



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση και Ανάλυση Ηλεκτρικού
Αυτοκινήτου Σύγχρονο Κινητήρα Μονίμων
Μαγνητών μέσω Simulink-Matlab

Όνομα Φοιτητή: Αργύρης Σφήκας

Αριθμός Μητρώου: 47005

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Ολυμπιάδα Συγγερίδου

Λέκτορας

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Simulation and Analysis of Electric Car
Permanent Magnet Synchronous Motor in
Simulink-Matlab

Student: Argiris Sfikas

Registration Number: 47005

Supervisor

Olympiada Syggeridou

Lecturer

ATHENS-EGALEO

JULY 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Συγγερίδου Ολυμπιάδα Λέκτορας	Καραϊσάς Πέτρος Αναπληρωτής Καθηγητής	Καλκάνης Κωνσταντίνος Επίκουρος Καθηγητής

Copyright © Σφήκας Αργύρης

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Σφήκας Αργύριος του Ευθυμίου, με αριθμό μητρώου 47005 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέπουσας καθηγήτριας.»

Ο Δηλών

Σφήκας Αργύριος

(Υπογραφή φοιτητή)

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Sphakos Argyrios', written in a cursive style.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Ολυμπιάδα Συγγερίδου, Λέκτορα ΠΑΔΑ, για τις πολύτιμες συμβουλές και την επιστημονική καθοδήγηση που υπέδειξε στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου για τη στήριξη που παρείχε σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα αναπτύσσονται ενεργά και όπως είναι γνωστό, ο σχεδιασμός κινητήρα υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος απαιτεί υψηλή απόδοση, υψηλή αναλογία ισχύος-βάρους και αξιοπιστία από χαμηλή ταχύτητα ρότορα σε υψηλή.

Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιείται για την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων. Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει τις μεθόδους ελέγχου σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη για τις ταχύτητες του ρότορα.

Λέξεις-Κλειδιά: Ηλεκτρικό Όχημα, Κινητήρας Μόνιμων Μαγνητών, Τεχνολογία, Κίνηση

Summary

Hybrid electric vehicles and electric vehicles are actively developing and as is it known, a hybrid electric vehicle motor design requires high efficiency, high power-to-weight ratio and reliability from low rotor speed to high rotor speed.

The permanent magnet synchronous motor is used to fulfill these requirements. The purpose of this thesis is to present all methods of permanent magnet synchronous motor control for all rotor speeds.

Keywords: Electric Vehicle, Permanent Magnet Motor, Technology, Motion

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΤΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ	5
1.1 Ιστορική Εξέλιξη Αυτοκινήτου	5
1.2 Το πρώτο αυτοκίνητο στην Ελλάδα	6
1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Χρήσης Αυτοκινήτου	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ	9
2.1 Ιστορική Εξέλιξη του Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2.2 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή	9
2.3 Οι Τεχνολογικές Εξελίξεις στα Μισά του 20 ^{ου} Αιώνα	10
2.1.3 Οι Τεχνολογικές Εξελίξεις στα Τέλη του 20ου Αιώνα και Αρχές του 21ου Αιώνα	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	13
3.1 Εξοικονόμηση Ενέργειας και Μείωση των Εκπομπών Άνθρακα	13
3.2 Μείωση της Τοπικής Ρύπανσης	13
3.3 Μείωση της Εξάρτησης από το Πετρέλαιο και τα Παράγωγά του	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ EV	16
4.1 Πλεονεκτήματα του Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου	16
4.2 Μειονεκτήματα του Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ	188
5.1 Τα Κίνητρα του Κράτους για την Χρήση EV	188
5.2 Τα Κίνητρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Χρήση EV	188
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ EV ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΕΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΟΣ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ.....	19
6.1 Χρήση σε Χώρες Εντός της Ε.Ε	19
6.2 Χρήση σε Χώρες Εκτός της Ε.Ε	200
6.3 Σύγκριση των Περιπτώσεων	211
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο : ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ.....	233
7.1. Ενεργειακές κρίσεις	244
7.2 Κινητήρες LS-PMS	255
7.3 Πλεονεκτήματα κινητήρα LS-PMS.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.8
7.3.1 Αποδοτικότητα	28
7.3.2 Συντελεστής Ισχύος	300
7.3.3 Ροπή και Πυκνότητα Ισχύος	311
7.3.4 Θερμοκρασία Ρότορα	322
7. 4. Προκλήσεις Κινητήρα LS-PMS (Κόστος)	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.2

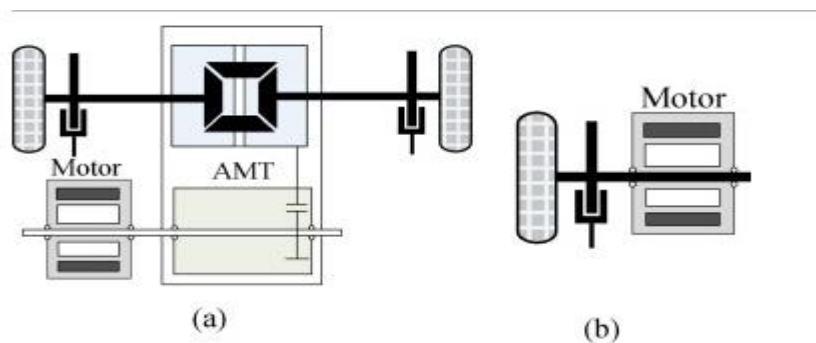
7.4.1 Εκκίνηση και Συγχρονισμός	37
7.4.2 Κατασκευή και Διαστάσεις	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΈΛΕΓΧΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ	
ΜΑΓΝΗΤΩΝ	444
8.1 Στρατηγικές Ελέγχου του PMSM	444
8.1.1 Διανυσματικός Έλεγχος	455
8.1.2 Άμεσος Έλεγχος Ροπής	477
8.1.3 Προηγμένες Στρατηγικές Ελέγχου	47
8.2 Στρατηγικές Ελέγχου Βασισμένες στη Σύγχρονη Θεωρία Ελέγχου.	49
8.3 Στρατηγικές Ελέγχου Βασισμένες στη Θεωρία Ευφυούς Ελέγχου.	51
8.4 Ηλεκτρομαγνητικές Παράμετροι του Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη για Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα	522
8.5 Εξωτερικές Χαρακτηριστικές του Κινητήρα	544
8.5.1 Μετατροπείας Τάσης.....	555
8.5.2 Εξωτερικές Χαρακτηριστικές του IPMSM	555
8.6 Ανάλυση επι της Επιρροής της Εξωτερικής Χαρακτηριστικής του Κινητήρα.....	58
8.6.1 Επίδραση του Λόγου Ικανότητας στις Εξωτερικές Χαρακτηριστικές του κινητήρα	60
8.7 Παράμετροι που Λαμβάνονται Υπόψη στο Σχεδιασμό	633
8.7.1 Επιλογή της Αναλογίας Διακρίσεων.....	633
8.7.2 Επιλογή της Αναλογίας Εξασθένησης Πεδίου	655
8.7.3 Υπολογισμός Ηλεκτρομαγνητικών Παραμέτρων.....	67
8.8 Μαθηματικό Μοντέλο Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ	
ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ SIMULINK.....	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την παγκόσμια έλλειψη ενέργειας και τις ολοένα και πιο αυστηρές απαιτήσεις εκπομπών ρύπων, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και η ανάπτυξη νέας καθαρής ενέργειας έχουν αποκτήσει αυξανόμενη σημασία για την κοινωνία. Με το πλεονέκτημα της υψηλής ενεργειακής απόδοσης και των χαμηλών εκπομπών ρύπων, τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) [1, 2] και τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs) [3, 4] θεωρούνται ελκυστική πρόταση για τα παραδοσιακά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Τα HEV χρησιμοποιούνται συχνότερα για μεταφορές μεγάλων αποστάσεων ή βαρέων φορτίων, ενώ τα EV έχουν ισχυρότερη εφαρμογή για μεταφορές εντός πόλεων. Τα EV είναι ένα σύστημα περιορισμένης ενέργειας που λειτουργεί με μπαταρίες, τα χαρακτηριστικά κατανάλωσης του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι θεμελιώδους σημασίας και μια τάξη μεγέθους υψηλότερη από άποψη προτεραιότητας σε σύγκριση με τα HEV.

Όσον αφορά τη διάταξη του συστήματος, σε σύγκριση με το παραδοσιακό σύστημα κίνησης κινητήρα με αυτοματοποιημένο μηχανικό κιβώτιο ταχυτήτων (AMT) [5], το σύστημα άμεσης μετάδοσης κίνησης με κινητήρα εντός τροχού έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής δυναμικής απόδοσης και της χαμηλής απώλειας μετάδοσης που είναι πιο κατάλληλο για EV, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Σύστημα μετάδοσης κίνησης PMSM σε EV. (α) PMSM με AMT. (β) Σύστημα άμεσης μετάδοσης κίνησης PMSM.

Για να βελτιωθεί η χιλιομετρική αντοχή των EV με μία φόρτιση, είναι σημαντικό να ελαχιστοποιήσουμε την κατανάλωση ενέργειας. Αρχικά τον κύριο μηχανισμό εξόδου ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων, τυχόν κέρδη απόδοσης στην κίνηση πρόσφυσης. Αυτά μεταφράζονται άμεσα σε αξιοσημείωτα βελτιωμένη χιλιομετρική αντοχή [6].

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτροκινητήρων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα ισχύος των EV, όπως ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC), ο κινητήρας επαγωγής (IM), ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PMSM) καθώς επίσης και ο κινητήρας (SRM). Οι κινητήρες PMSM λόγω της υψηλής απόδοσης, υψηλού συντελεστή ισχύος και υψηλής πυκνότητας ισχύος είναι συχνά μια βασική επιλογή. Η λειτουργική απόδοση του ηλεκτροκινητήρα PMSM εξαρτάται από τον ηλεκτρομαγνητικό σχεδιασμό του κινητήρα και την εφαρμοζόμενη κίνηση ελέγχου [7, 8, 9].

Για την βελτιστοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού σχεδιασμού συνίσταται προσαρμογή των γεωμετριών, των υλικών και των απωλειών των στοιχείων με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία του [10, 11, 12, 13]. Από την άλλη πλευρά πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη οι στρατηγικές ελέγχου για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του συνολικού εύρους του ηλεκτροκινητήρα [14, 15, 16].

Υπάρχουν πολλές στρατηγικές διανυσματικού ελέγχου για το σύστημα ισχύος PMSM των EVs, όπως ο έλεγχος $i_d = 0$, ο έλεγχος συντελεστή ισχύος μονάδας (UPF), ο έλεγχος μέγιστης ροπής ανά αμπέρ (MTPA), ο έλεγχος μέγιστης ταχύτητας ανά τάση (MSPV) και ο έλεγχος μοντέλου απώλειας (LMC). Ο έλεγχος $i_d = 0$ διατηρεί την ηλεκτρομαγνητική ροπή και το ρεύμα του άξονα q σε ανάλογη σχέση εντός του γραμμικού τρόπου λειτουργίας της μηχανής διατηρώντας το ρεύμα του άξονα d στο μηδέν [17, 18].

Ο έλεγχος $i_d = 0$ χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα PMSM (SPMSM) λόγω της έλλειψης εξέχουσας σημασίας. Ωστόσο, ο έλεγχος $i_d = 0$ δεν μπορεί να μεγιστοποιήσει την ηλεκτρομαγνητική ροπή στα εσωτερικά PMSM (IPMSM), και

επομένως, ο έλεγχος MTPA παρουσιάζεται για να αξιοποιήσει στο έπακρο τη διαθέσιμη ροπή [19, 20].

Η στρατηγική ελέγχου MTPA επιτυγχάνει την ελάχιστη απώλεια χαλκού, καθώς χρησιμοποιεί λιγότερο ρεύμα για να επιτύχει την επιθυμητή ροπή εξόδου. Ωστόσο, βελτιστοποιεί μόνο τις απώλειες χαλκού και επομένως δεν θα μεγιστοποιήσει την απόδοση του PMSM που αποτελείται από διάφορους άλλους όρους απωλειών [21, 22, 23].

Επιπρόσθετα, ο έλεγχος MSPV ελαχιστοποιεί την τάση και μειώνει τις απώλειες σιδήρου επίσης χάνει την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης του μηχανήματος. Ο έλεγχος UPF μειώνει την άεργο ισχύ στο μηδέν και έτσι μειώνεται η απώλεια ενέργειας μεταξύ των μεταδόσεων ισχύος [24, 25].

Οι απώλειες κινητήρα ενός PMSM μπορούν να χωριστούν σε τέσσερα μέρη: μηχανικές απώλειες, απώλειες χαλκού, απώλειες σιδήρου και απώλειες δινορευμάτων. Οι απώλειες χαλκού και σιδήρου είναι οι λεγόμενες ελεγχόμενες απώλειες που μπορούν να επηρεαστούν άμεσα από τις στρατηγικές ελέγχου. Ο έλεγχος MTPA και ο έλεγχος MSPV εστιάζουν μόνο σε μέρος των ελεγχόμενων απωλειών, ενώ το LMC λαμβάνει υπόψη τόσο τις απώλειες χαλκού, όσο και τις απώλειες σιδήρου και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να βελτιστοποιήσει τη μεγιστοποίηση της απόδοσης σε όλο το εύρος λειτουργίας του PMSM [31, 32].

Το LMC εστιάζει στη μείωση των απωλειών κινητήρα ωστόσο, οι απώλειες μετατροπέα παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στα γενικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων. Η τρέχουσα έρευνα για τη μείωση των απωλειών μετατροπέα επικεντρώνεται στον τρόπο διαμόρφωσης του τριφασικού μετατροπέα [33, 34, 35] και αγνοεί τις σχέσεις σύζευξης μεταξύ της απώλειας μετατροπέων ισχύος και της απώλειας κινητήρα που επηρεάζουν τη σταθερότητα του συστήματος PMSM. Άλλες έρευνες απλώς εφαρμόζουν συσκευές ισχύος SiC για τη βελτίωση της απόδοσης του μετατροπέα.

Αν και οι συσκευές ισχύος SiC με χαμηλές απώλειες μεταγωγής μειώνουν την απώλεια μετατροπέα και αυξάνουν την απόδοση του μετατροπέα του συστήματος PMSM, η χαμηλή απόδοση που προκύπτει όταν το όχημα επιβραδύνει μπορεί να είναι ένα πρόβλημα σε εφαρμογές EV [36, 37, 38]. Από τα παραπάνω σαφώς για τη βελτιστοποίηση του συστήματος μετάδοσης κίνησης EV PMSM, απαιτείται να ληφθούν υπόψη οι ελεγχόμενες απώλειες τόσο του μηχανήματος όσο και του μετατροπέα, ενώ λαμβάνονται υπόψη προσεκτικά οι απαιτήσεις σταθερότητας και δυναμικής απόδοσης.

Στην παρούσα λοιπόν εργασία αρχικά γίνεται λόγος για το ηλεκτρικό όχημα και στην συνέχεια αναλύεται ο κινητήρας μόνιμων μαγνητών. Στη συνέχεια, παρατίθεται η εφαρμογή αυτού του κινητήρα στα ηλεκτρικά οχήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΤΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

1.1 Ιστορική Εξέλιξη Αυτοκινήτου

Από τα αρχαία χρόνια ο άνθρωπος προσπαθούσε να μετακινηθεί σε διάφορες περιοχές και να εξερευνήσει άγνωστα για αυτόν τοπία και μέρη. Όπως λοιπόν γίνεται εύκολα αντιληπτό δεν θα μπορούσε να μετακινείται για μεγάλες αποστάσεις μόνο με τα πόδια. Έψαχνε λοιπόν διαρκώς μέσα τα οποία θα τον διευκολύνουν στην μετακίνηση του.

Αρχικά η μεταφορά των ανθρώπων γινόταν με την βοήθεια ζώων είτε άλογα τα οποία ίππευαν είτε με την χρήση κάρων και αμαξών. Όμως ήταν θέμα χρόνου το πολυμήχανο μυαλό των ανθρώπων να επινοήσει το αυτοκίνητο [39].

Το πρώτο αυτοκίνητο της ιστορίας φαίνεται να τοποθετείται στην Κίνα το 1672 από τον Ferdinand Verbiest ο οποίος ήταν και επικεφαλής του παρατηρητηρίου του Πεκίνου με την ιδιότητα του ερευνητή καθώς είχε σπουδάσει Μαθηματικά. Το αυτοκίνητο κατασκευάστηκε για να εξυπηρετήσει της ανάγκες Κινέζου Αυτοκράτορα ο οποίος ονομαζόταν Kangxi. Το αυτοκίνητο αυτό κινούνταν με ατμό και ήταν μεγέθους 65 εκατοστών και δεν μπορούσε να φέρει κάποιον οδηγό ούτε επιβάτη [40].

Έπρεπε να περάσει ένα χρονικό διάστημα σχεδόν ενός αιώνα μέχρι ο άνθρωπος να εξελίξει αυτή την ιδέα και να κατασκευάσει τελικά το πρώτο αυτοκίνητο το οποίο θα μπορούσε να μεταφέρει ανθρώπους. Ήταν ένα τρίκυκλο όχημα το οποίο ζύγιζε 2.5 τόνους και κινούνταν με την βοήθεια μίας ατμομηχανής η οποία είχε τοποθετηθεί στον μπροστινό τροχό. Μπορούσε να μεταφέρει έως και 4 επιβάτες για μόλις 20 λεπτά. Κινούνταν με μικρή ταχύτητα και είχε πολλά προβλήματα στη λειτουργία της κατεύθυνσής του. Τα εύσημα για αυτή την ανακάλυψη φαίνεται να ανήκουν στον Γάλλο εφευρέτη Nicola-Joseph Cugnot [41].

Ο Nicola-Joseph Cugnot έφερε την επανάσταση στην επιστημονική κοινότητα και από το σημείο αυτό ακολούθησε ένας καταϊγισμός επιστημονικών ανακαλύψεων.

Ορισμένες σημαντικές εφευρέσεις ενδεικτικά παρουσιάζονται και στις παρακάτω εικόνες. Όπως αυτή του Benz (Εικόνα 1α) ο οποίος κατασκεύασε το πρώτο όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης το 1885 [42] και φυσικά αυτή του Ford το 1896 (Εικόνα 1β.), ο οποίος κατασκεύασε το πλέον ιστορικό αυτοκίνητο Ford Model T και έμελλε να γίνει ο άνθρωπος ο οποίος στην αρχή του επόμενου αιώνα θα ξεκινούσε την μαζική παραγωγή αυτοκινήτων [43].



Εικόνα 1β.: Το Ford Model T



Εικόνα 1α.: Το μοντέλο Benz

1.2. Το Πρώτο Αυτοκίνητο στην Ελλάδα

Από την στιγμή που στον κόσμο άρχισε να αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς η βιομηχανία του αυτοκινήτου ήταν θέμα χρόνου να φτάσει και στην χώρα μας.

Το 1884 αποτελεί και χρονολογία σταθμό, καθώς κάνει την εμφάνισή του το πρώτο λεωφορείο με ατμό για να εξυπηρετεί ένα δρομολόγιο Αθήνα, Θήβα και Λιβαδειά για 14 επιβάτες και σε έναν απίστευτο χρόνο για τα ελληνικά δεδομένα σε μόλις 4 ώρες.

Το 1899 εμφανίζεται στην Αθήνα το πρώτο κανονικό αυτοκίνητο και φυσικά προκύπτουν και τα πρώτα προβλήματα καθώς όπως αναφέρουν μαρτυρίες της εποχής τα φρένα του ήταν σχεδόν ανύπαρκτα. Η ταχύτητα που μπορούσαν να αναπτύξουν δεν ξεπερνούσε τα 35 χιλιόμετρα ανά ώρα και δυστυχώς με όλα τα καλά που έφεραν τα αυτοκίνητα ήταν θέμα χρόνου να συμβεί και το πρώτο ατύχημα, το οποίο έλαβε χώρα το 1907 και ήταν θανατηφόρο καθώς 2 αυτοκίνητα συγκρούστηκαν με μια πεζή.

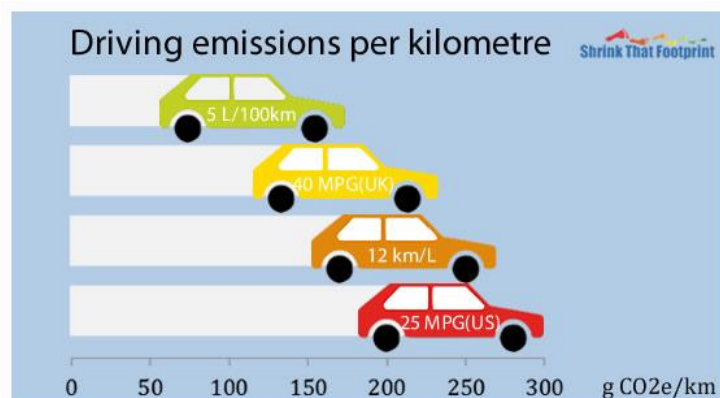
1.3. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Χρήσης Αυτοκινήτου

Στις μέρες μας η πλειονότητα των νοικοκυριών παγκοσμίως έχει στην κατοχή της τουλάχιστον ένα αυτοκίνητο. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης ενός αυτοκινήτου είναι η ελευθερία του να ταξιδέψει κανείς οποιαδήποτε χρονική στιγμή επιθυμεί σε οποιοδήποτε μέρος με άνεση και σχετική ασφάλεια.

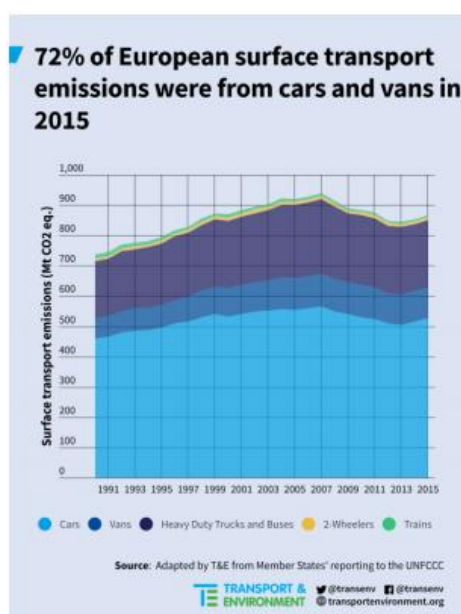
Από τη μία πλευρά, τα σύγχρονα αυτοκίνητα τα οποία διαθέτουν μία σειρά ανέσεων όπως κλιματισμό, παροχή μουσικής αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις μέχρι και θερμαινόμενα καθίσματα κάνουν το ταξίδι ακόμη πιο άνετο και απολαυστικό. Ενώ πλέον με την ταχύτητα την οποία αναπτύσσουν εκμηδενίζουν σχεδόν της αποστάσεις.

Από την άλλη πλευρά όμως, τα συμβατικά αυτοκίνητα επιφέρουν και κάποιες ζημιές τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη ζωή. Αρχικά ένα παραδοσιακό αυτοκίνητο καταναλώνει ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό πετρελαίου ή diesel κάτι που συνεχώς αυξάνει τις ανάγκες για εξόρυξη πετρελαίου. Αυτό πέρα από οικολογική καταστροφή επιφέρει και αύξηση της τιμής του πετρελαίου με αποτέλεσμα την οικονομική ζημία των ανθρώπων. Επίσης η συνεχή αύξηση της παραγωγής και της χρήσης των αυτοκινήτων έχει σαν αποτέλεσμα την έκλυση καρκινογόνων αέριων ρύπων στο περιβάλλον. Αυτό προκαλεί τεράστια κλιματική αλλαγή (φαινόμενο θερμοκηπίου κλπ) αλλά και επιβλαβής επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων που περιλαμβάνει από αναπνευστικά προβλήματα μέχρι και την εκδήλωση καρκίνου [44].

Στο διάγραμμα 1.3α παρατηρούμε τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά χιλιόμετρο ενώ στο διάγραμμα 1.3β παρατηρούμε την εξέλιξη των εκπομπών συγκριτικά με το μέσο μεταφοράς κάθε φορά.



Διάγραμμα 1.3α: CO2 emissions/km



Διάγραμμα 1.3β: Συγκριτικό διάγραμμα εκπομπών αερίων ανάλογα με το μοντέλο οχήματος κάθε φορά.

Η εξέλιξη τώρα της αυτοκινητοβιομηχανίας παρουσιάζει μία πολλά υποσχόμενη εφεύρεση που επιφέρει τις λύσεις σε όλα τα προαναφερθέντα προβλήματα και δεν είναι άλλο από το ηλεκτρικό όχημα όπως θα αναλύεται και στα επόμενα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

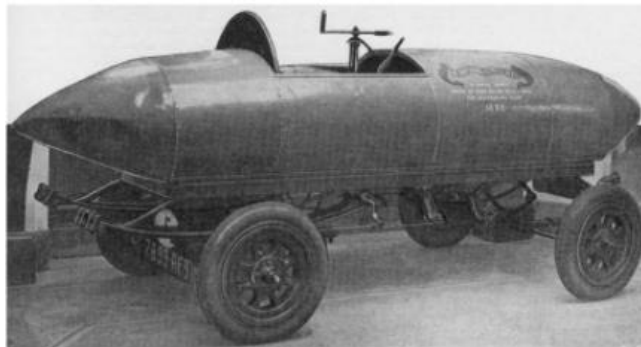
2.1 Σύνοψη Ιστορική Αναδρομή

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αναπτύχθηκαν στηριζόμενοι στο έργο του Michael Faraday το 1821. Ο πρώτος ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος εφευρέθηκε από τον Βρετανό επιστήμονα William Sturgeon το 1832.

Η πρώτη ηλεκτρική ατμομηχανή κατασκευάστηκε στο 1837 από τον χημικό Robert Davidson και τροφοδοτούνταν από μη-επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, όπου αργότερα το 1841 ο ίδιος έφτιαξε μία μεγαλύτερη ηλεκτρική ατμομηχανή. Η πρώτη χρήση ενός τέτοιου οχήματος ήταν το 1895, το οποίο διένυσε 6.4 χιλιόμετρα κατά μήκος της Βαλτιμόρης στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

Έπρεπε όμως να παρέλθουν πολλά ακόμη χρόνια μέχρι να αναπτυχθεί περαιτέρω η τεχνολογία των μπαταριών και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλη εμβέλεια τα ηλεκτρικά οχήματα [45].

Στην εικόνα 2.1α βλέπουμε και το πρώτο ηλεκτρικό όχημα το οποίο ονομάστηκε « La Jamais Contente», το οποίο οδηγήθηκε από τον οδηγό ταχύτητας Camille Jenatzy σημειώνοντας ρεκόρ ταχύτητας (65.9 mph).



Εικόνα 2.1α: Το Πρώτο Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο

Μέχρι τα τέλη του 19^{ου} αιώνα με την μαζική παραγωγή των επαναφορτιζόμενων μπαταριών η χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έγινε μαζική.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα τα ηλεκτρικά οχήματα άρχισαν να κερδίζουν έδαφος έναντι των ατμομηχανών και μέχρι το 1920 πολλά ηλεκτρικά οχήματα άρχισαν να κατασκευάζονται. Ωστόσο ακόμη δεν ήταν ευρεία η χρήση τους και αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι τα κινούμενα με βάση το πετρέλαιο οχήματα είχαν ισχύ περί τα

$9000Wh*kg^{-1}$ έναντι των ηλεκτρικών που κινούνταν με μπαταρίες που ήταν περί τα $30Wh*kg^{-1}$.

2.2 Οι Τεχνολογικές Εξελίξεις στα Μέσα του 20^{ου} Αιώνα

Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα τα πρώτα ηλεκτρικά τρένα άρχισαν να αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας τόσο DC όσο και AC συστήματα και να χρησιμοποιούνται λόγω των πλεονεκτημάτων και απαιτούσαν λιγότερη συντήρηση έναντι των ατμομηχανών.

Ωστόσο τα ηλεκτρικά τρένα υπερτερούσαν έναντι των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην παρούσα κατάσταση, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν είχαν αρχίσει ήδη από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα να χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

2.3 Οι Τεχνολογικές Εξελίξεις στα τέλη του 20ου Αιώνα και Αρχές του 21ου Αιώνα

Τα ηλεκτρικά τρένα μέχρι τα τέλη του 20^{ου} αιώνα είχαν κερδίσει επ' άξια μία θέση στις μεταφορές ενώ άρχισαν να κάνουν και την εμφάνιση τους τα επονομαζόμενα high-speed τρένα στην Ιαπωνία όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.3α



Εικόνα 2.3α: High-speed τρένα στην Ιαπωνία

Τα τρένα αυτά ήταν ικανά να διανύσουν μία απόσταση περί τα 500km σε διάρκεια 4 ωρών. Τα σύγχρονα high-speed τρένα ή bullet trains (μία άλλη ονομασία τους) αναπτύσσουν τεράστιες ταχύτητες της τάξης των 300 χλμ. Το σύστημα των τρένων αυτών στην Ιαπωνία εξυπηρετεί περίπου 150 επιβάτες. Ωστόσο τέτοιου είδους

τρένα άρχισαν να εξυπηρετούν και άλλες χώρες όπως Γαλλία και Κίνα. Το σύστημα αυτών των τρένων στην Γαλλία αγγίζει ταχύτητα της τάξεως των 581χλμ. [45].

Όσον αφορά την εξέλιξη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, οι προσπάθειες εξέλιξης προέρχονται από διάφορους χώρους και διάφορες βιομηχανίες ακόμη και η Nasa στους αυτοκινούμενους δορυφόρους άλλαξε την μορφή τροφοδοσίας από καύσιμο σε ηλεκτρισμό και συγκεκριμένα σε ηλεκτρικές μπαταρίες.

Έτσι ξεκινά και αναπτύσσεται ραγδαία το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Ωστόσο δεν είναι τόσο απλό στο να δημιουργηθεί ένα πολύ αξιόπιστο ηλεκτρικό αυτοκίνητο και για αυτό πέρασαν πολλά χρόνια μέχρι κάποιο από αυτά τα μοντέλα να κυκλοφορήσει επίσημα στην αγορά.

Κάτι τέτοιο έγινε στις αρχές του 1990 όταν η CARB άρχισε να απαιτεί αυτοκίνητα με λιγότερους ρύπους και έτσι οι κατασκευαστές έβγαλαν στην αγορά τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Όμως ακόμη και αυτό δεν ήταν αρκετό να πείσει τους ανθρώπους να τα αγοράσουν και χρειάστηκε να περάσει πολύς καιρός μέχρι το 2008 η εταιρία Tesla Motors να ξεκινήσει να εργάζεται πάνω σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο το οποίο ξεκινάει να αποκτά τεράστια φήμη και να κερδίζει την εκτίμηση του κόσμου [46].

Στην εικόνα 2.3β φαίνεται και ένα από τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα τα οποία κυκλοφόρησαν στην αγορά και στην εικόνα 2.3γ το μοντέλο της Tesla που έχει επιφέρει την επανάσταση στην αυτοκινητοβιομηχανία.



Εικόνα 2.3β: Ένα από τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα το General Motors EV1



Εικόνα 2.3γ: Tesla Model S

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

3.1 Εξοικονόμηση Ενέργειας και Μείωση των Εκπομπών Άνθρακα

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο είναι όχημα «μηδενικής» ρύπανσης μόνο στην περιοχή που λειτουργεί. Εάν οι συσσωρευτές του φορτίζονται με ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από θερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, τότε το πρόβλημα της ρύπανσης μεταφέρεται έξω από την πόλη. Αλλά ακόμα και έτσι, είναι τεχνολογικά ευκολότερο να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα σε παγκόσμιο επίπεδο.

Πέραν αυτού, οι υδροηλεκτρικοί ή γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής δεν είναι άμεσα ρυπογόνοι. Το ίδιο ισχύει για την ηλιακή ενέργεια και υπό ορισμένες προϋποθέσεις και για την πυρηνική ενέργεια. Η συνολική ρύπανση από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής εξαρτάται από την ποσοστιαία συμμετοχή των διαφόρων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε κάθε σύστημα και αυτή διαφέρει από χώρα σε χώρα [46].

Σε παγκόσμια κλίμακα εκτιμάται ότι η εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα μειώσει τη ρύπανση τόσο μέσα στις πόλεις όσο και συνολικά, επίσης θα περιορίσει το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Μια άλλη αιτία ρύπανσης είναι τα άχρηστα βιομηχανικά προϊόντα. Τα παλιά αυτοκίνητα ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Οι αριθμοί των ετήσιων πωλήσεων αυτοκινήτων, δείχνουν το μέγεθος του προβλήματος. Αποτελεί πλέον αναγκαιότητα τα αυτοκίνητα να είναι ανακυκλώσιμα. Αυτό πρέπει να ισχύει υποχρεωτικά και για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, παρά το γεγονός ότι ένα μη ανακυκλώσιμο αυτοκίνητο κατασκευασμένο από μη ανακυκλώσιμα συνθετικά υλικά μπορεί να είναι ελαφρύτερο, ανθεκτικότερο και να διαθέτει μεγαλύτερη αυτονομία.

