



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΠΟΛΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Αναγεννητική Πέδηση στην Ηλεκτροκίνηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Ι. Ξυπολιτάς

Επιβλέπων: Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΠΟΛΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Αναγεννητική Πέδηση στην Ηλεκτροκίνηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων: Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

.....
Νικόλαος Ι. Ξυπολιτάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Νικόλαος Ι. Ξυπολιτάς, 2016.

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

Περίληψη

Όλες οι ηλεκτρικές μηχανές έχουν δύο μηχανικές λειτουργίες, κίνησης και πέδησης. Η φύση της πέδησης μπορεί να είναι αναγεννητική, όπου η κινητική ενέργεια του ρότορα μετατρέπεται σε ηλεκτρική και στέλνεται πίσω στην πηγή ισχύος, ή μη-αναγεννητικής, όπου η πηγή παρέχει ηλεκτρική ενέργεια για την παροχή πέδης. Αυτή η διπλωματική εξετάζει διάφορα κρίσιμα ζητήματα που σχετίζονται με την αναγεννητική πέδηση στις ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος, συμπεριλαμβανομένου του προσδιορισμού των ορίων στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας καθορίζοντας τις περιοχές αναγεννητικής πέδησης και αξιολογώντας τα σημεία λειτουργίας εντός των περιοχών που έχουν ως αποτέλεσμα το μέγιστο ρεύμα αναγεννητικής πέδησης.

Οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται στους κινητήρες των ηλεκτρικών και υβριδικών-ηλεκτρικών οχημάτων για την παροχή ροπής κίνησης ή πέδησης ανάλογα με το αίτημα του οδηγού και την λογική της διαχείρισης της ενέργειας. Δεδομένου ότι τα εν λόγω οχήματα μεταφέρουν ένα περιορισμένο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (όπως μία μπαταρία), είναι σημαντικό να διατηρηθεί όσο περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί για να αυξηθεί η διαδρομή που θα καλύψει το όχημα. Ως εκ τούτου, η έννοια της αναγεννητικής πέδησης είναι σημαντική για τα οχήματα αφού όταν λειτουργεί σε αυτή την κατάσταση κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος στέλνει ενέργεια πίσω στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αναπληρώνοντας έτσι το επίπεδο ενέργειας της. Από την στιγμή που η ηλεκτρική μηχανή βοηθάει το σύστημα των μηχανικών φρένων του οχήματος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε μείωση της φθοράς των εξαρτημάτων του συστήματος των μηχανικών φρένων. Καθώς η μηχανική τριβή φρεναρίσματος και η πέδηση της ηλεκτρικής μηχανής χρησιμοποιούνται για να παρέχουν την απαιτούμενη ροπή πέδης του οχήματος, περιγράφονται στρατηγικές πέδησης που αφορούν το διαχωρισμό της εντολής πέδησης μεταξύ των δύο μηχανισμών πέδησης. Επίσης μελετάται και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ενός δοκιμαστικού οχήματος ως προς διαφορετικά προγράμματα οδήγησης, και τέλος ως προς την χρησιμοποίηση διαφορετικών στρατηγικών πέδησης.

Λέξεις κλειδιά: αναγεννητική πέδηση, ηλεκτρικές μηχανές, ρεύμα φόρτισης, στρατηγικές πέδησης, προγράμματα οδήγησης, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Abstract

All electric machines have two mechanical operations, motoring and braking. The nature of braking can be regenerative, where the kinetic energy of the rotor is converted into electricity and sent back to the power source or non-regenerative, where the source supplies electric power to provide braking. This thesis investigates several critical issues related to regenerative braking in both DC and AC electric machines, including the determination of boundaries in the torque-speed plane defining the regenerative braking capability region and the evaluation of operating points within that capability region that result in maximum regenerative braking recharge current.

Electric machines are used in the powertrains of electric and hybrid-electric vehicles to provide motoring or braking torque in response to the driver's request and power management logic. Since such vehicles carry a limited amount of electrical energy on-board their energy storage systems (such as a battery pack), it is important to conserve as much electrical energy as possible in order to increase the range of travel. Therefore, the concept of regenerative braking is of importance for such vehicles since operating in this mode during a braking event sends power back to the energy storage system thereby replenishing its energy level. Since the electric machine assists the mechanical friction braking system of the vehicle, it results in reduced wear on components within the mechanical friction brake system. As both mechanical friction braking and electric machine braking are used to provide the requested vehicle braking torque, braking strategies which relate to splitting of the braking command between the two braking mechanisms are discussed. The reduction in energy consumption of a test vehicle along different driving schedules while using different braking strategies is also studied.

Key words: regenerative braking, motoring, braking, regenerative braking recharge current, low energy consumption, electric machine, braking strategies.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κ. Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και τους συμφοιτητές και φίλους μου που στάθηκαν στο πλευρό μου με πολύτιμες συμβουλές και γνώσεις κατά τη διάρκεια φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο.

Τέλος, θέλω να αφιερώσω τη διπλωματική μου εργασία στους γονείς μου και στις αδερφές μου.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	V
ABSTRACT	VII
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	IX
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΤΟ ΚΙΝΗΤΡΟ ΓΙΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ	3
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	5
1.2.1 ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ	5
1.2.2 Ο ΙΔΡΥΤΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	7
ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	7
2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	7
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ.....	11
2.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	13
2.3.1 Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης.....	13
2.3.2 Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος Μόνιμου Μαγνήτη	14
2.4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	16
2.4.1 Αγνόηση της αντίστασης απωλειών πυρήνα, R_c	16
2.4.1.1 Όρια Αναγεννητικής Πέδησης.....	16
2.4.1.2 Μέγιστο Ρεύμα Αναγεννητικής Πέδησης	19
2.4.2 Λαμβάνοντας την αντίσταση απωλειών πυρήνα, R_c	20
2.4.2.1 Όρια Αναγεννητικής Πέδησης.....	20
2.4.2.2 Μέγιστο Ρεύμα Αναγεννητικής Πέδησης	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	25
ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ	25
3.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	25
3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ.....	33
3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	34
3.1 Εσωτερικός Μόνιμος Μαγνήτης-Α (IPM-A).....	34
3.2 Εσωτερικός Μόνιμος Μαγνήτης-Β (IPM-B).....	36
3.3 Επιφανειακός Μόνιμος Μαγνήτης.....	37
3.4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	39
3.4.1 Αγνόηση της αντίστασης απωλειών πυρήνα, R_c	39
3.4.1.1 Όρια αναγεννητικής πέδησης.....	39
3.4.1.2 Μέγιστο Ρεύμα αναγεννητικής πέδησης.....	42
3.4.2 Λαμβάνοντας την αντίσταση απωλειών πυρήνα, R_c	43
3.4.2.1 Όρια αναγεννητικής πέδησης.....	44
3.4.2.2 Μέγιστο ρεύμα αναγεννητικής πέδησης.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	49
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΟΧΗΜΑ	49
4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ	50
4.1.1 Απώλειες Ηλεκτρικού Υποσυστήματος.....	50

4.1.2	Απώλειες Μηχανικού Υποσυστήματος.....	54
4.2	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΠΕΔΗΣΗΣ.....	56
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	63
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Περιεχόμενα Εικόνων-Σχημάτων

ΕΙΚΟΝΑ 1: 4-ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΚΑΙ ΠΕΔΗΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	2
ΕΙΚΟΝΑ 2 : ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΡ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ(ΔΕΝ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ)	9
ΕΙΚΟΝΑ 3 : ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΕΙ ΤΗΝ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΡ ΣΤΗΝ ΣΡ ΠΗΓΗ ΜΕΣΩ ΕΝΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΣΡ-ΣΡ	10
ΕΙΚΟΝΑ 4 : ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΩΣ ΠΗΓΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.	10
ΕΙΚΟΝΑ 5 :ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΡ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ	14
ΕΙΚΟΝΑ 6 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΡ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ	15
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΌΡΙΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΣΡ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΑΜΕΛΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΥΡΗΝΑ.	19
ΕΙΚΟΝΑ 8 :ΌΡΙΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΣΡ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΑΜΕΛΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΥΡΗΝΑ.	24
ΕΙΚΟΝΑ 9 : Η ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΜΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΗΣ ΔΙΠΟΛΙΚΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΜΗΧΑΝΗΣ	26
ΕΙΚΟΝΑ 10 :ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΙΑΣ ΕΡ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΣΕ ΑΣΤΕΡΑ ΜΕ ΠΗΓΗ ΣΡ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΕΝΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΣΡ-ΕΡ	27
ΕΙΚΟΝΑ 11 : ΜΟΝΤΕΛΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΥΣ ΑΞΟΝΕΣ D ΚΑΙ Q ΣΕ ΜΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ	27
ΕΙΚΟΝΑ 12 :ΑΦΗΡΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΗΓΗΣ ΣΡ, ΣΡ-ΕΡ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΟΡΟΥΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ D ΚΑΙ Q ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ	31
ΕΙΚΟΝΑ 13 :ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ-Α(IPM-A)	36
ΕΙΚΟΝΑ 14 :ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ-B(IPM-B)	37
ΕΙΚΟΝΑ 15 :ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ	39
ΕΙΚΟΝΑ 16 :ΌΡΙΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΑΓΝΟΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΥΡΗΝΑ, RC	42
ΕΙΚΟΝΑ 17 :ΌΡΙΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ	

ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΥΡΗΝΑ, RC	46
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	53
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	54
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΕΝΑ ΟΧΗΜΑ ΠΟΥ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΕΝΟΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΟΥ	54
ΕΙΚΟΝΑ 21: ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΟ ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ ΠΕΔΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΝΑ ΕΞΗΓΗΣΕΙ ΤΙΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΠΕΔΗΣΗΣ.	57
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΠΕΔΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΥΚΛΟ ΚΙΝΗΣΗΣ UDDS	62

Περιεχόμενα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 :ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΡ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	13
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 :ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΡ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	15
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 :ΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ-Α (ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΣΕ ΑΣΤΕΡΑ) (IPM-A)	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 :ΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ-Β (ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΣΕ ΑΣΤΕΡΑ) (IPM-B)	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 :ΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ (ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΣΕ ΤΡΙΓΩΝΟ)	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΠΕΔΗΣΗΣ.....	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

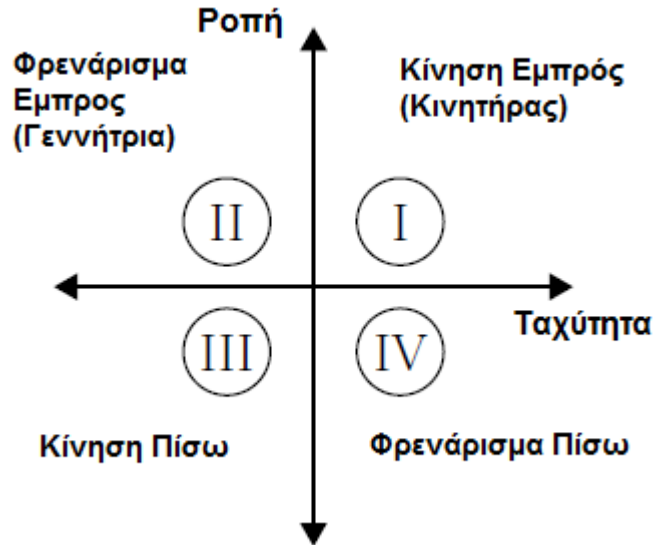
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει είτε σαν κινητήρας είτε σαν γεννήτρια. Στην περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στο κύριο τύλιγμα της μηχανής, το οποίο ονομάζεται τύλιγμα τυμπάνου, ενώ αποδίδεται μηχανική ενέργεια σε μία περιστρεφόμενη άτρακτο, η οποία κινεί το μηχανικό φορτίο. Από την άλλη μεριά κατά τη λειτουργία της μηχανής ως γεννήτρια, παρέχεται μηχανική ενέργεια στην άτρακτο της ηλεκτρικής μηχανής από μία κινητήρια μηχανή και εξέρχεται ηλεκτρική ενέργεια από τους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου. [1].

Οι ηλεκτρικές μηχανές μπορούν να παρέχουν λειτουργίες κινητήρα και γεννήτριας σε δύο κατευθύνσεις ,εμπρός και πίσω.

Στην Εικόνα 1 φαίνεται πως η ροπή και η ταχύτητα συνδυάζονται για την εμπρός(θετική) και πίσω(αρνητική) κίνηση. Αυτό οφείλεται στο ότι η παραγόμενη ισχύς μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι αποτέλεσμα της ταχύτητας και της ροπής. Συνεπώς στο τεταρτημόριο I, η παραγόμενη ισχύς είναι θετική. Άρα η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και ονομάζεται κίνηση εμπρός. Στο τεταρτημόριο II, η ισχύς είναι αρνητική. Συνεπώς η μηχανή φρενάρει αφού αντιτίθεται στην κίνηση της ατράκτου. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται Φρενάρισμα εμπρός(ή πέδη εμπρός). Ομοίως οι λειτουργίες στα τεταρτημόρια III και IV ονομάζονται Κίνηση πίσω και Φρενάρισμα(ή Πέδη) πίσω. Επομένως, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν τα όρια της αναγεννητικής πέδησης εντός των τεταρτημορίων II και IV.

Συνοψίζοντας τα τεταρτημόρια I και III του επιπέδου ροπής-ταχύτητας αντιπροσωπεύουν τις λειτουργίες της εμπρός και πίσω κίνησης, ενώ στα τεταρτημόρια IV και II αντιπροσωπεύουν τις περιοχές λειτουργίας εμπρός και πίσω πέδης αντίστοιχα. [2]



Εικόνα 1: 4-τεταρτημόρια λειτουργίας κινητήρας και πέδης στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας

Στις μηχανές Συνεχούς Ρεύματος υπάρχουν τριών μορφών πέδησης: η **αναγεννητική** (regenerative braking), η **δυναμική** (dynamic or rheostatic braking) και η **ανάστροφη ρεύματος πέδηση** (Plugging or Reverse current braking). [2]

Στην **αναγεννητική** πέδηση, η μηχανική ενέργεια του δρομέα μετατρέπεται σε ηλεκτρική και τροφοδοτείται πίσω στην πηγή τροφοδοσίας. Η πηγή τροφοδοσίας μπορεί είτε να είναι σταθερής τάσης, για μηχανές σταθερού ρεύματος, είτε εναλλασσόμενης τάσης, για εναλλασσόμενες μηχανές, είτε μια πηγή σταθερού ρεύματος συνδεδεμένη σε έναν κατάλληλο ελεγχόμενο μετατροπέας ισχύος (ΣΡ-ΣΡ ή ΣΡ-ΕΡ).

Στη μέθοδο **αναστροφής ρεύματος πέδησης**, οι συνδέσεις οπλισμού αντιστρέφονται και επομένως η μηχανή τείνει να αλλάξει τη φορά περιστροφής. Λόγω αυτής της αντιστροφής των συνδέσεων, η τάση τροφοδοσίας V και η επαγόμενη τάση E_A θα έχουν την ίδια φορά. Συνεπώς η πραγματική τάση κατά μήκος του οπλισμού θα είναι $V + E_A$, η οποία θα είναι σχεδόν διπλάσια από τη τάση τροφοδοσίας. Έτσι το ρεύμα οπλισμού αλλάζει φορά και παράγεται ροπή φρεναρίσματος (πέδης). Αυτή η μέθοδος πέδησης δεν είναι τόσο αποτελεσματική, διότι εκτός από την ενέργεια που παρέχεται από το φορτίο, η τροφοδοτούμενη ενέργεια που παρέχεται από την πηγή καταναλώνεται σε αντιστάσεις.

Τέλος η **δυναμική πέδηση** είναι γνωστή και ως ροοστατική πέδηση. Σε αυτή τη μορφή η μηχανή αποσυνδέεται από την τροφοδοσία και συνδέεται αμέσως μια αντίσταση R_b στον οπλισμό. Η μηχανή τώρα θα λειτουργεί ως γεννήτρια και θα παράγει ροπή πέδης. Κατά τη διάρκεια της ηλεκτρικής πέδησης, όταν η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, η κινητική ενέργεια αποθηκεύεται στα περιστρεφόμενα μέρη της μηχανής και το συνδεδεμένο φορτίο μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια καταναλώνεται

στην αντίσταση R_b και στην αντίσταση τυμπάνου με τη μορφή θερμότητας. Η δυναμική πέδη είναι μία αναποτελεσματική μέθοδος αφού όλη η παραγόμενη ενέργεια καταναλίσκεται στις αντιστάσεις στη μορφή θερμότητας. [3]

Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως από τις τρεις αυτές μορφές πέδης, η αναγεννητική είναι η μόνη που τροφοδοτεί ηλεκτρισμό πίσω στην πηγή τροφοδοσίας. Επομένως είναι σημαντικό να αναλυθεί εκτενέστερα η εντός των τεταρτημορίων φρεναρίσματος, δηλαδή του II και IV τεταρτημορίου.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι να παρέχει την ανάλυση της αναγεννητικής πέδησης στις ηλεκτρικές μηχανές τροφοδοτούμενες από πηγή συνεχούς ρεύματος, να γνωστοποιήσει τα οφέλη της και παρουσιάσει μερικές εφαρμογές στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα.

Οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρικά και σε υβριδικά ηλεκτρικά συστήματα κίνησης οχημάτων για να παρέχουν κίνηση ή ροπή πέδης, ανάλογα με την προτίμηση του οδηγού και της λογική της διαχείρισης ενέργειας. Το γεγονός αυτό καθιστά την έννοια της αναγεννητικής πέδησης όλο και πιο σημαντική σε τέτοια οχήματα, λόγω της περιορισμένης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας των οχημάτων. Η αναγεννητική πέδη παρέχει ένα μέσο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια ενός συμβάντος φρεναρίσματος, για άμεση χρήση ή για αποθήκευση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής κατανάλωσης των οχημάτων και με τον τρόπο αυτό, το όχημα διανύει μεγαλύτερη διαδρομή για μια δεδομένη ενέργεια από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον καθώς η ηλεκτρική μηχανή φρενάρει βοηθά τα μηχανικά φρένα που συνδέονται με τους τροχούς του οχήματος, οδηγώντας έτσι μείωση της φθοράς των μηχανικών εξαρτημάτων των φρένων. [4]

1.1 ΤΟ ΚΙΝΗΤΡΟ ΓΙΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ

Παγκόσμια κρίση υπάρχει στην αναζήτηση αξιόπιστων πηγών ενέργειας στα οχήματα πέρα από ορυκτά καύσιμα, λόγω των περιορισμένων πόρων. Αυτή η κρίση επεκτείνεται από τα εξαρτημένα εδάφη του πετρελαίου της Μέσης Ανατολής, όπου υπάρχει σε αφθονία αλλά όχι σε ατελείωτη προσφορά των ορυκτών καυσίμων, προς όλο τον κόσμο. Για δεκαετίες, οι τιμές πετρελαίου αυξάνονταν συνεχώς. Το πρώτο ατμοκίνητο όχημα εφευρέθηκε το 1770 από τον Γάλλο μηχανικό Νικολά-Ζόζεφ Κυνιό [5]. Αργότερα στα μέσα της δεκαετίας του 1830, ο Ρόμπερτ Άντερσον της Σκωτίας εφηύρε το πρώτο ακατέργαστο ηλεκτρικό όχημα, που λειτουργούσε με μη επαναφορτιζόμενες ηλεκτρικές κυψέλες. [6]

Ωστόσο ο κόσμος εξακολουθεί να είναι εξαρτημένος από το πετρέλαιο καθώς οι τεχνολογίες αυτοκινήτων έχουν εξελιχθεί σε αυτό που είναι σήμερα.

Αυτή η πετρελαϊκή κρίση δεν είναι κάτι το πρωτοφανές. Στα μέσα της δεκαετίας του 1970, οι ελλείψεις καυσίμων άλλαξε ριζικά την οδηγική συμπεριφορά των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτή η έλλειψη ανάγκασε την ομοσπονδιακή κυβέρνηση να θέσει ένα εθνικό όριο ταχύτητας στην προσπάθεια διατήρησης των καυσίμων και αναγκάζοντας την αυτοκινητοβιομηχανία να δημιουργήσει πιο αποδοτικά οχήματα. Το 1974, η Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας(EPA) δημιούργησε ένα ερευνητικό πρόγραμμα που ονομάζεται το πρόγραμμα κινητήρων Ομοσπονδιακής οικολογικού αμαξίου(Federal Clean Car Incentive Program) [7] .Το πρόγραμμα αυτό ενθάρρυνε νέες καινοτόμες ιδέες για την ανάπτυξη αξιόπιστων εναλλακτικών πηγών ενέργειας για την αυτοκινητοβιομηχανία. Το πρώτο υβριδικό όχημα εφευρέθηκε από τον Victor Wouk λίγο μετά την εφαρμογή του προγράμματος (FCCIP). Ο Δρ Wouk είχε τροποποιήσει μια Buick Skylark 1972 σε ένα βενζινο-ηλεκτρικό όχημα που ήταν ικανό να μειώσει την εκπομπή των καυσίμων αλλά και να εξοικονομήσει καύσιμα, αλλά ο στόχος της Υπηρεσίας Περιβαλλοντικής Προστασίας εκείνη την εποχή ήταν η κατασκευή ενός ηλεκτρικού οχήματος. [7]

Σήμερα, η αυτοκινητοβιομηχανία κατασκευάζει υβριδικά οχήματα για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του κοινού για πιο αποδοτικά οχήματα λόγω, των υψηλών τιμών των καυσίμων. Επιπλέον, για να κάνει τα υβριδικά οχήματα ακόμη πιο αποδοτικά στην εξοικονόμηση ενέργειας έχουν εφαρμοστεί διάφορες τεχνολογίες. Ένας τύπος τεχνολογίας για την ανάκτηση ενέργειας σε ένα κινούμενο όχημα είναι η αναγεννητική πέδηση.

