



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών
Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων

*Απομακρυσμένος έλεγχος κινητήρα επαγωγής μέσω
internet με χρήση διατάξεων μικροεπεξεργαστών
(Arduino & RPI) για τη χάραξη χαρακτηριστικών
καμπυλών ροπής-ταχύτητας*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Α. Ζάβου

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβρης 2017



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών
Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων

*Απομακρυσμένος έλεγχος κινητήρα επαγωγής μέσω
internet με χρήση διατάξεων μικροεπεξεργαστών
(Arduino & RPI) για τη χάραξη των χαρακτηριστικών
καμπυλών ροπής-ταχύτητας*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Α. Ζάβου

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.

.....
Μ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Τσαραμπάρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβρης 2017

.....
Μαρία Α. Ζάβου

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

Copyright © Μαρία Α. Ζάβου, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στην κα. Μαρία Ιωαννίδου καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του θέματος, την επιστημονική της καθοδήγηση, την ευχάριστη συνεργασία και πολύπλευρη συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης, επιθυμώ να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, την οικογένειά μου, που με στηρίζει και μου δίνει δύναμη όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον απομακρυσμένο έλεγχο ενός κινητήρα επαγωγής με την οδήγησή του να πραγματοποιείται από μια ιστοσελίδα. Επιπλέον, πραγματεύεται την εξαγωγή και χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών της ροπής με την ταχύτητα του συγκεκριμένου κινητήρα. Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Εισάγεται η έννοια της επαγωγικής μηχανής, με επικέντρωση στον ασύγχρονο κινητήρα. Γίνεται μια γενική αναφορά στα χαρακτηριστικά του, αναλύεται η δομή του και αναφέρονται βασικές έννοιες, όπως το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, η ταχύτητα περιστροφής, η ολίσθηση. Έπειτα, παρουσιάζεται η σχεδίαση του ισοδύναμου κυκλώματος του ηλεκτροκινητήρα, μελετάται το διάγραμμα ροής ισχύος και αναλύεται ο βαθμός απόδοσής του. Επίσης, χαράσσονται και αναλύονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες της εν λόγω μηχανής.

Επιπλέον, ορίζονται οι κυκλωματικές διατάξεις της εργαστηριακής εφαρμογής, οι οποίες με την κατάλληλη μεταξύ τους σύνδεση συνεισφέρουν στον απομακρυσμένο έλεγχο του κινητήρα επαγωγής μέσω του internet. Παρουσιάζονται οι έννοιες του αντιστροφέα (inverter) και του ανορθωτή (rectifier), και αναλύονται οι μικροεπεξεργαστές Arduino και Raspberry Pi η χρήση των οποίων ολοκληρώνει την επικοινωνία της μηχανής με το διαδίκτυο.

Στη συνέχεια, ακολουθεί το πειραματικό μέρος της εργασίας. Πρώτα εγκαθίσταται ο κινητήρας επαγωγής στην είσοδο του οποίου συνδέεται ο αντιστροφέας (inverter), ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται με τους μικροεπεξεργαστές. Έτσι απ' τη μια μεριά είναι δυνατή η διαχείριση του συστήματος ώστε ο κινητήρας να οδηγηθεί μέσω του internet. Απ' τη μεριά της εξόδου του κινητήρα συνδέεται σε σειρά μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, έχοντας ως κύκλωμα διέγερσης τον ανορθωτή (rectifier), και τοποθετείται στους εξωτερικούς ακροδέκτες ωμικό φορτίο. Σε όλη την έκταση της εργαστηριακής διάταξης συνδέονται όργανα για την καταγραφή των ηλεκτρικών μεγεθών. Αρχικά γίνονται μετρήσεις κενού φορτίου και στη συνέχεια με φορτίο. Οι συνθήκες του πειράματος αλλάζουν μέσω της ιστοσελίδας www.efc.hopto.org μεταβάλλοντας τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος. Από τις καταγεγραμμένες μετρήσεις δημιουργήθηκαν οι γραφικές παραστάσεις ροπής-ταχύτητας για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον απομακρυσμένο έλεγχο των ασύγχρονων κινητήρων.

Τέλος, συνοψίζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και γίνεται αναφορά σε μελλοντικές επεκτάσεις.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: κινητήρας επαγωγής, απομακρυσμένος έλεγχος, διαδικτυακός έλεγχος, χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας, αντιστροφέας, ανορθωτής, μικροεπεξεργαστές Arduino και Raspberry Pi.

ABSTRACT

This thesis refers to the remote control of an induction motor driven by a web site. In addition, it deals with the exportation and engraving of characteristic torque-speed curves of the determinate motor. This thesis was carried out at the Laboratory of Control Systems of Electrical Machines of the School of Electrical and Computer Engineering of the National Technical University of Athens.

The concept of the induction machine is introduced, focusing on the asynchronous motor. There is a general reference to its features, its structure is analyzed and basic concepts are mentioned, such as the rotating magnetic field, the speed of rotation and the slip. Next, the design of the equivalent circuit of the electric motor is presented, the power flow diagram is studied and its performance level is analyzed. Also, the characteristic curves of the machine are plotted and analyzed.

In addition, there are defined the circuits of the laboratory application which, with the appropriate interconnection, contribute to the remote control of the induction motor via the internet. The definitions of the inverter and the rectifier are presented, and the Arduino and Raspberry Pi microprocessors are analyzed, the use of which completes the communication between motor and internet.

Then it follows the experimental part of the thesis. First, the induction motor is installed. The inverter is connected to the motor's input and, subsequently, the microprocessors are connected to the inverter. On the one hand, it is possible to manage the system so that the motor can be driven over the internet. On the output side of the motor, a DC generator is connected in series, having rectifier circuitry as the excitation circuit and an ohmic load on the external terminals. Instruments for the recording of electrical quantities are connected throughout the laboratory. Initially, empty load measurements are made and then loaded. Experiment conditions change through the website www.efc.hopto.org by changing the system's operating frequency. From the recorded measurements, the torque-speed graphs were generated to draw conclusions about the remote control of asynchronous motors.

Finally, the results of the experimental process are summarized and reference is made to future extensions.

KEY WORDS: induction motor, remote control, web control, characteristic torque-speed curves, inverter, rectifier, microprocessors Arduino and Raspberry Pi.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	17
Γενικά χαρακτηριστικά ενός κινητήρα επαγωγής	17
1.1 Εισαγωγή	17
1.2 Δομή ενός κινητήρα επαγωγής	17
1.3 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο-Βασικές έννοιες στους κινητήρες επαγωγής	19
1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα επαγωγής	21
1.5 Διάγραμμα ροής ισχύος-Βαθμός απόδοσης ενός κινητήρα επαγωγής	22
Κεφάλαιο 2	25
Χαρακτηριστικές καμπύλες (Ροπής-Ταχύτητας) ενός κινητήρα επαγωγής	25
2.1 Η επαγόμενη ροπή ενός κινητήρα επαγωγής και η εξαγωγή της σχέσης.....	25
2.2 Βασικά στοιχεία από την καμπύλη ροπής ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής.	30
Κεφάλαιο 3	33
Έλεγχος της ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής.....	33
3.1 Εισαγωγή	33
3.2 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου	33
3.3 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας	35
Κεφάλαιο 4	37
Ορισμοί των κυκλωματικών διατάξεων της εργαστηριακής εφαρμογής	37
4.1 Αντιστροφέας (Inverter).....	37
4.2 Ανορθωτής (Rectifier)	39
4.3 Raspberry Pi (RPI).....	40
4.4 Arduino.....	41
Κεφάλαιο 5	45
Πειραματικό/Εργαστηριακό μέρος.....	45
5.1 Εισαγωγή	45
5.2 Παρουσίαση εργαστηριακής διάταξης.....	45
5.3 Ανάλυση των επιμέρους μερών της εργαστηριακής διάταξης	47
5.4 Ανάλυση του τρόπου λειτουργίας της εργαστηριακής διάταξης	49
5.5 Διεξαγωγή πειράματος	51
5.5.1 Ανάλυση του λογισμικού (software)-Οδήγηση του αντιστροφέα μέσω διαδικτύου.....	51
5.5.2 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας- Παρουσίαση μετρήσεων με βάση τη μεταβολή συχνότητας και φορτίου.....	52

5.5.3 Παρουσίαση των χαρακτηριστικών καμπυλών ροπής-ταχύτητας	55
Κεφάλαιο 6	65
Σύνοψη.....	65
6.1 Συμπεράσματα-Συγκέντρωση αποτελεσμάτων	65
6.2 Επέκταση-Μελλοντικές εξελίξεις.....	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- **Σχήμα 1.** Επαγωγικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα (Πηγή: http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf) 18
- **Σχήμα 2.** Επαγωγικός κινητήρας με δακτυλιοφόρο δρομέα (Πηγή: http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf) 19
- **Σχήμα 3.** Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα επαγωγής (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 21
- **Σχήμα 4.** Το διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 22
- **Σχήμα 5.** Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 26
- **Σχήμα 6.** Η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 27
- **Σχήμα 7.** Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 27
- **Σχήμα 8.** Το τελικό απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 27
- **Σχήμα 9.** Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf)..... 28
- **Σχήμα 10.** Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (κόκκινη γραμμή) και του φορτίου (πράσινη γραμμή) (Πηγή: http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf) 30
- **Σχήμα 11.** Οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας για ταχύτητες κάτω από τη βασική (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 35
- **Σχήμα 12.** Οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας για ταχύτητες πάνω από τη βασική (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 35
- **Σχήμα 13.** Ρύθμιση της ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής με έλεγχο της τάσης εισόδου (Πηγή: Stephen J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)..... 36
- **Σχήμα 14.** Κύκλωμα ισχύος ενός τριφασικού αντιστροφέα με IGBTs ημιαγωγικούς διακόπτες (Πηγή: Στέφανος Ν.Μανιάς, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ, Εκδόσεις Συμεών, Κεφάλαιο 3 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος)..... 38
- **Σχήμα 15.** Κύκλωμα ισχύος μονοφασικής ανόρθωσης σε συνδεσμολογία γέφυρας (Πηγή: Στέφανος Ν.Μανιάς, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ, Εκδόσεις Συμεών, Κεφάλαιο 3 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος)..... 39
- **Σχήμα 16.** Κυκλωματική πλακέτα του Raspberry Pi Model B (Πηγή: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>)..... 40

- **Σχήμα 17.** Μητρική πλακέτα του Arduino Mega (Πηγή: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>) 42
- **Σχήμα 18.** Πειραματική διάταξη του εργαστηρίου 46
- **Σχήμα 19.** Ρύθμιση στροφών τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα (Πηγή: <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/EE898/Διαλέξεις/Διάλεξη%2009η.pdf>) 49
- **Σχήμα 20.** Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (κόκκινη γραμμή) και του φορτίου (πράσινη γραμμή) (Πηγή: http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf) 56

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=44.5V$ & $I_f=0.04A$ 54
- Πίνακας 2. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=100V$ & $I_f=0.13A$ 54
- Πίνακας 3. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=150V$ & $I_f=0.2A$ 54
- Πίνακας 4. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=50.5V$ & $I_f=0.08A$ 54
- Πίνακας 5. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=100V$ & $I_f=0.13A$ 55
- Πίνακας 6. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=150V$ & $I_f=0.2A$ 55
- Πίνακας 7. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=50.3V$ & $I_f=0.09A$ 55
- Πίνακας 8. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=100V$ & $I_f=0.13A$ 55
- Πίνακας 9. Η ονομαστική ταχύτητα, η σύγχρονη ταχύτητα και η ολίσθηση του κινητήρα επαγωγής για τις διάφορες τιμές της συχνότητας λειτουργίας..65
- Πίνακας 10. Η τάση τροφοδοσίας και το ρεύμα στο στάτη του κινητήρα επαγωγής για τις διάφορες τιμές της συχνότητας λειτουργίας67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΩΝ

- **Γραφική παράσταση 1.** Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=35.87\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 50V & 0.08A57
- **Γραφική παράσταση 2.** Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=35.87\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 100V & 0.13A57
- **Γραφική παράσταση 3.** Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=35.87\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 150V & 0.2A58
- **Γραφική παράσταση 4.** Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 50V & 0.08A.....58
- **Γραφική παράσταση 5.** Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 100V & 0.13A.....59
- **Γραφική παράσταση 6.** Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 150V & 0.2A.....59
- **Γραφική παράσταση 7.** Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=65\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 50V & 0.08A.....60
- **Γραφική παράσταση 8.** Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=65\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 100V & 0.13A.....60
- **Γραφική παράσταση 9.** Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή συχνότητα λειτουργίας $f=35.87\text{Hz}$ και μεταβλητή διέγερση της DC γεννήτριας από 50V έως 150V61
- **Γραφική παράσταση 10.** Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ και μεταβλητή διέγερση της DC γεννήτριας από 50V έως 150V61
- **Γραφική παράσταση 11.** Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή συχνότητα λειτουργίας $f=65\text{Hz}$ και μεταβλητή διέγερση της DC γεννήτριας από 50V έως 100V62
- **Γραφική παράσταση 12.** Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή διέγερση της DC γεννήτριας στα 50V & 0.08A και μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας από 35.87Hz έως 65Hz62
- **Γραφική παράσταση 13.** Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή διέγερση της DC γεννήτριας στα 100V & 0.13A και μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας από 35.87Hz έως 65Hz63

- **Γραφική παράσταση 14.** Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή διέγερση της DC γεννήτριας στα 150V & 0.2A και μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας από 35.87Hz έως 50Hz.....63

Κεφάλαιο 1

Γενικά χαρακτηριστικά ενός κινητήρα επαγωγής

1.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες μηχανές και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές.

Στις σύγχρονες μηχανές το ρεύμα διέγερσης παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος, ενώ στις ασύγχρονες μηχανές το ρεύμα αυτό παράγεται επαγωγικά στα τυλίγματα διέγερσής τους. Συγκεκριμένα, ο λόγος που οι ασύγχρονες μηχανές ονομάζονται και επαγωγικές οφείλεται στο γεγονός ότι σε μια επαγωγική μηχανή η τάση στο δρομέα (που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα) ουσιαστικά επάγεται στα τυλίγματά του αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση.

Η βασική διαφορά ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ότι για να κινηθεί δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέγερσης.

Η επαγωγική μηχανή, όπως κάθε ηλεκτρική μηχανή, μπορεί να λειτουργεί τόσο ως γεννήτρια όσο και ως κινητήρας, αφού είναι ένα σύστημα που μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ σε μηχανική ροπή στον άξονά της και αντίστροφα. Όμως κατά τη λειτουργία της ως γεννήτρια παρατηρούνται πολλά μειονεκτήματα κι έτσι σπάνια χρησιμοποιείται με αυτόν τον τρόπο. Απόρροια αυτού είναι όλες οι επαγωγικές μηχανές να αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

1.2 Δομή ενός κινητήρα επαγωγής

Οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές είτε αυτές είναι γεννήτριες είτε είναι κινητήρες έχουν μια ανάλογη δομή καθώς κατά βάση συνιστούν στρεφόμενα πηνία ειδικής κατασκευής και ποικίλου μεγέθους.

Οι ηλεκτροκινητήρες έχουν δυο μέλη, ένα σταθερό μέλος που λέγεται στάτης (stator) και ένα στρεφόμενο μέλος που λέγεται δρομέας (rotor). Επειδή είναι επιθυμητή η μειωμένη μαγνητική αντίσταση των δρόμων της μαγνητικής ροής, οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή μονωμένων μεταξύ τους ελασμάτων. Αυτό αποσκοπεί στην ελάττωση των απωλειών δινορρευμάτων. Κάνοντας μια γενική περιγραφή ο δρομέας είναι βασικά ένας κύλινδρος και ο στάτης είναι ένας κούφιος κύλινδρος. Ο δρομέας και ο στάτης χωρίζονται από ένα διάκενο αέρα. Το μήκος του διακένου αυτού είναι πολύ μικρό αν συγκριθεί με τη διάμετρο του δρομέα. Το τύλιγμα τυμπάνου βρίσκεται είτε στο στάτη είτε στο δρομέα. Το μαγνητικό κύκλωμα συμπληρώνεται μέσα από το σιδηρομαγνητικό υλικό του άλλου κύριου μέλους της μηχανής. Στο μέλος αυτό

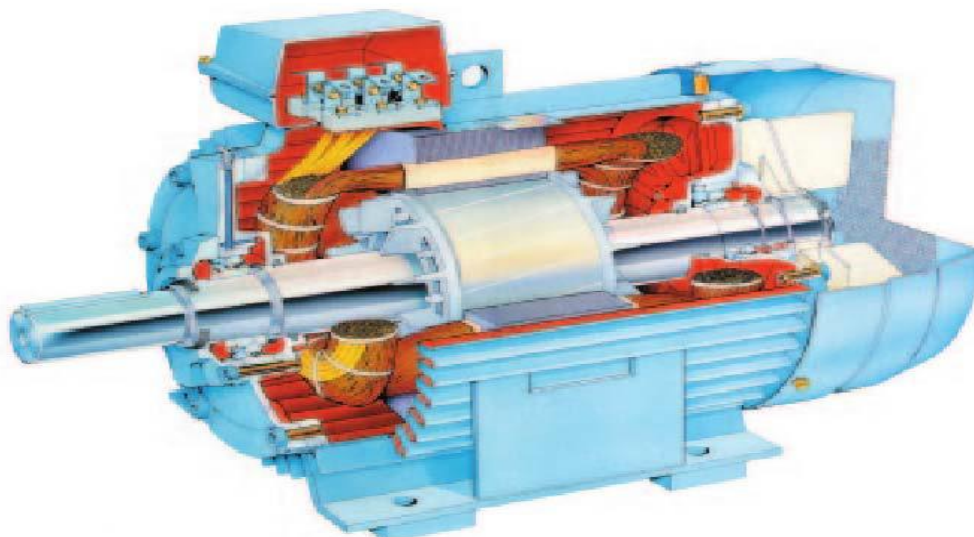
τοποθετούνται τα πηνία διέγερσης ή τυλίγματα πεδίου που ενεργούν σαν κύριες πηγές μαγνητικής ροής.

Στους κινητήρες επαγωγής η τοποθέτηση των τυλιγμάτων συνίσταται στην τοποθέτηση πηνίων σε ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες, τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα. Για να σχηματιστεί ένα πλήρες τύλιγμα τοποθετούνται όμοια πηνία σε άλλα ζευγάρια αυλακών και στη συνέχεια όλα τα πηνία συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Οι ομάδες των πηνίων μπορεί τότε να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα και σε τριφασικές μηχανές κατά αστέρα ή κατά τρίγωνο. Η περιέλιξη που βρίσκεται στα αυλάκια του δρομέα, που τοποθετείται στο εσωτερικό του στάτη, χαρακτηρίζει το είδος της επαγωγικής μηχανής.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες διακρίνονται σε δυο τύπους:

α) κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα (squirrel-cage rotor), ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 1. Αποτελείται από μια σειρά αγωγίων ράβδων που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένες στα δυο άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων βραχυκύκλωσης (shorting rings).

β) κινητήρας με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor), ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 2. Διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τύλιγμα όπου είναι τοποθετημένο ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Οι αγωγοί του δρομέα βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίους. Άρα τα ρεύματα του δακτυλιοφόρου δρομέα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες κι ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα διέγερσης.



Σχήμα 1. Επαγωγικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα (Πηγή: http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf)



Σχήμα 2. Επαγωγικός κινητήρας με δακτυλιοφόρο δρομέα (Πηγή: http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf)

1.3 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο-Βασικές έννοιες στους κινητήρες επαγωγής

Για τη δημιουργία ροπής σε έναν ηλεκτροκινητήρα, είναι απαραίτητη η αλληλεπίδραση δυο μαγνητικών πεδίων, ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο στάτη και ενός άλλου στο δρομέα. Το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, λειτουργώντας σαν μόνιμος μαγνήτης, παρασύρει το πεδίο του δρομέα, δημιουργώντας κατάλληλη ροπή και αναγκάζοντάς τον να περιστραφεί.

Για τη δημιουργία ενός στρεφόμενου πεδίου στο στάτη, είναι απαραίτητη η ύπαρξη δυο τουλάχιστον χωρικά μετατοπισμένων πηνίων τα οποία να διαρρέονται από κατάλληλα χρονικά μετατοπισμένα ρεύματα. Με τον τρόπο αυτό διεγείροντας εναλλάξ τα δυο τυλίγματα με κατάλληλα ρεύματα μπορεί να παραχθεί ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο.

Το συμμετρικό τριφασικό σύστημα είναι ένα σύστημα τριών χρονικά μετατοπισμένων τάσεων και ρευμάτων. Εάν ένα τέτοιο σύστημα τροφοδοτήσει τρία διαφορετικά πηνία, τοποθετημένα στο στάτη, με απόσταση 120 μοίρες το ένα από το άλλο, τότε στο διάκενο της μηχανής εμφανίζεται ένα συνιστάμενο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Γίνεται λόγος στην περίπτωση αυτή για *στρεφόμενο πεδίο στο διάκενο*. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πεδίου είναι σταθερή και εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και το πλήθος των ζευγών των πόλων. Η σχέση που δίνει την καλούμενη *σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής* (synchronous speed) σε rpm (revolutions per minute) είναι:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p}$$

όπου f είναι η συχνότητα του δικτύου και p ο αριθμός των μαγνητικών πόλων της μηχανής.

