



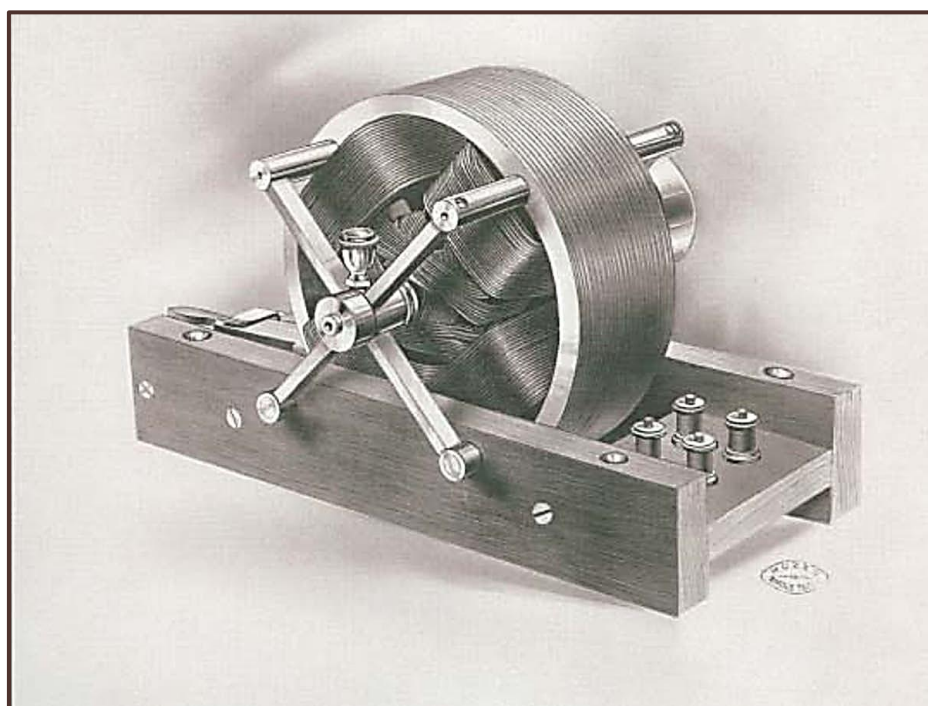
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα



Φοιτήτρια: Μπουζάλα Χριστίνα

ΑΜ: 48347376

Επιβλέπων Καθηγητής

Πέτρος Καραϊσάς

Αναπληρωτής καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022



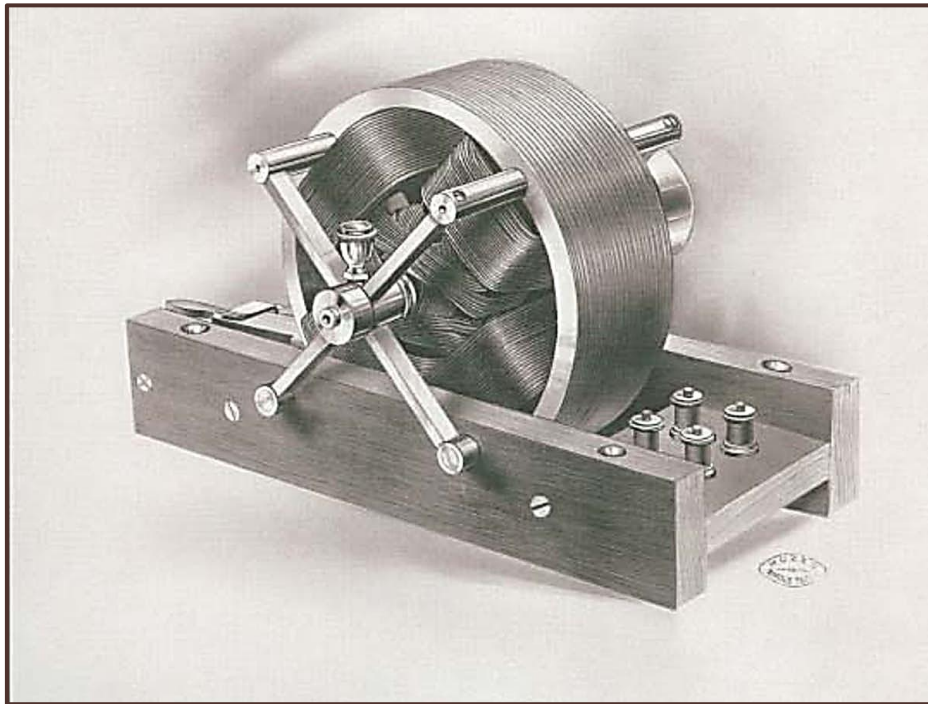
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Study of asynchronous three-phase motor



Student: Bouzala Christina

Registration Number: 48347376

Supervisor

Karaisas Petros

Associate Professor

ATHENS-EGALEO, JULY 2022

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

| ΚΑΡΑΙΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ | ΚΑΛΚΑΝΗΣ ΚΩΣΤΑΣ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ | ΣΥΓΓΕΡΙΔΟΥ ΟΛΥΜΠΙΑΔΑ ΛΕΚΤΟΡΑΣ |
|--|--|----------------------------------|
| (Υπογραφή) | (Υπογραφή) | (Υπογραφή) |

Copyright © Μπουζάλα Χριστίνα 2022

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

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μπουζάλα Χριστίνα του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 48347376 φοιτήτρια 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 καθηγητή»

Η Δηλούσα

Μπουζάλα Χριστίνα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη, δίχως το ενδιαφέρον και την καθοδήγηση του αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών κ. Πέτρου Καραϊσά. Τον ευχαριστώ εκ βαθέως για τις χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του, οι οποίες ήταν καθοριστικές για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας, γνωστός και ως επαγωγικός κινητήρας. Αρχικά, γίνεται μια απόπειρα να παρουσιαστούν οι βασικές αρχές και τα μεγέθη ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Αναλύονται έννοιες όπως είναι το μαγνητικό πεδίο και η μαγνητική ροή, η δημιουργία ροπής σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα μέσω του μαγνητικού κυκλώματος και επισημαίνεται η σημασία διαφόρων μεγεθών όπως η ένταση και η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος για τη λειτουργία του κινητήρα. Γίνεται επίσης αναφορά στις γενικές ιδιότητες αυτών των κινητήρων, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας τους, η ροπή και η ισχύς.

Στη δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση που στοχεύει στην κατανόηση των βασικών αρχών μιας σημαντικής ομάδας ηλεκτρικών κινητήρων, των κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Το κεφάλαιο ξεκινά με μια απαραίτητη ιστορική αναδρομή στις καινοτομίες που έκαναν δυνατή την κατασκευή αυτού του τύπου κινητήρα. Έπειτα αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος καθώς και τυπική δομή τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους διαφορετικούς τύπους κινητήρων και φυσικά στις εφαρμογές τους, που εντοπίζονται κυρίως στην ηλεκτροκίνηση.

Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί μια εκτενέστερη ανάλυση των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίοι αποτελούν τη δεύτερη μεγάλη κατηγορία ηλεκτροκινητήρων. Σε αυτό το κεφάλαιο, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους διαφορετικούς τύπους κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς και στη πληθώρα εφαρμογών που βρίσκουν εφαρμογή, κυρίως στο βιομηχανικό και παραγωγικό τομέα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας, και εφόσον πλέον υπάρχουν όλες οι βάσεις για την κατανόηση των εννοιών, πραγματοποιείται μια διεξοδική μελέτη του ειδικού και πλέον χρησιμοποιούμενου τύπου κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. Αρχικά γίνεται μια ιστορική αναδρομή στην εφεύρεση αυτού του κινητήρα και σημειώνεται η σημαντική συμβολή μεγάλων επιστημονικών προσωπικοτήτων. Στη συνέχεια αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά και η δομή του συγκεκριμένου κινητήρα, καθώς και οι βασικές βλάβες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του. Αναλύεται επίσης η πληθώρα εφαρμογών του επαγωγικού κινητήρα και το σημαντικό πλεονέκτημα που εμφανίζει ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας και γενικότερα οι ηλεκτρικοί κινητήρες σε σχέση με κινητήρες άλλου τύπου, που είναι η οικονομική του απόδοση και η αποτελεσματικότητα.

Συμπερασματικά, αναλύονται τα σημαντικά πλεονεκτήματα του τριφασικού κινητήρα και τονίζονται οι διαφορές μεταξύ των ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Περιγράφεται δηλαδή η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας έναν ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα, τον οποίο υποβάλλουμε στα εξής πειράματα: μέτρηση ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη, λειτουργία εν κενώ και πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα. Επιπλέον, πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η προσομείωση του πειραματικού μέρους με τη χρήση του προγράμματος Matlab/Simulink. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται οι δοκιμές

συνεχούς ρεύματος, χωρίς φορτίο και ακινητοποιημένου δρομέα, με σκοπό την παρουσίαση γραφημάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Λέξεις – κλειδιά

Ηλεκτρικές μηχανές, Ηλεκτρικοί κινητήρες, Μαγνητικό πεδίο, Κινητήρες συνεχούς ρεύματος, Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας, Πειραματικό μέρος, Προσομοίωση.

Abstract

The scope of this thesis is the study of the asynchronous three-phase motor, also known as induction motor. First, an attempt is made to present the basic principles and physical quantities of the electric motor. Concepts such as magnetic field and magnetic flux, the creation of torque in an electric motor through the magnetic circuit and the importance of various quantities such as the intensity and direction of the electric current for the operation of the motor are analyzed and pointed out. General properties of these motors, such as operating temperature, torque and power, are also reported.

In the second chapter an analysis is made that aims to understand the basic principles of an important group of electric motors, called direct current or DC motors. The chapter begins with a necessary historical overview of the innovations that made the construction of this type of motor possible. Then, the basic principles of operation of DC motors as well as their typical structure are analyzed. Special emphasis is given to the different types of motors and of course to their applications, which are mainly found in electric vehicle propulsion.

In the third chapter a more detailed analysis of alternating current or AC motors, which are the second largest category of electric motors. In this chapter, special emphasis is given to the different types of AC motors, as well as the variety of applications that are applicable, mainly in the industrial and productive sector.

In the fourth chapter of this thesis, and since there are now all the basic information for understanding the concept available, a thorough study of the special and most widely used type of AC motor, the asynchronous three-phase motor, is carried out. Initially, a historical review is made of the invention of this motor and the important contribution of great scientific personalities is noted. Then, an analysis is following that highlights the basic characteristics and structure of this motor, as well as the basic failures that occur during its operation. The variety of applications of the induction motor is also analyzed and the important advantage of the asynchronous three-phase motor and all the electric motors in general in relation to other types of motors, which is its economic efficiency and effectiveness, is analyzed.

In conclusion, the significant advantages of the three-phase motor are analyzed and the differences between direct and alternating current electric motors are emphasized

The fifth chapter refers to the experimental part of this thesis. In other words, the experimental set-up performed in the laboratory using an asynchronous three-phase squirrel-cage motor is described, which we submit to the following experiments: measurement of ohmic resistance of stator windings, no-load operation and stationary rotor experiment. In addition, the necessary calculations are performed to process the experimental results.

In the sixth chapter the experimental part is simulated using the Matlab / Simulink program. Specifically, direct current test, without load and with a stationary rotor, are performed in order to present graphs and draw conclusions.

Keywords

Electric machines, Electric motors, Magnetic field, DC motors, AC motors, Asynchronous three -Phase motor, Experimental part, Simulation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| Περίληψη | 5 |
| Abstract | 7 |
| Εισαγωγή | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ. | 15 |
| 1.1 Μαγνητικό πεδίο και μαγνητική ροή. | 16 |
| 1.2 Μαγνητικό κύκλωμα και μαγνητικο-κινητική δύναμη. | 17 |
| 1.3 Μαγνητικό κύκλωμα στους κινητήρες και δημιουργία ροπής. | 20 |
| 1.4 Βασικός κινητήρας — Στατικές συνθήκες – Ισοδύναμο κύκλωμα. | 24 |
| 1.4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα. | 25 |
| 1.5 Συμπεριφορά χωρίς μηχανικό φορτίο. | 26 |
| 1.6 Σχετικά μεγέθη V και E, και απόδοση. | 29 |
| 1.7 Γενικές ιδιότητες ηλεκτροκινητήρων. | 31 |
| 1.7.1 Θερμοκρασία λειτουργίας και ψύξη. | 32 |
| 1.7.2 Ροπή ανά μονάδα όγκου. | 32 |
| 1.7.3 Ισχύς ανά μονάδα όγκου και απόδοση — Σημασία της ταχύτητας. | 33 |
| 1.7.4 Επιδράσεις μεγέθους—Ειδική ροπή και απόδοση. | 33 |
| 1.7.5 Ονομαστική τάση. | 33 |
| 1.7.6 Βραχυπρόθεσμη υπερφόρτωση. | 34 |
| Κεφάλαιο 2: Ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος. | 34 |
| 2.1 Ιστορική αναδρομή. | 34 |
| 2.2 Βασική δομή και αρχές λειτουργίας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. | 38 |
| 2.3 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. | 42 |
| 2.3.1 Κινητήρας ανεξάρτητης διέγερσης. | 43 |
| 2.3.2 Κινητήρας με διέγερση σειράς. | 44 |
| 2.3.3 Κινητήρας με σύνθετη διέγερση. | 46 |
| 2.3.4 Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη. | 47 |
| 2.4 Εφαρμογές ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. | 47 |
| Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. | 50 |
| 3.1 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων AC. | 50 |
| 3.1.1 Τύποι σύγχρονου κινητήρα. | 51 |
| 3.1.2.Κινητήρες διεγερμένου ρότορα. | 53 |

| | |
|--|-----|
| 3.1.3 Κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. | 55 |
| 3.1.4 Κινητήρες αντίστασης. | 55 |
| 3.1.5 Κινητήρες υστέρησης. | 56 |
| 3.2 Βασικές εφαρμογές ηλεκτρικών κινητήρων AC. | 57 |
| 3.2.1 Ηλεκτροκίνηση. | 57 |
| 3.2.2 Βιομηχανικές εφαρμογές. | 58 |
| Κεφάλαιο 4: Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας. | 63 |
| 4.1 Ιστορική αναδρομή. | 63 |
| 4.2 Βασικά χαρακτηριστικά και αρχή λειτουργίας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. | 67 |
| 4.2.1 Κατασκευή στάτορα και ρότορα. | 69 |
| 4.2.2 Πινακίδα κατασκευαστή. | 71 |
| 4.2.3 Κατηγορίες (κλάσεις) μόνωσης. | 73 |
| 4.2.4 Βαθμός προστασίας κινητήρα. | 73 |
| 4.2.5 Αρχή λειτουργίας. | 74 |
| 4.2.6 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. | 76 |
| 4.3 Συντήρηση και βλάβες. | 78 |
| 4.3.1 Βλάβες. | 81 |
| 4.4 Εφαρμογές ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. | 83 |
| 4.4.1 Σιδηροδρομικές εφαρμογές. | 83 |
| 4.4.2 Αυτοκινητοβιομηχανία. | 85 |
| 4.4.3 Άλλες εφαρμογές. | 87 |
| 4.5 Οικονομική απόδοση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. | 88 |
| Συμπεράσματα | 91 |
| Κεφάλαιο 5: Πειραματική μελέτη ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. | 94 |
| 5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα. | 94 |
| 5.2 Μέτρηση ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη. | 95 |
| 5.2.1 Θεωρητικό μέρος. | 95 |
| 5.2.2 Πειραματικό μέρος. | 96 |
| 5.2.3 Υπολογισμοί. | 98 |
| 5.2.4 Συμπεράσματα. | 100 |
| 5.3 Λειτουργία εν κενώ. | 101 |
| 5.3.1 Θεωρητικό μέρος. | 101 |
| 5.3.2 Πειραματικό μέρος. | 102 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.3 Υπολογισμοί. | 104 |
| 5.3.4 Συμπεράσματα. | 105 |
| 5.4 Πείραμα ακινητοποιήμενου δρομέα. | 106 |
| 5.4.1. Θεωρητικό μέρος. | 106 |
| 5.4.2 Πειραματικό μέρος. | 107 |
| 5.4.3 Υπολογισμοί. | 109 |
| 5.4.4 Συμπεράσματα. | 113 |
| Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με χρήση MATLAB-SIMULINK. | 114 |
| 6.1 Εισαγωγή. | 114 |
| 6.2 Δυναμική ανάλυση. | 114 |
| 6.3 Υλοποίηση Matlab. | 117 |
| 6.4.1 Δοκιμή συνεχούς ρεύματος. | 120 |
| 6.4.2 Δοκιμή χωρίς φορτίο. | 121 |
| 6.4.3 Δοκιμή με ακινητοποιημένο δρομέα. | 124 |
| 6.5 Παρατηρήσεις για την προσομοίωση. | 127 |
| Βιβλιογραφία. | 128 |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|----|
| 1 Εικόνα 1.1: Μηχανική δύναμη που παράγεται σε ένα σύρμα που μεταφέρει ρεύμα σε μαγνητικό πεδίο (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 16 |
| 2 Εικόνα 1.2: Μαγνητικό πεδίο γύρω από μεγάλο μήκους σύρμα που φέρει σταθερό ρεύμα. | 18 |
| 3 Εικόνα 1.3: Μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από αντίθετα ρεύματα με υπέρθεση (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 18 |
| 4 Εικόνα 1.4: Πηνίο με πολλές σπείρες, για χρήση σε ηλεκτρικούς κινητήρες (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 19 |
| 5 Εικόνα 1.5: Η εξέλιξη από τον μαγνητικό κύκλωμα στη γεωμετρία του κινητήρα (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 21 |
| 6 Εικόνα 1.6: Αγωγοί στερεωμένοι στο ρότορα (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 22 |
| 7 Εικόνα 1.7: Η στοιχειώδης γραμμική μηχανή (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 24 |
| 8 Εικόνα 1.8: Η στοιχειώδης γραμμική μηχανή σε διαγραμματική μορφή (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 24 |
| 9 Εικόνα 1.9: Ισοδύναμο κύκλωμα στοιχειώδη κινητήρα (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 26 |
| 10 Εικόνα 1.10: Δυναμική συμπεριφορά στοιχειώδους d.c. κινητήρα χωρίς μηχανικό φορτίο (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 27 |
| 11 Εικόνα 1.11: Επίδραση της πυκνότητας ροής στην επιτάχυνση και τη σταθερή ταχύτητα λειτουργίας του στοιχειώδους d.c. κινητήρα χωρίς μηχανικό φορτίο (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 29 |
| 12 Εικόνα 2.1: Η δυναμομηχανή του Siemens (Πηγή: Siemens). | 38 |
| 13 Εικόνα 2.2: Ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος, όπου εμφανίζεται ο στάτορας και ο ρότορας (Πηγή: Sang-Hoon K., 2017). | 39 |
| 14 Εικόνα 2.3: Η δύναμη που ασκείται στον αγωγό εντός μαγνητικού πεδίου λόγω μαγνητικού πεδίου (Πηγή: Keyes C., 2007). | 40 |
| 15 Εικόνα 2.4: Τυπικό διάγραμμα ροπής – ταχύτητας περιστροφής ενός ηλεκτρικού κινητήρα (Πηγή: Keyes C., 2007). | 41 |
| 16 Εικόνα 2.5: Παραγωγή ροπής σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος (Πηγή: Keyes C., 2007). | 43 |
| 17 Εικόνα 2.6: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης (Πηγή: Keyes C., 2007). | 44 |
| 18 Εικόνα 2.7: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς (Πηγή: Keyes C., 2007). | 45 |
| 19 Εικόνα 2.8: Κινητήρας με σύνθετη διέγερση (Πηγή: Keyes C., 2007). | 46 |
| 20 Εικόνα 2.9: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες (Πηγή: Keyes C., 2007). | 47 |
| 21 Εικόνα 3.1: Καμπύλη ροπής-στροφών σταθερής κατάστασης για σύγχρονο κινητήρα που τροφοδοτείται σε σταθερή συχνότητα. (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 53 |
| 22 Εικόνα 3.2: Ρότορες για σύγχρονους κινητήρες. (Α) 2-πολικός κυλινδρικός, με πηνία πεδίου καταναμεμένα σε σχισμές, (Β) 2-πολικός προεξέχων πόλος με συγκεντρωμένη περιέλιξη πεδίου (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 54 |
| 23 Εικόνα 3.3: Σύγχρονοι ρότορες κινητήρα μόνιμου μαγνήτη: 4 πόλων (αριστερά) και 10 πόλων (δεξιά) (Hughes, A., & Drury, B., 2019). | 56 |
| 24 Εικόνα 3.4: 4-πολικοί ρότορες κινητήρα αντίστασης (Hughes, A., & Drury, B., 2019) | 57 |
| 25 Εικόνα 4.1: Ο μηχανικός και εφευρέτης του επαγωγικού κινητήρα Νικόλα Τέσλα (Carlson, W. B., 2013). | 64 |
| 26 Εικόνα 4.2: Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας του Τέσλα (P. L. Alger & R. E. Arnold, 1976). | 65 |
| 27 Εικόνα 4.3: Σχέδια επαγωγικών τριφασικών κινητήρων της εταιρείας General Electric (P. L. Alger & R. E. Arnold, 1976). | 67 |
| 28 Εικόνα 4.4: Βασικά μέρη ενός επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα (Al Kadhim, S.A. S., 2020). | 69 |
| 29 Εικόνα 4.5: Τυπικός στάτης τριφασικού επαγωγικού κινητήρα (Al Kadhim, S.A. S., 2020). | 70 |
| 30 Εικόνα 4.6: Ρότορας βραχυκυκλωμένου δρομέα και ρότορας με δακτυλίους ολίσθησης (Al Kadhim, S.A. S., 2020). | 71 |
| 31 Εικόνα 4.7: Ρότορας βραχυκυκλωμένου δρομέα και ρότορας με δακτυλίους ολίσθησης (Al Kadhim, S.A. S., 2020). | 71 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| 32 Εικόνα 4.8: | Τυπική πινακίδα κατασκευαστή ενός επαγωγικού κινητήρα. | 72 |
| 33 Εικόνα 4.9: | Τμήμα του επαγωγικού κινητήρα (Al Kadhim, S.A. S., 2020). | 76 |
| 34 Εικόνα 4.10: | Αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα (Alkadhim, S.A. S., 2020) | 77 |
| 35 Εικόνα 4.11: | Πιθανές βλάβες και αστοχίες ενός ηλεκτρικού κινητήρα (S.P. Watson, 1988). | 79 |
| 36 Εικόνα 4.12: | Ανύψωση στάτορα 7,460 kW, 6,6 kV, 60 Hz, τετραπολικού κινητήρα επαγωγής για χρήση σε συμπιεστή (S.P. Watson, 1988). | 80 |
| 37 Εικόνα 4.13: | Ρότορας υψηλής ταχύτητας καλιμπράρεται πριν την επανατοποθέτηση (S.P. Watson, 1988). | 82 |
| 38 Εικόνα 4.14: | Διάταξη μιας ηλεκτρικής μηχανή AC, που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από μια εναέρια γραμμή (Dordea, T. et al., 2011). | 84 |
| 39 Εικόνα 4.15: | Διάταξη ενός ηλεκτρικού οχήματος (Jape, S. & Thosar, A., 2017). | 85 |
| 40 Εικόνα 4.16: | Αριστερά φαίνονται τα ιδανικά μηχανικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού κινητήρα για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα. Δεξιά εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά ροπής του επαγωγικού κινητήρα (Jape, S. & Thosar, A., 2017). | 87 |
| 41 Εικόνα 4.17: | Οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες βρίσκουν πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία (Jape, S. & Thosar, A., 2017). | 88 |
| 42 Εικόνα 4.18: | Απόδοση ενός νέου και ενός ανακατασκευασμένου επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ονομαστική του ισχύ (Rai, K. et al., 2017). | 89 |
| 43 Εικόνα 4.19: | Διαφορές κινητήρων εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος. | 92 |
| 44 Εικόνα 5.1: | Ονομαστική πινακίδα κινητήρα. | 95 |
| 45 Εικόνα 5.2: | Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.. | 96 |
| 46 Εικόνα 5.3: | Τυλίγματα στάτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα. | 97 |
| 47 Εικόνα 5.4: | Τυλίγματα στάτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα (από εργαστήριο). | 97 |
| 48 Εικόνα 5.5: | Τυλίγματα στάτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου. | 99 |
| 49 Εικόνα 5.6: | Τυλίγματα στάτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου(από εργαστήριο). | 99 |
| 50 Εικόνα 5.7: | Εργαστηριακό κύκλωμα για τον προσδιορισμό των ισχύων τριφασικού επαγωγικού κινητήρα στην εν κενώ λειτουργία. | 103 |
| 51 Εικόνα 5.8: | Χαρακτηριστικές $I_{nl}=f(V_{nl})$, $P_{nl}=f(V_{nl})$, $P_{wc}=f(V_{nl})$, $P_{wc}=f(V_{nl})^2$ σε κοινό άξονα | 105 |
| 52 Εικόνα 5.9: | Εργαστηριακό κύκλωμα για δοκιμή κενού φορτίου. | 108 |
| 53 Εικόνα 5.10: | Εργαστηριακό κύκλωμα για δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα. | 108 |
| 54 Εικόνα 5.11: | Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης. | 112 |
| 55 Εικόνα 5.12: | Χαρακτηριστική ροπής στρωφών. | 112 |
| 56 Εικόνα 6.1: | Ισοδύναμο κύκλωμα $dq0$. | 115 |
| 57 Εικόνα 6.2: | Αρχείο Matlab. | 118 |
| 58 Εικόνα 6.2: | Αρχείο Matlab. | 119 |
| 59 Εικόνα 6.3: | Αρχείο Matlab με τα στοιχεία του κινητήρα. | 119 |
| 60 Εικόνα 6.4: | Κύκλωμα DC δοκιμής. | 120 |
| 61 Εικόνα 6.5: | Υλοποίηση DC δοκιμής με Simulink. | 121 |
| 62 Εικόνα 6.6: | Υλοποίηση Simulink δοκιμή κινητήρα χωρίς φορτίο | 122 |
| 63 Εικόνα 6.7: | Κυματομορφή ρεύματος δρομέα και στάτη στην δοκιμή χωρίς φορτίο. | 123 |
| 64 Εικόνα 6.8: | Κυματομορφή ροπής εκκίνησης στην δοκιμή χωρίς φορτίο. | 123 |
| 65 Εικόνα 6.9: | Κυματομορφή ταχύτητας στην δοκιμή χωρίς φορτίο. | 124 |
| 66 Εικόνα 6.10: | Υλοποίηση Simulink δοκιμής ακινητοποιημένου δρομέα . | 125 |
| 67 Εικόνα 6.11: | Κυματομορφή ρεύματος δρομέα και στάτη στην δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα. | 126 |
| 68 Εικόνα 6.12: | Κυματομορφή ηλεκτρομαγνητικής ροπής στην δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα. | 127 |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|-----|
| 1 Πίνακας 2.1: Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης του ηλεκτρικού κινητήρα (Πηγή: Doppelbauer M., 2018). | 36 |
| 2 Πίνακας 3.1: Λεπτομέρειες γερανού. | 59 |
| 3 Πίνακας 4.1: Επεξήγηση όρων (Al kadhim, S.A. S., 2020). | 72 |
| 4 Πίνακας 4.2: Κλάσεις μονώσεων κινητήρα (Al Kadhim, S.A. S., 2020). | 73 |
| 5 Πίνακας 4.3: Βαθμοί προστασίας (Al Kadhim, S.A. S., 2020). | 74 |
| 6 Πίνακας 4.4: Τα αποτελέσματα ελέγχου του επαγωγικού κινητήρα έλξης LK-450 X6 (J. Bernatt et al., 2018). | 84 |
| 7 Πίνακας 5.1 Μετρήσεων ωμικής αντίστασης σε συνδεσμολογία αστέρα. | 98 |
| 8 Πίνακας 5.2 Μετρήσεων ωμικής αντίστασης σε συνδεσμολογία τριγώνου. | 100 |
| 9 Πίνακας 5.3 Μετρήσεων απωλειών. | 103 |
| 10 Πίνακας 5.4 Μετρήσεων εν κενώ. | 109 |
| 11 Πίνακας 5.5 Μετρήσεων ακινητοποιημένου δρομέα. | 109 |

Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν πλέον ένα μεγάλο μέρος της καθημερινής ζωής που σπάνια έρχονται στο ανθρώπινο μυαλό ως δεύτερη σκέψη. Όταν για παράδειγμα ενεργοποιούμε ένα παλιό ηλεκτρικό τρυπάνι, περιμένουμε με σιγουριά ότι θα περιστρέφεται με τη σωστή ταχύτητα και δεν αμφισβητούμε πως ξέρει με ποια ταχύτητα να περιστραφεί, ούτε πώς γίνεται όταν έχει αρκετή ενέργεια η οποία αντλείται από την τροφοδοσία για να έλθει σε κατάλληλη ταχύτητα, η ισχύς που αντλείται πέφτει σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Όταν βάζουμε το τρυπάνι να δουλέψει αντλεί περισσότερη ισχύ, και όταν τελειώνουμε η ισχύς που αντλείται από την παροχή μειώνεται αυτόματα, χωρίς παρέμβαση από μέρους μας.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας, που δεν αποτελείται από τίποτα περισσότερο από μια διάταξη χάλκινων πηνίων και χαλύβδινων ελασμάτων, είναι σαφώς ένας έξυπνος μετατροπέας ενέργειας, γεγονός που από μόνο του αποτελεί έναν καλό λόγο περαιτέρω εξέτασης του. Αποκτώντας μια βασική κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του κινητήρα, θα μπορέσουμε να εκτιμήσουμε τις δυνατότητές του και τους περιορισμούς του και να δούμε πως η ήδη αξιοσημείωτη απόδοσή του βελτιώνεται δραματικά με την προσθήκη εξωτερικών ηλεκτρονικών χειριστηρίων. Η μεγάλη πλειονότητα των ηλεκτροκινητήρων έχει άξονα που περιστρέφεται, αλλά οι γραμμικοί ηλεκτροκινητήρες έχουν εξειδικευμένες εφαρμογές και ενώ φαίνονται πολύ διαφορετικοί από την περιστρεφόμενη εκδοχή τους, η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.

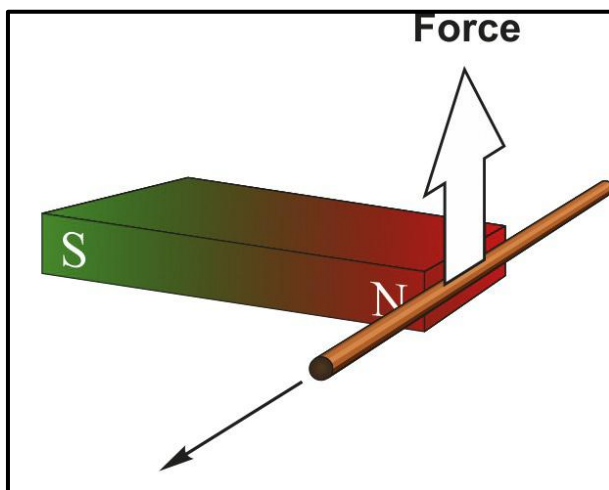
Σχεδόν όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες εκμεταλλεύονται τη δύναμη που ασκείται σε έναν αγωγό που μεταφέρει ρεύμα τοποθετημένο σε μαγνητικό πεδίο. Η δύναμη μπορεί να αποδειχτεί τοποθετώντας έναν μαγνήτη ράβδου κοντά σε ένα σύρμα που μεταφέρει ρεύμα (Σχήμα 1.1), αλλά όποιος δοκιμάσει το πείραμα, πιθανότατα θα απογοητευτεί όταν ανακαλύψει πόσο αδύναμη είναι η δύναμη και αναμφίβολα θα μείνει να αναρωτιέται πως μπορεί ένα τέτοιο απρόοπτο αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αποτελεσματικών κινητήρων.

Αξιοσημείωτο είναι ότι για να αξιοποιήσουμε στο έπακρο τον μηχανισμό, πρέπει να υπάρχει ένα πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο που να αλληλεπιδρά με πολλούς αγωγούς, ο καθένας από τους οποίους μεταφέρει όσο το δυνατόν περισσότερο ρεύμα. Θα δούμε επίσης, ότι παρόλο που το μαγνητικό πεδίο (ή «διέγερση») είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του κινητήρα, λειτουργεί μόνο ως καταλύτης και όλη η μηχανική ισχύς εξόδου προέρχεται από την ηλεκτρική παροχή στους αγωγούς στους οποίους η δύναμη είναι αναπτυγμένη.

Παράλληλα, θα προκύψει αργότερα ότι σε ορισμένους κινητήρες τα μέρη της μηχανής που είναι υπεύθυνα για τη διέγερση και για τις λειτουργίες μετατροπής ενέργειας είναι ευδιάκριτα και αυτονόητα. Για παράδειγμα, η διέγερση παρέχεται, είτε από μόνιμους μαγνήτες, είτε από πηνία πεδίου τυλιγμένα γύρω από σαφώς καθορισμένους πόλους προεξέχοντος πεδίου στο ακίνητο τμήμα, ενώ οι αγωγοί στους οποίους αναπτύσσεται η δύναμη βρίσκονται στον ρότορα και τροφοδοτούνται με ρεύμα μέσω γνωστών συρόμενων επαφών ως βούρτσες. Σε πολλούς κινητήρες, ωστόσο, δεν υπάρχει τόσο ξεκάθαρη φυσική διάκριση μεταξύ των μερών «διέγερσης» και «μετατροπής ενέργειας» του μηχανήματος, και ένα μόνο σταθερό τύλιγμα εξυπηρετεί και τους δύο σκοπούς. Παρόλα αυτά, θα διαπιστώσουμε ότι η αναγνώριση και ο διαχωρισμός των συναρτήσεων διέγερσης και μετατροπής ενέργειας είναι πάντα χρήσιμες για την κατανόηση τόσο του τρόπου λειτουργίας των κινητήρων, όλων των τύπων, όσο και των χαρακτηριστικών απόδοσης τους.

Στη συνέχεια, επιστρέφοντας στο θέμα της δύναμης σε έναν μόνο αγωγό, θα εξετάσουμε πρώτα τι καθορίζει το μέγεθος και την κατεύθυνση της δύναμης, πριν

στραφούμε στους τρόπους εκμετάλλευσης του μηχανισμού για την παραγωγή περιστροφής. Η έννοια του μαγνητικού κυκλώματος θα πρέπει να διερευνηθεί, καθώς αυτό είναι βασικό για την κατανόηση του γιατί οι κινητήρες έχουν τα σχήματα που έχουν. Πριν από αυτό περιλαμβάνεται μια σύντομη εισαγωγή στο μαγνητικό πεδίο και τη μαγνητική ροή και την πυκνότητα ροής για όσους δεν είναι ήδη εξοικειωμένοι με τις εμπλεκόμενες ιδέες.



1 Εικόνα 1.1: Μηχανική δύναμη που παράγεται σε ένα σύρμα που μεταφέρει ρεύμα σε μαγνητικό πεδίο (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

1.1 Μαγνητικό πεδίο και μαγνητική ροή.

Αρχικά, όταν ένας αγωγός που μεταφέρει ρεύμα τοποθετείται σε μαγνητικό πεδίο, δέχεται μια δύναμη. Ειδικότερα, το πείραμα δείχνει ότι το μέγεθος της δύναμης εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα στο σύρμα και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου και ότι η δύναμη είναι μεγαλύτερη όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στον αγωγό.

Η έννοια του «μαγνητικού πεδίου» που περιβάλλει έναν μαγνήτη είναι μια αφηρημένη ιδέα που μας βοηθά να καταλάβουμε το μυστηριώδες φαινόμενο του μαγνητισμού: όχι μόνο μας παρέχει έναν βολικό εικονογραφικό τρόπο απεικόνισης, αλλά μας επιτρέπει επίσης να προβλέψουμε αβίαστα τα διάφορα αποτελέσματα που παράγονται από αυτό. Οι διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται ως γραμμές μαγνητικής ροής ή απλώς γραμμές ροής και εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι υποδεικνύουν την κατεύθυνση, κατά την οποία θα ευθυγραμμίζονται τα ρινίσματα σιδήρου (ή οι μικρές χαλύβδινες περόνες), όταν τοποθετούνται στο πεδίο του μαγνήτη της ράβδου. Οι χαλύβδινες ακίδες δεν έχουν δικό τους αρχικό μαγνητικό πεδίο, επομένως δεν υπάρχει

κανένας λόγος για τον οποίο το ένα ή το άλλο άκρο των ακίδων θα πρέπει να δείχνει σε έναν συγκεκριμένο πόλο του μαγνήτη της ράβδου. Ωστόσο, όταν βάζουμε μια βελόνα πυξίδας (η οποία είναι η ίδια ένας μόνιμος μαγνήτης) στο πεδίο, διαπιστώνουμε ότι ευθυγραμμίζεται.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται φανερό, ότι στο πάνω μισό, το Ν άκρο της πυξίδας σε σχήμα ρόμβου βρίσκεται πιο κοντά στον Ν πόλο του μαγνήτη, ενώ στο κάτω μισό, το Ν άκρο της πυξίδας αναζητά το S του μαγνήτη. Αυτό υποδηλώνει αμέσως ότι υπάρχει μια κατεύθυνση που σχετίζεται με τις γραμμές ροής, όπως φαίνεται από τα βέλη στις γραμμές ροής, οι οποίες συμβατικά λαμβάνονται ως θετικά κατευθυνόμενες από τον Ν προς τον πόλο S του μαγνήτη ράβδου.

1.2 Μαγνητικό κύκλωμα και μαγνητικο-κινητική δύναμη.

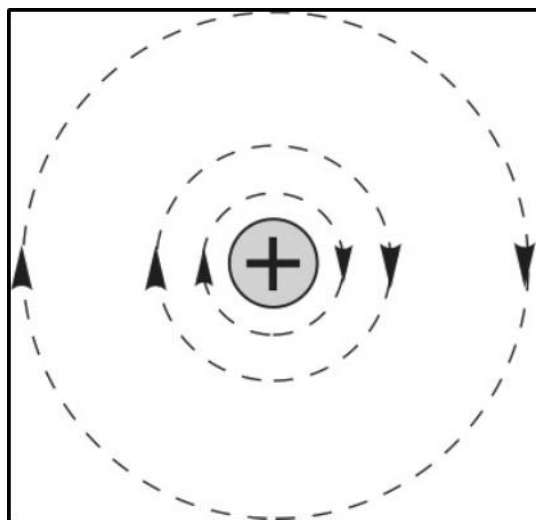
Μέχρι στιγμής θεωρείται ότι η πηγή του μαγνητικού πεδίου είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Αν και αυτό είναι ένα βολικό σημείο εκκίνησης, ωστόσο στην πλειονότητα των κινητήρων, το μαγνητικό πεδίο παράγεται από μεταλλικά πηνία που μεταφέρουν ρεύμα, επομένως είναι σκόπιμο να εξεταστεί η διάταξη των πηνίων και το σχετικό τους μαγνητικό κύκλωμα έτσι ώστε να παράγει υψηλά μαγνητικά πεδία τα οποία στη συνέχεια αλληλεπιδρούν με άλλους αγωγούς που μεταφέρουν ρεύμα για να παράγουν δύναμη, και ως εκ τούτου περιστροφή.

Αρχικά, εξετάζεται η απλούστερη δυνατή περίπτωση του μαγνητικού πεδίου που περιβάλλει ένα απομονωμένο μεγάλο μήκους σύρμα που φέρει σταθερό ρεύμα, σχήμα 1.2. Στο σχήμα, το σύμβολο + δηλώνει ότι ρέει ρεύμα κάθετα προς την επιφάνεια. Παρατηρείται ότι οι γραμμές ροής σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους γύρω από το σύρμα, με την ένταση του πεδίου να είναι η μεγαλύτερη κοντά στο σύρμα. Όπως θα ήταν αναμενόμενο, η ένταση του πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο είναι ευθέως ανάλογη με την ένταση του ρεύματος.

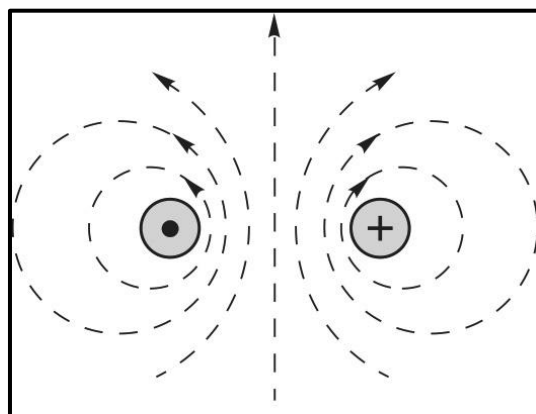
Η σύμβαση για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης του πεδίου είναι ότι η θετική κατεύθυνση λαμβάνεται ως η κατεύθυνση που πρέπει να περιστραφεί ένας δεξιόστροφος κοχλίας για να κινηθεί προς την κατεύθυνση του ρεύματος.

Το Σχ. 1.2 φαίνεται να είναι κάπως τεχνητό, καθώς το ρεύμα μπορεί να ρέει μόνο σε ένα πλήρες κύκλωμα, επομένως πρέπει να υπάρχει πάντα μια διαδρομή επιστροφής. Αν φανταστούμε ένα παράλληλο κύκλωμα, για παράδειγμα, το πεδίο μπορεί να ληφθεί

υποθέτοντας το πεδίο που παράγεται από το θετικό ρεύμα στην πλευρά μετάβασης με το πεδίο που παράγεται από το αρνητικό ρεύμα στην πλευρά επιστροφής, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3. Σημειώνεται ότι το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται στην περιοχή μεταξύ των αγωγών και μειώνεται στις εξωτερικές περιοχές. Αν και το Σχ. 1.3 ισχύει αυστηρά μόνο για ένα απείρως μακρύ ζεύγος ευθύγραμμων αγωγών, πιθανότατα δεν αποτελεί έκπληξη ότι το πεδίο που παράγεται από μια μόνο περιστροφή σύρματος ορθογώνιας, τετράγωνης ή στρογγυλής μορφής είναι σε μεγάλο βαθμό το ίδιο με αυτό που φαίνεται στο Σχ. 1.3.

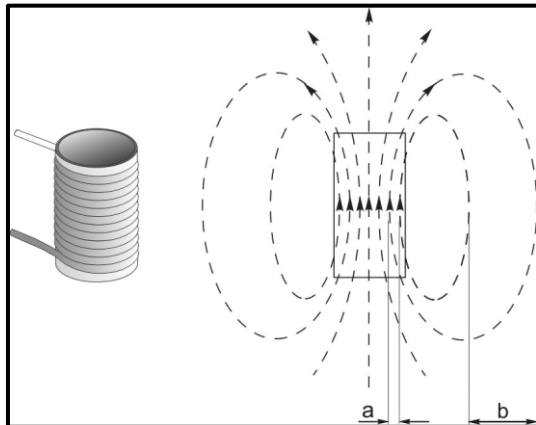


2 **Εικόνα 1.2:** Μαγνητικό πεδίο γύρω από μεγάλο μήκος σύρμα που φέρει σταθερό ρεύμα.