Όταν ένα όχημα φρενάρει ή αρχίζει να επιβραδύνει, η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλες μορφές όπως θερμότητας λόγω τριβής ή άλλων απωλειών του οχήματος. Η αναγεννητική πέδηση στα ηλεκτρικά οχήματα μετατρέπει μέρος της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια η οποία μπορεί να φορτίσει μία συστοιχία μπαταριών, που αργότερα μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί για την ηλεκτρική ροπή του κινητήρα. Βασικά, ο κινητήρας κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας ωθεί το όχημα προς τα εμπρός και μόλις φρενάρει ο κινητήρας, μέσω ενός κυκλωματικού συστήματος ελέγχου, λειτουργεί ως γεννήτρια φρενάροντας το όχημα και την ίδια στιγμή φορτίζει την συστοιχία των μπαταριών. Αυτή η μέθοδος της διατήρησης της ενέργειας βοηθά το υβριδικό όχημα στην κάλυψη μεγαλύτερης απόστασης και αυξάνει την αποδοτικότητα των καυσίμων, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

1.2.1 ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ

Τον Σεπτέμβριο του 1866, εφευρέθηκε η πρώτη αυτοδιεγειρόμενη γεννήτρια, η οποία έκανε την ηλεκτροκίνηση πραγματικότητα, από τον Σάμουελ Άλφρεντ Βάρλεϋ (Samuel Alfred Varley). [8]. Μια αυτοδιεγειρόμενη γεννήτρια είναι μία “γεννήτρια που παράγει μαγνητικό πεδίο γύρω από τον εαυτό της, δια του οποίου οι κινήσεις ενός ηλεκτρικού αγωγού, που μεταφέρουν δυναμικές μαγνητικές γραμμές παράγουν επιπλέον ρεύμα και τελικά οδηγεί σε ένα σταθερό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.” [9]. Ουσιαστικά εφηύρε τυλίγματα ενώσεων, που είναι ένας συνδυασμός τυλιγμάτων σειράς και παράλληλων τυλιγμάτων στο μαγνητικό πεδίο μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος. Ο Σάμουελ Βάρλεϋ δεν εφηύρε την αναγεννητική πέδηση, αλλά άνοιξε τον δρόμο για τους ηλεκτρολόγους μηχανικούς που πάλευαν σκληρά για την επιτυχία της αναγεννητικής πέδησης. [8].

1.2.2 Ο ΙΔΡΥΤΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ

Η εταιρία Τζόν Λουντελ (John-Lundell Company), το 1902, ήταν η πρώτη που ανέπτυξε ένα αναγεννητικό σύστημα πέδησης που λειτούργησε και ήταν σε θέση να εγκατασταθεί το σύστημα σε ένα βαγόνι του τραμ τους. Την ίδια χρονική περίοδο που η εταιρία Τζόν Λουντελ έκανε το ντεπούτο του καινούργιου συστήματος ο Τζόν Σμίθ Ρέιουορθ (John Smith Raworth) ανέπτυξε και αυτός ένα αναγεννητικό σύστημα πέδησης στα δικά του Demi-Cars. Υπήρξε μεγάλη διαμάχη ανάμεσα στις εταιρίες Τζόν Λουντελ και Ρέιουορθ που πάλευαν για τα δικαιώματα της εφεύρεσης της αναγεννητικής πέδησης. Αυτή η διαμάχη είχε ως αποτέλεσμα και οι δυο εταιρίες να έχουν χάσει τα περισσότερά τους λεφτά σε αμοιβές δικηγόρων, πράγμα που τους οδήγησε στην οικονομική αστάθεια και ανάγκασε την εταιρία του Τζόν Λουντελ να αποσύρει τα δικαιώματά τους από την εφεύρεση. Έτσι κατέληξε η Ρέιουορθ να είναι ο εφευρέτης της αναγεννητικής πέδησης. Εντός της δεκαετίας της εφαρμογής της αναγεννητικής πέδησης στα Demi-Cars, ένα ατύχημα σε ένα Demi-Cars, που έλαβε χώρα στο Ρόουτενστολ το 1911, είχε ως αποτέλεσμα την δυσφήμιση της αναγεννητικής πέδησης, προκαλώντας το κλείσιμο της εταιρίας Ρέιουορθ λίγο αργότερα [8].

Ο αντισυνταγματάρχης Ντρούιτ (Druitt) έγραψε μία αναφορά για το ατύχημα της εταιρίας Ρέιουορθ στις 22 Νοέμβριου του 1911. Διευκρίνισε ότι η αναγεννητική πέδηση ήταν ανίκανη να σταματήσει το τραμ σε απότομες κλίσεις, προκαλώντας έτσι την ένωση των παράλληλων τυλιγμάτων. Αυτό οδήγησε στην επιτάχυνση του κινητήρα, με αποτέλεσμα την σύγκρουση δυο τράμ. Τόνισε επίσης, στο υπουργείο εμπορίου ότι τα αυτοκίνητα που είναι

εξοπλισμένα με συστήματα ελέγχου αναγεννητικής πέδησης είναι ακατάλληλα. [8]. Μετά την αναφορά , η επιτροπή του υπουργείου εμπορίου στο Ηνωμένο Βασίλειο απαγόρευσε την αναγεννητική πέδηση λόγω της φοβίας μελλοντικών ατυχημάτων που προκαλεί αυτή η τεχνολογία. [8]

Σχεδόν δύο δεκαετίες αργότερα, η αναγεννητική πέδηση επανήλθε στο προσκήνιο. Λόγου του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας μετά τον Α Παγκόσμιο πόλεμο άρθηκε η απαγόρευση που είχε επιβάλλει το υπουργείο εμπορίας του Ηνωμένου Βασιλείου, και η αναγεννητική πέδηση εξερευνήθηκε ξανά. Το 1915, η σιδηροδρομική εταιρία Norfolk and Western ήταν σε θέση να θέσει σε λειτουργία ηλεκτρικές μηχανές με τριφασικό κινητήρα χρησιμοποιώντας αναγεννητική πέδηση. [8]

Ακόμη, εξαιτίας του Β΄ Παγκοσμίου πολέμου η εξέλιξη της αναγεννητικής πέδησης παρέμεινε στάσιμη μέχρι την κρίση των καυσίμων της δεκαετίας του 1970.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

2.1 Μοντελοποίηση

Το ισοδύναμο κύκλωμα μια μηχανής συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης φαίνεται στην Εικόνα 2, όπου το V_m είναι η τάση εισόδου της μηχανής, i_a το ρεύμα τυμπάνου, R_a η αντίσταση τυμπάνου, R_c η αντίσταση απωλειών πυρήνα, i_m και i_c αντιπροσωπεύουν τα ρεύματα μαγνήτισης και σκέδασης, K_b είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής, i_f το ρεύμα διέγερσης και ω η γωνιακή ταχύτητα της μηχανής. Το γινόμενο $K_b i_f \omega = E_a$ που είναι η τάση που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας. Το κύκλωμα της διέγερσης δεν εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα. Το σχηματικό διάγραμμα της μηχανής συνεχούς ρεύματος που περιγράφεται παραπάνω συνδεδεμένο με μία πηγή συνεχούς ρεύματος, όπως μια μπαταρία, μέσω μιας πλήρους γέφυρας ΣΡ-ΣΡ, φαίνεται στην Εικόνα 3. Η πλήρους γέφυρα ΣΡ-ΣΡ είναι ένα ενεργοποιητής που χρησιμοποιείται για να μία μέση επιθυμητή τάση κατά μήκος των τερματικών την μηχανής συνεχούς ρεύματος. Αυτός ο ελεγχόμενος μετατροπέας αποτελείται από δύο μισές γέφυρες, η καθεμία αποτελούμενη από δύο διακόπτες τρανζίστορ και δύο διόδους όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Σε αυτό το σχήμα το τρίτο τερματικό του κάθε διακόπτη τρανζίστορ δεν εμφανίζεται. Η ισχύς παρέχεται από την πηγή συνεχούς ρεύματος, σαν μία ηλεκτροχημική μπαταρία της οποίας το ισοδύναμο κυκλωματικό διάγραμμα φαίνεται στην Εικόνα 4.

Η μηχανή ΣΡ συνδέεται στη μέση των διόδων κάθε κλάδου του DC-DC μετατροπέα, δηλαδή στα σημεία A και B όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Ο κόμβος εξόδου του σημείου A, έχει τάση V_A , που μετρήθηκε σε σχέση με τον αρνητικό ακροδέκτη τροφοδοσίας N και ρεύμα i_A που ρέει από αυτό τον κλάδο προς το θετικό ακροδέκτη του κινητήρα. Ο κόμβος εξόδου του σημείου B, έχει τάση V_B , που μετρήθηκε σε σχέση με τον αρνητικό ακροδέκτη τροφοδοσίας N και το ρεύμα i_B ρέει από αυτό τον κλάδο στον αρνητικό ακροδέκτη του κινητήρα. Εφαρμόζοντας τον Νόμο της τάσεως του Kirchhoff (NTK) και τον Νόμο ρευμάτων του Kirchhoff (NPA), βρίσκουμε την τάση και το ρεύμα της μηχανής:

$$V_m = V_A - V_B$$

$$i_a = i_A - i_B$$

Προκειμένου να ελεγχθεί το στιγμιαίο ρεύμα στην ηλεκτρική μηχανή, η μέση τάση που εφαρμόζεται στη μηχανή συνεχούς ρεύματος πρέπει να ελέγχεται. Ο μετατροπέας επιτυγχάνει την επιθυμητή λειτουργία της δημιουργίας μια επιθυμητής μέσης τάσης στη μηχανή χρησιμοποιώντας διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM) με τους διακόπτες να λειτουργούν σε λειτουργία μεταγωγής. Η λειτουργία μεταγωγής ή αλλιώς Switched-mode power supply (SMPS) είναι μια είναι ένα ηλεκτρονικό τροφοδοτικό που ενσωματώνει ένα ρυθμιστή μεταγωγής για τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεσματικά. Δηλαδή η ρύθμιση της τάσης επιτυγχάνεται με την μεταβολή της αναλογίας του χρόνου που οι διακόπτες θα είναι on-off. [10]. Ουσιαστικά τα τρανζίστορ λειτουργούν ως διακόπτες και όχι σαν γραμμικοί ενισχυτές. Θεωρείται ότι ο μετατροπέας δεν έχει απώλειες. Αυτό σημαίνει ότι, η αγωγιμότητα και οι απώλειες μεταγωγής των διακοπών των κλάδων του μετατροπέα ΣΡ-ΣΡ αμελούνται για την ανάλυση αυτή.

Οι διακόπτες σε κάθε κλάδο λειτουργούν συμπληρωματικά μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι ο διακόπτης πάνω από τον κόμβο A και ο διακόπτης κάτω από τον κόμβο B λειτουργούν μαζί, και ο διακόπτης πάνω από τον κόμβο B λειτουργεί μαζί με τον διακόπτη κάτω από τον κόμβο A. Αν το u είναι το duty-cycle, δηλαδή όταν ο διακόπτης πάνω από τον κόμβο A και ο διακόπτης κάτω από το B λειτουργούν μαζί, δηλαδή βρίσκονται στην κατάσταση on οι διακόπτες, και το T_s είναι η χρονική περίοδος ενεργοποίησης, τότε κατά τη διάρκεια αυτής της εναλλαγής uT_s έχουμε:

$$V_A = V_s$$

$$V_B = 0$$

Άρα η τάση εισόδου της μηχανής είναι:

$$V_m = V_A - V_B = V_s$$

Κατά το υπόλοιπο τμήμα της περιόδου μεταγωγής $(1-u)T_s$, όταν ο διακόπτης κάτω από τον κόμβο A και ο διακόπτης πάνω από τον κόμβο B ενεργοποιούνται έχουμε:

$$V_A = 0$$

$$V_B = V_s$$

Άρα η τάση εισόδου της μηχανής είναι:

$$V_m = V_A - V_B = -V_s$$

Η μέση τάση εισόδου της μηχανής κατά τη διάρκεια της πλήρους περιόδου εναλλαγής T_s είναι:

$$V_m = uV_s + (1 - u)(-V_s)$$

$$\Rightarrow V_m = (2u - 1)V_s \quad (1)$$

Από την στιγμή που θεωρήσαμε να μην έχει απώλειες ο μετατροπέας, παίρνουμε την εξίσωση ισορροπίας ισχύος μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου και εξόδου του μετατροπέα.

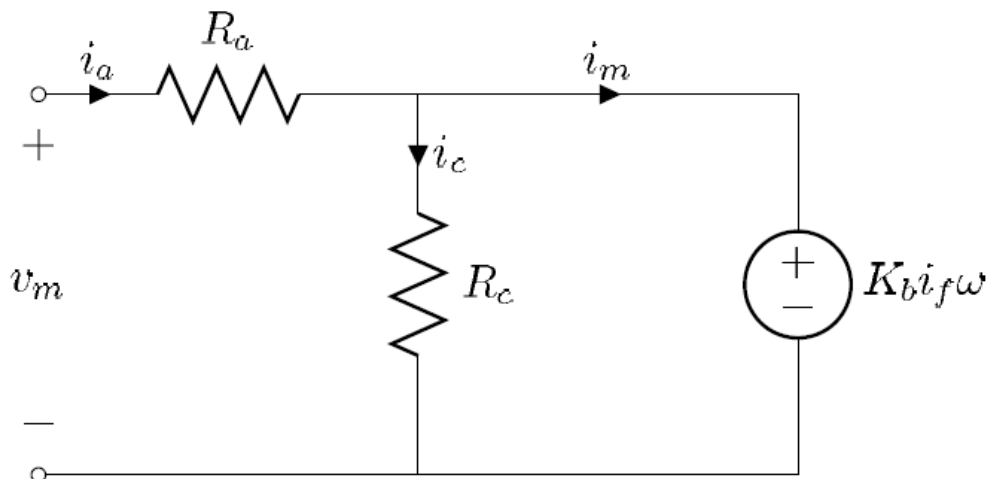
Συνεπώς,

$$V_s i_s = V_m i_a$$

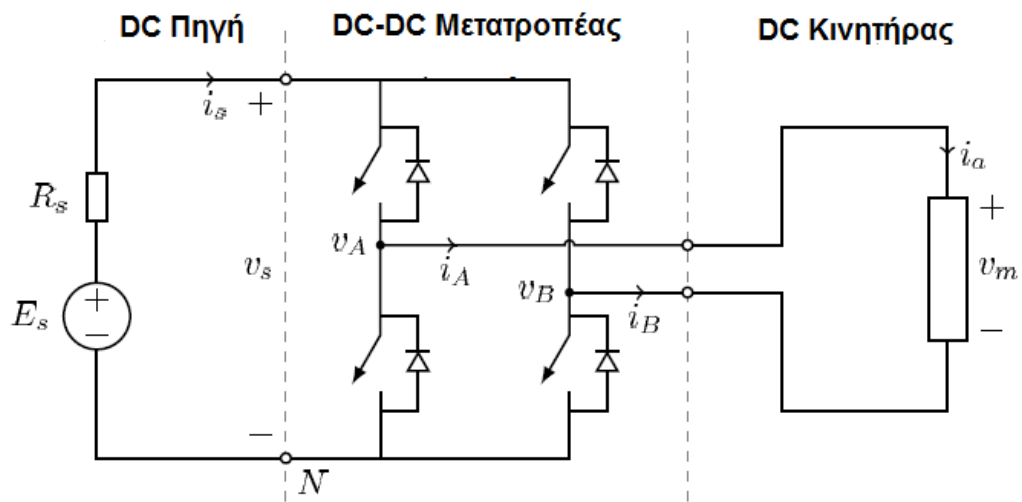
Με την βοήθεια της (1) έχουμε:

$$V_s i_s = (2u - 1)V_s i_a$$

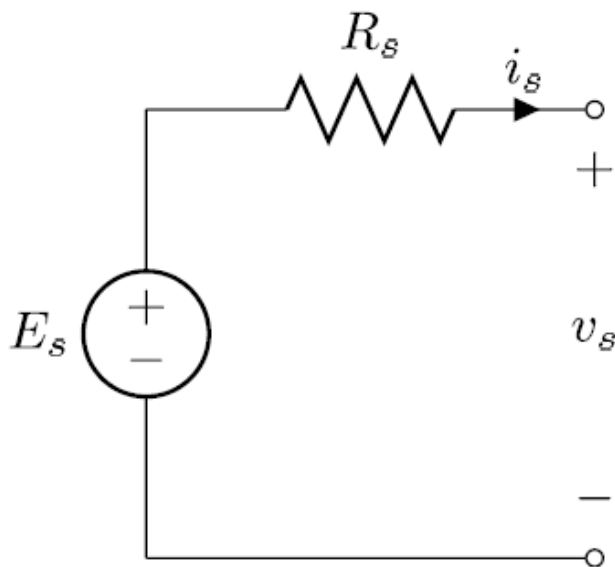
$$\Rightarrow i_s = (2u - 1)i_a \quad (2)$$



Εικόνα 2 : Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής ΣΡ ξένης διέγερσης(δεν περιλαμβάνει το κύκλωμα της διέγερσης)



Εικόνα 3 : Σχηματικό διάγραμμα παρουσιάζει την σύνδεση της μηχανής ΣΡ στην ΣΡ πηγή μέσω ενός μετατροπέα ΣΡ-ΣΡ



Εικόνα 4 : Ισοδύναμο κύκλωμα μιας ηλεκτροχημικής μπαταρίας που χρησιμοποιείται ως πηγή συνεχούς ρεύματος.

Μπορούμε να συνοψίσουμε τις εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τα ισοδύναμα κυκλωματικά διαγράμματα που φαίνονται στην Εικόνα 2 και στην Εικόνα 4, μαζί με τις εξισώσεις (1) και (2) όπως φαίνεται παρακάτω.

Υποθέσαμε πως η διέγερση της μηχανής ΣΡ είναι ξένης διεγέρσεως, με την ροή της διέγερσης εντός του ορίου κορεσμού και της αντίστασής της να αμελείται.

$$\begin{bmatrix} -R_c & R_c & 0 & 0 & 0 \\ R_c & -(R_a + R_c) & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & (2u - 1) \\ 0 & (2u - 1) & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_m \\ i_a \\ v_m \\ i_s \\ v_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_b i_f \omega \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής δίνεται από τον τύπο:

$$T = K_b i_f i_m \quad (4)$$

2.2 Ανάλυση

Η κίνηση εμπρός συμβαίνει μέσα σε ένα εφικτό υποσύνολο του 1^{ου} τεταρτημορίου του επιπέδου Ροπής-Ταχύτητας όπου $T \geq 0$ και $\omega \geq 0$. Όμοια φρενάρισμα εμπρός συμβαίνει μέσα σε ένα εφικτό υποσύνολο του 2^{ου} τεταρτημορίου, όπου $T \geq 0$ και $\omega \leq 0$. Η αναγεννητική πέδηση λαμβάνει χώρα σε ένα μικρότερο εφικτό υποσύνολο του 4^{ου} τεταρτημορίου, όπου $T \leq 0$, $\omega \geq 0$ και $i_s \leq 0$.

Ορίζουμε τα ακόλουθα προβλήματα βελτιστοποίησης:

Πρόβλημα 1: μεγιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3) – (4):

$$0 \leq u \leq 1, \quad |i_a| \leq I_{\max}, \quad 0 \leq i_f \leq I_{f-\max}, \quad T \geq 0 \quad (5)$$

Πρόβλημα 2: ελαχιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3) – (4):

$$0 \leq u \leq 1, \quad |i_a| \leq I_{\max}, \quad 0 \leq i_f \leq I_{f-\max}, \quad T \leq 0 \quad (6)$$

Πρόβλημα 3: μεγιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3) – (4):

$$0 \leq u \leq 1, \quad |i_a| \leq I_{\max}, \quad 0 \leq i_f \leq I_{f-\max}, \quad T \leq 0 \quad (7)$$

Πρόβλημα 4: ελαχιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3) – (4):

$$0 \leq u \leq 1, \quad |i_a| \leq I_{\max}, \quad 0 \leq i_f \leq I_{f-\max}, \quad T \leq 0, \quad i_s \leq 0 \quad (8)$$

Πρόβλημα 5: μεγιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3) – (4):

$$0 \leq u \leq 1, \quad |i_a| \leq I_{\max}, \quad 0 \leq i_f \leq I_{f-\max}, \quad T \leq 0, \quad i_s \leq 0 \quad (9)$$

Όπου το I_{\max} είναι το μέγιστο ρεύμα εισόδου που δίνεται στην μηχανή, $I_{f-\max}$ είναι το ανώτατο όριο του ρεύματος διέγερσης. Το πρόβλημα 1 λύνει τα όρια της μέγιστης ροπής εμπρός κίνησης(κινητήρας) της περιοχής I της Εικόνα 1. Τα προβλήματα 2 και 3 λύνουν τα όρια της μέγιστης και ελάχιστης ροπής πέδησης του 4^{ου} τεταρτημορίου, δηλαδή της περιοχής IV της Εικόνα 1. Τα προβλήματα 4 και 5 λύνουν τα όρια της μέγιστης και ελάχιστης ροπής αναγεννητικής πέδησης στα όρια του 4^{ου} τεταρτημορίου αλλά για μικρότερο υποσύνολο της περιοχής IV.