3.2 Μείωση της Τοπικής Ρύπανσης

Θα μπορούσαμε να φανταστούμε πόλεις χωρίς επιβατικά αυτοκίνητα, που να διαθέτουν μόνο «καθαρά» μέσα μαζικής μεταφοράς (π.χ. ηλεκτρικά λεωφορεία, τρόλεϊ ή τραμ). Αυτή η μάλλον μη-δημοφιλής λύση απαιτεί πρόβλεψη διάθεσης μεγάλων χώρων στάθμευσης των επιβατικών αυτοκινήτων στις προσβάσεις των πόλεων και αυτό δεν είναι εφικτό σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, μια γενίκευση

αυτής της εφαρμογής, θα είχε ίσως καταστροφική επίδραση στην αυτοκινητοβιομηχανία και επακόλουθη έκρηξη ανεργίας.

Μπορεί μόνο να θεωρηθεί σαν μέτρο προς εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις όπως π.χ. σε πόλεις με πολλά σημαντικά αρχαιολογικά μνημεία ή πόλεις ιδιαίτερου τουριστικού ενδιαφέροντος.

Η εισαγωγή της χρήσης στις πόλεις, αυτοκινήτων «μηδενικής ρύπανσης» είναι μια εναλλακτική λύση. Σαν τέτοια πρέπει να θεωρήσουμε τα ηλεκτρικά δημόσια συστήματα μεταφοράς προσώπων, τα ηλεκτρικά επιβατικά αυτοκίνητα και τα ηλεκτρικά δίκυκλα [46].

Τεχνολογικά, σήμερα είναι εφικτή η κατασκευή ηλεκτρικών οχημάτων με ικανοποιητική ακτίνα ενέργειας για αστική χρήση. Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι έτοιμη να παράγει τέτοια οχήματα εάν υπάρξει μια ικανή ζήτηση η οποία θα οδηγήσει στη μείωση των τιμών τους που σήμερα είναι πολύ υψηλότερες από εκείνες των συμβατικών αυτοκινήτων με θερμικούς κινητήρες.

Μια τέτοια απόφαση θα έχει θετικά αποτελέσματα όχι μόνο στη μείωση της ρύπανσης και του θορύβου, αλλά και σε πολλές άλλες δραστηριότητες του βίου μας. Κάθε μία από αυτές τις λύσεις δεν αποκλείει την άλλη και έτσι ο βέλτιστος συνδυασμός μπορεί να επιλεγεί για κάθε πόλη. Αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η βελτίωση του προβλήματος της ρύπανσης και του θορύβου μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν σημαντικός αριθμός θερμικών αυτοκινήτων αντικατασταθεί με ηλεκτρικά.

3.3 Μείωση της Εξάρτησης από το Πετρέλαιο και τα Παράγωγά του

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα συμβατικά οχήματα αυξάνουν τον κίνδυνο περιβαλλοντικής ρύπανσης εν αντιθέσει με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα όπου μετατρέπουν τις πόλεις σε ένα πιο ευχάριστο μέρος να ζει κάποιος.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα που ταλανίζουν τις σύγχρονες κοινωνίες ίσως θα πρέπει να ήταν και η πιο σημαντική αφορμή για την ευρεία χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Ήδη η χρήση βενζίνης έχει απαγορευτεί και γίνεται λόγος για την υποχρεωτική ένταξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε ορισμένες πόλεις.

Η Καλιφόρνια με το πρόγραμμα «Emission Vehicle Program», προσπάθησε να προωθήσει τα ηλεκτρικά οχήματα στους καταναλωτές, με σκοπό να μετριάσει το περιβαλλοντικό πρόβλημα [47].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΥ

4.1 Πλεονεκτήματα της Χρήσης του Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου

Το κυριότερο πλεονέκτημα του ηλεκτρικού οχήματος είναι η συνεισφορά του στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας οφείλεται στους ρύπους των συμβατικών οχημάτων. Το ηλεκτρικό όχημα έχει ουσιαστικά μηδενικούς ρύπους προκαλώντας ελάχιστη ρύπανση του αέρα και μηδενική ρύπανση του χώρου που κινείται. Σε μια πρόσφατη μέτρηση φαίνεται ότι το ηλεκτρικό όχημα είναι 98% καθαρότερο του συμβατικού. Επίσης η συνεισφορά του αφορά στη μείωση της ηχορύπανσης που κάνει την ατμόσφαιρα των μοντέρνων πόλεων ανυπόφορη. Το ηλεκτρικό όχημα είναι ουσιαστικά αθόρυβο συγκρινόμενο με τα οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσεως. Τέλος, είναι περισσότερο αξιόπιστα από τα συμβατικά οχήματα. Επιπρόσθετα είναι πιο εύκολη η κατασκευή του γιατί ο ηλεκτροκινητήρας είναι πολύ απλός στη δομή του, σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσεως. Εφόσον τροφοδοτείται μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ελέγχονται εύκολα ηλεκτρονικά, δεν απαιτείται συνήθως νερό για την ψύξη τους και δεν χρησιμοποιεί φίλτρα και λάδι, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει προβλήματα που δημιουργούνται από χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι γνωστό ότι καταναλώνει ενέργεια μόνο όταν κινείται. Όταν δεν κινείται π.χ. στάση σε σηματοδότες ή σε μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση, δεν καταναλώνει ενέργεια. Λόγω του σεβασμού του στο περιβάλλον επιτρέπει την ενσωμάτωση της κίνησης σε περιοχές «ιστορικά ευαίσθητες» π.χ. Ιστορικό κέντρο των πόλεων. Δεν απαιτούνται για τη χρήση του υψηλές μηχανικές γνώσεις και εμπειρία. Έχει σαφώς πιο εύκολο χειρισμό από το συμβατικό όχημα. Το κόστος της λειτουργίας του, σύμφωνα με υπολογισμούς των General Motors και Chrysler είναι πολύ μικρότερο από αυτό των συμβατικών οχημάτων.

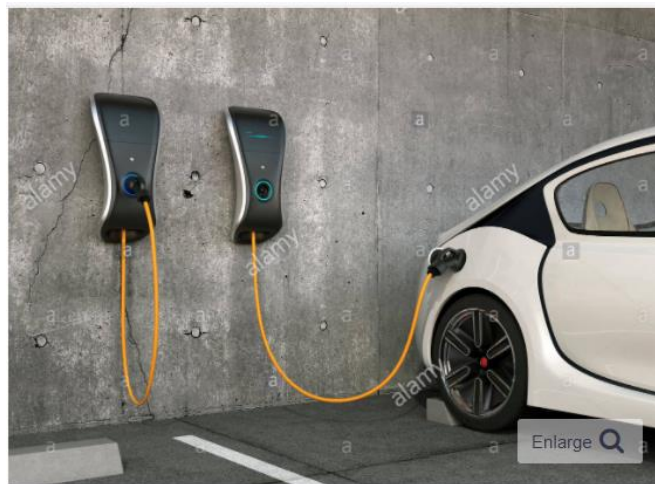
Η ηλεκτρική μηχανή είναι πολύ πιο αποτελεσματική συγκρινόμενη με του συμβατικού, αναμένεται να κρατήσει πάνω από 1.000.000 μίλια εν αντιθέσει με τα 100.000 μίλια του συμβατικού [48, 49].

4.2 Μειονεκτήματα της Χρήσης του Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου

Αρχικά, έχει μικρότερες επιδόσεις π.χ. χιλιομετρικές, εξαιτίας της ανεπάρκειας των συσσωρευτών. Έχει δηλαδή πολύ μικρή αυτονομία σε σχέση με τα συμβατικά.

Επίσης, η πυκνότητα ενέργειας των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών είναι πολύ μικρότερη αυτής του υγρού καύσιμου, το οποίο προέρχεται από υδρογονάνθρακες. Ένα μειονέκτημα, επίσης, είναι ότι χρειάζεται μεγάλο χρόνο για τη φόρτιση των συσσωρευτών, σε αντίθεση με το συμβατικό το οποίο χρειάζεται ελάχιστο χρόνο για τον εφοδιασμό του με υγρά καύσιμα. Υπάρχει γενικά υψηλό κόστος συσσωρευτών. Το κόστος των συσσωρευτών είναι προφανές ότι επηρεάζει αισθητά το συνολικό κόστος του ηλεκτρικού οχήματος.

Βασικό μειονέκτημα, αποτελεί η ασφάλεια από τους συσσωρευτές που μπορεί να τραυματίσουν σοβαρά τους επιβάτες. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση κακής μόνωσης υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας. Τέλος, είναι δύσκολη η πρόσβαση σε φορτιστή σε αντίθεση με τους σταθμούς καυσίμων που συναντάμε παντού. Πρόβλημα που αντιμετωπίζεται με τους φορητούς φορτιστές ή τους σταθμούς φόρτισης σε πολλές ξένες πόλεις όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1 [48, 49].



Εικόνα 4.1: Σταθμοί Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

5.1 Τα Κίνητρα του Κράτους για την Χρήση EV

Όλα τα ευρωπαϊκά κράτη όπως ακριβώς και η Ελλάδα, στην προσπάθειά τους να στηρίξουν έμπρακτα την ηλεκτροκίνηση, παρέχουν στους οδηγούς αρκετά κίνητρα με σκοπό την αλλαγή των συμβατικών οχημάτων.

Πρώτα από όλα, τα τέλη κυκλοφορίας που έχουν πολλά αυτοκίνητα, στα ηλεκτρικά δεν υπάρχουν καθώς βασίζονται στις εκπομπές των ρύπων. Έπειτα, όποιο όχημα και να αποκτήσεις οποιαδήποτε αξίας εξαιρείσαι από φόρους και τέλη ταξινόμησης άλλο ένα μέτρο με στόχο να μπούμε ακόμη πιο ενεργά στην ηλεκτροκίνηση. Ένα ακόμη μέτρο που συμβάλει στην αλλαγή είναι ότι η απόσυρση του οχήματός σου για την απόκτηση ενός ηλεκτρικού δίνει διπλάσια χρήματα από ότι στην απόσυρση για την απόκτηση ενός ηλεκτρικού.

Όπως καταλαβαίνουμε το κράτος προσπαθεί με κάθε τρόπο να τονώσει αυτήν την αγορά [50].

5.2 Τα Κίνητρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Χρήση EV

Το σχέδιο της ευρωπαϊκής ένωσης είναι γνωστό ότι θέλει να επιφέρει την αλλαγή άμεσα έτσι ώστε να γίνει ο πλανήτης πιο «καθαρός».

Έδωσε την δυνατότητα σε πολλές χώρες να παρέχουν επιδότηση σε ιδιοκτήτες με την προοπτική την απόκτηση του ηλεκτρικού. Παρείχε κονδύλια στα κράτη-μέλη με σκοπό να οργανώσουν δράσεις για να δείξουν στους πολίτες τα υπέρ της ηλεκτροκίνησης.

Ακόμη, σε πολλά κράτη έδωσε την δυνατότητα χρηματοδότησης με ένα ποσοστό της τάξεως 10 με 20% του κόστους για να αποκτήσουν ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Αυτό γίνεται γιατί το περιβάλλον σε αυτές τις χώρες είναι ιδιαίτερα κορεσμένο. Επίσης παρέχει την οικονομική δυνατότητα στα κράτη να μπορέσουν να φτιάξουν σταθμούς ανεφοδιασμού πρώτα από όλα στους περιφερειακούς μεγάλους αυτοκινητόδρομους και έπειτα σε σημεία εντός των πόλεων [50].

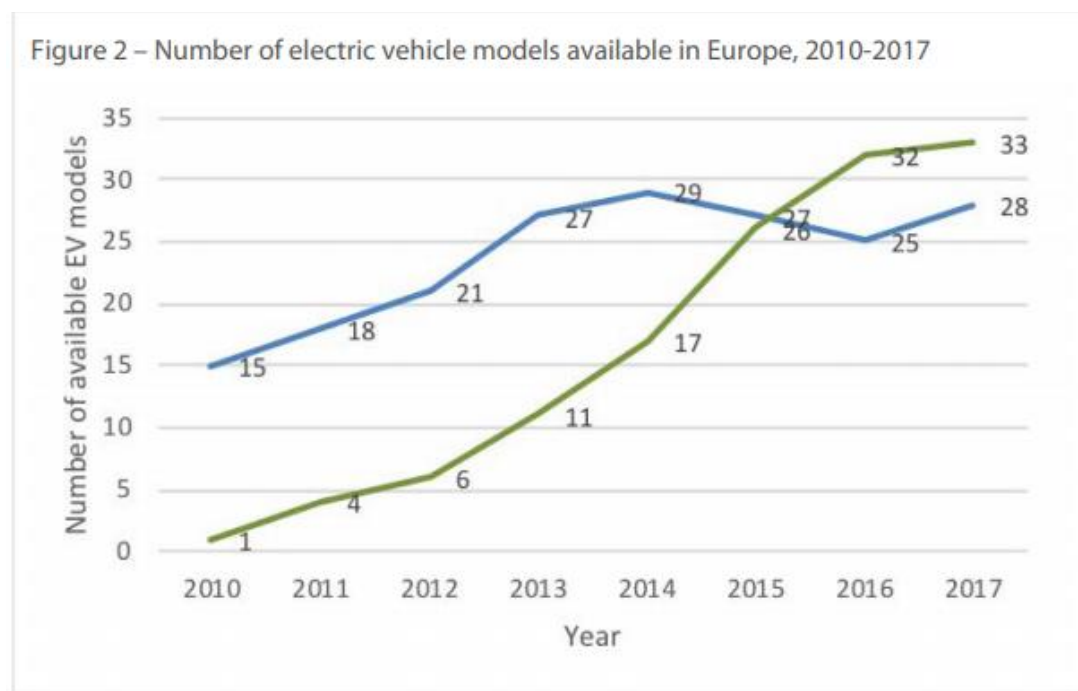
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΕV ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΕΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΟΣ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ

6.1 Χρήση σε Χώρες Εντός της Ε.Ε

Η αγορά της ΕΕ εξακολουθεί να κυριαρχείται από οχήματα βενζίνης και ντίζελ, αλλά το μερίδιο των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται γρήγορα. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση Κατασκευαστών Αυτοκινήτων (ACEA), το μερίδιο αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην ΕΕ ήταν περίπου 2% το τρίτο τρίμηνο του 2018, περίπου 30% υψηλότερο από το 2017. Ενώ τα περισσότερα από αυτά τα αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται σε λίγα κράτη στα βόρεια και δυτικά κράτη μέλη, η μεγαλύτερη αύξηση των πωλήσεών τους τα τελευταία χρόνια έχει καταγραφεί σε νότια και ανατολικά. Στα περισσότερα κράτη μέλη, οι πωλήσεις υβριδικών αυτοκινήτων υπερβαίνουν πλήρως τις πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων αυξάνουν τις επενδύσεις τους για να προσφέρουν όλο και περισσότερα μοντέλα ΕV σε όλα τα μεγέθη των οχημάτων. Ωστόσο, η επιλογή των μοντέλων ΕV εξακολουθεί να είναι περιορισμένη σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα. Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (JRC), υπήρχαν 33 μοντέλα υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (PHEV) και 28 μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας (BEV) διαθέσιμα στην Ευρώπη το 2017 όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 6.1. Επιπλέον, ο χρόνος αναμονής για τη λήψη ενός ΕV είναι συχνά πολύ μεγάλος και οι διαμορφώσεις ή επιλογές οχημάτων, όπως πρόσθετος εξοπλισμός, σχεδιασμός και επιλογές κινητήρα, είναι περιορισμένες. Επιπλέον, η τιμή αγοράς ενός ΕV είναι γενικά ακόμη υψηλότερη από εκείνη ενός συγκρίσιμου συμβατικού οχήματος. Σύμφωνα με το JRC, «κατά μέσο όρο ένα ΕV κοστίζει σήμερα τουλάχιστον 40% περισσότερο από ένα συμβατικό αυτοκίνητο». Ωστόσο, το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας μπορεί να είναι χαμηλότερο για ορισμένα μοντέλα. Μια μελέτη του 2016 από την Ευρωπαϊκή Οργάνωση Καταναλωτών (BEUC) δείχνει ότι ακόμη και αν επρόκειτο να εφαρμοστούν μικρές φορολογικές ελαφρύνσεις, έως το 2024 το μέσο τετραετές κόστος λειτουργίας ενός ΕV θα αναμενόταν με εκείνο ενός βενζινοκίνητου αυτοκινήτου και έως το 2030 ότι ενός ντίζελ. Σύμφωνα με το JRC, το κόστος

συντήρησης EV είναι γενικά χαμηλότερο, λόγω του ότι τα EV έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα [50].



Διάγραμμα 6.1: Αριθμός μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων που διατίθενται στην Ευρώπη

Πηγή: Maria Niestadt with Amalie Bjørnåvold Members Research Service, «Electric road vehicles in the European Union Trends, impacts and policies», European Parliamentary Research Service, 2019

6.2 Χρήση σε Χώρες Εκτός της Ε.Ε

ΑΣΙΑ

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία ηλεκτρικών οχημάτων σε ολόκληρη την περιοχή της Ασίας γνώρισε τεράστιες εξελίξεις. Αυτό τονίζεται από την περιοχή που αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μερίδιο των πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων μπαταριών παγκοσμίως. Επιπλέον, η Ασία παρουσιάζει υψηλότερη ανάπτυξη από τους δυτικούς ανταγωνιστές της με τις πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων. Οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία στην περιοχή έχουν αυξηθεί δραματικά από το 2010. Επιπλέον, εκτιμήθηκε ότι η Κίνα είχε τον μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων σε χρήση και προβλεπόταν να συνεχίσει να παράγει τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα στην περιοχή της Ασίας μέχρι το 2023. Μαζί με την Ιαπωνία και τη Νότια Κορέα, αυτά τα κράτη κατέχουν ηγετική θέση στον τομέα της ηλεκτροκίνησης παγκοσμίως. Ενώ η Νότια Κορέα είναι ισχυρή στην τεχνολογία,

η Ιαπωνία και η Κίνα έχουν ισχυρή θέση όσον αφορά την παραγωγή και το μέγεθος της αγοράς [51].

ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ ΑΜΕΡΙΚΗΣ

Ένα μικρό αλλά σημαντικό μερίδιο των ιδιοκτητών αυτοκινήτων στις Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν στραφεί στην αγορά ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Σε μια πρόσφατη έρευνα του Pew Research Center, το 7% των ενηλίκων των ΗΠΑ δήλωσαν ότι διαθέτουν επί του παρόντος ηλεκτρικό ή υβριδικό όχημα και το 39% δήλωσε ότι ήταν πολύ ή κάπως πιθανό να εξετάσουν σοβαρά την αγορά ηλεκτρικού οχήματος [52].

Εκτός από μερικές μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές, τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) δεν είναι τόσο συνηθισμένα στις ΗΠΑ. Ενώ ο αριθμός τους έχει αυξηθεί ταχύτατα σε απόλυτους όρους τα τελευταία χρόνια, αυτό προέρχεται από μια σχετικά μικρή βάση.

6.3 Σύγκριση των Περιπτώσεων

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 6.3α και β αντίστοιχα, η παγκόσμια αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων σημείωσε σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Το 2017, υπήρχαν περίπου 3,1 εκατομμύρια ηλεκτρικά αυτοκίνητα στον κόσμο, που είναι περισσότερο από 50% περισσότερο από ό, τι το 2016. Περίπου το 40% αυτών των αυτοκινήτων ήταν στην Κίνα. Επιπλέον, περίπου 250.000 ηλεκτρικά ελαφρά επαγγελματικά οχήματα (φορτηγά) και δισεκατομμύρια δίκυκλα και τρίκυκλα κυκλοφόρησαν παγκοσμίως το 2017. Το ίδιο έτος, η Νορβηγία ήταν παγκόσμιος ηγέτης όσον αφορά το μερίδιο αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων (39% των καινούργιων αυτοκινήτων που πωλήθηκαν ήταν ηλεκτρικά) και είχε επίσης το υψηλότερο μερίδιο ηλεκτρικών αυτοκινήτων στον κόσμο στο απόθεμά του: 6,4%. Αυτά τα στοιχεία οφείλονται τουλάχιστον εν μέρει σε φορολογικά και άλλα κίνητρα σε αυτήν τη χώρα.



Διάγραμμα 6.3α: Αριθμός ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε κυκλοφορία, 2013-2017 (σε εκατομμύρια)



Διάγραμμα 6.3β: Ποσοστό αγοράς καινούργιων ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε επιλεγμένες χώρες ανά τον κόσμο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

Η παγκόσμια ετήσια κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται εδώ και δεκαετίες, φτάνοντας σε υψηλό ρεκόρ. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας προέρχεται από ορυκτά καύσιμα με το 81% να παρέχεται από πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα. Η υπερβολική κατανάλωση αυτών των πόρων πρωτογενούς ενέργειας έχει προκαλέσει σοβαρή συρρίκνωση των πόρων εκτός από την ατμοσφαιρική ρύπανση και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Ως εκ τούτου, η εξοικονόμηση ενέργειας γενικά αποτελεί ζωτικό μέλημα για την ανθρωπότητα σήμερα.

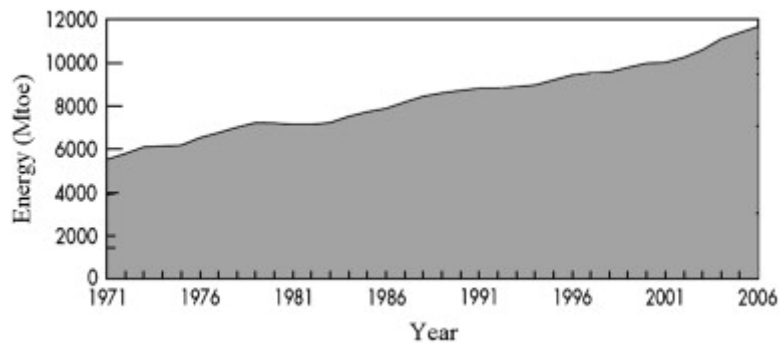
Μεγάλο μέρος των πηγών πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από την οποία περισσότερο από το 50% χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρικών κινητήρων. Ως εκ τούτου, οι ηλεκτροκινητήρες είναι υπεύθυνοι για ένα τεράστιο μερίδιο εκπομπών που είναι 97 εκατομμύρια τόνοι CO₂ για τριφασικούς κινητήρες επαγωγής μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο. Αυτό είναι το 17% των συνολικών ετήσιων εκπομπών CO₂ της χώρας [55]. Επομένως, η βελτιστοποίηση της απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα είναι ζωτικής σημασίας για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών. Ορισμένοι κανονισμοί έχουν ορίσει ελάχιστες αποδόσεις για ηλεκτρικούς κινητήρες στις Ηνωμένες Πολιτείες, τον Καναδά, την Ευρωπαϊκή Ένωση και άλλες χώρες. Επίσης, ενώσεις όπως η NEMA και το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) έχουν προχωρήσει στον σχεδιασμό νέων προτύπων για ηλεκτρικούς κινητήρες που απαιτούν υψηλότερες αποδόσεις. Από την άλλη πλευρά, γίνονται πρακτικές προσπάθειες για την αύξηση της απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων, όπως τα προγράμματα στις ΗΠΑ και την ΕΕ.

Η βελτίωση της απόδοσης των επαγωγικών κινητήρων, μεταξύ όλων των τύπων ηλεκτροκινητήρων, είναι η πιο αποτελεσματική πρακτική, καθώς αυτός ο τύπος κινητήρων καταναλώνει ένα τεράστιο μέρος της συνολικής ενέργειας που πηγαίνει στους ηλεκτρικούς κινητήρες, το οποίο είναι 96% στις ΗΠΑ. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται μέσω της βελτιστοποίησης σχεδιασμού των επαγωγικών κινητήρων με αποτελέσματα όχι και τόσο επιτυχή. Μια εναλλακτική λύση είναι η αντικατάσταση των επαγωγικών κινητήρων με κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PM) υψηλής απόδοσης που κερδίζουν έδαφος λόγω της σημαντικής μείωσης των τιμών των μόνιμων μαγνητών τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, οι κινητήρες PM χρειάζονται

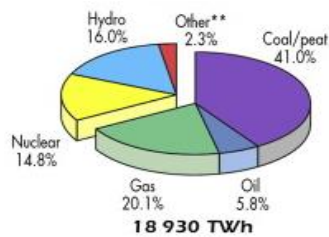
μετατροπείς για εκκίνηση, κάτι που δεν είναι οικονομικό για πολλές εφαρμογές μιας ταχύτητας, όπως ανεμιστήρες, αντλίες και συμπιεστές που αποτελούν περισσότερο από το 70% των εφαρμογών ηλεκτροκινητήρων. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, οι κινητήρες PM είναι εξοπλισμένοι με κλωβό, οι λεγόμενοι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη εκκίνησης γραμμής (LS-PMS) έχουν αναπτυχθεί από το 1955 [59]. Ωστόσο, η έλλειψη μόνιμων μαγνητών υψηλής ενέργειας στο παρελθόν και οι υψηλές τιμές τους αργότερα, εμπόδισαν την ευρεία χρήση των κινητήρων LS-PMS. Τα τελευταία χρόνια, η εισαγωγή υλικών μόνιμου μαγνήτη υψηλής ενέργειας με «λογικές» τιμές έχει ανοίξει το δρόμο για τους κινητήρες LS-PMS.

7.1 Ενεργειακές Κρίσεις

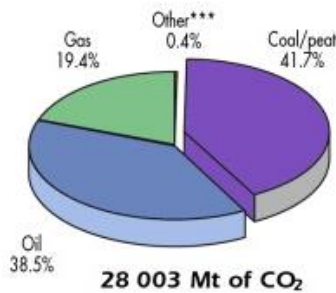
Η παγκόσμια ενεργειακή ανάπτυξη από το 1972 έως το 2006 απεικονίζεται στον διάγραμμα 7.1α. Αυτός ο αριθμός δείχνει μια σταθερά αυξητική τάση. Μεγάλη ποσότητα αυτής της ενέργειας έχει μετατραπεί σε ηλεκτρική. Η παγκόσμια καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μόνο το 2006 ήταν 18.930 (TWh). Υποθέτοντας μια απόδοση 33,5% για την καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υπολογίζεται ότι περίπου το 40% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Το μερίδιο των ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 66,9% όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.1β. Καθώς το κύριο μέρος των αερίων του θερμοκηπίου παράγεται από ορυκτά καύσιμα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.1γ, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει αναμφισβήτητο ρόλο στην παγκόσμια ατμοσφαιρική ρύπανση και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Από την άλλη πλευρά, η τιμή των ορυκτών καυσίμων παρουσιάζει διακυμάνσεις, επιβαρύνοντας βαριά την ηλεκτροπαραγωγή. Ως εκ τούτου, η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζεται ως το πιο κρίσιμο φάρμακο για τη βιώσιμη ανάπτυξη παγκοσμίως. Δεδομένου ότι περισσότερο από το 50% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται από ηλεκτρικούς κινητήρες. Η αύξηση της απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων αξίζει τη μέγιστη προσοχή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κυρίως εστιάζοντας σε κινητήρες υψηλής απόδοσης. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη εκκίνησης γραμμής, λόγω των πολλών χαρακτηριστικών τους, πρέπει να επανεξεταστούν σοβαρά από αυτή την άποψη.



Διάγραμμα 7.1α: Παγκόσμια ενεργειακή ανάπτυξη στον κόσμο. Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης



Διάγραμμα 7.1β: Το μερίδιο των διαφορετικών καυσίμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως

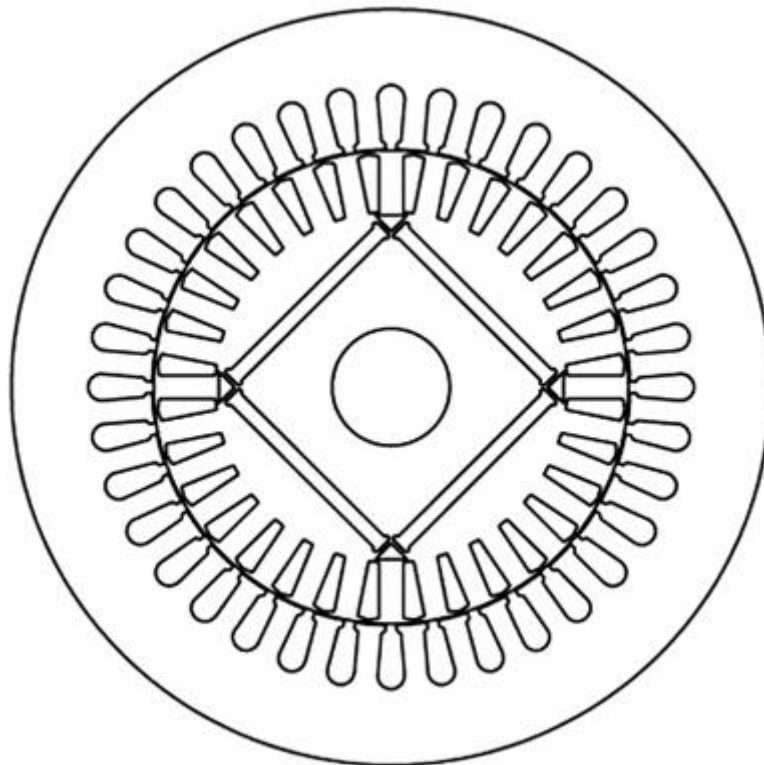


Διάγραμμα 7.1γ: Το μερίδιο των διαφορετικών καυσίμων στις εκπομπές CO₂ στον κόσμο

7.2 Κινητήρες LS-PMS

Ένας κινητήρας LS-PMS αποτελείται από έναν μονοφασικό ή πολυφασικό στάτη ως έναν από τους επαγωγικούς κινητήρες και έναν ρότορα που περιλαμβάνει ένα

ηλεκτρικό αγώγιμο κλωβό και ζεύγη πόλων μόνιμου μαγνήτη. Μέχρι στιγμής έχουν παρουσιαστεί διαφορετικοί συνδυασμοί του σχήματος πόλων και θέσεων πόλων για τον ρότορα. Το σχήμα 7.2α δείχνει την δομή ενός τριφασικού κινητήρα LS-PMS. Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά των κινητήρων LS-PMS είναι το μεγάλο βάθος των αυλακώσεων του ρότορα που έχει ως αποτέλεσμα να ξεπεράσει την ονομαστική ροπή λόγω των μόνιμων μαγνητών κατά την εκκίνηση. Η διάμετρος του άξονα πρέπει να είναι μικρότερη στους επαγωγικούς κινητήρες, ώστε να υπάρχει αρκετός χώρος για τον εντοπισμό πόλων PM μέσα στον ρότορα [60].



Σχήμα 7.2α: Διατομή τριφασικού κινητήρα LS-PMS

Επίσης, όταν η ταχύτητα του κινητήρα φτάσει κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, ξεκινά μια διαδικασία συγχρονισμού και η λειτουργία του κινητήρα μεταφέρεται στη συγχρονισμένη κατάσταση όταν δεν ρέουν δινορεύματα στον κλωβό εκτός βέβαια από τα ρεύματα αρμονικού πεδίου. Στη συγχρονισμένη κατάσταση δύο συνιστώσες ροπής, δηλαδή ένα στοιχείο ροπής και μια σύγχρονη ροπή προκαλούν την κίνηση του ρότορα.

$$V_{sq} = r_s i_{sq} + \omega_r \lambda_{sd} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} \quad (1)$$

$$V_{sd} = r_s i_{sd} - \omega_r \lambda_{sq} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} \quad (2)$$

$$V'_{rq} = r'_r i'_{rq} + \frac{d\lambda'_{rq}}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$V'_{rd} = r'_{rd} i'_{rd} + \frac{d\lambda'_{rd}}{dt} = 0 \quad (4)$$

Παραπάνω, τα V_{sq} , V_{sd} , V_{rq}' και V_{rd}' είναι τάσεις στάτη και ρότορα, τα λ_{sq} , λ_{sd} , λ_{rq}' και λ_{rd}' αντιπροσωπεύουν τις ροές σύνδεσης του στάτη και του ρότορα και τα i_{sq} , i_{sd} , i_{sq}' και i_{sd}' αντιπροσωπεύουν ρεύματα στάτη και ρότορα αντίστοιχα. Τα ω_r , r_s , r_{rd}' και r_{rq}' υποδηλώνουν την ταχύτητα του ρότορα, την αντίσταση του στάτη και τις αντιστάσεις του ρότορα που αναφέρονται στον στάτη αντίστοιχα. Επίσης, οι ροές σύνδεσης στάτη και ρότορα προσδιορίζονται ως εξής:

$$\lambda_{sq} = L_{sq} i_{sq} + L_{mq} i'_{rq} \quad (5)$$

$$\lambda_{sd} = L_{sd} i_{sd} + L_{mq} i'_{rd} + \lambda'_m \quad (6)$$

$$\lambda'_{rq} = L'_{rq} i'_{rq} + L_{mq} i_{sq} \quad (7)$$

$$\lambda'_{rd} = L'_{rd} i'_{rd} + L_{md} i_{sd} + \lambda'_m \quad (8)$$

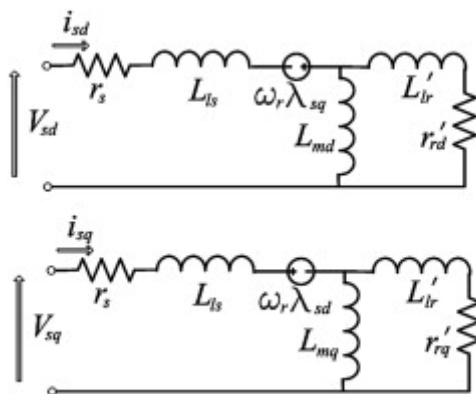
όπου τα L_{sq} , L_{sd} , L_{rq}' , L_{rd}' είναι αυτοεπαγωγές του στάτη και του ρότορα αντίστοιχα και τα L_{mq} και L_{md} είναι αμοιβαίες επαγωγές. Η μόνιμη μαγνητική ροή αντιπροσωπεύεται από λ'_m . Στη συνέχεια, η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από το:

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} + \frac{3P}{2} (L_{md} i'_{rd} i_{sq} - L_{mq} i'_{rq} i_{sd}) + \frac{3P}{2} \lambda'_m i_{sq} \quad (9)$$

στην οποία ο πρώτος όρος είναι η ροπή απροθυμίας, ο δεύτερος όρος είναι η ροπή κλωβού και ο τρίτος όρος είναι η σύγχρονη ροπή με μαγνήτη. Τέλος, η δυναμική του κινητήρα:

$$T_{em} - T_l - B\omega_r = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (10)$$

Όπου τα J , B και T_1 είναι η ροπή αδράνειας, ο συντελεστής εξόδου και η ροπή φορτίου αντίστοιχα. Μια σχηματική όψη ισοδύναμων κυκλωμάτων d-q για κινητήρες LS-PMS απεικονίζεται στο Σχήμα 7.2β.