3 **Εικόνα 1.3:** Μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από αντίθετα ρεύματα με υπέρθεση (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

Αυτό δίνει τη δυνατότητα οπτικοποίησης του πεδίου που θα παραγόταν - στον αέρα - από το είδος των πηνίων που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες, οι οποίοι συνήθως έχουν πολλές σπείρες, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο Σχ. 1.4. Το ίδιο το πηνίο φαίνεται στα αριστερά στο Σχ. 1.4, ενώ το μοτίβο ροής που παράγεται φαίνεται στα δεξιά. Κάθε στροφή στο πηνίο παράγει ένα μοτίβο πεδίου και όταν όλα τα επιμέρους στοιχεία του πεδίου υπερτίθενται, παρατηρείται ότι το πεδίο μέσα στο πηνίο αυξάνεται σημαντικά και ότι οι κλειστές διαδρομές ροής προσομοιάζουν με αυτές του μαγνήτη σχήμα ράβδου που εξετάστηκε νωρίτερα. Ο αέρας που περιβάλλει τις πηγές δημιουργίας του πεδίου προσφέρει ένα ομογενές μέσο για τη ροή, με αποτέλεσμα μόλις οι σωλήνες ροής ξεφύγουν από τη συγκεντρωτική επιρροή της πηγής, είναι ελεύθεροι να εξαπλωθούν σε ολόκληρο τον περιβάλλοντα χώρο. Υπενθυμίζεται ότι μεταξύ κάθε ζεύγους γραμμών ροής υπάρχει ίση ποσότητα ροής - επειδή οι γραμμές ροής απλώνονται καθώς φεύγουν από τα όρια του πηνίου, η πυκνότητα ροής είναι πολύ μικρότερη έξω από ό,τι στο εσωτερικό.



4 Εικόνα 1.4: Πηνίο με πολλές σπείρες, για χρήση σε ηλεκτρικούς κινητήρες (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

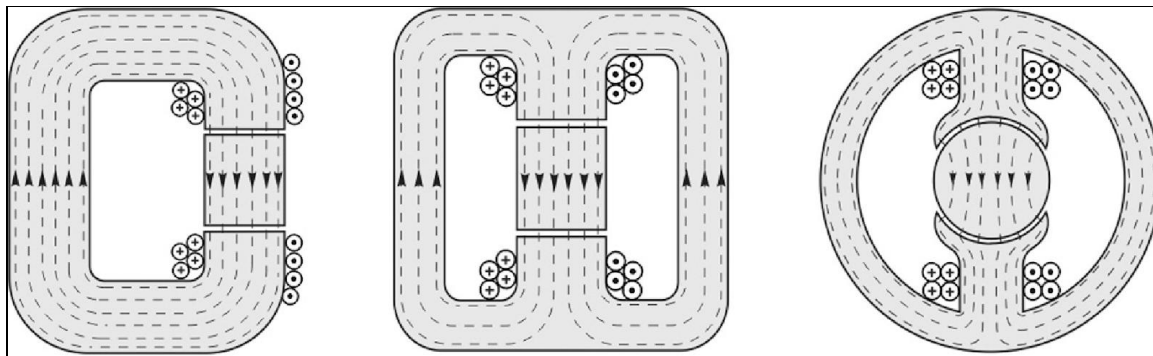
Αν και η πυκνότητα ροής μέσα στο πηνίο είναι υψηλότερη από ό,τι έξω, θα διαπιστώσαμε ότι οι πυκνότητες ροής που θα μπορούσαμε να επιτύχουμε είναι ακόμα πολύ χαμηλές για να χρησιμοποιηθούν σε έναν κινητήρα. Αυτό που χρειάζεται είναι πρώτον ένας τρόπος αύξησης της πυκνότητας ροής και δεύτερον ένα μέσο για τη συγκέντρωση της ροής και την αποτροπή της εξάπλωσής της στον περιβάλλοντα χώρο.

Ένας προφανής τρόπος για να αυξήσετε την πυκνότητα ροής είναι να αυξήσετε το ρεύμα στο πηνίο ή να προσθέσετε περισσότερες στροφές. Διαπιστώνουμε ότι αν διπλασιάσουμε το ρεύμα ή τον αριθμό των στροφών, διπλασιάζουμε τη συνολική ροή, διπλασιάζοντας έτσι την πυκνότητα ροής παντού.

Η ποσοτικοποίηση της ικανότητας του πηνίου να παράγει ροή εκφράζεται μέσω της μαγνητικοκινητικής δύναμης του. Η μαγνητικο-κινητική δύναμη του πηνίου είναι απλώς το γινόμενο του αριθμού των στροφών (N) επί την ένταση του ρεύματος (I), και έτσι εκφράζεται σε στροφές επί Ampere. Μια δεδομένη τιμή μαγνητικο-κινητικής δύναμης, μπορεί να επιτευχθεί με μεγάλο αριθμό σπειρών λεπτού σύρματος που φέρει χαμηλό ρεύμα ή μερικές σπείρες χοντρού σύρματος που φέρουν υψηλό ρεύμα: εφόσον το γινόμενο NI είναι σταθερό, η μαγνητικο-κινητική δύναμη είναι η ίδια.

1.3 Μαγνητικό κύκλωμα στους κινητήρες και δημιουργία ροπής.

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη μελέτη του μαγνητικού κυκλώματος, αν και φαίνεται να έχει ελάχιστη ομοιότητα με τα μαγνητικά κυκλώματα που βρίσκονται στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ωστόσο στην πραγματικότητα είναι ένα σύντομο βήμα πριν από το τυπικό μαγνητικό κύκλωμα ενός κινητήρα και δεν εμπλέκονται ουσιαστικά νέες ιδέες. Η εξέλιξη από τον μαγνητικό κύκλωμα στη γεωμετρία του κινητήρα φαίνεται στο Σχ. 1.5, το οποίο και σχετίζεται με το μαγνητικό πεδίο ενός παραδοσιακού κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Σημειώνεται ότι το πρώτο στάδιο εξέλιξης - Σχ. 1.5, αριστερά - έχει ως αποτέλεσμα το αρχικό ενιαίο διάκενο μήκους g να χωρίζεται σε δύο κενά μήκους $g/2$, αντανακλώντας την απαίτηση για περιστροφή του ρότορα. Ταυτόχρονα, το μοναδικό πηνίο μαγνήτισης χωρίζεται στα δύο με σκοπό να διατηρηθεί η συμμετρία.

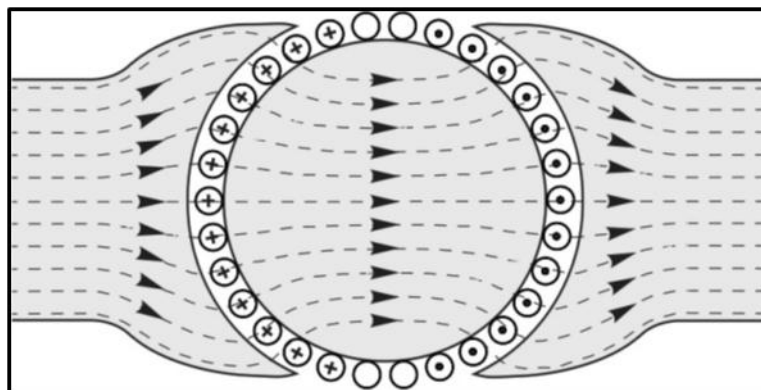


5 Εικόνα 1.5: Η εξέλιξη από τον μαγνητικό κύκλωμα στη γεωμετρία του κινητήρα (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

Φυσικά η επανατοποθέτηση του πηνίου μαγνήτισης σε διαφορετική θέση γύρω από το μαγνητικό κύκλωμα είναι ενδεδειγμένη, όπως μια μπαταρία μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Στη συνέχεια, - Σχ. 1.5, κέντρο - η μοναδική μαγνητική διαδρομή χωρίζεται σε δυο παράλληλες διαδρομές, με τη μισή αρχική διατομή, καθεμιά από τις οποίες φέρει το ήμισυ της ροής. Τέλος, - Σχ. 1.5, δεξιά - οι διαδρομές ροής και οι όψεις των πόλων καμπυλώνουν ώστε να ταιριάζουν με τον κυλινδρικό ρότορα. Το πηνίο έχει πλέον πολλά στρώματα για να ταιριάζει στο διαθέσιμο χώρο, αλλά όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η συγκεκριμένη ιδιότητα δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στη μαγνητοκινητική δύναμη. Έχοντας σχεδιάσει το μαγνητικό κύκλωμα ώστε να δίνει υψηλή πυκνότητα ροής κάτω από τους πόλους, είναι αναγκαίο να έχουμε το μέγιστο όφελος από αυτό. Επομένως, πρέπει να σχεδιαστεί ένα σύνολο αγωγών, στερεωμένων στο ρότορα, όπως φαίνεται στο σχ. 1.6, και να διασφαλιστεί ότι οι αγωγοί κάτω από έναν πόλο N - στα αριστερά - μεταφέρουν θετικό ρεύμα, ενώ εκείνοι κάτω από τον πόλο S μεταφέρουν αρνητικό ρεύμα. Η επαπτομενικά ηλεκτρομαγνητική δύναμη, σε όλους τους θετικούς αγωγούς θα είναι με κατεύθυνση προς τα κάτω, ενώ η δύναμη στους αρνητικούς θα είναι προς τα πάνω. Ασκείται επομένως μια ροπή στον ρότορα, η οποία τον αναγκάζει να περιστραφεί.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να εξεταστούν ορισμένα σημαντικά ερωτήματα: το πρώτο είναι γιατί δεν έχει γίνει καμία αναφορά στο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους αγωγούς που μεταφέρουν ρεύμα στον ρότορα. Σίγουρα και αυτοί θα παράγουν μαγνητικό πεδίο, το οποίο κατά πάσα πιθανότητα θα παρεμβάλλεται στο αρχικό πεδίο, οπότε ίσως η έκφραση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δύναμης στον αγωγό δεν ισχύει πλέον. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι ότι το πεδίο που παράγεται από

τους αγωγούς που μεταφέρουν ρεύμα στον ρότορα σίγουρα τροποποιεί το αρχικό πεδίο, δηλαδή το πεδίο που υπήρχε όταν δεν υπήρχε ρεύμα στους αγωγούς του ρότορα. Ωστόσο στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η δύναμη στον αγωγό μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο του ρεύματος και του αρχικού πεδίου.



6 Εικόνα 1.6: Αγωγοί στερεωμένοι στο ρότορα (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

Αυτό είναι πολύ σημαντικό από την άποψη του υπολογισμού της δύναμης. Για παράδειγμα στο Σχήμα 1.1, δεν αναμενόταν καμία δύναμη στον αγωγό μεταφοράς ρεύματος εάν δεν υπήρχε εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο, παρόλο που το ρεύμα στον αγωγό παράγει το δικό του πεδίο. Φαίνεται λοιπόν σωστό ότι εφόσον εμφανίζεται δύναμη μόνο όταν υπάρχει εξωτερικό πεδίο, όλη η δύναμη πρέπει να οφείλεται μόνο σε αυτό το πεδίο.

Το δεύτερο ερώτημα προκύπτει από την αρχή της δράσης και της αντίδρασης. Όταν υπάρχει ροπή στον ρότορα, υπάρχει πιθανώς ίση και αντίθετη ροπή στον στάτορα. Επομένως, υφίσταται το ερώτημα εάν ο μηχανισμός παραγωγής ροπής θα μπορούσε να απεικονιστεί χρησιμοποιώντας τις ίδιες ιδέες που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη της ροπής του ρότορα. Η απάντηση είναι πως υπάρχει πάντα ίση και αντίθετη ροπή στον στάτορα, γι' αυτό είναι συνήθως σημαντικό να στερεώνεται ένας κινητήρα με ασφάλεια. Σε ορισμένους κινητήρες, όπως για παράδειγμα στον επαγωγικό κινητήρα, είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι η ροπή που παράγεται στον στάτορα από την αλληλεπίδραση της πυκνότητας ροής και των ρευμάτων του στάτη, πραγματοποιείται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που η πυκνότητα ροής αλληλεπιδρά με τα ρεύματα του ρότορα για να παράγουν ροπή στον ρότορα

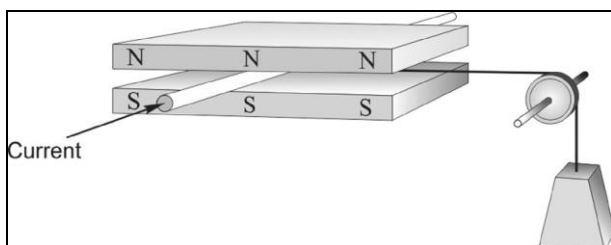
Η μεγάλη δύναμη έλξης που μπορούν να παράγουν οι μαγνήτες ανύψωσης, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μεγάλη ακτινική δύναμη μεταξύ του πόλου του στάτορα και του σιδερένιου σώματος του ρότορα. Υπάρχει πράγματι μια ακτινική δύναμη λόγω μαγνητικής έλξης, ακριβώς όπως σε έναν ανυψωτικό μαγνήτη ή ρελέ, αν και ο μηχανισμός με τον οποίο το μαγνητικό πεδίο ασκεί μια έλξη καθώς εισέρχεται σε αυτό σίδηρος ή χάλυβας είναι διαφορετικός. Αποδεικνύεται ότι η δύναμη έλξης ανά μονάδα επιφάνειας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της πυκνότητας ακτινικής ροής και η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας του ρότορα υπολογίζεται περίπου στα 40 N/cm². Αυτό δείχνει ότι η συνολική ακτινική δύναμη μπορεί να είναι πολύ μεγάλη: για παράδειγμα η δύναμη έλξης σε μια μικρή επιφάνεια μόνο 5 - 10 cm είναι 2,000 N, ή περίπου 200 kg. Αυτή η δύναμη δεν συνεισφέρει τίποτα στη ροπή του κινητήρα και είναι απλώς ένα ανεπιθύμητο παραπροϊόν που χρησιμοποιείται για την παραγωγή επαπτομενικής δύναμης στους αγωγούς του ρότορα. Στις περισσότερες μηχανές, η ακτινική μαγνητική δύναμη είναι στην πραγματικότητα πολύ μεγαλύτερη από την επαπτομενική ηλεκτρομαγνητική δύναμη στους αγωγούς του ρότορα, και τείνει να τραβήξει τον ρότορα στον πόλο.

Μολαταύτα, η πλειονότητα των κινητήρων κατασκευάζεται με ζυγό αριθμό πόλων, σε ίση απόσταση γύρω από τον ρότορα, και η πυκνότητα ροής σε κάθε πόλο είναι ίδια, έτσι ώστε —θεωρητικά τουλάχιστον— η προκύπτουσα δύναμη σε ολόκληρο τον ρότορα να είναι μηδέν. Στην πράξη, ακόμη και μια μικρή εκκεντρότητα θα κάνει το πεδίο να είναι ισχυρότερο κάτω από τους πόλους και αυτό θα προκαλέσει μια μη ισορροπημένη έλξη, με αποτέλεσμα τη θορυβώδη λειτουργία και τη γρήγορη φθορά των ρουλεμάν. Η πηγή της πυκνότητας μαγνητικής ροής μπορεί να είναι μια περιέλιξη ή ένας μόνιμος μαγνήτης και επιπλέον μπορεί να βρίσκεται στον στάτορα ή στον ρότορα. Συνεπώς, εάν η πηγή της μαγνητικής ροής βρίσκεται στον στάτορα, οι αγωγοί μεταφοράς ρεύματος στους οποίους αναπτύσσεται η δύναμη βρίσκονται στον ρότορα, ενώ αντίθετα εάν η διέγερση είναι στον ρότορα, οι ενεργοί αγωγοί βρίσκονται στον στάτορα. Σε όλα αυτά οι μεγάλες ακτινικές μαγνητικές δυνάμεις που συζητήθηκαν παραπάνω είναι ένα ανεπιθύμητο παραπροϊόν.

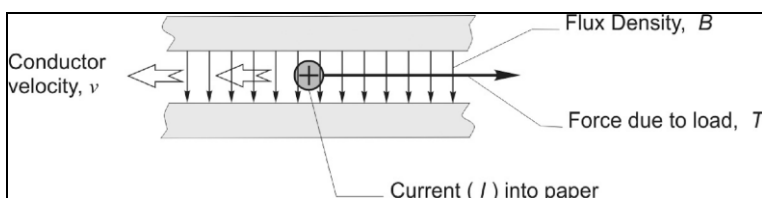
Εντούτοις, σε ορισμένους κινητήρες η γεωμετρία του στάτορα και/ή του ρότορα είναι διατεταγμένη, έτσι ώστε μέρος της ροής που διασχίζει το διάκενο αέρα προς τον ρότορα να παράγει επαπτομενικές δυνάμεις - και επομένως ροπή - απευθείας στο δρομέα, χωρίς την ύπαρξη ρεύματος στο ρότορα.

1.4 Βασικός κινητήρας — Στατικές συνθήκες – Ισοδύναμο κύκλωμα.

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι η στοιχειώδης γραμμική μηχανή φαίνεται στο Σχ. 1.7 και σε διαγραμματική μορφή στο Σχ. 1.8. Αποτελείται από έναν αγωγό ενεργού μήκους, ο οποίος μπορεί να κινείται οριζόντια, υπό γωνία 90 μοιρών σε πυκνότητα μαγνητικής ροής. Θεωρείται ότι ο αγωγός έχει αντίσταση (R), ότι φέρει συνεχές ρεύμα συγκεκριμένης έντασης (I), και ότι κινείται με ταχύτητα (v) με κατεύθυνση κάθετη στο πεδίο και το ρεύμα, σχήμα 1.8. Στον αγωγό είναι προσαρτημένη μια χορδή που περνά πάνω από μια τροχαλία και στηρίζει ένα βάρος: η τάση στη χορδή λειτουργεί ως μηχανικό φορτίο στη ράβδο. Η τριβή υποτίθεται ότι είναι μηδενική.



7 Εικόνα 1.7: Η στοιχειώδης γραμμική μηχανή (Hughes, A., & Drury, B., 2019).



8 Εικόνα 1.8: Η στοιχειώδης γραμμική μηχανή σε διαγραμματική μορφή (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

Το σημαντικό σημείο είναι ότι, αν και πρόκειται για μια υποθετική διάταξη, η παραπάνω στοιχειώδης μηχανή αντιπροσωπεύει σε μεγάλο βαθμό τι πραγματικά συμβαίνει σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την ξεκάθαρη κατανόηση για τη συμπεριφορά και τον τρόπο λειτουργίας των πραγματικών μηχανών προτού μελετηθούν πιο περίπλοκες δομές.

Αρχικά θεωρείται ότι ο αγωγός είναι ακίνητος (δηλαδή $v=0$). Υποτίθεται ακόμα ότι το μαγνητικό πεδίο (B) παρέχεται από μόνιμους μαγνήτες. Μόλις δημιουργηθεί το

πεδίο, δε χρειάζεται περαιτέρω ενέργεια για τη διατήρησή του, κάτι που είναι εξίσου καλό αφού είναι προφανές ότι ένας αδρανής μαγνήτης δεν είναι ικανός να παρέχει συνεχώς ενέργεια. Συνεπάγεται ότι η μηχανική ενέργεια κατά την έξοδο από αυτό το στοιχειώδη κινητήρα, δεν προέρχεται από τον μαγνήτη. Αυτό είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό σημείο: το σύστημα του μαγνητικού πεδίου, είτε παρέχεται από μόνιμους μαγνήτες, είτε περιελίξεις, λειτουργεί μόνο ως καταλύτης στη διαδικασία μετατροπής ενέργειας και δεν συνεισφέρει τίποτα στη μηχανική ισχύ εξόδου.

Είναι φανερό ότι όταν ο αγωγός παραμένει ακίνητος, η δύναμη που παράγεται σε αυτόν δε λειτουργεί, επομένως δεν υπάρχει μηχανική ισχύς εξόδου και η μόνη ηλεκτρική ισχύς εισόδου που απαιτείται είναι αυτή που χρειάζεται για να διοχετευτεί το ρεύμα μέσω του αγωγού. Η αντίσταση του αγωγού είναι R , το ρεύμα μέσω αυτού είναι I , επομένως η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στα άκρα της ράβδου από μια εξωτερική πηγή θα δοθεί από τη σχέση $V=I \cdot R$ και η ηλεκτρική ισχύς εισόδου θα είναι VI ή I^2R . Υπό αυτές τις συνθήκες, όλη η ηλεκτρική ισχύς εισόδου θα εμφανίζεται ως θερμότητα μέσα στον αγωγό και το ισοζύγιο ισχύος μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση:

$$\text{Ηλεκτρική ισχύς εισόδου (VI)} = \text{Ρυθμός παραγωγής θερμότητας στον αγωγό (I}^2\text{R)}.$$

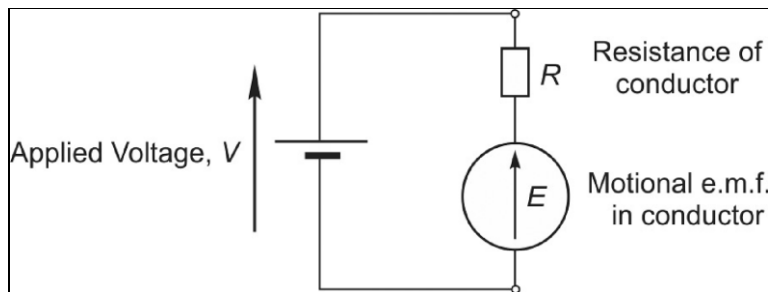
Αν και δεν υπάρχει παραγωγή έργου, εφόσον δεν υπάρχει κίνηση, η σταθερή κατάσταση μπορεί να διατηρηθεί μόνο εάν υπάρχει ισορροπία δυνάμεων. Η τάση στη χορδή (T) πρέπει να ισούται με τη βαρυτική δύναμη που ασκείται στη μάζα ($m \cdot g$) και αυτή με τη σειρά της πρέπει να εξισορροπηθεί με την ηλεκτρομαγνητική δύναμη στον αγωγό ($B \cdot I \cdot l$). Επομένως, υπό σταθερές συνθήκες το ρεύμα πρέπει να δίνεται από τη σχέση:

$$T = mg = Bil, \text{ ή } I = \frac{mg}{Bl}$$

Αξίζει να τονιστεί ότι αυτή η σχέση είναι μια πρώτη ένδειξη για τον ουσιαστικό σύνδεσμο που υπάρχει, στη σταθερή κατάσταση, μεταξύ του μηχανικού και του ηλεκτρικού κόσμου, καθώς η διατήρηση της σταθερής κατάστασης συνδέεται με το ρεύμα στον αγωγό, το οποίο καθορίζεται από τη μάζα του μηχανικού φορτίου.

1.4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα.

Οι ηλεκτρικές σχέσεις στο στοιχειώδη κινητήρα αναπαρίστανται σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα όπως φαίνεται στο Σχ. 1.9.



9 Εικόνα 1.9: Ισοδύναμο κύκλωμα στοιχειώδη κινητήρα (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

Η αντίσταση του αγωγού και η ηλεκτρεγερτική δύναμη, αντιπροσωπεύουν σε όρους κυκλώματος αυτό που συμβαίνει στον αγωγό. Η εξωτερικά εφαρμοζόμενη πηγή που οδηγεί το ρεύμα αντιπροσωπεύεται από την τάση V στα αριστερά - το παραδοσιακό σύμβολο της μπαταρίας χρησιμοποιείται σκόπιμα για τη διαφοροποίηση της εφαρμοζόμενης τάσης V από την επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη. Σημειώνεται ότι η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη, εμφανίζεται ως αντίθετη με την εφαρμοζόμενη τάση. Έχει ιδιαίτερη σημασία, η γνώση που μπορεί να προκύψει από αυτές τις εξισώσεις επειδή, όπως σημειώθηκε προηγουμένως, αυτός ο απλός στοιχειώδης ηλεκτρικός κινητήρας ενσωματώνει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των πραγματικών κινητήρων. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν σε αυτό το στάδιο είναι ανεκτίμητα, καθώς αργότερα εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρονται οι πραγματικοί κινητήρες.

1.5 Συμπεριφορά χωρίς μηχανικό φορτίο.

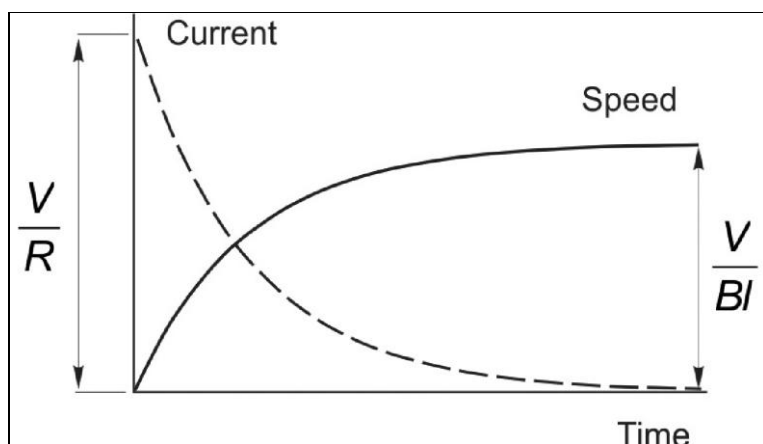
Σε αυτή την περίπτωση, γίνεται η υπόθεση ότι το βάρος έχει αφαιρεθεί και ότι η μόνη δύναμη που ασκείται στον αγωγό είναι η ηλεκτρομαγνητικά παραγόμενη δύναμη. Το πρωταρχικό ενδιαφέρον εμπίπτει στο τι είναι αυτό που καθορίζει τη σταθερή ταχύτητα του στοιχειώδους κινητήρα, αλλά αρχικά εξετάζεται τι συμβαίνει όταν εφαρμόζεται για πρώτη φορά η τάση.

Με τον αγωγό ακίνητο όταν εφαρμόζεται η τάση V , το ρεύμα θα επέλθει άμεσα σε μια τιμή V/R , δηλαδή στο νόμο του Ohm, αφού το μόνο που περιορίζει το ρεύμα είναι η

αντίσταση. Η αντίσταση θα είναι μικρή, άρα το ρεύμα θα είναι μεγάλο και επομένως μια υψηλή δύναμη $B \cdot I \cdot l$ θα αναπτυχθεί στον αγωγό. Επομένως, ο αγωγός θα επιταχύνει με ρυθμό που διέπεται από το νόμο του Νεύτωνα, δηλαδή την επιτάχυνση της δύναμης που ασκεί πάνω του διαιρούμενη με τη μάζα του.

Είναι φανερό ότι καθώς η ταχύτητα (v) αυξάνεται, η ηλεκτρεγερτική δύναμη θα αυξηθεί ανάλογα με την ταχύτητα. Δεδομένου ότι είναι αντίθετη στην εφαρμοζόμενη τάση, το ρεύμα θα πέσει, οπότε η δύναμη και επομένως η επιτάχυνση θα μειωθούν, αν και η ταχύτητα θα συνεχίσει να αυξάνεται. Έπειτα η ταχύτητα θα αυξάνεται, όσο υπάρχει δύναμη επιτάχυνσης, δηλαδή όσο υπάρχει ρεύμα στον αγωγό. Έστερα, το ρεύμα θα πέσει τελικά στο μηδέν όταν η ταχύτητα φτάσει σε ένα επίπεδο, στο οποίο η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ίση με την εφαρμοζόμενη τάση. Επομένως, η ταχύτητα και το ρεύμα ποικίλλουν όπως φαίνεται στο Σχ. 1.10, και οι δύο καμπύλες έχουν το εκθετικό σχήμα που χαρακτηρίζει την απόκριση συστημάτων που διέπονται από μια διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης.

Το γεγονός ότι το ρεύμα της σταθερής κατάστασης είναι μηδέν συμφωνεί με την προηγούμενη παρατήρησή ότι το μηχανικό φορτίο - σε αυτήν την περίπτωση το μηδέν - καθορίζει το ρεύμα της σταθερής κατάστασης. Σημειώνεται ότι σε αυτή την εξιδανικευμένη κατάσταση, στην οποία δεν ασκείται φορτίο και δυνάμεις τριβής, ο αγωγός θα συνεχίσει να κινείται με σταθερή ταχύτητα, επειδή καμία δύναμη δεν ασκείται πάνω του και επομένως δεν υπάρχει επιτάχυνση. Φυσικά, δεν παράγεται μηχανική ισχύς, αφού έχουμε υποθέσει ότι δεν υπάρχει αντίθετη δύναμη στον αγωγό και επομένως δεν υπάρχει ισχύς εισόδου επειδή το ρεύμα είναι μηδέν.



10 Εικόνα 1.10: Δυναμική συμπεριφορά στοιχειώδους d.c. κινητήρα χωρίς μηχανικό φορτίο (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

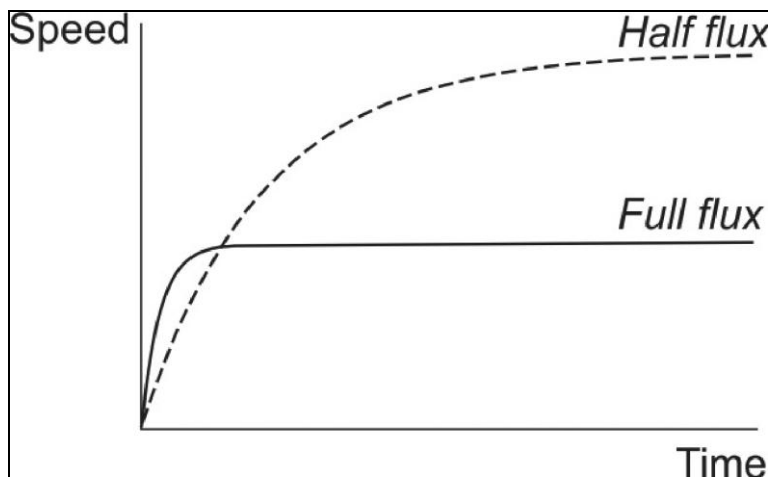
Απεναντίας, αυτή η υποθετική κατάσταση αντιστοιχεί στενά στη λεγόμενη κατάσταση «χωρίς φορτίο» σε έναν κινητήρα, με τη μόνη διαφορά ότι ένας κινητήρας θα έχει κάποια τριβή - και επομένως θα τραβήξει ένα μικρό ρεύμα - ενώ έχει ειπωθεί ότι δεν υπάρχει τριβή για την απλοποίηση των δεδομένων.

Αξίζει επιπλέον να αναφερθεί ότι ένας αυτορυθμιζόμενος μηχανισμός φαίνεται πως λειτουργεί στη συγκεκριμένη περίπτωση. Δηλαδή, όταν ο αγωγός είναι ακίνητος, ασκείται υψηλή δύναμη πάνω του, αλλά αυτή η δύναμη μειώνεται καθώς η ταχύτητα ανεβαίνει στην τιμή στόχο, η οποία είναι ίση με την εφαρμοζόμενη τάση. Ανατρέχοντας στην έκφραση για την ηλεκτρεγερτική δύναμη, μπορεί να ληφθεί μια έκφραση για την ταχύτητα χωρίς φορτίο (v_0) εξισώνοντας την εφαρμοζόμενη τάση και την οπισθέλκουσα ηλεκτρεγερτική δύναμη, που δείχνει ότι η ταχύτητα χωρίς φορτίο σταθερής κατάστασης είναι ευθέως ανάλογη με την εφαρμοζόμενη τάση, γεγονός που αποδεικνύει ότι ο έλεγχος της ταχύτητας μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμοζόμενης τάσης. Θα δειχθεί αργότερα ότι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα χρήσης για τους ηλεκτρικούς κινητήρες, είναι ότι η ταχύτητά τους μπορεί να ελεγχθεί μέσω της εφαρμοζόμενης σε αυτούς τάσης.

Αποκαλύπτεται επίσης, ότι η ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με την πυκνότητα της μαγνητικής ροής, πράγμα που σημαίνει ότι όσο πιο ασθενές είναι το πεδίο, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα σταθερής κατάστασης. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να προκαλέσει έκπληξη. Σίγουρα, έχει λογική βάση, καθώς η δύναμη παράγεται από τη δράση του πεδίου και ο αγωγός δεν θα κινηθεί τόσο γρήγορα αν το πεδίο είναι πιο αδύναμο. Αυτή η άποψη είναι λάθος, αλλά είναι κατανοητή. Το μειονέκτημα του επιχειρήματος είναι η εξίσωση της δύναμης με την ταχύτητα. Όταν εφαρμοστεί για πρώτη φορά η τάση, η δύναμη στον αγωγό θα είναι σίγουρα μικρότερη εάν το πεδίο είναι ασθενέστερο και η αρχική επιτάχυνση θα είναι μικρότερη. Αλλά και στις δύο περιπτώσεις η επιτάχυνση θα συνεχιστεί έως ότου το ρεύμα πέσει στο μηδέν, και αυτό θα συμβεί μόνο όταν η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη έχει αυξηθεί για να ισούται με την εφαρμοζόμενη τάση. Με ασθενέστερο πεδίο, η ταχύτητα που απαιτείται για τη δημιουργία αυτού θα είναι υψηλότερη από ό,τι με ένα ισχυρό πεδίο, διότι υπάρχει λιγότερη ροή.

Το παραπάνω θέμα συνοψίζεται στο Σχ. 1.11, το οποίο δείχνει πώς θα αυξηθεί η ταχύτητα για μια δεδομένη εφαρμοζόμενη τάση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αρχική επιτάχυνση - δηλαδή η κλίση της καμπύλης ταχύτητας-χρόνου - στην περίπτωση μισής

ροής είναι η μισή από την περίπτωση πλήρους ροής, αλλά η τελική σταθερή ταχύτητα είναι διπλάσια. Στους ηλεκτρικούς κινητήρες η τεχνική μείωσης της πυκνότητας ροής προκειμένου να αυξηθεί η ταχύτητα είναι γνωστή ως εξασθένηση πεδίου.



11 Εικόνα 1.11: Επίδραση της πυκνότητας ροής στην επιτάχυνση και τη σταθερή ταχύτητα λειτουργίας του στοιχειώδους *d.c.* κινητήρα χωρίς μηχανικό φορτίο (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

1.6 Σχετικά μεγέθη V και E, και απόδοση.

Είναι δεδομένο ότι πάντα αναζητούνται μηχανές που έχουν υψηλή απόδοση. Για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση, η απώλεια θερμότητας (I^2R) πρέπει να είναι μικρή σε σύγκριση με τη μηχανική ισχύ (EI), πράγμα που σημαίνει ότι η ωμική πτώση της τάσης στον αγωγό (IR) πρέπει να είναι μικρή σε σύγκριση με την επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (E) ή την εφαρμοζόμενη τάση (V). Με άλλα λόγια, αυτό που επιζητείται είναι το μεγαλύτερο μέρος της εφαρμοζόμενης τάσης να οδεύει προς τη δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης, παρά προς τη σπατάλη ενέργειας στα καλώδια και στον εξοπλισμό. Δεδομένου ότι η κινητική δύναμη είναι ανάλογη της ταχύτητας και η πτώση τάσης λόγω αντίστασης εξαρτάται από την αντίσταση του αγωγού, παρατηρείται ότι ένας καλός μετατροπέας ενέργειας απαιτεί η αντίσταση του αγωγού να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη και η ταχύτητα να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη.

Για να δοθεί μια αίσθηση για τα μεγέθη που είναι πιθανό να συναντηθούν, μπορεί να εξεταστεί ένας αγωγός με αντίσταση $0,5 \Omega$, ικανός να μεταφέρει ρεύμα 4 A χωρίς υπερθέρμανση και να κινείται με ταχύτητα τέτοια ώστε η ηλεκτρεγερτική δύναμη να είναι 8 V . Από την εξ. (1.19), η τάση τροφοδοσίας δίνεται από τη σχέση:

$$V = E + IR \Leftrightarrow V = 8 + 4 \cdot 0.5 \Leftrightarrow V = 10 \text{ V}$$

Ως εκ τούτου, η ηλεκτρική ισχύς εισόδου (VI) είναι 40 W , η μηχανική ισχύς εξόδου (EI) είναι 32 W και η απώλεια θερμότητας (I^2R) είναι 8 W , και έτσι η απόδοση προκύπτει να είναι 80% . Εάν η τάση τροφοδοσίας διπλασιαστεί (δηλαδή $V = 20 \text{ Volts}$), ωστόσο, η δύναμη της αντίστασης θεωρηθεί ότι παραμένει η ίδια - έτσι ώστε το ρεύμα σταθερής κατάστασης να συνεχίσει να είναι 4 A -, η ηλεκτρεγερτική δίνεται από τη σχέση:

$$E = 20 - 4 \cdot 0.5 = 18 \text{ V}$$

που δείχνει ότι η ταχύτητα θα έχει υπερδιπλασιαστεί, όπως αναμενόταν. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου είναι τώρα 80 W , η μηχανική ισχύς εξόδου είναι 72 W ενώ οι απώλειες θερμότητας είναι ακόμα 8 W . Η απόδοση έχει πλέον αυξηθεί στο 90% , υπογραμμίζοντας επιπλέον το γεγονός ότι η διαδικασία της μετατροπής ενέργειας γίνεται αποδοτικότερη σε υψηλότερες ταχύτητες.

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια, υπάρχει και πάλι όφελος από τις υψηλότερες ταχύτητες. Για παράδειγμα, με την τάση της μπαταρίας να διατηρείται στα 10 V , και ο αγωγός να κινείται από μια εξωτερική δύναμη έτσι ώστε η ηλεκτρεγερτική να είναι 12 V , το παραγόμενο ρεύμα των 4 A θα ρέει τώρα στην μπαταρία, με την ενέργεια να μετατρέπεται από μηχανική σε ηλεκτρική μορφή. Η ισχύς στην μπαταρία (VI) είναι 40 W , η μηχανική ισχύς εισόδου (EI) είναι 48 W και η απώλεια θερμότητας 8 W . Σε αυτήν την περίπτωση, η απόδοση ορίζεται ως ο λόγος της χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος διαιρούμενος με τη μηχανική ισχύ εισόδου, δηλαδή $40/48$, ή $83,3\%$. Με διπλασιασμό της τάσης της μπαταρίας στα 20 V και αύξηση της ταχύτητας κίνησης έτσι ώστε η κινητική ε.μ.φ. να ανέβει στα 22 V , η μπαταρία θα τροφοδοτηθεί ξανά με 4 A ,

αλλά η απόδοση θα είναι τώρα 80/88, ή 90,9%. Η ιδανική κατάσταση είναι σαφώς εκείνη όπου ο όρος IR στην προηγούμενη εξίσωση γίνεται ελάχιστος, ώστε η τελική ηλεκτρεγερτική να είναι ίση με την εφαρμοζόμενη τάση. Τότε θα είχαμε έναν ιδανικό κινητήρα με απόδοση 100%, στον οποίο η ταχύτητα σταθερής κατάστασης, θα ήταν ευθέως ανάλογη με την εφαρμοζόμενη τάση και ανεξάρτητη από το φορτίο.

Στην πράξη, ο βαθμός στον οποίο η ιδανική κατάσταση που συζητήθηκε παραπάνω μπορεί να γίνει εφικτή, εξαρτάται από το μέγεθος του μηχανήματος. Οι μικροσκοπικοί κινητήρες, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στα ρολόγια χειρός, είναι ελάχιστα αποδοτικοί, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της εφαρμοζόμενης τάσης καταναλώνεται για την υπερνίκηση της αντίστασης των αγωγών και η κινητική ηλεκτρεγερτική δύναμη που παράγεται είναι πολύ μικρή. Σημειώνεται, ότι αυτοί οι κινητήρες είναι πολύ καλύτεροι στην παραγωγή θερμότητας παρά στην παραγωγή μηχανικής ισχύος εξόδου. Οι μικροί κινητήρες, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε εργαλεία χειρός, είναι πολύ καλύτεροι με την κινητική ηλεκτρεγερτική να αντιπροσωπεύει περίπου το 70-80% της εφαρμοζόμενης τάσης. Τέλος, οι βιομηχανικοί κινητήρες είναι πολύ καλύτεροι, καθώς οι μεγάλης ισχύος κινητήρες - των πολλών εκατοντάδων kW - χρησιμοποιούν μόνο το 1 ή 2% της εφαρμοζόμενης τάσης για να υπερνικήσουν την αντίσταση και επομένως έχουν πολύ υψηλές αποδόσεις.

1.7 Γενικές ιδιότητες ηλεκτροκινητήρων.

Όλοι οι ηλεκτροκινητήρες διέπονται από τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού και υπόκεινται ουσιαστικά στους ίδιους περιορισμούς που επιβάλλονται από τα υλικά - χαλκός ή αλουμίνιο για το ηλεκτρικό κύκλωμα, μαγνητικός χάλυβας για τη μόνωση - από τα οποία κατασκευάζονται. Επομένως, δεν προκαλεί έκπληξη η διαπίστωση ότι, στο θεμελιώδες επίπεδο, όλοι οι κινητήρες — ανεξαρτήτως τύπου — εμφανίζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά.

Σε αυτές τις κοινές ιδιότητες, οι περισσότερες από τις οποίες έχουν αναφερθεί σε αυτό το κεφάλαιο, συνήθως δε δίνεται έμφαση. Η βιβλιογραφία τείνει να επικεντρώνεται στις διαφορές μεταξύ των τύπων κινητήρα και οι κατασκευαστές συνήθως ενδιαφέρονται να προωθήσουν τις αρετές του συγκεκριμένου κινητήρα τους σε βάρος του ανταγωνισμού. Αυτή η διχαστική έμφαση μπορεί να προκαλέσει τη συσκότιση της

υποκείμενης ενότητας, αφήνοντας στους χρήστες ελάχιστες ευκαιρίες να απορροφήσουν το είδος της γνώσης που θα τους εξοπλίσει να κάνουν τεκμηριωμένες κρίσεις.

Ως εκ τούτου, οι πιο χρήσιμες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τους ηλεκτρικούς κινητήρες και που αξίζει να γνωρίζει ο χρήστης εμφανίζονται παρακάτω μαζί με σύντομες σημειώσεις που συνοδεύουν την καθεμία. Η εμπειρία δείχνει ότι οι χρήστες που έχουν εμπειρία και τριβή με αυτές τις βασικές ιδέες θα καταλάβουν καλύτερα γιατί ένας κινητήρας είναι καλύτερος από έναν άλλο και θα νιώθουν μεγαλύτερη αυτοπεποίθηση όταν αντιμετωπίζουν το δύσκολο έργο της στάθμισης των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των ανταγωνιστικών τύπων.

1.7.1 Θερμοκρασία λειτουργίας και ψύξη.

Είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι η διάταξη ψύξης είναι ο πλέον πιο σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της επιτρεπόμενης απόδοσης σε κάθε δεδομένο κινητήρα. Οποιοσδήποτε κινητήρας θα δώσει περισσότερη ισχύ εάν το ηλεκτρικό του κύκλωμα εργαστεί πιο έντονα, δηλαδή εάν αφηθεί να αυξηθεί το ρεύμα. Ο περιοριστικός παράγοντας είναι συνήθως η επιτρεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας των περιελίξεων, η οποία εξαρτάται από την κατηγορία της μόνωσης.

Εναλλακτικά, με μια δεδομένη μόνωση η απόδοση μπορεί να αυξηθεί εάν βελτιωθεί το σύστημα ψύξης. Ένας αεριζόμενος κινητήρας, για παράδειγμα, μπορεί να δώσει ίσως διπλάσια ισχύ εξόδου από μια κατά τα άλλα πανομοιότυπη αλλά εντελώς κλειστή, ψυχόμενη μηχανή.

1.7.2 Ροπή ανά μονάδα όγκου.

Για κινητήρες με παρόμοια συστήματα ψύξης, η ονομαστική ροπή είναι περίπου ανάλογη με τον όγκο του ρότορα, ο οποίος με τη σειρά του είναι κατά προσέγγιση ανάλογος με τον συνολικό όγκο του κινητήρα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι για μια δεδομένη διάταξη ψύξης, τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φορτία μηχανών διαφορετικών τύπων θα είναι λίγο πολύ τα ίδια. Επομένως, η ροπή ανά μονάδα μήκους εξαρτάται πρωτίστως από το τετράγωνο της διαμέτρου, επομένως κινητήρες περίπου ίδιας διαμέτρου και μήκους αναμένεται να παράγουν περίπου την ίδια ροπή.

1.7.3 Ισχύς ανά μονάδα όγκου και απόδοση — Σημασία της ταχύτητας.

