



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση σφαλμάτων μηχανής μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Γ. Πουραΐμης

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση σφαλμάτων μηχανής μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Γ. Πουραΐμης

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Οκτωβρίου 2023.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

.....

Παναγιώτης Γ. Πουραΐμης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης, Πουραΐμης, 2023.

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη και ανάλυση σφαλμάτων σε σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Οι μηχανές αυτές αποτελούν την κύρια επιλογή στα σύγχρονα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα λόγω της υψηλής απόδοσής τους και της μεγάλης πυκνότητας ισχύος που προσφέρουν. Ωστόσο, η παρουσία μονίμων μαγνητών τις καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτες σε σφάλματα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία και την ασφάλεια του συστήματος.

Στην εργασία εξετάζονται δύο κρίσιμοι τύποι συμμετρικών σφαλμάτων, το τριφασικό βραχυκύκλωμα και το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης, το οποίο μπορεί να συμβεί κατά την απώλεια παλμοδότησης του αντιστροφέα.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε παραμετροποιημένο μοντέλο σχεδίασης και ανάλυσης σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών με χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Μέσω μαγνητοστατικών αναλύσεων εξήχθησαν χάρτες πεπλεγμένων ροών και ροπής που λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα κορεσμού και μη γραμμικότητες. Υλοποιήθηκαν μοντέλα σφαλμάτων τόσο για μόνιμη όσο και για μεταβατική κατάσταση, τα οποία επιτρέπουν τον ακριβή υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος και των ροπών πέδησης με μικρό υπολογιστικό κόστος.

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση σφαλμάτων σε τρεις διαφορετικές τοπολογίες δρομέα βασισμένες σε κινητήρα εμπορικού οχήματος. Ειδικότερα μελετήθηκαν μία μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών (SPM) και δύο μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών (IPM) με διάταξη I και V αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σφαλμάτων δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την επίδραση των διαφορετικών τοπολογιών δρομέα αλλά και την επίδραση της λειτουργικής κατάστασης της μηχανής προ σφάλματος στη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια συμμετρικών σφαλμάτων.

Η κύρια συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη εργαλείων και μεθοδολογιών για την ανάλυση σφαλμάτων σε σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης και τη βελτίωση της ασφάλειας των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων.

Η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB σε συνδυασμό με το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM.

Λέξεις κλειδιά : Ηλεκτροκίνηση, σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών, επιφανειακοί μαγνήτες, εσωτερικοί μόνιμοι μαγνήτες, τριφασικό βραχυκύκλωμα, σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης.

ABSTRACT

The present thesis focuses on the study and analysis of faults in permanent magnet synchronous machines for electric propulsion applications. These machines constitute the primary choice in modern electric and hybrid vehicles due to their high efficiency and the high power density they offer. However, the presence of permanent magnets makes them particularly vulnerable to faults, which can cause significant effects on the operation and safety of the system.

The work examines two critical types of symmetrical faults, the three-phase short circuit and the uncontrolled voltage generator fault, which can occur after inverter pulse width modulation loss.

Within the framework of this thesis, a parameterized design and analysis model for permanent magnet synchronous machines was developed using the Finite Element Method. Through magnetostatic analyses, flux linkage and torque maps were extracted that account for saturation phenomena and nonlinearities. Fault models were implemented for both steady-state and transient conditions, which enable accurate calculation of fault currents and braking torque with low computational cost.

Fault analysis was performed on three different rotor topologies based on a commercial vehicle motor. Specifically, one surface permanent magnet machine (SPM) and two interior permanent magnet machines (IPM) with I and V arrangements respectively were studied. The results of the fault analysis provide significant information about the effect of different rotor topologies as well as the effect of the machine's operating state prior to the fault on the behavior of the machines during symmetrical faults.

The main contribution of this thesis is the development of tools and methodologies for fault analysis in permanent magnet synchronous machines, which can be used for design optimization and improvement of the safety of electric propulsion systems.

The entire analysis is carried out using MATLAB coupled with the finite element analysis software FEMM.

Keywords: Electric propulsion, permanent magnet synchronous motors, surface magnets, interior permanent magnets, three-phase short circuit, uncontrolled voltage generator.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί το τέλος μιας εξαιρετικά σημαντικής περιόδου της ζωής μου. Αυτό το επίτευγμα δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την υποστήριξη, καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που μου επέδειξαν πολλοί άνθρωποι κατά τη διάρκεια της πορείας αυτής.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της εργασίας αυτής, καθώς και για την αμέριστη στήριξη και την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσής της. Τον ευχαριστώ ακόμη περισσότερο διότι, από τα πρώτα προπτυχιακά μαθήματα, κατάφερε να μου μεταδώσει το πάθος του για το αντικείμενο των ηλεκτρικών μηχανών, προσφέροντάς μου όχι μόνο πολύτιμες γνώσεις αλλά και κίνητρο για συστηματική ενασχόληση με αυτόν τον τομέα αυτό.

Ευχαριστώ θερμά τους κ. Μίνω Μπενιακάρ και κ. Ιάκωβο Μανωλά για την έμπρακτη συνεισφορά τους και τις πολύτιμες συμβουλές τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω του γονείς μου Γεώργιο και Αγγελική, τη θεία μου Ιωάννα καθώς και τη σύζυγό μου Δέσποινα για τη σημαντική στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Σκοπός της εργασίας	12
1.2 Δομή της εργασίας	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ	14
2.1 Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης	14
2.2 Ηλεκτρικές μηχανές	15
2.2.1 Μηχανές επαγωγής	15
2.2.2 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ & ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ	18
3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα – Πλαίσιο σύγχρονης περιστροφής $d - q$	18
3.2 Μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος	21
3.3 Μοντέλο μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης	25
3.4 Μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος με χρήση χαρτών ροής	29
3.5 Μοντέλο μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης με χρήση χαρτών ροής	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	35
4.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	35
4.2 Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων	35
4.3 Οριακές συνθήκες	36
4.4 Παραμετροποιημένη σχεδίαση γεωμετρίας	38
4.5 Ανάλυση ηλεκτρικής μηχανής με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	39
4.6 Οργάνωση των χαρτών ροής – ροπής	40
4.7 Εξαγωγή χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΛΕΤΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ	47
5.1 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών υπό μελέτη	47
5.2 Ανάλυση σφαλμάτων	51
5.2.1 Ανάλυση σφαλμάτων ηλεκτρικής μηχανής επιφανειακών μαγνητών	51
5.2.2 Ανάλυση σφαλμάτων ηλεκτρικής μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών τύπου I	57
5.2.3 Ανάλυση σφαλμάτων ηλεκτρικής μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών τύπου V	63
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	69
5.3.1 Απόκριση σφαλμάτων στη μόνιμη κατάσταση	69
5.3.2 Μεταβατική απόκριση σε τριφασικό βραχυκύκλωμα	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75

6.1 Κύρια συμπεράσματα	75
6.2 Συνεισφορά της εργασίας στην Επιστήμη	76
6.3 Σημεία για περαιτέρω διερεύνηση	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με σκοπό τη διεξοδική μελέτη και ανάλυση σφαλμάτων σε σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών που προορίζονται για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η ανάλυση σφαλμάτων για μια ηλεκτρική μηχανή μονίμων μαγνητών με τρεις διαφορετικές τοπολογίες δρομέα. Ειδικότερα, εξετάστηκαν μία τοπολογία επιφανειακών μονίμων μαγνητών (Surface Permanent Magnet, SPM) και δύο τοπολογίες εσωτερικών μονίμων μαγνητών (Interior Permanent Magnet, IPM) με διάταξη μαγνητών τύπου I και τύπου V αντίστοιχα.

Η εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση δύο κρίσιμων τύπων συμμετρικών σφαλμάτων που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη σχεδίαση και την ασφάλεια των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων:

- **Τριφασικό βραχυκύκλωμα:** Αναλύεται τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση, αποτελώντας τη δυσμενέστερη περίπτωση σφάλματος από άποψη ρευμάτων και ροπών πέδησης.
- **Σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης:** Σφάλμα το οποίο συμβαίνει κατά την απώλεια παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα όπου ο αντιστροφέας λειτουργεί σαν μη ελεγχόμενος ανορθωτής και η μηχανή ως γεννήτρια.

Μέσω της ανάπτυξης μοντέλων ανάλυσης σφαλμάτων και της εφαρμογής της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, η εργασία στοχεύει στην παροχή εργαλείων και μεθοδολογιών που θα συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της σχεδίασης και την ενίσχυση της ασφάλειας των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων

1.2 Δομή της εργασίας

Στο «Κεφάλαιο 1» το οποίο αποτελεί και την εισαγωγή γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των περιεχομένων της εργασίας καθώς και η δομή της.

Στο «Κεφάλαιο 2» γίνεται μια εισαγωγή στην ηλεκτροκίνηση, παρουσιάζονται τα μέρη ενός κινητήριου συστήματος καθώς και οι τύποι των ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Ειδικότερα για τους σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών γίνεται αναφορά στις διάφορες τοπολογίες δρομέα καθώς και στη διαφοροποίηση τους ως προς το τύλιγμα.

Στο «Κεφάλαιο 3» γίνεται εκτενής αναφορά στα μοντέλα σφαλμάτων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και στα μοντέλα που υλοποιήθηκαν για την ανάλυση σφαλμάτων των ηλεκτρικών

μηχανών υπό μελέτη. Επίσης γίνεται αναφορά στο μοντέλο σύγχρονης περιστροφής $d - q$ των σύγχρονων μηχανών και πως αυτό χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση τους.

Στο «Κεφάλαιο 4» γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και πως αυτή εφαρμόζεται στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του παραμετρικού μοντέλου σχεδίασης σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, καθώς και των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν για την ελαχιστοποίηση του χρόνου προσομοίωσης.

Στο «Κεφάλαιο 5» γίνεται ανάλυση σφαλμάτων τριών ηλεκτρικών μηχανών βασισμένων σε μηχανή εμπορικού οχήματος. Η ανάλυση σφαλμάτων γίνεται ξεχωριστά για κάθε τοπολογία δρομέα και στο τέλος γίνεται μια σύγκριση των τοπολογιών δρομέα ως προς τη συμπεριφορά τους στα σφάλματα.

Στο «Κεφάλαιο 6» εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, αξιολογείται η επιστημονική συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση των μοντέλων που υλοποιήθηκαν καθώς και η χρήση τους συνδυαστικά με μοντέλα απομαγνήτισης ή σε προβλήματα βελτιστοποίησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ

Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα αμιγώς ηλεκτρικά (BEV) και υβριδικά με δυνατότητα φόρτισης (PHEV), αυξάνεται ραγδαία. Αυτή η άνοδος οφείλεται τόσο στην αυστηροποίηση των κανονισμών για τον περιορισμό των ρύπων και του διοξειδίου του άνθρακα, όσο και στις κρατικές ενισχύσεις για την αγορά και χρήση τέτοιων οχημάτων. Εκτιμάται ότι οι ετήσιες πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων παγκοσμίως θα εκτοξευθούν. Λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικών μηχανών αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Η στροφή αυτή προς τα υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές τόσο στην τεχνολογική προσέγγιση όσο και στις απαιτήσεις για τους ηλεκτρικούς κινητήρες [1],[2],[3].

Οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης διαφέρουν σημαντικά από τους βιομηχανικούς κινητήρες του παρελθόντος, όχι μόνο ως προς τα όρια λειτουργίας σε ισχύ, ροπή και στροφές, αλλά και λόγω των ιδιαίτερα απαιτητικών συνθηκών λειτουργίας, όπως οι κραδασμοί, οι θερμικοί κύκλοι και οι αυξημένες απαιτήσεις διάρκειας ζωής. Αυτοί οι παράγοντες απαιτούν νέες σχεδιαστικές λύσεις, καινοτόμα υλικά και προηγμένες μεθόδους μαζικής παραγωγής [1].

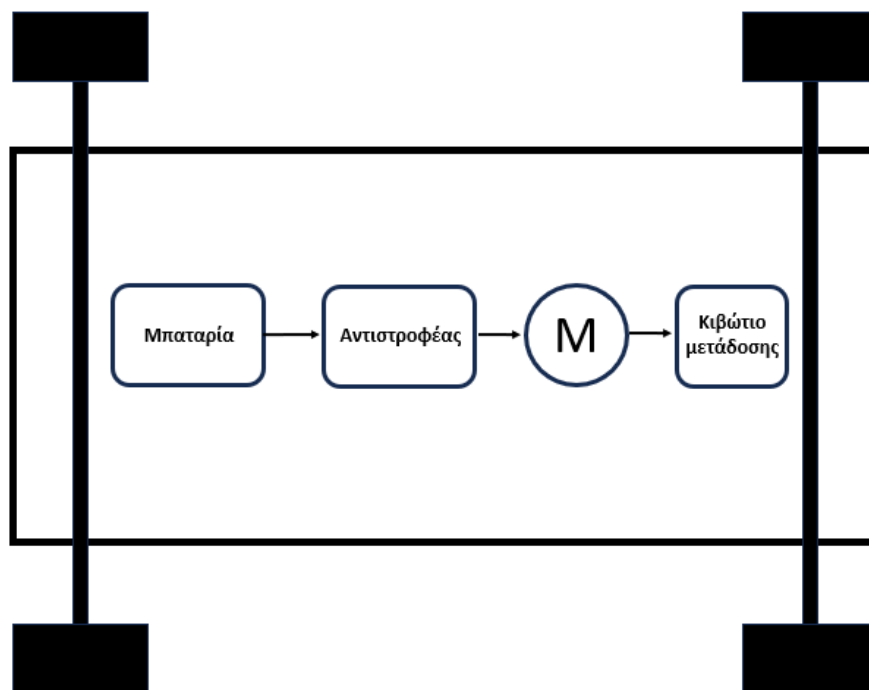
Από εμπορικής πλευράς, οι περισσότεροι κατασκευαστές και προμηθευτές αυτοκινήτων επιλέγουν κινητήρες μόνιμων μαγνητών για την πρόωση. Ο κυριότερος τύπος ηλεκτρικής μηχανής για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης είναι οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών και ειδικότερα οι σύγχρονες μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών (IPM). Παρόλο που κάποιοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν και επαγωγικούς ή εξωτερικά διεγερόμενους σύγχρονους κινητήρες οι σύγχρονες μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών αποτελούν βασική επιλογή [1],[2].

2.1 Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης

Ένα ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα αποτελείται από τα παρακάτω κύρια υποσυστήματα:

1. Μπαταρία
2. Αντιστροφέας
3. Ηλεκτρική μηχανή
4. Κιβώτιο μετάδοσης

Τα υποσυστήματα αυτά φαίνονται και στο σχήμα 2.1, η μπαταρία τροφοδοτεί μια ηλεκτρική μηχανή μέσω ενός αντιστροφέα και η ισχύς μεταφέρεται στους τροχούς μέσω ενός κιβωτίου μετάδοσης το οποίο συνήθως έχει σταθερό λόγο μετάδοσης.



Σχήμα 2.1 Κύρια μέρη ενός ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος.

2.2 Ηλεκτρικές μηχανές

Τα συστήματα κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιούν κυρίως δύο τύπους ηλεκτρικών κινητήρων, τους επαγωγικούς κινητήρες και σύγχρονους κινητήρες μόνιμων μαγνητών. Κάθε τεχνολογία παρουσιάζει διακριτά πλεονεκτήματα και προκλήσεις που επηρεάζουν την υιοθέτησή τους στην αυτοκινητοβιομηχανία [1].

2.2.1 Μηχανές επαγωγής

Οι μηχανές επαγωγής έχουν καθιερωθεί σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που έχουν. Μερικά από αυτά είναι [1]:

- **Κόστος:** Χαμηλότερο κόστος, δεν απαιτούνται σπάνιες γαίες, εύκολη κατασκευή.
- **Διαθεσιμότητα:** Ευρέως διαθέσιμοι από πολλούς κατασκευαστές, ώριμη τεχνολογία καθώς έχουν χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κατά κόρων.
- **Ικανότητα υπερφόρτισης:** Οι μηχανές επαγωγής μπορούν να υπερφορτιστούν παροδικά και να παράγουν υψηλή ροπή.
- **Υψηλή αξιοπιστία:** Οι μηχανές επαγωγής έχουν υψηλή αξιοπιστία και σε περίπτωση σφάλματος από τη πλευρά του αντιστροφέα αποδιεγείρονται με αποτέλεσμα να είναι εγγενώς ασφαλείς.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους έχουν τα παρακάτω σημαντικά μειονεκτήματα:

- **Απόδοση:** Χαμηλότερη λόγω απωλειών στο κλωβό του δρομέα

- **Συντελεστής ισχύος:** Χαμηλότερος συντελεστής ισχύος σημαίνει μεγαλύτερη απαίτηση ρεύματος για την ίδια ισχύ συγκριτικά με τις μηχανές μονίμων μαγνητών. Αυτό συνεπάγεται σε μεγαλύτερο κόστος από τη πλευρά του αντιστροφέα.
- **Υψηλές απαιτήσεις ψύξης:** Υψηλότερος απώλειες συνεπάγονται αυξημένες απαιτήσεις θερμικής διαχείρισης.

2.2.2 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών

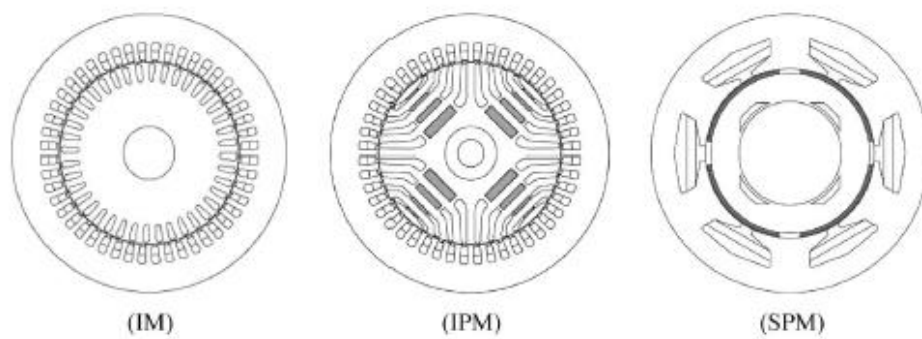
Οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών αποτελούν την κύρια επιλογή στα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών, οι σύγχρονες μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών (Surface Permanent Magnet Motor, SPM) και οι σύγχρονες μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών (Internal Permanent Magnet Motor, IPM). Οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών διαφοροποιούνται επίσης και ως προς το τύλιγμα τους που μπορεί να είναι συγκεντρωμένο ή καταναμημένο. Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης κυριαρχούν οι σύγχρονες μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών με καταναμημένο τύλιγμα [1],[2],[3].

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών είναι:

- **Υψηλή απόδοση:** Οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών έχουν υψηλότερη απόδοση καθώς σε αντίθεση με τις μηχανές επαγωγής δεν έχουν σημαντικές απώλειες στο δρομέα.
- **Συντελεστής ισχύος:** Υψηλός συντελεστής ισχύος άρα καλύτερη απόδοση και μικρότερο κόστος αντιστροφέα.
- **Ικανότητα υπερφόρτισης:** Όπως και οι μηχανές επαγωγής οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών έχουν σημαντική ικανότητα υπερφόρτισης.
- **Πυκνότητα ροπής/ισχύος:** Οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών έχουν μεγάλη πυκνότητα ροπής/ισχύος με αποτέλεσμα να είναι σημαντικά μικρότερες σε μάζα από μηχανές παρόμοιων επιδόσεων άλλης τεχνολογίας.

Τα κύρια μειονεκτήματα των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών είναι:

- **Πολύπλοκη κατασκευή:** Οι δρομείς ειδικότερα των σύγχρονων μηχανών εσωτερικών μονίμων μαγνητών έχουν πολλαπλά φράγματα ροής έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν τη ροπή εκτυπότητας.
- **Κόστος υλικών:** Οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών χρησιμοποιούν μαγνήτες οι οποίοι έχουν προσμίξεις σπάνιων γαιών με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος.
- **Συμπεριφορά σε σφάλματα:** Σε αντίθεση με τις μηχανές επαγωγής που αποδιεγείρονται οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών παράγουν σημαντικά ρεύματα σφάλματος και ροπής πέδησης λόγω της μόνιμης διέγερσης που προέρχεται από τους μαγνήτες του δρομέα.



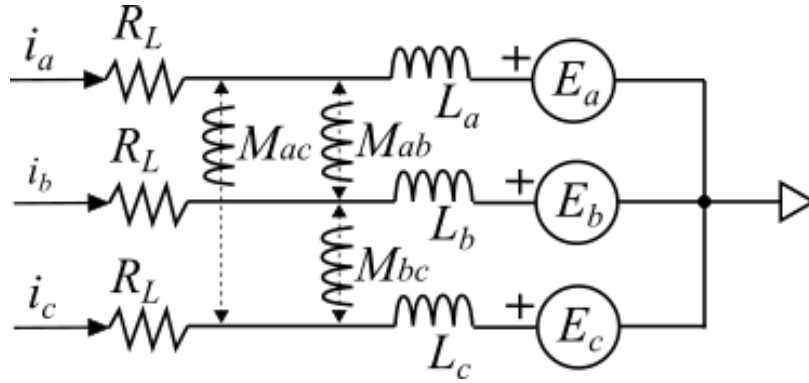
Σχήμα 2.2 Μηχανή επαγωγής (IM), σύγχρονη μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών (IPM) με κατανεμημένο τύλιγμα, σύγχρονη μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών (SPM) με συγκεντρωμένο τύλιγμα [1].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ & ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα – Πλαίσιο σύγχρονης περιστροφής d – q

Μια σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών μπορεί να αναπαρασταθεί στο τριφασικό σύστημα μέσω του παρακάτω ισοδύναμου κυκλώματος [4].



Σχήμα 3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής στο τριφασικό σύστημα.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα αυτό παρατηρούμε το τριφασικό τύλιγμα του στάτη το οποίο αναπαρίσταται από μια αντίσταση R_L μία αυτεπαγωγή L_{abc} καθώς και την αντί – ΗΕΔ που δημιουργείται λόγω του πεδίου του δρομέα, η οποία αναπαρίσταται ως μια πηγή τάσης ανά φάση E_{abc} , ως M_{ab} , M_{bc} , M_{ac} αναπαριστούμε τις αλληλεπαγωγές μεταξύ των φάσεων. Μέσω του παραπάνω ισοδύναμου κυκλώματος μπορούμε να εξάγουμε τις εξισώσεις που περιγράφουν τις φασικές τάσεις οι οποίες είναι:

$$u_a = R_L i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega_e \lambda_a + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} \quad (3.1)$$

$$u_b = R_L i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + \omega_e \lambda_b + M_{ab} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} \quad (3.2)$$

$$u_c = R_L i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + \omega_e \lambda_c + M_{ac} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_b}{dt} \quad (3.3)$$

Η χρήση του τριφασικού μοντέλου δεν είναι πρακτική για την περιγραφή των παραμέτρων και της λειτουργίας μια σύγχρονης μηχανής, γι' αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι οι μετασχηματισμοί

Clarke & Park. Μέσω του μετασχηματισμού Park περνάμε στο πλαίσιο σύγχρονης περιστροφής d – q, για την μετατροπή από το abc στο d – q χρειαζόμαστε τον πίνακα μετασχηματισμού.

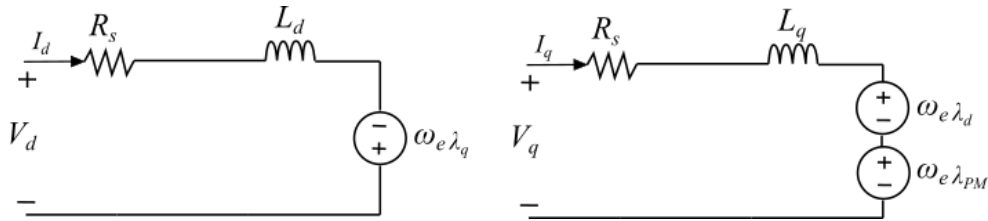
$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Ο πίνακας μετασχηματισμού είναι αντιστρέψιμος οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πάμε από το abc $\rightarrow$ d – q και αντίστροφα από το d – q $\rightarrow$ abc. Για να μεταβούμε από το abc στο dq μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον πίνακα μετασχηματισμού ως εξής:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = P \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Όπου η μεταβλητή X μπορεί να είναι οποιαδήποτε ποσότητα (πεπλεγμένες ροές, τάσεις, ρεύματα κτλ.). Η γωνία θ είναι εξαιρετικά σημαντική για το μετασχηματισμό και για την περίπτωση των σύγχρονων μηχανών είναι η θέση του δρομέα. Στο πλαίσιο σύγχρονης περιστροφής d – q όλες οι ηλεκτρικές ποσότητες μια σύγχρονης μηχανής είναι σταθερές DC τιμές πράγμα που διευκολύνει την ανάλυση τους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε περιγράψουμε μια σύγχρονη μηχανή μέσω των ισοδύναμων κυκλωμάτων και κατ' επέκταση των εξισώσεων που ακολουθούν:



Σχήμα 3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής στο πλαίσιο σύγχρονης περιστροφής d – q.

$$u_d = Ri_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega\lambda_q \quad (3.6)$$

$$u_q = Ri_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega\lambda_d \quad (3.7)$$

$$\lambda_d = \lambda_{PM} + L_d i_d \quad (3.8)$$

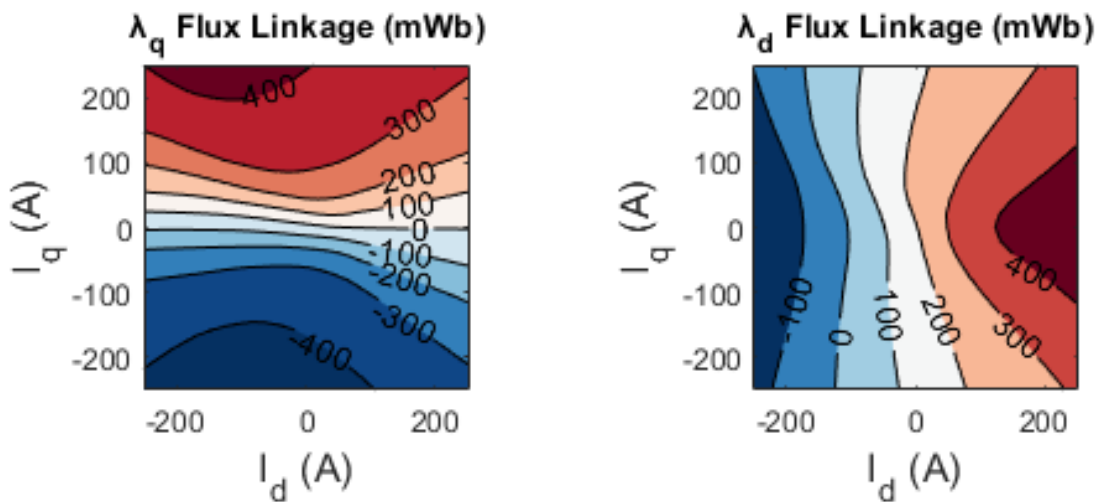
$$\lambda_q = L_q i_q \quad (3.9)$$

Όπου λ_d , λ_q οι πεπλεγμένες ροές του ορθού (d) και κάθετου (q) άξονα και λ_{PM} η πεπλεγμένη ροή που παράγεται από τους μαγνήτες του δρομέα. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτει από την εξίσωση:

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.10)$$

Όπου P ο αριθμός των πόλων της ηλεκτρικής μηχανής.