Καθώς το πεδίο που προκαλείται από το στάτη περιστρέφεται στο διάκενο, επάγει μια εναλλασσόμενη τάση στα πηνία του ακίνητου δρομέα. Η συχνότητα της επαγόμενης τάσης εξαρτάται από το ρυθμό της μεταβολής του πεδίου, δηλαδή για ακίνητο δρομέα είναι ίδια με εκείνη του στάτη. Το πεδίο του δρομέα συνεπώς δεν προέρχεται από ηλεκτρική τροφοδότηση του τυλίγματος του, αλλά από επαγωγή, όπως σε ένα μετασχηματιστή. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού, ο κινητήρας αυτός ονομάζεται *επαγωγικός* (induction motor).

Τα πηνία του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένα, είτε με κλωβό είτε μέσω εξωτερικών αντιστάσεων. Συνεπώς η επαγόμενη τάση προκαλεί τη ροή ισχυρών ρευμάτων στο δρομέα. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν μαγνητεγερτικές δυνάμεις οι οποίες αλληλεπιδρούν με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη και δημιουργούν μηχανική ροπή, η οποία αναγκάζει το δρομέα να κινηθεί προς την κατεύθυνση της κίνησης του στρεφόμενου πεδίου.

Καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα αυξάνει, ο ρυθμός της μεταβολής του πεδίου του στάτη, όπως αυτός φαίνεται από το δρομέα, ελαττώνεται. Το σύστημα των πηνίων στάτη και δρομέα εξακολουθεί να λειτουργεί σαν ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής που διεγείρεται από μια εναλλασσόμενη τάση η συχνότητα της οποίας ελαττώνεται, όσο αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε κάποια χρονική στιγμή η επαγόμενη στο δρομέα τάση φτάνει σε μια χαμηλή τιμή, ώστε η ΜΕΔ που δημιουργείται από τα ρεύματα στα πηνία του δρομέα, να δίνει μια ροπή ίση με εκείνη του επιβαλλόμενου μηχανικού φορτίου. Τότε ο κινητήρας έχει φτάσει στο σημείο λειτουργίας του και η ταχύτητα περιστροφής είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου στο διάκενο.

Εάν ο κινητήρας λειτουργεί εν κενώ, δηλαδή χωρίς μηχανικό φορτίο στον άξονα, τότε η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή ισούται με τις τριβές της περιστροφής του άξονα του κινητήρα. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητό ότι όσο υπάρχει ένα μηχανικό φορτίο στον κινητήρα, οσοδήποτε μικρό, η ταχύτητα περιστροφής του θα είναι πάντοτε μικρότερη από τη σύγχρονη. Καθώς η λειτουργία του κινητήρα στηρίζεται στην εξ επαγωγής διέγερση του δρομέα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει, έστω και ελάχιστη, διαφορά ταχύτητας περιστροφής μεταξύ του πεδίου στο διάκενο και του δρομέα της μηχανής. Εάν οι δυο αυτές ταχύτητες ήταν ίσες τότε τα πηνία του δρομέα θα «έβλεπαν» μια σταθερή τάση στο πρωτεύον και, φυσικά, η επαγόμενη τάση θα ήταν μηδέν.

Η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα ορίζεται ως ταχύτητα ολίσθησης (slip speed) σε rpm και δίνεται από τη σχέση:

$$n_{slip} = n - n_m$$

όπου n είναι η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων και n_m είναι η μηχανική ταχύτητα του άξονα της μηχανής. Ο όρος ολίσθηση χρησιμοποιείται για να εκφράσει ότι, από έναν παρατηρητή που στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα στο διάκενο, ο δρομέας

φαίνεται να ολισθαίνει προς τα πίσω. Η ολίσθηση εκφράζεται συνηθέστερα ως ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$s = \frac{n - n_m}{n} * 100\%$$

Η ολίσθηση ενός κινητήρα μπορεί, να μεταβάλλεται μεταξύ του 0 και του 1. Στην πράξη είναι ιδιαίτερα χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ μερικών δεκάτων % έως το πολύ 10%.

Η συχνότητα ρευμάτων και τάσεων στο δρομέα εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του σύγχρονα στρεφόμενου πεδίου και του δρομέα, δηλαδή από την ολίσθηση και δίνεται από τη σχέση:

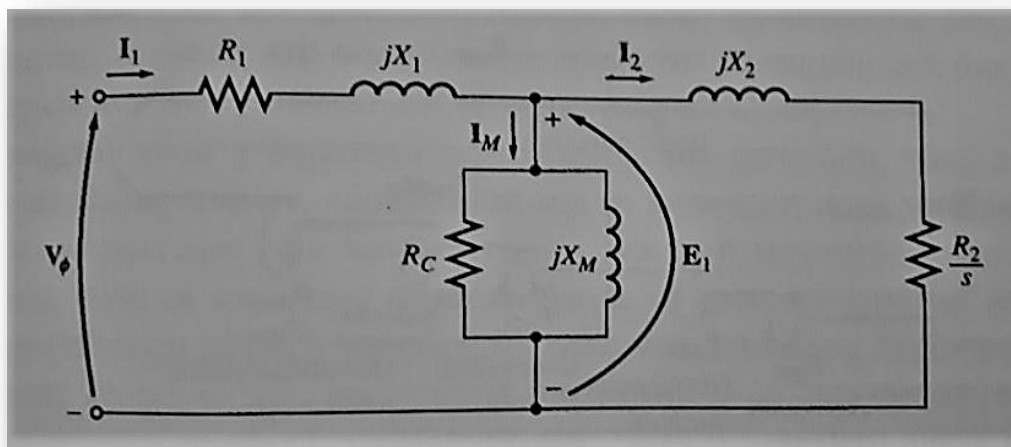
$$f_r = s * f$$

όπου f_r είναι η συχνότητα στο δρομέα και f είναι η συχνότητα τροφοδοσίας του στάτη.

1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα επαγωγής

Οι μηχανές επαγωγής έχουν μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα τα οποία διεγείρονται από συμμετρικές πολυφασικές τάσεις. Μελετάται μόνο μια φάση εφόσον όλες οι φάσεις συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο και η μόνη διαφορά μεταξύ τους είναι η χαρακτηριστική διαφορά φάσης χρόνου. Το τύλιγμα στάτη θεωρείται συνδεδεμένο κατά αστέρα και όλα τα ρεύματα και οι τάσεις έχουν ημιτονοειδή μορφή κύματος. Οι επιδράσεις των αρμονικών χώρου στη διανομή της ροής αγνοούνται, ενώ λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό των αντιδράσεων σκέδασης στάτη και δρομέα.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα δίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3. Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα επαγωγής (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)

Τα μεγέθη που παριστάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα είναι τα εξής:

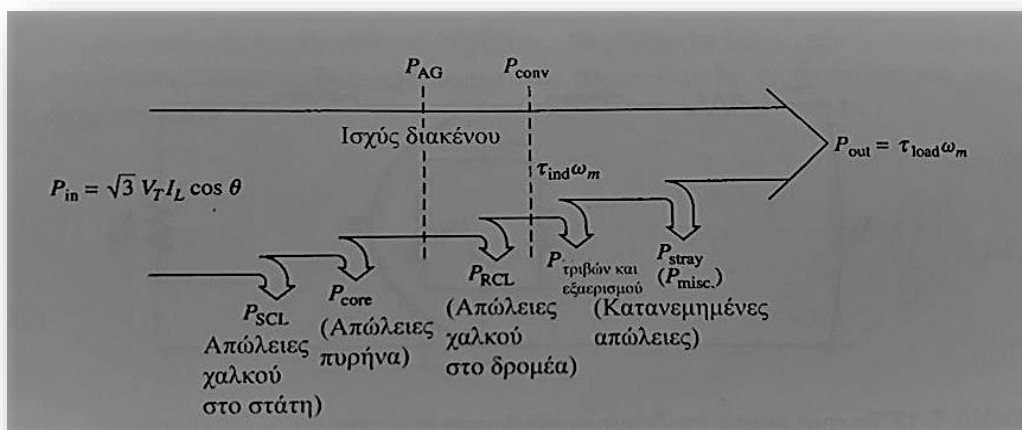
- V_ϕ η τάση στους ακροδέκτες του στάτη
- E_1 η αντι-ΗΕΔ που αναπτύσσεται από τη συνισταμένη ροή διακένου
- I_1 το ρεύμα του στάτη
- R_1 η πραγματική αντίσταση του στάτη
- X_1 η αντίδραση σκέδασης του στάτη
- I_M η συνιστώσα ρεύματος διέγερσης
- R_C η αντίσταση απωλειών του πυρήνα
- X_M η μαγνητίζουσα αντίδραση
- I_2 η συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα
- X_2 η αντίδραση σκέδασης του δρομέα ανηγμένη στη συχνότητα του στάτη
- R_2/s η ανακλώμενη αντίσταση.

Ισχύει η σχέση: $V_\phi = E_1 + I_1 * (R_1 + jX_1)$

Επισημαίνεται ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανακλώνται στο στάτη, η συχνότητά τους μετατρέπεται σε συχνότητα στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα του δρομέα, όταν παρατηρούνται στο στάτη, γίνονται φαινόμενα συχνότητας στάτη, διότι το τύλιγμα του στάτη απλώς βλέπει κύματα ΜΕΔ και ροής να οδεύουν στη σύγχρονη ταχύτητα.

1.5 Διάγραμμα ροής ισχύος-Βαθμός απόδοσης ενός κινητήρα επαγωγής

Το διάγραμμα ροής ισχύος του επαγωγικού κινητήρα αποδίδει σχηματικά τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η ηλεκτρική ισχύς εισόδου, η μηχανική ισχύς εξόδου καθώς και οι επιμέρους απώλειες αυτού.



Σχήμα 4. Το διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)

Ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο ηλεκτρική ισχύ που έχει τη μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων. Η ισχύς εισόδου μπορεί να μετρηθεί με βατόμετρο και δίνεται από την σχέση:

$$P_{in} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \theta \quad \text{σε W.}$$

Στον στάτη του κινητήρα χάνεται κάποιο ποσό ισχύος. Πρώτα στο τύλιγμα του στάτη (απώλειες χαλκού στο στάτη - P_{SCL}) οι λεγόμενες ωμικές απώλειες που υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{SCL} = I_L^2 * R_s$$

όπου R_s η ωμική αντίσταση του στάτη,

κι έπειτα στον πυρήνα του κινητήρα με τη μορφή απωλειών υστέρησης και απωλειών εξαιτίας των δινορρευμάτων που αναπτύσσονται σε αυτόν (P_{core}).

Στη συνέχεια η ισχύς που απομένει μεταφέρεται στο δρομέα του κινητήρα διαμέσου του διακένου, η λεγόμενη ισχύς διακένου (air-gap power) P_{AG} της μηχανής. Ένα μέρος αυτής χάνεται με τη μορφή θερμικών απωλειών στους αγωγούς του δρομέα (απώλειες χαλκού στο δρομέα - P_{RCL}) οι οποίες δίνονται από τη σχέση:

$$P_{RCL} = I_L^2 * R_R$$

όπου R_R η ωμική αντίσταση του δρομέα.

Η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική ισχύς σε μηχανική μορφή (P_{conv}). Η ισχύς αυτή, που ονομάζεται και αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς, δίνεται από την σχέση:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad \text{ή} \quad P_{conv} = T_{ind} * \omega_m$$

όπου T_{ind} η αναπτυσσόμενη ροπή της μηχανής και ω_m η μηχανική ταχύτητα.

Η P_{conv} μειώνεται από τις απώλειες τριβής και εξαερισμού $P_{F\&W}$ (μηχανικές απώλειες) καθώς και τις κατανεμημένες απώλειες P_{misc} του κινητήρα. Το ποσό της μηχανικής ισχύος που απομένει αποτελεί την ισχύ που δίνει στον άξονά του ο κινητήρας και κατ' επέκταση στο συνδεδεμένο φορτίο.

Η ισχύς εξόδου ή μηχανική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P_{out} = T_L * \omega_m$$

όπου T_L η ροπή εξόδου.

Συγκεντρωτικά, οι απώλειες του κινητήρα κατηγοριοποιούνται σε δυο είδη:

- α) σταθερές απώλειες, που δεν μεταβάλλονται με το φορτίο και
- β) μεταβλητές απώλειες, που μεταβάλλονται με το φορτίο.

Στις σταθερές απώλειες εντάσσονται οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης και των δινορρευμάτων στο σιδερένιο πυρήνα της μηχανής, οι απώλειες τριβής και εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες στον άξονα του κινητήρα. Οι απώλειες του άξονα συνήθως προστίθενται μεταξύ τους και ονομάζονται απώλειες περιστροφής (rotational losses).

Στις μεταβλητές απώλειες ανήκουν οι ηλεκτρικές απώλειες του στάτη (P_{SCL}) και οι ηλεκτρικές απώλειες του δρομέα (P_{RCL}), οι οποίες οφείλονται στην ωμική αντίσταση των χάλκινων τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα, αντίστοιχα. Επειδή ο

κινητήρας συνήθως περιστρέφεται με ταχύτητα που είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη, η σχετική ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων είναι πολύ μικρή κι έτσι οι απώλειες πυρήνα στο δρομέα είναι πολύ λίγες σε σχέση με τις αντίστοιχες απώλειες στο στάτη.

Ο συντελεστής απόδοσης ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ίσος με το λόγο της ωφέλιμης μηχανικής ισχύος εξόδου του κινητήρα προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου του και δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}}.$$

Κεφάλαιο 2

Χαρακτηριστικές καμπύλες (Ροπής-Ταχύτητας) ενός κινητήρα επαγωγής

2.1 Η επαγόμενη ροπή ενός κινητήρα επαγωγής και η εξαγωγή της σχέσης

Όταν ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο η ολίσθηση είναι πολύ μικρή (αφού λειτουργεί κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα) κι έτσι η σχετική κίνηση ανάμεσα στο δρομέα και τα μαγνητικά πεδία είναι μικρή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τάση που επάγεται στις ράβδους του δρομέα καθώς και το αντίστοιχο ρεύμα να έχουν μικρές τιμές. Σημειώνεται ότι το ρεύμα του στάτη λαμβάνει μεγάλες τιμές ακόμα και στην εν κενώ λειτουργία, επειδή θα πρέπει να παράγει το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού μαγνητικού πεδίου της μηχανής. Επειδή το μαγνητικό πεδίο του δρομέα είναι πολύ μικρό, η επαγόμενη ροπή είναι τόση ώστε να μπορέσει να ξεπεράσει τις απώλειες περιστροφής.

Όταν στον κινητήρα προστεθεί κάποιο επαγωγικό φορτίο, τότε παρατηρείται η σταδιακή αύξηση της ολίσθησης και η μείωση της ταχύτητας του δρομέα. Η σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του πεδίου του στάτη προκαλεί μεγαλύτερη τάση στο δρομέα και κατ' επέκταση αύξηση του ρεύματος του δρομέα (αφού αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο σε αυτόν). Το ρεύμα του δρομέα καθυστερεί περισσότερο σε σχέση με την τάση του, ενώ το μαγνητικό πεδίο αυτού καθυστερεί όσο και το ρεύμα του δρομέα. Έτσι πέρα από αυτή την αύξηση, προκαλείται και αύξηση της γωνίας ροπής. Επομένως η συνολική επαγόμενη ροπή αυξάνεται ώστε να τροφοδοτηθεί το αυξημένο φορτίο του κινητήρα.

Η επαγόμενη ροπή, που διατηρεί την κίνηση του δρομέα, δίνεται από την σχέση:

$$T_{ind} = k * B_R \times B_{net}$$

το μέτρο της οποίας είναι:

$$T_{ind} = k * B_R * B_{net} * \sin \delta$$

όπου B_R είναι το μαγνητικό πεδίο στο δρομέα, B_{net} το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής και δ η γωνία μεταξύ των μαγνητικών πεδίων του δρομέα και του στάτη.

Ο καθένας από τους παραπάνω όρους συνεισφέρει στη συνολική συμπεριφορά της μηχανής ως εξής:

- Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα είναι ανάλογο του ρεύματος στο δρομέα, όσο αυτός είναι ακόρεστος. Το ρεύμα του δρομέα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ολίσθηση και μειώνεται η ταχύτητα της μηχανής.
- Το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής είναι ανάλογο της αντι-ΗΕΔ E_1 , που προσεγγιστικά θεωρείται σταθερό.

- Η γωνία μεταξύ των μαγνητικών πεδίων του δρομέα και του στάτη είναι ίση με την γωνία του συντελεστή ισχύος στο δρομέα αυξημένη κατά 90° . Οπότε ο όρος $\sin \delta = \sin \theta_R + 90^\circ = \cos \theta_R$, είναι ίσος με το συντελεστή ισχύος στο δρομέα.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα και το διανυσματικό διάγραμμα ροής είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή της γενικής εξίσωσης που δίνει τη σχέση της επαγόμενης ροπής του κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής του. Η επαγόμενη ροπή του κινητήρα δίνεται από τις σχέσεις:

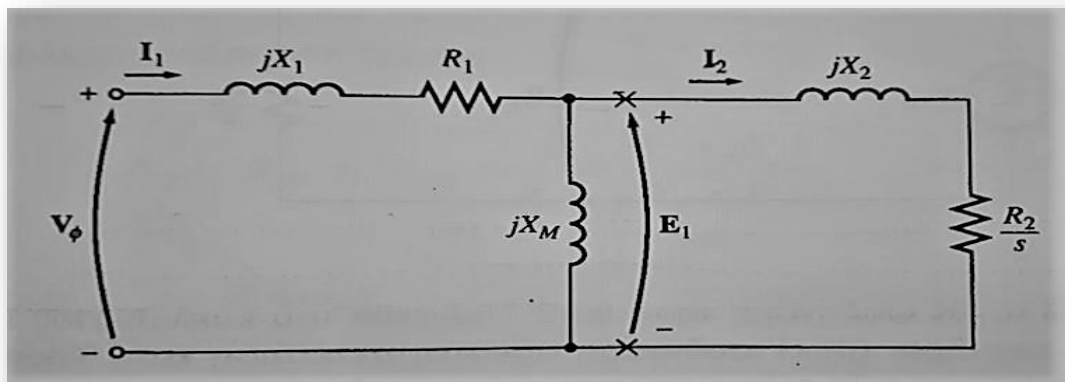
$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad \text{και} \quad T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$$

Η ισχύς διακένου P_{AG} είναι η ισχύς που διέρχεται από το κύκλωμα του στάτη στο κύκλωμα του δρομέα μέσω του διακένου και υπολογίζεται από τη σχέση:

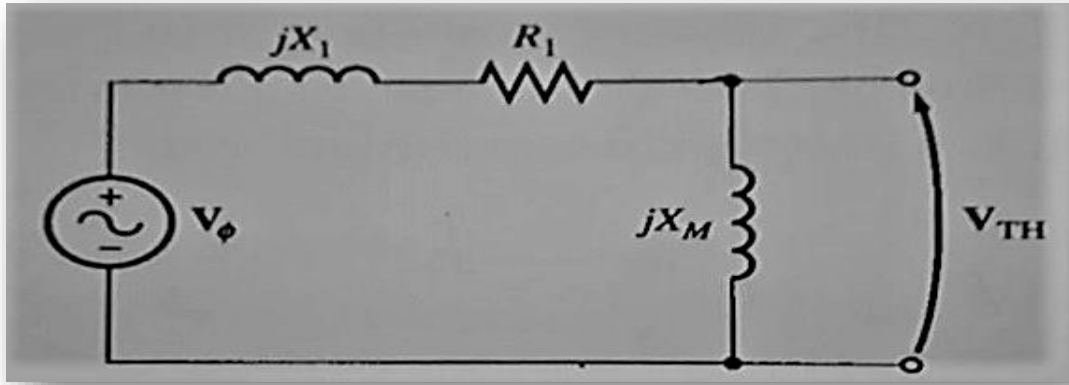
$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

δηλαδή είναι η ισχύς που απορροφάται στην αντίσταση $\frac{R_2}{s}$.