Εκτός από αυτά υπάρχει ένα άλλο πρόβλημα βελτιστοποίησης που έχει ενδιαφέρον

Πρόβλημα 6: ελαχιστοποίηση του ρεύματος πηγής, i_s

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3) – (4):

$$0 \leq u \leq 1, \quad |i_a| \leq I_{\max}, \quad 0 \leq i_f \leq I_{f-\max}, \quad T \leq 0, \quad i_s \leq 0 \quad (10)$$

Το πρόβλημα 6 λύνει το μέγιστο πιθανό ρεύμα που μεταφέρεται πίσω στην πηγή συνεχούς ρεύματος κατά την διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης και η σχέση που έχει αυτή η λύση στην αντίστοιχη αναγεννητική ροπή πέδησης.

2.3 Αριθμητικά Αποτελέσματα

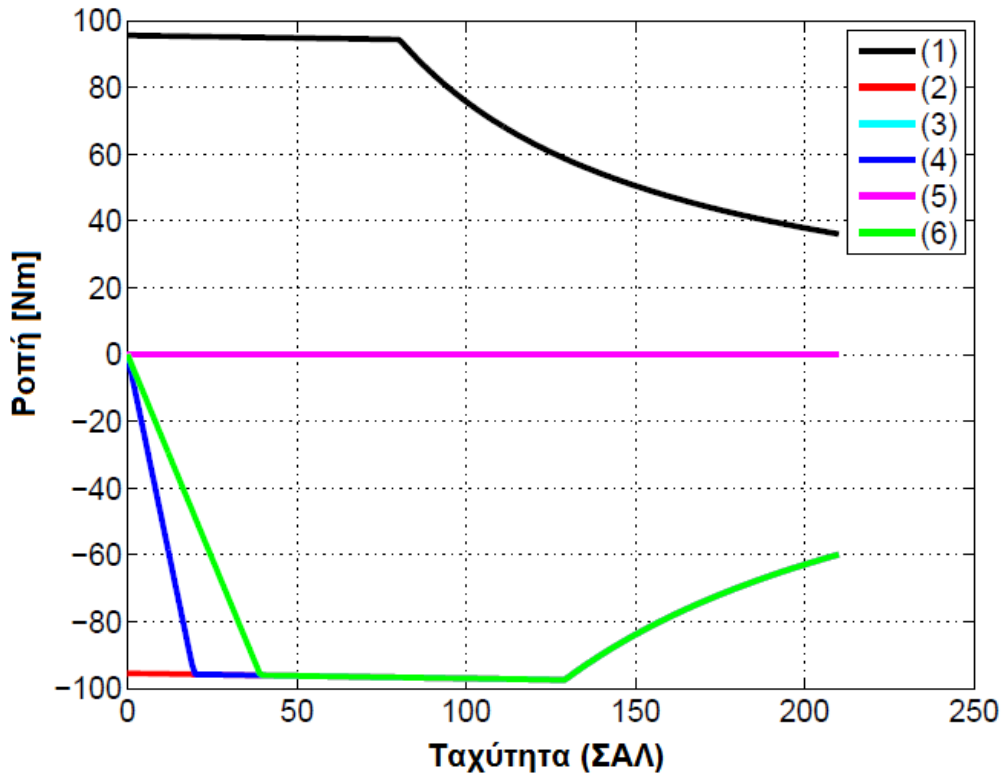
Τα παραπάνω προβλήματα βελτιστοποίησης προγραμματίστηκαν στο MATLAB και επιλύθηκαν χρησιμοποιώντας την αριθμητική συνάρτηση βελτιστοποίησης `fmincon` της εργαλειοθήκης βελτιστοποίησης. (Optimization Toolbox). Τα προβλήματα λύθηκαν για μία ξένης διέγερσης μηχανής συνεχούς ρεύματος και μια μόνιμου μαγνήτη συνεχούς ρεύματος μηχανής .

2.3.1 Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης

Οι παράμετροι του συστήματος που περιγράφουν μια μηχανή ΣΡ με ξένη διέγερση δίνονται στον Πίνακας 1. Να σημειωθεί ότι η αντίσταση της διέγερσης αμελείται. Οι λύσεις των έξι προβλημάτων βελτιστοποίησης παρίστανται γραφικώς στο επίπεδο Ροπής-Ταχύτητας όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Φαίνεται ότι η λύση στο πρόβλημα 4 χωρίζει το τεταρτημόριο της εμπρός πέδησης (περιοχή II της Εικόνα 1) σε δύο τμήματα. Το τμήμα μεταξύ του άξονος y και της λύσης του προβλήματος 4 (φαίνεται με μπλε) αντιπροσωπεύει την περιοχή της μη αναγεννητικής πέδησης και το υπόλοιπο του τεταρτημορίου της εμπρός πέδησης αντιπροσωπεύει την περιοχή της αναγεννητικής πέδησης. Η λύση του προβλήματος 5 (φαίνεται με το μωβ) συμπίπτει με τον άξονα τον x . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα διέγερσης τροφοδοτείται από κύκλωμα ξένης διέγερσης, του οποίου οι απώλειες δεν έχουν ληφθεί υπόψη κατά την μοντελοποίηση του συστήματος. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, η λύση του προβλήματος 6 (φαίνεται με πράσινο) είναι μία καμπύλη που περνάει μέσα από το τεταρτημόριο της πέδησης. Λειτουργία κατά μήκος αυτής της γραμμής θα έχει αποτέλεσμα την απορρόφηση του μέγιστου ρεύματος από την πηγή συνεχούς ρεύματος κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης.

Πίνακας 1 :Παράμετροι Μηχανής ΣΡ Ξένης Διέγερσης που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική βελτιστοποίηση

Παράμετροι	Τιμές
E_s	201.3 V
R_s	0.183 Ω
K_b	1.91 V/(A rads ⁻¹)
R_a	0.75 Ω
R_c	240 Ω
I_{max}	20 A
$I_f\text{-max}$	1 A
ω_{max}	1000 ΣΑΛ



Εικόνα 5 :Αριθμητικές λύσεις βελτιστοποίησης Μηχανής ΣΡ ξένης διέγερσης

2.3.2 Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος Μόνιμου Μαγνήτη

Τα αριθμητικά προβλήματα βελτιστοποίησης που περιγράφηκαν νωρίτερα, λύθηκαν επίσης και για μηχανή ΣΡ μόνιμου μαγνήτη (ΣΜΜΜ). Το μαγνητικό πεδίο της ΣΜΜΜ παρέχεται από μόνιμους μαγνήτες που είναι συνδεδεμένοι στον στάτη της μηχανής. Όλες οι παραπάνω εξισώσεις που περιγράφονται για την μηχανή ξένης διέγερσης παραμένουν ως έχουν, εκτός του μεταβλητού ρεύματος διέγερσης, i_f που αντικαθίσταται από μία σταθερή μαγνητική ροή φ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει την εξίσωση της αντι-ηλεκτεγερτικής δύναμης και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής ως εξής:

$$E_A = K \varphi \omega$$

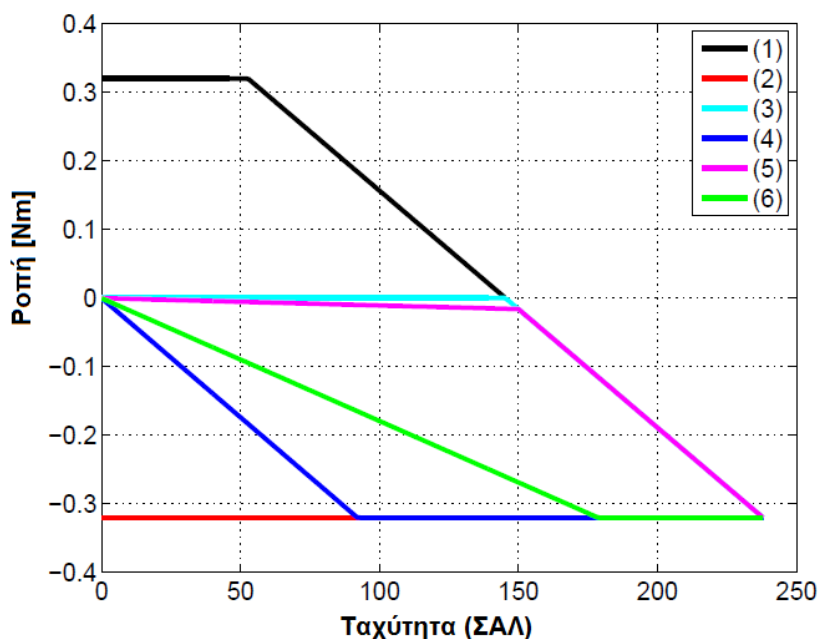
$$T = K \varphi i_a \quad (11)$$

Οι παράμετροι του συστήματος που περιγράφουν την μηχανή συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη απαριθμούνται στον Πίνακα 2 και οι λύσεις απεικονίζονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.

Πίνακας 2 :Παράμετροι Μηχανής ΣΡ Μόνιμου Μαγνήτη που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική βελτιστοποίηση

Παράμετροι	Τιμές
E_s	26.4 V
R_s	0.048 Ω
K_b	1.91 V/(A rads ⁻¹)
φ	0.1047 Wb
R_α	7.6 Ω
R_c	240 Ω
I_{max}	2 A
ω_{max}	1500 ΣΑΛ

Φαίνεται στο διάγραμμα ροπής-ταχύτητας ότι η μαύρη και η κόκκινη καμπύλη για την ΣΜΜΜ είναι διαφορετική σε σχήμα από εκείνη της μηχανής ΣΡ ξένης διεγέρσεως. Αυτό οφείλεται στην εξασθένιση της μαγνητικής ροής στις ΣΜΜΜ. Επίσης, η λύση του προβλήματος 5 (φαίνεται με το μωβ) στην Εικόνα 6 , δεν συμπίπτει με τον άξονα x όπως νωρίτερα, αλλά αντισταθμίζεται. Ακόμα, οι λύσεις του προβλήματος 4 (φαίνεται με το μπλε χρώμα) και 5 διαιρούν το τεταρτημόριο της εμπρός πέδησης σε τρία τμήματα. Οι περιοχές κοντά στους άξονες x και y είναι περιοχές μη αναγεννητικής πέδησης και η ενδιάμεση περιοχή είναι αναγεννητικής πέδησης. Η λύση του προβλήματος 6 (φαίνεται με πράσινο) αντιπροσωπεύει την καμπύλη λειτουργίας κατά μήκος του οποίου το μέγιστο ρεύμα στέλνεται πίσω στην πηγή συνεχούς ρεύματος μέσω της αναγεννητικής πέδησης.



Εικόνα 6 : Αριθμητικές Λύσεις Βελτιστοποίησης Μηχανής ΣΡ Μόνιμου Μανήτη

2.4 Θεωρητικά Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή, θα χρησιμοποιηθούν οι θεωρητικοί τύποι που περιγράφουν τα όρια της αναγεννητικής πέδησης και η καμπύλη του μέγιστου ρεύματος αναγεννητικής πέδησης που αναπτύσσεται σε μία μηχανή ΣΡ μόνιμου μαγνήτη.

2.4.1. Αγνόηση της αντίστασης απωλειών πυρήνα, R_c

Σε αυτή την ενότητα θεωρούμε το σύστημα εξισώσεων που περιγράφεται στην σχέση (3) και θέτουμε την R_c να τείνει στο άπειρο, επιτρέποντας έτσι να περάσει μηδενικό ρεύμα από την αντίσταση R_c και οι απώλειες πυρήνα, που ισούται με $i^2 R_c$, θεωρούνται αμελητέες.

2.4.1.1. Όρια Αναγεννητικής Πέδησης

Το σύστημα αναλύεται ως εξής. Η ισχύς της πηγής ΣΡ είναι:

$$P_s = E_s i_s \quad (12)$$

Η απώλεια ισχύος της πηγής είναι:

$$P_{(απ)S} = i_s^2 R_s$$

Η ισχύς εισόδου της ηλεκτρικής μηχανής είναι:

$$P_e = v_m i_a$$

Η ισχύς εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής είναι:

$$P_m = T\omega \quad (13)$$

Οι απώλειες της ηλεκτρικής μηχανής είναι:

$$P_a = i_a^2 R_a$$

Αφού $i_c = 0$, τότε $i_a = i_m$. Η εξίσωση ισορροπίας ισχύος από την πλευρά της ηλεκτρικής μηχανής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\begin{aligned}
P_e &= P_m + P_a \\
P_e &= T\omega + i_a^2 R_a \\
P_e &= K \varphi i_m \omega + i_m^2 R_a
\end{aligned}
\tag{14}$$

Η εξίσωση ισορροπίας ισχύος από την πλευρά της πηγής ΣΡ δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_s = P_e + P_{(απ)s}$$

$$P_s = P_e + i_s^2 R_s$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση (12), παίρνουμε το ρεύμα πηγής:

$$i_s = \frac{E_s - \sqrt{E_s^2 - 4R_s P_e}}{2R_s} \tag{15}$$

Για να βρούμε το όριο μεταξύ αναγεννητικής πέδησης και μη, θέτουμε την ισχύς της πηγής με μηδέν, δηλαδή $P_s = 0$. Αυτό σημαίνει ότι, η ισχύς ούτε απομακρύνεται ούτε ότι απορροφάται από την πηγή συνεχούς ρεύματος.

$$P_s = E_s i_s = 0$$

Και επειδή η E_s είναι θετική και όχι μηδενική τότε :

$$i_s = 0$$

Με την βοήθεια της (15) παίρνουμε:

$$E_s^2 = E_s^2 - 4R_s P_e$$

$$\Leftrightarrow 4R_s P_e = 0$$

$$P_e = 0 \tag{16}$$

Από την σχέση (16) με την βοήθεια της (14), παίρνουμε:

$$K \phi i_m \omega + i_m^2 R_a = 0$$

$$i_m = - (K / R_a) \omega \text{ και } i_m = 0$$

Οι ηλεκτρομαγνητικές ροπές που αντιστοιχούν στις παραπάνω εξισώσεις είναι:

$$T = - \left[\frac{(K\phi)^2}{R_a} \right] \omega \quad (17)$$

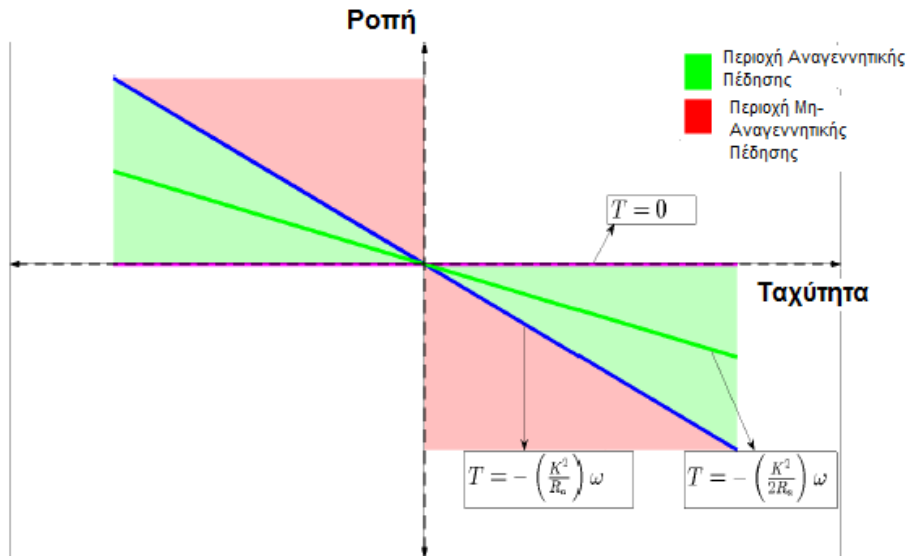
Και

$$T = 0$$

αντίστοιχα.

Οι παραπάνω εκφράσεις των ροπών δείχνουν ότι υπάρχουν δύο όρια που χωρίζουν τις περιοχές της αναγεννητικής πέδησης και της μη αναγεννητικής στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας, με την απουσία της αντίστασης απωλειών πυρήνα R_c . Ένα όριο είναι μία ευθεία γραμμή στο τέταρτο και δεύτερο τεταρτημόριο που περνά από την αρχή των αξόνων με αρνητική κλίση, που εξαρτάται από την αντίσταση σπλισμού της μηχανής R_a , της μαγνητικής σταθεράς $K\phi$, όπου K η σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής και ϕ η μαγνητική ροή που διατηρείται σταθερή.

Το άλλο όριο είναι κατά μήκος του άξονος x όπου $T = 0$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Αν η ευθεία που περιγράφει το όριο της αναγεννητικής πέδησης υπερβεί τα όρια της καμπύλης ροπής-ταχύτητας, τότε το όριο της αναγεννητικής πέδησης ακολουθεί την καμπύλη ροπής-ταχύτητας. Από τις σχέσεις (17) και (18), μπορούμε επίσης να συμπεράνουμε, ότι η ένταση της αντίστασης της πηγής συνεχούς ρεύματος, R_s , δεν επηρεάζει το όριο μεταξύ αναγεννητικής πέδησης και μη αναγεννητικής των λειτουργικών περιοχών. Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί ότι η R_s θα επηρέαζε τα συνολικά όρια των καμπυλών ροπής-ταχύτητας.



Εικόνα 7: Όρια αναγεννητικής πέδησης και καμπύλη μέγιστου ρεύματος αναγεννητικής πέδησης για μια μηχανή ΣΡ μόνιμου μαγνήτη αμελώντας την αντίσταση απωλειών πυρήνα.

2.4.1.2. Μέγιστο Ρεύμα Αναγεννητικής Πέδησης

Για να βρούμε σχέση για το μέγιστο ρεύμα που απορροφάει μια μηχανή ΣΡ, παραγωγίζουμε το ρεύμα της μηχανής ΣΡ, i_s , ως προς το ρεύμα ελέγχου i_a . Από τη σχέση (15) έχουμε:

$$\frac{di_s}{di_a} = \frac{d}{di_a} \left(\frac{Es - \sqrt{Es^2 - 4R_s P_e}}{2R_s} \right) = 0$$

Και επειδή η Es και η R_s είναι σταθερές

$$\Leftrightarrow \frac{dP_e}{di_a} = 0 \quad (19)$$

Επιπλέον η R_c αμελείται, άρα θα ισχύει $i_a = i_m$

Συνεπώς, η (19) θα γίνει:

$$\frac{dP_e}{di_m} = 0$$

Από την (14) θα πάρουμε:

$$\frac{dP_e}{di_m} = K \varphi \omega + 2R_a i_m = 0$$

$$i_m = -\frac{(K \varphi)}{2R_a} \omega$$

και η αντίστοιχη εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι:

$$T = -\frac{(K\varphi)^2}{2R_a} \omega \quad (20)$$

Η παραπάνω έκφραση της ροπής είναι μία ευθεία γραμμή στο 2^ο και 4^ο τεταρτημόριο του επιπέδου ροπής-ταχύτητας και περνάει από την αρχή των αξόνων όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Η κλίση της ευθείας είναι αρνητική και είναι η μισή αυτής της (17). Παρατηρείται ότι η αντίσταση πηγής, R_c , δεν επηρεάζει την εξίσωση. Το μέγιστο ρεύμα που απορροφάται από την πηγή κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης δίνεται ως εξής:

$$i_{s \max} = \frac{E_s - \sqrt{E_s^2 + (K\varphi)^2 \omega^2 \left(\frac{R_s}{R_a}\right)}}{2R_s} \quad (21)$$

2.4.2. Λαμβάνοντας την αντίσταση απωλειών πυρήνα, R_c

Στην ενότητα αυτή, εξετάζεται η επίδραση της αντίστασης απωλειών πυρήνα, R_c , στα όρια της αναγεννητικής πέδησης για μία μηχανή ΣΡ Μόνιμου Μαγνήτη. Οι καμπύλες που περιγράφουν τα όρια της αναγεννητικής πέδησης και η καμπύλη του μέγιστου ρεύματος αναγεννητικής πέδησης λαμβάνονται ως εξής.

2.4.2.1 Όρια Αναγεννητικής Πέδησης

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της σχέσης (3), μπορούμε να γράψουμε τις παρακάτω εξισώσεις. Η απώλεια ισχύος του πυρήνα της ηλεκτρικής μηχανής δίνεται από τον τύπο:

$$P_{Fe} = (i_a - i_m)^2 R_c$$

Η συνολική απώλεια ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής, είναι το άθροισμα των απωλειών χαλκού και των απωλειών πυρήνα, άρα έχουμε:

$$P_{(απ)ολ} = i_a^2 R_a + (i_a - i_m)^2 R_c$$

Παίρνοντας τώρα την εξίσωση ισορροπίας ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής και με την βοήθεια της σχέσης (13) έχουμε:

$$P_e = P_m + P_{(απ)ολ}$$

$$P_e = T\omega + i_a^2 R_a + (i_a - i_m)^2 R_c$$

Από την (3) και την (11), έχουμε:

$$i_a = i_m + \frac{K\phi\omega}{R_c} \quad \text{και} \quad T = K\phi i_m$$

$$\Rightarrow P_e = K\phi\omega i_m + \left(i_m + \frac{K\phi\omega}{R_c}\right)^2 R_a + \frac{(K\phi\omega)^2}{R_c}$$

Θέτουμε $\gamma = R_a / R_c$, άρα

$$P_e = i_m^2 R_a + K\phi\omega(1 + 2\gamma)i_m + \frac{(K\phi\omega)^2}{R_c}(1 + \gamma)$$

Με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την (16), δηλ $P_e = 0$, προκύπτει

$$P_e = i_m^2 R_a + K\phi\omega(1 + 2\gamma)i_m + \frac{(K\phi\omega)^2}{R_c}(1 + \gamma) = 0 \quad (22)$$

Και λύνοντας ως προς i_m , παίρνουμε:

$$i_m = -\left(\frac{K\phi(1+\gamma)}{R_a}\right)\omega \quad \text{και} \quad i_m = -\left(\frac{K\phi\gamma}{R_a}\right)\omega$$

Οι αντίστοιχες ηλεκτρομαγνητικές ροπές που συνδέονται με τα παραπάνω ρεύματα είναι:

$$T = -\left(\frac{(K\phi)^2(1+\gamma)}{R_a}\right)\omega \quad (23)$$

Και
$$T = -\left(\frac{(K\phi)^2\gamma}{R_a}\right)\omega \quad (24)$$

αντίστοιχα.