Είναι φανερό ότι, η ισχύς εξόδου ανά μονάδα όγκου είναι ευθέως ανάλογη της ταχύτητας. Οι κινητήρες χαμηλής ταχύτητας δεν είναι ελκυστικοί για τις περισσότερες εφαρμογές επειδή είναι μεγάλοι και επομένως ακριβοί. Συνήθως είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται κινητήρας υψηλής ταχύτητας με μηχανική μείωση της ταχύτητας. Για παράδειγμα, ένας κινητήρας άμεσης μετάδοσης κίνησης για ένα φορητό ηλεκτρικό κατσαβίδι θα ήταν μια ανέφικτη επιλογή. Από την άλλη πλευρά, η αξιοπιστία και η αναποτελεσματικότητα των κιβωτίων ταχυτήτων μπορεί μερικές φορές να υπερτερεί του επιχειρήματος του μεγέθους, ειδικά σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Η απόδοση ενός κινητήρα βελτιώνεται με την ταχύτητα. Για μια δεδομένη ροπή, η ισχύς εξόδου συνήθως αυξάνεται σε ευθεία αναλογία με την ταχύτητα, ενώ οι ηλεκτρικές απώλειες τείνουν να αυξάνονται λιγότερο γρήγορα, έτσι ώστε τελικά η απόδοση να αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας.

1.7.4 Επιδράσεις μεγέθους—Ειδική ροπή και απόδοση.

Οι μεγάλοι κινητήρες έχουν μεγαλύτερη ειδική ροπή, δηλαδή ροπή ανά μονάδα όγκου και επομένως είναι πιο αποδοτικοί από τους μικρούς. Στους μεγάλους κινητήρες το ειδικό ηλεκτρικό φορτίο είναι συνήθως πολύ υψηλότερο από ό,τι στους μικρούς και το ειδικό μαγνητικό φορτίο είναι κάπως υψηλότερο. Αυτοί οι δύο παράγοντες συνδυάζονται για να δώσουν την υψηλότερη ειδική ροπή. Οι πολύ μικροί κινητήρες είναι εγγενώς πολύ αναποτελεσματικοί – για παράδειγμα η απόδοση σε έναν κινητήρα ρολογιού χειρός είναι περίπου 1% - ενώ οι κινητήρες άνω των 100 kW έχουν απόδοση μεγαλύτερη από 96%. Οι λόγοι για αυτό το φαινόμενο κλίμακας είναι περίπλοκοι, αλλά πηγάζουν από το γεγονός ότι ο όρος της πτώσης τάσης λόγω αντίστασης μπορεί να γίνει σχετικά μικρός σε μεγάλες ηλεκτρομαγνητικές συσκευές, ενώ σε μικρές η αντίσταση τείνει να γίνει ο κυρίαρχος όρος.

1.7.5 Ονομαστική τάση.

Αδιαμφισβήτητα, ένας κινητήρας μπορεί να κατασκευαστεί για να ταιριάζει σε οποιαδήποτε τάση. Εντός ορίων, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας για διαφορετική τάση χωρίς να επηρεαστεί η απόδοσή του. Ένας κινητήρας 200 V, 10 A θα

μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για 100 V, 20 A απλά χρησιμοποιώντας τις μισές στροφές ανά πηνίο, το οποίο έχει διπλάσιο εμβαδόν διατομής και η ηλεκτρεγερτική δύναμη παραμένει ίδια. Οι συνολικές ποσότητες του ενεργού υλικού, και συνεπώς η απόδοση, θα είναι οι ίδιες. Αυτό το επιχείρημα καταρρέει εάν τα όρια ξεφύγουν αρκετά: για παράδειγμα ένας πολύ μικρός κινητήρας που αρχικά είχε τυποποιηθεί για 100V θα απαιτούσε σχεδόν σίγουρα μεγαλύτερο πλαίσιο εάν απαιτείται να λειτουργήσει στα 690 V, λόγω του πρόσθετου χώρου που απαιτείται για την υψηλότερης ποιότητας μόνωση.

1.7.6 Βραχυπρόθεσμη υπερφόρτωση.

Χρειάζεται να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι ηλεκτρικοί κινητήρες, μπορούν να υπερφορτωθούν για μικρά χρονικά διαστήματα χωρίς σοβαρές επιπτώσεις. Το συνεχές ηλεκτρικό φορτίο - δηλαδή το ρεύμα - δεν μπορεί να ξεπεραστεί χωρίς υπερθέρμανση και ζημιά στη μόνωση, αλλά εάν ο κινητήρας λειτουργεί με μειωμένο ρεύμα για κάποιο χρονικό διάστημα, επιτρέπεται το ρεύμα, και επομένως η ροπή, να είναι πολύ μεγαλύτερη από το φυσιολογικό για μικρό χρονικό διάστημα. Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει το μέγεθος και τη διάρκεια της επιτρεπόμενης υπερφόρτισης είναι η θερμική χρονική σταθερά - η οποία διέπει το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Οι θερμικές σταθερές χρόνου κυμαίνονται από λίγα δευτερόλεπτα για μικρούς κινητήρες έως πολλά λεπτά ή ακόμα και ώρες για μεγάλους. Τα μοτίβα λειτουργίας είναι προφανώς πολύ μεταβλητά, επομένως αντί να βασίζονται σε ένα συγκεκριμένο μοτίβο που ακολουθείται, είναι σύνηθες για τους κινητήρες να παρέχονται προστατευτικές διατάξεις υπερθέρμανσης (π.χ. θερμίστορ) που ενεργοποιούν το συναγερμό ή/και διακόπτουν την παροχή σε περίπτωση υπέρβασης της ασφαλούς θερμοκρασίας.

Κεφάλαιο 2: Ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

2.1 Ιστορική αναδρομή.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι μια σχετικά πρόσφατη εφεύρεση. Εφευρέσεις όπως η μπαταρία (Alessandro Volta, 1800), η δημιουργία μαγνητικού πεδίου από

ηλεκτρικό ρεύμα (Hans Christian Oersted, 1820) και ο ηλεκτρομαγνήτης (William Sturgeon, 1825) έθεσαν τα πρώτα θεμέλια για την κατασκευή των ηλεκτρικών κινητήρων. Εκείνη την εποχή δεν ήταν ακόμη ξεκάθαρο αν οι ηλεκτροκινητήρες θα έπρεπε να είναι περιστρεφόμενες ή παλινδρομικές μηχανές - να προσομοιώνουν δηλαδή τη λειτουργία μιας ατμομηχανής - και παγκοσμίως, πολλοί εφευρέτες εργάστηκαν παράλληλα για την ανάπτυξη του ηλεκτρικού κινητήρα. Νέα φαινόμενα ανακαλύπτονται σχεδόν καθημερινά και οι εφευρέσεις στον τομέα της ηλεκτρολογικής επιστήμης ήταν πρωτοποριακές για την εποχή. Πολύ συχνά, διαφορετικοί εφευρέτες που δε γνώριζαν τίποτα ο ένας για τον άλλο, ανέπτυξαν παρόμοιες λύσεις εργαζόμενοι ανεξάρτητα.

Ο πρώτος περιστρεφόμενος κινητήρας που βασίζεται στις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού κατασκευάστηκε από τον Άγγλο Peter Barlow το 1822 (Barlow's Wheel). Μετά από πολλές άλλες, περισσότερο ή λιγότερο επιτυχημένες προσπάθειες οι οποίες κατέληξαν σε περιστρεφόμενους και παλινδρομικούς ηλεκτρικούς κινητήρες με σχετικά μικρή ισχύ, ο γερμανόφωνος Πρώσος Moritz Jacobi δημιούργησε τον πρώτο πραγματικό περιστρεφόμενο ηλεκτροκινητήρα τον Μάιο του 1834, ο οποίος ανέπτυξε μια αξιοσημείωτη μηχανική ισχύ. Ο κινητήρας του σημείωσε παγκόσμιο ρεκόρ ισχύος, το οποίο ξεπεράστηκε μόλις τέσσερα χρόνια αργότερα, το Σεπτέμβριο του 1838 από τον ίδιο τον Jacobi. Ο δεύτερος κινητήρας του ήταν αρκετά ισχυρός για να οδηγήσει ένα σκάφος με 14 άτομα εντός ενός ποταμού. Μόλις το 1839/40 και άλλοι εφευρέτες σε όλο τον κόσμο κατάφεραν να κατασκευάσουν κινητήρες παρόμοιας και στη συνέχεια ακόμη υψηλότερης απόδοσης.

Ήδη το 1833 ο Γερμανός Heinrich Friedrich Emil Lenz δημοσίευσε ένα άρθρο σχετικά με τη συνάφεια των μαγνητικών και ηλεκτρικών φαινομένων, δηλαδή την αρχή στην οποία στηρίζεται η αντιστρεψιμότητα της γεννήτριας και του ηλεκτρικού κινητήρα. Το 1838 δημοσίευσε μια λεπτομερή περιγραφή των πειραμάτων του, στα οποία χρησιμοποίησε μια γεννήτρια Pixii που λειτουργούσε ως κινητήρας. Το 1835 οι Ολλανδοί Sibrandus Stratingh και Christopher Becker κατασκεύασαν έναν ηλεκτροκινητήρα που τροφοδοτούσε ένα μικρό μοντέλο αυτοκινήτου - αυτή είναι και η πρώτη γνωστή πρακτική εφαρμογή ενός ηλεκτροκινητήρα. Το Φεβρουάριο του 1837 το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για έναν ηλεκτρικό κινητήρα χορηγήθηκε στον Αμερικανό Thomas Davenport. Ωστόσο, όλες αυτές οι πρώιμες εξελίξεις από τους Jacobi, Stratingh, Davenport και άλλους τελικά δεν οδήγησαν στους ηλεκτρικούς κινητήρες που

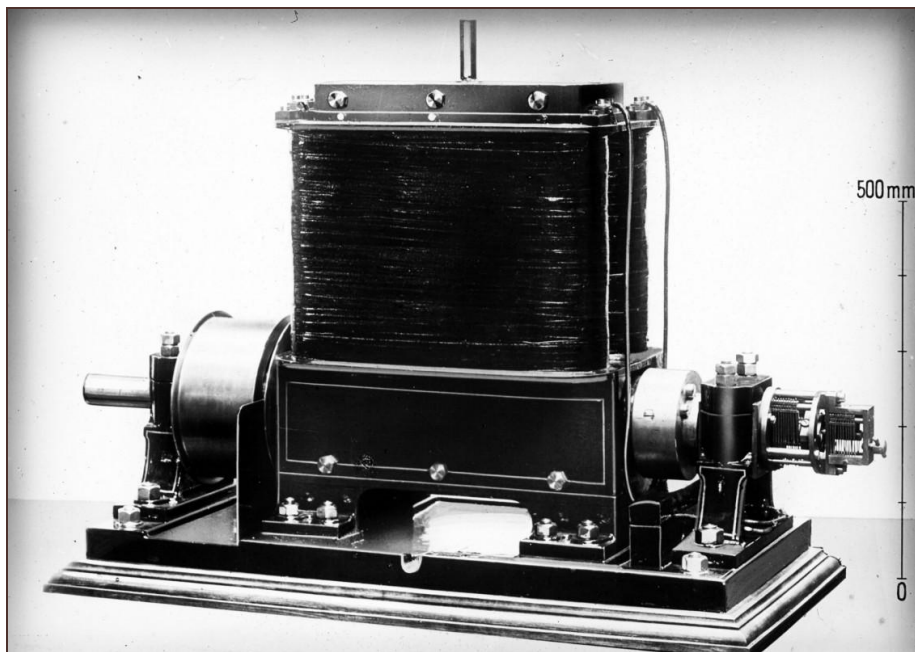
γνωρίζουμε σήμερα. Ο ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος (Direct Current Motor) δεν δημιουργήθηκε από αυτούς τους κινητήρες, αλλά περισσότερο από την ανάπτυξη γεννητριών ισχύος. Τα θεμέλια τέθηκαν από τους William Ritchie και Hippolyte Pixii το 1832 με την εφεύρεση του μετατροπέα και, κυρίως, από τον Werner Siemens το 1856 με τον αρχιμηχανικό του, Friedrich Hefner Alteneck, το 1872 με την εφεύρεση του επαγωγικού τυμπάνου. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος εξακολουθούν να κατέχουν κυρίαρχη θέση στην αγορά σήμερα στην περιοχή χαμηλής ισχύος (κάτω από 1 kW) και χαμηλής τάσης (κάτω από 60 V).

Παρακάτω εμφανίζεται ένα χρονοδιάγραμμα με τα γεγονότα – σταθμούς στην ιστορία της ανάπτυξης του ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

1 Πίνακας 2.1: Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης του ηλεκτρικού κινητήρα (Πηγή: Doppelbauer M., 2018).

| ΕΤΟΣ | ΓΕΓΟΝΟΣ |
|------|---|
| 1800 | Για πρώτη φορά ο Αλεσάντρο Βόλτα κατασκευάζει μια πηγή συνεχούς ηλεκτρικής ισχύος από ασημένιες πλάκες και πλάκες από ψευδάργυρο, η οποία θεωρείται η πρώτη μπαταρία. |
| 1821 | Ο Michael Faraday κάνει επίδειξη των πειραμάτων του σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική περιστροφή: Ένα κατακόρυφο σύρμα κινείται σε κυκλική τροχιά γύρω από ένα μαγνήτη. |
| 1825 | Ο William Sturgeon εφευρίσκει τον ηλεκτρομαγνήτη, ένα μεταλλικό πηνίο με σιδερένιο πυρήνα που ενισχύει το μαγνητικό πεδίο. |
| 1831 | Ο Michael Faraday ανακαλύπτει και μελετά το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, δηλαδή τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος λόγω ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Ο Faraday θέτει έτσι τα θεμέλια για την ανάπτυξη της γεννήτριας. |
| 1833 | Ο σιδηρουργός Thomas Davenport αγοράζει μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα από τον Joseph Henry και ξεκινάει πειράματα μαζί με την Orange Smalley σε ένα εργαστήριο στο Βερμόντ. Τον Ιούλιο του 1834, οι δύο άνδρες δημιουργούν την πρώτη τους περιστροφική μηχανή και προχωρούν σε μια σειρά από βελτιώσεις προτού οργανώσουν δημόσια επίδειξη για πρώτη φορά το Δεκέμβριο του 1834. |

| | |
|-------------|---|
| 1837 | Στις 5 Φεβρουαρίου, ο Davenport λαμβάνει το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που δόθηκε στις ΗΠΑ για τον ηλεκτρικό κινητήρα: «Βελτίωση του περιστροφικού κινητήρα με μαγνητισμό και ηλεκτρομαγνητισμό». |
| 1838 | Στις 13 Σεπτεμβρίου, ο Jacobi κάνει για πρώτη φορά επίδειξη ενός ηλεκτροκίνητου σκάφους μήκους περίπου 8 μέτρων με κουπιά στον ποταμό Νέβα της Ρωσίας το οποίο μπορεί να μεταφέρει περισσότερους από δώδεκα επιβάτες. |
| 1856 | Ο Werner Siemens κατασκευάζει μια ηλεκτρική γεννήτρια με επαγωγικό τύμπανο διπλής περιέλιξης. Αυτή η εφεύρεση σηματοδοτεί ένα σημείο καμπής στο σχεδιασμό ηλεκτρικών κινητήρων, καθώς όλα τα προηγούμενα σχέδια εξαφανίζονται από την αγορά τις επόμενες δεκαετίες. Μέχρι σήμερα, σχεδόν όλοι οι ηλεκτροκινητήρες κατασκευάζονται με επαγωγικό τύμπανο διπλής περιέλιξης. |
| 1864 | Ο James Clerk Maxwell συνοψίζει όλη την γνώση της εποχής του στο πεδίο του ηλεκτρομαγνητισμού σε 4 εξισώσεις με 4 μεταβλητές. Αυτές οι εξισώσεις ισχύουν ακόμη και σήμερα και περιγράφουν πλήρως τη θεωρία της ηλεκτρολογικής μηχανικής. |
| 1867 | Ο Siemens αναπτύσσει τη δυναμοηλεκτρική μηχανή του, που βασίζεται στο επαγωγικό τύμπανο διπλής περιέλιξης. Πλέον, μια ισχυρή ηλεκτρική γεννήτρια είναι διαθέσιμη και η εποχή της ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινά. |



12 Εικόνα 2.1: Η δυναμομηχανή του Siemens (Πηγή: Siemens).

Ένα θεμελιώδες πρόβλημα των πρώιμων ηλεκτροκινητήρων είναι ότι το ηλεκτρικό ρεύμα από τα γαλβανικά στοιχεία - μπαταρίες ψευδαργύρου - είναι πολύ ακριβό για να ανταγωνιστεί τις ατμομηχανές. Ο R. Hunt ανέφερε το 1850 στο *British Philosophical Magazine* ότι ο ηλεκτρικός κινητήρας ακόμη και κάτω από τις καλύτερες συνθήκες είναι 25 φορές πιο ακριβός από μια ατμομηχανή. Μόνο με τη συνεχή ανάπτυξη του δυναμώ η κατάσταση αρχίζει να αλλάζει.

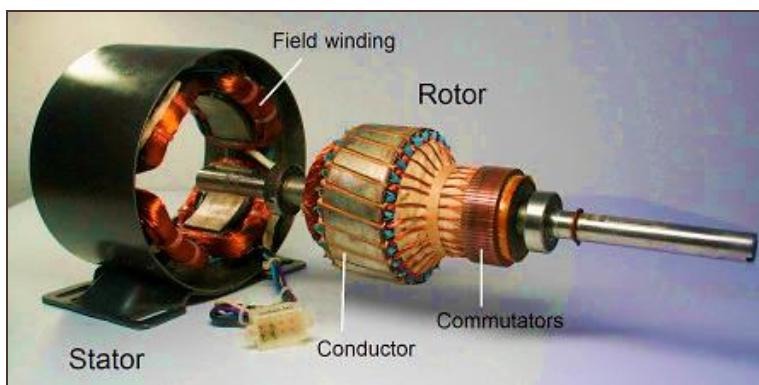
2.2 Βασική δομή και αρχές λειτουργίας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Προχωρώντας διαπιστώνουμε ότι, όπως και σε άλλου τύπου περιστρεφόμενους κινητήρες, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος βασίζονται στην αλληλεπίδραση δύο ηλεκτρομαγνητών. Η αλληλεπίδραση προκύπτει από την απώθηση των όμοιων πόλων, καθώς ο βόρειος πόλος του ενός μαγνήτη απωθεί το βόρειο πόλο του άλλου όπως αντίστοιχα συμβαίνει και με το νότιο πόλο. Ο ένας εκ των δύο ηλεκτρομαγνητών είναι συνδεδεμένος στο πλαίσιο του κινητήρα και ενεργοποιείται από το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τις περιελίξεις του στάτορα, ενώ ο άλλος μαγνήτης ενεργοποιείται από το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τις περιελίξεις του ρότορα.

Όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν δύο βασικά μέρη:

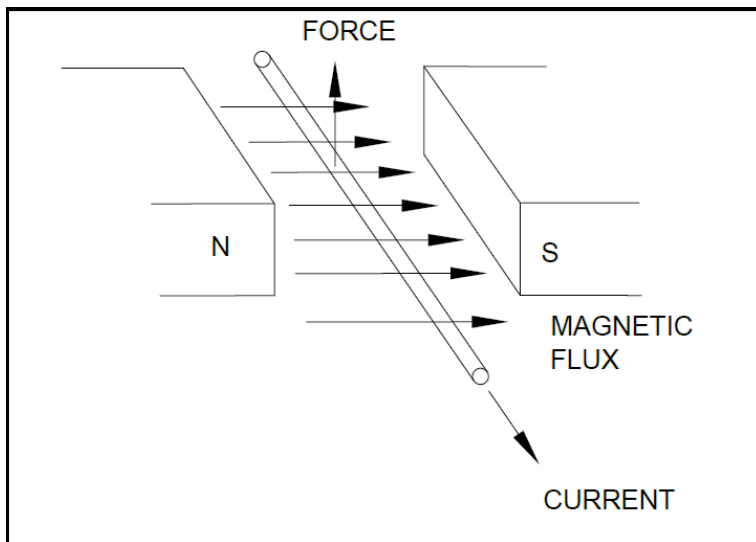
- Το στάτορα ή αλλιώς στάτη, που είναι το στατικό τμήμα.
- Το ρότορα ή αλλιώς δρομέα, που αποτελεί το περιστρεφόμενο τμήμα.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή αυτών των δύο εξαρτημάτων καθορίζει την ταξινόμηση αλλά και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα. Παράλληλα, πρόσθετα εξαρτήματα (π.χ. ψήκτρες, δακτύλιοι ολίσθησης, ρουλεμάν, ανεμιστήρες, πυκνωτές, φυγοκεντρικοί διακόπτες κλπ.) αποτελούν μοναδικά χαρακτηριστικά για έναν συγκεκριμένο τύπο κινητήρα.



13 Εικόνα 2.2: Ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος, όπου εμφανίζεται ο στάτορας και ο ρότορας (Πηγή: Sang-Hoon K., 2017).

Οι περισσότεροι ηλεκτρικοί κινητήρες βασίζουν τη λειτουργία τους στις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού. Αν και υπάρχουν κινητήρες που βασίζονται στις αρχές του πιεζοηλεκτρισμού, ωστόσο είναι λιγότερο συνηθισμένοι. Στους ηλεκτρικούς κινητήρες, η δύναμη περιστροφής συνδέεται άμεσα με την ισχύ του μαγνητικού πεδίου και την ποσότητα του ρεύματος που ρέει στον αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.



14 Εικόνα 2.3: Η δύναμη που ασκείται στον αγωγό εντός μαγνητικού πεδίου λόγω μαγνητικού πεδίου (Πηγή: Keyes C., 2007).

Για τη δύναμη F ισχύει ότι, $F = ILB$, όπου

F , είναι η δύναμη (N)

I , είναι η ένταση του ρεύματος (A)

L , είναι το μήκος του αγωγού (m)

B , είναι η μαγνητική ροή (webers/m²)

Γενικά, ο ρότορας ενός ηλεκτροκινητήρα βρίσκεται εντός του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το στάτορα. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ροή ηλεκτρονίων – δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα – εντός του ρότορα και η δύναμη που δημιουργείται από τα μαγνητικά πεδία στον στάτορα και τον ρότορα - και επομένως η ροπή – έχει ως αποτέλεσμα τη περιστροφή του ρότορα.

Η ονομαστική ισχύς ενός ηλεκτροκινητήρα εκφράζει τη μηχανική ισχύ σε ιπποδύναμη ή κιλοβάτ. Η σχέση που συνδέει τις δύο εκφράσεις εμφανίζεται παρακάτω:

$$hp = \frac{kW}{0.746}$$

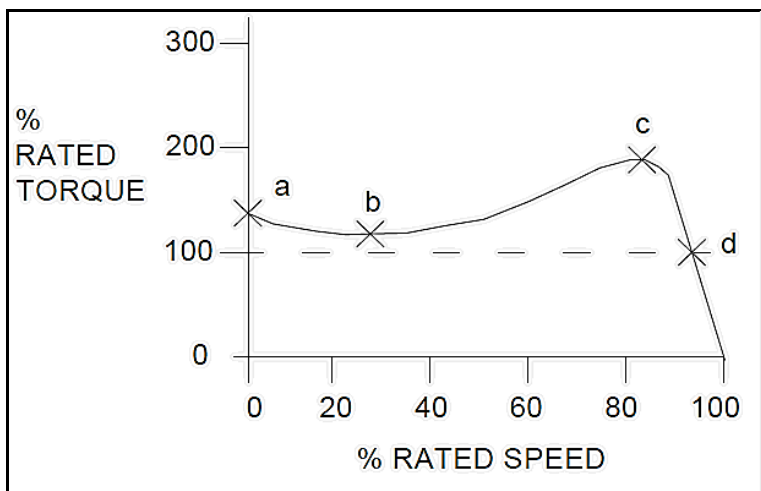
Οι δύο πιο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν τη μηχανική ισχύ ενός ηλεκτρικού κινητήρα είναι η ροπή και η ταχύτητα περιστροφής. Η ροπή είναι το μέτρο δύναμης που τείνει να περιστρέψει ένα σώμα και η μονάδα μέτρησης της είναι σε νιουτόμετρα (Nm).

Η ταχύτητα του κινητήρα εκφράζεται συνήθως σε στροφές ανά λεπτό (RPM). Η ιπποδύναμη του κινητήρα ορίζεται ως η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα πολλαπλασιαζόμενη επί τη ροπή.

$$hp = Torque \times Speed$$

Όσο πιο αργά λειτουργεί ένας ηλεκτρικός κινητήρας τόσο περισσότερη ροπή πρέπει να παράγει για να παρέχει την ίδια ισχύ εξόδου. Για να αντέξουν τη μεγαλύτερη ροπή, οι κινητήρες χαμηλότερης ταχύτητας χρειάζονται ισχυρότερα εξαρτήματα και είναι γενικά μεγαλύτεροι, πιο ακριβοί και με μεγαλύτερο βάρος από τους κινητήρες υψηλότερης ταχύτητας με την ίδια ονομαστική ισχύ.

Η ροπή που παράγεται από έναν ηλεκτρικό συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα περιστροφής. Κάθε τύπος κινητήρα έχει τη δική του συσχέτιση ταχύτητας – ροπής, η οποία όταν απεικονίζεται σε κατάλληλο διάγραμμα ταχύτητας-ροπής βοηθά στη διαδικασία επιλογής ενός κινητήρα.



15 Εικόνα 2.4: Τυπικό διάγραμμα ροπής – ταχύτητας περιστροφής ενός ηλεκτρικού κινητήρα (Πηγή: Keyes C., 2007).

Μερικά σημαντικά σημεία που βρίσκονται στο γράφημα ταχύτητας περιστροφής - ροπής του σχήματος 2.4 περιλαμβάνουν:

- *Ροπή εκκίνησης (σημείο a):* Η ροπή που παράγεται σε μηδενική ταχύτητα περιστροφής. Εάν ο ηλεκτρικός κινητήρας προορίζεται για την περιστροφή φορτίων υψηλής αδράνειας – και άρα φορτίων που είναι δύσκολο να περιστραφούν – θα πρέπει να επιλεγθεί ένας κινητήρας με υψηλή ροπή εκκίνησης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων κινητήρων αποτελούν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

- *Ροπή έλξης (σημείο b)*: Η ελάχιστη ροπή που παράγεται κατά την επιτάχυνση από στάση έως την πλήρη ταχύτητα λειτουργίας. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να είναι κρίσιμο για έναν ηλεκτρικό κινητήρα που προορίζεται για μια εφαρμογή που απαιτεί ενέργεια για να περάσει από ορισμένα προσωρινά φορτία, προτού επιτύχει πλήρη.
- *Ροπή κατάρρευσης (σημείο c)*: Η μέγιστη ροπή που μπορεί να παράγει ο κινητήρας πριν σταματήσει.
- *Ροπή πλήρους φορτίου ή ροπή πέδησης (σημείο d)*: Η ροπή που παράγεται στην ταχύτητα πλήρους φορτίου και δίνει την ονομαστική ισχύ του κινητήρα. Σε αυτό το σημείο η ροπή επί την ταχύτητα ισούται με την ονομαστική υποδύναμη (Keyes C., 2007).

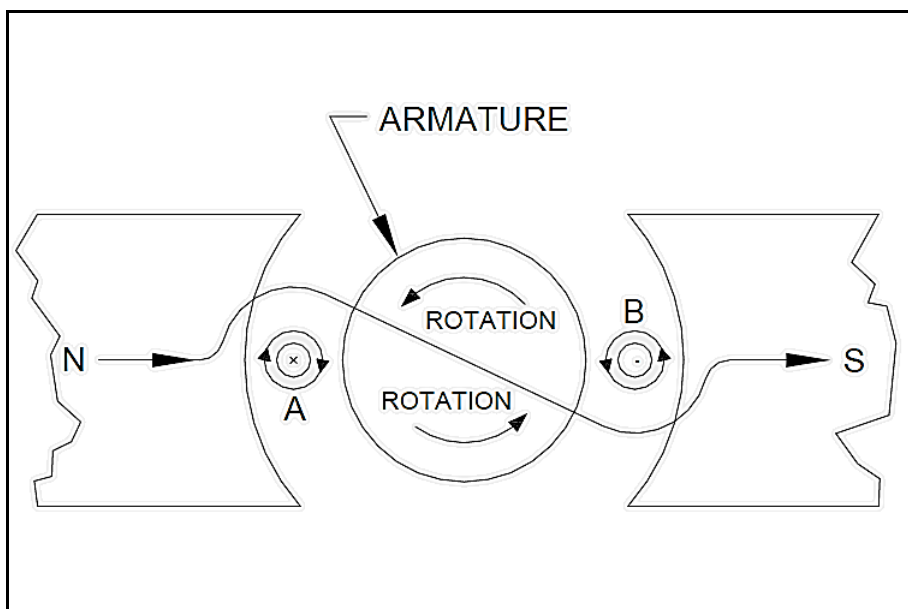
2.3 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος διαθέτουν χαρακτηριστικά που τους καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικούς για μια σειρά από εφαρμογές. Για παράδειγμα, η πολύ υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές κάνει τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος ελκυστικό για εφαρμογές που απαιτούν περιστροφή φορτίων υψηλής αδράνειας ή κατά την εκκίνηση ενός κινητήρα. Επίσης, η ταχύτητα περιστροφής μπορεί εύκολα να ελεγχθεί, με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας.

Ακολουθεί μια γενική περιγραφή ενός τυπικού ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος:

Το περιστρεφόμενο τμήμα – δηλαδή ο ρότορας - ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ονομάζεται επίσης οπλισμός και αποτελείται από περιελίξεις παρόμοιες με αυτές που υπάρχουν σε έναν επαγωγικό κινητήρα. Το ακίνητο τμήμα - δηλαδή ο στάτορας - εισάγει ένα μαγνητικό πεδίο είτε μέσω μόνιμων μαγνητών, είτε μέσω περιελίξεων που δρουν στον οπλισμό. Το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στις περιελίξεις του οπλισμού μέσω ψηκτρών άνθρακα και ενός μεταγωγέα. Ο μεταγωγέας είναι εύκολα αναγνωρίσιμος, καθώς εμφανίζεται ως ένας δακτύλιος παράλληλων, διαμετρικά αντίθετων ζευγών χάλκινων επαφών ορθογώνιου σχήματος στο ένα άκρο του οπλισμού.

Κάθε ζεύγος επαφών συνδέεται με ένα πηνίο τυλιγμένο στον οπλισμό. Οι ψήκτρες διατηρούν την επαφή με το μεταγωγέα μέσω ελατηρίων. Όταν ο κινητήρας είναι ενεργοποιημένος, το ρεύμα ρέει σε μια ψύκτρα μέσω ενός μεταγωγέα που συνδέεται με ένα πηνίο περιέλιξης στον οπλισμό και ρέει έξω από την άλλη ψήκτρα, μέσω ενός διαμετρικά αντίθετου μεταγωγέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο οπλισμός να λειτουργεί ως ένας μαγνήτης, με τον οποίο αλληλεπιδρά το πεδίο του στάτορα. Το μαγνητικό πεδίο του οπλισμού προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με το πεδίο του στάτορα και έτσι παράγεται ροπή και ο οπλισμός περιστρέφεται ελαφρά. Την ίδια στιγμή, η σύνδεση με το πρώτο ζεύγος επαφών του μεταγωγέα διακόπτεται και το επόμενο ζεύγος ευθυγραμμίζεται με τις ψήκτρες. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και ο κινητήρας συνεχίζει να περιστρέφεται.



16 Εικόνα 2.5: Παραγωγή ροπής σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος (Πηγή: Keyes C., 2007).

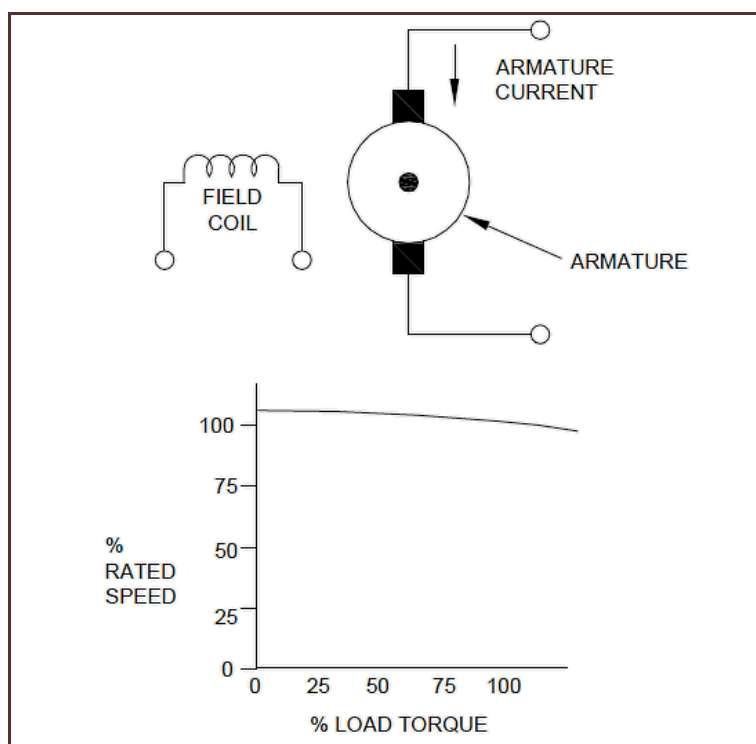
2.3.1 Κινητήρας ανεξάρτητης διέγερσης.

Το πηνίο του στάτορα περιέχει έναν σχετικά μεγάλο αριθμό σπειρών, γεγονός που ελαχιστοποιεί το ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται για την παραγωγή ενός ισχυρού πεδίου στο στάτη. Συνδέεται με ξεχωριστό τροφοδοτικό DC, με αποτέλεσμα το ρεύμα πεδίου να καθίσταται ανεξάρτητο από το φορτίο ή το ρεύμα οπλισμού. Το κύριο

χαρακτηριστικό αυτού του τύπου κινητήρα είναι η εξαιρετική ρύθμιση της ταχύτητας, που επιτυγχάνεται μέσω της διακύμανσης του ρεύματος πεδίου.

Οι τρεις μέθοδοι για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση εμφανίζονται παρακάτω:

- Ρύθμιση της τάσης στο τύλιγμα του οπλισμού (armature voltage control) V .
- Ρύθμιση της μαγνητικής ροής (field control) ϕ .
- Ρυθμιζόμενη αντίσταση στο κύκλωμα του δρομέα (armature resistance control).



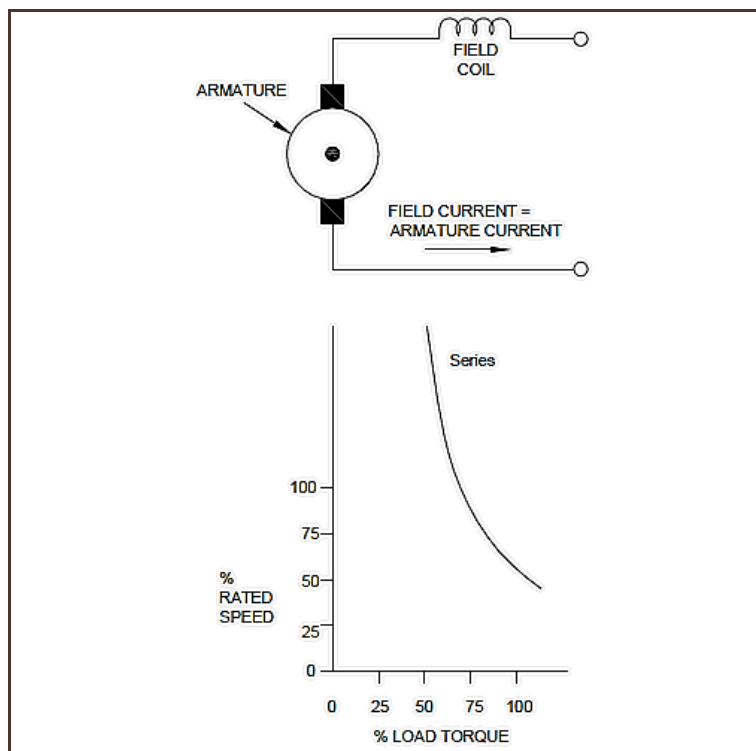
17 Εικόνα 2.6: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης (Πηγή: Keyes C., 2007).

2.3.2 Κινητήρας με διέγερση σειράς.

Το πηνίο του στάτορα έχει σχετικά μικρό αριθμό σπειρών και συνδέεται σε σειρά με τον οπλισμό. Συγκεκριμένα, επειδή διαρρέεται από ισχυρό ρεύμα οπλισμού, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται με το φορτίο. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου κινητήρα είναι η πολύ υψηλή ροπή εκκίνησης, ενώ η ρύθμιση της ταχύτητας δεν είναι ικανοποιητική όταν ο κινητήρας λειτουργεί με πολύ υψηλή ταχύτητα χωρίς φορτίο. Η απότομη μεταβολή της ταχύτητας με τη ροπή, οφείλεται στη μεταβολή της μαγνητικής

ροής με το φορτίο. Συνεπώς, μια αύξηση της ροπής φορτίου προκαλεί την αύξηση του ρεύματος οπλισμού και της μαγνητικής ροής.

Επιπροσθέτως, η ταχύτητα του κινητήρα αποκτά πολύ μεγάλες τιμές όταν η ροπή του φορτίου τείνει στο μηδέν. Έτσι, οι κινητήρες με διέγερση σειράς δεν πρέπει ποτέ να λειτουργούν χωρίς φορτίο. Οι κινητήρες σειράς δίνουν τη μεγαλύτερη ροπή ανά μονάδα ρεύματος, από κάθε άλλο κινητήρα συνεχούς ρεύματος, εξαιτίας της αύξησης της ροής με τη ροπή και μάλιστα σε μικρή ταχύτητα. Επομένως, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ροπή εκκίνησης και μεγάλες υπερφορτίσεις. Τέτοιες εφαρμογές είναι οι κινητήρες των ανελκυστήρων, των γερανών και των συστημάτων έλξης (τρένα).

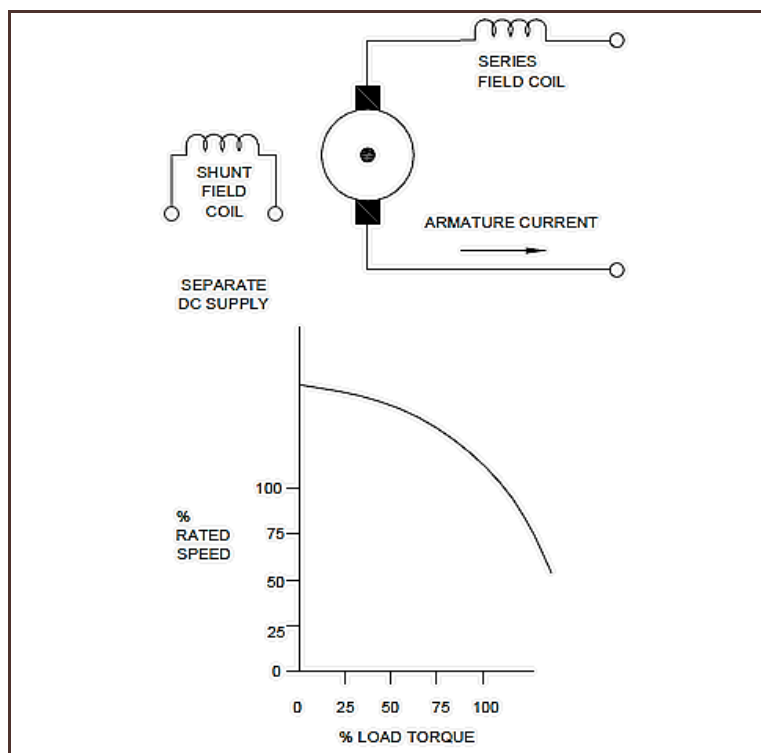


18 Εικόνα 2.7: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς (Πηγή: Keyes C., 2007).

2.3.3 Κινητήρας με σύνθετη διέγερση.

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος με σύνθετη διέγερση χρησιμοποιεί το τύλιγμα σειράς και το παράλληλο τύλιγμα και συνδέονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε οι μαγνητικές ροές που αναπτύσσουν να προστίθενται. Αυτή η σύνδεση δύο περιελίξεων έχει ως αποτέλεσμα, ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος με σύνθετη διέγερση να εμφανίζει χαρακτηριστικά ενδιάμεσα στον κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης και στο κινητήρα με διέγερση σειράς. Η ρύθμιση της ταχύτητας είναι πιο ικανοποιητική σε σχέση με τον κινητήρα με διέγερση σειράς.

Σε μικρές ροπές φορτίου, η επίδραση του τυλίγματος σειράς είναι ασθενής. Ως εκ τούτου, ο κινητήρας παρουσιάζει τη συμπεριφορά ενός κινητήρα με παράλληλη διέγερση. Επιπλέον, η ταχύτητα του κινητήρα στο κενό έχει μία σαφώς καθορισμένη τιμή, όπως οι κινητήρες παράλληλης και ανεξάρτητης διέγερσης. Σε μεγάλες ροπές του φορτίου, η επίδραση του τυλίγματος σειράς είναι έντονη, εξαιτίας του υψηλού ρεύματος δρομέα. Επομένως, ο κινητήρας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης τείνει να συμπεριφέρεται ως κινητήρας με διέγερση σειράς, εμφανίζοντας μεγάλη ροπή εκκίνησης.

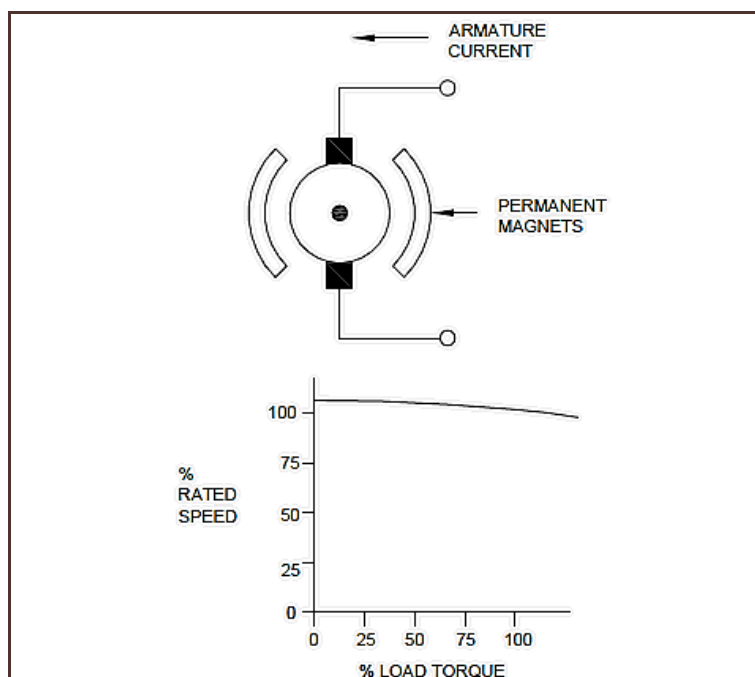


19 Εικόνα 2.8: Κινητήρας με σύνθετη διέγερση (Πηγή: Keyes C., 2007).

2.3.4 Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη.

Αυτός ο τύπος κινητήρα χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες στη θέση των περιελίξεων για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Ειδικότερα, οι μόνιμοι μαγνήτες παρέχουν σταθερή ένταση πεδίου, και εμφανίζουν χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης.

Αξίζει να τονιστεί ότι οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές χαμηλής ιπποδύναμης, ιδιαίτερα σε αυτές που λειτουργούν με μπαταρία, για παράδειγμα κινητήρες για υαλοκαθαριστήρες παρμπρίζ. Ωστόσο, με τις πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των μαγνητών, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη μπορεί να ξεπεράσουν σε ιπποδύναμη τα 200 HP.



20 Εικόνα 2.9: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες (Πηγή: Keyes C., 2007).