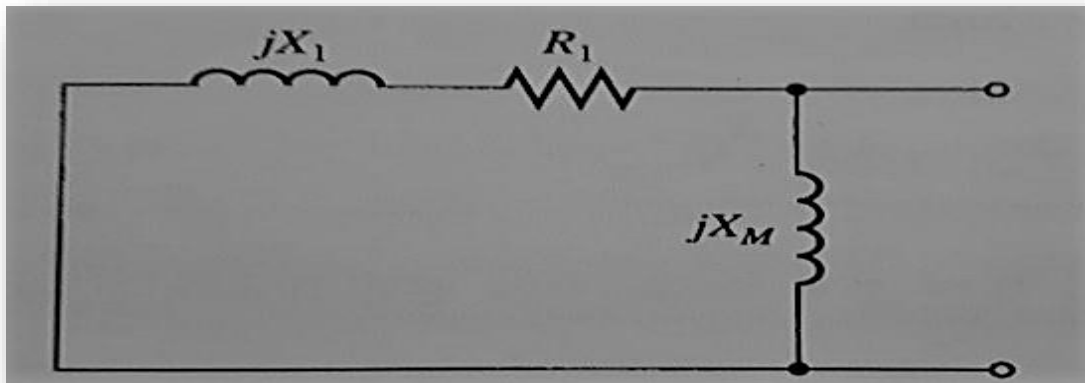
Για τον υπολογισμό του ρεύματος του δρομέα I_2 είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της τάσης και της σύνθετης αντίστασης του ισοδύναμου Thevenin στην είσοδο του επαγωγικού κινητήρα, όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



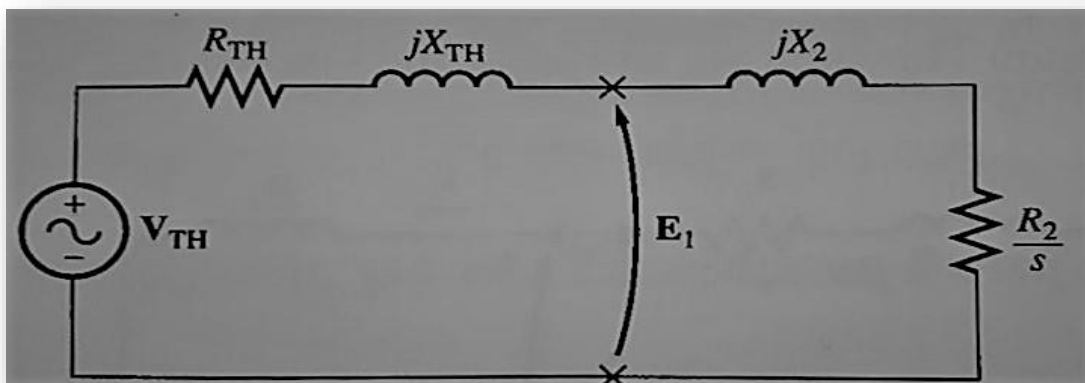
Σχήμα 5. Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)



Σχήμα 6. Η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)



Σχήμα 7. Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)



Σχήμα 8. Το τελικό απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)

Αρχικά, σύμφωνα με τον κανόνα του διαιρέτη τάσης, με τη βοήθεια του σχήματος 6 υπολογίζεται η τάση κατά Thevenin, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$V_{TH} = V_{\varphi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}$$

το μέτρο της οποίας είναι:

$$V_{TH} = V_{\varphi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}}$$

Έπειτα, από το σχήμα 7 προκύπτει η σύνθετη αντίσταση Thevenin, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$Z_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)}$$

Οπότε το ρεύμα του δρομέα I_2 δίνεται από την σχέση:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + jX_{TH} + jX_2}$$

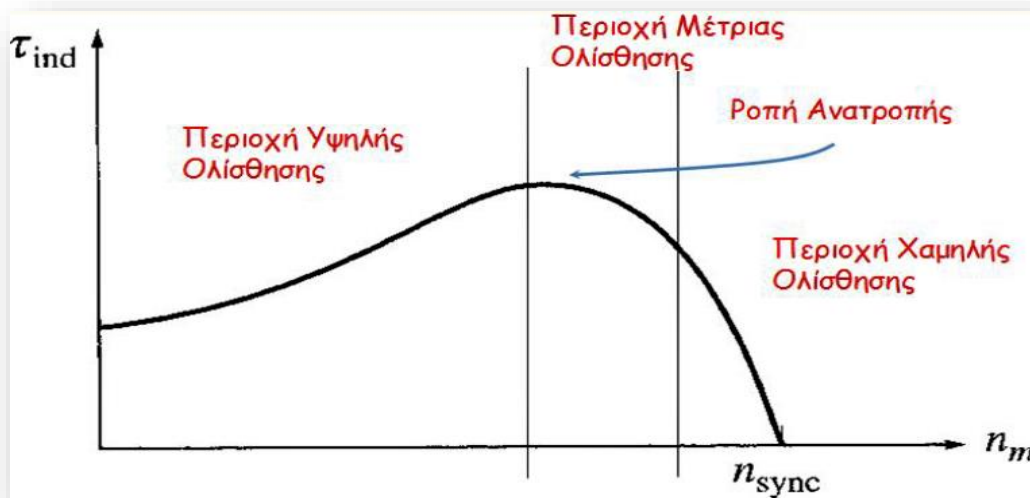
και το μέτρο του είναι:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

Άρα η επαγόμενη ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$T_{ind} = \frac{3 * V_{TH}^2 * \frac{R_2}{s}}{\omega_s * [(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2]}$$

Με βάση την παραπάνω σχέση προκύπτει η γραφική παράσταση της ροπής ενός επαγωγικού κινητήρα ως προς την ταχύτητα περιστροφής, η οποία παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 9. Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (Πηγή: www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf)

Η παραπάνω καμπύλη μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές.

- *Περιοχή χαμηλής ολίσθησης (low-slip region)*: Σε αυτή την περιοχή η ολίσθηση του κινητήρα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του φορτίου και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μειώνεται σχεδόν γραμμικά με το φορτίο. Η αντίδραση του δρομέα είναι αμελητέα κι έτσι ο συντελεστής ισχύος του δρομέα είναι προσεγγιστικά μοναδιαίος, ενώ το ρεύμα δρομέα αυξάνεται γραμμικά με την ολίσθηση. Το τελικό εύρος της κανονικής ευσταθούς λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα περιλαμβάνεται σ' αυτή την περιοχή γραμμικής και χαμηλής ολίσθησης. Έτσι, στην κανονική λειτουργία ο επαγωγικός κινητήρας παρουσιάζει γραμμική πτώση της ταχύτητάς του. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει η σχέση:

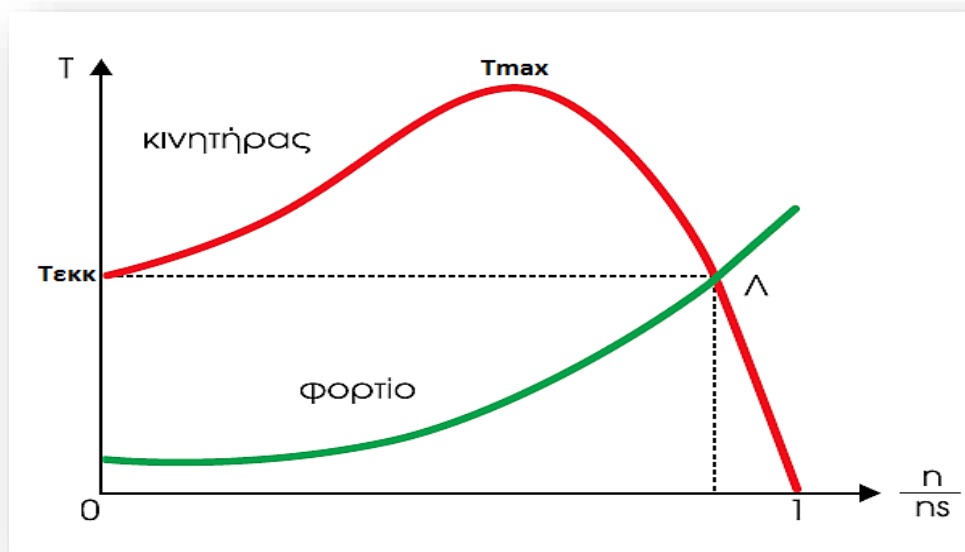
$$T_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot s}{\omega_s \cdot R_2}$$

- *Περιοχή μέτριας ολίσθησης (moderate-slip region)*: Στην περιοχή αυτή η συχνότητα του δρομέα είναι υψηλότερη απ' ό,τι στην προηγούμενη περιοχή, ενώ το μέτρο της αντίδρασης του δρομέα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστασή του. Το ρεύμα του δρομέα δεν αυξάνεται τόσο απότομα, όπως στην προηγούμενη περιοχή και ο συντελεστής ισχύος αρχίζει να μειώνεται. Ο κινητήρας αποκτά τη μέγιστη ροπή του (*ροπή ανατροπής - pullout torque*) στο σημείο όπου για μια σημαντική αύξηση του φορτίου η αύξηση του ρεύματος εξουδετερώνεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος στο δρομέα. Η ροπή αυτή είναι δυο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση, είναι η μέγιστη επιτρεπτή και είναι αδύνατο να ξεπεραστεί. Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_s[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]}$$

Περιοχή υψηλής ολίσθησης (high-slip region): Σ' αυτή την περιοχή η επαγόμενη ροπή μειώνεται με την αύξηση του φορτίου, καθώς η αύξηση του ρεύματος στο δρομέα επικαλύπτεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος στο δρομέα.

2.2 Βασικά στοιχεία από την καμπύλη ροπής ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής



Σχήμα 10. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (κόκκινη γραμμή) και του φορτίου (πράσινη γραμμή)
(Πηγή: www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf)

Η τυπική καμπύλη ροπής-ταχύτητας ενός ασύγχρονου κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 10. Η καμπύλη αυτή είναι σημαντική για τη λειτουργία των κινητήρων.

Κατά την εκκίνηση, όταν οι στροφές είναι πρακτικά μηδέν, η ροπή του κινητήρα έχει τιμή $T_{εκκ}$ και λέγεται ροπή εκκίνησης. Καθώς αυξάνονται οι στροφές, αυξάνεται και η ροπή μέχρι την τιμή T_{max} , η οποία, όπως έχει αναφερθεί, λέγεται μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Η ροπή εκκίνησης είναι λίγο μεγαλύτερη από την ροπή κατά την πλήρη φόρτιση. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.

Στη συνέχεια η ροπή μειώνεται απότομα και μηδενίζεται, όταν η ταχύτητα του κινητήρα φθάσει τη σύγχρονη ταχύτητα.

Στο σχήμα 10 φαίνεται και η καμπύλη ροπής-ταχύτητας του φορτίου. Σε κάθε ταχύτητα η διαφορά μεταξύ της ροπής του κινητήρα και της ροπής του φορτίου λέγεται ροπή επιτάχυνσης. Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ροπή εκκίνησης του φορτίου και να παραμείνει μεγαλύτερη όλο το διάστημα που ο κινητήρας επιταχύνεται μέχρι να φθάσει στην ταχύτητα λειτουργίας του. Η ταχύτητα λειτουργίας και η ροπή λειτουργίας καθορίζονται από το σημείο λειτουργίας Λ που είναι η τομή των δυο καμπυλών του σχήματος 10.

Η λειτουργία του κινητήρα στο τμήμα της καμπύλης πριν τη μέγιστη ροπή (T_{max}) είναι ασταθής λειτουργία και μετά τη μέγιστη ροπή είναι ευσταθής λειτουργία. Ο κινητήρας εργάζεται στην ευσταθή περιοχή για να μπορεί να προσαρμόζεται αυτόματα στις διακυμάνσεις του φορτίου. Στην περιοχή αυτή, αν για κάποιο λόγο αυξηθεί το φορτίο, θα μειωθεί η ταχύτητα και κατόπιν θα αυξηθεί η ροπή ώστε να μπορέσει ο κινητήρας να περιστρέψει το φορτίο.

Τέλος, αναφέρεται ότι στην περίπτωση που ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, παρατηρείται η αντιστροφή της φοράς περιστροφής της επαγόμενης ροπής. Αυτό συνεπάγεται ότι η μηχανή θα λειτουργεί πλέον ως γεννήτρια και όχι ως κινητήρας, μετατρέποντας την μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική.

Κεφάλαιο 3

Έλεγχος της ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής

3.1 Εισαγωγή

Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές οι κινητήρες πρέπει να ικανοποιούν πολύ αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την περιοχή και την ομαλότητα ελέγχου καθώς και την οικονομική λειτουργία. Το κανονικό εύρος λειτουργίας ενός τυπικού κινητήρα επαγωγής περιορίζεται κάτω από 5% για την ολίσθηση, ενώ η μεταβολή της ταχύτητας πέρα από αυτό το εύρος είναι σχεδόν ανάλογη του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα. Ακόμη κι αν η ολίσθηση έπαιρνε μεγαλύτερη τιμή, η απόδοση του κινητήρα θα έπεφτε πολύ χαμηλά, αφού οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ανάλογες με την ολίσθηση ($P_{RCL} = s * P_{AG}$). Γι' αυτό το λόγο οι επαγωγικοί κινητήρες παλαιότερα δεν αποτελούσαν καλή επιλογή για εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας, κάτι το οποίο αντιμετωπίστηκε με την εμφάνιση των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρονικής οδήγησης.

Οι τεχνικές με τις οποίες είναι δυνατό να ρυθμιστεί η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων είναι οι εξής:

- *Η μεταβολή της σύγχρονης ταχύτητας του κινητήρα.* Η ταχύτητα αυτή είναι η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, αφού ο άξονας της μηχανής περιστρέφεται πάντα κοντά στη σύγχρονη n_s . Η σύγχρονη ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα δίνεται από τη σχέση: $n_s = \frac{120 * f}{p}$, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Επομένως, οι μόνοι τρόποι μεταβολής της είναι η ρύθμιση της ηλεκτρικής συχνότητας και η μεταβολή του αριθμού των πόλων.
- *Η μεταβολή της ολίσθησης του κινητήρα για δεδομένο φορτίο.* Ο έλεγχος της ολίσθησης πραγματοποιείται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα και με τη μεταβολή της τάσης εισόδου στον κινητήρα.

Επειδή η επέμβαση στο εσωτερικό μιας μηχανής είναι πρακτικά ένα αβίαστο κατόρθωμα, ο έλεγχος της ταχύτητας στους επαγωγικούς κινητήρες επιτυγχάνεται κυρίως με τη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου και τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας.

3.2 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου

Με την μεταβολή της συχνότητας που εφαρμόζεται στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα παρατηρείται ότι ο ρυθμός περιστροφής των μαγνητικών του πεδίων n_s και το σημείο λειτουργίας χωρίς φορτίο στην καμπύλη ροπής-ταχύτητας μεταβάλλονται

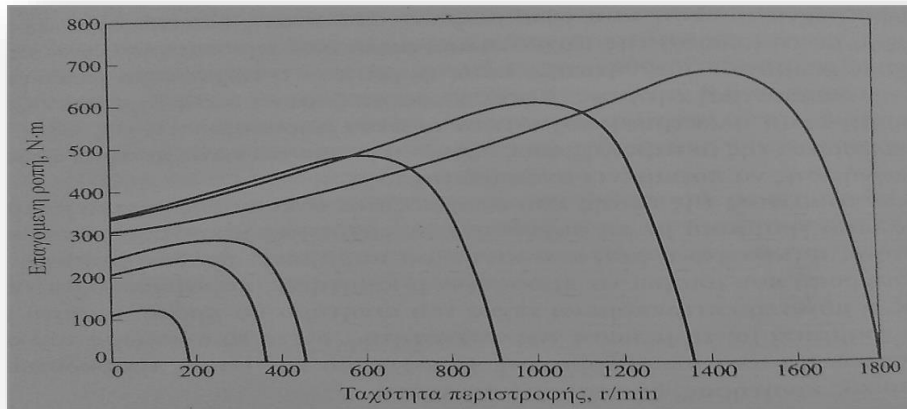
με ανάλογο τρόπο. Ελέγχοντας δηλαδή τη μεταβολή της συχνότητας, είναι δυνατή η ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα, η οποία μπορεί να λαμβάνει τιμές μικρότερες ή μεγαλύτερες από τη βασική ταχύτητα (base speed-η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα στις ονομαστικές συνθήκες). Το εύρος των τιμών ρύθμισης ξεκινά από 5% της βασικής ταχύτητας και μπορεί να φθάσει σε τιμές διπλάσιες της βασικής. Όμως, είναι απαραίτητος ο καθορισμός κάποιων ορίων τόσο για την τάση όσο και για τη ροπή του κινητήρα, ώστε κατά τη μεταβολή της ταχύτητάς του, να παραμένει στην ασφαλή λειτουργία.

Η ασφαλής λειτουργία του κινητήρα επαγωγής μεταβάλλοντας τη συχνότητα του δικτύου επιτυγχάνεται με τις ακόλουθες διαδικασίες.

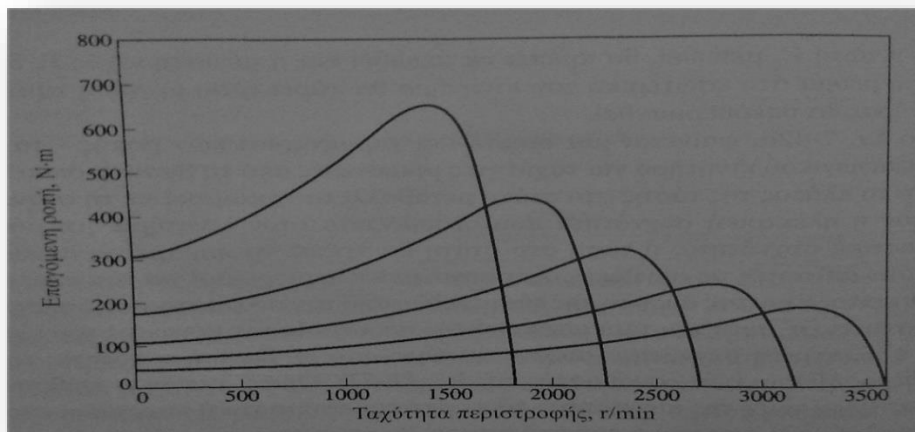
Η πρώτη διαδικασία αφορά τον υποβιβασμό της τάσης που εφαρμόζεται στο στάτη περιστρέφοντας τον κινητήρα με ταχύτητες μικρότερες από τη βασική. Στην περίπτωση αυτή η τάση θα πρέπει να μειώνεται γραμμικά με τη συχνότητα προκειμένου να αποφευχθεί ο κορεσμός του χάλυβα του στάτη και η μεγάλη αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης του κινητήρα. Επίσης, η μέγιστη ροπή που μπορεί να προσφέρει η μηχανή παραμένει σχετικά υψηλή, ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς θα πρέπει κι αυτή να μειώνεται γραμμικά με τη μείωση της συχνότητας ώστε το κύκλωμα του στάτη να μην υπερθερμαίνεται.

Η δεύτερη διαδικασία πραγματοποιείται όταν η ηλεκτρική συχνότητα που εφαρμόζεται στον κινητήρα ξεπεράσει την ονομαστική συχνότητα. Σε αυτή την περίπτωση η τάση στο στάτη θα πρέπει να παραμείνει σταθερή, ώστε να διασφαλιστεί η προστασία της μόνωσης του κινητήρα. Επίσης, λόγω της μείωσης της προκαλούμενης μαγνητικής ροής παρατηρείται η μείωση της μέγιστης ροπής του κινητήρα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι οικογένειες των χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα με ονομαστική ταχύτητα 1800rpm. Στο σχήμα 11 η μεταβολή της συχνότητας επιφέρει ταχύτητες κάτω από τη βασική, ενώ στο σχήμα 12 οι ταχύτητες ξεπερνούν τη βασική ταχύτητα. Τέλος, είναι εμφανές από τις καμπύλες ότι η μέγιστη ροπή στην πρώτη διαδικασία αυξάνεται, ενώ στη δεύτερη ακολουθεί αντίθετη μεταβολή.



Σχήμα 11. Οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας για ταχύτητες κάτω από τη βασική (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)



Σχήμα 12. Οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας για ταχύτητες πάνω από τη βασική (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)

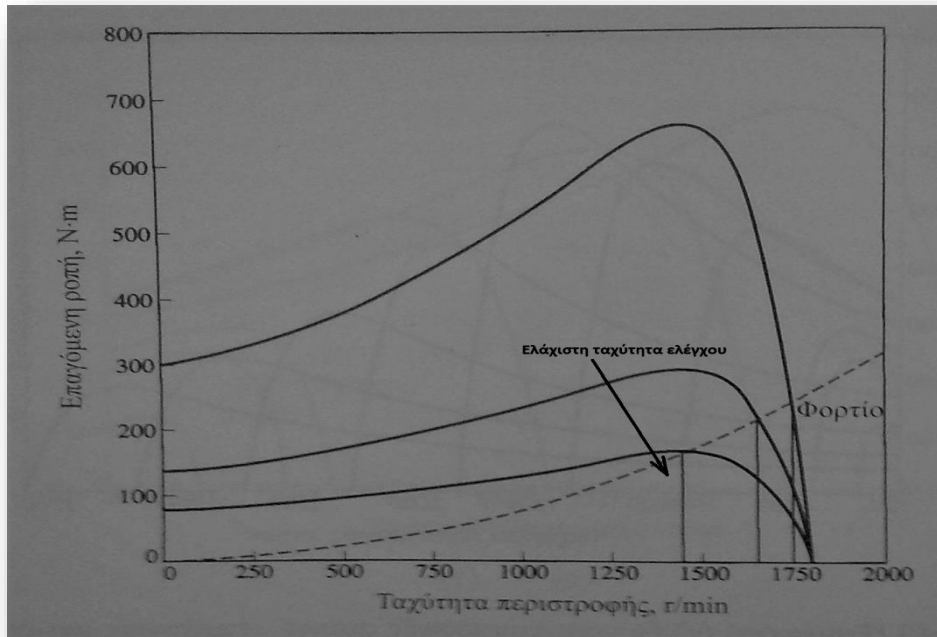
Η ανάπτυξη των σύγχρονων συσκευών οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρικούς διακόπτες έχει γίνει πλέον η πιο δημοφιλής μέθοδος ρύθμισης της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων.