Όταν οι εξισώσεις των ροπών των σχέσεων (23) και (24) απεικονίζονται στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας, παρατηρούμε δυο ευθείες με αρνητικές κλίσεις να διέρχονται από την αρχή των αξόνων. Αυτές οι ευθείες χωρίζουν τα τεταρτημόρια πέδησης (4° και 2°) το καθένα σε τρεις περιοχές. Τα δύο τμήματα που γειτνιάζουν με τους άξονες είναι μη αναγεννητικής πέδησης και το κεντρικό τμήμα αντιστοιχεί στην περιοχή της αναγεννητικής πέδησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.

2.4.2.2 Μέγιστο Ρεύμα Αναγεννητικής Πέδησης

Προκειμένου να προσδιοριστεί η μέγιστη ισχύς που απορροφάται από την πηγή συνεχούς ρεύματος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πάλι την παραγωγή του ρεύματος i_s ως προς το ρεύμα i_a .

Από τη σχέση (19), έχουμε:

$$\frac{di_s}{di_a} = 0 \text{ ισούται με } \frac{dP_e}{di_a} = 0$$

$$\frac{dP_e}{di_a} = \frac{dP_e}{di_m} \frac{di_m}{di_a} = 0$$

Και επειδή $i_a = i_m + \left(\frac{K\phi\omega}{R_c}\right)$, τότε

$$\frac{di_m}{di_a} = 1$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση (22):

$$\frac{dP_e}{di_a} = \frac{dP_e}{di_m} = 2i_m R_a + K\phi\omega(1 + 2\gamma) = 0$$

$$i_m = -\left(\frac{K\phi(1 + 2\gamma)}{2R_a}\right)\omega$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αντιστοιχεί σε αυτό το ρεύμα είναι:

$$T = - \left(\frac{(K\phi)^2(1+2\gamma)}{2R_a} \right) \omega \quad (25)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή της ροπής στη σχέση (22), παίρνουμε :

$$P_e = - \left(\frac{(K\phi)^2}{4R_a} \right) \omega^2 = 0$$

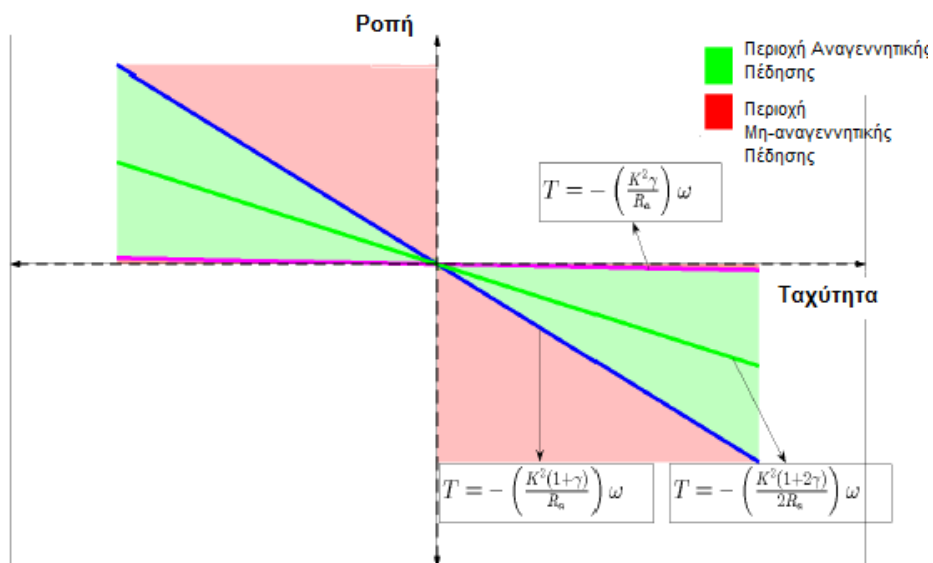
Τέλος, αντικαθιστούμε την τιμή της ισχύς P_e στη σχέση (15), και παίρνουμε το ρεύμα της πηγής ΣΡ:

$$i_{s \max} = \frac{E_s - \sqrt{E_s^2 + (K\phi)^2 \omega^2 \left(\frac{R_s}{R_a} \right)}}{2R_s} \quad (26)$$

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση που βρέθηκε για το μέγιστο ρεύμα φόρτισης ενώ συμπεριλάβαμε την αντίσταση απωλειών πυρήνα, η σχέση (26) , είναι ίδια με την εξίσωση της προηγούμενης ενότητας, σχέση (21), όπου η αντίσταση απωλειών πυρήνα είχε αμεληθεί. Όταν η εξίσωση της ροπής, σχέση (25), χαραχθεί στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας παίρνουμε μία ευθεία με αρνητική κλίση που διέρχεται από την αρχή των αξόνων στο 2^ο και 4^ο τεταρτημόριο όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.

Οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τις εξισώσεις των ροπών των σχέσεων (23), (24) και (25) είναι πανομοιότυπες με τις αριθμητικές λύσεις του προβλήματος 4, προβλήματος 5 και προβλήματος 6 αντίστοιχα για την μηχανή ΣΡ Μόνιμου Μαγνήτη (ΣΜΜΜ), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Οι καμπύλες ταιριάζουν η μία με την άλλη μέχρι οι αριθμητικές τιμές των θεωρητικών εξισώσεων υπερβούν το όριο της ροπής-ταχύτητας ,πέρα από το οποίο αναγκάζονται να συγχωνευθούν με το όριο της ροπής-ταχύτητας για το υπόλοιπο της κλίμακας στροφών.

Επομένως, αναπτύξαμε τις εξισώσεις που εκφράζουν τα όρια της αναγεννητικής πέδησης και του μέγιστου ρεύμα απορρόφησης από την πηγή ΣΡ κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης, στο πλαίσιο μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη. Αυτή η ανάλυση δίνει μία καλύτερη κατανόηση της εξάρτησης των ορίων της αναγεννητικής πέδησης και της καμπύλης μέγιστου ρεύματος της αναγεννητικής πέδησης για τις παραμέτρους της μηχανής



Εικόνα 8 :Όρια αναγεννητικής πέδησης και καμπύλη μέγιστου ρεύματος αναγεννητικής πέδησης για μια μηχανή ΣΡ μόνιμου μαγνήτη αμελώντας την αντίσταση απωλειών πυρήνα.

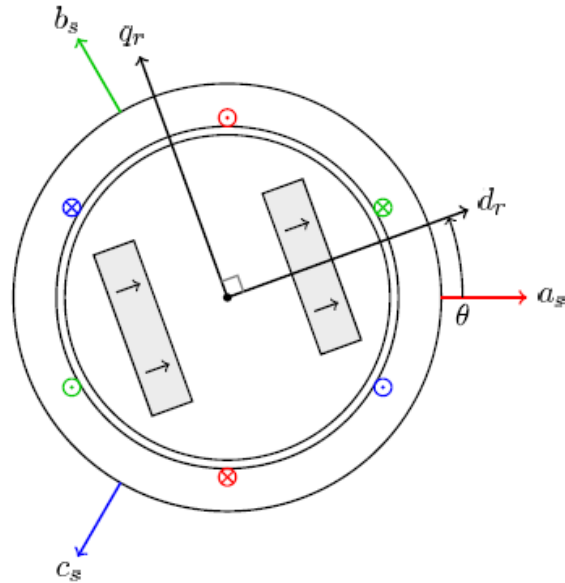
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ

3.1 Μοντελοποίηση

Η γεωμετρία εγκάρσιας τομής μιας σύγχρονης τριφασικής διπολικής εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη μηχανής φαίνεται στην Εικόνα 9, όπου θ υποδηλώνει την θέση του δρομέα και απεικονίζονται με abc οι άξονες του στάτη και με da οι άξονες του δρομέα. Τα τριφασικά τυλίγματα του στάτη υποτίθεται ότι είναι συνδεδεμένα σε αστέρα και είναι συνδεδεμένα στο ενδιάμεσο των τριών κλάδων ελεγχόμενου μετατροπέα ισχύος ΣΡ-ΕΡ(DC-AC) όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Ο μετατροπέας ΣΡ-ΕΡ (αντιστροφέας) αποτελείται από τρεις πανομοιότυπους κλάδους που περιέχουν δύο διακόπτες και δύο διόδους ο καθένας. Το τερματικό ελέγχου κάθε διακόπτη δεν εμφανίζεται στην Εικόνα 10. Κάθε κλάδος του αντιστροφέα λειτουργεί με διαμόρφωση εύρους παλμών με μεταβαλλόμενο duty cycle για να παράγει μια ισορροπημένη τριφασική έξοδο, όπου δίνεται ως είσοδος στην ηλεκτρική μηχανή. Οι δύο διακόπτες σε κάθε κλάδο δεν μπορούν να ενεργοποιηθούν και οι δύο την ίδια χρονική στιγμή στον κλάδο γιατί αυτό θα βραχυκύκλωνε την τάση εισόδου. Συνεπώς, η φύση της λειτουργίας των δυο διακοπών σε κάθε κλάδο είναι συμπληρωματική.

Η πλευρά ΣΡ του μετατροπέα ισχύος είναι συνδεδεμένη με μια πηγή συνεχούς ρεύματος (μια ηλεκτροχημική μπαταρία) με χωρητικότητα διαύλου. Το διάγραμμα του ισοδύναμου κυκλώματος της ηλεκτροχημικής μπαταρίας είναι ίδιο με αυτό της Εικόνα 4. Οι μεταβλητές του συστήματος αποθήκευσης συμβολίζεται με δείκτη s, του μετατροπέα ΣΡ-ΕΡ με δείκτες ABC και οι φασικές μεταβλητές της μηχανής με δείκτες abc. Η βασική ιδέα είναι η προβολή των τάσεων και των ρευμάτων του στάτη ενός πλαισίου αναφοράς da0, που περιστρέφεται με τον δρομέα και επιπλέον να μειώσει τον αριθμό των συντεταγμένων της τάσης και του ρεύματος από τρεις σε δύο από την εκμετάλλευση της ύπαρξης συμμετρικών και ισορροπημένων τυλιγμάτων φάσης. Οι παραστάσεις da0 των φασικών μεταβλητών abc ορίζονται από



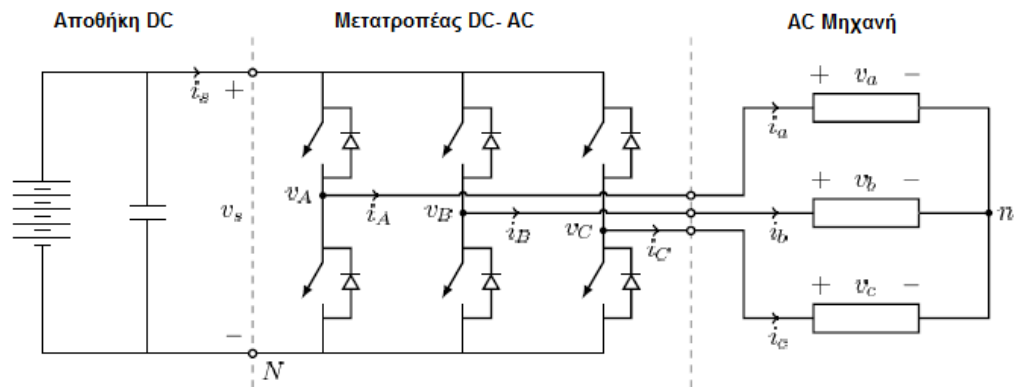
Εικόνα 9 : Η εγκάρσια τομή μιας σύγχρονης τριφασικής διπολικής εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη μηχανής

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(N\theta) & \cos(N\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(N\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(N\theta) & -\sin(N\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(N\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

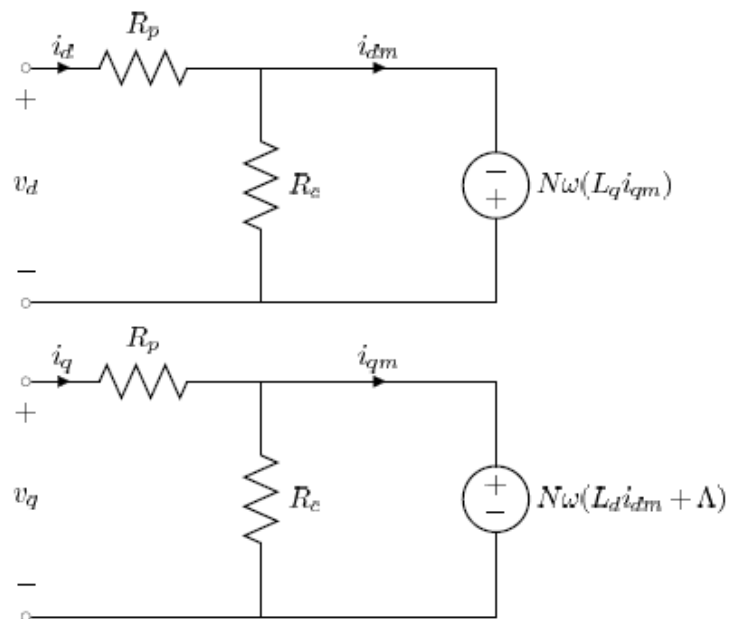
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(N\theta) & \cos(N\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(N\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(N\theta) & -\sin(N\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(N\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Όπου N ο αριθμός των ζευγών πόλων της μηχανής. Η ανάλυση δείχνει ότι $v_0 = 0$ και $i_0 = 0$, ως εκ τούτου θα πρέπει να υπολογίζονται μόνο οι μεταβλητές d, q . Η δομή της ηλεκτρικής μηχανής που υποδεικνύεται από το διάγραμμα ισοδύναμου κυκλώματος άξονα d και q φαίνεται στην Εικόνα 11 όπως περιγράφεται στο [11]. Οι φασικές τάσεις στους άξονες d και q συμβολίζονται με v_d και v_q , τα φασικά ρεύματα με i_d και i_q και οι μαγνητικές συνιστώσες των ρευμάτων συμβολίζονται με i_{dm} και i_{qm} αντίστοιχα. Η φασική αντίσταση της ηλεκτρικής μηχανής και η φασική αντίσταση απωλειών πυρήνα

συμβολίζονται με R_p και R_c αντίστοιχα. Οι αυτεπαγωγές συμβολίζονται με L_d και L_q , η μόνιμη μαγνητική ροή με Λ και η ταχύτητα του κινητήρα με ω .



Εικόνα 10 :Σχηματική απεικόνιση μιας ΕΡ μηχανής συνδεδεμένη σε αστέρα με πηγή ΣΡ διαμέσου ενός μετατροπέα ΣΡ-ΕΡ



Εικόνα 11 : Μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος στους άξονες d και q σε μία σύγχρονη μηχανή εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη

Η σχέση μεταξύ των φασικών τάσεων v_{abc} και των τάσεων v_{ABC} του κλάδου του αντιστροφέα θα καθορισθεί με βάση την Εικόνα 10.

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Τάση στον ακροδέκτη A σε σχέση με τον κόμβο N} \\ \text{Τάση στον ακροδέκτη B σε σχέση με τον κόμβο N} \\ \text{Τάση στον ακροδέκτη C σε σχέση με τον κόμβο N} \end{bmatrix}$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσεων Kirchhoff (NTK) στις τάσεις των κλάδων του αντιστροφέα, στις φασικές τάσεις του κινητήρα και στο v_{nN} , όπου v_{nN} η τάση του κόμβου n σε σχέση με το N, παίρνουμε:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_A - v_{nN} \\ v_B - v_{nN} \\ v_C - v_{nN} \end{bmatrix}$$

Προσθέτοντας αυτές τις τρεις εξισώσεις και συνδυάζοντας το με το γεγονός ότι $v_a + v_b + v_c = 0$, προκύπτει:

$$v_{nN} = \frac{1}{3}(v_A + v_B + v_C)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix}$$

Αν u_a , u_b και u_c αντιπροσωπεύουν τις εντολές των κύκλων λειτουργίας (duty-cycle) των τριών κλάδων του αντιστροφέα και v_s αντιπροσωπεύει την τάση συνεχούς ρεύματος της πλευράς ΣΡ του μετατροπέα ΣΡ-ΕΡ (DC-AC), τότε:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} v_s$$

Αν χρησιμοποιήσουμε την απλούστερη μορφή της εντολής duty-cycle, τότε:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} + \frac{v_{ref}}{v_s} \begin{bmatrix} \cos(N\theta + \varphi_v) \\ \cos(N\theta - \frac{2}{3}\pi + \varphi_v) \\ \cos(N\theta + \frac{2}{3}\pi + \varphi_v) \end{bmatrix}$$

Όπου v_{ref} είναι η τάση αναφοράς και φ_v είναι η φασική γωνία του μετατροπέα, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα οι τάσεις $dq0$ να είναι:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_{ref} \begin{bmatrix} \cos(\varphi_v) \\ \sin(\varphi_v) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Το γεγονός ότι $v_0 = 0$ δημιουργεί την σύνδεση μεταξύ της επιβαλλόμενης ημιτονοειδούς τάσης του κλάδου του μετατροπέα από τον έλεγχο και του προκύπτοντος διανύσματος φασικής τάσης του κινητήρα στο πλαίσιο αναφοράς $dq0$. Μπορούμε να ορίσουμε ως u_d και u_q να είναι τα duty-cycles του ΣΡ-ΕΡ μετατροπέα στο dq πλαίσιο αναφοράς. Έτσι:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{v_{ref}}{v_s} \begin{bmatrix} \cos(\varphi_v) \\ \sin(\varphi_v) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Από τη σχέση (27), μπορούμε να ξαναγράψουμε τις φασικές τάσεις dq ως εξής :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} v_s \quad (28)$$

Το μέγεθος του duty-cycle του διανύσματος του μετατροπέα στο dq επίπεδο δίνεται ως εξής:

$$U_{dq} = \|u_{dq}\| = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(\frac{v_{ref}}{v_s} \right) \quad (29)$$

Το σχηματικό διάγραμμα δείχνει ότι οι τάσεις του κλάδου του μετατροπέα περιορίζεται από:

$$\begin{aligned} 0 &\leq v_A \leq v_s \\ 0 &\leq v_B \leq v_s \\ 0 &\leq v_C \leq v_s \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας την έκφραση για τους κύκλους λειτουργίας(duty-cycles), προκύπτει ότι

$$\begin{aligned} 0 &\leq v_{ref} \leq \frac{1}{2} v_s \\ \max(v_{ref}) &= \frac{1}{2} v_s \end{aligned}$$

Από την (29), έχουμε:

$$\max(U_{dq}) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} \quad (30)$$

Αν ορίσουμε τους κύκλους λειτουργίας του μετατροπέα u_A, u_B και u_C να περιλαμβάνει την τρίτη αρμονική, παίρνουμε:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} + \frac{v_{ref}}{v_s} \left(\begin{bmatrix} \cos(N\theta + \varphi_v) \\ \cos(N\theta - \frac{2}{3}\pi + \varphi_v) \\ \cos(N\theta + \frac{2}{3}\pi + \varphi_v) \end{bmatrix} - \frac{1}{6} \begin{bmatrix} \cos(3(N\theta + \varphi_v)) \\ \cos(3(N\theta - \frac{2}{3}\pi + \varphi_v)) \\ \cos(3(N\theta + \frac{2}{3}\pi + \varphi_v)) \end{bmatrix} \right)$$

Παρατηρείται ότι οι εξισώσεις για τις φασικές τάσεις dq και των duty-cycles του μετατροπέα παραμένουν ίδιες όπως ήταν στη σχέση (27). Όμως, όπως περιγράφηκε στο [12] η μέγιστη τιμή της V_{ref} αλλάζει σε:

$$0 \leq v_{ref} \leq \frac{1}{\sqrt{3}} v_s$$

$$\max(v_{ref}) = \frac{1}{\sqrt{3}} v_s$$

Από τη σχέση (29):

$$\max(U_{dq}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μέγιστο μήκος του διανύσματος του κύκλου λειτουργίας, U_{dq} , εξαρτάται από την τεχνική διαμόρφωση εύρους παλμών που χρησιμοποιείται. Για μία ηλεκτρική μηχανή συνδεδεμένη σε αστέρα, το μέγιστο μήκος του διανύσματος της φασικής τάσης της μηχανής που χρησιμοποιεί διαμόρφωση εύρους παλμών, χωρίς αρμονικές τρίτης τάξεως, είναι:

$$\max(V_{dq}) = \max(\|\langle v_d, v_q \rangle\|) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} v_s$$

Και χρησιμοποιώντας διαμόρφωση εύρους παλμών(PWM) με 3^η αρμονική έχουμε:

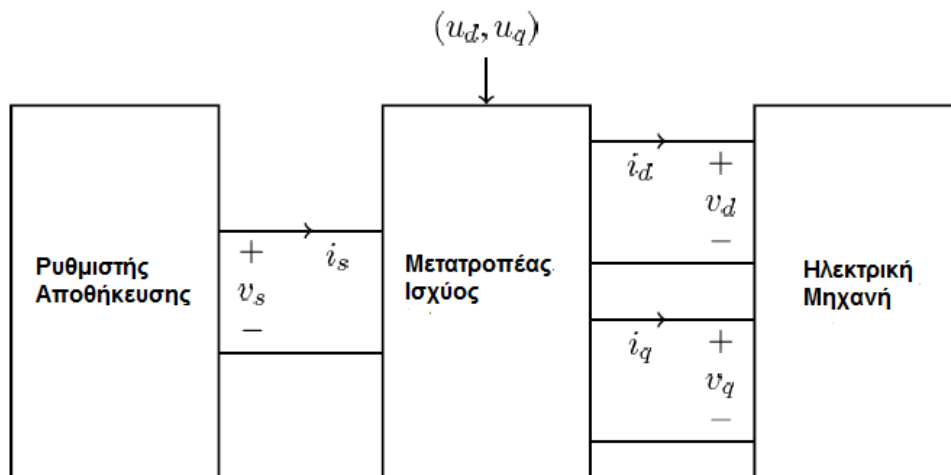
$$\max(V_{dq}) = \max(\|\langle v_d, v_q \rangle\|) = \frac{1}{\sqrt{2}} v_s$$

Για ηλεκτρική μηχανή που είναι συνδεδεμένη σε τρίγωνο, μπορεί να αποδειχθεί ότι το μέγιστο μήκος του διανύσματος φασικής τάσης της μηχανής που χρησιμοποιεί PWM, χωρίς 3^η αρμονική συνιστώσα, είναι:

$$\max(V_{dq}) = \max(\|\langle v_d, v_q \rangle\|) = \frac{3}{2\sqrt{2}} v_s$$

Και με χρήση PWM με 3^η αρμονική συνιστώσα, έχουμε:

$$\max(V_{dq}) = \max(\|\langle v_d, v_q \rangle\|) = \frac{3}{\sqrt{2}} v_s$$



Εικόνα 12 :Αφηρημένο διάγραμμα πηγής ΣΡ, ΣΡ-ΕΡ μετατροπέα ισχύος και ηλεκτρική μηχανή με όρους μεταβλητών d και q στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα

Η Εικόνα 12 δείχνει μια αφηρημένη όψη της πηγής ΣΡ, ΣΡ-ΕΡ μετατροπέα ισχύος και ηλεκτρική μηχανή με όρους μεταβλητών του πλαισίου του δρομέα που συμβολίζονται με δείκτες d και q με u_d και u_q που εφαρμόζονται στον μετατροπέα ΣΡ-ΕΡ. Από την παραπάνω εικόνα μπορούν να γραφούν οι εξισώσεις ισορροπίας ισχύος. Η ισχύς εισόδου της ηλεκτρικής μηχανής είναι:

$$P_e = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_d i_d + v_q i_q \quad (32)$$

Υποθέτουμε ότι οι συνδέσεις μεταξύ της ηλεκτρικής μηχανής και του αντιστροφέα είναι χωρίς απώλειες, άρα έχουμε την εξής σχέση:

$$v_A i_A + v_B i_B + v_C i_C = v_d i_d + v_q i_q$$

Από τη στιγμή που ο αντιστροφείας δεν έχει απώλειες, παίρνουμε την εξής εξίσωση ισοροπίας ισχύος:

$$\begin{aligned} v_s i_s &= v_A i_A + v_B i_B + v_C i_C \\ &= v_d i_d + v_q i_q \\ \Rightarrow i_s &= \frac{v_d}{v_s} i_d + \frac{v_q}{v_s} i_q \end{aligned}$$

Άρα με τη βοήθεια της σχέσης (28), προκύπτει:

$$i_s = v_d i_d + v_q i_q \quad (33)$$

Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας είναι η R_s , και η τάση ανοιχτού κυκλώματος E_s , η οποία είναι η ίδια που συζητήσαμε στο κεφάλαιο 2. Σύμφωνα με την Εικόνα 4, η Εικόνα 11 και οι εξισώσεις (28) και (33), που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το μοντέλο της μονάδας κινητήρας-γεννήτρια μπορεί να εκφραστεί στην παρακάτω μορφή:

$$\begin{bmatrix} -R_c & 0 & R_p + R_c & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_c & 0 & R_p + R_c & 0 & -1 & 0 & 0 \\ R_c & -N\omega L_d & -R_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N\omega L_d & R_c & 0 & -R_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & u_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & u_q \\ 0 & 0 & u_d & u_q & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \\ i_d \\ i_q \\ v_d \\ v_q \\ i_s \\ v_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -N\omega\Lambda \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_s \end{bmatrix} \quad (34)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ισούται με:

$$T = N(\Lambda + (L_d - L_q)i_{dm})i_{qm} \quad (35)$$

3.2 Ανάλυση

Όπως και προηγουμένως στην ενότητα 2.2 , προκειμένου να καθοριστούν τα όρια της ροπής-ταχύτητας της λειτουργίας κινητήρα, πέδησης και αναγεννητικής πέδησης ορίζονται τα ακόλουθα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Πρόβλημα 1: μεγιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (34) – (35):

$$\|u_{dq}\| \leq \max(U_{dq}), \|i_{dq}\| \leq I_{max}, T \geq 0 \quad (36)$$

Πρόβλημα 2: ελαχιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (34) – (35):

$$\|u_{dq}\| \leq \max(U_{dq}), \|i_{dq}\| \leq I_{max}, T \leq 0 \quad (37)$$

Πρόβλημα 3: μεγιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (34) – (35):

$$\|u_{dq}\| \leq \max(U_{dq}), \|i_{dq}\| \leq I_{max}, T \leq 0 \quad (38)$$

Πρόβλημα 4: ελαχιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (34) – (35):

$$\|u_{dq}\| \leq \max(U_{dq}), \|i_{dq}\| \leq I_{max}, T \leq 0, i_s \leq 0 \quad (39)$$

Πρόβλημα 5: μεγιστοποίηση της ροπής, T

Σύμφωνα με τις σχέσεις (34) – (35):

$$\|u_{dq}\| \leq \max(U_{dq}), \|i_{dq}\| \leq I_{max}, T \leq 0, i_s \leq 0 \quad (40)$$

Πρόβλημα 6: ελαχιστοποίηση του ρεύματος πηγής, i_s

Σύμφωνα με τις σχέσεις (34) – (35):

$$\|u_{dq}\| \leq \max(U_{dq}), \|i_{dq}\| \leq I_{max}, T \leq 0, i_s \leq 0 \quad (41)$$

Όπου $\max(U_{dq})$ είναι το μέγιστο μεταβιβάσιμο μήκος του διανύσματος κύκλου λειτουργίας (duty-cycle), όπου εξαρτάται από την τεχνική PWM, και I_{max} είναι το μέγιστο επιτρεπτό μήκος του διανύσματος ρεύματος i_{dq} . Το πρόβλημα 1 λύνει τα όρια της μέγιστη ροπής εμπρός κίνησης(κινητήρας) της περιοχής I της Εικόνα 1. Τα προβλήματα 2 και 3 λύνουν τα όρια της μέγιστης και ελάχιστης ροπής πέδησης του 4^{ου} τεταρτημορίου, δηλαδή της περιοχής IV της Εικόνα 1. Τα προβλήματα 4 και 5 λύνουν για τα όρια της μέγιστης και ελάχιστης ροπής αναγεννητικής πέδησης του 4^{ου} τεταρτημορίου. Το πρόβλημα 6 το μέγιστο πιθανό ρεύμα που μεταφέρεται πίσω στην πηγή συνεχούς ρεύματος κατά την διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης και η σχέση που έχει αυτή η λύση στην αντίστοιχη αναγεννητική ροπή πέδησης.

3.3 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Τα παραπάνω προβλήματα βελτιστοποίησης προγραμματίστηκαν στο MATLAB και επιλύθηκαν χρησιμοποιώντας την αριθμητική συνάρτηση βελτιστοποίησης `fmincon` της εργαλειοθήκης βελτιστοποίησης. (Optimization Toolbox). Οι παράμετροι δύο διαφορετικών σύγχρονων μηχανών εσωτερικών μόνιμων μαγνητών θεωρήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης, που συμβολίζονται ως IPM-A(Interior permanent magnet-A) και IPM-B(Interior permanent magnet-B). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι μιας σύγχρονη μηχανής επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης.

3.1 Εσωτερικός Μόνιμος Μαγνήτης-A (IPM-A)

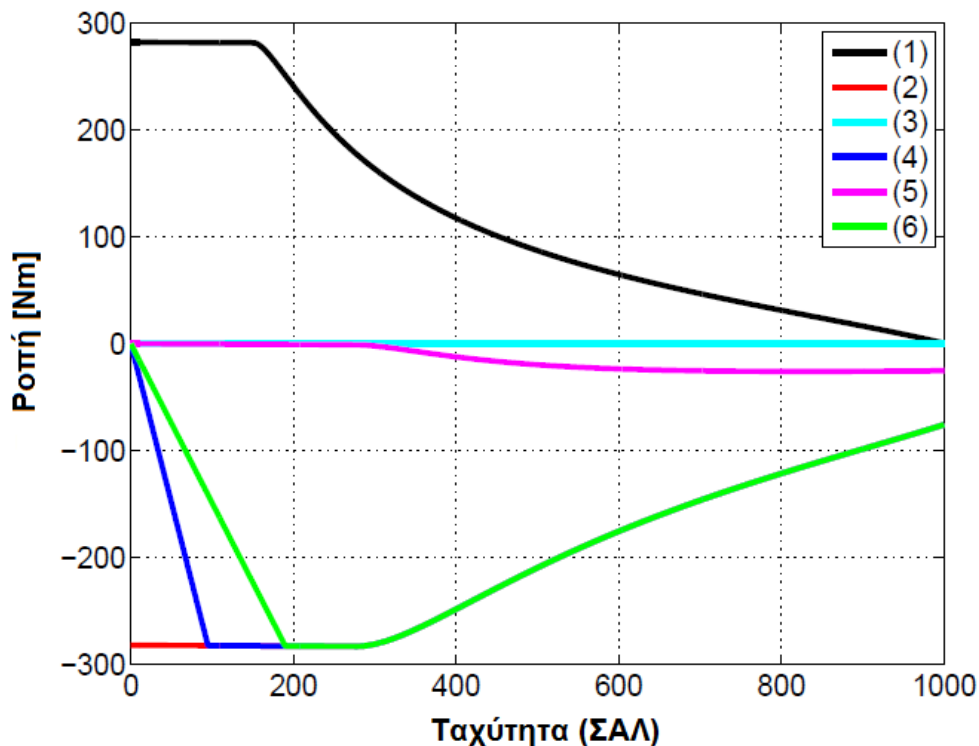
Οι παράμετροι του συστήματος που περιγράφουν την σύγχρονη μηχανή εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη-A (IPM-A) απαριθμούνται στον Πίνακα 3.

Οι λύσεις των έξι προβλημάτων βελτιστοποίησης για IPM-A σχεδιάστηκαν στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13. Μπορούμε να δούμε ότι οι λύσεις των προβλημάτων 4 και 5 (φαίνονται με μπλε και μωβ χρώμα) χωρίζει το τεταρτημόριο της εμπρός πέδησης, περιοχή IV της Εικόνα 1, σε τρεις περιοχές. Οι περιοχές κοντά στους άξονες x και y αντιπροσωπεύουν περιοχές μη-αναγεννητικής πέδησης, ενώ η ενδιάμεση

περιοχή αντιπροσωπεύει την περιοχή της αναγεννητικής πέδησης. Επίσης, βλέπουμε ότι η λύση του προβλήματος δ (φαίνεται με πράσινο) είναι μία καμπύλη που διέρχεται από την αρχή των αξόνων στο τεταρτημόριο της εμπρός πέδησης. Λειτουργίες κατά μήκος αυτής της γραμμής θα έχει ως αποτέλεσμα απορρόφηση μέγιστου ρεύματος από την πηγή συνεχούς ρεύματος κατά την διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης.

Πίνακας 3 :Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική βελτιστοποίηση της σύγχρονη μηχανής εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη-Α (συνδεδεμένη σε αστέρα) (IPM-A)

Παράμετροι	Τιμές
E_s	366.3 V
R_s	0.0247 Ω
N	4
R_p	0.297 Ω
R_c	240 Ω
L_d	0.5841 mH
L_q	0.6039 mH
Λ	0.235 Wb
I_{max}	300 A
$Max(U_{dq})$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
ω_{max}	10000 ΣΑΛ



Εικόνα 13 :Αριθμητικές λύσεις βελτιστοποίησης της σύγχρονης μηχανής του εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη-A(IPM-A)

3.2 Εσωτερικός Μόνιμος Μαγνήτης-B (IPM-B)

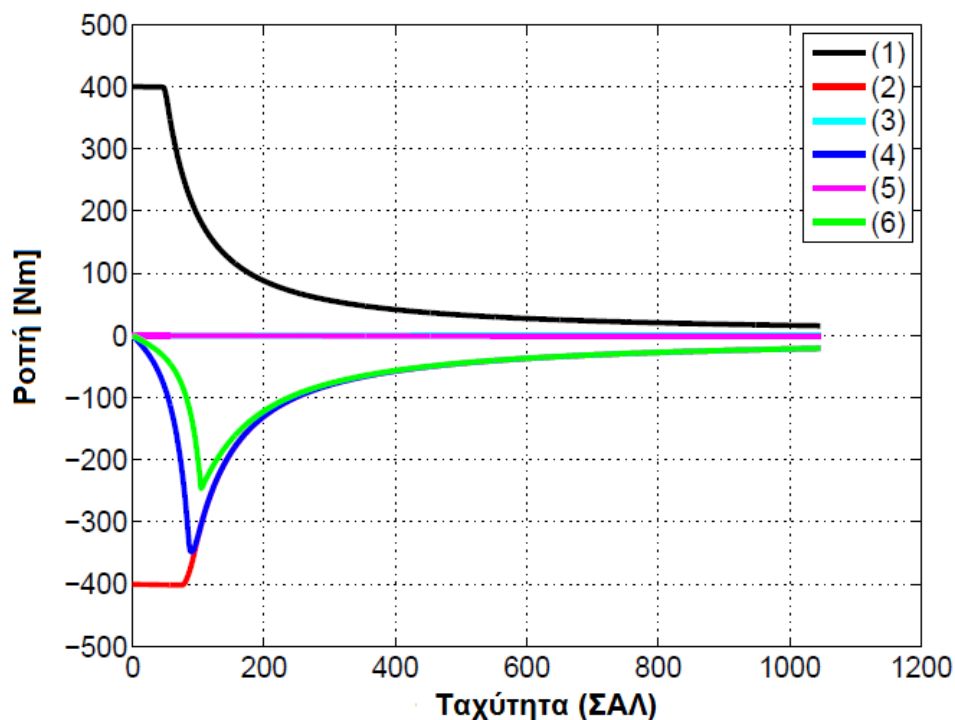
Οι παράμετροι του συστήματος που περιγράφουν την σύγχρονη μηχανή εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη-B (IPM-B) απαριθμούνται στον Πίνακα 4.

Από την Εικόνα 14 βλέπουμε ότι οι λύσεις των προβλημάτων 4 και 5 (φαίνεται με μπλε και με μωβ) για το IPM-B χωρίζει επίσης το τεταρτημόριο της πέδησης σε τρεις περιοχές. Όμως, το σχήμα της καμπύλης που περιγράφει η λύση του προβλήματος 4 είναι διαφορετικό από το IPM-A που φαίνεται στην Εικόνα 13. Ομοίως, το σχήμα της καμπύλης που περιγράφει η λύση του προβλήματος 6 (φαίνεται με πράσινο) είναι και αυτό διαφορετικό από το IPM-A. Αυτό οφείλεται στην διαφορά των παραμέτρων της μηχανής αφού όλες οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα, τα προβλήματα βελτιστοποίησης και η μεθοδολογική λύση παραμένουν τα ίδια.

Πίνακας 4 :Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική βελτιστοποίηση της σύγχρονη μηχανής εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη-B (συνδεδεμένη σε αστέρα) (IPM-B)

Παράμετροι	Τιμές
E_s	402,6 V
R_s	0.0366 Ω

N	4
R _p	0.57 Ω
R _c	240 Ω
L _d	3 mH
L _q	5 mH
Λ	0.2 Wb
I _{max}	250 A
Max(U _{dq})	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
ω _{max}	10000 ΣΑΛ



Εικόνα 14 :Αριθμητικές λύσεις βελτιστοποίησης της σύγχρονης μηχανής του εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη-B(IPM-B)

3.3 Επιφανειακός Μόνιμος Μαγνήτης

Η σύγχρονη μηχανή επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη. Όλες οι εξισώσεις που περιγράφηκαν για την σύγχρονη μηχανή του εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη παραμένουν ίδιες εκτός από την $L_d = L_q = L$. Χρησιμοποιώντας αυτή τη συνθήκη, η εξίσωση της ροπής της σχέσης (35), γίνεται:

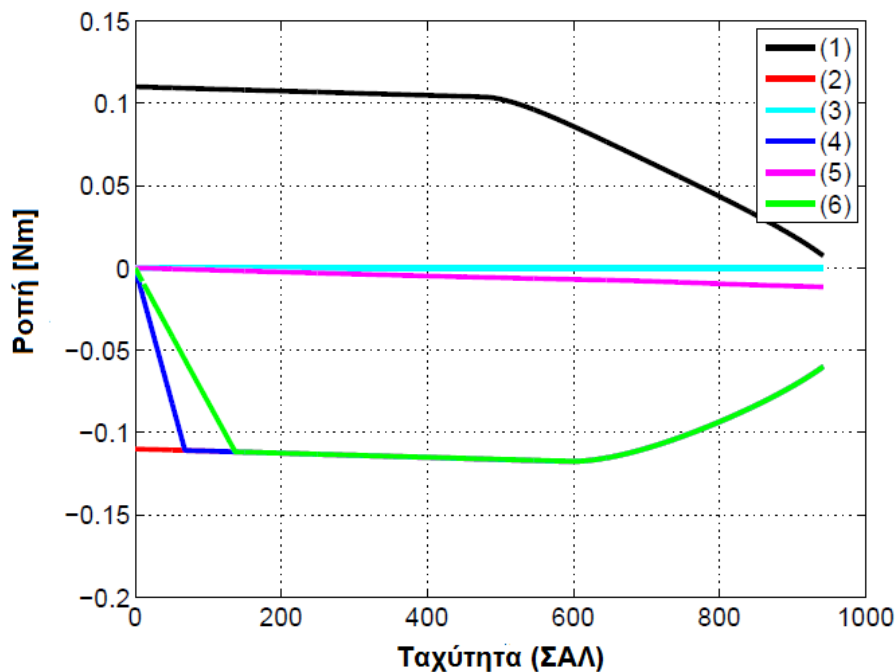
$$T = N\Lambda i_{qm} \quad (42)$$

Οι παράμετροι του συστήματος που περιγράφουν την σύγχρονη μηχανή επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη απαριθμούνται στον Πίνακα 5 και οι λύσεις των προβλημάτων βελτιστοποίησης απεικονίζονται όπως φαίνονται στην Εικόνα 15.

Παρατηρούμε ότι οι λύσεις των προβλημάτων 4 και 5 (φαίνονται με μπλε και μωβ) χωρίζουν το τεταρτημόριο της εμπρός πέδησης σε περιοχές μη-αναγεννητικής πέδησης και αναγεννητικής πέδησης. Επίσης η λύση του προβλήματος 6 (φαίνεται με πράσινο) είναι μία καμπύλη στο τεταρτημόριο της εμπρός πέδησης που περνάει από την αρχή των αξόνων.

Πίνακας 5 : Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική βελτιστοποίηση της σύγχρονη μηχανής επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη (συνδεδεμένη σε τρίγωνο)

Παράμετροι	Τιμές
E_s	26.4 V
R_s	0.048 Ω
N	4
R_p	1.2 Ω
R_c	150 Ω
$L_d = L_q = L$	1.8 mH
Λ	0.011 Wb
I_{max}	2.5 A
$Max(U_{dq})$	$\frac{3}{2\sqrt{2}}$
ω_{max}	9000 ΣΑΛ



Εικόνα 15 :Αριθμητικές λύσεις βελτιστοποίησης της σύγχρονης μηχανής του επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη

3.4 Θεωρητικά Αποτελέσματα

Για να κατανοήσουμε τις επιπτώσεις των παραμέτρων του συστήματος στα όρια της αναγεννητικής πέδησης, μελετάται η σύγχρονη μηχανή επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη με και χωρίς αντίσταση απωλειών πυρήνα, R_c .