Το μοντέλο αυτό αποτελεί το κλασσικό μοντέλο d – q το οποίο είναι αρκετό για να περιγράψει τη λειτουργία μια σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών αγνοώντας όμως φαινόμενα κορεσμού, την αλληλεπίδραση μεταξύ των αξόνων d – q καθώς και την επίδραση της θέσης του δρομέα. Στην πραγματικότητα οι πεπλεγμένες ροές λ_d , λ_q και κατ' επέκταση οι αυτεπαγωγές L_d , L_q και η πεπλεγμένη ροή λόγω των μαγνητών του δρομέα λ_{PM} δεν είναι σταθερές τιμές και εξαρτώνται από τα ρεύματα i_d , i_q και τη θέση του δρομέα θ .



Σχήμα 3.3 Χάρτες πεπλεγμένων ροών $\lambda_q(i_d, i_q)$, $\lambda_d(i_d, i_q)$ μιας σύγχρονης μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών.

3.2 Μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος

Ανάμεσα στα διάφορα σφάλματα που μπορούν να προκύψουν κατά τη λειτουργία μια ηλεκτρικής μηχανής το πιο επικίνδυνο θεωρείται το τριφασικό βραχυκύκλωμα. Λόγω της παρουσίας μονίμων μαγνητών οι οποίοι αποτελούν μόνιμη διέγερση κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα αναπτύσσονται μεταβατικά μεγάλα ρεύματα σφάλματος και η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σαν πέδη [7].

Η ανάλυση γίνεται στο πλαίσιο σύγχρονης περιστροφής $d - q$ όπου οι τάσεις δίνονται από τις σχέσεις 3.6, 3.7, 3.8, 3.9. Για το τριφασικό βραχυκύκλωμα θέτουμε $u_d = 0$ και $u_q = 0$ άρα αντικαθιστώντας τα λ_d και λ_q και λύνοντας ως προς i_d i_q έχουμε:

$$\frac{d\lambda_d}{dt} = -Ri_d + \omega\lambda_q \quad (3.11)$$

$$\frac{d\lambda_q}{dt} = -Ri_q - \omega\lambda_d \quad (3.12)$$

$$L_d \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega L_q i_q \quad (3.13)$$

$$L_q \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega(\lambda_{PM} + L_d i_d) \quad (3.14)$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L_d} i_d + \omega \frac{L_q}{L_d} i_q \quad (3.15)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q} i_q - \omega \frac{\lambda_{PM}}{L_q} - \frac{L_d}{L_q} i_d \quad (3.16)$$

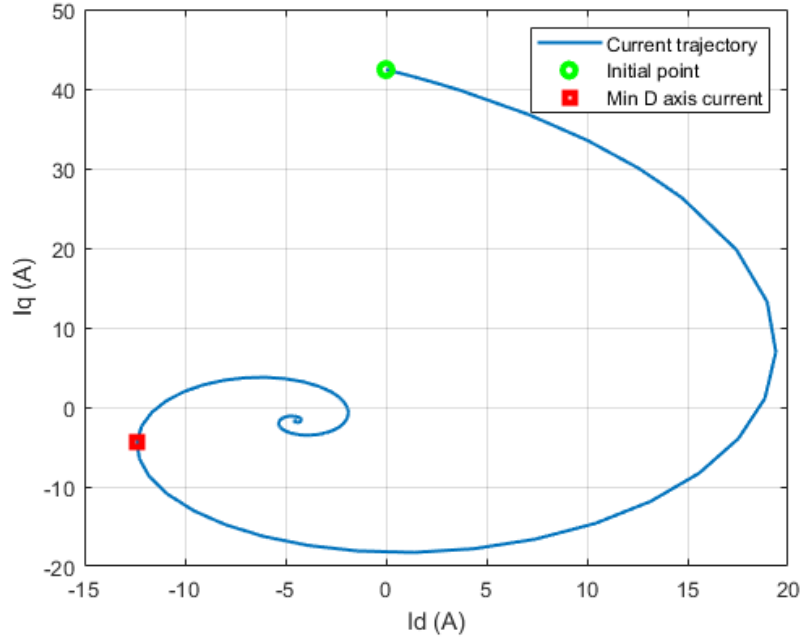
Επιλύοντας το σύστημα διαφορικών εξισώσεων 3.15 και 3.16 μπορούμε να υπολογίσουμε τα ρεύματα βραχυκύκλωσης συναρτήσει του χρόνου. Τα ρεύματα ξεκινούν από μια αρχική τιμή I_{d0} I_{q0} που ορίζεται ως σημείο λειτουργίας προ σφάλματος και καταλήγουν προς μια τις τιμές μόνιμης κατάστασης του βραχυκυκλώματος που ορίζονται από:

$$I_{d,shc} = \frac{\omega^2 L_q \lambda_{PM}}{R^2 + \omega^2 L_d L_q} \quad (3.17)$$

$$I_{q,shc} = \frac{\omega \lambda_{PM} R}{R^2 + \omega^2 L_d L_q} \quad (3.18)$$

Από τις σχέσεις 3.17, 3.18 το πλάτος του ρεύματος βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης είναι:

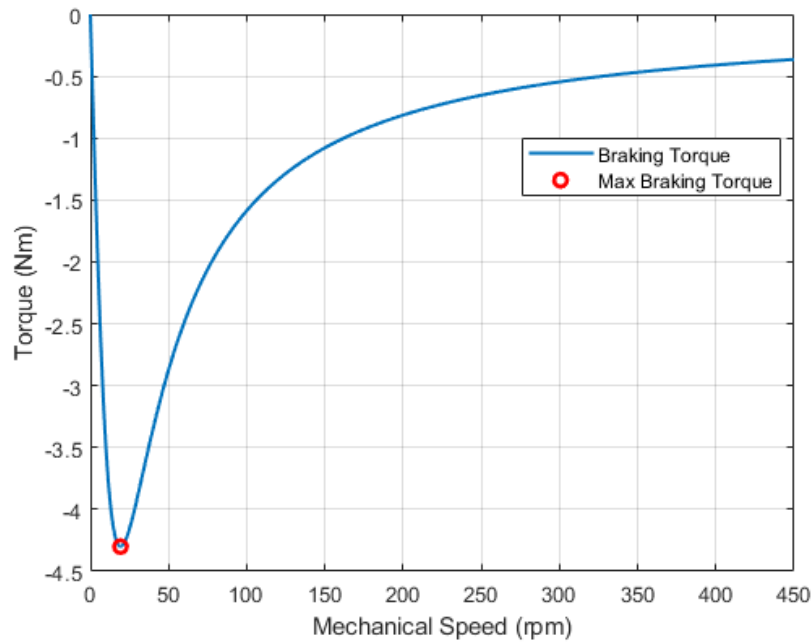
$$I_{shc} = \frac{\sqrt{(\omega^2 L_q \lambda_{PM})^2 + (\omega R \lambda_{PM})^2}}{R^2 + \omega^2 L_d L_q} \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.4 Τροχιά μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών.

Η ροπή πέδησης μόνιμης κατάστασης προκύπτει από τη σχέση:

$$T_{brk} = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} R \lambda_{PM}^2 \omega \frac{R^2 + \omega^2 L_q^2}{(R^2 + \omega^2 L_d L_q)^2} \quad (3.20)$$

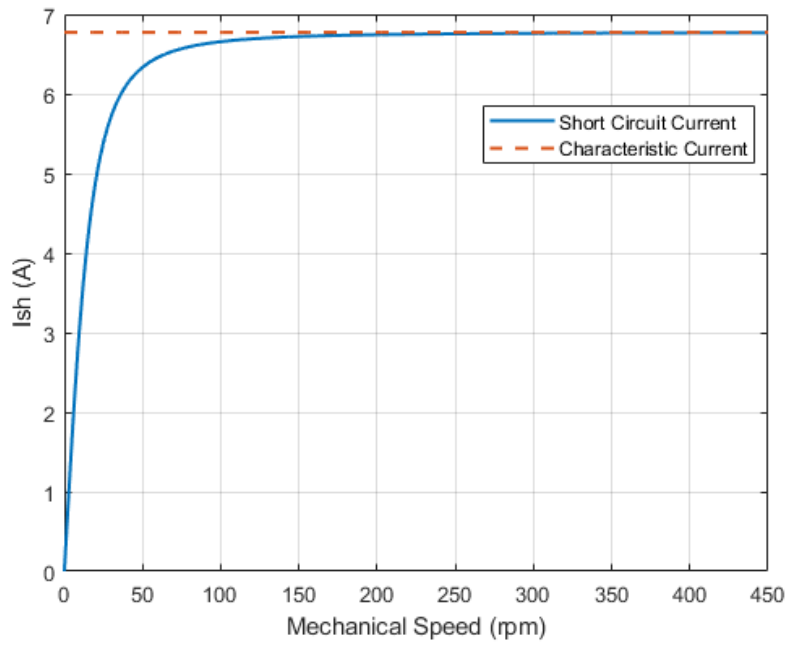


Σχήμα 3.5 Διάγραμμα ροπής πέδησης ως προς μηχανική ταχύτητα περιστροφής.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας προσεγγίζοντας το χαρακτηριστικό ρεύμα της μηχανής που είναι:

$$I_{ch} = \frac{\lambda_{PM}}{L_d} \quad (3.21)$$

Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 3.6, αξίζει να σημειωθεί ότι το χαρακτηριστικό ρεύμα της μηχανής είναι συνάρτηση μόνο της πεπλεγμένης ροής προερχόμενη από τους μαγνήτες λ_{PM} και την αυτεπαγωγή L_d το οποίο μας δείχνει ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης είναι συνάρτηση μόνο των κατασκευαστικών παραμέτρων της μηχανής [7].



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς μηχανική ταχύτητα περιστροφής.

Η μέγιστη τιμή της ροπή πέδησης T_{brk} μπορεί να υπολογιστεί θέτοντας $\omega = 0$ στην παράγωγο της εξίσωσης 3.20. Η σχέση που προκύπτει είναι:

$$T_{brk}^* = \frac{3}{2} p \frac{\Lambda_m^2}{L_q} f(\xi) \quad (3.22)$$

Η ταχύτητα στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη ροπή πέδησης είναι:

$$\omega^* = \frac{R}{L_q} \sqrt{\chi} \quad (3.23)$$

Όπου η συνάρτηση $f(\xi)$ είναι:

$$f(\xi) = \sqrt{\chi} \frac{1 + \chi}{\left(1 + \frac{\chi}{\xi}\right)^2} \quad (3.24)$$

με

$$\chi = \frac{1}{2} \left[3(\xi - 1) + \sqrt{9(\xi - 1)^2 + 4\xi} \right] \quad (3.25)$$

Όπου $\xi = \frac{L_q}{L_d}$ ο λόγος εκτυπότητας, στην περιοχή με λόγο εκτυπότητας $\xi = 2$ έως $\xi = 6$ η $f(\xi)$ μπορεί να προσεγγιστεί από μια ευθεία $f(\xi) \approx \xi - 1$ [7].

3.3 Μοντέλο μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης

Το μοντέλο μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης (uncontrolled voltage generator ‘UCG’) περιγράφει τη συμπεριφορά μια σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών στην περίπτωση απώλειας παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα που την οδηγεί [8]. Στο σφάλμα αυτό έχουμε λειτουργία της μηχανής ως γεννήτρια και του αντιστροφέα ως μη ελεγχόμενου ανορθωτή, αυτό συμβαίνει διότι όταν η μηχανή λειτουργεί στην περιοχή εξασθένησης πεδίου και ξαφνικά χαθεί η παλμοδότηση, ο αντιστροφέας σταματά να παρέχει τα κατάλληλα ρεύματα ως προς d – q και η αντί – ΗΕΔ της μηχανής επιστρέφει στην ονομαστική τιμή της η οποία είναι μεγαλύτερη της τάσης εφαρμοζόμενης τάσης του DC - Link.

Το μοντέλο που περιγράφεται παρακάτω είναι βασισμένο στις παρακάτω παραδοχές [8]:

1. Η σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών κατά τη διάρκεια του σφάλματος συνεχίζει να παρέχει ημιτονοειδή ρεύματα παρόλο που η τάση που εφαρμόζει ο αντιστροφέας στους ακροδέκτες της όταν λειτουργεί σαν μη ελεγχόμενος ανορθωτής δεν είναι ημιτονική.
2. Ο αντιστροφέας κατά τη λειτουργία του σαν μη ελεγχόμενος ανορθωτής εφαρμόζει φασικά ρεύματα που έχουν 180° διαφορά φάσης με τη τάση.
3. Οι αντίσταση του τυλίγματος και οι απώλειες σιδήρου θεωρούνται αμελητέες.

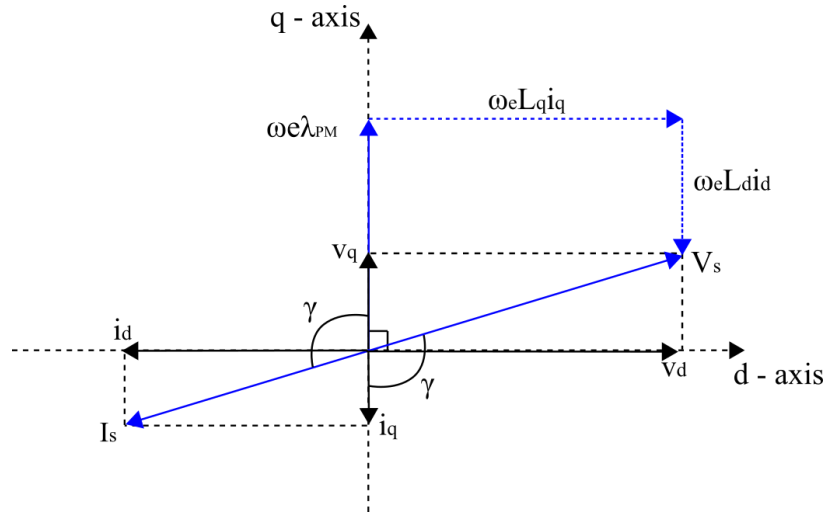
Οπότε αρχικά θεωρούμε ότι η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση από τον αντιστροφέα κατά τη διάρκεια του σφάλματος είναι:

$$V_0 = \frac{2}{\pi} V_{dc} \quad (3.26)$$

Η τάση αυτή είναι η μέγιστη τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της φασικής τάσης που μπορεί να εφαρμόσει ο αντιστροφέας στη μηχανή. Βασιζόμενοι στις εξισώσεις των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών στο πλαίσιο d – q έχουμε:

$$V_q = \omega \Psi_m + \omega L_d I_d \quad (3.27)$$

$$V_d = -\omega L_q I_q \quad (3.28)$$



Σχήμα 3.7 Διανυσματικό διάγραμμα κατά το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης.

Σύμφωνα με το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 3.11 που αντιστοιχεί στην λειτουργία σε ανεξέλεγκτης γεννήτριας τάσης βλέπουμε ότι ο ανορθωτής (αντιστροφέας μετά την απώλεια παλμοδότησης) επιβάλλει 180° φάση ανάμεσα σε V_s και I_s [8], [9] άρα μπορούμε να αναλύσουμε τα ρεύματα και τις τάσεις ως προς d – q ως εξής:

$$I_d = -I_s \sin \gamma \quad (3.29)$$

$$I_q = I_s \cos \gamma \quad (3.30)$$

$$V_d = V_s \sin \gamma \quad (3.31)$$

$$V_q = -V_s \cos \gamma \quad (3.32)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει το ρεύμα στάτη:

$$I_s = \frac{-V_s \sin \gamma}{\omega L_q \cos \gamma} \quad (3.33)$$

Ορίζουμε τις μεταβλητές ξ ως το λόγο εκτυπότητας και α το λόγο της αντί - ΗΕΔ σε μια ταχύτητα ω ως προς την εφαρμοζόμενη τάση στο στάτη από τον αντιστροφέα:

$$\xi = \frac{L_q}{L_d} \quad (3.34)$$

$$a = \frac{\omega \lambda_{PM}}{V_s} \quad (3.35)$$

Αντικαθιστώντας το ρεύμα στάτη στη σχέση της τάσης V_q και σε συνδυασμό με τα ξ , a και λύνοντας ως προς $\cos \gamma$ έχουμε:

$$\cos \gamma = \frac{-a\xi + \sqrt{(a\xi)^2 - 4(\xi - 1)}}{2(\xi - 1)} \quad (3.36)$$

Με

$$a \geq \frac{2\sqrt{\xi - 1}}{\xi}, \quad \text{εάν } \xi > 2 \quad (3.37)$$

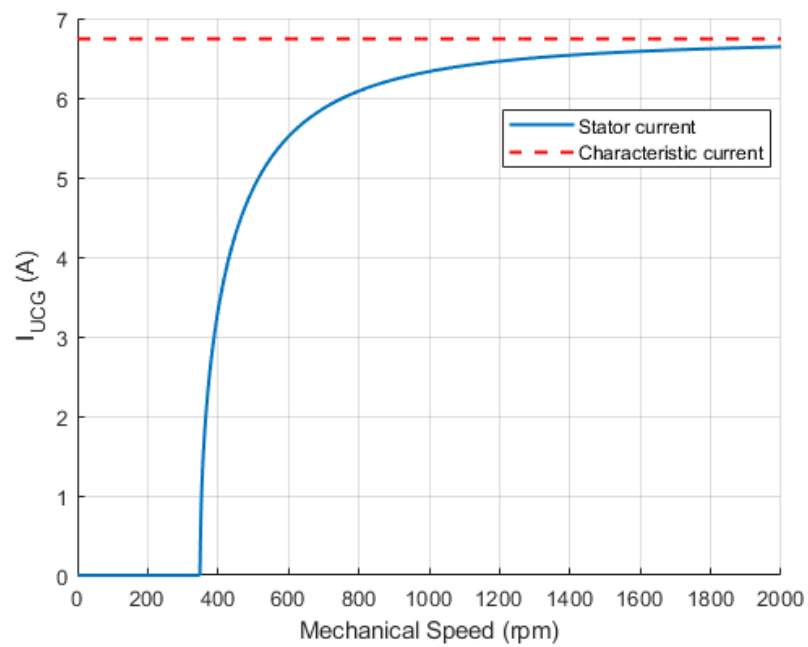
Και

$$a \geq 1, \quad \text{εάν } \xi \leq 2 \quad (3.38)$$

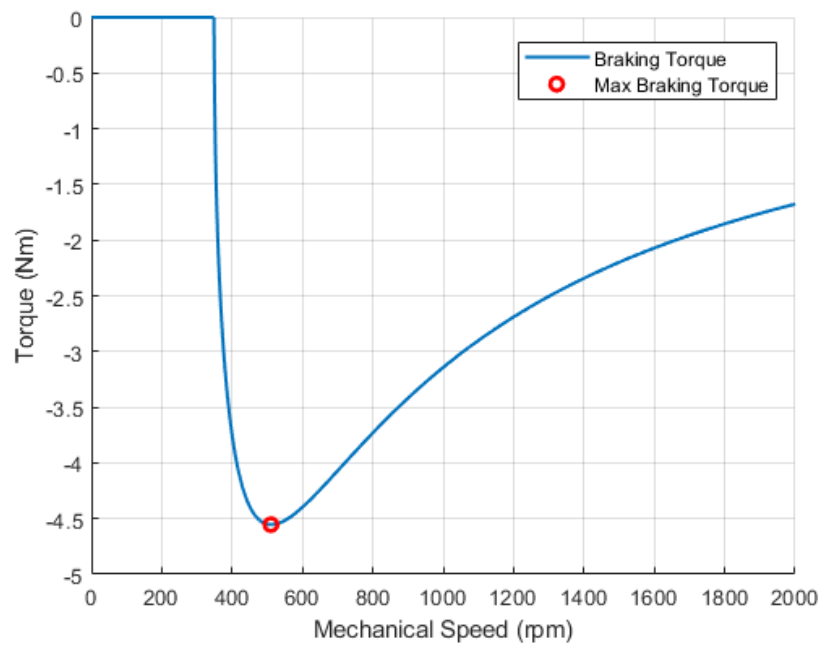
Από τον συντελεστή a και το λόγο εκτυπότητας παρατηρούμε μέσω των σχέσεων 3.36, 3.37, 3.38 ότι για λόγους εκτυπότητας από 1 έως 2 η ταχύτητα έναυσης του σφάλματος και η ταχύτητα σβέσης ταυτίζονται. Για λόγους εκτυπότητας άνω του 2 η ταχύτητα έναυσης του σφάλματος και η ταχύτητα σβέσης είναι διαφορετικές. Η ταχύτητα έναυσης σφάλματος ονομάζεται οριακή ταχύτητα ενώ η ταχύτητα στην οποία αποσβένει το σφάλμα ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα και είναι μικρότερη της οριακής ταχύτητας. Η περιοχή λειτουργίας ανάμεσα στη κρίσιμη ταχύτητα και την οριακή ταχύτητα ονομάζεται περιοχή δισταθούς λειτουργίας [8], [9].

Η ροπή πέδησης που αναπτύσσεται κατά το σφάλμα είναι:

$$T_{em} = I_{sn} \cos \gamma [\Psi_{mn} + L_{dn}(\xi - 1)I_{sn} \sin \gamma] \quad (3.39)$$



Σχήμα 3.8 Ρεύμα στάτη κατά το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης.



Σχήμα 3.9 Ροπή πέδησης κατά το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης..

3.4 Μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος με χρήση χαρτών ροής

Το μοντέλο που περιγράφεται παρακάτω είναι επέκταση του μοντέλου τριφασικών βραχυκυκλωμάτων της «Ενότητας 3.2» το οποίο χρησιμοποιεί χάρτες πεπλεγμένης ροής $\lambda_d(I_d, I_q)$, $\lambda_q(I_d, I_q)$. Οι χάρτες αυτοί προέρχονται από μαγνητοστατικές αναλύσεις με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται για να εξάγουμε αυτούς τους χάρτες περιγράφεται αναλυτικά στο «Κεφάλαιο 4». Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη φαινόμενα κορεσμού καθώς και μη γραμμικότητες όπως η αλληλεπίδραση μεταξύ του ορθού (d) και κάθετου (q) [10],[11].

