



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Συγκριτική Ανάλυση των Ηλεκτρικών Μηχανών σε Εφαρμογές Μεταφοράς

Φοιτητής: Πατσάκης Παναγιώτης
ΑΜ: (51204162)

Επιβλέπων/ουσα Καθηγητής
Πέτρος Καραϊσάς
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, (ΙΟΥΝΙΟΣ) (2024)



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Comparative Analysis of Electric Motors in Transportation Applications

Student: Patsakis Panagiotis
Registration Number: 51204162

Supervisor
Petros Karaisas
Associate professor

ATHENS-EGALEO, (JUNE) (2024)

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

(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)	(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)	(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Πατσάκης Παναγιώτης 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς 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 Πατσάκης Παναγιώτης του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 51204162 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

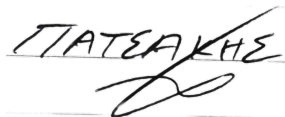
δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«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 επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο/Η Δηλών/ούσα
Πατσάκης Παναγιώτης



Η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη και καθοδήγηση του Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών κ. Πέτρου Καραϊσά. Τον ευχαριστώ θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του, που υπήρξαν καθοριστικές για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμμαθητές και συναδέλφους μου για την συνεχή υποστήριξη. Η βοήθειά τους ήταν ανεκτίμητη και συνέβαλε σημαντικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία γίνεται συγκριτική ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών σε εφαρμογές μεταφοράς μέσω της ανάλυσης των κατηγοριών ηλεκτρικών μηχανών, των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε κατηγορίας και της καταλληλότητας ανά εφαρμογή μεταφοράς. Αρχικά, στο κεφάλαιο 1 γίνεται εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές σε εφαρμογές μεταφοράς μέσω μιας ιστορικής αναδρομής στην ηλεκτροκίνηση και τις ηλεκτρικές μηχανές. Περιγράφονται οι σημαντικότερες εφαρμογές μεταφορών ενώ αναλύεται και η δομή των σύγχρονων ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται περιγραφή των ηλεκτρικών μηχανών. Αρχικά, αναλύονται οι μηχανές συνεχούς ρεύματος ανά κατηγορία, ως προς την δομή τους, την αρχή λειτουργίας και τις χαρακτηριστικές λειτουργίες τους. Αναλύονται τα ισοδύναμα κυκλώματα και οι εξισώσεις λειτουργίας. Αναφέρονται πλεονεκτήματα καθώς και μειονεκτήματα των συγκεκριμένων μηχανών. Έπειτα, γίνεται ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, που αποτελούν την κυριότερη κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών σήμερα. Αρχικά, γίνεται ανάλυση των ασύγχρονων ή επαγωγικών ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την δομή τους, αναλύεται η αρχή λειτουργίας τους, τα χαρακτηριστικά τους και οι εφαρμογές τους. Εξάγονται τα ισοδύναμα κυκλώματα και οι χαρακτηριστικές λειτουργίες ενώ αναφέρονται και τρόποι ελέγχου της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων, που αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες κινητήρων σε εφαρμογές μεταφορών. Στη συνέχεια, αναλύονται οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Παρόμοια με τις επαγωγικές μηχανές, γίνεται ανάλυση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών τους, της αρχής λειτουργίας και των κατηγοριών ανάλογα με τα παραπάνω. Αναλύεται το ισοδύναμο κύκλωμα, η χαρακτηριστική λειτουργίας και η δομή ελέγχου τους μέσω κλειστού βρόχου.

Το κεφάλαιο 3 αποτελεί την ουσία της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, καθώς γίνεται σύγκριση των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται σε μέσα μεταφοράς ανά κατηγορία εφαρμογής. Πρώτα, καθορίζονται μερικές από τις σημαντικότερες παραμέτρους των ηλεκτρικών μηχανών για την σύγκριση αυτών, όπως η απόδοση, οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας κ.α. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των ηλεκτρικών μηχανών σε εφαρμογές μεταφορών στην αυτοκινητοβιομηχανία με βάση την υπάρχουσα τεχνολογία καθώς και τις τάσεις σήμερα. Στην συνέχεια ακολουθά σύγκριση στις σιδηροδρομικές εφαρμογές, στις εφαρμογές μικρό-κινητικότητας, αεροπλοΐας, και τέλος των θαλάσσιων μεταφορών. Γίνεται σύγκριση των σημαντικότερων κατηγοριών που χρησιμοποιούνται σε κάθε εφαρμογή με βάση τις υποκατηγοριών μέσω μεταφοράς και τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει η κάθε μία. Αναλύονται χαρακτηριστικά κάθε τομέα μεταφορών και των ηλεκτρικών μηχανών που αποτελούν την καλύτερη επιλογή. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των ηλεκτρικών μηχανών με βάση τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κάθε κατηγορίας. Τέλος, επισημαίνονται οι απαιτήσεις συντήρησης καθώς και τα πιθανά σφάλματα ανά κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών.

Στο κεφάλαιο 4 προσομοιώνονται με τη βοήθεια του Simulink ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες, ο ασύγχρονος επαγωγικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος και ο αυτοελεγχόμενος σύγχρονος κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος, προκειμένου να μελετηθούν και να συγκριθούν ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Μέσω των συμπερασμάτων, εξάγονται τόσο πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας, όσο και μελλοντικές τάσεις των ηλεκτρικών μηχανών σε εφαρμογές μεταφοράς.

Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα και οι προοπτικές των ηλεκτρικών μηχανών σε εφαρμογές μεταφορών. Αναλύονται οι βασικές διαπιστώσεις που προκύπτουν από τη σύγκριση των διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών μηχανών, καθώς και οι μελλοντικές τάσεις και οι πιθανές εφαρμογές τους. Εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι απαιτήσεις συντήρησης και η αξιοπιστία των ηλεκτρικών μηχανών, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα για την τρέχουσα και μελλοντική χρήση τους στις μεταφορές.

Λέξεις – κλειδιά

Ηλεκτρικές Μηχανές, Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος, Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος, Σύγκριση, Αυτοκινητοβιομηχανία, Σιδηροδρομικές Εφαρμογές, Μικρο-Κινητικότητα, Αεροπλοΐα, Θαλάσσιες Μεταφορές.

Abstract

In this thesis, a comparative analysis of electrical machines in transport applications is done through the analysis of the categories of electrical machines, the advantages and disadvantages of each category and the suitability for each transport application. At first, chapter 1 introduces electrical machines in transportation applications through a historical overview of electric propulsion and electrical machines. The most important transport applications are described while the structure of modern electric propulsion systems is also analyzed.

Chapter 2 describes electrical machines. At first, DC machines are analyzed by category, in terms of their structure, operating principle and operating characteristics. Equivalent circuits and operating equations are analyzed. Advantages and disadvantages of the specific machines are mentioned. Afterward, an analysis is made of alternating current electrical machines, which are the main class of electrical machines today. First, asynchronous or induction AC electric machines are analyzed. They are categorized according to their structure, their principle of operation, their characteristics and their applications are analyzed. Equivalent circuits and characteristic functions are extracted, while ways to control the speed of induction motors, which are one of the most important categories of motors in transport applications, are mentioned. Next, synchronous alternating current electrical machines are analyzed. Similar to induction machines, an analysis of their manufacturing characteristics, operating principle and categories according to the above. Their equivalent circuit, operating characteristic and closed-loop control structure are analyzed.

Chapter 3 constitutes the essence of this particular thesis, as a comparison is made of the electrical machines used in means of transportation by application category. First, some of the most important parameters of electric motors are determined for their comparison, such as efficiency, torque-speed characteristics, etc. Then a comparison is made on electrical machines in transportation applications in the automotive industry based on existing technology as well as trends today. Then follows a comparison in railway applications, micro-mobility applications, aviation, and finally maritime transport. A comparison is made of the most important categories used in each application based on the subcategories of means of transport and the particularities presented by each one. Characteristics of each transport sector and the electric machines that are the best choice are analyzed. In addition, electric machines are compared based

on the environmental impact of each category. Finally, the maintenance requirements are highlighted as well as the possible faults per category of electric machines.

In Chapter 4, with the help of Simulink, the brushless DC motor, the asynchronous AC induction motor, and the self-controlled synchronous AC motor are simulated in order to study and compare their operational characteristics. Through the conclusions, both potential future extensions of the present work and future trends of electric machines in transportation applications are derived.

In Chapter 5, the final conclusions and prospects of electric machines in transportation applications are presented. The key findings from the comparison of different types of electric machines are analyzed, as well as future trends and potential applications. The environmental impacts, maintenance requirements, and reliability of electric machines are examined, providing a comprehensive overview of their current and future use in transportation.

Keywords

Electrical Machines, DC Machines, AC Machines, Comparison, Automotive, Railway Applications, Micro-Mobility, Aviation, Maritime Transport.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	11
Κατάλογος Εικόνων	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	15
Σκοπός και στόχοι	15
Μεθοδολογία	16
Καινοτομία	16
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΤΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.	17
1.1 Ιστορία της Ηλεκτρικής Μηχανής	17
1.2 Ηλεκτροκίνηση	19
1.3 Εφαρμογές Ηλεκτρικών Κινητήρων στα Μέσα Μεταφοράς	20
1.4 Δομή Ηλεκτρικών Κινητηρίων Συστημάτων	23
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	25
2.1 Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος	25
2.1.1 Κατασκευαστικά Στοιχεία Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος	25
2.1.2 Κατηγοριοποίηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος	28
2.2 Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος	35
2.2.1 Επαγωγικές (Ασύγχρονες) Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος	35
2.2.2 Σύγχρονες Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος	43
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	50
3.1 Παράμετροι Σύγκρισης Ηλεκτρικών Μηχανών σε Εφαρμογές Μεταφοράς	50
3.2 Ηλεκτρικές Μηχανές στην Αυτοκινητοβιομηχανία	50
3.3 Ηλεκτρικές Μηχανές σε Σιδηροδρομικές Εφαρμογές	54
3.4 Ηλεκτρικές Μηχανές σε Εφαρμογές Μικρό-Κινητικότητας	55
3.5 Ηλεκτρικές Μηχανές σε Εφαρμογές Αεροπλοΐας	57
3.6 Ηλεκτρικές Μηχανές σε Εφαρμογές Θαλάσσιων Μεταφορών	58
3.7 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	61
3.8 Αξιοπιστία, Συντήρηση και Διάγνωση Σφαλμάτων Ηλεκτρικών Μηχανών	67
4 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	73
4.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτες	73
4.2 Ασύγχρονος επαγωγικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος	80
4.3 Αυτοελεγχόμενος σύγχρονος κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος	84
4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων προσομοιώσεων	87
5 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	88
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	90

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Μοντέλα Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων, Χρονολογία, Τύπος Αυτοκινήτου και Χρησιμοποιούμενος Ηλεκτρικός Κινητήρας [5]

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικών Κινητήρων DC, Επαγωγικών Κινητήρων και Σύγχρονων Κινητήρων Μόνιμου Μαγνήτη για εφαρμογές αυτοκίνησης [5]

.....

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Ο ηλεκτρικός κινητήρας του Jacobi (Wikipedia)

Εικόνα 2. Εικόνα από πατέντα ηλεκτρικού κινητήρα του Νικόλα Τέσλα.

Εικόνα 3. Σύγχρονη μορφή ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Εικόνα 4. Ηλεκτροκίνητο λεωφορείο (ΟΑΣΘ)

Εικόνα 5. Σύγχρονο Ηλεκτρικό Τρένο

Εικόνα 6. Μορφές Μικρό-Ηλεκτροκίνησης

Εικόνα 7. Ηλεκτρικό Σκάφος Αναψυχής

Εικόνα 8. Ηλεκτρικό αεροπλάνο ‘Alice’

Εικόνα 9. Δομή Σύγχρονου Ηλεκτρικού Κινητηρίου Συστήματος

Εικόνα 10. Στάτης και Δρομέας Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Εικόνα 11. Στάτης Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Εικόνα 12. Σύστημα Συλλέκτη-Ψηκτρών Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Εικόνα 13. Τύλιγμα Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Εικόνα 14. Κλάσεις μονώσεων και οι μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες λειτουργίας τυλιγμάτων Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Εικόνα 15. Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 16. Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος Ανεξάρτητης Διέγερσης. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 17. Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Ανεξάρτητης Διέγερσης. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 18. Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος Παράλληλης Διέγερσης. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 19. Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος με διέγερση σειράς. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 20. Χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με διέγερση σε σειρά. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 21. Χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με σύνθετη διέγερση. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 22. Χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με σύνθετη διέγερση. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 23. Δομή κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη

Εικόνα 24. Στάτης Επαγωγικής Μηχανής

Εικόνα 25. Δρομέας Βραχυκυκλωμένου Κλωβού Επαγωγικής Μηχανής

Εικόνα 26. Δακτυλιοφόρος Δρομέας Επαγωγικής Μηχανής

Εικόνα 27. Ισοδύναμο Κύκλωμα Επαγωγικής Μηχανής

Εικόνα 28. Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας Επαγωγικής Μηχανής. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 29. Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας επαγωγικής μηχανής με μεταβολή της συχνότητας. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 30. Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας Επαγωγικής Μηχανής με μεταβολή της τάσης. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 31. Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας Επαγωγικής Μηχανής για μεταβολή της αντίστασης δρομέα δακτυλιοφόρου δρομέα. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 32. Κυλινδρικός Δρομέας Σύγχρονης Μηχανής

Εικόνα 33. Δρομέας Έκτυπων Πόλων Σύγχρονης Μηχανής

Εικόνα 34. Σχηματικό διάγραμμα διέγερσης Σύγχρονης Μηχανής χωρίς ψήκτρες.

Εικόνα 35. Τοπολογίες δρομέων Σύγχρονης Μηχανής με μόνιμους μαγνήτες

Εικόνα 36. Σύγχρονες Μηχανές Μαγνητικής Αντίδρασης

Εικόνα 37. Ηλεκτρική μηχανή ακτινικής ροής (αριστερά) και αξονικής ροής(δεξιά)

Εικόνα 38. Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Γεννήτριας. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 39. Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονου Κινητήρα. (Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals).

Εικόνα 40. Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας Σύγχρονου Κινητήρα.(Hughes, A. L. (1990). Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types, and applications.)

Εικόνα 41. Σχήμα ελέγχου κλειστού βρόχου Σύγχρονου Κινητήρα

Εικόνα 42. Χαρακτηριστικής Ροπής-Ταχύτητας Σιδηροδρομικών εφαρμογών

Εικόνα 43. Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών κινητήρων για σιδηροδρομικές εφαρμογές

Εικόνα 44. Σύγχρονος Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη, ενσωματωμένος σε ρόδα (in-wheel application).

Εικόνα 45. Τοπολογία οδήγησης Σύγχρονης Μηχανής με ανοχή σε σφάλματα

Εικόνα 46. Χαρακτηριστικά λειτουργίας διαφορετικών μηχανών για εφαρμογές αεροπλοΐας

Εικόνα 47. Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος στο πλοίο USS Glacier του πολεμικού ναυτικού των ΗΠΑ

Εικόνα 48. Σύστημα πρόωσης επιβατηγών πλοίων

Εικόνα 49. Σύστημα πρόωσης πλοίων διεξαγωγής γεωτρήσεων

Εικόνα 50. Συγκριτική ανάλυση ηλεκτροκίνητων οχημάτων, υβριδικών οχημάτων και συμβατικών οχημάτων εσωτερικής καύσης υπό την σκοπιά των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.(Oğuz, S. (2023, October 10). Life Cycle Emissions: EVs vs. Combustion Engine Vehicles. Elements by Visual Capitalist.

<https://elements.visualcapitalist.com/life-cycle-emissions-of-electric-hybrid-and-combustion-engine-vehicles/>)

Εικόνα 51. Σύγκριση Επαγωγικών Μηχανών, Σύγχρονων Μηχανών Μαγνητικής Αντίδρασης και Σύγχρονων Μηχανών Μαγνητικής Αντίδρασης υποβοηθούμενων από μόνιμους μαγνήτες κατά τα στάδια παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, χρησιμοποίησης και τέλους ζωής. (Rassõlkin, A., Belahcen, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Lukichev, D. V., Orlova, S. A., Heidari, H., Asad, B., & Pando-Acedo, J. (2020). Life cycle analysis of electrical motor-drive system based on electrical machine type. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 69(2), 162. <https://doi.org/10.3176/proc.2020.2.07>)

Εικόνα 52. Σύγκριση Επαγωγικών Μηχανών, Σύγχρονων Μηχανών Μαγνητικής Αντίδρασης και Σύγχρονων Μηχανών Μαγνητικής Αντίδρασης υποβοηθούμενων από μόνιμους μαγνήτες κατά τα στάδια παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, χρησιμοποίησης και τέλους ζωής υπό την σκοπιά της περιβαλλοντικής επίπτωσης. (Rassõlkin, A., Belahcen, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Lukichev, D. V., Orlova, S. A., Heidari, H., Asad, B., & Pando-Acedo, J. (2020). Life cycle analysis of electrical motor-drive system based on electrical machine type. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 69(2), 162. <https://doi.org/10.3176/proc.2020.2.07>).

Εικόνα 53- Σφάλμα μόνωσης στα τυλίγματα στάτη ηλεκτρικής μηχανής.

Εικόνα 54- Σφάλματα στα ρουλεμάν ηλεκτρικής μηχανής.

Εικόνα 55- Σφάλματα στις μπάρες βραχυκύκλωσης επαγωγικής μηχανής.

Εικόνα 56- Σφάλματα σε γρανάζια ηλεκτρικών μηχανών.

Εικόνα 57- Σφάλματα στο σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών ηλεκτρικής μηχανής συνεχούς ρεύματος.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα, η ηλεκτροκίνηση αντικαθιστά τις συμβατικές μορφές κίνησης με μηχανές εσωτερικής καύσης λόγω σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, την ρύπανση του περιβάλλοντος και θέματα βιωσιμότητας. Για τον λόγο αυτό, η ηλεκτρική κίνηση αρχίζει να εμφανίζεται σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές κίνησης και μεταφοράς. Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν την καρδιά αυτών των συστημάτων καθώς είναι τα ηλεκτρομηχανικά στοιχεία που προσδίδουν την απαραίτητη κίνηση. Με την πάροδο των χρόνων, η μορφή, η δομή και τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών μηχανών έχουν μεταβληθεί και συνεχίζονται να μεταβάλλονται δραστικά. Οι Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος αποτελούν τις πρώτες ηλεκτρικές μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον και συνεχίζουν έως σήμερα σε πολλές εφαρμογές μεταφοράς. Ωστόσο συγκεκριμένα μειονεκτήματα αυτών των μηχανών σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των Ηλεκτρικών Μηχανών Εναλλασσόμενου Ρεύματος οδηγούν στην υιοθέτησή τους. Ανάλογα με την εφαρμογή μεταφοράς, οι απαιτήσεις είναι διαφορετικές. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ανάλυση των χαρακτηριστικών κάθε μηχανής, η σύγκριση με βάση τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μίας, με κριτήρια που αφορούν την εφαρμογή στις πιο σημαντικές πτυχές των μέσων μεταφοράς.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας πραγματεύεται τις ηλεκτρικές μηχανές σε εφαρμογές μεταφοράς, μέσω της διερεύνησης των διαφορετικών κατηγοριών και την σύγκριση αυτών. Με την υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης ολοένα και περισσότερο στην σημερινή πραγματικότητα, η ανάγκη για διερεύνηση και σύγκριση των ηλεκτρικών μηχανών σε αυτήν είναι απαραίτητη. Συγχρόνως, με την αύξηση των απαιτήσεων και των εφαρμογών, είναι σκόπιμο να τονιστούν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ηλεκτρικών μηχανών σε κάθε εφαρμογή για την περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθούν οι Ηλεκτρικές Μηχανές ως προς την εφαρμογή στον τομέα των μεταφορών. Στόχος είναι να αναλυθούν σε βάθος τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών Ηλεκτρικών Μηχανών, τα προσδιοριστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε κατηγορίας και να γίνει μια ουσιαστική σύγκριση για κάθε τομέα μεταφορών ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και προοπτικές ανάπτυξης.

Μεθοδολογία

Αρχικά, διερευνήθηκαν οι εφαρμογές μεταφοράς όπου η ηλεκτροκίνηση χρησιμοποιείται σήμερα αλλά και αναμένεται να υιοθετηθεί στο άμεσο μέλλον. Έγινε διερεύνηση της ιστορικής πορείας των ηλεκτρικών μηχανών και των ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων. Στη συνέχεια μελετήθηκαν οι αρχές λειτουργίας και οι βασικοί νόμοι που διέπουν τις Ηλεκτρικές Μηχανές. Έγινε μελέτη των Ηλεκτρικών Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος, μέσω της αρχής λειτουργίας τους, των κατασκευαστικών τους στοιχείων, των διαφορετικών τοπολογιών, των ισοδύναμων κυκλωμάτων, των εξισώσεων λειτουργίας, των τρόπων ελέγχου της λειτουργίας τους, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους. Έπειτα έγινε διερεύνηση των Ηλεκτρικών Μηχανών Εναλλασσόμενου Ρεύματος, με την ανάλυση των δύο μεγάλων κατηγοριών, τις Επαγωγικές Ηλεκτρικές Μηχανές και τις Σύγχρονες Ηλεκτρικές Μηχανές. Έγινε μελέτη των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών τους των ισοδύναμων κυκλωμάτων, των εξισώσεων λειτουργίας, των χαρακτηριστικών τους, και των τρόπων ελέγχου. Έπειτα, με βάση τις κατηγορίες εφαρμογών μεταφοράς, διερευνήθηκαν οι Ηλεκτρικές Μηχανές που χρησιμοποιούνται σε κάθε μία, με βάση τα χαρακτηριστικά τους και έγινε σύγκριση αυτών. Επιπλέον, μελετήθηκαν τόσο στοιχεία που οδήγησαν στην υιοθέτησή τους όσο και στην μελλοντική πορεία τους. Τέλος, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα και προοπτικές εξέλιξης για κάθε Ηλεκτρική Μηχανή.

Καινοτομία

Η καινοτομία της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έγκεται στην ανάλυση των Ηλεκτρικών Μηχανών κατά εφαρμογή στους διάφορους τομείς μεταφορών, με τον προσδιορισμό τόσο της σημερινής πραγματικότητας, όσο και της ιστορικής αλλά και μελλοντικής πορείας. Σημαντική καινοτομία της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών τόσο κατά κατηγορία μεταφορών με διαφορετικές απαιτήσεις όσο και κατά κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών όπου περιγράφονται τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

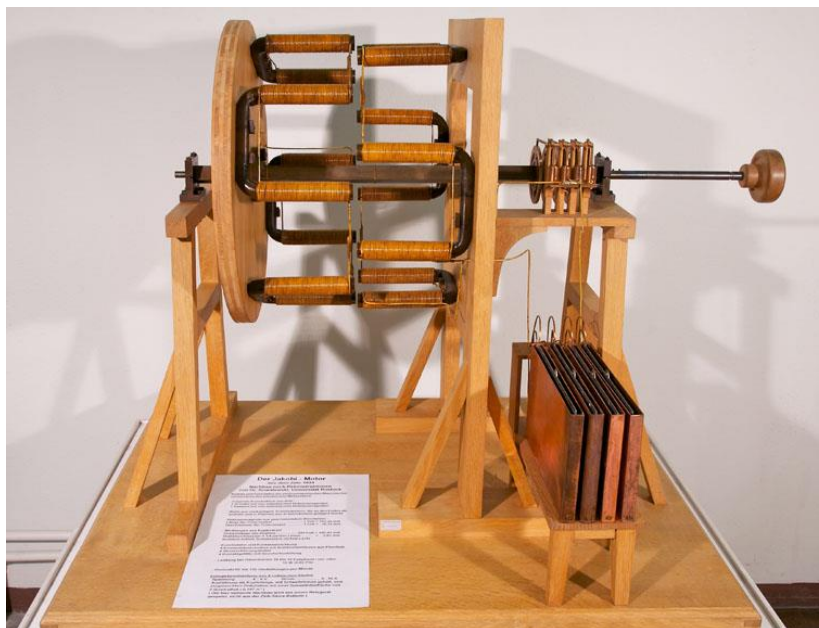
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΤΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.

Ο Ηλεκτρικός Κινητήρας είναι μια Ηλεκτρική Μηχανή που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Μια Ηλεκτρική Γεννήτρια είναι μηχανικά πανομοιότυπη με έναν Ηλεκτρικό Κινητήρα, αλλά λειτουργεί αντίστροφα, μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Και οι δύο τύποι ηλεκτρικών μηχανών στηρίζουν την λειτουργία τους στην αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών.

1.1 Ιστορία της Ηλεκτρικής Μηχανής

Η ανάπτυξη των Ηλεκτρικών Κινητήρων προωθήθηκε από την ανάπτυξη των πρώτων μπαταριών, η οποία έγινε από τον Ιταλό Allesandro Volta, το 1800. Ο Δανός Oersted ήταν αυτός, ο οποίος εφάρμοσε τα πρώτα πειράματα ηλεκτρομηχανικής κίνησης, μέσω της κίνησης μηχανικών μερών, που διαρρέονταν από ρεύμα σε μαγνητικό πεδίο. Την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση για την ανάπτυξη κίνησης προώθησε και Βρετανός Michael Faraday με διάφορα πειράματα κίνησης λόγω ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων. Το 1825 ο Βρετανός William Sturgeon αναπτύσσει τον ηλεκτρομαγνήτη, που αποτελείται από έναν πυρήνα σιδήρου με τυλίγμα χαλκού. Το 1831, ο Faraday ερευνά και διατυπώνει τις βασικές αρχές της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, δηλαδή της παραγωγής τάσης και ρεύματος λόγω μεταβλητού μαγνητικού πεδίου.

Η πρώτη μορφή ηλεκτρικού κινητήρα με λειτουργικότητα έρχεται από τον Jacobi το 1834 και φαίνεται στην εικόνα 1. Περιλαμβάνει μια μπαταρία ψευδάργυρου, που φαίνεται κάτω δεξιά, σύστημα συλλέκτη και ψηκτρών, και τα δύο μέρη, τον στάτη και τον δρομέα, όπου ο καθένας αποτελείται από πολλαπλά τυλίγματα χαλκού όπως φαίνεται στην εικόνα 1.

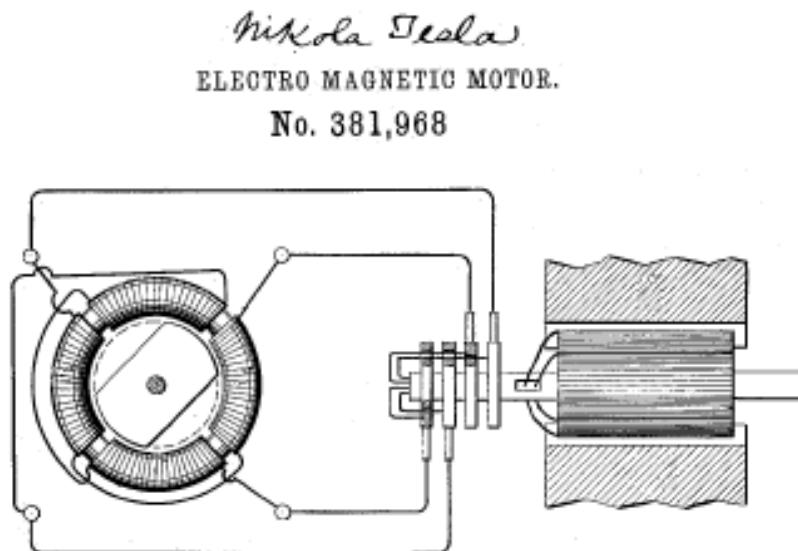


Σχήμα 1-Ο ηλεκτρικός κινητήρας του Jacobi

Η επόμενη ολοκληρωμένη μορφή ηλεκτρικού κινητήρα έρχεται από τον Αμερικανό Thomas Davenport, ο οποίος το 1837 φτάνει στην κατασκευή ενός ηλεκτρικού κινητήρα 1000 στροφών το λεπτό, και ισχύος 4.5W. Η κατασκευή του αποτελείται από ηλεκτρομαγνήτες, σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών και μόνιμους μαγνήτες από μαλακό σίδηρο. Ωστόσο, οι κινητήρες που αναπτύχθηκαν από τον Jacobi αναπτύσσονται παραπάνω στα χρόνια μεταξύ 1834-1854 και φτάνουν τα 300 W σε ισχύ ενώ εφαρμόζονται σε πρωτοπόρες εφαρμογές όπως ηλεκτρικές βάρκες. Οι κινητήρες που ανέπτυξε ο Jacobi έφταναν μέχρι το 1 kW.

Το 1856 ο Γερμανός Werner Siemens κατασκευάζει μια ηλεκτρική γεννήτρια, με τοποθέτηση τυλιγμάτων σε πόλους, κάτι που αποτέλεσε επανάσταση στην σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών. Στη συνέχεια, ο Γερμανός Friedrich von Hefner-Alteneck, ο οποίος ήταν συνεργάτης του Siemens κατασκευάζει έναν κυλινδρικό δρομέα-τύμπανο με σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών, αντίστοιχο της σημερινής μορφής δρομέα των μηχανών Συνεχούς Ρεύματος.

Το 1887, ο Κροάτης-Σέρβος Nikola Tesla αναπτύσσει εναλλασσόμενα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτρικές γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς, και κινητήρες. Η εποχή ανάπτυξης των επαγωγικών κινητήρων ξεκινά με τις ανακαλύψεις του Τέσλα. Στη συνέχεια, ο Ιταλός Galileo Ferraris, κατασκευάζει την πρώτη μορφή επαγωγικού κινητήρα με δύο φάσεις. Το 1889 ο Ρώσος Michael Dolivo-Dobrowolsky, μηχανικός στην AEG, κατασκευάζει την τριφασική επαγωγική μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού, που υπάρχει μέχρι σήμερα, στηριζόμενος στις ιδέες του Tesla και Ferraris.



Σχήμα 2- Εικόνα από πατέντα ηλεκτρικού κινητήρα του Νικόλα Τέσλα.

Από το 1889 έως σήμερα οι Ηλεκτρικές Μηχανές, συνεχίζονται και εξελίσσονται. Νέες μορφές ηλεκτρικών μηχανών έχουν εμφανιστεί ενώ ολοένα και περισσότερα συστήματα ενσωματώνονται σε συμβατικές μορφές. Μάλιστα, με τις αυξανόμενες απαιτήσεις των εφαρμογών και του εξηλεκτρισμού, τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά αναπτύσσονται.