2.4 Εφαρμογές ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ιδιαίτερα σημαντικοί σε μια σειρά από εφαρμογές. Σε φορητές εφαρμογές που χρησιμοποιούν μπαταρία, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι η απόλυτη επιλογή. Οι DC κινητήρες χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης και ακριβή έλεγχο της ταχύτητας. Με λίγα λόγια, οι κύριες εφαρμογές των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι: ανελκυστήρες, χαλβουργία, ελασματοουργεία, ατμομηχανές, εκσκαφείς και άλλες.

2.4.1 Ηλεκτροκίνηση

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες αποτελείται από έναν μεταγωγέα και ψήκτρες που μετατρέπουν ένα ρεύμα συνεχές, σε ένα πηνίο οπλισμού σε ρεύμα AC. Καθώς το ρεύμα ρέει μέσα από τις περιελίξεις του οπλισμού, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο απωθεί τους κοντινούς μαγνήτες με την ίδια πολικότητα και αναγκάζει το φτερό να στραφεί προς τους ελκυστικούς μαγνήτες αντίθετης πολικότητας. Στη συνέχεια, καθώς ο οπλισμός περιστρέφεται, ο μεταγωγέας αντιστρέφει το ρεύμα στο πηνίο οπλισμού για να απωθήσει τους κοντινούς μαγνήτες, προκαλώντας έτσι τη συνεχή περιστροφή του κινητήρα. Αυτός ο κινητήρας μπορεί να κινηθεί με ισχύ συνεχούς ρεύματος, επομένως είναι πολύ ελκυστικός για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Απεναντίας, ορισμένα μειονεκτήματα είναι ότι το τόξο που παράγεται από τα πηνία οπλισμού στην επιφάνεια της βούρτσας-μετατροπέα που παράγει θερμότητα, φθορά και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Αυτά τα χαρακτηριστικά του κινητήρα δείχνουν ότι είναι πιο κατάλληλος σε εφαρμογές όπου η υψηλή απόδοση δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτό ότι η χρήση αυτού του τύπου κινητήρα λιγότερο ελκυστική.

Κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC) είναι οι πιο δημοφιλείς και ευρέως χρησιμοποιούμενοι στην εφαρμογή ελέγχου και είναι διαμορφωμένοι σε μονοφασικούς, διφασικούς και τριφασικούς. Η απλή δομή, η στιβαρότητα και το χαμηλό κόστος ενός κινητήρα BLDC τον καθιστούν βιώσιμο υποψήφιο για διάφορες εφαρμογές γενικής χρήσης. Το BLDC σε συνδυασμό με έναν κατάλληλο ελεγχόμενο μετατροπέα παρέχει πολλά επιθυμητά χαρακτηριστικά για ένα αποτελεσματικό σύστημα μετάδοσης κίνησης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του BLDC είναι η βελτιωμένη ταχύτητα σε σχέση με τα χαρακτηριστικά ροπής σε σύγκριση με άλλους ηλεκτρικούς κινητήρες. Επιπλέον, το BLDC ολοκληρώνει τη μεταγωγή ηλεκτρονικά χρησιμοποιώντας ανάδραση θέσης

ρότορα για να καθορίσει πότε θα αλλάξει το ρεύμα. Αυτός ο κινητήρας είναι κατασκευασμένος με ρότορα μόνιμου μαγνήτη και πόλους στάτορα με σύρμα. Ο ρότορας σχηματίζεται από μόνιμο μαγνήτη και μπορεί να αλλάξει από διπολικά σε οκταπολικά ζεύγη με εναλλακτικούς βόρειους (B) και νότιους (S) πόλους. Οι περιελίξεις του στάτη συνεργάζονται με τους μόνιμους μαγνήτες στον ρότορα για να δημιουργήσουν μια ομοιόμορφη πυκνότητα ροής στο διάκενο αέρα. Αυτό επιτρέπει στα πηνία του στάτορα να κινούνται με σταθερή τάση DC (εξ ου και η ονομασία DC χωρίς ψήκτρες). Παράλληλα, η θέση του ρότορα ενός BLDC, η οποία ανιχνεύεται με χρήση αισθητήρων εφέ είναι πολύ σημαντική και δίνει τις πληροφορίες σχετικά με την περιέλιξη που ενεργοποιείται αυτή τη στιγμή και την περιέλιξη που θα ενεργοποιηθεί έπειτα. Κάθε φορά που οι μαγνητικοί πόλοι του ρότορα περνούν κοντά στους αισθητήρες της αίθουσας, δίνουν ένα υψηλό ή χαμηλό σήμα, υποδηλώνοντας ότι ο πόλος N ή S περνά κοντά στους αισθητήρες. Συμπληρωματικά, η ακριβής σειρά εναλλαγής μπορεί να εκτιμηθεί, ανάλογα με τον συνδυασμό αυτών των τριών σημάτων του αισθητήρα αίθουσας.

Ακόμα, οι στρατηγικές ελέγχου χωρίς αισθητήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξάλειψη των αισθητήρων θέσης, μειώνοντας έτσι το κόστος και το μέγεθος του κινητήρα. Στην πραγματικότητα, οι μέθοδοι ελέγχου, όπως το back-EMF και η ανίχνευση ρεύματος μπορούν να παρέχουν αρκετές πληροφορίες για να εκτιμηθεί με επαρκή ακρίβεια η θέση του ρότορα και, επομένως, να λειτουργήσει ο κινητήρας με σύγχρονα ρεύματα φάσης. Ίσως, οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι BEMF βασίζονται σε μια τεχνική που ονομάζεται σημείο διέλευσης μηδέν (ZCP), που είναι το μόνο σημείο που παρέχει τις πληροφορίες θέσης του ρότορα είτε στο 00 είτε στο 1800 ηλεκτρικό. Οι μέθοδοι μηδενικού σημείου διέλευσης διαδέχονται μια μετατόπιση φάσης 300 ή 900 για να ταιριάζουν με τις περιπτώσεις μεταγωγής. Οποιοδήποτε σφάλμα ανίχνευσης του ZCP έχει ως αποτέλεσμα ένα μη βέλτιστο ρεύμα φάσης.

Ας σημειωθεί ακόμα ότι ο κινητήρας BLDC προσφέρει εξαιρετική πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με άλλους κινητήρες, υψηλότερη ροπή, μειωμένο λειτουργικό και μηχανικό θόρυβο, εξάλειψη ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και προσφέρει εξαιρετική απόδοση. Ως εκ τούτου, αυτός ο κινητήρας είναι ο πιο δημοφιλής στην εφαρμογή της ηλεκτροκίνησης των οχημάτων.

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

3.1 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων AC.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι ηλεκτρικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Ειδικότερα, η ηλεκτρική ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική τροφοδοτείται στον στάτορα, έτσι, όπως και με τον επαγωγικό κινητήρα κλωβού, δεν υπάρχουν συρόμενες επαφές στα κύρια κυκλώματα ισχύος. Η πλειοψηφία έχει στάτορες που είναι πανομοιότυποι (ή πολύ παρόμοιοι) με τον επαγωγικό κινητήρα, αλλά ορισμένες νέες τεχνικές κατασκευής και περιέλιξης που περιλαμβάνουν τμηματοποιημένη κατασκευή εφαρμόζονται στο χαμηλότερο άκρο ισχύος: αυτοί θα παρουσιαστούν αργότερα.

Τα ονόματα που θα συναντήσουμε περιλαμβάνουν:

(α) Συμβατική Σύγχρονη Μηχανή με την περιέλιξη του πεδίου του ρότορα (διεγερτικός δρομέας). Αυτό είναι το μόνο μηχάνημα που μπορεί να έχει βούρτσες, αλλά ακόμα και τότε θα μεταφέρουν μόνο το ρεύμα διέγερσης του ρότορα, όχι το κύριο εναλλασσόμενο ρεύμα εισόδου.

(β) Σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη, με μόνιμους μαγνήτες που αντικαθιστούν την περιέλιξη του πεδίου του ρότορα.

(γ) Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες (ίδιος με το (β)). Το πρόθεμα «χωρίς ψήκτρες» είναι περιττό.

(δ) Κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς βούρτσες (ίδιος με το (β)).

(ε) Κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς βούρτσες (ίδιο με το (β) εκτός από λεπτομερείς διαφορές στα μοτίβα πεδίου). Αυτό το όνομα επινοήθηκε τη δεκαετία του 1970 για να περιγράψει κινητήρες «μέσα προς τα έξω» που προορίζονταν ως άμεσοι αντικαταστάτες των συμβατικών d.c. κινητήρων, και από αυτή την άποψη έχει κάποια δικαιολογία.

(στ) Σερβοκινητήρας μόνιμου μαγνήτη (ίδιο με το (β)).

Ας σημειωθεί ακόμη ότι ο κινητήρας μαγνητικής αντίστασης είναι θεμελιωδώς διαφορετικός από όλους τους παραπάνω τύπους. Ενώ περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα, δεν έχει καμία μορφή διέγερσης στον ρότορα και η μέθοδος παραγωγής ροπής

είναι κάπως διαφορετική. Βέβαια, είναι ένας όλο και πιο σημαντικός τύπος ηλεκτρικής μηχανής. Παραδοσιακά, όπως υποδηλώνει το όνομά τους, οι σύγχρονοι κινητήρες σχεδιάστηκαν για λειτουργία απευθείας από την παροχή ρεύματος, συνήθως είτε στα 50Hz ή 60Hz. Στη συνέχεια λειτουργούν με συγκεκριμένη και σταθερή ταχύτητα (που καθορίζεται από τον αριθμό πόλων της περιέλιξης) σε ένα ευρύ φάσμα φορτίων και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά προτίμηση έναντι των επαγωγικών κινητήρων, όταν είναι ακριβείς στην ανοχή της συχνότητας χρήσης και έχουν σταθερή ταχύτητα. Κατά συνέπεια, αυτά τα μηχανήματα είναι διαθέσιμα σε ένα πολύ ευρύ φάσμα από μικροσκοπικές μονοφασικές εκδόσεις σε οικιακά ρολόγια και χρονόμετρα, έως μηχανές πολλών μεγαβάτ σε μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως οι συμπιεστές αερίου. (Η εφαρμογή ρολογιού σημαίνει ότι οι εταιρείες κοινής ωφέλειας έχουν την ευθύνη να διασφαλίζουν ότι η μέση συχνότητα σε μια περίοδο 24 ωρών πρέπει πάντα να είναι ακριβώς η ονομαστική συχνότητα της παροχής προκειμένου να μας κρατούν όλους στην ώρα τους. Κατά ειρωνικό τρόπο, για να το κάνουν αυτό, ελέγχουν την ταχύτητα πολύ μεγάλων, στροβίλων, σύγχρονων μηχανών που παράγουν τη συντριπτική πλειονότητα της ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο.) Επομένως, για να ξεπεραστεί ο περιορισμός σταθερής ταχύτητας που προκύπτει από τη σταθερή συχνότητα της παροχής κοινής ωφέλειας, ο σύγχρονος κινητήρας τροφοδοτείται με μετατροπέα. Με λίγα λόγια, όλες οι μορφές αυτής της γενικής τεχνολογίας χρησιμοποιούν έναν μετατροπέα μεταβλητής συχνότητας για την μεταβολή της σύγχρονης ταχύτητας, αλλά σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις το μοτίβο μεταγωγής του μετατροπέα (και επομένως η συχνότητα) καθορίζεται από τη θέση του ρότορα και όχι από τον εξωτερικό ταλαντωτή. Σε τέτοιους λεγόμενους «αυτοσύγχρονους» μηχανισμούς κίνησης, ο ρότορας δεν μπορεί να χάσει τον συγχρονισμό και να σταματήσει (που είναι ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του μηχανήματος που τροφοδοτείται με βοηθητικά προγράμματα). Με δεδομένα τα παραπάνω, ο επιτόπιος έλεγχος μπορεί να εφαρμοστεί σε σύγχρονες μηχανές για να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα απόδοσης με μηχανές που έχουν υψηλότερες εγγενείς πυκνότητες ισχύος από τους ισοδύναμους επαγωγικούς κινητήρες.

3.1.1 Τύποι σύγχρονου κινητήρα.

Στον σύγχρονο κινητήρα, οι περιελίξεις του στάτορα είναι ουσιαστικά οι ίδιες με αυτές του επαγωγικού κινητήρα, οπότε όταν συνδέεται στην τροφοδοσία 3 φάσεων, παράγεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Εντούτοις, αντί να έχει έναν κυλινδρικό

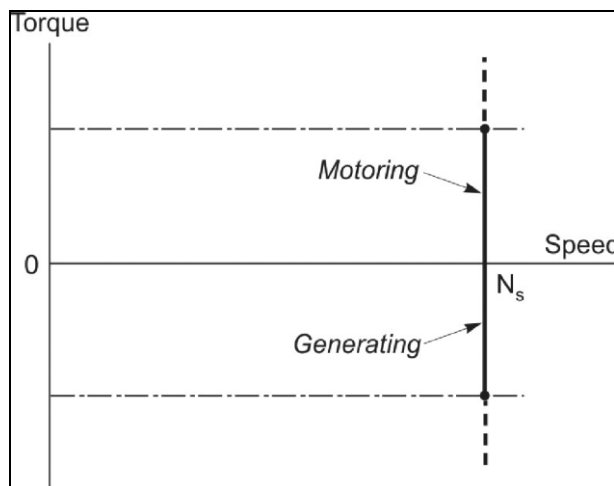
ρότορα με περιέλιξη κλωβού που προσαρμόζεται αυτόματα στον αριθμό πόλων του πεδίου του στάτορα, ο σύγχρονος κινητήρας διαθέτει ρότορα είτε με d.c. διεγερμένη περιέλιξη (παρέχεται σε μεγαλύτερες μηχανές με βοηθητικό διεγέρτη), ή μόνιμοι μαγνήτες, σχεδιασμένοι με τον ίδιο αριθμό πόλων με τον στάτορα. Ο ρότορας είναι έτσι σε θέση να «κλειδώσει» ή να «συγχρονίσει» με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τον στάτορα. Μόλις συγχρονιστεί ο ρότορας, θα λειτουργεί με την ίδια ακριβώς ταχύτητα με το περιστρεφόμενο πεδίο παρά τη διακύμανση του φορτίου, επομένως σε λειτουργία σταθερής συχνότητας η ταχύτητα θα παραμείνει σταθερή όσο η συχνότητα παροχής είναι σταθερή. Συνεπώς, η σύγχρονη ταχύτητα (σε στροφές/λεπτό) δίνεται από την έκφραση

$$N_s = \frac{120 f}{p}$$

όπου f είναι η συχνότητα παροχής και p είναι ο αριθμός πόλων της περιέλιξης. Ειδικότερα, για βιομηχανικούς κινητήρες 2, 4 και 6 πόλων οι ταχύτητες λειτουργίας σε τροφοδοσία 50 Hz είναι 3000, 1500 και 1000 στροφές/λεπτό, ενώ σε τροφοδοσία 60 Hz γίνονται 3600, 1800 και 1200 στροφές/λεπτό αντίστοιχα. Στο άλλο άκρο, ο μικρός κινητήρας σε έναν χρονοδιακόπτη με τον κυπελλοειδές ρότορα με τα 20 αξονικά προεξέχοντα δακτύλια και ένα κυκλικό πηνίο στη μέση είναι ένας κινητήρας μαγνητικής αντίστασης 20 πόλων (σύγχρονος) που θα λειτουργεί με 300 στροφές/λεπτό όταν τροφοδοτείται από τροφοδοσία 50 Hz. Ιδιαίτερα, οι χρήστες που θέλουν ταχύτητες διαφορετικές από αυτές τις διακριτές τιμές θα απογοητευτούν, εκτός εάν είναι έτοιμοι να επενδύσουν σε έναν μετατροπέα μεταβλητής συχνότητας.

Με το σύγχρονο μηχάνημα, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει ένα όριο στη μέγιστη ροπή (pull-out) που μπορεί να αναπτυχθεί πριν ο ρότορας αναγκαστεί να βγει εκτός συγχρονισμού με το περιστρεφόμενο πεδίο. Αυτή η ροπή «έλξης» θα είναι συνήθως 1,5 φορές η συνεχή ονομαστική ροπή, αλλά μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι τόσο υψηλή όσο 4 ή ακόμα και 6 φορές υψηλότερη στην περίπτωση κινητήρων υψηλής απόδοσης, όταν απαιτούνται υψηλές ροπές επιτάχυνσης για σχετικά σύντομες περιόδους. Επιπλέον, για όλες τις ροπές κάτω από το pull-out, η σταθερή ταχύτητα λειτουργίας θα είναι απολύτως σταθερή.

Επιπροσθέτως, η καμπύλη ροπής-ταχύτητας είναι μια κατακόρυφη γραμμή στη σύγχρονη ταχύτητα. Μπορούμε να δούμε ότι η κατακόρυφη γραμμή εκτείνεται στο τεταρτημόριο 2, πράγμα που δείχνει ότι αν προσπαθήσουμε να επιβάλλουμε την ταχύτητα πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα, η μηχανή θα λειτουργήσει ως γεννήτρια. Παραδοσιακά, χρησιμοποιούνταν σύγχρονοι κινητήρες που τροφοδοτούνται με βοηθητικό εξοπλισμό όπου απαιτείται σταθερή ταχύτητα, επιθυμητή υψηλή απόδοση και ελεγχόμενος συντελεστής ισχύος. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης σε ορισμένες εφαρμογές όπου απαιτούνταν, ένας αριθμός κινητήρων να λειτουργούν με την ίδια ακριβώς ταχύτητα. Ωστόσο, μια ομάδα σύγχρονων κινητήρων με τροφοδοσία χρησιμότητας δεν θα μπορούσε πάντα να αντικαταστήσει τον μηχανικό άξονα επειδή, ενώ η ταχύτητα περιστροφής τους θα ήταν πάντα αντιστοιχισμένη, η ακριβής σχετική γωνία ρότορα κάθε κινητήρα θα ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο στους μεμονωμένους άξονες κινητήρα.

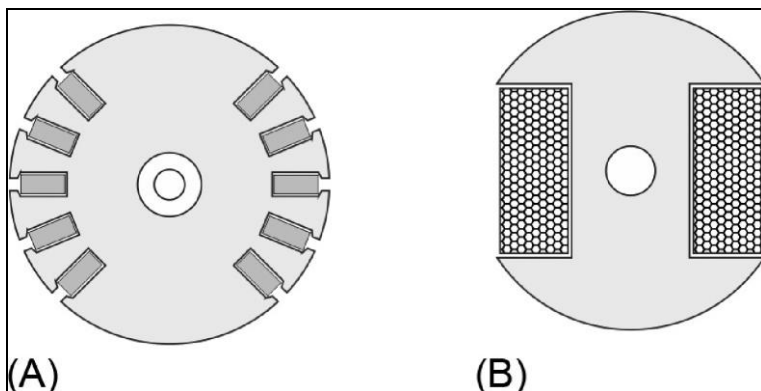


21 **Εικόνα 3.1:** Καμπύλη ροπής-στροφών σταθερής κατάστασης για σύγχρονο κινητήρα που τροφοδοτείται σε σταθερή συχνότητα. (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

3.1.2.Κινητήρες διεγερμένου ρότορα.

Ο ρότορας μιας συμβατικής σύγχρονης μηχανής φέρει μια περιέλιξη «πεδίου» ή «διέγερσης», η οποία τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα, είτε μέσω ενός ζεύγους ολισθήσεων στον άξονα, είτε μέσω ενός βοηθητικού διεγέρτη χωρίς ψήκτρες στον ίδιο άξονα. Συγκεκριμένα, η περιέλιξη πεδίου έχει σχεδιαστεί, για να παράγει ένα πεδίο διακένου αέρα του ίδιου αριθμού πόλων και χωρικής κατανομής (συνήθως ημιτονοειδούς), με αυτό που παράγεται από την περιέλιξη του στάτη. Ο ρότορας μπορεί

να είναι λίγο-πολύ κυλινδρικός, με το τύλιγμα πεδίου κατανεμημένο σε σχισμές ή μπορεί να έχει προεξέχοντες πόλους, γύρω από τους οποίους η περιέλιξη είναι συγκεντρωμένη.



22 Εικόνα 3.2: Ρότορες για σύγχρονους κινητήρες. (Α) 2-πολικός κυλινδρικός, με πηνία πεδίου κατανεμημένα σε σχισμές, (Β) 2-πολικός προεξέχων πόλος με συγκεντρωμένη περιέλιξη πεδίου (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

Ένας κινητήρας κυλινδρικού ρότορα έχει μικρή ή καθόλου μαγνητική ροπή (αυτοευθυγραμμιζόμενη) (συζητείται αργότερα), επομένως μπορεί να παράγει ροπή μόνο όταν τροφοδοτείται ρεύμα στον ρότορα. Από την άλλη πλευρά, ο τύπος του προεξέχοντος πόλου παράγει επίσης κάποια ροπή ακόμη και όταν η περιέλιξη του ρότορα δεν έχει ρεύμα. Και στις δύο περιπτώσεις, ωστόσο, η ισχύς «διέγερσης» του ρότορα είναι σχετικά μικρή, αφού όλη η μηχανική ισχύς εξόδου παρέχεται από την πλευρά του στάτορα.

Παράλληλα, οι διεγερμένοι κινητήρες ρότορα χρησιμοποιούνται σε μεγέθη που κυμαίνονται από μερικά kW έως πολλά MW. Ουσιαστικά, είναι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας, αλλά και ως κινητήρες. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι επαγωγικοί κινητήρες τυλιγμένου ρότορα μπορούν επίσης να λειτουργούν συγχρονισμένα τροφοδοτώντας τον ρότορα με d.c. ρεύμα.

Όπως θα δούμε αργότερα, ένα πλεονέκτημα του τύπου διεγερμένου ρότορα είναι ότι ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ελεγχθεί σε μεγάλο εύρος, μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης του δρομέα.

3.1.3 Κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

Αναντίρρητα, οι σύγχρονες μηχανές που εξετάστηκαν μέχρι τώρα απαιτούν δύο ηλεκτρικές παροχές, η πρώτη για την τροφοδοσία του πεδίου/διέγερση και η δεύτερη για την τροφοδοσία του στάτορα.

Οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες, έχουν μαγνήτες συνδεδεμένους στον ρότορα για να παρέχουν το πεδίο, και επομένως απαιτείται μόνο παροχή στάτορα. Η αρχή απεικονίζεται για 4-πολικούς επιφανειακούς και 10-πολικούς εσωτερικούς τύπου σ.

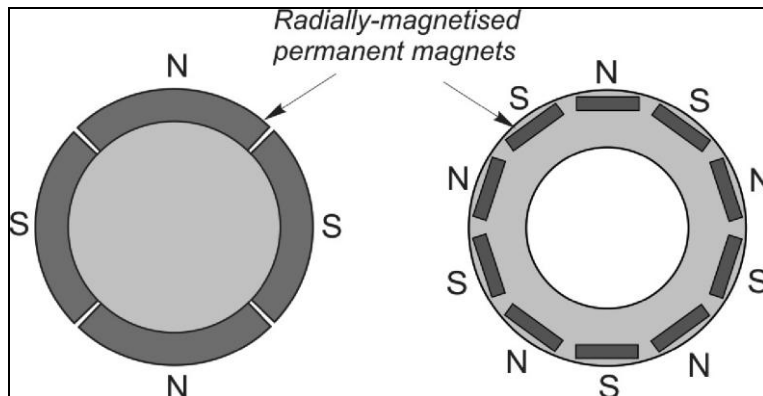
Οι κινητήρες αυτού του είδους έχουν τυπική απόδοση που κυμαίνεται από περίπου 100 W έως ίσως 500 kW, αν και έχουν γίνει σημαντικά υψηλότερα τα επίπεδα. Επιπλέον, τα πλεονεκτήματα του τύπου μόνιμου μαγνήτη είναι ότι δεν απαιτείται παροχή για τον ρότορα και η κατασκευή του ρότορα μπορεί να είναι στιβαρή και αξιόπιστη. Αντίθετα, το μειονέκτημα είναι ότι η διέγερση είναι εγγενώς σταθερή, άρα ο σχεδιαστής πρέπει είτε να επιλέξει το σχήμα και τη διάταξη των μαγνητών, ώστε να ταιριάζει με τις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου φορτίου είτε να αναζητήσει έναν συμβιβασμό γενικής χρήσης. Αξίζει να τονιστεί ότι ο έλεγχος του συντελεστή ισχύος μέσω διέγερσης φυσικά δεν είναι πλέον δυνατός. Εντός αυτών των περιορισμών, ο σύγχρονος κινητήρας χωρίς ψήκτρες συμπεριφέρεται σχεδόν με τον ίδιο τρόπο, όπως ο αδερφός του, ο κινητήρας διεγερμένου ρότορα.

3.1.4 Κινητήρες αντίστασης.

Ο κινητήρας αντίστασης είναι αναμφισβήτητα ο απλούστερος σύγχρονος κινητήρας από όλους, ο ρότορας αποτελείται απλώς από ένα σύνολο ελασμάτων διαμορφωμένων, έτσι ώστε να τείνει να ευθυγραμμιστεί με το πεδίο που παράγεται από τον στάτορα. Το πεδίο επιβάλλεται αφαιρώντας το σίδηρο μέσα στον ρότορα, έτσι ώστε η ροή να καθοδηγείται κατά μήκος της επιθυμητής διαδρομής, η τελευταία αφορά έναν κινητήρα που τροφοδοτείται με μετατροπέα, όπου δεν απαιτείται κλωβός εκκίνησης. Όλοι αυτοί οι τύποι ρότορα φαίνεται ότι έχουν «εξέχοντες» πόλους. Ο ρότορας θα τείνει να ευθυγραμμίζεται με το πεδίο, και ως εκ τούτου είναι σε θέση να παραμένει συγχρονισμένος με το οδεύον πεδίο που έχει ρυθμιστεί από την τριφασική περιέλιξη στον στάτορα με τον ίδιο σχεδόν τρόπο, όπως ένας ρότορας μόνιμου μαγνήτη.

Οι πρώτοι κινητήρες αντίστασης ήταν πάντα ένα ή δύο μεγέθη πλαισίου μεγαλύτεροι από έναν επαγωγικό κινητήρα, για δεδομένη ισχύ και ταχύτητα και είχαν χαμηλό συντελεστή ισχύος και κακή απόδοση έλξης. Ως αποτέλεσμα, δεν ευνοήθηκαν,

εκτός από ορισμένες ειδικές εφαρμογές, όπως μηχανήματα κλωστοϋφαντουργίας, όπου χρησιμοποιήθηκαν μεγάλοι αριθμοί φθινών συγχρονισμένων κινητήρων που κινούνταν από έναν μετατροπέα μεταβλητής συχνότητας.

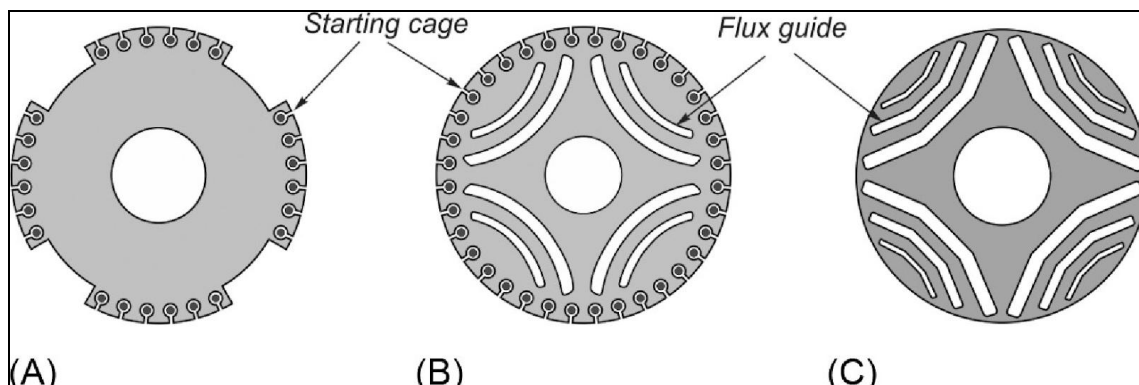


23 Εικόνα 3.3: Σύγχρονοι ρότορες κινητήρα μόνιμου μαγνήτη: 4 πόλων (αριστερά) και 10 πόλων (δεξιά) (Hughes, A., & Drury, B., 2019).

Συμπερασματικά, οι κινητήρες αντίστασης είναι τώρα πολύ πιο προηγμένοι, αν και η βασική τους απόδοση εξακολουθεί να υστερεί σε σχέση με τον επαγωγικό κινητήρα όσον αφορά την ισχύ εξόδου, τον συντελεστή ισχύος και την απόδοση. Πρόσφατα, υπάρχει ανανεωμένο ενδιαφέρον για τους ρότορες που εκμεταλλεύονται τόσο τον μόνιμο μαγνήτη όσο και τη ροπή μαγνητικής αντίστασης.

3.1.5 Κινητήρες υστέρησης.

Είναι φανερό ότι οι περισσότεροι κινητήρες μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν με επιθεώρηση όταν αποσυναρμολογούνται, απεναντίας ο κινητήρας υστέρησης είναι πιθανό να μπερδέψει, όποιον δεν τον έχει συναντήσει πριν. Συγκεκριμένα, ο ρότορας αποτελείται απλώς από έναν κύλινδρο με λεπτό τοίχωμα που μοιάζει με χάλυβα, ενώ ο στάτορας έχει μια συμβατική μονοφασική ή τριφασική περιέλιξη. Ενδείξεις πολύ αδύναμου μαγνητισμού μπορεί απλώς να είναι ανιχνεύσιμες στον ρότορα, αλλά δεν υπάρχει κανένας υπαινιγμός οποιουδήποτε κρυφού μαγνήτη καθαυτού, και σίγουρα κανένα σημάδι κλωβού. Παρόλα αυτά, ο κινητήρας λειτουργεί ομαλά με ταχύτητα και σταθεροποιείται στην σύγχρονη ταχύτητα, χωρίς σημάδια ξαφνικής μετάβασης από την επαγωγική στη σύγχρονη λειτουργία.



24 Εικόνα 3.4: 4-πολικόι ρότορες κινητήρα αντίστασης (Hughes, A., & Drury, B., 2019)

Παράλληλα, αυτοί οι κινητήρες (η λειτουργία των οποίων είναι αρκετά περίπλοκη) βασίζονται κυρίως στις ειδικές ιδιότητες του χιτωνίου του δρομέα, το οποίο είναι κατασκευασμένο από σκληρό χάλυβα που παρουσιάζει έντονη μαγνητική υστέρηση. Κανονικά στις μηχανές στοχεύουμε να ελαχιστοποιήσουμε την υστέρηση στα μαγνητικά υλικά, αλλά σε αυτούς τους κινητήρες το φαινόμενο αυτό τονίζεται σκόπιμα. Υπάρχει επίσης κάποια ενέργεια επαγωγικού κινητήρα, κατά τη φάση εκκίνησης, με αποτέλεσμα η ροπή να παραμένει περίπου σταθερή σε όλες τις ταχύτητες.

Είναι φανερό ότι οι μικροί κινητήρες υστέρησης χρησιμοποιούνταν κάποτε εκτενώς σε εξοπλισμό γραφείου, ανεμιστήρες κ.λπ. Επιπλέον, η σχεδόν σταθερή ροπή κατά τη διάρκεια της εκκίνησης και το πολύ μέτριο ρεύμα εκκίνησης (ίσως 1,5 φορές το ονομαστικό ρεύμα) σημαίνει ότι είναι κατάλληλοι και για φορτία υψηλής αδράνειας, όπως γυροσκόπιο πυξίδες και μικρές φυγόκεντρες. Τέλος, οι κινητήρες υστέρησης χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες περιοχές, άρα δεν θα τους εξετάσουμε περαιτέρω.

3.2 Βασικές εφαρμογές ηλεκτρικών κινητήρων AC.

3.2.1 Ηλεκτροκίνηση.

Προχωρώντας διαπιστώνουμε ότι μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτρικών κινητήρων έχει χρησιμοποιηθεί για ενσωμάτωση σε ηλεκτρικά οχήματα.

Ιστορικά, οι ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος ήταν οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι, αλλά οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία έκαναν τους ηλεκτρικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος πολύ πιο κατάλληλους. Οι

ηλεκτροκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη αξιοπιστία, μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και λιγότερη ανάγκη συντήρησης. Μεταξύ της ομάδας ηλεκτρικών κινητήρων AC, ο επαγωγικός κινητήρας και ο κινητήρας AC χωρίς ψήκτρες μόνιμου μαγνήτη είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι για ενσωμάτωση σε ηλεκτρικά οχήματα.

Οι επαγωγικοί κινητήρες χαρακτηρίζονται από απλή κατασκευή, αξιοπιστία και χαμηλή συντήρηση, χαμηλό κόστος και ικανότητα λειτουργίας σε εχθρικά περιβάλλοντα. Παρόλα αυτά, χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, λόγω των απωλειών τους στον ρότορα.

Οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης έχουν κερδίσει μεγάλο ενδιαφέρον, ως υποψήφιοι για εφαρμογές σε ηλεκτρικά οχήματα, λόγω της απλής και στιβαρής κατασκευής τους, του απλού ελέγχου και της ικανότητας λειτουργίας εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας. Ωστόσο, αυτοί οι κινητήρες παρουσιάζουν επίσης αρκετά μειονεκτήματα: έχουν προβλήματα θορύβου και χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

Επεκτείνοντας το συλλογισμό μας, θα λέγαμε ότι το πιο ελκυστικό για μελλοντική εφαρμογή στα ηλεκτρικά οχήματα θα είναι ένας κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς ψήκτρες μόνιμου μαγνήτη από τη διαμόρφωσή του (άλλοι λόγοι που υποστηρίζουν αυτήν την επιλογή είναι οι εξής: υψηλή ροπή ($T = 98,7 \text{ Nm}$), υψηλή απόδοση ($\eta = 86,8 \%$). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τους τροχούς του οχήματος (αυτό το σύστημα κίνησης δεν έχει σύστημα μετάδοσης και επομένως δεν έχει μηχανικές απώλειες). Εκτός από τον περιγραφόμενο τύπο κινητήρων, επιτρέπει τον σχεδιασμό εναλλακτικών κινητήρων για μελλοντική ενσωμάτωση σε ηλεκτρικά οχήματα, όπως για παράδειγμα, κινητήρες αξονικής ροής. Ωστόσο, αναπτύχθηκε με βάση ορισμένες προϋποθέσεις που πρέπει να βελτιωθούν. Μία από αυτές τις προϋποθέσεις σχετίζεται με τη θερμική ανάλυση των κινητήρων, καθώς θεωρήθηκε ότι οι κινητήρες είναι αερόψυκτοι.

3.2.2 Βιομηχανικές εφαρμογές.

Οι συμβατικοί γερανοί που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα, χρησιμοποιούν κινητήρα επαγωγής δακτυλίου ολίσθησης, του οποίου οι περιελίξεις του ρότορα συνδέονται με την αντίσταση ισχύος σε 4 έως 5 βήματα μέσω επαφών ισχύος. Η αντιστροφή γίνεται αλλάζοντας τη σειρά φάσεων της τροφοδοσίας του στάτη, μέσω των

επαφών γραμμής. Το φρενάρισμα επιτυγχάνεται με λειτουργία βουλώματος. Επιπλέον, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε ένα σύστημα ελέγχου γερανού, χρησιμοποιώντας μεταβλητή τάση μεταβλητής συχνότητας και έναν προγραμματιζόμενο ελεγκτή. Το κύριο πλεονέκτημα που επιτυγχάνεται είναι η ακριβής τοποθέτηση του αντικειμένου, η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με αναγεννητική πέδηση, η αυξημένη διάρκεια ζωής του κινητήρα με την εφαρμογή χαμηλής τάσης στην εκκίνηση και κατά συνέπεια η μείωση του ρεύματος βιασύνης.

Ένας γερανός με τις ακόλουθες λεπτομέρειες έχει ληφθεί για πειραματισμό με ρυθμιζόμενη κίνηση συχνότητας.

2 Πίνακας 3.1: Λεπτομέρειες γερανού.

| Χαρακτηριστικά | Τιμή |
|---------------------------|------------------|
| Κύριος ανυψωτήρας | 30 τόνοι |
| Βοηθητικός ανυψωτήρας | 5 τόνοι |
| Συλλέκτης ρεύματος | Διάταξη συλλέκτη |
| Ταχύτητα | |
| Ταχύτητα κύριος ανυψωτήρα | 8 m/min |
| Ταχύτητα βοηθ. ανυψωτήρα | 20 m/min |

Ειδικότερα, η βασική απαίτηση των μηχανισμών κίνησης γερανού είναι:

- η αμφίδρομη κίνηση των κινητήρων,
- οι εγκαταστάσεις πέδησης με ανάκτηση,
- η ελεγχόμενη επιτάχυνση για τη μείωση της ταλάντευσης του φορτίου,
- η ακριβής τοποθέτηση του φορτίου,
- η ροπή σε μηδενική ταχύτητα και
- τα χαρακτηριστικά ασφαλείας.

Παράλληλα, οι σύγχρονοι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των κυλίνδρων βάσης τραχύνσεως σε ένα ελασματοουργείο, όταν η απαίτηση ισχύος είναι πολύ υψηλή και η ταχύτητα κύλισης είναι χαμηλή. Για παράδειγμα, οι κινητήρες της χαλυβουργίας είναι σύγχρονοι κινητήρες. Αυτοί οι κινητήρες κινούνται με κυκλομετατροπέα και έχουν συχνότητα εξόδου 5-15 Hz.

Σημαντικά είναι τα ακόλουθα τεχνολογικά οφέλη που προέκυψαν από αυτές τις μονάδες:

- i) Η ρύθμιση της ταχύτητας είναι ακριβής.
- ii) Το σύστημα ελέγχου έχει υψηλή δυναμική απόκριση.
- iii) Η χωρητικότητα υπερφόρτωσης του ηλεκτροκινητήρα είναι πολύ υψηλή και, ως εκ τούτου, ο αριθμός σκονών λόγω υπερβολικού φορτίου είναι πολύ μικρότερος.

A. Μονάδες συσσωμάτωσης.

Οι μονάδες συσσωμάτωσης διαθέτουν δύο εξαμιστήρες για την αναρρόφηση αέρα μέσω της μηχανής πυροσυσσωμάτωσης. Η πίεση αναρρόφησης είναι περίπου 1500 mm. Το εγκατεστημένο ηλεκτρικό φορτίο είναι 21 MW. Η μέση κατανάλωση ενέργειας στην ονομαστική ισχύ είναι 13-14 MW, εκ των οποίων τα 8 MW καταναλώνονται στους εξαμιστές. Η συχνότητα της γραμμής ισχύος κυμαίνεται από 49 έως 53 Hz. Όταν η συχνότητα είναι υψηλή (ας πούμε 53 Hz), η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται στις 1060 RPM και η ταχύτητα της λεπίδας αυξάνεται στις 1442 RPM. Με αυτή την ταχύτητα αυξάνεται το φορτίο στον κινητήρα της εξάτμισης και κατά συνέπεια το ρεύμα του στάτη. Όταν το ρεύμα αυξάνεται πάνω από το ασφαλές όριο, ο κινητήρας σβήνει. Αυτό το γεγονός προκαλεί καθυστέρηση περίπου 1 ώρας. Κάθε σύγχρονος κινητήρας έχει ονομαστική ισχύ 4670 kVA, στάτης 11kV, 244 A, ρότορας 78 V, 295 A, $\text{Cos}\phi = 0,9$. Κατά τη διάρκεια της υψηλής συχνότητας, το φορτίο στο μηχάνημα μειώνεται κλείνοντας τον αποσβεστήρα στη γραμμή αναρρόφησης.

Επιπλέον, αυτοί οι σύγχρονοι κινητήρες διεγείρονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντλείται ρεύμα οδηγού και ο συνολικός συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης να είναι πιο κοντά στη μονάδα.

Τέλος, μια κίνηση μεταβλητής συχνότητας που ταιριάζει σε αυτή τη χωρητικότητα του κινητήρα θα βοηθήσει στον έλεγχο της αναρρόφησης μεταβάλλοντας τη συχνότητα τροφοδοσίας.

B. Συμπιεστές οξυγόνου της μονάδας χάλυβα.

Η δυναμικότητα της μονάδας οξυγόνου είναι 700 τόνοι/ημέρα. Η μονάδα αποτελείται από δύο μονάδες διαχωρισμού αέρα, η καθεμία χωρητικότητας 350 τόνοι/ημέρα. Επίσης, υπάρχουν δύο αεροσυμπιεστές για δύο μονάδες διαχωρισμού αέρα. Κάθε αεροσυμπιεστής κινείται από σύγχρονο κινητήρα ισχύος 11 kV, 6 MW, μολύβδου 0,9 pf. Παράλληλα, υπάρχουν τρεις συμπιεστές οξυγόνου, που κινούνται από σύγχρονο

κινητήρα ισχύος 11 kV, 1700 kW, μολύβδου 0,9 pf. Εκτός από αυτά, υπάρχουν δύο συμπιεστές αζώτου που κινούνται με επαγωγικό κινητήρα ισχύος 11 kV, 1320 kW. Σε υψηλότερη συχνότητα πάνω από 50 Hz, η εγκατάσταση γίνεται ασταθής.

Αντίθετα, η εγκατάσταση γίνεται σταθερή με την αλλαγή εξαιρετισμού και με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ειδική κατανάλωση ρεύματος. Συγκεκριμένα, δεν υπάρχει πρόβλεψη για ρύθμιση της ταχύτητας των συμπιεστών σε υψηλότερη συχνότητα. Άρα, οι κινητήρες μεταβλητής συχνότητας που ταιριάζουν σε αυτές τις χωρητικότητες του κινητήρα, θα βοηθήσουν στον έλεγχο της διαδικασίας, μεταβάλλοντας τη συχνότητα τροφοδοσίας.

Γ. Ειδικές εφαρμογές

Εκτός από το σύστημα μετάδοσης κίνησης, υπάρχουν αρκετές ειδικές εφαρμογές όπου τα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε εργοστάσια χάλυβα. Μερικές από αυτές περιγράφονται παρακάτω:

A. Ηλεκτρομαγνητικός αναδευτήρας

Κατά τη χύτευση, ο υγρός χάλυβας αναδεύεται για να βελτιωθεί η ποιότητα του προϊόντος. Έτσι, ένας αναδευτήρας λειτουργεί σαν στάτορας ενός κινητήρα AC. Τροφοδοτείται από τροφοδοτικό 3 φάσεων ή 2 φάσεων και δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο προκαλεί ροπή στον υγρό χάλυβα που περνά μέσα από το καλούπι. Αυτό σημαίνει ότι ο υγρός χάλυβας, λειτουργεί σαν ρότορας ενός κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος και περιστρέφεται γύρω από τον άξονα των χυτών προϊόντων, σε ένα επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση χύτευσης.

Με άλλα λόγια, ένας περιστρεφόμενος αναδευτήρας επάγει αξονικές συμμετρικές δυνάμεις, δημιουργώντας μια ροπή στρέψης σε όλο το τμήμα της δεξαμενής υγρών, ανεξάρτητα από το μέγεθος της, ακόμα και αν ο κλώνος δεν είναι κεντραρισμένος μέσα στον αναδευτήρα. Από αυτό προκύπτει ότι όλες οι δυνάμεις επάγονται σε ολόκληρο το τμήμα της δεξαμενής υγρών και κατά συνέπεια η πλήρης ισχύς που προκαλείται εντός της δεξαμενής υγρών συμβάλλει στην ανάδευση του υγρού χάλυβα. Η συχνότητα παροχής ποικίλλει από 3-10 Hz ανάλογα με τον αναδευτήρα

Το σχέδιο για τη δημιουργία του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου συνίσταται στη μετατροπή της ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος σε ισχύ συνεχούς ρεύματος και

στη συνέχεια της ισχύος συνεχούς ρεύματος σε ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος μεταβλητής συχνότητας. Οι κύριες μονάδες είναι:

- Μετασηματιστής μετατροπέα.
- Γέφυρα διόδου για AC σε DC.
- Γέφυρα μετατροπέα για DC σε AC.

