



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

*Εξοικονόμηση ενέργειας από την χρήση ηλεκτρικών
κινητήριων συστημάτων μέσω ελεγχόμενων ηλεκτρονικών
μετατροπέων ισχύος - Εφαρμογές στη βιομηχανία*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΣΗΜΑΚΗ Ν. ΣΟΥΛΕΛΕ

Επιβλέπουσα : *Μαρία Γ. Ιωαννίδου*

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

*Εξοικονόμηση ενέργειας από την χρήση ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων
μέσω ελεγχόμενων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος - Εφαρμογές στη
βιομηχανία*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ασημάκη Ν. Σουλελέ

Επιβλέπουσα: *Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.*

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8/6/2018

.....
Παρασκευή Ιωαννίδου Νικόλαος Θεοδώρου Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π Καθηγητής Ε.Μ.Π Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Copyright © Σουλελής Ασημάκης, 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.

(Υπογραφή)

.....

ΑΣΗΜΑΚΗΣ Ν. ΣΟΥΛΕΛΗΣ

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

Περίληψη

Η εξοικονόμηση ενέργειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη σημερινή εποχή και στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Σύμφωνα με τις τάσεις της κοινωνίας, τα επόμενα χρόνια, αναμένεται να αποτελέσει έναν από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες διαβίωσης, τόσο από πλευράς προστασίας του περιβάλλοντος όσο και από πλευράς εξοικονόμησης χρημάτων.

Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα αποτελούν σημαντικό παράγοντα του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι υπεύθυνα για σημαντικότερα ποσοστά κατανάλωσης ανά τον κόσμο και ανά τομείς εφαρμογής. Σύμφωνα με έρευνες πάνω από το 40% της παγκόσμιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται σε βιομηχανικές εφαρμογές και τα 2/3 αυτής χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικούς κινητήρες. Σε έρευνα που είχε διεξαχθεί ειδικά για τις ευρωπαϊκές χώρες, τα κινητήρια συστήματα είναι υπεύθυνα για το 69% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία και για το 38% στις οικιακές εφαρμογές.

Με εξαίρεση το φωτισμό, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται στην ηλεκτροκίνηση, δηλαδή καταναλώνεται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες που ανέρχονται σε ένα τεράστιο αριθμό επάνω στο πλανήτη. Η ισχύς των ηλεκτρικών κινητήρων αρχίζει από πολύ μικρά μεγέθη (για παράδειγμα mW) και εκτείνεται στην περιοχή των MW. Ειδικά, στη βιομηχανία η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική επιτυγχάνεται, ολοένα και περισσότερο, από τις ηλεκτρικές μηχανές οι οποίες τροφοδοτούνται και ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος.

Η τεχνολογία ελέγχου μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος άρχισε να αναπτύσσεται στη δεκαετία του 1960 και σήμερα, μετά από πέντε δεκαετίες, έχει φθάσει σε πολύ υψηλό επίπεδο ανάπτυξης. Στη σημερινή εποχή έχουν κατακτηθεί δύο στόχοι:

- ο σύγχρονος σχεδιασμός και οι βελτιώσεις στην κατασκευή των ηλεκτρικών κινητήρων έχουν οδηγήσει σε πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (της τάξεως του 97%) χρησιμοποιώντας βελτιωμένα υλικά (αγώγιμα, μονωτικά, σιδηρομαγνητικά) και εφαρμόζοντας προωθημένες μεθόδους υπολογισμού (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία)
- οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος με τη χρήση νέων ημιαγωγικών ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος και νέες μεθόδους διακοπτικής λειτουργίας που πραγματοποιούνται μέσω μικροϋπολογιστικών διατάξεων, έχουν κατακτήσει πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (της τάξεως του 98%), μεγάλη αξιοπιστία, καλή δυναμική συμπεριφορά και λογικό κόστος.

Λέξεις Κλειδιά: Εξοικονόμηση ενέργειας, μετατροπή ισχύος, ηλεκτρική ενέργεια, ηλεκτρικός κινητήρας

Abstract

Energy saving plays a very important role in modern times and in people's everyday lives. According to the trends of society, in the following years, it is expected to be one of the most important living factors, both in terms of environmental protection and in terms of saving money.

Electric propulsion systems are an important factor in the electricity sector, which is responsible for very high consumption rates across the world and by sectors of application. According to research, over 40% of the world's electricity is consumed in industrial applications and two thirds of it is used in electric motors. In a survey conducted specifically for European countries, driving systems are responsible for 69% of the electricity consumed in industry and 38% for domestic applications.