1.2 Ηλεκτροκίνηση

Η ηλεκτρική κίνηση ξεκινά με την ανάπτυξη των ηλεκτρικών κινητήρων, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 1.1. Οι σημαντικότερες στιγμές που καθόρισαν την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης ήταν οι εφεύρεση των πρώτων μορφών ηλεκτρικών κινητήρων και η εφαρμογή τους σε πραγματικές εφαρμογές. Δύο από τις σημαντικότερες ιστορικές προσωπικότητες στα τέλη του 19^{ου} αιώνα στον τομέα της Ηλεκτροκίνησης είναι οι Thomas Edison και Nikola Tesla.

Μία από τις κυριότερες εφαρμογές της ηλεκτρικής κίνησης ήταν σε σιδηροδρομικές εφαρμογές, όπου αντικατέστησε τις μηχανές εσωτερικής καύσης, προσφέροντας πιο ομαλή μετακίνηση, με λιγότερο θόρυβο και μειωμένες εκπομπές. Οι πρώτες μορφές ηλεκτροκίνητων σιδηροδρόμων εμφανίστηκαν στο Βερολίνο το 1881.

Από τον 20^ο αιώνα ξεκίνησε περαιτέρω η ανάπτυξη της ηλεκτρικής κίνησης με την εφαρμογή σε πολλαπλές μορφές μεταφορών. Ωστόσο, με την ανάπτυξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης και των κατασκευαστικών γραμμών παραγωγής, οι εφαρμογές της ηλεκτρικής κίνησης περιορίστηκε σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Σήμερα λόγω περιβαλλοντικών ζητημάτων όπως η ρύπανση της ατμόσφαιρας και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, τίθενται θέματα αντικατάστασης των κινητήρων εσωτερικής καύσης σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Παράλληλα, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών, των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και θεωρίας

ελέγχου ενισχύει την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Σήμερα, οι κυβερνήσεις και οι μεγαλύτερες εταιρείες ενισχύουν την υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης σε πολλαπλές εφαρμογές, επενδύοντας υψηλά ποσά σε έρευνα και ανάπτυξη.

1.3 Εφαρμογές Ηλεκτρικών Κινητήρων στα Μέσα Μεταφοράς

Σήμερα, οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν την κύρια επιλογή για τον μετασχηματισμό των συμβατικών μορφών κίνησης. Βασικοί παράγοντες στην κατεύθυνση αυτή είναι η βιωσιμότητα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και οι αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες. Παρακάτω αναλύονται οι βασικές εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης στα μέσα μεταφοράς:

- Ηλεκτρικά αυτοκίνητα:

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούν ίσως την μεγαλύτερη τάση ανάπτυξης της ηλεκτρικής κίνησης, με την αντικατάσταση των συμβατικών μορφών κινήσεων εσωτερικής καύσης. Πολλαπλά μοντέλα εμφανίζονται τα τελευταία χρόνια με την εταιρεία Tesla να αποτελεί πρωτοπόρο στην ανάπτυξη αμιγώς ηλεκτρικών αυτοκινήτων, όπως το Tesla Model S, Model 3 ή Model X.



Σχήμα 3- Σύγχρονη μορφή ηλεκτρικού αυτοκινήτου

- Ηλεκτρικά λεωφορεία:

Παρόμοια με την αυτοκίνηση, τα ηλεκτρικά λεωφορεία αλλάζουν το τοπίο των αστικών μεταφορών προσφέροντας μια πράσινη και βιώσιμη λύση. Μάλιστα σε συνδυασμό με χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής κίνησης, όπως ο μειωμένος θόρυβος λειτουργίας και η απουσία εκπομπών ρύπων, βελτιώνεται η ποιότητα της συνολικής αστικής ζωής. Στο σχήμα 4 φαίνεται ένα αμιγώς ηλεκτροκίνητο λεωφορείο. Σημειώνεται ότι σήμερα, στην Ελλάδα, χρησιμοποιούνται αρκετά ηλεκτρικά λεωφορεία ενώ ο στόλος τους αυξάνεται συνεχώς.



Σχήμα 4- Ηλεκτροκίνητο λεωφορείο

- Ηλεκτρικά τρένα και τραμ:

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια σε σιδηροδρομικές εφαρμογές, λόγω των τεχνολογικών απαιτήσεων της εφαρμογής. Τεχνολογίες αιχμής αξιοποιούνται σε εφαρμογές όπως τρένα και τραμ για μεγαλύτερη αποδοτικότητα και εξοικονόμηση ενέργειας,



Σχήμα 5- Σύγχρονο Ηλεκτρικό Τρένο

- Δίκυκλα και η μικρό-κινητικότητα (Ηλεκτρικά ποδήλατα και σκούτερ):

Για μετακινήσεις μικρών αποστάσεων χρησιμοποιούνται διάφορες λύσεις μικρό-κινητικότητας, που περιλαμβάνουν ηλεκτρικά ποδήλατα (e-bikes),

ηλεκτρικά σκούτερ, τρίκυκλα, κ.α. Οι συγκεκριμένες μορφές μικροκινητικότητας έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής στις σημερινές αστικές περιοχές προσφέροντας μορφές μετακίνησης φιλικές προς το περιβάλλον.



Σχήμα 6- Μορφές Μικρό-Ηλεκτροκίνησης

- Θαλάσσιες μεταφορές:

Οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν έναν επίσης μεγάλο τομέα μεταφορών όπου η ηλεκτρική κίνηση χρησιμοποιείται κατά κόρον. Η ηλεκτροκίνηση χρησιμοποιείται σε φορτηγά πλοία, επιβατηγά πλοία, αλιευτικά, ρυμουλκά, κ.α. Ο συνδυασμός πολλαπλών τεχνολογιών αξιοποίησης της ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζεται και στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών, όπως το σκάφος αναψυχής της εικόνας 7.



Σχήμα 7- Ηλεκτρικό Σκάφος Αναψυχής

- Αεροπλοΐα:

Αν και βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, οι ηλεκτρικοί κινητήρες εισβάλλουν στην αεροπορία. Τα ηλεκτρικά αεροσκάφη, συμπεριλαμβανομένων των μικρών ηλεκτρικών αεροπλάνων και των οχημάτων αστικής εναέριας κινητικότητας, διερευνώνται ως πιθανές λύσεις για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των αεροπορικών ταξιδιών.



Σχήμα 8- Ηλεκτρικό αεροπλάνο 'Alice'

Ενώ η υιοθέτηση των ηλεκτροκινητήρων στις μεταφορές διευρύνεται, παραμένουν προκλήσεις όπως η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης, η βελτίωση της τεχνολογίας των μπαταριών και το κόστος. Οι κυβερνήσεις, οι επιχειρήσεις και οι καινοτόμοι συνεχίζουν να αντιμετωπίζουν αυτές τις προκλήσεις για να επιταχύνουν την ευρεία υιοθέτηση των ηλεκτρικών μεταφορών.

1.4 Δομή Ηλεκτρικών Κινητηρίων Συστημάτων

Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα χρησιμοποιούνται σε πολλαπλές εφαρμογές κίνησης όπως επεξηγήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η δομή των ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων έχει αλλάξει τα τελευταία χρόνια λόγω αλλαγών στους ηλεκτρικούς κινητήρες που χρησιμοποιούνται, στις ολοένα αυξανόμενες εφαρμογές και των αυξημένων απαιτήσεων. Η δομή ενός σύγχρονου ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος φαίνεται στην εικόνα 9.



Σχήμα 9-Δομή Σύγχρονου Ηλεκτρικού Κινητηρίου Συστήματος

Το βασικό κομμάτι ενός ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις η επιλογή διαφέρει όπως θα δούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος μαζί με τον ελεγκτή αποτελούν τον εγκέφαλο του συστήματος, και έχουν ως σκοπό τον έλεγχο ταχύτητας και ροπής του κινητήρα καθώς και την επιτήρησή του. Η πηγή ενέργειας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι και σε μια εφαρμογή ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα μπορούσε να είναι η μπαταρία όπως φαίνεται και στο σχήμα Παρόμοια, σε μια εφαρμογή αυτοκίνησης το φορτίο περιγράφει τις απαιτήσεις ροπής και ταχύτητας που πρέπει να πληροί ο κινητήρας, και είναι η κίνηση μέσω των τροχών σε δρόμο με ανηφόρες κατηφόρες κ.λπ.. Οι αισθητήρες αποτελούν απαραίτητο κομμάτι ενός σύγχρονου ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος, καθώς είναι δυνατή η μέτρηση πολλαπλών μεγεθών, όπως θερμοκρασία, ρεύματα, τάσεις, ροπή, κ.α., που αποτελούν σημαντικές παραμέτρους προς χρήση από τον ελεγκτή.

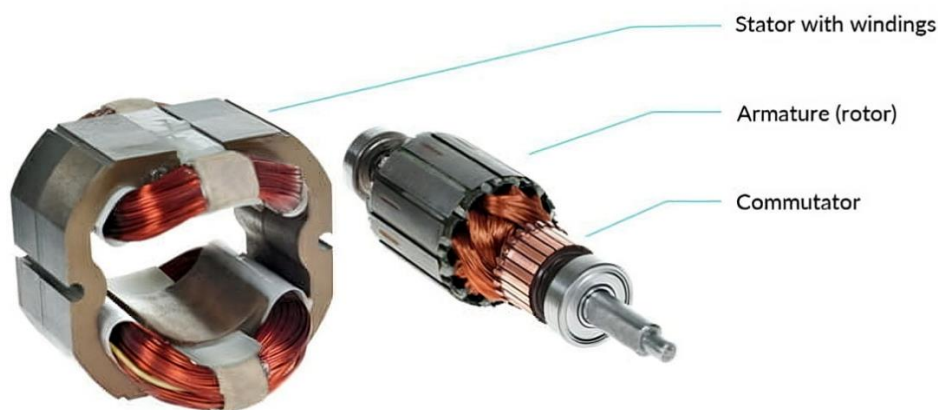
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η βασική κατηγοριοποίηση των Ηλεκτρικών Μηχανών συνδέεται με την χρήση Συνεχούς (DC) ή Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC). Ανάλογα με την εφαρμογή μεταφοράς και τις επιθυμητές προδιαγραφές, η επιλογή μιας ηλεκτρικής μηχανής διαφοροποιείται. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση των βασικότερων τύπων ηλεκτρικών μηχανών για εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης.

2.1 Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

2.1.1 Κατασκευαστικά Στοιχεία Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Όπως όλες οι ηλεκτρικές μηχανές, οι μηχανές ΣΡ αποτελούνται από τον στάτη και τον δρομέα. Ο στάτης αποτελεί το σταθερό μέρος του κινητήρα. Κατασκευάζεται από σίδηρο και ελάσματα, καθώς έτσι μειώνονται απώλειες που σχετίζονται με τα δινορρέυματα. Η μορφή του στάτη ενός κινητήρα ΣΡ μικρής ισχύος φαίνεται στο σχήμα 10.



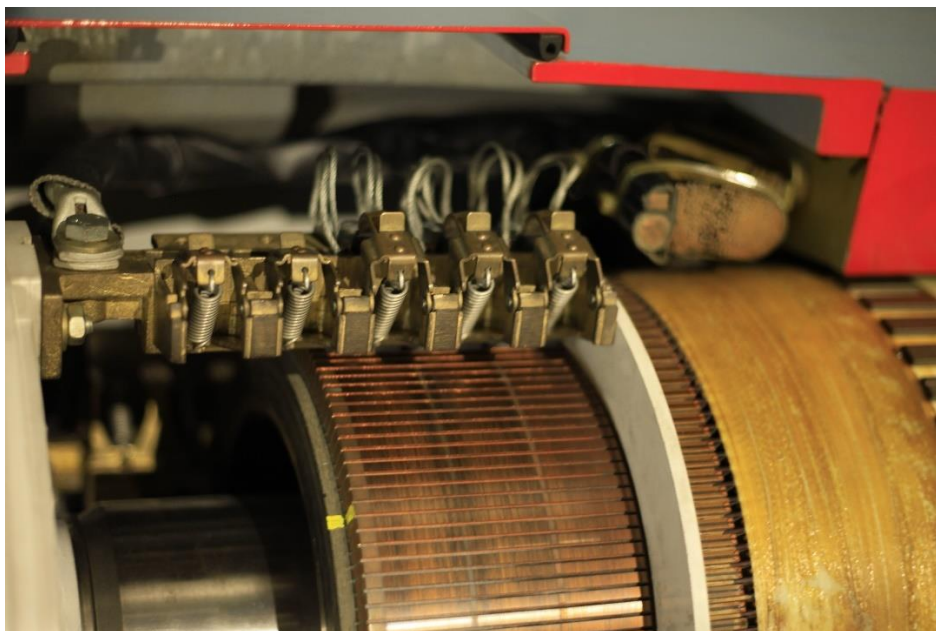
Σχήμα 10- Στάτης και Δρομέας Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Παρατηρούμε τις μικρές γραμμές στον πυρήνα του στάτη που υποδεικνύουν ότι είναι κατασκευασμένος από ελάσματα σιδήρου. Στον στάτη υπάρχουν οι πόλοι, γύρω από τους οποίους τυλίγεται το τύλιγμα του στάτη. Ο πόλος είναι επίσης κατασκευασμένος από ελάσματα για τους ίδιους λόγους. Η μορφή του πόλου με το τύλιγμα φαίνονται στο σχήμα 11, όπου διακρίνεται μια μηχανή με 4 πόλους.



Σχήμα 11-Στάτης Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

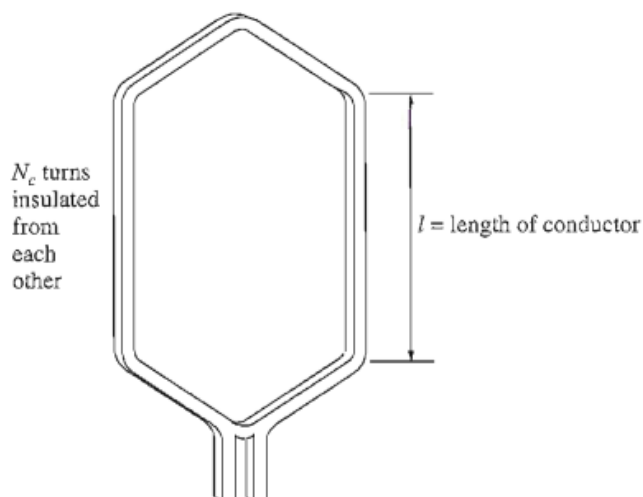
Ο δρομέας ενός κινητήρα ΣΡ αποτελείται από το πυρήνα, ο οποίος επίσης κατασκευάζεται από ελάσματα σιδήρου. Ο δρομέας περιέχει αυλακώσεις, στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα του δρομέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Στο ένα άκρο του δρομέα υπάρχει το πίσω ρουλεμάν όπου προσαρμόζεται στον στάτη και το πλαίσιο της μηχανής. Στο άλλο άκρο υπάρχει ο συλλέκτης και οι ψήκτρες. Το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται στους τομείς του συλλέκτη. Ο συλλέκτης φαίνεται με το χρυσαφί χρώμα στο σχήμα 12. Ο συλλέκτης συνδεεται με τις ψήκτρες για να δημιουργήσουν το απαραίτητο κύκλωμα μεταγωγής. Οι ψήκτρες είναι κατασκευασμένες από άνθρακα, από γραφίτη ή μίγμα των παραπάνω. Οι ψήκτρες έρχονται σε επαφή με τον συλλέκτη με την βοήθεια ελατηρίων. Η πίεση των ελατηρίων, η επιλογή του υλικού των ψηκτρών καθώς και του συλλέκτη έχει να κάνει με την επιθυμητή αντοχή λειτουργίας, την συντήρηση και την λειτουργία του κινητήρα.



Σχήμα 12-Σύστημα Συλλέκτη-Ψηκτρών Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Παρατηρώντας το σχήμα 11, θα δούμε ότι υπάρχουν κάποιοι επιπλέον, μικρότεροι, πόλοι στον στάτη της μηχανής, ενδιάμεσα από τους κύριους πόλους. Αυτοί ονομάζονται βοηθητικοί ή εσωτερικοί πόλοι και τοποθετούνται επιπλέον των βασικών έτσι ώστε να περιορίσουν ανεπιθύμητα φαινόμενα που σχετίζονται με την λειτουργία των κινητήρων ΣΡ. Τα φαινόμενα αυτά συνδέονται με τους σπινθηρισμούς που εμφανίζονται στις ψήκτρες. Οι βοηθητικοί πόλοι βοηθούν στην μείωση και εξάλειψη των σπινθηρισμών χωρίς να επηρεάζουν την κανονική λειτουργία του κινητήρα. Ένα επιπλέον ανεπιθύμητο φαινόμενο που εμφανίζεται στις μηχανές ΣΡ είναι η μείωση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της μηχανής, κοντά στους πόλους. Για την επίλυση αυτού τοποθετούνται επιπλέον τυλίγματα, τα τυλίγματα αντιστάθμισης. Αυτά τοποθετούνται στον στάτη, ανάμεσα στους πόλους. Χρησιμοποιούνται περισσότερο σε κινητήρες μεγάλης ισχύος, με αυστηρές προδιαγραφές, καθώς αυξάνουν το κόστος και απαιτούν ειδική τοποθέτηση.

Τόσο ο δρομέας όσο και ο στάτης περιλαμβάνουν τυλίγματα για την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση και κίνηση του κινητήρα. Ο δρομέας μπορεί να αποτελείται από διάφορες διασυνδέσεις των τυλιγμάτων. Το κύκλωμα των τυλιγμάτων του δρομέα ονομάζεται τύμπανο της μηχανής. Τα τυλίγματα του δρομέα αποτελούνται από ομάδες αγωγών, όπου η κάθε ομάδα αποτελείται από αγωγία πλαίσια, όπως φαίνεται στην εικόνα ?. Αφού τοποθετηθούν τα τυλίγματα στον οπλισμό του δρομέα, απαιτείται η σύνδεση αυτών με τον συλλέκτη. Σημαντικές κατασκευαστικές προδιαγραφές είναι η απόσταση μεταξύ των τομέων του συλλέκτη, η πολλαπλότητα των τυλιγμάτων και η διαδοχή αυτών. Ανάλογα με την διαδοχή συνδέσεων διακρίνουμε τα βροχοτυλίγματα, τα κυματοτυλίγματα και το ισοσταθμισμένο τύλιγμα.



Σχήμα 13-Τύλιγμα Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Τα τυλίγματα που χρησιμοποιούνται περιέχουν μονώσεις, για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων. Η μόνωση των τυλιγμάτων καθορίζεται με θερμοκρασιακά όρια και κλάσεις μονώσεων. Οι κλάσεις καθορίζονται από εθνικούς και παγκόσμιους οργανισμούς όπως η NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Στο σχήμα 14 φαίνονται οι τρεις κλάσεις μονώσεων και οι μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες λειτουργίας. Η θερμοκρασία λειτουργίας συνήθως μετριέται με αισθητήρες προσαρμοσμένους σε διάφορα σημεία των τυλιγμάτων.

Temperature Class Tolerance	Maximum Operation Temperature Allowed	
	°C	°F
A	105	221
B	130	266
F	155	311
H	180	356

Σχήμα 14-Κλάσεις μονώσεων και οι μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες λειτουργίας τυλιγμάτων Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

2.1.2 Κατηγοριοποίηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος

Οι Ηλεκτρικοί Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται κατά κόρον εδώ και αρκετές δεκαετίες. Παρά την σταδιακή αντικατάστασή τους σε ολόένα και περισσότερες εφαρμογές από Κινητήρες AC, η ώριμη τεχνολογία και η αξιοπιστία τους οδηγεί στην χρησιμοποίησή τους σε πολλαπλά συστήματα ακόμα και σήμερα. Μία από τις κυριότερες εφαρμογές τους είναι μέσα κίνησης, όπως επιβατικά αυτοκίνητα, φορτηγά και αεροπλάνα. Ένας

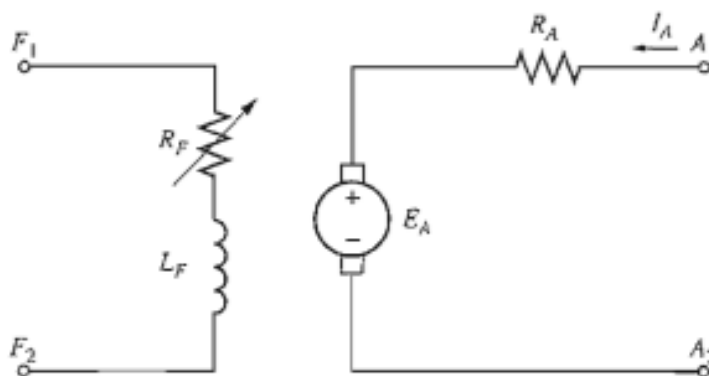
από τους κύριους λόγους έγκειται στην ύπαρξη συνεχούς πηγής τάσης στις παραπάνω εφαρμογές.

Οι βασικοί τύποι Ηλεκτρικών Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος (ΣΡ), που θα αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο είναι οι εξής:

- Κινητήρας ΣΡ Ανεξάρτητης Διέγερσης (Separately Excited DC Motor)
- Κινητήρας ΣΡ Παράλληλης Διέγερσης (Shunt DC Motor)
- Κινητήρας ΣΡ Διέγερσης Σειράς (Series DC Motor)
- Κινητήρας ΣΡ Σύνθετης Διέγερσης (Compound DC Motor)
- Κινητήρας ΣΡ Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet DC Motor)

2.1.2.1 *Ισοδύναμο Κύκλωμα και Εξισώσεις Λειτουργίας Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος*

Οι Κινητήρες ΣΡ αποτελούνται, όπως όλες οι ηλεκτρικές μηχανές, από τον στάτη, το σταθερό μέρος και τον δρομέα, το περιστρεφόμενο μέρος. Ωστόσο, στις Μηχανές ΣΡ γίνεται διάκριση ανάλογα με την θέση του κυκλώματος διέγερσης και του κυκλώματος τυμπάνου. Στο σχήμα 15 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα των Κινητήρων ΣΡ όπου διακρίνεται το κύκλωμα τυμπάνου με τους ακροδέκτες A1-A1 και το κύκλωμα διέγερσης με τους ακροδέκτες F1-F2.



Σχήμα 15- Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος.

Η πηγή τάσης E_a αποτελεί την επαγόμενη τάση από την περιστροφή του δρομέα. Η αντίσταση R_a αποτελεί την αντίσταση τυμπάνου. Στο κύκλωμα διέγερσης η αντίσταση και η επαγωγή διέγερσης συμβολίζονται με R_f και L_f αντίστοιχα. Η φορά του ρεύματος τυμπάνου I_a είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα, με το ρεύμα να εισέρχεται στο κύκλωμα, καθώς έχουμε λειτουργία κινητήρα.

Η τάση εξ επαγωγής E_a του κινητήρα δίνεται από την εξίσωση 1.

$$E_a = C \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (1)$$

, όπου C είναι σταθερά που περιγράφει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής, Φ η ροή που δημιουργεί το κύκλωμα διέγερσης και Ω η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

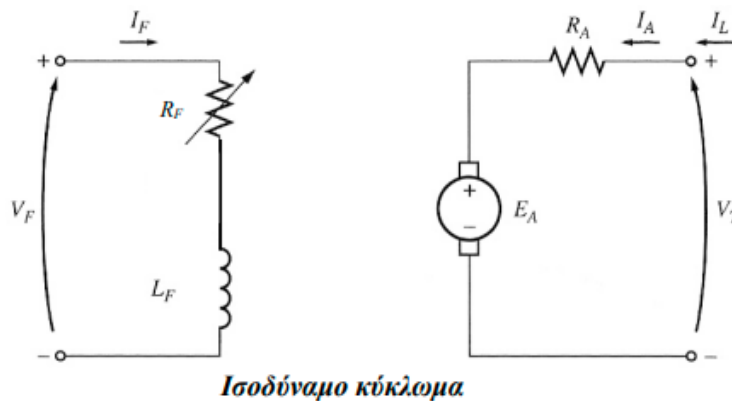
Η ροή στον άξονα του κινητήρα δίνεται από την εξίσωση 2

$$T = C \cdot \Phi \cdot I_A \quad (2)$$

, όπου C είναι σταθερά που περιγράφει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής, Φ η ροή που δημιουργεί το κύκλωμα διέγερσης και I_A το ρεύμα τυμπάνου του κινητήρα.

2.1.2.2 Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Ανεξάρτητης Διέγερσης

Ο Κινητήρας ΣΡ Ανεξάρτητης Διέγερσης τροφοδοτείται στο κύκλωμα διέγερσης από μια ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης V_f . Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα?.



Σχήμα 16- Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος Ανεξάρτητης Διέγερσης

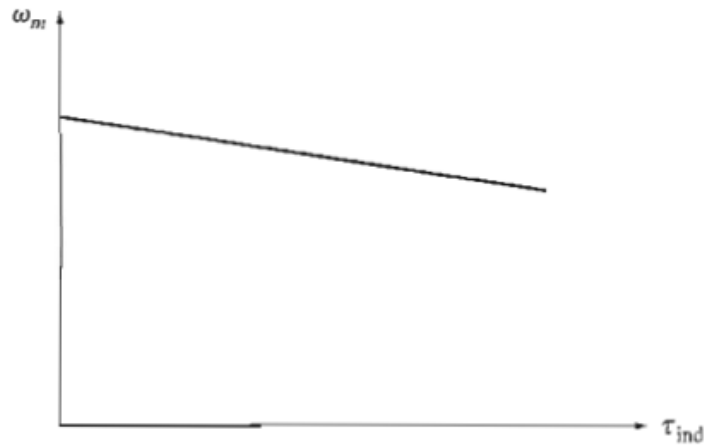
Η αντίσταση διέγερσης R_f στο ισοδύναμο κύκλωμα είναι ρυθμιζόμενη έτσι ώστε να ρυθμίζει το κύκλωμα διέγερσης και συνεπώς την ροή διέγερσης. Με βάση την πολικότητα της τάσης διέγερσης και της τάσης τυμπάνου έχουμε τις εξής εξισώσεις για την λειτουργία του Κινητήρα ΣΡ Ανεξάρτητης διέγερσης:

$$V_f = I_f R_f \quad (3)$$

$$V_t = E_a + I_a R_a = E_a + I_L R_a \quad (4)$$

Με βάση την συνδεσμολογία και την λειτουργία του Κινητήρα ΣΡ Ανεξάρτητης Διέγερσης προκύπτει η χαρακτηριστική ροπής στροφών που περιγράφει την λειτουργία του. Στο σχήμα 17 φαίνεται η χαρακτηριστική. Σημειώνεται ότι η καμπύλη είναι γραμμική καθώς δεν έχουν συμπεριληφθεί μη γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την λειτουργία της μηχανής, όπως η αντίδραση τυμπάνου. Από την καμπύλη

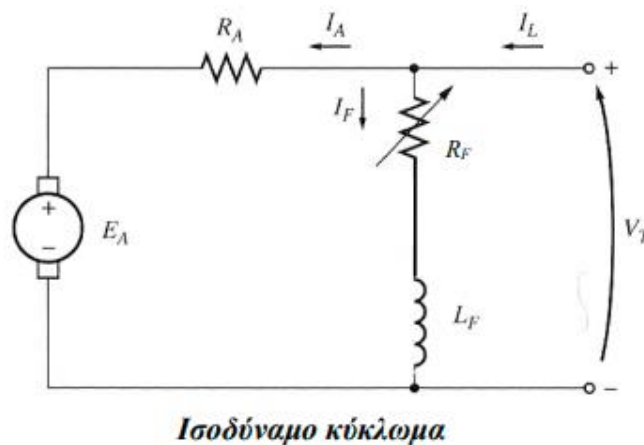
ροπής-ταχύτητας μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι με την αύξηση της ροπής μειώνονται οι στροφές του κινητήρα.



Σχήμα 17- Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Ανεξάρτητης Διέγερσης

2.1.2.3 Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Παράλληλης Διέγερσης

Στον Κινητήρα ΣΡ Παράλληλης Διέγερσης, το κύκλωμα διέγερσης συνδέεται σε παράλληλη σύνδεση με το κύκλωμα τυμπάνου, όπως φαίνεται στο σχήμα 18.



Σχήμα 18- Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος Παράλληλης Διέγερσης

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα για τον Κινητήρα ΣΡ Παράλληλης Διέγερσης είναι οι εξής:

$$V_f = I_f R_f \quad (5)$$

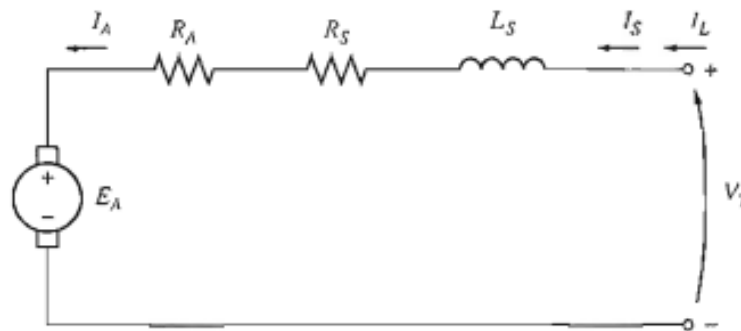
$$V_t = E_a + I_A R_A = E_a + (I_L - I_f) R_A \quad (6)$$

Η αντίστοιχη καμπύλη φορτίου για τον κινητήρα ΣΡ παράλληλης διέγερσης είναι η ίδια όπως στην περίπτωση του Κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης, που φαίνεται στο σχήμα 17.

Σε πολλές εφαρμογές των κινητήρων ΣΡ παράλληλης διέγερσης, είναι επιθυμητό να ελέγχεται η ταχύτητα περιστροφής. Αυτό είναι δυνατόν με 2 κυρίως τρόπους. Ο πρώτος είναι η ρύθμιση της αντίστασης διέγερσης R_f που φαίνεται και στο ισοδύναμο κύκλωμα. Με την μεταβολή της αντίστασης, μεταβάλλεται το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα διέγερσης, οπότε και η παραγόμενη μαγνητική ροή. Ο δεύτερος τρόπος ελέγχου της ταχύτητας έχει να κάνει με την ρύθμιση της τάσης στο τύμπανο του κινητήρα. Η ρύθμιση της τάσης μπορεί να γίνει με την σύνδεση μιας εξωτερικά ελεγχόμενης αντίστασης στο κύκλωμα τυμπάνου, ή με την χρήση μιας διάταξης που ελέγχει την πτώση τάσης. Η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να είναι ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος.

2.1.2.4 Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος με Διέγερση Σειράς

Το ισοδύναμο ενός κινητήρα ΣΡ με Διέγερση Σειράς φαίνεται στο σχήμα 19. Στον συγκεκριμένο τύπο κινητήρα έχουμε την σύνδεση του τυλίγματος τυμπάνου σε σειρά με το τύλιγμα διέγερσης, το οποίο περιέχει λιγότερες σπείρες από το πρώτο.



Σχήμα 19- Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος με διέγερση σειράς.

