάστατη συζευγμένη μέθοδο. (β) Κατανομή πεδίου υπολογισμένη από 3D FEA.	155

Σχ. 6.19 Ειδικές απώλειες αμόρφου σιδήρου για διάφορες τιμές μέγιστης πυκνότητας ροής υπό ημιτονοειδή διέγερση σε διάφορες συχνότητες. Τα πειραματικά δεδομένα είναι διακεκομμένα, ενώ η αναπαράσταση απωλειών σύμφωνα με τον τύπο Bertotti σχεδιάζεται με συμπαγείς γραμμές.....	155
Σχ. 6.20 Μαγνητικό κύκλωμα με πηνία σκίασης: Κατανομή πεδίου B στα $I_{exc}=6mA$ με $f=10kHz$ (α)2D. (β)3D. Κατανομή πυκνότητας ρεύματος (γ)2D στα $I_{exc}=6mA$ με $f=10kHz$ (πάνω) και $I_{exc}=1A$ με $f=50 Hz$ (κάτω)(δ)3D στα $I_{exc}=1A$ με $f=50Hz$	156
Σχ. 6.21 Συνολικές μετρούμενες απώλειες με μέση πυκνότητα ροής στο μαγνητικό κύκλωμα για διαφορετικές συχνότητες τροφοδοσίας και διαμορφώσεις μαγνητικού κυκλώματος.....	158
Σχ. 6.22 Συνολικές απώλειες ως συνάρτηση του ρεύματος διέγερσης για τις τρεις διαφορετικές πειραματικές διαμορφώσεις. (α) $f=1kHz$. (β) $f=20kHz$. Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν με βάση την 3-D προσομοίωση FEA και την προτεινόμενη τεχνική 2-D συζευγμένης προσομοίωσης.....	159
Σχ. 6.23 Προσομοιωμένα αποτελέσματα στους μαγνήτες που αφορούν το μαγνητικό κύκλωμα με αγωγίσιμους δακτυλίους και διέγερση 20A στα $f=20 kHz$. (α) Κατανομή πεδίου υπολογισμένη με την προτεινόμενη μέθοδο 2D. (β) Κατανομή πεδίου υπολογισμένη από 3D FEA. (γ) Κατανομές πυκνότητας δινορευμάτων που υπολογίζονται με την προτεινόμενη μέθοδο 2D. (δ) Κατανομές πυκνότητας δινορευμάτων που υπολογίζονται από 3D FEA.....	160
Σχ. 6.24 Προσομοιωμένη διακύμανση απώλειας μαγνήτη με μέση πυκνότητα ροής στον όγκο του μαγνήτη υπό παλμικό και περιστρεφόμενο πεδίο για διαφορετικές συχνότητες.....	161
Σχ. 7.1 (α) Διαστάσεις διάταξης Epstein μέτρησης απωλειών πυρήνα (β) Διάγραμμα ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος της διάταξης αυτής.....	167
Σχ. 7.2 Η πειραματική τράπεζα Epstein και λωρίδες ηλεκτρικού χάλυβα.....	167
Σχ. 7.3 Διαστάσεις ελασμάτων από ηλεκτρικό χάλυβα GO 0,27 mm. (α) ειδικές απώλειες σιδήρου σε δείγματα Epstein. (β) Αντίστοιχοι βρόχοι υστέρησης στους 1.8 T. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	168
Σχ. 7.4 Μετρήσεις σε ελάσματα για ένα σήμα AC 50 mT υπό πυκνότητα ροής πόλωσης DC B_{dc} . α) Βρόχοι υστέρησης για διαφορετικά B_{dc} σε συχνότητα 400 Hz β) Διακύμανση ειδικής απώλειας σιδήρου για διαφορετικές B_{dc} και διαφορετικές συχνότητες. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	170
Σχ. 7.5 Μετρημένες απώλειες σιδήρου σε έναν πυρήνα δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης ελασμάτων σιδήρου υπό ημιτονοειδή διέγερση 50 Hz με και χωρίς πυκνότητα ροής πόλωσης DC ($B_{dc}=0,65T$). Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	171