Όπως και στην «Ενότητα 3.2» χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις στο πλαίσιο περιστροφής d – q:

$$u_d = Ri_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega\lambda_q \quad (3.40)$$

$$u_q = Ri_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega\lambda_d \quad (3.41)$$

Όπου τώρα τα λ_d, λ_q είναι συναρτήσεις των i_d, i_q .

$$\lambda_d = \Lambda_d(i_d, i_q) \quad (3.42)$$

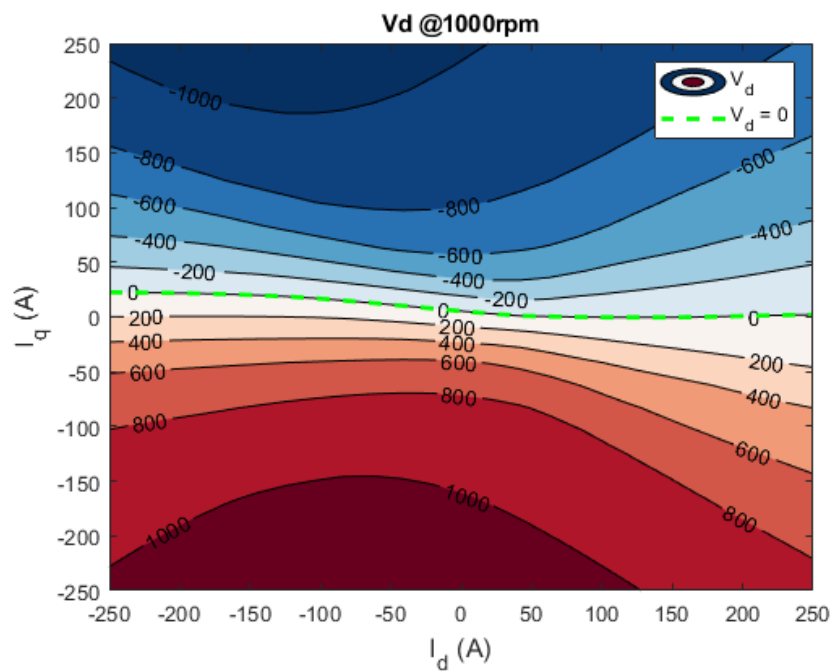
$$\lambda_q = \Lambda_q(i_d, i_q) \quad (3.43)$$

Για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της ροπής πέδησης στη μόνιμη κατάσταση υπολογίζουμε αρχικά τις τάσεις $V_d(i_d, i_q)$, $V_q(i_d, i_q)$, για κάθε ταχύτητα περιστροφής που επιθυμούμε μέσω των εξισώσεων:

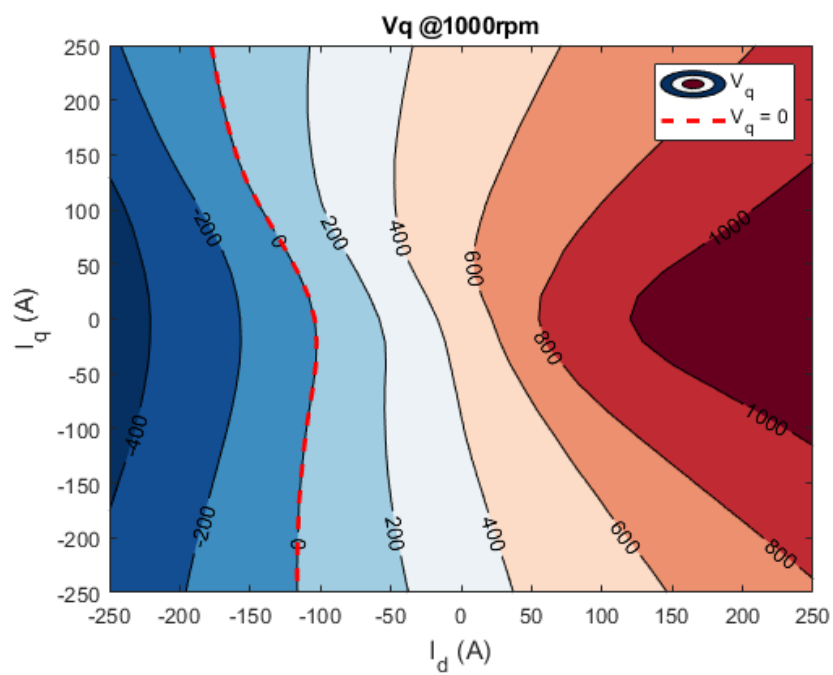
$$V_d = Ri_d - \omega\lambda_q \quad (3.44)$$

$$V_q = Ri_q + \omega\lambda_d \quad (3.45)$$

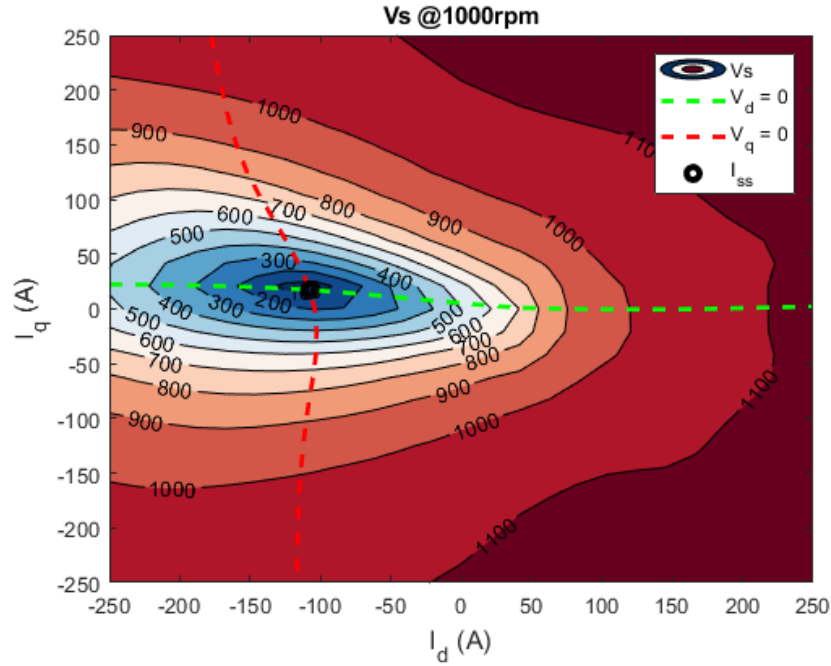
Μέσω των χαρτών τάσης $V_d(i_d, i_q)$, $V_q(i_d, i_q)$ για την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής βρίσκουμε τις ισοδυναμικές γραμμές για $V_d = 0$, $V_q = 0$ και βρίσκοντας το σημείο τομής μεταξύ των δύο ισοδυναμικών γραμμών βρίσκουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης.



Σχήμα 3.10 Χάρτης τάσης V_d για ταχύτητα περιστροφής 1000rpm.



Σχήμα 3.11 Χάρτης τάσης V_q για ταχύτητα περιστροφής 1000rpm.



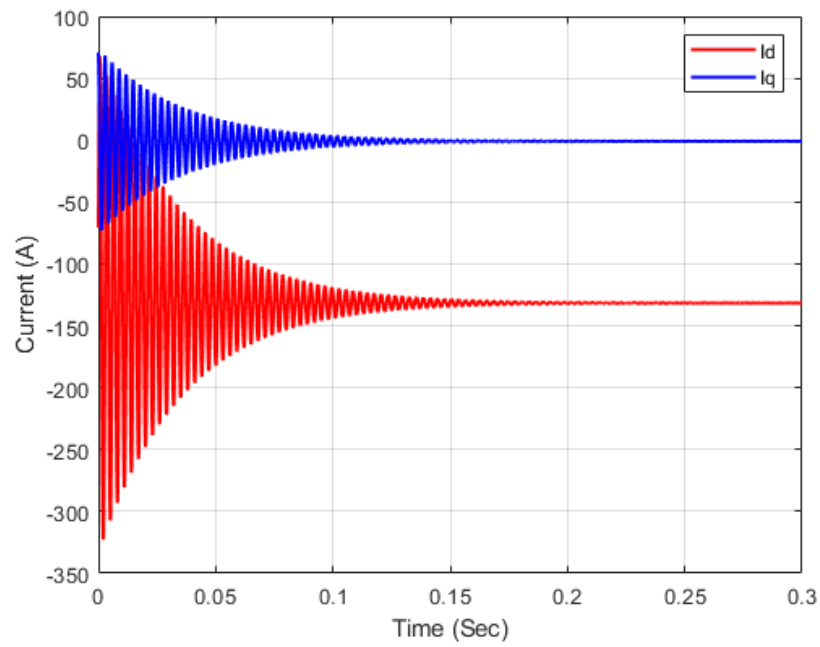
Σχήμα 3.12 Χάρτης τάσης στάτη V_s για ταχύτητα περιστροφής 1000rpm.

Για τη μεταβατική συμπεριφορά της ηλεκτρικής μηχανής στο τριφασικό βραχυκύκλωμα επιλύουμε με αριθμητική μέθοδο (μέθοδος Euler) το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν από τις σχέσεις 3.40, 3.41 και θέτοντας $u_d = 0$ και $u_q = 0$:

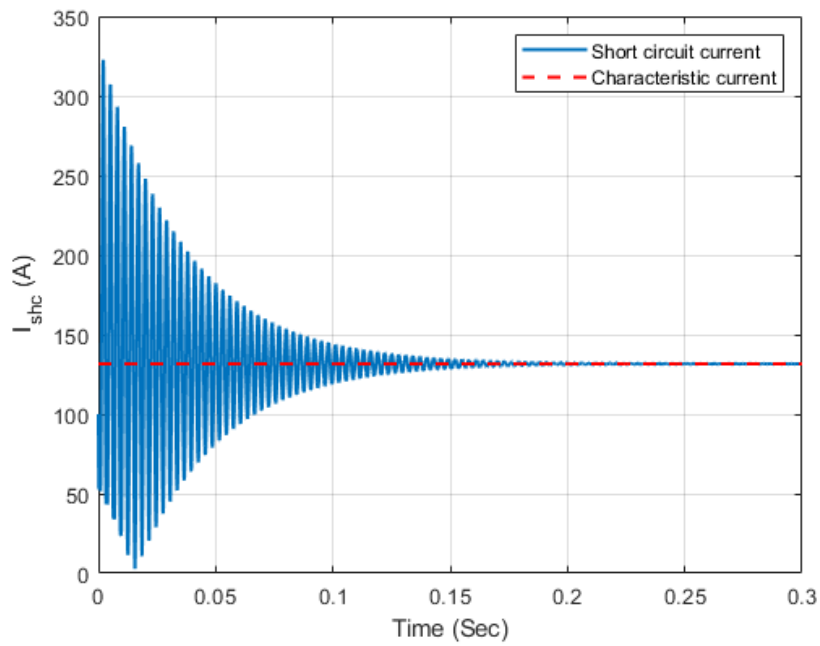
$$\frac{d\lambda_d}{dt} = -Ri_d + \omega\lambda_q \quad (3.46)$$

$$\frac{d\lambda_q}{dt} = -Ri_q - \omega\lambda_d \quad (3.47)$$

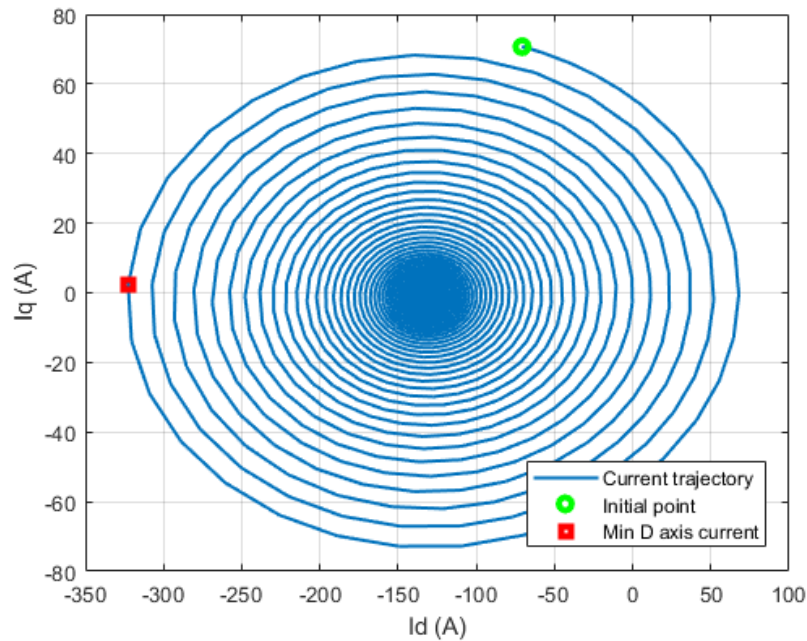
Σε κάθε χρονική στιγμή μεταφράζουμε τα Λ_d, Λ_q μέσω των χαρτών πεπλεγμένης ροής σε ρεύματα $i_d(\Lambda_d, \Lambda_q), i_q(\Lambda_d, \Lambda_q)$ μέσω των αντίστροφων χαρτών ροής, υπολογίζουμε τις νέες πεπλεγμένες ροές που αντιστοιχούν στο νέο σημείο λειτουργίας και προχωράμε στην επίλυση της επόμενης χρονικής στιγμής [11]. Στα σχήματα 3.12, 3.13, 3.14 βλέπουμε την εξέλιξη των ρευμάτων σφάλματος στο χρόνο.



Σχήμα 3.13 Ρεύμα βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών στο στρεφόμενο πλαίσιο $d - q$.



Σχήμα 3.13 Ρεύμα βραχυκύκλωσης στάτη σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών.



Σχήμα 3.14 Τροχιά ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών.

3.5 Μοντέλο μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης με χρήση χαρτών ροής

Όπως και στο μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος και εδώ κάνουμε χρήση των χαρτών πεπλεγμένης ροής για τη μελέτη του σφάλματος, επιπλέον τροποποιήσαμε το μοντέλο της «Ενότητας 3.3» ώστε να λαμβάνει υπόψη την αντίσταση του τυλίγματος [12]. Για τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος και της ροπής πέδησης μόνιμης κατάστασης χρησιμοποιήσαμε τις σχέσεις:

Όπου:

$$V_d = \frac{2V_{DC}i_d}{\pi\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (3.48)$$

$$V_q = \frac{2V_{DC}i_q}{\pi\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (3.49)$$

Οι εφαρμοζόμενες τάσεις που προκύπτουν μέσω του διανυσματικού διαγράμματος του σχήματος 3.11 είναι

Αντίστοιχα οι εξισώσεις στο d – q για το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης είναι :

$$-\frac{2V_{DC}i_d}{\pi\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} = Ri_d - \omega\lambda_q \quad (3.50)$$

$$-\frac{2V_{DC}i_q}{\pi\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} = Ri_q + \omega\lambda_d \quad (3.51)$$

Επιλύοντας το παραπάνω σύστημα εξισώσεων θεωρώντας ακόρεστη μηχανή δηλαδή για $\lambda_d(0,0)$, $\lambda_q(0,0)$ υπολογίζουμε τα ρεύματα σφάλματος και τη ροπή πέδησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η επίλυση των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου με αναλυτικό τρόπο μπορεί να καταστεί πολύ δύσκολη για σύνθετες γεωμετρίες όπως είναι οι ηλεκτρικές μηχανές. Στις περιπτώσεις αυτές καταφεύγουμε στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis). Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων διακριτοποιεί σύνθετες γεωμετρίες μέσω πλεγματοποίησης όπου το πρόβλημα χωρίζεται σε μεγάλο αριθμό στοιχείων (Elements) και για την επίλυση του συνολικού προβλήματος χρησιμοποιούμε τις επιλύσεις που έχουν γίνει για κάθε επιμέρους στοιχείο. Οι λύσεις αυτές συνδυάζονται μέσω κατάλληλων συναρτήσεων μορφής (shape functions) που εξασφαλίζουν τη συνέχεια του πεδίου στα όρια των στοιχείων. Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων [14].

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM (Finite Element Method Magnetism). Το λογισμικό αυτό διακριτοποιεί τη γεωμετρία με χρήση τριγωνικών στοιχείων πρώτης τάξης κάνοντας χρήση του ενσωματωμένου στο λογισμικό πλεγματοποιητή Triangle.

4.2 Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων

Τα μαγνητοστατικά προβλήματα είναι προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο ως προς το χρόνο. Σε αυτή τη περίπτωση για την ένταση του μαγνητικού πεδίου H και τη μαγνητική επαγωγή B έχουμε:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.2)$$

Σύμφωνα με τη θεμελιώδη καταστατική σχέση μεταξύ των μεγεθών B και H για κάθε υλικό ισχύει:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.3)$$

Εάν το υλικό είναι μη γραμμικό όπως ο κορεσμένος σίδηρος ή οι μαγνήτες alnico, η μαγνητική διαπερατότητα μ είναι συνάρτηση του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής B :

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (4.4)$$

Η επίλυση των εξισώσεων 4.1 – 4.3 γίνεται μέσω του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού (A). Οπότε η πυκνότητα της μαγνητικής ροής B μπορεί να γραφεί συναρτήσει του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A ως εξής:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4.5)$$

Οπότε από μέσω των εξισώσεων 4.2 και 4.5 η εξίσωση 4.1 γίνεται:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (4.6)$$

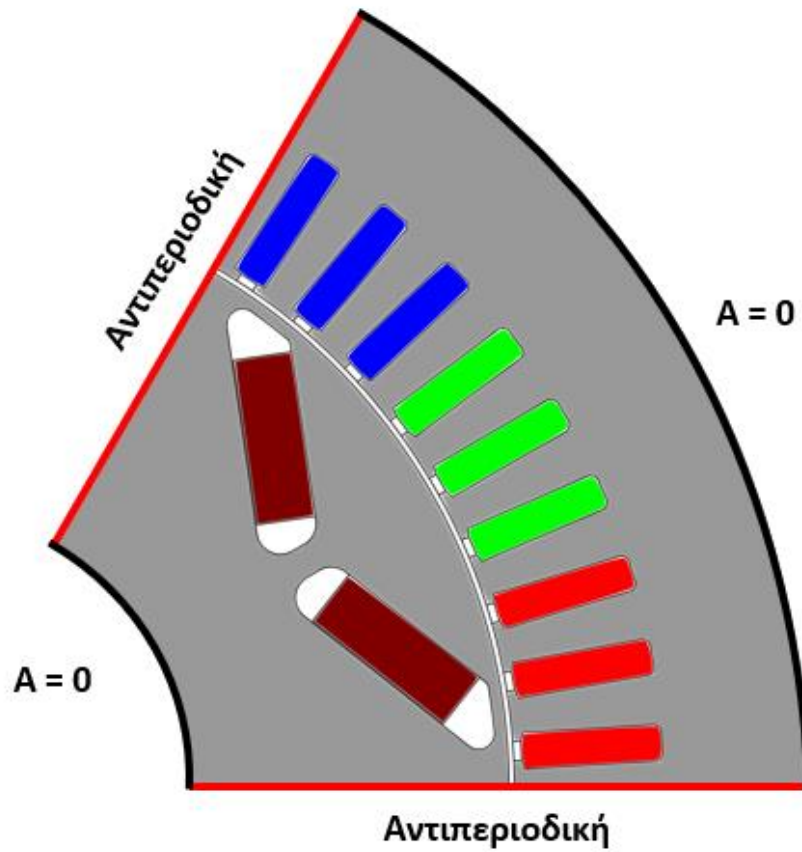
Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι αν υπολογιστεί το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A τότε η πυκνότητα της μαγνητικής ροής B και η ένταση του μαγνητικού H μπορούν να υπολογιστούν διαφορίζοντας το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A [14].

4.3 Οριακές συνθήκες

Η επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων ανάγεται σε επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων οπότε για την επίλυση τους πρέπει να ορισθούν κατάλληλες οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες κατηγοριοποιούνται ως εξής [14]:

- **Συνθήκες Dirichlet:** Οι συνθήκες Dirichlet ορίζουν την τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας. Συνήθως ορίζεται $A=0$ δηλαδή ομογενής οριακή συνθήκη. Στην περίπτωση προσομοίωσης ηλεκτρικών μηχανών η συνθήκη $A=0$ επιβάλλεται στην εξωτερική διάμετρο του στάτη και την εσωτερική διάμετρο του δρομέα. Η συνθήκη αυτή περιορίζει τη μαγνητική ροή εντός της μηχανής, οι γραμμές της μαγνητικής ροής ακολουθούν διαδρομή παράλληλη στο όριο που έχει εφαρμοστεί η συνθήκη αυτή.
- **Συνθήκες Neumann:** Οι συνθήκες αυτές ορίζουν την κάθετη παράγωγο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A κατά μήκος του ορίου. Συνήθως ορίζεται συνθήκη $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$. Η χρήση της συνθήκης αυτής επιβάλλει στις γραμμές της μαγνητικής ροής να είναι κάθετες στο όριο όπου έχει εφαρμοστεί.
- **Συνθήκες Robin:** Οι συνθήκες αυτές είναι ένα είδος συνδυασμού Dirichlet και Neumann. Καθορίζουν μια σχέση μεταξύ του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A και της κάθετης παραγώγου του πάνω στο σύνορο. Χρησιμοποιείται συχνά σε προβλήματα διάδοσης της θερμότητας ως οριακή συνθήκη σε μονωτικές επιφάνειες.
- **Περιοδικές/Αντιπεριοδικές συνθήκες:** Οι συνθήκες αυτές συνδέουν δύο όρια μεταξύ τους. Στην περίπτωση των περιοδικών συνθηκών οι τιμές του πεδίου στα δύο όρια είναι ίσες κατά μέτρο και πρόσημο ενώ στην περίπτωση των αντιπεριοδικών συνθηκών οι τιμές του πεδίου στα δύο όρια είναι ίσες κατά μέτρο αλλά αντίθετου πρόσημου. Ο τύπος αυτών οριακών συνθηκών είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στη προσομοίωση ηλεκτρικών μηχανών, οι

περιοδικές συνθήκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη προσομοίωση ενός ζεύγους πόλων ενώ οι αντιπεριοδικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη προσομοίωση ενός πόλου.



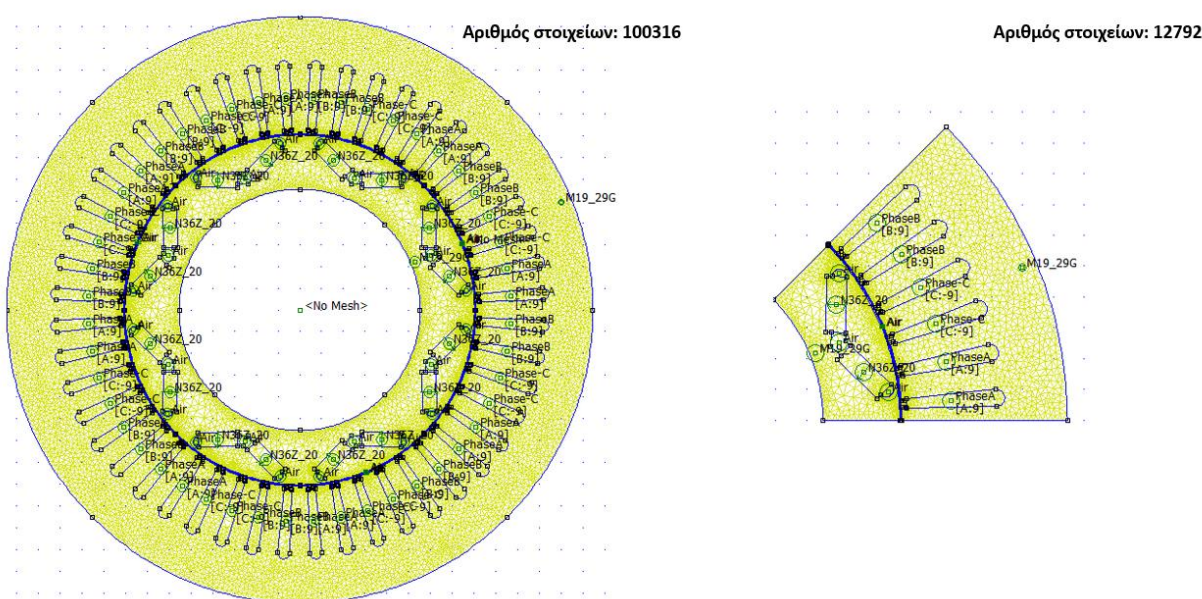
Σχήμα 4.1 Αποτύπωση οριακών συνθηκών για τη προσομοίωση τμήματος γεωμετρίας ηλεκτρικής μηχανής.

4.4 Παραμετροποιημένη σχεδίαση γεωμετρίας

Στα πλαίσια της διπλωματική εργασίας αναπτύχθηκε κώδικας MATLAB ο οποίος μέσω της διεπαφής του λογισμικού FEMM μας έδωσε τη δυνατότητα παραμετρικής σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών. Για την ελαχιστοποίηση του χρόνου προσομοίωσης κάναμε χρήση των οριακών συνθηκών που αναφέρονται παραπάνω. Καθώς οι ηλεκτρικές μηχανές είναι συμμετρικές και ειδικότερα για τη περίπτωση ηλεκτρικών μηχανών κατανεμημένου τυλίγματος η ελάχιστη απαιτούμενη γεωμετρία αναγκαία για τη πραγματοποίηση των προσομοιώσεων είναι [13],[16]:

$$\text{Ελάχιστη γεωμετρία} = \frac{1}{MKΔ(\# \text{Αυλάκων}, \# \text{Πόλων})} \quad (4.7)$$

Από τη σχέση 4.7 βλέπουμε ότι η ελάχιστη γεωμετρία είναι 1 δια το μέγιστο κοινό διαιρέτη των πόλων και των αυλάκων της ηλεκτρικής μηχανής.



Σχήμα 4.2 Σύγκριση αριθμού στοιχείων (Elements) πλήρους και ελάχιστης απαιτούμενης γεωμετρίας ηλεκτρικής μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών 48 αυλάκων 8 πόλων.

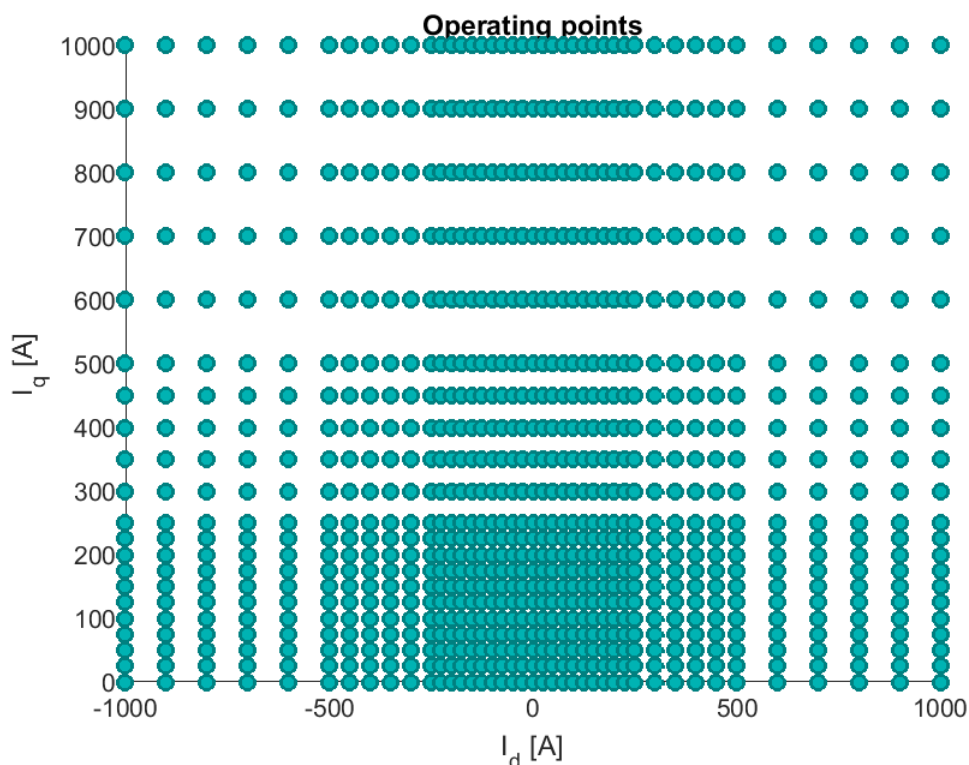
Όπως βλέπουμε από το σχήμα 4.2 χρησιμοποιώντας τις συμμετρίες της μηχανής και μέσω χρήσης αντιπεριοδικών οριακών συνθηκών μπορούμε να λύσουμε το μαγνητοστατικό πρόβλημα σε σημαντικά λιγότερο χρόνο καθώς χρειάζεται μόνο το 1/8 της γεωμετρίας το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του αριθμού των στοιχείων του πλέγματος.