Οι εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία του κινητήρα είναι οι εξής:

$$I_A = I_S = I_L \quad (7)$$

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (8)$$

Επίσης, για την παραγόμενη ροπή έχουμε ότι:

$$T = c\Phi I_A \quad (9)$$

, όπου η ροή Φ εξαρτάται από το ρεύμα I_A καθώς έχουμε σύνδεση σειράς:

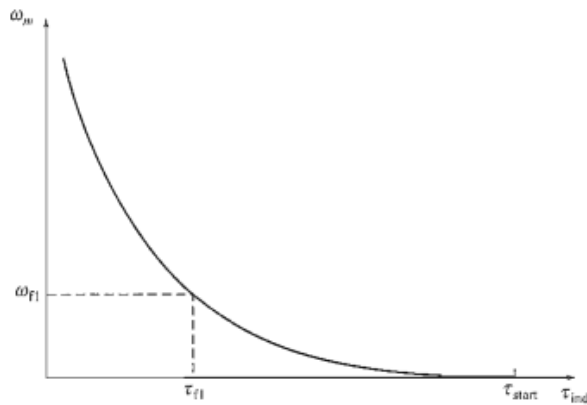
$$\Phi = cI_A \quad (10)$$

Άρα, προκύπτει ότι :

$$T = KI_A^2 \quad (11)$$

, όπου $K=Cc$

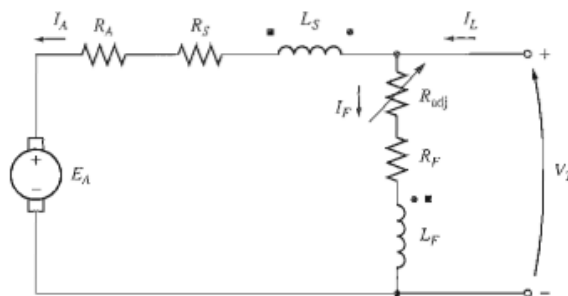
Η χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα ΣΡ με διέγερση σε σειρά φαίνεται στο σχήμα 20.



Σχήμα 20-Χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με διέγερση σε σειρά.

2.1.2.5 Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Σύνθετης Διέγερσης

Στον κινητήρα ΣΡ Σύνθετης Διέγερσης, έχουμε συνδυασμό της τοπολογίας διέγερσης σειράς και παράλληλης διέγερσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 21.



Σχήμα 21-Χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με σύνθετη διέγερση.

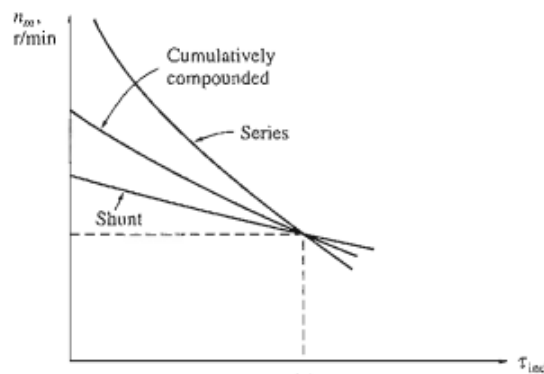
Οι εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία του κινητήρα ΣΡ με σύνθετη διέγερση είναι οι εξής:

$$V_t = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (12)$$

$$I_A = I_L - I_F \quad (13)$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_f} \quad (14)$$

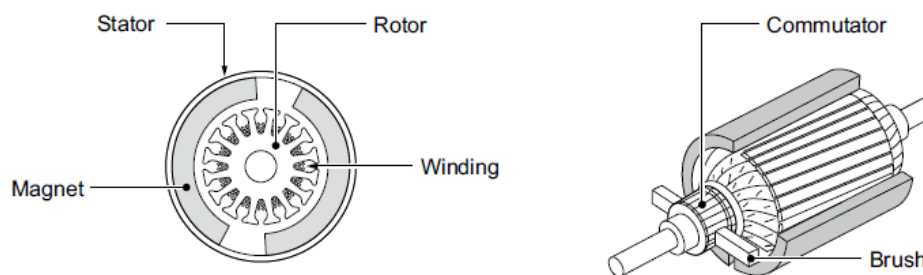
Στο σχήμα 22 φαίνεται χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών. Μάλιστα φαίνεται ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών διέγερσης σειράς (series) και παράλληλης διέγερσης (shunt) μαζί με την χαρακτηριστική σύνθετης διέγερσης (Cumulatively Compound).



Σχήμα 22-Χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με σύνθετη διέγερση.

2.1.2.6 Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Μόνιμου Μαγνήτη

Οι κινητήρες ΣΡ με μόνιμο μαγνήτη, χρησιμοποιούν τον μόνιμο μαγνήτη για την αντικατάσταση των ηλεκτρομαγνητών, δηλαδή των τυλιγμάτων του συμβατικού κινητήρα. Το τύλιγμα διέγερσης αντικαθίστανται από τον μόνιμο μαγνήτη ενώ το τύλιγμα τυμπάνου παραμένει όπως στις συμβατικές μορφές κινητήρων ΣΡ. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές μικρής ισχύος (< 1 HP). Η μορφή των συγκεκριμένων κινητήρων φαίνεται στην εικόνα 23.



Σχήμα 23-Δομή κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη

2.2 Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Στον παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι μηχανές που στηρίζουν την λειτουργία τους στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι δύο βασικές κατηγορίες μηχανών είναι οι Επαγωγικές ή Ασύγχρονες Μηχανές και οι Σύγχρονες Μηχανές. Το κεφάλαιο ξεκινά με την ανάλυση των Ασύγχρονων Μηχανών και στη συνέχεια των Σύγχρονων.

2.2.1 Επαγωγικές (Ασύγχρονες) Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος

2.2.1.1 Κατασκευαστικά Στοιχεία

Οι Επαγωγικές μηχανές Ε.Ρ. αποτελούνται από τον στάτη και τον δρομέα όπως όλες οι ηλεκτρικές μηχανές. Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την λειτουργία τους σε κινητήρες και γεννήτριες. Μάλιστα, οι επαγωγικές μηχανές Ε.Ρ χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, λόγω της αρχής λειτουργίας τους. Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούν την ναυαρχίδα των βιομηχανικών συστημάτων κίνησης και χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε πολλές εφαρμογές. Δομικά, ένας Επαγωγικός κινητήρας αποτελείται από τον στάτη και τον δρομέα. Η μορφή του στάτη φαίνεται στην εικόνα 24. Αποτελεί το σταθερό τμήμα της μηχανής και περιλαμβάνει το εξωτερικό πλαίσιο, τα αυλάκια στο εσωτερικό για την εισαγωγή του τυλίγματος και το τριφασικό τύλιγμα.



Σχήμα 24-Στάτης Επαγωγικής Μηχανής

Ο δρομέας στις επαγωγικές μηχανές διαφέρει και μάλιστα είναι αυτός που καθορίζει την κατηγορία επαγωγικών μηχανών. Ανάλογα με την μορφή του, έχουμε τις Επαγωγικές Μηχανές Βραχυκυκλωμένου Δρομέα (Squirrel Cage Induction Machine) και τις Επαγωγικές Μηχανές Δακτυλιοφόρου Δρομέα (Wound Rotor Induction Machine). Ο βραχυκυκλωμένος δρομέας αποτελείται από τον δρομέα, στον οποίο υπάρχουν αυλάκια, και μέσα σε αυτόν τοποθετούνται αγωγίμες μπάρες. Στα άκρα τους αυτές βραχυκυκλώνονται μέσω δακτυλίων βραχυκύκλωσης. Στο σχήμα 25 φαίνεται ο τύπος βραχυκυκλωμένου δρομέα.



Σχήμα 25-Δρομέας Βραχυκυκλωμένου Κλωβού Επαγωγικής Μηχανής

Ο δακτυλιοφόρος δρομέας αποτελείται από τριφασικό τύλιγμα, παρόμοιο με αυτό του στάτη, το οποίο τοποθετείται σε αυλακώσεις του δρομέα. Το τριφασικό τύλιγμα μπορεί να συνδεθεί σε αστέρα ή τρίγωνο. Το ένα άκρο του τριφασικού τυλίγματος συνδέεται με δακτυλίους, οι οποίοι με την σειρά τους συνδέονται με ψήκτρες. Έτσι, δημιουργούν το κύκλωμα του δρομέα. Συνήθως στο κύκλωμα του δρομέα συνδέονται εξωτερικά τριφασικές αντιστάσεις έτσι ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση του κυκλώματος. Ο δακτυλιοφόρος δρομέας φαίνεται στην εικόνα 26.



Σχήμα 26-Δακτυλιοφόρος Δρομέας Επαγωγικής Μηχανής

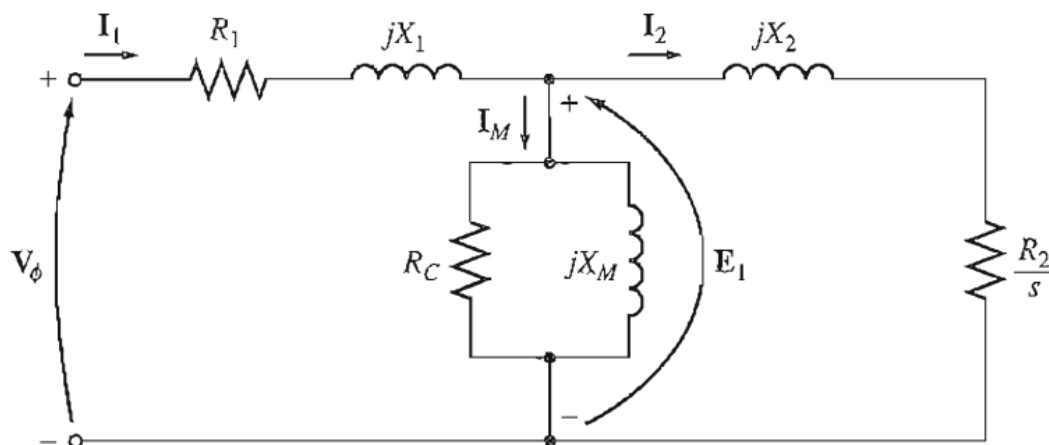
2.2.1.2 Λειτουργία και Ισοδύναμο Κύκλωμα Επαγωγικού Κινητήρα

Στην λειτουργία της Επαγωγικής Μηχανής σαν κινητήρα, στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη εφαρμόζεται τριφασική εναλλασσόμενη τάση. Με βάση την τοποθέτηση και την κατασκευή της μηχανής, δημιουργείται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Στον δρομέα, είτε αυτός είναι βραχυκυκλωμένος είτε δακτυλιοφόρου δρομέα, υπάρχει κλειστό κύκλωμα. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής, που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο του στάτη, έχει σαν αποτέλεσμα την επαγωγή τάσης στα άκρα του κυκλώματος δρομέα και την δημιουργία ρεύματος. Με βάση τον νόμο Laplace, θα ασκηθεί ροπή στο κύκλωμα του δρομέα και θα έχουμε κίνηση αυτού. Η ταχύτητα περιστροφής του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τον στάτη περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα. Ο δρομέας περιστρέφεται με ταχύτητα κοντά στην σύγχρονη αλλά μικρότερη από αυτή. Αυτό συμβαίνει γιατί σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση (ταχύτητα δρομέα ίση με την σύγχρονη ταχύτητα) δεν θα είχαμε επαγόμενη ροπή και κίνηση του δρομέα. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται από το μέγεθος της ολίσθησης:

$$s = \frac{n_s - n}{n} \quad (15)$$

, όπου n_s και n είναι η σύγχρονη ταχύτητα και η ταχύτητα του δρομέα αντίστοιχα.

Όπως και στις Μηχανές Σ.Ρ., έτσι και στους επαγωγικούς κινητήρες χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα για την περιγραφή της λειτουργίας της μηχανής. Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 27 καθώς και οι εξισώσεις που το διέπουν:



Σχήμα 27-Ισοδύναμο Κύκλωμα Επαγωγικής Μηχανής

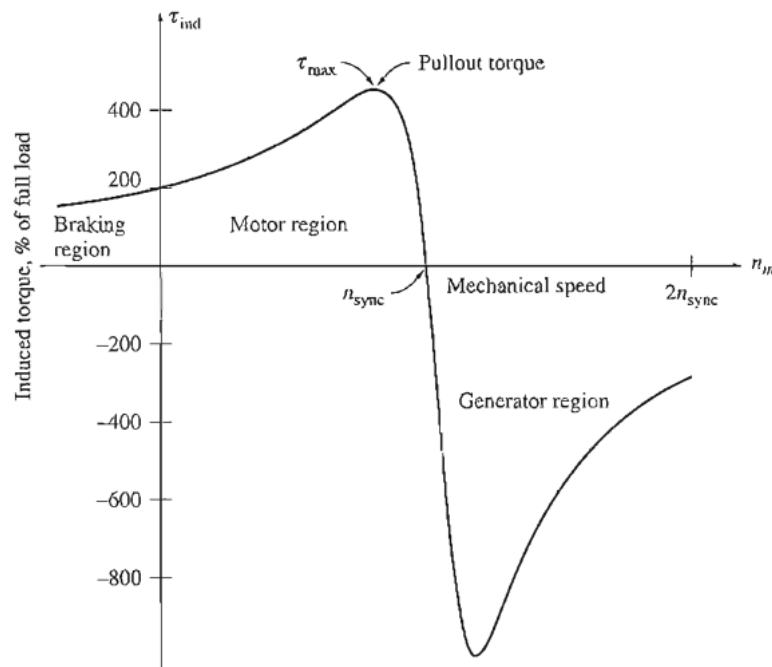
$$V_\phi = R_1 I_1 + jX_1 I_1 + E_1 \quad (16)$$

$$E_1 = R_c I_M = jX_M I_M = jX_2 + \frac{R_2}{s} \quad (17)$$

Η αντίσταση και η επαγωγή R_1 και X_1 περιγράφουν τα αντίστοιχα μεγέθη του στάτη. Ο εγκάρσιος βρόχος, που περιλαμβάνει την αντίσταση R_c και την επαγωγή X_M περιγράφει την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη του στάτη με τον δρομέα. Η αντίσταση $\frac{R_2}{s}$ και η επαγωγή X_2 περιγράφουν τα αντίστοιχα μεγέθη του δρομέα. Στην αντίσταση περιλαμβάνεται το μέγεθος της ολίσθησης έτσι ώστε να περιγράφει η επίδραση της στο ισοδύναμο κύκλωμα. Μία παρατήρηση που μπορεί να γίνει μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος είναι η εξής. Κατά την εκκίνηση, έχουμε μηδενική ταχύτητα του δρομέα η οποία αυξάνεται κατά την επιτάχυνση. Συνεπώς σύμφωνα με τον ορισμό της ολίσθησης, αυτή θα είναι μεγάλη και θα μειώνεται. Άρα κατά την εκκίνηση η ισοδύναμη αντίσταση $\frac{R_2}{s}$ θα είναι μικρή με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος στο ισοδύναμο κύκλωμα. Όντως, κατά την εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων χρησιμοποιούνται ειδικά κυκλώματα για τον έλεγχο του υψηλού ρεύματος εκκινήσεως.

2.2.1.3 Χαρακτηριστικές και Έλεγχος Επαγωγικού Κινητήρα

Η χαρακτηριστική φορτίου-ταχύτητας για την επαγωγική μηχανή, τόσο για την λειτουργία κινητήρα όσο για την λειτουργίας γεννήτριας αλλά και πέδησης φαίνεται στο σχήμα 28 από όπου έχουμε τα εξής:



Σχήμα 28-Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας Επαγωγικής Μηχανής

- Η ροπή για μηδενική ταχύτητα στην λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα ονομάζεται Ροπή Εκκινήσεως. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ροπή εκκίνησης βρίσκεται στο 200% της ροπής πλήρους φόρτισης

- Το μέγιστο σημείο στην καμπύλη, δηλαδή η μέγιστη ροπή, ονομάζεται Ροπή Ανατροπής, και αποτελεί το σημείο ευστάθειας της μηχανής. Η ροπή ανατροπής βρίσκεται στο 400% της ροπής πλήρους φόρτισης.
- Το σημείο ροπής πλήρους φόρτισης βρίσκεται σε ταχύτητα λίγο μικρότερης της σύγχρονης.
- Η ευσταθής περιοχή λειτουργίας τόσο στην λειτουργία κινητήρα όσο και γεννήτριας είναι στην γραμμική περιοχή κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα.

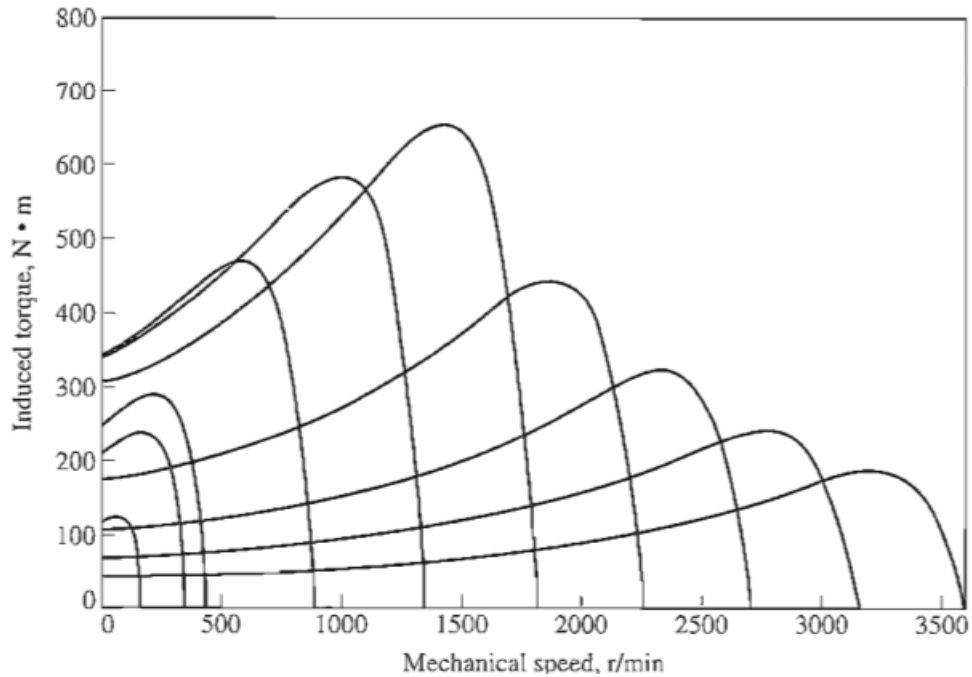
Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σαν κινητήρες σε εφαρμογές στις οποίες απαιτείται ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα. Για τον έλεγχο της ταχύτητας χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τρόποι με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα δίνεται από την σχέση :

$$n_s = \frac{120f_e}{P} \quad (18)$$

, όπου f_e είναι η ηλεκτρική συχνότητα και P ο αριθμός των πόλων του κινητήρα. Με την ρύθμιση των δύο παραπάνω μεγεθών είναι δυνατή η μεταβολή της σύγχρονης ταχύτητας και της ταχύτητας περιστροφής.

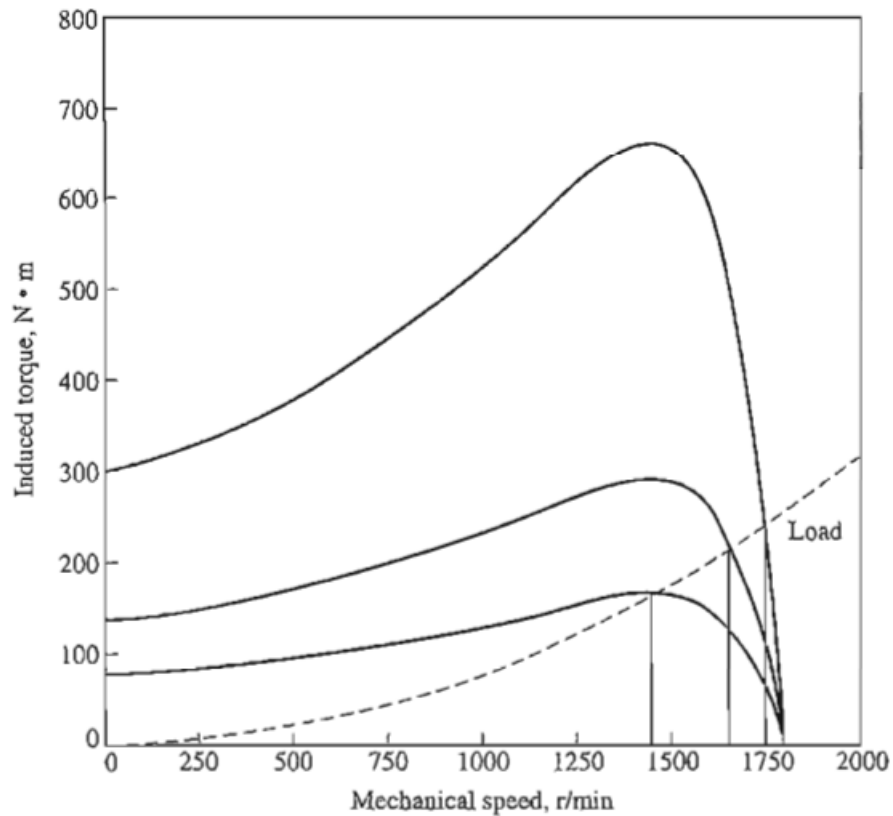
Οι μέθοδοι που στηρίζονται στην μεταβολή των πόλων αποτελούν παλαιές μεθόδους, που στηρίζονται στην μεταβολή του κυκλώματος του στάτη. Αυτό απαιτεί την ύπαρξη περίσσειας πόλων και τυλιγμάτων στον στάτη και την αύξηση του κόστους. Επίσης, δεν είναι δυνατή η αλλαγή ταχυτήτων στο πλήρες εύρος αλλά σε συγκεκριμένες κλίμακες (π.χ. 600, 900, 1200 rpm).

Η μεταβολή της συχνότητας του δικτύου αποτελεί την πιο σημαντική μέθοδο ελέγχου της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα. Σε αυτό συνέβαλε η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος τα τελευταία χρόνια καθώς η μεταβολή της συχνότητας γινόταν παλαιότερα με την χρήση ειδικών γεννητριών με υψηλό κόστος. Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται είναι μετατροπείς AC-AC, DC-AC, AC-DC και DC-DC, ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις. Ωστόσο, η μεταβολή της συχνότητας απαιτεί την προσαρμογή των ορίων μεταβολής καθώς μεταβάλλονται λειτουργικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με φαινόμενα κορεσμού.



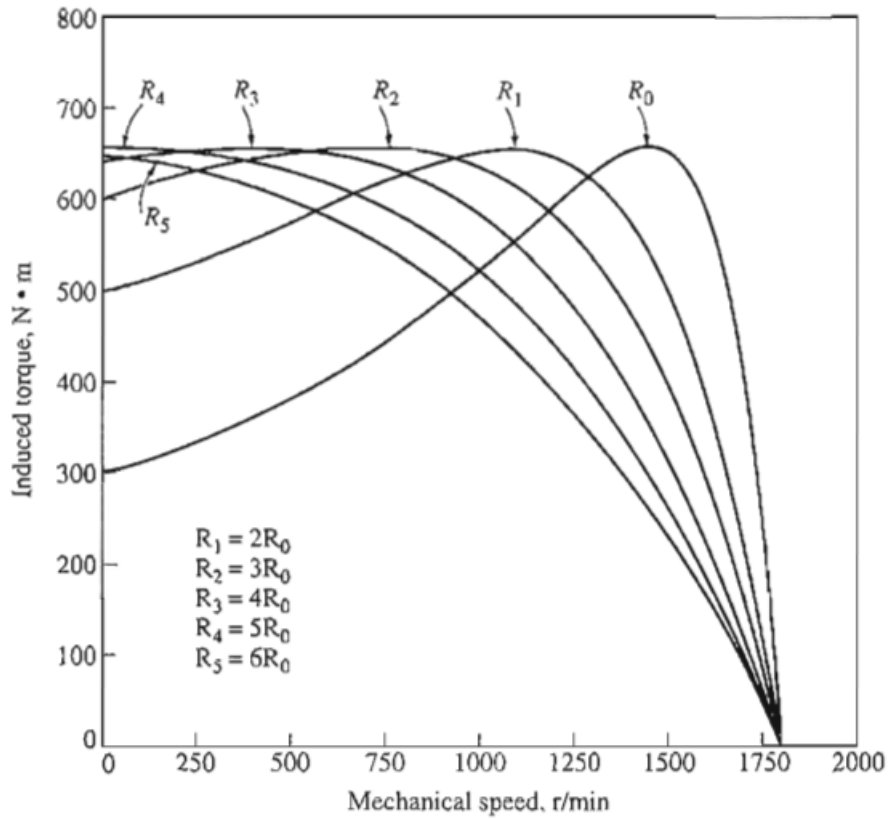
Σχήμα 29-Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας επαγωγικής μηχανής με μεταβολή της συχνότητας

Δύο επιπλέον τρόποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ταχύτητας, ο έλεγχος μέσω της τάσης τροφοδοσίας και ο έλεγχος μέσω των αντιστάσεων του δρομέα (για την περίπτωση των επαγωγικών κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα). Η μεταβολή της τάσης μπορεί να γίνει για φορτία που πληρούν την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 30, όπως οι εφαρμογές ανεμιστήρων.



Σχήμα 30-Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας Επαγωγικής Μηχανής με μεταβολή της τάσης

Στο σχήμα 31 φαίνεται η μεταβολή της καμπύλης ροπής-στροφών για μεταβολή της αντίστασης δρομέα ενός κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της αντίστασης έχουμε μετατόπιση της καμπύλης προς τα αριστερά. Για παράδειγμα, με την αύξηση της αντίστασης και την ίδια ταχύτητα περιστροφής, έχω μικρότερη ροπή λειτουργίας. Διαφορετικά, με την αύξηση της αντίστασης για ίδια ροπή λειτουργίας έχω μικρότερη ταχύτητα περιστροφής.



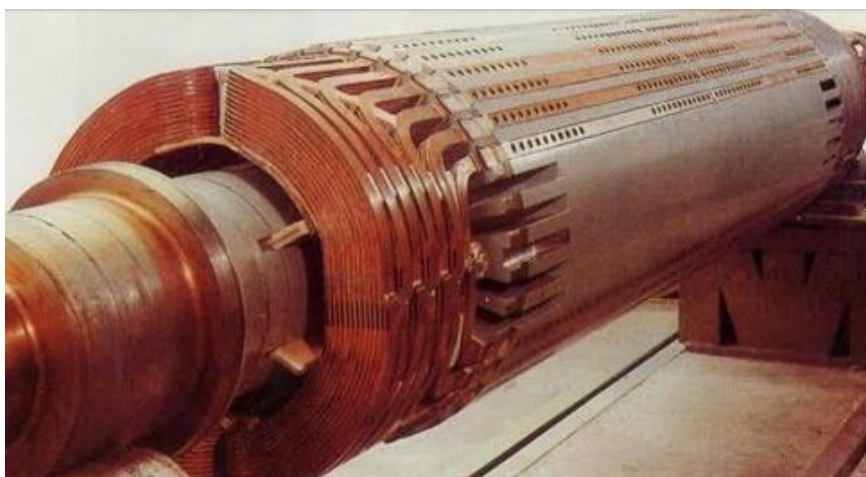
Σχήμα 31-Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας Επαγωγικής Μηχανής για μεταβολή της αντίστασης δρομέα δακτυλιοφόρου δρομέα

2.2.2 Σύγχρονες Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος

2.2.2.1 Κατασκευαστικά Στοιχεία Σύγχρονων Μηχανών

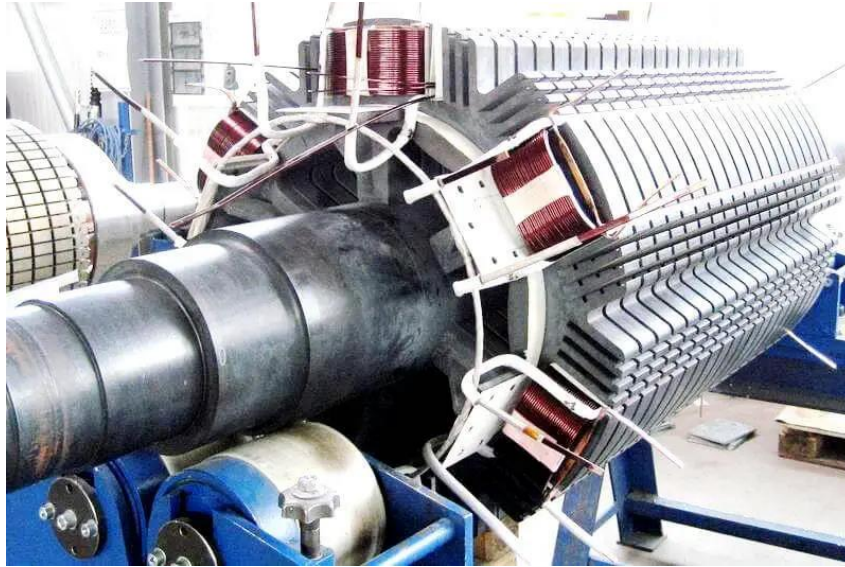
Οι Σύγχρονες Μηχανές Ε.Ρ., λόγω της κατασκευής και της αρχής λειτουργίας τους, χρησιμοποιείται περισσότερο σε εφαρμογές γεννητριών. Αυτό έχει αλλάξει τα τελευταία χρόνια, λόγω της εξέλιξης των ηλεκτρονικών ισχύος και των μεθόδων ελέγχου, με αποτέλεσμα οι Σύγχρονοι Κινητήρες να χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών κίνησης. Στην ίδια κατεύθυνση έχει συμβάλει και η εμφάνιση νέων τοπολογιών Σύγχρονων Μηχανών για λειτουργίες ηλεκτρικής κίνησης.

Ξεκινώντας από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, οι Σύγχρονες Μηχανές Ε.Ρ. αποτελούνται από τον στάτη και τον δρομέα. Ο στάτης έχει παρόμοια μορφή με αυτή των επαγωγικών μηχανών, όπου έχουμε το τριφασικό τύλιγμα στον στάτη, σε αυλακώσεις. Ο δρομέας των Σύγχρονων Μηχανών διαφέρει και βάσει αυτού γίνεται η κατηγοριοποίηση των Σύγχρονων Μηχανών. Οι Σύγχρονες Γεννήτριες κατηγοριοποιούνται σε Σύγχρονες Γεννήτριες Ε.Ρ. Κυλινδρικού Δρομέα και Σύγχρονες Γεννήτριες Έκτυπων Πόλων. Στο σχήμα 32 φαίνεται η μορφή του κυλινδρικού δρομέα.