Σχ. 7.6 Σχετική διακύμανση αυξητικής διαπερατότητας που μετράται σε πυρήνα δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης ελασμάτων σιδήρου με και χωρίς πυκνότητα ροής πόλωσης DC ($B_{dc}=0,65T$). Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	171
Σχ. 7.7 Μαγνητικό κύκλωμα δομής C-Core που περιλαμβάνει δύο ενδιάμεσους μόνιμους μαγνήτες ποιότητας NdFeB42UH. α) Βρόχοι υστέρησης για διαφορετικά B_{dc} σε συχνότητα 400 Hz β) Θερμική κάμερα Εικόνα του μαγνητικού κυκλώματος υπό διέγερση 200 At στα 10 kHz. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	172
Σχ. 7.8 Μετρημένη διακύμανση συνολικών απωλειών με ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης, καθώς και διαχωρισμός σε ελασματοποιημένο σίδηρο και απώλειες μόνιμου μαγνήτη για μαγνήτη SmCo βαθμού 28 χωρίς θωράκιση για διαφορετικές συχνότητες με ρεύμα διέγερσης.....	174
Σχ. 7.9 Μετρημένες απώλειες ελασματοποιημένου σιδήρου και μόνιμου μαγνήτη σε ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης για μαγνήτες SmCo βαθμού 28 σε διαφορετικές μεθόδους θωράκισης και συχνότητες. (α) $f=1 kHz$. (β) $f=5 kHz$. (γ) $f=10 kHz$. (δ) $f=20 kHz$. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	176
Σχ. 7.10 Μετρήσεις απωλειών ελασματοποιημένου σιδήρου και μόνιμου μαγνήτη για διάφορα ρεύματα διέγερσης στην περίπτωση του μαγνήτη NdFeB42 βαθμίδας UH για διαφορετικές τεχνικές θωράκισης και συχνότητες. α) $f=1kHz$, β) $f=5kHz$, γ) $f=10kHz$, δ) $f=20kHz$. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	177
Σχ. 7.11 Τρισδιάστατη αναπαράσταση FEA (ΜΠΣ) της κατανομής δινορευμάτων σε μαγνήτη κράματος NdFeB42 βαθμίδας UH σε συχνότητα 20 kHz για ημιτονοειδή διέγερση 100 At. (α) Χωρίς Θωράκιση. (β) Θωράκιση από μαγνητικό χάλυβα πλάτους 0.2 mm. (γ) Θωράκιση από φύλλο αλουμινίου πλάτους 0.4 mm.....	178
Σχ. 7.12 Χάρτης συντελεστών πόλωσης DC με βάση μαγνητικές μετρήσεις στον υπό διερεύνηση πυρήνα C. Το k_{DC} δεν έχει μονάδες. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	180
Σχ. 7.13 Μόνιμος μαγνήτης ορθογώνιας διατομής. Με πράσινο χρώμα το τμήμα που αντιπροσωπεύονται από 2D FEA και με κόκκινο χρώμα το τμήμα που μοντελοποιείται μέσω ισοδύναμων όρων παραμέτρων κυκλώματος. Η παραμένονσα μαγνήτιση M είναι κατά μήκος της διεύθυνσης y	180
Σχ. 7.14 Σύγκριση προσομοιωμένων απωλειών χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη 2D αριθμητική τεχνική με εκείνες που λαμβάνονται από το 3D FEA και μετρούνται στη διάταξη με ελασματοποιημένο σίδηρο και μαγνήτες NdFeB42 βαθμίδας UH υπό ημιτονοειδές ρεύματος διέγερσης, για διάφορες συχνότητες και τεχνικές θωράκισης. (α) $f=10kHz$ (β) $f=20kHz$. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	181