4.5 Ανάλυση ηλεκτρικής μηχανής με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Αφού σχεδιαστεί παραμετρικά η ελάχιστη απαιτούμενη γεωμετρία γίνεται σειρά μαγνητοστατικών αναλύσεων οι οποίες εκτελούνται παράλληλα. Η μεθοδολογία αυτή αποσκοπεί στην εξαγωγή των χαρτών πεπλεγμένης ροής και του χάρτη ροπής της μηχανής υπό μελέτη. Η χρήση χαρτών ροής μας διευκολύνει στην αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου μια σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών. Οι χάρτες αυτοί εκφράζονται σαν συνάρτηση των ρευμάτων I_d , I_q [15].

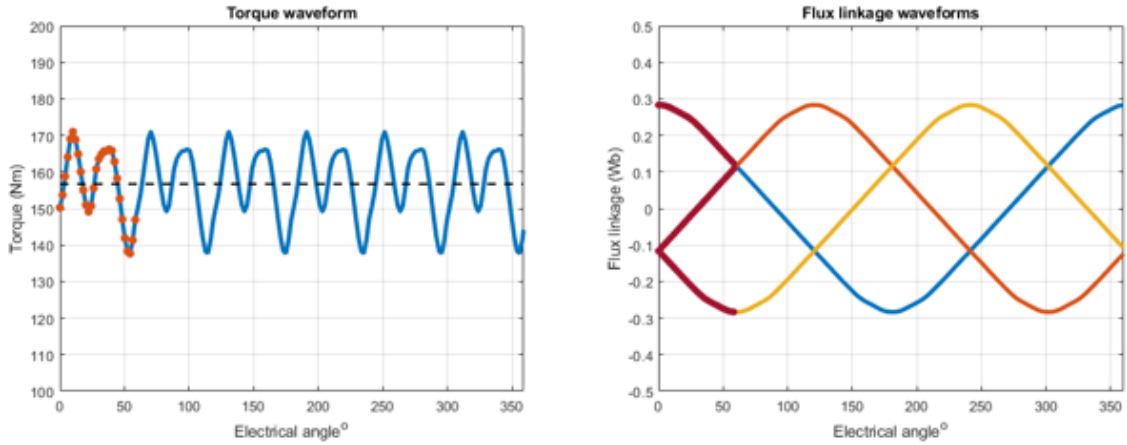
Η διαδικασία που ακολουθείται είναι:

- Ευθυγράμμιση του D άξονα του δρομέα με την A φάση, η οποία γίνεται με την εξαγωγή της πεπλεγμένης ροής της φάσης A για μια πλήρη περίοδο περιστροφής σε κατάσταση κενού φορτίου. Η γωνία που πρέπει να περιστρέψουμε το δρομέα ώστε να είναι ευθυγραμμισμένος με τη φάση A είναι ίση με τη γωνία περιστροφής στην οποία μεγιστοποιείται η πεπλεγμένη ροή της φάσης A.
- Παράλληλη εκτέλεση προσομοιώσεων για 1/6 της περιόδου για τα απαιτούμενα σημεία λειτουργίας (συνδυασμοί ρευμάτων – εσωτερικών ηλεκτρικών γωνιών μόνο για $I_q > 0$) [13],[16].



Σχήμα 4.3 Παράδειγμα σημείων λειτουργίας στο στρεφόμενο πλαίσιο DQ.

Για κάθε ένα από τα σημεία λειτουργίας εξάγουμε την παραγόμενη ροπή καθώς και τις πεπλεγμένες ροές των τριών φάσεων τις οποίες έπειτα μεταφέρουμε στο στρεφόμενο πλαίσιο d – q. Χρησιμοποιώντας μόνο το 1/6 της περιόδου μπορούμε μέσω συμμετρίας να εξάγουμε τους πλήρεις χάρτες πεπλεγμένων ροών και το χάρτη ροπής [16].



Σχήμα 4.4 Ανακατασκευή της πλήρους κυματομορφής της ροπής και των πεπλεγμένων ροών των φάσεων.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 4.4 λόγω περιοδικότητας μπορούμε να ανακατασκευάσουμε τις κυματομορφές των πεπλεγμένων ροών των φάσεων και της ροπής. Αντίστοιχα οι χάρτες των πεπλεγμένων ροών παρουσιάζουν συμμετρία ως προς το I_d οπότε εύκολα μπορούν να ανακατασκευαστούν παρότι προσομοιώσαμε μόνο τα σημεία λειτουργίας με θετικό I_q [15]. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές μπορούμε πολύ εύκολα και γρήγορα να εξάγουμε όλα τα βασικά ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη μια ηλεκτρικής μηχανής σε πολύ μικρό χρόνο.

4.6 Οργάνωση των χαρτών ροής – ροπής

Οι χάρτες ροής και ροπής οργανώνονται σε πίνακες δύο διαστάσεων ως εξής [15]:

$$I_d = \begin{bmatrix} i_{d,1} & \dots & i_{d,n_d} \\ \dots & \dots & \dots \\ i_{d,1} & \dots & i_{d,n_d} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

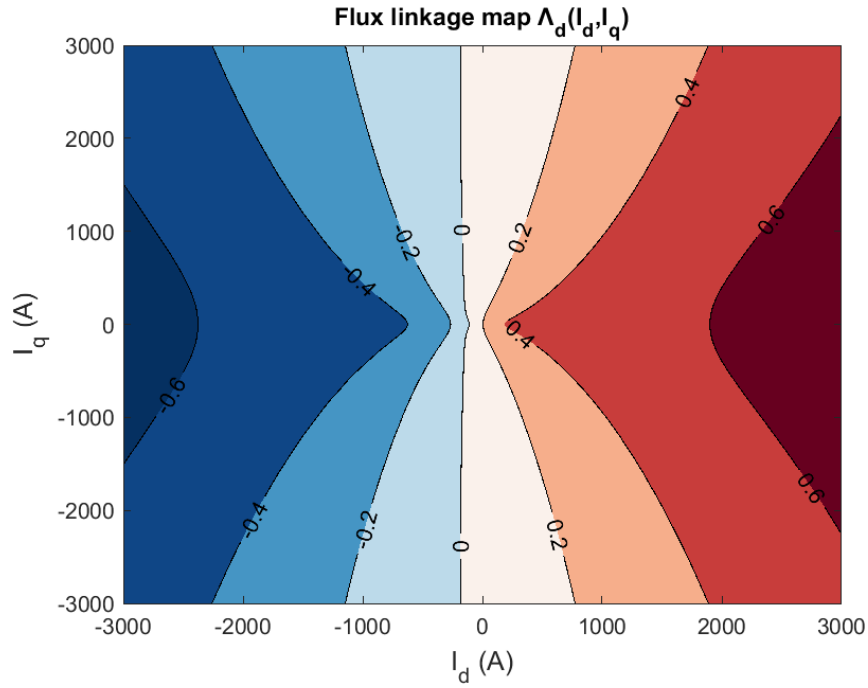
$$I_q = \begin{bmatrix} i_{q,1} & \dots & i_{q,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ i_{q,n_q} & \dots & i_{q,n_q} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\Lambda_d = \begin{bmatrix} \lambda_d(i_{d,1}, i_{q,1}) & \dots & \lambda_d(i_{d,n_d}, i_{q,1}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \lambda_d(i_{d,1}, i_{q,n_q}) & \dots & \lambda_d(i_{d,n_d}, i_{q,n_q}) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

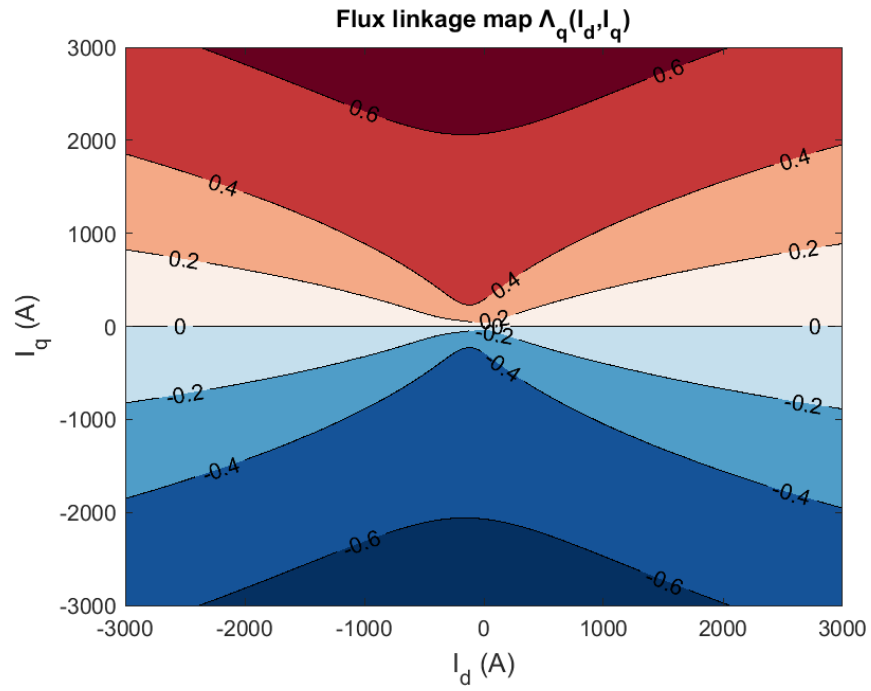
$$\Lambda_q = \begin{bmatrix} \lambda_q(i_{d,1}, i_{q,1}) & \dots & \lambda_q(i_{d,n_d}, i_{q,1}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \lambda_q(i_{d,1}, i_{q,n_q}) & \dots & \lambda_q(i_{d,n_d}, i_{q,n_q}) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$T_{em} = \begin{bmatrix} \tau(i_{d,1}, i_{q,1}) & \dots & \tau(i_{d,n_d}, i_{q,1}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \tau(i_{d,1}, i_{q,n_q}) & \dots & \tau(i_{d,n_d}, i_{q,n_q}) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

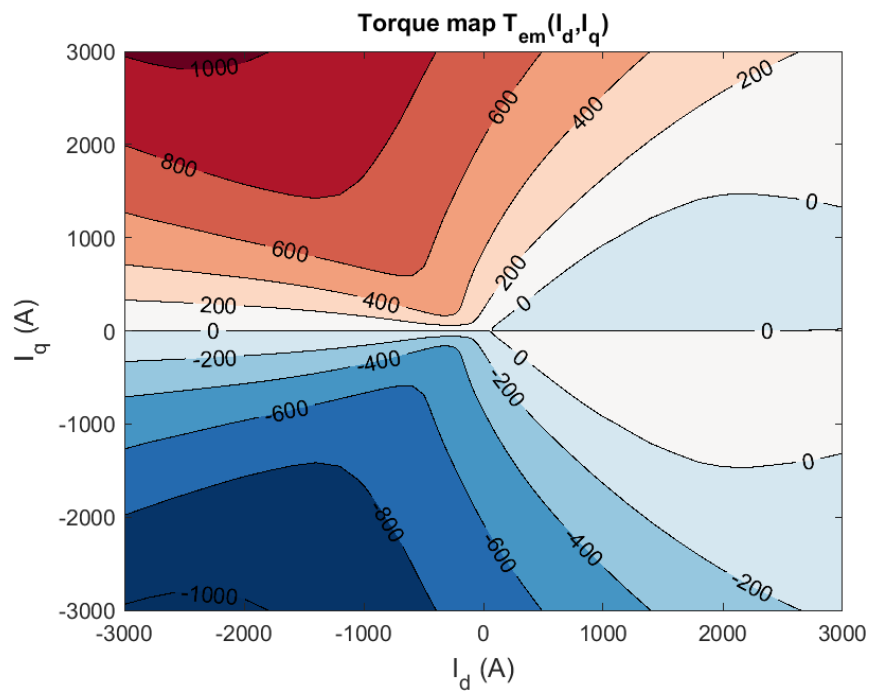
Επιπλέον κατασκευάζονται και οι αντίστροφοι χάρτες $I_d(\lambda_d, \lambda_q)$, $I_q(\lambda_d, \lambda_q)$ οι οποίοι είναι χρήσιμοι για την επίλυση δυναμικών μοντέλων όπου οι πεπλεγμένες ροές λ_d , λ_q είναι μεταβλητές κατάστασης, όπως για παράδειγμα η ανάλυση σφαλμάτων και η εξαγωγή της χαρακτηριστικής επίδοσης ροπής – ταχύτητας.



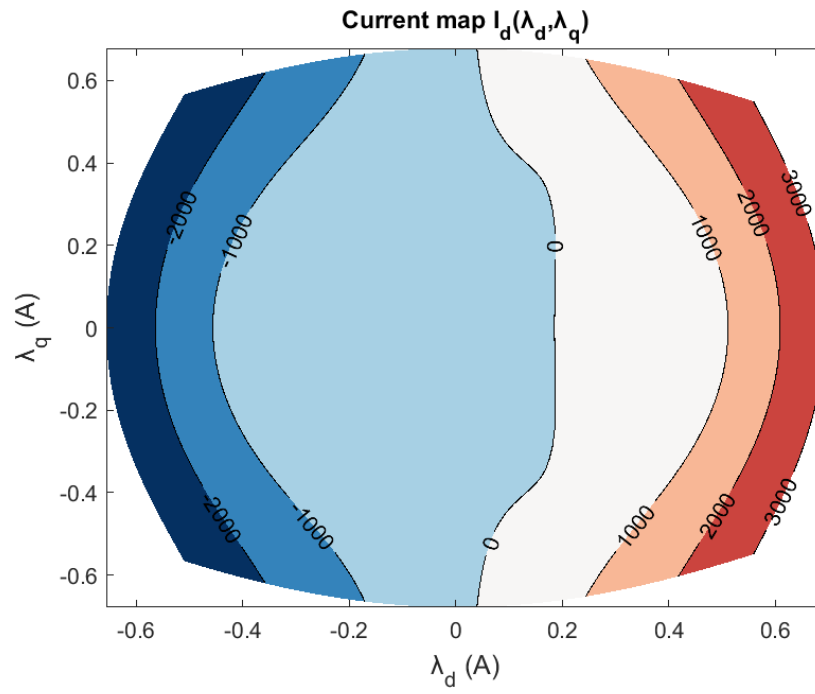
Σχήμα 4.5 Χάρτης πεπλεγμένης ροής ορθού άξονα (d).



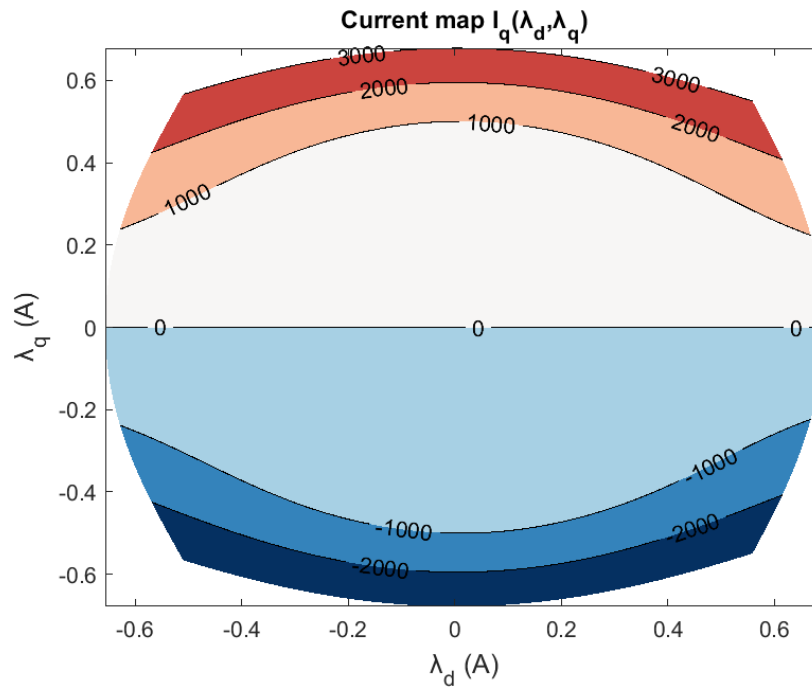
Σχήμα 4.6 Χάρτης πεπλεγμένης ροής κάθετον άξονα (q).



Σχήμα 4.7 Χάρτης ροπής.



Σχήμα 4.8 Αντίστροφος χάρτης, ρεύμα ορθού άξονα (d) ως προς τις πεπλεγμένες ροές



Σχήμα 4.9 Αντίστροφος χάρτης, ρεύμα κάθετου άξονα (q) ως προς τις πεπλεγμένες ροές

4.7 Εξαγωγή χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας

Για την εξαγωγή της χαρακτηριστικής ροπής - ταχύτητας της μηχανής είναι απαραίτητο να θέσουμε όρια τάσης και ρεύματος καθώς θεωρούμε ότι οδηγείται από αντιστροφέα [15]. Αν θεωρήσουμε ότι ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί μέθοδο διαμόρφωσης SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation), τότε η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση είναι:

$$V_{max} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (4.13)$$

Επίσης θεωρούμε μέγιστο ρεύμα I_{max} το ρεύμα το οποίο μπορεί να εφαρμόσει ο αντιστροφέας. Για να εξάγουμε αρχικά τη καμπύλη ροπής – ταχύτητας πρέπει να λύσουμε ένα πρόβλημα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με κριτήριο βελτιστοποίησης την μεγιστοποίηση της ροπής:

$$\text{maximize}(\text{Torque}) \quad (4.14)$$

Και περιορισμούς:

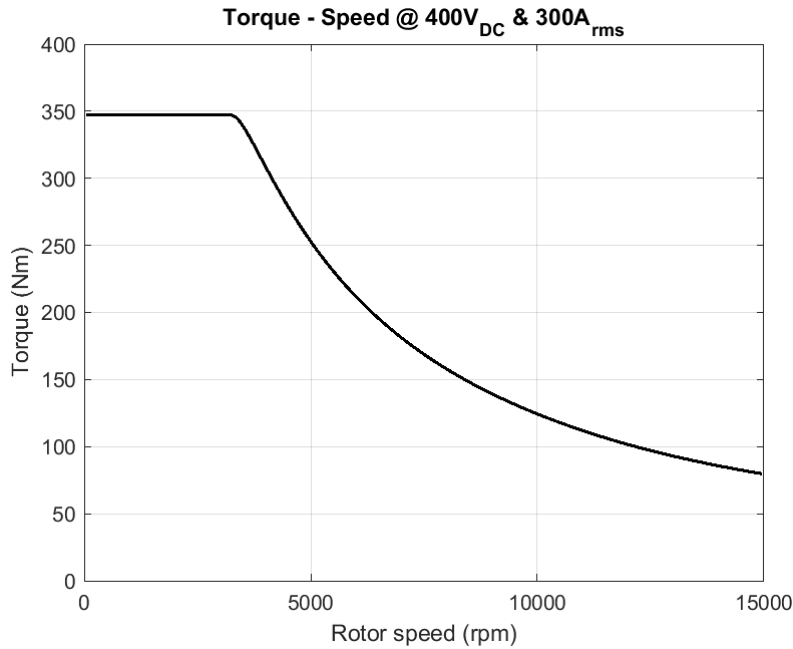
$$V_s \leq V_{max} \quad (4.15)$$

$$I_s \leq I_{max} \quad (4.16)$$

Όπου V_s και I_s είναι η τάση ακροδεκτών της μηχανής και το μέγιστο φασικό ρεύμα.

$$V_s = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (4.17)$$

$$I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (4.18)$$



Σχήμα 4.10 Παράδειγμα χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας.

Αφού υπολογίσουμε τη χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας μπορούμε να βρούμε όλα τους συνδυασμούς ρευμάτων I_d , I_q για κάθε ροπή και κάθε ταχύτητα. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο Μέγιστης ροπής ανά ρεύμα (MTPA, Maximum torque per ampere). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που πρέπει να λύσουμε τώρα έχει τα παρακάτω κριτήρια και περιορισμούς:

Κριτήριο βελτιστοποίησης :

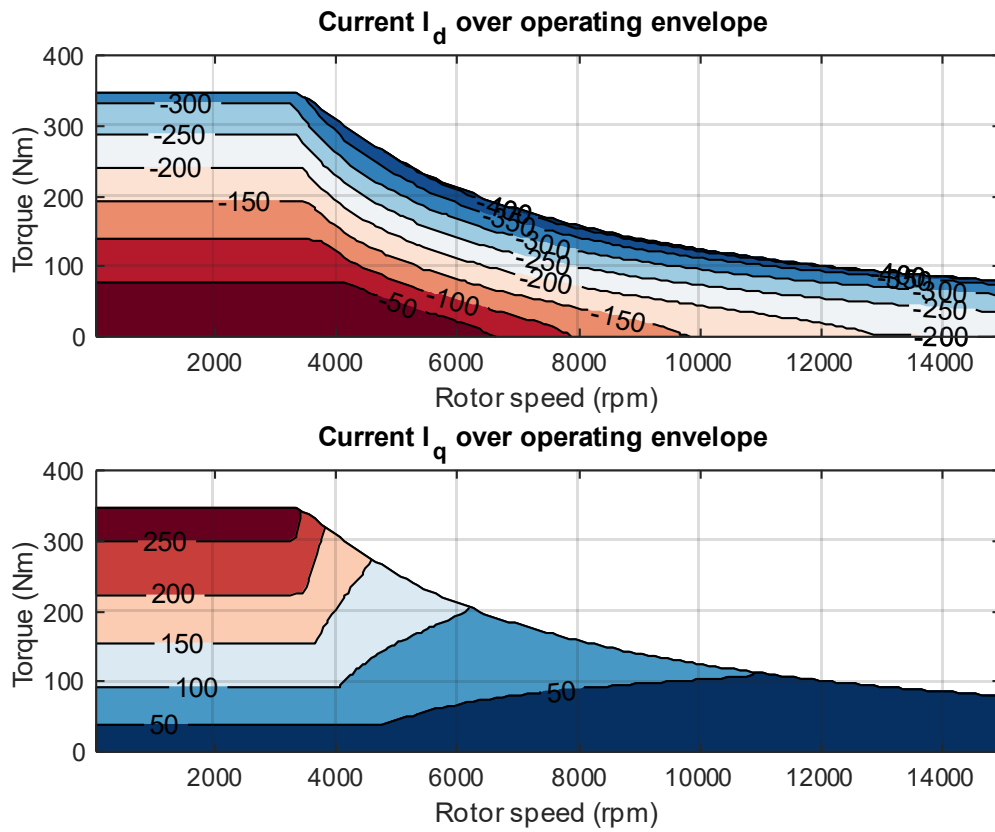
$$\text{minimize}(I_s) \quad (4.19)$$

Και περιορισμούς:

$$T = T_{\text{requested}} \quad (4.20)$$

$$V_s \leq V_{\text{max}} \quad (4.21)$$

$$I_s \leq I_{\text{max}} \quad (4.22)$$



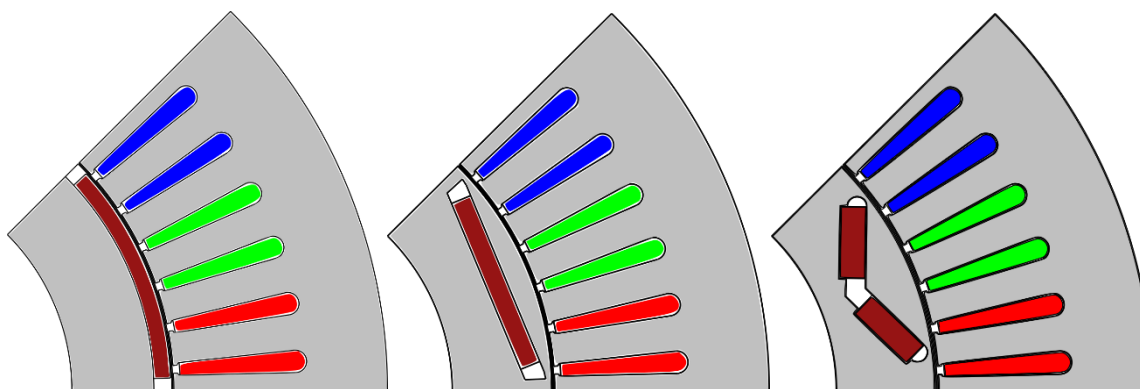
Σχήμα 4.11 Παράδειγμα χαρτών ρευμάτων I_d, I_q για κάθε σημείο λειτουργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΛΕΤΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

5.1 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών υπό μελέτη

Στο παρόν κεφάλαιο, θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά τριών σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών κατά τη διάρκεια συμμετρικών σφαλμάτων. Οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών υπό μελέτη βασίζονται σε κινητήρα εμπορικού οχήματος [17],[18],[19]. Για τους σκοπούς της μελέτης, θεωρήσαμε σταθερό στάτη και υλοποιήσαμε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες δρομέα, ένα δρομέα επιφανειακών μονίμων μαγνητών και δύο δρομείς εσωτερικών μονίμων μαγνητών. Η προσομοίωση των δρομέων αυτών έγινε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μέσω των προσομοιώσεων αυτών οι οποίες έγιναν βάσει των μεθοδολογιών που περιγράφονται στο «Κεφάλαιο 4» εξήχθησαν χάρτες πεπλεγμένης ροής και ροπής για κάθε τοπολογία δρομέα. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους χάρτες, μπορέσαμε να αξιολογήσουμε την επίδοση της κάθε μηχανής και να προβούμε σε λεπτομερή ανάλυση των πιθανών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη λειτουργία τους. Οι δρομείς έχουν σχεδιαστεί ώστε να έχουν την ίδια μάζα μαγνήτη και οι γεωμετρίες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



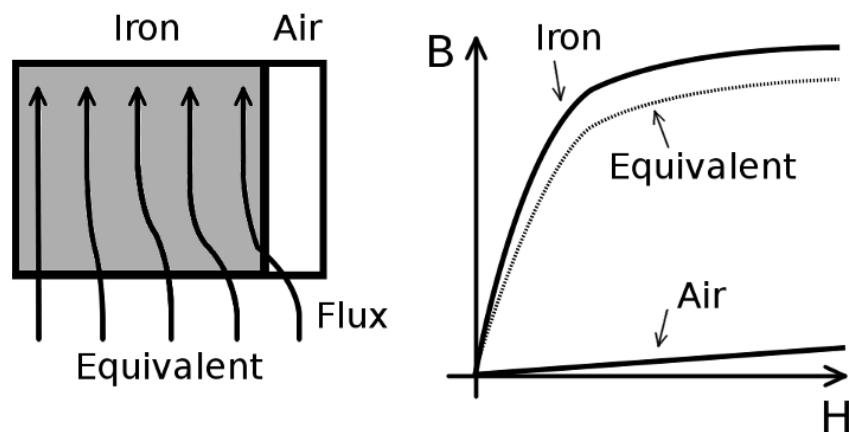
Σχήμα 5.1 Οι γεωμετρίες των τριών μηχανών που προσομοιώθηκαν.

Οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι των παραπάνω μηχανών και τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον πίνακα 5.1.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	
Εξωτερική ακτίνα στάτη (R_{SO})	134.62 mm
Εσωτερική ακτίνα στάτη (R_{SI})	80.96 mm
Εξωτερική ακτίνα δρομέα (R_{RO})	80.19 mm
Εσωτερική ακτίνα δρομέα (R_{RI})	55.32 mm
Μήκος διακένου (L_{airgap})	0.77 mm
Ενεργό μήκος	83.82 mm
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Πόλοι	8
Αύλακες	48
Αριθμός ενεργών ελιγμάτων ανά φάση	72

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά και γεωμετρικές παράμετροι των υπό μελέτη μηχανών.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι μαγνητική λαμαρίνα πάχους 0.36mm **M19-29G** και μαγνήτες νεοδυμίου **N36Z**. Για τη μοντελοποίηση της επίδρασης του συντελεστή ελασματοποίησης (stacking factor) χρησιμοποιήσαμε την παρακάτω μέθοδο [5],[6].



Σχήμα 5.2 Επίδραση του συντελεστή ελασματοποίησης στη καμπύλη μαγνήτισης μαγνητικής λαμαρίνας [5].

Σύμφωνα με το σχήμα 5.2, και εισάγοντας τη παρακάτω σχέση μπορούμε να εξάγουμε ένα συντελεστή ελασματοποίησης k_{st} (stacking factor) όπου l_{iron} το πραγματικό πάχος σιδήρου και $l_{iron} + l_{air}$ το συνολικό πάχος της μαγνητικής λαμαρίνας :

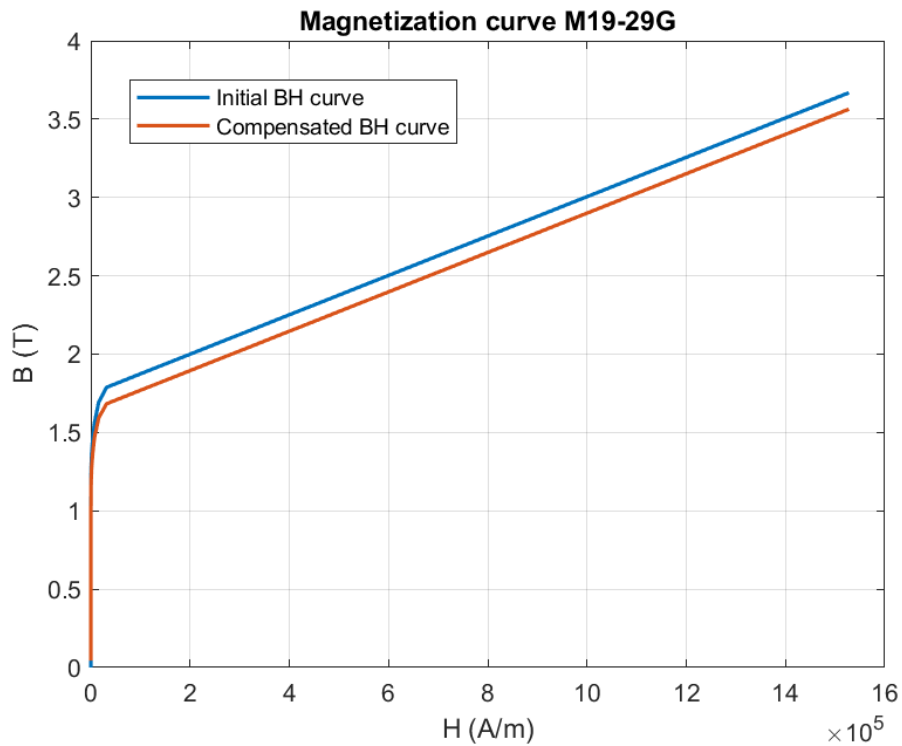
$$k_{st} = \frac{l_{iron}}{l_{iron} + l_{air}} \quad (5.1)$$

Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση του συντελεστή ελασματοποίησης δημιουργούμε ένα ισοδύναμο ομογενές σιδηρομαγνητικό υλικό μέσω προσαρμογής της μαγνητικής διαπερατότητας του.

$$\mu_{eq} = k_{st}\mu_{iron} + (1 - k_{st})\mu_0 \quad (5.2)$$

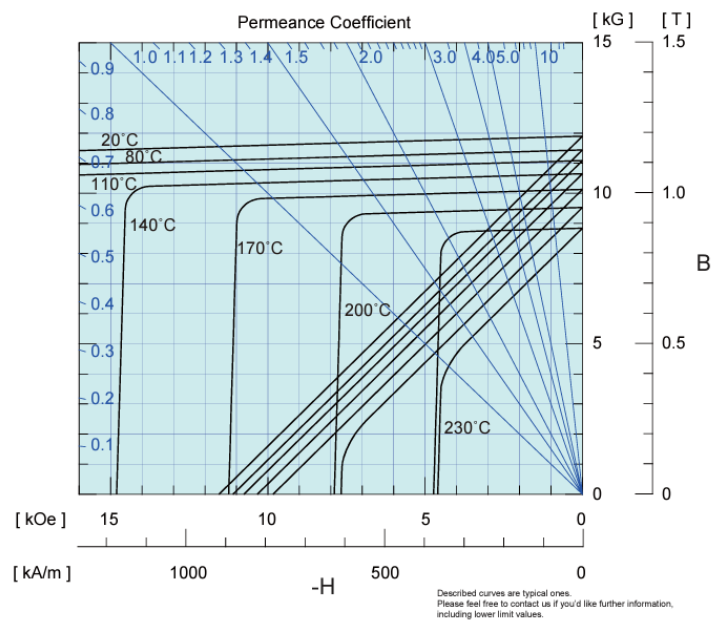
Οπότε εφαρμόζοντας τα παραπάνω στη σχέση που ακολουθεί και λύνοντας ως προς B_{eq} μπορούμε να προσαρμόσουμε την καμπύλη μαγνήτισης ως εξής:

$$B_{iron} = \frac{\mu_{iron}}{\mu_{eq}} B_{eq} \quad (5.3)$$



Σχήμα 5.3 Τροποποιημένη καμπύλη μαγνήτισης M19-29G για συντελεστή ελασματοποίησης 0.94.

Αντίστοιχα για οι B – H καμπύλες για τους μαγνήτες νεοδυμίου **N36Z** από το datasheet φαίνονται στο σχήμα 5.4



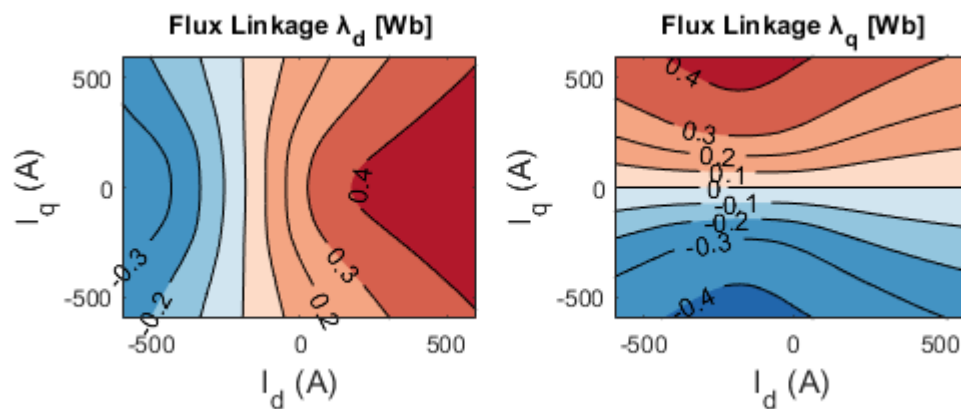
Σχήμα 5.4 Καμπύλες BH για τους μαγνήτες νεοδυμίου N36Z [20].

5.2 Ανάλυση σφαλμάτων

Για τις παρακάτω μελέτες οι μαγνητοστατικές προσομοιώσεις για την εξαγωγή των χαρτών πεπλεγμένης ροής και του χάρτη ροπής έγιναν για ρεύματα ορθού (d) και κάθετου (q) άξονα από -600A έως 600A, για την εξαγωγή των καμπυλών ροπής – ταχύτητας θεωρήθηκε $V_{DC} = 400V$ και ονομαστικό ρεύμα $I_{nom} = 100A_{rms}$.

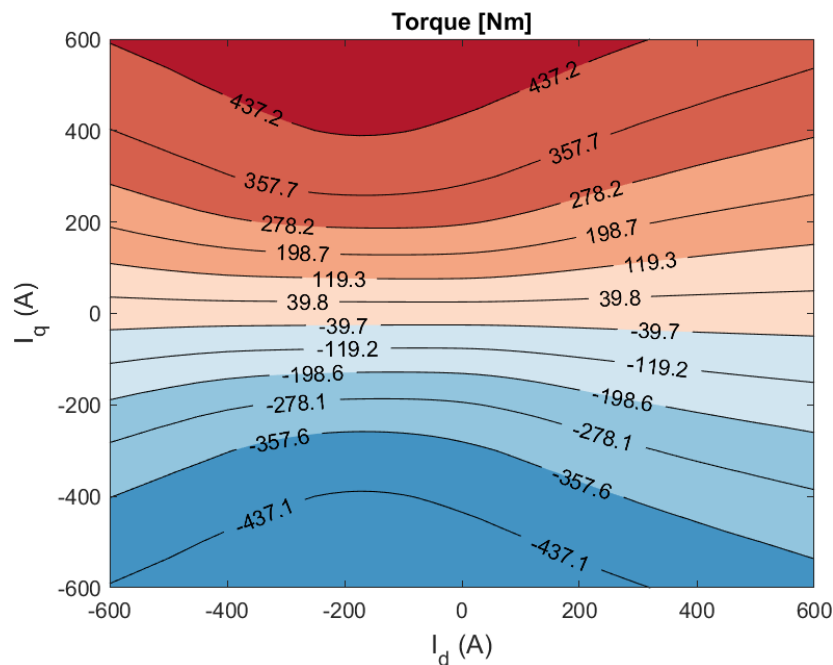
5.2.1 Ανάλυση σφαλμάτων ηλεκτρικής μηχανής επιφανειακών μαγνητών

Βάση των παραπάνω εξήγαμε τους χάρτες πεπλεγμένης ροής για τον ορθό και κάθετο άξονα οι οποίοι φαίνονται παρακάτω:



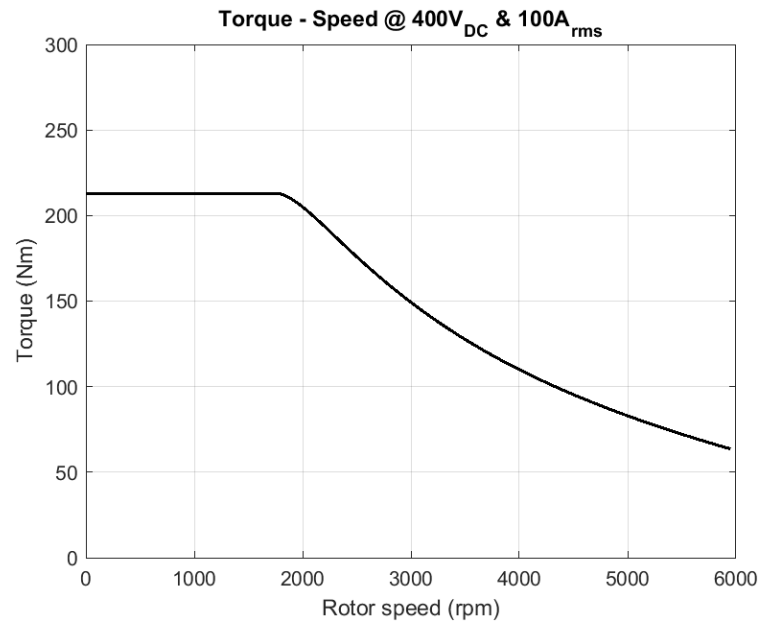
Σχήμα 5.5 Χάρτες πεπλεγμένης ροής λ_d και λ_q της μηχανής επιφανειακών μαγνητών.

Αντίστοιχα ο χάρτης ροπής για είναι:



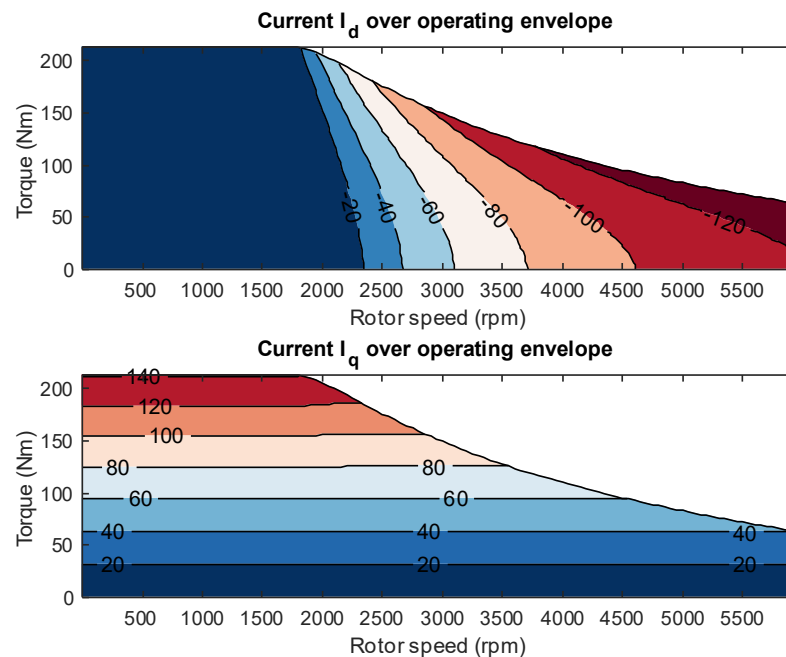
Σχήμα 5.6 Χάρτης ροπής της μηχανής επιφανειακών μαγνητών.

Επιβάλλοντας $V_{DC} = 400V$ και $I_{nom} = 100A_{rms}$ η καμπύλη Ροπής - Ταχύτητας είναι η ακόλουθη:



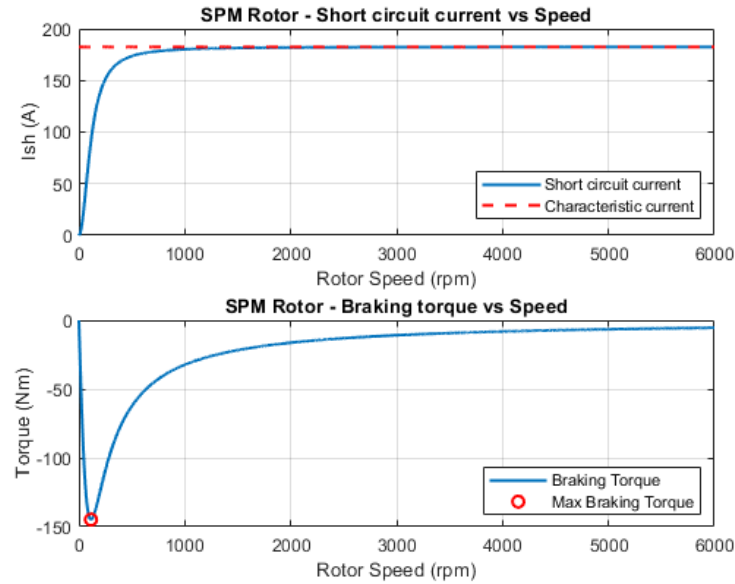
Σχήμα 5.7 Καμπύλη Ροπής – Ταχύτητας της μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών.

Εφαρμόζοντας στρατηγική ελέγχου μέγιστης ροπής ανά αμπέρ (MTPA) εξάγουμε τους χάρτες ρεύματος I_d , I_q για κάθε σημείο λειτουργίας.

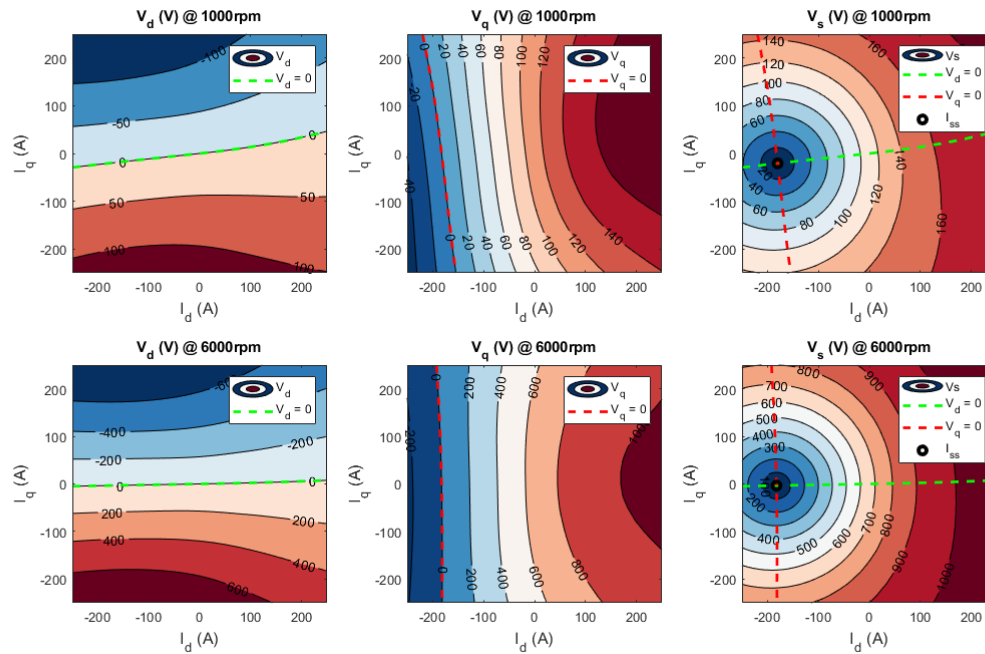


Σχήμα 5.8 Ρεύματα I_d και I_q για κάθε σημείο λειτουργίας της μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών

Αρχικά θα μελετήσουμε τα σφάλματα μόνιμης κατάστασης για τη μηχανή επιφανειακών μαγνητών ξεκινώντας από το τριφασικό βραχυκύκλωμα ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράψαμε στο «Κεφάλαιο 3». Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τις καμπύλες ροπής πέδησης και ρεύματος βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης.



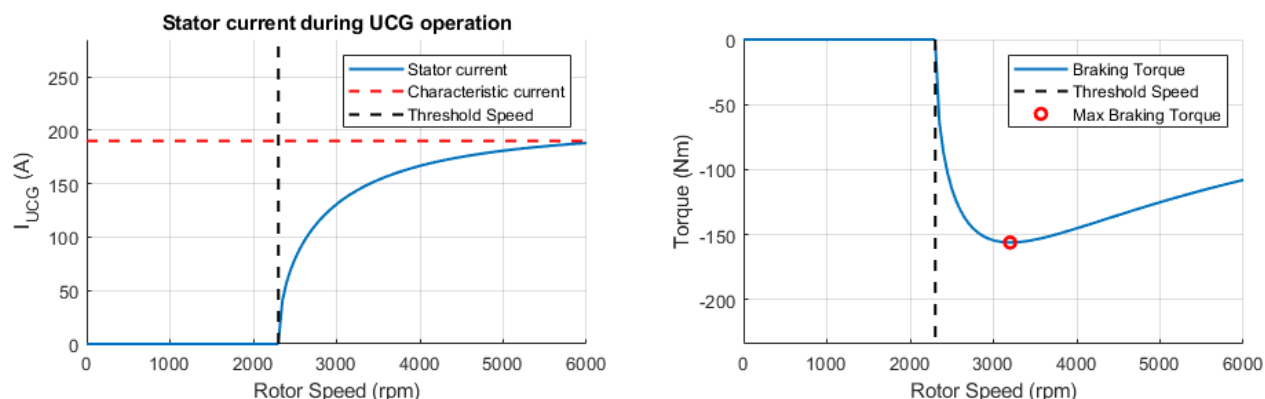
Σχήμα 5.9 Καμπύλες ροπής πέδησης και ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς ταχύτητα δρομέα.



Σχήμα 5.10 Προσδιορισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης για 1000 rpm και 6000 rpm.

Από το Σχήμα 5.9 παρατηρούμε ότι η μηχανή μονίμων μαγνητών εμφανίζει μέγιστη ροπή πέδησης στα 114 rpm και η τιμή αυτής είναι 144.8 Nm. Αντίστοιχα παρατηρούμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνει με τη ταχύτητα και συγκλίνει στο χαρακτηριστικό ρεύμα που για τη συγκεκριμένη μηχανή έχει πλάτος 182.5 A_{peak}. Στο Σχήμα 5.10 βλέπουμε ενδεικτικά τον προσδιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα κορεσμού για 1000 rpm και 6000 rpm.

Για το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης (UCG) εφαρμόσαμε το μοντέλο μόνιμης κατάστασης όπως αυτό έχει αναλυθεί στο «Κεφάλαιο 3» για το οποίο θεωρήσαμε ακόρεστη μηχανή. Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τη συμπεριφορά της μηχανής για σφάλμα UCG σε μόνιμη κατάσταση για όλο το εύρος ταχυτήτων που μπορεί να λειτουργήσει.

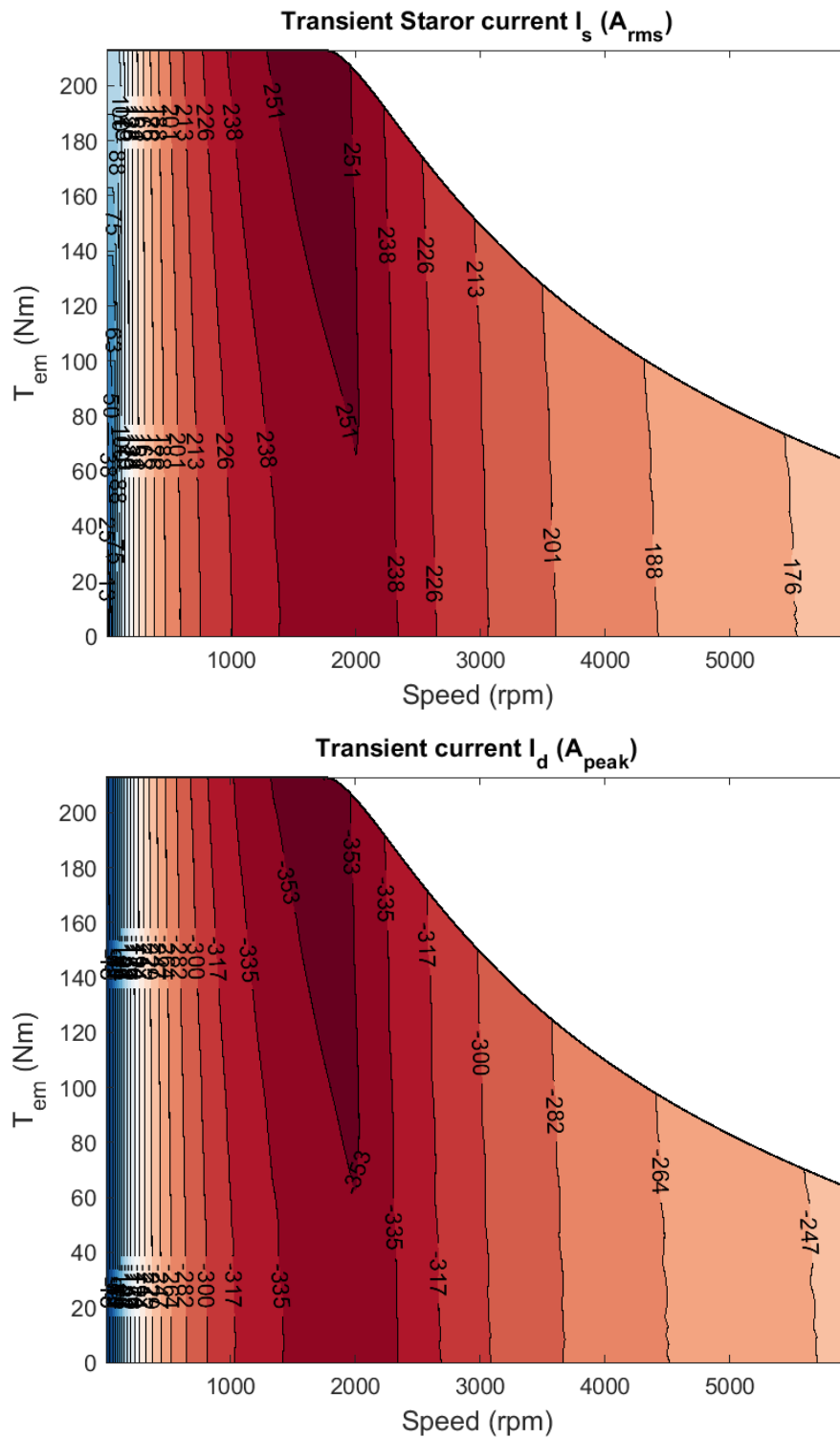


Σχήμα 5.11 Καμπύλες Ρεύματος σφάλματος UCG – Ταχύτητας και Ροπής πέδησης – Ταχύτητας.

Από το Σχήμα 5.11 παρατηρούμε ότι μηχανή εμφανίζει μέγιστη ροπή πέδησης 156.2 Nm σε ταχύτητα περιστροφής 3200 rpm, αντίστοιχα για το ρεύμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει η ταχύτητας περιστροφής συγκλίνει προς το χαρακτηριστικό ρεύμα. Όσον αφορά τις ταχύτητες εκκίνησης και σβέσης του σφάλματος βλέπουμε ότι συμπίπτουν και είναι ίσες με 2302 rpm.