3.3 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως στους μικρούς κινητήρες με τυλίγματα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας μεταβάλλονται

όπως στο σχήμα 13, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Οπότε, παρατηρώντας το σχήμα, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε πολύ μικρότερες ταχύτητες από τη σύγχρονη. Ακόμη, το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός.



Σχήμα 13. Ρύθμιση της ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής με έλεγχο της τάσης εισόδου (Πηγή: Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 7 Επαγωγικοί Κινητήρες)

Κεφάλαιο 4

Ορισμοί των κυκλωματικών διατάξεων της εργαστηριακής εφαρμογής

4.1 Αντιστροφέας (Inverter)

Οι ηλεκτρικές μηχανές, κυρίως βραχυκυκλωμένου δρομέα που είναι η πρώτη επιλογή για πλήθος εφαρμογών, έχουν την ταχύτητά τους άμεσα εξαρτώμενη από τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας τους. Στην Ελλάδα, όπως και παντού στη γη, η συχνότητα είναι καθορισμένη και σταθερή από τον πάροχο και δεν μπορεί να επιλεγεί (συχνότητα δικτύου: 50Hz). Ο μόνος ικανοποιητικός τρόπος για να γίνει έλεγχος στις στροφές είναι μέσω ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος, όπως είναι οι αντιστροφείς ή inverters.

Ο αντιστροφέας, όπως λέει και το όνομά του, έχει την ιδιότητα να «αντιστρέφει» (invert) μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος στην είσοδό του σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας και μεταβλητής RMS τιμής στην έξοδό του. Στην πραγματικότητα, στο εσωτερικό του αντιστροφέα πρώτα γίνεται η μετατροπή του εναλλασσόμενου μεγέθους του δικτύου σε συνεχές στην είσοδό του, αφού από το δίκτυο της ΔΕΗ λαμβάνεται τριφασική τάση 220-380V συχνότητας 50Hz.

Οι εφαρμογές των αντιστροφέων είναι πολυάριθμες κυρίως στη βιομηχανία και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι τα συστήματα ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, τα συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα ενεργά φίλτρα για τη μείωση αρμονικών για τη βελτίωση της ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος, τα ενεργά συστήματα αντιστάθμισης άεργου ισχύος και τα συστήματα αδιάκοπης παροχής ισχύος.

Οι κατηγορίες των αντιστροφέων είναι δύο:

- a. Αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης (VSI-Voltage Source Inverters)
- b. Αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος (CSI-Current Source Inverters).

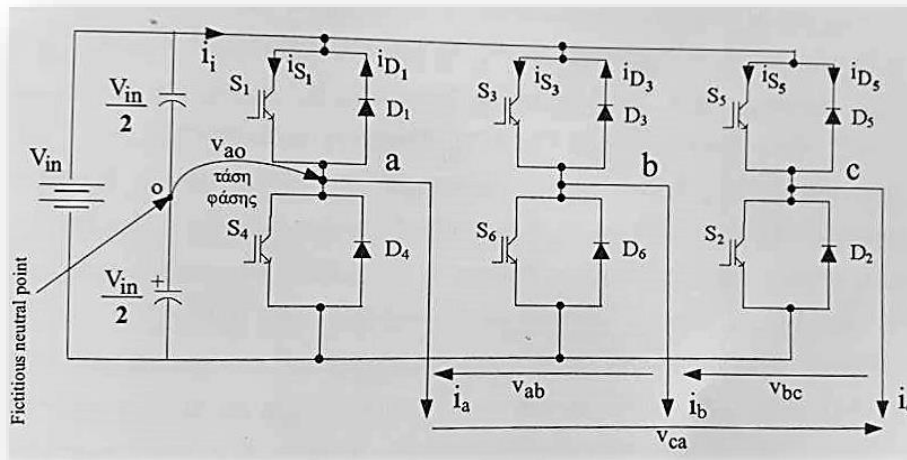
Οι οποίοι ανάλογα με τον τρόπο συνδεσμολογίας τους διακρίνονται σε:

- i. Μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας
- ii. Μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας
- iii. Τριφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας.

Στην συγκεκριμένη εργασία γίνεται χρήση τριφασικού αντιστροφέα τροφοδοτούμενο από πηγή τάσης σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας με σκοπό τον έλεγχο τριφασικού κινητήρα επαγωγής.

Οι τύποι αντιστροφέων πηγής τάσης που υπάρχουν είναι αρκετοί και διαφορετικοί. Γι' αυτό ανάλογα με την εφαρμογή που πραγματοποιείται κάθε φορά επιλέγεται ο καταλληλότερος. Στο ακόλουθο σχήμα, φαίνεται το κύκλωμα ισχύος

ενός τριφασικού αντιστροφέα με τρανζίστορ ισχύος IGBTs ως ημιαγωγικούς διακόπτες. Βέβαια αντί για IGBTs μπορεί να γίνει χρήση GTOs ή MOSFETs ή θυρίστορ ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ εξόδου του αντιστροφέα.



Σχήμα 14. Κύκλωμα ισχύος ενός τριφασικού αντιστροφέα με IGBTs ημιαγωγικούς διακόπτες (Πηγή: Στέφανος Ν.Μανιάς, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ, Εκδόσεις Συμεών, Κεφάλαιο 3 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος)

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η λειτουργία του αντιστροφέα, με τη βοήθεια του σχήματος 14 που περιλαμβάνει το κύκλωμα, αναλύεται ο τρόπος που λειτουργούν τα ημιαγωγικά στοιχεία του. Ο αντιστροφέας αποτελείται από έξι IGBTs, τα οποία συμβολίζονται με S_i , $i=1,2,\dots,6$ και αντιπαράλληλα συνδέονται οι δίοδοι ελευθέρως διέλευσης που συμβολίζονται με D_i , $i=1,2,\dots,6$. Στην είσοδο, παράλληλα με την πηγή συνεχούς ρεύματος, υπάρχει ένας χωρητικός καταμεριστής τάσης, ο οποίος αποτελείται από δυο όμοιους πυκνωτές, και στα άκρα του καθενός υπάρχει τάση ίση με το μισό της τάσης της πηγής. Σκοπός του καταμεριστή είναι η δημιουργία ενός κόμβου αναφοράς ανάμεσα στους δυο πυκνωτές, ο οποίος συμβολίζεται με O για τη μέτρηση των τάσεων εξόδου του αντιστροφέα πάνω στο φορτίο. Η συνεχής τάση εισόδου μπορεί να προέλθει είτε από μια πηγή συνεχούς τάσης, όπως συσσωρευτές ή φωτοβολταϊκές συστοιχίες, είτε από ανόρθωση της μονοφασικής ή τριφασικής εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου. Για την ορθή εξαγωγή των κατάλληλων κυματομορφών εξόδου, τα IGBTs άγουν με την εξής σειρά: $S_1S_5S_6-S_1S_2S_6-S_1S_2S_3-S_2S_4S_3-S_5S_4S_3-S_5S_4S_6$. Στην έξοδο του αντιστροφέα λαμβάνεται τριφασική εναλλασσόμενη τάση, η μορφή της οποίας εξαρτάται από τον τρόπο χειρισμού των ημιαγωγικών διακοπών. Ο χειρισμός τους γίνεται μέσω κατάλληλης παλμοδότησης στην πύλη τους. Τα ημιαγωγικά στοιχεία έχουν κάποιο χρονικό διάστημα που άγουν. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται αποκλειστικά από την χρονική διάρκεια των παλμών. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι τα διαστήματα αγωγής τους δεν πρέπει να συμπίπτουν μεταξύ τους, γιατί σε αντίθετη περίπτωση προκύπτει βραχυκύκλωμα στα άκρα της συνεχούς τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα να καταστρέφονται οι ημιαγωγικοί διακόπτες.

Ο αντιστροφέας, στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση ενός AC κινητήρα επαγωγής, προκειμένου να μετατρέπει την ισχύ της εισόδου ρυθμίζοντας τη συχνότητα και την τάση της τροφοδοσίας ώστε να ελέγχεται η ταχύτητά της. Η χρήση του αντιστροφέα μπορεί να προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας έως 50%, επεκτείνοντας παράλληλα τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού. Πλεονεκτεί λόγω της δυνατότητάς του να ελέγχει την ταχύτητα κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας της μηχανής και όχι μόνο κατά την εκκίνηση/παύση με χρήση ενός ομαλού εκκινητή. Επίσης, παρ' ότι το κόστος ενός αντιστροφέα μπορεί να είναι διπλάσιο ή τριπλάσιο απ' το κόστος ενός ομαλού εκκινητή, υπερτερεί όμως στην παροχή περισσότερων δυνατοτήτων στον χρήστη, όπως οι ψηφιακές διαγνωστικές πληροφορίες.

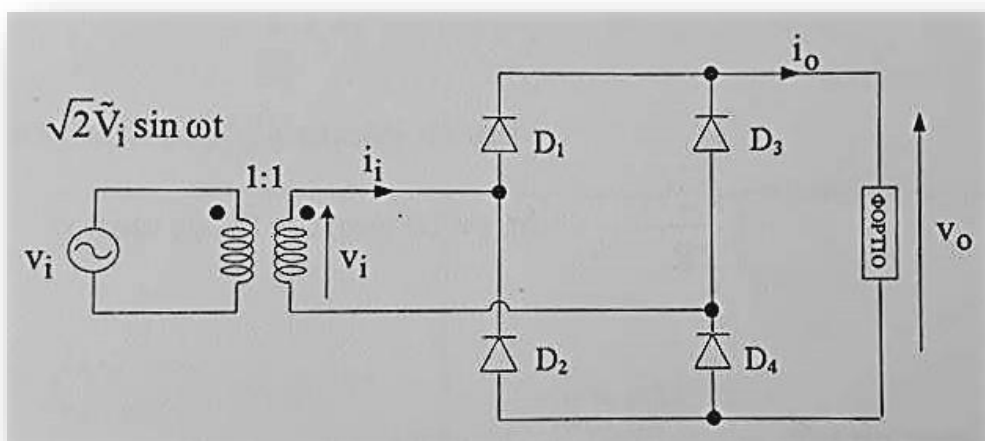
4.2 Ανορθωτής (Rectifier)

Ο ανορθωτής (rectifier) είναι μια διάταξη ισχύος η οποία μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως διόδους ή θυρίστορ.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες ανορθωτικών διατάξεων:

- 1) Ανορθωτικές διατάξεις με διόδους
- 2) Ανορθωτικές διατάξεις με θυρίστορ
- 3) Διακοπτικές ή PWM ανορθώσεις

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση ενός μονοφασικού πλήρους ανορθωτή με διόδους σε συνδεσμολογία γέφυρας.



Σχήμα 15. Κύκλωμα ισχύος μονοφασικής ανόρθωσης σε συνδεσμολογία γέφυρας (Πηγή: Στέφανος Ν.Μανιάς, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ, Εκδόσεις Συμεών, Κεφάλαιο 3 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος)

Το κύκλωμα ισχύος παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα. Αποτελείται από το συνδυασμό ενός μετασχηματιστή, ο οποίος υποβιβάζει ή ανυψώνει την εναλλασσόμενη τάση μέχρι την επιθυμητή τιμή, και από την ανορθωτική διάταξη, η οποία με τη βοήθεια των διόδων D_i , $i=1, 2, 3, 4$ επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος

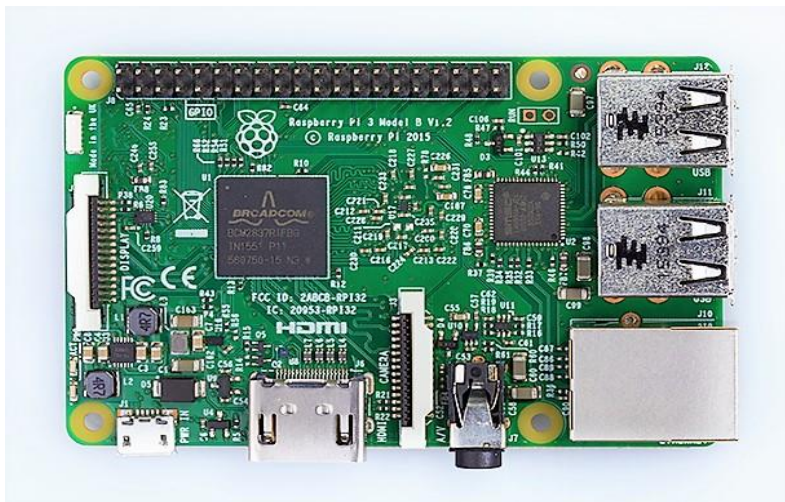
μόνο κατά τη μια φορά. Οι δίοδοι D_1 και D_4 είναι θετικά πολωμένες κατά το διάστημα της πρώτης ημιπεριόδου της τάσης τροφοδοσίας, ενώ οι δίοδοι D_2 και D_3 είναι θετικά πολωμένες κατά το διάστημα της δεύτερης ημιπεριόδου. Με τη χρήση ενός φίλτρου εξομάλυνσης οι διακυμάνσεις του ρεύματος καθίστανται πολύ μικρές και πρακτικά η έξοδος του ανορθωτή είναι συνεχές μέγεθος.

Οι συγκεκριμένες διατάξεις χρησιμοποιούνται σε πολυάριθμες εφαρμογές για το λόγο ότι με συνεχές ρεύμα λειτουργούν πλήθος ηλεκτρονικών συσκευών που δέχονται μπαταρίες, όπως για παράδειγμα οι φορτιστές τηλεφώνων, ψηφιακές φωτογραφικές, κ.ά. Εφαρμογή βρίσκουν και στις ακόλουθες περιοχές:

- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Συστήματα τροφοδοσίας ηλεκτρικών τρένων και τρόλεϊ
- Συστήματα ζυγών συνεχούς ρεύματος
- Τροφοδοσία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων

4.3 Raspberry Pi (RPI)

Το Raspberry Pi είναι ένας υπολογιστής χαμηλού κόστους (περίπου 40€ για την Ελλάδα) σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας. Λειτουργεί όπως ένας κλασικός υπολογιστής. Ο χρήστης του μπορεί να πλοηγηθεί στο internet, να παρακολουθεί βίντεο υψηλής ανάλυσης, να χρησιμοποιήσει κειμενογράφο και υπολογιστικά φύλλα και φυσικά να μάθει γλώσσες προγραμματισμού. Το πρώτο μοντέλο ήταν το A και ακολούθησαν τα B και B+. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση του Raspberry Pi 3 Model B, το οποίο αποτελεί την τρίτη γενιά των RPI.



Σχήμα 16. Κυκλωματική πλακέτα του Raspberry Pi Model B (Πηγή: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>)

Το Raspberry Pi συνδέεται σε μια οθόνη υπολογιστή ή μια τηλεόραση και χρησιμοποιείται με ένα USB, πληκτρολόγιο, ποντίκι και μια SD κάρτα για το λειτουργικό σύστημα και την αποθήκευση δεδομένων. Για την τροφοδοσία απαιτείται ένα microUSB τροφοδοτικό των 5 volt (ένας φορτιστής android κινητού είναι η

ευκολότερη λύση). Διαθέτει μνήμη RAM 1GB, τέσσερις θύρες USB, 40 pins γενικής χρήσης, μια έξοδο HDMI και θύρα Ethernet.

Το υλικό που χρησιμοποιεί είναι το SoC (System on a Chip) BCM2835 της εταιρείας Broadcom. System on a Chip σημαίνει ότι όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρειάζεται ένας υπολογιστής για να λειτουργήσει συνδυάζονται σε ένα μοναδικό chip. Ο τετραπύρηνος επεξεργαστής του RPI είναι ARMv8, ο οποίος βασίζεται στην αρχιτεκτονική RISC(Reduced Instruction Set Computing) και λειτουργεί στα 1.2 GHz. Η αρχιτεκτονική αυτή έχει ως χαρακτηριστικό ένα μικρό βελτιστοποιημένο σετ εντολών.

Το Raspberry Pi διαθέτει ψηφιακές εισόδους και εξόδους που ονομάζονται GPIOs (General Purpose Input Output), μπορούν όμως παράλληλα να εκτελούν έναν αριθμό διαφορετικών λειτουργιών. Έτσι χρησιμοποιούνται και για άλλους σκοπούς, όπως την επικοινωνία με μια περιφερειακή συσκευή. Ακόμα, στο RPI υπάρχει το header που δίνει πρόσβαση σε κάποιες από αυτές τις ακίδες (pins). Οι ακίδες δέχονται 3.3V και 16mA η καθεμία, με εξαίρεση τις ακίδες των 5V που δέχονται το πολύ 500mA. Η τροφοδοσία των 5V τραβάει ρεύμα απευθείας από την τροφοδοσία του microUSB, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται ότι απομένει από το ρεύμα που τραβάει η πλακέτα (η συνήθης τροφοδοσία 1A μπορεί να δώσει 300mA). Οι GPIOs πρέπει να ορισθούν ως είσοδοι ή εξόδοι πριν γίνει χρήση τους. Υπάρχουν πολλαπλοί τρόποι να γίνει κάτι τέτοιο, ο πιο εύκολος είναι μέσω της Python. Οι περισσότερες ακίδες του header συνδέονται άμεσα με το Broadcom chip. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να γίνει κατάλληλος σχεδιασμός και ρύθμιση των στοιχείων που θα συνδεθούν στα pins για την αποφυγή μόνιμης βλάβης στην πλακέτα. Απλά εργαλεία, όπως ένα πολύμετρο, και προσεκτικός έλεγχος των καλωδίων και της συνδεσμολογίας, καθώς και η χρήση antistatic wrist strap για την αποφυγή στατικού ηλεκτρισμού εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία και τη μακροβιότητα του RPI.

Η σύνδεση στο δίκτυο μπορεί να γίνει ενσύρματα μέσω USB Ethernet ή ασύρματα μέσω Wi-Fi ή Bluetooth.

Στο Raspberry Pi υπάρχει ένας install manager που ονομάζεται NOOBS και περιέχει διάφορα κατάλληλα λειτουργικά συστήματα τα οποία μπορεί να επιλέξει ο χρήστης. Το πιο δημοφιλές είναι το Raspbian. Αναφέρεται ότι η εγκατάσταση της πλήρους έκδοσης των Windows 10 δεν είναι εφικτή στο RPI, γι' αυτό υπάρχει μια ειδική έκδοση αυτών, το λειτουργικό Windows 10 IoT Core, το οποίο απευθύνεται κυρίως σε προγραμματιστές συσκευών τύπου Internet of Things (IoT), όπως έξυπνοι θερμοστάτες, έξυπνα ψυγεία, κλπ.

4.4 Arduino

Το Arduino αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή χαμηλών δυνατοτήτων που έχει όμως ανοικτό κώδικα προγραμματισμού με πολύ μεγάλη υποστήριξη από την εταιρία που το κατασκεύασε. Υποστηρίζει πολλούς και διαφορετικούς αισθητήρες, που λειτουργούν ως μονάδες εισόδου και έχει ένα ικανό σύνολο από

μονάδες εξόδου. Δίνει έτσι το δικαίωμα στον πειραματισμό και στον προγραμματισμό αυτών. Κι όλα αυτά χωρίς ιδιαίτερα υψηλό κόστος. Είναι, λοιπόν, μια open-source προγραμματιστική πλατφόρμα βασισμένη σε μια απλή μητρική πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή, εισόδους/εξόδους και ένα αναπτυγμένο περιβάλλον το οποίο υλοποιεί τη γλώσσα Processing/Wiring. Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων ή να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω λογισμικού (π.χ. Flash, Processing, MaxMSP).

Το Arduino Mega, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, φαίνεται στο σχήμα 17. Αποτελείται από ένα ενσωματωμένο κύκλωμα ATmega1280 και συμπληρωματικά εξαρτήματα για τη διευκόλυνση του χρήστη στον προγραμματισμό και την ενσωμάτωσή του σε άλλα κυκλώματα. Αναλυτικά, η πλακέτα αυτή περιλαμβάνει: 54 ψηφιακές ακίδες εισόδου/εξόδου (από τις οποίες οι 15 παρέχονται για PWM εξόδους), 16 αναλογικές εισόδους, έναν κρυσταλλικό ταλαντωτή 16MHz, μια θύρα USB, ένα βύσμα, ένα LED λειτουργίας της πλακέτας, δυο λυχνίες RX/TX λήψης και μετάδοσης δεδομένων, έναν ρυθμιστή τάσης και ένα κουμπί επανεκκίνησης. Περιέχει οτιδήποτε χρειάζεται ώστε να υποστηριχθεί ο μικροελεγκτής, απλά συνδέοντάς το σε έναν υπολογιστή με καλώδιο USB ή με ένα AC-σε-DC μετατροπέα ή μια μπαταρία προκειμένου να τεθεί σε λειτουργία. Το Arduino Mega διαθέτει μνήμη Flash 128KB (από τα οποία 4KB χρησιμοποιούνται από τον bootloader), SRAM 8KB και 4KB EEPROM. Η πλακέτα μπορεί να λειτουργεί με εξωτερική τροφοδοσία από 6 έως 20 Volts. Όμως, αν τροφοδοτηθεί με λιγότερο από 7V, η ακίδα των 5V μπορεί να παρέχει μικρότερη τάση και η λειτουργία της πλακέτας να είναι ασταθής. Από την άλλη, αν η τάση είναι μεγαλύτερη από 12V, ο ρυθμιστής τάσης μπορεί να υπερθερμανθεί και να προκαλέσει βλάβη στην πλακέτα. Γι' αυτό η προτεινόμενη περιοχή λειτουργίας είναι από 7 έως 12 Volts.