Σχήμα 7.2β: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα πλαισίου αναφοράς d-q κινητήρων LS-PMS

7.3 Πλεονεκτήματα του Κινητήρα LS-PMS και Αποδοτικότητα

Τα πρότυπα που τηρούν την απόδοση των ηλεκτροκινητήρων έχουν γίνει αυστηρότερα με την πάροδο του χρόνου. Ο Πίνακας 7.3α δείχνει ένα είδος τέτοιων προτύπων τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Φαίνεται ότι οι απαιτήσεις απόδοσης έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια σε βαθμό που το νέο πρότυπο NEMA σχετικά με τους κινητήρες εξαιρετικής απόδοσης δύσκολα μπορεί να επιτευχθεί με επαγωγικούς κινητήρες. Η εκπλήρωση ενός τέτοιου προτύπου χρειάζεται νέες τεχνολογίες π.χ. κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Η κατανομή των απωλειών στους επαγωγικούς κινητήρες φαίνεται στο Σχήμα 7.3α [63, 64]. Φαίνεται ότι σχεδόν το 20% των απωλειών διαχέεται στον κλωβό του ρότορα. Η απώλεια του κλωβού του ρότορα εξαφανίζεται στους κινητήρες LS-PMS εκτός από το αμελητέα αρμονικό τμήμα. Επιπλέον, οι ηλεκτρικές απώλειες του στάτη στους κινητήρες, που είναι το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής απώλειας κινητήρα, μειώνονται επίσης λόγω σημαντικής μείωσης του ρεύματος μαγνήτισης και επομένως του πλάτους του ρεύματος εισόδου των κινητήρων. Για να έχουμε καλύτερη εικόνα, διαφορετικοί επαγωγικοί κινητήρες συγκρίνονται με κινητήρες LS-PMS με την ίδια ισχύ εξόδου και το ίδιο πλαίσιο στάτη στον Πίνακα 7.3β. Φαίνεται ότι οι κινητήρες LS-PMS απολαμβάνουν πολύ υψηλότερη απόδοση σε όλες τις ονομαστικές ισχύος που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής των κινητήρων. Ο

Πίνακας 7.3.1α, ο Πίνακας 7.3β αντίστοιχα δείχνουν ότι η τεχνολογία LS-PMS υπερβαίνει το επίπεδο NEMA super premium efficiency (IE4) σε δύο ονομασίες ισχύος και είναι πολύ κοντά σε αυτό το πρότυπο σε δύο άλλες αξιολογήσεις. Δείχνει ότι οι κινητήρες LS-PMS είναι βέβαιο ότι θα φτάσουν επίπεδο IE4. Στην πραγματικότητα, η παράλειψη ηλεκτρικών απωλειών του ρότορα που αποτελεί περίπου το 20% των συνολικών απωλειών κινητήρα σε κορυφαίας απόδοσης επαγωγικούς κινητήρες (IE3) επιτρέπει την απόδοση των κινητήρων LS-PMS ακόμη και να υπερβαίνει το επίπεδο IE4 που έχει 15% χαμηλότερη απώλεια σε σύγκριση με το επίπεδο IE3.

Motor size (hp)	EPACT (1992)	IEEE 841 (2000)	NEMA premium (2003)	NEMA super premium ^a (2008)
1	82.5	84	85.5	87.6
2	84	85.5	86.5	88.5
3	87.5	88.5	89.5	91
5	87.5	88.5	89.5	91
7.5	89.5	90.2	91.7	92.9
10	89.5	90.2	91.7	92.9
25	92.4	93	93.6	94.5
50	93	93.6	94.5	95.3
75	94	94.5	95.4	96.1
100	94.5	95	95.4	96.1
200	95	95.4	96.2	96.7

Πίνακας 7.3α: Διαφορετικά πρότυπα απόδοσης.

Motor rated power	Induction motor		LS-PM motor	
	Efficiency	Power factor	Efficiency	Power factor
0.8 hp	0.733	0.688	0.862	0.986
2 hp	0.809	0.77	0.892	0.895
5 hp	0.868	0.854	0.904	0.879
25 hp	0.936	0.88	0.957	0.92

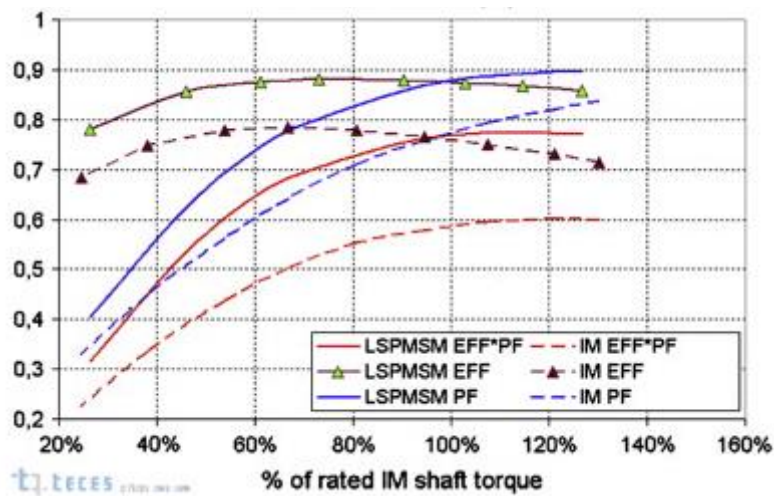
Πίνακας 7.3β: Σύγκριση κινητήρων LS-PM και κινητήρων επαγωγής.

Συντελεστής Ισχύος

Οι επαγωγικοί κινητήρες, λόγω της επαγωγικής τους συμπεριφοράς, έχουν γενικά χαμηλό συντελεστή ισχύος, με αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας των συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνοντας τη ροή ρεύματος και τις πτώσεις τάσης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των απωλειών των γραμμών μεταφοράς και σε υπερθέρμανση και πρόωρη αστοχία κινητήρων και άλλων επαγωγικών εξοπλισμών. Ένας χαμηλός συντελεστής ισχύος προκαλεί επίσης επιπλέον απώλειες στις περιελίξεις του στάτη των επαγωγικών κινητήρων. Επιπλέον, πολλές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας χρεώνουν τους πελάτες με ένα πρόσθετο τέλος εάν ο συντελεστής ισχύος τους είναι μικρότερος από το ελάχιστο, ας πούμε 0,95 [64].

Οι κινητήρες LS-PMS μπορούν να λειτουργήσουν με σημαντικά υψηλότερο συντελεστή ισχύος από τους επαγωγικούς κινητήρες. Λειτουργούν ακόμη και με ακριβή ή κοντά στη μονάδα συντελεστή ισχύος σε πολλές εφαρμογές και συνθήκες εργασίας. Η εικόνα 7.3γ συγκρίνει ορισμένους κινητήρες LS-PMS με επαγωγικούς κινητήρες της ίδιας ονομαστικής ισχύος και μεγέθους πλαισίου ως προς τους συντελεστές ισχύος τους. Οι διακυμάνσεις της απόδοσης, του συντελεστή ισχύος και του γινόμενου αυτών των δύο χαρακτηριστικών ενός τριφασικού κινητήρα LS-PMS συγκρίνονται με εκείνες ενός επαγωγικού κινητήρα της ίδιας ονομαστικής

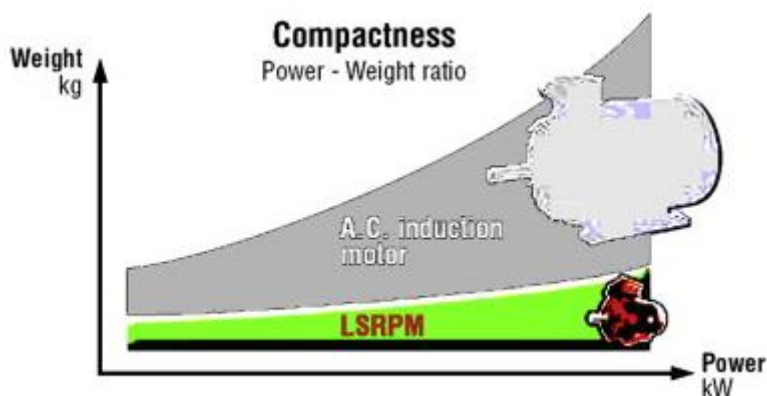
ισχύος. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει την απόλυτη υπεροχή του κινητήρα LS-PMS έναντι του κινητήρα επαγωγής.



Εικόνα 7.3γ: Απόδοση και συντελεστής ισχύος έναντι ροπής άξονα για κινητήρα LS-PMS και κινητήρα επαγωγής

Ροπή και Πυκνότητα Ισχύος

Είναι γνωστό ότι οι κινητήρες PM γενικά είναι ανώτεροι από άλλους κινητήρες όσον αφορά την παραγωγή ροπής και τις δυνατότητες ισχύος λόγω της χρήσης μόνιμων μαγνητών. Μια σύγκριση έναντι ισχύος κινητήρων PM και επαγωγικών κινητήρων συγκεκριμένου κατασκευαστή παρουσιάζεται στην εικόνα 7.3δ δείχνει την υπεροχή των κινητήρων PM. Οι κινητήρες LS-PMS ως ένα είδος κινητήρων PM απολαμβάνουν επίσης αυτό το πλεονέκτημα. Επομένως, οι κινητήρες LS-PMS είναι πιο συμπαγείς και πιο κατάλληλοι για ολοκληρωμένα συστήματα [66].



Εικόνα 7.3δ: Σύγκριση βάρους κινητήρων επαγωγής και κινητήρων PM σχετικά με την ισχύ τους

Θερμοκρασία Ρότορα

Η θερμοκρασία του ρότορα, επηρεάζεται από τις απώλειές του καθώς και από την ταχύτητα του κινητήρα. Στους επαγωγικούς κινητήρες, οι απώλειες του ρότορα περιλαμβάνουν δύο στοιχεία, δηλαδή απώλεια σιδήρου και απώλεια κλωβού. Στους κινητήρες LS-PMS, χάρη στη σύγχρονη ταχύτητα, η απώλεια του κλωβού εξαφανίζεται σε αμελητέα απώλεια δινορευμάτων που προκαλείται από τις αρμονικές του χώρου του διακένου αέρα. Επομένως, η θερμοκρασία του ρότορα αυτών των κινητήρων είναι περίπου 30% μικρότερη από αυτή των επαγωγικών κινητήρων με την ίδια ισχύ εξόδου. Αυτό το πλεονέκτημα μπορεί να προστατεύει τους μόνιμους μαγνήτες από τον απομαγνητισμό της θερμοκρασίας. Ωστόσο, δεδομένου ότι η κατάσταση εκκίνησης των κινητήρων LS-PMS μπορεί να είναι πιο αργή από αυτή των επαγωγικών κινητήρων, η υπερθέρμανση του ρότορα θα πρέπει να ελέγχεται κατά τον σχεδιασμό των κινητήρων LS-PMS [67].

7.4 Κόστος Κινητήρα LS-PMS

Το συνολικό κόστος ενός κινητήρα, αποτελείται από ένα κόστος υλικού και ένα κόστος κατασκευής. Σε αυτή την ενότητα, εξετάζεται το κόστος υλικού και στη συνέχεια θα συζητηθεί το κόστος κατασκευής. Η χρήση μόνιμων μαγνητών στους κινητήρες LS-PM είναι η κύρια αιτία των υψηλότερων τιμών τους σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες. Ωστόσο, την τελευταία δεκαετία η τιμή του μαγνήτη μειώθηκε σημαντικά λόγω της υψηλής παραγωγής μαγνήτη, ιδιαίτερα στην Κίνα. Για παράδειγμα, η μέση τιμή του NdFeB έχει μειωθεί κατά 40% από το 1998 έως το 2003.

Αποδεικνύεται ότι, τα υλικά των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη κοστίζουν περίπου 4,5 €/kW περισσότερο από αυτά των επαγωγικών κινητήρων για ονομαστική ισχύ περίπου 5,5 kW. Σε άλλη περίπτωση, αναφέρθηκε ότι η τιμή των υλικών που χρησιμοποιούνται σε έναν κινητήρα LS-PMS 1 hp είναι περίπου 20% υψηλότερη από αυτή ενός συγκρίσιμου κινητήρα επαγωγής.

Αν και το αρχικό κόστος των κινητήρων LS-PMS, είναι υψηλότερο από αυτό των επαγωγικών κινητήρων, οι κινητήρες LS-PMS μπορεί να είναι πιο οικονομικοί μακροπρόθεσμα λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας [70]. Για να αξιολογηθούν οι οικονομικές πτυχές οποιουδήποτε κινητήρα, πρέπει να υπολογιστεί το κόστος της

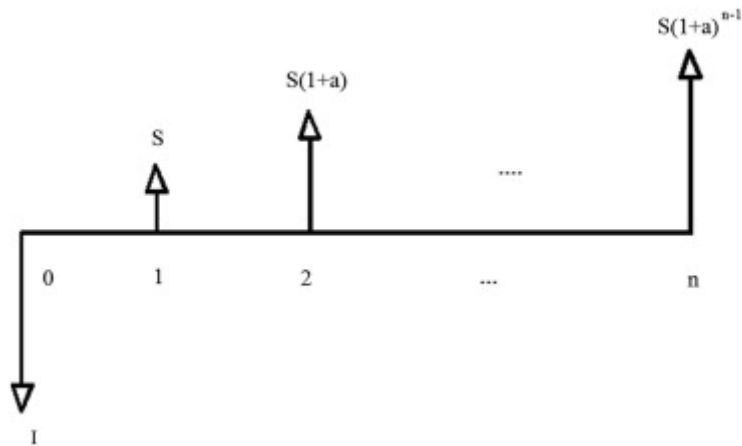
ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια ζωής του κινητήρα. Ένας επαγωγικός κινητήρας καταναλώνει περίπου 100 φορές την τιμή αγοράς του σε ηλεκτρική ενέργεια. Σημαίνει ότι για κάθε σημείο ανύψωσης της απόδοσης μπορεί να αγοραστεί ένας νέος κινητήρας μετά την απόρριψη του κινητήρα. Επομένως, το επιπλέον κόστος ενός ενεργειακά αποδοτικού κινητήρα συχνά αποπληρώνεται γρήγορα με την εξοικονόμηση ενέργειας. Για να έχουμε πιο λεπτομερή ανάλυση αυτού του γεγονότος, ας υπολογίσουμε την εξοικονόμηση κόστους ενέργειας από ενεργειακά αποδοτικούς κινητήρες. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας ενός κινητήρα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$S = P_{out} \times L \times h_r \times C \times \left[\frac{1}{E_{std}} - \frac{1}{E_{ee}} \right] \quad (11)$$

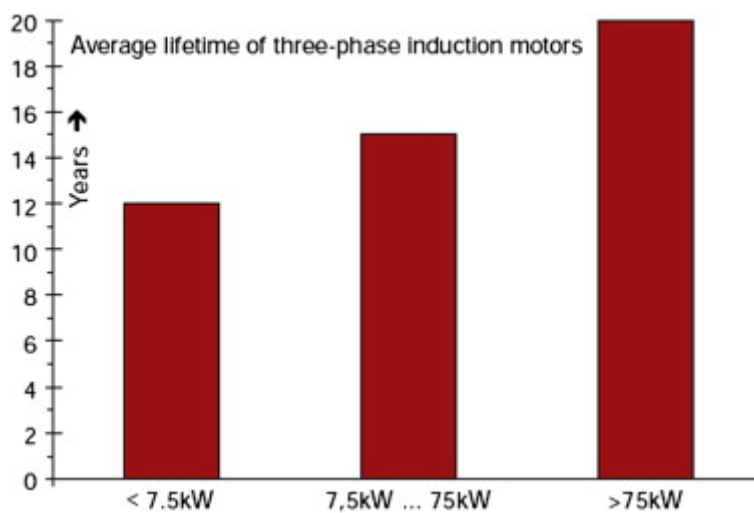
όπου S είναι η ετήσια εξοικονόμηση, P_{out} είναι η ονομαστική ισχύς του κινητήρα, L είναι συντελεστής φορτίου, h_r είναι οι ετήσιες ώρες λειτουργίας, C είναι ένα μέσο ενεργειακό κόστος και E_{std} και E_{ee} είναι οι τυπικές αποδόσεις κινητήρα και ενεργειακά αποδοτικού κινητήρα αντίστοιχα. Για να ληφθεί υπόψη ένα επιτόκιο και ένα ποσοστό πληθωρισμού ενέργειας στην ανάλυση, λαμβάνεται υπόψη το διάγραμμα ταμειακών ροών που φαίνεται στην εικόνα 7.4α. Η παρούσα αξία της εξοικονόμησης σε n έτη σχετικά με το διάγραμμα ταμειακών ροών δίνεται από το:

$$P = S \left[\frac{1 - (1+j)^n (1+i)^{-n}}{i-j} \right] \quad (12)$$

όπου i και j είναι το επιτόκιο και το ποσοστό πληθωρισμού του κόστους ενέργειας αντίστοιχα. Ο συμβολισμός n αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ετών της περιόδου ενδιαφέροντος που ισούται με μια διάρκεια ζωής του κινητήρα.



Εικόνα 7.4α: Διάγραμμα ταμειακών ροών για αξιολόγηση εξοικονόμησης ενέργειας του κινητήρα LS-PMS.



Εικόνα 7.4β: Μέση διάρκεια ζωής των επαγωγικών κινητήρων

Εάν η τρέχουσα αξία εξοικονόμησης (P) είναι μεγαλύτερη από το επιπλέον κόστος του κινητήρα LS-PMS σε σχέση με έναν επαγωγικό κινητήρα (I), η αντικατάσταση του κινητήρα επαγωγής με τον κινητήρα LS-PMS είναι οικονομική. Για να λάβουμε την περίοδο απόσβεσης όσον αφορά το επιτόκιο και τον πληθωρισμό, θα πρέπει να βρούμε n στο οποίο το P είναι ίσο με I .

Επομένως, η περίοδος απόσβεσης δίνεται από:

$$n = \frac{\ln\left[1 - \frac{I(i-j)}{S}\right]}{\ln\left[\frac{(1+j)}{(1+i)}\right]} \quad (13)$$

Όπως φαίνεται στην εικόνα 7.4β, μια βελτίωση κατά 1% στην απόδοση του κινητήρα οδηγεί σε σημαντική ετήσια εξοικονόμηση. Σε τυπικές βιομηχανικές εφαρμογές, οι ενεργειακά αποδοτικοί κινητήρες είναι οικονομικά αποδοτικοί όταν λειτουργούν περισσότερες από 4000 ώρες το χρόνο, με βάση ένα απλό κριτήριο απόσβεσης 1 έτους. Για παράδειγμα, με χαμηλό ενεργειακό κόστος 0,04 \$/kWh, ένα μόνο σημείο κέρδους απόδοσης για έναν κινητήρα 50 hp συνεχούς λειτουργίας με συντελεστή φορτίου 75% εξοικονομεί 4079 kWh ή 163 \$ ετησίως. Έτσι, ένας ενεργειακά αποδοτικός κινητήρας αυτής της βαθμολογίας που προσφέρει τέσσερις βαθμούς κέρδους απόδοσης, μπορεί να κοστίζει έως και 1304 \$ περισσότερο από ένα τυπικό μοντέλο και εξακολουθεί να πληροί ένα απλό κριτήριο απόσβεσης 2 ετών, παραβλέποντας το επιτόκιο και το ποσοστό πληθωρισμού [53].

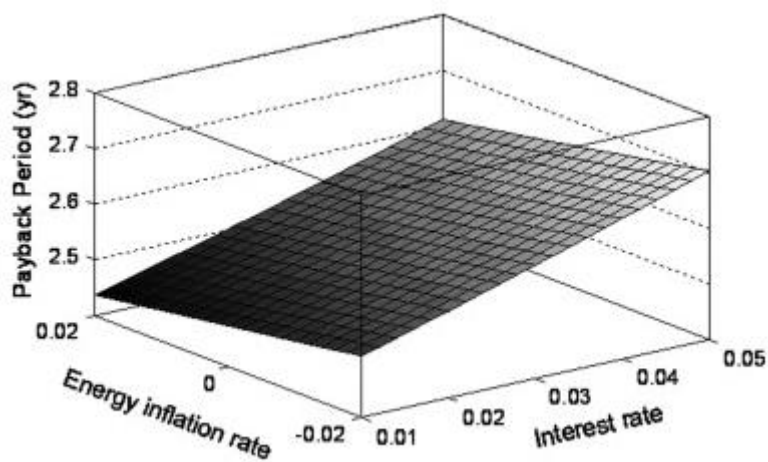
Motor size	Annual saving 0.04 \$/kwh, 8000 h/year	Annual saving 0.04 \$/kwh, 4000 h/year	Annual saving 0.10 \$/kwh, 8000 h/year	Annual saving 0.10 \$/kwh, 4000 h/year
5 hp	\$17	\$8.5	\$42.5	\$21.5
10 hp	\$32	\$16	\$80	\$40
20 hp	\$61	\$30.5	\$152.5	\$76.25
50 hp	\$142	\$71	\$177.5	\$88.75
100 hp	\$278	\$139	\$695	\$347.5
200 hp	\$537	\$268.5	\$1342.5	\$671.25

Εικόνα 7.4γ: Ετήσια εξοικονόμηση κόστους ενός κέρδους απόδοσης μιας μονάδας για διαφορετικές τιμές ενέργειας και χρόνους δασμών.

Για να αποκτήσουμε μια καλύτερη εικόνα, ας ρίξουμε μια ματιά στη διάρκεια ζωής του κινητήρα. Η μέση διάρκεια ζωής των τριφασικών κινητήρων επαγωγής απεικονίζεται στην εικόνα 7.4γ. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, ένας κινητήρας 5 ίππων μπορεί να εξοικονομήσει περισσότερα από 200 \$ στη ζωή του

για κάθε σημείο αύξησης απόδοσης υπό τις αναφερόμενες συνθήκες. Αυτό αυξάνεται στα 480 \$ για έναν κινητήρα 10 ίππων και στα 5560 \$ για έναν κινητήρα 100 ίππων. Αυτή η εξοικονόμηση κόστους ενέργειας μπορεί να αντισταθμίσει το επιπλέον κόστος των κινητήρων LS-PMS.

Ένας κινητήρας LS-PMS 5,5 kW είναι περίπου 30 \$ πιο ακριβός από έναν επαγωγικό κινητήρα με την ίδια ονομαστική ισχύ, αλλά έχει περίπου 20% χαμηλότερες απώλειες. Ενώ ένας επαγωγικός κινητήρας υψηλής απόδοσης 5,5 kW έχει απόδοση 91,7%, η απόδοση του κινητήρα LS-PMS με την ίδια ονομαστική ισχύ αναμένεται να είναι σχεδόν 93,3% ή 1,6% μεγαλύτερη από την απόδοση του κινητήρα επαγωγής. Ως εκ τούτου, εμφανίζεται η περίοδος απόσβεσης για το επιπλέον κόστος του κινητήρα LS-PMS με διαφορετικούς συνδυασμούς επιτοκίων και ρυθμών φουσκώματος ενέργειας και με ενεργειακό κόστος 0,04 \$/kWh και χρόνο λειτουργίας 4000 ώρες ετησίως με συντελεστή φορτίου 0,75 στην εικόνα 7.4δ. Η περίοδος αυτή, με απλή μέθοδο απόσβεσης, είναι περίπου 2,43 έτη.



Εικόνα 7.4δ: Περίοδος απόσβεσης πρόσθετου κόστους κινητήρα LS-PMS με διαφορετικό επιτόκιο και ρυθμό πληθωρισμού ενέργειας.

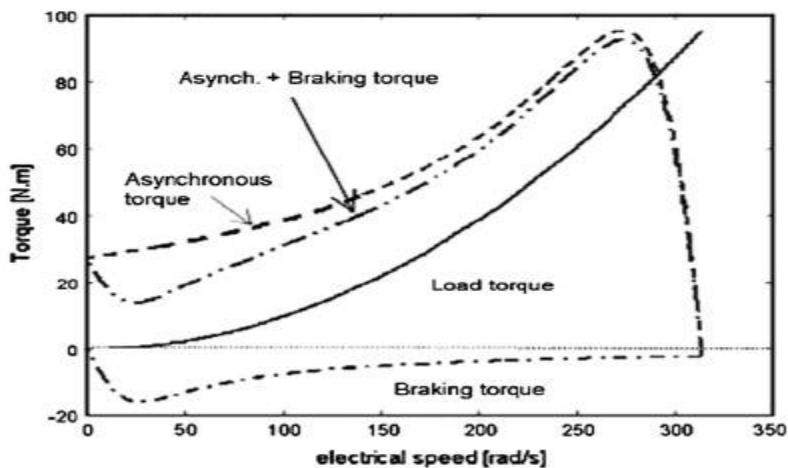
Γενικότερα πρέπει να αναφερθεί ότι όταν ληφθεί υπόψη το συνολικό κόστος επένδυσης και λειτουργίας ενός κινητήρα LS-PMS, φαίνεται σαν ευκαιρία και όχι πρόκληση. Φυσικά, απαιτείται λεπτομερής ανάλυση κόστους για κάθε πραγματική υπόθεση προτού εξαχθεί ένα τελικό συμπέρασμα.

7.4.1 Εκκίνηση και Συγχρονισμός

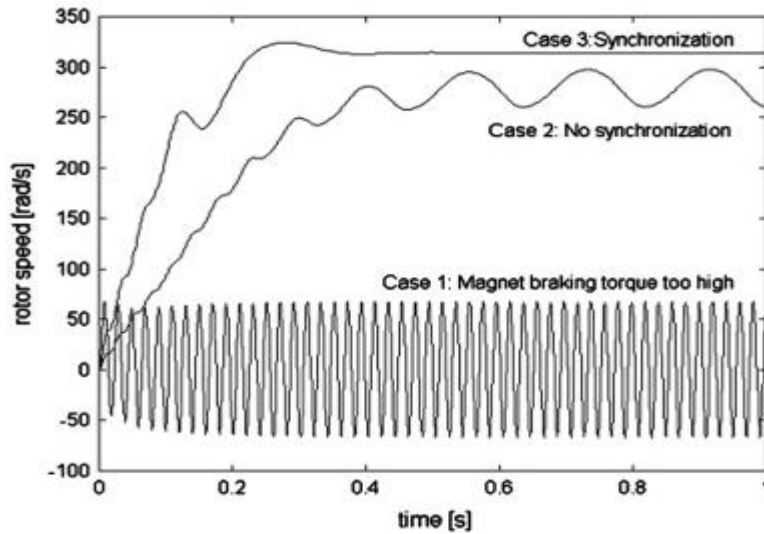
Η εκκίνηση και ο συγχρονισμός των κινητήρων LS-PMS αποτελούν ζητήματα που απασχολούν πολλές έρευνες μέχρι στιγμής. Πιθανώς, ο κύριος αποτρεπτικός παράγοντας στους κινητήρες LS-PMS είναι η ροπή πέδησης που παράγεται από τους μαγνητικούς πόλους. Αυτή η ροπή αναπτύσσεται κατά την περίοδο εκκίνησης μέχρι τη σύγχρονη ταχύτητα και φτάνει στη μέγιστη τιμή της σε χαμηλή ταχύτητα όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.4.1α. Η τιμή της ροπής πέδησης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$T_b = \frac{3Pr_y(1-s)E_0^2}{2\omega_s} \cdot \frac{r_s^2 + X_{sq}^2(1-s)^2}{(r_s^2 + X_{sd}X_{sq}(1-s)^2)^2} \quad (14)$$

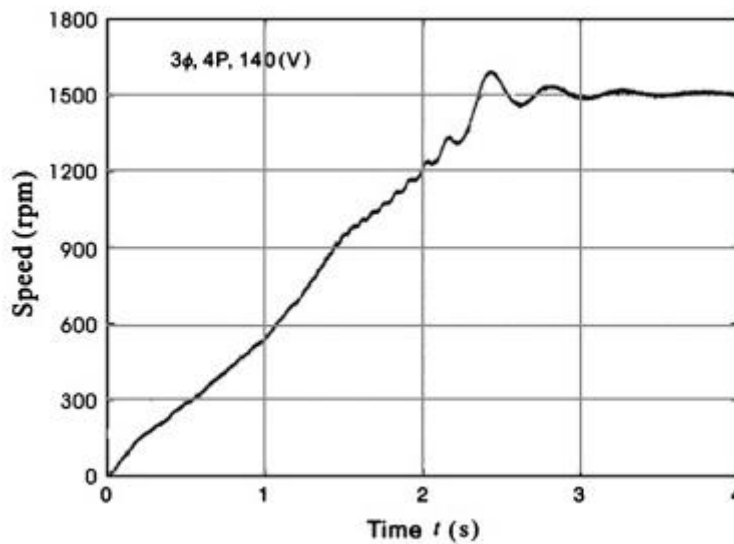
όπου τα E_0 , X_{sd} , X_{sq} , ω_s και s είναι μαγνήτης back-EMF, αντίδραση στάτη άξονα d, αντίδραση στάτη άξονα q, σύγχρονη γωνιακή συχνότητα και ολίσθηση αντίστοιχα. Αυτή η ροπή, αντέχει στη ροπή του κλωβού και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά την εκκίνηση, στο συγχρονισμό του κινητήρα όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.4.1β. Φαίνεται ότι στην περίπτωση 1, η ροπή πέδησης του μαγνήτη επιδεινώνει την κανονική λειτουργία σε χαμηλή ταχύτητα σε σύγκριση με μια μηχανή επαγωγής και οδηγεί σε αργή εκκίνηση και υπέρβαση στην καμπύλη στροφών ακόμη και όταν ο κινητήρας μπορεί κανονικά να ξεκινήσει και να συγχρονιστεί όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.4.1γ. Σε αυτό το σχήμα ο χρόνος ανόδου της ταχύτητας του κινητήρα είναι περίπου 2,5 s που είναι σχετικά μεγάλος.