Τέλος, ένα σύστημα αναδευτήρα εγκατεστημένο σε μονάδα συνεχούς χύτευσης έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές.

Μετατροπέας: Είσοδος 415 V + 10%.

Έξοδος 350 V, 180 kVA, 400 A.

Πηνίο: 100 Kva, 400 A.

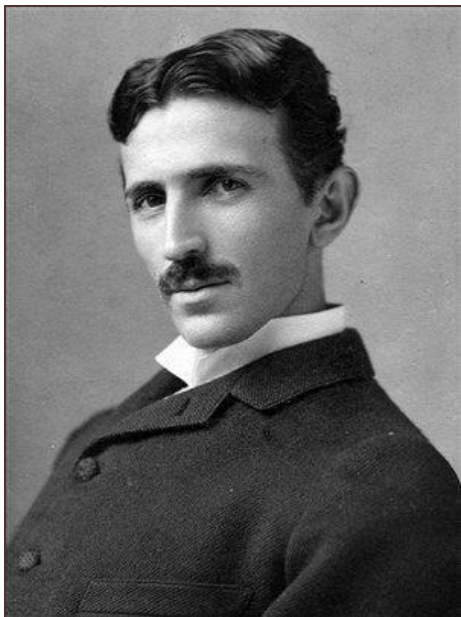
Κεφάλαιο 4: Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας.

Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας ή επαγωγικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος, εφευρέθηκε από τον Νικόλα Τέσλα το 1888 και έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της ηλεκτρικής βιομηχανίας. Πλέον χρησιμοποιείται από εκατομμύρια χρήστες σε βιομηχανικές εφαρμογές και σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές. Η ιστορία της εξέλιξης του επαγωγικού κινητήρα, αποτελεί ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα προόδου της μηχανικής. Ας σημειωθεί ακόμη, ότι ένας σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας ισχύος 100 hp έχει το ίδιο μέγεθος με έναν ηλεκτρικό κινητήρα του 1897, με ισχύς μόλις 7.5 hp.

4.1 Ιστορική αναδρομή.

Ο Νικόλα Τέσλα (Nikola Tesla, 10 Ιουλίου 1856 - 7 Ιανουαρίου 1943) ήταν Σερβοαμερικανός εφευρέτης και μηχανικός. Γεννήθηκε στο Σμίλιαν στην περιοχή Λίκα της σημερινής Κροατίας, το οποίο ανήκε στη Σερβική κοινότητα της Αυστριακής Αυτοκρατορίας. Τον Ιούνιο του 1884, αποφάσισε να μετακομίσει στη Νέα Υόρκη και να εργαστεί για τον Τόμας Έντισον. Ο Τέσλα μετά από κάποιες αποτυχημένες επιχειρηματικές ενέργειες βρίσκει νέο χρηματοδότη για τα πειράματά του το 1887. Ο νέος χρηματοδότης ήταν ο διευθυντής της τηλεγραφικής εταιρείας Γουέστερν Γιούνιον, Α. Μπράουν, ο οποίος του έστησε το εργαστήριο του, λίγα τετράγωνα πιο πάνω από το εργαστήριο του Έντισον, στην οδό Λίμπερτυ, στον αριθμό 89. Τον Οκτώβριο του 1887 η πατέντα του με το όνομα Πολυφασικό Σύστημα Τέσλα κατοχυρώθηκε στην Αμερικανική Επιτροπή Ευρεσιτεχνιών.

Το 1888 ο Τέσλα έδωσε μια διάλεξη με θέμα «Το Νέο Σύστημα Κινητήρων και Μετασχηματισμών Εναλλασσόμενου Ρεύματος», στο Αμερικανικό Ινστιτούτο Ηλεκτρομηχανικής, η οποία έδωσε το έναυσμα στον βιομήχανο Τζωρτζ Γουέστινχαουζ (1846-1914) να συνεργαστεί μαζί του. Η μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων, το Τέσλα, ονομάστηκε προς τιμήν του στο Γενικό Συνέδριο Μέτρων και Σταθμών του Παρισιού το 1960 (Carlson, W. B., 2013).

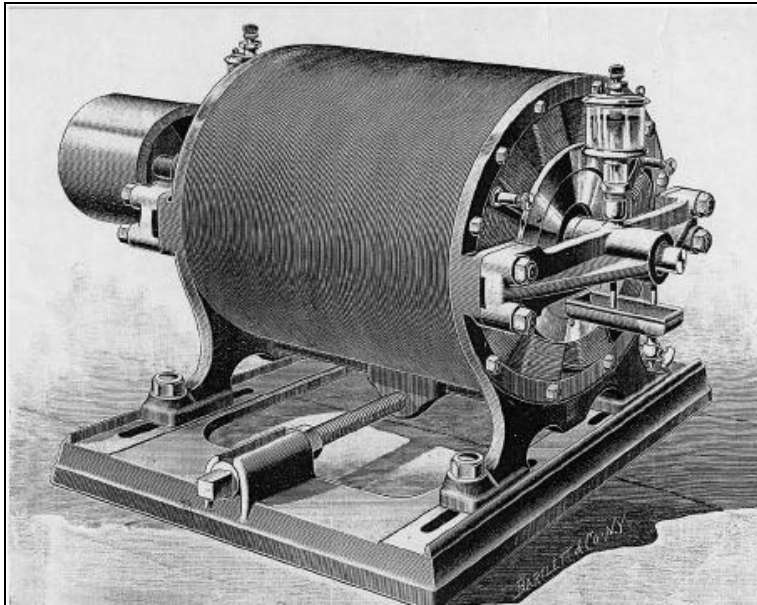


25 Εικόνα 4.1: Ο μηχανικός και εφευρέτης του επαγωγικού κινητήρα Νικόλα Τέσλα (Carlson, W. B., 2013).

Ο Τέσλα γνώριζε ότι ένα κομμάτι μετάλλου έλκεται και ακολουθεί έναν κινούμενο μαγνήτη και ότι το μαγνητικό πεδίο είναι δυνατό να μετακινηθεί κατά τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα πηνίο, καθώς το ρεύμα σε ένα γειτονικό πηνίο φθίνει. Αυτό σημαίνει ότι με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος εκτός χρονικής φάσης στα διαδοχικά πηνία ενός κινητήρα, το μαγνητικό πεδίο θα περιστραφεί.

Η εργασία του Τέσλα τον οδήγησε να υποβάλει αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τον Οκτώβριο του 1887, δίπλωμα που του χορηγήθηκε τον Μάιο του 1888. Παρουσίασε την εργασία του ενώπιον του Αμερικανικού Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων Μηχανικών (AIEE), στην οποία περιέγραψε τρεις εκδοχές της εφεύρεσής του. Σε καθεμία από τις εκδοχές υπήρχε ένας δακτυλιοειδής στάτορας με τέσσερις πόλους. Στην πρώτη μορφή, ο ρότορας είχε επίσης τέσσερις πόλους, σχηματίζοντας έναν κινητήρα μαγνητικής αντίστασης που δεν εκκινούσε αυτόματα, αλλά λειτουργούσε με συγχρονισμένη ταχύτητα. Η δεύτερη μορφή είχε περιέλιξη στο ρότορα, σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο έναν επαγωγικό κινητήρα, που ξεκινούσε και λειτουργούσε ελαφρώς ασύγχρονα. Η τρίτη μορφή ήταν ένας σύγχρονος κινητήρας, που προέκυψε με την απευθείας παροχή ρεύματος στην περιέλιξη του ρότορα. Ο Τζωρτζ Γουέστινχαουζ έπειτα, αγόρασε αμέσως τις πατέντες του Τέσλα και τον προσέλαβε για να τις αναπτύξει περαιτέρω.

Στη συνέχεια, ο Γουέστινχαουζ ανέθεσε στον Σκοτ να συνεργαστεί με τον Τέσλα. Σύντομα αντικατέστησαν το στάτορα, με τέσσερα πηνία σε σχήμα αυλού, αφήνοντας ένα μικρό διάκενο αέρα μεταξύ του στάτορα και του δακτυλίου. Με αυτό τον τρόπο, η εταιρία του Γουέστινχαουζ είχε επιτύχει τη δημιουργία ενός επαγωγικού κινητήρα για πρακτικές εφαρμογές μέχρι το 1892.



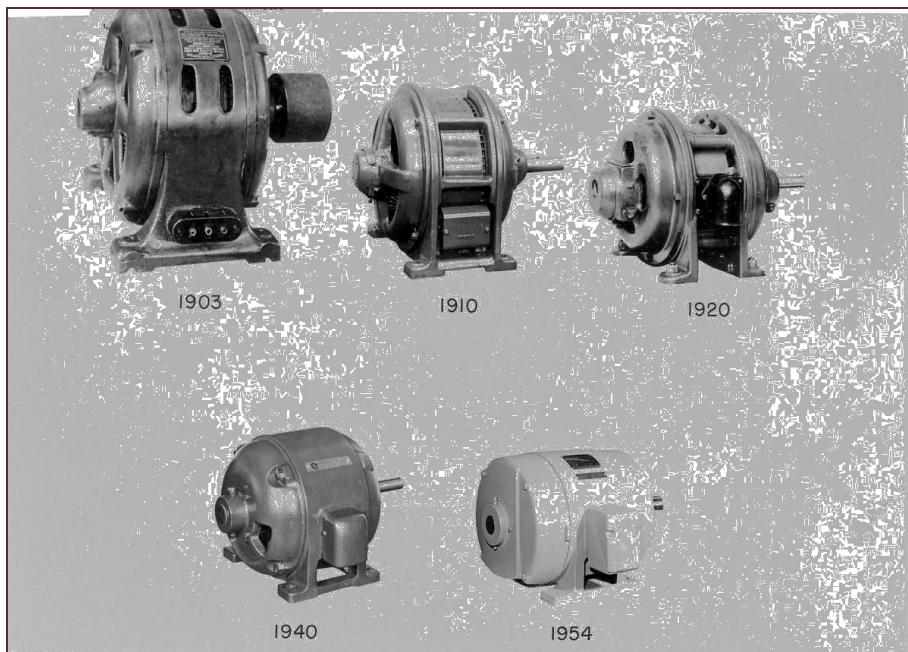
26 Εικόνα 4.2: Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας του Τέσλα (P. L. Alger & R. E. Arnold, 1976).

Ωστόσο, η μόνη διαθέσιμη ισχύς την εποχή εκείνη ήταν το μονοφασικό ρεύμα υψηλής συχνότητας. Για την προώθηση ενός πρακτικού πολυφασικού συστήματος, η Γουέστινχαουζ παρουσίασε έναν επαγωγικό κινητήρα δύο φάσεων 220V και ιπποδύναμης 300 ίππων στην Παγκόσμια Έκθεση του Σικάγου το 1893, που τροφοδοτούνταν από ένα ζεύγος μονοφασικών εναλλακτών 60 Hz και 500 ίππων στον ίδιο κινητήριο άξονα, αλλά μετατοπισμένοι κατά 90°, έτσι ώστε να παρέχουν ισχύ δύο φάσεων. Ο κινητήρας είχε 12 πόλους με μια κατανεμημένη διφασική κύρια περιέλιξη, η οποία περνούσε μέσω των μερικώς κλειστών σχισμών του ρότορα. Ο στάτορας είχε επίσης μερικώς κλειστές σχισμές, με έναν αγωγό του ηλεκτρισμού ανά σχισμή, συνδεδεμένο σε δύο δευτερεύοντα κυκλώματα υπό γωνία 90° μεταξύ τους. Κατά την εκκίνηση, αυτά τα δευτερεύοντα κυκλώματα έκλειναν μέσω μιας σειράς ράβδων άνθρακα μεγάλου μήκους, που βραχυκύκλωναν όταν ο κινητήρας ανέβαζε ταχύτητα.

Ύστερα από πρόταση του Λέιμ, η Γουέστινχαουζ ανέπτυξε στη συνέχεια μια γραμμή πολυφασικών εναλλακτών 60 Hz, για να καλύψει την παροχή σε ηλεκτρική ενέργεια μιας γραμμής κινητήρων με συχνότητα 60 Hz που εισήχθη το 1893. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες είχαν περιελίξεις στο ρότορα, για να αποφευχθεί η δυσκολία χειρισμού των μεγάλων δευτερευόντων ρευμάτων.

Το 1891 η εταιρία Τόμσον-Χιούστον άρχισε να εργάζεται με τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες υπό τη διοίκηση των Ρέιστ και Φόστερ. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες είχαν σιδερένια πλέγματα μέσα στο ρότορα, συνδεδεμένα με τις περιελίξεις του ρότορα και έναν φυγοκεντρικό διακόπτη για βραχυκύκλωμα των πλεγμάτων. Αν και ένα μεγάλο ποσοστό των πρώτων κινητήρων ήταν διφασικοί, σύντομα υιοθετήθηκε και από τις δύο εταιρείες το πιο οικονομικό τριφασικό σύστημα. Η μετάβαση από το διφασικό στο τριφασικό σύστημα υποβοηθήθηκε από την εφεύρεση του Σκοτ, δηλαδή τη σύνδεση τύπου T μεταξύ δύο μετασχηματιστών για την παροχή ισορροπημένης τριφασικής ισχύος από διφασικά συστήματα.

Η απουσία δακτυλίων συλλογής έδωσε στον κινητήρα Τόμσον-Χιούστον ένα σημαντικό πλεονέκτημα στις πωλήσεις έναντι του κινητήρα Γουέστινχαουζ, ο οποίος είχε σχεδιαστεί με την κύρια περιέλιξή του στον ρότορα. Ως απάντηση στο πρόβλημα, ο Λέιμ της εταιρίας Γουέστινχαουζ επινόησε την ραβδοειδείς περιέλιξη, που αργότερα ονομάστηκε βραχυκυκλωμένος δρομέας, και το τοποθέτησε στον ρότορα. Η Τζένεραλ Ελέκτρικ ακολούθησε σύντομα το παράδειγμά της Γουέστινχαουζ και πλέον - με την υπογραφή κατάλληλης συμφωνίας το 1896 - και οι δύο εταιρείες ήταν ελεύθερες να χρησιμοποιούν το σχέδιο που θεωρούν καλύτερο, χωρίς να προσφεύγουν σε διπλώματα ευρεσιτεχνίας.



27 Εικόνα 4.3: Σχέδια επαγωγικών τριφασικών κινητήρων της εταιρείας General Electric (P. L. Alger & R. E. Arnold, 1976).

4.2 Βασικά χαρακτηριστικά και αρχή λειτουργίας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

Η βασική αρχή λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά ως εξής: το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στις περιελίξεις του στάτορα δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μια ροή, που ονομάζεται κύρια ροή ή ροή στάτη. Η συγκεκριμένη ροή διέρχεται από το διάκενο αέρα και σταματά στους αγωγούς των περιελίξεων του ρότορα. Κατά συνέπεια, μια ηλεκτρική δύναμη επάγεται στις περιελίξεις του ρότορα και παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο ρέει στις περιελίξεις του ρότορα με αποτέλεσμα να δημιουργείται ροή, που ονομάζεται ροή ρότορα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ροών - ροές στάτορα και ρότορα - οδηγεί στην περιστροφή του κινούμενου μέρους του κινητήρα, δηλαδή του ρότορα. Ο ρότορας λαμβάνει ηλεκτρική ισχύ μέσω της ηλεκτρικής επαγωγής, δηλαδή με τον ίδιο τρόπο που το δευτερεύον σπείρωμα ενός ηλεκτρικού μετασχηματιστή λαμβάνει την ισχύ του από το πρωτεύον σπείρωμα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ένας επαγωγικός κινητήρας θα

μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως “περιστρεφόμενος μετασχηματιστής”, όπου το πρωτεύον σπείρωμα είναι ακίνητο αλλά το δευτερεύον είναι ελεύθερο να περιστρέφεται.

Ανάλογα με την κατασκευή του κυκλώματος του ρότορα υπάρχουν δύο βασικοί τύποι επαγωγικών κινητήρων:

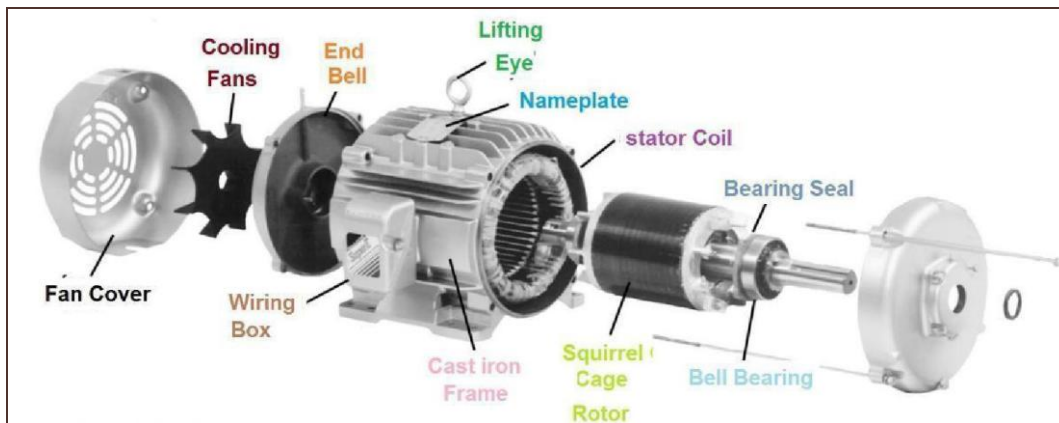
- a. *Επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα:* ο ρότορας είναι απλής κατασκευής και αποτελείται από ράβδους αλουμινίου ή χαλκού με βραχίονες στα άκρα.
- b. *Επαγωγικός κινητήρας δακτυλίου ολίσθησης:* ο ρότορας αποτελείται από τριφασικές περιελίξεις με ακροδέκτες που καταλήγουν σε δακτυλίους ολίσθησης για εξωτερικές συνδέσεις.

Ο επαγωγικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα είναι πιο συνηθισμένος σε σύγκριση με τον κινητήρα δακτυλίου ολίσθησης αφού είναι/απαιτεί:

- i. Στιβαρός: σχεδιάζεται χωρίς ψήκτρες και χωρίς επαφές στον άξονα του ρότορα.
- ii. Απλός στην κατασκευή και επομένως εύκολο να παραχθεί μαζικά.
- iii. Ελάχιστη συντήρηση, εκτός από ορισμένα ρουλεμάν και άλλα μηχανικά μέρη.
- iv. Υψηλής απόδοσης, καθώς ο ρότορας έχει πολύ χαμηλή αντίσταση και επομένως μικρή απώλεια χαλκού.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή επαγωγικών κινητήρων:

- a. Ενεργά υλικά, τα οποία ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες:
 - i. Μαγνητικά υλικά (χάλυβας 0.5 mm).
 - ii. Ηλεκτρικά υλικά (χάλκινα καλώδια, μονωτικά υλικά, ακραίοι δακτύλιοι, δακτύλιοι ολίσθησης, ψήκτρες και καλώδια μολύβδου).
- b. Κατασκευαστικά εξαρτήματα, όπως πλαίσιο, άξονας, ρουλεμάν και ανεμιστήρας.
Τα παραπάνω εξαρτήματα εμφανίζονται στο σχήμα 1.

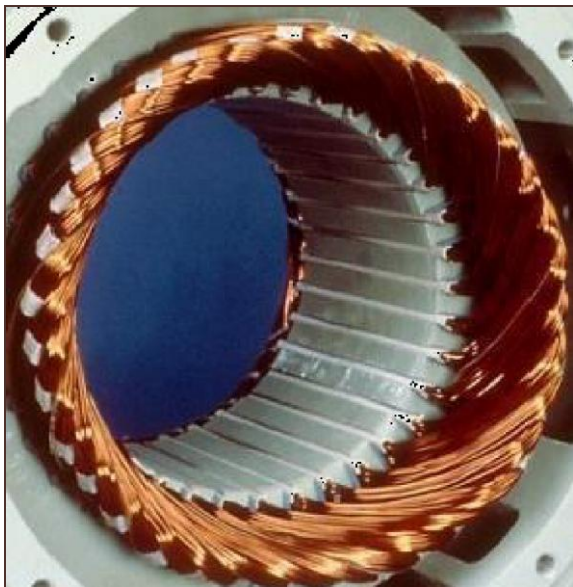


28 Εικόνα 4.4: Βασικά μέρη ενός επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα (Al Kadhim, S.A. S., 2020).

4.2.1 Κατασκευή στάτορα και ρότορα.

Ο στάτορας, ή αλλιώς στάτης, αποτελείται από πολλά λεπτά ελάσματα – πάχους 0,5 mm - πυριτικού χάλυβα, στα οποία, αφού δημιουργηθούν οπές, συσφίγγονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν έναν κοίλο κύλινδρο με υποδοχές, ο οποίος είναι ο πυρήνας του στάτορα.

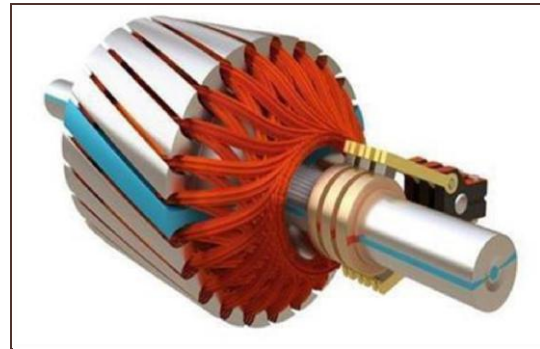
Σε αυτές τις υποδοχές εισάγονται κατάλληλα πηνία, κατασκευασμένα από μονωμένα σύρματα. Κάθε ομάδα πηνίων, μαζί με τον πυρήνα που περιβάλλει, σχηματίζει έναν ηλεκτρομαγνήτη. Παράλληλα, ο αριθμός των πόλων ενός κινητήρα επαγωγής εξαρτάται από την εσωτερική σύνδεση των περιελίξεων του στάτη.



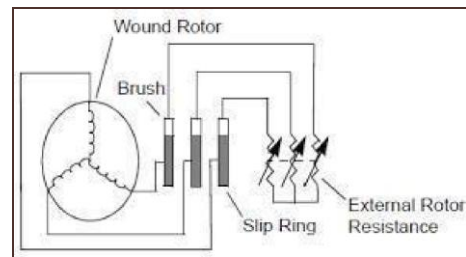
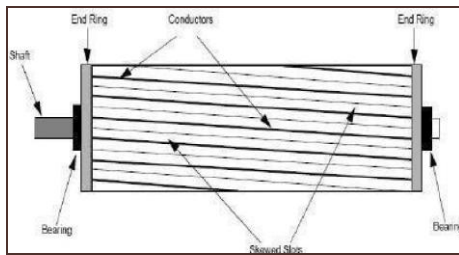
29 *Εικόνα 4.5: Τυπικός στάτης τριφασικού επαγωγικού κινητήρα (Al Kadhim, S.A. S., 2020).*

Επιπρόσθετα, ο ρότορας του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα αποτελείται από πολλές λεπτές ράβδους χάλυβα – πάχους 0,5 mm – ίδιου μήκους, οι οποίες καλύπτονται κατά μήκος της περιφέρειας από λεπτές πλάκες κατασκευασμένες από αλουμίνιο ή χαλκό. Στο συγκεκριμένο τύπο ρότορα, που είναι και ο πλέον δημοφιλής, οι ράβδοι συνδέονται στα άκρα, μηχανικά και ηλεκτρικά, με τη χρήση δακτυλίων. Σχεδόν το 90% των επαγωγικών κινητήρων χρησιμοποιούν ρότορες βραχυκυκλωμένου δρομέα. Οι υποδοχές του ρότορα δεν είναι ακριβώς παράλληλες με τον άξονα – αντιθέτως σχεδιάζονται με μια ελαφρά κλίση. Αυτό συμβαίνει για δύο βασικούς λόγους, αρχικά, με αυτό τον τρόπο, ο κινητήρας λειτουργεί αθόρυβα καθώς μειώνεται ο μαγνητικός θόρυβος και επιπλέον για να βοηθήσουν στη μείωση της τάσης ασφάλισης του ρότορα, καθώς τα γρανάζια του ρότορα τείνουν να παραμένουν κλειδωμένα κάτω από τα γρανάζια του στάτη λόγω της άμεσης μαγνητικής έλξης μεταξύ των δύο. Ο ρότορας τοποθετείται στον άξονα με τη χρήση ρουλεμάν και στα δύο άκρα.

Απεναντίας, ο ρότορας με δακτυλίους ολίσθησης αποτελείται από ένα σύνολο περιελίξεων στις υποδοχές του ρότορα που δεν είναι βραχυκυκλωμένες, αλλά καταλήγουν σε ένα σύνολο δακτυλίων ολίσθησης. Το τυπικό κύκλωμα ενός ρότορα με βραχυκυκλωμένο δρομέα και το τυπικό κύκλωμα ενός ρότορα με δακτυλίους ολίσθησης εμφανίζεται παρακάτω.



30 Εικόνα 4.6: Ρότορας βραχυκυκλωμένου δρομέα και ρότορας με δακτυλίους ολίσθησης (Al Kadhim, S.A. S., 2020).



31 Εικόνα 4.7: Ρότορας βραχυκυκλωμένου δρομέα και ρότορας με δακτυλίους ολίσθησης (Al Kadhim, S.A. S., 2020).

4.2.2 Πινακίδα κατασκευαστή.

Μια τυπική πινακίδα κατασκευαστή ενός επαγωγικού κινητήρα εμφανίζεται παρακάτω.

| <Name of Manufacturer> | | | | | |
|---------------------------|-----------------|-------------|----------------|----------------|--------|
| ORD. No. | 1N4560981324 | | | | |
| TYPE | HIGH EFFICIENCY | | FRAME | 286T | |
| H.P. | 42 | | SERVICE FACTOR | 1.10 | 3 PH |
| AMPS | 42 | | VOLTS | 415 | |
| R.P.M. | 1790 | | HERTZ | 60 | 4 POLE |
| DUTY | CONT | | DATE | 01/15/2003 | |
| CLASS INSUL | F | NEMA DESIGN | B | NEMA NOM. EFF. | 95 |
| <Address of Manufacturer> | | | | | |

32 Εικόνα 4.8: Τυπική πινακίδα κατασκευαστή ενός επαγωγικού κινητήρα.

3 Πίνακας 4.1: Επεξήγηση όρων (Al kadhim, S.A. S., 2020).

Πίνακας 4.1: Επεξήγηση όρων (Al kadhim, S.A. S., 2020).

| Όρος | Περιγραφή |
|------------------|--|
| Volts | Ονομαστική διαφορά δυναμικού τροφοδοσίας |
| Amps | Ονομαστική τιμή ρεύματος τροφοδοσίας |
| HP | Ονομαστική ισχύς |
| RPM | Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής κινητήρα |
| Hertz | Ονομαστική συχνότητα τροφοδοσίας |
| Frame | Εξωτερική διάσταση του κινητήρα με βάση τα πρότυπα NEMA |
| Duty | Κατάσταση φορτίου κινητήρα |
| Date | Ημερομηνία κατασκευής |
| Class insulation | Μονωτική κλάση του κινητήρα. Υποδεικνύει το μέγιστο όριο θερμοκρασίας των υποδοχών του κινητήρα. |

| | |
|----------------|--|
| NEMA design | Υποδεικνύει σε ποια σχεδιαστική κλάση της NEMA ανήκει ο κινητήρας. |
| Service factor | Βαθμός στον οποίο ο κινητήρας μπορεί να υπερφορτωθεί |
| PH | Αριθμός φάσεων του στάτη του κινητήρα |
| Pole | Αριθμός των πόλων στον κινητήρα |
| Y | Υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο οι υποδοχές του ρότορα συνδέονται – σε σχήμα Y ή Δ. |

4.2.3 Κατηγορίες (κλάσεις) μόνωσης.

Οι διαφορετικοί τύποι μόνωσης έχουν τυποποιηθεί και κατηγοριοποιηθεί με βάση την αντοχή τους στη θερμική γήρανση και την αστοχία. Ειδικότερα, τέσσερις κατηγορίες μόνωσης χρησιμοποιούνται κοινώς και συμβολίζονται με τα γράμματα A, B, F και H. Σημαντικό είναι ότι οι θερμοκρασιακές δυνατότητες αυτών των κατηγοριών αυξάνουν κατά 25 °C από τη μια κατηγορία στην άλλη. Η θερμοκρασιακή δυνατότητα κάθε κατηγορίας μόνωσης ορίζεται ως η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να λειτουργήσει η μόνωση, ώστε να παραμείνει αποδοτική για μέση διάρκεια ζωής 20.000 ωρών. Οι κλάσεις και οι θερμοκρασίες τους εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα.

4 Πίνακας 4.2: Κλάσεις μονώσεων κινητήρα (Al Kadhim, S.A. S., 2020).

| Κατηγορία μόνωσης | Θερμοκρασία |
|-------------------|-------------|
| A | 105 °C |
| B | 130 °C |
| F | 155 °C |
| H | 180 °C |

4.2.4 Βαθμός προστασίας κινητήρα.

Ως IP, International Protection, χαρακτηρίζεται ο βαθμός προστασίας του κινητήρα από την εισαγωγή στερεών σωμάτων και νερού. Υποδεικνύεται ως IP*#, όπου με * συμβολίζεται η προστασία απέναντι στην εισαγωγή ξένου σώματος στον κινητήρα και

με # συμβολίζεται η εισαγωγή νερού. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται και επεξηγούνται οι βαθμοί προστασίας.

5 Πίνακας 4.3: Βαθμοί προστασίας (Al Kadhim, S.A. S., 2020).

| * # | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή ξένου σώματος | # | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή νερού |
|-----|--|---|--|
| 0 | Μηδενική προστασία | 0 | Μηδενική προστασία |
| 1 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή ξένων σωμάτων διαμέτρου 50mm ή μεγαλύτερα | 1 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή στάγδην νερού |
| 2 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή ξένων σωμάτων διαμέτρου 12mm ή μεγαλύτερα | 2 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή στάγδην νερού με μέγιστη γωνία 150 μοίρες από τη κάθετο |
| 3 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή ξένων σωμάτων διαμέτρου 2.5 mm ή μεγαλύτερα | 3 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή νερού με ρυθμό πτώσης όπως στη περίπτωση βροχής |
| 4 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή ξένων σωμάτων διαμέτρου 1 mm ή μεγαλύτερα | 4 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή νερού από τυχαίο βρέξιμο |
| 5 | Μερική προστασία απέναντι στην εισαγωγή σκόνης | 5 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή νερού υπό μορφή πίδακα |
| 6 | Ολική προστασία απέναντι στην εισαγωγή σκόνης | 6 | Προστασία απέναντι στην εισαγωγή νερού υπό ειδικές περιπτώσεις για χρήση σε πλοία |
| | | 7 | Προστασία από βύθιση στο νερό |
| | | 8 | Προστασία από παρατεταμένη βύθιση στο νερό |

4.2.5 Αρχή λειτουργίας.

Προκειμένου να διευκρινιστούν οι βασικές αρχές λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα, θα εξεταστεί ένα μικρό τμήμα του, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η λειτουργία του κινητήρα εξηγείται ως εξής:

- I. Όταν η περιέλιξη του τριφασικού στάτορα ενεργοποιείται από μια τριφασική τροφοδοσία ρεύματος, δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο περιστρέφεται γύρω από τον στάτορα με σύγχρονη ταχύτητα, όπου η τιμή της δίνεται από τη σχέση

$$NS = 120 \frac{f}{P}$$

- II. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο διέρχεται από το διάκενο αέρα και τέμνει τους αγωγούς του ρότορα, οι οποίοι βρίσκονται ακόμη σε κατάσταση ακινησίας. Λόγω της σχετικής ταχύτητας μεταξύ της περιστρεφόμενης ροής και του ακίνητου ρότορα, προκαλείται μια ηλεκτροκινητική δύναμη στους αγωγούς του δρομέα. Δεδομένου ότι το κύκλωμα του ρότορα είναι βραχυκυκλωμένο, το ρεύμα αρχίζει να ρέει στους αγωγούς του ρότορα.

- III. Οι ηλεκτροφόροι αγωγοί του ρότορα τοποθετούνται εντός του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το στάτορα. Κατά συνέπεια, μηχανική δύναμη δρα στους αγωγούς του ρότορα. Η συνισταμένη των μηχανικών δυνάμεων που ασκείται σε όλους τους αγωγούς του ρότορα, παράγει μια ροπή που τείνει να κινήσει τον ρότορα στην ίδια κατεύθυνση με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.
- IV. Το γεγονός ότι ο ρότορας εξαναγκάζεται να ακολουθήσει το πεδίο του στάτορα - δηλαδή ο ρότορας κινείται προς την κατεύθυνση του πεδίου που παράγει ο στάτορας - μπορεί να εξηγηθεί θεωρητικά από το νόμο του Λενζ. Σύμφωνα με αυτόν τον νόμο, η κατεύθυνση του ρεύματος του ρότορα θα τείνει να αντιτίθενται στην αιτία που την παράγει.
- V. Η αιτία που παράγει το ρεύμα του ρότορα είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και των ακίνητων αγωγών του ρότορα. Ως εκ τούτου, για να μειωθεί αυτή η σχετική ταχύτητα, ο ρότορας αρχίζει να λειτουργεί προς την ίδια κατεύθυνση με αυτή του πεδίου του στάτη και προσπαθεί να εξισώσει την ταχύτητά του με αυτή του στάτη.
- VI. Αν και ο ρότορας επιταχύνει αρκετά γρήγορά προς την κατεύθυνση του περιστρεφόμενου πεδίου, στην πράξη δεν μπορεί ποτέ να φτάσει την ταχύτητα της ροής του στάτη. Εάν συνέβαινε αυτό, αυτομάτως δε θα υπήρχε σχετική ταχύτητα μεταξύ του πεδίου του στάτορα και των αγωγών του ρότορα, δε θα υπήρχαν τα επαγόμενα ρεύματα του ρότορα και, επομένως, δεν θα υπήρχε ροπή για την κίνηση του. Ως εκ τούτου, η ταχύτητα του ρότορα (N_r) είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητα πεδίου του στάτη (N_s). Αυτή η διαφορά στην ταχύτητα εξαρτάται από το φορτίο στον κινητήρα.
- VII. Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης ταχύτητας (N_s) του περιστρεφόμενου πεδίου του στάτορα και της πραγματικής ταχύτητας του ρότορα (N_r) ονομάζεται ολίσθηση. Συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας, δηλαδή:

$$\text{Ολίσθηση} = S = (N_s - N_r) \times 100 \% N_s$$

Όπου, η ποσότητα $N_s - N_r$ ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης και η ολίσθηση στη στατική κατάσταση είναι ίση με τη μονάδα.

- VIII. Η συχνότητα της τάσης ή του ρεύματος που προκαλείται λόγω της σχετικής ταχύτητας μεταξύ στάτορα και ρότορα δίνεται από τον γενικό τύπο:

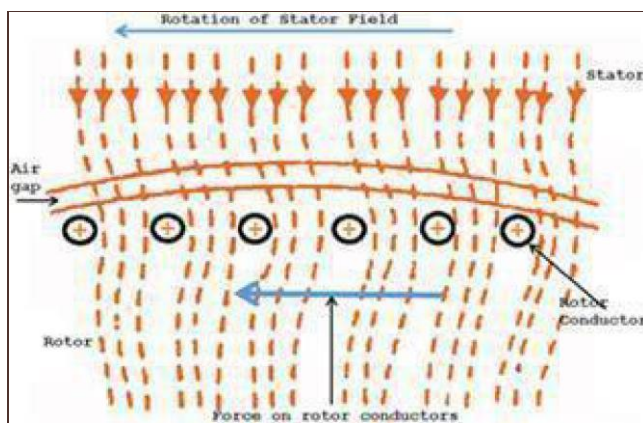
$$\text{Συχνότητα του κυκλώματος του ρότορα} = F_r = N P / 120$$

Όπου, N είναι η ταχύτητα ολίσθησης $N_s - N_r$ και με την αντικατάσταση της ταχύτητας ολίσθησης και της ολίσθησης στην παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι:

$$Fr = SF$$

Όπου S είναι η ολίσθηση και F είναι η συχνότητα παροχής.

- IX. Όταν ο ρότορας είναι ακινητοποιημένος ή σταθερός - δηλαδή $S = 1$ - η συχνότητα του ρεύματος του ρότορα είναι ίδια με αυτή της συχνότητας παροχής. Καθώς ο ρότορας αυξάνει ταχύτητα, η σχετική ταχύτητα μεταξύ της περιστρεφόμενης ροής και του ρότορα μειώνεται. Κατά συνέπεια, η ολίσθηση S και η συχνότητα του ρεύματος του ρότορα μειώνονται.

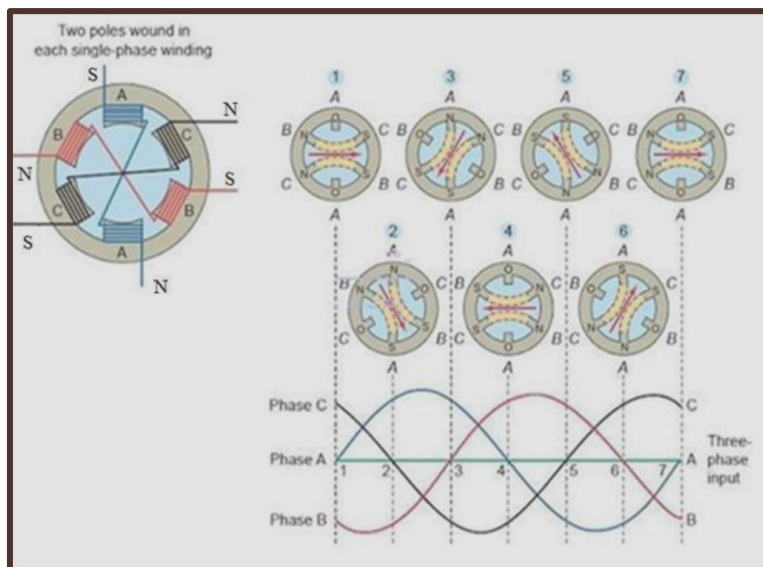


33 Εικόνα 4.9: Τμήμα του επαγωγικού κινητήρα (Al Kadhim, S.A. S., 2020).

4.2.6 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας έχει συμμετρικές τριφασικές περιελίξεις στο στάτορα που κατανέμονται υπό γωνία 120 μοιρών στο χώρο, με αποτέλεσμα κάθε σπείρωμα να δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο. Αυτά τα πεδία εμφανίζονται με διαφορά φάσης 120 μοιρών μεταξύ τους, τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Η πυκνότητα ροής από τη φάση A είναι μέγιστη σε συγκεκριμένο σημείο και τείνει ημιτονοειδώς στο μηδέν, 90 μοίρες μακριά από αυτό το σημείο. Έτσι, το μαγνητικό πεδίο του στάτορα μπορεί να απεικονιστεί ως ένα σύνολο

βόρειων και νότιων μαγνητικών πόλων που περιστρέφονται γύρω από την περιφέρεια του στάτορα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



34 Εικόνα 4.10: Αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα (Alkadhim, S.A. S., 2020)

Για μια ακολουθία φάσεων ABC, η φάση της μαγνητικής δύναμης ως συνάρτηση του χρόνου προκύπτει ως εξής:

$$F_a = F_{max} \cos wt \quad (1)$$

$$F_b = F_{max} \cos(wt - 120^\circ) \quad (2)$$

$$F_c = F_{max} \cos(wt + 120^\circ) \quad (3)$$

Όπου F_{max} είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητικής δύναμης οποιασδήποτε φάσης. Η προκύπτουσα μαγνητική δύναμη στο στάτορα - συμβολίζεται ως F_S - κατά μήκος ενός άξονα υπό γωνία φ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, μπορεί να υπολογιστεί αθροίζοντας τις προεκβολές των μαγνητικών δυνάμεων:

$$F_S = F_a + F_b + F_c = \frac{3}{2} F_{max} \cos(wt - \varphi) \quad (4)$$

Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου που προκύπτει είναι 1,5 φορές μεγαλύτερο από το πεδίο που παράγεται από οποιαδήποτε φάση (Alkadhim, S.A. S., 2020).

4.3 Συντήρηση και βλάβες.

Χρειάζεται επίσης να σημειωθεί ότι, όπως κάθε άλλο στοιχείο της ηλεκτρικής εγκατάστασης, οι ηλεκτροκινητήρες πρέπει να συντηρούνται μόνο από επαρκώς εκπαιδευμένο προσωπικό υπό την κατάλληλη επίβλεψη. Πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε εργασία σε έναν ηλεκτροκινητήρα που βρίσκεται ή ήταν πρόσφατα σε λειτουργία, θα πρέπει να τηρούνται οι κατάλληλες προφυλάξεις ασφαλείας. Αυτές περιλαμβάνουν σχεδόν σίγουρα μηχανικές ασφάλειες και/ή ένα κατάλληλο σύστημα πρόσβασης που να εκδίδει άδεια εργασίας. Όποιο σύστημα και αν χρησιμοποιηθεί, πρέπει να είναι βέβαιο ότι σε καμία στιγμή δεν μπορεί ένας κινητήρας να ενεργοποιηθεί τυχαία κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Ορισμένες προστατευτικές συσκευές, όπως διακόπτες διαρροής και γειώσεις, είναι κατάλληλες για χρήση σε μικρούς κινητήρες χαμηλής τάσης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος για το προσωπικό λειτουργίας και συντήρησης.

Επιπλέον, πριν εκτεθούν οι ακροδέκτες οποιουδήποτε ηλεκτροκινητήρα, όπως για παράδειγμα για την αποσύνδεση καλωδίων, η παροχή πρέπει να απομονωθεί, να κλειδωθεί και να επιβεβαιωθεί ότι είναι στο δυναμικό γείωσης με τη χρήση κατάλληλης συσκευής δοκιμής. Εκτός από τους κινδύνους που συνδέονται με την εργασία σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση, μια άλλη πτυχή ασφάλειας είναι οι επιπτώσεις οποιασδήποτε επισκευής ή συντήρησης στις αρχικές προδιαγραφές σχεδιασμού της. Πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να διασφαλιστεί ότι οποιαδήποτε εργασία εκτελείται δεν βλάπτει την ασφάλεια λειτουργίας της εγκατάστασης. Αυτό είναι ακόμη πιο σημαντικό όταν εφαρμόζεται σε κινητήρες που είναι πιστοποιημένοι για λειτουργία σε επικίνδυνες περιοχές.