Σχήμα 17. Μητρική πλακέτα του Arduino Mega (Πηγή: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>)

Όλες οι πλακέτες Arduino προγραμματίζονται με μια RS-232 σειριακή σύνδεση, αλλά ο τρόπος που επιτυγχάνεται αυτό διαφέρει σε κάθε hardware εκδοχή.

Οι σειριακές πλάκες Arduino περιέχουν ένα απλό κύκλωμα που βοηθά την μετατροπή του σήματος επιπέδου RS-232 σε TTL. Τα τωρινά Arduino προγραμματίζονται μέσω USB, κάτι που καθιστά δυνατό μέσω προσαρμοστικών chip USB-σε-Serial, όπως το FTDI FT232RL. Συγκεκριμένα, το Arduino Mega διαθέτει αρκετές δυνατότητες επικοινωνίας με έναν υπολογιστή, με ένα άλλο Arduino ή άλλους μικροελεγκτές. Ο ATmega1280 παρέχει τέσσερα UARTs για σειριακή επικοινωνία TTL (5V). Το chip FTDI FT232RL της πλακέτας διοχετεύει ένα από τα UARTs μέσω USB και οι FTDI drivers (που περιλαμβάνονται στο λογισμικό του Arduino) παρέχουν μια VCM θύρα στο λογισμικό του υπολογιστή. Το λογισμικό του Arduino περιλαμβάνει μια σειριακή οθόνη που επιτρέπει την αποστολή απλών δεδομένων κειμένου προς και από την πλακέτα. Οι ενδεικτικές λυχνίες RX και TX θα αναβοσβήσουν όταν τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω του FTDI και της σύνδεσης USB στον υπολογιστή (αλλά όχι για σειριακή επικοινωνία στις ακίδες 0 και 1). Μια βιβλιοθήκη λογισμικού επιτρέπει τη σειριακή επικοινωνία σε οποιαδήποτε από τις ψηφιακές ακίδες του Arduino Mega. Ο ATmega1280 υποστηρίζει επίσης την επικοινωνία με τους σειριακούς διαύλους I^2C (ή TWI) και SPI. Το λογισμικό του Arduino περιλαμβάνει μια βιβλιοθήκη Wire για απλοποίηση του διαύλου I^2C .

Το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) του Arduino είναι μια εφαρμογή γραμμένη σε Java, που λειτουργεί σε πολλές πλατφόρμες και προέρχεται από το IDE για τη γλώσσα προγραμματισμού Processing και το σχέδιο Wiring. Έχει σχεδιαστεί για να εισαγάγει τον προγραμματισμό στους χρήστες που δεν είναι εξοικειωμένοι με την ανάπτυξη λογισμικού. Περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα με χαρακτηριστικά όπως είναι η επισήμανση σύνταξης και ο συνδυασμός αγκυλών. Επίσης, είναι σε θέση να μεταγλωττίζει και να φορτώνει προγράμματα στην πλακέτα με ένα μόνο κλικ. Δεν υπάρχει συνήθως καμία ανάγκη του χρήστη να επεξεργαστεί αρχεία ή να τρέξει προγράμματα σε ένα περιβάλλον γραμμών εντολών. Ένα πρόγραμμα ή κώδικας που γράφτηκε για Arduino ονομάζεται σκίτσο(sketch). Τα Arduino προγράμματα είναι γραμμένα σε C και C++. Το Arduino IDE έρχεται με βιβλιοθήκη λογισμικού που ονομάζεται «Wiring» από το πρωτότυπο σχέδιο Wiring γεγονός που καθιστά πολλές κοινές λειτουργίες εισόδου/εξόδου πιο εύκολες.

Κεφάλαιο 5

Πειραματικό/Εργαστηριακό μέρος

5.1 Εισαγωγή

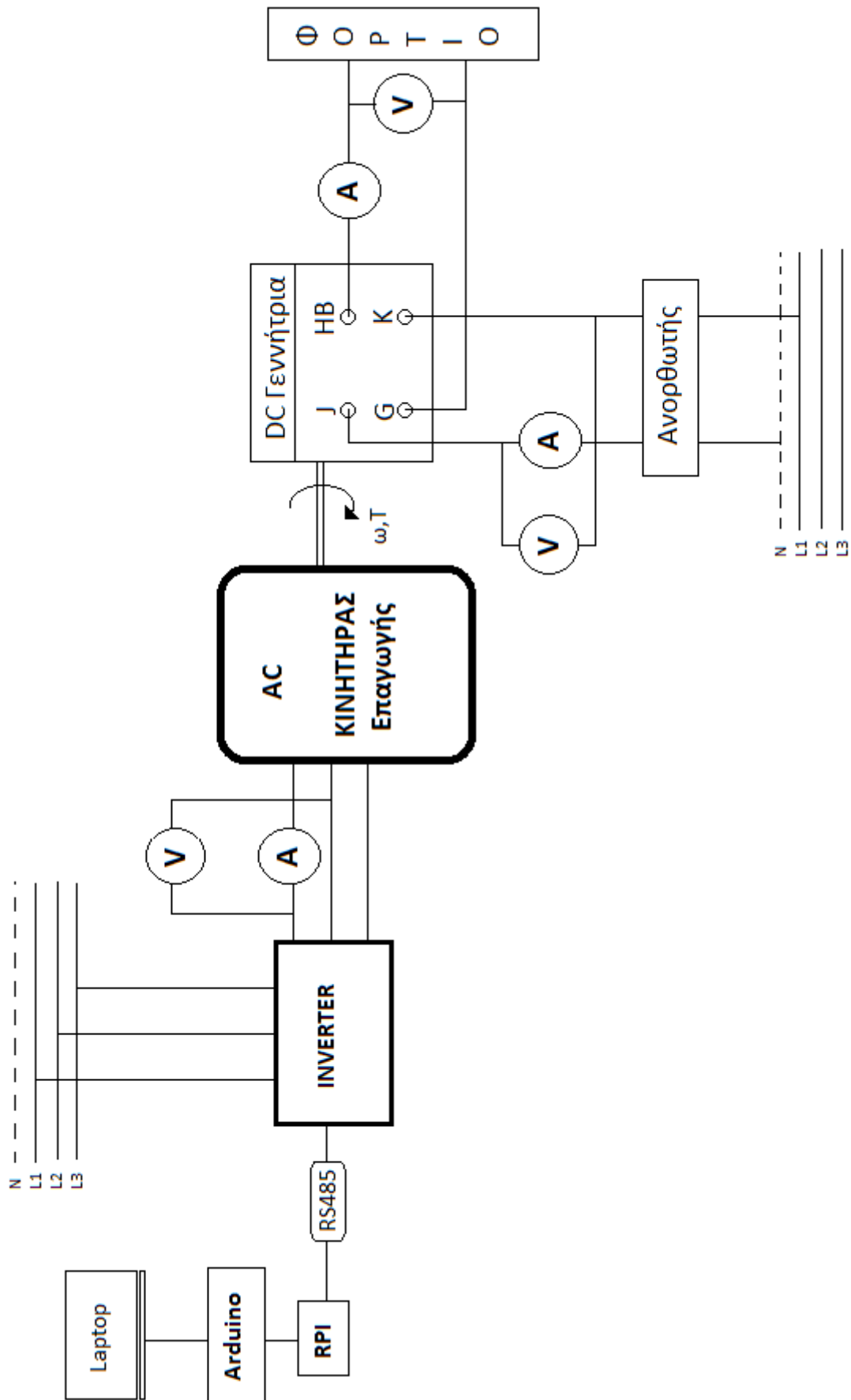
Η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς. Σε αυτό το γεγονός συμβάλλουν σημαντικά η αδιάκοπη θέληση του ανθρώπου για εξοικονόμηση χρόνου και κυρίως η ακατάπαυστη επιθυμία του να διευκολύνει διαρκώς την καθημερινότητά του. Στις μέρες μας η εξέλιξη της τεχνολογίας αφορά την κατασκευή συστημάτων μέσω των οποίων είναι δυνατή η δημιουργία αυτοματισμών ώστε να διευκολύνεται ο τρόπος ζωής του ανθρώπου. Πάνω σε αυτό τον τομέα βασίζεται και η συγκεκριμένη εργασία, έχοντας ως άξονες την εξοικονόμηση χρόνου, τη διευκόλυνση της καθημερινότητας του ανθρώπου και τη μέριμνα για την ασφάλειά του.

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο απομακρυσμένος έλεγχος ενός επαγωγικού κινητήρα μέσω του διαδικτύου με τη χρήση διατάξεων μικροεπεξεργαστών, όπως είναι το Arduino και το Raspberry Pi, προκειμένου να επιτευχθεί η χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών ροπής-ταχύτητας. Βασική ιδέα αποτελεί η ανάγκη του ανθρώπου να έχει την πλήρη εποπτεία της συμπεριφοράς ενός απομακρυσμένου συστήματος μέσω του διαδικτύου. Με άλλα λόγια, ο χρήστης να έχει τη δυνατότητα της παρατήρησης και διαχείρισης του συστήματος αυτού από απόσταση, περιορίζοντας τη φυσική του παρουσία στο χώρο όπου βρίσκεται το συγκεκριμένο σύστημα μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο.

Συγκεκριμένα παρακάτω θα παρουσιαστεί η σχεδίαση της εργαστηριακής διάταξης με τη βοήθεια της οποίας ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επεμβαίνει σ' έναν απομακρυσμένο επαγωγικό κινητήρα μέσω του διαδικτύου.

5.2 Παρουσίαση εργαστηριακής διάταξης

Για τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης εργαστηριακής εργασίας πραγματοποιήθηκε η συνδεσμολογία που παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 18. Πειραματική διάταξη του εργαστηρίου

5.3 Ανάλυση των επιμέρους μερών της εργαστηριακής διάταξης

Τα επιμέρους μέρη/εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργαστηριακή διάταξη είναι τα ακόλουθα:

Κινητήρας επαγωγής

Ο τριφασικός κινητήρας επαγωγής που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη είναι της ελληνικής εταιρείας VALIADIS Hellenic Motors και παρουσιάζει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά: 230-400V, 1.98-3.44A, 50Hz, $\cos\phi=0.76$, 1HP(0.75W), 1350rpm.

Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος

Η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη είναι της γερμανικής εταιρείας AEG και παρουσιάζει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά: 220V, 3.2A, 0.5W, 1500rpm.

Αντιστροφέας (Inverter)

Ο αντιστροφέας που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη είναι της ιταλικής εταιρείας ELETTRONICA SANTERNO S.P.A. Η συγκεκριμένη συσκευή ψηφιακού ελέγχου περιλαμβάνει ένα πληκτρολόγιο προγραμματισμού και ελέγχου και παρουσιάζει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

Model	VEGA DRIVE 4T002BIK
Code	ZZ0087330.07400
Input	AC3PH 380÷460V(±10%) 50/60Hz 3A
Output	AC3PH 0~INPUT V 0~400Hz 2.5A 1.9KVA
Motor	0.75KW
Max Torque	180% T_N

Ανορθωτής (Rectifier)

Ο μονοφασικός ανορθωτής που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη για τη διέγερση της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος είναι της εταιρείας REO Boris Von Wolff, η οποία εδρεύει στο Βερολίνο και παρουσιάζει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά: 1500VA, 220V(τάση τροφοδοσίας), 0-250V(τάση εξόδου), 6A και 50-60Hz.

Raspberry Pi (RPI)

Ο μικροεπεξεργαστής Raspberry Pi που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη ανήκει στην Τρίτη γενιά των Raspberry Pi και παρουσιάζει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

SoC	Broadcom BCM2837
CPU	4xARM Cortex-A53, 1.2GHz, 64-bit quad-core
GPU	Broadcom VideoCore IV
RAM	1GB LPDDR2(900MHz)
Networking	10/100 Ethernet, 2.4GHz, 802.11n wireless LAN
Bluetooth	Bluetooth 4.1 Classic, Bluetooth Low Energy (BLE)
Storage	microSD

GPIO	40-pin header
Ports	HDMI, 3.5mm analogue audio-video jack, 4xUSB 2.0, Ethernet, Camera Serial Interface (CSI), Display Serial Interface (DSI)

Arduino

Το Arduino που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη είναι το μοντέλο MEGA και παρουσιάζει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input pins	16
DC Current per I/O pins	20mA
DC Current for 3.3V pin	50mA
Flash Memory	256KB of which 8KB used by bootloader
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Clock speed	16MHz
LED_BUILTIN	13
Length	101.52mm
Width	53.3mm
Weight	37g

Μετατροπέας RS485

Στην εργαστηριακή διάταξη χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας πρωτοκόλλου σειριακής επικοινωνίας RS485.

Όργανα μέτρησης

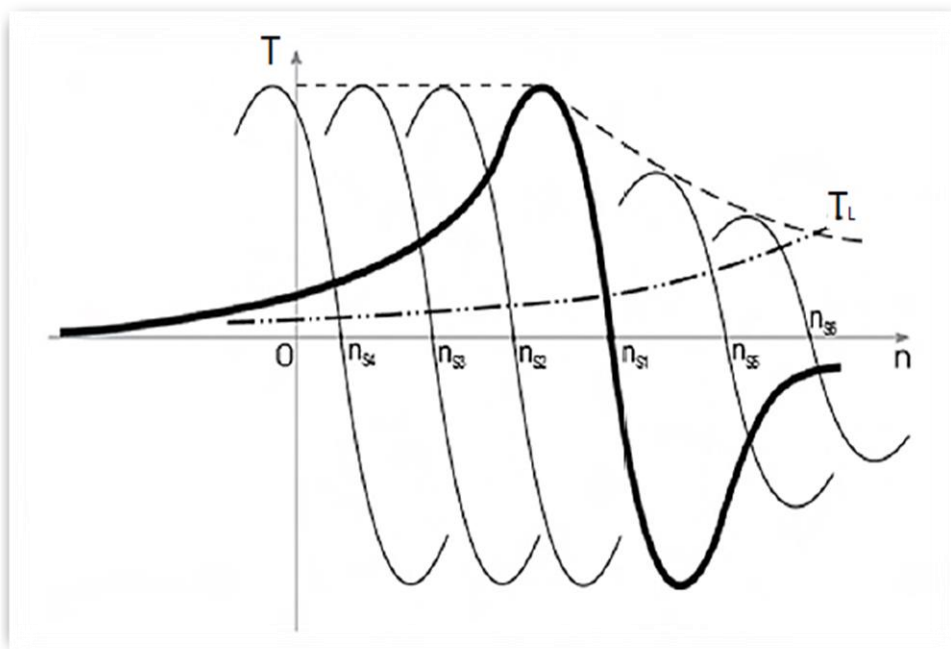
Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας είναι τα εξής:

- Τρία (3) βολτόμετρα με τα οποία μετρήθηκαν: η (πολική) τάση εξόδου του αντιστροφέα (η οποία ταυτίζεται με την τάση εισόδου του κινητήρα επαγωγής), η DC τάση διέγερσης της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος και η τάση του φορτίου στην έξοδο της εργαστηριακής διάταξης.
- Τρία (3) αμπερόμετρα με τα οποία μετρήθηκαν: το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα (το οποίο ταυτίζεται με το ρεύμα εισόδου στον κινητήρα επαγωγής), το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος και το ρεύμα φορτίου στην έξοδο της εργαστηριακής διάταξης.
- Ένα (1) στροφόμετρο με το οποίο μετρήθηκε η ταχύτητα του άξονα περιστροφής του κινητήρα επαγωγής σε κάθε μεταβολή της συχνότητας και του φορτίου.
- Ένα (1) πολύμετρο.

5.4 Ανάλυση του τρόπου λειτουργίας της εργαστηριακής διάταξης

Ο σκοπός της εργαστηριακής εφαρμογής, όπως έχει αναφερθεί, είναι ο απομακρυσμένος έλεγχος ενός επαγωγικού κινητήρα. Επομένως, η ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος χωρίζεται σε δύο επιμέρους μέρη: i) το πρώτο αφορά αποκλειστικά τον έλεγχο του AC κινητήρα και ii) το δεύτερο αφορά τον τρόπο με τον οποίο ο έλεγχος αυτός γίνεται απομακρυσμένα μέσω του διαδικτύου.

Αρχικά, η εκκίνηση του επαγωγικού κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί απλά με τη σύνδεσή του στο δίκτυο. Όμως, επειδή η συχνότητα του δικτύου είναι καθορισμένη και σταθερή από τη ΔΕΗ, $f=50\text{Hz}$, ο μόνος ικανοποιητικός τρόπος για να γίνει έλεγχος στροφών του κινητήρα είναι μέσω ενός αντιστροφέα (inverter). Ο αντιστροφέας είναι μια συσκευή η οποία λαμβάνει ως είσοδο την παροχή του δικτύου, δηλαδή τριφασική εναλλασσόμενη τάση 220-380V με συχνότητα 50 Hz, εσωτερικά τη μετατρέπει σε συνεχή τάση, κι έπειτα έχει ως απόκριση εναλλασσόμενη ελεγχόμενη RMS τιμή τάσης και μεταβλητή/ελεγχόμενη συχνότητα. Αφού πραγματοποιηθεί η εν λόγω σύνδεση ο κινητήρας πλέον οδηγείται από τον αντιστροφέα, ο ρόλος του οποίου είναι η ρύθμιση των στροφών της μηχανής μεταβάλλοντας τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του στάτη. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη μεταβολή συνεισφέρει στην παράλληλη μετατόπιση της καμπύλης ροπής-ταχύτητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 19.



Σχήμα 19. Ρύθμιση στροφών τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα (Πηγή: <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/EE898/Διαλέξεις/Διάλεξη%2009η.pdf>)

Στη συνέχεια, εφόσον ο επαγωγικός κινητήρας έχει τροφοδοτηθεί με τάση ξεκινά η λειτουργία του, η οποία βασίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Η ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης στους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα απ' το

στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο στάτης έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση του δρομέα, εξαιτίας δυνάμεων στους ρευματοφόρους (πλέον) αγωγούς λόγω της επαγόμενης τάσης. Η έξοδος του κινητήρα, δηλαδή η κίνηση/περιστροφή του δρομέα, λαμβάνεται ως είσοδος στη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που έπεται στη συνδεσμολογία. Ως γνωστόν, για να λειτουργήσει μια τέτοιου είδους γεννήτρια θα πρέπει να υπάρχει ένας κινούμενος αγωγός μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Γι' αυτό το λόγο η DC γεννήτρια συνδέεται στην παρούσα εργασία με έναν ανορθωτή (rectifier), ο οποίος λαμβάνει το ρόλο του κυκλώματος διέγερσης και τροφοδοτεί τη γεννήτρια με συνεχή τάση. Έτσι δημιουργείται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή στα άκρα του αγωγού/δρομέα και πλέον επιτυγχάνεται η τροφοδότηση του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στην έξοδο της γεννήτριας.

Ο έλεγχος του AC κινητήρα, που παρουσιάστηκε παραπάνω, επιτυγχάνεται απομακρυσμένα μέσω του διαδικτύου κυρίως λόγω της δυνατότητας του αντιστροφέα να επικοινωνεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή κι έπειτα με τη χρήση των μικροεπεξεργαστών Arduino και Raspberry Pi.

Ο αντιστροφέας (inverter) περιλαμβάνει ένα πρωτόκολλο σειριακών επικοινωνιών, το λεγόμενο MODBUS, το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο, συγκεκριμένα, ενός κεντρικού υπολογιστή (master) και περιφερειακών συσκευών που οδηγούνται από αυτόν (slaves). Οι όποιοι χειρισμοί επιτρέπουν αλλαγές στις παραμέτρους του αντιστροφέα γίνονται μέσω του πληκτρολογίου που περιλαμβάνει η συσκευή. Το MODBUS, όμως, αποτελεί τη μέθοδο με την οποία πραγματοποιείται η παρακολούθηση και ο προγραμματισμός του αντιστροφέα, η διαβίβαση πληροφοριών, καθώς και η επικοινωνία με διάφορους αισθητήρες και άλλα όργανα. Προκειμένου η οδήγηση του αντιστροφέα να γίνει μέσω αυτού του πρωτοκόλλου και όχι με χειρισμούς απ' το πληκτρολόγιο της συσκευής είναι απαραίτητες οι εξής ρυθμίσεις: 1) η συνάρτηση DRV-03, που σχετίζεται με τη λειτουργία του ελέγχου, να λάβει την τιμή 3 και 2) η συνάρτηση DRV-04, που σχετίζεται με τη λειτουργία της συχνότητας, να λάβει την τιμή 5. Επιπρόσθετα, για να ολοκληρωθεί η διασύνδεση του αντιστροφέα με την εφαρμογή τηλεχειρισμού πρέπει η ένδειξη I/O-50 να ρυθμιστεί λαμβάνοντας την τιμή 7. Είναι σημαντικό να τονιστεί η απαραίτητη χρήση μιας συσκευής μετατροπής RS485. Το RS485 είναι ένας μετατροπέας πρωτοκόλλου σειριακής επικοινωνίας, με τη βοήθεια του οποίου είναι δυνατή η χρήση του πρωτοκόλλου MODBUS που αναφέρθηκε παραπάνω. Μετατρέπει τα επίπεδα των σημάτων εκπομπής και λήψης του ευρέως χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου, και επιτρέπει τη σύνδεση του αντιστροφέα (inverter) με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Έπειτα από την τοποθέτηση του RS485 στην εργαστηριακή διάταξη είναι εφικτή η πρόσβαση σε μια θύρα USB και η επικοινωνία του απομακρυσμένου συστήματος με μια «γλώσσα» κατανοητή από ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τέλος, αναφέρεται και ο ρόλος των μικροεπεξεργαστών Arduino και Raspberry Pi. Το Raspberry Pi, το οποίο ως γνωστόν μπορεί να λειτουργήσει όπως ένας κλασικός υπολογιστής απλά συνδέοντάς το σε μια οθόνη και προσθέτοντας

πληκτρολόγιο και ποντίκι, παίζει το ρόλο του server για το συγκεκριμένο σύστημα. Ενώ στην προγραμματιστική πλατφόρμα Arduino γίνεται η σύνδεση των αισθητήρων της εργαστηριακής εφαρμογής του απομακρυσμένου συστήματος κι έτσι λαμβάνονται οι όποιες μετρήσεις ηλεκτρονικά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι με την τελευταία σύνδεση ανατροφοδοτείται η έξοδος του συστήματος στην είσοδο, έχοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα του επιθυμητού ελέγχου του απομακρυσμένου συστήματος.