3.4.1 Αγνόηση της αντίστασης απωλειών πυρήνα, R_c

Όπως συζητήθηκε νωρίτερα στην περιοχή της μηχανής ΣΡ, το ρεύμα που πηγαίνει στον κλάδο απωλειών πυρήνα θεωρείται ότι είναι μηδέν, συνεπώς $i_d = i_{dm}$ και $i_q = i_{qm}$. Ως εκ τούτου, η ισχύς απώλειας πυρήνα είναι αμελητέα. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα όρια της αναγεννητικής πέδησης και το μέγιστο ρεύμα αναγεννητικής πέδησης λαμβάνονται ως εξής:

3.4.1.1 Όρια αναγεννητικής πέδησης

Η απώλεια ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής είναι:

$$P_{\alpha\pi} = (i_d^2 + i_q^2)R_p$$

Η ισχύς εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής είναι:

$$P_m = T\omega$$

Από την (42), χρησιμοποιώντας $i_q=i_{qm}$ παίρνουμε:

$$P_m = N\Lambda i_{qm}\omega$$

Από την (32), η ισχύς εισόδου της ηλεκτρικής μηχανής είναι:

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις, η εξίσωση ισορροπίας ισχύος, γράφεται ως εξής:

$$P_e = P_m + P_{\alpha\pi}$$

$$P_e = N\Lambda i_{qm}\omega + (i_d^2 + i_q^2)R_p$$

Όπως είδαμε στην περιοχή της μηχανής ΣΡ νωρίτερα, το όριο της αναγεννητικής πέδησης λαμβάνεται με $P_e = 0$. Όμως, σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν δύο μεταβλητές, $i_d = i_{dm}$ και $i_q = i_{qm}$. Κάνοντας χρήση του περιορισμού της ισότητας $P_e = 0$, παίρνουμε το i_q συναρτήσει του i_d ως εξής:

$$i_q = \frac{-N\Lambda\omega \pm \sqrt{N^2\Lambda^2\omega^2 - 4R_p^2 i_d^2}}{2R_p} \quad (43)$$

Η εξίσωση της ροπής, δίνεται ως εξής:

$$T = N\Lambda i_{qm} = N\Lambda \left(\frac{-N\Lambda\omega \pm \sqrt{N^2\Lambda^2\omega^2 - 4R_p^2 i_d^2}}{2R_p} \right)$$

Επομένως, παρατηρείται ότι χρησιμοποιώντας την ισότητα του περιορισμού η εξίσωση ροπής εξαρτάται μόνο από την μεταβλητή ελέγχου, για παράδειγμα i_d . Από την στιγμή που βρίσκουμε την μέγιστη και την

ελάχιστη ροπή πέδησης που μπορεί να παραχθεί, ενώ ισχύει ο περιορισμός της εξίσωσης $P_e = 0$, βρίσκουμε την παράγωγο της ροπής σε σχέση με την μεταβλητή ελέγχου i_d , και την θέτουμε ίση με μηδέν. Έτσι:

$$\frac{dT}{di_d} = 0$$

$$\Rightarrow i_d = 0$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση (43), έχουμε:

$$\Rightarrow i_q = \left(-\frac{N\Lambda}{R_p} \right) \omega \quad \text{και} \quad i_q = 0$$

Οι ηλεκτρομαγνητικές ροπές που αντιστοιχούν στα παραπάνω ρεύματα είναι:

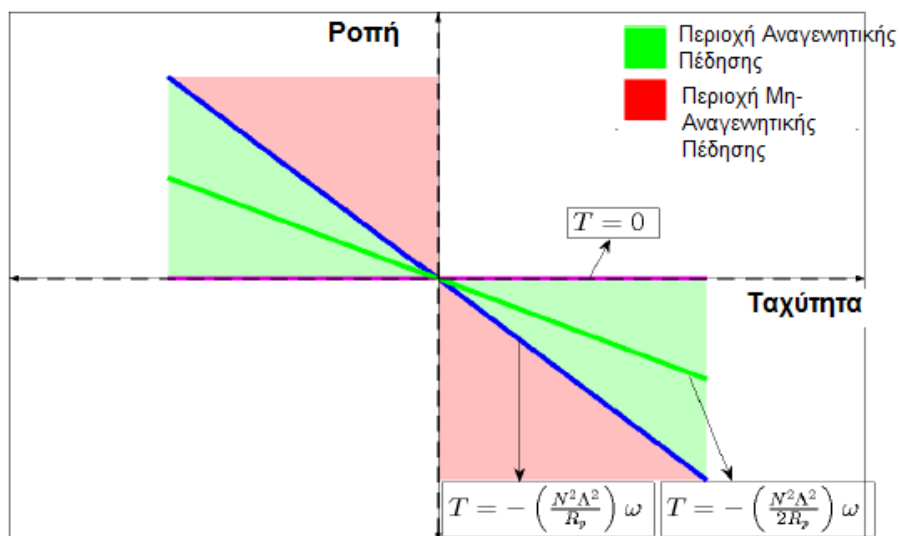
$$T = -\left(\frac{N^2 \Lambda^2}{R_p} \right) \omega \quad (44)$$

Και

$$T = 0 \quad (45)$$

αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις (44) και (45) απεικονίζονται στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας, παίρνουμε μια καμπύλη, που ουσιαστικά είναι μια ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση και περνάει από την αρχή των αξόνων και η άλλη συμπίπτει στον άξονα x όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16 :Όρια αναγεννητικής πέδησης και καμπύλη μέγιστου ρεύματος αναγεννητικής πέδησης για μία σύγχρονη μηχανή επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη αγνοώντας την αντίσταση απωλειών πυρήνα, R_c

3.4.1.2 Μέγιστο Ρεύμα αναγεννητικής πέδησης

Προκειμένου να προσδιοριστεί το μέγιστο ρεύμα που απορροφάει η πηγή ΣΡ κατά την διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης, παραγωγίζουμε την ηλεκτρική ισχύς P_e ως προς τα ρεύματα ελέγχου i_d και i_q . Το διάνυσμα της παραγώγου είναι:

$$\nabla P_e = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_e}{\partial i_d} \\ \frac{\partial P_e}{\partial i_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2R_p i_d \\ N\Lambda\omega + 2R_p i_q \end{bmatrix}$$

Θέτουμε το διάνυσμα της παραγώγου με μηδέν, και παίρνουμε τις εξής τιμές για i_d και i_q :

$$i_d = 0$$

$$i_q = -\left(\frac{N\Lambda}{R_p}\right)\omega$$

Ο Εσσιανός πίνακας της συνάρτησης βελτιστοποίησης P_e υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_e^2}{\partial i_d \partial i_d} & \frac{\partial P_e^2}{\partial i_d \partial i_q} \\ \frac{\partial P_e^2}{\partial i_q \partial i_d} & \frac{\partial P_e^2}{\partial i_q \partial i_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2R_p & 0 \\ 0 & 2R_p \end{bmatrix}$$

Δεδομένου ότι ο Εσσιανός πίνακας είναι συμμετρική θετικά ορισμένη, μπορούμε να καταλήξουμε ότι η λύση είναι ένα τοπικό ελάχιστο. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αντιστοιχεί στο παραπάνω διάνυσμα ρεύματος είναι:

$$T = -\left(\frac{N^2\Lambda^2}{2R_p}\right)\omega \quad (46)$$

Η εξίσωση (46) είναι μία ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση που είναι η μισή της (44) και διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Λειτουργίες κατά μήκος αυτής της ευθείας θα έχει ως αποτέλεσμα το μέγιστο ρεύμα που επιστρέφει στην πηγή ΣΡ κατά την διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης και δίνεται από τον τύπο:

$$i_{s,max\,regen} = \frac{E_s - \sqrt{E_s^2 + N^2\Lambda^2\omega^2\left(\frac{R_s}{R_p}\right)}}{2R_s} \quad (47)$$

3.4.2 Λαμβάνοντας την αντίσταση απωλειών πυρήνα, R_c

Σε αυτή την ενότητα, δεν αγνοούμε την αντίσταση απωλειών πυρήνα και τα ρεύματα i_d και i_q χωρίζονται σε δύο μονοπάτια: στην συνιστώσα της μαγνήτισης με i_{dm} και i_{qm} και στην συνιστώσα απωλειών πυρήνα με i_{cd} και i_{cq} . Οι εξισώσεις των ορίων της αναγεννητικής πέδησης και του μέγιστου

ρεύματος αναγεννητικής πέδησης για αυτή την περίπτωση παρατίθενται παρακάτω.

3.4.2.1 Όρια αναγεννητικής πέδησης

Οι απώλειες ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής δίνονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{απ} = (i_d^2 + i_q^2)R_p + (i_{cd}^2 + i_{cq}^2)R_c$$

Όπου $i_{cd} = i_d - i_{dm}$ και $i_{cq} = i_q - i_{qm}$. Η ισχύς ισορροπίας δίνεται:

$$P_e = P_m + P_{απ}$$

$$P_e = N\Lambda i_{qm}\omega + (i_d^2 + i_q^2)R_p + ((i_d - i_{dm})^2 + (i_q - i_{qm})^2)R_c$$

Όπως είδαμε και νωρίτερα το όριο της αναγεννητικής πέδησης λαμβάνεται από την $P_e = 0$. Εφαρμόζοντας αυτή την εξίσωση περιορισμού και γράφοντας το i_d και i_q συναρτήσεσι του i_{dm} και i_{qm} από τη σχέση (34), παίρνουμε το ρεύμα i_{qm} ως τετραγωνική εξίσωση του i_{dm} . Η αντίστοιχη εξίσωση ροπής είναι συνάρτηση μιας μόνο μεταβλητής ελέγχου της i_{dm} . Προκειμένου να αποκτήσει την μέγιστη και ελάχιστη ροπή αναγεννητικής πέδησης, βρίσκουμε την παράγωγο της ροπής ως προς την μεταβλητή ελέγχου i_{dm} και την θέτουμε ίση με το μηδέν.

$$\frac{dT}{di_{dm}} = 0$$

$$i_{dm} = -\frac{N^2\omega^2\Lambda L\gamma(1+\gamma)}{R_p^2 + N^2\omega^2L^2\gamma(1+\gamma)}$$

Χρησιμοποιώντας την τιμή της i_{dm} , η εξίσωση για το i_{qm} είναι η εξής:

$$i_{qm} = -N\Lambda \left(\frac{(1+\gamma)R_p}{R_p^2 + N^2\omega^2 L^2\gamma(1+\gamma)} \right) \omega$$

Και

$$i_{qm} = -N\Lambda \left(\frac{\gamma R_p}{R_p^2 + N^2\omega^2 L^2\gamma(1+\gamma)} \right) \omega$$

Όπου $\gamma = \frac{R_p}{R_c}$. Οι αντίστοιχες ηλεκτρομαγνητικές ροπές είναι:

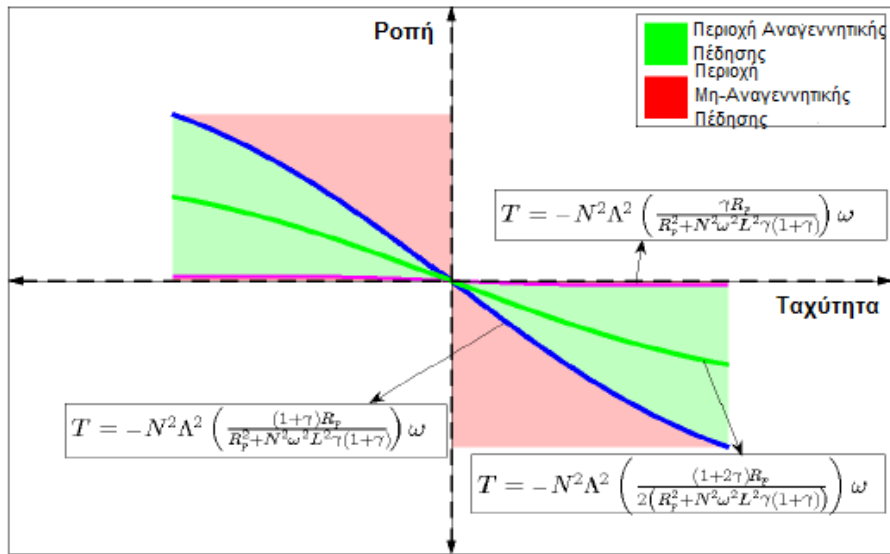
$$T = -N^2 \Lambda^2 \left(\frac{(1+\gamma)R_p}{R_p^2 + N^2\omega^2 L^2\gamma(1+\gamma)} \right) \omega \quad (48)$$

Και

$$T = -N^2 \Lambda^2 \left(\frac{\gamma R_p}{R_p^2 + N^2\omega^2 L^2\gamma(1+\gamma)} \right) \omega \quad (49)$$

αντίστοιχα.

Όταν σχεδιασθούν στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας, οι παραπάνω εξισώσεις ροπής αντιπροσωπεύουν δύο καμπύλες στο 2^ο και στο 4^ο τεταρτημόριο, η σχέση (48) είναι κοντά στον άξονα τον y και η σχέση (49) είναι κοντά στον x, όπως φαίνεται στην Εικόνα 17. Οι δύο περιοχές κοντά στον άξονα τον x και y αντιπροσωπεύουν τις περιοχές της μη-αναγεννητικής πέδησης ενώ η ενδιάμεση περιοχή αντιπροσωπεύει την περιοχή της αναγεννητικής πέδησης.



Εικόνα 17 :Όρια αναγεννητικής πέδησης και καμπύλη μέγιστου ρεύματος αναγεννητικής πέδησης για μία σύγχρονη μηχανή επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη λαμβάνοντας την αντίσταση απωλειών πυρήνα, R_c

3.4.2.2 Μέγιστο ρεύμα αναγεννητικής πέδησης

Για να προσδιορίσουμε το μέγιστο ρεύμα που απορροφά μία πηγή ΣΡ κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης, η P_e ελαχιστοποιείται ως προς τα ρεύματα ελέγχου i_{dm} και i_{qm} . Το διάνυσμα της παραγώγου της συνάρτησης βελτιστοποίησης ως προς τις μεταβλητές ελέγχου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας:

$$\nabla P_e = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_e}{\partial i_{dm}} \\ \frac{\partial P_e}{\partial i_{qm}} \end{bmatrix}$$

Θέτοντας το διάνυσμα της παραγώγου μηδέν, λαμβάνουμε τις τιμές των i_{dm} και i_{qm} ως εξής:

$$i_{dm} = -\frac{N^2\omega^2\Lambda L\gamma(1+\gamma)}{R_p^2 + N^2\omega^2L^2\gamma(1+\gamma)}$$

$$i_{qm} = -N\Lambda\left(\frac{(1+2\gamma)R_p}{2(R_p^2 + N^2\omega^2L^2\gamma(1+\gamma))}\right)\omega$$

Ο Εσσιανός πίνακας της συνάρτησης βελτιστοποίησης P_e υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_e^2}{\partial i_{dm}\partial i_{dm}} & \frac{\partial P_e^2}{\partial i_{dm}\partial i_{qm}} \\ \frac{\partial P_e^2}{\partial i_{qm}\partial i_{dm}} & \frac{\partial P_e^2}{\partial i_{qm}\partial i_{qm}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 2R_p + \frac{2N^2\omega^2L^2\gamma(1+\gamma)}{R_p} & 0 \\ 0 & 2R_p + \frac{2N^2\omega^2L^2\gamma(1+\gamma)}{R_p} \end{bmatrix}$$

Ο Εσσιανός πίνακας είναι συμμετρικός θετικά ορισμένος που είναι αναγκαία και επαρκής προϋπόθεση για να καταλήξει στο αποτέλεσμα ότι η λύση είναι ένα τοπικό ελάχιστο. Η ροπή που αντιστοιχεί στο παραπάνω διάνυσμα ρευμάτων είναι:

$$T = -N^2\Lambda^2\left(\frac{(1+2\gamma)R_p}{2(R_p^2 + N^2\omega^2L^2\gamma(1+\gamma))}\right)\omega \quad (50)$$

Η έκφραση της ροπής στη σχέση (50) είναι μία καμπύλη στα τεταρτημόρια πέδησης που διέρχεται από την αρχή των αξόνων όπως φαίνεται στην Εικόνα 17. Λειτουργίες κατά μήκος αυτής της καμπύλης θα έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση μέγιστου ρεύματος από την πηγή ΣΡ κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$i_{s,max\,regen} = \frac{E_s - \sqrt{E_s^2 + N^2 L^2 \omega^2 \left(\frac{R_s}{R_p}\right) \beta}}{2R_s} \quad (51)$$

όπου
$$\beta = \frac{R_p^2}{R_p^2 + N^2 \omega^2 L^2 \gamma (1 + \gamma)}$$

Οι εξισώσεις ροπών στις σχέσεις (48), (49), (50) ταιριάζουν με τις αριθμητικές λύσεις των προβλημάτων βελτιστοποίησης, πρόβλημα 4, πρόβλημα 5, και 6 αντίστοιχα, για την σύγχρονη μηχανή επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη όπως φαίνεται στην Εικόνα 15. Οι καμπύλες ταιριάζουν με τις αριθμητικές λύσεις στην περιοχή χαμηλών στροφών όπου βρίσκονται εντός των ορίων ικανότητας της ροπής-ταχύτητας. Πέρα από μία ορισμένη ταχύτητα, οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τις αναλυτικές λύσεις υπερβαίνει το όριο ικανότητας ροπής-ταχύτητας και αναγκάζονται να συγχωνευθούν με το υπόλοιπο της κλίμακας ταχύτητας.

Επομένως, οι εξισώσεις που περιγράφουν τα όρια της αναγεννητικής πέδησης και το μέγιστο ρεύμα που απορροφά η πηγή συνεχούς ρεύματος κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης είναι για την σύγχρονη μηχανή επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη. Αυτή η άσκηση παρέχει μια καλύτερη κατανόηση της εξάρτησης των ορίων της αναγεννητικής πέδησης και του μέγιστου ρεύματος απορρόφησης κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης των παραμέτρων του συστήματος. Όπως είδαμε στην ενότητα της σύγχρονης μηχανής, οι εξισώσεις των ορίων της αναγεννητικής πέδησης είναι ανεξάρτητες από την αντίσταση της πηγής συνεχούς ρεύματος. Όμως, η αντίσταση της πηγής ΣΡ επηρεάζει την συνολική ικανότητα της ροπής-ταχύτητας των καμπυλών της μηχανής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΟΧΗΜΑ

Η έννοια της αναγεννητικής πέδησης είναι πολύ σημαντική στο πλαίσιο της εφαρμογής σε ένα ηλεκτρικό ή υβριδικό-ηλεκτρικό όχημα δεδομένου ότι αντιπροσωπεύει την ανάκτηση της κινητικής ενέργειας του κινούμενου οχήματος για την αποθήκευση ενέργειας, όπως μια μπαταρία, υπερ-πυκνωτή ή βολάν. Κάθε βατώρα (wh) της ενέργειας που ανακτάται από την αναγεννητική πέδηση σημαίνει ότι το ηλεκτρικό όχημα μπορεί να ταξιδέψει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πριν η μπαταρία εξαντλήσει της φόρτισή της και ένα υβριδικό-ηλεκτρικό όχημα καταναλώσει λιγότερο καύσιμο για να ταξιδεύσει μια συγκεκριμένη απόσταση. Ένα ηλεκτρικό ή υβριδικό όχημα έχει τη δυνατότητα να φρενάρει τόσο ηλεκτρικά, χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική μηχανή, όσο και μηχανικά, χρησιμοποιώντας τα φρένα που συνδέονται με τους τροχούς. Το σύστημα πέδησης είναι γενικά σχεδιασμένο να φρενάρει το όχημα με ασφάλεια ακόμη και εν απουσία ηλεκτρικού φρεναρίσματος. Αν και η περίπτωση φρεναρίσματος είναι ένα παροδικό φαινόμενο για τα οχήματα, είναι μια λειτουργία σταθερής κατάστασης για την ηλεκτρική μηχανή η οποία παράγει ηλεκτρική ροπή πέδησης. Αυτό συμβαίνει επειδή η σταθερά χρόνου που σχετίζεται με τη δυναμική της ηλεκτρικής μηχανής είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με αυτή που σχετίζεται με τη δυναμική του οχήματος το οποίο έχει ένα πολύ μεγαλύτερο από ότι η αδράνεια του ρότορα της ηλεκτρικής μηχανής.

Από τότε που η ηλεκτρική πέδηση χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη μηχανική πέδηση, για να παρέχεται η ροπή πέδησης που ζητείται από τον οδηγό, αυτό οδηγεί στη έννοια της στρατηγικής πέδησης. Καθώς η ηλεκτρική μηχανή φρενάρει βοηθά την πέδηση του οχήματος, τα μηχανικά φρένα υπόκεινται σε λιγότερη φθορά και κατά συνέπεια διαρκούν περισσότερο. Η στρατηγική πέδησης ορίζει του κανόνες για να χωρίσει την εντολή πέδησης του οδηγού μεταξύ της ηλεκτρικής μηχανής και του μηχανικού συστήματος πέδησης. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα του οχήματος που μελετάται στο [2] όμως αυτή η πτυχή αγνοείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Αυτό το κεφάλαιο μελετά τις επιπτώσεις των διαφορετικών στρατηγικών πέδησης του οχήματος στην ενεργειακή κατανάλωση, που μετράται στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για ένα ηλεκτρικό όχημα για μερικούς δοκιμαστικούς κύκλους οδήγησης που χρησιμοποιούνται συχνά. Για να προσδιοριστεί η κατανάλωση ενέργειας του οχήματος, η συνολική ενέργεια που δαπανάται από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που βρίσκεται επί του οχήματος για να διασχίσει κατά μήκος, πρέπει να προσδιοριστεί πρώτα ο

κύκλος οδήγησης. Αυτό απαιτεί την μοντελοποίηση των διάφορων μηχανισμών απωλειών ισχύος όπου το όχημα και τα εξαρτήματά του υφίστανται. Το άθροισμα αυτών των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη ενέργεια που απαιτείται για να επιταχυνθεί και να επιβραδυνθεί το όχημα κατά μήκος του κύκλου οδήγησης, δίνει τη συνολική απαιτούμενη ενέργεια από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

4.1 Μοντελοποίηση Απωλειών

Οι συνολικές απώλειες ισχύος του οχήματος μελετώνται κάτω από τα ηλεκτρικά και μηχανικά υποσυστήματα. Το ηλεκτρικό υποσύστημα αποτελείται από μία ή περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές, τον μετατροπέα που συνδέεται με κάθε μηχανή που το συνδέει με το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, και το ίδιο το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Το μηχανικό υποσύστημα αποτελείται από τα μηχανικά εξαρτήματα του οχήματος, όπως τα ελαστικά, το σώμα, μετάδοση κ.λπ.