With the exception of lighting, most of the electricity is consumed in electric driving, that is, it is consumed by electric engines that amount to a huge number on the planet. The power of the electric motors starts from very small sizes (for example mW) and extends to the MW range. Especially in industry, the conversion of electrical energy into kinetics is increasingly being achieved by electrical machines which are powered and controlled by electronic power converters.

Control technology via electronic power converters began to develop in the 1960s and today, after five decades, has reached a very high level of growth. Today, two goals have been conquered:

- Modern design and improvements in the construction of electric motors have resulted in a very high efficiency (97%) using improved materials (conductive, insulating, ferromagnetic) and applying advanced calculation methods (eg finite elements)
- Electronic power converters using new semiconductor electronic power components and new microcontrolled switching methods have achieved a very high performance (98%), high reliability, good dynamic behavior and reasonable cost.

Key words: Energy saving, power conversion, electrical energy, electric motor

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου, κα Μαρία Γ. Ιωαννίδου, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές, τις υποδείξεις και την γνώση που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο θέμα γόνιμης δημιουργίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και όλους τους συμφοιτητές που γνώρισα στην διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Ασημάκης Σουλελής

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	8
Abstract.....	9
Κεφάλαιο 1: Ενεργειακές επιδόσεις ηλεκτρικών κινητήρων	10
1.1. Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα	11
1.1.1. Κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων	12
1.1.1.1. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος.....	12
1.1.1.2 Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.....	14
1.1.2. Χρήσεις ηλεκτρικών κινητήρων	21
1.2. Βαθμός απόδοσης ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων.....	22
1.3. Εξοικονόμηση ενέργειας ηλεκτρικών κινητήρων	26
1.3.1. Ενέργειες διεθνών οργανισμών για εξοικονόμηση ενέργειας ηλεκτρικών κινητήρων	26
1.3.1.1. Σημερινά δεδομένα.....	28
1.3.1.2. Πλεονεκτήματα κατηγοριοποίησης κινητήρων	29
1.3.1.3. Εξοικονόμηση ενέργειας – οφέλη αλλαγής κατηγορίας	30
1.3.2. Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας λόγω ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και ελέγχου των κινητήρων.....	30
1.3.2.1. Αντικατάσταση κινητήρα	31
1.3.2.2. Επίδραση κατασκευαστικών χαρακτηριστικών κινητήρα	32
1.3.2.3. Επίδραση διαστάσεων κινητήρα.....	36
1.3.2.4. Εξοικονόμηση ενέργειας και συντελεστής ισχύος ηλεκτρικού κινητήρα.....	38
Κεφάλαιο 2:Εξοικονόμηση ενέργειας στα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα με χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος για τον έλεγχο αυτών.....	43
2.1. Πλεονεκτήματα σύγχρονων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος	44
2.2. Είδη σύγχρονων ηλεκτρονικών ισχύος	45
2.2.1. Δίοδος ισχύος.....	45
2.2.2. Θυρίστορ (SCR, Thyristor)	46
2.2.3. Triac	46
2.2.4. GTO.....	47
2.2.5. BJT.....	48
2.2.6. MOSFET	48
2.2.7. IGBT	49
2.2.8. SIT	49

2.2.9. SITH.....	50
2.2.10. MCT	50
2.2.11. Άλλα στοιχεία	51
2.3. Σύγχρονες διατάξεις και μετατροπείς ισχύος	51
2.3.1. Μη ελεγχόμενοι ανορθωτές	54
2.3.2. Ελεγχόμενοι ανορθωτές.....	55
2.3.3. Μετατροπείς συνεχούς τάση σε συνεχή.....	56
2.3.4. Αντιστροφείς	59
2.3.5. Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη	60
2.4. Εξοικονόμηση ενέργειας ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων με τη χρήση ελεγχόμενων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος.....	61
2.4.1. Κύκλωμα ισχύος	63
2.4.2. Ρύθμιση και έλεγχος ηλεκτρικού κινητήρα	67
2.5. Τεχνολογίες ελέγχου κινητήριων	69
2.5.1. Έλεγχος του κινητήριου συστήματος με μικροελεγκτές.....	69
2.5.2. Αυξομείωση στροφών του κινητήριου συστήματος με μετατροπέα ισχύος	70
2.5.3. Αυξομείωση στροφών του κινητήριου συστήματος με μετατροπέα συχνότητας ...	71
2.5.4. Σύγκριση της αυξομείωσης στροφών του κινητήριου συστήματος με άλλες μεθόδους ελέγχου παροχής.....	73
2.6. Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας σε κινητήρια συστήματα μέσω ελεγχόμενων μετατροπέων ισχύος	74
Κεφάλαιο 3: Εφαρμογές στη βιομηχανία.....	78
3.1. Χρήση ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων στη βιομηχανία	79
3.2. Βιομηχανικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος	80
3.2.1. Συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS).....	82
3.2.2. Διόρθωση συντελεστή ισχύος.....	82
3.2.3. Επαγωγική θέρμανση.....	83
3.2.4 Ηλεκτροσυγκολλήσεις.....	84
3.2.5. Φωτισμός με λαμπτήρες φθορισμού σε υψηλή συχνότητα	84
3.3. Ειδικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στη βιομηχανία.....	84
Κεφάλαιο 4:Πειραματική επιβεβαίωση ενεργειακής απόδοσης ηλεκτρικού κινητήρα.....	87
4.1. Έρευνες και πειράματα παγκόσμιου βεληνεκού που επιβεβαιώνουν το θέμα	88
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Προοπτικές.....	90
5.1. Συμπεράσματα	91
5.2. Προοπτικές	92
Βιβλιογραφία	93