5.5 Διεξαγωγή πειράματος

5.5.1 Ανάλυση του λογισμικού (software)-Οδήγηση του αντιστροφέα μέσω διαδικτύου

Ο έλεγχος του επαγωγικού κινητήρα της εργαστηριακής διάταξης πραγματοποιείται απομακρυσμένα μέσω του διαδικτύου. Με βάση τη δυνατότητα του αντιστροφέα να επικοινωνεί με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή έλαβε χώρα η δημιουργία μιας ιστοσελίδας με διεύθυνση www.efc.hopto.org, η οποία παρέχει στο χρήστη τις εξής δυνατότητες όσον αφορά το σύστημα του εργαστηρίου:

- Να εκκινεί και να σταματά τον AC κινητήρα επιλέγοντας τις αντίστοιχες επιλογές start και stop.
- Να μεταβάλλει τη συχνότητα f με την οποία περιστρέφεται ο AC κινητήρας, απλά πληκτρολογώντας τη νέα τιμή της συχνότητας κι έπειτα πατώντας την επιλογή set.
- Να αλλάζει τη φορά περιστροφής του AC κινητήρα επιλέγοντας τις επιλογές forward και reverse.
- Να λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος.

Τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ του αντιστροφέα και ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή και μετέπειτα ο προγραμματισμός της συγκεκριμένης συσκευής ψηφιακού ελέγχου αναφέρονται περιγραφικά παρακάτω.

Αρχικά, αφού πραγματοποιήθηκε η ορθή σύνδεση της γραμμής επικοινωνίας MODBUS-RTU με τους ακροδέκτες του αντιστροφέα (CM), (S+) και (S-) ακολούθησε μια σειρά από ρυθμίσεις βασικών δεδομένων του αντιστροφέα από το πληκτρολόγιό του. Αυτές οι ρυθμίσεις είναι οι εξής:

- I/O-46 (Inv. Number), έλαβε την τιμή 1 καθώς αφορά τον αριθμό των αντιστροφέων που συνδέονται με τον H/Y,
- I/O-47 (Baud rate), αφορά την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και η default τιμή της είναι 3,
- I/O-48 (Lost command), αφορά την λειτουργία απώλειας και η default τιμή της είναι 0,
- I/O-49 (Time out), αφορά το χρόνο λήξης και η default τιμή της είναι 10,

- I/O-50 (Comm. Prot), αφορά τη διασύνδεση του αντιστροφέα με την εφαρμογή τηλεχειρισμού (Remote Drive) και έλαβε την τιμή 7.

Ύστερα οι συναρτήσεις DRV-03, που σχετίζεται με τη λειτουργία ελέγχου, και DRV-04, που σχετίζεται με τη λειτουργία συχνότητας, έλαβαν τις τιμές 3 και 5, αντίστοιχα.

Εφόσον η σύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με τον αντιστροφέα εξετάστηκε ώστε να εξακριβωθεί η ορθότητά της και δεν παραλήφθηκε καμία από τις παραπάνω ρυθμίσεις, ο αντιστροφέας τέθηκε σε λειτουργία και το πρόγραμμα οδήγησής του ξεκίνησε. Αναφέρεται ότι η συγκεκριμένη δομή επικοινωνίας μεταξύ του ηλεκτρονικού υπολογιστή και του αντιστροφέα είναι της μορφής master-slave, καθώς ο ηλεκτρονικός υπολογιστής παίζει το ρόλο του master που οδηγεί τον αντιστροφέα.

Τέλος, με βάση τη λίστα των κωδικών παραμέτρων του αντιστροφέα που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη, η οποία ελήφθη από το εγχειρίδιο της συσκευής κατασκευάστηκε ένα πρόγραμμα το οποίο επεμβαίνει στις λειτουργίες αυτού. Κατ' επέκταση έλαβε χώρα και η ιστοσελίδα www.efc.hopto.org από την οποία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εκκινήσει ή να σταματήσει τον επαγωγικό κινητήρα, να τον περιστρέφει δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα και να μεταβάλλει τη συχνότητα λειτουργίας του μέσω του διαδικτύου.

5.5.2 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας- Παρουσίαση μετρήσεων με βάση τη μεταβολή συχνότητας και φορτίου

Ο σκοπός διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας αφορά την εξαγωγή και μελέτη των χαρακτηριστικών καμπυλών ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα της εργαστηριακής διάταξης. Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός έλαβαν χώρα μια σειρά από μετρήσεις στον χώρο του εργαστηρίου θέτοντας τον επαγωγικό κινητήρα σε λειτουργία κάτω από διαφορετικές συνθήκες, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι προτού ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία τοποθετήθηκαν τα όργανα μέτρησης (βολτόμετρα και αμπερόμετρα) στις σωστές θέσεις και εξακριβώθηκε η ορθότητα της συνδεσμολογίας της εργαστηριακής διάταξης. Επίσης, πραγματοποιήθηκε εκτενής έλεγχος στο χώρο εργασίας, ούτως ώστε να πληρούνται όλοι οι κανόνες ασφαλείας προς αποφυγή ατυχημάτων.

Περιγραφικά στο εργαστήριο ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Αρχικά, η εργαστηριακή διάταξη τέθηκε σε ισχύ ανεβάζοντας όλους τους απαραίτητους διακόπτες. Έπειτα, μέσω του διαδικτύου από την ιστοσελίδα www.efc.hopto.org, πατώντας την επιλογή start, ο επαγωγικός κινητήρας ξεκίνησε την περιστροφή του εν κενώ, δηλαδή μη έχοντας συνδεδεμένο κάποιο φορτίο στους ακροδέκτες του. Σημειώνεται ότι η συχνότητα περιστροφής του επαγωγικού κινητήρα στην αρχική φάση είναι $f=35.87\text{Hz}$ και στη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που έπεται του επαγωγικού κινητήρα δεν εφαρμόζεται καμία διέγερση ($V_f=0\text{V}$ και $I_f=0\text{A}$). Στην παρούσα κατάσταση οι στροφές του κινητήρα ανέρχονται στις $n=1070\text{rpm}$. Εν

συνεχία, πραγματοποιείται η σύνδεση ωμικού φορτίου 135Ω στην έξοδο της διάταξης και το κύκλωμα διέγερσης της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος τροφοδοτείται με τάση $V_f=44.5V$ και ρεύμα $I_f=0.04A$. Καθώς ο κινητήρας δεν σταματά να περιστρέφεται και μειώνοντας σταδιακά το φορτίο γίνεται η λήψη και καταγραφή των μετρήσεων όλων των μεγεθών από τα όργανα μέτρησης. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης σειράς μετρήσεων στη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας, χωρίς να μεταβληθεί η συχνότητα περιστροφής, ακολουθεί μια αλλαγή στη διέγερση της DC γεννήτριας. Απλά αυξάνοντας τη διέγερσή της στα $V_f=100V$ και $I_f=0.13A$ γίνεται η λήψη της δεύτερης σειράς μετρήσεων, ξεκινώντας και σε αυτή την περίπτωση με το πλήρες φορτίο των 135Ω στην έξοδο της διάταξης και μειώνοντάς το με σταδιακό τρόπο. Οι επόμενες μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε η τρίτη σειρά μετρήσεων με την αύξηση της διέγερσης στα $V_f=150V$ και $I_f=0.2A$. Η παρουσίαση των μετρήσεων αυτών γίνεται στον πίνακα 3.

Θα ήταν παράληψη να μην τονιστεί ότι η ωμική αντίσταση που χρησιμοποιήθηκε ως φορτίο στο παρόν πείραμα είναι 135Ω με μέγιστο ρεύμα αντοχής $2A$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα δίνοντας μεγαλύτερη διέγερση στο σύστημα το ρεύμα εξόδου του να αυξάνεται με πιο γρήγορο ρυθμό, και κατ' επέκταση το ρεύμα που διέρχεται από το φορτίο να λαμβάνει σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο για αυξημένη διέγερση έγινε λήψη μικρότερου αριθμού μετρήσεων.

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης ομάδας μετρήσεων, η οποία αφορά τη συχνότητα περιστροφής $f=35.87Hz$, η συχνότητα f μεταβλήθηκε μέσω του διαδικτύου από την ιστοσελίδα που προαναφέρθηκε, κι έλαβε την τιμή $f=50Hz$. Η τιμή αυτή, ως γνωστόν, αποτελεί και τη συχνότητα παροχής της ΔΕΗ. Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω έγινε η λήψη και καταγραφή των αντίστοιχων μετρήσεων. Στην εν κενώ λειτουργία οι στροφές περιστροφής ανέρχονται στις $n=1494rpm$. Τροφοδοτώντας τη DC γεννήτρια πρώτα με $V_f=50.5V$ $I_f=0.08A$ ελήφθησαν οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 4. Έπειτα αυξάνοντας τη διέγερση στα $V_f=100V$ και $I_f=0.13A$ ελήφθησαν οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 5. Και τέλος, έχοντας διεγείρει τη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος στα $V_f=150V$ και $I_f=0.2A$ έγινε η λήψη των μετρήσεων που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.

Το τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας αφορά τη μεταβολή της συχνότητας στην τιμή $f=65Hz$. Με όμοιο τρόπο, έγινε αρχικά η μέτρηση των στροφών του κινητήρα στην εν κενώ λειτουργία, οι οποίες ανέρχονται στις $n=1941rpm$. Σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιήθηκαν δυο διεγέρσεις της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος. Η πρώτη στα $V_f=50.3V$ και $I_f=0.09A$ με τις μετρήσεις να παρουσιάζονται στον πίνακα 7, και η δεύτερη στα $V_f=100V$ και $I_f=0.13A$ με τις μετρήσεις να παρουσιάζονται στον τελευταίο πίνακα 8.

Οι πίνακες 1, 2 και 3 που εμφανίζονται παρακάτω αναφέρονται στη συχνότητα περιστροφής $f=35.87\text{Hz}$. Κατά την εν κενώ λειτουργία οι στροφές του επαγωγικού κινητήρα ανέρχονται στις $n_0=1070\text{rpm}$, ενώ η σύγχρονη ταχύτητα σε αυτή την περίπτωση είναι $n_s=1076\text{rpm}$.

Πίνακας 1. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=44.5\text{V}$ & $I_f=0.04\text{A}$

n (rpm)	Va (V)	Ia (A)	Load (Ω)	ω (rad/s)	Pout (W)	T (Nm)
1063	66.3	0.5	135	111.317	33.15	0.2978
1062	65.3	0.6	108.833	111.212	39.18	0.3523
1063	64.3	0.7	91.8571	111.317	45.01	0.40434
1058	63	0.8	78.75	110.793	50.4	0.4549
1058	61.6	0.9	68.4444	110.793	55.44	0.50039
1056	60.5	1	60.5	110.584	60.5	0.5471
1055	59.2	1.1	53.8182	110.479	65.12	0.58943
1053	57.7	1.2	48.0833	110.27	69.24	0.62791

Πίνακας 2. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=100\text{V}$ & $I_f=0.13\text{A}$

n (rpm)	Va (V)	Ia (A)	Load (Ω)	ω (rad/s)	Pout (W)	T (Nm)
1045	120.7	0.93	135	109.432	112.251	1.02576
1042	119.3	1	119.3	109.118	119.3	1.09331
1041	116.4	1.1	105.818	109.013	128.04	1.17454
1036	114	1.2	95	108.49	136.8	1.26095

Πίνακας 3. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=150\text{V}$ & $I_f=0.2\text{A}$

n (rpm)	Va (V)	Ia (A)	Load (Ω)	ω (rad/s)	Pout (W)	T (Nm)
1030	142.2	1.1	135	107.861	156.42	1.4502
1027	139.7	1.2	116.417	107.547	167.64	1.55876

Οι πίνακες 4, 5 και 6 που εμφανίζονται παρακάτω αναφέρονται στη συχνότητα περιστροφής $f=50\text{Hz}$. Κατά την εν κενώ λειτουργία οι στροφές του επαγωγικού κινητήρα ανέρχονται στις $n_0=1494\text{rpm}$, ενώ η σύγχρονη ταχύτητα σε αυτή την περίπτωση είναι $n_s=1500\text{rpm}$.

Πίνακας 4. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=50.5\text{V}$ & $I_f=0.08\text{A}$

n (rpm)	Va (V)	Ia (A)	Load (Ω)	ω (rad/s)	Pout (W)	T (Nm)
1481	98.8	0.76	135	155.0898	75.088	0.484158
1480	98.4	0.8	123	154.9851	78.72	0.50792
1480	97.5	0.9	108.3333	154.9851	87.75	0.566183
1476	96.1	1	96.1	154.5662	96.1	0.62174
1476	94.8	1.1	86.18182	154.5662	104.28	0.674662
1473	93.5	1.2	77.91667	154.2521	112.2	0.727381

Πίνακας 5. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=100V$ & $I_f=0.13A$

n (rpm)	V _a (V)	I _a (A)	Load (Ω)	ω (rad/s)	P _{out} (W)	T (Nm)
1458	163.5	1.3	135	152.6813	212.55	1.392116
1453	161.4	1.4	115.2857	152.1577	225.96	1.485038
1450	159	1.5	106	151.8435	238.5	1.570696
1446	157.7	1.6	98.5625	151.4246	252.32	1.666307

Πίνακας 6. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=150V$ & $I_f=0.2A$

n (rpm)	V _a (V)	I _a (A)	Load (Ω)	ω (rad/s)	P _{out} (W)	T (Nm)
1435	197	1.55	135	150.2727	305.35	2.031972
1430	193.7	1.7	113.9412	149.7491	329.29	2.198972

Οι πίνακες 7 και 8 που εμφανίζονται παρακάτω αναφέρονται στη συχνότητα περιστροφής $f=65Hz$. Κατά την εν κενώ λειτουργία οι στροφές του επαγωγικού κινητήρα ανέρχονται στις $n_0=1941rpm$, ενώ η σύγχρονη ταχύτητα σε αυτή την περίπτωση είναι $n_s=1950rpm$.

Πίνακας 7. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=50.3V$ & $I_f=0.09A$

n (rpm)	V _a (V)	I _a (A)	Load (Ω)	ω (rad/s)	P _{out} (W)	T (Nm)
1914	128.7	1	135	200.4334	128.7	0.642108
1906	126	1.2	105	199.5957	151.2	0.757531
1900	123	1.4	87.85714	198.9674	172.2	0.865469
1898	121.1	1.5	80.73333	198.7579	181.65	0.913926
1895	120	1.6	75	198.4438	192	0.967528
1889	116.4	1.8	64.66667	197.8155	209.52	1.059169

Πίνακας 8. Διέγερση DC γεννήτριας: $V_f=100V$ & $I_f=0.13A$

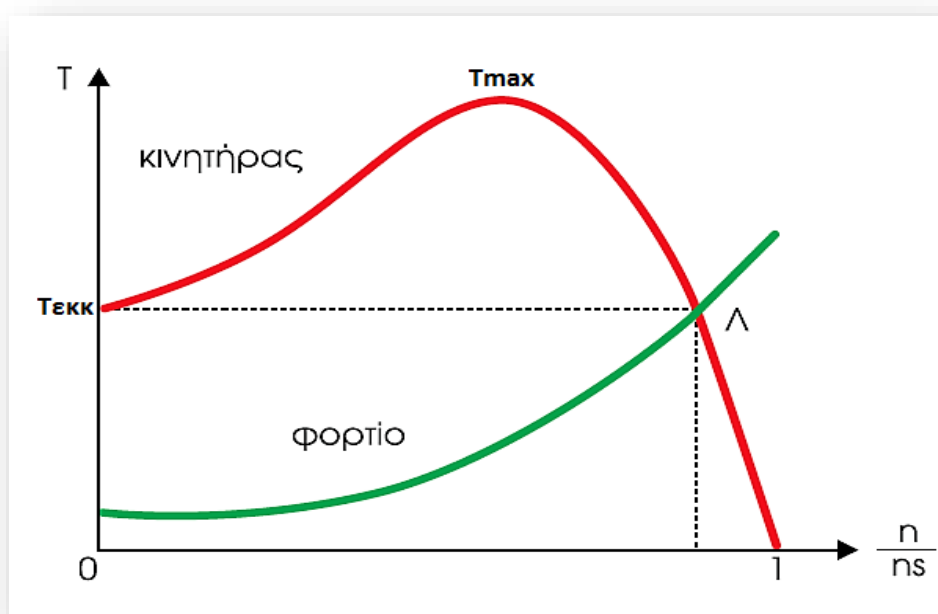
n (rpm)	V _a (V)	I _a (A)	Load (Ω)	ω (rad/s)	P _{out} (W)	T (Nm)
1855	205.9	1.6	128.6875	194.255	329.44	1.695915
1851	204	1.7	120	193.8361	346.8	1.78914
1846	201.4	1.8	111.8889	193.3125	362.52	1.875305
1840	198.8	1.9	104.6316	192.6842	377.72	1.960306

5.5.3 Παρουσίαση των χαρακτηριστικών καμπυλών ροπής-ταχύτητας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας του κινητήρα επαγωγής, η εξαγωγή των οποίων βασίζεται στις μετρήσεις

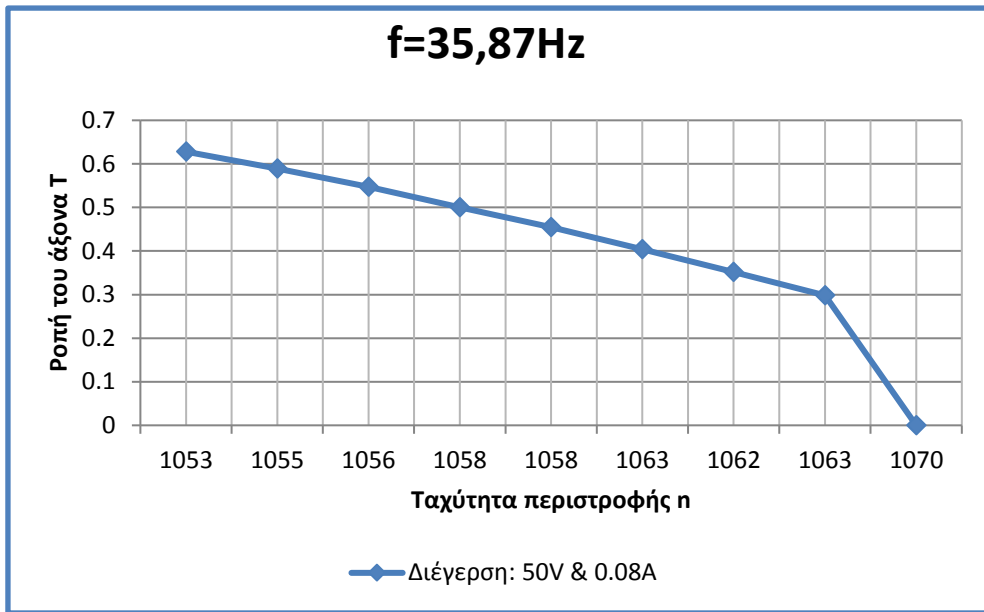
που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας και παρουσιάστηκαν αναλυτικά παραπάνω.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η πλήρης χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής φαίνεται στο σχήμα 20. Όταν ο κινητήρας ξεκινά να περιστρέφεται οι στρόφες του είναι πρακτικά μηδενικές και η ροπή του λαμβάνει την τιμή $T_{εκκ}$ (ροπή εκκίνησης). Στη συνέχεια καθώς αυξάνονται οι στρόφες, αυξάνεται και η ροπή μέχρι την τιμή T_{max} (μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής). Η λειτουργία του κινητήρα στο τμήμα της καμπύλης πριν τη μέγιστη ροπή είναι ασταθής. Ο κινητήρας εργάζεται στην ευσταθή λειτουργία (μετά τη μέγιστη ροπή) για να μπορεί να προσαρμόζεται αυτόματα στις διακυμάνσεις του φορτίου. Έτσι, είναι ικανός να περιστρέψει οποιοδήποτε φορτίο μόνο στη συγκεκριμένη περιοχή. Όταν το φορτίο αυξηθεί παρατηρείται η μείωση της ταχύτητας περιστροφής και κατόπιν η αύξηση της ροπής. Η ροπή μειώνεται και μηδενίζεται όταν η ταχύτητα λάβει τη σύγχρονη τιμή της. Γι' αυτό το λόγο, επομένως, σε όλες τις χαρακτηριστικές καμπύλες που παρουσιάζονται παρακάτω φαίνεται μόνο η περιοχή ευσταθούς λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα.