Διάγραμμα 7.4.1α: Διαφορετικές ροπές που εφαρμόζονται στον ρότορα των κινητήρων LS-PMS



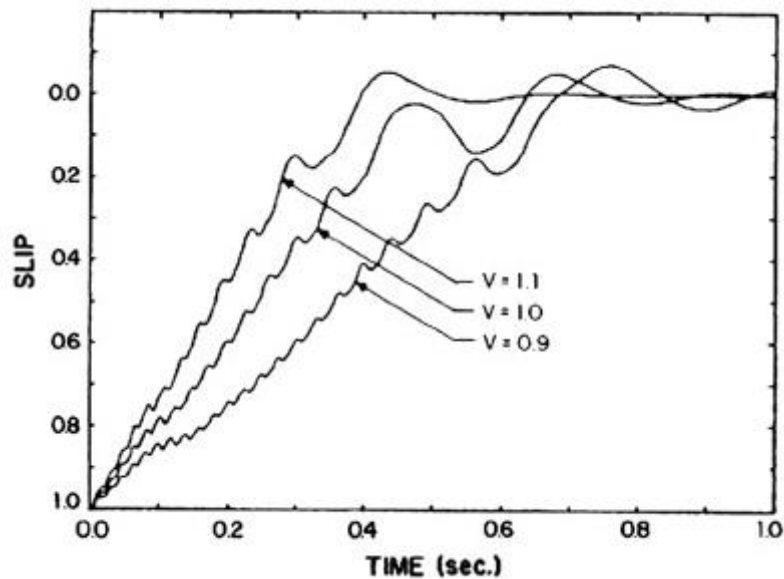
Διάγραμμα 7.4.1β: Αποτυχία εκκίνησης και συγχρονισμού



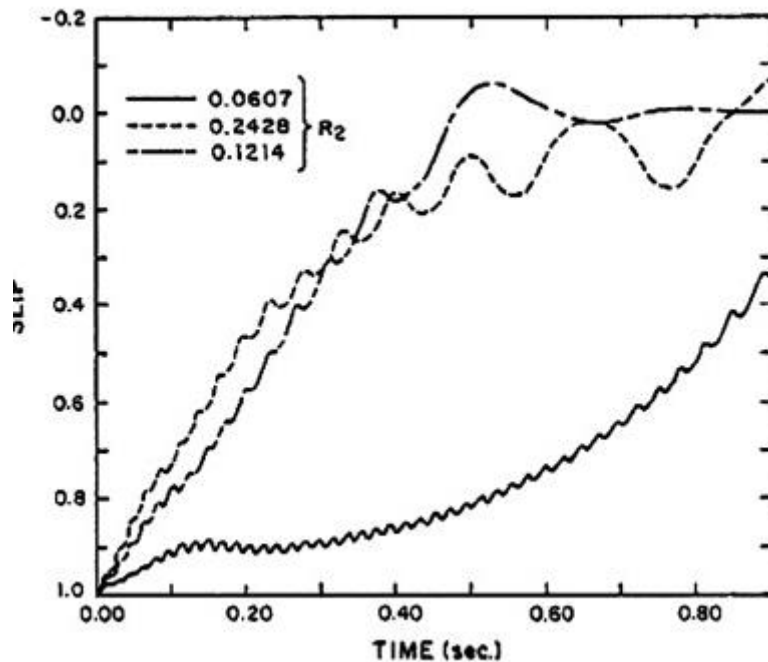
Διάγραμμα 7.4.1γ: Αργή εκκίνηση και υπέρβαση

Η ροπή πέδησης με μαγνήτη δεν είναι η μόνη ανεπάρκεια στην εκκίνηση των κινητήρων LS-PMS. Οι κινητήρες είναι ευαίσθητοι γενικά κατά την διαδικασία εκκίνησης από την τάση εισόδου, την ροπή αδράνειας του άξονα και την αντίσταση των κλωβών. Η επίδραση της τάσης εισόδου στη διαδικασία εκκίνησης φαίνεται στο διάγραμμα 7.4.1δ. Φαίνεται ότι, με μειωμένη τάση εισόδου, ο κινητήρας ξεκινά πιο αργά και μπορεί ακόμη και να αποτύχει στον συγχρονισμό. Ο χρόνος καμπύλης ταχύτητας αυξάνεται με την πτώση της τάσης εισόδου. Η επίδραση της αντίστασης κλωβού στην εκκίνηση ενός κινητήρα LS-PMS φαίνεται στο διάγραμμα 7.4.1ε.

Επίσης, υπάρχει μια βελτίωση στην τιμή για αυτήν την αντίσταση από την οποία ο κινητήρας δεν ξεκινά ομαλά.



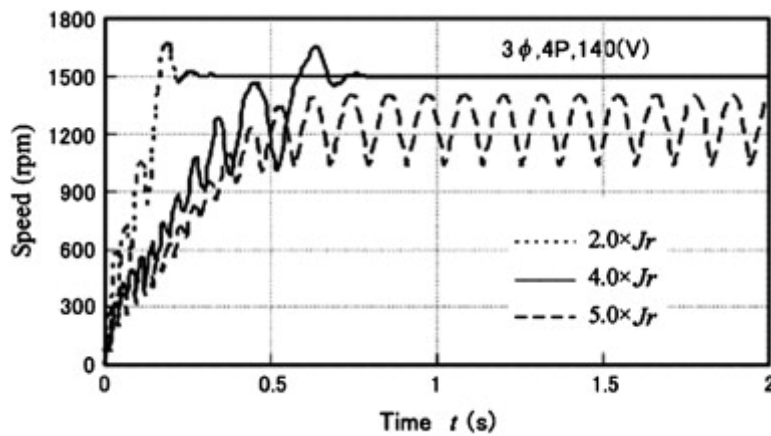
Διάγραμμα 7.4.1δ: Επίδραση της τάσης εισόδου στη διαδικασία εκκίνησης



Διάγραμμα 7.4.1ε: Επίδραση της αντίστασης του ρότορα στη διαδικασία εκκίνησης

Τέλος, η επίδραση της αδράνειας φορτίου στη διαδικασία εκκίνησης απεικονίζεται στο διάγραμμα 7.4.1ζ. Αυξάνοντας την αδράνεια του φορτίου, η εκκίνηση του

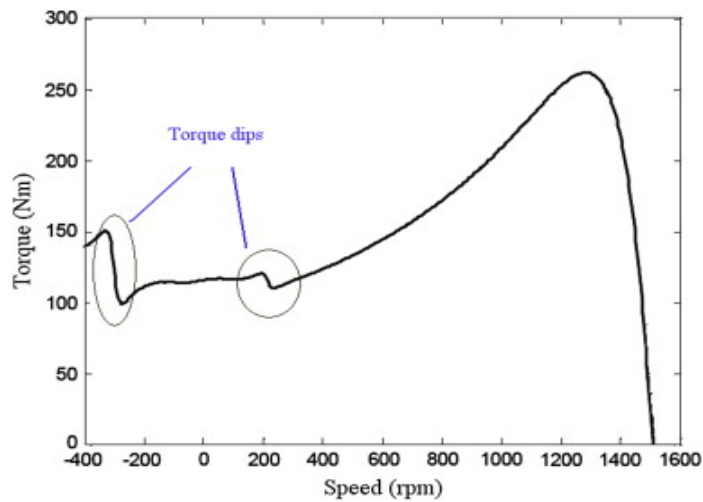
κινητήρα επιδεινώνεται. Αυτό, μπορεί να οδηγήσει σε υψηλούς παλμούς ροπής στη λειτουργία επαγωγής, που δεν φθάνουν καθόλου στη σύγχρονη λειτουργία [53].



Διάγραμμα 7.4.1ζ: Επίδραση της ροπής αδράνειας στη διαδικασία εκκίνησης

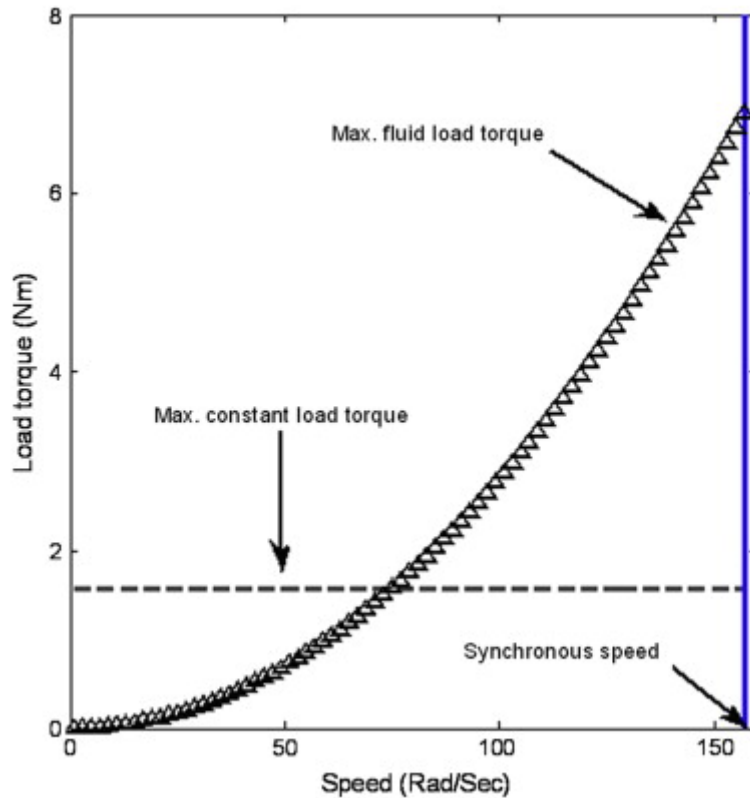
Ένα άλλο πρόβλημα που σχετίζεται με τους κινητήρες LS-PMS καθώς και με τους κινητήρες επαγωγής είναι η βύθιση της ροπής λόγω των αρμονικών όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 7.4.1η. Αυτό το πρόβλημα εμφανίζεται από τη ροπή πέδησης, το οποίο μπορεί να μειώσει σημαντικά την ροπή κατά την εκκίνηση σε χαμηλές ταχύτητες και να προκαλέσει βλάβη στην εκκίνηση του κινητήρα υπό φορτίο. Για τις περισσότερες εφαρμογές, όπως ανεμιστήρες, συμπιεστές και αντλίες που κινούν ένα ρευστό, η ροπή φορτίου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας, π.χ.

$$T_L = k\omega^2 \quad (15)$$



Διάγραμμα 7.4.1η: Επιδράσεις χωρικών αρμονικών στα χαρακτηριστικά ροπής-στροφών επαγωγικών κινητήρων

Επομένως, η ροπή φορτίου είναι σχετικά μικρή στη χαμηλή ταχύτητα, και ο κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει εύκολα. Όμως, υπό σταθερό φορτίο ο κινητήρας δεν μπορεί να ξεκινήσει εύκολα. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.4.1θ, ο κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με μέγιστη ροπή σταθερού φορτίου περίπου 1,55 Nm, ενώ μπορεί να λειτουργήσει με ροπή φορτίου 7 Nm εάν η ροπή ορίζεται από το (15).



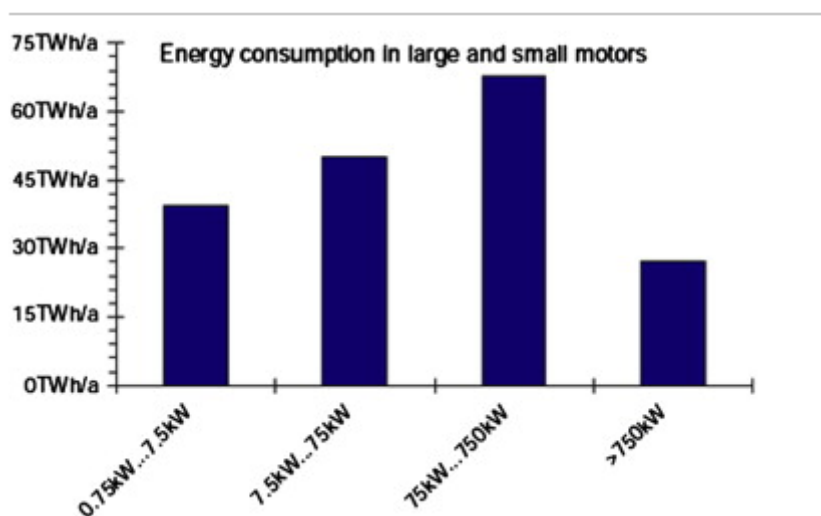
Διάγραμμα 7.4.1θ: Σύγκριση μέγιστης ανεκτής ροπής κινητήρων LS-PMS για ροπές σταθερού και κινούμενου φορτίου ρευστού.

7.4.2 Κατασκευή και Διαστάσεις

Ο στάτης ενός κινητήρα LS-PMS είναι ο ίδιος με τον στάτη των επαγωγικών κινητήρων, ενώ ο ρότορας του είναι πιο περίπλοκος από αυτόν των επαγωγικών κινητήρων, λόγω της ύπαρξης μόνιμων μαγνητών. Αυτό επιβάλλει επιπλέον κατασκευαστικό φόρτο για την τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών (PMs) μέσα στο σώμα του ρότορα.

Ενώ οι επαγωγικοί κινητήρες κατασκευάζονται σε ένα ευρύ φάσμα ονομαστικών τιμών ισχύος από κλασματικά hp έως αρκετά MW, οι κινητήρες LS-PMS κατασκευάζονται συχνά σε περιορισμένο εύρος ονομαστικής ισχύος λόγω των οικονομικών και των κατασκευαστικών δυσκολιών, καθώς και των προβλημάτων απομαγνήτισης. Η κατανάλωση ενέργειας επαγωγικών κινητήρων των διαφορετικών τιμών ισχύος απεικονίζεται στο διάγραμμα 7.4.2. Φαίνεται ότι, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας καταναλώνεται από μεγάλους επαγωγικούς

κινητήρες. Επομένως, είναι απαραίτητη μια κίνηση προς την κατασκευή μεγάλων κινητήρων LS-PMS [72].



Διάγραμμα 7.4.2: Κατανομή των επαγωγικών κινητήρων σύμφωνα με την ισχύ τους ως προς την κατανάλωση ενέργειας

Μια πρώιμη έρευνα για τους κινητήρες PM ανέφερε ότι, οι κινητήρες LS-PM με μαγνήτες έως 25hr είναι πιο οικονομικοί. Σήμερα, με την εμφάνιση νέων μόνιμων μαγνητών υψηλής ενέργειας, έχουν κατασκευαστεί κινητήρες PM με ισχύ 10MW και άνω. Οι νέοι μόνιμοι μαγνήτες, είναι δύσκολο να απομαγνητιστούν. Επομένως, με ουσιαστική μείωση των τιμών των υλικών μόνιμου μαγνήτη των σπανίων γαιών μαγνητών υψηλής ενέργειας, η κατασκευή μεγάλων κινητήρων LS-PMS θεωρείται οικονομική και πρακτική. Τέτοιοι κινητήρες μπορούν πλέον να βρεθούν στην αγορά. Η Hitachi Ltd, χρησιμοποιεί κινητήρες LS-PMS σε αντλίες υψηλής απόδοσης και Toyo Denki Seizo K.K. πουλά αυτούς τους κινητήρες για γενική χρήση [98, 99].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΈΛΕΓΧΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και τα ηλεκτρικά οχήματα αναπτύσσονται συνεχώς. Ένας σχεδιασμός κινητήρα υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος, απαιτεί υψηλή απόδοση, υψηλή αναλογία ισχύος/βάρους και αξιοπιστία από χαμηλή ταχύτητα ρότορα σε υψηλή ταχύτητα ρότορα. Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιείται για την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων. Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να αναπτύξει μια μέθοδο ελέγχου σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη για όλες τις ταχύτητες του ρότορα. Αυτή η μέθοδος, αυξάνει τη ροπή και την απόδοση σε υψηλή ταχύτητα σε σύγκριση με τη συνηθισμένη μέθοδο ανάδρασης σφάλματος ρεύματος. Για την επίτευξη αυτού του στόχου προτείνεται μια μέθοδος που αποτελείται από δύο αντισταθμιστές. Ένας από τους αντισταθμιστές ελέγχει τη ροπή χρησιμοποιώντας τις φάσεις τάσης. Το άλλο, είναι η συνηθισμένη ανατροφοδότηση τρέχοντος σφάλματος. Διάφορες μέθοδοι διόρθωσης για τον αντισταθμιστή φάσης τάσης έχουν προταθεί για τον αντισταθμιστή για πολλές απαιτήσεις ελέγχου. Η εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου επιβεβαιώθηκε με τη χρήση προσομοίωσης και πειραματικών αξιολογήσεων [100].

Πρόσφατα, τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν αναπτυχθεί ενεργά. Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιείται για την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων.

Οι δυνατότητες τέτοιων κινητήρων για ηλεκτρική οδική έλξη έχουν ήδη διερευνηθεί στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Επιπλέον, η μεγιστοποίηση της ροπής που παράγεται από τον σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη παρουσία περιορισμών τάσης και ρεύματος είναι μια σημαντική πρακτική σκέψη προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω απαιτήσεις [105, 106].

8.1 Στρατηγικές Ελέγχου του PMSM

Μέχρι τώρα, υπάρχουν δύο ώριμες μέθοδοι ελέγχου που έχουν εφαρμοστεί στο σύστημα ελέγχου ταχύτητας PMSM: Ο διανυσματικός έλεγχος και ο άμεσος έλεγχος

ροπής. Έχουν τις δικές τους αρχές και αντίστοιχα χαρακτηριστικά και είναι κατάλληλα για διαφορετικές εφαρμογές [107].

8.1.1 Διανυσματικός Έλεγχος

Δεδομένου ότι ο κινητήρας AC είναι ένα σύστημα πολλαπλών μεταβλητών, ισχυρής σύζευξης και μη γραμμικό σύστημα, ήταν δύσκολο να αποκτηθεί μια καλή συμπεριφορά ρύθμισης της ταχύτητας στο παρελθόν. Το 1971, με στόχο την ασύγχρονη μηχανή F.Blaschke από τη Siemens, η γερμανική εταιρεία, πρότεινε το διανυσματικό έλεγχο, που έκανε τον έλεγχο κινητήρα AC να περάσει από τον εξωτερικό μακροσκοπικό σταθερό έλεγχο στον εσωτερικό ηλεκτρομαγνητικό μεταβατικό έλεγχο. Ήταν ένα ποιοτικό άλμα στη θεωρία ελέγχου του κινητήρα AC [108]. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μετασχηματισμού συντεταγμένων, ο διανυσματικός έλεγχος αποσυνδέει ουσιαστικά τη ροπή και τη ροή. Κάνει τον έλεγχο του κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος να μοιάζει με κινητήρα συνεχούς ρεύματος και συνεπώς να βελτιώνει σημαντικά την απόδοση ελέγχου. Ο διανυσματικός έλεγχος έχει γίνει βασική μέθοδος των κινητήρων AC. Ένας διανυσματικός έλεγχος στο PMSM μπορεί να επιτύχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής ακρίβειας, της υψηλής δυναμικής απόδοσης, του μεγάλου εύρους ταχύτητας και του ακριβούς προσανατολισμού. Η βασική ιδέα του διανυσματικού ελέγχου είναι: κατά μήκος της κατεύθυνσης της ροής του ρότορα, η μέθοδος ελέγχου διανυσμάτων αποσυνθέτει το διάνυσμα ρεύματος σε αναγνωριστικό ρεύματος πεδίου και ρεύμα ροπής i_d και παίρνει τον έλεγχο αυτών των δύο ρευμάτων χωριστά. Ουσιαστικά μπορεί να συνοψιστεί στους ελέγχους του πλάτους και της φάσης του ρεύματος του στάτη. Μέχρι στιγμής, οι κύριες τρέχουσες στρατηγικές ελέγχου για το PMSM είναι οι εξής:

- Ο προσανατολισμένος έλεγχος πεδίου, ο οποίος ονομάζεται επίσης έλεγχος $i_d = 0$, κάνει το μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη να παραμένει μόνο προς την κατεύθυνση του άξονα d ρυθμίζοντας το στοιχείο i_d του ρεύματος του άξονα d στο 0 και έτσι δημιουργεί μια γραμμική σχέση μεταξύ ροπής και ρεύματος του στάτη. Είναι ένα είδος κοινής στρατηγικής ελέγχου για το PMSM, η στρατηγική αυτή είναι απλή και δεν ανησυχεί για το πρόβλημα απομαγνητισμού που προκαλείται από την αντίδραση σπλισμού. Η απόδοση

ελέγχου ρεύματος είναι τόσο υψηλή που όλο το ρεύμα του στάτη του κινητήρα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Ωστόσο, στον εσωτερικό σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (IPMSM), η ροπή του κινητήρα δεν εκμεταλλεύεται πλήρως και δεν μπορεί να αξιοποιήσει πλήρως την ικανότητα ροπής εξόδου του.

- Ο έλεγχος μέγιστης ροπής ανά αμπέρ είναι ένα είδος στρατηγικής ελέγχου που ελαχιστοποιεί το ρεύμα του στάτη υπό την προϋπόθεση ότι ο κινητήρας εξάγει μια δεδομένη τιμή ροπής. Αυτή η στρατηγική ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιήσει πλήρως τη ροπή του IPMSM, να ενισχύσει την ικανότητα της ροπής εξόδου ανά αμπέρ και είναι μια συνήθης στρατηγική ελέγχου ρεύματος για το IPMSM σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή ταχύτητα αλλά υψηλή ροπή, όπως το ηλεκτρικό όχημα. Ενώ παράγει την ίδια ροπή, μπορεί σχετικά να μειώσει το ρεύμα του στάτη, να μειώσει τις απώλειες χαλκού του κινητήρα και του μετατροπέα, να βελτιώσει τη χρήση του μετατροπέα στην ονομαστική χωρητικότητα, να μειώσει το αρχικό κόστος του συστήματος και να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια. Ωστόσο, σε αντίθεση με τον έλεγχο πεδίου, ο έλεγχος της μέγιστης ροπής ανά αμπέρ είναι πιο δύσκολο να πραγματοποιηθεί online, λόγω της περίπλοκης εξίσωσης τροχιάς ρεύματος και του μεγάλου όγκου υπολογισμού. Οι μέθοδοι υπολογισμού περιλαμβάνουν κυρίως πίνακα αναζήτησης, τη μέθοδο γραμμικής προσέγγισης, τη μέθοδο προσαρμογής καμπύλης κ.α. [109].
- Ο έλεγχος εξασθένησης πεδίου χρησιμοποιείται για μεγάλο εύρος στροφών. Ως αποτέλεσμα του ορίου του μετατροπέα, ο ρυθμιστής ρεύματος μπορεί να φτάσει σε κορεσμό όταν η τάση ακροδεκτών του κινητήρα θα φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Για να αποκτηθεί ένα ευρύ φάσμα στροφών πρέπει να ρυθμιστεί η ισχύ πάνω από τη βασική ταχύτητα. Η βασική ιδέα αυτού του είδους ελέγχου προέρχεται από τον έλεγχο ρύθμισης πεδίου για ξεχωριστά διεγερμένη μηχανή DC: μειώνοντας το ρεύμα διέγερσης, ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί με υψηλότερη ταχύτητα εντός του μέσου όρου τάσης. Για να επιτευχθεί η εξασθένηση του πεδίου, απαιτείται αντίδραση σπλισμού του άξονα d για την εξασθένηση του μαγνητικού πεδίου του διακένου, αντί για

την άμεση εξασθένιση του πεδίου, επειδή το πεδίο του ρότορα του PMSM παράγεται από τον μόνιμο μαγνήτη [114, 115].

8.1.2 Άμεσος Έλεγχος Ροπής

Ο άμεσος έλεγχος ροπής, είναι ένας νέος τύπος ελέγχου ταχύτητας AC υψηλής απόδοσης μετά από διανυσματικό έλεγχο, που προτάθηκε από τους επιστήμονες Takahashi και Denpenbrock [117, 118, 120] στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Παρατηρώντας λοιπόν την απόκλιση της μαγνητικής ροής του στάτη, την απόκλιση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στα συστήματα συντεταγμένων του στάτη, επίσης τη μεταβολή της μαγνητικής ροής του στάτη λόγω του ανεμισμού του κινητήρα, εκπληρώνει τον έλεγχο της ροπής κυριαρχώντας στην τιμή της τάσης της μαγνητικής ροής του στάτη σύμφωνα με το διάνυσμα χώρου τάσης που επιλέγεται από τον πίνακα μεταγωγής. Το 1997, μια προσέγγιση άμεσου ελέγχου ροπής βασισμένη στο PMSM, που προτάθηκε από την ομάδα των επιστημόνων Zhong, Rahman και Yuwen [119, 121], προκαταρκτικά καθόρισε τη θεωρητική αρχή του άμεσου ελέγχου ροπής στο PMSM. Ο άμεσος έλεγχος ροπής του PMSM, αναλαμβάνει τον έλεγχο της μαγνητικής ροής του στάτη και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής άμεσα και διέπει το ρεύμα και την τάση του στάτη έμμεσα. Σε σύγκριση με τον διανυσματικό έλεγχο, η δομή του είναι πιο απλή, και η απόκριση ροπής είναι καλύτερη. Επιπλέον, έχει ανώτερη στιβαρότητα για αλλαγές παραμέτρων. Καθώς έχει μεγάλη διακύμανση κατά την ενεργοποίηση και τη λειτουργία σε χαμηλή ταχύτητα, ο άμεσος έλεγχος ροπής είναι κατάλληλος για εφαρμογές στις οποίες η απόδοση ελέγχου δεν είναι υψηλή. Το πώς να δημιουργηθούν τα πλεονεκτήματά του και να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματά του είναι ένα άλυτο πρόβλημα που απαιτεί περαιτέρω έρευνες.

8.1.3 Προηγμένες Στρατηγικές Ελέγχου

Η ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου ταχύτητας AC υψηλής απόδοσης, δεν μπορεί να αποκλίνει από τις επιτυχίες των προηγμένων στρατηγικών ελέγχου. Το πώς να φέρετε τα νεότερα ευρήματα της έρευνας στον έλεγχο του συστήματος ελέγχου ταχύτητας είναι ένα καθήκον για τους ερευνητές στο σύστημα ελέγχου κινητήρα. Σε συνδυασμό με την τεχνολογία μικροϋπολογιστών, η ψηφιοποίηση του συστήματος ελέγχου ταχύτητας PMSM βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη. Οι συνεχείς εκτοξεύσεις μικροεπεξεργαστών με διαφορετικές ιδιότητες, κάνουν πραγματικότητα τις

εφαρμογές που χρησιμοποιούν πολύπλοκους αλγόριθμους ελέγχου στο σύστημα ελέγχου ταχύτητας. Είναι εξαιρετικά δύσκολο για τον αναλογικό ελεγκτή να το κάνει.

Οι βελτιώσεις των παραδοσιακών στρατηγικών ελέγχου, αναφέρονται κυρίως σε συμβατικούς αλγόριθμους PID και στις συμπληρωματικές στρατηγικές τους. Ο έλεγχος PID μπορεί να αντικατοπτρίζει το παρελθόν, το τρέχον καθώς και τις επερχόμενες πληροφορίες που μεταφέρονται από τη δυναμική διαδικασία. Επιπλέον, μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της συνήθους απόδοσης ελέγχου χάρη στην απλή δομή και τις ρυθμιζόμενες παραμέτρους του. Όπως δείχνουν οι ευρείες εφαρμογές του, ο έλεγχος PID έχει αποδειχθεί μια από τις πιο αποτελεσματικές και απλούστερες μεθόδους ελέγχου.

Η προσαρμογή των παραμέτρων του ελεγκτή PID είναι η βασική τεχνολογία στον έλεγχο PID και σχετίζεται στενά με τη λειτουργία του ελεγκτή. Ως εκ τούτου, ο τρόπος ορθολογικής βελτιστοποίησης των παραμέτρων του ελεγκτή PID είναι πάντα ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που έχει αποτελέσει εδώ και καιρό το επίκεντρο των ερευνών του συστήματος ελέγχου PMSM [123]. Λόγω της μη γραμμικότητας, της χρονικής διακύμανσης και άλλων χαρακτηριστικών του κινητήρα, ο συμβατικός ελεγκτής PID, ο οποίος δεν έχει τρόπο να εκτελέσει τη ρύθμιση παραμέτρων on-line, δεν είναι σε θέση να παρέχει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα ελέγχου. Στην αναφορά [124], λαμβάνοντας τις παραμέτρους του ελεγκτή PID στο PMSM ως σωματίδια στο σμήνος σωματιδίων, λαμβάνοντας την ακρίβεια ελέγχου του συστήματος ως στόχο βελτιστοποίησης των σωματιδίων, οι βέλτιστες παράμετροι ελέγχου PID μπορούν να βρεθούν μετά από μια αναζήτηση σωματιδίων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι αυτός ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων αυξάνει την ακρίβεια του συστήματος ελέγχου PMSM και προσφέρει ένα νέο έδαφος στο σχεδιασμό της βελτιστοποίησης των παραμέτρων του ελεγκτή PID. Δεδομένου ότι το PMSM είναι μη γραμμικό και ισχυρής σύζευξης, το μοντέλο του είναι κατάλληλο να μεταμορφώνεται όταν διαταραχές φορτίου ή άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λειτουργίας. Ενώ οι προσαρμοσμένες παράμετροι PID είναι απλώς μια βέλτιστη τιμή σε έναν συγκεκριμένο τομέα, όχι το συνολικό βέλτιστο. Μόλις ο

μετασχηματισμός του μοντέλου είναι εκτός του εύρους, η απόδοση του συστήματος γίνεται κακή προφανώς και συμβαίνει ακύρωση του ελέγχου PID [125]. Επομένως, ο συνήθης ελεγκτής PID, ο οποίος προσαρμόζεται σε πολλές παραλλαγές, όπως παραμετρικές αλλαγές και διαταραχές, είναι αδύνατο να ικανοποιήσει την απαίτηση ενός συστήματος ελέγχου ταχύτητας υψηλής απόδοσης. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές τροποποίησαν τον συμβατικό αλγόριθμο ελέγχου PID συνδυάζοντάς τον με νέες θεωρίες ελέγχου. Ο τροποποιημένος αλγόριθμος ελέγχου PID για το σύστημα ελέγχου PMSM έχει ενισχύσει την προσαρμοστική ικανότητα του ελεγκτή και προώθησε την απόδοση ελέγχου του. Τα τελευταία χρόνια, έχουν σημειωθεί πολλές πρόοδοι σε αυτόν τον ερευνητικό τομέα [126-130].

Με στόχο το κορεσμένο φαινόμενο Windup και για να υπολογίσει την απόδοση κορεσμένης εξόδου κοντά στη γραμμική έξοδο στην ακόρεστη περίοδο, μια έρευνα αναφοράς [131] παρουσίασε μια μεταβλητή δομή Anti-Windup ελεγκτή συνδυάζοντας την υπό όρους ολοκληρωτική μέθοδο, η οποία μπορεί εξασφάλισε μια ομαλή μετάβαση όταν αλλάζουν οι παράμετροι του μοντέλου και μπορεί να παρέχει έναν προτιμώμενο έλεγχο ταχύτητας για το PMSM. Ενοποιώντας τη θεωρία ασαφούς ελέγχου με τον έλεγχο PID, η αναφορά [132] ορίζει την παράμετρο απολαβής PID on-line σύμφωνα με την απόκλιση ταχύτητας και τους ρυθμούς μεταβολής της, η οποία είναι ικανή να βελτιώσει την ευρωστία του βρόχου ταχύτητας. Ένας αλγόριθμος ελέγχου PID νευρωνικού δικτύου με μοντέλο πρόβλεψης που εισάγεται στην αναφορά [133] μπορεί να βελτιώσει την προσαρμοστικότητα του συστήματος στην παραμετρική διακύμανση και μπορεί να μειώσει την επίδραση που προκαλείται από τη διαταραχή φορτίου.

8.2 Στρατηγικές Ελέγχου Βασισμένες στη Σύγχρονη Θεωρία Ελέγχου.

Στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται στη σύγχρονη θεωρία ελέγχου, που περιλαμβάνουν κυρίως τον προσαρμοστικό έλεγχο, τον έλεγχο μεταβλητής δομής, τον ισχυρό έλεγχο, τον προγνωστικό έλεγχο κ.α. Λαμβάνοντας υπόψη τη δομική διακύμανση του στόχου, τις αλλαγές παραμέτρων, το φαινόμενο μη γραμμικότητας, τις αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας, τις περιβαλλοντικές διαταραχές και άλλους αβέβαιους παράγοντες, οι σύγχρονες στρατηγικές ελέγχου μπορούν να διατηρήσουν το σύστημα σε καλή απόδοση παρά τη διακύμανση του μοντέλου ή

των παραμέτρων. Ο προσαρμοστικός έλεγχος συνεχίζει να εξάγει τις σχετικές πληροφορίες του μοντέλου και να προσδιορίζει τις σχετικές παραμέτρους του συστήματος, οι οποίες μπορούν να κάνουν το μοντέλο ολοκληρωμένο κατά βαθμούς. Ως εκ τούτου, έχει γίνει ένα αποτελεσματικό μέσο για την υπέρβαση της παραμετρικής διακύμανσης. Η μέθοδος προσαρμοστικού ελέγχου που χρησιμοποιείται στον έλεγχο PMSM περιλαμβάνει προσαρμοστικό έλεγχο αναφοράς μοντέλου [134, 135], έλεγχο αυτοσυντονισμού αναγνώρισης παραμέτρων [136] και άλλους μη γραμμικούς προσαρμοστικούς ελέγχους νέου τύπου [137, 138]. Επί του παρόντος, ο προσαρμοστικός έλεγχος έχει ήδη μια ευρεία χρήση στην αναγνώριση παραμέτρων του συστήματος ελέγχου PMSM, ξεπερνώντας με επιτυχία την επίδραση της παραμετρικής διακύμανσης. Ουσιαστικά, ο έλεγχος μεταβλητής δομής είναι μια συγκεκριμένη στρατηγική ασυνεχούς μη γραμμικού ελέγχου, η οποία συμπεριφέρεται ότι μπορεί να μεταβάλλει τη δομή του ασυνεχώς. Λόγω της μη ευαισθησίας του σε εξωτερικές διαταραχές, μπορεί να μειώσει την επίδραση των αλλαγών του φορτίου και της διακύμανσης των παραμέτρων στις δυναμικές ιδιότητες του κινητήρα. Τα τελευταία χρόνια, με την καλή απόδοση ελέγχου και την ευκολία επίτευξης, ο έλεγχος μεταβλητής δομής λειτουργίας ολίσθησης χρησιμοποιείται σταδιακά στο σύστημα ελέγχου ταχύτητας AC. Ωστόσο, το πρόβλημα κατά την εναλλαγή συρόμενης λειτουργίας επιβάλλει περιορισμούς στις εφαρμογές του [139].