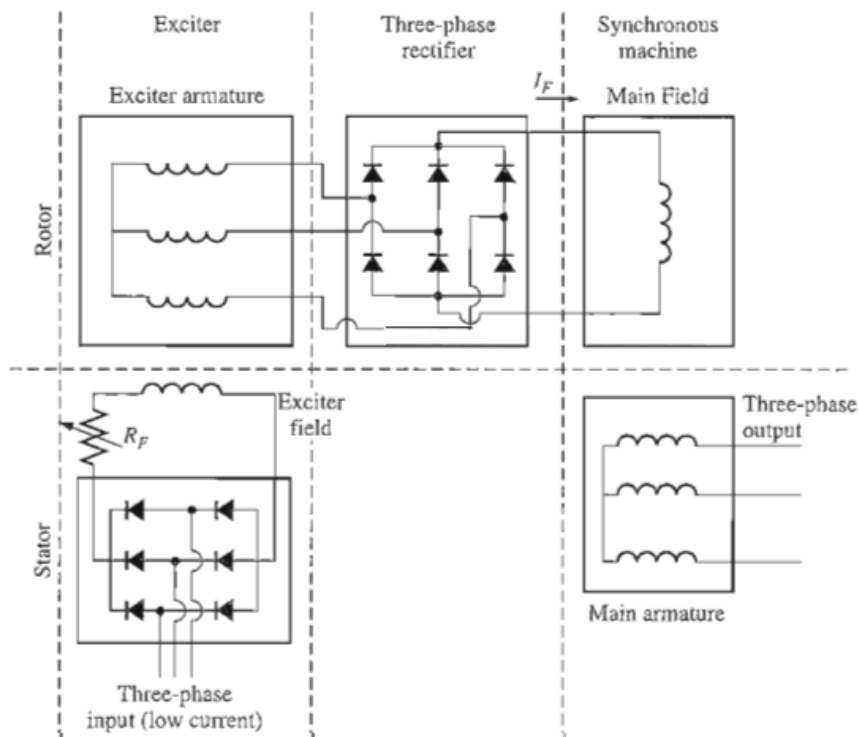
Σχήμα 32-Κυλινδρικός Δρομέας Σύγχρονης Μηχανής

Ο κυλινδρικός δρομέας περιλαμβάνει αυλακώσεις στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα ή οι αγωγικές μπάρες. Ο πυρήνας του δρομέα κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα για την αποφυγή των απωλειών λόγω δινορρευμάτων. Σημειώνεται ότι το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Οι κυλινδρικοί δρομείς χρησιμοποιούνται σε Σύγχρονες Μηχανές δύο ή τεσσάρων πόλων. Στην περίπτωση του δρομέα έκτυπων πόλων, έχουμε εξέχοντες πόλους από τον πυρήνα του δρομέα, πάνω στους οποίους τυλίγεται το τύλιγμα αυτού. Η μορφή ενός δρομέα έκτυπων πόλων φαίνεται στην εικόνα 33. Οι δρομείς έκτυπων πόλων χρησιμοποιούνται σε Σύγχρονες Μηχανές άνω των τεσσάρων πόλων.



Σχήμα 33-Δρομέας Έκτυπων Πόλων Σύγχρονης Μηχανής

Το τύλιγμα συνεχούς ρεύματος που υπάρχει στον δρομέα μπορεί να τροφοδοτείται με διαφορετικούς τρόπους. Μπορεί να συνδέεται με εξωτερικό κύκλωμα διέγερσης, μέσω δακτυλίων και ψηκτρών, είτε να υπάρχει προσαρμοσμένο κύκλωμα τροφοδοσίας επάνω στον δρομέα. Καθώς η τοπολογία ψηκτρών απαιτεί συχνή συντήρηση, σε πολλές εφαρμογές προτιμάται η δεύτερη επιλογή. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει ένα δεύτερο κύκλωμα τόσο στον στάτη όσο και στον δρομέα της μηχανής υπεύθυνα για την διέγερση του τυλίγματος δρομέα. Στο σχήμα 34 φαίνεται το διάγραμμα για μια Σύγχρονη Γεννήτρια με διεγέρτρια.

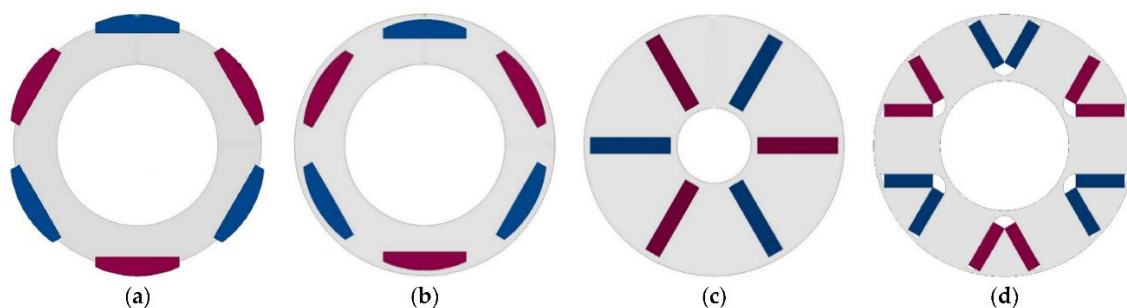


Σχήμα 34-Σχηματικό διάγραμμα διέγερσης Σύγχρονης Μηχανής χωρίς ψήκτρες.

Στον στάτη υπάρχει το κύριο τριφασικό τύλιγμα του στάτη και το βοηθητικό τύλιγμα της διεγέρτριας, το οποίο αποτελείται από τριφασικό σύστημα με ανορθωτή και ρυθμιζόμενη αντίσταση. Στον δρομέα υπάρχει το κύριο τύλιγμα διέγερσης του δρομέα, το οποίο τροφοδοτείται μέσω ανορθωτικής διάταξης από το τύλιγμα δρομέα της διεγέρτριας.

Επιπλέον κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει για τους Σύγχρονους Κινητήρες με βάση τον δρομέα τους. Τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται κατά κόρον οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες αποτελούνται από δρομέα με μόνιμους μαγνήτες, που αντικαθιστούν το συνεχές τύλιγμα του δρομέα. Με βάση την τοποθέτηση των μαγνητών έχουμε τις εξής κατηγορίες Σύγχρονων Κινητήρων Μόνιμου Μαγνήτη, όπως φαίνονται στην εικόνα 35:

- Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη επιφανειακής τοποθέτησης
- Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη επιφανειακής ένθετα τοποθέτησης
- Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη εσωτερικά στον δρομέα ακτινικής μαγνήτισης
- Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη εσωτερικά στον δρομέα με εφαπτομενικής μαγνήτισης



Σχήμα 35-Τοπολογίες δρομέων Σύγχρονης Μηχανής με μόνιμους μαγνήτες

Ανάλογα με την μεθοδολογία ελέγχου μιας Σύγχρονης Μηχανής Μόνιμου μαγνήτη, μπορούμε να έχουμε μία ακόμα κατηγοριοποίηση, τις Σύγχρονες Μηχανές με ημιτονοειδή διέγερση (BLAC-Brushless AC Motors) και τις Σύγχρονες Μηχανές με τραπεζοειδή διέγερση (BLDC-Brushless DC Motors). Η δεύτερη κατηγορία αν και αποτελεί Σύγχρονη Μηχανή, λόγω του τρόπου ελέγχου της, και επειδή θυμίζει τον τρόπο ελέγχου κινητήρων DC ονομάζεται BLDC.

Στην κατηγορία των Σύγχρονων Μηχανών ανήκουν και οι Σύγχρονες Μηχανές Μαγνητικής Αντίδρασης (Synchronous Reluctance Motors). Οι συγκεκριμένες μηχανές λειτουργούν με την σύγχρονη ταχύτητα, όπως και οι αντίστοιχες σύγχρονες μηχανές με τύλιγμα στον δρομέα ή με μόνιμους μαγνήτες. Ωστόσο, κατασκευαστικά διαφέρουν στην δομή του δρομέα. Η Σύγχρονη Μηχανή Μαγνητικής Αντίδρασης στηρίζει την λειτουργία της στην μαγνητική αντίδραση. Ο δρομέας της μηχανής

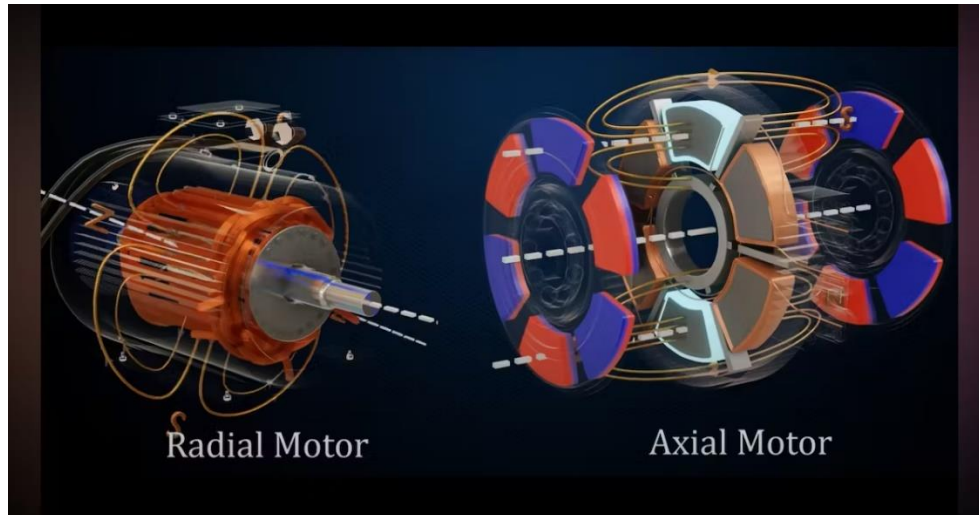
σχεδιάζεται χωρίς μαγνήτες ή τύλιγμα αλλά έχει ιδιαίτερη μορφή εκτυπότητας έτσι ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία μέσω της μαγνητικής αντίδρασης. Δύο τύποι δρομέων Σύγχρονης Μηχανής Μαγνητικής Αντίδρασης φαίνονται στο σχήμα 36:



Σχήμα 36-Σύγχρονες Μηχανές Μαγνητικής Αντίδρασης

Στην πρώτη περίπτωση (αριστερά) χρησιμοποιούνται συγκεντρωμένα τυλίγματα στον στάτη και ο δρομέας αποτελείται από λίγους πόλους με υψηλή εκτυπότητα. Ο συγκεκριμένος τύπος δρομέα βρίσκεται στις Σύγχρονες Μηχανές Διακοπτικής Μαγνητικής Αντίδρασης (Switched Reluctance Motor). Στην δεύτερη περίπτωση (δεξιά) έχουν κατανομημένο τύλιγμα στον στάτη και διαφορετική μορφή του δρομέα. Στην ουσία, χρησιμοποιούνται κενά αέρα με συγκεκριμένη κατεύθυνση και διαστάσεις για την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής.

Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση των Σύγχρονων Μηχανών μπορεί να γίνει με βάση την διεύθυνση της μαγνητικής ροής. Όπως φαίνεται στο σχήμα, μπορούμε να έχουμε Σύγχρονες Μηχανές Ακτινικής Ροής, που αποτελούν την συμβατική μορφή ηλεκτρικών μηχανών ή Σύγχρονες Μηχανές Αξονικής Ροής. Στις συγκεκριμένες μηχανές, η μαγνητική ροή έχει κατεύθυνσή προς στον άξονα περιστροφής. Η συγκεκριμένη κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών έχει ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμογές μεταφοράς καθώς προσφέρει την δυνατότητα για ενσωμάτωση σε εφαρμογές μέσα στον τροχό (in-wheel integration) με υψηλή πυκνότητα ισχύος.



Σχήμα 37-Ηλεκτρική μηχανή ακτινικής ροής (αριστερά) και αξονικής ροής(δεξιά)

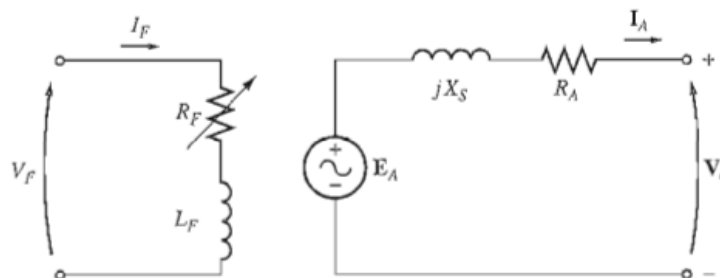
2.2.2.2 Αρχή Λειτουργίας, Χαρακτηριστική και Έλεγχος Σύγχρονων Μηχανών

Η Σύγχρονη Μηχανή οφείλει το όνομά της στην αρχή λειτουργίας που στηρίζεται. Η σύγχρονη ταχύτητα δίνεται από την εξής σχέση:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (19)$$

, όπου n_m είναι η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου και P είναι ο αριθμός πόλων της μηχανής.

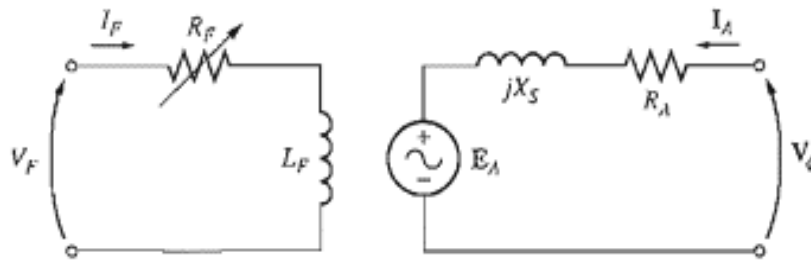
Ο δρομέας της Σύγχρονης Μηχανής περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με την σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη. Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μιας Σύγχρονης Γεννήτριας και ενός Σύγχρονου Κινητήρα φαίνονται στις εικόνες 38 και 39 αντίστοιχα. Επίσης, παρακάτω φαίνονται και οι εξισώσεις των αντίστοιχων ισοδύναμων κυκλωμάτων.



Σχήμα 38-Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Γεννήτριας

$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \quad (20)$$

$$V_f = R_f I_f + jX_f I_f \quad (21)$$

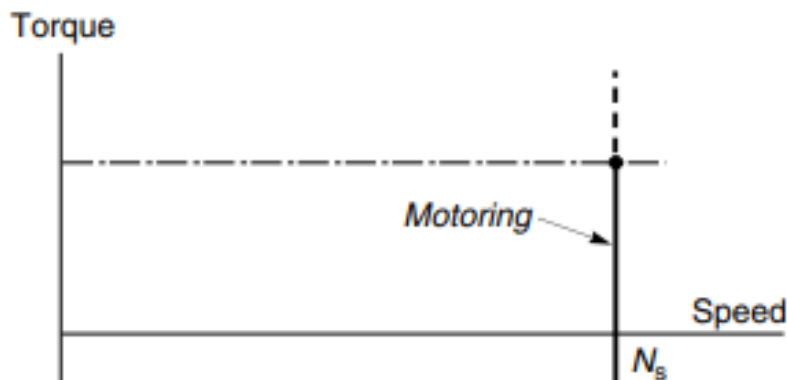


Σχήμα 39-Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονου Κινητήρα

$$V_\phi = E_A + jX_s I_A + R_A I_A \quad (22)$$

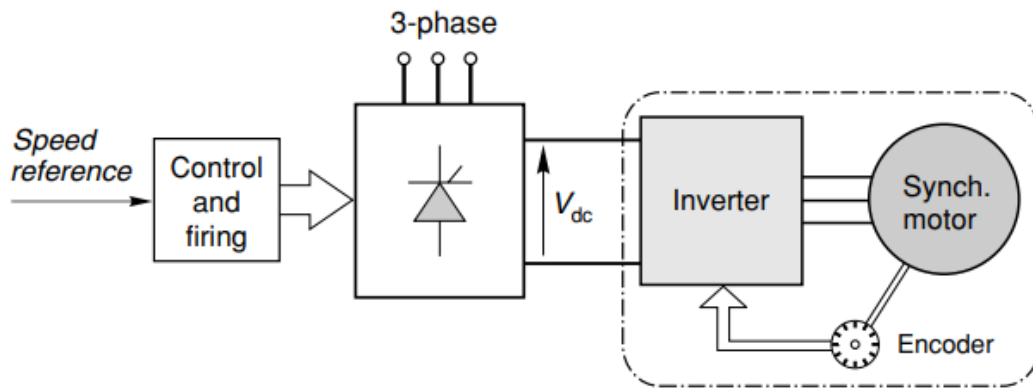
$$V_f = R_f I_f + jX_f I_f \quad (23)$$

Το κύκλωμα διέγερσης αποτελείται από την ρυθμιζόμενη αντίσταση διέγερσης R_f και την επαγωγή L_f ενώ το κύκλωμα του στάτη αποτελείται από την επαγόμενη τάση E_A , την αντίσταση στάτη R_A και την επαγωγή jX_s . Η διαφορά μεταξύ γεννήτριας και κινητήρα φαίνεται στην κατεύθυνση του ρεύματος στάτη. Η χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας ενός Σύγχρονου Κινητήρα είναι απλώς μια ευθεία γραμμή καθώς λειτουργεί υπό την σύγχρονη ταχύτητα και φαίνεται στο σχήμα 40.



Σχήμα 40-Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας Σύγχρονου Κινητήρα

Καθώς οι Σύγχρονοι Κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές με έλεγχο ταχύτητας, θέσης και ροπής σε κλειστό βρόχο στα μέσα μεταφοράς, κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί η δομή αυτών των συστημάτων. Στο σχήμα 41 φαίνεται η δομή ενός τέτοιου συστήματος.



Σχήμα 41-Σχήμα ελέγχου κλειστού βρόχου Σύγχρονου Κινητήρα

Ο έλεγχος μιας Σύγχρονης Μηχανής γίνεται κυρίως με μεθόδους κλειστού βρόχου καθώς παρουσιάζει προβλήματα ευστάθειας σε ανοιχτό βρόχο. Σημειώνεται ότι ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να οδηγηθεί με ευκολία σε ανοιχτό βρόχο αλλά και σε κλειστό. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ένα κινητήριο σύστημα ελέγχου Σύγχρονου Κινητήρα αποτελείται από μετατροπέα ανόρθωσης της τάσης εισόδου, έναν αντιστροφέα και τον απαραίτητο αισθητήρα για την ανάδραση ταχύτητας και θέσης. Ο έλεγχος της μηχανής γίνεται μέσω της θεωρίας Διανυσματικού Ελέγχου, που απλοποιεί τις εξισώσεις της μηχανής.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των Ηλεκτρικών Μηχανών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεταφοράς. Σε κάθε κεφάλαιο της ενότητας γίνεται σύγκριση με βάση την κατηγορία συστημάτων μεταφοράς. Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται μερικές από τις σημαντικότερες παραμέτρους σύγκρισης ηλεκτρικών μηχανών σε εφαρμογές μεταφοράς.

3.1 Παράμετροι Σύγκρισης Ηλεκτρικών Μηχανών σε Εφαρμογές Μεταφοράς

Για την σύγκριση των Ηλεκτρικών Μηχανών σε εφαρμογές μεταφοράς απαιτείται η θέσπιση παραμέτρων έτσι ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του κάθε τύπου μηχανής και η σύγκριση αυτών. Παρακάτω αναλύονται οι συγκεκριμένοι παράμετροι:

- a) Ο λόγος ισχύος προς βάρος ορίζεται ως :

$$PWR = \frac{Power}{Weight} \left(\frac{kW}{Kg} \right)$$

, και εκφράζει την ισχύ που μπορεί να αποδώσει μια ηλεκτρική μηχανή προς το συνολικό βάρος του.

- b) Παρόμοια, ο πυκνότητα ισχύος, που ορίζεται ως η ισχύ ανά κυβικό μέτρο (W/m³) χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ισχύος συναρτήσει του μεγέθους.
- c) Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ιδανική χαρακτηριστική ροπής-στροφών για κάθε εφαρμογή κίνησης διαφέρει, γι' αυτό και η κάθε μηχανή μπορεί να ταιριάζει διαφορετικά στην εκάστοτε περίπτωση.
- d) Η απόδοση, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της χρήσιμης ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου του ηλεκτρικού κινητήρα
- e) Το κόστος, που συνδέεται με τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τα κατασκευαστικά μέρη, τα περιφερειακά συστήματα ελέγχου κ.λπ.

3.2 Ηλεκτρικές Μηχανές στην Αυτοκινητοβιομηχανία

Τα τελευταία χρόνια, λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συμβατικών αυτοκινήτων εσωτερικής καύσης υπάρχει έντονη υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος κυριαρχούν στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελούν την κυρίαρχη ομάδα ηλεκτρικών μηχανών και είναι οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται από τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα. Τα τελευταία χρόνια για την αύξηση της απόδοσης, της πυκνότητας ισχύος και των δυνατοτήτων ελέγχου χρησιμοποιούνται οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη. Στον πίνακα 1

φαίνονται μερικά από τα πιο διαδεδομένα ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα στην αγορά, η χρονολογία κατασκευής, ο τύπος οχήματος και οι χρησιμοποιούμενοι ηλεκτρικοί κινητήρες.

Πίνακας 1. Μοντέλα Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων, Χρονολογία, Τύπος Αυτοκινήτου και Χρησιμοποιούμενος Ηλεκτρικός Κινητήρας

Μοντέλο	Χρονολογία	Τύπος Αυτοκινήτου	Ηλεκτρικός Κινητήρας
Honda Accord	2005	Υβριδικό	Σύγχρονος Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
Hona Civic	2005	Υβριδικό	Σύγχρονος Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
Toyota Prius	2010	Υβριδικό	Σύγχρονος Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
Toyota Prius	2018	Υβριδικό	Σύγχρονος Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
Chevrolet Volt	2016	Υβριδικό	Σύγχρονος Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
Chevrolet Volt	2016	Υβριδικό	Σύγχρονος Κινητήρας Μαγνητικής Αντίδρασης υποβοηθούμενος από Μόνιμους Μαγνήτες
BMW i3	2014	Ηλεκτρικό	Σύγχρονος Κινητήρας Μαγνητικής Αντίδρασης υποβοηθούμενος

			από Μόνιμους Μαγνήτες
Nissan Leaf	2012	Ηλεκτρικό	Σύγχρονος Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
Renault Zoe	2014	Υβριδικό	Σύγχρονος Κινητήρας με τύλιγμα στον δρομέα
Tesla Model S	2012	Ηλεκτρικό	Επαγωγικός Κινητήρας

Αρχικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε την απουσία των ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος, καθώς οι ηλεκτρικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι συγκριτικά πιο αποδοτικοί, με μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, μειωμένη συντήρηση και ευκολία ελέγχου μέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Ο Επαγωγικός Κινητήρας αποτελούσε την επιλογή στα πρώτα ηλεκτρικά μοντέλα ενώ τα τελευταία χρόνια βλέπουμε ότι προτιμώνται Σύγχρονοι Κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι αποτελούν την κυρίαρχη επιλογή.

Σε εφαρμογές αυτοκινητοβιομηχανίας, οι απαιτήσεις ενός κινητήρα έχουν να κάνουν με την υψηλή απόδοση, έτσι ώστε να έχουμε τη μέγιστη αυτονομία και ταυτόχρονα την ελάχιστη κατανάλωση. Επιπλέον, απαιτείται υψηλός λόγος ισχύος προς βάρος καθώς υπάρχουν περιορισμοί ως προς το μέγεθος και την τοποθέτηση σε ένα αυτοκίνητο. Ακόμα, πρέπει να καλύπτεται το εκτεταμένο εύρος ταχυτήτων. Καθώς μια ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως κινητήρας όσο και σαν γεννήτρια, αυτό αποτελεί σημαντικό ζήτημα για την ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση και αυτό αποτελεί μία ακόμα απαίτηση από τον χρησιμοποιούμενο κινητήρα. Τέλος, το κόστος θα πρέπει να ελαχιστοποιείται. Το κόστος συνδέεται τόσο με τα χρησιμοποιούμενα υλικά των κινητήρων όσο επίσης με τα απαραίτητα περιφερειακά συστήματα ελέγχου του ηλεκτρικού κινητήρα. Ο έλεγχος ταχύτητας και ροπής απαιτεί ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και αισθητήρες. Συγχρόνως, οι απαιτήσεις λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα καθιστούν απαραίτητη την χρήση ψυκτικού συστήματος υψηλών προδιαγραφών,

Φαίνεται ότι η σημαντικότερη σύγκριση ηλεκτρικών κινητήρων είναι μεταξύ Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη και Επαγωγικού Κινητήρα. Όσον αφορά την απόδοση και τον λόγο ισχύος-βάρους, ο Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη

υπερτερεί σε σχέση με τον Επαγωγικό Κινητήρα. Και οι δύο μηχανές μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων και να προσαρμοστούν για τις απαιτήσεις ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση. Βασικό πλεονέκτημα των επαγωγικών κινητήρων σε σχέση με τους Σύγχρονους Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη είναι η απουσία των μαγνητών που αποτελούν σπάνιες γαίες. Λόγω της χρήσης μόνιμων μαγνητών το κόστος είναι υψηλότερο, τίθενται θέματα βιωσιμότητας καθώς και θέματα εφοδιαστικών αλυσίδων. Φυσικά, τίθενται και θέματα σφαλμάτων όπως απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών κατά την υπερφόρτιση του κινητήρα.

Από την εργασία [5] έχουν εξαχθεί δείκτες που αξιολογούν διάφορους παράγοντες για την επιλογή ενός ηλεκτρικού κινητήρα για την χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα, οι οποίοι φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

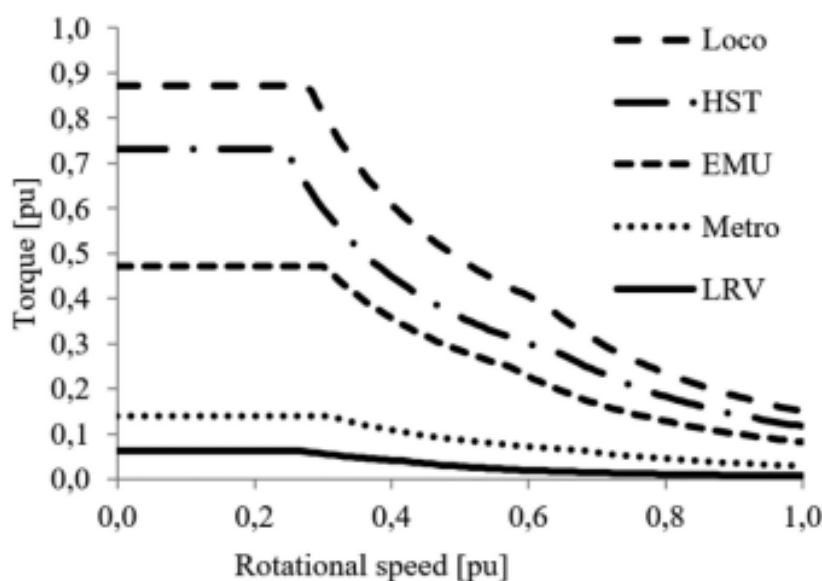
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικών Κινητήρων DC, Επαγωγικών Κινητήρων και Σύγχρονων Κινητήρων Μόνιμου Μαγνήτη για εφαρμογές αυτοκίνησης

Χαρακτηριστικά	DC Κινητήρας	Επαγωγικός Κινητήρας	Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη
Πυκνότητα Ισχύος	2.5	3.5	5
Απόδοση	2.5	3.5	5
Έλεγχος	5	5	4
Αξιοπιστία	3	5	4
Τεχνολογική Ωριμότητα	5	5	4
Κόστος	4	5	3
Σύνολο	22	27	25

Παρατηρούμε ότι ο επαγωγικός κινητήρας σημειώνει το μεγαλύτερο σκορ. Ο Σύγχρονος Κινητήρας σημειώνει χαμηλότερες τιμές λόγω αξιοπιστίας, ελέγχου, τεχνολογικής ωριμότητας και κόστους. Ωστόσο, οι τιμές αυτές προέρχονται από την συγκεκριμένη εργασία του 2008. Από την χρονολογία αυτή και έπειτα οι Σύγχρονοι Κινητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα μοντέλων στην αυτοκινητοβιομηχανία, με αποτέλεσμα οι παραπάνω δείκτες να έχουν βελτιωθεί σημαντικά και να είναι συγκρίσιμοι ή και ανώτεροι των αντίστοιχων του Επαγωγικού Κινητήρα.

3.3 Ηλεκτρικές Μηχανές σε Σιδηροδρομικές Εφαρμογές

Όσον αφορά τους Σιδηροδρόμους, οι υποψήφιες ηλεκτρικές μηχανές παραμένουν οι ίδιες, με τις Ηλεκτρικές Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος να αντικαθιστούν σιγά σιγά τα τελευταία χρόνια τις Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος. Οι κύριες υποψήφιες μηχανές προς σύγκριση είναι οι Επαγωγικοί Κινητήρες, Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη και Σύγχρονοι Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης. Το προφίλ ροπής ταχύτητας που συναντάται σε σιδηροδρομικές εφαρμογές διαφέρει ανά περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 42 για τρένα (loco), τρένα υψηλών ταχυτήτων (HST), μονάδες πολλαπλών βαγονιών (EMU), μετρό (metro) και τραμ (LRV).



Σχήμα 42-Χαρακτηριστικής Ροπής-Ταχύτητας Σιδηροδρομικών εφαρμογών

Παρατηρούμε ότι η πιο απαιτητική κατηγορία είναι τα τρένα, στα οποία απαιτείται υψηλή ροπή εκκινήσεως καθώς και οι υψηλές ταχύτητες. Στις εφαρμογές χαμηλής ροπής και μεγάλου εύρους ταχυτήτων χρησιμοποιούνται κινητήρες ελεγχόμενοι από μετατροπείς. Σε μετρό χρησιμοποιούνται ομάδες κινητήρων ελεγχόμενοι από μετατροπείς. Επιπλέον υπάρχει απαίτηση για κινητήρες με αυξημένη προστασία από σκόνη και εξωτερικές συνθήκες, κυρίως σε τραμ και τρένα.

Παρόμοια με άλλες εφαρμογές, ο Επαγωγικός Κινητήρας αποτελεί την κυρίαρχη επιλογή, λόγω απλής κατασκευής, αξιοπιστίας και χαμηλού κόστους. Επιπλέον σε πολλές σιδηροδρομικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται πολλαπλοί κινητήρες ελεγχόμενοι από μετατροπείς. Οι επαγωγικοί κινητήρες μπορούν να ελεγχθούν από έναν μετατροπέα ενώ οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη πρέπει να συνοδεύονται από έναν μετατροπέα. Μια άλλη κατηγορία ηλεκτρικών κινητήρων υποψήφια για σιδηροδρομικές εφαρμογές είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης. Ωστόσο, εμφανίζουν προκλήσεις που συνδέονται με τον συντελεστή ισχύος, τον έλεγχο και την πυκνότητα ισχύος. Έχουν εξαχθεί οι παρακάτω βαθμοί-

δείκτες με βάση διαφορετικούς παράγοντες για Επαγωγικούς Κινητήρες με ρότορα χαλκού και αλουμινίου, Σύγχρονους Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη, Σύγχρονους Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης και Σύγχρονους Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης υποβοηθούμενοι από μόνιμους μαγνήτες.