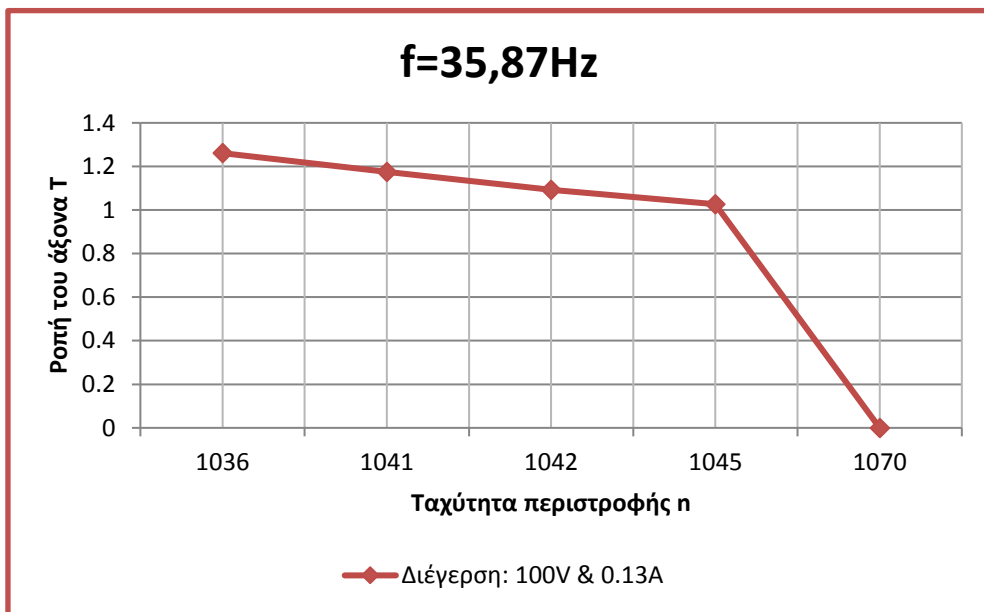


Σχήμα 20. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (κόκκινη γραμμή) και του φορτίου (πράσινη γραμμή) (Πηγή: http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf)

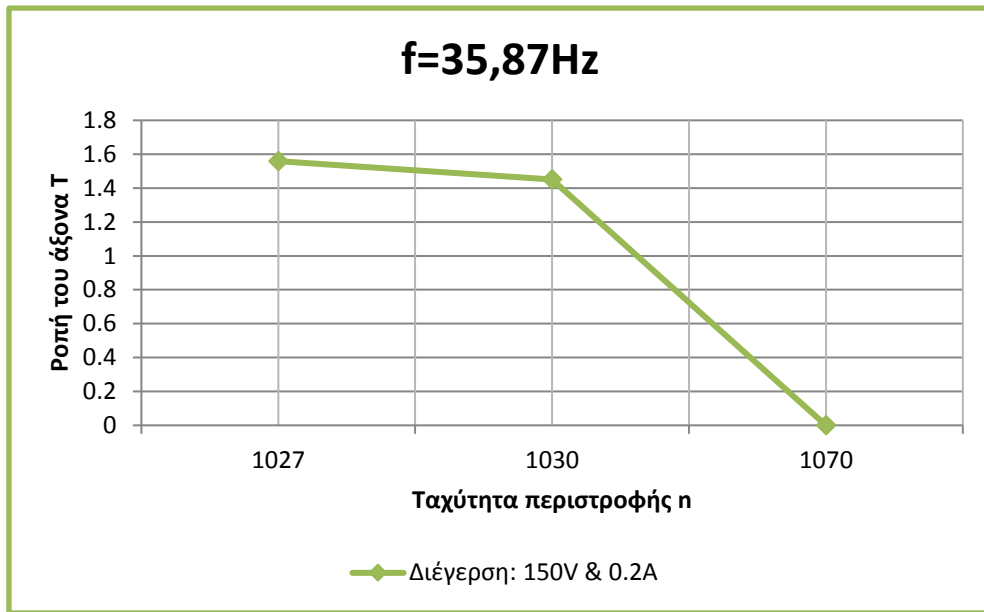
Με βάση τους πίνακες 1, 2 και 3, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτουν οι ακόλουθες χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας του κινητήρα επαγωγής. Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα λειτουργίας είναι $f=35.87\text{Hz}$ και η διέγερση της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος μεταβάλλεται σταδιακά από 50V έως 150V.



Γραφική παράσταση 1. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=35.87\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 50V & 0.08A

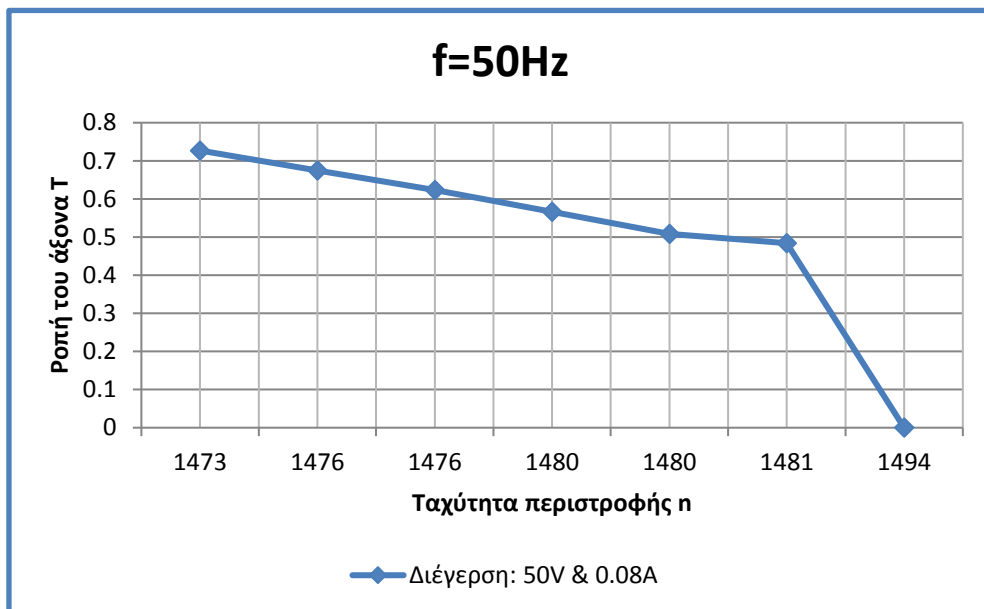


Γραφική παράσταση 2. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=35.87\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 100V & 0.13A

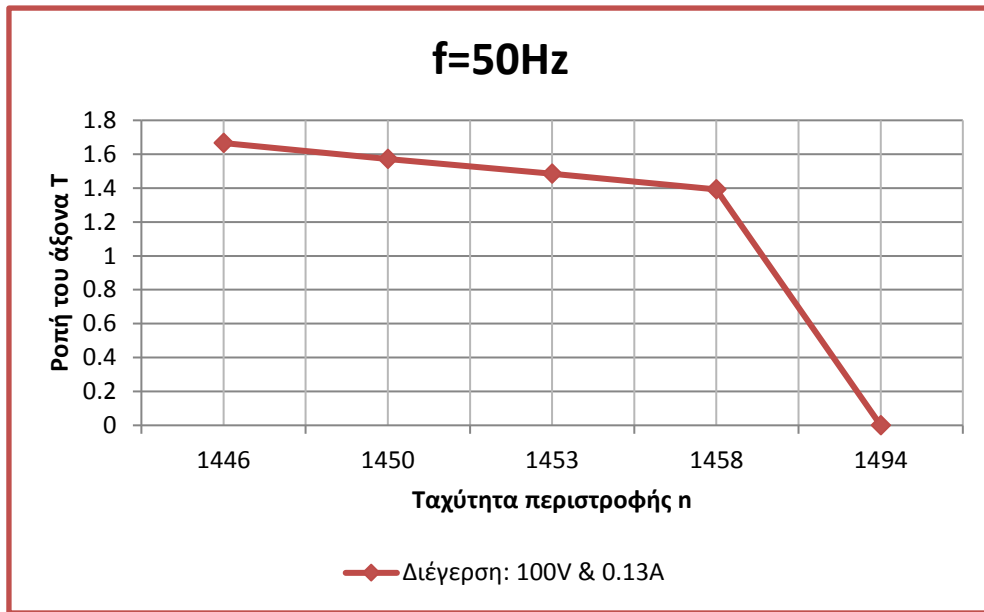


Γραφική παράσταση 3. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=35.87\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 150V & 0.2A

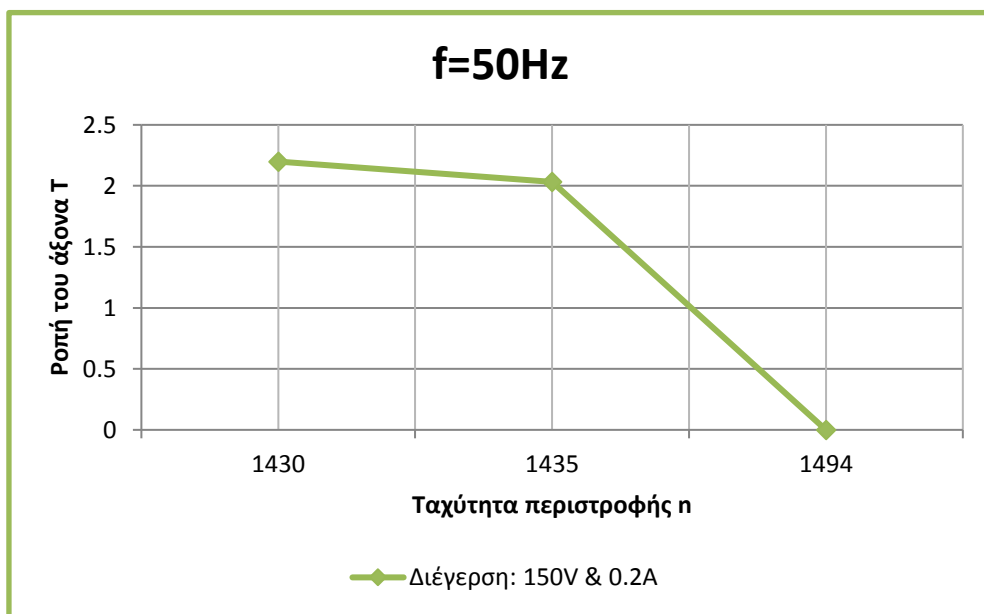
Με βάση τους πίνακες 4, 5 και 6, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτουν οι ακόλουθες χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας του κινητήρα επαγωγής. Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα λειτουργίας είναι $f=50\text{Hz}$ και η διέγερση της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος μεταβάλλεται σταδιακά από 50V έως 150V.



Γραφική παράσταση 4. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 50V & 0.08A

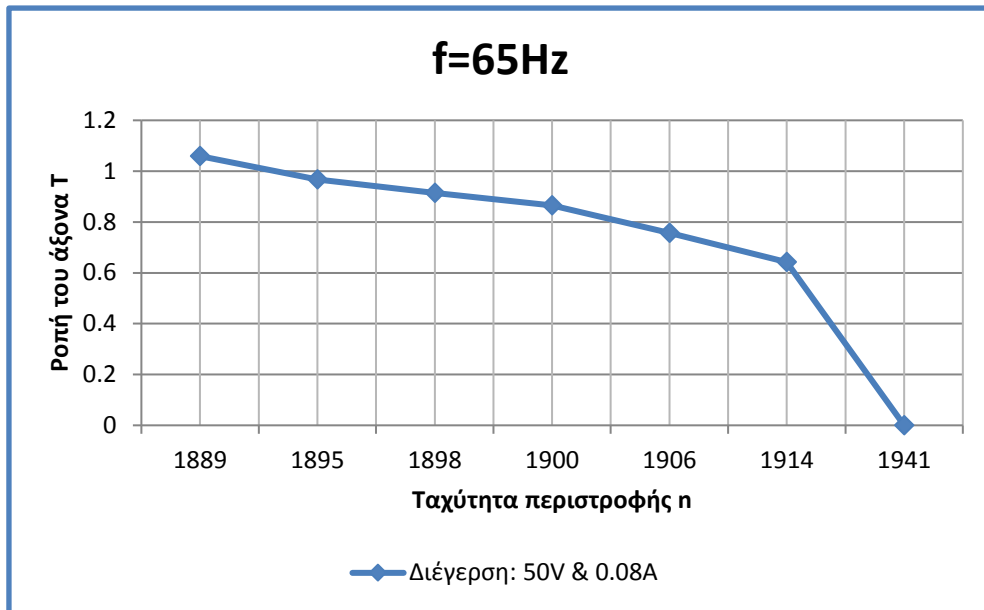


Γραφική παράσταση 5. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 100V & 0.13A

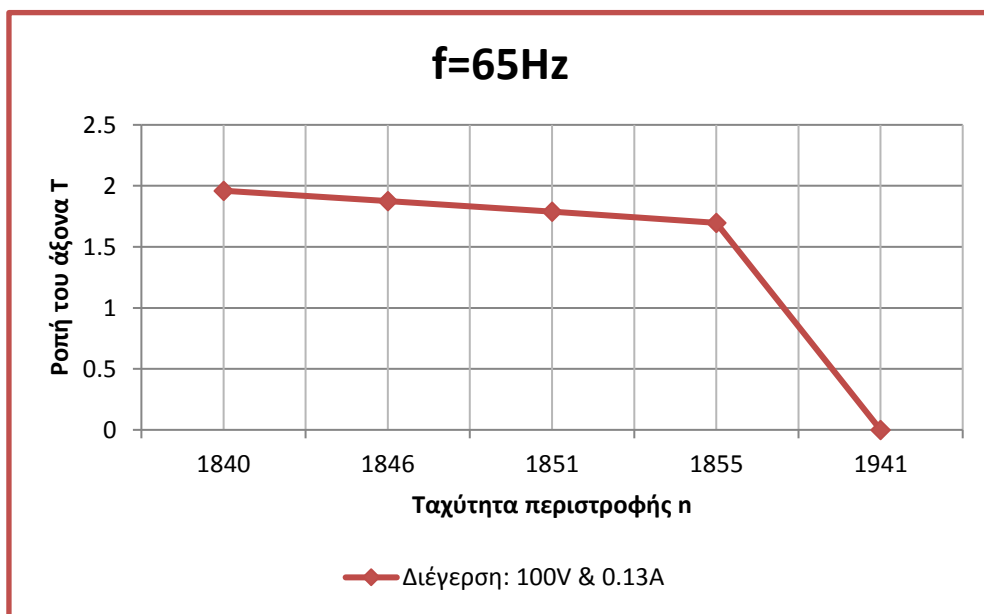


Γραφική παράσταση 6. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 150V & 0.2A

Με βάση τους πίνακες 7 και 8, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτουν οι ακόλουθες χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-ταχύτητας του κινητήρα επαγωγής. Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα λειτουργίας είναι $f=65\text{Hz}$ και η διέγερση της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος λαμβάνει τις τιμές 50V και 100V αντίστοιχα.



Γραφική παράσταση 7. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=65\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 50V & 0.08A

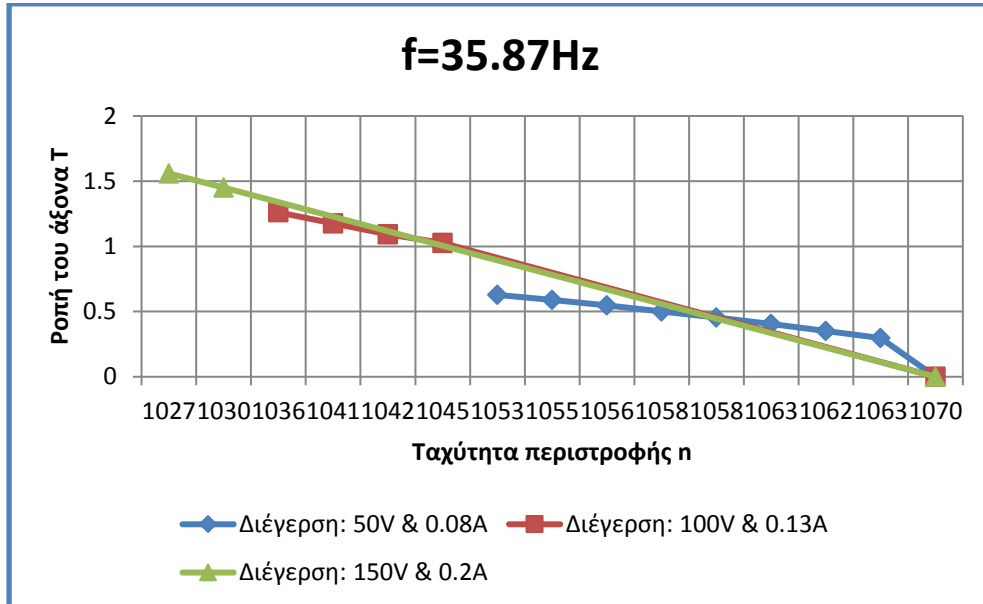


Γραφική παράσταση 8. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με συχνότητα λειτουργίας $f=65\text{Hz}$ και διέγερση της DC γεννήτριας 100V & 0.13A

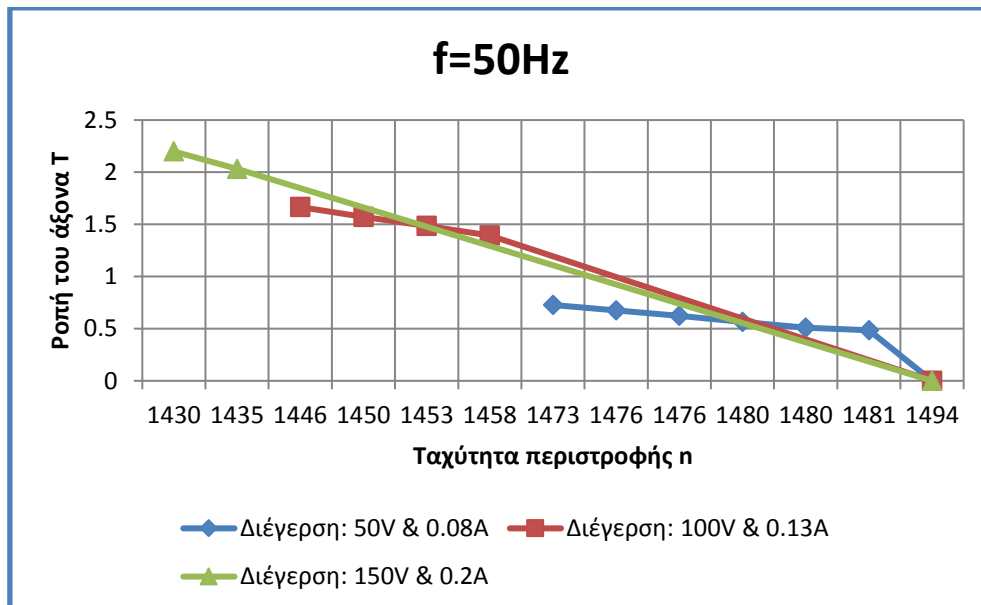
Εν συνεχεία, παρουσιάζεται γραφικά η σύγκριση των παραπάνω χαρακτηριστικών καμπυλών ροπής-ταχύτητας σε δυο μέρη:

1. έχοντας σταθερή τη συχνότητα λειτουργίας του AC κινητήρα και μεταβάλλοντας μόνο τη διέγερση της DC γεννήτριας
2. έχοντας σταθερή τη διέγερση της DC γεννήτριας και μεταβάλλοντας μόνο τη συχνότητα λειτουργίας του AC κινητήρα.