Ο ισχυρός έλεγχος, ο οποίος στοχεύει στα προβλήματα αβεβαιότητας του μοντέλου PMSM, μπορεί να διατηρήσει ορισμένους από τους δείκτες απόδοσης σε καλή κατάσταση και να διασφαλίσει τη σταθερότητα του συστήματος ακόμη και το σύστημα ελέγχου είναι υπό εξωτερική διαταραχή ή αλλαγές εσωτερικών παραμέτρων. Η αλγεβρική μέθοδος και η μέθοδος τομέα συχνότητας είναι δύο κύριες μέθοδοι ισχυρού ελέγχου. Η μέθοδος του τομέα συχνότητας είναι να σχεδιάσει έναν ελεγκτή με βάση τη μήτρα συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος. Ο έλεγχος H^∞ είναι ένας μάλλον ώριμος έλεγχος του οποίου η ουσία είναι η λήψη του δεσμευμένου κανόνα της συνάρτησης μεταφοράς H^∞ ως ο βέλτιστος δείκτης σχεδίασης του ρυθμιστή. Για να επιτευχθεί ο στόχος του συστήματος να φτάσει σε ισχυρή σταθερότητα και να περιορίσει την αποσταθεροποίηση, οι ελεγκτές

ανάδρασης έχουν σχεδιαστεί για να κάνουν το σύστημα κλειστού βρόχου σταθερό, ενώ η δεσμευμένη νόρμα H^∞ πρέπει να είναι μικρότερη ή μικρότερη από μια δεδομένη τιμή. Ο έλεγχος H^∞ μπορεί να περιορίσει αποτελεσματικά τα προβλήματα αποσταθεροποίησης που εμφανίζονται στο PMSM [140].

Ο προγνωστικός έλεγχος, είναι ένα είδος μεθόδου ελέγχου που βασίζεται σε μοντέλο πρόβλεψης και μπορεί να βελτιστοποιήσει επανειλημμένα το σύστημα on-line, έτσι ώστε να πραγματοποιήσει τη λειτουργία ελέγχου του. Καθώς δεν εξαρτάται από το ακριβές μαθηματικό μοντέλο του στόχου, ο προγνωστικός έλεγχος με καλή απόδοση ρύθμισης παρακολούθησης και ισχυρή ευρωστία μπορεί να εξαλείψει τις βλαβερές συνέπειες από απρόβλεπτες διαταραχές. Έτσι, το σύστημα ελέγχου ταχύτητας PMSM που χρησιμοποιεί προγνωστικό έλεγχο μπορεί γενικά να έχει ένα εξαιρετικό αποτέλεσμα ελέγχου [141].

8.3 Στρατηγικές Ελέγχου Βασισμένες στη Θεωρία Ευφυούς Ελέγχου

Οι στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται σε έξυπνες σκέψεις ελέγχου, όπως ο ασαφής έλεγχος, ο έλεγχος νευρωνικών δικτύων, ο έλεγχος των εμπειρογνομόνων [142], ο αλγόριθμος κ.λπ. διακύμανση παραμέτρων και μη γραμμικότητα.

Η θεωρία του ασαφούς ελέγχου, προέρχεται από την ικανότητα του ανθρώπου να σκέφτεται, να συλλογίζεται και να κρίνει, έτσι ώστε να λύνει τα προβλήματα ελέγχου σε μη γραμμικό σύστημα. Δεν βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο των στόχων και είναι σχετικά ισχυρό. Στην αναφορά [143], σε σύγκριση με τον έλεγχο PID, ο ασαφής έλεγχος δείχνει τα μεγάλα του πλεονεκτήματα σε μη γραμμικά συστήματα, PMSM για παράδειγμα, και σε εφαρμογές διαφορετικού φορτίου. Παρόλα αυτά, ο ασαφής έλεγχος δεν διαθέτει καλή ικανότητα εκμάθησης και οι κανόνες ελέγχου του εξαρτώνται υπερβολικά από την εμπειρία και τις γνώσεις των ειδικών. Στην πραγματικότητα, ο ασαφής έλεγχος συνήθως συνδυάζεται με άλλες στρατηγικές ελέγχου, όπως ο έλεγχος fuzzy-PID, ο ασαφής προσαρμοστικός έλεγχος, ο νευρικός ασαφής έλεγχος.

Έχοντας συνειδητοποιήσει μερικές λειτουργίες του βιολογικού νευρικού συστήματος μέσω των νευρικών κυττάρων και τα βάρη τους σε αμοιβαία σύνδεση, το νευρωνικό δίκτυο έχει μια καλή ικανότητα αυτομάθησης, τόσο on-line όσο και

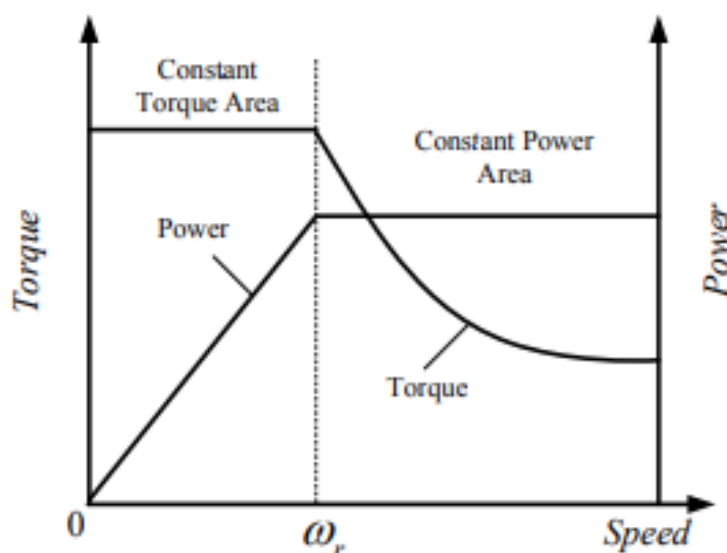
off-line, καθώς και ικανότητα αυτοοργάνωσης. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για συστήματα που είναι δύσκολο να περιγραφούν βάσει μοντέλου ή κανονισμού. Με τις ιδιότητες του νευρικού ελέγχου δικτύου, ο ελεγκτής του συστήματος ελέγχου ταχύτητας PMSM μπορεί να παρακολουθεί επακριβώς τις αλλαγές των παραμέτρων του συστήματος και παρουσιάζει καλή απόδοση σε τυχαία διαταραχή, γεγονός που καθιστά το σύστημα γρήγορη δυναμική απόκριση και μεγάλο περιθώριο σταθερότητας [145]. Ο αλγόριθμος είναι ένα είδος αναζήτησης και βελτιστοποίησης που καθιερώνεται με τη μίμηση της βιολογικής κληρονομικότητας και της μακροπρόθεσμης εξελικτικής διαδικασίας. Έχει υψηλή ακρίβεια, γρήγορη ταχύτητα υπολογισμού και μπορεί να λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών παραμέτρων. Όταν χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση παραμέτρων για ελεγκτή PID σε ένα σύστημα ελέγχου ταχύτητας, μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος διανυσματικού ελέγχου. Όταν εφαρμόζεται στη βέλτιστη εκτίμηση για τις παραμέτρους του μοντέλου, μπορεί να ολοκληρώσει την αναγνώριση παραμέτρων [145].

8.4 Ηλεκτρομαγνητικές Παράμετροι του Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη για Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα

Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη, χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο ως κινητήρες σε βιομηχανικούς κινητήρες όσο και ως γεννήτριες σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [146]. Και τα τελευταία χρόνια, απαιτήθηκαν υψηλότερες απαιτήσεις για την ταχύτητα και τη ροπή των κινητήρων [148]. Η επιλογή των παραμέτρων του κινητήρα μπορεί να επηρεάσει άμεσα την απόδοση του υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος (HEV). Οι παράμετροι του κινητήρα αποτελούν σημαντικό μέρος του σχεδιασμού HEV. Ως μία από τις δύο κύριες πηγές ισχύος του HEV, ο κινητήρας απαιτείται γενικά όχι μόνο να παρέχει βοηθητική ροπή κίνησης για τον κινητήρα στη λειτουργία μείγματος [149, 150] αλλά και να είναι εξοπλισμένος με την ικανότητα να οδηγεί το όχημα ανεξάρτητα. Επομένως, ο κινητήρας μετάδοσης κίνησης πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις των εξωτερικών χαρακτηριστικών εικόνα 8.1, που περιλαμβάνει τη σταθερή ροπή χαμηλής ταχύτητας (για συχνή εκκίνηση, επιτάχυνση και αναρρίχηση) και τη σταθερή ισχύ

υψηλής ταχύτητας (για το όχημα να λειτουργεί σε μεγάλη ταχύτητα και προσπέρασε αν χρειαστεί).

Πολλές βιβλιογραφίες σχετικά με την έρευνα των παραμέτρων απόδοσης που ταιριάζουν τ σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (PMSM) για HEV, είναι διαθέσιμες σήμερα και οι παράμετροι απόδοσης αναφέρονται στην ισχύ, τη ροπή και την ταχύτητα. Ο Wang (2010) [162] πρότεινε ότι η μέθοδος αντιστοίχισης παραμέτρων βασίστηκε στο μοντέλο απώλειας του PMSM για τη βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου και την εγγύηση της απόδοσης ισχύος του HEV. Οι Tian et al. (2013) [161] ανέλυσε την απαίτηση κινητήρα μετάδοσης κίνησης για την απόδοση ισχύος του EV (Electric Vehicle) και προσδιόρισε την μέγιστη ισχύ και τη συνεχή ισχύ του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το δρόμο όσο και το off-road. Η αντιστοίχιση παραμέτρων του κινητήρα μετάδοσης προτάθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των υβριδικών λεωφορείων και οι παράμετροι κορυφής αντιστοιχίστηκαν σύμφωνα με τη δυναμική ιδιότητα του οχήματος και οι ονομαστικές παράμετροι αντιστοιχίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα [151, 152].



Εικόνα 8.1: Οι εξωτερικές χαρακτηριστικές του PMSM

Ωστόσο, μπορούν να βρεθούν μόνο λίγες βιβλιογραφίες σχετικά με τις ηλεκτρομαγνητικές παραμέτρους (οι αυτεπαγωγές του άξονα d και q, η μαγνητική

ροή του μόνιμου μαγνήτη και η αντίσταση του στάτη) που ταιριάζουν στον κινητήρα μετάδοσης κίνησης για HEV. Για τους κινητήρες με διαφορετικούς λόγους προεξοχής, οι Bianchi et al. (1997) [146] μελέτησαν τη σχέση της μαγνητικής ροής μόνιμου μαγνήτη, του ονομαστικού ρεύματος, της αυτεπαγωγής του άξονα d και της υψηλότερης ταχύτητας υπό την απαίτηση ταχύτητας ροπής ενός συγκεκριμένου σημείου λειτουργίας. Οι Kamien et al. (2013) [152] σχεδίασε 6 είδη δομών ρότορα PMSM, οι οποίες περιείχαν τις εξωτερικές χαρακτηριστικές καμπύλες διαφορετικών κινητήρων, επίσης απέκτησε ένα αρκετά μεγάλο εύρος στροφών, με την προϋπόθεση ότι η διαφορά μεταξύ της μαγνητικής ροής μόνιμου μαγνήτη και της αυτεπαγωγής του άξονα d είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Οι άνω αναφερόμενες ομάδες επιστημόνων ανέλυσαν την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων PMSM στην απόδοση του κινητήρα, αλλά δεν προσδιόρισαν την ποσοτική σχέση διαφόρων παραμέτρων. Ο Fei (2008) [155] έδειξε με λεπτομέρεια τύπους ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων PMSM επιφάνειας και υπολόγισε τις αυτεπαγωγές PMSM, τη συνάρτηση της μαγνητικής ροής μόνιμου μαγνήτη από την αντίσταση του στάτη κ.λπ., βάση τη δεδομένη τάση, το ρεύμα και τα άλλα στοιχεία. Όμως, αυτές οι μέθοδοι δεν ισχύουν για την αντιστοίχιση των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων του προεξέχοντος κινητήρα.

Συμπερασματικά, υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων απόδοσης του κινητήρα και των παραμέτρων δομής του. Οι ηλεκτρομαγνητικές παράμετροι του κινητήρα παίζουν μεταβατικό ρόλο, επομένως η αντιστοίχιση των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων του είναι μεγάλης σημασίας. Επιπλέον, δεν υπάρχει πλήρες σύνολο μεθόδων που να είναι κατάλληλες για την αντιστοίχιση ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων του IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor).

8.5 Εξωτερικές Χαρακτηριστικές του Κινητήρα

Η υψηλότερη ταχύτητα του PMSM, είναι χαμηλότερη από αυτή του IPMSM και η μηχανική του αντοχή είναι επίσης χαμηλότερη από το IPMSM, επομένως χρησιμοποιείται σπάνια σε HEV.

Ο έλεγχος του ρεύματος του στάτη και του μετατροπέα, έχει σημαντική επίδραση στις εξωτερικές χαρακτηριστικές του κινητήρα και η εξέταση της επιρροής του καθίσταται απαραίτητη στον σχεδιασμό του PMSM [156].

8.5.1 Μετατροπέας Τάσης

Για τον μετατροπέα τάσης, υπάρχουν διάφορα είδη αλγορίθμων ελέγχου, όπως έλεγχος υστέρησης, διαμόρφωση ημιτονοειδούς πλάτους παλμού (SPWM) και διαμόρφωση διανυσματικού πλάτους παλμού χώρου (SVPWM) κ.α. Ο SVPWM γίνεται όλο και περισσότερο πιο δημοφιλής στον έλεγχο του PMSM για το HEV, λόγω κάποιων πλεονεκτημάτων [159, 161]:

- Βελτιώνει την αναλογία χρήσης της τάσης κατά περίπου 15,5% (η ονομαστική ταχύτητα και η μέγιστη ισχύς εξόδου αυξάνονται και οι δύο κατά περίπου 15,5%).
- Η κατάσταση του μετατροπέα αλλάζει μόνο μία φορά σε έναν κύκλο.
- Η αρμονική συνιστώσα της τάσης είναι χαμηλότερη και η διακύμανση της ροπής εξόδου είναι μικρότερη.

Για το ρεύμα του στάτη, υπάρχουν δύο κοινές στρατηγικές ελέγχου στην περιοχή σταθερής ροπής, έλεγχος $i_d=0$ και έλεγχος μέγιστης ροπής ανά αμπέρ (MTPA). Η κύρια διαφορά μεταξύ του ελέγχου $i_d=0$ και του ελέγχου MTPA έγκειται στον τρέχοντα έλεγχο της περιοχής σταθερής ροπής. Όταν η τρέχουσα στρατηγική ελέγχου υιοθετεί τον έλεγχο MTPA, η ικανότητα εξόδου σε χαμηλή ταχύτητα είναι καλή. Και το HEV απαιτεί υψηλή απόδοση σε χαμηλή ταχύτητα κινητήρα. Έτσι, το IPMSM είναι πιο κατάλληλο για την υιοθέτηση ελέγχου MTPA για HEV [162].

8.5.2 Εξωτερικές Χαρακτηριστικές του IPMSM

Οι εξωτερικές χαρακτηριστικές του IPMSM, παριστάνουν της καμπύλες ροπής - ταχύτητας του κινητήρα στην περιοχή σταθερής ροπής και στην περιοχή εξασθένισης μαγνητικού πεδίου.

Αρχικά, ορίζονται οι κύριοι παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των εξωτερικών χαρακτηριστικών του κινητήρα.

$$\rho = \frac{L_q}{L_d} \quad (1)$$

$$\xi = \frac{L_d i_{lim}}{\psi_f} \quad (2)$$

όπου ρ είναι ο λόγος εξέχουσας ικανότητας, ξ είναι ο λόγος εξασθένησης πεδίου, L_d είναι η αυτεπαγωγή του άξονα d , L_q είναι η αυτεπαγωγή του άξονα q , ψ_f είναι η μαγνητικής ροή μόνιμου μαγνήτη του ρότορα του κινητήρα και i_{lim} είναι η οριακή τιμή του ρεύματος. Για ευκολία, η βασική τιμή κάθε μεταβλητής ορίζεται ως

$$P_N = u_{lim} i_{limN} = u_{lim} \frac{\psi_f}{L_d} \quad (3)$$

$$\omega_{eN} = \frac{u_{lim}}{\psi_f} \quad (4)$$

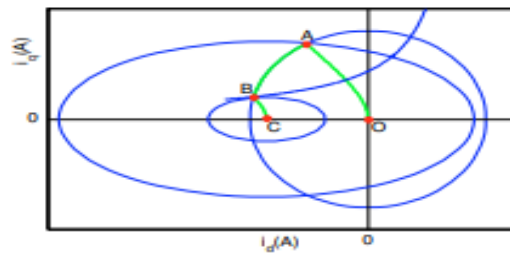
$$\omega_{mN} = \frac{u_{lim}}{\rho \psi_f} \quad (5)$$

$$T_N = \frac{P_N}{\omega_{mN}} = \frac{\rho \psi_f^2}{L_d} \quad (6)$$

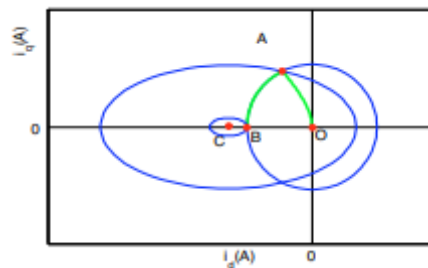
όπου P_N είναι η βασική τιμή της ισχύος, ω_{eN} είναι η βασική τιμή της ηλεκτρικής γωνιακής ταχύτητας, ω_{mN} είναι η βασική τιμή της μηχανικής γωνιακής ταχύτητας, T_N είναι η βασική τιμή της ροπής, u_{lim} η οριακή τιμή της τάσης και ρ είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων.

Στην εικόνα 8.5.2α, η τροχιά ελέγχου του ρεύματος χωρίζεται σε τρία τμήματα όταν το κέντρο της έλλειψης ορίου τάσης βρίσκεται εντός του κύκλου ορίου ρεύματος ($\xi > 1$): περιοχή σταθερής ροπής (γραμμή OA), περιοχή εξασθένησης πεδίου I (γραμμή AB) και περιοχή εξασθένησης πεδίου II (γραμμή BC). Η τροχιά ελέγχου του ρεύματος χωρίζεται μόνο σε δύο τμήματα όταν το κέντρο της έλλειψης ορίου τάσης

είναι εκτός του κύκλου ορίου ρεύματος ($\xi < 1$): περιοχή σταθερής ροπής (γραμμή OA) και περιοχή εξασθένησης ροής (γραμμή AB), όπως φαίνεται στην εικόνα 8.5.2β.



Εικόνα 8.5.2α: Η τροχιά ελέγχου του ρεύματος



Εικόνα 8.5.2β: Η τροχιά ελέγχου του ρεύματος

Στην περιοχή σταθερής ροπής, υιοθετείται ο έλεγχος μέγιστης ροπής ανά αμπέρ (ΜΤΡΑ). Όταν ο λόγος υπεροχής είναι μεγαλύτερος από 1, οι καταστάσεις τάσης και ρεύματος είναι $i_s = i_{lim}$ και $u_s \leq u_{lim}$, τότε η ισχύς εξόδου και η ροπή εξόδου εμφανίζονται ως εξής με τη μορφή τιμής ανά μονάδα (ρ.υ.):

$$(L_d i_d + \psi_f)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{u_{lim}}{\omega_e} \right)^2 \quad (11)$$

$$i_q = \frac{\sqrt{\left(\frac{u_{lim}}{\omega_e} \right)^2 - (L_d i_d + \psi_f)^2}}{L_q} \quad (12)$$

Η ισχύς εξόδου (ρ.υ.) εμφανίζεται ως

$$P^* = \frac{P}{P_N} = \frac{u_d i_d + u_q i_q}{P_N} = \frac{\sqrt{1 - A^2 \omega_m^{*2}} [1 + (1 - \rho)(A - 1)]}{\rho} \quad (13)$$

Όπου,

$$A = \frac{\rho - \sqrt{\rho^2 + 8(\rho - 1)^2 (1 / \omega_m^*)^2}}{4(\rho - 1)}.$$

Η ροπή εξόδου (ρ.υ.) φαίνεται στη σχέση (14):

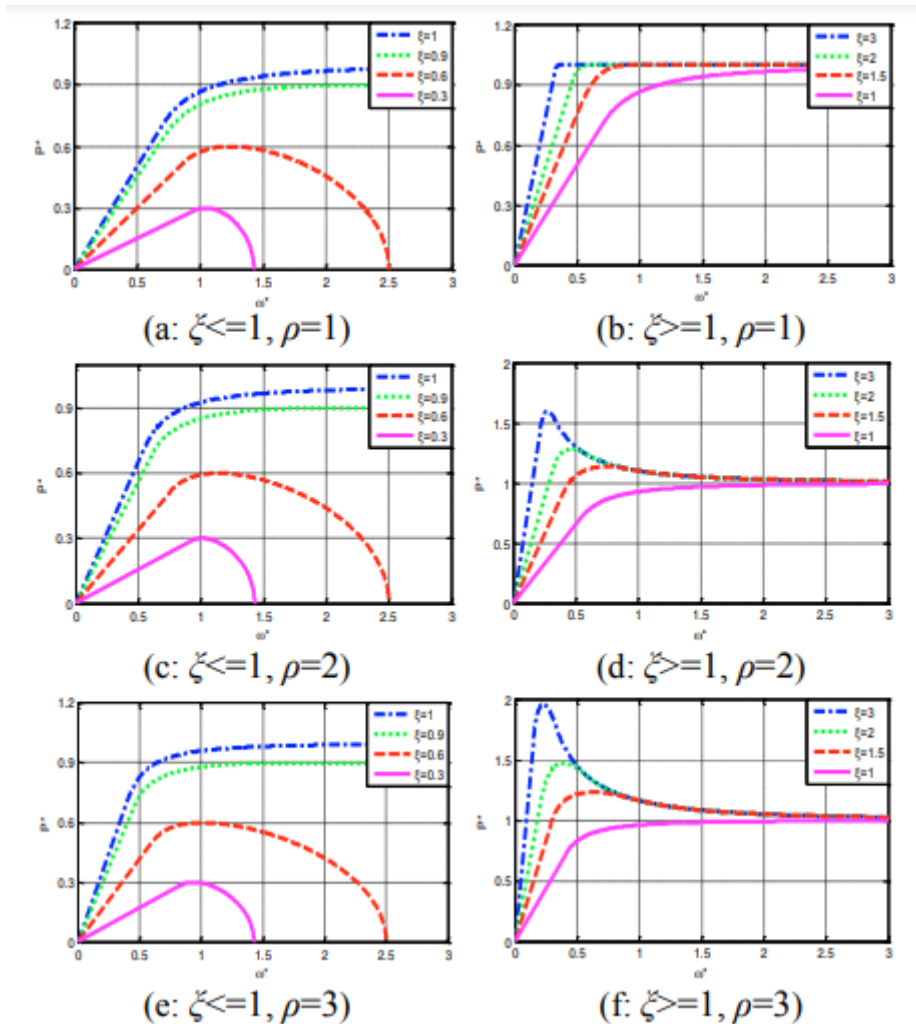
$$T_e^* = \frac{T_e}{T_N} = \frac{P / \omega_m}{P_N / \omega_{mN}} = \frac{\sqrt{1 - A^2 \omega_m^{*2}} [1 + (1 - \rho)(A - 1)]}{\rho \omega_m^*} \quad (14)$$

8.6 Επίδραση της Αναλογίας Εξασθένησης του Μαγνητικού Πεδίου στις Εξωτερικές Χαρακτηριστικές του Κινητήρα

Τα παρακάτω διαγράμματα, δείχνουν την επίδραση του λόγου εξασθένησης του μαγνητικού πεδίου ξ στις εξωτερικές χαρακτηριστικές ισχύος του PMSM. Τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Όταν ο λόγος εξασθένησης πεδίου ξ είναι μικρότερος από 1, η μέγιστη ισχύς εξόδου και η υψηλότερη ταχύτητα εξαρτώνται μόνο από την αναλογία αποδυνάμωσης πεδίου και δεν έχουν καμία συσχέτιση με την αναλογία προεξοχής.
- Όταν η αναλογία εξασθένησης πεδίου ξ αυξάνεται, η υψηλότερη ταχύτητα αυξάνεται όπως και η μέγιστη ισχύς (Διάγραμμα 8.6α (α, c και e)).
- Όταν ο λόγος εξασθένησης πεδίου ξ είναι ίσος με 1, το εύρος σταθερής ταχύτητας ισχύος στην περιοχή εξασθένησης πεδίου δεν έχει καμία σχέση με τις ηλεκτρομαγνητικές παραμέτρους του κινητήρα και ο κινητήρας έχει την ιδανική υψηλότερη ταχύτητα. Επιπλέον το IPMSM έχει την ιδανική εξωτερική χαρακτηριστική, δηλαδή σταθερή ροπή σε χαμηλή ταχύτητα και σταθερή ισχύ σε υψηλή ταχύτητα.
- Όταν ο λόγος εξασθένησης πεδίου ξ είναι μεγαλύτερος από 1, με την αύξηση του λόγου εξασθένησης πεδίου, η μέγιστη ισχύς εξόδου αυξάνεται και η ταχύτητα που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ εξόδου μειώνεται στον ίδιο λόγο εξασθένησης. Έτσι, η μεγαλύτερη αναλογία εξασθένησης πεδίου συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης εξόδου χαμηλής ταχύτητας. Ταυτόχρονα,

υπάρχει μια μέγιστη ισχύς, η οποία είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ PN. Τέλος, η ισχύς εξόδου μειώνεται γρήγορα και πλησιάζει την ονομαστική ισχύ με την αύξηση της ταχύτητας, Διάγραμμα 8.6α(b, d, και f).



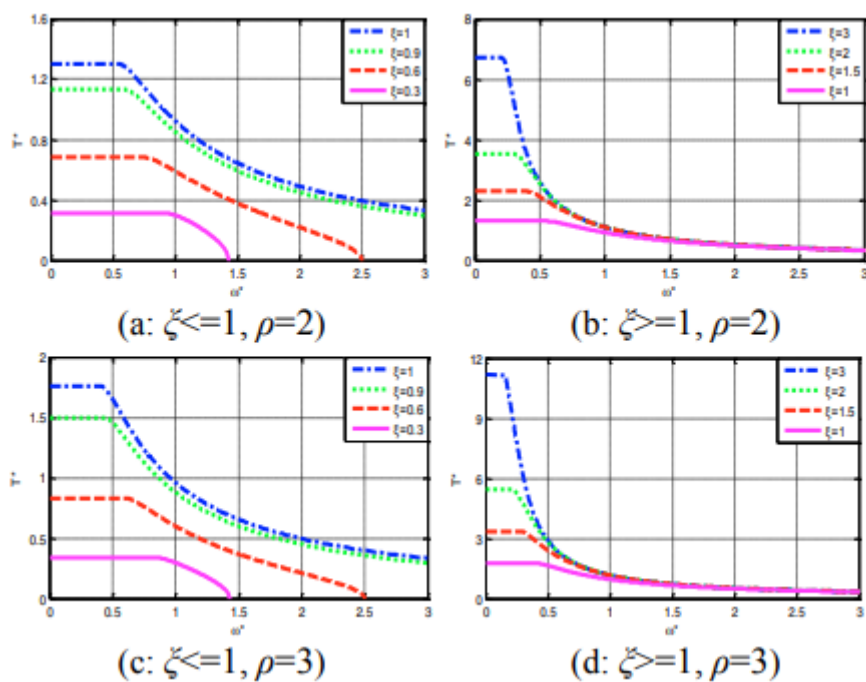
Διαγράμματα 8.6α: Επίδραση του λόγου εξασθένησης πεδίου ζ στις εξωτερικές χαρακτηριστικές ισχύος του PMSM

Εάν ο λόγος εξασθένησης πεδίου είναι πολύ υψηλός, ο βαθμός ισχύος του μετατροπέα θα πρέπει επίσης να προωθηθεί για να ικανοποιήσει την απαίτηση της ισχύος του κινητήρα και το κόστος του μετατροπέα επίσης αυξάνεται. Η περιοχή υψηλής ισχύος του κινητήρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλήρως, επειδή το εύρος στροφών που αντιστοιχεί στην ισχύ αιχμής είναι περιορισμένο.

Όταν ο λόγος υπεροχής είναι 2, στα διαγράμματα 8.6α(a, b), με την αύξηση του λόγου εξασθένησης πεδίου, η μέγιστη ροπή του κινητήρα αυξάνεται και το χαρακτηριστικό ροπής σε χαμηλή ταχύτητα γίνεται καλύτερο. Ομοίως, όταν η

αναλογία προεξοχής είναι 3, στα διαγράμματα 9.6α(c, d), καταλήγει στο ίδιο συμπέρασμα. Εάν η χαρακτηριστική ροπής είναι μόνο ένας παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη, είναι προτιμότερο να επιλέξετε τη μεγαλύτερη αναλογία εξασθένησης πεδίου. Λαμβάνοντας όμως υπόψη την ανάλυση του εξωτερικού χαρακτηριστικού της ισχύος, ο λόγος εξασθένησης πεδίου θα πρέπει να είναι περίπου 1.

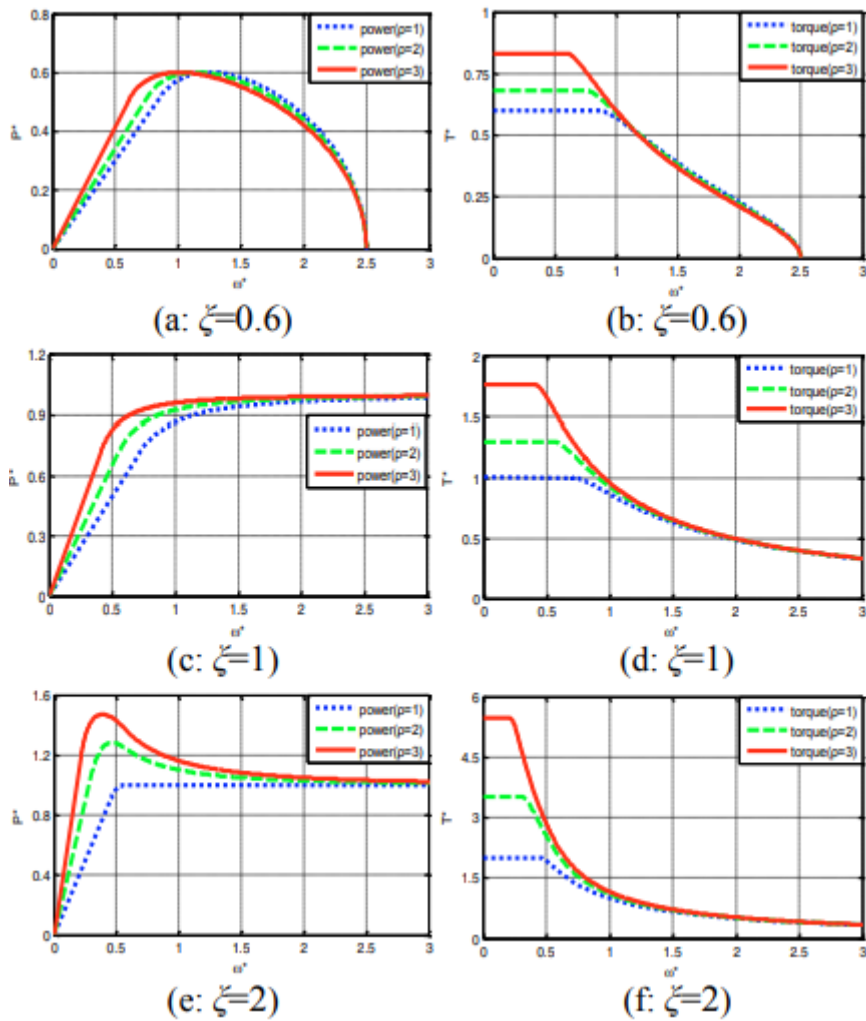
Επομένως, ο κινητήρας που έχει τη μεγαλύτερη αναλογία εξασθένησης πεδίου, δεν επιλέγεται, εκτός από το ότι απαιτείται πολύ υψηλή απαίτηση ροπής σε χαμηλή ταχύτητα. Και για το HEV, είναι καλύτερο να επιλέξετε τον κινητήρα, του οποίου η αναλογία εξασθένησης πεδίου είναι κοντά στο 1, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το κόστος κ.λπ.