Κεφάλαιο 1: Ενεργειακές επιδόσεις ηλεκτρικών κινητήρων

1.1. Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα

Τα Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα είναι τεχνικές διατάξεις, που μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανικό έργο. Τα κύρια συνιστώσα στοιχεία αυτού είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας και η μηχανή παραγωγής έργου. Ο ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτείται είτε από μια ηλεκτρική πηγή σταθερών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών μέσω απλής διακοπτικής διάταξης, είτε παρεμβάλλοντας έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος για τη δημιουργία ηλεκτρικών μεγεθών με νέα χαρακτηριστικά για τον έλεγχο της κινητικής κατάστασης του κινητήρα σύμφωνα με τις ποικίλες απαιτήσεις των διαφόρων φορτίων(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010). Η μετατροπή της ενέργειας συνοδεύεται πάντοτε από απώλειες, οι οποίες πρέπει να ελαχιστοποιούνται με σκοπό αφ' ενός την κατά τον δυνατόν μειωμένη χρήση των φυσικών ενεργειακών πόρων και αφ' ετέρου την αριστοποίηση της διαδικασίας μετατροπής με κριτήρια οικονομικά, περιβαλλοντικά και λιγότερων φθορών του συστήματος μετατροπής.

Ως ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε σύστημα, το οποίο μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανικό φορτίο ή και αντιστρόφως, Η μετατροπή αυτή προφανώς επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη λειτουργία διαφόρων τεχνικών διατάξεων, εκ των οποίων τον πρώτο ρόλο παίζει η ηλεκτρική μηχανή(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010).

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν κατηγορία των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Το βασικό στοιχείο μιας στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής είναι η μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Με βάση το φαινόμενο της επαγωγής όταν ένας αγωγός κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε μέσα στον αγωγό αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή δηλαδή ηλεκτρικό δυναμικό το οποίο είναι και το αίτιο της εμφάνισης ηλεκτρικού ρεύματος στον αγωγό(Κορομηλάς & Μαρής, 2011). Στους κινητήρες αξιοποιείται επιπλέον και το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε πάνω του ασκείται από το μαγνητικό πεδίο μια δύναμη που τείνει να τον κινήσει. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αλλά και το μήκος του αγωγού. Οι κινητήρες στην βιομηχανία καταναλώνουν περίπου το 70% του συνολικού φορτίου.

Φορτίο σε ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης ονομάζεται το μηχανικό, συνήθως, σύστημα που είναι συνδεδεμένο στον άξονα της ηλεκτρικής μηχανής και ανταλλάσσει με αυτήν μηχανική ενέργεια (είτε λαμβάνει οπότε έχουμε λειτουργία κινητήρα είτε προσφέρει οπότε έχουμε λειτουργία γεννήτριας). Ο σχεδιασμός ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης ξεκινάει με την εξέταση του φορτίου που πρέπει να εξυπηρετήσει ο κινητήρας(Μπουντάκης, 2012). Για το λόγο αυτό πριν να προχωρήσει

οποιοδήποτε άλλο βήμα ο σχεδιασμός θα πρέπει απαραίτητως να είναι γνωστές οι χαρακτηριστικές ροπής– ταχύτητας και ισχύος–ταχύτητας του φορτίου.