Σχ. 7.15 Διαχωρισμός απωλειών με βάση τις προσομοιώσεις σε ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη αριθμητική τεχνική 2D στην περίπτωση μαγνητών NdFeB42 βαθμίδας UH, για διαφορετικές συχνότητες και τεχνικές θωράκισης. (α) $f=10 kHz$. (β) $f=20 kHz$. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.....	182
Σχ. 8.1 Δισδιάστατη τομή κατά μήκος της γραμμικής μηχανής. Οι διαστάσεις δίνονται σε mm, ενώ το ύψος του μαγνητικού κυκλώματος στον κάθετο στη σελίδα άξονα είναι 50mm. Με πράσινο χρώμα δίνονται τα χωρία που περνούν	

τα πηνία της φάσης Α, με μπλε τα πηνία της φάσης Β, και με κόκκινο τα πηνία της φάσης C. Η διακύμανση της έντασης των χρωμάτων δηλώνει την θετική ή αρνητική φορά του ρεύματος.	185
Σχ. 8.2 Κατασκευασμένη ηλεκτρική γραμμική μηχανή. (α) Στάτης και τυλίγματα (β) Δρομέας και μαγνήτες. (γ) Συνολική διάταξη με τις μηχανικές συγκρατήσεις της.	186
Σχ. 8.3 Κυματομορφές τάσεων κενού φορτίου της γραμμικής μηχανής για δύο διαδοχικά πειράματα μετακίνησης του δρομέα. (α), (β) Καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης. Στο (γ),(δ) παρουσιάζεται η απομόνωση μίας ηλεκτρικής περιόδου κοντά στην στιγμή μέγιστης ταχύτητας.	187
Σχ. 8.4 Κυματομορφές τάσης της φάσης Α, για τα δύο πειράματα μετακίνησης του δρομέα.	187
Σχ. 8.5 Κυματομορφές ροής ως προς την ηλεκτρική γωνία και οι αρμονικές συνιστώσες της. (α) Με ολοκλήρωση της κυματομορφής της τάσης. (β) ολοκλήρωση της κυματομορφής της τάσης και εξάλειψη των άρτιων αρμονικών. (γ) ολοκλήρωση της κυματομορφής της τάσης με εξάλειψη των άρτιων αρμονικών και των αρμονικών πολλαπλασίων της 3ης τάξης.	188
Σχ. 8.6 (α) Λεπτομέρεια μαγνητικού κυκλώματος του πρωτότυπου γραμμικού κινητήρα που κατασκευάστηκε. (β) Εικόνα που δείχνει την κατανομή θερμοκρασίας στο γραμμικό πρωτότυπο κινητήρα υπό ημιτονοειδή διέγερση μιας περιόδου με 1200 At στη συχνότητα 10 kHz. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.	189
Σχ. 8.7 Μετρημένες συνολικών απωλειών υπό ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης στο πρωτότυπο γραμμικού κινητήρα για διαφορετικές συχνότητες και στις δύο περιπτώσεις παρουσίας δρομέα και απουσίας δρομέα. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.	190
Σχ. 8.8 (α) Κατανομή μαγνητικού πεδίου στη γραμμική μηχανή λόγω διέγερσης θεμελιωδών συχνοτήτων συμπεριλαμβανομένου μαγνητικού πεδίου μόνιμου μαγνήτη. (β) Κατανομή μαγνητικού πεδίου λόγω διέγερσης συχνότητας μεταγωγής εξαιρουμένου του μόνιμου μαγνητικού πεδίου και χρήσης διαφορετικής διαπερατότητας στα μέρη του σιδήρου.	191
Σχ. 8.9 Σύγκριση των συνολικών μετρούμενων απωλειών με προσομοιωμένες τις επιμέρους συνιστώσες απωλειών. (α) Περίπτωση διαμόρφωσης μαγνητικού κυκλώματος που περιλαμβάνει μόνο το μέρος του στάτη. (β) Περίπτωση διαμόρφωσης μαγνητικού κυκλώματος συμπεριλαμβανομένου του μέρους του δρομέα.	191