Motor type	IM, Cu	IM, Al	PM	SynRel	PMSynRel
Efficiency	4	2	10	6	8
Torque density	6	4	10	4	8
Field weakening	6	6	10	4	8
Power factor	6	6	10	2	8
Multiple drive	8	10	2	2	2
Cost	6	8	2	10	4
Reliability	10	10	8	10	8
Safety	10	10	4	10	6

Σχήμα 43-Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών κινητήρων για σιδηροδρομικές εφαρμογές [10]

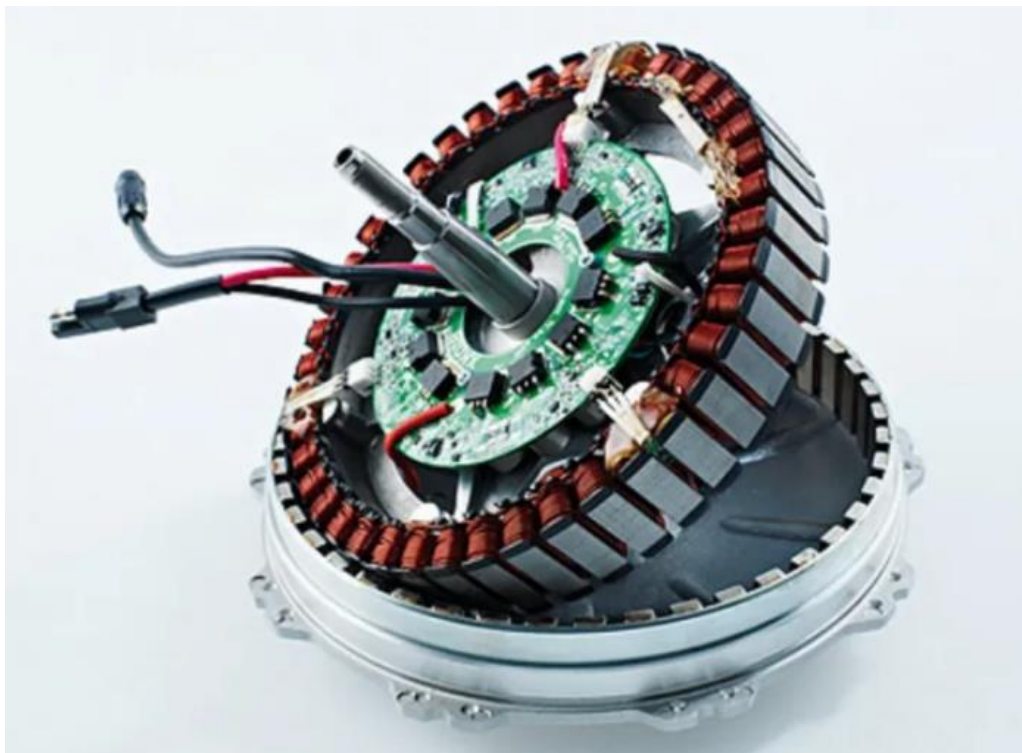
Παρατηρούμε ότι οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου μαγνήτη εμφανίζουν τους μεγαλύτερους δείκτες απόδοσης, πυκνότητας ροπής, εξασθένισης πεδίου για αυξημένη ταχύτητα και συντελεστή ισχύος. Ωστόσο, εμφανίζουν χαμηλούς δείκτες στο κόστος και στην χρήση πολλαπλών μετατροπέων. Στους παράγοντες κόστους, αξιοπιστίας και ασφάλειας ο Σύγχρονος Κινητήρας Μαγνητικής Αντίδρασης και ο Επαγωγικός Κινητήρας τόσο με ρότορα χαλκού όσο και με αλουμίνιο αποτελούν τις καλύτερες επιλογές. Πέρα από τους δείκτες πολλαπλών μετατροπέων και κόστους, οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης υποβοηθούμενοι από μαγνήτες φαίνεται να συνδυάζουν πλεονεκτήματα των άλλων μηχανών και αποτελούν μια ελπιδοφόρα επιλογή. Ωστόσο, είναι μια μη ώριμη ακόμα τεχνολογία.

3.4 Ηλεκτρικές Μηχανές σε Εφαρμογές Μικρό-Κινητικότητας

Στις εφαρμογές μικρό-κινητικότητας περιλαμβάνονται ήπιες μορφές κίνησης, όπως ηλεκτρικά σκούτερ, ηλεκτρικά ποδήλατα, ηλεκτρικά τρίκυκλα ή μικρά ηλεκτρικά οχήματα. Ένας από τους πιο βασικούς παράγοντες σε αυτές τις μορφές μεταφοράς είναι ο λόγος ισχύος προς βάρος καθώς υπάρχει περιορισμένος χώρος. Επίσης σημαντικό είναι το κόστος, το οποίο πρέπει να είναι το ελάχιστο δυνατόν, ειδικά για τέτοιες εφαρμογές όπου πρέπει να είναι προσιτές και προσβάσιμες για την υιοθέτηση της

ηλεκτροκίνησης. Οι υποψήφιοι ηλεκτρικοί κινητήρες για εφαρμογές μικρό-κινητικότητας περιλαμβάνουν τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, τους επαγωγικούς κινητήρες, τους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και τους σύγχρονους κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος λόγω της απλότητας ελέγχου τους καθώς και του χαμηλού κόστους τους σε χαμηλή ισχύ χρησιμοποιούνται ακόμα σε εφαρμογές όπως ηλεκτρικά σκούτερ και ηλεκτρικά ποδήλατα. Όπως και σε άλλες εφαρμογές, αντικαθίστανται από κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Στα ηλεκτρικά ποδήλατα και στα ηλεκτρικά σκούτερ προτιμώνται Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη λόγω του υψηλού λόγου ισχύος-βάρους, της ευκολίας ενσωμάτωσης στην κατασκευή και τις δυνατότητες ελέγχου. Μάλιστα η πιο δημοφιλής επιλογή είναι οι BLDC κινητήρες λόγω της απλότητας ελέγχου. Σε εφαρμογές τρικύκλων και μικρών οχημάτων χρησιμοποιούνται τόσο επαγωγικοί όσο και σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Και σε αυτές τις περιπτώσεις καθοριστικοί παράγοντες είναι η ενσωμάτωση στο σύστημα, ο λόγος ισχύος-βάρους και το κόστος.

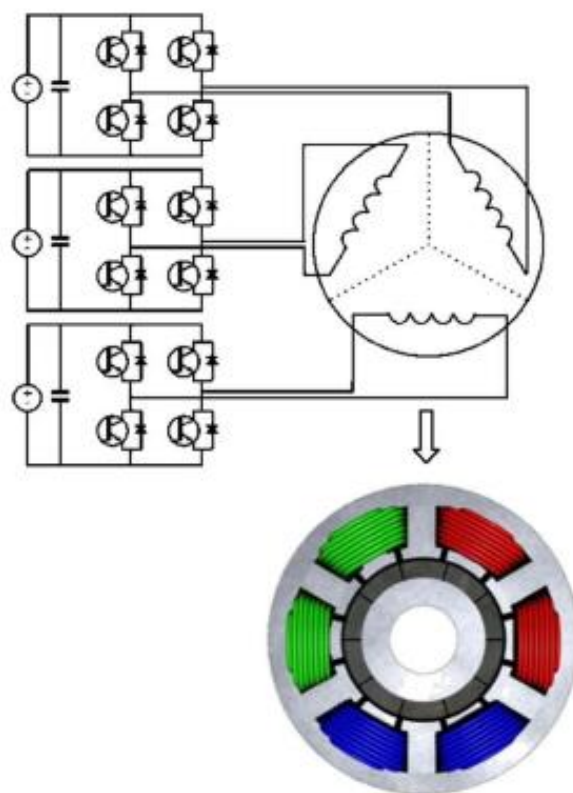
Στην εικόνα 44 φαίνεται ένας Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ηλεκτρικών ποδηλάτων. Στην προκειμένη περίπτωση τα τυλίγματα βρίσκονται στο εσωτερικό ενώ οι μαγνήτες στο εξωτερικό. Στον άξονα είναι προσαρμοσμένα και διάφορα περιφερειακά ηλεκτρονικά, όπως αισθητήρες θέσης ταχύτητας και θερμοκρασίας, απαραίτητοι για τον έλεγχο της λειτουργίας.



Σχήμα 44-Σύγχρονος Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη, ενσωματωμένος σε ρόδα (in-wheel application).

3.5 Ηλεκτρικές Μηχανές σε Εφαρμογές Αεροπλοΐας

Σημαντικές προσπάθειες έχουν γίνει για την δημιουργία ‘πιο ηλεκτρικών’ ή ακόμα και ηλεκτρικών αεροσκαφών. Στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν όλο και περισσότεροι ηλεκτρικοί κινητήρες για τα διάφορα υποσυστήματα των αεροσκαφών που απαιτούν κίνηση, πέρα από τις κύριες μηχανές πρόωσης. Φυσικά, υπάρχουν σημαντικές απαιτήσεις από τους κινητήρες καθώς στα περισσότερα υποσυστήματα είναι ανεπίτρεπτο να χαθεί ο έλεγχος κατά την ύπαρξη πιθανού σφάλματος. Οι υποψήφια ηλεκτρικές μηχανές για εφαρμογές αεροσκαφών είναι οι Επαγωγικοί Κινητήρες, οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη και Σύγχρονοι Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης. Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούν μια αξιόπιστη επιλογή αλλά δεν υπάρχουν αρκετά περιθώρια επέκτασης για λειτουργία με περισσότερες φάσεις και πλεονασμό για λειτουργία με ανοχή σε σφάλματα. Αντιθέτως οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη δίνουν αυτήν την δυνατότητα και μπορούν να τροποποιηθούν έτσι ώστε να περιλαμβάνουν πολλαπλά τυλίγματα και φάσεις καθώς και διαφορετικές συνδέσεις με μετατροπείς. Μια τοπολογία με ανοχή σε σφάλματα φαίνεται στην εικόνα 45.



Σχήμα 45-Τοπολογία οδήγησης Σύγχρονης Μηχανής με ανοχή σε σφάλματα

Οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης αποτελούν επίσης μια καλή υποψήφια επιλογή καθώς είναι κινητήρες με σθεναρή κατασκευή ρότορα, δεν

περιέχουν μαγνήτες ή τυλίγματα σε αυτόν και μπορούν να αντέξουν υψηλές μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις. Φυσικά, οι συγκεκριμένοι κινητήρες πρέπει να περιλαμβάνουν ιδιότητες ανοχής σε σφάλματα. Στον πίνακα της εικόνας 46 από την εργασία [13] φαίνονται τα βασικότερα συγκριτικά χαρακτηριστικά των τριών υποψήφιων ηλεκτρικών κινητήρων για εφαρμογές αεροσκαφών.

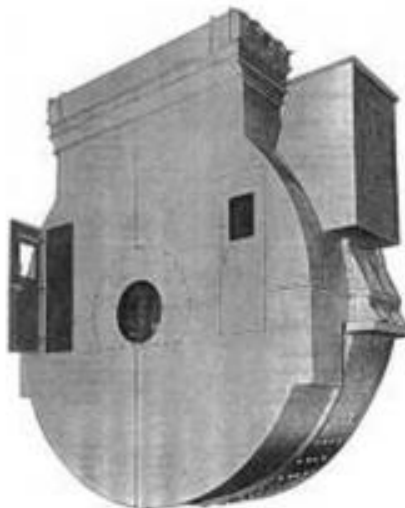
Performance	IM-cage	SR	PMAC
Fault tolerance	low	high	high
Power density	moderate	moderate	high
Robustness	√	√	×
Efficiency	moderate	high	high
Cost	low	low	high
Wide speed range	×	√	√
Open-loop control	√	×	×
Close-loop simplicity	√	√	√
Torque ripple	×	high	low
Acoustic noise	×	moderate	low
Areas of application	actuators	high-temp. engine	fuel pump actuators

Σχήμα 46-Χαρακτηριστικά λειτουργίας διαφορετικών μηχανών για εφαρμογές αεροπλοΐας

Οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη έχουν υψηλή ανοχή σε σφάλματα, υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση, χαμηλή κυμάτωση ροπής και ακουστικής εκπομπής ήχου αλλά χαμηλή σθεναρότητα και υψηλό κόστος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργοποιητές αντλιών καυσίμου. Οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν χαμηλή ικανότητα ανοχής σε σφάλματα, καλή πυκνότητα ισχύος, χαμηλό κόστος δυνατότητα ελέγχου σε ανοιχτό και κλειστό βρόχος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές διάφορων ενεργοποιητών. Οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης έχουν υψηλή ικανότητα ανοχής σε σφάλματα, καλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση, χαμηλό κόστος, αλλά υψηλή κυμάτωση ροπής. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές λειτουργίας με υψηλές θερμοκρασίες.

3.6 Ηλεκτρικές Μηχανές σε Εφαρμογές Θαλάσσιων Μεταφορών

Για την πρόωση σε εφαρμογές Θαλάσσιων Μεταφορών, τόσο κινητήρες dc όσο και κινητήρες ac χρησιμοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος και τις δυνατότητες ελέγχου. Οι κινητήρες DC έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές πλοίων λόγω της αξιοπιστίας τους, της ωριμότητας της τεχνολογίας και των δυνατοτήτων ελέγχου. Ωστόσο, σε εφαρμογές πλοίων όπου απαιτείται υψηλή ισχύ, φτάνουν σε μεγάλα κατασκευαστικά μεγέθη. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά από την εικόνα της ηλεκτρικής μηχανής στο σχήμα 47 από το USS Glacier, του πολεμικού ναυτικού των ΗΠΑ, από όπου μπορούμε να συγκρίνουμε το συνολικό μέγεθος με το μέγεθος της πόρτας του ελεγκτή λειτουργίας. Το συγκεκριμένο πλοίο χρησιμοποιούνταν και σαν παγοθραυστικό και η ισχύς του κινητήρα έφτανε τα 6.3MW.



Σχήμα 47-Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος στο πλοίο USS Glacier του πολεμικού ναυτικού των ΗΠΑ

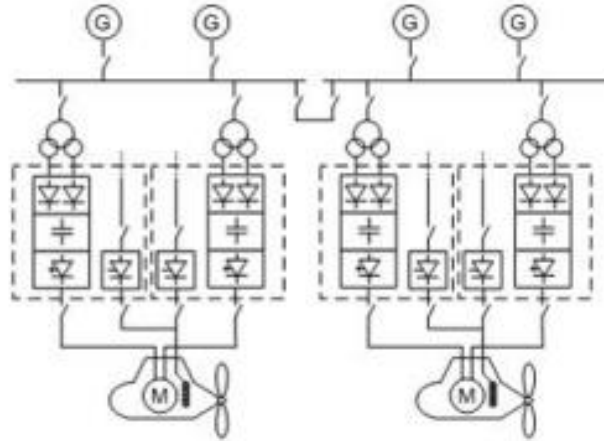
Οι DC κινητήρες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε συστήματα γεννήτριας-κινητήρα για υποβρύχια έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόωση και τροφοδότηση του πλοίου σε περίπτωση απουσίας της κεντρικής μονάδας πρόωσης. Σημειώνεται ότι σημαντικό ζήτημα σε εφαρμογές υποβρυχίων και σκαφών έρευνας είναι η χαμηλή εκπομπή ήχου των κινητήρων.

Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούν την επόμενη μεγάλη κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών για εφαρμογές στην ηλεκτρική πρόωση. Λόγω της συγκριτικά μεγαλύτερης απόδοσης από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, της απουσίας ψηκτρών και αναγκών συντήρησης αποτελούν μία αρκετά προσιτή λύση για τέτοιες εφαρμογές. Ωστόσο, η απαίτηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος για την οδήγηση και τον έλεγχο των επαγωγικών κινητήρων απαιτεί πιο πολύπλοκη λειτουργία και αυξημένο κόστος.

Οι σύγχρονοι κινητήρες με τυλίγμα στον δρομέα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης. Ωστόσο, απαιτείται τροφοδοσία του τυλίγματος δρομέα ενώ σε περίπτωση ψηκτρών απαιτείται συντήρηση. Βέβαια με την χρήση διεγερτριών χωρίς ψήκτρες αυτό μπορεί να αποφευχθεί, αλλά αυξάνεται ο όγκος και το μέγεθος της συνολικής διάταξης. Το παραπάνω μειονέκτημα δεν υπάρχει στους Σύγχρονους Κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες. Ωστόσο, η ύπαρξη υλικών σπάνιων γαιών αποτελεί τόσο πρόβλημα βιωσιμότητας όσο και κόστους. Επιπλέον, η μόνιμη διέγερση που υπάρχει από τους μόνιμους μαγνήτες μπορεί να εισάγει προβλήματα ασφαλείας κατά την συντήρηση και αποσυναρμολόγηση των μηχανών σε διάφορες περιπτώσεις.

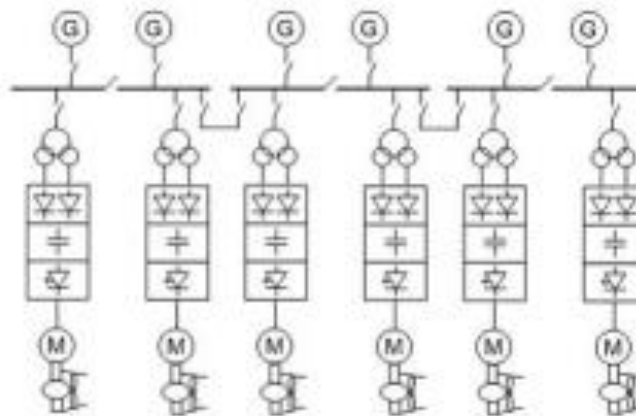
Τα επιβατηγά πλοία χρησιμοποιείται η ηλεκτρική πρόωση καθώς είναι η πιο οικονομική επιλογή για το προφίλ φορτίου και τις διακυμάνσεις αυτού που συναντώνται. Το σύστημα ενός τέτοιου πλοίου φαίνεται στην εικόνα 48.

Χρησιμοποιούνται δύο βασικοί κινητήρες πρόωσης, μετατροπείς ισχύος, μετασχηματιστές και ντιζελογεννήτριες. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι συνήθως σύγχρονοι κινητήρες.



Σχήμα 48-Σύστημα πρόωσης επιβατηγών πλοίων

Τα πλοία διεξαγωγής γεωτρήσεων έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από τα επιβατηγά πλοία καθώς απαιτείται έλεγχος θέσης και ταχύτητας για να διεξάγονται οι απαραίτητες εργασίες. Το σύστημα ενός τέτοιου πλοίου φαίνεται στην εικόνα 49. Χρησιμοποιούνται περισσότεροι κινητήρες και προπέλες, οι οποίοι τροφοδοτούνται από μετατροπείς ισχύος, μετασχηματιστές και ντιζελογεννήτριες.



Σχήμα 49-Σύστημα πρόωσης πλοίων διεξαγωγής γεωτρήσεων

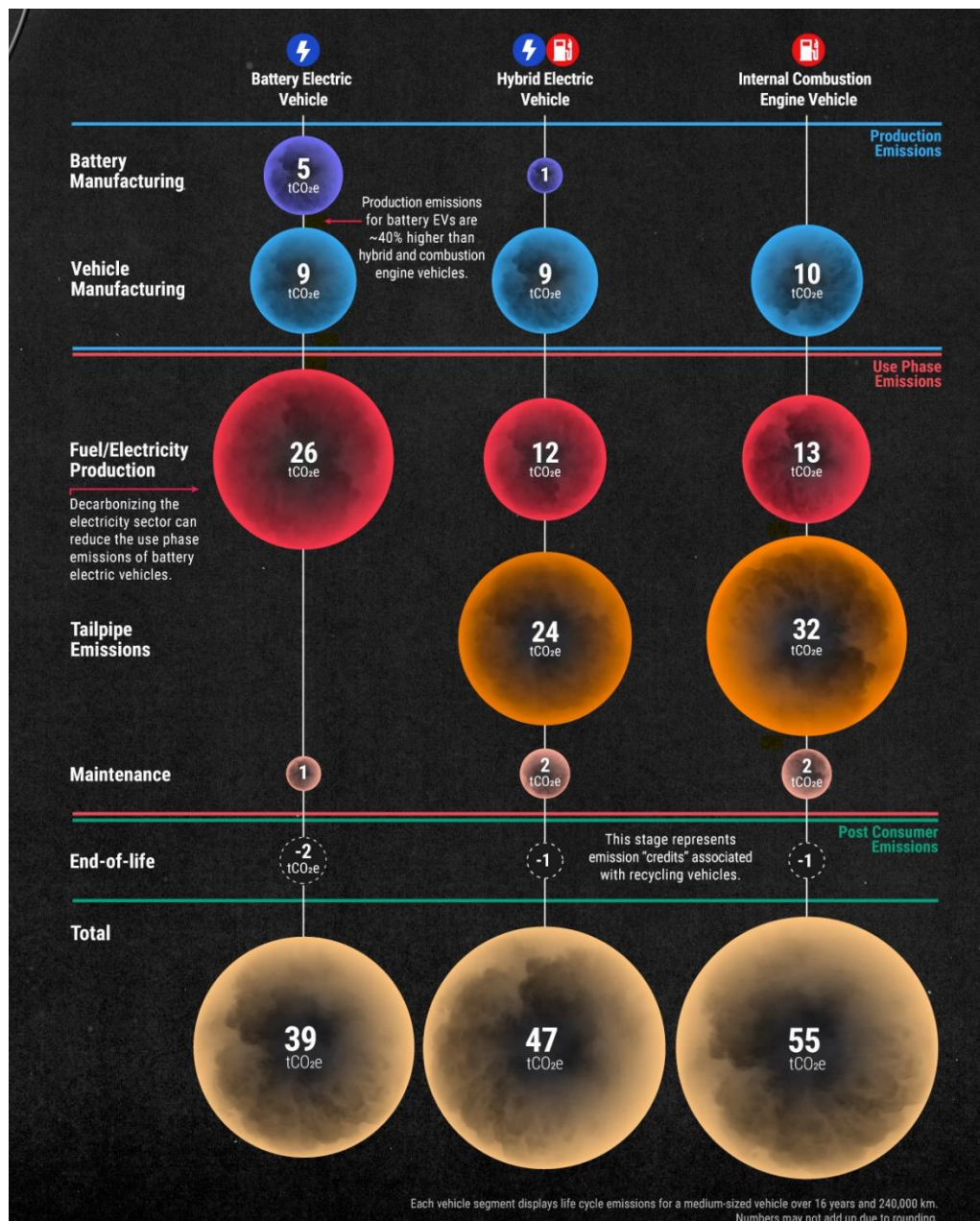
Τα πλοία κατασκευών τύπου OSV/OCV (Offshore support/Construction vessels) αποτελούν πλοία σε διαφορετικά μεγέθη, χαρακτηριστικά και σχεδιασμούς ανάλογα με την εφαρμογή.

3.7 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Οι εφαρμογές μεταφοράς αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι στην συνολική προσπάθεια για μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και της επίτευξης στόχων βιωσιμότητας. Η πιο κρίσιμη επιλογή είναι αυτή μεταξύ των μηχανών εσωτερικής καύσης και των ηλεκτρικών μηχανών σε εφαρμογές κίνησης. Το πιο άμεσο κριτήριο σύγκρισης συνδέεται με τους ρύπους των συμβατικών μηχανών κίνησης. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης, λόγω της αρχής λειτουργίας τους, εκπέμπουν ρύπους που περιέχουν οξειδία του αζώτου και άλλες οργανικές ενώσεις. Αντίθετα, οι ηλεκτρικές μηχανές δεν παράγουν κανέναν από τους παραπάνω ρύπους. Η μείωση των ρύπων συμβάλλει τόσο στην μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, όσο και στην μείωση της ομίχλης στο αστικό περιβάλλον και των επιπτώσεων στην υγεία του ανθρώπινο παράγοντα.

Γενικότερα, οι ηλεκτρικές μηχανές εμφανίζουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης καθώς έχουν απώλειες συνδεδεμένες με τα μηχανικά μέρη και την εσωτερική καύση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ηλεκτροκίνηση να έχει μικρότερες απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας. Έτσι, μειώνεται και η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Ένα επιπλέον συγκριτικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών μηχανών έναντι των συμβατικών κινητήρων εσωτερικής καύσης έγκειται στα υλικά που χρησιμοποιούνται και στις μεθόδους κατασκευής αυτών. Οι ηλεκτρικές μηχανές απαιτούν λιγότερα υλικά και ιδιαίτερα υλικά σπάνιων γαιών. Επίσης, οι απαιτήσεις κατασκευής είναι μικρότερες. Τα παραπάνω συμβάλουν και στην καλύτερη αξιοποίηση των υλικών μετά το τέλος ζωής του κινητήρα. Μάλιστα, με την εξέλιξη διεργασιών κατασκευής και ανακύκλωσης τόσο των ηλεκτρικών μηχανών όσο και των μπαταριών, η βιωσιμότητα των ηλεκτροκινητήριων συστημάτων βελτιώνεται.

Είναι σκόπιμο να εξεταστεί ο συνολικός κύκλος εκπομπών ρύπων των ηλεκτρικών μηχανών και των μηχανών εσωτερικής καύσης έτσι ώστε να προσδιοριστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε διεργασίας. Ένα ηλεκτροκίνητο όχημα περιέχει πέρα από τον ηλεκτρικό κινητήρα και την πηγή ενέργειας, που συνήθως είναι η μπαταρία. Οι μπαταρίες συνδέονται με περιβαλλοντικές ανησυχίες τόσο κατά την κατασκευή τους όσο και κατά την ανακύκλωση καθώς αποτελούνται από επιβλαβή υλικά. Στην εικόνα 50 φαίνεται ένα συνολικό διάγραμμα για τα ηλεκτρικά οχήματα, τα υβριδικά οχήματα και τα οχήματα εσωτερικής καύσης, για το στάδιο παραγωγής, χρήσης και τέλους ζωής υπό την σκοπιά των εκπομπών ρύπων.



Σχήμα 50-Συγκριτική ανάλυση ηλεκτροκίνητων οχημάτων, υβριδικών οχημάτων και συμβατικών οχημάτων εσωτερικής καύσης υπό την σκοπιά των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.[17]

Ξεκινώντας από το στάδιο της παραγωγής, τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία εμφανίζουν περισσότερους ρύπους λόγω του σταδίου κατασκευής μπαταριών, ενώ ακολουθούν τα υβριδικά και τα οχήματα εσωτερικής καύσης. Στο στάδιο της κατασκευής του οχήματος προηγούνται ελαφρώς τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, κυρίως λόγω της μείωσης των απαιτήσεων κατασκευής του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Όσον αφορά το στάδιο λειτουργίας και χρησιμοποίησης των οχημάτων, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας προκαλεί την αύξηση των ρύπων και είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την παραγωγή των ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, οι ρύποι

κατά την λειτουργία του οχήματος είναι μηδενικοί για τα ηλεκτροκίνητα οχήματα ενώ αρκετά υψηλότεροι για τα υβριδικά και τα οχήματα εσωτερικής καύσης. Επίσης, οι ρύποι κατά την απαιτούμενη συντήρηση είναι μικρότεροι για τα ηλεκτροκίνητα οχήματα. Στο σχήμα φαίνεται επίσης ένας δείκτης για την εκπομπή ρύπων μετά το τέλος ζωής των αντίστοιχων κατηγοριών. Καταλήγοντας στο τελικό αποτέλεσμα, τα ηλεκτροκίνητα οχήματα έχουν μικρότερη εκπομπή ρύπων κατά τον συνολικό κύκλο ζωής από τα υβριδικά κατά 8 μονάδες και από τα εσωτερικής καύσης κατά 16 μονάδες.

Πέρα από την σύγκριση των ηλεκτρικών μηχανών με τις μηχανές εσωτερικής καύσης είναι σημαντικό να γίνει σύγκριση των διάφορων τύπων ηλεκτρικών μηχανών μεταξύ τους υπό την σκοπιά των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Υπό την σκοπιά των χρησιμοποιούμενων υλικών, οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούν διαφορετικά υλικά για την κατασκευή του στάτη, των τυλίγμάτων, του δρομέα, των ρουλεμάν, του άξονα και των μόνιμων μαγνητών. Για τα τυλίγματα χρησιμοποιείται κυρίως χαλκός ενώ η επόμενη εναλλακτική είναι το αλουμίνιο. Ο χαλκός είναι τρεις φορές πιο ακριβός από το αλουμίνιο αλλά έχει περίπου δύο φορές καλύτερη αγωγιμότητα. Ο πυρήνας μιας ηλεκτρικής μηχανής αποτελείται από ατσάλι και κατασκευάζεται σε ελάσματα. Σχεδιάζεται για να ικανοποιεί συγκεκριμένες προδιαγραφές, όπως χαμηλές απώλειες δινορρευμάτων και υστέρησης και υψηλή διαπερατότητα. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι πυρήνες των ηλεκτρικών μηχανών περιέχει και σίδηρο για την βελτίωση των παραπάνω ιδιοτήτων. Εναλλακτικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τους πυρήνες των ηλεκτρικών μηχανών είναι τα μαλακά μαγνητικά σύνθετα υλικά. Για τον άξονα της μηχανής, χρησιμοποιείται μίγμα άνθρακα-χάλυβα κατηγορίας SAE 1045. Αποτελεί στιβαρό υλικό που χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών, όπως βίδες, άξονες, γρανάζια κ.α. Τα ρουλεμάν των ηλεκτρικών μηχανών είναι απαραίτητα για την στήριξη της μηχανής και την μετάδοση της κίνησης. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο σχεδιασμός και τα υλικά των ρουλεμάν διαφέρουν. Συνήθως κατασκευάζονται από ατσάλι, ανοξείδωτο ατσάλι ή κράμα χάλυβα-άνθρακα. Οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη είναι οι εξής:

- Αλουμίνιο (Al), Νικέλιο (Ni), Κοβάλτιο (Co), Σίδηρος (Fe)
- Φερρίτες
- Κράμα Σαμαρίου-Κοβαλτίου (SmCo)
- Κράμα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB)

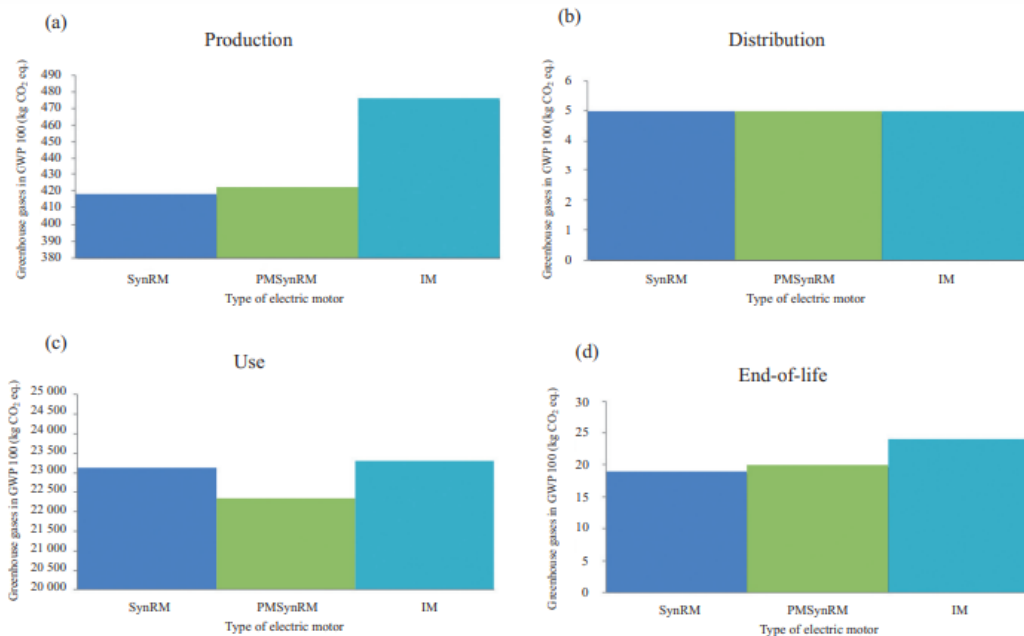
Οι επαγωγικές μηχανές, χρησιμοποιούνται σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών λόγω της υψηλής απόδοσης και της ευκολίας ελέγχου τους. Επίσης αποτελούν μία κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών με πιο εύκολο σχεδιασμό και κατασκευή. Κατασκευαστικά αποτελούνται από τα τυλίγματα χαλκού στον στάτη και τον δρομέα, που συνήθως είναι βραχυκυκλωμένου κλωβού και αποτελείται από μπάρες χαλκού ή αλουμινίου. Δεν περιέχει υλικά σπάνιων γαιών, όπως μαγνήτες, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνει το περιβάλλον υπό την σκοπιά των υλικών προς εξόρυξη και επεξεργασία.