Τα φορτία του κινητήρα είναι τριών ειδών(Μπουντάκης, 2012):

- Φορτίο σταθερής ροπής: η τάση εξόδου μεταβάλλεται ενώ το φορτίο μένει σταθερό. Φορτία αυτού του είδους συναντώνται σε ταινιόδρομους, περιστροφικούς κλίβανους και αντλίες σταθερής μετατόπισης.
- Φορτίο μεταβλητής ροπής: το φορτίο μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής. Φορτία αυτού του είδους συναντώνται σε φυγόκεντρες αντλίες και ανεμιστήρες.
- Φορτίο σταθερής τάσης: η ροπή στρέψης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα. Φορτία αυτού του είδους συναντώνται σε ηλεκτρικά εργαλεία.

1.1.1.Κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων

Οι ηλεκτροκινητήρες διακρίνονται στις δυο βασικές κατηγορίες(Μπουντάκης, 2012):

- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος
- Κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, οι οποίοι καλύπτουν και την πλειοψηφία των εφαρμογών.

Οι μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος διακρίνονται στις δυο βασικές κατηγορίες:

- Σύγχρονες μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος.
- Ασύγχρονες (επαγωγικές)μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος.

Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που στρέφεται το πεδίο του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στον άξονα της μηχανής. Η βασική διαφορά ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ότι για την κίνησή του δεν είναι απαραίτητη η τροφοδότηση με συνεχές ρεύμα διέγερσης.

1.1.1.1.Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Η μηχανή συνεχούς ρεύματος μπορεί να λειτουργήσει τόσο σαν κινητήρας, όσο και σαν γεννήτρια. Στην πράξη όμως χρησιμοποιείται περισσότερο ως κινητήρας (εξαιτίας της ευρείας διάδοσης των γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος) παρέχοντας τη δυνατότητα για ακριβή έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής σε μια ευρεία κλίμακα τιμών(Καρλής, 2002). Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μεγάλου

μεγέθους (δεκάδων ή εκατοντάδων ίππων) χρησιμοποιούνται σε εργαλειομηχανές, εκτυπωτικές πρέσες, ταινίες μεταφοράς, ανεμιστήρες, αντλίες, ανυψωτικές μηχανές, γερανούς, μηχανές κατεργασίας χάρτου και υφάσματος, κτλ. Επίσης, οι κινητήρες συνεχούς χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στην έλξη ηλεκτρικών οχημάτων (αυτοκινήτων και σιδηροδρόμων). Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μικρού μεγέθους (υποδιαίρεσεων του ίππου) χρησιμοποιούνται κυρίως ως συσκευές ελέγχου, όπως ταχογεννήτριες για μέτρηση της ταχύτητας και σερβοκινητήρες για ακριβή τοποθέτηση και κατανομή.

Η λειτουργία ενός τυπικού ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος βασίζεται στην αλληλεπίδραση δύο μαγνητικών πεδίων. Το πρώτο πεδίο δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες (διέγερση) που βρίσκονται συνήθως σταθερά προσαρμοσμένοι στο στάτη της μηχανής. Το δεύτερο πεδίο δημιουργείται στον δρομέα της μηχανής από το περιστρεφόμενο τύλιγμα τυμπάνου, που συνιστά έναν ηλεκτρομαγνήτη (Μπουντάκης, 2012).

Βασικό ρόλο στη λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος παίζει ο συλλέκτης. Ο ρόλος του συλλέκτη είναι να αντιστρέφει τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος τυμπάνου δύο φορές σε κάθε κύκλο, έτσι ώστε να αντιστρέφεται η πολικότητα του ηλεκτρομαγνήτη τυμπάνου την κατάλληλη χρονική στιγμή (όταν οι δύο αντίθετοι μαγνητικοί πόλοι βρίσκονται απέναντι) και τελικά να αλληλεπιδρούν εις το διηνεκές μαγνητικά τα δύο πεδία. Αυτό είναι αναγκαίο αφού το τύλιγμα τυμπάνου είναι περιστρεφόμενο και χωρίς το συλλέκτη η μηχανή θα σταματούσε άμεσα την πρώτη φορά που δύο αντίθετοι πόλοι θα βρίσκονταν απέναντι.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα η μηχανή συνεχούς ρεύματος να μη διαθέτει μόνιμους μαγνήτες στο στάτη αλλά τύλιγμα ηλεκτρομαγνήτη (ως διέγερση), που αποτελεί και τη συνηθέστερη πρακτική. Η μηχανή αυτή ονομάζεται μηχανή συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα πεδίου. Έτσι μεταβάλλοντας το ρεύμα που διέρχεται από τον ηλεκτρομαγνήτη (που ονομάζεται εναλλακτικά τύλιγμα πεδίου ή τύλιγμα διεγέρσεως) μπορεί να μεταβληθεί η χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής του κινητήρα.

Ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας του τυλίγματος διέγερσης, οι μηχανές συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα πεδίου χωρίζονται στις εξής κατηγορίες (Μπουντάκης, 2012):

- Ξένης διέγερσης: Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται από ανεξάρτητη πηγή τάσης/ρεύματος δίνοντας τη δυνατότητα για πολύ εύκολο έλεγχο του πεδίου διέγερσης.
- Διέγερσης σε σειρά: Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων υψηλής ροπής σε μικρές ταχύτητες.
- Παράλληλης διέγερσης: Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων υψηλών ταχυτήτων.

- Σύνθετης διέγερσης: Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται εν μέρει σε σειρά και εν μέρει παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων περίπου σταθερής ταχύτητας παρά τις μεταβολές της ροπής.

Οι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος ιστορικά προηγούνται των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος έχουν χρησιμοποιηθεί για πάρα πολλά χρόνια σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Η δυνατότητα που παρέχουν για εύκολο έλεγχο ταχύτητας και ροπής τις είχε καταστήσει για πολλές δεκαετίες τη μοναδική επιλογή για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που απαιτούσαν μεταβλητή ταχύτητα λειτουργίας.

Η ευκολία του ελέγχου έγκειται στο ότι γενικά σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης στο τύμπανο και η αναπτυσσόμενη ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος τυμπάνου (αυτό ισχύει επακριβώς μόνο για τους κινητήρες συνεχούς ξένης διέγερσης). Συνεπώς, όπως ήδη θα είναι φανερό, είναι αρκετά απλός ο έλεγχος ενός τέτοιου κινητήρα (για παράδειγμα μέσω ενός μετατροπέα συνεχούς σε συνεχές – DC/DC Converter).

1.1.1.2 Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος

Η αρχή λειτουργίας του σύγχρονου κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος έγκειται στο ότι το μαγνητικό πεδίο του δρομέα προσπαθεί να ακολουθήσει το πεδίο του στάτη χωρίς ποτέ να καταφέρει να ευθυγραμμιστεί. Στις περισσότερες περιπτώσεις το φορτίο ενός σύγχρονου κινητήρα είναι μια διάταξη που πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα. Γενικά η τάση εισόδου και η συχνότητα παραμένουν σταθερές και ανεξάρτητες από την ισχύ εξόδου του κινητήρα. Η ταχύτητα προσδιορίζεται από την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας και δεν εξαρτάται καθόλου από το φορτίο (Μπουντάκης, 2012).

Τα επιμέρους στοιχεία ενός σύγχρονου κινητήρα απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 1.1: Επιμέρους στοιχεία σύγχρονου κινητήρα(Μπουντάκης, 2012)

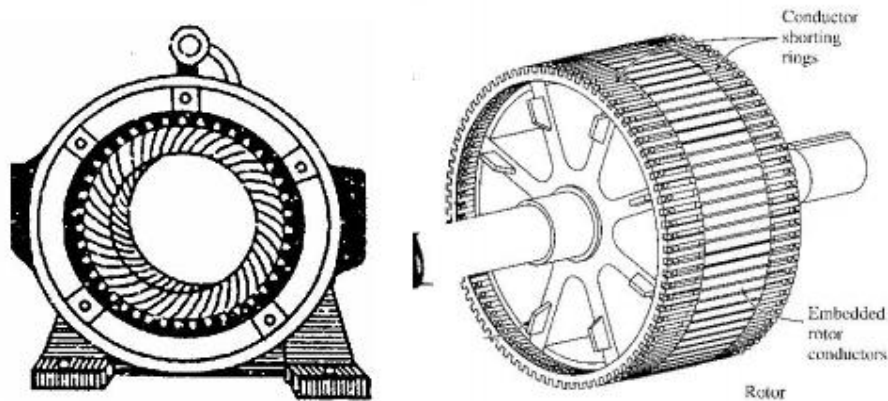
- 1: Μόνιμος μαγνήτης
- 2: Τυλίγμα σπειρών
- 3: Ρουλεμάν
- 4: Άξονας ακριβείας
- 5: Ρότορας
- 6: Διπλό ελατήριο
- 7: Τελικό κιβώτιο
- 8: Σπείρες που τυλίγονται σε ισχύ
- 9: Στάτης

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor), χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας(Γεωργάλας, 2011).