Σχ. 9.1 Γεωμετρία του δρομέα με εφαρμογή των μηχανικών οριακών συνθηκών στις κατάλληλες γραμμές.	195
Σχ. 9.2 Δομημένο Ηλεκτρομαγνητικό πλέγμα ΑΠΣ που έχει διαμορφωθεί για τμήματα του στάτη και του δρομέα. Περιοχές και όρια διαφορετικών υλικών επισημαίνονται με διαφορετικά χρώματα.	196
Σχ. 9.3 Αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης στην παραμορφωμένη γεωμετρία, υπό συνθήκες μέγιστης ταχύτητας (15kRPM) αντιπροσωπεύουν: (α) Κατανομή τάσης Von-Mises. (β) Κατανομή υδροστατικής τάσης.	199
Σχ. 9.4 Αποτελέσματα λύσης ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που δείχνουν την πυκνότητα ροής B και τις ισοδυναμικές γραμμές υπό συνθήκες μέγιστης ροπής.	200
Σχ. 9.5 Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου μηχανικής βελτιστοποίησης με βάση την παράλληλη χρήση επεξεργαστών.	202
Σχ. 9.6 Ρύθμιση διαμόρφωσης Single Sheet Tester (SST) υπό τάση, που χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση των μαγνητικών ιδιοτήτων υπό τάση για το δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα M270-35A.	203
Σχ. 9.7 Μετρημένα αποτελέσματα της σχετικής διαπερατότητας μαγνητικού χάλυβα με εφαρμοζόμενη τάση σε διέγερση 50Hz. Η κατηγορία ηλεκτρικού χάλυβα είναι κατηγορίας M237-35A. Οι μετρήσεις αυτές προσκομίστηκαν από την Tesla Greece.	203
Σχ. 9.8 Μετρημένες καμπύλες BH από μαγνητικό χάλυβα με ασκούμενη τάση υπό διέγερση συνεχούς ρεύματος. Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι ποιότητας M237-35A. Οι μετρήσεις αυτές προσκομίστηκαν από την Tesla Greece.	204
Σχ. 9.9 Σχετική διαπερατότητα μετρημένη σε δοκίμιο λωρίδων χάλυβα, υπό διαφορετικές συχνότητες και συχνότητες διέγερσης. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εργαστήριο της Tesla Greece.	204
Σχ. 9.10 Προσομοιώσεις τάσεων σε λωρίδα Epstein για εξωτερική καταπόνηση 300MPa: α) Υδροστατική πίεση. β) Πίεση πρώτου κύριου άξονα. (Κλίμακα παραμόρφωσης γεωμετρίας: x 40)	206
Σχ. 9.11 Ακτινική παραμόρφωση της εξωτερικής ακτίνας του δρομέα σε συνάρτηση με τη γωνία σε ποικίλες ταχύτητες περιστροφής.	207
Σχ. 9.12 Διάγραμμα ροής υπολογισμού συζευγμένου μηχανικού και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που εφαρμόζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογία.	208
Σχ. 9.13 Προσομοιωμένα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία για συνθήκες χωρίς φορτίο κάτω από 15 kRPM: α) Πυκνότητα ροής και γραμμές ροής. β) Σχετική διαπερατότητα των ελασμάτων ηλεκτρικού χάλυβα.	209
Σχ. 9.14 Ποσοστιαία διαφορά σχετικής διαπερατότητας των ελασμάτων κινητήρα με ταχύτητα. Οι θετικές τιμές ερμηνεύονται ως αύξηση της σχετικής διαπερατότητας στα 15kRPM σε σύγκριση με τη σχετική διαπερατότητα στο 1kRPM.	210