Οι σύγχρονες μηχανές με τύλιγμα διέγερσης αποτελούνται από τον στάτη που περιέχει τα τυλίγματα του χαλκού και το τύλιγμα διέγερσης στον δρομέα, όπου χρησιμοποιείται το σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών. Οι ψήκτρες αποτελούνται από υλικά όπως το κάρβουνο και απαιτούν συχνή συντήρηση, γεγονός που θέτει περιβαλλοντικές ανησυχίες. Οι σύγχρονες μηχανές με μόνιμους μαγνήτες δεν περιέχουν σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών καθώς αντικαθίστανται από του μόνιμους μαγνήτες. Οι συγκεκριμένες μηχανές εμφανίζουν υψηλή απόδοση, μειωμένο λόγο ισχύος προς βάρος, και μειωμένες απώλειες, γεγονός που τις καθιστά ενεργειακά πιο οικονομικές. Ωστόσο, η χρήση των μαγνητών θέτει σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα. Οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται για τους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι τύπου Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB) ή Σαμαρίου-Κοβαλτίου (SmCo). Αποτελούν μαγνήτες σπάνιων γαιών που απαιτούν εξόρυξη και ειδική επεξεργασία και διαμόρφωση για να αποκτήσουν τις απαιτούμενες μαγνητικές τους ιδιότητες. Επίσης, η ανακύκλωση των συγκεκριμένων μαγνητών μετά το τέλος ζωής αποτελεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα. Για τους παραπάνω λόγους τίθενται περιβαλλοντικές ανησυχίες αλλά και θέματα βιωσιμότητας και εφοδιαστικής αλυσίδας.

Με την αύξηση της ηλεκτροκίνησης σε πολλές εφαρμογές, είναι σημαντικό να μελετηθούν μέθοδοι ανακύκλωσης των ηλεκτρικών μηχανών. Οι δύο βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανακύκλωση των ηλεκτρικών μηχανών είναι η μέθοδος τεμαχισμού και χρησιμοποιείται περισσότερο σε ηλεκτρικές μηχανές μικρού μεγέθους και η μέθοδος αποσυναρμολόγησης, που χρησιμοποιείται περισσότερο σε μεγαλύτερες μηχανές. Με την μέθοδο του τεμαχισμού οι ηλεκτρικές μηχανές χωρίζονται σε μικρότερα κομμάτια. Ενώ αποτελεί εύκολη και αποτελεσματική μέθοδο, τίθενται ζητήματα όπως η ανάμειξη διάφορων υλικών και η δυσκολία διαχωρισμού τους για την επαναχρησιμοποίηση. Με την μέθοδο της αποσυναρμολόγησης, η μηχανή αποσυναρμολογείται όπως κατασκευάστηκε και κάθε μέρος της ανακυκλώνεται ξεχωριστά. Αποτελεί πιο κοστοβόρα μέθοδο, αλλά μπορεί να αποτελέσει αυτοματοποιημένη διαδικασία και να είναι πιο αποτελεσματική. Η μέθοδος ανακύκλωσης εξαρτάται και από τον τύπο της μηχανής και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη μπορεί να έχουν διαφορετική τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών ανάλογα με την κατασκευή, όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 2.2.2. Η αφαίρεση των μόνιμων μαγνητών μπορεί να είναι δύσκολη λόγω της τοποθέτησής τους, με κίνδυνο το σπάσιμο ή την καταστροφή τους. Σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι απαραίτητη και η απομαγνήτιση αυτών. Μάλιστα, η επαναχρησιμοποίηση αυτών αποτελεί μια ακόμη πρόκληση καθώς απαιτείται επεξεργασία για την επαναφορά των μαγνητικών ιδιοτήτων, με ζητήματα εφοδιαστικής αλυσίδας και περιορισμένης τεχνογνωσίας. Τα τυλίγματα των ηλεκτρικών μηχανών αξιολογούνται μετά το τέλος ζωής της ηλεκτρικής μηχανής με βάση την ποιότητα της μόνωσής τους. Συνήθως, τα τυλίγματα χαλκού περνούν σε διαδικασία ρευστοποίησης για την επαναχρησιμοποίηση του υλικού.

Η εργασία [18] παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα σύγκριση τριών κυρίαρχων ηλεκτρικών μηχανών, της επαγωγικής μηχανής, της σύγχρονης μηχανής μόνιμου

μαγνήτη και της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίδρασης υποβοηθούμενης από μόνιμους μαγνήτες. Η σύγκριση γίνεται για τις εκπομπές ρύπων φαινομένου θερμοκηπίου για την φάση παραγωγής, διανομής, χρησιμοποίησης και τέλους ζωής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 51.



Σχήμα 51-Σύγκριση Επαγωγικών Μηχανών, Σύγχρονων Μηχανών Μαγνητικής Αντίδρασης και Σύγχρονων Μηχανών Μαγνητικής Αντίδρασης υποβοηθούμενων από μόνιμους μαγνήτες κατά τα στάδια παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, χρησιμοποίησης και τέλους ζωής. [18]

Στην εικόνα 52 φαίνονται και τα ποσοστά επιβάρυνσης του περιβάλλοντος κατά τα 4 στάδια του κύκλου ζωής για τις τρεις ηλεκτρικές μηχανές.

Stage	SynRM	PMSynRM	IM
Production (%)	1.77	1.85	2.00
Distribution (%)	0.02	0.02	0.02
Use (%)	98.12	98.04	97.88
End-of-life (%)	0.08	0.09	0.10

Σχήμα 52- Σύγκριση Επαγωγικών Μηχανών, Σύγχρονων Μηχανών Μαγνητικής Αντίδρασης και Σύγχρονων Μηχανών Μαγνητικής Αντίδρασης υποβοηθούμενων από μόνιμους μαγνήτες κατά τα στάδια παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, χρησιμοποίησης και τέλους ζωής υπό την σκοπιά της περιβαλλοντικής επίπτωσης.[18]

Προκύπτει ότι κατά το στάδιο της παραγωγής, η σύγχρονη μηχανής μαγνητικής αντίδρασης παρουσιάζει τους καλύτερους δείκτες, κυρίως λόγω της απλής κατασκευής του δρομέα. Ωστόσο, η σύγχρονη μηχανή με υποβοήθηση από μόνιμους μαγνήτες εμφανίζει καλύτερους δείκτες κατά την λειτουργία λόγω της μεγαλύτερης συγκριτικά απόδοσής της. Κατά το τέλος της ζωής των τριών ηλεκτρικών μηχανών οι δείκτες είναι παρόμοιοι με το στάδιο της παραγωγής, με την σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη να έχει την καλύτερη επίδραση στον περιβάλλον.

3.8 Αξιοπιστία, Συντήρηση και Διάγνωση Σφαλμάτων Ηλεκτρικών Μηχανών

Σε όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν ηλεκτρικές μηχανές, είναι απαραίτητη η συντήρηση και ο προγραμματισμός αυτής. Ανάλογα με την εφαρμογή, οι απαιτήσεις διαφέρουν τόσο ως προς την συντήρηση όσο και στην αξιοπιστία. Για παράδειγμα, στις εφαρμογές αεροπλοΐας, οι απαιτήσεις αξιοπιστίας είναι ιδιαίτερα υψηλές καθώς τα περιθώρια σφαλμάτων είναι πολύ στενά. Ως ένα άλλο παράδειγμα, στις εφαρμογές μικρό-κινητικότητας οι απαιτήσεις συντήρησης είναι μικρότερες συγκριτικά με τις εφαρμογές πλοίων καθώς υπάρχουν απαιτήσεις συνεχούς και αδιάκοπης λειτουργίας. Με λιγότερο αυστηρά πλαίσια συντήρησης αλλά με υψηλά πρότυπα αξιοπιστίας συνοδεύονται οι εφαρμογές ηλεκτρικών μηχανών στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Για την διερεύνηση της αξιοπιστίας των ηλεκτρικών μηχανών είναι σκόπιμο να προσδιοριστούν τόσο τα πιθανά σφάλματα όσο και οι διάφοροι μηχανισμοί σφαλμάτων. Γενικά, μια ηλεκτρική μηχανή μπορεί να εμφανίσει σφάλματα που σχετίζονται τόσο με το ηλεκτρικό όσο και με το μηχανικό της μέρος. Τα σφάλματα που σχετίζονται με το μηχανικό μέρος αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία σφαλμάτων που εμφανίζονται σχετικά συχνά σε ηλεκτρικές μηχανές. Σχετίζονται με την δομή του ρότορα, και μπορεί να εμφανίζονται σαν σπάσιμο μπάρας στον δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού της επαγωγικής μηχανής, σαν σφάλματα εκκεντρότητας, σφάλματα σε κιβώτια ταχυτήτων, σφάλματα στα ρουλεμάν ή σφάλματα στους συνδέσμους μεταξύ μηχανής και φορτίου. Μάλιστα, υπάρχουν περιπτώσεις που εμφανίζονται παραπάνω από ένα σφάλμα ταυτόχρονα σε μια ηλεκτρική μηχανή, ή το ένα σφάλμα οδηγεί στο άλλο. Τα σφάλματα στο ηλεκτρικό μέρος μιας ηλεκτρικής μηχανής σχετίζονται με τα τυλίγματα που περιλαμβάνει. Πιθανά σφάλματα στα τυλίγματα του στάτη είναι βραχυκυκλώματα μεταξύ φάσεων, μεταξύ τυλιγμάτων στην περιέλιξη ή ανοιχτοκυκλώματα. Τα ίδια σφάλματα είναι πιθανά στις ηλεκτρικές μηχανές που περιλαμβάνουν τύλιγμα στον δρομέα, όπως οι Επαγωγικές Μηχανές Δακτυλιοφόρου Δρομέα, οι Σύγχρονες Μηχανές με τύλιγμα διέγερσης και οι Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος. Επίσης, στις Σύγχρονες Μηχανές με Μόνιμους Μαγνήτες μπορούν να εμφανιστούν σφάλματα όπως σπάσιμο ενός μαγνήτη ή απομαγνητισμός αυτού, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρικά σφάλματα.

Τα ηλεκτρικά σφάλματα που σχετίζονται με τα τυλίγματα της μηχανής έχουν άμεση σχέση με την μόνωση των τυλιγμάτων. Η βασική μόνωση τυλιγματος είναι αυτή μεταξύ χαλκού(τυλιγματος) και του πυρήνα σιδήρου. Αποτελείται από πολυμερή υλικά και είναι ιδιαίτερα ενισχυμένη στις ηλεκτρικές μηχανές υψηλής τάσης. Επόμενη βασική μόνωση είναι αυτή μεταξύ φάσεων της μηχανής και αποτελείται από παρόμοια υλικά με αυτή μεταξύ τυλιγμάτων και πυρήνα. Τέλος, υπάρχει και η μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων σε κάθε φάση της μηχανής, που αποτελείται από λεπτό στρώμα πολυεστέρα και καλύπτει τον χαλκό κάθε τυλιγματος. Τα περισσότερα σφάλματα που προκύπτουν είναι λόγω της τελευταίας περίπτωσης, δηλαδή λόγω σφαλμάτων στην μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων μιας φάσης. Η γήρανση και εμφάνιση σφάλματος στις μονώσεις των τυλιγμάτων συνδέεται με την εφαρμογή συγκεκριμένων καταπονήσεων

στην μηχανή. Μία από τις πιο σημαντικές είναι οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των τυλιγμάτων. Ένας εμπειρικός κανόνας για την υγεία των τυλιγμάτων είναι ότι αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 βαθμούς κελσίου συνδέεται με μείωση της αντοχής της μόνωσης στο μισό. Για τον έλεγχο των τυλιγμάτων χρησιμοποιούνται διάφορα τεστ που στηρίζονται στην εφαρμογή τάσεων και μελέτη της απόκρισης. Ένα από τα πιο σημαντικά τεστ αφορά την μελέτη της μόνωσης μεταξύ τυλίγματος και πυρήνα σιδήρου. Εφαρμόζεται dc τάση στο τύλιγμα ενώ ο πυρήνας γειώνεται. Με βάση το ρεύμα που περνά από το τύλιγμα καθορίζεται η κατάσταση της μόνωσης. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται σφάλματα στην μόνωση των τυλιγμάτων αλλά συνήθως έχουν προηγηθεί σφάλματα στην μόνωση μεταξύ των τυλιγμάτων ή των φάσεων. Ένας τρόπος ελέγχου τέτοιων μονώσεων είναι το τεστ υπερτάσεων (Surge test) όπου εφαρμόζεται συγκεκριμένη τάση μέσω αποφόρτισης ενός εσωτερικού πυκνωτή και μετριέται η απόκριση.



Σχήμα 53- Σφάλμα μόνωσης στα τυλίγματα στάτη ηλεκτρικής μηχανής.

Τα μηχανικά σφάλματα που μπορούν να εμφανιστούν σε μια ηλεκτρική μηχανή σχετίζονται με τον ρότορα. Τα σφάλματα των ρουλεμάν αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία μηχανικών σφαλμάτων και ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο ρουλεμάν μπορεί να προκύψουν σφάλματα τόσο στο κέλυφος, όσο και στα περιστρεφόμενα μέρη του. Η εκκεντρότητα του ρότορα αποτελεί ένα επιπλέον σοβαρό μηχανικό σφάλμα. Ανάλογα με την μορφή του διαχωρίζεται σε στατική, δυναμική και μεικτή εκκεντρότητα. Το σπάσιμο μπαρών σε δρομείς βραχυκυκλωμένου δρομέα αποτελεί ένα ακόμα σοβαρό μηχανικό σφάλμα. Μερικές από τις αιτίες που συνδέονται με την εμφάνιση των παραπάνω είναι η κακή εγκατάσταση της ηλεκτρικής μηχανής και του συνολικού συστήματος, οι κατασκευαστικές αστοχίες, η υπερφόρτιση της μηχανής, ή οι περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας (σκόνη, σωματίδια κ.λ.π.). Η διάγνωση και

ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΜΜ, Διπλωματική Εργασία, Πατσάκης Παναγιώτης

επιτήρηση του συστήματος για τέτοια σφάλματα γίνεται κυρίως μέσω ακουστικών μέσων και μετρήσεις δονήσεων. Τα μηχανικά σφάλματα προκαλούν τόσο ακουστικά σήματα όσο και δονήσεις με αποτέλεσμα η μέτρηση και ανάλυση τέτοιων σημάτων να δίνουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της μηχανής. Μία ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για διάγνωση σφαλμάτων σε ηλεκτρικές μηχανές είναι η μέτρηση δονήσεων και η ανάλυση αυτών στο πεδίο της συχνότητας. Διαφορετικά σφάλματα στην μηχανή, μπορούν να διαχωριστούν και διαγνωστούν μέσω της παραπάνω ανάλυσης.



Σχήμα 54- Σφάλματα στα ρουλεμάν ηλεκτρικής μηχανής

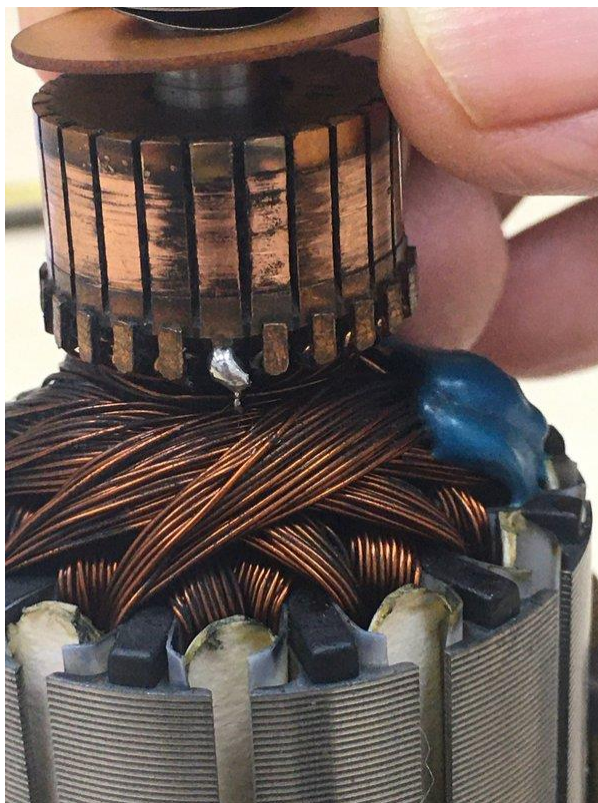


Σχήμα 55- Σφάλματα στις μπάρες βραχυκύκλωσης επαγωγικής μηχανής.



Σχήμα 56- Σφάλματα σε γρανάζια ηλεκτρικών μηχανών

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος αποτελούν μία κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών με απαιτήσεις συχνής συντήρησης. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης του συστήματος συλλέκτη-ψηκτρών που αποτελείται από υλικά όπως κάρβουνο και φθείρονται με την λειτουργία της μηχανής. Συνεπώς, απαιτείται τόσο συντήρηση αυτών όσο και σωστός προγραμματισμός αυτής. Παρόμοια, στις συμβατικές σύγχρονες μηχανές, που χρησιμοποιούν συμβατικό τύλιγμα διέγερσης απαιτείται παρόμοια συντήρηση λόγω των ψηκτρών του συγκεκριμένου συστήματος. Στην εικόνα 57 φαίνεται ο δρομέας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, όπου έχει προκληθεί φθορά στο σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών.



Σχήμα 57- Σφάλματα στο σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών σε ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος

Στις Σύγχρονες Μηχανές, η αντικατάσταση του τυλίγματος διέγερσης με το σύστημα συλλέκτη ψηκτρών από μόνιμους μαγνήτες έχει ως αποτέλεσμα τόσο την μείωση των απωλειών που συνδέονται με τις ψήκτρες όσο και των απαιτήσεων συντήρησης και αντικατάστασης αυτών. Ωστόσο, οι μόνιμοι μαγνήτες αποτελούν υλικά που μπορούν να εμφανίσουν διάφορα σφάλματα, όπως η απομαγνήτιση, δηλαδή η απώλεια των μαγνητικών τους ιδιοτήτων ή κάποιους είδους μηχανικού σφάλματος, όπως σπάσιμο.

Στις Επαγωγικές Μηχανές βραχυκυκλωμένου δρομέα, που αποτελούν την κύρια κατηγορία επαγωγικών μηχανών σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, δεν έχουμε σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών αλλά ούτε μόνιμους μαγνήτες. Ο δρομέας αποτελείται από βραχυκυκλωμένες μπάρες σε δακτυλίους. Παρότι αποτελούν μια πιο αξιόπιστη μορφή δρομέα, με την πάροδο των ωρών λειτουργίας της μηχανής, σφάλματα μπορούν να προκύψουν στις μπάρες βραχυκύκλωσης, όπως κάποιο σπάσιμο ή κάποια ασυνέχεια στην διαδρομή που καλύπτουν.

Για την συντήρηση των ηλεκτρικών μηχανών χρησιμοποιούνται διάφορες προσεγγίσεις και στρατηγικές ανάλογα με την εφαρμογή. Τρεις βασικές στρατηγικές συντήρησης είναι οι ακόλουθες:

1. Προληπτική Συντήρηση (Preventive Maintenance):

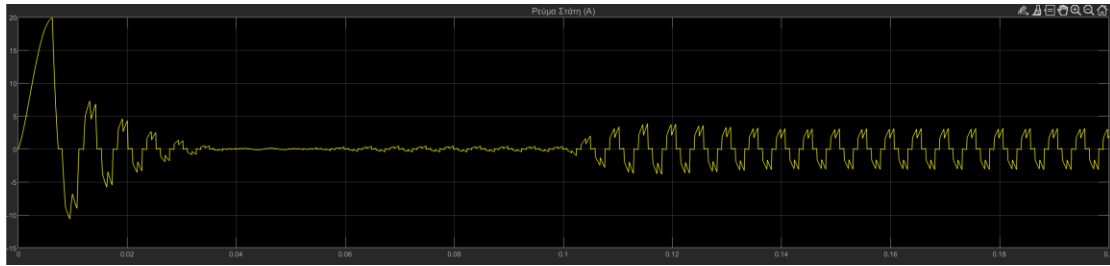
Έχει σκοπό να προλάβει προβλήματα και σφάλματα σε ηλεκτρικές μηχανές εξασφαλίζοντας την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Στηρίζεται στην τακτική επίβλεψη των μηχανών μέσω κάποιου χρονοδιαγράμματος. Προσφέρει την δυνατότητα για επέκταση του χρόνου ζωής του εξοπλισμού, την μείωση ενεργειακών δαπανών, την μείωση πιθανότητας για σφάλματα και την μείωση του κόστους. Ωστόσο, σφάλματα μπορούν να συμβούν στο ενδιάμεσο των ελέγχων, πολλοί προγραμματισμένοι έλεγχοι μπορεί να είναι μη χρήσιμοι, και απαιτείται ανθρώπινο δυναμικό για την υλοποίηση των ελέγχων.

2. Προγνωστική Συντήρηση (Predictive Maintenance):

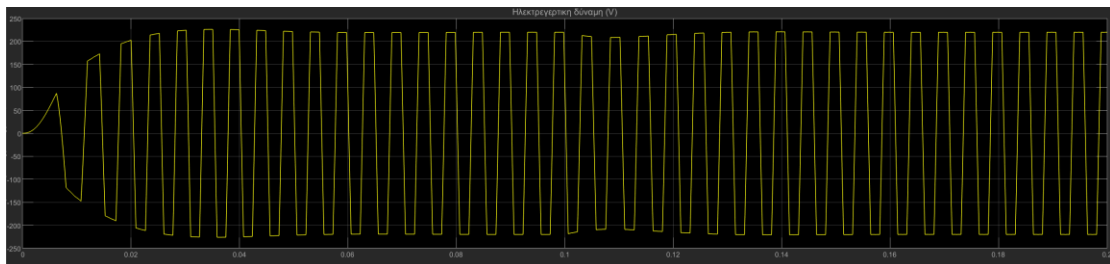
Έχει επίσης ως σκοπό να προλάβει προβλήματα και σφάλματα αλλά και να εξασφαλίσει ότι η συντήρηση θα γίνει στο σωστό χρονικό διάστημα. Για να γίνει αυτό, απαιτείται συνεχής επιτήρηση του συστήματος μέσω πολλαπλών αισθητήρων και μετρήσεων, όπως δονήσεις, ήχος, θερμοκρασία κ.α. Προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα όπως η μείωση του χρόνου διακοής λειτουργίας, την αύξηση του χρόνου ζωής των συστημάτων, την μείωση του κόστους, την αύξηση της εξοικονόμησης ενέργειας και την βελτίωση των συνθηκών ασφάλειας. Ωστόσο, απαιτεί επένδυση σε διαγνωστικά μέσα και μέσα επιτήρησης όπως αισθητήρες και επιμόρφωση του προσωπικού.

3. Διορθωτική Συντήρηση (Reactive-Breakdown Maintenance):

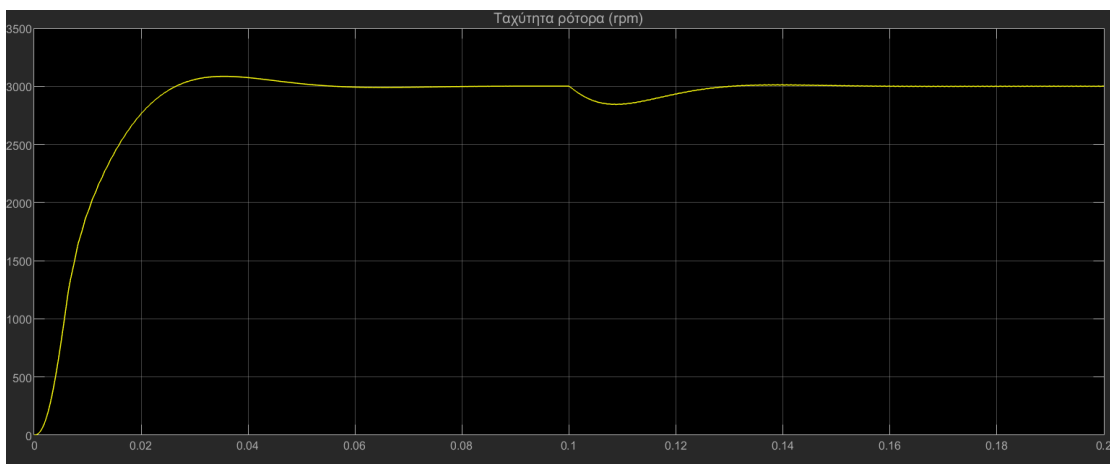
Η συγκεκριμένη κατηγορία συντήρησης έχει ως σκοπό την διόρθωση σφαλμάτων που έχουν συμβεί. Στηρίζεται στην λογική της λειτουργίας του συστήματος έως ότου συμβεί κάποιο σφάλμα. Τα πλεονεκτήματα της διορθωτικής συντήρησης είναι το χαμηλό κόστος συντήρησης και το μικρό απαιτούμενο προσωπικό. Ωστόσο, το κόστος ενός σφάλματος μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο, καταστροφικά λάθη μπορεί να προκαλέσουν ακόμα και ζητήματα ασφαλείας ενώ τα παραπάνω μπορεί να οδηγήσουν στην της παύσης λειτουργίας του συστήματος για μεγάλο χρονικό διάστημα.