Όπως όλες οι μηχανές, έτσι και οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται από δύο βασικά μέρη: το ένα είναι σταθερό και ονομάζεται στάτης, και το δεύτερο βρίσκεται επί του άξονα της μηχανής και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται και ονομάζεται δρομέας.

Στο στάτη της μηχανής είναι τοποθετημένα τυλίγματα των οποίων ο αριθμός ποικίλει ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων. Τα τυλίγματα αυτά τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση είτε από το δίκτυο είτε μέσω αντιστροφέα και είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία του κύριου μαγνητικού πεδίου της μηχανής. Ο στάτης κατασκευάζεται από ελάσματα με σκοπό τη μείωση των απωλειών ισχύος λόγω ανάπτυξης δινορευμάτων. Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας προσφέρει κινητική ενέργεια (στην περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, ενώ δέχεται κινητική ενέργεια στην περίπτωση που έχουμε λειτουργία γεννήτριας). Όπως και ο στάτης, έτσι και ο δρομέας συνήθως κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα για τη μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω δινορευμάτων, αλλά σε αντίθεση με το στάτη

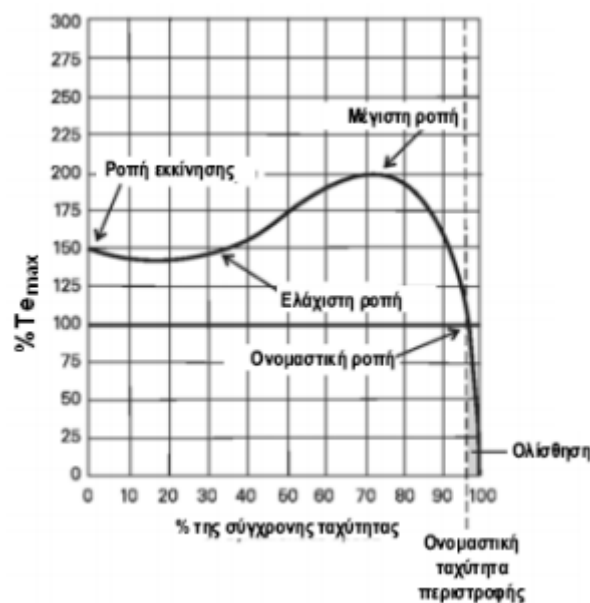
και ανάλογα με το είδος της μηχανής ο δρομέας δεν έχει πάντα τυλίγματα στην επιφάνειά του(Γεωργάλας, 2011).



Εικόνα 1.2: Στάτης και δρομέας ασύγχρονου κινητήρα(Γεωργάλας, 2011)

Όταν το τυλίγμα του στάτη του κινητήρα τροφοδοτείται από συμμετρική πηγή θα δημιουργηθεί στο διάκενο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα. Το στρεφόμενο πεδίο του διακένου επάγει τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα το οποίο αποτελείται από κλειστά κυκλώματα. Οι τάσεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την ροή ρευμάτων στα τυλίγματα του δρομέα και την δημιουργία κύματος ΜΕΔ το οποίο στρέφεται ως προς τον στάτη με την σύγχρονη ταχύτητα. Η αλληλεπίδραση των δύο πεδίων στάτη και δρομέα ή του συνισταμένου πεδίου του διακένου και του πεδίου του δρομέα προκαλεί την ροπή της μηχανικής επαγωγής.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών ενός κινητήρα επαγωγής είναι η εξής:



Εικόνα 1.3: Χαρακτηριστική ροπής – στροφών κινητήρα επαγωγής(Γεωργάλας, 2011)

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των δρομέων των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος είναι η πολυμορφία ως προς την κατασκευή τους. Μπορεί να συναντήσει κανείς απόλυτα λείους κυλινδρικούς δρομείς χωρίς οδοντώσεις και προεξοχές σε κινητήρες υστέρησης, κυλινδρικούς δρομείς με αυλακώσεις στην επιφάνειά τους σε σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές, δρομείς έκτυπων πόλων σε σύγχρονες μηχανές και κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης τύπου switched reluctance, καθώς και ειδικής κατασκευής δρομείς όπως είναι για παράδειγμα οι δρομείς με «οδηγούς ροής» στην επιφάνειά τους για βελτίωση των χαρακτηριστικών τους σε σύγχρονους κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης ή οι δρομείς με μόνιμους μαγνήτες στην επιφάνειά τους σε κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ή βηματικούς κινητήρες(Γεωργάλας, 2011).