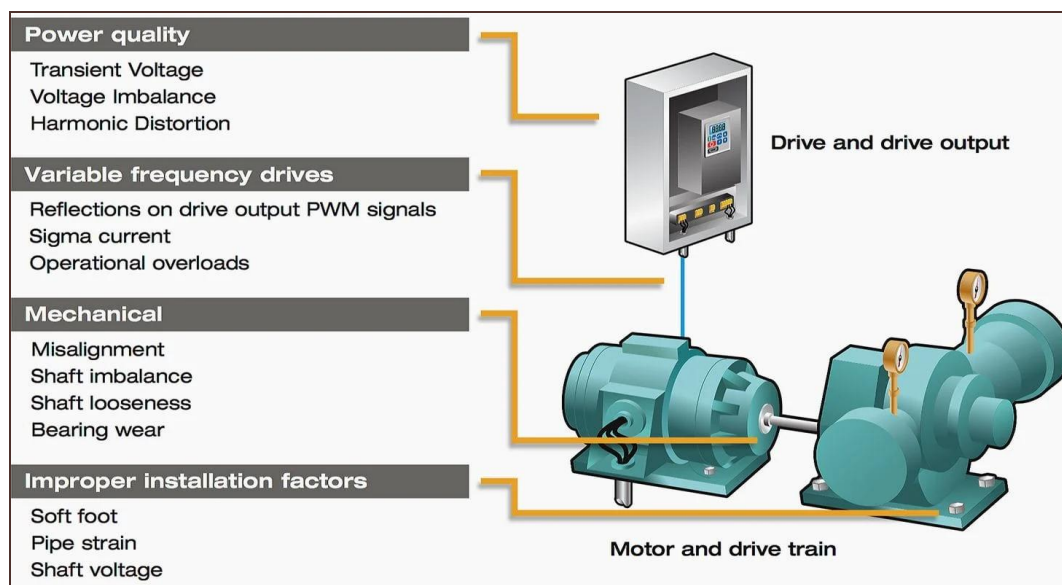
Συγχρόνως, οι κατευθυντήριες γραμμές που εκδίδονται από τις εκάστοτε επιτροπές Υγείας και Ασφάλειας θα πρέπει να ακολουθούνται ανά πάσα στιγμή κατά τη διάρκεια της επισκευής ή συντήρησης των ηλεκτρικών κινητήρων. Συνιστάται κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε επανεγκατάστασης μετά την αφαίρεση από το χώρο λειτουργίας να τηρούνται οι σχετικές ενότητες των κανονισμών καλωδίωσης.

Ένας κινητήρας μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας και να δρομολογηθεί για επισκευή για διάφορους λόγους όπως:

- A. Προληπτική ή προγραμματισμένη συντήρηση.
- B. Βλάβη.
- C. Αναγνώριση συμπτωμάτων που ενδέχεται να οδηγήσουν σε βλάβη.

D. Επανατοποθέτηση του κινητήρα με διαφορετικό εξοπλισμό κίνησης.

Μια σειρά από πιθανές βλάβες εμφανίζονται στην εικόνα παρακάτω:



35 Εικόνα 4.11: Πιθανές βλάβες και αστοχίες ενός ηλεκτρικού κινητήρα (S.P. Watson, 1988).

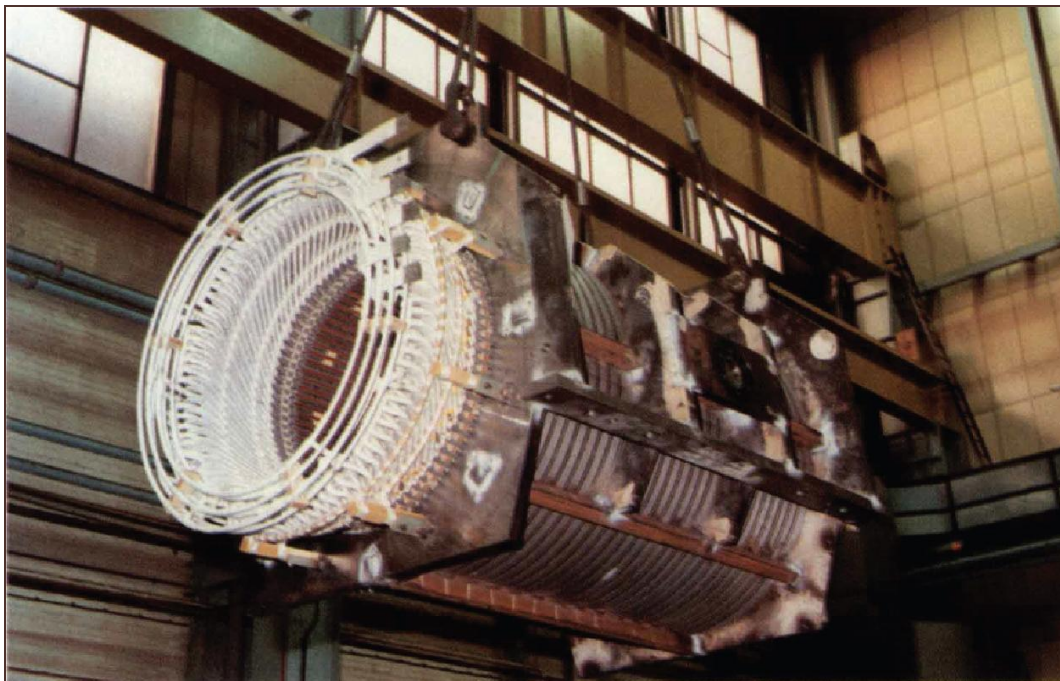
Είναι γνωστό ότι πριν από την αποσυναρμολόγηση, ο κινητήρας θα πρέπει, εφόσον είναι εφικτό, να μεταφερθεί σε καθαρό και στεγνό συνεργείο, κατά προτίμηση εξοπλισμένο με κατάλληλο ανυψωτικό εξοπλισμό. Εάν δεν είναι δυνατή η μετακίνηση του κινητήρα, τότε η γύρω περιοχή πρέπει να καθαριστεί όσο είναι εφικτό, ενώ στην περίπτωση που ο κινητήρας βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο, θα πρέπει να τοποθετηθεί ένα προσωρινό προστατευτικό κάλυμμα.

Όταν πραγματοποιείται ανύψωση ενός κινητήρα είναι απαραίτητο να βεβαιωθεί ότι χρησιμοποιούνται τα σωστά σημεία ανύψωσης. Η χρήση σημείων ανύψωσης που βρίσκονται σε υποσυστήματα όπως στους εναλλάκτες θερμότητας δεν είναι αποδεκτή, εκτός εάν έχουν σχεδιαστεί ειδικά για το σκοπό αυτό.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη μεταφορά ιδιαίτερα μεγάλων κινητήρων, το ελεύθερο άκρο του άξονα θα πρέπει να ασφαλίσει για να αποτρέψει πιθανή φθορά των ρουλεμάν. Είναι κατανοητό ότι πριν εκτελεστεί οποιαδήποτε εργασία σε έναν κινητήρα, θα πρέπει πρώτα να απομονωθεί από όλες τις ηλεκτρικές παροχές, τόσο τις κύριες όσο και τις βοηθητικές. Όλα τα καλώδια ακροδεκτών πρέπει να αποσυνδεθούν στο κουτί ακροδεκτών, συμπεριλαμβανομένων των θερμαντικών σωμάτων, των θερμίστορ, των θερμοστοιχείων κ.λπ. και θα πρέπει να αναγνωρίζονται για να βοηθήσουν στη

μελλοντική επανασυναρμολόγηση. Στην περίπτωση κινητήρα υψηλής τάσης εφοδιασμένου με θάλαμο στεγανοποίησης γεμάτο με σύνθετα υλικά, ο θάλαμος στεγανοποίησης θα πρέπει να ξεβιδωθεί και να αφαιρεθεί συνδεδεμένος στο καλώδιο τροφοδοσίας.

Τυχόν εκτεθειμένα καλώδια ή ανοίγματα του θαλάμου στεγανοποίησης θα πρέπει να προστατεύονται για να αποτρέπεται η είσοδος υγρασίας ή σκόνης. Ο κινητήρας μπορεί τώρα να αποσυνδεθεί από το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Τυχόν μπουλόνια συγκράτησης και πείροι μπορούν τώρα να αφαιρεθούν. Επίσης, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί οποιεσδήποτε ροδέλες, αυτές θα πρέπει να εντοπιστούν και να διατηρηθούν προσεκτικά για να διασφαλιστεί η σωστή ευθυγράμμιση με το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Ο κινητήρας μπορεί τώρα να ανυψωθεί από τη θέση του.



36 Εικόνα 4.12: Ανύψωση στάτορα 7,460 kW, 6,6 kV, 60 Hz, τετραπολικού κινητήρα επαγωγής για χρήση σε συμπιεστή (S.P. Watson, 1988).

Επιπλέον, εάν απαιτείται επανακαλωδίωση είτε του στάτορα είτε του ρότορα, τότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:

- i. Είναι η εν λόγω περιέλιξη υπό πίεση κενού; Εάν ναι, η απογύμνωση της περιέλιξης μπορεί να αποδειχθεί δύσκολη και σε ορισμένες περιπτώσεις λιγότερο οικονομική από την πλήρη αντικατάσταση της ή ακόμη και με την αντικατάσταση όλου

του κινητήρα, εκτός εάν έχουν εφαρμοστεί ειδικά σχεδιασμένα φιλμ αποδέσμευσης κατά την κατασκευή για να αποφευχθεί το συγκεκριμένο σενάριο.

- ii. Τι είδους μονωτική επίστρωση εφαρμόζεται στα ελάσματα του πυρήνα; Ορισμένες μονωτικές επιστρώσεις με οργανική βάση εξαφανίζονται εντελώς σε θερμοκρασίες άνω των 200° C. Φούρνοι καύσης που λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των 400° C χρησιμοποιούνται μερικές φορές για να βοηθήσουν στην αφαίρεση των πηνίων. Εάν η επίστρωση περάσει απαρατήρητη, η χρήση υψηλών θερμοκρασιών θα βλάψει τη μόνωση και θα οδηγήσει σε πολύ αυξημένες απώλειες σιδήρου, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση και την πολύ γρήγορη αστοχία της νέας περιέλιξης όταν αυτή τεθεί ξανά σε λειτουργία.
- iii. Εάν έχει συμβεί κάποια αστοχία σε ρουλεμάν, είναι πιθανό να έχει καταρρεύσει ολόκληρη η επιφάνεια του ρουλεμάν. Το αποτέλεσμα αυτού θα μπορούσε να είναι ότι ο περιστρεφόμενος ρότορας έχει έρθει σε επαφή με τον στάτορα με αποτέλεσμα να προκληθεί ζημιά και στα δύο εξαρτήματα. Αυτά θα πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά για να εντοπιστεί οποιαδήποτε τέτοια βλάβη και η έκτασή της. Εάν η βλάβη είναι εμφανής, ενδέχεται να απαιτηθούν μεταλλουργικοί έλεγχοι.

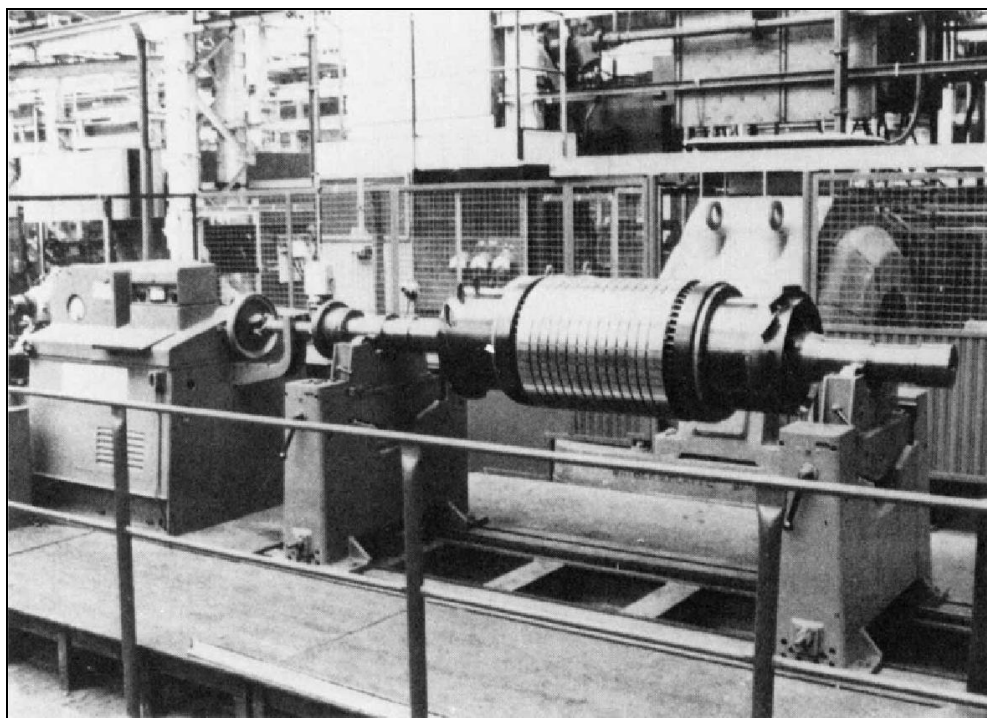
4.3.1 Βλάβες.

Αναλυτικότερα, εάν ένας κινητήρας έχει εγκατασταθεί και τεθεί σωστά σε λειτουργία, κανονικά δεν αναμένεται να συμβεί κάποια σημαντική βλάβη κατά τη διάρκεια της ζωής του. Βέβαια, εάν προκύψει αστοχία, πιθανότατα θα οφείλεται σε λανθασμένες ρυθμίσεις στις προστατευτικές συσκευές ή ανεπαρκή παρακολούθηση της κατάστασης. Η παρακολούθηση της κατάστασης και η σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων μπορεί σε αρκετές περιπτώσεις να προειδοποιήσει για μια επικείμενη αποτυχία. Για παράδειγμα, μια αύξηση της θερμοκρασίας του ρουλεμάν ή αύξηση στο επίπεδο δόνησης, όπως καταγράφεται από τον κατάλληλο εξοπλισμό παρακολούθησης, μπορεί να υποδηλώνει επικείμενη αστοχία του ρουλεμάν. Όταν δεν υπάρχει εξοπλισμός προστασίας, τότε μια αύξηση του θορύβου που εκπέμπεται από έναν κινητήρα, όπως την αντιλαμβάνονται ο χειριστής ή ο μηχανικός συντήρησης, μπορεί κάλλιστα να υποδηλώνει υπερβολικούς κραδασμούς ή χαλαρά εξαρτήματα που με τη σειρά τους πιθανώς υποδηλώνουν επικείμενη αστοχία.

Ο εντοπισμός της αρχικής αιτίας μιας αστοχίας μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να αποδειχθεί δύσκολο έργο, ειδικά εάν έχει προκληθεί σημαντική ζημιά σε άλλα

εξαρτήματα, που πιθανώς συγκαλύπτει το αρχικό πρόβλημα. Οι λεπτομέρειες όλων των παρακολουθούμενων μεταβλητών, αμέσως πριν από μια έξοδο μπορεί να αποδειχθούν χρήσιμες για την εύρεση σφαλμάτων. Πολλά προστατευτικά ρελέ που είναι τώρα διαθέσιμα είναι ικανά να αποθηκεύσουν αυτές τις πληροφορίες για μελλοντική ανάκτηση.

Δεν είναι φυσιολογικό για έναν κινητήρα που βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία να αστοχεί ξαφνικά χωρίς προειδοποίηση. Εάν συμβεί αυτό, τότε ο τρόπος λειτουργίας του εξοπλισμού και του κιβωτίου ταχυτήτων θα πρέπει να θεωρείται ως μια πιθανή αιτία αστοχίας. Με λίγα λόγια, εάν ο κινητήρας ήταν εκτός λειτουργίας για οποιαδήποτε στιγμή πριν από τη βλάβη, τότε πιθανώς να φταίνε οι συνθήκες υπό τις οποίες έχει αποθηκευτεί, π.χ. εισροή υγρασίας ή ρύπων στις περιελίξεις ή στα ρουλεμάν. Ως εκ τούτου, μια καλή πρακτική είναι να διενεργούνται βασικοί έλεγχοι και να επιθεωρείται η κατάσταση του λιπαντικού πριν από τη λειτουργία ενός κινητήρα που δεν λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα (S.P. Watson, 1988).



37 Εικόνα 4.13: Ρότορας υψηλής ταχύτητας καλιμπράρεται πριν την επανατοποθέτηση (S.P. Watson, 1988).

4.4 Εφαρμογές ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

4.4.1 Σιδηροδρομικές εφαρμογές.

Η χρήση επαγωγικών τριφασικών κινητήρων στις αστικές συγκοινωνίες αντί για κινητήρων συνεχούς ρεύματος, έχει επιτρέψει τη μονοκινητήρια κίνηση, γεγονός που ανταποκρίνεται στις νέες απαιτήσεις των συστημάτων, ειδικά των οχημάτων χαμηλού δαπέδου. Το κύριο πλεονέκτημα της άμεσης οδήγησης είναι η αποφυγή του μηχανικού κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο σε αρκετές περιπτώσεις τείνει να φθείρεται σύντομα λόγω των σκληρών συνθηκών λειτουργίας.

Ένα σύγχρονο σύστημα ελαφριάς έλξης σιδηροδρομικών οχημάτων, όπως τραμ, ηλεκτρικών τρένων και μετρό αποτελείται από ένα μετατροπέα ισχύος, από μια τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος και από ηλεκτρικούς επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό οποιουδήποτε κινητήρα έλξης είναι το σχετικά μεγάλο εύρος σταθερής ισχύος. Οι συνθήκες σταθερής ροπής και σταθερής ισχύος σε μεγάλο εύρος στροφών μπορούν να επιτευχθούν μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου.

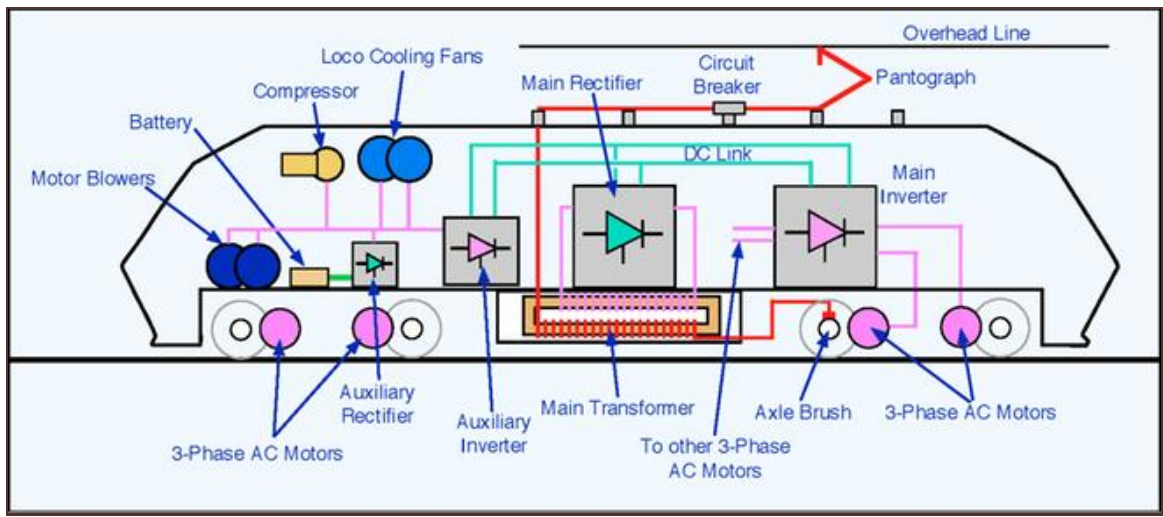
Οι ηλεκτρικοί κινητήρες έλξης θα πρέπει να πληρούν ένα σύνολο απαιτήσεων, όπως υψηλή στιγμιαία ισχύς, υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή ροπή σε χαμηλή ταχύτητα, γρήγορη απόκριση ροπής, υψηλή απόδοση σε μεγάλα εύρη στροφών και ροπής, υψηλή αξιοπιστία και στιβαρότητα και φυσικά χαμηλό κόστος.

Από την άλλη πλευρά, το σύστημα άμεσης μετάδοσης κίνησης, δηλαδή απευθείας μετάδοση κίνησης στον τροχό χωρίς χρήση γραναζιών και κιβωτίων ταχυτήτων προσφέρει πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως μηδενικές απώλειες ενέργειας στο κιβώτιο ταχυτήτων, μηδενική συντήρηση, έλλειψη θορύβων, σύστημα μετάδοσης κίνησης χωρίς χρήση λιπαντικών ελαίων και άλλα.

Σήμερα, οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες μόνιμου μαγνήτη είναι πιο αποδοτικοί, πιο συμπαγείς, έχουν καλύτερες επιδόσεις σταθερής κατάστασης και δυναμικές σε χαμηλές ταχύτητες και αποτελούν μια εξαιρετική επιλογή κινητήρων για εφαρμογές έλξης άμεσης μετάδοσης κίνησης.

Ωστόσο, λόγω της ειδικής τους σχεδίασης, οι επαγωγικοί κινητήρες αποδείχθηκαν μια καλή οικονομική λύση, ανταποκρινόμενη στις απαιτήσεις ισχύος και ταχύτητας για εφαρμογές σε σιδηροδρομικά οχήματα. Αποδεικνύεται ότι ο επαγωγικός κινητήρας είναι

η καλύτερη επιλογή για τις περισσότερες εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας και για ορισμένες εφαρμογές όπως τα συστήματα απευθείας μετάδοσης κίνησης (Dordea, T. et al., 2011).



38 Εικόνα 4.14: Διάταξη μιας ηλεκτρικής μηχανής AC, που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από μια εναέρια γραμμή (Dordea, T. et al., 2011).

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα διερεύνησης των συνθηκών λειτουργίας ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα έλξης τύπου LK450X6, που είναι εγκατεστημένοι στα ηλεκτρικά τρένα τύπου EMU EN57. Η συγκεκριμένη κλάση χρησιμοποιείται σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες, όπως στην Πολωνία, στην Κροατία και στη Σλοβενία. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν το 2014.

6 Πίνακας 4.4: Τα αποτελέσματα ελέγχου του επαγωγικού κινητήρα έλξης LK-450 X6 (J. Bernatt et al., 2018).

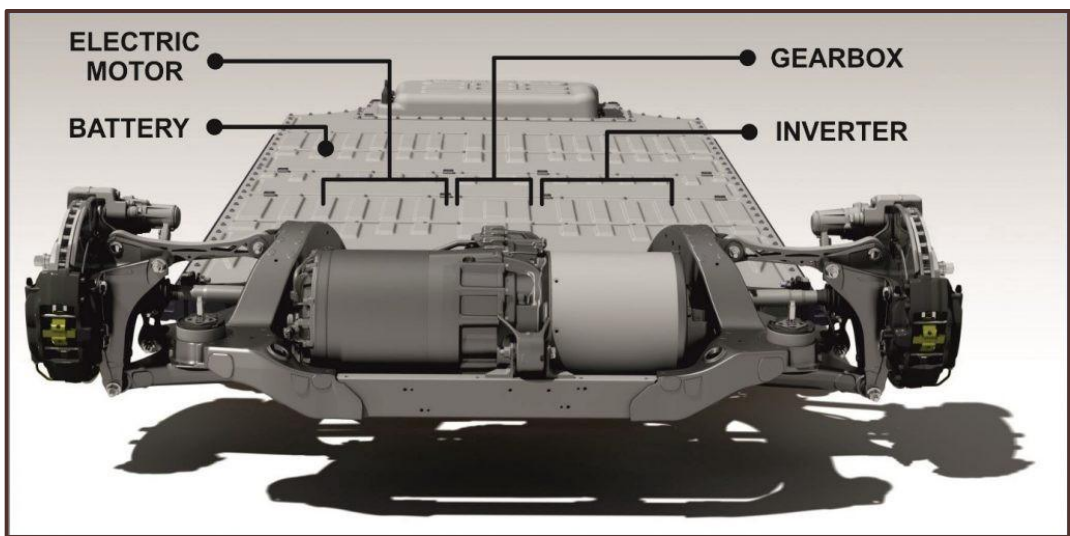
| | |
|---|----------------|
| Ονομαστική ισχύς | 300 kW |
| Ονομαστική τροφοδοσία σε συχνότητα 50 Hz | 2,340 V |
| Ονομαστική/μέγιστη ισχύς | 50/120 Hz |
| Ονομαστική/μέγιστη ισχύς ρεύματος | 78/160 A |
| Ονομαστική/μέγιστη ροπή σε συχνότητα 50 Hz | 2,419/4,400 Nm |
| Απόδοση | > 94% |
| Ψύξη | Εξαναγκασμένη |

| | |
|--|--------|
| Αξιολόγηση προστασίας εισόδου σωματιδίων/νερού | IP22 |
| cos φ | > 0.84 |

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ο εξαιρετικά υψηλός συντελεστής απόδοσης που εμφανίζουν οι κινητήρες αυτού του τύπου, που στη συγκεκριμένη περίπτωση ξεπερνά το 94%. Συγκριτικά αναφέρεται ότι ένα κινητήρας diesel εσωτερικής καύσης με δυσκολία πλησιάζει ένα συντελεστή απόδοσης της τάξης του 50% (J. Bernatt et al., 2018).

4.4.2 Αυτοκινητοβιομηχανία.

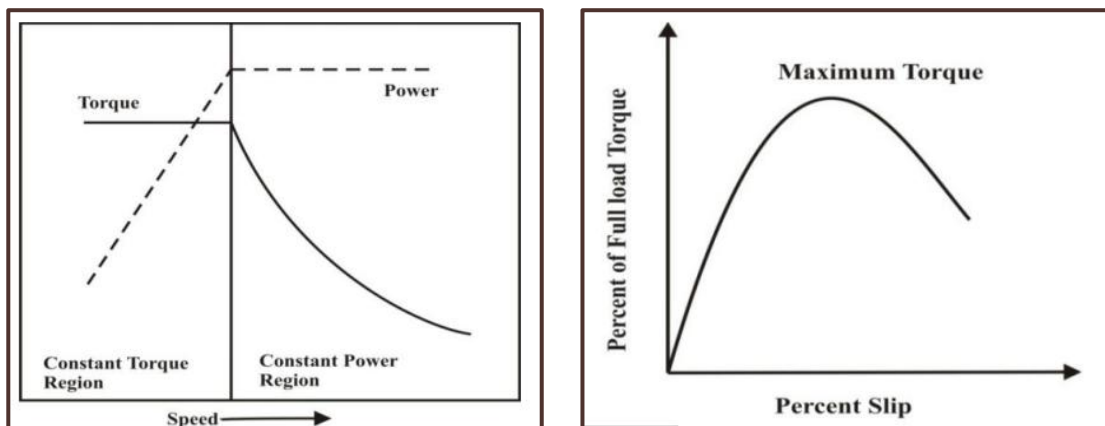
Αξιοσημείωτο είναι ότι το σύστημα κίνησης και ελέγχου του ηλεκτρικού κινητήρα είναι ο πυρήνας του ηλεκτρικού οχήματος. Ο επαγωγικός κινητήρας έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως απλή δομή, χαμηλές τιμές, εύκολη συντήρηση και σταθερή ισχύς και ως εκ τούτου έχει μια ευρύτερη εφαρμογή στους τομείς των ηλεκτρικών οχημάτων. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό, το σύστημα κίνησης που εφαρμόζεται σε ένα ηλεκτρικό όχημα, όχι μόνο να έχει υψηλή ροπή εκκίνησης και μεγάλο εύρος σταθερής ισχύος αλλά και υψηλή απόδοση σε όλο το εύρος ταχυτήτων. Το ηλεκτρικό όχημα χρησιμοποιεί τη συστοιχία των μπαταριών για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία στη συνέχεια τροφοδοτεί τον επαγωγικό κινητήρα.



39 Εικόνα 4.15: Διάταξη ενός ηλεκτρικού οχήματος (Jape, S. & Thosar, A., 2017).

Παρόλα αυτά, η χαμηλή τάση τροφοδοσίας οδηγεί σε υψηλής έντασης ρεύμα στον κινητήρα γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί σε υψηλή αύξηση της θερμοκρασίας και σε απώλειες στον κινητήρα. Οι απώλειες αυξάνονται και η απόδοση μειώνεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει τις επιδόσεις, τη μόνωση και τη διάρκεια ζωής του κινητήρα, επομένως η μείωση των απωλειών, η αύξηση της απόδοσης των κινητήρων και η αξιοπιστία της λειτουργίας έχει γίνει το κλειδί του σχεδιασμού ενός κινητήρα για ένα ηλεκτρικό όχημα.

Σε γενικές γραμμές, τα υλικά του ρότορα καθορίζουν τις αντιστάσεις του δρομέα. Η επιλογή χαμηλότερης ειδικής αντίστασης μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τις αντιστάσεις του ρότορα. Για παράδειγμα, η υιοθέτηση ενός επαγωγικού κινητήρα με χάλκινο ρότορα μπορεί να μειώσει σημαντικά τις απώλειες ενέργειας, επομένως η απόδοση του κινητήρα αυξάνεται. Έρευνες έχουν δείξει ότι η απόδοση ενός ρότορα από χαλκό και ενός ρότορα από αλουμίνιο σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο μπορεί να διαφέρουν ως και 5%, με τη χρήση του χαλκού να εμφανίζει σημαντικά περισσότερα οφέλη (Jape, S. & Thosar, A., 2017).



40 Εικόνα 4.16: Αριστερά φαίνονται τα ιδανικά μηχανικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού κινητήρα για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα. Δεξιά εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά ροπής του επαγωγικού κινητήρα (Jare, S. & Thosar, A., 2017).

4.4.3 Άλλες εφαρμογές.

Οι υψηλής ισχύος τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες, έχουν πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά αναφέρονται:

- Ανελκυστήρες
- Φυγόκεντρες αντλίες
- Γερανοί
- Ανυψωτικά
- Ανεμιστήρες εξάτμισης μεγάλης χωρητικότητας
- Τόρνοι
- Θραυστήρες
- Ελαιουργεία

- Κλωστοϋφαντουργία και άλλα.



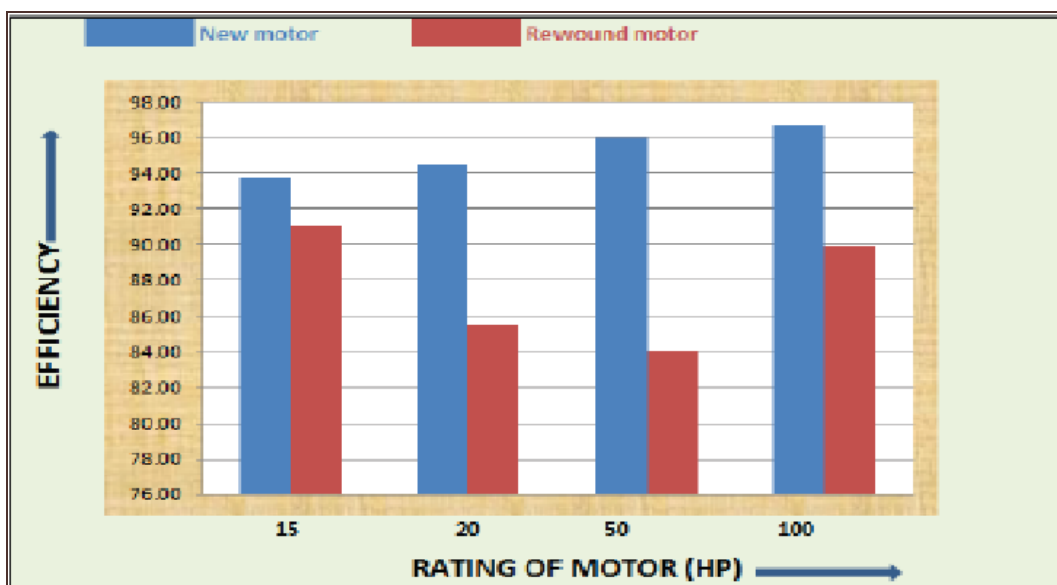
41 Εικόνα 4.17: Οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες βρίσκουν πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία (Jape, S. & Thosar, A., 2017).

4.5 Οικονομική απόδοση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

Πράγματι, ο επαγωγικός κινητήρας είναι το κύριο σύστημα κίνησης στις βιομηχανίες, και καταναλώνει το 30% - 60% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα στις μέρες μας, η ενέργεια είναι ύψιστη ανάγκη σε κάθε τομέα για την εκτέλεση δραστηριοτήτων είτε πρόκειται για οικιακές, εμπορικές, βιομηχανικές, γεωργικές και πλήθος άλλες παρόμοιες εφαρμογές. Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας, αλλά η αρχή της βέλτιστης πρακτικής κατά την επιλογή του επαγωγικού κινητήρα ξεκινά με την ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής του κινητήρα. Το κόστος κύκλου ζωής είναι μια οικονομική αρχή για την επιλογή των κινητήρων καθώς καταναλώνουν περισσότερο από το ήμισυ της ενέργειας που χρησιμοποιείται σε ένα εργοστάσιο.

Είναι γνωστό ότι ο επαγωγικός κινητήρας που λειτουργεί με πλήρες φορτίο προσφέρει καλή απόδοση, ακόμη και σε σχετικά μέτρια ονομαστική τιμή kW. Ωστόσο, σε χαμηλότερες τιμές από τα ονομαστικά φορτία – γεγονός που ισχύει για πολλούς κινητήρες για σημαντικό διάστημα της λειτουργίας τους - η απόδοσή τους μειώνεται και οι απώλειες αυξάνονται, με αποτέλεσμα η κατανάλωση ενέργειας να είναι μεγαλύτερη στη βιομηχανία . Η απόδοση ενός κινητήρα καθορίζεται από εγγενείς απώλειες - σταθερές και μεταβλητές - που μπορούν να μειωθούν μόνο με την αλλαγή του σχεδιασμού του κινητήρα.

Είναι προφανές ότι η βελτιστοποίηση της απόδοσης των επαγωγικών κινητήρων θα αντιμετώπιζε αυτό το πρόβλημα, αλλά το κύριο πρόβλημα έγκειται κυρίως στο δύσκολο έλεγχο του, λόγω του περίπλοκου μαθηματικού μοντέλου, της μη γραμμικής συμπεριφοράς του κινητήρα και της ηλεκτρικής ταλάντωσης της παραμέτρου που εξαρτάται από τη φυσική επίδραση της θερμοκρασίας. Όταν οι επαγωγικοί κινητήρες λειτουργούν χωρίς κατάλληλο έλεγχο καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας και το κόστος λειτουργίας είναι υψηλό. Αυτές οι φυσικές και λειτουργικές διαταραχές συχνά προκαλούν αστοχία του κινητήρα, και η αντικατάσταση του κινητήρα θεωρείται βιώσιμη λύση, ωστόσο συχνά η επανεγκατάσταση ενός χαλασμένου κινητήρα μετά την επιδιόρθωση του θα μπορούσε να είναι οικονομικά εφικτή.



42 Εικόνα 4.18: Απόδοση ενός νέου και ενός ανακατασκευασμένου επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ονομαστική του ισχύ (Rai, K. et al., 2017).

Ο στόχος της Ενεργειακής Οικονομικής Απόδοσης είναι η επίτευξη και η διατήρηση της βέλτιστης χρήσης ενέργειας, σε όλο τον οργανισμό, διατηρώντας παράλληλα τη βελτίωση της παραγωγής και της ποιότητας των προϊόντων. Σε γενικές γραμμές, όσον αφορά τον επαγωγικό κινητήρα, η οικονομική απόδοση του εξαρτάται από τρία κύρια στοιχεία, δηλαδή την απόδοση του κινητήρα, το κόστος του κινητήρα (σταθερό και λειτουργικό), τις ώρες λειτουργίας και τους παράγοντες φόρτωσης.

- i. *Απόδοση κινητήρα:* Η απόδοση του κινητήρα ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου και είναι υψίστης σημασίας στις μέρες μας λόγω της αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, της αυξανόμενης οικονομικής αναταραχής στις τιμές των ορυκτών καυσίμων και άλλων κοινωνικοοικονομικών παραγόντων. Συγκεκριμένα, οι απώλειες ενέργειας είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την απόδοση του κινητήρα. Οι απώλειες στον επαγωγικό κινητήρα χωρίζονται τυπικά σε α) απώλεια χαλκού (στάτορα & ρότορα), β) απώλεια σιδήρου, γ) απώλεια τριβής, δ) απώλειες λόγω λάθος θέσης και ε) πρόσθετες απώλειες. Η συνδυασμένη απώλεια χαλκού, σιδήρου και λάθος θέσης συμβάλλει στο 90% των συνολικών απωλειών κινητήρα. Τέλος, η απόδοση λειτουργίας οποιουδήποτε κινητήρα καθορίζεται από τον αρχικό σχεδιασμό του, την ποιότητα κατασκευής του και την ποιότητα της παροχής ρεύματος.
- ii. *Σταθερό και λειτουργικό κόστος:* Το σταθερό κόστος είναι το κόστος του κινητήρα επαγωγής (καινούργιο/ανακαινισμένο) ενώ το κόστος λειτουργίας ορίζεται ως το κόστος με το οποίο λειτουργεί ο κινητήρας, το οποίο είναι κρίσιμο να μετρηθεί καθώς παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του κινητήρα. Το κόστος λειτουργίας είναι ζωτικής σημασίας γιατί αντιπροσωπεύει το 90% της ισχύος που χρησιμοποιείται από τον επαγωγικό κινητήρα. Επιπλέον, το κόστος των ενεργειακά αποδοτικών κινητήρων είναι γενικά υψηλότερο από εκείνο των συνηθισμένων κινητήρων, λόγω των πολλών τροποποιήσεων στην κατασκευή του που έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση. Ειδικότερα, το συνολικό κόστος του κινητήρα επαγωγής ορίζεται ως το άθροισμα του σταθερού και του λειτουργικού κόστους που συχνά επιστρέφει γρήγορα όσον αφορά την εξοικονόμηση του λειτουργικού κόστους, ιδιαίτερα σε νέες εφαρμογές ή αντικαταστάσεις κινητήρα στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα είναι το κόστος της ανέγερσης του μηχανήματος και η συστημική διασύνδεση για τη

λειτουργικότητα του κινητήρα και την έναρξη με ολόκληρο το μηχάνημα σε λειτουργία. Είναι προφανές ότι το κόστος εγκατάστασης και θέσης σε λειτουργία ενός νέου κινητήρα - συμπεριλαμβανομένης της εκπαίδευσης - θα είναι μεγαλύτερο από το κόστος του για έναν ανακαινισμένο κινητήρα.

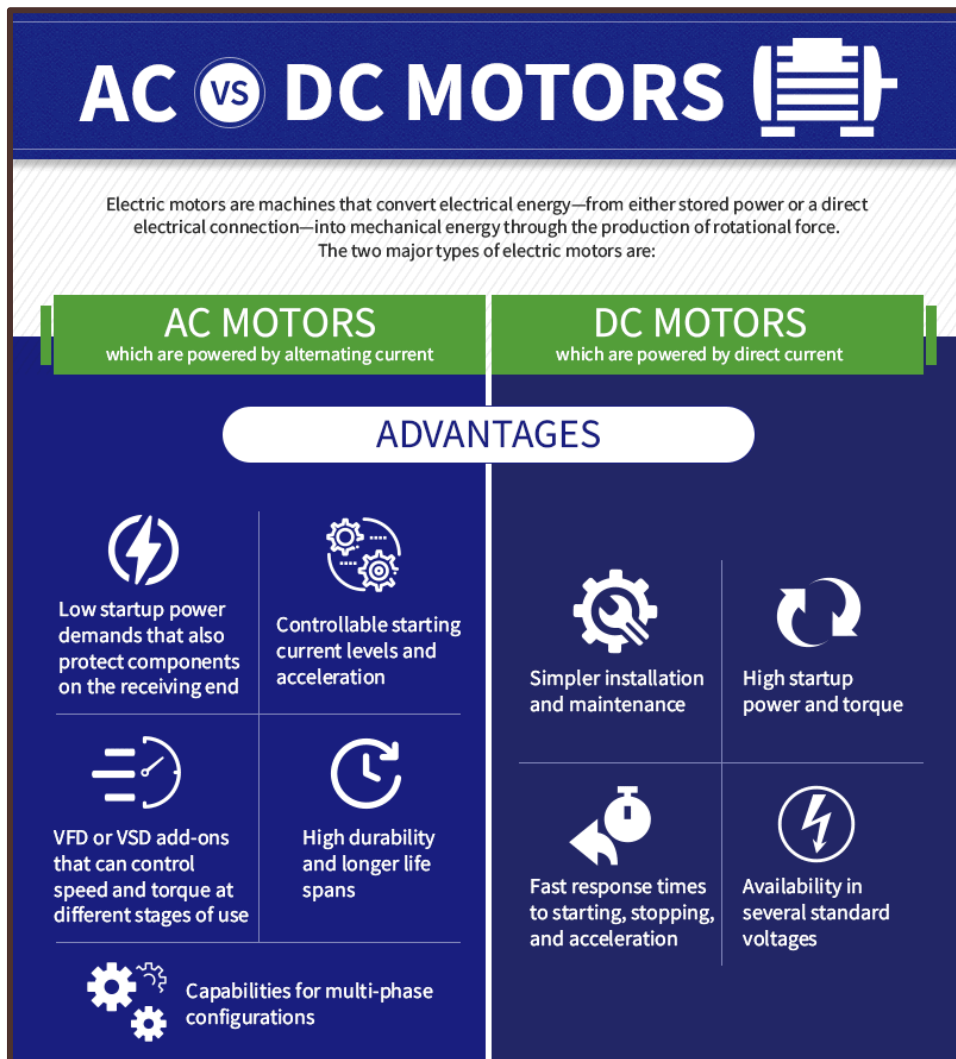
Γενικά, το κόστος λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα είναι η ισχύς που χρησιμοποιείται για την απαιτούμενη εργασία, αλλά το κόστος λειτουργίας του νέου κινητήρα είναι χαμηλό, καθώς η απόδοση του κινητήρα είναι υψηλή και στην περίπτωση του κινητήρα με που έχει υποστεί επισκευή το κόστος λειτουργίας είναι γενικά υψηλό καθώς η απόδοση του κινητήρα θα μειώνεται.

Συμπερασματικά, το κόστος εργασίας και συντήρησης του επαγωγικού κινητήρα είναι το κόστος του απασχολούμενου ειδικευμένου προσωπικού για τη λειτουργία του μηχανήματος και η συστημική συντήρηση για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα κατά τη λειτουργία του. Είναι προφανές ότι το κόστος εργασίας ενός νέου κινητήρα - συμπεριλαμβανομένης της εκπαίδευσης - θα είναι μεγαλύτερο από το κόστος του για έναν ανακαινισμένο κινητήρα (Rai, K. et al., 2017).

Συμπεράσματα

Είναι πλέον ξεκάθαρο ότι οι κινητήρες εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν ομοιότητες: χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα για να παράγουν περιστρεφόμενα μαγνητικά πεδία που, με τη σειρά τους, δημιουργούν περιστροφική δύναμη στον οπλισμό - που βρίσκεται στον ρότορα ή στον στάτορα - γύρω από τον άξονα. Τα διάφορα σχέδια κινητήρων χρησιμοποιούν την ίδια βασική ιδέα για να μετατρέψουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική δύναμη και να παρέχουν υψηλά επίπεδα ταχύτητας ή ισχύος.

Ωστόσο εμφανίζουν και σημαντικές διαφορές, ορισμένες εκ των οποίων φαίνονται παρακάτω:



43 Εικόνα 4.19: Διαφορές κινητήρων εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος.

Κάθε τύπος κινητήρα έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα που τον καθιστούν κατάλληλο για διαφορετικές εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι κινητήρες AC, για παράδειγμα, είναι εύκαμπτοι και εύκολοι στον έλεγχο. Μερικά από τα άλλα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν:

- i. Χαμηλές απαιτήσεις ισχύος εκκίνησης που προστατεύουν επίσης τα εξαρτήματα τους.
- ii. Ελεγχόμενα επίπεδα ρεύματος εκκίνησης και επιτάχυνσης.
- iii. Πρόσθετα VFD ή VSD που μπορούν να ελέγξουν την ταχύτητα και τη ροπή σε διαφορετικά στάδια χρήσης.

- iv. Υψηλή αντοχή και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- v. Δυνατότητες για πολυφασικές διαμορφώσεις.

Ωστόσο, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος προσφέρουν επίσης τα δικά τους πλεονεκτήματα, όπως:

- i. Απλή εγκατάσταση και συντήρηση.
- ii. Υψηλή ισχύς και ροπή εκκίνησης.
- iii. Γρήγοροι χρόνοι απόκρισης στην εκκίνηση, τη διακοπή και την επιτάχυνση.
- iv. Διαθεσιμότητα σε πολλές τυπικές τάσεις.