Σχ. 9.15 Κατανομή των χωρικών αρμονικών της ενότητας πυκνότητας ροής και η κανονική παραγωγός με και χωρίς παραμόρφωση του δρομέα υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.	211
Σχ. 9.16 Ποσοστό των μεταβολών του μέτρου κατανομής των χωρικών αρμονικών της πυκνότητας ροής στο διάκενο και της ακτινικής συνιστώσας, λόγω παραμόρφωσης του δρομέα, σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.	211
Σχ. 9.17 Πειραματική διάταξη.	212
Σχ. 9.18 Μετρημένες αρμονικές ροής μόνιμου μαγνήτη σε σχέση με την ταχύτητα. Ο κινητήρας λειτουργεί υπό μηδενικό ρεύμα (κενό φορτίο).	213

Σχ. 9.19 Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών απωλειών (κουκκίδες), Εκτίμηση απώλειας μοντέλου με παραμόρφωση δρομέα (μπλε γραμμή), εκτίμηση απώλειας μοντέλου χωρίς παραμόρφωση δρομέα (κόκκινη γραμμή) και η ποσοστιαία διαφορά στις απώλειες μεταξύ των προσομοιωμένων απωλειών (μωβ γραμμή) σε σχέση με την ταχύτητα. Ο κινητήρας λειτουργεί υπό μηδενικό ρεύμα (κενό φορτίο).	214
Σχ. 9.20 Ροές ορθού (D) και καθέτου (Q) άξονα υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας ως συνάρτηση της μηχανικής γωνίας περιστροφής με και χωρίς παραμόρφωση δρομέα.	215
Σχ. 9.21 Μέση ροπή στρέψης σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας συναρτήσει της εσωτερικής ηλεκτρικής γωνίας φορτίου (IEA) και οι ποσοστιαίες διαφορές με και χωρίς παραμόρφωση δρομέα σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.	215
Σχ. 9.22 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας, παραβλέποντας και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της παραμόρφωσης του ρότορα στην υπολογιζόμενη ροπή.	216
Σχ. 9.23 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων αποτελεσμάτων (γραμμές) και πειραματικών αποτελεσμάτων (κουκκίδες) σχετικά με τη ροή κενού φορτίο στο εύρος στροφών (1 - 15 kRPM) ενώ ο κινητήρας λειτουργεί υπό μηδενικό ρεύμα (συνθήκη χωρίς φορτίο).	216
Σχ. 9.24 Σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων αποτελεσμάτων (γραμμές) και πειραματικών αποτελεσμάτων (κουκκίδες). Το σχήμα απεικονίζει την ποσοστιαία διαφορά στην εκάστοτε αρμονική τιμή της ροής καθώς η ταχύτητα ποικίλλει από 1k έως 15kRPM, σε σχέση με την τιμή στο 1kRPM. Οι πρώτες δεκατρείς αρμονικές ροής εμφανίζονται ενώ ο κινητήρας λειτουργεί υπό μηδενικό ρεύμα (συνθήκη χωρίς φορτίο).	216
Σχ. 10.1 (α) Παραμετροποίηση γεωμετρίας δρομέα και (β) στάτη.	223
Σχ. 10.2 (α) Χάρτης ροπής και (β) Χάρτης τάσης σε σχέση με το ρεύμα και τη εσωτερική ηλεκτρική γωνία όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με 5kRPM.	224
Σχ. 10.3 (α) Χάρτης επιλεγμένης εσωτερικής ηλεκτρικής γωνίας (β) Χάρτης επιλεγμένης έντασης ρεύματος σε σχέση με τη ροπή και την ταχύτητα εξόδου. (γ) Χάρτης απόδοσης ενσωματωμένου συστήματος κινητήρα – αντιστροφέα σε σχέση με τη ροπή και την ταχύτητα.	226