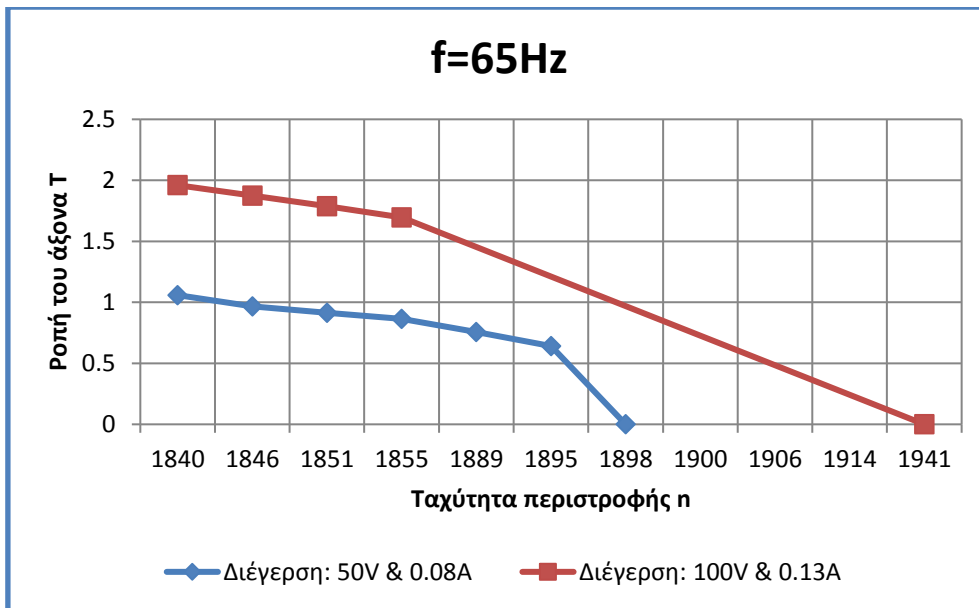
Στο πρώτο μέρος οι γραφικές παραστάσεις 9, 10 και 11 αναφέρονται στην περίπτωση όπου η συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα επαγωγής παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται η διέγερση που δίνεται στη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Παρατηρείται ότι η κλίση των καμπυλών που αφορά τις διεγέρσεις των 100V και 150V είναι απότομη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πραγματοποιήθηκε λήψη μικρού αριθμού μετρήσεων στις συγκεκριμένες καταστάσεις.



Γραφική παράσταση 9. Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή συχνότητα λειτουργίας $f=35.87\text{Hz}$ και μεταβλητή διέγερση της DC γεννήτριας από 50V έως 150V

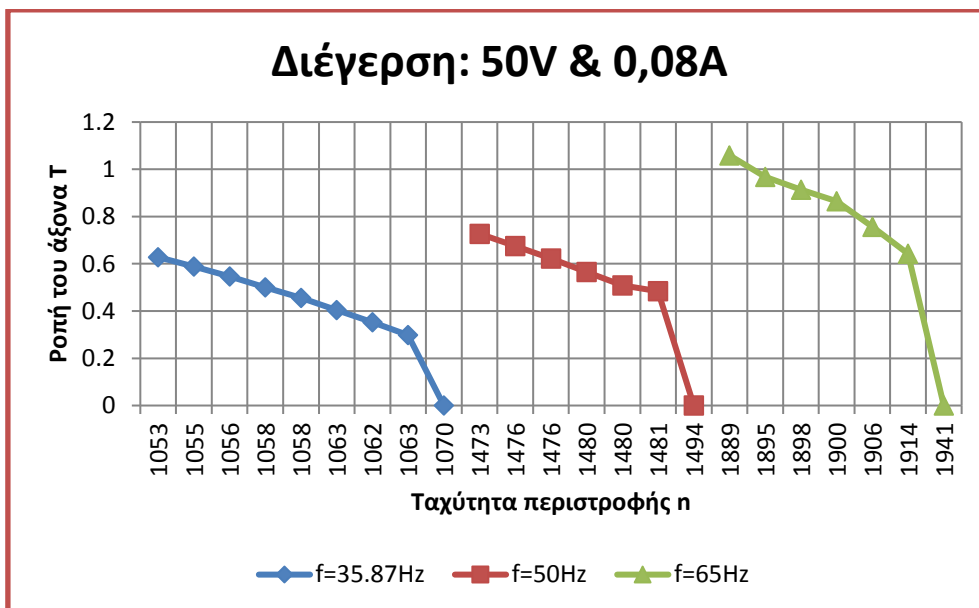


Γραφική παράσταση 10. Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ και μεταβλητή διέγερση της DC γεννήτριας από 50V έως 150V

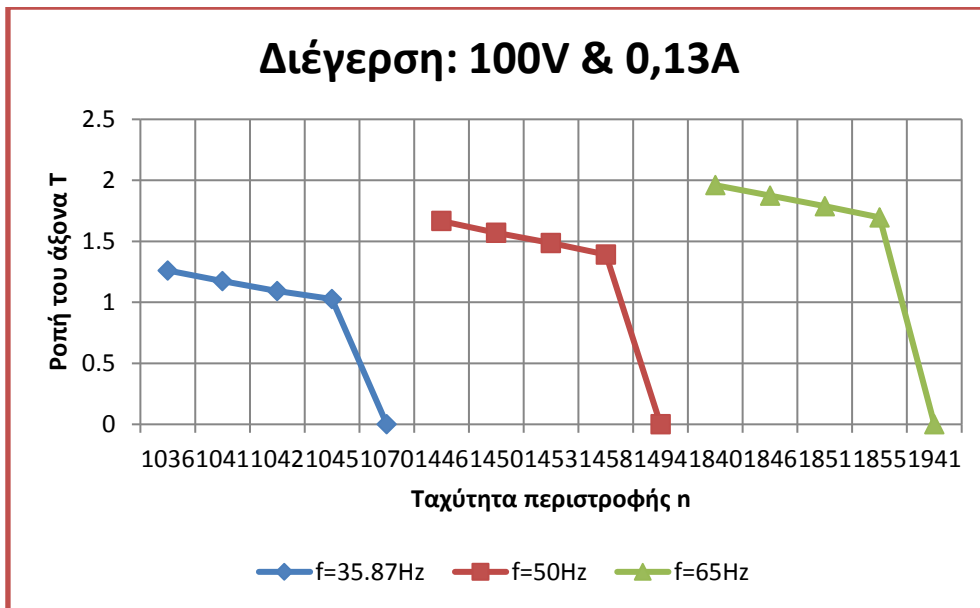


Γραφική παράσταση 11. Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή συχνότητα λειτουργίας $f=65\text{Hz}$ και μεταβλητή διέγερση της DC γεννήτριας από 50V έως 100V

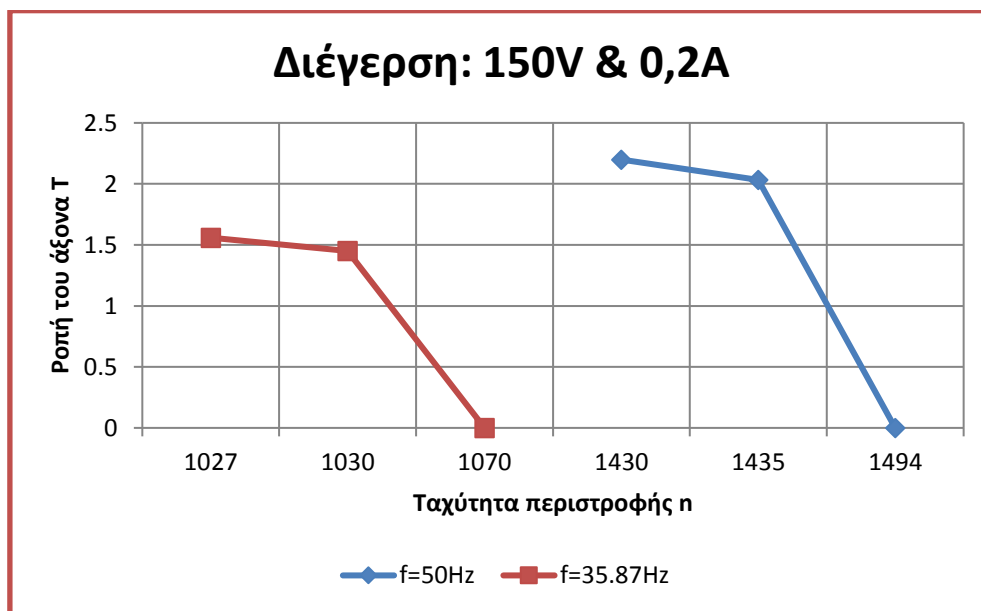
Στο δεύτερο μέρος οι γραφικές παραστάσεις 12, 13 και 14 αναφέρονται στην περίπτωση όπου η διέγερση που δίνεται στη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος.



Γραφική παράσταση 12. Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή διέγερση της DC γεννήτριας στα 50V & 0.08A και μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας από 35.87Hz έως 65Hz



Γραφική παράσταση 13. Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή διέγερση της DC γεννήτριας στα 100V & 0.13A και μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας από 35.87Hz έως 65Hz



Γραφική παράσταση 14. Συγκριτική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας AC κινητήρα με σταθερή διέγερση της DC γεννήτριας στα 150V & 0.2A και μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας από 35.87Hz έως 50Hz

Κεφάλαιο 6

Σύνοψη

6.1 Συμπεράσματα-Συγκέντρωση αποτελεσμάτων

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε έπειτα από την εξαγωγή των χαρακτηριστικών καμπυλών της ροπής με την ταχύτητα ενός κινητήρα επαγωγής. Στο πρώτο μέρος της εργασίας εκπονείται μια συνοπτική παρουσίαση του απομακρυσμένου ελέγχου του συγκεκριμένου κινητήρα μέσω του διαδικτύου. Αφετηρία, λοιπόν, της πειραματικής διαδικασίας αποτελεί η διαδικτυακή οδήγηση του κινητήρα με τη βοήθεια μικροεπεξεργαστών, όπως είναι το Arduino και το Raspberry Pi (RPI), απλά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας. Κατόπιν, μέσω της ιστοσελίδας www.efc.hopto.org, που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες του Εργαστηρίου Συστημάτων Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, έγινε δυνατή η εκκίνηση/ακινητοποίηση (start/stop) της ηλεκτρικής μηχανής, η μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας f του συστήματος και ο γενικότερος έλεγχος της εργαστηριακής διάταξης. Έπειτα από πλήθος κατάλληλων χειρισμών έλαβε χώρα μια σειρά από απαραίτητες μετρήσεις τάσης και ρεύματος στην είσοδο και την έξοδο του συστήματος ώστε μέσω κατάλληλων υπολογισμών επετεύχθη ο τελικός στόχος της διπλωματικής εργασίας, που είναι άλλος απ' την χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών ροπής-ταχύτητας.

Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων ξεκίνησε με την εν κενώ λειτουργία του κινητήρα επαγωγής σε τρεις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας: $f=35.87\text{Hz}$, $f=50\text{Hz}$ και $f=65\text{Hz}$. Έπειτα ο διαχωρισμός που ακολούθησε αφορά τη μεταβολή του φορτίου (ωμικό φορτίο μέγιστης αντίστασης 135Ω με ρεύμα ανοχής 2A) και τη μεταβολή της συχνότητας υπό σταδιακή μεταβολή του κυκλώματος διέγερσης.

Από την οικογένεια των μετρήσεων που αναλυτικά παρουσιάστηκαν στους πίνακες 1 έως 8 του προηγούμενου κεφαλαίου, τα βασικότερα συμπεράσματα/αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

Κατά την εν κενώ λειτουργία του κινητήρα επαγωγής (μηδενικό φορτίο στους ακροδέκτες του και έλλειψη κυκλώματος διέγερσης) πραγματοποιήθηκε η λήψη των ονομαστικών στροφών της μηχανής, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

$f(\text{Hz})$	$n_N(\text{rpm})$	$n_S(\text{rpm})$	$s(\%)$
35.87	1070	1076.1	0.56
50	1494	1500	0.4
65	1941	1950	0.46

Πίνακας 9. Η ονομαστική ταχύτητα, η σύγχρονη ταχύτητα και η ολίσθηση του κινητήρα επαγωγής για τις διάφορες τιμές της συχνότητας λειτουργίας

Παρατηρείται ότι όταν η συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα επαγωγής μεταβληθεί, ο ρυθμός περιστροφής των μαγνητικών του πεδίων n_s μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας. Επίσης, μεταβάλλεται και το σημείο λειτουργίας χωρίς φορτίο στην χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας.

Εν συνεχεία, συνδέοντας στους ακροδέκτες του κινητήρα επαγωγής το μέγιστο φορτίο της συγκεκριμένης εργαστηριακής διαδικασίας, οι στροφές ανά λεπτό του δρομέα είναι μέγιστες. Όσο το φορτίο ελαττώνεται σταδιακά οι στροφές μειώνονται, η τάση στους ακροδέκτες εξόδου λαμβάνει μικρότερες τιμές, το αντίστοιχο ρεύμα και το μέγεθος της ροπής αυξάνονται.

Ο έλεγχος της εξόδου πέρα από τη ρύθμιση των στροφών πραγματοποιείται και με τη βοήθεια του κυκλώματος διέγερσης που είναι συνδεδεμένο στη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης προκαλείται μεταβολή κατά ανάλογο τρόπο της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της μηχανής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της τάσης εξόδου. Όπως παρατηρείται και από τις γραφικές παραστάσεις 9, 10 και 11 η αύξηση της διέγερσης μετατοπίζει τη χαρακτηριστική καμπύλη προς τα δεξιά, ενώ διατηρώντας τη σε χαμηλά επίπεδα την κρατά στο αριστερότερο μέρος που αντιστοιχεί σε μικρότερες ταχύτητες περιστροφής.

Από μια άλλη οπτική, για δεδομένο φορτίο συνδεδεμένο στην έξοδο της εργαστηριακής διάταξης ο κινητήρας περιστρέφεται με μικρή ταχύτητα όταν στην είσοδό του η ηλεκτρική συχνότητα ρυθμίζεται χαμηλά στα 35.87Hz. Αντίθετα στην περίπτωση που αυτή αυξάνεται στα 65Hz ο κινητήρας περιστρέφει το ίδιο φορτίο με εμφανώς περισσότερες στροφές ανά λεπτό. Κατά ανάλογο τρόπο συμπεριφέρεται και το μέγεθος της ροπής, το οποίο λαμβάνει μικρότερη τιμή στη χαμηλή συχνότητα, ενώ σχεδόν διπλασιάζει την τιμή της στην υψηλή συχνότητα υπό σταθερό φορτίο.

Το συμπέρασμα/πλεονέκτημα είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα το ίδιο φορτίο να οδηγηθεί από τον ασύγχρονο κινητήρα με διάφορους τρόπους, δηλαδή με μικρό αριθμό στροφών ανά λεπτό ή με μεγαλύτερο, και κατ' επέκταση με μειωμένη ή αυξημένη ροπή στον δρομέα της μηχανής. Με αυτό τον τρόπο η ηλεκτρική μηχανή είναι εφικτό να προσαρμοστεί κάθε φορά στις όποιες απαιτήσεις του φορτίου που συνδέεται στους ακροδέκτες της. Με τη μεταβολή μόνο της συχνότητας λειτουργίας, διατηρώντας σταθερή την τάση τροφοδοσίας στον ασύγχρονο κινητήρα, εκτός από την αλλαγή των στροφών παρατηρείται αλλαγή στο ρεύμα και τη ροπή του. Οι αλλαγές μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στην κινητήρια μηχανή. Προκειμένου να επιτευχθεί αντιστάθμιση του αποτελέσματος της μεταβολής συχνότητας πραγματοποιείται ταυτόχρονα αλλαγή και της τάσης τροφοδοσίας, ώστε να μην αυξάνεται το ρεύμα και να μην οδηγείται το μαγνητικό πεδίο της μηχανής στον κόρο. Έτσι, ο λόγος $\frac{V}{f}$ παραμένει σχεδόν αμετάβλητος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την οικονομική και αποδοτική λειτουργία του κινητήρα. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη

τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες όπου δεν απαιτούνται συχνές μεταβολές στις στροφές του δρομέα.

Η τροφοδότηση του κινητήρα επαγωγής με τάση μεταβλητής συχνότητας που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του σύγχρονου αριθμού στροφών του προκαλεί την μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής-ταχύτητας του κινητήρα προς τα αριστερά, όσο η συχνότητα μειώνεται, και προς τα δεξιά, όσο η συχνότητα αυξάνεται. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι εμφανής βλέποντας τις γραφικές παραστάσεις 12, 13 και 14. Με αυτό τον τρόπο το σύστημα κινητήρας-φορτίο ισορροπεί κάθε φορά σε διαφορετικό σημείο, με αποτέλεσμα την ελέγξιμη μεταβολή των στροφών του.

Επιπρόσθετα, είναι αξιοσημείωτο ότι το ρεύμα του κινητήρα είναι αυξημένο στη χαμηλή συχνότητα σε σύγκριση με την υψηλή, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

f(Hz)	$V_1(V)$	$I_1(A)$
35.87	270	0.9
50	351	0.8
65	350	0.3

Πίνακας 10. Η τάση τροφοδοσίας και το ρεύμα στο στάτη του κινητήρα επαγωγής για τις διάφορες τιμές της συχνότητας λειτουργίας

Αυτό οφείλεται στην μεταβολή της μαγνητικής ροής. Συγκεκριμένα, η μαγνητική ροή στον πυρήνα ενός κινητήρα επαγωγής αυξάνεται όταν, υπό σταθερή τάση, η ηλεκτρική συχνότητα που εφαρμόζεται λαμβάνει χαμηλές τιμές. Εξαιτίας της εν λόγω αύξησης της μαγνητικής ροής προκαλείται κορεσμός της ροής διακένου και οι παράμετροι του κινητήρα δεν συνυπολογίζονται στον καθορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής-ταχύτητας. Έτσι, σε χαμηλές συχνότητες η αντίδραση του κινητήρα μειώνεται και το ρεύμα του ακολουθεί απότομη ανοδική πορεία.

6.2 Επέκταση-Μελλοντικές εξελίξεις

Παρατηρώντας την ορθή λειτουργία του κινητήρα επαγωγής μέσω της συγκεκριμένης πλατφόρμας και δεδομένου της ευρείας χρήσης των ασύγχρονων κινητήρων είναι απαραίτητο να τονιστεί η σημαντικότητα του απομακρυσμένου ελέγχου των ηλεκτρικών μηχανών με τη χρήση μια απλής ιστοσελίδας.

Στις μέρες μας η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς. Αυτό το γεγονός έχει ως απόρροια την εξοικείωση του ανθρώπου με κάθε τεχνολογικό μέσο και την καθημερινή ενασχόλησή του με το διαδίκτυο. Επομένως, το περιβάλλον μιας ιστοσελίδας, όπως η www.efc.hopto.org, είναι οικείο και εύχρηστο ως προς οποιονδήποτε χρήστη ο οποίος έχει την ανάγκη να ελέγξει ένα ορισμένο σύστημα επιλέγοντας τις σαφώς καθορισμένες επιλογές που υπάρχουν στην ιστοσελίδα.

Η λειτουργία ενός κινητήρα επαγωγής μέσω μια ιστοσελίδας στο διαδίκτυο έχει ως πλεονέκτημα τη δυνατότητα απουσίας του χρήστη από τον τόπο όπου

βρίσκεται η εν λόγω μηχανή. Με τις κατάλληλα προκαθορισμένες ρυθμίσεις ο κινητήρας επαγωγής μπορεί να ενεργοποιηθεί ή να απενεργοποιηθεί και να αλλάξει συνθήκες λειτουργίας αυτόματα. Η δυνατότητα αυτή συνεισφέρει και στην ασφαλή λειτουργία του συστήματος με τον ανάλογο προγραμματισμό. Επιπρόσθετα, ένα κομμάτι της πλατφόρμας με ιδιαίτερη σημασία είναι ο γονικός έλεγχος, ο έλεγχος δηλαδή του ιστορικού λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής. Έτσι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ανατρέχει, όταν το επιθυμεί, στο ιστορικό του κινητήρα μελετώντας τη συμπεριφορά του συστήματος προκειμένου να εξαγάγει ανάλογα συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα, για το σύστημα του εργαστηρίου με τον ασύγχρονο κινητήρα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη περιοχή ταχυτήτων. Η εν λόγω περιοχή μπορεί να ξεκινά από τη μηδενική ταχύτητα μέχρι μια μεγάλη, ο καθορισμός της οποίας γίνεται από τη μηχανική και την ηλεκτρική αντοχή της μηχανής. Ο ηλεκτρικός κινητήρας ακολουθώντας μια καμπύλη με μικρότερη ταχύτητα και μικρότερη ροπή καταναλώνει μικρότερα ποσά ισχύος. Μικραίνοντας την ταχύτητα επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας, στόχος ο οποίος είναι ιδιαίτερα σημαντικός σήμερα. Σημειώνεται ότι η απόσβεση του κόστους αγοράς των εργαλείων και των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό και την υλοποίηση της αναφερόμενης πλατφόρμας γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα, συνυπολογίζοντας τη διάρκεια ζωής της πλατφόρμας και το βαθμό χρησιμότητά της.

Το σύστημα αυτό δημιουργήθηκε με στόχο την ύπαρξη δυνατοτήτων επέκτασης και τροποποιείται ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη.

Βιβλιογραφία

- [1] Stephen J. Chapman, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ», 4^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα
- [2] Στέφανος Ν. Μανιάς, «ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ», Εκδόσεις Συμεών
- [3] Κεφάλαιο 4 Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες (Α.Τ.Κ.), Web site: http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf
- [4] Arduino Mega, Web site: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>
- [5] Raspberry Pi 3 Model B, Web site: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [6] Εμμανουήλ Πουλάκης, «Προγραμματίζοντας με τον μικροελεγκτή Arduino», Ηράκλειο 2015, Web site: <http://users.sch.gr/manpoul/docs/arduino/ProgrammingArduino.pdf>
- [7] Γρηγόρης Παπαγιάννης, «ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Ι: Επαγωγικοί ή ασύγχρονοι κινητήρες», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Θεσσαλονίκη 2010
- [8] Κωνσταντίνος Γεωργιάδης, Διπλωματική εργασία «Σειριακή Επικοινωνία δυο Raspberry Pi», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Θεσσαλονίκη Μάρτιος 2015