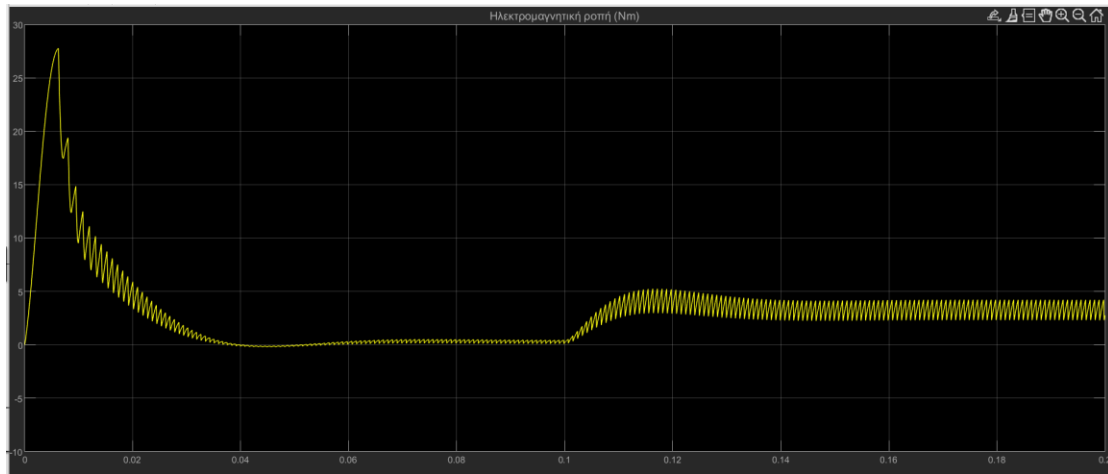
Σχήμα 2 Ρεύμα στάτη - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



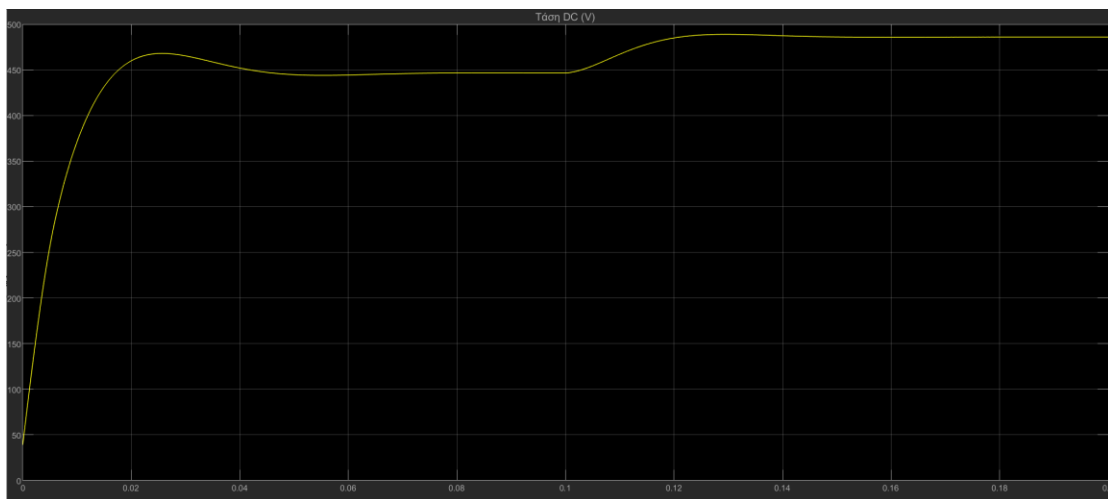
Σχήμα 3 Ηλεκτρεγερτική δύναμη στάτη - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



Σχήμα 4 Ταχύτητα ρότορα - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



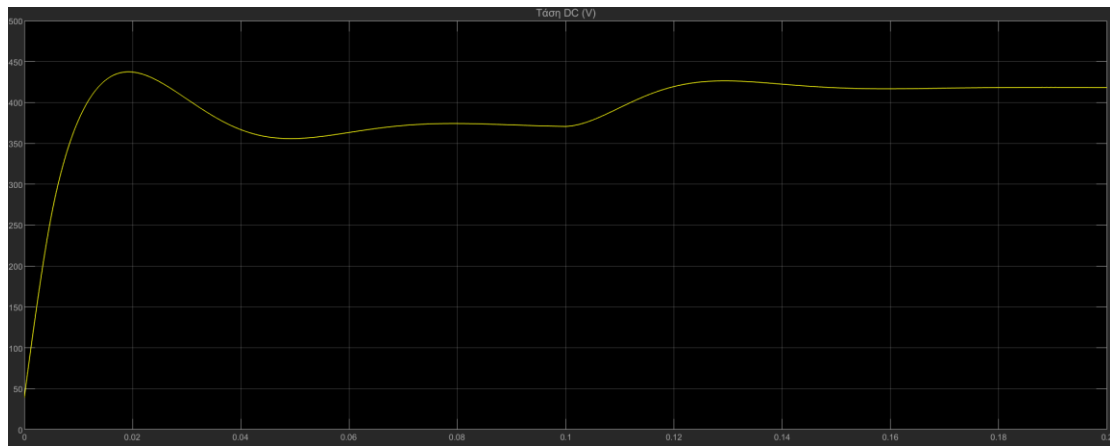
Σχήμα 5 Ηλεκτρομαγνητική ροπή - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



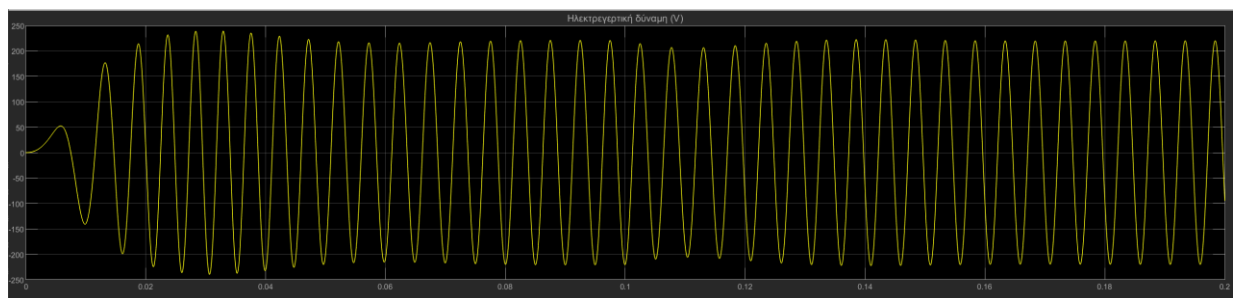
Σχήμα 6 Εφαρμοζόμενη DC τάση - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

Η πριονωτή μορφή του ρεύματος του κινητήρα οφείλεται στην τάση DC τάση η οποία εφαρμόζει σταθερή τάση για 120° στα τυλίγματα του κινητήρα. Η πριονωτή κυματομορφή αποτυπώνεται επίσης στην ηλεκτρομαγνητική ροπή, αλλά δεν αποτυπώνεται στην ταχύτητα του ρότορα λόγω της αδράνειας του κινητήρα. Επιπλέον, το ρεύμα εκκίνησης είναι υψηλό και μειώνεται καθώς η ταχύτητα του δρομέα προσεγγίζει την ονομαστική τιμή της. Κατά την εφαρμογή της ονομαστικής ροπής, το ρεύμα στάτη αυξάνεται για να διατηρήσει την ονομαστική ροπή.

Ο συνδυασμός του ρεύματος DC με την τραπεζοειδή αντι – ηλεκτρεγερτική δύναμη παράγει θεωρητικά μία σταθερή ροπή. Μεταβάλλοντας την παράμετρο του κινητήρα Back EMF flat area από 120° σε 0° η ηλεκτρεγερτική δύναμη έχει πλέον ημιτονοειδή μορφή και η εφαρμοζόμενη τάση DC μειώνεται περίπου κατά 25 V.



Σχήμα 7 Εφαρμοζόμενη DC τάση για BACK EMF flat area = 0° - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

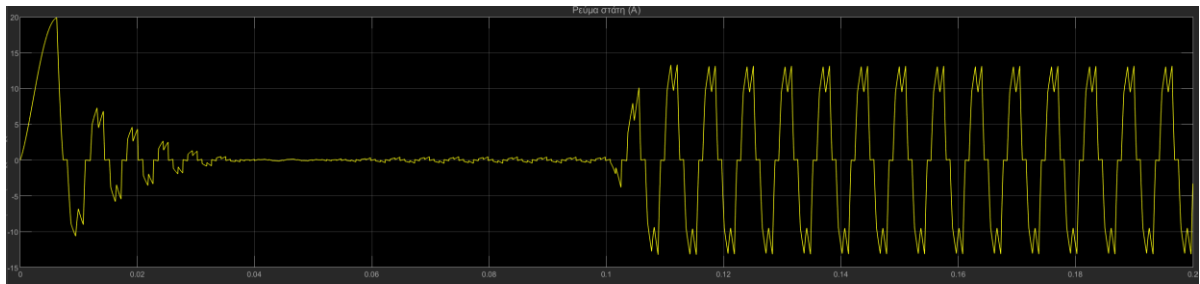


Σχήμα 8 Ηλεκτρεγερτική δύναμη στάτη για BACK EMF flat area = 0° - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

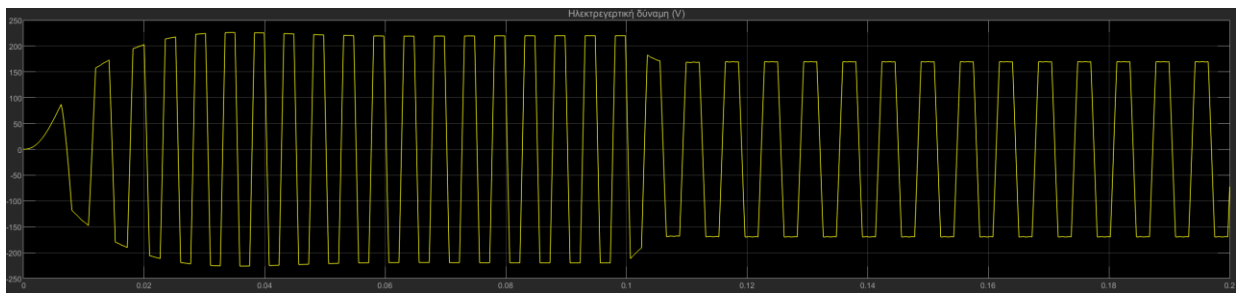
Οι κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να λειτουργούν με την υψηλότερη δυνατή τάση, καθώς η χαμηλή τάση δημιουργεί ένα μεγάλο ρεύμα για τη λειτουργία του κινητήρα, το οποίο αυξάνει τις απώλειες ισχύος και μειώνει την απόδοση του μετατροπέα. Επιπλέον, μικρότερο ρεύμα συνεπάγεται εξοικονόμηση κόστους λόγω των μικρότερων διατομών των καλωδίων και ηλεκτρικών στοιχείων χαμηλότερων προδιαγραφών, όπως είναι οι ημιαγωγοί, οι επαφές και τα μέσα προστασίας.

Η ροπή του κινητήρα συνεχούς ρεύματος προκύπτει από τη σχέση $T = \frac{V\omega k}{R}k$ όπου V η εφαρμοζόμενη τάση, k η ηλεκτρική σταθερά του κινητήρα, R η αντίσταση του κυκλώματος και ω η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Αυτό σημαίνει ότι εάν αυξηθεί η ζητούμενη ροπή και η εφαρμοζόμενη τάση DC παραμείνει σταθερή τότε θα μειωθεί η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Προκειμένου να παραμείνει σταθερή η ταχύτητα περιστροφής θα πρέπει να αυξηθεί η εφαρμοζόμενη τάση DC.

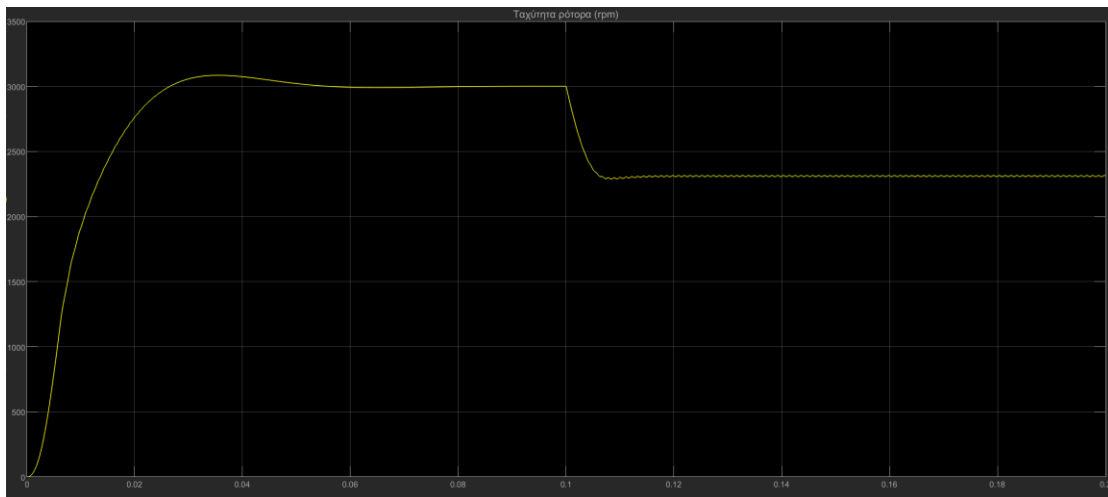
Στο υπό εξέταση μοντέλο αυξάνεται η ζητούμενη ροπή από 3 σε 15 Nm.



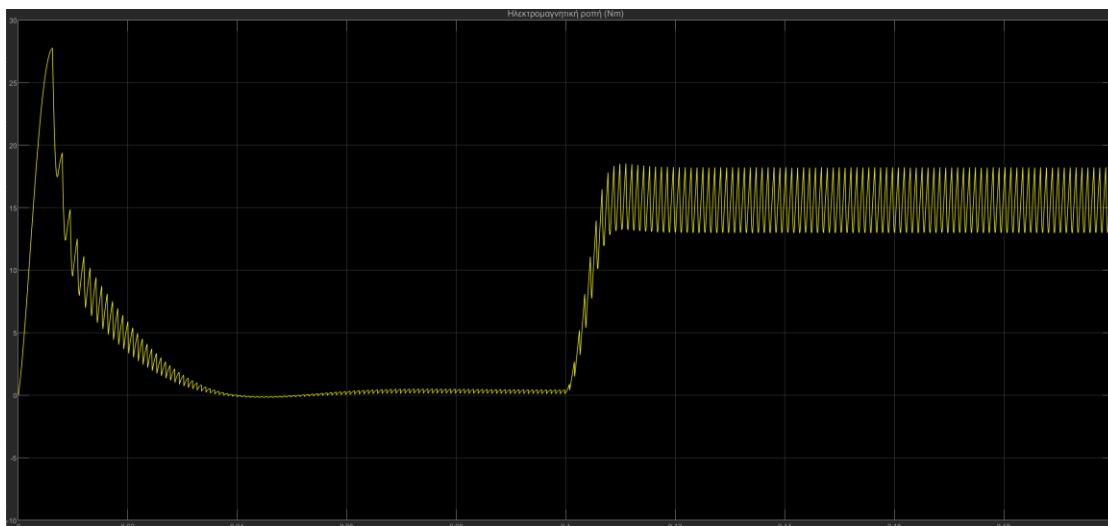
Σχήμα 9 Ρεύμα στάτη για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC έως 500 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



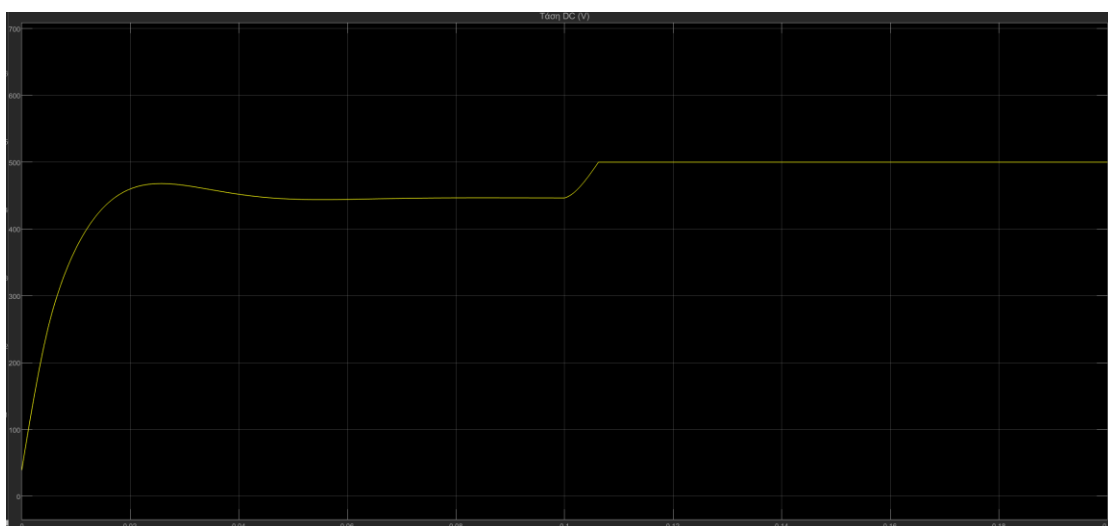
Σχήμα 10 Ηλεκτρεγερτική δύναμη για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC έως 500 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



Σχήμα 11 Ταχύτητα ρότορα για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC έως 500 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



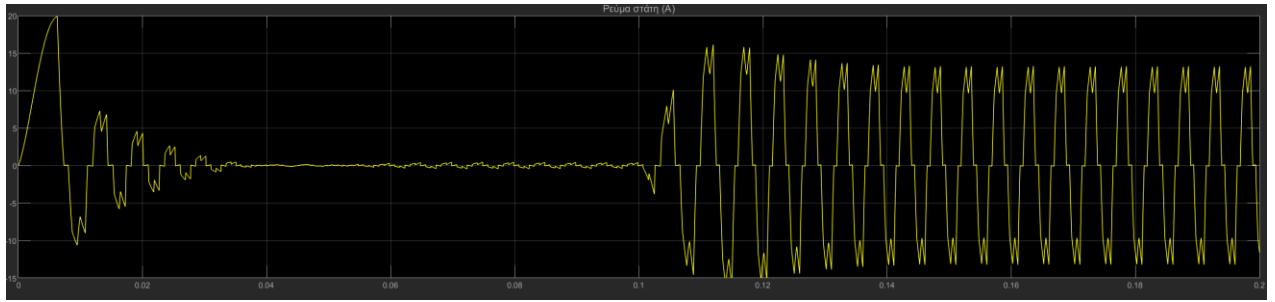
Σχήμα 12 Ηλεκτρομαγνητική ροπή για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC εώς 500 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



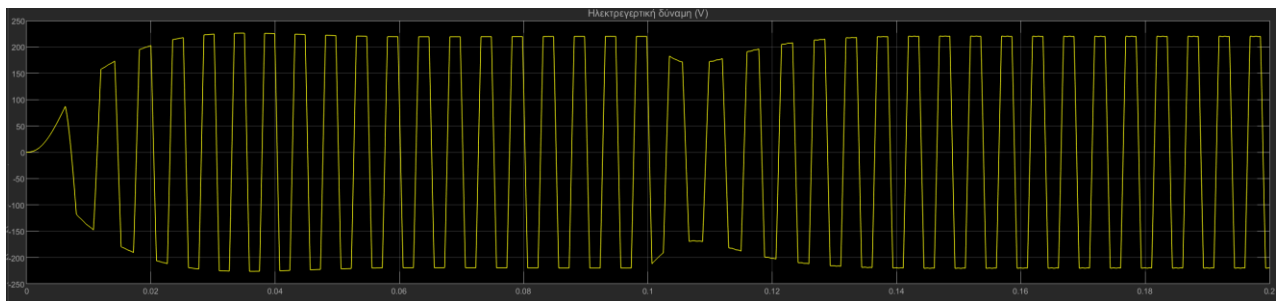
Σχήμα 13 Εφαρμοζόμενη τάση DC για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC εώς 500 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

Παρατηρείται ότι κατά την εφαρμογή της ροπής 15 Nm η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μειώνεται στις 2300 rpm, ενώ η τάση DC φτάνει το άνω κατώφλι των 500 V, το peak του ρεύματος στάτη γίνεται 13 A και η ηλεκτρεγερτική δύναμη μειώνεται.

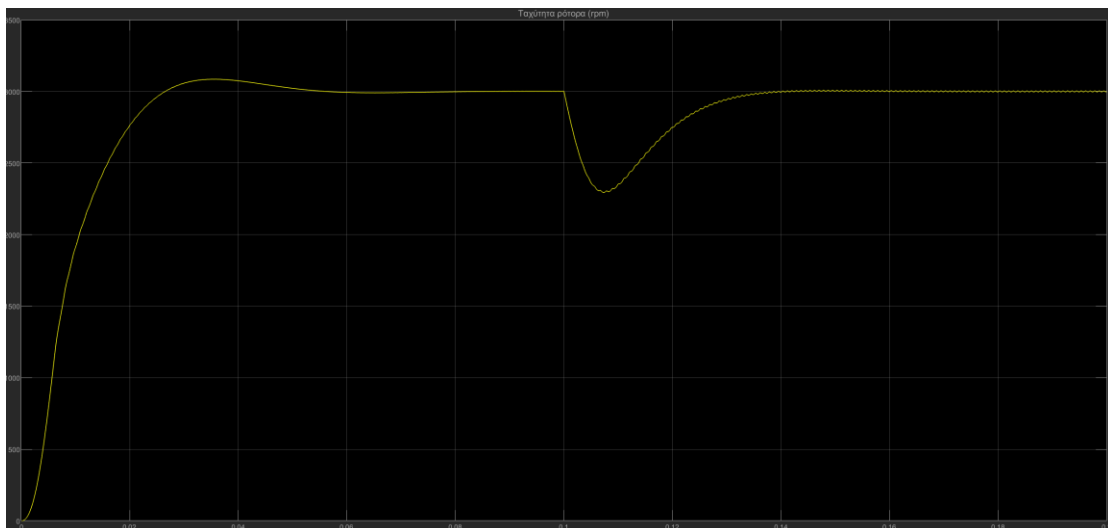
Ακολούθως αυξάνεται το άνω κατώφλι της τάσης DC στα 800 V και επαναλαμβάνεται η προσομοίωση για ζητούμενη ροπή 15 Nm.



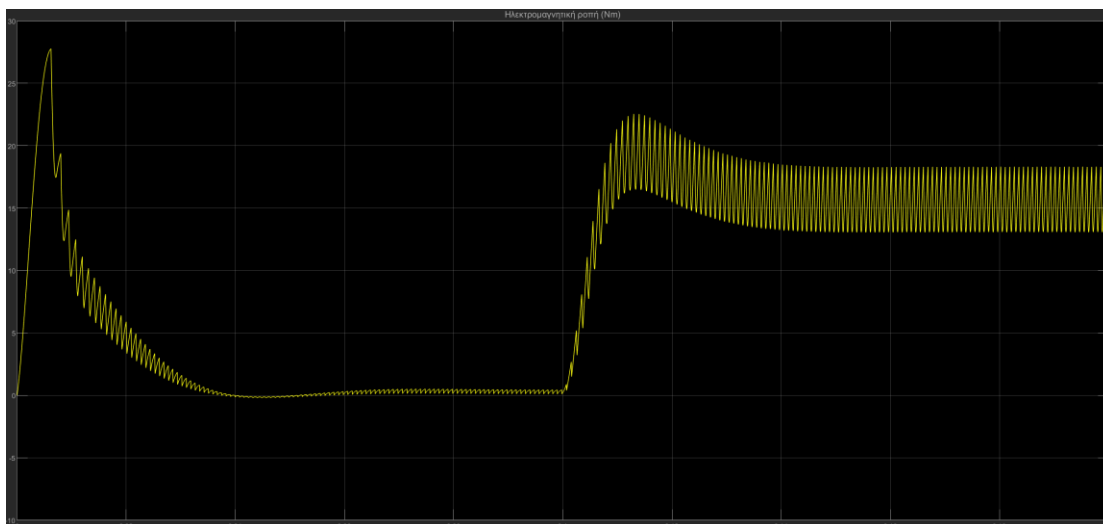
Σχήμα 14 Ρεύμα στάτη για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC εώς 800 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



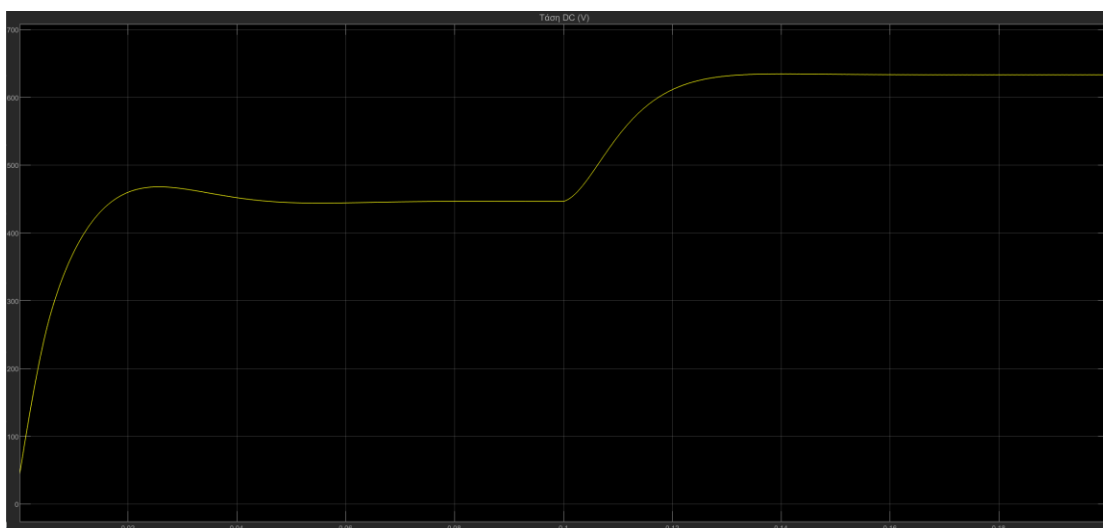
Σχήμα 15 Ηλεκτρεγερτική δύναμη για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC εώς 800 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



Σχήμα 16 Ταχύτητα ρότορα για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC εώς 800 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



Σχήμα 17 Ηλεκτρομαγνητική ροπή για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC εώς 800 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες



Σχήμα 18 Εφαρμοζόμενη τάση DC για ζητούμενη ροπή = 15 Nm και τάση DC εώς 800 V - Προσομοίωση κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

Προκύπτει ότι για να διατηρηθεί η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα στις 3000 rpm κατά την αύξηση της ζητούμενης ροπής στα 15 Nm, πρέπει να αυξηθεί η εφαρμοζόμενη τάση DC στα 633 V. Επίσης η αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης DC έχει ως αποτέλεσμα την διατήρηση της τιμής της ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

4.2 Ασύγχρονος επαγωγικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος

Σε αυτή την ενότητα προσομοιώνεται ένας ασύγχρονος τριφασικός επαγωγικός κινητήρας, ο οποίος έχει ένα τριφασικό τύλιγμα στον στάτη και βραχυκυκλωμένο

δρομέα. Οι αγώγιμες μπάρες του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένες στο πέρας του ρότορα με δακτυλίους βραχυκύκλωσης.

Ο κινητήρας τροφοδοτείται από μία μεταβλητή κατά τάση και συχνότητα AC τάση η οποία παράγεται από έναν inverter. Ο inverter είναι τύπου VSI (Voltage Source Inverter) και τροφοδοτείται από μία σταθερή τάση DC. Η σταθερή τάση DC παράγεται από έναν ανορθωτή διόδων.

Λόγω του ανορθωτή διόδων δεν είναι εφικτή η αμφίδρομη ροή ισχύος και κατά συνέπεια η αναγεννητική πέδηση. Για το λόγο αυτό, υπάρχει η αντίσταση πέδησης εν σειρά με ένα DC-DC μετατροπέα έτσι ώστε να διασφαλίζεται η πέδηση του κινητήρα. Αυτό το σύστημα πέδησης ονομάζεται δυναμική πέδηση (Dynamic braking) και τοποθετείται παράλληλα στον ζυγό DC με σκοπό να αποτρέψει την αύξηση της τάσης όταν ο κινητήρας επιβραδύνει. Έτσι η κινητική ενέργεια του κινητήρα μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση πέδησης.

Ο έλεγχος του κινητήρα με την τεχνική προσανατολισμένου πεδίου (Field – oriented control) είναι μία καλή μέθοδος ελέγχου αλλά έχει ένα σοβαρό μειονέκτημα καθώς απαιτεί την ακριβή γνώση των παραμέτρων του κινητήρα. Η χρονική σταθερά του ρότορα είναι δύσκολο να μετρηθεί καθώς μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Μία πιο αποτελεσματική μέθοδος ελέγχου, ο άμεσος έλεγχος ροπής (Direct torque control), αρχικά εκτιμά την μαγνητική ροή του στάτη και την ηλεκτρομαγνητική ροπή στην στάσιμη κατάσταση. Η εκτιμώμενη μαγνητική ροή στον στάτη και η ηλεκτρομαγνητική ροπή ελέγχονται άμεσα μέσω της σύγκρισής του με τις αντίστοιχες ζητούμενες τιμές, χρησιμοποιώντας συγκριτές υστέρησης. Οι έξοδοι των συγκριτών χρησιμοποιούνται ως σήματα εισόδου σε ένα πίνακα κατάστασης διακοπών, ο οποίος καθορίζει την κατάσταση των διακοπών του inverter.

Η μαγνητική ροή στον στάτη και η ηλεκτρομαγνητική ροπή υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\varphi_{ds} = \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) dt$$

$$\varphi_{qs} = \int (V_{qs} - R_s i_{qs}) dt$$

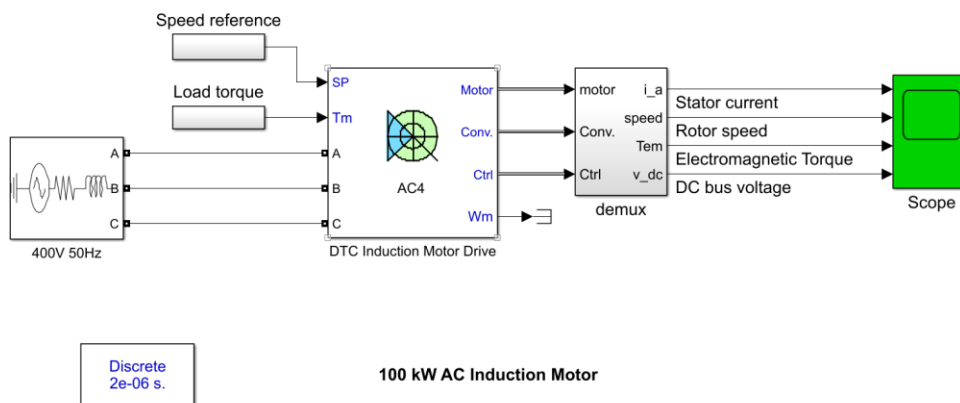
$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{ds}^2 + \varphi_{qs}^2} < \text{atan} \left(\frac{\varphi_{qs}}{\varphi_{ds}} \right)$$

$$T_e = 1.5(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

Πίνακας 1 Διανύσματα χώρου - κατάσταση διακοπών inverter μοντέλου ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα

Hψ	H _{Te}	S(1)	S(2)	S(3)	S(4)	S(5)	S(6)
1	1	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁
	0	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇
	-1	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
-1	1	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂
	0	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀
	-1	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄

Για την προσομοίωση του μοντέλου λαμβάνονται ως παράμετροι τυπικές τιμές για τον κινητήρα οι οποίες αντιστοιχούν σε κινητήρα ηλεκτρικού SUV. Ειδικότερα, προσομοιώνεται ο κινητήρας για ισχύ ίση με 100 kW, για ταχύτητα περιστροφής 2000 rpm και ζητούμενη ροπή 250 Nm [20]. Ο κινητήρας έχει συντελεστή ισχύος ίσο με 0.9.



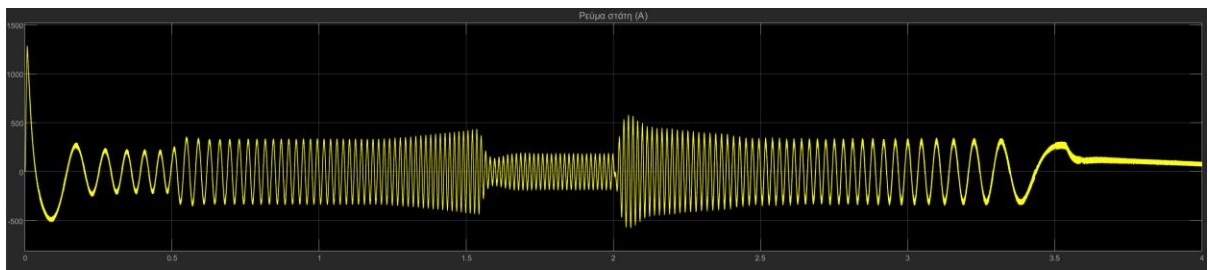
Σχήμα 19 Μοντέλο ασύγχρονου επαγωγικού AC κινητήρα στο Simulink

Την χρονική στιγμή $t = 0$ η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι 446 Nm. Η αναφορά της ταχύτητας περιστροφής αυξάνεται υπό την μορφή ράμπας με ρυθμό 2000 rpm/s και τελική τιμή 2000 rpm. Την χρονική στιγμή $t = 0.5$ s εφαρμόζεται η ζητούμενη ροπή των 250 Nm ενώ ταυτόχρονα η ταχύτητα περιστροφής συνεχίζει να αυξάνεται.

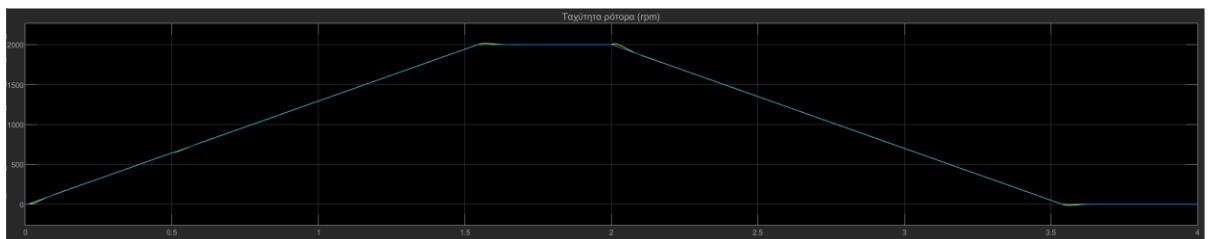
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ηλεκτρομαγνητική ροπή να αυξηθεί στα 718 Nm και κατόπιν, όταν η ταχύτητα περιστροφής φτάσει στην τελική τιμή της την χρονική στιγμή $t = 1.6$ s, να σταθεροποιηθεί στα 293 Nm.