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος θεωρούνται γενικά πιο ισχυροί από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, επειδή μπορούν να παράγουν υψηλότερη ροπή χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη ένταση ρεύματος. Ωστόσο, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι συνήθως πιο αποδοτικοί και χρησιμοποιούν καλύτερα την ενέργεια εισόδου τους. Και οι δύο κινητήρες διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και ισχύ που μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις ισχύος κάθε βιομηχανίας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι κινητήρες AC και DC βρίσκουν εφαρμογή σε διαδικασίες και εγκαταστάσεις σχεδόν σε κάθε κλάδο. Μερικές από τις πιο κοινές βιομηχανικές εφαρμογές για κινητήρες AC περιλαμβάνουν:

- Συσκευές.
- Κινητήρες και συστήματα συμπιεστών.
- Υπολογιστές.
- Συστήματα μεταφοράς.
- Ανεμιστήρες και κλιματιστικά.
- Υδραυλικές και αρδευτικές αντλίες.
- Εξοπλισμός μεταφοράς.

Οι κοινές βιομηχανικές εφαρμογές για κινητήρες συνεχούς ρεύματος περιλαμβάνουν:

- Μονάδες κατασκευής και παραγωγής.
- Μηχανήματα που απαιτούν σταθερή ισχύ όπως ηλεκτρικές σκούπες, ανελκυστήρες και ραπτομηχανές.
- Εξοπλισμός διαλογής αποθήκης.

Κεφάλαιο 5: Πειραματική μελέτη ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

Σε έναν κινητήρα είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τις τιμές των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος, διότι αυτό αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τον μετέπειτα προσδιορισμό της απόκρισης του κινητήρα στις αλλαγές του φορτίου του. Για να εξάγουμε αυτές τις τιμές πρέπει να υποβάλλουμε τον κινητήρα σε μία σειρά από πειράματα, τα οποία είναι:

- μέτρηση ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη,
- λειτουργία εν κενώ,
- πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα.

Αυτά τα πειράματα θα πρέπει να πραγματοποιηθούν κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες γιατί οι αντιστάσεις μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και ειδικά η αντίσταση του δρομέα μεταβάλλεται με τη συχνότητά του.

5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα.

Πριν την πραγματοποίηση των πειραμάτων είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του τριφασικού κινητήρα. Αυτά τα στοιχεία αναγράφονται στην ονομαστική πινακίδα επάνω στο μοτέρ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1, και αποτελούν τη ταυτότητα του κατασκευαστή πάνω στη μηχανή προκειμένου να τα λαμβάνει υπόψη τον όποιος τη χρησιμοποιεί. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι κοινά για κάθε συσκευή αυτού του τύπου και διαφέρουν ελάχιστα από συσκευή σε συσκευή εξαιτίας των μικρών κατασκευαστικών ατελειών. Οι ενδείξεις 220-380 V και 3,91-2,26 A είναι η ονομαστική τάση και το ονομαστικό ρεύμα σε διάταξη τριγώνου και αστέρα αντίστοιχα. Η ονομαστική ισχύς είναι 1,1 kW. Η συχνότητα είναι στα 50 Hz και η ταχύτητα στα 2835 Rpm. Επιπλέον, ο βαθμός προστασίας είναι IP 20, όπου το ψηφίο 2

δηλώνει την προστασία έναντι εισχώρησης ξένων σωμάτων και το ψηφίο 0 την προστασία έναντι εισχώρησης νερού.



44 Εικόνα 5.1: Ονομαστική πινακίδα κινητήρα.

5.2 Μέτρηση ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη.

Ο σκοπός του πρώτου πειράματος είναι η μελέτη της λειτουργίας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα χωρίς φορτίο και ο υπολογισμός της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη σε συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου αντίστοιχα.

5.2.1 Θεωρητικό μέρος.

Η τιμή της αντίστασης τυλιγμάτων του στάτη ενός ασύγχρονου κινητήρα είναι χρήσιμη για τον καθορισμό :

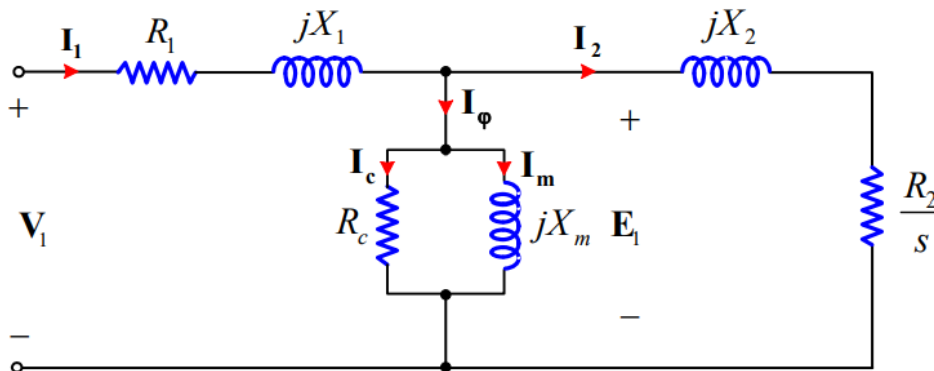
- της απόδοσης (η)
- των ροπών (T) και της ολίσθησης (s) υπό φορτίο.

5.2.2 Πειραματικό μέρος.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

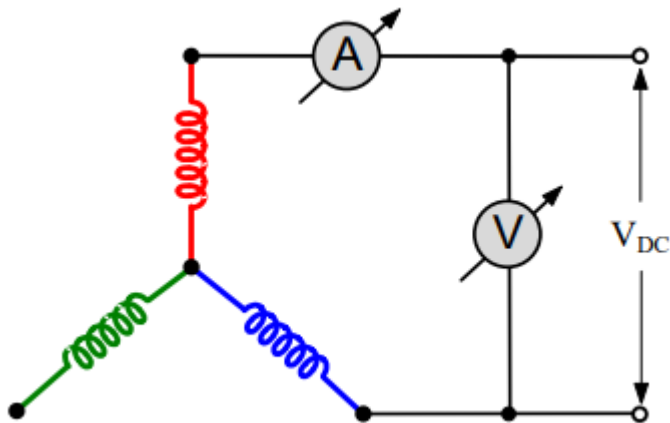
- Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με:
 - Ονομαστική ισχύ $P=1,1 \text{ Kw}$.
 - Σύγχρονη ταχύτητα $n_s=3000 \text{ rpm}$ (2 πόλοι).
 - Ονομαστική τάση 220-380 V.
 - Ονομαστικό ρεύμα 3,91-2,26 A.
- Βολτόμετρο.
- Αμπερόμετρο.
- Τροφοδοτικό.

Η συνδεσμολογία που υλοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 5.1.

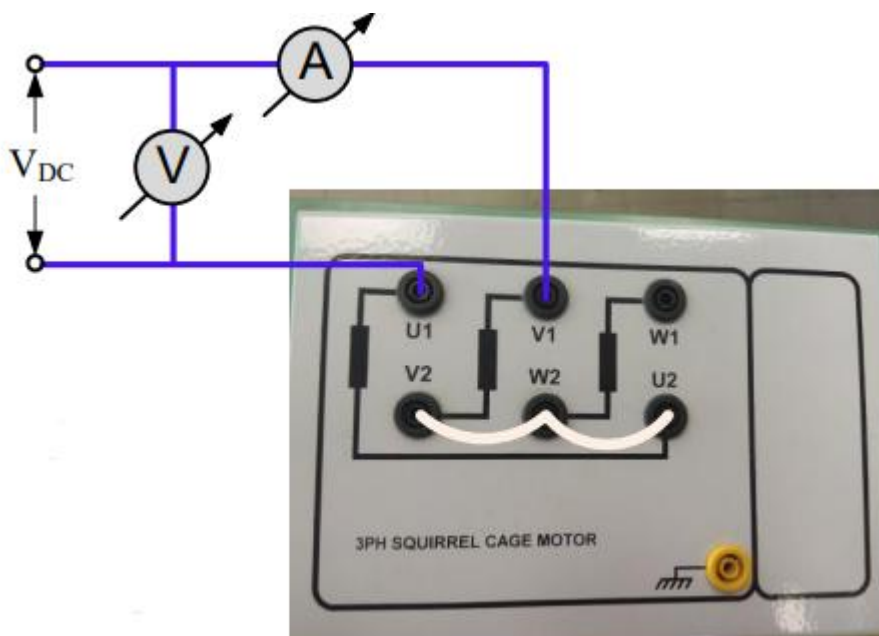


45 Εικόνα 5.2: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα..

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, υπολογίσαμε την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη του επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2 και την εικόνα 5.2 συμπληρώνοντας τον πίνακα 5.1.



46 Εικόνα 5.3: Τυλίγματα στάτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα.



47 Εικόνα 5.4: Τυλίγματα στάτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα (από εργαστήριο).

7 Πίνακας 5.1 Μετρήσεων ωμικής αντίστασης σε συνδεσμολογία αστέρα.

| α/α | V _{DC} (V) | I _{DC} (A) | R _{DC} (Ω) |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 5,21 | 0,39 | 13,36 |
| 2 | 8,74 | 0,67 | 13,04 |
| 3 | 14,95 | 1,16 | 12,89 |

5.2.3 Υπολογισμοί.

Για να υπολογίσουμε την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη σε συνδεσμολογία αστέρα πραγματοποιήσαμε τους κατώθι υπολογισμούς.

$$R_{DC1} = \frac{V_{DC1}}{I_{DC1}} = \frac{5,21}{0,39} = 13,36 \Omega.$$

$$R_{DC2} = \frac{V_{DC2}}{I_{DC2}} = \frac{8,74}{0,67} = 13,04 \Omega.$$

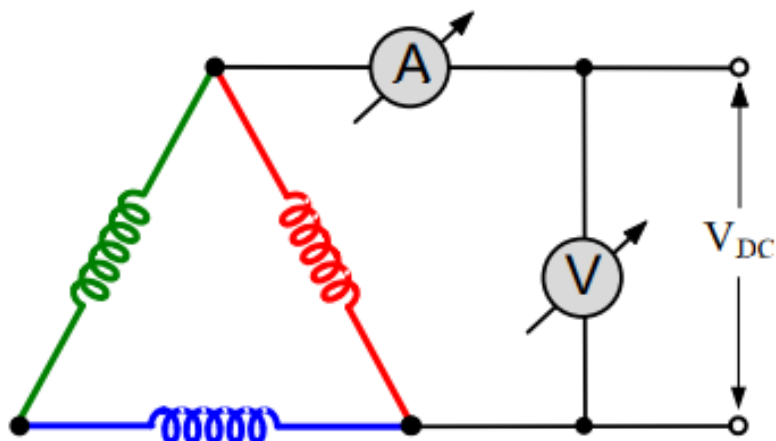
$$R_{DC3} = \frac{V_{DC3}}{I_{DC3}} = \frac{14,95}{1,16} = 12,89 \Omega.$$

Έπειτα βρίσκω το μέσο όρο της R_{DC}

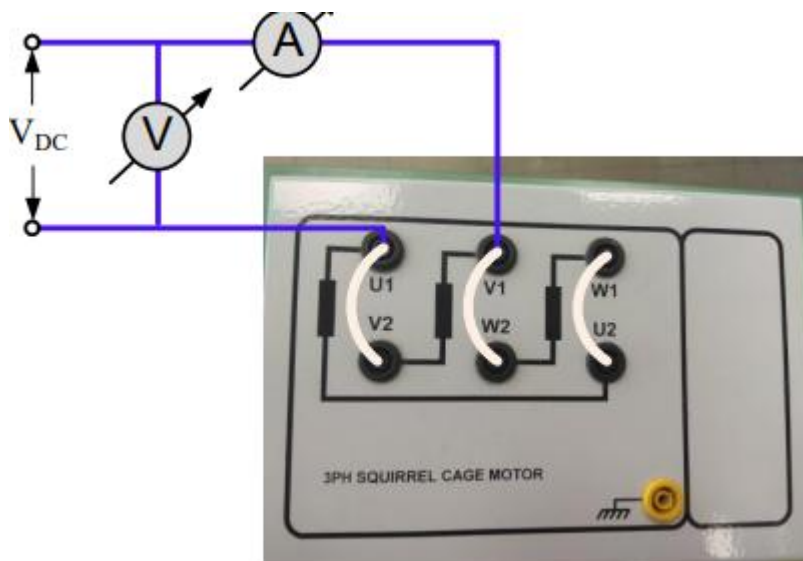
$$R_{DC} = 13,36 + 13,04 + 12,89 = 13,10 \Omega.$$

$$\text{Τέλος εφαρμόζω τον τύπο } R = \frac{R_{DC}}{2} = \frac{13,10}{2} = 6,55 \Omega.$$

Έπειτα, υπολογίσαμε την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη του επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3 και την εικόνα 5.3 συμπληρώνοντας τον πίνακα 5.2.



48 Εικόνα 5.5: Τυλίγματα στάτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου.



49 Εικόνα 5.6: Τυλίγματα στάτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου(από εργαστήριο).

8 Πίνακας 5.2 Μετρήσεων ωμικής αντίστασης σε συνδεσμολογία τριγώνου.

| α/α | V_{DC} (V) | I_{DC} (A) | R_{DC} (Ω) |
|-----------------|--------------|--------------|-----------------------|
| 1 | 5,16 | 1,12 | 4,61 |
| 2 | 10,77 | 2,42 | 4,45 |
| 3 | 20,36 | 4,68 | 4,35 |

Για να υπολογίσουμε την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη σε συνδεσμολογία τριγώνου πραγματοποιήσαμε τους κατώθι υπολογισμούς.

$$R_{DC1} = \frac{V_{DC1}}{I_{DC1}} = \frac{5,16}{1,12} = 4,61 \Omega.$$

$$R_{DC2} = \frac{V_{DC2}}{I_{DC2}} = \frac{10,77}{2,42} = 4,45 \Omega.$$

$$R_{DC3} = \frac{V_{DC3}}{I_{DC3}} = \frac{20,36}{4,68} = 4,35 \Omega.$$

Έπειτα βρίσκω το μέσο όρο της R_{DC}

$$R_{DC} = 4,61 + 4,45 + 4,35 = 13,41 \Omega.$$

$$\text{Εφαρμόζω τον τύπο } R = \frac{3 R_{DC}}{2} = \frac{13,41}{2} = 6,71 \Omega.$$

5.2.4 Συμπεράσματα.

Παρατηρώ ότι η ωμική αντίσταση του στάτη είναι περίπου ίδια σε συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου. Αυτό συμβαίνει γιατί τα τυλίγματα έχουν την ίδια τιμή και δεν εξαρτώνται από την συνδεσμολογία.

Παράλληλα κατά τη διάρκεια του πειράματος παίρνουμε τρεις μετρήσεις σε κάθε συνδεσμολογία για να έχουμε πιο σωστό αποτέλεσμα.

Το τριφασικό τύλιγμα του κινητήρα τροφοδοτείται από συμμετρικό σύστημα ρευμάτων και δημιουργεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού πλάτους.

Τέλος, οι αντιστάσεις μετρήθηκαν αφότου ο κινητήρας έπιασε θερμοκρασία λειτουργίας για να μην υπάρξουν ατέλειες για μια σωστή μέτρηση.

5.3 Λειτουργία εν κενώ.

5.3.1 Θεωρητικό μέρος.

Στο πείραμα της λειτουργίας εν κενώ θα τροφοδοτήσουμε τον κινητήρα με τριφασικό ρεύμα διαφόρων τιμών και θα λειτουργήσει εν κενώ, δηλαδή χωρίς φορτίο. Επομένως η ενέργεια που προσδίδεται σε αυτόν θα μετατρέπεται αποκλειστικά σε κίνηση στον άξονά του και σε απώλειες που περιγράφονται παρακάτω.

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο, τότε η αναρροφούμενη ισχύς $P_{in} = P_{nl}$ χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κάλυψη των απωλειών του.

$$P_{in} = P_{nl} = P_{cu, s} + P_{cu, r} + P_{w, c}.$$

Οι ηλεκτρικές απώλειες του στάτη ή απώλειες χαλκού στα τύλιγμα του στάτη, δίνονται από τη σχέση: $P_{cu, s} = 3 I^2 R = 3 I_{nl}^2 R$

και οι ηλεκτρικές απώλειες του δρομέα ή απώλειες χαλκού στα τύλιγμα του δρομέα, δίνονται από τη σχέση: $P_{cu, r} = 3 I^2 R$

οι οποίες, στη περίπτωση του κινητήρα χωρίς φορτίο θεωρούνται αμελητέες. Επομένως, ισχύει για κινητήρα χωρίς φορτίο:

$$P_{w, c} = P_w + P_{core} = P_{in} - P_{cu, s} = P_{in} - 3 I_{nl}^2 R.$$

Ο διαχωρισμός των μηχανικών απωλειών (απώλειες τριβών και ανεμισμού) από τις απώλειες του πυρήνα (απώλειες μαγνητικής υστέρησης και δινορρευσμάτων), μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί κατά τη δοκιμή κενού φορτίου, τροφοδοτώντας τον κινητήρα με τάση μεταβαλλόμενου μεγέθους και σταθερής συχνότητας ίση με την ονομαστική. Οι απώλειες πυρήνα είναι ανάλογες του τετραγώνου της ενεργού τιμής της τάσης τροφοδοσίας, μειώνονται σημαντικά με τη μείωση του μεγέθους της τάσης τροφοδοσίας. Οι μηχανικές απώλειες παραμένουν σχεδόν σταθερές, αφού η αύξηση της ολίσθησης με τη μείωση του μεγέθους της τάσης είναι αρκετά μικρή

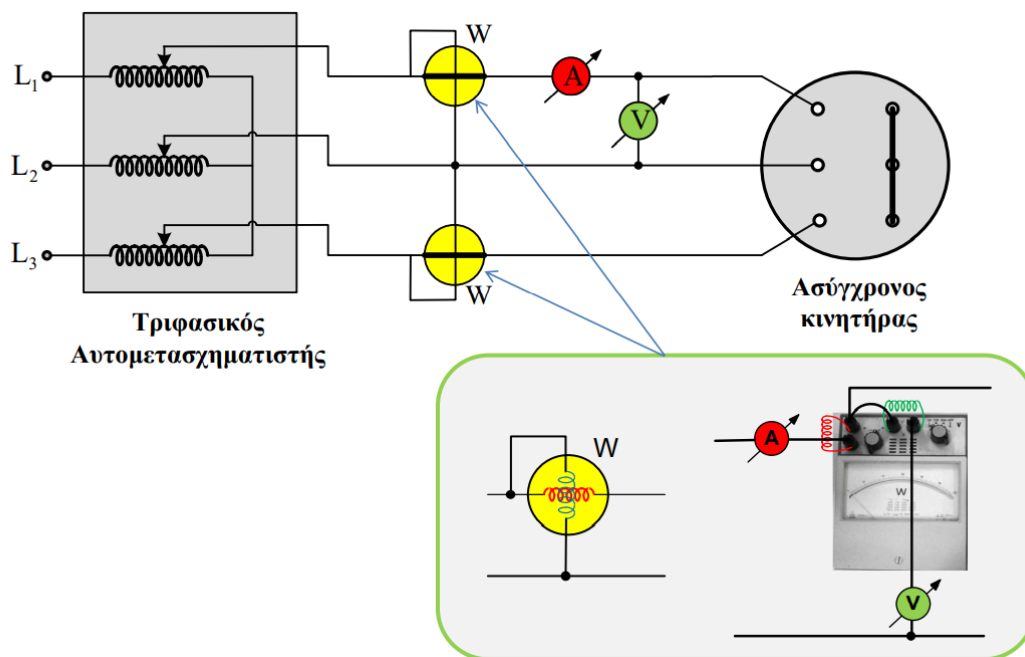
5.3.2 Πειραματικό μέρος.

Το πείραμα θα πραγματοποιηθεί για διάφορες τιμές της τάσης (V), δίχως να παραβιάσουμε την ονομαστική τάση που αναγράφεται στην πινακίδα της μηχανής.

Ο εξοπλισμός του κυκλώματος είναι ο εξής:

- Τριφασικό Τροφοδοτικό (Variac) με μεταβαλλόμενη τάση.
- Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με:
 - Ονομαστική ισχύ $P=1,1 \text{ Kw}$.
 - Σύγχρονη ταχύτητα $n_s=3000 \text{ rpm}$ (2 πόλοι).
 - Ονομαστική τάση 220-380 V.
 - Ονομαστικό ρεύμα 3,91-2,26 A.
- Βατόμετρα (Για την συνολική ισχύ προσθέτουμε τις ισχύς των δυο βατομέτρων).
- Αμπερόμετρο, Βολτόμετρο.

Αρχικά πραγματοποιούμε την συνδεσμολογία σχήμα 5.4.



50 Εικόνα 5.7: Εργαστηριακό κύκλωμα για τον προσδιορισμό των ισχύων τριφασικού επαγωγικού κινητήρα στην εν κενώ λειτουργία.

Έπειτα, εκκινούμε τον κινητήρα μέσω του τροφοδοτικού ρυθμίζοντας τη τάση σταδιακά μέχρι το 1.2 της ονομαστικής τάσης V . Τροφοδοτούμε τον κινητήρα μειώνοντας σταδιακά τη τάση τροφοδοσίας για διάφορες τιμές και ονομαστική συχνότητα υπό κενό φορτίο. Καταγράφουμε τις ενδείξεις των V_{nl} , I_{nl} και P_{nl} . Υπολογίζουμε από τα μεγέθη που μετρήσατε τις τιμές των V_{nl}^2 και I_{nl}^2 . Υπολογίζουμε στη συνέχεια τις ηλεκτρικές απώλειες $P_{Cu,s}$ και τις σταθερές μηχανικές απώλειες και απώλειες πυρήνα $P_{w,c}$, τις καταχωρούμε στον πίνακα 5.3.

9 Πίνακας 5.3 Μετρήσεων απωλειών.

| α/α | V_{nl} (V) | I_{nl} (A) | P_{nl} (W) | V_{nl}^2 (V) | I_{nl}^2 (A) | $P_{Cu,s}$ (W) | $P_{w,c}$ (W) |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | 380 | 0,83 | 308,50 | 144400 | 0,6889 | 13,43 | 295,07 |
| 2 | 340 | 0,71 | 245 | 115600 | 0,5041 | 9,83 | 235,17 |
| 3 | 300 | 0,61 | 176 | 90000 | 0,3721 | 7,26 | 168,74 |
| 4 | 260 | 0,53 | 127,50 | 67600 | 0,2809 | 5,48 | 122,02 |
| 5 | 220 | 0,46 | 94 | 48400 | 0,2116 | 4,13 | 89,87 |
| 6 | 180 | 0,43 | 70 | 32400 | 0,1849 | 3,61 | 66,39 |

5.3.3 Υπολογισμοί.

Οι ηλεκτρικές απώλειες $P_{Cu,s}$ και οι σταθερές μηχανικές απώλειες και απώλειες πυρήνα $P_{w,c}$ υπολογίζονται με τον παρακάτω τύπο, θεωρώντας ως $R_1 = 6,5 \Omega$ (από πείραμα πρώτο):

$$P_{Cu,s} = 3 I_l^2 R_1 = 3 I_{nl}^2 R_1$$

1. $P_{Cu,s} = 3 * 0,6889 * 6,5 = 13,43 \text{ W.}$

2. $P_{Cu,s} = 3 * 0,5041 * 6,5 = 9,83 \text{ W.}$

3. $P_{Cu,s} = 3 * 0,3721 * 6,5 = 7,26 \text{ W.}$

4. $P_{Cu,s} = 3 * 0,2809 * 6,5 = 5,48 \text{ W.}$

5. $P_{Cu,s} = 3 * 0,2116 * 6,5 = 4,13 \text{ W.}$

6. $P_{Cu,s} = 3 * 0,1849 * 6,5 = 3,61 \text{ W.}$

$$P_{w,c} = P_{nl} - P_{Cu,s}$$

1. $P_{w,c} = 308,50 - 13,43 = 295,07 \text{ W.}$

2. $P_{w,c} = 245 - 9,83 = 235,17 \text{ W.}$

3. $P_{w,c} = 176 - 7,26 = 168,74 \text{ W.}$

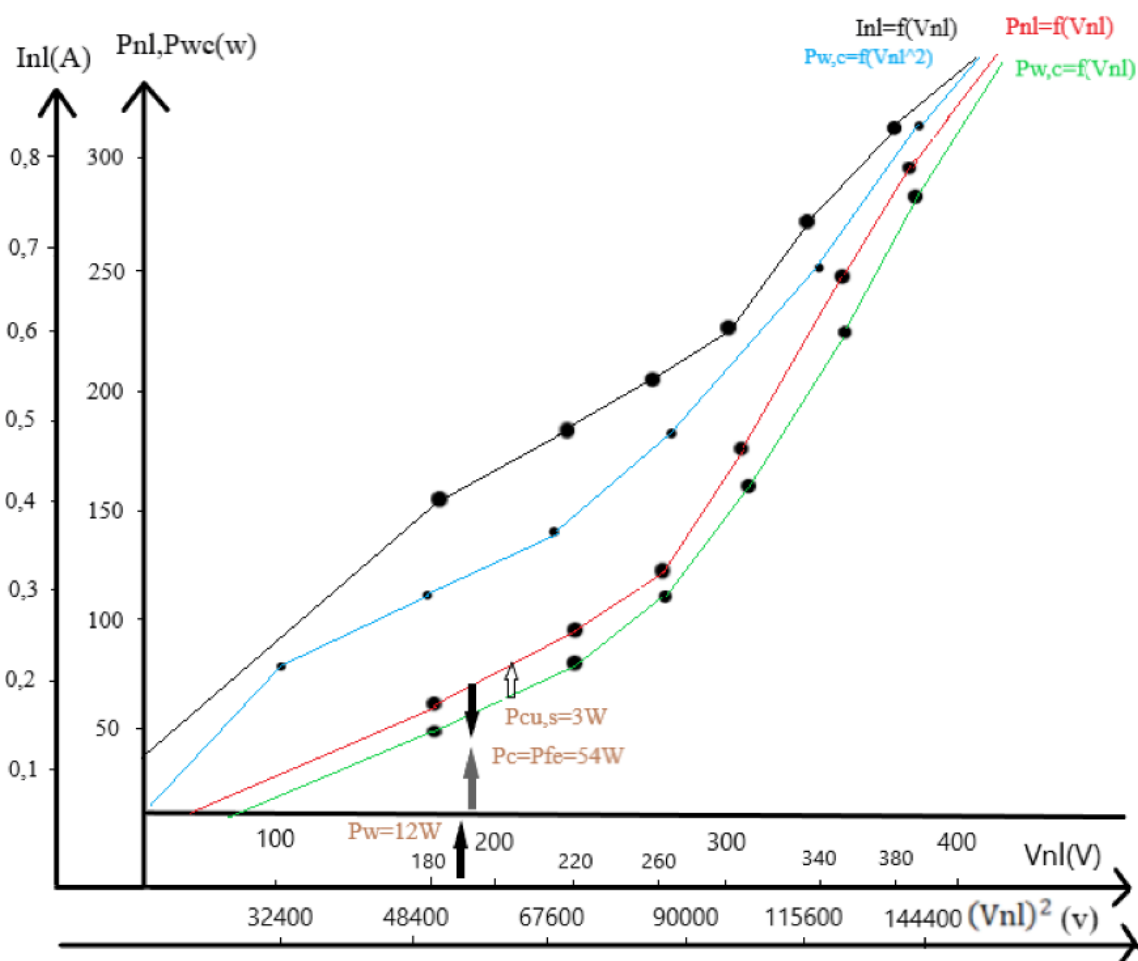
4. $P_{w,c} = 127,50 - 5,48 = 122,02 \text{ W.}$

5. $P_{w,c} = 94 - 4,13 = 89,87 \text{ W.}$

6. $P_{w,c} = 70 - 3,61 = 66,39 \text{ W.}$

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα 5.3 σχεδιάζουμε τις χαρακτηριστικές $I_{nl}=f(V_{nl})$,

$P_{nl}=f(V_{nl})$, $P_{w,c}=f(V_{nl})$, $P_{w,c} = f(V_{nl})^2$ σε κοινό άξονα.



51 Εικόνα 5.8: Χαρακτηριστικές $I_{nl}=f(V_{nl})$, $P_{nl}=f(V_{nl})$, $P_{wc}=f(V_{nl})$, $P_{wc}=f(V_{nl})^2$ σε κοινό άξονα

5.3.4 Συμπεράσματα.

Στη γραφική παράσταση παρατηρώ ότι η προέκταση της μέχρι τον πλήρη μηδενισμό της τάσης, όπου μηδενίζονται και οι απώλειες πυρήνα, οδηγεί στον υπολογισμό των απωλειών του πυρήνα.

Οι μηχανικές απώλειες παραμένουν σχεδόν σταθερές, διότι η αύξηση της ολίσθησης με τη μείωση του μεγέθους της τάσης είναι αρκετά μικρή.

Επιπλέον, βλέπω στο γράφημα ότι οι απώλειες P_{wc} είναι ανάλογες του τετραγώνου της τάσης V_{nl}^2 και η γραφική παράσταση έχει τη μορφή ευθείας. Προεκτείνοντας την μπλε χαρακτηριστική μέχρι τον πλήρη μηδενισμό της τάσης τέμνει τον κατακόρυφο άξονα σε ένα σημείο 12 W περίπου, το οποίο οδηγεί στον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα.

Παράλληλα, συγκρίνοντας το υπολογιστικό μέρος με το γραφικό μέρος και έχοντας ως σημείο αναφοράς τη μέτρηση 6 (180 V), παρατηρώ ότι στη γραφική παράσταση οι ηλεκτρικές απώλειες $P_{cus}=3$ W, ενώ μέσω υπολογισμών $P_{cus}=3,61$ W. Άρα συμπίπτουν αυτοί οι δύο τρόποι υπολογισμού έχοντας ελάχιστη διαφορά. Επιπρόσθετα, στη μέτρηση 6 οι απώλειες πυρήνα είναι $P_{wc}=66,39$ W υπολογιστικά, ενώ γραφικά ξέρω ότι $P_{wc}=P_w+P_c=54+12=66$ W. Πάλι και οι δύο τιμές είναι πολύ κοντά.

5.4 Πείραμα ακινητοποιήμενου δρομέα.

Το πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα που πραγματοποιήθηκε στον επαγωγικό κινητήρα, έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα. Το πείραμα αυτό είναι παρόμοιο με το πείραμα βραχυκύκλωσης ενός μετασχηματιστή. Η διαφορά είναι ότι ο δρομέας μένει ακίνητος και εφαρμόζουμε διάφορες τιμές ρεύματος μικρότερες της ονομαστικής και έπειτα μετράμε την τάση, το ρεύμα και την ισχύ καθώς και άλλες παραμέτρους του κινητήρα. Ο δρομέας σταθεροποιείται με ειδικά προσαρμοσμένο φρένο ή με το χέρι. Κατά τη διάρκεια του πειράματος ο δρομέας κρατήθηκε χειροκίνητα.

Κατά τη λειτουργία της μηχανής με κλειδωμένο το δρομέα θεωρείται ότι είναι βραχυκυκλωμένη, διότι οι περιελίξεις του στάτη και του δρομέα βρίσκονται σε ηλεκτρική αναλογία με τις πρωτεύουσες και δευτερεύουσες περιελίξεις ενός στατικού μετασχηματιστή που δουλεύει σε βραχυκυκλωμένες συνθήκες.

Αξιοσημείωτο είναι ότι σε αυτό το πείραμα η ενέργεια που προσδίδουμε στον κινητήρα απορροφάται μόνο από τις αντιστάσεις τυλιγμάτων του δρομέα και από τις ελάχιστες αντιστάσεις διαρροής. Έτσι θα οδηγηθούμε σε θέρμανση των τυλιγμάτων και είναι απαραίτητο να προσέχουμε ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση αυτών, καθώς θα είχε καταστροφικές συνέπειες για τον κινητήρα αλλά και για την ασφάλεια του πειράματος.

5.4.1. Θεωρητικό μέρος.

Αρχικά όταν ο κινητήρας είναι σε θερμοκρασία δωματίου θα προσδώσουμε το μέγιστο φορτίο (ονομαστικό) και παίρνοντας γρήγορα τις μετρήσεις θα μειώνουμε σταδιακά το φορτίο εισόδου. Με αυτόν τον τρόπο όταν η μηχανή έχει ήδη θερμανθεί το ρεύμα που θα

προσδίδουμε θα είναι χαμηλό. Αυτή είναι η σωστή μεθοδολογία για την αποφυγή καταστροφικής βλάβης της μηχανής.

Σε αυτό το πείραμα η ισχύς μετατρέπεται σε :

- απώλειες ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη.
- απώλειες στα τυλίγματα του δρομέα.
- επιπρόσθετες απώλειες στο χαλκό του δρομέα.

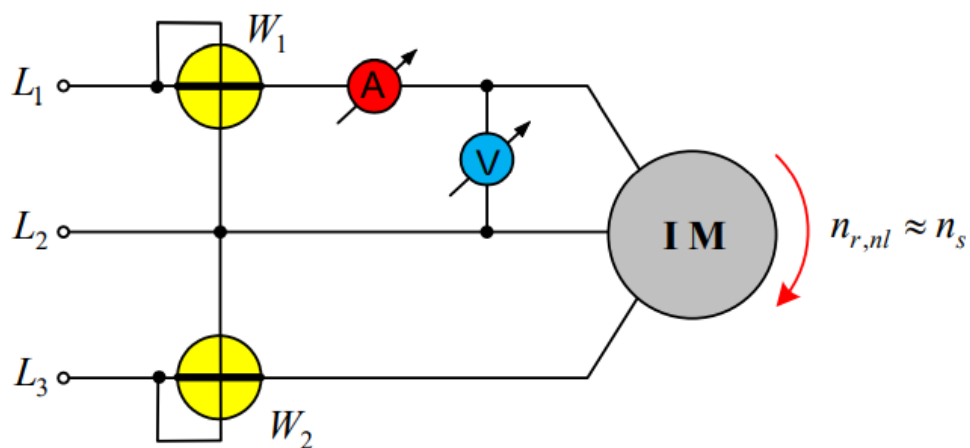
Οι επιπρόσθετες απώλειες χαλκού οφείλονται στην υψηλή συχνότητα η οποία παράγει δινορρέυματα στο δρομέα. Επομένως η απώλειες ισχύος αυξάνονται σε σύγκριση με τις τιμές που πήραμε κατά τη φυσιολογική λειτουργία, όπου υπάρχουν πολύ μικρές συχνότητες δρομέα.

5.4.2 Πειραματικό μέρος.

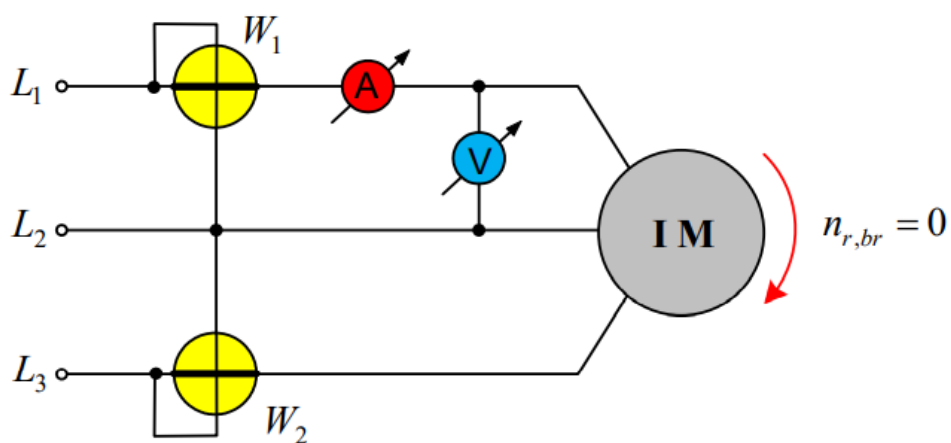
Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα (σε σύνδεση αστέρα)με:
 - Ονομαστική ισχύ $P=1,1 \text{ Kw}$.
 - Σύγχρονη ταχύτητα $n_s=3000 \text{ rpm}$ (2 πόλοι).
 - Ονομαστική τάση 220-380 V.
 - Ονομαστικό ρεύμα 3,91-2,26 A.
- Τριφασικό τροφοδοτικό Variac με μεταβαλλόμενη τάση.
- 2 Αναλογικά βατόμετρα.
- Αμπερόμετρο.
- Βολτόμετρο.

Η συνδεσμολογία της άσκησης φαίνεται στο Σχήμα 5.5 και 5.6:



52 Εικόνα 5.9: Εργαστηριακό κύκλωμα για δοκιμή κενού φορτίου.



53 Εικόνα 5.10: Εργαστηριακό κύκλωμα για δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.

Αρχικά τροφοδοτούμε τον κινητήρα με ονομαστικότητα και συχνότητα υπό κενό φορτίο. Μετράμε τις ενδείξεις των V_{nl} , I_{nl} και P_{nl} και συμπληρώνουμε τον πίνακα 5.4.

10 Πίνακας 5.4 Μετρήσεων εν κενώ.

| Vnl (V) | Inl (A) | Pnl (W) |
|----------------|----------------|----------------|
| 380 | 0,83 | 308,5 |

Αυξάνουμε βαθμιαία τη τάση τροφοδοσίας του κινητήρα μέχρις ότου το απορροφούμενο ρεύμα, γίνει ίσο με το ονομαστικό. Μετράμε τις ενδείξεις των οργάνων. Δηλαδή τις Vbr , Ibr και Pbr και συμπληρώνουμε τον πίνακα 5.5.

11 Πίνακας 5.5 Μετρήσεων ακινητοποιημένου δρομέα.

| Vbr (V) | Ibr (A) | Pbr (W) |
|----------------|----------------|----------------|
| 78,6 | 2,26 | 187,5 |

5.4.3 Υπολογισμοί.

Έπειτα υπολογίζουμε τις τιμές των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος της μιας φάσης.

Από το πείραμα στην εν κενώ λειτουργία ισχύει ότι:

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3 I_{nl}^2} = \frac{308,5}{3 * 0,83^2} = 149,27 \Omega.$$

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3} I_{nl}} = \frac{380}{\sqrt{3} * 0,83} = 264,33 \Omega.$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} = \sqrt{264,33^2 - 149,27^2} = 218,15 \Omega.$$

Από το πείραμα με ακινητοποιημένο δρομέα ισχύει ότι:

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{3 I_{br}^2} = \frac{187,5}{3 * 2,26^2} = 12,24 \Omega.$$

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{\sqrt{3}I_{br}} = \frac{78,6}{\sqrt{3} * 2,26} = 20,10 \Omega.$$

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2} = \sqrt{20,10^2 - 12,24^2} = 15,94 \Omega.$$

Στις συνηθισμένες μηχανές του εμπορίου (κλάσης A), ισχύει $X_1=X_2$.

$$\text{Οπότε } X_1=X_2=\frac{X_{br}}{2}=\frac{15,94}{2}=7,97 \Omega.$$

Γνωρίζοντας την αντίδραση σκέδασης X_1 , μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την αντίδραση μαγνήτισης X_m , δηλαδή $X_m=X_{nl}-X_1=218,15-7,97=210,18 \Omega$.

Επομένως, η αντίστοιχη τιμή R_2 της ωμικής αντίστασης του τυλίγματος του δρομέα, υπολογίζεται: $R_2=R_{br}-R_1=12,24-6,5=5,74 \Omega$ (θεωρώντας ως $R_1 =6,5 \Omega$ από πείραμα πρώτο).

Επιπλέον, για να υπολογίσουμε τη μέγιστη ροπή, τη ροπή εκκίνησης και την ολίσθηση μέγιστης ροπής πραγματοποιούμε τους παρακάτω υπολογισμούς:

Η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi * 3000}{60} = 314,16 \frac{rad}{s}.$$

Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin, ισχύει ότι:

$$V_{th} = V_1 * \frac{jX_m}{(R_1 + jX_1) + jX_m} = V_1 * \frac{jX_m}{R_1 + jX_{11}} = \frac{380}{\sqrt{3}} * \frac{j * 210,18}{6,5 + j * 218,15} = 211,28 < 1,71^\circ V.$$

Όπου $X_{11}=X_1+X_m=7,97+210,18=218,15 \Omega$.

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση είναι:

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + jX_{11}} = \frac{j * 210,18(6,5 + j * 7,97)}{6,5 + j * 218,15} = 6,03 + 7,86j \Omega.$$

Ολοκληρώνοντας τις πράξεις καταλήγουμε:

$$R_{th} = \frac{X_m^2 R_1}{X_{11}^2 + R_1^2} = \frac{210,18^2 * 6,5}{218,15^2 + 6,5^2} = 6,03 \Omega.$$

$$X_{th} = \frac{X_m(R_1^2 + X_1 * X_{11})}{X_{11}^2 + R_1^2} = \frac{210,18 * (6,5^2 + 7,97 * 218,15)}{218,15^2 + 6,5^2} = 7,86 \Omega.$$

Η μέγιστη ροπή είναι:

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_s} * \frac{V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} = \frac{3}{2 * 314,16} * \frac{211,28^2}{6,03 + \sqrt{6,03^2 + (7,86 + 7,97)^2}} = 9,28 \text{ Nm.}$$

Η ροπή κατά την εκκίνηση είναι:

$$T_{st} = \frac{3}{\omega_s} * \frac{V_{th}^2 * R_2}{(R_{th} + R_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2} = \frac{3}{314,16} * \frac{211,28^2 * 5,74}{(6,03 + 5,74)^2 + (7,86 + 7,97)^2} = 6,29 \text{ Nm.}$$

Η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή είναι:

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} = \frac{5,74}{\sqrt{6,03^2 + (7,86 + 7,97)^2}} = 0,34.$$

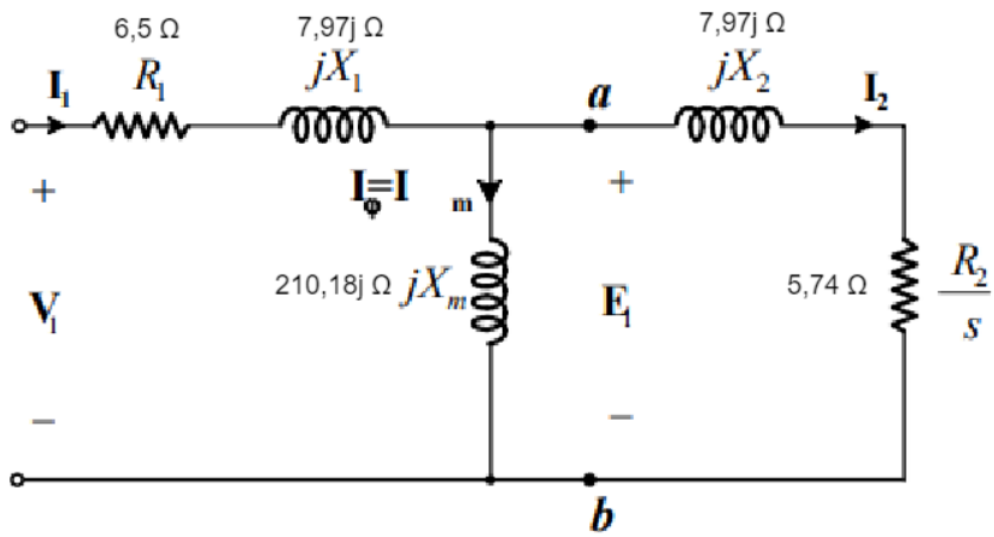
Η ολίσθηση στις ονομαστικές στροφές είναι:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{3000 - 2835}{3000} = 0,055 \text{ ή } 5,5\%.$$

Οι μέγιστες στροφές της μέγιστης ροπής είναι: $n_{max,\tau} = n_s - s_{max,\tau} * n_s = 3000 - 0,34 * 3000 =$

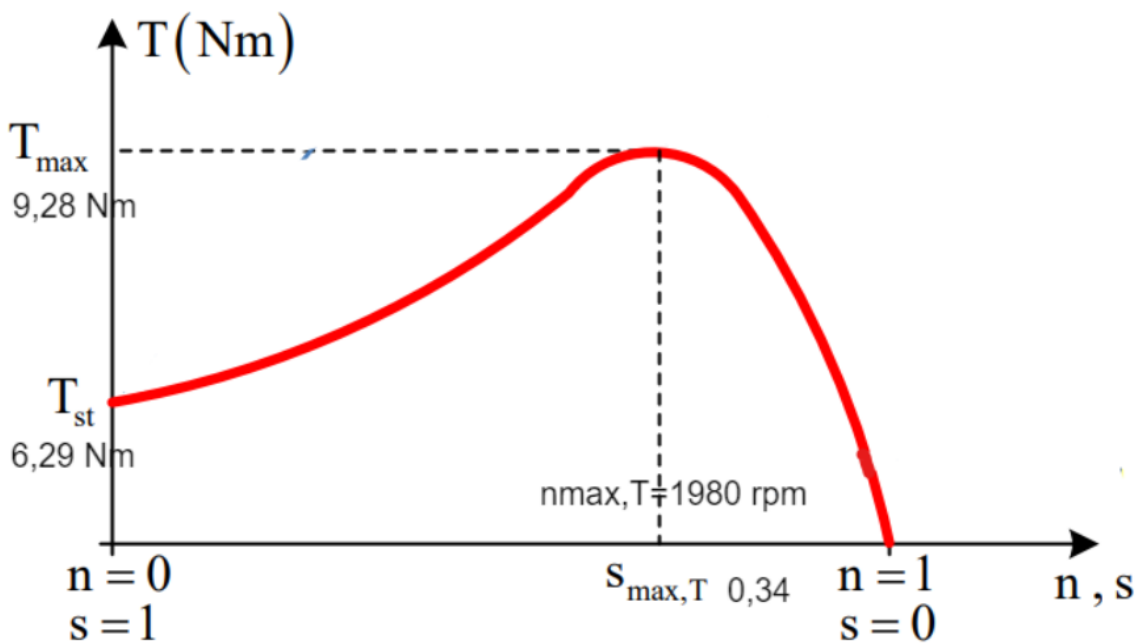
1980 rpm.