Διαγράμματα 8.6β: Επίδραση του λόγου εξασθένησης πεδίου ξ στις εξωτερικές χαρακτηριστικές της ροπής του IPMSM

8.6.1 Επίδραση του Λόγου Ικανότητας στις Εξωτερικές Χαρακτηριστικές του Κινητήρα
 Τα διαγράμματα δείχνουν την επίδραση της αναλογίας ικανότητας στις εξωτερικές χαρακτηριστικές IPMSM. Τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Όταν η αναλογία εξασθένησης πεδίου ξ δεν είναι μεγαλύτερη από 1 και διατηρεί σταθερή τιμή, η αναλογία επηρεάζεται μόνο την ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ισχύ αιχμής και έχει μικρή επίδραση τόσο στην ισχύ αιχμής όσο και στην υψηλότερη ταχύτητα. Με άλλα λόγια, η ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ισχύ αιχμής μειώνεται με την αύξηση της αναλογίας, (διαγράμματα 8.6.1 (a, c)). Όταν ο λόγος αυξάνεται, η ροπή του κινητήρα αυξάνεται στην περιοχή σταθερής ροπής, αλλά η ονομαστική ταχύτητα μειώνεται και το εύρος στροφών μειώνεται στην περιοχή σταθερής ροπής (διαγράμματα 8.6.1 (b, d)).
- Όταν η αναλογία εξασθένησης πεδίου ξ είναι μεγαλύτερη από 1, η αναλογία επηρεάζει ελάχιστα την υψηλότερη ταχύτητα, ωστόσο, όταν ο λόγος εξασθένησης αυξάνεται, η μέγιστη ισχύς του κινητήρα αυξάνεται και η ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ισχύ αιχμής μειώνεται (διάγραμμα 8.6.1(e)). Και όταν ο λόγος υπεροχής αυξάνεται, η ροπή του κινητήρα αυξάνεται στην περιοχή σταθερής ροπής, αλλά η ονομαστική ταχύτητα τότε μειώνεται και το εύρος στροφών μειώνεται στην περιοχή σταθερής ροπής (διάγραμμα 8.6.1(f)).



Διαγράμματα 8.6.1: Επίδραση της αναλογίας ικανότητας στις εξωτερικές χαρακτηριστικές PMSM. (α, γ, ε: οι εξωτερικές χαρακτηριστικές της ισχύος· β, δ, ς: οι εξωτερικές χαρακτηριστικές της ροπής)

Πιο αναλυτικά:

Όταν ο λόγος εξασθένησης πεδίου ξ είναι μικρότερος του 1 και πλησιάζει το 1, οι εξωτερικές χαρακτηριστικές της ισχύος βελτιώνονται. Όταν ο λόγος εξασθένησης πεδίου ξ είναι μεγαλύτερος του 1, η μέγιστη ισχύς του κινητήρα αυξάνεται και είναι συνετό να επιλέξετε μια σωστή αναλογία εξασθένησης πεδίου λαμβάνοντας υπόψη το κόστος. Επομένως, αν ο λόγος εξασθένησης πεδίου είναι ελαφρώς μεγαλύτερος του 1, ο κινητήρας IPMSM είναι πιο κατάλληλος για HEV.

Όταν ο λόγος προεξοχής ρ αυξάνεται, η ροπή στην περιοχή σταθερής ροπής αυξάνεται και η μέγιστη ισχύς επίσης, ωστόσο, η ταχύτητα που αντιστοιχεί στην

ισχύ αιχμής μειώνεται. Εξάλλου, η απαίτηση του χαρακτηριστικού της ροπής σε χαμηλή ταχύτητα είναι υψηλότερη, επομένως συνιστάται να επιλέξετε τον κινητήρα, ο οποίος έχει μεγαλύτερη αναλογία προεξοχής.

8.7 Παράμετροι που Λαμβάνονται Υπόψη στο Σχεδιασμό

Η αναλογία εξασθένησης πεδίου και η αναλογία υπεροχής, είναι οι προϋποθέσεις για τον προσδιορισμό των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων του IPMSM. Έτσι, οι επιλογές της αναλογίας εξασθένησης πεδίου και της αναλογίας προεξοχής έχουν μεγάλη σημασία.

Το μέγιστο όριο τάσης u_{lim} που μπορεί να παρέχει ο μετατροπέας στον κινητήρα, περιορίζεται από την τάση u_{dc} συνεχούς ρεύματος DC και τη στρατηγική SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation, που είναι η στρατηγική ελέγχου του μετατροπέα) (Krishnan, 2010; Zhou et al., 2006· Su et al., 2006· Zhang et al., 2013).

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε να παρουσιαστεί μια στρατηγική SVPWM που βασίζεται στο διάνυσμα χώρου τάσης και το u_{lim} είναι $u_{dc}/\sqrt{2}$ (ο συντελεστής μετασχηματισμού Clarke είναι $\sqrt{\frac{2}{3}}$). Το μέγιστο όριο ρεύματος i_{lim} , καθορίζεται από την ονομαστική τιμή ρεύματος του μετατροπέα και τη θερμική ονομαστική τιμή μηχανής (Kim and Sul, 1997). Επομένως, οι σχέσεις περιορισμού τάσης και ρεύματος είναι:

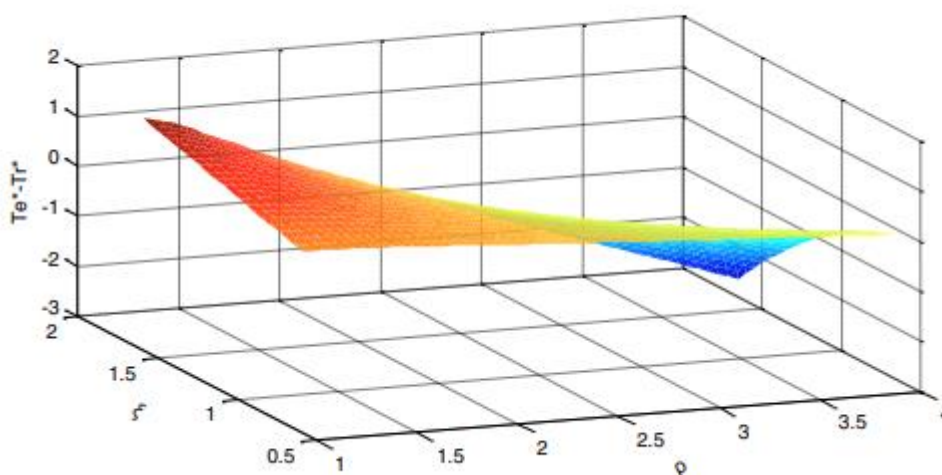
$$\begin{cases} u_d^2 + u_q^2 \leq u_{lim}^2 \\ i_d^2 + i_q^2 \leq i_{lim}^2 \end{cases}$$

8.7.1 Επιλογή της Αναλογίας Διακρίσεων

Με την παραπάνω ανάλυση, όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία τόσο μεγαλύτερη είναι η ροπή στην περιοχή σταθερής ροπής. Δεδομένου ότι, το HEV απαιτεί μεγάλη ροπή σε εύρος χαμηλών στροφών, ένας κινητήρας με μεγάλη αναλογία είναι καλύτερος. Και η στρατηγική ελέγχου MTPA προτιμάται, γενικά, από τον εξαιρετικά σημαντικό κινητήρα με $\rho > 2$ [153, 154]. Ως εκ τούτου, ο λόγος εξέχουσας θέσης του κινητήρα οδήγησης αναμένεται να είναι μεγαλύτερος από 2 για το υβριδικό σύστημα στα HEV.

Ωστόσο, η αναλογία της ροπής αυξάνεται ενώ η αναλογία υψηλότητας αυξάνεται. Όταν η ροπή είναι μεγαλύτερη από την ηλεκτρομαγνητική ροπή στη συνολική ροπή εξόδου, η απόδοση του PMSM είναι κοντά στον κινητήρα και είναι εύκολο να προκληθεί παλμός της ροπής και να γίνει δύσκολος ο έλεγχος του κινητήρα. Επομένως, η ηλεκτρομαγνητική ροπή θα πρέπει να είναι το κύριο μέρος της ροπής εξόδου του PMSM. Επιπλέον, εάν ο λόγος αυξηθεί, η ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα μειωθεί, ο κινητήρας θα εισέλθει στην περιοχή εξασθένησης πεδίου I με πολύ χαμηλή ταχύτητα. Εάν ναι, δεν είναι ωφέλιμο για την επέκταση του εύρους στροφών του κινητήρα [161].

Το διάγραμμα 8.7.1α δείχνει τη σχέση της διαφοράς μεταξύ της $T_e^* - T_r^*$. Με την αύξηση της αναλογίας προεξοχής και της αναλογίας εξασθένησης πεδίου του PMSM, η αναλογία της ροπής του κινητήρα αυξάνεται.

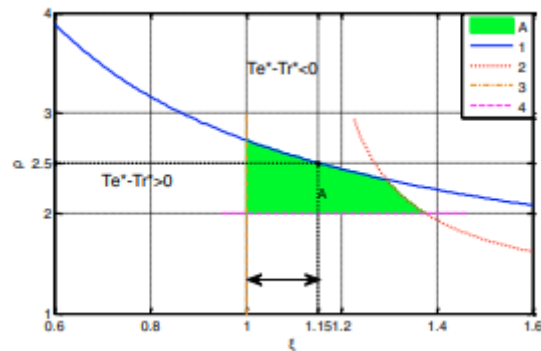


Διάγραμμα 8.7.1α: Σχέση του $T_e^ - T_r^*$, του λόγου υπεροχής και του λόγου εξασθένησης πεδίου ξ .*

Το 8.7.1β είναι μια διδιάστατη έκδοση του διαγράμματος 8.7.1α. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι μεγαλύτερη από τη ροπή T_r κάτω από την καμπύλη 1.

Τα διαγράμματα 8.6.1(d) και (f), εισάγουν έναν μεγαλύτερο λόγο εξασθένησης πεδίου που οδηγεί σε μεγαλύτερη κορυφή στην εξωτερική χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος και απαιτείται ένας μετατροπέας υψηλής ισχύος. Ωστόσο, ο κινητήρας μπορεί να διατηρήσει την μέγιστη ισχύ εξόδου σε ένα πολύ στενό εύρος στροφών, η

υψηλή ισχύς του μετατροπέα δεν είναι απαραίτητη για το μεγαλύτερο μέρος του εύρους στροφών του κινητήρα. Για να αποφευχθεί η σπατάλη του μετατροπέα, το εύρος ισχύος αιχμής (p.u.) περιορίζεται μεταξύ 1 και 1,1, αυτό δημιουργεί τη ζώνη μεταξύ της καμπύλης 2 και της καμπύλης 3 στο διάγραμμα 8.7.1β. Οι τιμές του λόγου υπεροχής και του πεδίου- Η αναλογία αποδυνάμωσης χαρακτηρίζεται στην περιοχή σκιάς Α στο διάγραμμα 8.7.1β.



Διάγραμμα 8.7.1β: Τιμές της αναλογίας υπεροχής και της αναλογίας εξασθένησης πεδίου.

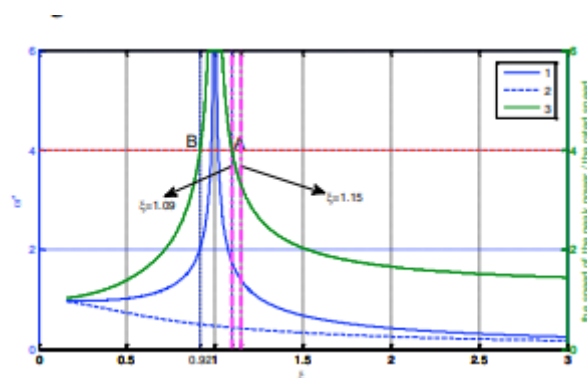
8.7.2 Επιλογή της Αναλογίας Εξασθένησης Πεδίου

Σε αυτήν την υποενότητα του κεφαλαίου, το εύρος της αναλογίας αποδυνάμωσης πεδίου αναλύεται περαιτέρω. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 8.7.1β, η τιμή του λόγου εξασθένησης είναι 2,00-2,73 και το εύρος αναλογίας εξασθένησης πεδίου είναι 1-1,375, όταν ο λόγος εξέχοντος ρ είναι 2,5, το εύρος του λόγου εξασθένησης πεδίου είναι 1-1,15.

Θεωρητικά, αν $\xi \geq 1$, η μέγιστη ταχύτητα είναι άπειρη. Αλλά η ικανότητα εξασθένησης πεδίου περιορίζεται από τον μη αναστρέψιμο απομαγνητισμό των μόνιμων μαγνητών και την απόδοση του ελεγκτή. Ένας ελεγκτής κινητήρα υψηλής απόδοσης μπορεί να επεκτείνει την ταχύτητα σε 4-5 φορές την ονομαστική ταχύτητα. Για να ικανοποιηθεί η απαίτηση ισχύος του HEV, η μέγιστη ισχύς του PMSM θα πρέπει να βρίσκεται σε ένα κατάλληλο εύρος. Με άλλα λόγια, η ταχύτητα του σημείου μέγιστης ισχύος δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 4 φορές της ονομαστικής ταχύτητας.

Το διάγραμμα 8.7.2α απεικονίζει το εύρος της αναλογίας εξασθένησης πεδίου όταν ο λόγος προεξοχής ρ είναι 2,5. Οι καμπύλες είναι, αντίστοιχα, η ταχύτητα του κινητήρα που αντιστοιχεί στην μέγιστη ισχύ (p.u.) (Καμπύλη 1), η ονομαστική ταχύτητα (p.u.) (Καμπύλη 2) και η αναλογία μεταξύ της ταχύτητας της μέγιστης ισχύος και της ονομαστικής ταχύτητας (Καμπύλη 3). Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει ότι ο λόγος μεταξύ της ταχύτητας της μέγιστης ισχύος και της ονομαστικής ταχύτητας είναι 4. Άρα τα σημεία τομής της καμπύλης 3 και της κόκκινης γραμμής είναι τα σημεία A και B. Ο λόγος εξασθένησης πεδίου που αντιστοιχεί στο σημείο A είναι 1,09, και ο λόγος εξασθένησης πεδίου που αντιστοιχεί στο σημείο B είναι 0,92. Άρα το εύρος του λόγου εξασθένησης πεδίου είναι $\xi < 0,92$ και $\xi > 1,09$.

Σύμφωνα με το παραπάνω αποτέλεσμα, το πραγματικό εύρος της αναλογίας εξασθένησης πεδίου είναι 1,09-1,15.

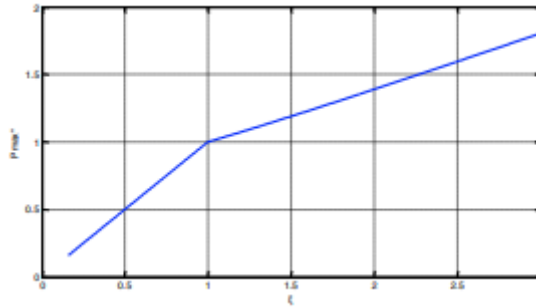


Διάγραμμα 8.7.2α: Εύρος αναλογίας αποδυνάμωσης πεδίου

Το διάγραμμα 8.7.2β δείχνει ότι η σχέση της ισχύος αιχμής και της αναλογίας εξασθένησης πεδίου όταν ο λόγος εξέχουσας ικανότητας ρ είναι 2,5. Και η σχέση της ισχύος αιχμής και του λόγου εξασθένησης πεδίου δίνεται ως εξής:

$$P_{\max}^* = \begin{cases} \xi & (\xi \leq 1) \\ 0.4 \cdot \xi + 0.6 & (\xi > 1) \end{cases} \quad (16)$$

Για παράδειγμα, η μέγιστη ισχύς του PMSM (p.u.) είναι 1,04 όταν ο λόγος εξασθένησης πεδίου είναι 1,1 και ο λόγος εξόγκωσης ρ είναι 2,5.



Διάγραμμα 8.7.2β: Σχέση της μέγιστης ισχύος P'_{max} και του λόγου εξασθένησης πεδίου

8.7.3 Υπολογισμός Ηλεκτρομαγνητικών Παραμέτρων

Όταν λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση του στάτη, η πραγματική ισχύς εξόδου μπορεί να είναι μικρότερη από τη θεωρητική. Η ισχύς εξόδου θα πρέπει να τροποποιηθεί ως

$$P'_{max} = \eta P_{max} \quad (17)$$

όπου P_{max} είναι η μέγιστη ισχύς εξόδου που υπολογίζεται αγνοώντας την αντίσταση του στάτη, P'_{max} είναι η μέγιστη ισχύς εξόδου που τροποποιείται λαμβάνοντας υπόψη την αντίσταση του στάτη και η είναι ο συντελεστής διόρθωσης, ο οποίος ποικίλλει ανάλογα με τη διαφορά του βαθμού ισχύος.

Πρώτον, η μέγιστη ισχύς εξόδου και η ροπή εξόδου δίνονται ως (18)

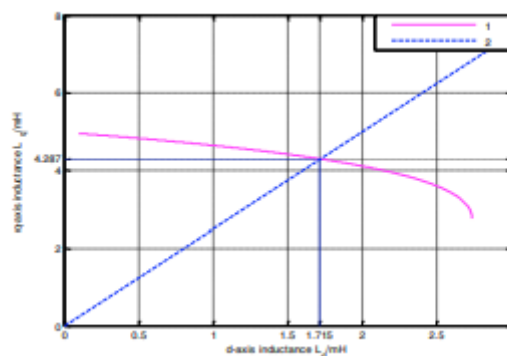
$$\begin{cases} P'_{max} = 1.04u_{lim} \frac{\psi_f}{L_d} \\ T' = [\xi \sin \alpha_0 + 0.5(1 - \rho) \xi^2 \sin 2\alpha_0] \frac{p\psi_f^2}{L_d} \end{cases} \quad (18)$$

Στο (18), ο υπολογισμός των επαγωγών του άξονα d και q φαίνεται στο διάγραμμα 8.7.3, και η σχέση ψ_f και L_d προσδιορίζεται από την σχέση (11).

Οι Bianchi et al. (1997) [146] ανέλυσαν την επίδραση του αριθμού των ζευγών πόλων στη χαρακτηριστική ροπής εξόδου του PMSM. Και όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων, τόσο μικρότερος είναι ο παλμός της ροπής.

Ο αριθμός των ζευγών πόλων, μπορεί να είναι συνήθως 1-8 και είναι καλύτερο να επιλέξετε 4 για τον κινητήρα κίνησης, επομένως ο αριθμός των ζευγών πόλων σε αυτό το χαρτί είναι 4.

Η σχέση των αυτεπαγωγών του άξονα d και q , φαίνεται στο διάγραμμα 8.7.3 υπό την προϋπόθεση της ικανοποίησης της απαίτησης ροπής του PMSM. Οι αυτεπαγωγές του άξονα d και q , προσδιορίζονται όταν η αναλογία εξέχουσας ικανότητας ρ είναι 2,5.



Διάγραμμα 8.7.3: Η αυτεπαγωγή του άξονα d και η αυτεπαγωγή του άξονα q .

Δεύτερον, η σύνδεση μόνιμης μαγνητικής ροής προκύπτει από την (2):

$$\psi_f = \frac{L_d i_{lim}}{\xi} \quad (19)$$

Τρίτον, όταν αναλύεται η εξωτερική χαρακτηριστική του κινητήρα, η υπόθεση είναι ότι η πτώση τάσης του στάτη είναι πολύ μικρότερη από το back-EMF (Electric Motive Force):

$$R_s i_{lim} \ll \omega_r p \psi_f \quad (20)$$

Για να διασφαλιστεί η γρήγορη απόκριση ροπής, η ηλεκτρική σταθερά χρόνου του κινητήρα θα πρέπει να ικανοποιεί το $T_1 \leq 0,02$. Επομένως, η αντίσταση στάτη R_s προσδιορίζεται από το (21):

$$\begin{cases} \frac{L_d}{R_s} \leq 0.02 \\ \frac{L_q}{R_s} \leq 0.02 \end{cases} \quad (21)$$

Με την ανάλυση που αναφέρθηκε παραπάνω, κυρίως οι παράμετροι απόδοσης του κινητήρα καθορίζονται σύμφωνα με τους δείκτες δυναμικής απόδοσης ή τον κύκλο οδήγησης ενός οχήματος (Wang, 2010; Tian et al., 2013; Xu and Qiu, 2012). Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του λόγου εξέχουσας ικανότητας και του λόγου εξασθένησης πεδίου στην εξωτερική χαρακτηριστική του κινητήρα, οι ηλεκτρομαγνητικές παράμετροι του κινητήρα, όπως οι αυτεπαγωγές στους άξονες d και q, η μαγνητική ροή μόνιμου μαγνήτη και η αντίσταση του στάτη, προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας την παράμετρο της απόδοσης του κινητήρα.

8.8 Μαθηματικό Μοντέλο Σύγχρονου Κινητήρα με Μόνιμο Μαγνήτη

Για τον έλεγχο της λειτουργίας ενός Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM), απαιτείται ένα μαθηματικό μοντέλο. Το μαθηματικό μοντέλο τριών φάσεων, χρησιμοποιείται σπάνια για το σχεδιασμό ελέγχου, γνωστό και ως χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, θα χρησιμοποιηθεί το μαθηματικό μοντέλο δύο φάσεων με ευθύ και εγκάρσιο άξονα, d-q αντίστοιχα [5]. Το μαθηματικό μοντέλο PMSM περιλαμβάνει τυπικά εξισώσεις ροών, επαγόμενων τάσεων, μηχανικών εξισώσεων και εξισώσεων ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Παρακάτω δίνονται χαρακτηριστικά κάποιες υποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα χωρίς περιέλιξη αποσβεστήρα στο πλαίσιο αναφοράς του ρότορα.

- Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (Electromotive Force – EMF) που δημιουργείται είναι ημιτονοειδούς μορφής.
- Ο κορεσμός (saturation) αγνοείται.
- Δεν υπάρχει δυναμική του ρεύματος πεδίου.
- Οι απώλειες υστέρησης (hysteresis losses) και τα δινορρεύματα (eddy currents) παραλείπονται.

- Στο πλαίσιο αναφοράς του ρότορα (rotor reference frame), οι εξισώσεις των επαγόμενων τάσεων δίνονται από τις σχέσεις:
- $V_q = R_s i_q + w_r \lambda_d + \frac{d}{dt} \lambda_q$ (2.1)
- $V_d = R_s i_d - w_r \lambda_q + \frac{d}{dt} \lambda_d$ (2.2)
- Οι εξισώσεις ρών (flux linkage equations) δίνονται από τις σχέσεις:
- $\lambda_q = L_q i_q$ (2.3)
- $\lambda_d = L_d i_d + \lambda_f$ (2.4)
- Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.1), (2.2), (2.3) και (2.4), προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:
- $V_q = R_s i_q + w_r (L_d i_d + \lambda_f) + \frac{d}{dt} (L_q i_q) = R_s i_q + w_r L_d i_d + w_r \lambda_f + L_q \frac{di_q}{dt} \rightarrow$
 $L_q \frac{di_q}{dt} = V_q - R_s i_q - w_r L_d i_d - w_r \lambda_f \rightarrow$
- $\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} [V_q - R_s i_q - L_d w_r i_d - w_r \lambda_f]$ (2.5)
- $V_d = R_s i_d - w_r (L_q i_q) + \frac{d}{dt} (L_d i_d + \lambda_f) = R_s i_d - w_r L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \rightarrow$
- $L_d \frac{di_d}{dt} = V_d - R_s i_d + w_r L_q i_q \rightarrow$
- $\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} [V_d - R_s i_d + w_r L_q i_q]$ (2.6)
- Επιπλέον, η ηλεκτρομαγνητική ροπή (electromagnetic torque) στους άξονες d-q μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης:
- $T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_d i_d - \lambda_q i_q)$ (2.7)
- Τέλος, η μηχανική ροπή (mechanical torque) περιγράφεται από την εξίσωση:
- $w_m = \int \frac{(T_e - T_L - B w_m)}{J} dt$ (2.8)
- Διαφορίζοντας και τα δυο μέλη της εξίσωσης (2.8), προκύπτει ότι:
- $d w_m = \frac{T_e - T_L - B w_m}{J} dt \rightarrow \frac{d w_m}{dt} = \frac{T_e - T_L - B w_m}{J} \rightarrow J \frac{d w_m}{dt} = T_e - T_L - B w_m \rightarrow J \frac{d w_m}{dt} + B w_m = T_e - T_L$ (2.9)
- ενώ η μηχανική ταχύτητα (mechanical speed) δίνεται από τη σχέση: $w_m = \frac{2}{p} w_r$ (2.10), όπου
- R_s : η αντίσταση του στάτη (stator resistance),
- L_d, L_q : η αυτεπαγωγή στον d και q άξονα αντίστοιχα (inductance on d-q axis),

- i_d, i_q : το ρεύμα του στάτη στον d και q άξονα αντίστοιχα (stator current on d-q axis),
- V_d, V_q : η τάση του στάτη στον d και q άξονα αντίστοιχα (stator voltage on d-q axis),
- λ_d, λ_q : η ροή του στάτη στον d και q άξονα αντίστοιχα (flux linkage of the stator on d-q axis),
- λ_f : η ροή μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet flux),
- T_e : η ηλεκτρομαγνητική ροπή (electromagnetic torque),
- T_L : η ροπή φορτίου (load torque),
- ω_r : η ηλεκτρική ταχύτητα (electrical speed),
- ω_m : η μηχανική ταχύτητα (mechanical speed),
- J : η ροπή αδρανείας (moment of inertia),
- B : ο συντελεστής κλάσματος (fraction factor) και
- P : ο αριθμός των πόλων (number of poles).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ SIMULINK

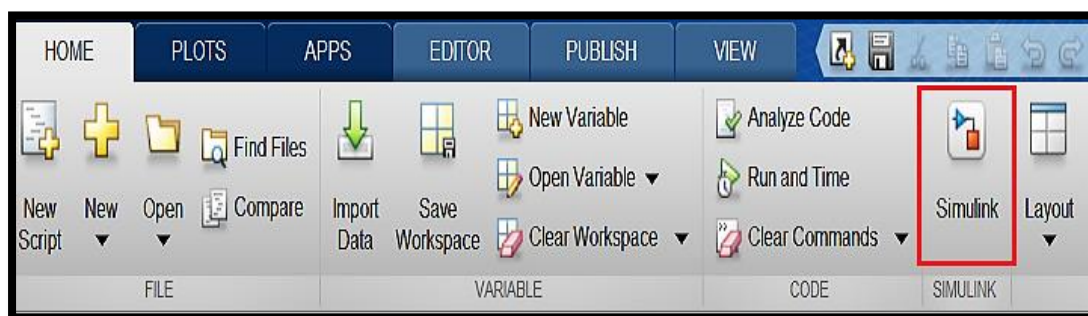
Το Simulink, αποτελεί μια γραφική επέκταση του MATLAB για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση συστημάτων. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης μη-γραμμικών συστημάτων, κάτι που στη περίπτωση των συναρτήσεων μεταφοράς, δεν μπορεί να επιτευχθεί. Επίσης, διαθέτει τη δυνατότητα επιλογής αρχικών συνθηκών, δεδομένου ότι στη περίπτωση των συναρτήσεων μεταφοράς, οι αρχικές συνθήκες θεωρούνται μηδενικές. Τα συστήματα σχεδιάζονται στην οθόνη σε μορφή μπλοκ διαγραμμάτων, τα οποία περιλαμβάνουν συναρτήσεις μεταφοράς, μαθηματικές πράξεις, εικονικές συσκευές εισόδου και εξόδου, γεννήτριες συναρτήσεων και παλμογράφους.

Επιπλέον, το Simulink είναι ενσωματωμένο στο περιβάλλον MATLAB και τα δεδομένα μπορούν εύκολα να μεταφερθούν μεταξύ των δύο προγραμμάτων. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του μαθηματικού μοντέλου του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη σε μορφή μπλοκ διαγραμμάτων.

Το Simulink, ανοίγει εισάγοντας την ακόλουθη εντολή στη γραμμή εντολών του MATLAB:

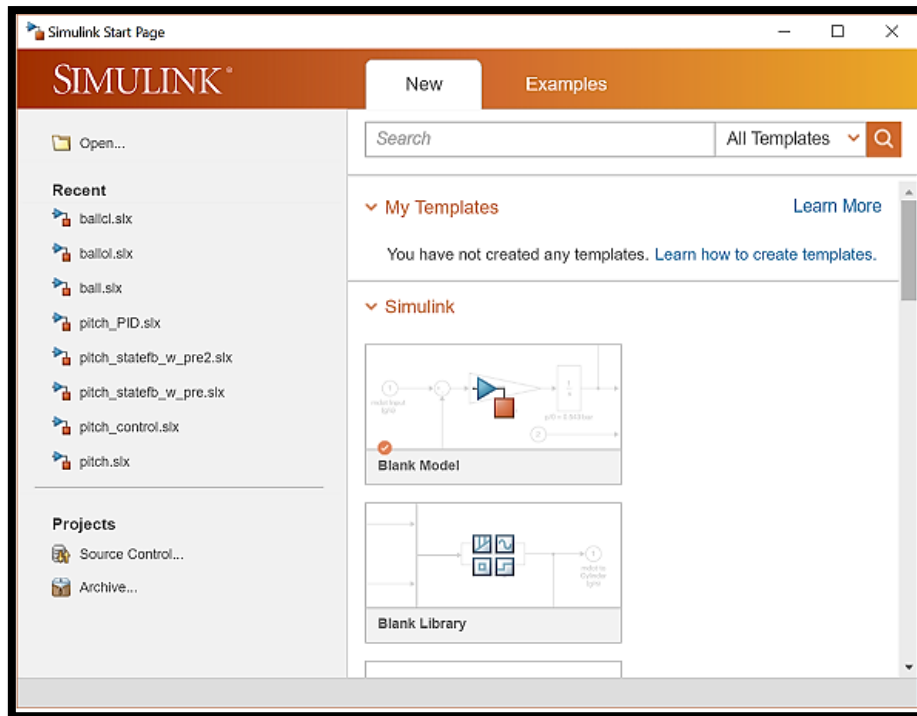
```
>> simulink
```

Εναλλακτικά, μπορεί ο χρήστης να κάνει κλικ στο εικονίδιο Simulink στο πάνω μέρος του παραθύρου MATLAB, όπως χαρακτηριστικά επισημαίνεται στην εικόνα 9.α.



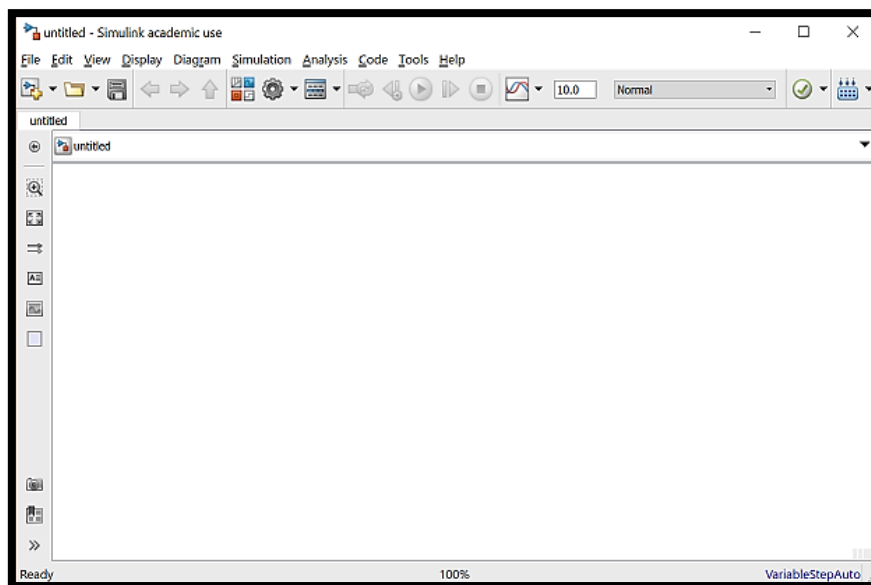
Εικόνα 9α: Εικονίδιο Simulink στο παράθυρο του MATLAB.

Όταν ξεκινήσει το πρόγραμμα, εμφανίζει το παράθυρο αρχικής σελίδας όπως φαίνεται στην εικόνα 9β.



Εικόνα 96: Παράθυρο αρχικής σελίδας Simulink.