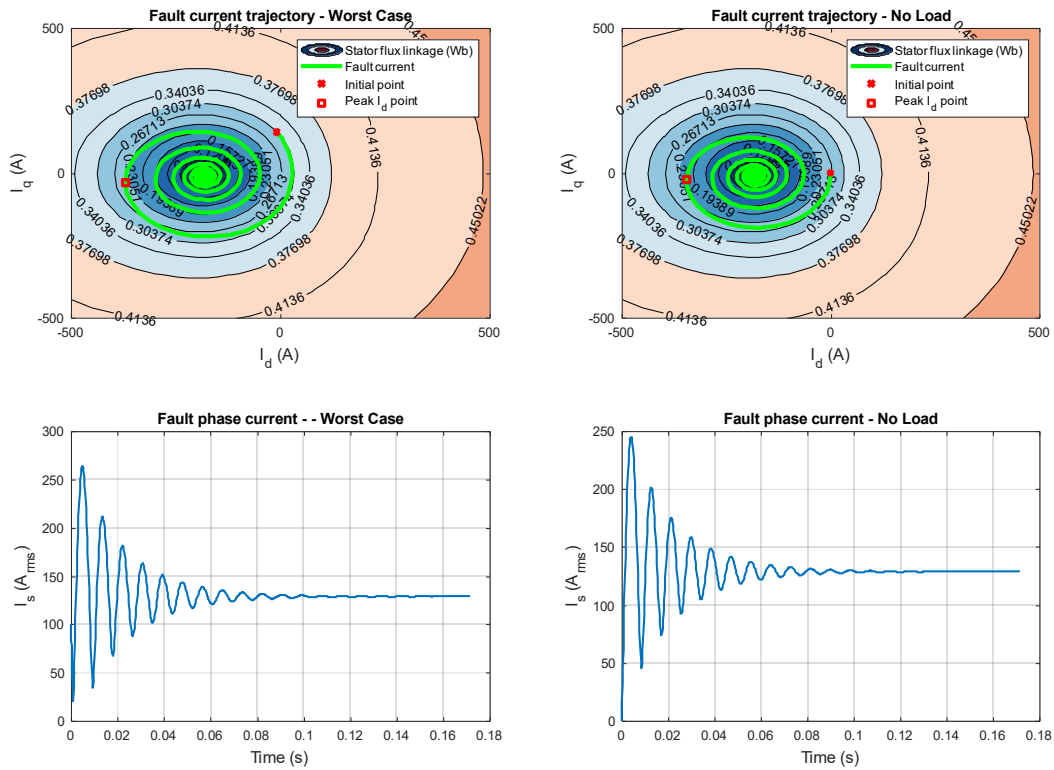
Για να αναλύσουμε τη συμπεριφορά της μηχανής κατά τη διάρκεια ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος σε μεταβατική κατάσταση, χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο μεταβατικής κατάστασης που παρουσιάστηκε και αναλύθηκε εκτενώς στο «Κεφάλαιο 3». Το εν λόγω μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα του κορεσμού πράγμα πολύ σημαντικό για τη σωστή πρόβλεψη των μεταβατικών ρευμάτων σφάλματος. Χρησιμοποιώντας τους χάρτες του Σχήματος 5.8 για την επίτευξη αυτής της ανάλυσης, επιλύσαμε το συστημάτων διαφορικών εξισώσεων στο πλαίσιο d – q και προσομοιώσαμε τα μεταβατικά ρεύματα βραχυκύκλωσης καθώς και τη συνιστώσα ορθού άξονα του ρεύματος για κάθε σημείο λειτουργίας. Το ρεύμα I_d αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα και η αποτίμηση του είναι πολύ σημαντική, καθώς μέσω αυτού μπορούμε να διαπιστώσουμε την ανθεκτικότητα μιας ηλεκτρικής μηχανής στην απομαγνήτιση κατά τη διάρκεια ενός ενδεχόμενου σφάλματος.

Στα σχήματα που ακολουθούν βλέπουμε τους χάρτες του μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης καθώς και της d συνιστώσας του για κάθε σημείο λειτουργίας της μηχανής.



Σχήμα 5.12 Χάρτες μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και d συνιστώσας για κάθε σημείο λειτουργίας.

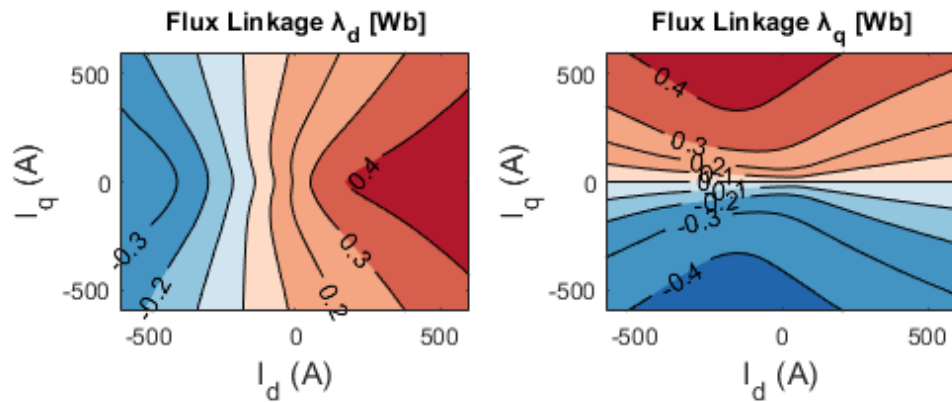
Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 5.12 η μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών εμφανίζει μεγάλα μεταβατικά ρεύματα βραχυκύκλωσης. Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται στα 1750 rpm και είναι ίσο με $-264.5 \text{ A}_{\text{rms}}$, αντίστοιχα το μέγιστο ρεύμα που εμφανίζεται στον D άξονα είναι $370.22 \text{ A}_{\text{peak}}$. Επιπλέον παρατηρούμε ότι για την ίδια ταχύτητα ακόμα και αν λειτουργεί σε κενό φορτίο τα μεταβατικά ρεύματα βραχυκύκλωσης παραμένουν σε υψηλά επίπεδα πράγμα το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 5.13 όπου δείχνουμε τη τροχιά του ρεύματος βραχυκύκλωσης και την εξέλιξη του στο χρόνο για τη χειρότερη δυνατή περίπτωση και για τη περίπτωση κενού φορτίου.



Σχήμα 5.13 Τροχιά μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και διαγράμματα εξέλιξης τους στο χρόνο.

5.2.2 Ανάλυση σφαλμάτων ηλεκτρικής μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών τύπου I

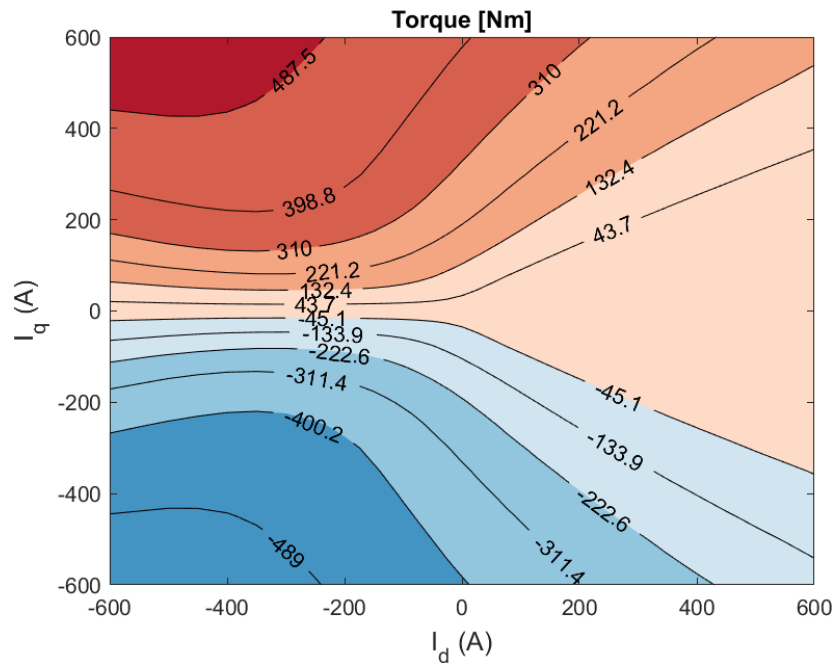
Όπως και στο «Υποκεφάλαιο 5.2.1» εξήγαμε τους χάρτες πεπλεγμένης ροής για τον ορθό και κάθετο άξονα οι οποίοι φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα

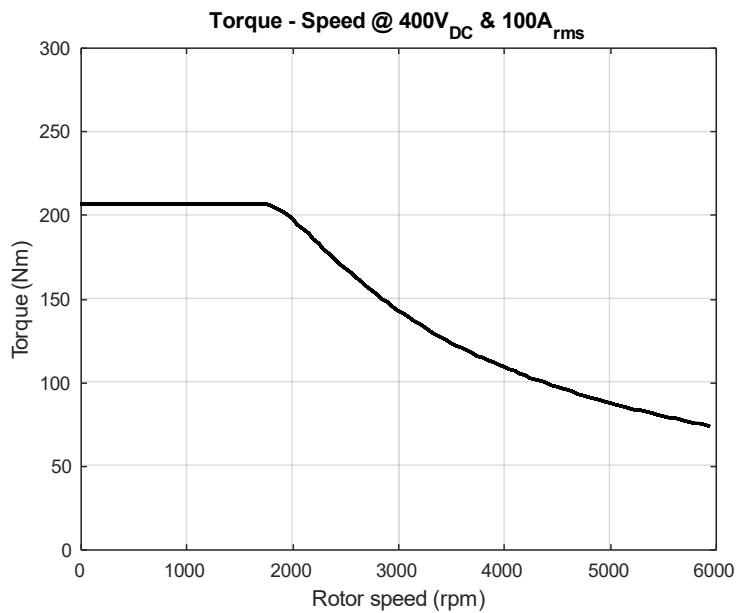
5.14 Χάρτες πεπλεγμένης ροής λ_d και λ_q εσωτερικών μονίμων μαγνητών I.

Αντίστοιχα ο χάρτης ροπής για είναι:



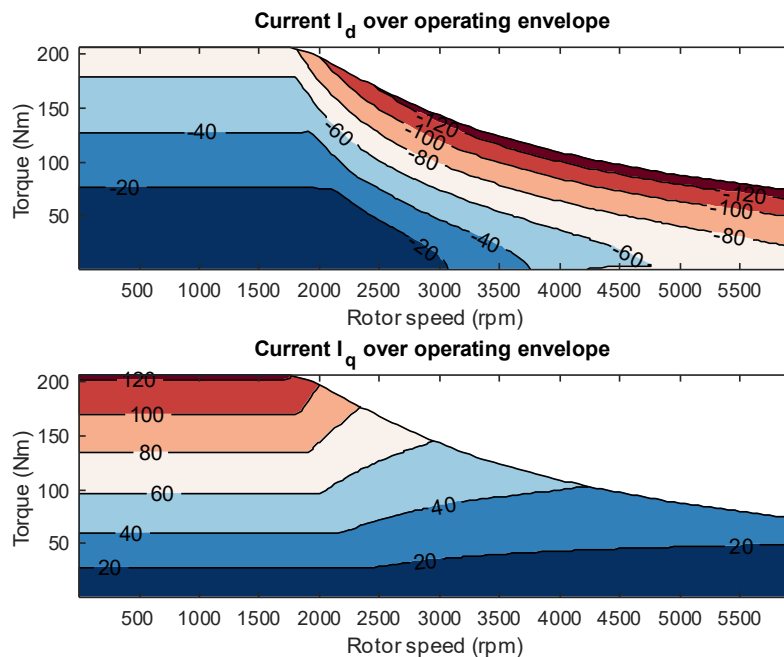
Σχήμα 5.15 Χάρτης ροπής της μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών I.

Επιβάλλοντας $V_{DC} = 400V$ και $I_{nom} = 100A_{rms}$ οι καμπύλη Ροπής - Ταχύτητας είναι η ακόλουθη:



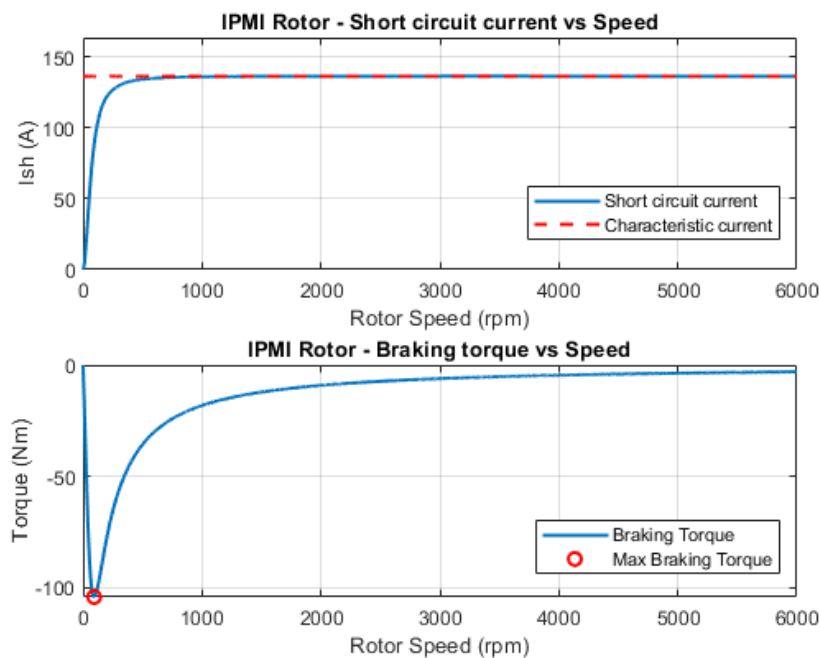
Σχήμα 5.16 Καμπύλη Ροπής – Ταχύτητας της μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών I.

Εφαρμόζοντας στρατηγική ελέγχου μέγιστης ροπής ανά αμπέρ (MTPA) εξάγουμε τους χάρτες ρεύματος I_d , I_q για κάθε σημείο λειτουργίας.

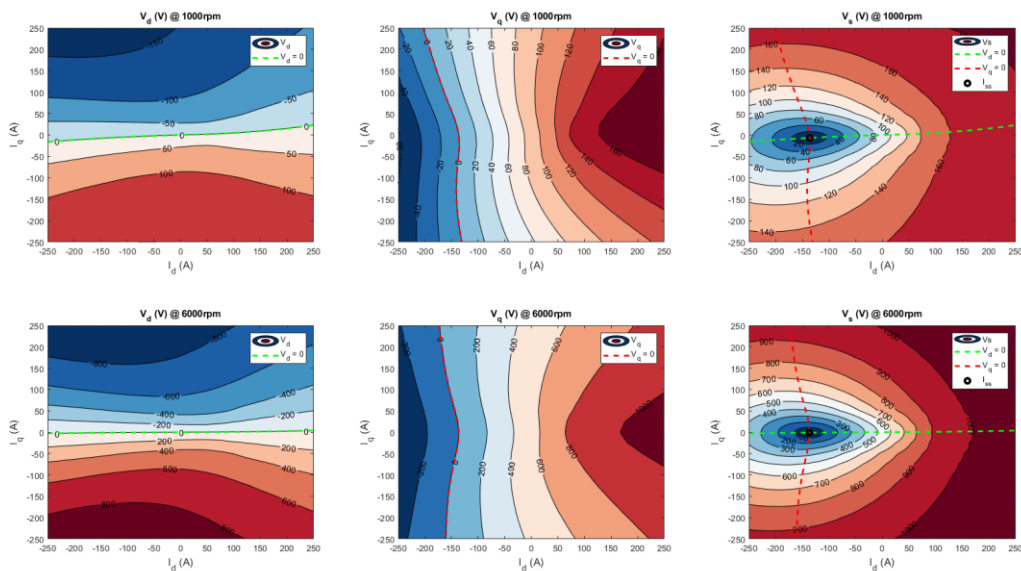


Σχήμα 5.17 Ρεύματα I_d και I_q για κάθε σημείο λειτουργίας της μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών I.

Με τη μεθοδολογία που ακολουθήσαμε για τη μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών βλέπουμε στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τις καμπύλες ροπής πέδησης και ρεύματος βραχυκύκλωσης κατάστασης.



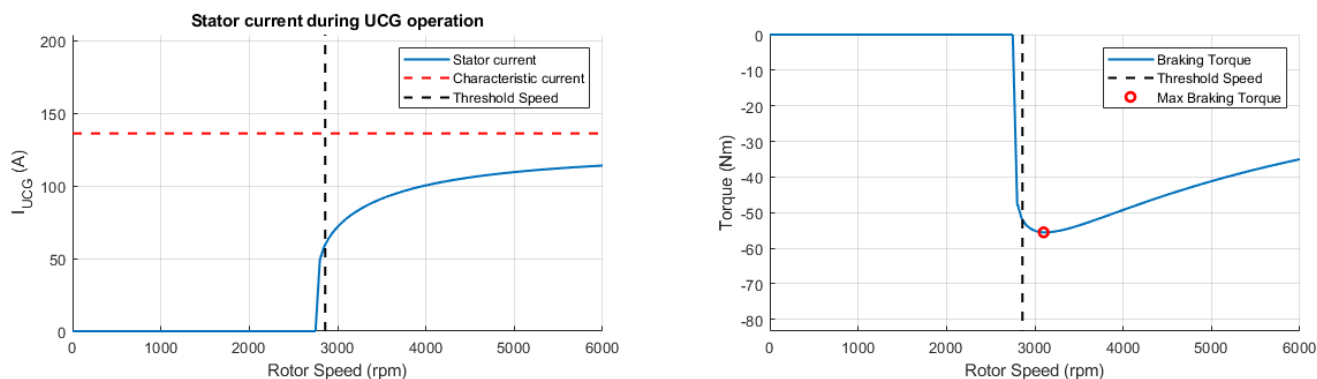
Σχήμα 5.18 Καμπύλες ροπής πέδησης και ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς ταχύτητα δρομέα.



Σχήμα 5.19 Προσδιορισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης για 1000 rpm και 6000 rpm.

Από το Σχήμα 5.19 παρατηρούμε ότι η μηχανή μονίμων μαγνητών εμφανίζει μέγιστη ροπή πέδησης στα 93 rpm και η τιμή αυτής είναι 104.1 Nm. Αντίστοιχα παρατηρούμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνει με τη ταχύτητα και συγκλίνει στο χαρακτηριστικό ρεύμα που για τη συγκεκριμένη μηχανή έχει πλάτος 136.2 A_{peak}. Στο Σχήμα 5.19 βλέπουμε τον προσδιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης μόνιμης για 1000 rpm και 6000 rpm.

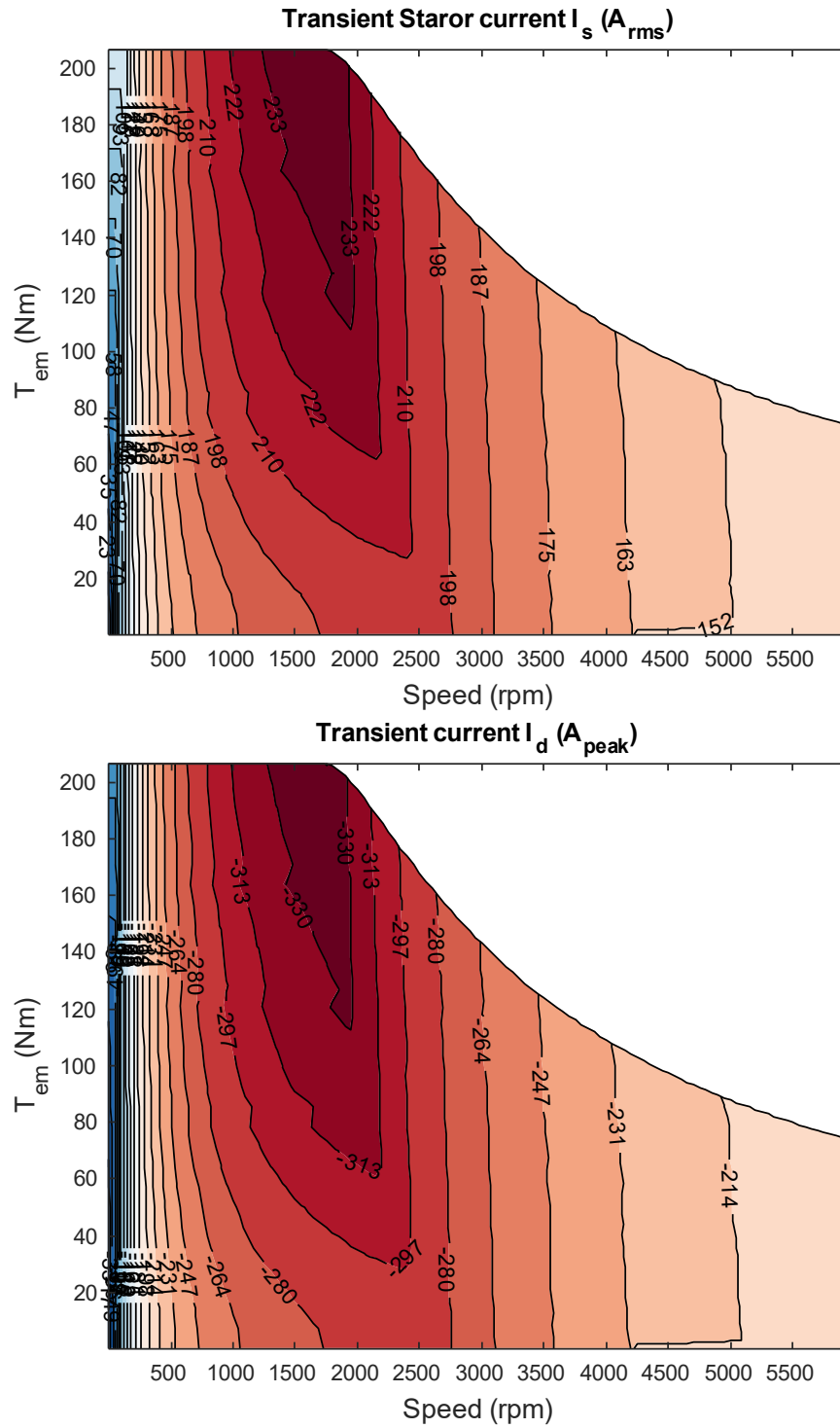
Για το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης (UCG) εφαρμόσαμε το μοντέλο μόνιμης κατάστασης και θεωρήσαμε ακόρεστη μηχανή. Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τη συμπεριφορά της μηχανής για σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης σε μόνιμη κατάσταση για όλο το εύρος ταχυτήτων που μπορεί να λειτουργήσει.



Σχήμα 5.20 Καμπύλες Ρεύματος σφάλματος UCG – Ταχύτητας και Ροπής πέδησης – Ταχύτητας.

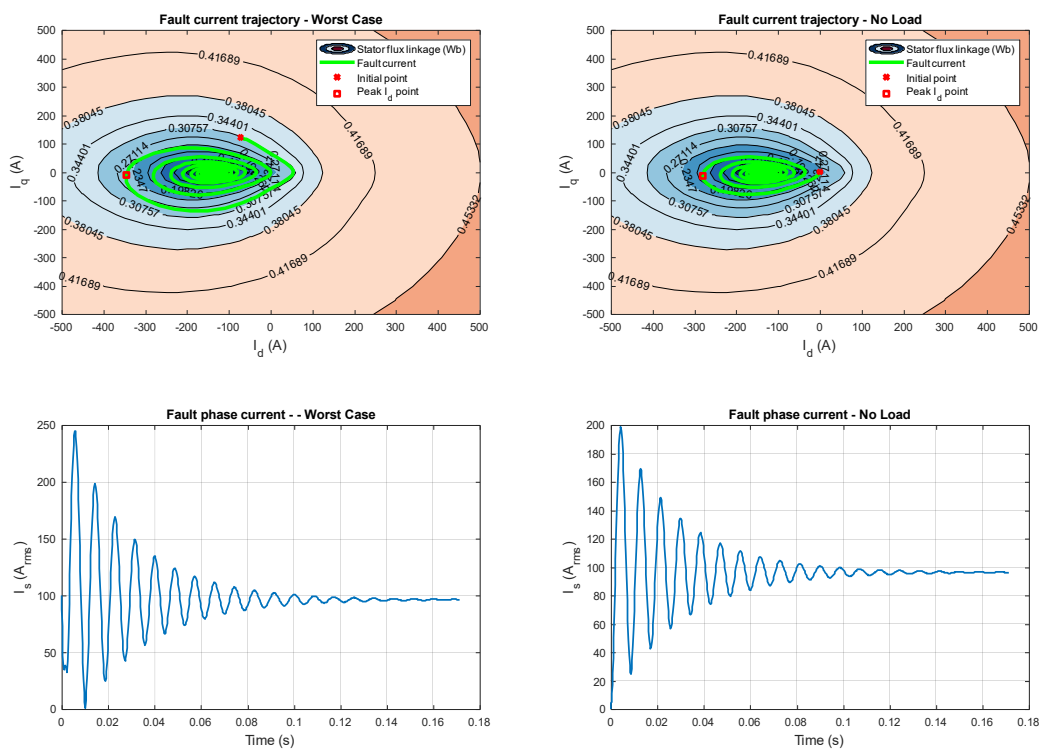
Από το Σχήμα 5.20 παρατηρούμε ότι μηχανή εμφανίζει μέγιστη ροπή πέδησης 55.2 Nm σε ταχύτητα περιστροφής 3100 rpm, αντίστοιχα για το ρεύμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής συγκλίνει προς το χαρακτηριστικό ρεύμα. Όσον αφορά τις ταχύτητες εκκίνησης και σβέσης του σφάλματος βλέπουμε ότι σε αντίθεση με τη μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών, η ταχύτητα στην οποία εκκινεί το σφάλμα είναι 2860 rpm ενώ η ταχύτητα όπου το σφάλμα αποσβένει είναι 2750 rpm, συμπεριφορά που επιβεβαιώνει τη επίδραση της εκτυπότητας στην οριακή και κρίσιμη ταχύτητα.