Με βάση τα στοιχεία που υπολογίσαμε το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης φαίνεται στο σχήμα 5.7.



54 Εικόνα 5.11: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης.

Η χαρακτηριστική ροπής–στροφών $T = (n)$ φαίνεται στο σχήμα 5.8.



55 Εικόνα 5.12: Χαρακτηριστική ροπής στροφών.

5.4.4 Συμπεράσματα.

Στο γράφημα παρατηρώ, ότι κάθε αύξηση της ολίσθησης, πάνω από την τιμή $S_{max}=0,34$, που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής $T_{max}=9,28$ Nm, προκαλεί μείωση της παραγόμενης ροπής και σταδιακή μείωση των στροφών, καθώς στο συγκεκριμένο κλάδο της χαρακτηριστικής ο κινητήρας αδυνατεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του φορτίου. Επομένως, η αύξηση της ολίσθησης προκαλεί αύξηση της παραγόμενης ροπής, μέχρι μιας μέγιστης τιμής, η οποία καθορίζει το όριο ευσταθούς και ασταθούς περιοχής λειτουργίας του κινητήρα.

Παράλληλα, παρατηρώ ότι η ολίσθηση του κινητήρα είναι μικρή $s=0,055$, άρα ο κινητήρας λειτουργεί με υψηλές στρόφες, οι οποίες πλησιάζουν τις σύγχρονες και έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Επιπλέον, κατά τη δοκιμή κενού φορτίου η n_r είναι πολύ κοντά στη n_s , οπότε μπορούμε να αμελήσουμε τον ισοδύναμο ανηγμένο κλάδο του τυλίγματος του δρομέα.

Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με χρήση MATLAB-SIMULINK.

6.1 Εισαγωγή.

Η προσομοίωση με το λογισμικό Matlab-Simulink είναι ένα από τα βασικά βήματα για την επαλήθευση της πειραματικής διαδικασίας σχεδιασμού του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, η οποία εξαλείφει λάθη και συνακόλουθα σφάλματα κατά τη δοκιμή του.

Το Matlab-Simulink έχει ένα πλεονέκτημα έναντι άλλων προσομοιωτών μηχανών, διότι χρησιμοποιεί δυναμικά μοντέλα (μαθηματικά μοντέλα) για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του κινητήρα επαγωγής τόσο σε μεταβατική όσο και σε σταθερή κατάσταση. Η δυναμική μοντελοποίηση θέτει όλες τις μηχανικές εξισώσεις για την αδράνεια, τη ροπή και την ταχύτητα έναντι του χρόνου. Επίσης, μοντελοποιεί όλες τις συνδέσεις διαφορικής τάσης, ρευμάτων και ροής μεταξύ του σταθερού στάτορα καθώς και του κινούμενου ρότορα. Επομένως, το ηλεκτρομηχανολογικό δυναμικό μοντέλο μπορεί να επιτευχθεί με απλό τρόπο και ταχύτερα χρησιμοποιώντας μπλοκ συναρτήσεων, έτσι ώστε όλες οι μεταβλητές να μπορούν να διατίθενται άμεσα για έλεγχο και επαλήθευση.

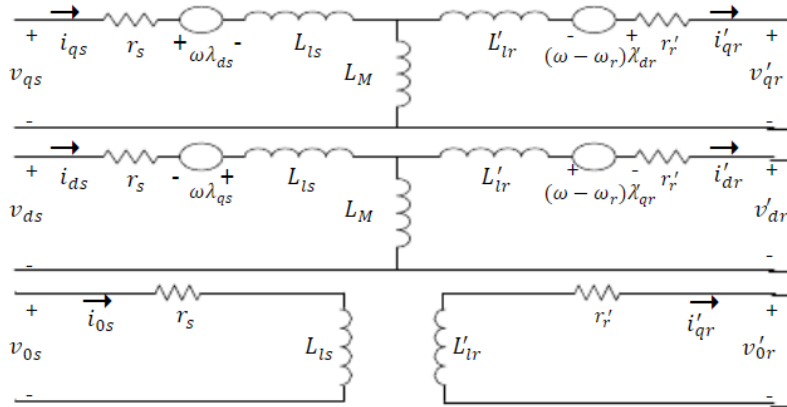
Τέλος, ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας προσομοιώνεται με τρόπο που διευκολύνει τον αναγνώστη να παρακολουθήσει και να κατανοήσει τη διαδικασία υλοποίησης, καθώς παρέχει πλήρεις λεπτομέρειες σχετικά με τη δομή Simulink για κάθε εξίσωση του μοντέλου.

6.2 Δυναμική ανάλυση.

Η προσομοίωση με Matlab του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα πραγματοποιείται σε τρεις λειτουργικές καταστάσεις:

- Δοκιμή DC.
- Δοκιμή χωρίς φορτίο.
- Δοκιμή με ακινητοποιημένο δρομέα.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται προκύπτουν από το ισοδύναμο κύκλωμα dq0 που φαίνεται στο σχήμα 6.1.



56 Εικόνα 6.1: Ισοδύναμο κύκλωμα dq0.

Οι εξισώσεις των συνδέσεων ροής που σχετίζονται με αυτό το κύκλωμα μπορούν να βρεθούν ως εξής:

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}) \right] \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) \right] \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (\psi_{mq} - \psi_{qr}) \right] \dots \dots (3)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (\psi_{md} - \psi_{dr}) \right] \dots \dots (4)$$

Όπου:

$$\psi_{mq} = X_{ml} \left[\frac{\psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\psi_{qr}}{X_{lr}} \right] \dots \dots \dots (5)$$

$$\psi_{md} = X_{ml} \left[\frac{\psi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\psi_{dr}}{X_{lr}} \right] \dots \dots \dots (6)$$

$$X_{ml} = 1 / \left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

Έπειτα αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές βρίσκουμε τα ρεύματα:

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) \dots\dots\dots (8)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) \dots\dots\dots (9)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{lr}} (\psi_{qr} - \psi_{mq}) \dots\dots\dots (10)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{lr}} (\psi_{dr} - \psi_{md}) \dots\dots\dots (11)$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, η ροπή και η ταχύτητα του δρομέα μπορούν να προσδιοριστούν ως εξής:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right) \frac{1}{\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \dots\dots\dots (12)$$

$$\omega_r = \int \frac{P}{2J} (T_e - T_L) \dots\dots\dots (13)$$

Όπου P: αριθμός πόλων. J: ροπή αδράνειας (Kg/m²).

Μετά την εύρεση των εξισώσεων ροπής και ταχύτητας ως προς τις συνδέσεις ροής d-q και τα ρεύματα του στάτορα, ο μετασχηματισμός του άξονα d-q θα πρέπει τώρα να εφαρμοστεί στις τάσεις εισόδου της μηχανής (στάτορα).

Οι τριφασικές τάσεις του στάτη μιας επαγωγικής μηχανής υπό ισορροπημένες συνθήκες μπορούν να εκφραστούν ως:

$$V_a = \sqrt{2} V_{rms} \sin(\omega t) \dots\dots\dots (14)$$

$$V_b = \sqrt{2} V_{rms} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \dots\dots\dots (15)$$

$$V_c = \sqrt{2} V_{rms} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \dots\dots\dots (16)$$

Αυτές οι τριφασικές τάσεις μεταφέρονται σε ένα σύγχρονο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς σε δύο μόνο φάσεις (μετασχηματισμός άξονα d-q). Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες δύο εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

Οι στιγμιαίες τιμές των ρευμάτων του στάτη και του ρότορα στο τριφασικό σύστημα υπολογίζονται τελικά χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο μετασχηματισμό:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots(19)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(20)$$

6.3 Υλοποίηση Matlab.

Σε αυτή την ενότητα, ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας το Matlab/Simulink. Το μοντέλο υλοποιείται χρησιμοποιώντας το ίδιο σύνολο εξισώσεων που παρέχονται παραπάνω.

Η προσομοίωση ξεκινά με τη δημιουργία τριφασικών τάσεων στάτη, σύμφωνα με τις εξισώσεις (14, 15, 16) και στη συνέχεια μετατρέποντας αυτές τις ισορροπημένες τάσεις σε τάσεις δύο φάσεων που αναφέρονται στο συγχρόνως περιστρεφόμενο πλαίσιο, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (17, 18). Μετά από αυτό, εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις ροής d-q και ρεύματος.

Το αρχείο Matlab που γράφτηκε για το μοντέλο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

```
Command Window
fx >> % M-file on induction machine
% It sets up the motor parameters, initial conditions, and
% mechanical loading in the MATLAB workspace for simulation,
% and plots the results of the simulation.
% Load three-phase induction motor parameters
plhp % load 1 hp motor parameters from plhp.m
% initialize to start from standstill with machine unexcited
Psiqso = 0; % stator q-axis total flux linkage
Pspiqro = 0; % rotor q-axis total flux linkage
Psidso = 0; % stator d-axis total flux linkage
Pspidro = 0; % rotor d-axis total flux linkage
wrbywbo = 0; % pu rotor speed
tstop = 2; % use 2 sec simulation time for Fig. in text

% Transfer to keyboard for simulation
disp('Perform simulation then type return for plots');
keyboard
clf;
subplot(7,1,1)
plot(y(:,1),y(:,2),'-')
ylabel('vag in V')
title('stator phase to neutral voltage')
subplot(7,1,2)
plot(y(:,1),y(:,3),'-')
ylabel('ias in A')
axis([-inf inf -25 25]);
title('stator current')
subplot(7,1,3)
plot(y(:,1),y(:,5),'-')
ylabel('Tem in Nm')
title('developed torque')
subplot(7,1,4) ...
```

57 Εικόνα 6.2: Αρχείο Matlab.

```

plot(y(:,1),y(:,4),'-')
axis([-inf inf 0 1.2]);
ylabel('wr/wb')
title('pu rotor speed')
subplot(7,1,5)
plot(y(:,1),y(:,6),'-')
ylabel('idr in A')
title('d-current')
xlabel('time in sec')
subplot(7,1,6)
plot(y(:,1),y(:,7),'-')
ylabel('v0s in V')
title('v0s voltage')
subplot(7,1,7)
plot(y(:,1),y(:,8),'-')
ylabel('i0s in A')
title('0-current')
xlabel('time in sec')

```

58 Εικόνα 6.2: Αρχείο Matlab.

```

Command Window
fx >> % Parameters of machine
|
Prated = 1100;          % output power in W
Vrated = 220;          % rated line to line voltage in V
pf = 0.8;
Irated = 3,91; % rated rms current
P = 2;                 % number of poles
frated = 50;           % rated frequency in Hz
wb = 2*pi*frated;     % base electrical frequency
we = wb;
wbm = 2*wb/P;         % base mechanical frequency
Tb = Sb/wbm;          % base torque
Zb = Vrated*Vrated/Sb; %base impedance in ohms
Vm = Vrated*sqrt(2/3); % magnitude of phase voltage
Vb = Vm; % base voltage
Tfactor = (3*P)/(4*wb); % factor for torque expression
rs = 6.5;              % stator wdg resistance in ohms
xls = 7,97;% stator leakage reactance in ohms
xplr = xls;           % rotor leakage reactance
xm = 210,18; %stator magnetizing reactance
rpr = 5,74;           % referred rotor wdg resistance in ohms
xM = 1/(1/xm + 1/xls + 1/xplr);
J = 0.1;              % rotor inertia in kg m2
H = J*wbm*wbm/(2*Sb); % rotor inertia constant in secs.
Domega = 0; % rotor damping coefficient

```

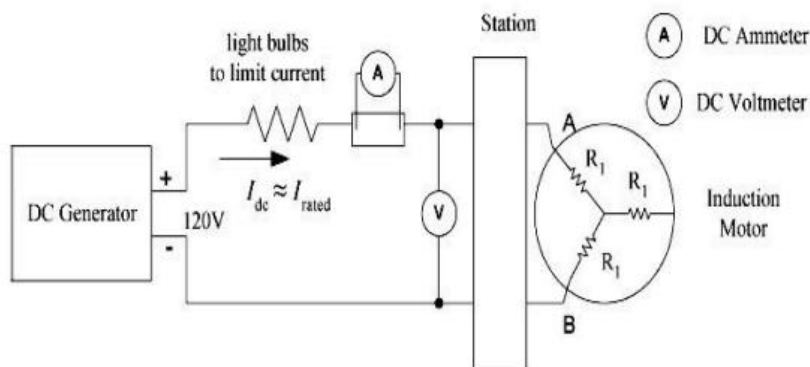
59 Εικόνα 6.3: Αρχείο Matlab με τα στοιχεία του κινητήρα.

6.4 Υλοποίηση Simulink.

6.4.1 Δοκιμή συνεχούς ρεύματος.

Η δοκιμή συνεχούς ρεύματος εκτελείται για τον υπολογισμό της αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη. Μια συνεχής τάση εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη στον επαγωγικό κινητήρα. Το προκύπτον ρεύμα που ρέει μέσω των περιελίξεων του στάτη είναι ένα συνεχές ρεύμα. Έτσι, δεν προκαλείται τάση στο κύκλωμα του δρομέα και η αντίδραση του κινητήρα είναι μηδέν. Η αντίσταση του στάτη είναι η μόνη παράμετρος κυκλώματος που περιορίζει τη ροή ρεύματος.

εκτελείται για τον υπολογισμό της αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη



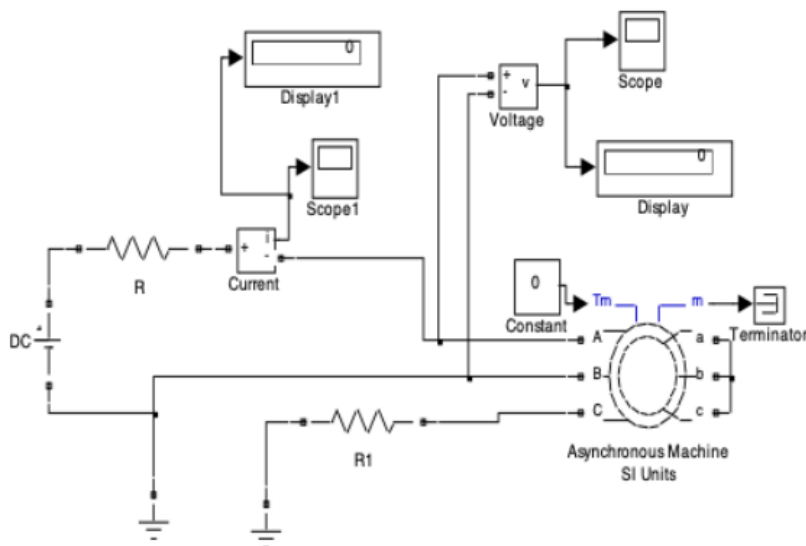
60 Εικόνα 6.4: Κύκλωμα DC δοκιμής.

Η εικόνα 6.5 απεικονίζει την υλοποίηση με πρόγραμμα Simulink της δοκιμής dc. Συγκεκριμένα, μια πηγή συνεχούς ρεύματος εφαρμόζεται στις δύο φάσεις ενός συνδεδεμένου κινητήρα επαγωγής Y (σε αστέρα) και μια ομάδα λαμπτήρων εγκαθίσταται στο κύκλωμα ως ωμικό φορτίο προκειμένου να ρυθμιστεί το συνεχές ρεύμα στην ονομαστική τιμή. Έπειτα μετράται το ρεύμα στις περιελίξεις του στάτη και η τάση στις δύο φάσεις του κινητήρα.

Χρησιμοποιείται ένα μπλοκ κινητήρα του οποίου οι ηλεκτρικές παράμετροι (όπως η ονομαστική τάση και οι παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος) και οι μηχανικές

παράμετροι (όπως η αδράνεια και ο αριθμός πόλων), συμφωνούν με αυτές του κινητήρα του εργαστηρίου.

Παρόμοια με την πειραματική εγκατάσταση, μια πηγή συνεχούς ρεύματος εφαρμόζεται στις δύο φάσεις (φάσες Α και Β) του επαγωγικού κινητήρα μέσω μιας αντίστασης σειράς, ενώ η φάση C γειώνεται μέσω ενός κλάδου αντίστασης για να υπάρχει πλήρης ηλεκτρική σύνδεση. Ο σκοπός της αντίστασης σειράς μεταξύ της πηγής συνεχούς ρεύματος και του κινητήρα επαγωγής είναι να περιοριστεί το ρεύμα που διαρρέει τις δύο περιελίξεις του κινητήρα στην ονομαστική του τιμή, η οποία είναι παρόμοια με τους λαμπτήρες φωτισμού που χρησιμοποιούνται. Τα μπλοκ μέτρησης τάσης και ρεύματος μετρούν τη στιγμιαία τάση σε δύο φάσεις και το ρεύμα που ρέει μέσω των περιελίξεων, αντίστοιχα.



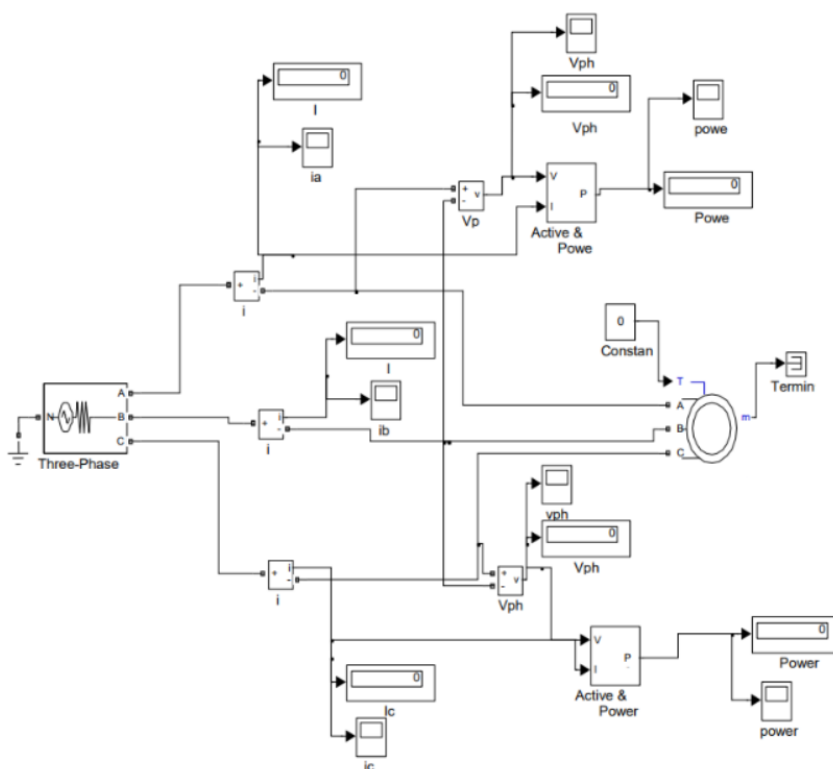
61 Εικόνα 6.5: Υλοποίηση DC δοκιμής με Simulink.

6.4.2 Δοκιμή χωρίς φορτίο.

Η δοκιμή χωρίς φορτίο σε έναν κινητήρα διενεργείται για τη μέτρηση των απωλειών περιστροφής του κινητήρα και για να προσδιορίσει τις παραμέτρους από το ισοδύναμο κύκλωμα του. Σε αυτή τη δοκιμή, μια ονομαστική εναλλασσόμενη τάση με ονομαστική

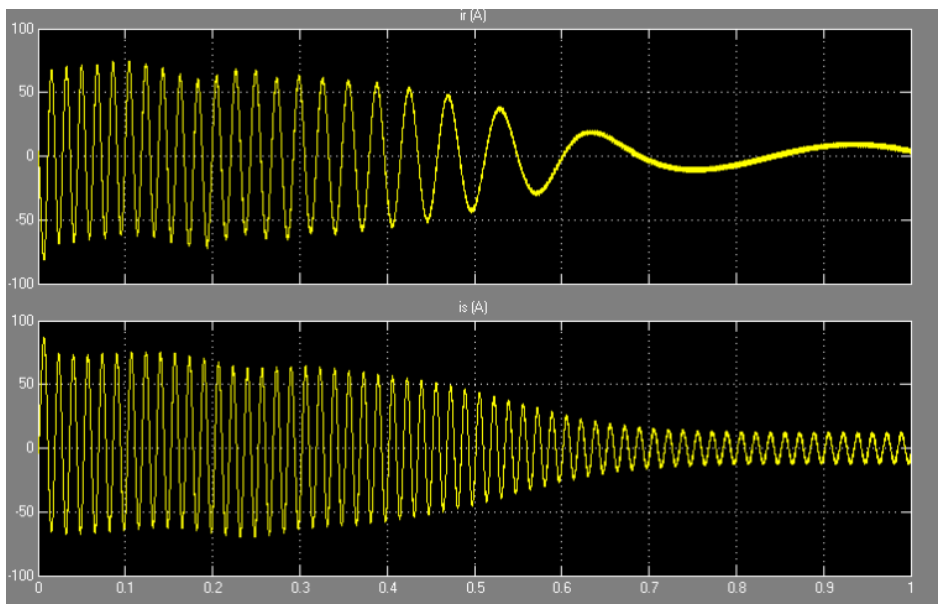
συχνότητα εφαρμόζεται στον στάτη, ενώ λειτουργεί χωρίς φορτίο και ισχύς, τάση και ρεύμα μετρώνται σε κατάσταση χωρίς φορτίο.

Κατά τη πραγματοποίηση της δοκιμής χωρίς φορτίο με το πρόγραμμα Simulink, μια τριφασική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος εφαρμόζεται στον ακροδέκτη του στάτη. Οι ηλεκτρικές εισοδοί του μπλοκ του κινητήρα είναι οι τρεις ηλεκτρικές συνδέσεις του στάτη(ακροδέκτες A-BC), ενώ οι ηλεκτρικές έξοδοι (ακροδέκτες a-b-c) είναι οι τρεις ηλεκτρικές συνδέσεις του ρότορα, ο οποίος είναι βραχυκυκλωμένος. Το μπλοκ εισόδου (τερματικό Tm) αποτελεί τη μηχανική ροπή στον άξονα της μηχανής. Αυτή η ροπή είναι μηδενική για την προσομοίωση της συνθήκης χωρίς φορτίο. Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος που λαμβάνονται από τα πειραματικά δεδομένα και ο αριθμός των πόλων, καθορίζονται χρησιμοποιώντας το πλαίσιο διαλόγου του μπλοκ κινητήρα. Τρία μπλοκ μέτρησης ρεύματος χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του στιγμιαίου ρεύματος ανά φάση. Οι έξοδοι του μπλοκ μέτρησης τάσης και το τρέχον μπλοκ μέτρησης των φάσεων είναι συνδεδεμένα σε ένα μπλοκ μέτρησης ισχύος, που υπολογίζει την ενεργό ισχύ και άεργο ισχύ. Η έξοδος αυτού του μπλοκ είναι συνδεδεμένη σε ένα παλμογράφο που δείχνει τις κυματομορφές.

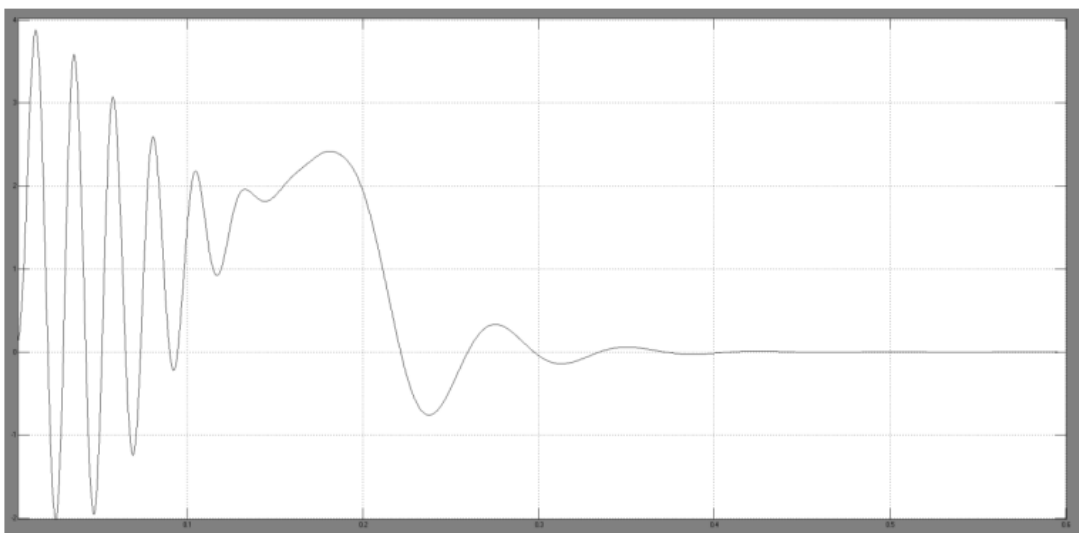


62 Εικόνα 6.6: Υλοποίηση Simulink δοκιμή κινητήρα χωρίς φορτίο

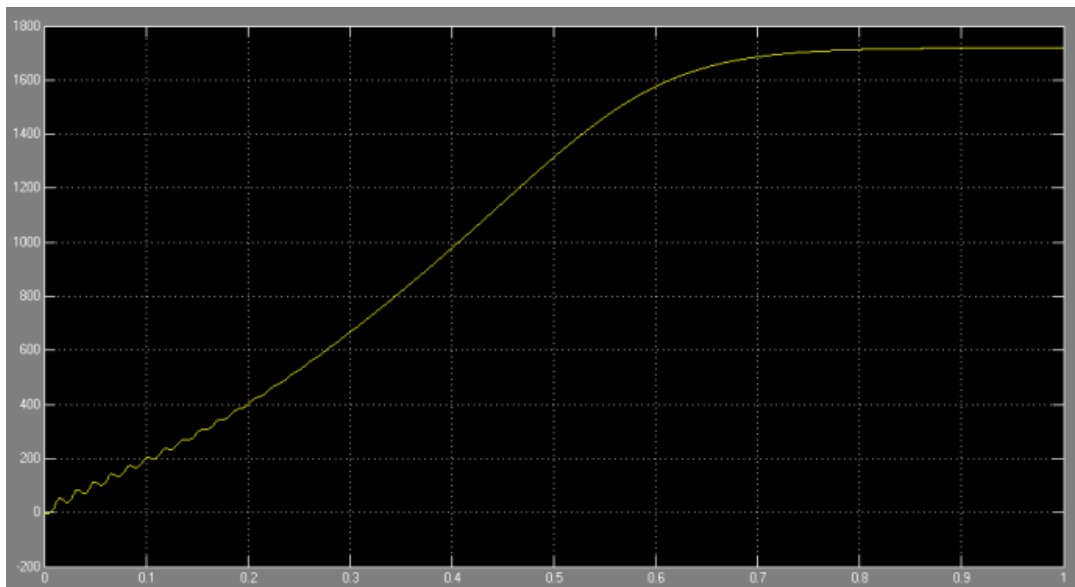
Προκύπτουν οι παρακάτω κυματομορφές:



63Εικόνα 6.7: Κυματομορφή ρεύματος δρομέα και στάτη στην δοκιμή χωρίς φορτίο.



64 Εικόνα 6.8: Κυματομορφή ροπής εκκίνησης στην δοκιμή χωρίς φορτίο.



65 Εικόνα 6.9: Κυματομορφή ταχύτητας στην δοκιμή χωρίς φορτίο.

Η ταχύτητα κατά τη διάρκεια της μεταβατικής κατάστασης φτάνει στη σταθερότητα. Σταθερότητα επιτυγχάνεται όταν η καμπύλη ταχύτητας φτάνει μια ορισμένη τιμή και γίνεται σταθερή.

6.4.3 Δοκιμή με ακινητοποιημένο δρομέα.

Η δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα σε έναν επαγωγικό κινητήρα εκτελείται για να προσδιοριστούν οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος. Σε αυτή τη δοκιμή, ο ρότορας του κινητήρα επαγωγής μπλοκάρεται και εφαρμόζεται μειωμένη τάση στους ακροδέκτες του στάτη, έτσι ώστε το ονομαστικό ρεύμα να ρέει μέσω των περιελίξεων του στάτη. Επιπλέον, η ισχύς εισόδου, η τάση και το ρεύμα μετρούνται. Για ορισμένους επαγωγικούς κινητήρες κατηγορίας σχεδιασμού, αυτή η δοκιμή διεξάγεται με συχνότητα, συνήθως μικρότερη από την κανονική συχνότητα λειτουργίας, ώστε να αξιολογηθεί κατάλληλα η αντίσταση του ρότορα.

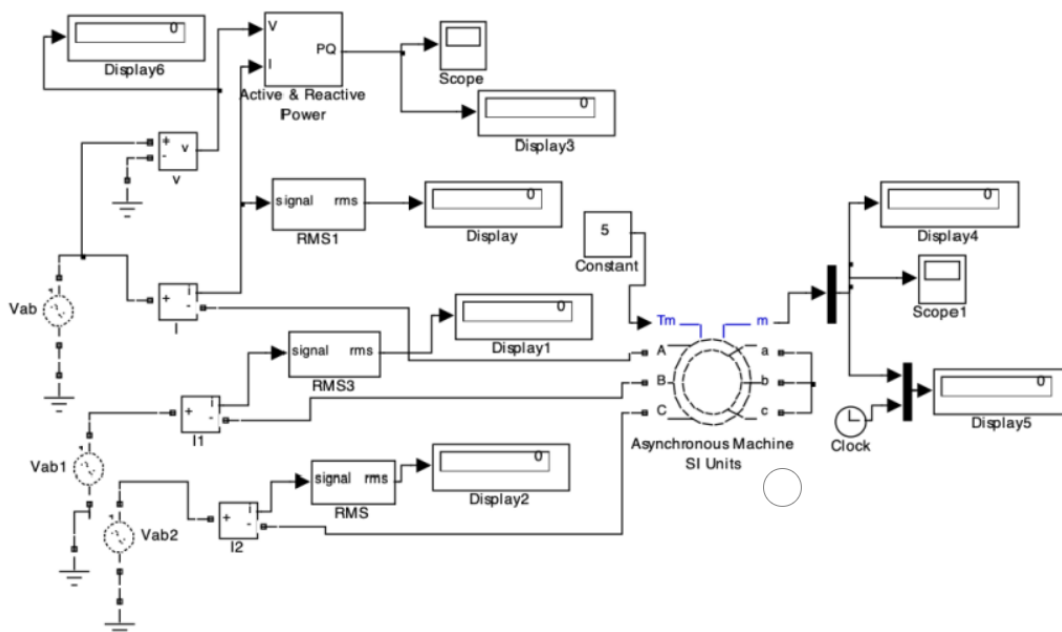
Το μοντέλο Simulink της δοκιμής ακινητοποιημένου δρομέα είναι σχεδόν το ίδιο με αυτό της δοκιμής χωρίς φορτίο. Η διαφορά είναι ότι μια σύγχρονη γεννήτρια σε συνδυασμό με έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος και έναν αυτομετασχηματιστή εγκαταστάθηκαν στο κύκλωμα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η δοκιμή

ακινητοποιημένου δρομέα, σε διάφορες συχνότητες και για τον έλεγχο της τάσης εισόδου στο στάτη. Επιπλέον, η αδράνεια του κινητήρα έχει ρυθμιστεί στο άπειρο, προκειμένου να προσομοιωθεί η κατάσταση του ακινητοποιημένου δρομέα.

Πολλά μπλοκ μετρήσεων χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ρεύματος, της τάσης και των ενεργών/άεργων ισχύων.

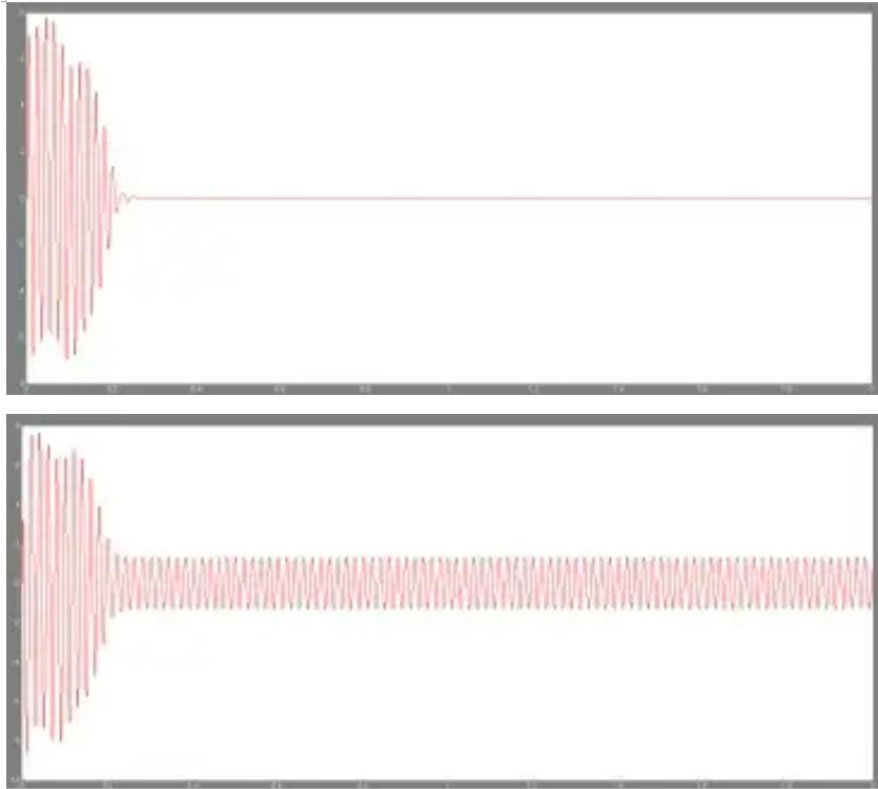
Η μηχανική ροπή στον ρότορα ορίζεται σε μια αυθαίρετη μη μηδενική τιμή [σε αυτή την περίπτωση, 5 Newton-meter (N-m)], η οποία δεν θα επηρεάσει τη συνθήκη ακινητοποιημένου δρομέα αφού η αδράνεια είναι άπειρη.

Λόγω της άπειρης αδράνειας, η ταχύτητα του ρότορα παραμένει στο μηδέν κατά την προσομοίωση. Διάφορες συχνότητες δοκιμής μπορούν εύκολα να επιτευχθούν αλλάζοντας τις συχνότητες των συνδεδεμένων πηγών τάσης αντί με χρήση σύγχρονης γεννήτριας σε συνδυασμό με κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

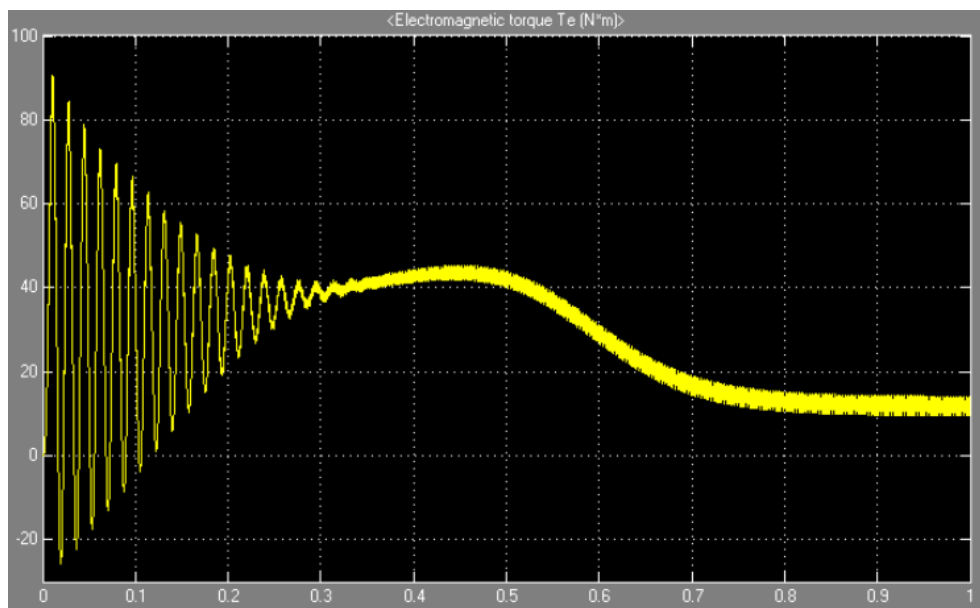


66 Εικόνα 6.10: Υλοποίηση Simulink δοκιμής ακινητοποιημένου δρομέα .

Προκύπτουν οι παρακάτω κυματομορφές:



67 Εικόνα 6.11: Κυματομορφή ρεύματος δρομέα και στάτη στην δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.



68 **Εικόνα 6.12:** Κυματομορφή ηλεκτρομαγνητικής ροπής στην δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.

6.5 Παρατηρήσεις για την προσομοίωση.

Παρατηρώ ότι η προσομοίωση έχει δώσει ικανοποιητική απόκριση όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των κυματομορφών ροπής, ρεύματος και ταχύτητας. Παρόλα αυτά, οι κυματομορφές περιέχουν σημαντικό ποσοστό κυμάτωσης. Αυτό είναι σε ένα βαθμό αναμενόμενο, λόγω της παλμικής τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα.

Συμπερασματικά, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σκοπός ήταν, αφενός να αναδείξουμε πόσο σημαντική είναι η συμβολή του προγράμματος MATLAB/SIMULINK στην προσομοίωση δυναμικών συστημάτων και αφετέρου να προσφέρουμε τη κύρια πληροφόρηση στον αναγνώστη αναφορικά με τη χρήση και τις δυνατότητες του. Τέλος το Matlab/Simulink είναι ένας αξιόπιστος και εξελιγμένος τρόπος ανάλυσης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς των επαγωγικών κινητήρων χρησιμοποιώντας τη θεωρία των πλαισίων αναφοράς.

Βιβλιογραφία.

- (1) Hughes, A., & Drury, B. (2019). Electric motors—The basics. *Electric Motors and Drives*, 1–39. doi:10.1016/b978-0-08-102615-1.00001-5
- (2) <https://new.siemens.com/global/en/company/about/history/stories/dynamo-machine.html>, 2022
- (3) Doppelbauer, M. (2018). The invention of the electric motor 1800 – 1854, A short history of electric motors Part 1, Elektrotechnisches Institut (ETI), 2018.
- (4) Sang-Hoon K., (2017) Chapter 2 - Control of direct current motors, Sang-Hoon Kim, *Electric Motor Control*, Elsevier, 2017, Pages 39-93
- (5) Keyes C., (2007). *Electric motors - Energy Efficiency Reference Guide*, CEA Technologies Inc. (CEATI) Customer Energy Solutions Interest Group (CESIG), Ontario.
- (6) Carlson, W. B. (2013): *Tesla: Inventor of the electrical age*, Princeton University Press, ISBN 9780691165615, p. 51.
- (7) P. L. Alger & R. E. Arnold (1976). "The history of induction motors in America," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 64, no. 9, pp. 1380-1383, doi: 10.1109/PROC.1976.10329.
- (8) Alkadhim, S.A. S., *Three-phase Induction Motor: Types and Structure* (2020). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3647425> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3647425>

- (9) Dordea, T. & Hoancă, V. & Păun, Ş. & Biriescu, M.s & Madescu, G. & Liuba, G. & Moţ, M. (2011). Direct-drive induction motor for railway traction applications. 12.
- (10) J. Bernatt, S. Gawron, T. Glinka, A. Polak, (2018) MATEC Web of Conferences 180, 04005, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818004005>
- (11) Jape, S. & Thosar, A.. (2017). COMPARISON OF ELECTRIC MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION. International Journal of Research in Engineering and Technology. 06. 12-17. 10.15623/ijret.2017.0609004.
- (12) S.P. Watson, 10 - Maintenance and failures, Editor(s): B.J. Chalmers, Electric Motor Handbook, Butterworth-Heinemann, 1988, Pages 496-524, <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-00707-8.50013-1>
- (13) Rai, K. & Seksena, S. & Thakur, A. (2017). Economic Efficiency Measure of Induction Motors for Industrial Applications. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 7. 1661. 10.11591/ijece.v7i4.pp1661-1670.
- (14) Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές, 3η Έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, σελ.15-78, 257-298, 421-659, 737-800.
- (15) Charles I. Hubert, Ηλεκτρικές Μηχανές Θεωρία Λειτουργία Εφαρμογές Ρυθμίσεις και Έλεγχος, 1η Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, σελ.183-331.
- (16) Εργαστηριακές Σημειώσεις Ηλεκτρικές Μηχανές 2 (2021-2022), Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

- (17) Raghvendra Dhar Diwan (2021). Induction Motor Testing Using MATLAB/ Simulink. International Journal of Research in Engineering and Technology, <https://www.irjet.net/archives/V8/i6/IRJET-V8I6327>.
- (18) Jayanta Bhusan Basu (2015). MATLAB based Performance Prediction of a Three-Phase Induction Motor Utilising its Test Results. International Journal of Research in Engineering and Technology, <https://www.ijert.org/research/matlab-based-performance-prediction-of-a-three-phase-induction-motor-utilising-its-test-results-IJERTV4IS09006>.
- (19) Adel Aktaibi (2011). Dynamic Simulation of a Three-Phase Induction Motor Using Matlab Simulink. Memorial University of Newfoundland, https://www.researchgate.net/publication/230851802_Dynamic_Simulation_of_a_Three-Phase_Induction_Motor_Using_Matlab_Simulink.
- (20) Mohamad Moulham Abboud (2004). Simulation of 3ph induction motor in Matlab with Direct and Soft starting methods. Department of Physics and Electrical Engineering Faculty of Technology, <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:849215/FULLTEXT01.pdf>.
- (21) Εκπαιδευτικό Υλικό Εργαστηρίου Υπολογιστικών Μεθόδων Ανάλυσης Ηλεκτρικών Μηχανών (2022). Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, ://ecourses.dbnet.ntua.gr/el/hlektrikes_mhxanes_i/ekpaideytiko_yliko/virtual_lab_-_machines.html#B5.1