Πέρα από τον στάτη και το δρομέα στη δομή μιας μηχανής εναλλασσομένου ρεύματος μπορεί να υπάρχουν ψήκτρες, ανορθωτικά κυκλώματα, πυκνωτές για την εκκίνηση και βοηθητικοί πόλοι.

Οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή αξιοπιστία και απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής, χαμηλές ανάγκες συντήρησης, μικρό βάρος και όγκο. Για αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με τους μοντέρνους αντιστροφείς και τις προηγμένες τεχνικές ελέγχου, προτιμώνται στα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Παρατηρείται ήδη η τάση αντικατάστασης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό επίπεδο από τους πιο οικονομικούς και αξιόπιστους κινητήρες επαγωγής(Μπουντάκης, 2012).

Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν είχε συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας (η θεαματική αύξηση της τιμής του πετρελαίου έκανε όλο και πιο σημαντικό το λειτουργικό κόστος των μηχανών, ενώ το αρχικό κόστος κατασκευής άρχισε να γίνεται μικρότερης σχετικά σημασίας). Όμως, στη συνέχεια, όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηρισμό υψηλής απόδοσης (high efficiency induction motors). Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς.

Η πλειοψηφία των ασύγχρονων μηχανών λειτουργεί χωρίς έλεγχο καθώς τροφοδοτούνται απευθείας από το εκάστοτε τριφασικό δίκτυο. Ωστόσο, το ποσοστό των υπό έλεγχο μηχανών που προορίζονται για συστήματα ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας αυξάνει σταθερά καθώς οι μηχανές συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται σπανιότερα. Οι τελευταίες έχουν μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος αγοράς, η αυξημένη αδράνεια του δρομέα, η κατασκευαστική πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος συντήρησης που προκύπτει λόγω των εγγενών προβλημάτων που συσχετίζονται με τη λειτουργία του συλλέκτη και των ψηκτρών, του συστήματος που πετυχαίνει την ανόρθωση της τάσεως σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μηχανών με σημαντικότερα τον απλό έλεγχό τους και την ταχεία απόκτηση ροπής δυσκολεύονται όλο και περισσότερο να αντισταθμίσουν τα μειονεκτήματα καθώς η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των

μικροεπεξεργαστών δίνει πλέον τη δυνατότητα υλοποίησης συστημάτων ελέγχου μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής αποδόσεως, με βελτιστοποιημένες αποκρίσεις σε δυναμικές ή στατικές καταστάσεις λειτουργίας(Γεωργάλας, 2011).

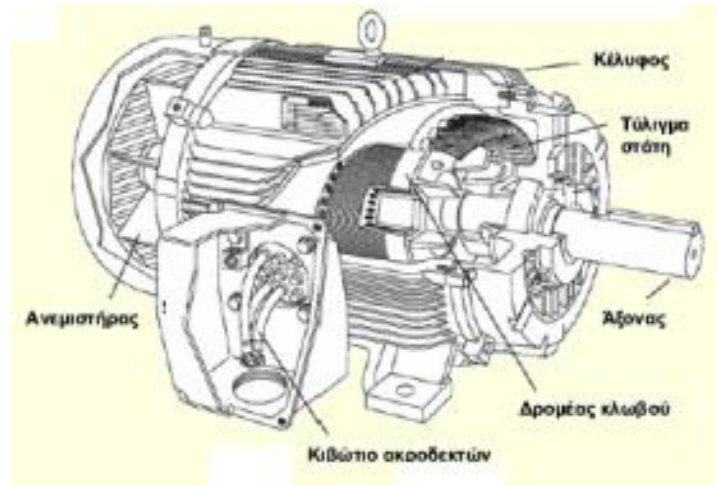
Αντίθετα, η εξέλιξη στο σχεδιασμό των ηλεκτρικών μηχανών γίνεται με αργά βήματα σε σχέση με τα πεδία των ηλεκτρονικών ισχύος και της αρχιτεκτονικής υπολογιστών, πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η έρευνα και η ανάπτυξη σε αυτήν την περιοχή ξεκίνησε περισσότερο από εκατό χρόνια πριν, όταν ξεκίνησε και η κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, και διαφαίνεται πως δεν θα υπάρξει κάποιος κορεσμός σε αυτό το πεδίο. Επομένως, τα μειονεκτήματα των μηχανών συνεχούς ρεύματος, τα οποία κατά το πλείστον σχετίζονται με κατασκευαστικά ζητήματα φαίνεται να αποκτούν μεγαλύτερο ειδικό βάρος και να καταδικάζουν τις μηχανές συνεχούς ρεύματος σε περιορισμένη και μάλλον εξειδικευμένη χρήση σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος.