4.1.1 Απώλειες Ηλεκτρικού Υποσυστήματος

Σήμερα, το εσωτερικό της σύγχρονης μηχανής μόνιμου χρησιμοποιείται ευρέως σε ηλεκτρικούς και σε υβριδικούς-ηλεκτρικούς κινητήρες. Ως εκ τούτου, ένα ηλεκτρικό υποσύστημα που αποτελείται από μια σύγχρονη μηχανή εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη, έναν αντιστροφέα και πηγή ΣΡ (μια ηλεκτροχημική μπαταρία) μελετώνται. Επίσης και οι απώλειες που συνδέονται με το κάθε μεμονωμένο εξάρτημα του ηλεκτρικού υποσυστήματος μελετώνται. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση απωλειών του ανωτέρω ηλεκτρικού υποσυστήματος μελετάται ανεξάρτητα από εφαρμογή του σε ένα όχημα.

Από την Εικόνα 11, μπορούμε να περιγράψουμε της ηλεκτρικές απώλειες μιας σύγχρονης μηχανής εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη κάτω από τις απώλειες χαλκού και τις απώλειες σιδήρου(πυρήνα) ως:

$$W_{Cu} = (i_d^2 + i_q^2)R_p$$

$$W_{Fe} = (i_{cd}^2 + i_{cq}^2)R_c$$

αντίστοιχα. Οι συνολικές ηλεκτρικές απώλειες της μηχανής δίνονται από τον τύπο:

$$W_{em} = W_{Cu} + W_{Fe} \quad (52)$$

Η έννοια της ελαχιστοποίησης των απωλειών χαλκού και σιδήρου, σε μια σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη, ενώ παρέχει σταθερή ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι εγκατεστημένος στο [10]. Αυτή η μέθοδος ελέγχου είναι ευεργετική από την οπτική του ηλεκτρικού οχήματος αφού ελάχιστες απώλειες μηχανής σε μικρότερη ενέργεια εξάγονται από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Οι απώλειες χαλκού και σιδήρου στα εξαρτήματα της ηλεκτρικής μηχανής, που φαίνονται στην σχέση (52), μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ελέγχοντας τα ρεύματα της μηχανής. Η μηχανική απώλεια τριβής που σχετίζεται με τα ρουλεμάν του ρότορα έχει αμεληθεί. Η ισχύς εισόδου της ηλεκτρικής μηχανής, P_{em} , δίνεται:

$$P_{em} = T\omega + W_{em} = u_d i_d + u_q i_q \quad (53)$$

Όπως συζητήθηκε νωρίτερα, ο μετατροπέας αποτελείται από τρεις όμοιους κλάδους που λειτουργούν χρησιμοποιώντας διαμόρφωση πλάτους παλμού για να παραγάγουν μια ισορροπημένη τριφασική έξοδο στα μεσαία σημεία των κλάδων του μετατροπέα. Τα ρεύματα των κλάδων στους τρεις κλάδους είναι i_A, i_B, i_C . Η αναλογία κύκλων λειτουργίας τους διακόπτες των κλάδων A, B και C είναι u_a, u_b, u_c και όπως περιγράφεται νωρίτερα στο κεφάλαιο 3. Το σχήμα διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM) που επιλέχθηκε για τη μελέτη, λαμβάνει τις 3^{ες} αρμονικές για να αξιοποιήσει στο μέγιστο βαθμό τη διαθέσιμη τάση ΣΡ [11]. Ο μετατροπέας υποτίθεται ότι είναι χωρίς απώλειες για την παρούσα μελέτη. Αυτό σημαίνει ότι η αγωγιμότητα και οι απώλειες μεταγωγής των ημιαγωγών διακοπών και των διόδων έχουν αμεληθεί.

$$W_{inv} = 0$$

Η απώλεια της τελικής ηλεκτρικής συνιστώσας, της ηλεκτροχημικής μπαταρίας, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_{is} = i_s^2 R_s$$

όπου R_s είναι η αντίσταση του ισοδύναμου Thevenin της μπαταρίας και i_s είναι το ρεύμα της μπαταρίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.

Οι παραπάνω εκφράσεις περιγράφουν διάφορες απώλειες, που σχετίζονται με το ηλεκτρικό υποσύστημα, συνοψίζονται ως W_e , η οποία είναι η συνολική απώλεια που συνδέεται με το ηλεκτρικό υποσύστημα.

$$W_e = W_{em} + W_{inv} + W_s$$

Μπορούμε στη συνέχεια να ορίσουμε το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

Πρόβλημα 7: ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής απώλειας W_e , στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας (T, ω) ,

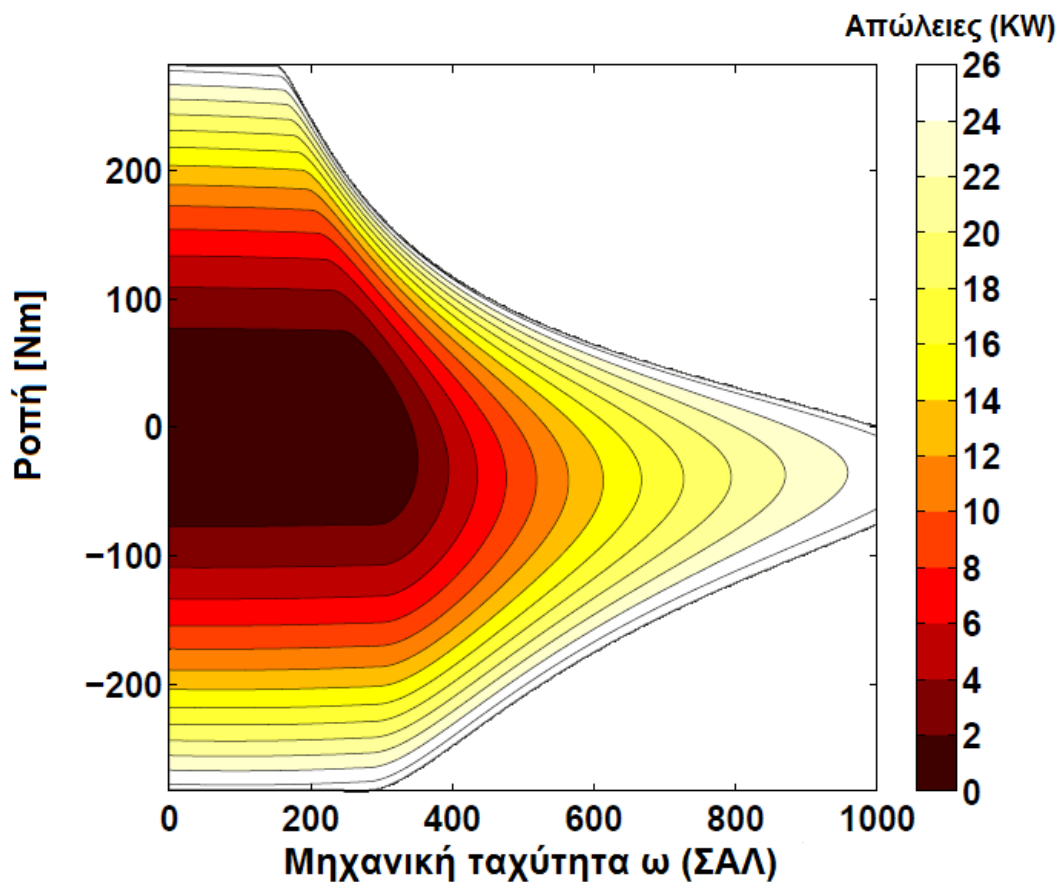
Σύμφωνα με τις σχέσεις (34) και (35):

$$\|u_{dq}\| \leq \max(U_{dq}), \|i_{dq}\| \leq I_{max}$$

Το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται για κάθε σημείο λειτουργίας (T, ω) που βρίσκεται εντός καμπύλης ροπής-ταχύτητας που ορίζεται από τις λύσεις των προβλημάτων 1 και 2, όπως φαίνεται στις σχέσεις (36) και (37). Το παραπάνω πρόβλημα λύθηκε χρησιμοποιώντας την αριθμητική λειτουργία βελτιστοποίησης (fmincon του Optimization Toolbox) του MATLAB για τις παραμέτρους του συστήματος που περιγράφονται στον Πίνακα 3.

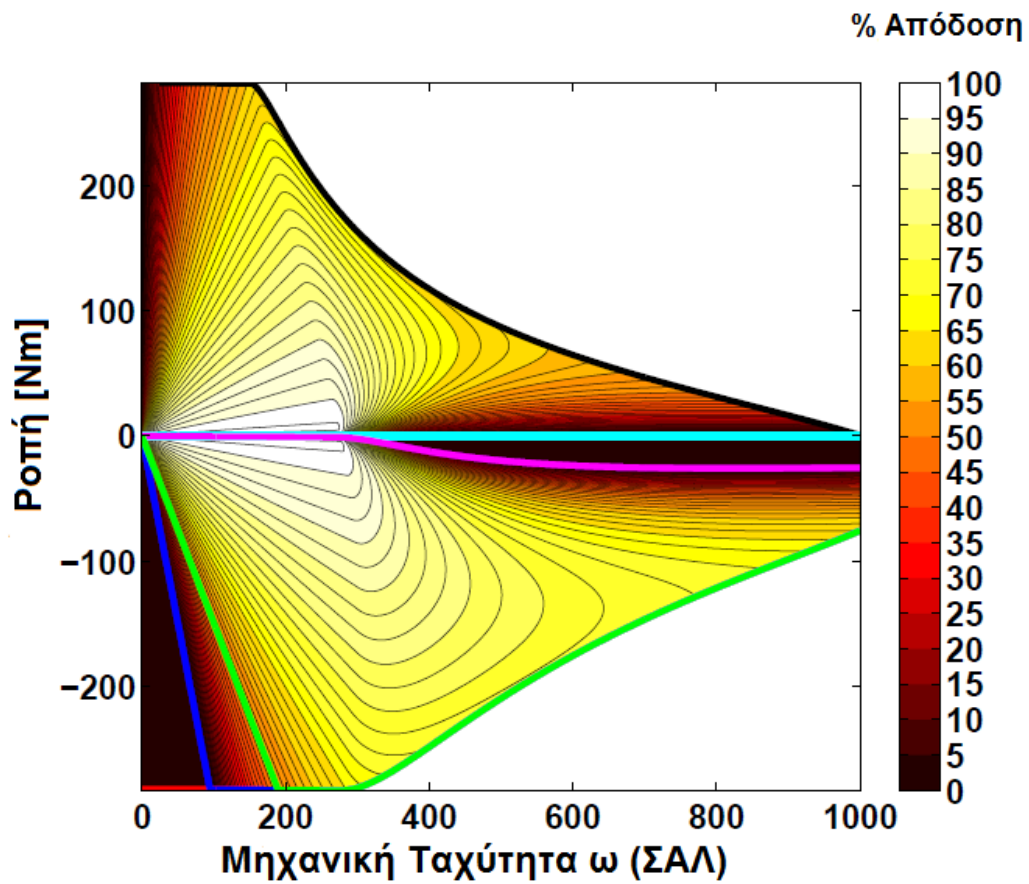
Το αποτέλεσμα της επίλυσης του προβλήματος 7 φαίνεται στην Εικόνα 18, όπου οι καμπύλες των απωλειών απεικονίζονται σε kw στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας. Εάν η ισχύς της πηγής ΣΡ είναι $P_s = E_s i_s$ και η μηχανική ισχύς εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής είναι $P_m = T \omega$, μπορούμε να ορίσουμε την έννοια της αποτελεσματικότητας του συστήματος n_s ως:

$$n_s = \begin{cases} \frac{P_m}{P_s}, & \text{αν } P_m > 0 \text{ και } P_s > 0 \\ \frac{P_s}{P_m}, & \text{αν } P_m < 0 \text{ και } P_s < 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$



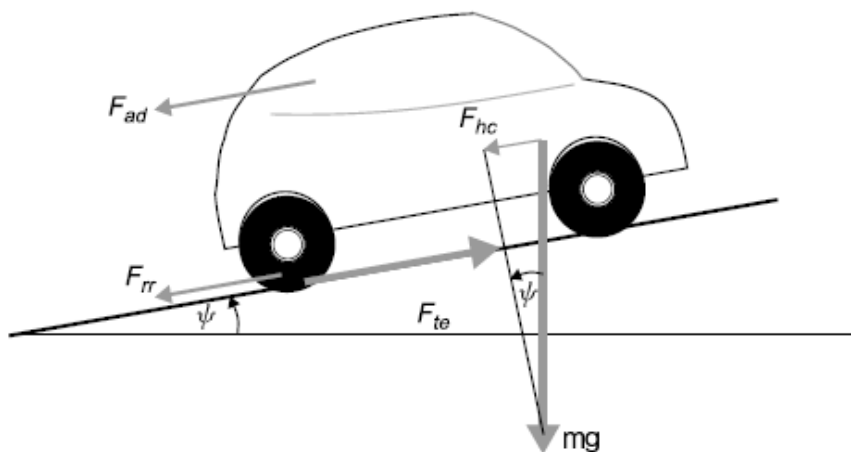
Εικόνα 18: Καμπύλες σταθερών απωλειών του ηλεκτρικού υποσυστήματος που απεικονίζονται στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας

Οι καμπύλες της αποτελεσματικότητας στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας με τις καμπύλες ικανότητας ροπής-ταχύτητας, τα όρια αναγεννητικής πέδησης και η ροπή που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα απορρόφησης από την πηγή ΣΡ κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης φαίνονται στην Εικόνα 19. Παρατηρείται ότι οι περιοχές της μη-αναγεννητικής πέδησης που περιγράφηκαν νωρίτερα αντιστοιχούν σε μηδενική απόδοση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ισχύς της πηγής ΣΡ είναι θετική $P_s > 0$ ενώ η μηχανική ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής είναι αρνητική $P_m < 0$ για όλα τα σημεία που λειτουργούν στις περιοχές της μη-αναγεννητικής πέδησης. Αυτό σημαίνει ότι η πηγή συνεχούς ρεύματος δαπανά ενέργεια για την παροχή ροπής πέδησης για τα σημεία λειτουργίας που εμπίπτουν σε αυτές τις περιοχές.



Εικόνα 19: Καμπύλες σταθερής απόδοσης του ηλεκτρικού υποσυστήματος που απεικονίζονται στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας

4.1.2 Απώλειες Μηχανικού Υποσυστήματος



Εικόνα 20: Δυνάμεις αντίστασης που σχετίζονται με ένα όχημα που κινείται κατά μήκος ενός κεκλιμένου δρόμου

Ένα όχημα που κινείται σε ένα κεκλιμένο δρόμο δείχνεται στην Εικόνα 20. Οι δυνάμεις αντίστασης που σχετίζονται με το όχημα είναι η δύναμη αντίστασης του δρόμου κύλισης (road rolling resistance force),

$$F_{rr} = c_r m g$$

Η δύναμη αντίστασης του αέρα (air drag resistance force),

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho_a \alpha_f c_d u_w^2$$

Και η δύναμη αντίστασης αναρρίχησης λόφων (hill climbing resistance force),

$$F_{hc} = m g \sin(\psi)$$

Όπου c_r είναι ο συντελεστής αντίστασης κύλισης, m η μάζα του οχήματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, ρ_a η πυκνότητα του αέρα, α_f είναι η μετωπική επιφάνεια του οχήματος, c_d ο συντελεστής της οπισθέλκουσας, u_w είναι η ταχύτητα της κέντρου μάζας του οχήματος, η οποία αναφέρεται ως η ταχύτητα του οχήματος από τώρα και στο εξής, και η ψ είναι η κλίση της επιφάνειας του οδοστρώματος. Το σύστημα πρόωσης του οχήματος οφείλει να παρέχει ενέργεια που ξεπερνάει αυτές τις δυνάμεις και επιπλέον να επιταχύνει ή να επιβραδύνει το όχημα. Η δύναμη της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης λαμβάνεται από τον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα ως:

$$F_{acc} = (1 + \delta_m) m \frac{du_w}{dt}$$

Όπου δ_m είναι ο συντελεστής δυναμικής μάζας του οχήματος. Ο παράγοντας αυτός αντιπροσωπεύει την αδράνεια των διάφορων περιστρεφόμενων εξαρτημάτων στο σύστημα μετάδοσης κίνησης του οχήματος και είναι γενικά ένα πολύ μικρό ποσοστό της μάζας του οχήματος. Ο όρος $\frac{du_w}{dt}$ απαιτείται για την επιτάχυνση ή επιβράδυνση του οχήματος. Η συνολική ελκτική δύναμη που εφαρμόζεται στο όχημα γράφεται ως εξής:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{acc} \quad (54)$$

Η μονάδα παραγωγής ενέργειας του οχήματος πρέπει να παρέχει την παραπάνω ελκτική δύναμη στους τροχούς μέσω ενός συστήματος μετάδοσης. Αν θεωρήσουμε ένα ηλεκτρικό όχημα το οποίο έχει μια ηλεκτρική μηχανή ως το μόνο προωθητικό σύστημα, τότε θα πρέπει να παρέχει την παραπάνω ελκτική δύναμη του οχήματος. Ο ρότορας της ηλεκτρικής μηχανής είναι συνδεδεμένος με τους τροχούς μέσω ενός μηχανισμού ταχυτήτων στην μετάδοση του οχήματος. Η απόδοση του μηχανισμού ταχυτήτων είναι n_g η οποία δίνει ένα μέτρο της απώλειας ισχύος στις ταχύτητες. Εάν η ακτίνα του τροχού είναι r_w , τότε η ροπή που απαιτείται στους τροχούς είναι:

$$T_w = F_{te} r_w$$

Εάν η τελική σχέση μετάδοσης κίνησης μεταξύ της ηλεκτρικής μηχανής και του τροχού είναι i_g , τότε η σταθερή κατάσταση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μηχανικής ταχύτητας του ρότορα της ηλεκτρικής μηχανής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$T_w = \frac{T_w}{i_g n_g}$$

$$\omega = \frac{i_g u_w}{r_w}$$

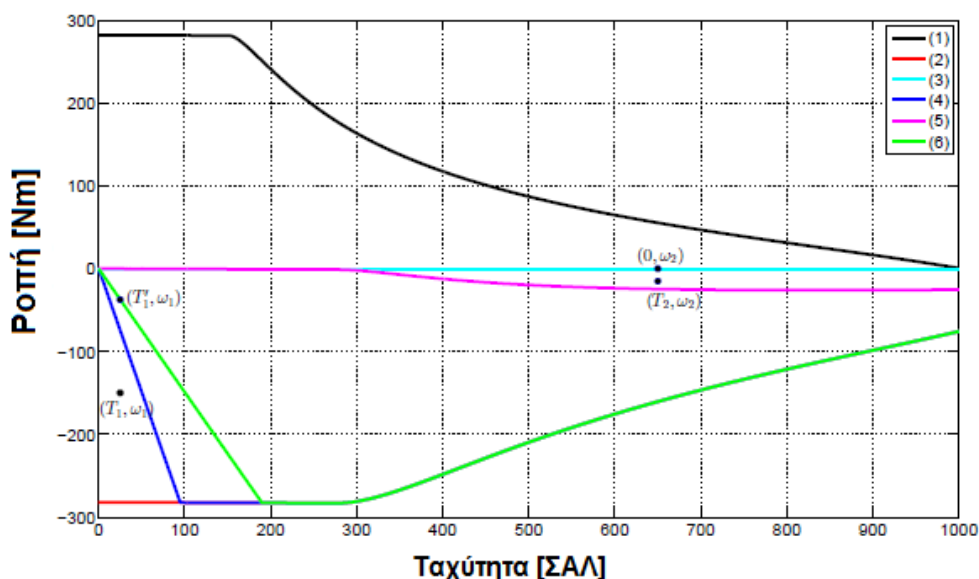
αντίστοιχα.

Ως εκ τούτου, φαίνεται ότι το αίτημα επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης του οχήματος αντιστοιχεί σε ένα σημείο λειτουργίας σταθερής κατάστασης στο επίπεδο της ροπής-ταχύτητας της ηλεκτρικής μηχανής.

4.2 Στρατηγικές Πέδησης

Θεωρείται ένα ηλεκτρικό όχημα με μία σύγχρονη μηχανή ενός εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη IPM-A, έναν μετατροπέα χωρίς απώλειες και μία ηλεκτροχημική μπαταρία. Ο ρότορας της μηχανής συνδέεται στους τροχούς μέσω των ταχυτήτων. Ένας κύκλος κίνησης είναι μία συνεχής σειρά από επιθυμητές ταχύτητες ως προς το χρόνο όπου το όχημα πρέπει να ακολουθήσει. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή επιτάχυνση ή επιβράδυνση, η ηλεκτρική μηχανή πρέπει να παρέχει σταθερή κατάσταση ροπής οδήγησης ή πέδησης σε ταχύτητα μηχανής η οποία είναι η ταχύτητα του οχήματος που κλιμακώνεται μέσω μιας σχέσης μετάδοσης ταχυτήτων στο κιβώτιο ταχυτήτων

του οχήματος. Ως εκ τούτου, κάθε καταχώρηση στα δεδομένα του κύκλου οδήγησης χαρτογραφείται στην ηλεκτρική μηχανή στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας, ως σημείο λειτουργίας σε σταθερή κατάσταση, μέσω από μία σχέση μετάδοσης ταχυτήτων. Σε αυτή την ενότητα θα συζητήσουμε στρατηγικές πέδησης σε σχέση με διαφορετικά δείγματα σημείων λειτουργίας στο τεταρτημόριο πέδησης του επιπέδου ροπής-ταχύτητας της ηλεκτρικής μηχανής.



Εικόνα 21: Δείγματα σημείων λειτουργίας στο τεταρτημόριο πέδησης του επιπέδου ροπής-ταχύτητας που χρησιμοποιείται για να εξηγήσει τις στρατηγικές πέδησης.