Αντίστοιχα μελετήθηκε για τη μεταβατική κατάσταση η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών I. Χρησιμοποιώντας τους χάρτες του Σχήματος 5.17 προσομοιώσαμε τη συμπεριφορά της μηχανής για κάθε σημείο λειτουργίας.



Σχήμα 5.21 Χάρτες μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και D συνιστώσας για κάθε σημείο λειτουργίας.

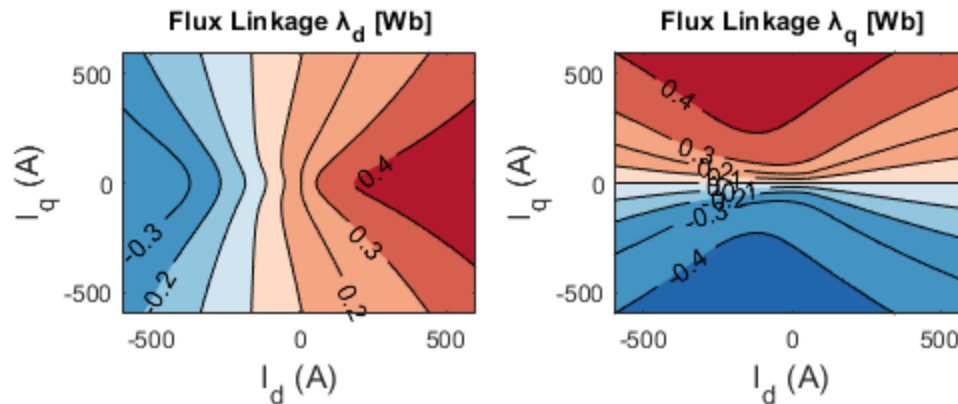
Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται στα 1750 rpm και είναι ίσο με 245 A_{rms}, αντίστοιχα το μέγιστο ρεύμα που εμφανίζεται στον D άξονα είναι -345.64 A_{peak}. Επιπλέον παρατηρούμε σε αντίθεση με τη μηχανή επιφανειακών μαγνητών ότι για την ίδια ταχύτητα σε κενό φορτίο τα μεταβατικά ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι σημαντικά μικρότερα του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης. Στο Σχήμα 5.22 όπου δείχνουμε τη τροχιά του ρεύματος βραχυκύκλωσης και την εξέλιξη του στο χρόνο για τη χειρότερη δυνατή περίπτωση και για τη περίπτωση κενού φορτίου επαληθεύεται και η παρατήρησή μας ότι τα ρεύματα βραχυκύκλωσης σε κενό φορτίο είναι μικρότερα.



Σχήμα 5.22 Τροχιά μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και διαγράμματα εξέλιξης τους στο χρόνο.

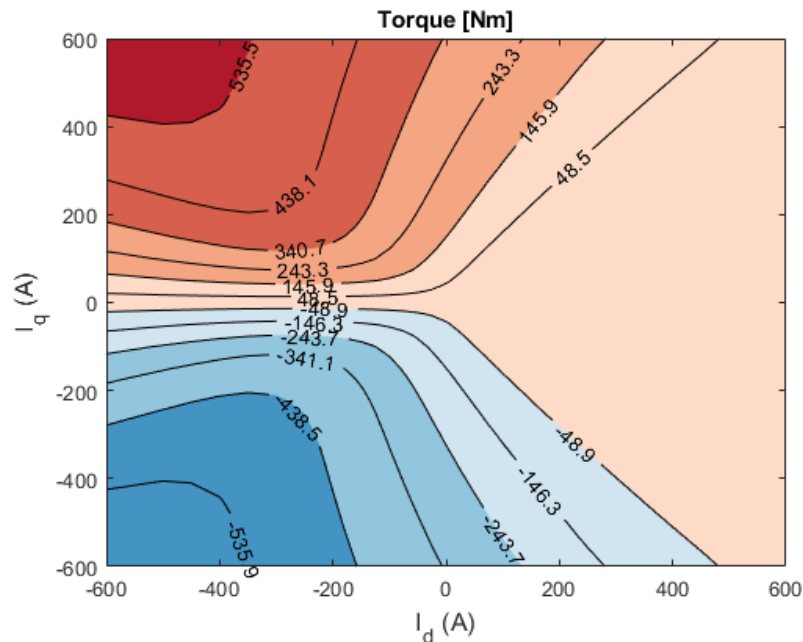
5.2.3 Ανάλυση σφαλμάτων ηλεκτρικής μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών τύπου V

Όπως και στα δύο προηγούμενα υποκεφάλαια αναλύουμε ως προς τα σφάλματα την μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών V. Αρχικά εξήγαμε τους χάρτες πεπλεγμένης ροής για τον ορθό και κάθετο άξονα οι οποίοι φαίνονται παρακάτω:



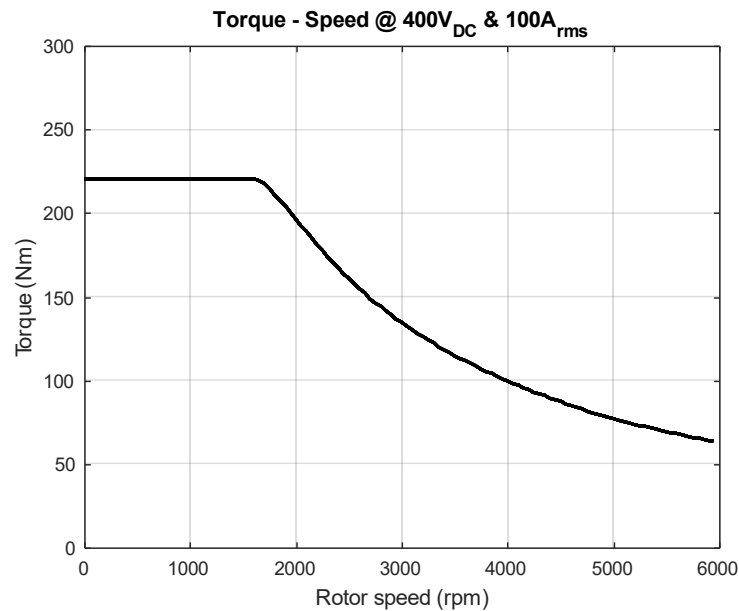
Σχήμα 5.23 Χάρτες πεπλεγμένης ροής λ_d και λ_q της μηχανής επιφανειακών μαγνητών.

Αντίστοιχα ο χάρτης ροπής για είναι:



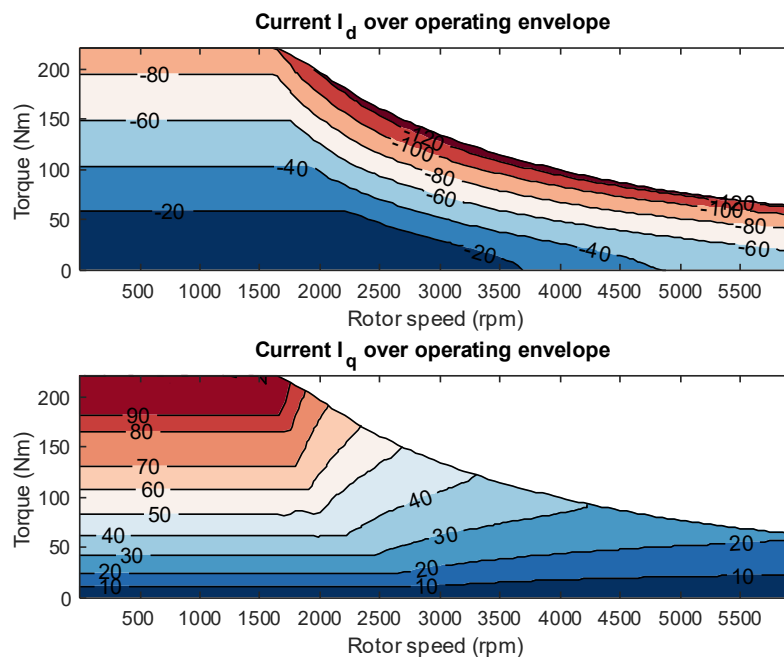
Σχήμα 5.24 Χάρτης ροπής της μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών V.

Επιβάλλοντας $V_{DC} = 400V$ και $I_{nom} = 100A_{rms}$ οι καμπύλη Ροπής - Ταχύτητας είναι η ακόλουθη:



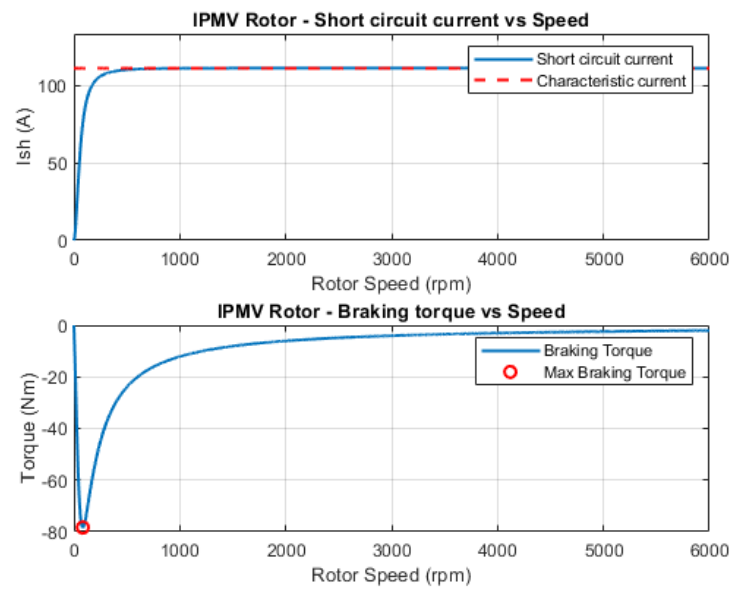
Σχήμα 5.25 Καμπύλη Ροπής – Ταχύτητας της μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών V.

Εφαρμόζοντας στρατηγική ελέγχου μέγιστης ροπής ανά αμπέρ (MTPA) εξάγουμε τους χάρτες ρεύματος I_d , I_q για κάθε σημείο λειτουργίας

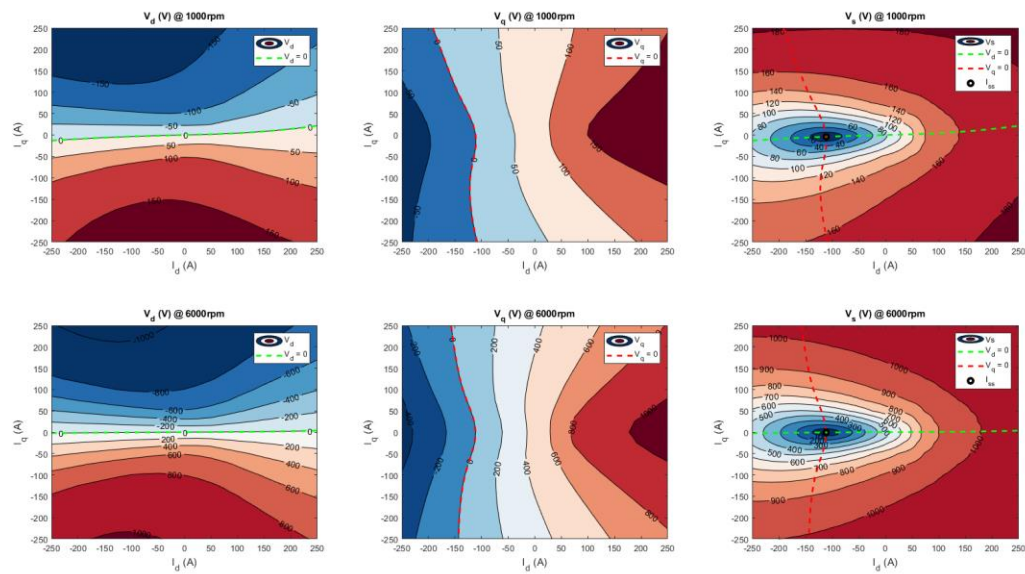


Σχήμα 5.26 Ρεύματα I_d και I_q για κάθε σημείο λειτουργίας της μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών V.

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με πριν βλέπουμε στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τις καμπύλες ροπής πέδησης και ρεύματος βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης.



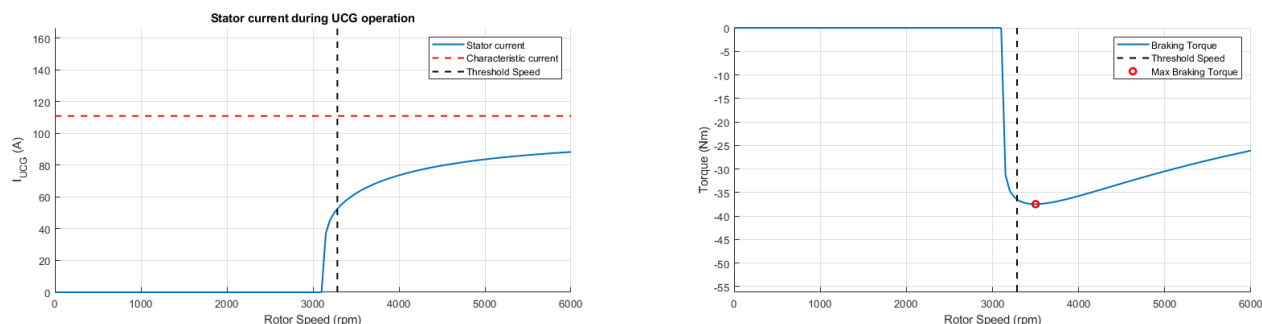
Σχήμα 5.27 Καμπύλες ροπής πέδησης και ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς ταχύτητα δρομέα.



Σχήμα 5.28 Προσδιορισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης για 1000 rpm και 6000 rpm.

Από το Σχήμα 5.27 παρατηρούμε ότι η μηχανή μονίμων μαγνητών εμφανίζει μέγιστη ροπή πέδησης στα 84 rpm και η τιμή αυτής είναι 78.4 Nm. Αντίστοιχα παρατηρούμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνει με τη ταχύτητα και συγκλίνει στο χαρακτηριστικό ρεύμα που για τη συγκεκριμένη μηχανή έχει πλάτος 111 A_{peak}. Στο Σχήμα 5.28 βλέπουμε τον προσδιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης μόνιμης για 1000 rpm και 6000 rpm.

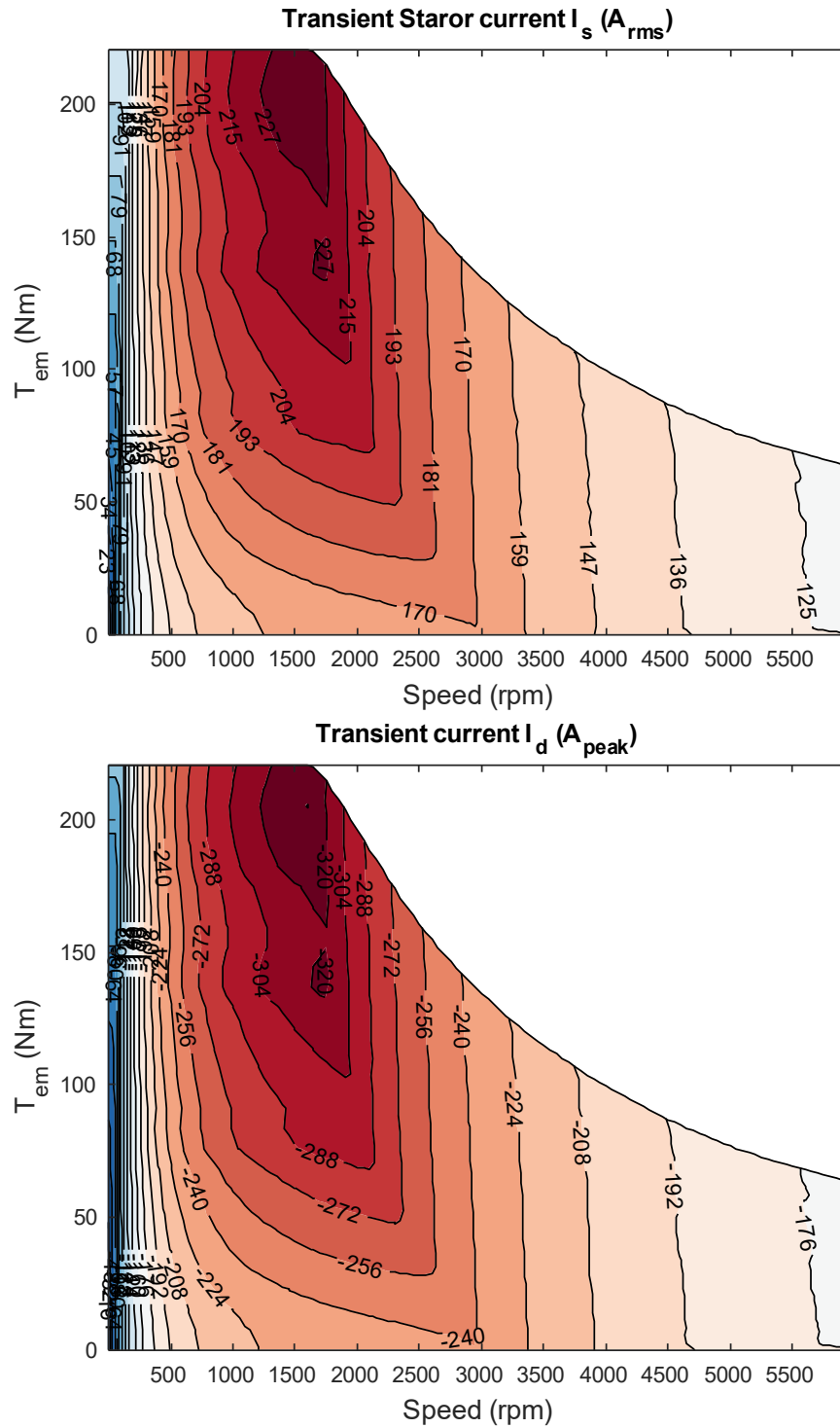
Για το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης (UCG) εφαρμόσαμε το μοντέλο μόνιμης κατάστασης και θεωρήσαμε ακόρεστη μηχανή. Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τη συμπεριφορά της μηχανής για σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης σε μόνιμη κατάσταση για όλο το εύρος ταχυτήτων που μπορεί να λειτουργήσει.



Σχήμα 5.29 Καμπύλες ρεύματος σφάλματος UCG – Ταχύτητας και Ροπής πέδησης – Ταχύτητας.

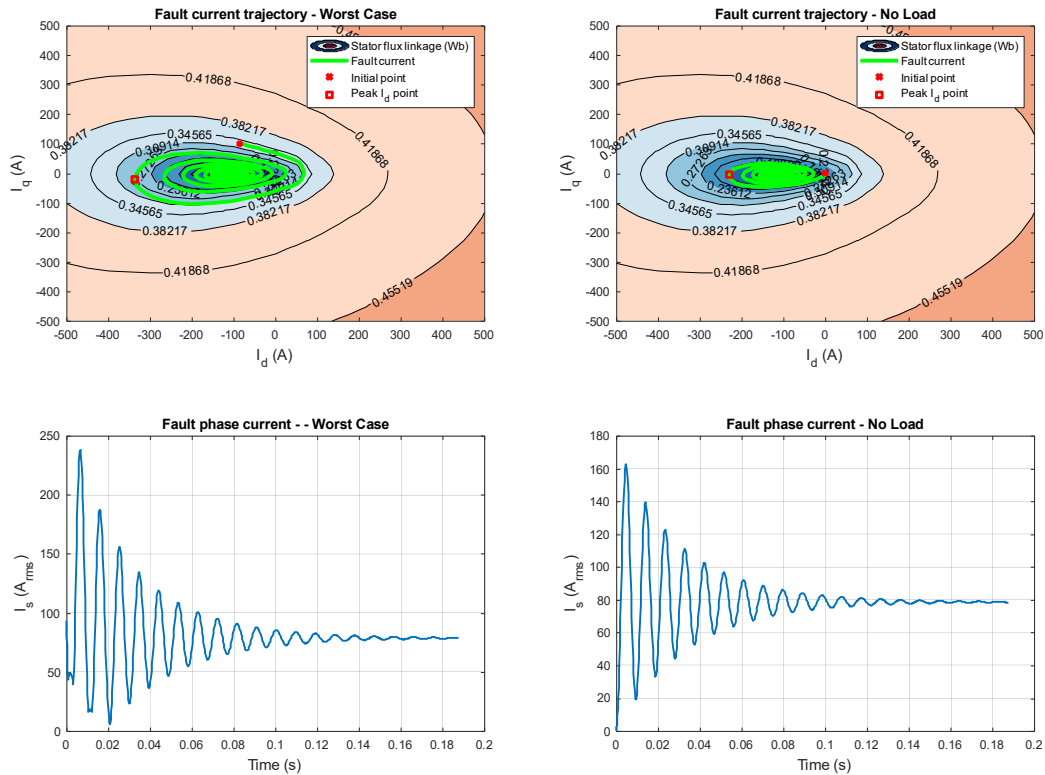
Από το Σχήμα 5.29 παρατηρούμε ότι μηχανή εμφανίζει μέγιστη ροπή πέδησης 37.2 Nm σε ταχύτητα περιστροφής 3500 rpm, αντίστοιχα για το ρεύμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει η ταχύτητας περιστροφής συγκλίνει προς το χαρακτηριστικό ρεύμα. Όσον αφορά τις ταχύτητες εκκίνησης και σβέσης του σφάλματος βλέπουμε ότι σε αντίθεση με τη μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών η ταχύτητα στην οποία εκκινεί το σφάλμα είναι 3284 rpm ενώ η ταχύτητα όπου το σφάλμα αποσβένει είναι 3100 rpm.

Αντίστοιχα μελετήθηκε για τη μεταβατική κατάσταση η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών V. Χρησιμοποιώντας τους χάρτες του Σχήματος 5.26 προσομοιώσαμε τη συμπεριφορά της μηχανής για κάθε σημείο λειτουργίας.



Σχήμα 5.30 Χάρτες μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και I_d συνιστώσας για κάθε σημείο λειτουργίας.

Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται στα 1600 rpm και είναι ίσο με $238.12 A_{rms}$, αντίστοιχα το μέγιστο ρεύμα που εμφανίζεται στον D άξονα είναι $-336.18 A_{peak}$. Επιπλέον παρατηρούμε σε αντίθεση με τη μηχανή επιφανειακών μαγνητών ότι για την ίδια ταχύτητα σε κενό φορτίο τα μεταβατικά ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι σημαντικά μικρότερα του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης και συγκρίσιμα με την IPMI μηχανή. Στο Σχήμα 5.31 όπου δείχνουμε τη τροχιά του ρεύματος βραχυκύκλωσης και την εξέλιξη του στο χρόνο για τη χειρότερη δυνατή περίπτωση και για τη περίπτωση κενού φορτίου επαληθεύεται και η παρατήρησή μας ότι τα ρεύματα βραχυκύκλωσης σε κενό φορτίο είναι σημαντικά μικρότερα.



Σχήμα 5.31 Τροχιά μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και διαγράμματα εξέλιξης τους στο χρόνο.

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.3.1 Απόκριση σφαλμάτων στη μόνιμη κατάσταση.

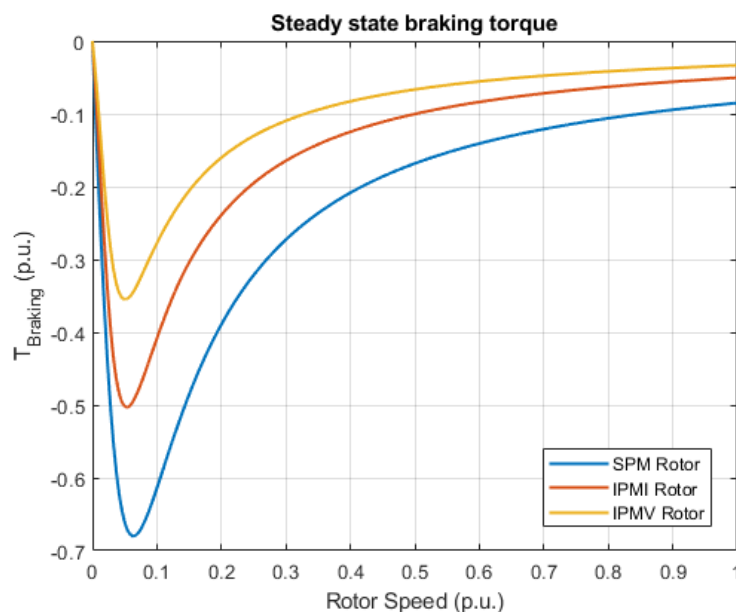
Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τη συμπεριφορά των μηχανών μεταξύ τους θα πρέπει αρχικά να κανονικοποιήσουμε ως προς τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη.

Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

		SPM	IPMI	IPMV	
Μέγιστο ρεύμα	$I_{\max}$	100	100	100	A_{rms}
Χαρακτηριστικό ρεύμα	I_{ch}	182.5	136.2	111.1	A_{peak}
Τάση DC Link	V_{DC}	400	400	400	V
Μέγιστη ροπή	$T_{\max}$	213	207	221	Nm
Ονομαστική ταχύτητα	N_{nom}	1800	1750	1650	rpm
Μέγιστη ταχύτητα	$N_{\max}$	6000	6000	6000	rpm
Μέγιστη ισχύς	$P_{\max}$	47	46	42.3	kW
Ροή μαγνήτη	λ_{pm}	0.264	0.213	0.186	Wb
Συντελεστής εκτυπότητας	ξ	1	2.6	2.8	-

Πίνακας 5.2 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μηχανών υπό μελέτη

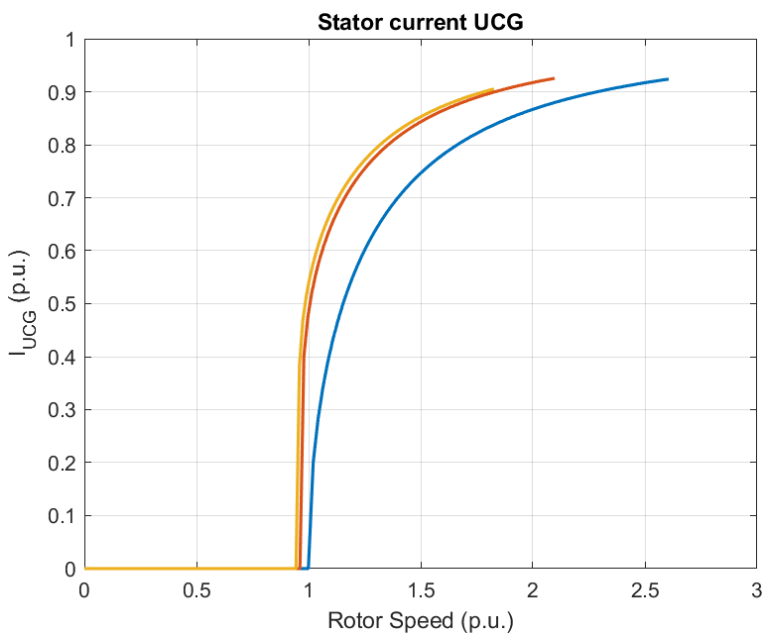
Η κανονικοποίηση για τη σύγκριση των μηχανών σε τριφασικό βραχυκύκλωμα έχει γίνει με βάση την ονομαστική ταχύτητα και τη μέγιστη ροπή.