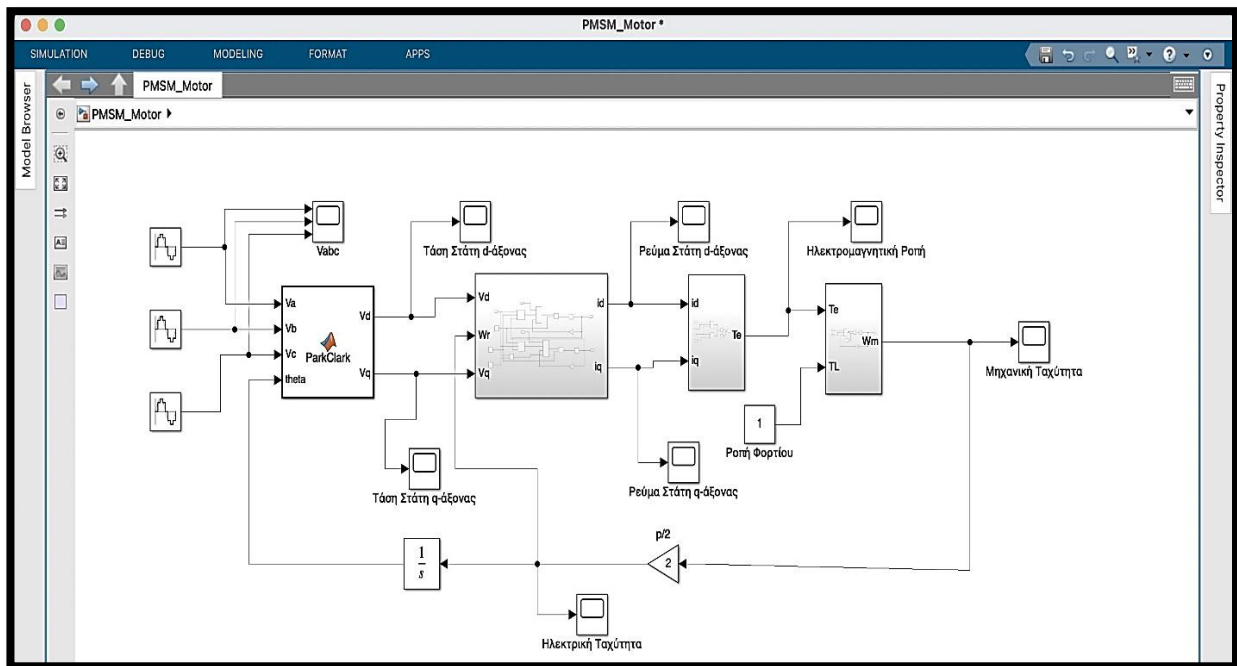
Πατώντας ο χρήστης το εικονίδιο “Blank Model”, εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο.



Εικόνα 97: Εμφάνιση παραθύρου πατώντας το εικονίδιο “Blank Model”.

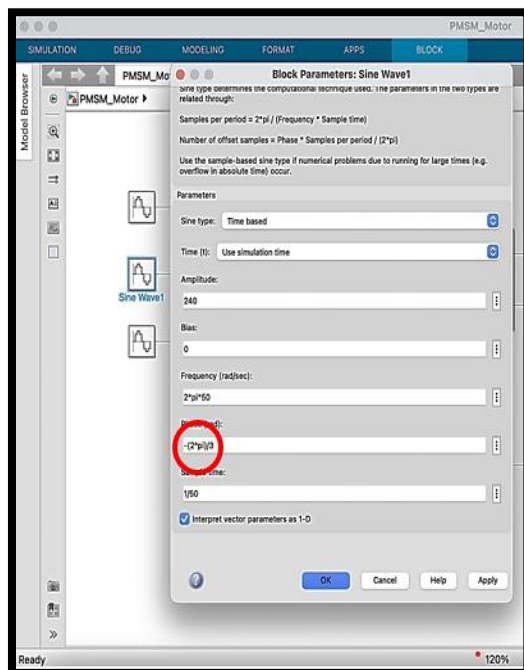
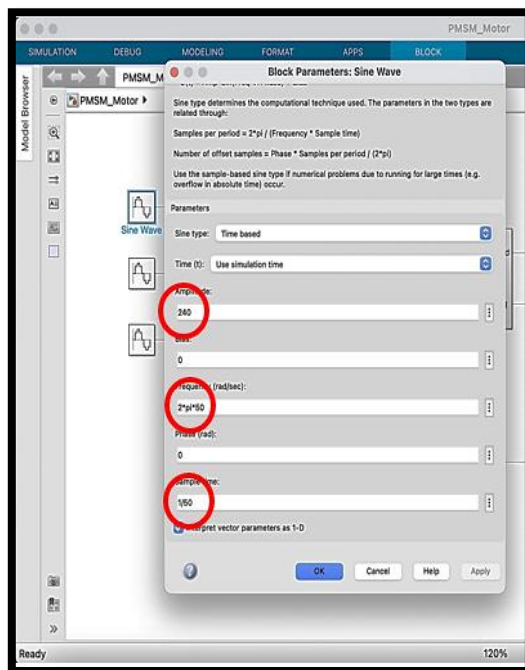
Η υλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου του Σύγχρονου Κινητήρα με Μόνιμο Μαγνήτη στο Simulink, φαίνεται στην εικόνα 9γ. Η συγκεκριμένη εικόνα περιλαμβάνει τέσσερα υποσυστήματα (subsystems), το πρώτο αντιπροσωπεύει το μετασχηματισμό των τριών φασικών τάσεων (abc) σε (d-q), το δεύτερο αφορά τη

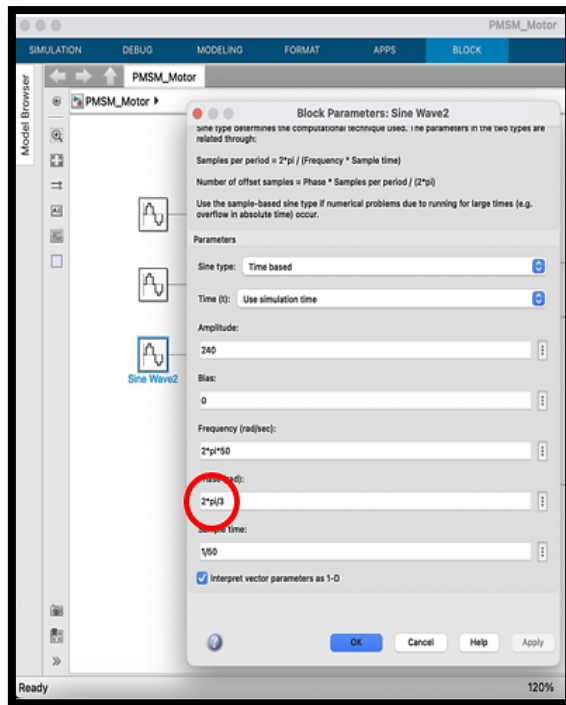
κατασκευή των ρευμάτων i_d, i_q του στάτη στον d και q άξονα αντίστοιχα, στο τρίτο εμφανίζεται το μπλοκ υπολογισμού της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e ενώ στο τέταρτο εμφανίζεται το μπλοκ υπολογισμού της μηχανικής ταχύτητας ω_m .



Εικόνα 9δ: Υλοποίηση μαθητικού μοντέλου Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη σε μορφή μπλοκ διαγραμμάτων.

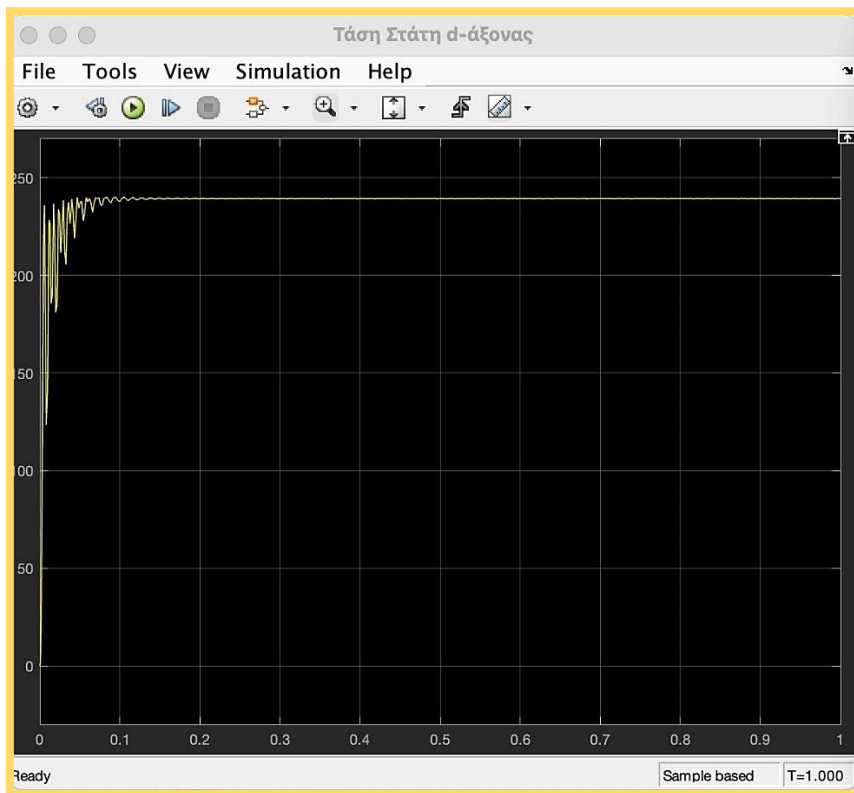
Οι τρεις φασικές-συμμετρικές επαγόμενες τάσεις (abc) θα έχουν το ίδιο μέτρο $V_{max} = 240V$ και φασική μετατόπιση 120° με συχνότητα $f = 50Hz$.



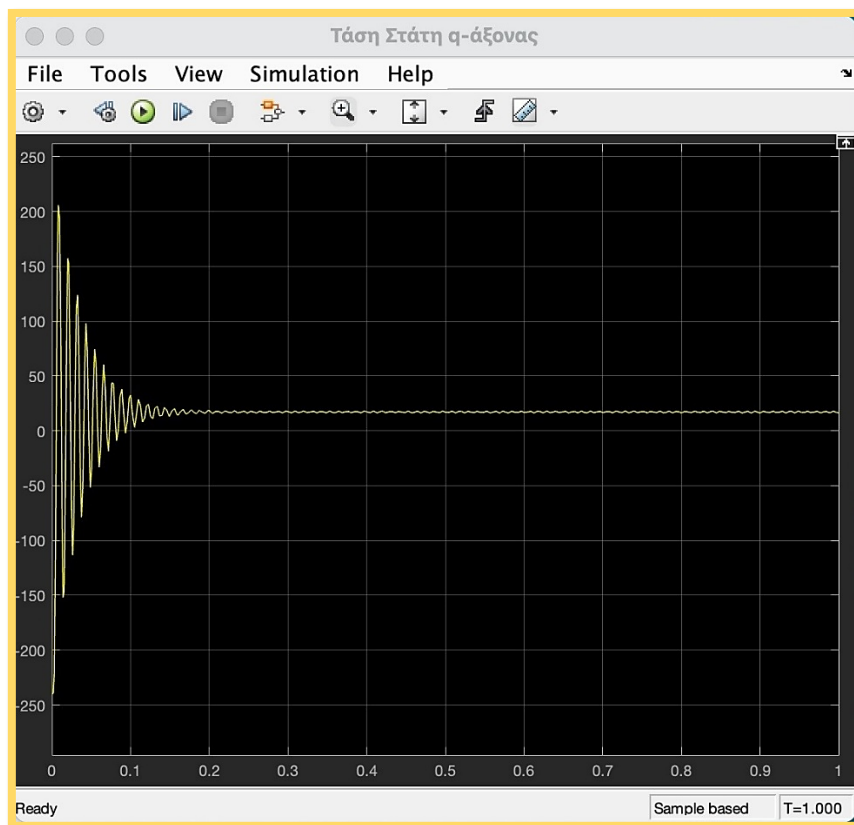


Εικόνα 9ε: Φασικές-συμμετρικές επαγόμενες τάσεις με ίδιο μέτρο $V_{max} = 240V$ και φασική μετατόπιση 120° σε συχνότητα $f = 50Hz$.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω φασικές-συμμετρικές επαγόμενες τάσεις (abc), προκύπτουν οι νέες συνιστώσες των τάσεων του στάτη στον d και q άξονα.

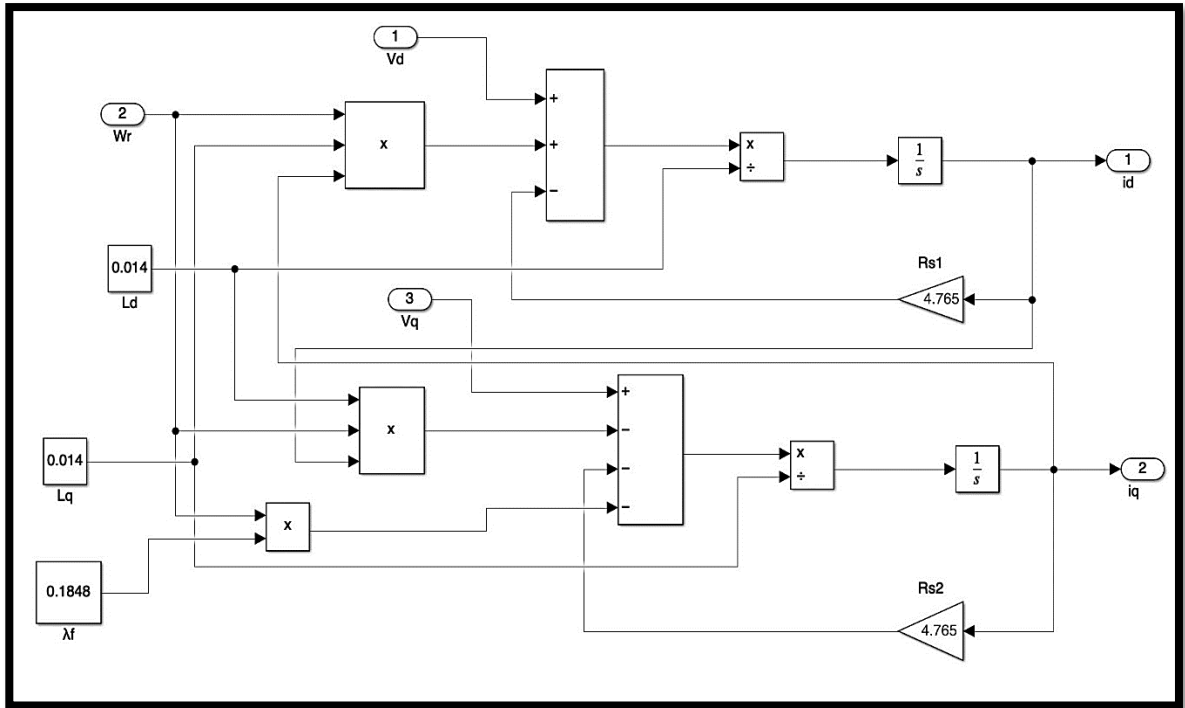


Διάγραμμα 9ζ: Τάση στάτη V_d στον d-άξονα.

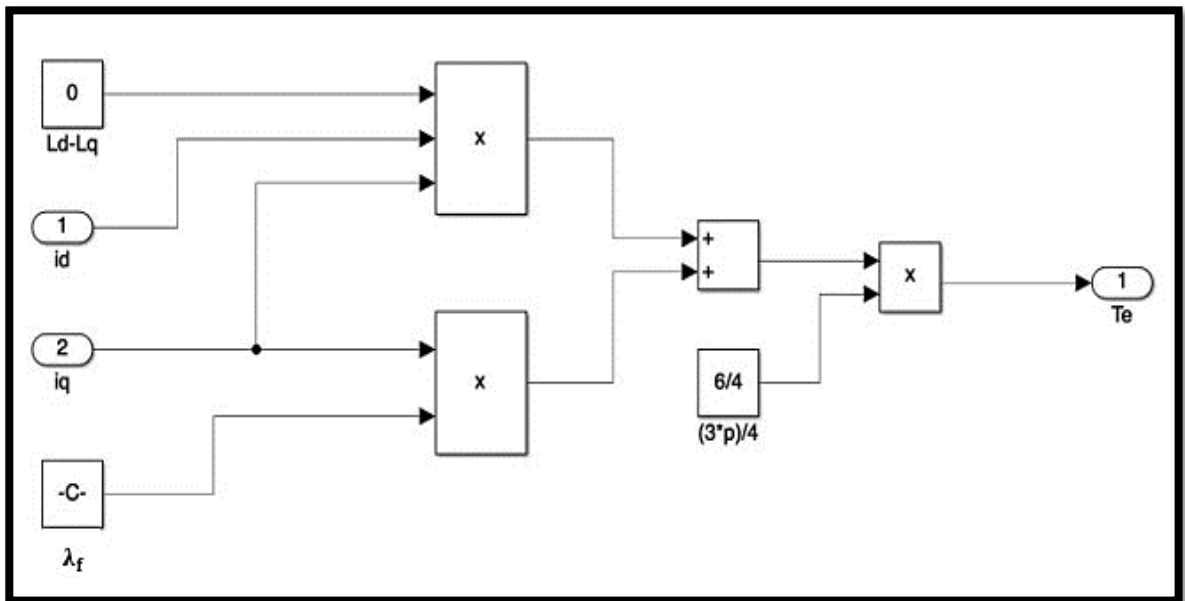


Διάγραμμα 9η: Τάση στάτη V_q στον q-άξονα.

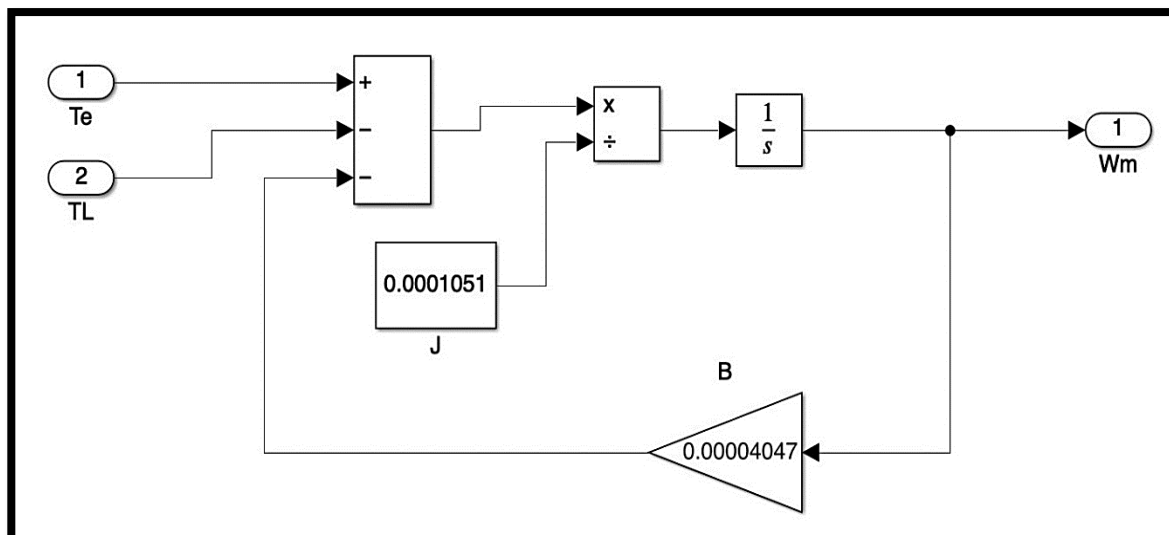
Στα μπλοκ διαγράμματα που φαίνονται παρακάτω, παρουσιάζονται τα υποσυστήματα που απαρτίζουν τον Σύγχρονο Κινητήρα με Μόνιμο Μαγνήτη. Επιπλέον παρουσιάζεται το υποσύστημα υπολογισμού των ρευμάτων του στάτη στον d και q άξονα, το υποσύστημα υπολογισμού της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e και το υποσύστημα υπολογισμού της μηχανικής ταχύτητας w_m .



Μπλοκ διάγραμμα 9α:Υποσύστημα υπολογισμού ρευμάτων του στάτη i_d , i_q στον d και q άξονα.



Μπλοκ διάγραμμα 9β:Υποσύστημα υπολογισμού Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής T_e .



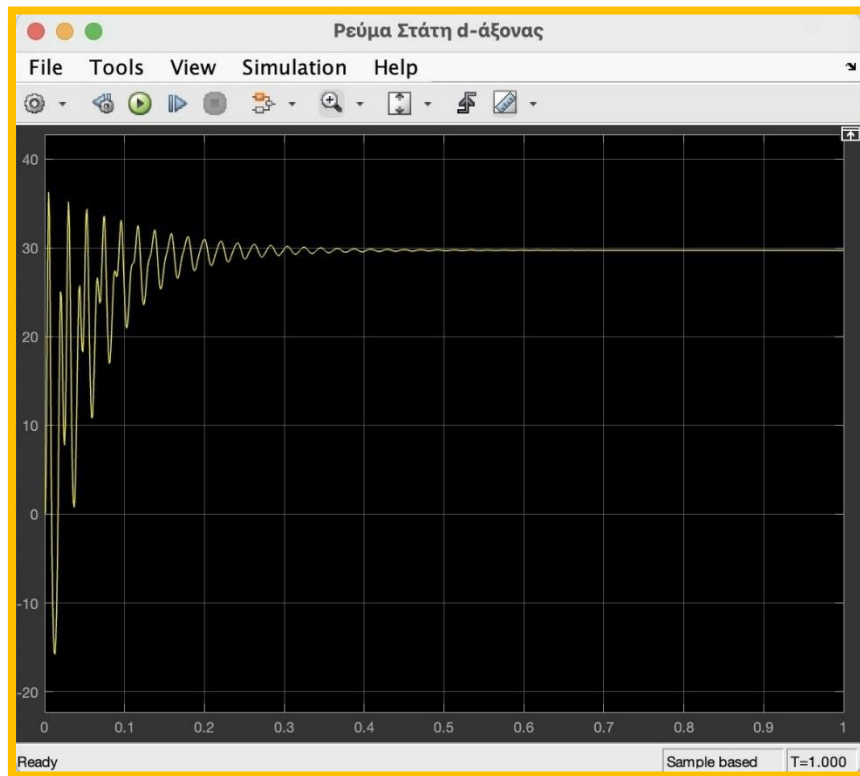
Μπλοκ διάγραμμα 9γ:Υποσύστημα υπολογισμού Μηχανικής Ταχύτητας w_m .

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του τριφασικού μοντέλου του Σύγχρονου Κινητήρα με Μόνιμο Μαγνήτη στο περιβάλλον Simulink του MATLAB, φαίνονται στις ακόλουθες Εικόνες, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του συστήματος που έχουν χρησιμοποιηθεί με βάση τον πίνακα 9α.

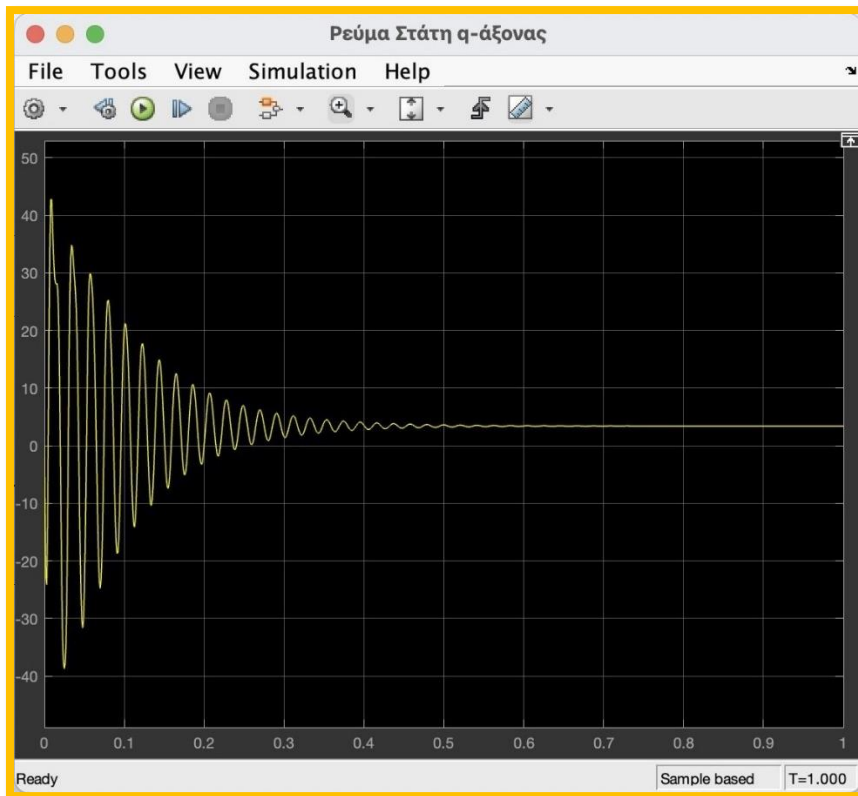
No.	Παράμετροι	Τιμές
1	R_s	4.765Ω
2	L_q	0.014H
3	L_d	0.014H
4	P	2
5	B	$4.047 * 10^{-5} \frac{Nm}{rad} /s$
6	J	0.0001051Kgm ²
7	λ_f	0.1848Wb

Πίνακας 9α: Παράμετροι συστήματος Σύγχρονου Κινητήρα με Μόνιμο Μαγνήτη.

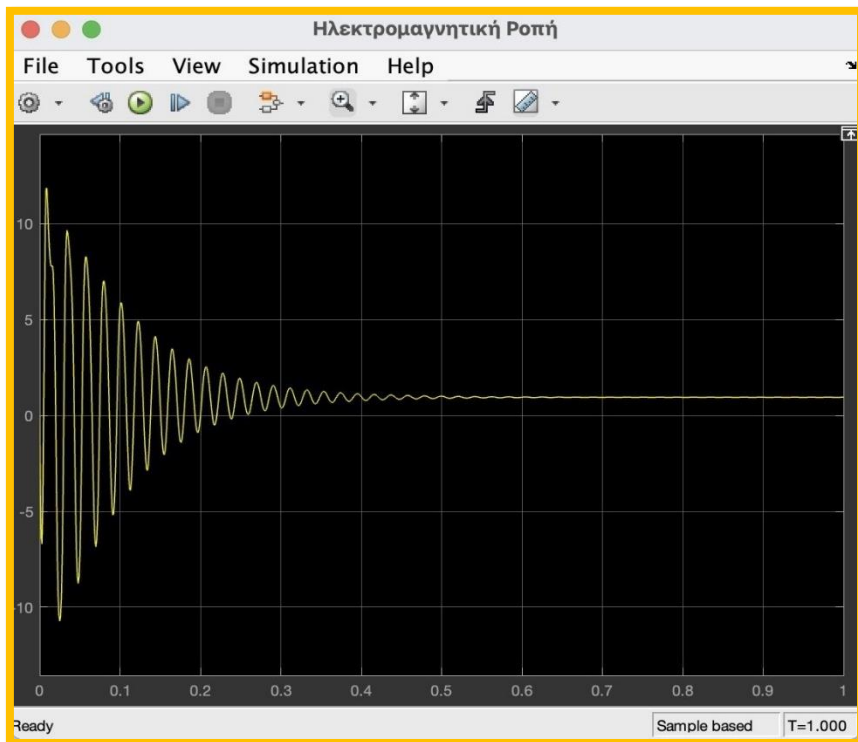
Στα διαγράμματα παρακάτω , έχει εφαρμοστεί ένα φορτίο $T_L = 1 \text{ Nm}$ στον κινητήρα, ενώ σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου, φαίνονται χαρακτηριστικά οι αποκρίσεις των ρευμάτων του στάτη στον d και q άξονα, της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e , της ηλεκτρικής ταχύτητας ω_r και της μηχανικής ταχύτητας ω_m .



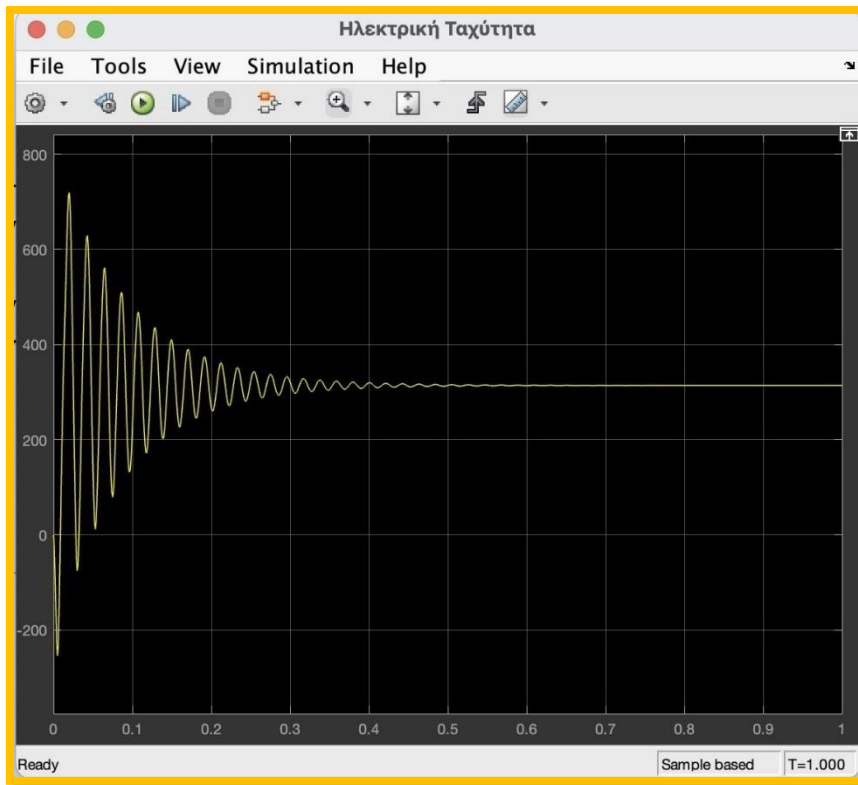
Διάγραμμα 9θ: Ρεύμα στάτη i_d στον d-άξονα.



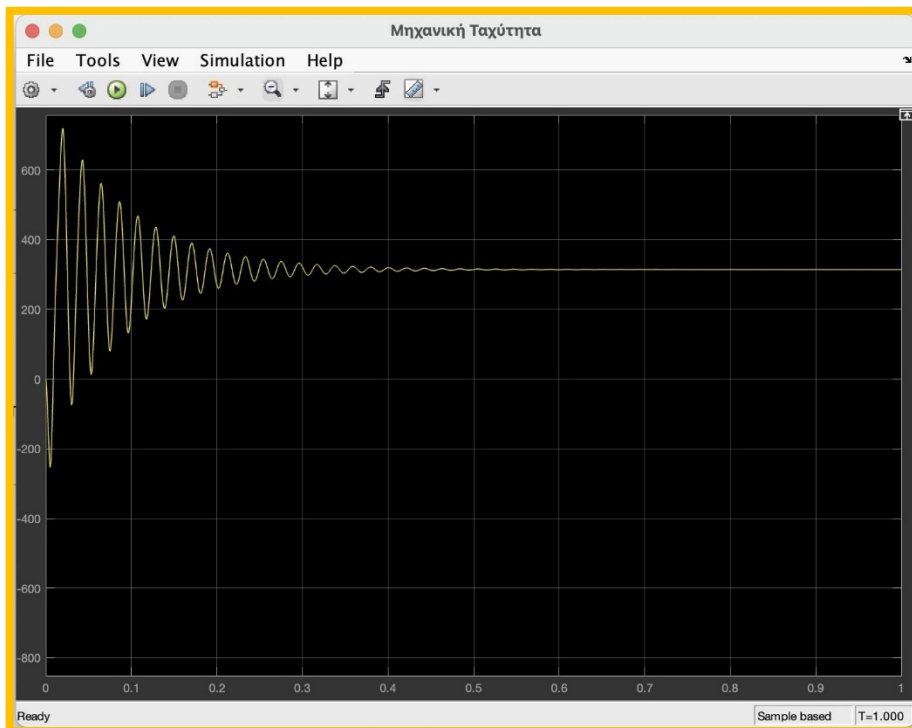
Διάγραμμα 9ί: Ρεύμα στάτη i_q στον q-άξονα.



Διάγραμμα 9κ: Ηλεκτρομαγνητική Ροπή T_e .



Διάγραμμα 9λ: Ηλεκτρική Ταχύτητα W_r .



Διάγραμμα 9μ: Μηχανική Ταχύτητα W_m .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

Από τις προσομοιώσεις και τα πειράματα χρησιμοποιώντας πρωτότυπους κινητήρες, μάθαμε τα ακόλουθα σχετικά με τη βέλτιστη διαμόρφωση του κινητήρα για το EV:

(1) Για να αποκτήσει παραγωγή υψηλής ροπής σε σταθερό ρεύμα και μεγάλο εύρος λειτουργίας, ο κινητήρας θα πρέπει να είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε η αυτεπαγωγή του άξονα q να είναι υψηλή.

(2) Για να αυξηθεί η αυτεπαγωγή του άξονα q , ο κινητήρας θα πρέπει να έχει μόνιμους μαγνήτες ενσωματωμένους στον ρότορα. Μια ιδιαίτερα υψηλή αυτεπαγωγή άξονα q μπορεί να σχεδιαστεί για σταθερό όγκο μαγνήτη, χωρίζοντας τους μόνιμους μαγνήτες στην ακτινική κατεύθυνση. Ο κινητήρας θα πρέπει να έχει 2 στρώματα μόνιμων μαγνητών γιατί αυτού του είδους η διαμόρφωση αυξάνει αποτελεσματικά την αυτεπαγωγή του άξονα q . Η επαγωγή του άξονα q αποδείχθηκε ότι δεν αυξάνεται περαιτέρω με περισσότερα στρώματα μαγνήτη.