Έστω (T_1, ω_1) αντιπροσωπεύει ένα σημείο λειτουργίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 21. Αυτό το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στην περιοχή των ηλεκτρικών μηχανών μη-αναγεννητικής πέδησης που γειτνιάζει με τον άξονα y . Μια επιλογή είναι να αφήσουμε τη μηχανή να λειτουργεί σε αυτό το σημείο λειτουργίας αλλά αυτό θα σήμαινε ότι η πηγή ΣΡ δαπανά ενέργεια για να φρενάρει το όχημα το οποίο εξαντλεί την ενέργεια που μεταφέρει. Αντ' αυτού, προτείνεται η ακόλουθη στρατηγική πέδησης. Έστω (T'_1, ω_1) είναι ένα σημείο στη λύση του προβλήματος δ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 21. Αυτό το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στην ίδια ταχύτητα μηχανής με το προηγούμενο, ωστόσο το σημείο αυτό όχι μόνο βρίσκεται στην περιοχή αναγεννητικής πέδησης, αλλά επίσης παρέχει ρεύμα πίσω στην πηγή ΣΡ μέσω της αναγεννητικής πέδησης. Επομένως, είναι ωφέλιμο να μετατοπιστεί το σημείο λειτουργίας της μηχανής στο (T'_1, ω_1) και το υπόλοιπο μέρος της ροπής πέδησης του οχήματος παρέχεται από τα μηχανικά φρένα που

επισυνάπτονται στους τροχούς. Η τιμή της μηχανικής ροπής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$T_{mech} = (T_1 - T_1')i_g n_g$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η στρατηγική θα ισχύει για όλα τα σημεία που λειτουργούν στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας της ηλεκτρικής μηχανής που βρίσκονται κάτω από την λύση του προβλήματος 6, έστω και αν δεν βρίσκονται στην περιοχή μη-αναγεννητικής πέδησης.

Είναι επίσης σημαντικό να λάβουμε υπόψη ότι η φασική αντίσταση της μηχανής υπόκειται σε αλλαγή καθώς η θερμοκρασία περιελίξεων ποικίλει. Για παράδειγμα, στην επιφάνεια μιας σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη, φαίνεται από τις σχέσεις (44) και (46), οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις συμβολικές λύσεις στο όριο της αναγεννητικής πέδησης (Πρόβλημα 4) και την μέγιστη απορρόφηση ενέργειας αναγεννητικής πέδησης από την πηγή ΣΡ (Πρόβλημα 6) αντίστοιχα, ότι οι καμπύλες είναι αντιστρόφως ανάλογη με την φασική αντίσταση της μηχανής R_p . Επίσης, παρατηρείται ότι οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν την λύση του προβλήματος 6 έχει μια κλίση που είναι ακριβώς η μισή από την λύση του προβλήματος 4. Με την απουσία ενός οργάνου που παρακολουθεί με ακρίβεια την φασική αντίσταση περιέλιξης της μηχανής, και ακολουθώντας την παραπάνω στρατηγική πέδησης θα οδηγήσει πάντα την μηχανή να λειτουργεί στην περιοχή αναγεννητικής πέδησης εκτός αν η θερμοκρασία της περιέλιξης αυξηθεί σε ένα τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να αυξάνει την φασική αντίσταση κατά περισσότερο από 100%. Αλλά αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας είναι πρακτικά αδύνατη, επειδή θα υπερβεί τις τιμές των θερμοκρασιών των τυπικών υλικών καλωδίων μόνωσης.

Ένα άλλο ενδιαφέρον σημείο λειτουργίας είναι το σημείο (T_2, ω_2) το οποίο είναι μία γενική αναπαράσταση όλων των σημείων που βρίσκονται στην περιοχή της μη-αναγεννητικής πέδησης κοντά στο άξονα x όπως φαίνεται στην Εικόνα 21. Έστω P_{e2} είναι η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται στη μηχανή για να λειτουργήσει σε αυτό το σημείο. Όταν $P_{e2} > 0$, δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στη μηχανή για να παρέχει πέδηση, δεν είναι ωφέλιμη για να λειτουργήσει σε αυτό το σημείο. Μπορούμε να θεωρήσουμε την μετατόπιση του σημείου στον άξονα x στο σημείο $(0, \omega_2)$ όπως φαίνεται στην Εικόνα 21, το οποίο έχει ηλεκτρική ισχύς $P'_{e2} > 0$. Αυτό σημαίνει ότι η ηλεκτρική μηχανή παρέχει μηδενική ροπή πέδησης και όλη η απαιτούμενη ροπή πέδησης του οχήματος παρέχεται από τα μηχανικά φρένα για τα εν λόγω σημεία λειτουργίας, η οποία είναι μια άλλη στρατηγική πέδησης. Η μηχανική ροπή πέδησης δίνεται από τον τύπο:

$$T_{mech} = T_2 i_g n_g$$

Από την στιγμή που η στρατηγική περιέχει την μετακίνηση του σημείου λειτουργίας πιο μακριά από την ευθεία $Pe = 0$, αυτό θα σήμαινε ότι:

$$P'_{e2} > P_{e2} > 0$$

Ως εκ τούτου, το όχημα θα πρέπει να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια στο σημείο λειτουργίας $(0, \omega_2)$ σε σύγκριση με το να λειτουργήσει στο σημείο (T_2, ω_2) .

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο στόχος είναι να μελετηθούν οι επιπτώσεις της κατανάλωσης ενέργειας του οχήματος χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές πέδησης. Οι διαφορετικές στρατηγικές πέδησης συνοψίζονται στον Πίνακα 6.

4.3 Αποτελέσματα

Οι παραπάνω στρατηγικές εφαρμόστηκαν σε μία προσομοίωση οχήματος για τους ακόλουθους κύκλους οδήγησης που λήφθηκαν από την ιστοσελίδα της Υπηρεσίας και Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Environmental Protection Agency website) [5],

- Το EPA Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS)
- Ομοσπονδιακή Διαδικασία Δοκιμής (Federal Test Procedure (FTP))
- Το US06 το οποίο είναι ένα υψηλής επιτάχυνσης χρονοδιάγραμμα επιθετικής οδήγησης
- Ο κύκλος οδήγησης της Νέας Υόρκης (New York City Cycle (NYCC))

Πίνακας 6: Στρατηγικές Πέδησης

Στρατηγικές Πέδησης	Περιγραφή
Στρατηγική I	Χρησιμοποιήθηκαν μόνο μηχανικά φρένα. Η ηλεκτρική μηχανή χρησιμοποιήθηκε για κίνηση μόνο.
Στρατηγική II	Η ηλεκτρική μηχανή χρησιμοποιήθηκε για πέδηση μαζί με τα μηχανικά φρένα. Τα σημεία λειτουργίας δεν μετατοπίστηκαν για την βελτιστοποίηση της αναγεννητικής πέδησης.
Στρατηγική III	Η ηλεκτρική μηχανή χρησιμοποιήθηκε για πέδηση μαζί με τα μηχανικά φρένα. (T_1, ω_1) μετατοπίστηκε στο (T'_1, ω_1) και το (T_2, ω_2) στο $(0, \omega_2)$
Στρατηγική IV	Η ηλεκτρική μηχανή χρησιμοποιήθηκε για πέδηση μαζί με τα μηχανικά φρένα. (T_1, ω_1) μετατοπίστηκε στο (T'_1, ω_1) και το (T_2, ω_2) έμεινε αμετάβλητο

Πίνακας 7: Παράμετροι Οχήματος

Μηχανικό Υποσύστημα		Ηλεκτρικό Υποσύστημα	
Παράμετροι	Τιμές	Παράμετροι	Τιμές
Μάζα οχήματος(συμπεριλαμβανομένου του οδηγού και ενός επιβάτη), m	1653.8 kg	Χωρητικότητα ενέργειας μπαταρίας	24.72 kWh
Ακτίνα τροχού, r_w	0.316 m	Τάση μπαταρίας	366.3 V
Συντελεστής αντίστασης κύλισης, c_r	0.0069	Χωρητικότητα Φόρτισης μπαταρίας	67.5 Ah
Συντελεστής οπισθέλκουσας, c_d	0.26	Αντίσταση μπαταρίας	0.0247 Ω
Μετωπική περιοχή του οχήματος, a_f	2.7435 m ²	Αρχική κατάσταση φόρτισης	90%
Συντελεστής δυναμικής μάζας, δ_m	4%	Ηλεκτρική Μηχανή	Πίνακας 3
Σχέση μετάδοσης ταχύτητας, i_g	8.125		
Απόδοτικότητα ταχύτητας, η_g	95%		

Οι παράμετροι του οχήματος που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις φαίνονται στον Πίνακας 7. Οι προσομοιώσεις έτρεξαν για έναν κύκλο κάθε κινητήριου προγράμματος χρησιμοποιώντας κάθε μια από τις στρατηγικές πέδησης που αναφέρθηκαν στον Πίνακας 6 και την κατανάλωση ενέργειας στο τέλος κάθε κύκλου οδήγησης συνοψίστηκε όπως φαίνεται στον Πίνακας 8.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα Προσομοίωσης

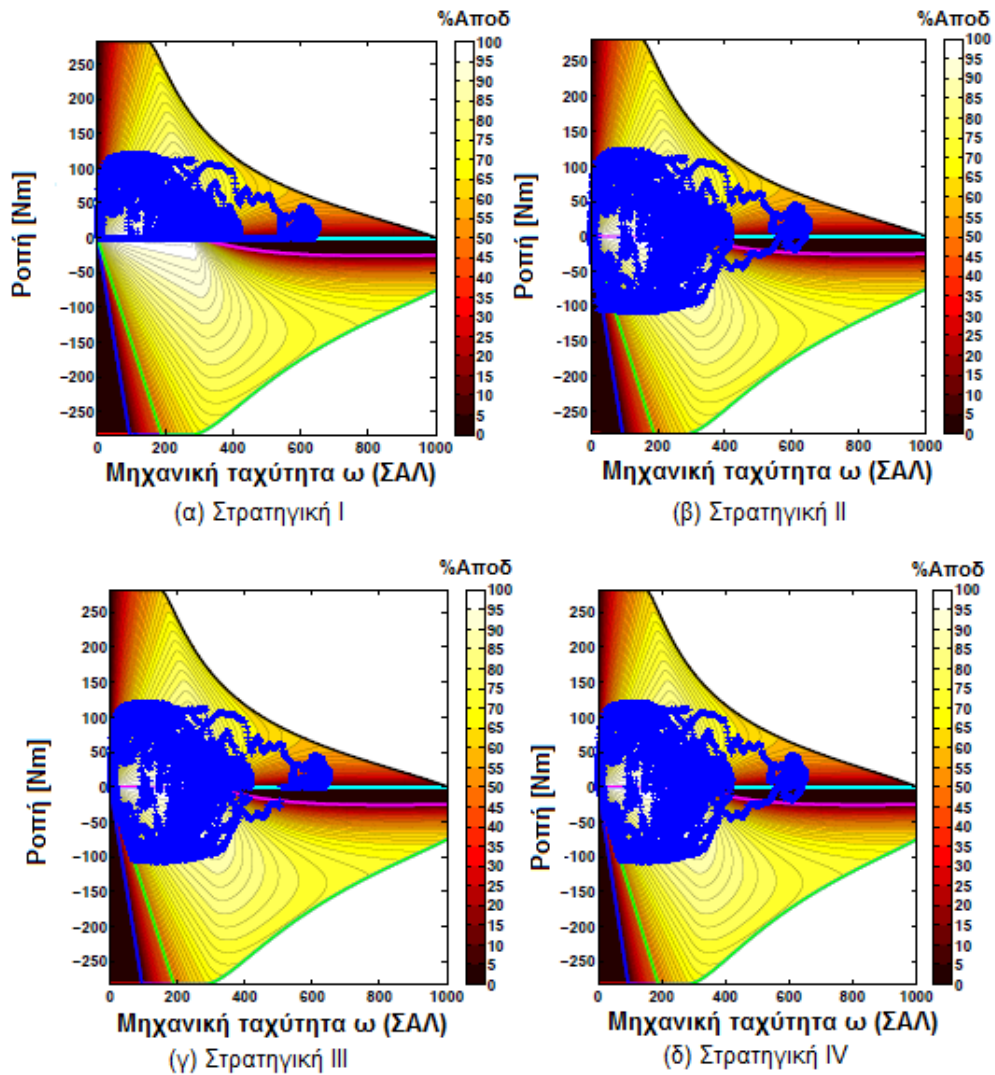
Πρόγραμμα Κίνησης	Κατανάλωση Ενέργειας (Wh / mile)			
	Στρατηγική I	Στρατηγική II	Στρατηγική III	Στρατηγική IV
UDDS	320.83	227.29	231.86	226.92
FTP	352.93	260.73	266.71	260.39
US06	689.89	593.67	602.57	593.32
NYCC	328.40	158.39	157.50	157.44

Η Εικόνα 22 δείχνει τα σημεία λειτουργίας του οχήματος στον χάρτη των αποδοτικότητων των καμπυλών του ηλεκτρικού υποσυστήματος. Μπορεί να παρατηρηθεί η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας στο τεταρτημόριο πέδησης καθώς υιοθετούνται διαφορετικές στρατηγικές πέδησης. Από τον Πίνακα 8, φαίνεται ότι είναι ωφέλιμο να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρική πέδηση από την ηλεκτρική μηχανή για να βοηθήσει το μηχανικό σύστημα πέδησης για να παρέχει την απαιτούμενη ροπή πέδησης του οχήματος (Στρατηγική II), δεδομένου ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας κατά ένα μεγάλο ποσοστό. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της Στρατηγικής IV οδηγούν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας περίπου 0,3 έως 1,1 Wh/mile σε σχέση με την Στρατηγική II. Σε μία απόσταση 100 μιλίων εξοικονομεί 0,03 έως 0,11 kWh καθαρής ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Η Στρατηγική III δεν παρέχει κανένα όφελος και στην πραγματικότητα προκαλεί μια αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί κάνοντας αναφορά στην Εικόνα 21. Όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, P_{e2} είναι η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται στη μηχανή για να λειτουργήσει στο σημείο μη-αναγεννητικής πέδησης (T_2, ω_2) (Στρατηγική II) και P'_{e2} είναι η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται στη μηχανή για να λειτουργήσει στο σημείο $(0, \omega_2)$ (Στρατηγική III) και προκύπτει ότι $P'_{e2} > P_{e2} > 0$. Αυτό σημαίνει ότι η πηγή SP παρέχει περισσότερη ενέργεια για να λειτουργήσει το σημείο $(0, \omega_2)$ από ότι το σημείο (T_2, ω_2) , στο οποίο δεν είναι ωφέλιμη κατάσταση.

Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για αυτήν την απλοϊκή αρχιτεκτονική του οχήματος που περιλαμβάνει μόνο μια ηλεκτρική μηχανή οδηγώντας τους τροχούς μέσω ενός κιβώτιου ταχυτήτων, είναι πιο ωφέλιμο να υιοθετήσουν την Στρατηγική IV. Αν και δεν βλέπουμε πολλή ενέργεια να αποθηκεύεται σε σύγκριση με την Στρατηγική II, η απλοϊκή φύση της αρχιτεκτονικής του οχήματος δεν επιτρέπει την εφαρμογή των πιο πολύπλοκων στρατηγικών πέδησης. Σε άλλες αρχιτεκτονικές οχήματος όπως σειράς, παράλληλης ή ενεργειακού διαχωρισμού υβριδικών-ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν πολλαπλά συστήματα ισχύος όπως κινητήρες εσωτερικής

καύσης και μία ή περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές, περισσότερο σύνθετες στρατηγικές πέδησης, μπορούν μειώσουν την ηλεκτρική κατανάλωση.

Επίσης, η αναγνώριση των ορίων της αναγεννητικής πέδησης (Πρόβλημα 4 και 5) , η καμπύλη που περιγράφει το μέγιστο ρεύμα απορρόφησης από την πηγή συνεχούς ρεύματος (Πρόβλημα 6) και η ενσωμάτωση των ενεργειακών στρατηγικών οδηγούν σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ενός ηλεκτρικού ή υβριδικού οχήματος.



Εικόνα 22: Σύγκριση των στρατηγικών πέδησης για τον κύκλο κίνησης UDDS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τεταρτημόρια πέδησης στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας μιας ηλεκτρικής μηχανής χωρίζονται σε περιοχές αναγεννητικής και μη-αναγεννητικής πέδησης. Αυτό φάνηκε στην αριθμητική μέθοδο ανάλυσης για την μηχανή ΣΡ ξένης διέγερσης, τη μηχανή μόνιμου μαγνήτη ΣΡ και των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη. Υπάρχει επίσης μία καμπύλη η οποία περιγράφει το μέγιστο ρεύμα που απορροφάται από την πηγή ΣΡ κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης. Συμβολικές εκφράσεις οι οποίες περιγράφουν τα όρια της αναγεννητικής πέδησης και η καμπύλη του μέγιστου ρεύματος αναγεννητικής πέδησης που λήφθηκαν για τη μηχανή του μόνιμου μαγνήτη ΣΡ. Διαπιστώθηκε ότι οι εκφράσεις που λήφθηκαν ήταν εξαρτημένες μόνο από τον οπλισμό της μηχανής και οι αντιστάσεις απωλειών πυρήνα και η μαγνητική σταθερά, και ήταν ανεξάρτητες από τις παραμέτρους της πηγής συνεχούς ρεύματος.

Για τις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη, διαπιστώθηκε ότι το σχήμα των καμπυλών περιγράφει τα όρια της αναγεννητικής πέδησης και το μέγιστο ρεύμα αναγεννητικής πέδησης ήταν διαφορετικό για τις δύο σύγχρονες μηχανές εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη που μελετήθηκαν. Λήφθηκαν συμβολικές εκφράσεις που περιγράφουν τις παραπάνω καμπύλες για μία επιφάνεια σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη. Βρέθηκε ότι αυτές οι εκφράσεις για τις καμπύλες εξαρτώνται μόνο από τους παραμέτρους της μηχανής και όχι από τις παραμέτρους της πηγής ΣΡ σε αυτή την περίπτωση.

Όταν οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές οχημάτων, είναι σημαντικό να εξεταστούν τα όρια της αναγεννητικής πέδησης. Εάν η κατάσταση οδήγησης του οχήματος τοποθετηθεί στο σημείο λειτουργίας σταθερής κατάστασης της μηχανής στις περιοχές μη-αναγεννητικής πέδησης, έχουν σχεδιασθεί στρατηγικές πέδησης για να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας του οχήματος. Για την απλή αρχιτεκτονική του οχήματος που χρησιμοποιεί μόνο μια ηλεκτρική μηχανή που συνδέεται με τους τροχούς μέσω των ταχυτήτων, συγκρίνονται διαφορετικές στρατηγικές πέδησης για την κατανάλωση ενέργειας ως προς διάφορα προγράμματα οδήγησης. Η Στρατηγική πέδησης IV που περιγράφεται στον Πίνακα 6 βρέθηκε να καταναλώνει την ελάχιστη ποσότητα ενέργειας από την πηγή συνεχούς ρεύματος για την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική του οχήματος. Οι αρχιτεκτονικές των οχημάτων που περιλαμβάνουν πολλαπλά συστήματα

ισχύος όπως κινητήρες εσωτερικής καύσης και ηλεκτρικές μηχανές όπως σειράς, παράλληλης ή ενεργειακού διαχωρισμού υβριδικών-ηλεκτρικών οχημάτων, θα απαιτούν πιο σύνθετες στρατηγικές πέδησης ανάλογα με τη θέση των σημείων λειτουργίας της σταθερής κατάστασης στα τεταρτημόρια πέδησης των μηχανών στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας. Επίσης, η αναγνώριση των αναγεννητικών ορίων πέδησης και της καμπύλης που περιγράφει το μέγιστο ρεύμα που απορροφάται από την πηγή ΣΡ είναι ένα σημαντικό βήμα στο σχεδιασμό στρατηγικών πέδησης για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών και υβριδικών-ηλεκτρικών οχημάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Κ.Βουρνάς, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [2] G. Dubey, Fundamentals of Electrical Drives, Pangbourne: Alpha Science International, 2002.
- [3] B. D. Austin Hughes, Electric motors and drives: fundamentals, types and applications, Newnes, 2013.
- [4] S. Cikanek και K. Bailey, «Regenerative Braking System For A Hybrid Electric Vehicle,» σε Proceedings of the American Control Conference, 2002.
- [5] Wikipedia, «Nicolas-Joseph Cugnot,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas-Joseph_Cugnot. [Πρόσβαση 17 Μάρτιος 2016].
- [6] Anonymous, «The History of Electric Vehicles, The Early Years - Electric Cars,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm>. [Πρόσβαση 17 Μάρτιος 2016].
- [7] Anonymus, «hybridCars,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.hybridcars.com/the-great-hybrid-car-cover-up-of-74/>. [Πρόσβαση 17 Μάρτιος 2016].
- [8] S. T. Robertson και J. D. Markham, «The Regenerative Braking Story,» The Scottish Tramway and Transport Society and Venture Publications LTD, pp. 14-50, 2006.
- [9] a. M. A. A. Allaby, «encyclopedia.com,» Ιανουάριος 1999. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.encyclopedia.com/doc/1O13-selfexcitingdynamo.html>. [Πρόσβαση 17 Μάρτιος 2016].
- [10] Anonymus, «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode_power_supply. [Πρόσβαση 21 Μάρτιος 2016].
- [11] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda και T. Hirasu, «Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives,» IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 511-517, Οκτώβριος 1994.
- [12] T. Schoenen, A. Krings, D. van Treek και R. De Doncker, «Maximum dc-link voltage utilization for optimal operation of IPMSM,» Electric Machines and Drives Conference, pp. 1547-1550, Μάιος 2009.