Σχήμα 5.32 Ανά μονάδα Ροπή πέδησης - ταχύτητα περιστροφής για τριφασικό βραχυκύκλωμα

Από το Σχήμα 5.32 για την περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος παρατηρούμε ότι η μηχανή επιφανειακών μαγνητών έχει τη χειρότερη συμπεριφορά ως προς τη ροπή πέδησης και την καλύτερη συμπεριφορά εμφανίζει η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών V. Αυτό συμβαίνει διότι η μηχανή επιφανειακών μαγνητών έχει την υψηλότερη ροή μαγνήτη η οποία είναι ίση με 0.26404 Wb, αντίστοιχα η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών I έχει 0.21253 Wb και η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών V έχει 0.18509 Wb. Επίσης οι μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών εμφανίζουν εκτυπότητα σε αντίθεση με τη μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών που έχει εκτυπότητα L_q/L_d ίση με τη μονάδα. Η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών I εμφανίζει συντελεστή εκτυπότητας 2.6 ενώ αντίστοιχα η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών V εμφανίζει συντελεστή εκτυπότητας 2.8. Αν θυμηθούμε τον αντίστοιχο τύπο της ροπής πέδησης από το «Κεφάλαιο 3» θα παρατηρήσουμε ότι είναι ανάλογη του τετραγώνου της ροής του μαγνήτη και αντιστρόφως ανάλογη της αυτεπαγωγής L_q . Επιπλέον παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη εκτυπότητα εμφανίζει η μηχανή τόσο μειώνεται η ταχύτητα στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη ροπή πέδησης καθώς η κρίσιμη ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της αυτεπαγωγής L_q .

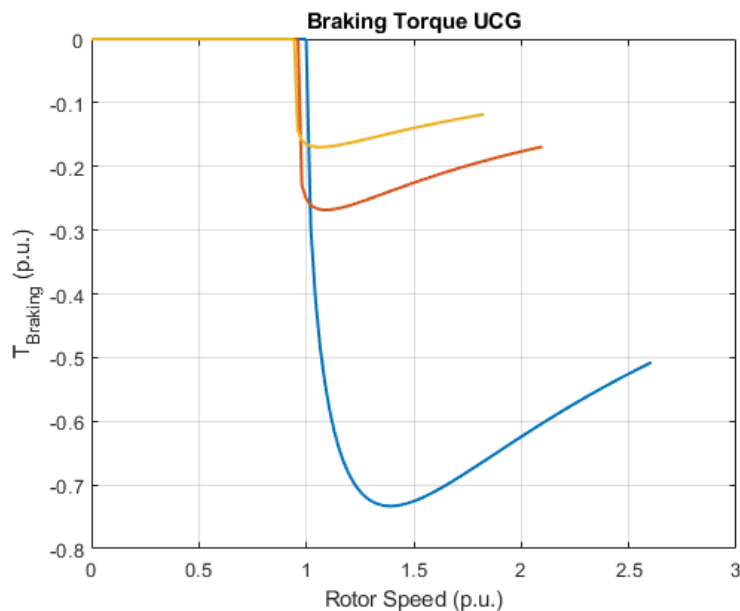
Όσον αφορά τη συμπεριφορά των μηχανών κατά τη λειτουργία υπό σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης η ταχύτητα έχει κανονικοποιηθεί ως προς τη ταχύτητα στην οποία η μηχανή παράγει αντι – ΗΕΔ ίση με τη τάση της πηγής, η ροπή με βάση τη μέγιστη ροπή και το ρεύμα με βάση το χαρακτηριστικό ρεύμα.



Σχήμα 5.33 Ανά μονάδα Ρεύμα σφάλματος - ταχύτητα περιστροφής κατά το σφάλμα UCG.

Από το Σχήμα 5.33 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει η εκτυπότητα τόσο μειώνεται η ταχύτητα κατά την οποία αποσβένει το ρεύμα σφάλματος. Αυτό σημαίνει ότι για μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών το σφάλμα εκκινεί αλλά και αποσβένει στη ταχύτητα περιστροφής στην οποία η μηχανή παράγει αντι – ΗΕΔ ίση με τη τάση που εφαρμόζει ο αντιστροφείας. Σε περίπτωση που έχουμε μηχανή που εμφανίζει εκτυπότητα θα πρέπει να μειωθεί η ταχύτητα κάτω από το προαναφερθέν

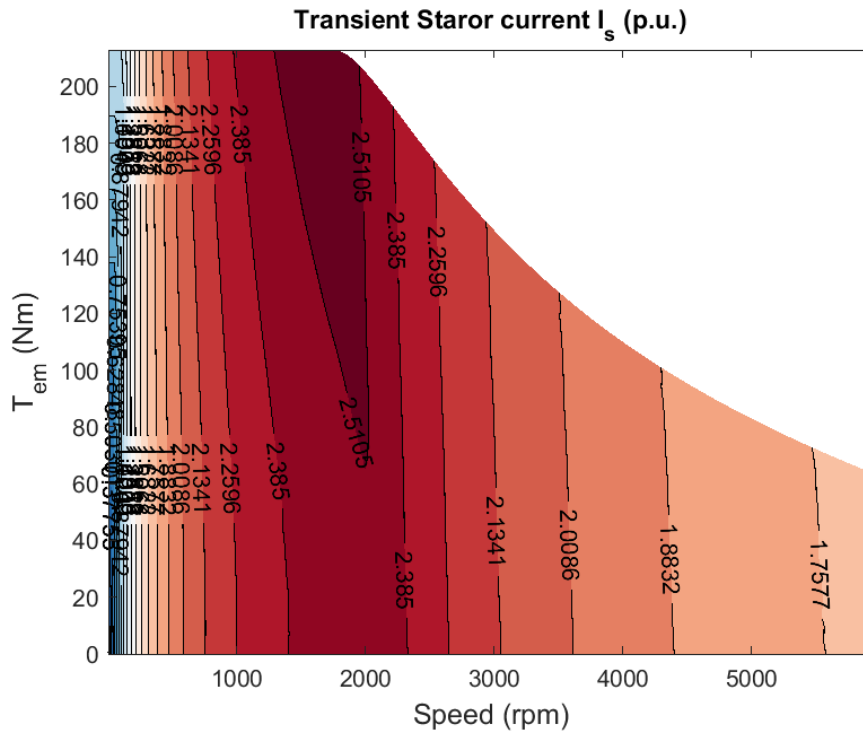
όριο και ειδικότερα για τις μηχανές που μελετάμε η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών I θα αποσβέσει το ρεύμα σφάλματος σε ταχύτητα περίπου 4% μικρότερη της οριακής ταχύτητας και η μηχανή εσωτερικών μονίμων μαγνητών V σε ταχύτητα περίπου 6% μικρότερη της οριακής ταχύτητας. Όσον αφορά τη ροπή πέδησης κατά το σφάλμα UCG παρατηρούμε από το Σχήμα 5.34 μεγαλύτερη ροπή πέδησης εμφανίζει η μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών λόγω της αυξημένης ροής μαγνήτη, αντίστοιχα οι μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών εμφανίζουν μικρότερη ροπή πέδησης και αντίστοιχα με το ρεύμα σφάλματος και η ροπή εμφανίζει αυτή τη δισταθή συμπεριφορά ανάμεσα στη ταχύτητα έναυσης και σβέσης του σφάλματος.



Σχήμα 5.34 Ανά μονάδα Ροπή πέδησης - ταχύτητα περιστροφής κατά το σφάλμα UCG.

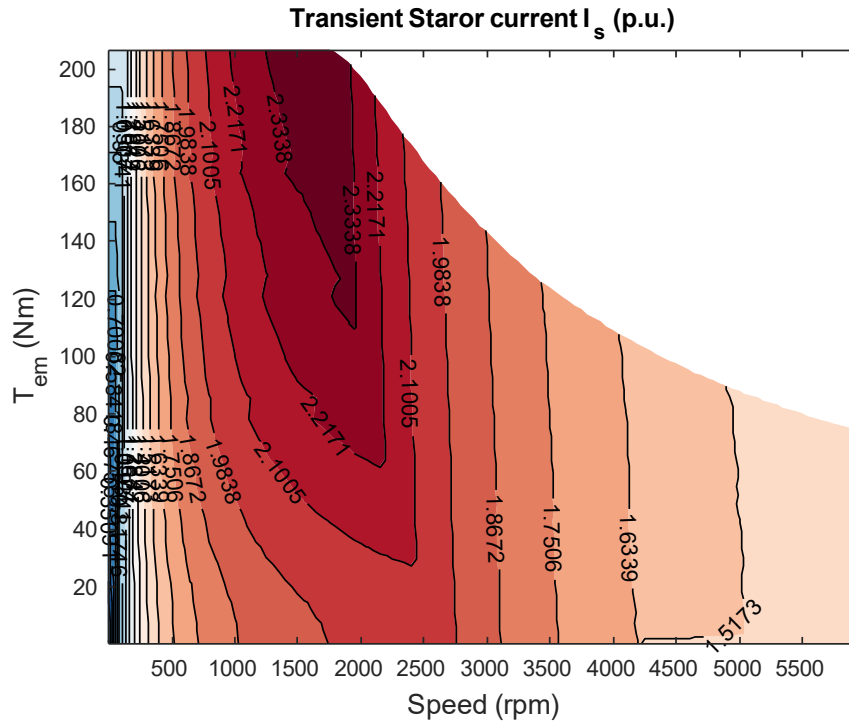
5.3.2 Μεταβατική απόκριση σε τριφασικό βραχυκύκλωμα

Στα Σχήματα 5.35, 5.36, 5.37 βλέπουμε τον χάρτες μέγιστου μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης κανονικοποιημένο με το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας. Στο Σχήμα 5.35 βλέπουμε τον χάρτη της μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών και παρατηρούμε ότι σε όλο το εύρος λειτουργίας δεν υπάρχουν περιοχές με ρεύμα βραχυκύκλωσης χαμηλότερο από 1.7 φορές το ονομαστικό ρεύμα. Ειδικότερα παρατηρούμε ότι το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης φτάνει έως και 2.5 φορές το ονομαστικό, για χαμηλά φορτία κυμαίνεται από 1.75 έως 2.38 φορές το ονομαστικό.



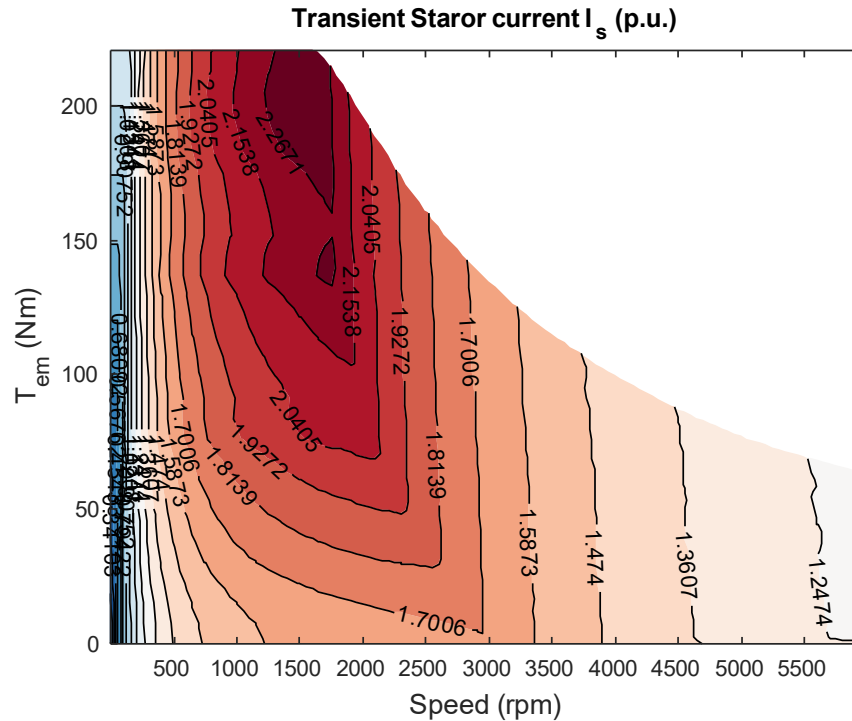
Σχήμα 5.35 Μέγιστο ανά μονάδα μεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης της μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών

Από το Σχήμα 5.36, το οποίο παρουσιάζει τον χάρτη της μηχανής με εσωτερικούς μονίμους μαγνητές τύπου I, μπορούμε να διαπιστώσουμε σημαντικές διαφορές σχετικά με τη συμπεριφορά του μεταβατικού ρεύματος σφάλματος ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε την αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ της φόρτισης της μηχανής και του μεταβατικού ρεύματος σφάλματος. Συνοπτικά, όταν η φόρτιση της μηχανής μειώνεται, το μέγιστο μεταβατικό ρεύμα σφάλματος μειώνεται κι αυτό. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές, καθώς το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης μπορεί να ανέλθει σε επίπεδα που είναι έως και 2.4 φορές υψηλότερα από το ονομαστικό. Για λειτουργία της μηχανής σε χαμηλές φορτίσεις ή κατάσταση κενού φορτίου, το μέγιστο ρεύμα σφάλματος περιορίζεται σε τιμές που κυμαίνονται από 1.4 έως 1.98 φορές το ονομαστικό.



Σχήμα 5.36 Μέγιστο ανά μονάδα μεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης της μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών I.

Εξετάζοντας το Σχήμα 5.37, το οποίο αφορά τον χάρτη της μηχανής με εσωτερικούς μονίμους μαγνητές τύπου V, διακρίνουμε παρόμοια συμπεριφορά και με τη μηχανή με εσωτερικούς μονίμους μαγνητές τύπου I. Καθίσταται και πάλι εμφανές ότι υπάρχει μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ φόρτισης και ρεύματος σφάλματος. Ειδικά, παρατηρούμε ότι το μέγιστο ρεύμα κατά τη βραχυκύκλωση μπορεί να κυμαίνεται σε τιμές που είναι έως και 2.3 φορές το ονομαστικό. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή στις περιπτώσεις όπου η μηχανή λειτουργεί με ελάχιστη φόρτιση ή κατάσταση κενού φορτίου, το μεταβατικό ρεύμα σφάλματος μειώνεται, φτάνοντας σε επίπεδα από 1.2 έως 1.6 φορές το ονομαστικό.



Σχήμα 5.37 Μέγιστο ανά μονάδα μεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης της μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών V .

Μετά από την παραπάνω εκτενή ανάλυση των δεδομένων, παρατηρούμε ότι οι μηχανές με υψηλή πεπλεγμένη ροή μαγνήτη, όπως είναι εκείνες με επιφανειακούς μαγνήτες, δεν έχουν καλή συμπεριφορά σε συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος ή σε περιπτώσεις σφαλμάτων μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης. Συγκεκριμένα, τα ρεύματα σφάλματος που παράγονται σε αυτές τις μηχανές είναι σημαντικά, καταλήγοντας στη δημιουργία υψηλών ροπών πέδησης και πιθανότατα μπορούν να προκαλέσουν απομαγνήτιση των μαγνητών του δρομέα. Από την άλλη πλευρά, οι μηχανές που παρουσιάζουν εκτυπότητα, όπως οι μηχανές με εσωτερικούς μονίμους μαγνήτες, φαίνεται να είναι πιο ανθεκτικές απέναντι στα ρεύματα σφάλματος και παρουσιάζουν μειωμένες ροπές πέδησης. Ωστόσο, υπό συνθήκες σφάλματος μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης, η εκτυπότητα που παρουσιάζουν σημαίνει ότι για να αποσβεστεί το ρεύμα σφάλματος, η ταχύτητα περιστροφής τους πρέπει να μειωθεί κάτω από τη ταχύτητα έναρξης του σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Κύρια συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Στην περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος και για μόνιμη κατάσταση το ρεύμα σφάλματος αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής έως ότου συγκλίνει με το χαρακτηριστικό ρεύμα της μηχανής το οποίο είναι μέγεθος εξαρτημένο από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της.
- Η ροπή πέδησης κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα εμφανίζεται σε χαμηλές ταχύτητες και είναι ανάλογη του τετραγώνου της πεπλεγμένης ροής του μαγνήτη και αντιστρόφως ανάλογη της αυτεπαγωγής L_q . Η ταχύτητα στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη ροπή πέδησης μειώνεται όσο αυξάνει η εκτυπότητα της μηχανής.
- Στην περίπτωση σφάλματος μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης και για μόνιμη κατάσταση το ρεύμα σφάλματος εμφανίζεται σε ταχύτητα τέτοια που η αντί – ΗΕΔ της μηχανής γίνεται μεγαλύτερη από την επιβαλλόμενη τάση από τον αντιστροφέα. Το ρεύμα αυξάνει όσο αυξάνει και η ταχύτητα και τελικώς συγκλίνει στη τιμή του χαρακτηριστικού ρεύματος.
- Η ροπή πέδησης κατά το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης αυξάνει έως μια κρίσιμη ταχύτητα η οποία είναι μεγαλύτερη της ταχύτητας έναυσης του σφάλματος και μετά μειώνεται όσο αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής. Η ροπή πέδησης συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής του μαγνήτη άρα όσο μεγαλύτερη η τιμή της πεπλεγμένης ροής του μαγνήτη τόσο υψηλότερη η ροπή πέδησης.
- Μηχανές που εμφανίζουν εκτυπότητα έχουν ως χαρακτηριστικό κατά το σφάλμα μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης να αποσβένουν το σφάλμα σε ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας έναυσης του σφάλματος.
- Το μέγιστο μεταβατικό ρεύμα σφάλματος κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα είναι ανάλογο της φόρτισης της ηλεκτρικής μηχανής. Μηχανή που πριν το σφάλμα λειτουργούσε σε περιοχή κοντά σε αυτή της μέγιστης ισχύος παράγει υψηλότερα μεταβατικά ρεύματα σφάλματος απ' ό,τι αν λειτουργούσε σε κενό φορτίο. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια που υπάρχει στο μαγνητικό κύκλωμα της ηλεκτρικής μηχανής.

- Οι μηχανές επιφανειακών μαγνητών εμφανίζουν υψηλά μεταβατικά ρεύματα σφάλματος τα οποία δεν μειώνονται ιδιαίτερα αν προ σφάλματος η μηχανή λειτουργούσε σε κενό φορτίο ή σε χαμηλή φόρτιση. Μηχανές με αυξημένη εκτυπότητα όπως οι μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών εμφανίζουν μικρότερα μέγιστα μεταβατικά ρεύματα σφάλματος και τα ρεύματα σφάλματος σε χαμηλές φορτίσεις είναι συγκρίσιμα με το ρεύμα ονομαστικής λειτουργίας.
- Ανάμεσα σε μηχανές παρόμοιων επιδόσεων οι μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών έχουν καλύτερη συμπεριφορά στο τριφασικό βραχυκύκλωμα καθώς σε αντίθεση με τις μηχανές επιφανειακών μαγνητών έχουν και δευτερεύοντα μηχανισμό παραγωγής ροπής μέσω της εκτυπότητας. Λόγω της ροπής εκτυπότητας χρειάζονται μικρότερη ποσότητα μαγνήτη για να παράξουν την ίδια ροπή με μια μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών άρα έχουν και μικρότερη πεπλεγμένη ροή μαγνήτη.

6.2 Συνεισφορά της εργασίας στην Επιστήμη

Η επιστημονική συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζεται στα εξής:

- Αναπτύχθηκε παραμετροποιημένο μοντέλο σχεδίασης και ανάλυσης σύγχρονου κινητήρα εσωτερικών μόνιμων μαγνητών, το οποίο μέσω μαγνητοστατικών αναλύσεων παράγει χάρτες ροής και ροπής χρησιμοποιώντας τεχνικές μείωσης του χρόνου προσομοίωσης.
- Υλοποιήθηκε μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος μόνιμης κατάστασης το οποίο λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα κορεσμού.
- Υλοποιήθηκε μοντέλο σφάλματος μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης μόνιμης κατάστασης.
- Υλοποιήθηκε μοντέλο τριφασικού βραχυκυκλώματος μεταβατικής κατάστασης το οποίο λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα κορεσμού και μπορεί σε μικρό χρόνο να δώσει μεταβατικές τιμές ρεύματος σφάλματος για οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας της μηχανής.

6.3 Σημεία για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα ακόλουθα σημεία που είναι σκόπιμο να διερευνηθούν περαιτέρω:

- Ανάπτυξη μοντέλου σφάλματος μη ελεγχόμενης γεννήτριας τάσης μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης το οποίο να λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα κορεσμού.
- Συνδυασμός των μοντέλων σφαλμάτων που αναπτύχθηκαν με μοντέλα απομαγνήτισης ηλεκτρικών μηχανών μόνιμων μαγνητών.
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με πειραματικά δεδομένα.

- Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών με κριτήριο τη συμπεριφορά τους σε σφάλματα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo and P. Guglielmi, "Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2322-2332, Nov.-Dec. 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2227092.
- [2]. Z. Q. Zhu and D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746-765, April 2007, doi: 10.1109/JPROC.2006.892482.
- [3]. A. Krings and C. Monissen, "Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles," *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 1807-1813, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270946.
- [4]. Bianchi, N. (2005). *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements* (1st ed.). CRC Press. doi.org/10.1201/9781315219295
- [5]. S. Meier, "Stacking Factor," *Emetor.com*. [Online]. Available: <https://www.emetor.com/glossary/stacking-factor/>. [Accessed: 02-September-2023].
- [6]. Salon, S. J. (1995). *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. Springer.
- [7]. N. Bianchi, M. D. Pre and S. Bolognani, "Design of a fault-tolerant IPM motor for electric power steering," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 4, pp. 1102-1111, July 2006, doi: 10.1109/TVT.2006.877716.
- [8]. T. M. Jahns and V. Caliskan, "Uncontrolled generator operation of interior PM synchronous machines following high-speed inverter shutdown," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 6, pp. 1347-1357, Nov.-Dec. 1999, doi: 10.1109/28.806049.
- [9]. Chong-Zhi Liaw, W. L. Soong, B. A. Welchko and N. Ertugrul, "Uncontrolled generation in interior permanent-magnet Machines," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 4, pp. 945-954, July-Aug. 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.851557.
- [10]. B. A. Welchko, T. M. Jahns, W. L. Soong and J. M. Nagashima, "IPM synchronous machine drive response to symmetrical and asymmetrical short circuit faults," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 291-298, June 2003, doi: 10.1109/TEC.2003.811746.
- [11]. S. Ferrari, P. Ragazzo, G. Dilevrano and G. Pellegrino, "Determination of the Symmetric Short-Circuit Currents of Synchronous Permanent Magnet Machines Using Magnetostatic Flux Maps," *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Vancouver, BC, Canada, 2021, pp. 3697-3704, doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9595806.
- [12]. Lu, Ke & Zhu, Yuan & Wu, Zhihong & Xiao, Mingkang. (2019). Suppression of Current Fluctuations and the Brake Torque for PMSM Shutoff in Electric Vehicles. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. 1-13. 10.1155/2019/5026316.
- [13]. I. P. Brown, G. Y. Sizov and N. A. O. Demerdash, "Rapid high fidelity finite element-based synchronous machine model for system simulations," *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, Chicago, IL, USA, 2013, pp. 944-951, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556211.

- [14].D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, User's Manual, Version 4.2, <http://www.femm.info/wiki/HomePage>, 2019.
- [15]. S. Ferrari, P. Ragazzo, G. Dilevrano and G. Pellegrino, "Flux and Loss Map Based Evaluation of the Efficiency Map of Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 2, pp. 1500-1509, March-April 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3221381.
- [16]. G. Y. Sizov, D. M. Ionel and N. A. O. Demerdash, "Modeling and Parametric Design of Permanent-Magnet AC Machines Using Computationally Efficient Finite-Element Analysis," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 6, pp. 2403-2413, June 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2163912.
- [17]. Hsu, J.S. & Ayers, C.W. & Coomer, C.L. & Wiles, R.H. & Burress, Tim & Campbell, S.L. & Lowe, K.T. & Michelhaugh, R.T. (2007). Report on Toyota/Prius Motor Torque Capability, Torque Property, No-Load Back EMF, and Mechanical Losses, Revised May 2007. 10.2172/921782.
- [18]. Burress, Tim & Coomer, C.L. & Campbell, S.L. & Seiber, L.E. & Marlino, L.D. & Staunton, R.H. & Cunningham, J.P. (2008). Evaluation of the 2007 Toyota Camry Hybrid Syneregy Drive System. 10.2172/928684.
- [19]. Hsu, J.S. (2005). Report on Toyota Prius Motor Thermal Management. 10.2172/885987.
- [20].Shin-Etsu Chemical Co., Ltd., "N36Z Nd-Fe-B magnet demagnetization curves at elevated temperature," [Online]. Available: <https://www.shinetsu.co.jp/serem/e/download/N36Zsheet.pdf>