Την χρονική στιγμή $t = 2$ s το setpoint της ταχύτητας αναφοράς μηδενίζεται και το setpoint της ζητούμενης ροπής γίνεται -250 Nm. Έτσι ξεκινά η επιβράδυνση του κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής να μειώνεται με ρυθμό 2000 rpm/s.

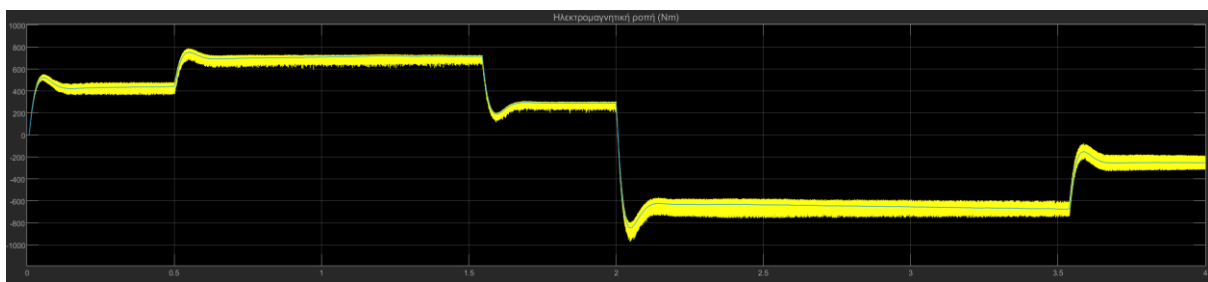
Η τάση στον ζυγό DC αυξάνεται στιγμιαία καθώς ξεκινά η επιβράδυνση αλλά μειώνεται σύντομα, διότι η κινητική ενέργεια του κινητήρα καταναλώνεται στην αντίσταση πέδησης. Επίσης το ημιτονοειδές ρεύμα του στάτη παραμένει σταθερό τόσο κατά επιτάχυνση όσο και κατά την επιβράδυνση του κινητήρα και την λειτουργία με σταθερή ταχύτητα περιστροφής, ενώ παρουσιάζει σύντομα μεταβατικά κατά τις αλλαγές καταστάσεων.



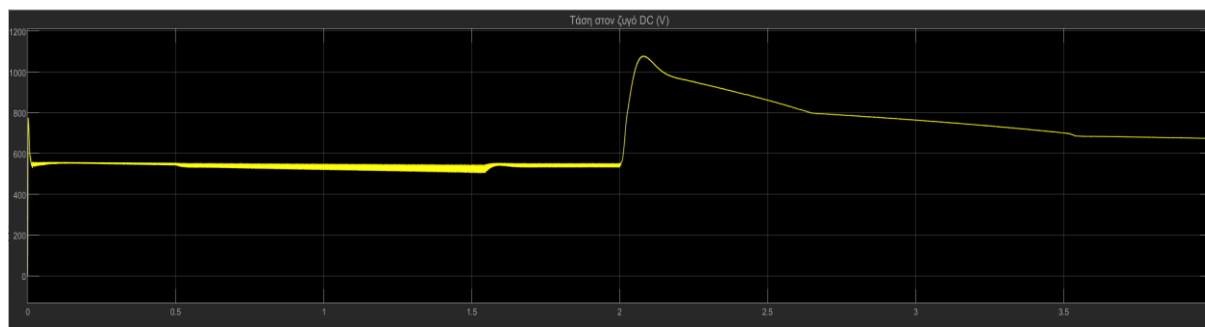
Σχήμα 20 Ρεύμα στάτη - Προσομοίωση ασύγχρονου επαγωγικού AC κινητήρα



Σχήμα 21 Ταχύτητα ρότορα - Προσομοίωση ασύγχρονου επαγωγικού AC κινητήρα



Σχήμα 22 Ηλεκτρομαγνητική ροπή - Προσομοίωση ασύγχρονου επαγωγικού AC κινητήρα

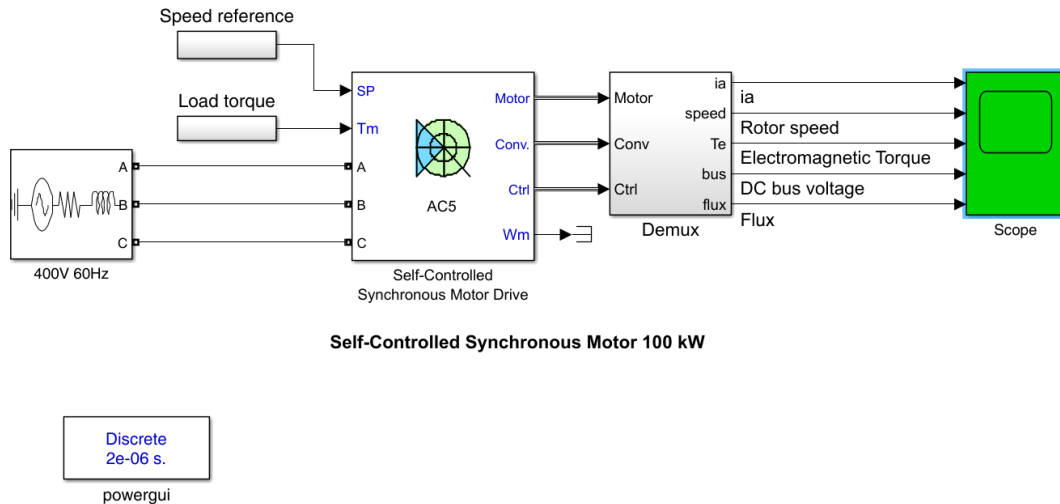


Σχήμα 23 Τάση στον ζυγό DC - Προσομοίωση ασύγχρονου επαγωγικού AC κινητήρα

4.3 Αυτοελεγχόμενος σύγχρονος κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος

Το block Self-Controlled Synchronous Motor αναπαριστά την κλασσική οδήγηση με έλεγχο διανυσμάτων για ένα σύγχρονο κινητήρα με περιέλιξη στον δρομέα. Η οδήγηση του κινητήρα λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ο έλεγχος της ταχύτητας μέσω κλειστού βρόγχου βασίζεται στην μέθοδο ελέγχου διανυσμάτων. Ο μοναδιαίος συντελεστής ισχύος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός τριφασικού ανορθωτή με ελεγχόμενη τάση. Ο βρόγχος ελέγχου της ταχύτητα έχει ως έξοδο την αναφορά της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μαγνητικής ροής του στάτη. Οι αναφορές των συνιστωσών d και q του ρεύματος του στάτη υπολογίζονται με βάση την στρατηγική ελέγχου διανυσμάτων. Κατόπιν οι αναφορές αυτών των συνιστωσών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απαραίτητων σημάτων για τους διακόπτες του inverter μέσω του ελεγκτή ρεύματος ζώνης υστέρησης. Η τάση που απαιτείται για τη λειτουργία του κινητήρα προκύπτει από τον βρόγχο ελέγχου της μαγνητικής ροής του στάτη.

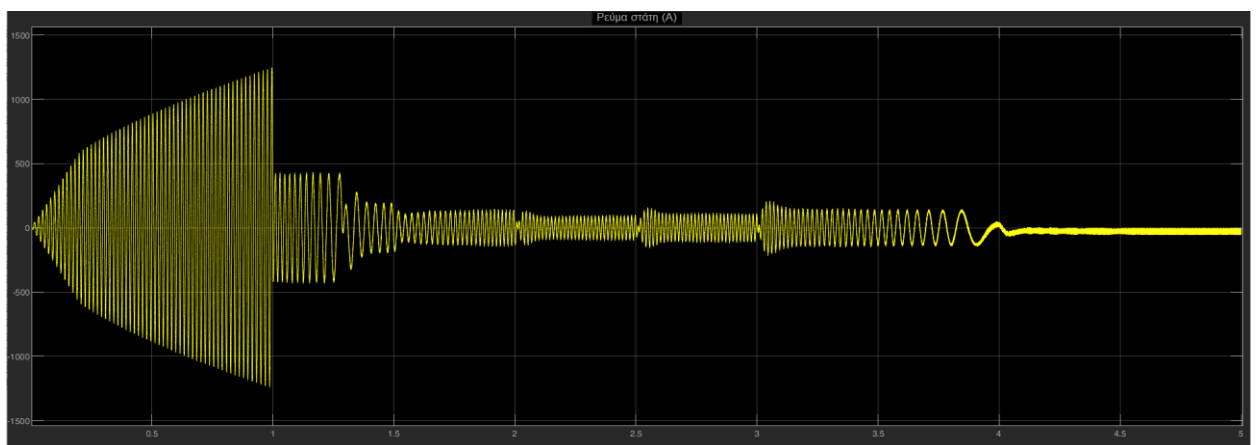
Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του κινητήρα είναι η γρήγορη και δυναμική απόκρισή του. Ο συσχετισμός της ροπής και της μαγνητικής ροής επιτυγχάνεται μέσω του προσανατολισμού της μαγνητικής ροής του στάτη, ο οποίος επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της ροπής και της μαγνητικής ροής.



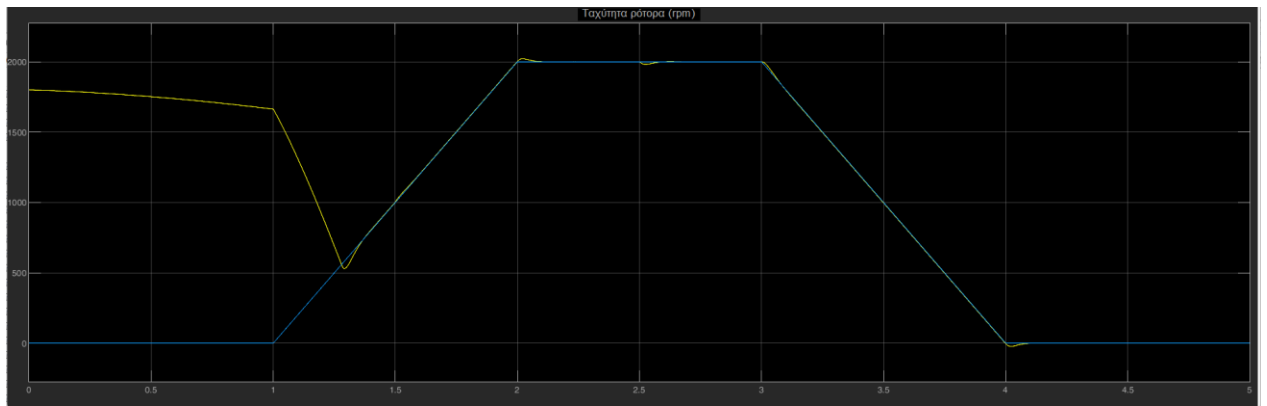
Σχήμα 24 Μοντέλο αυτοελεγχόμενου σύγχρονου AC κινητήρα στο Simulink

Ο σύγχρονος κινητήρας τροφοδοτείται από τον VSI τύπου PWM (Pulse Width Modulation). Ο βρόγχος ελέγχου της ταχύτητας χρησιμοποιεί έναν PI ελεγκτή για την δημιουργία των αναφορών μαγνητικής ροής και ρεύματος για το block ελέγχου διανυσμάτων. Ο ελεγκτής διανυσμάτων υπολογίζει τις αναφορές του τριφασικού ρεύματος γραμμής του κινητήρα που αντιστοιχούν στην ροπή αναφοράς, και τροφοδοτεί τον κινητήρα με αυτό το ρεύμα χρησιμοποιώντας έναν ρυθμιστή τριφασικού ρεύματος. Ο ελεγκτής διανυσμάτων επίσης υπολογίζει την μαγνητική ροή κατά προσέγγιση και την συγκρίνει με την επιθυμητή τιμή με σκοπό την παραγωγή της τάσης διέγερσης πεδίου.

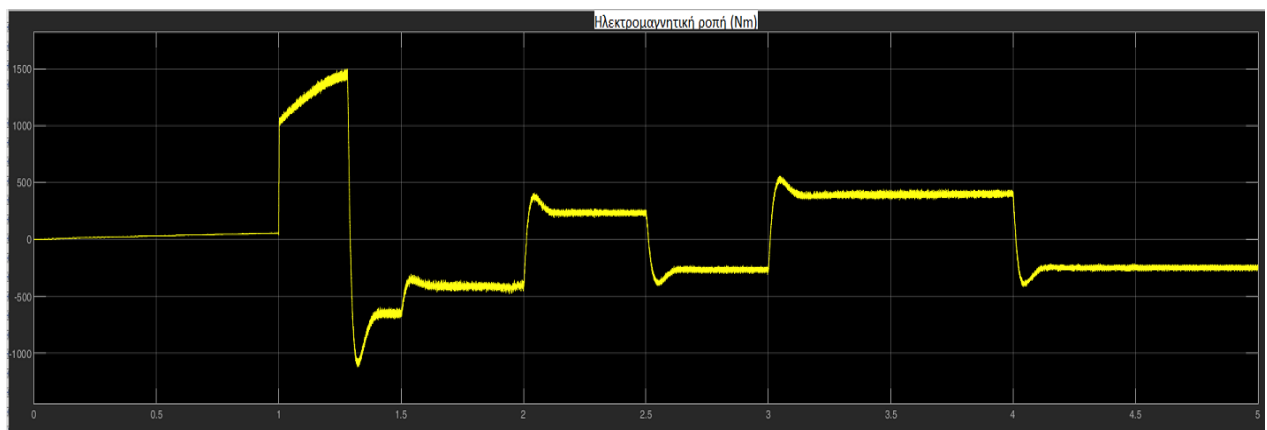
Στο μοντέλο εφαρμόζεται υψηλή τάση μαγνήτισης (600 V) στον ρότορα κατά την διάρκεια των πρώτων 0.2s της προσομοίωσης προκειμένου να επιταχυνθεί η αύξηση του πεδίου του ρότορα. Μόλις η ροή φτάσει την ονομαστική τιμή του 1 Wb, εκκινεί ο ρυθμιστής του τριφασικού ρεύματος.



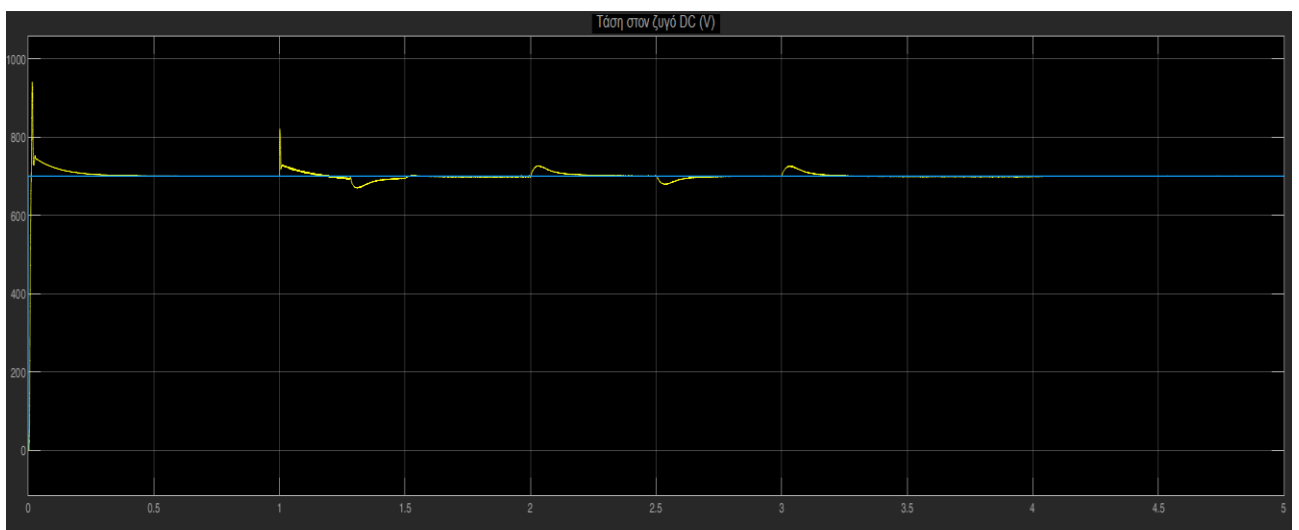
Σχήμα 25 Ρεύμα στάση - Προσομοίωση αυτοελεγχόμενου σύγχρονου AC κινητήρα



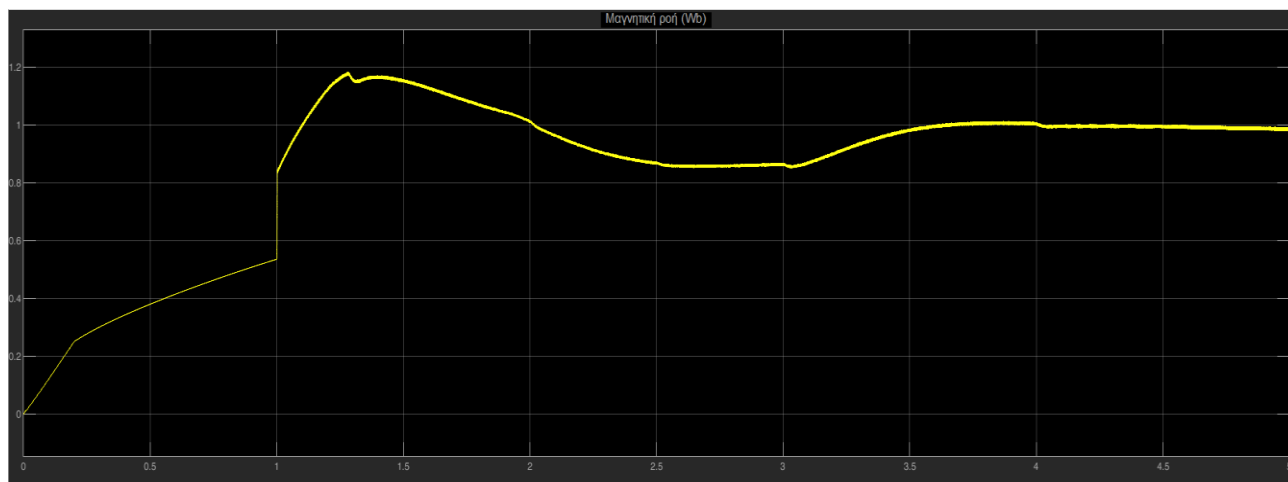
Σχήμα 26 Ταχύτητα ρότορα - Προσομοίωση αυτοελεγχόμενου σύγχρονου AC κινητήρα



Σχήμα 27 Ηλεκτρομαγνητική ροπή - Προσομοίωση αυτοελεγχόμενου σύγχρονου AC κινητήρα



Σχήμα 28 Τάση στον ζυγό DC - Προσομοίωση αυτοελεγχόμενου σύγχρονου AC κινητήρα



Σχήμα 29 Μαγνητική ροή - Προσομοίωση αυτοελεγχόμενου σύγχρονου AC κινητήρα

Για την προσομοίωση του μοντέλου λαμβάνονται ως παράμετροι τυπικές τιμές για τον κινητήρα οι οποίες αντιστοιχούν σε κινητήρα ηλεκτρικού SUV. Ειδικότερα, προσομοιώνεται ο κινητήρας για ισχύ ίση με 100 kW, για ταχύτητα περιστροφής 2000 rpm και ζητούμενη ροπή 250 Nm.

Την χρονική στιγμή $t = 0$ s ο κινητήρας λειτουργεί στην σύγχρονη ταχύτητα ρότορα και σταδιακά ακολουθεί την ταχύτητα αναφοράς του ρότορα. Την χρονική στιγμή $t = 1$ s το set point της ταχύτητας ρότορα γίνεται 2000 rpm. Η ταχύτητα ρότορα ακολουθεί με ακρίβεια την ράμπα ανόδου της αναφοράς, ενώ το πλάτος του ρεύματος στάτη και η συχνότητά του αυξάνονται σταδιακά. Την χρονική στιγμή $t = 1.5$ s εφαρμόζεται ζητούμενη ροπή 250 Nm, με αποτέλεσμα να μειωθεί το ρεύμα του στάτη και η ηλεκτρομαγνητική ροπή να αλλάξει πρόσημο προκειμένου να επιβραδύνει το κινητήρα. Την χρονική στιγμή $t = 2.5$ s εφαρμόζεται ζητούμενη ροπή αντίθετης φοράς -250 Nm και παρατηρείται το αντίθετο φαινόμενο. Την χρονική στιγμή $t = 3$ s το set point της ταχύτητας του ρότορα μηδενίζεται και ο κινητήρας επιβραδύνεται. Κατά την σταθεροποίηση του κινητήρα μετά το 4s εφαρμόζεται μία ηλεκτρομαγνητική ροπή επιτάχυνσης. Η τάση στον ζυγό DC παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις κατά την διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων που προκαλούνται από τις μεταβολές της ζητούμενης ροπής και της ταχύτητας του ρότορα.

4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

Από τις προσομοιώσεις των ηλεκτρικών κινητήρων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Η ροή ισχύος στους AC κινητήρας είναι αμφίδρομη. Η αλλαγή της φοράς περιστροφής του AC κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της φοράς της

- ροής ισχύος. Η ροή ισχύος στους DC κινητήρες έχει συγκεκριμένα φορά καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα.
- ✓ Ο έλεγχος των AC κινητήρων επιτρέπει την δημιουργία υψηλής ροπής σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Από την άλλη πλευρά, ο έλεγχος των DC κινητήρων επιτρέπει τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής με μεγαλύτερη ακρίβεια.
 - ✓ Όταν η ταχύτητα περιστροφής του σύγχρονου AC κινητήρα είναι μικρότερη από την σύγχρονη ταχύτητα, παράγεται ηλεκτρομαγνητική ροπή με διακύμανση και το ρεύμα στάτη είναι υψηλό. Αυτό το πρόβλημα δεν παρουσιάζεται στους ασύγχρονους επαγωγικούς AC κινητήρες.
 - ✓ Ο AC κινητήρας χρειάζεται inverter προκειμένου να λειτουργήσει με την DC παροχή των μπαταριών του ηλεκτρικού οχήματος. Αυτό το ζήτημα δεν υπάρχει στους DC κινητήρες.
 - ✓ Ο σύγχρονος AC κινητήρας μόνιμων μαγνητών, σε αντίθεση με τον BLDC κινητήρα, δεν χρησιμοποιεί ρεύμα DC και διακοπτικό περιοδικό έλεγχο για την περιστροφή των μόνιμων μαγνητών, αλλά λειτουργεί με συνεχές ημιτονοειδές ρεύμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της κυμάτωσης της ροπής και ταυτόχρονα απαιτείται μόνο ένας αισθητήρας τύπου Hall για τον προσδιορισμό της ταχύτητας και της θέσης του ρότορα. Έτσι ο σύγχρονος AC κινητήρας μόνιμων μαγνητών λειτουργεί πιο αποδοτικά και δεν είναι θορυβώδης σε σύγκριση με τον BLDC κινητήρα.
 - ✓ Ο DC κινητήρας, σε σύγκριση με τον AC κινητήρα, έχει υψηλότερη ροπή εκκίνησης, ταχύτερη εκκίνηση και παύση λειτουργίας και μεγαλύτερη ευελιξία στο έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής μέσω της τάσης εισόδου.
 - ✓ Στον σύγχρονο AC κινητήρα ο ρότορας και το μαγνητικό πεδίο περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Στον επαγωγικό AC κινητήρα ο ρότορας περιστρέφεται με χαμηλότερη ταχύτητα σε σύγκριση με το μαγνητικό πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι ο επαγωγικός AC κινητήρας είναι πιο κατάλληλος για εφαρμογές με κριτήρια τη διαθεσιμότητα, το μέγεθος, το σχήμα και την ισχύ του κινητήρα.

5 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε διερεύνηση των ηλεκτρικών μηχανών στις εφαρμογές μεταφοράς και σύγκριση αυτών. Σε όλες τις εφαρμογές μεταφορών (αυτοκίνησης, σιδηροδρομικών, μικρό-κινητικότητας, αεροπλοΐας, θαλάσσιων μεταφορών) η τάση κινείται στην αντικατάσταση των ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος από τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι κυριότεροι λόγοι συνδέονται με την ύπαρξη συστήματος ψηκτρών-συλλέκτη που απαιτεί συχνή συντήρηση και την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που καθιστούν δυνατό τον έλεγχο

των ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος και την μετατροπή AC-DC, DC-AC, DC-DC και AC-AC. Επιπλέον, οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, κατασκευαστικά, προσφέρουν περισσότερα πλεονεκτήματα που συμβάλλουν στην αύξηση της απόδοσης, του λόγου ισχύος προς βάρος και την πυκνότητας ισχύος, ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι σε εφαρμογές μεταφοράς λόγω περιορισμού χώρου και τοποθέτησης.

Όσον αφορά την επιλογή μηχανών από την κατηγορία μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, φαίνεται ότι τα τελευταία χρόνια, προτιμώνται οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, λόγω της συγκριτικά με τις επαγωγικές μηχανές, μεγαλύτερης απόδοσης, λόγου ισχύος προς βάρος, πυκνότητας ισχύος, μειωμένων αναγκών συντήρησης κ.λπ. Ωστόσο, οι επαγωγικές μηχανές έχουν χαμηλότερο κόστος, αποτελούν μια αξιόπιστη και αρκετά ώριμη τεχνολογία ηλεκτρικών μηχανών με αρκετά υψηλά λειτουργικά πλεονεκτήματα. Λόγω της ύπαρξης των μόνιμων μαγνητών, οι αντίστοιχες ηλεκτρικές μηχανές έχουν υψηλότερο κόστος, κινδύνους σφάλματος συνδεδεμένους με τους μαγνήτες, και ζητήματα βιωσιμότητας τόσο στην εξόρυξη και επεξεργασία σπάνιων γαιών όσο και στην αλυσίδα τροφοδότησης των συγκεκριμένων υλικών. Μάλιστα, οι χώρες που εξάγουν και επεξεργάζονται τους συγκεκριμένους μαγνήτες είναι περιορισμένες, με την Κίνα και την Ιαπωνία να προηγούνται στον τομέα αυτόν. Για αυτούς τους λόγους, οι επαγωγικές μηχανές συνεχίζουν και αποτελούν μια μεγάλη δύναμη στον χώρο των ηλεκτρικών μηχανών για εφαρμογές μεταφορών.

Παράλληλα, οι απαιτήσεις των εφαρμογών μεταφοράς για υψηλή απόδοση, υψηλή πυκνότητα ισχύος και χαμηλή συντήρηση, οδηγούν στην ανάπτυξη και αξιοποίηση νέων μορφών ηλεκτρικών μηχανών καθώς και την αξιοποίηση νέων τεχνολογιών. Πιο συγκεκριμένα, οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, χρησιμοποιούνται σήμερα σε συστήματα κλειστού βρόχου με την χρήση μετατροπέων ισχύος, αισθητήρων και ελεγκτών για υψηλή μεταβατική και μόνιμης κατάστασης απόκριση λειτουργίας. Ο συνδυασμός των ηλεκτρονικών με τις ηλεκτρικές μηχανές έχει αλλάξει τον τρόπο που χρησιμοποιούνται και τις εφαρμογές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση των BLDC σε πολλαπλές εφαρμογές μικρό-κινητικότητας.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές που ελαχιστοποιούν ή δεν χρησιμοποιούν καθόλου μόνιμους μαγνήτες. Μία βασική κατηγορία είναι σύγχρονες μηχανές μαγνητικής αντίδρασης. Λόγω της χαμηλής συντήρησης και της υψηλής απόδοσης, αποτελούν μία από τις σημαντικότερες υποψήφιες κατηγορίες για εφαρμογές όπου κυριαρχούν οι επαγωγικές μηχανές και οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη. Ωστόσο, η λειτουργία τους εμφανίζει συγκεκριμένα μειονεκτήματα, τα οποία απαιτούν επιπλέον έρευνα. Στην κατεύθυνση αυτή συμβάλλει τόσο η ανάπτυξη νέων κατασκευαστικών τοπολογιών, όσο και υλικών, ηλεκτρονικών, μεθοδολογιών ελέγχου καθώς και συστημάτων ψύξεως.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Chapman, S. J. (2002). Electric machinery and power system fundamentals / Stephen J. Chapman.
- [2] Hughes, A. L. (1990). Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and applications.
- [3] Krishnan, R. (2001). Electric Motor Drives: Modeling, analysis, and control.

- [4] Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2002). Analysis of electric machinery and drive systems. In IEEE eBooks. <https://doi.org/10.1109/9780470544167>
- [5] Al-Ani, M., Öner, Y., & Tameemi, A. (2022). Electrical machines in automotive: evaluation of current technologies and future requirements. *Electrical Engineering*, 105(1), 477–491. <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01673-7>
- [6] Bhatt, P., Mehar, H., & Sahajwani, M. (2019). Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3364887>
- [7] Comparing Electric Motors: An analysis using four standard driving schedules. (2014, August 1). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6804651>
- [8] Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. (2008, September 1). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4800157?denied=>
- [9] A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. (2014, September 1). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6980715>
- [10] A review on different aspects of traction motor design for railway applications. (2020, June 1). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8964446?denied=>
- [11] Electric Motor drive selection issues for HEV propulsion Systems: A Comparative study. (2006, November 1). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4012550>
- [12] Comparison of advance and conventional motors for electric vehicle application. (2019, October 1). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8979092>
- [13] Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA). (2012, September 1). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5991952?denied=>
- [14] A review of electric aircraft drivetrain motor technology. (2022, February 1). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9435356>
- [15] Motors for ship propulsion. (2015, December 1). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7317729>
- [16] History and state of the art in commercial electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends. (2015, December 1). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7272043>
- [17] Oğuz, S. (2023, October 10). Life Cycle Emissions: EVs vs. Combustion Engine Vehicles. Elements by Visual Capitalist.

<https://elements.visualcapitalist.com/life-cycle-emissions-of-electric-hybrid-and-combustion-engine-vehicles/>

- [18] Rassõlkin, A., Belahcen, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Lukichev, D. V., Orlova, S. A., Heidari, H., Asad, B., & Pando-Acedo, J. (2020). Life cycle analysis of electrical motor-drive system based on electrical machine type. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 69(2), 162. <https://doi.org/10.3176/proc.2020.2.07>
- [19] “Makers of Matlab and simulink,” MathWorks, <https://www.mathworks.com/>
- [20] HIGEN RNM, <http://www.higenmotor.com/>