(3) Μια συμπαγής περιέλιξη, είναι αποτελεσματική για τη μείωση του μεγέθους του κινητήρα, αλλά η αυτεπαγωγή του άξονα q και d τείνουν να αυξάνονται περισσότερο από ό,τι με μια κατανεμημένη περιέλιξη. Επίσης, η διαφορά επαγωγής μεταξύ των αξόνων q και d είναι μικρότερη, επομένως η ροπή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Εάν η μέγιστη παραγόμενη ροπή για μια συμπαγής περιέλιξη έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ισοδύναμη με εκείνη μιας κατανεμημένης περιέλιξης, οι στροφές εξακολουθούν να μην είναι τόσο υψηλές όσο αυτές που επιτυγχάνονται με ένα κατανεμημένο τύλιγμα, ακόμη και όταν ελέγχεται η εξασθένηση του πεδίου. Ως αποτέλεσμα, ο κινητήρας θα έχει μια πολύ στενή περιοχή σταθερής εξόδου. Όταν χρησιμοποιείται μια συμπαγής περιέλιξη, είναι απαραίτητο να βελτιωθεί η επαγωγή και να πλησιάσει η κυματομορφή της επαγωγικής τάσης σε ένα ημιτονοειδές σχήμα.

Συμπερασματικά οι κινητήρες αυτού του είδους είναι γνωστοί ως οι καλύτεροι υποψήφιοι για τις εφαρμογές EV επειδή είναι στιβαροί, λιγότερο δαπανηροί, ώριμοι σε τεχνολογία και χρειάζονται λιγότερη συντήρηση. Ωστόσο, αποδεικνύεται ότι όσον αφορά τη ρύπανση και την κατανάλωση καυσίμου, ο μόνιμος μαγνήτης και

οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες έχουν περισσότερες δυνατότητες όπως λιγότερη ρύπανση, λιγότερη κατανάλωση καυσίμου και περισσότερη αναλογία ισχύος σε σχέση με την πυκνότητα, γεγονός που τους καθιστά ελκυστικούς στις εφαρμογές EV.

BIBΛIOΓPAΦIA

[1] Fei Teng, Yunfei Mu, Hongjie Jia, et al., *Challenges on primary frequency control and potential solution from EVs in the future GB electricity system*, *Appl Energy*, 194 (2017), pp. 353-362

[2] Bin Wang, Jun Xu, Binggang Cao, Bo Ning, *Adaptive mode switch strategy based on simulated annealing optimization of a multi-mode hybrid energy storage system for electric vehicles*, *Appl Energy*, 194 (2017), pp. 596-608

[3] Shuo Zhanga, Rui Xionga, *Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming*, *Appl Energy*, 155 (2015), pp. 67-78

[4] Hewu Wang, Xiaobin Zhang, Minggao Ouyang, *Energy consumption of electric vehicles based on real-world driving patterns: a case study of Beijing*, *Appl Energy*, 157 (2015), pp. 710-719

[5] Lishan Suna, Yuchen Huang, Shuli Liub, et al., *A complete survey study on the feasibility and adaptation of EVs in Beijing, China*, *Appl Energy*, 187 (2017), pp. 128-139

[6] Liang Lia, Xujian Lia, Xiangyu Wang, Jian Song, Kai He, Chenfeng Lia, *Analysis of downshift's improvement to energy efficiency of an electric vehicle during regenerative braking*, *Appl Energy*, 176 (2016), pp. 125-137

[7] A. Arroyo, M. Manana, C. Gomez, I. Fernandez, F. Delgado, Ahmed F. Zobaa, *A methodology for the low-cost optimisation of small wind turbine performance*, *Appl Energy*, 104 (2012), pp. 1-9

[8] Jemaa Brahmi, Lotfi Krichen, Abderrazak Ouali, *A comparative study between three sensorless control strategies for PMSG in wind energy conversion system*, *Appl Energy*, 86 (2009), pp. 1565-1573

[9] S.-Y. Jung, J. Hong, K. Nam, *Current minimizing torque control of the IPMSM using Ferrari's method*, *IEEE Trans Power Electron*, 28 (2013), pp. 5603-5617

- [10] Xiaoxu Zhang, Xiao Liu, Jinglin Liu, Zhe Chen, *Analytical investigation on the power factor of a flux-modulated permanent-magnet synchronous machine*, *IEEE Trans Magn*, 51 (2015), pp. 73-76
- [11] Wenliang Zhao, Thomas A. Lipo, Byung-Il Kwon, *Dual-stator two-phase permanent magnet machines with phase-group concentrated-coil windings for torque enhancement*, *IEEE Trans Magn*, 51 (2015), pp. 211-212
- [12] Shi-Uk Chung, Ji-Won Kim, Yon-Do Chun, Byung-Chul Woo, Do-Kwan Hong, *Fractional slot concentrated winding PMSM with consequent pole rotor for a low-speed direct drive: reduction of rare earth permanent magnet*, *IEEE Trans Energy Convers*, 30 (2015), pp. 103-109
- [13] Yong Liu, Chengde Tong, Jingang Bai, Shuang Yu, Weiming Tong, Fu Weinong, *Optimization of an 80 kW radial-radial flux compound-structure permanent-magnet synchronous machine used for HEVs*, *IEEE Trans Magn*, 47 (2011), pp. 2399-2402
- [14] W. Yuan, P.W. Shao, M.C. Shu, *Choice of pole spacer materials for a high-speed PMSM based on the temperature rise and thermal stress*, *IEEE Trans Appl Supercond*, 26 (2016), pp. 1109-1114
- [15] F. Thomas, H. Kay, *Design and optimization of an IPMSM with fixed outer dimensions for application in HEVs*, *IEEE international electric machines and drives conference, USA*, 3–6 (2009), pp. 887-892
- [16] Tiberiu Tudorache, Ion Trifu, *Permanent-magnet synchronous machine cogging torque reduction using a hybrid model*, *IEEE Trans Magn*, 48 (2012), pp. 2426-2437
- [17] F. Li, L.L. Guo, Q. Zhe, X.Y. Wen, *Analysis of eddy current loss on permanent magnets in PMSM with fractional slot*, *Industrial electronics and applications (ICIEA), Auckland, New Zealand*, 15–17, June 2015 (2015), pp. 1246-1250
- [18] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, T. Hirasu *Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives*, *IEEE Trans Ind Electron*, 41 (1994), pp. 511-517

- [19] J.O. Estima, A.J. Marques Cardoso, *Efficiency analysis of drive train topologies applied to electric/hybrid vehicles*, *IEEE Trans Veh Technol*, 61 (2012), pp. 1021-1031
- [20] C.T. Pan, S.M. Sue, *A linear maximum torque per ampere control for IPMSM drives over full-speed range*, *IEEE Trans Energy Convers*, 20 (2005), pp. 359-366
- [21] B. Stumberger, G. Stumberger, D. Dolinar, *Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor*, *IEEE Trans Ind Appl*, 39 (2003), pp. 1264-1271
- [22] S.Y. Jung, J. Hong, K. Nam, *Current minimizing torque control of the IPMSM using Ferrari's method*, *IEEE Trans Power Electron*, 28 (2013), pp. 5603-5617
- [23] Xiaofeng Ding, Min Du, Tong Zhou, et al., *Comprehensive comparison between Sic-mosfets and Si-igbts based electric vehicle traction systems under low speed and light load*, *Energy Proc*, 88 (2016), pp. 991-997
- [24] A. Castellazzi, A. Fayyaz, G. Romano, et al., *SiC power MOSFETs performance, robustness and technology maturity*, *Microelectron Reliab*, 58 (2016), pp. 164-176
- [25] I. Jeong, B.G. Gu, J. Kim, K. Nam, Y. Kim, *Inductance estimation of electrically excited synchronous motor via polynomial approximations by Least Square Method*, *IEEE Trans Ind Appl*, 51 (2015), pp. 1526-1537
- [26] A. Consoli, G. Scarcella, G. Scelba, A. Testa, *Steady-state and transient operation of IPMSMs under maximum-torque-per-ampere control*, *IEEE Trans Ind Appl*, 46 (2010), pp. 121-129
- [27] F. Reza, J.K. Mahdi, *High performance speed control of interior-permanent-magnet-synchronous motors with maximum power factor operations*, *IEEE Trans Ind Appl*, 3 (2003), pp. 1125-1128
- [28] M.N. Uddin, T.S. Radwan, M.A. Rahman, *Performance of interior permanent magnet motor drive over wide speed range*, *IEEE Trans Energy Conv*, 17 (2002), pp. 79-84

- [29] C. Cavallaro, A.O. Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G.R. Galluzzo, M. Trapanese, *Efficiency enhancement of permanent-magnet synchronous motor drives by online loss minimization approaches, IEEE Trans Ind Electron*, 52 (2005), pp. 1153-1160
- [30] M.N. Uddin, R.S. Rebeiro, *Online efficiency optimization of a fuzzy-logic-controller-based IPMSM drive, IEEE Trans Ind Appl*, 47 (2011), pp. 1043-1050
- [31] N. Urasaki, T. Senjyu, K. Uezato, *A novel calculation method for iron loss resistance suitable in modeling permanent-magnet synchronous motors, IEEE Trans Energy Convers*, 18 (2003), pp. 41-47
- [32] N. Urasaki, T. Senjyu, K. Uezato, *An accurate modeling for permanent magnet synchronous motor drives, 15th Annu IEEE APEC, USA, 6–10, Feb 2000 (2000), pp. 387-392*
- [33] S. Bolognani, L. Peretti, M. Zigliotto, E. Bertotto, *Commissioning of electromechanical conversion models for high dynamic PMSM drives, IEEE Trans Ind Electr*, 57 (2010), pp. 986-993
- [34] R.G. Ni, D.G. Xu, G.L. Wang, L. Ding, G.Q. Zhang, L.Z. Qu, *Maximum efficiency per ampere control of permanent-magnet synchronous machines, IEEE Trans Industr Electron*, 62 (2015), pp. 2135-2143
- [35] Xiaofeng Ding, Guanliang Liu, Min Du, Hong Guo, Chongwei Duan, Hao Qian, *Efficiency improvement of overall PMSM-inverter system based on artificial bee colony algorithm under full power range, IEEE Trans Magn*, 52 (2016), pp. 1-4
- [36] Chun Wang, Rui Xiong, Hongwen He, et al., *Efficiency analysis of a bidirectional DC/DC converter in a hybrid energy storage system for plug-in hybrid electric vehicles, Appl*
- [37] Xiaofeng Ding, Min Du, Tong Zhou, Hong Guo, Chengming Zhang, *Comprehensive comparison between silicon carbide MOSFETs and silicon IGBTs based traction systems for electric vehicles, Appl Energy*, 194 (2017), pp. 626-634

- [38] Xiaofeng Ding, Feida Chen, Min Du, Hong Guo, Suping Ren, *Effects of silicon carbide MOSFETs on the efficiency and power quality of a microgrid-connected inverter*, *Appl Energy*, 201 (2017), pp. 270-283
- [39] Drew Desilver, «*Today's electric vehicle market: Slow growth in U.S., faster in China, Europe*», *Climate, Energy & Environment*, Pew Research Center, 2021
- [40] Ford R. Bryan, "The Birth of Ford Motor Company", Henry Ford Heritage Association, retrieved August 20, 2012.
- [41] Z S Gelmanova, G Zhabalova, G A Sivyakova, O N Lelikova, O N Onishchenko, A Smailova and S N Kamarova, «*Electric cars. Advantages and disadvantages*», in *Journal of Physics: Conference Series*, vol.1015, 2018.
- [42] H O Hardenberg, *The Oldest Precursor of the Automobile: Ferdinand Verbiest's Steam Turbine-powered Vehicle Model* (Society of Automotive Engineers, 1995).
- [43] L.A. Manwaring, *The Observer's Book of Automobiles* (12th edition), Library of Congress Catalog Card #62-9807, page 7, 1966.
- [44] James Larminie, John Lowry, «*Electric Vehicle Technology Explained*», second edition, 2012.
- [45] Ivan Mahalec, Zoran Lulic, Ivan Mavrin, «*Traffic- Croatia Facing the Global Issues*» in *Traffic and Human Environment Review*, Vol. 13, pages 211-221, 2001.
- [46] Mercedes-Benz AG (Hrsg.), *Benz & Cie.: Zum 150. Geburtstag von Karl Benz*, Motorbuch Verlag: Stuttgart, 1994 1. Aufl. 296 S., 492 Abb., 124 in Farbe, ISBN 3-613-01643-5, (German) (biography).
- [47] Maria Niestadt with Amalie Bjørnåvold Members Research Service, «*Electric road vehicles in the European Union Trends, impacts and policies*», *European Parliamentary Research Service*, 2019.
- [48] Statista Research Department, «*Electric vehicles in Asia Pacific - statistics & facts*», *Transportation & Logistics, Vehicles & Road Traffic*, 2021.

[49] Targonya A., Khmeluk A., Bankovskaya I, « *Electric Cars: Advantages and Disadvantages*», *Belarusian National Technical University Minsk, Belarus, 2019.*

[50] Βουγιουκλάκης Παναγιώτης & Κοντογιώργης Μιχαήλ, Πτυχιακή Εργασία με θέμα «*Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο*», *ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, 2012.*

[51] Ψαρράς Ευθύμιος, Πτυχιακή Εργασία με τίτλο «*Η Διαχρονική Εξέλιξη των Φορέων των Επιβατικών Αυτοκινήτων*», *Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Πάτρα 2016.*

[52] *Key world energy statistics, International Energy Agency (2008)*

[53] *Buying an energy efficient electric motor. Fact Sheet, Motor challenge program. U.S. Department of Energy.*

[54] *Summary report for motor and its energy efficiency standards, China National Institute of Standardization, CNIS (May 2004)*

[55] A.M. Knight, C.I. McClay, *The design of high-efficiency line-start motors, IEEE Trans Ind Appl, 36 (2000), pp. 1555-1562*

[56] M. Akbaba, *Energy conservation by using energy efficient electric motors, J Appl Energy, 64 (1999), pp. 149-158*

[57] *Evaluation of the U.S. department of energy motor challenge program, Technical Report, U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies (2000) Available from: http://www.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/mceval1_2.pdf*

[58] <http://www.motor-challenge.eu>.

[59] F.W. Merrill, *Permanent magnet excited synchronous motors, AIEE Trans, 74 (1955), pp. 1754-1760*

[60] Modeer T. *Modeling and testing of line start permanent magnet motors. Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden; 2007.*

[61] C.M. Ong, *Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink*, Prentice Hall PTR (1998)

[62] *Final Draft Int. Standard, IEC 60034-30 Ed.1, UK; 2008.*

[63] Sun W. *High efficiency machine evaluation with SPEED. M.Sc. thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden; Sept 2008.*

[64] *The effect of repair/rewinding on motor efficiency, Electrical Apparatus Service Association/Association of Electrical and Mechanical Trades, St. Louis, MO (2003)*

[65] *Reducing power factor cost. Fact Sheet, Motor challenge program. U.S. Department of Energy.*

[66] <http://www.teces.si/prikazi.asp?vsebina=info%2Fobvestilo.asp&id=123&jezik=1033>

[67] *Synchronous permanent magnet motor LSRPM aluminum housing, Product technical catalogue, 4173en-122007/b. Available from: <http://www.loreysomer.com>.*

[68] T. Marcic, G. Stumberger, B. Stumberger, M. Hadziselimovic, P. Vrtic, *Determining parameter of a line-start interior permanent magnet synchronous motor model by the differential evolution, IEEE Trans Magn, 44 (2008)*

[69] Walt Benecki. *Magnetics industry overview: 2004 China magnet symposium highlights recent industry trends. Technical report; 2004. Available from: <http://www.waltbenecki.com>.*

[70] Yang G, Ma J, Shen J, Wang Y. *Optimal design and experimental verification of a line-start permanent magnet synchronous motor. In: Proceedings of International Conference on Electrical machines and systems, ICEMS, Beijing, China, 9–11 October 2008*

[71] M.M. Oskounejad, *Engineering economy or economic evaluation of industrial projects, Amirkabir University of Technology Press (2006)*

[72] Fassbinder S. Saving energy with high-efficiency motors. Briefing paper, Leonardo Energy; Sept 2007. Available from: <http://www.leonardo-energy.org>.

[73] F. Libert, J. Souldard, J. Engström, Design of a 4-pole line start permanent magnet synchronous motor, Proceedings of international conference on electrical machines, ICEM (Aug 2002), pp. 1166-1171

[74] K. Kiurihara, M.A. Rahman, High-efficiency line-start interior permanent magnet synchronous motors, IEEE Trans Ind Appl, 40 (2004), pp. 789-796

[75] M.A. Rahman, T.A. Little, Dynamic performance analysis of permanent magnet synchronous motors, IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-103 (1984), pp. 1277-1282

[76] B.Y. Yang, B.I. Kwon, C.K. Lee, K.I. Woo, B.T. Kim, Comparison of dynamic characteristics of the line start permanent magnet motor and the induction motor, KIEE Int Trans EMECS, 2-B (2002), pp. 90-94

[77] T.J.E. Miller, Synchronization of line-start permanent-magnet ac motors, IEEE Trans Power Appar Syst, PAS-103 (1984), pp. 1822-1828

[78] V.B. Honsinger, Permanent magnet machines: asynchronous operation, IEEE Trans Power Appar Syst, PAS-99 (1980), pp. 1503-1509

[79] M.A. Rahman, A.M. Osheiba, T.S. Radwan, Synchronization process of line-start permanent magnet synchronous motors, Electric machine and power systems, vol. 25 (1997), pp. 577-592

[80] M.A. Rahman, A.M. Osheiba, Parameter sensitivity analysis for line-start permanent magnet motor, Electric machine and power systems, vol. 14 (1988) pp. 195-212

[81] M. Popescu, T.J.E. Miller, M. McGilp, G. Strappazon, N. Trivillin, R. Santarossa, Line-start permanent-magnet motor: single-phase starting performance analysis, IEEE Trans Ind Appl, 39 (2003), pp. 1021-1030

[82] B. Kim, Y. Kim, D. Kim, Analysis of squirrel cage effect in single phase LSPM, KIEE Int Trans EMECS, 4-B (4) (2004), pp. 190-195

[83] M. Popescu, T.J.E. Miller, M. McGilp, G. Strappazon, N. Trivillin, R. Santarossa, *Asynchronous performance analysis of a single-phase, capacitor-start, capacitor-run permanent magnet motor*, *IEEE Trans Energy Conv*, 20 (2005), pp. 142-150

[84] M. Popescu, T.J.E. Miller, M. McGilp, G. Strappazon, N. Trivillin, R. Santarossa, *Torque behaviour of one-phase permanent magnet ac motor*, *IEEE Trans Energy Conv*, 21 (2006), pp. 19-26

[85] Bingyi Z, Wei Z, Fuyu Z, Guihong F. *Design and starting process analysis of multi polar line start PMSM*. In: *Proceedings of International Conference on Electrical machines and systems*, Seoul, Korea, 8–11 Oct, 2007. pp. 1629–34.

[86] Bingyi Z, Bingxue L, Guihong F, Fuyu Z. *Starting performance analysis of single phase line-start permanent magnet motor*. In: *Proceedings of IEEE International conference on Mechatronics and Application*, Harbin, China, 5–8 Aug, 2007, pp. 2883–8.

[87] Soulard J, Nee HP. *Study of the synchronization of line-start permanent magnet synchronous motors*. In: *Proceedings of Industry application conference*, 8–12 Oct 2000. pp. 424–31.

[88] Lefevre L, Soulard J. *Finite element transient start of a line-start permanent magnet synchronous motor*. In: *Proceedings of International Conference on Electrical Machines*, ICEM Aug 2000. pp. 1564–8.

[89] T. Marcic, G. Stumberger, B. Stumberger, M. Hadziselimovic, P. Virtic, D. Dolinar *Line-starting three- and single-phase interior permanent magnet synchronous motors—direct comparison to induction motors* *IEEE Trans Magn*, 44 (2008)

[90] Ding T, Takorabet N, Sargos FM. *Design and analysis of different line-start PM synchronous motors for oil-pump applications*. In: *Proceedings on Electromagnetic Field Computation, 2008 13th Biennial, IEEE Conference*, Athen, Greek, 11–15 May, 2008. p. 356.

[91] Takahashi A, Kikuchi S, Miyata K, Wakui S, Mikami H, Ide K, et al. *Transient torque analysis of line-starting permanent-magnet synchronous motor*. In:

International Conference on electrical machine, ICEM, Vilamoura, Portugal, 6–9 Sept 2008.

[92] Kim BT, Kwon BI. *Influence of space harmonics on starting performance of 1-phase line start permanent magnet motor. In: Proceedings on Electromagnetic Field Computation, 2006 12th Biennial IEEE Conference on 2006. p 387.*

[93] M. Popescu, T.J.E. Miller, M.I. McGilp, F.J.H. Kalluf, C. daSilva, L. von Dokonal *Effect of winding harmonics on the asynchronous torque of a single-phase line-start permanent-magnet motor IEEE Trans Ind Appl, 42 (2006), pp. 1014-1023*

[94] Stening A, Sadarangani C. *The effects of inter-bar currents in cast aluminium and cast copper rotors. International Conference on Electricalmachines, ICEM; 2008.*

[95] C.K. Lee, B.I. Kwon *Design of post-assembly magnetization system of line start permanent magnet motors using FEM IEEE Trans Magn, 41 (2005), pp. 1928-1931*

[96] C.K. Lee, B.I. Kwon, B.T. Kim, K.I. Woo, M.G. Han *Analysis of magnetization of magnet in the rotor of line start permanent magnet motorIEEE Trans Magn, 39 (2003), pp. 1928-1931*

[97] E. Richter, T.J.E. Miller, T.W. Neumann, T.L. Hudson *The ferrite permanent magnet ac motor – a technical and economical assessment IEEE Trans Ind Appl, IA-21 (1985), pp. 644-650 View Record in ScopusGoogle Scholar*

[98] James S. Smith, Andrew P. Watson. *Design, manufacture, and testing of a high speed 10 MW permanent magnet motor and discussion of potential applications. In: Proceedings of 35th Turbomachinery symposium, Texas, US; 2006. pp. 19–24.*

[99] <http://www.toyodenki.co.jp>.

[100] T. Yoshioka and H. Sugita, “Noise and vibration reduction technology in hybrid vehicle development,” SAE, New York, SAE Tech. Paper 2001-01-1415, 2001.

[101] K. Moriya, Y. Ito, Y. Inaguma, and E. Sato, “Design of the surge control method for electric vehicle powertrain,” presented at the Future Car Congr., Arlington, VA, Jun. 3–5, 2002, Paper 2002-01-1935.

- [102] M. A. Rahman and R. Qin, "A permanent magnet hysteresis hybrid synchronous motor for electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 1, pp. 46–53, Feb. 1997.
- [103] K. J. Binns, B. Sneyers, G. Maggetto, and P. Lataire, "Rotor-position controlled permanent magnet synchronous machines for electrical vehicles," in *Proc. ICEM'80*, 1980, pp. 346–357.
- [104] B. Sneyers, G. Maggetto, and J. L. VanEck, "Inverter fed permanent magnet synchronous motor road electric traction," in *Proc. ICEM'82*, 1982, pp. 550–553.
- [105] V. Alexander and B. Marc, "Torque maximization for permanent magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 6, no. 6, pp. 740–745, Nov. 1998.
- [106] C. French and P. Acarnley, "Direct torque control of permanent magnet drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 5, pp. 1080–1088, Sep./Oct. 1996
- [107] Yaohua Li, Dieter Gerling: submitted to the 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, 2010.
- [108] Estima, J.O., Cardoso, A.J.M.: submitted to 2010 XIX Inter-national Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1-6, 6-8, Sept. 2010.
- [109] M.S. Merzoug, F. Nacéri: submitted to World Academy of Science, Engineering and Technology, vol.45, pp. 299-304, 2008.
- [110] Rong Chen, *PMSM Control System*, Beijing: China WaterPower Press, 2009.
- [111] Wenjuan Zhang, Shoudao Huang: submitted to the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, vol. 11, no. 13, pp. 1-5, 2011.
- [112] Nanfang Yang, Guangzhao Luo, Weiguo Liu, Kang Wang: submitted to IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 1015-1019, 2012.

- [113] Changhong Li, Mingjun Chen, Xiaoyi Wu: submitted to proceedings of the CSEE, vol. 25, no. 21, pp. 169-174, 2005.
- [114] Shoudao Huang, Ziqiang Chen, Keyuan Huang, Jian Gao: submitted to IEEE VPPC, pp. 1-5, 2010.
- [115] P. Vaclavek, P. Blaha: submitted to the 2008 SICE Annual Conference, pp. 753-757, 2008.
- [116] Liang Chu, Feikun Zhou, Jianhua Guo, Liang Yao: submitted to 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), pp. 1601-1604, 2011.
- [117] Takahashi I, Noguchi T: submitted to IEEE Transactions on Industry Application, vol. 22, no. 5, pp. 820-827, 1988.
- [118] Depenbrock M: submitted to Power Electronics Specialist Conference in Germany, pp. 632-641, 1987.
- [119] Denpenbrock M: submitted to IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 3, no. 4, pp. 420-429, 1989.
- [120] French C, Acarnley P: submitted to IEEE Trans on IA, vol. 32, no. 5, pp. 1080-1088, 1996.
- [121] L Zhong, Rahman M F, W Y Hu: submitted to IEEE Trans on PE, vol. 12, no. 3, pp. 528-536, 1997.
- [122] Chengyuan Wang, Jiakuan Xia, Junyou Yang, et al., Motor modern control technology, Beijing: China Machine Press, 2006.
- [123] Xianhong Li, Haibin Yu, Minzhe Yuan: submitted to International Conference on Information Engineering and Computer Science, pp. 1-5, 2009.
- [124] Haibing Hu, Qingbo Hu, Zhengyu Lu: submitted to Journal of Zhejiang University (Engineering Science), vol. 40, no. 12, pp. 2144-2148, 2006.

[125] Chikh K, Saad A, Khafallah M, Yousfi D: submitted to *Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, pp. 1-7, 2011.

[126] Jong-Woo Choi, Sang-Cheol Lee: submitted to *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 2039-2046, 2009.

[127] Limei Wang, Mingxiu Tian, Yanping Gao: submitted to *IEEE International Conference on Electric Machines & Drives*, vol. 1, pp. 860-863, 2007.

[128] R Kumar, R A Gupta, B Singh: submitted to *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 2055-2060, 2006.

[129] Lixiong Lin, Xiafu Peng: submitted to the *5th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE)*, pp. 1174-1178, 2010.

[130] T S Raaj Bharath, D P Winston, M. Saravanan: submitted to *International Conference on Computing and Control Engineering*, 2012.

[131] Hongzhang Liu, Shijun Chen, Hui Cao: submitted to the *2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, pp. 687-689, 2012.

[132] Junli Gao, Yingfan Zhang: submitted to *proceedings of 2nd International Conference on Information Science and Engineering (ICISE)*, pp. 5251-5254, 2010.

[133] Underwood, S.J., Husain, I.: submitted to *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2435-2443, 2010.

[134] Maolin Wu, Shenghua Huang: submitted to *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. 24, no. 8, pp. 65-68, 2009.

[135] J Zhou, Y Wang: submitted to *IEEE Proceedings, Part B, Electric Power Applications*, vol. 149, no. 2, pp. 165-172, 2002.

[136] Yaguang Chen, Shuangyuan Zhao: submitted to *Journal of Benxi College of Metallurgy*, vol. 4, no. 4, pp. 28-31, 2002.

[137] Coman S, Comnac V, Boldisor C: submitted to 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. 594-599, 2012.

[138] Li Niu, Ming Yang, Keshu Liu: submitted to Proceedings of the CSEE, vol. 32, no. 6, pp. 131-137, 2012.

[139] Haokun Wang, Qunli Shang: submitted to Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, no. 12, pp. 43-45, 2007.

[140] Yunhong Zhang, Wei Xu, Xianyong Xiao, Cengbi Zeng, Jianguo Zhu: submitted to International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), pp. 169-174, 2011.

[141] Kuang-Yao Cheng, Ying-Yu Tzou: submitted to IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1085-1099, 2004.

[142] Chunyan Zhang, Reserch for PMSM adaptive fuzzy control method, Tianjin University, 2008.

[143] Xianqing Cao, Jianguang Zhu, Renyuan Tang: submitted to Proceedings of the CSEE, vol. 26, no. 1, pp. 137-141, 2006.

[144] Chuanyu Song: submitted to Electric Machines & Control Application, vol. 35, no. 6, pp. 24-26, 2008.

[145] Yu Ren, Chengyao Zhao: submitted to the 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, pp. 123-126, 2010.

[146] Bianchi, N., Bolognani, S. (1997). Parameters and VoltAmpere Ratings of a Synchronous Motor Drive for Fluxweakening Applications. IEEE Transactions on Power Electronics, 12(5): 895-903.

[147] Cao, Y.X. (2015). Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Parameter Matching and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicle. M.S. thesis, Jilin University, 2015.

[148] Chu, L., Yin, J.K., Yao, L. et al. (2011). The Method for Matching the PMSM's Base Parameters of the Hybrid Electric Vehicle Based on Drive Cycle. 11th

International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), Harbin, China.

[149] Fei, D.C. (2008). *The Optimization Design of Permanent Magnet Synchronous Motors and System Performance Analysis of HEV. Ph.D. thesis, Jiangsu University.*

[150] Guo, X.H., Wen, X.H., Zhao, F. et al. (2008). *Power Parameters Matching Design of Dual Mechanical Ports Electric Machine with Clutch Applied in Hybrid Electric Vehicle. 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China.*

[151] Han, H., Cao, Z.Q., Hu, Y.F. et al. (2014). *Path Recognition Algorithm of Tracking Robots Based on Image Sensor. Journal of Donghua University (English Edition), 31(2): 137-140.*

[152] Kamiev, K., Montonen, J., Ragavendra, M.P. et al. (2013). *Design Principles of Permanent Magnet Synchronous Machines for Parallel Hybrid or Traction Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(11): 4881-4890.*

[153] Kamiya, M. (2006). *Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System. IEEE Transactions on Industry Applications, 126(4): 473-479.*

[154] Kim, J.M., Sul, S.K. (1997). *Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux Weakening Operation. IEEE Transactions on Industry Applications, 33(1): 43-48*

[155] Krishnan, R. (2010). *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. CRC Press/Taylor & Francis, New York.*

[156] Marano, V., Tulpule, P., Stockar, S. et al. (2009). *Comparative Study of Different Control Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. SAE Technical Paper.*

[157] Mehta, H., Joshi, V., Thakar, U. et al. (2015). *Speed Control of PMSM with Hall Sensors Using DSP TMS320F2812. 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Sydney, Australia.*

[158] Poullikkas, A. (2015). *Sustainable Options for Electric Vehicle Technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 1277-1287.

[159] Ruschetti, C., Verucchi, C. Bossio, G., et al. (2013). *Rotor Demagnetization Effects on Permanent Magnet Synchronous Machines*. *Energy Conversion and Management*, 74: 1-8.

[160] Su, J.L., Zhang, S.Y., Ji, X.J. et al. (2006). *Comparison between SVPWM and SPWM in PMSM Control System*. *Journal of Xi'an University of Arts & Science (Natural Science)*, 2: 55-58.

[161] Tian, D.W., Ma, Y.Q., Zou, Y. (2013). *Research on Parameters Matching Methodology of Electric Vehicle Driving Motor*. *Vehicle & Power Technology*, 3: 11-14.

[162] Wang, W. (2010). *Study on the Parameter Matching, Coordinated Control and Performance Evaluation of Hybrid Electric Vehicle Permanent Magnet Synchronous Motor*. Ph.D. thesis, Jilin University. (in Chinese)

[163] Wen, D.S., Cai, Q.X., Ma, H.S. et al. (2013). *Output Speed and Torque of Differential Double-Stator Swing Hydraulic Multi-motors*. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 30(6): 487-493.

[164] Xu, K., Qiu, B. (2012). *Optimized Parameter Matching Method of Plug-in Series Hybrid Electric Bus*. 2012 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), Beijing, China.

[165] Yuan, Z.S. (2013). *Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for New Energy Vehicle Drive System*. M.S. thesis, Harbin Institute of Technology.

[166] Zhang, C., Wang, X.J., Yi, P. et al. (2013). *Comparative Simulation Study between SVPWM and SPWM*. *Machinery & Electronics*, 1: 3-7. (in Chinese)

[167] Zhou, W.P., Wu, Z.G., Tang, J.S. et al. (2006). *A Novel Algorithm of SVPWM and the Study on the Essential Relationship between SVPWM and SPWM*. *Proceedings of the CSEE*, 2: 133-137.

[168] A. F. Fatimah F.Jaber, «Mathematical Model of Permanent Magnet Synchronous Motor,» p. 5, December 2022.