Σχ. 10.4 Η κατανομή της τάσης Von-Mises του κινητήρα υπό φυγόκεντρες δυνάμεις στις 18kRPM.	227
Σχ. 10.5 Απόδοση της Μονάδας Κίνησης (DU.A, λόγος μετάδοσης 1:9) σε σχέση με τη ροπή εξόδου και την ταχύτητα περιστροφής των τροχών.	228
Σχ. 10.6 Καμπύλες ισχύος της μονάδας κίνησης σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής των τροχών.	229
Σχ. 10.7 Μέση θερμοκρασία έναντι χρόνου σε διάφορες περιοχές του κινητήρα. Και στις τέσσερις εικόνες, ο Κινητήρας Α λειτουργεί συνεχώς με 30Nm και 16kRPM, ενώ η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού είναι στους 20°C με συνολική ροή 10 lpm.	231
Σχ. 10.8 Διάγραμμα Χρόνου έως το Θερμικό Όριο για τον Κινητήρα Α. Η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού είναι στους 20°C με συνολική ροή 10 Lpm, ενώ το λάδι ρέει μόνο στους ψυκτικούς διαύλους του στάτορα.	232

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίν. 2.1 Τυπικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας	43
Πίν. 2.2 Μέγιστες θερμοκρασίες του κινητήρα.	47
Πίν. 3.1 Ιδιότητες μόνιμων μαγνητών σαμάριου-κοβάλτιου	54
Πίν. 3.2 Θερμοκρασιακοί συντελεστές για διάφορους μόνιμους μαγνήτες	55
Πίν. 3.3 Εμπορικά διαθέσιμα υλικά μόνιμων μαγνητών.	63
Πίν. 3.4 Ιδιότητες υλικών μόνιμων μαγνητών.	64
Πίν. 3.5 Εμπορικά διαθέσιμες ποιότητες μαγνητικών υλικών σπάνιων γαιών.	65
Πίν. 3.6 Ιδιότητες δεσμευμένων μόνιμων μαγνητών SmCo	66
Πίν. 4.1 Διαρρύθμιση τυλίγματος και είδη υλικών κατασκευής.	101
Πίν. 4.2 Πειραματικές μετρήσεις και χαρακτηριστικά του κινητήρα.....	101
Πίν. 5.1 Μαγνητικές Ιδιότητες ND50H	119
Πίν. 5.2 Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμων απομαγνήτισης	120
Πίν. 5.3 Πίνακας Γεωμετρικών Παραμέτρων σχεδίασης Ηλ. Κινητήρα.....	129
Πίν. 5.4 Τιμές παραμέτρων ανάλυσης ευαισθησίας γεωμετρικών μεγεθών	131
Πίν. 5.5 Παράμετροι βελτιστοποίησης όγκου μαγνητικού υλικού.....	133
Πίν. 6.1 Πίνακας διαπίστευσης μοντέλου απωλειών πυρήνα και πειραματικής μέτρησης	142
Πίν. 6.2 Απώλειες μαγνητικού κυκλώματος παρουσία μαγνήτη	143
Πίν. 6.3 Υπολογισμένοι παράγοντες ειδικών απωλειών αμόρφου σιδηρού	156
Πίν. 6.4 Σύγκριση μοντέλων απωλειών δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες.....	157
Πίν. 8.1 Χαρακτηριστικά τυλίγματος και μαγνητικών υλικών της γραμμικής μηχανής.	185
Πίν. 8.2 Μετρήσεις μέγιστης οριζόντιας δύναμης της γραμμικής μηχανής.	188
Πίν. 9.1 Παράμετροι κυρίας διάταξης της μηχανής.....	197
Πίν. 9.2 Χαρακτηριστικά των υλικών.....	197
Πίν. 9.3 Γεωμετρικές παράμετροι του δρομέα.....	197
Πίν. 10.1 Χαρακτηριστικά Κινητήρων	227
Πίν. 10.2 Χαρακτηριστικά κινητηρίου συστήματος	228
Πίν. 10.3 Ικανότητα μέγιστης συνεχούς ισχύος	232
Πίν. 10.4 Ικανότητα μέγιστης συνεχούς ροπής.....	233