Παρά το γεγονός ότι η αρχή λειτουργίας των μηχανών επαγωγής έχει μείνει αναλλοίωτη, σημαντική τεχνολογική πρόοδος έχει επιτελεστεί, ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες. Σε σύγκριση με παλαιότερα χρόνια, οι επαγωγικές μηχανές είναι μικρότερες, ελαφρύτερες, πιο αξιόπιστες και αποδοτικές(Τσαμπούρης, 2008). Οι αποκαλούμενες βιομηχανίες υψηλής απόδοσης στις οποίες τυλίγματα μειωμένης αντίστασης και σιδηρομαγνητικά υλικά χαμηλών απωλειών εξασφαλίζουν σημαντική μείωση κατανάλωσης ενέργειας, είναι ευρέως διαθέσιμες. Είναι ακριβότερες από τις συμβατικές μηχανές, ωστόσο για τις περισσότερες εφαρμογές οι απλή περίοδος αποπληρωμής είναι μικρή.

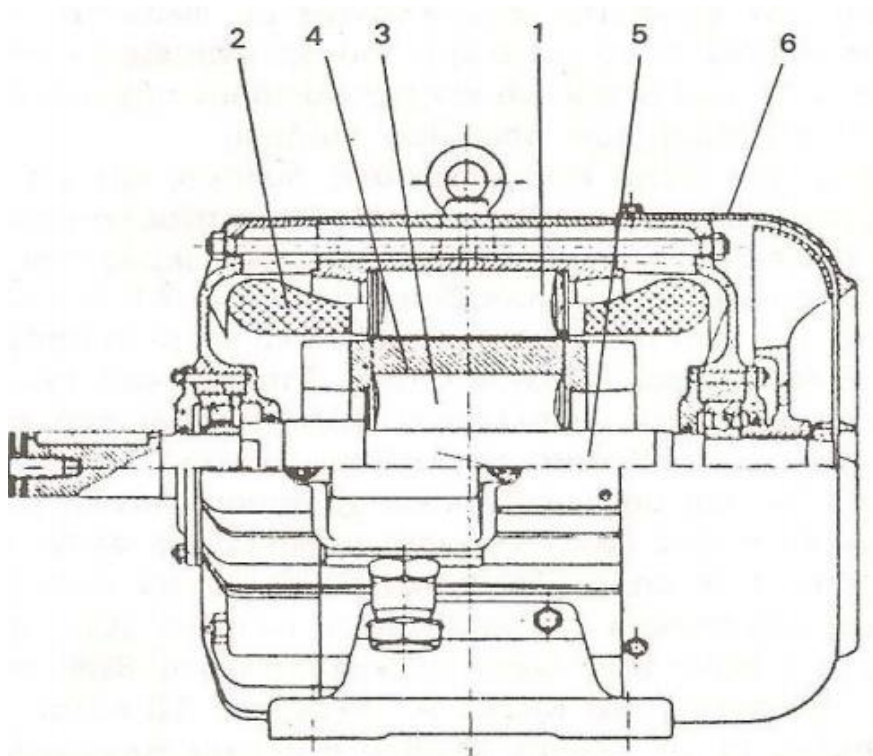
Ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους, οι επαγωγικοί κινητήρες διακρίνονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- Κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού
- Κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, ο δρομέας αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητα ροπής. Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα.



Εικόνα 1.4: Κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού(Γεωργάλας, 2011)



Εικόνα 1.5: Διαμήκης τομή κινητήρα επαγωγής με τύλιγμα κλωβού(Γεωργάλας, 2011)

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, τα κύρια μέρη των κινητήρων επαγωγής με τύλιγμα κλωβού είναι τα εξής:

1. Σίδηρο στάτη
2. Ακραία τυλίγματα στάτη
3. Σίδηρος δρομέα
4. Τύλιγμα κλωβού δρομέα
5. Άξονας
6. Κέλυφος

Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος χρησιμοποιείται αλουμίνιο αντί του χαλκού. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Όμως τα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως από τον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Οι κινητήρες αυτού του τύπου είναι και οι πιο διαδεδομένοι.

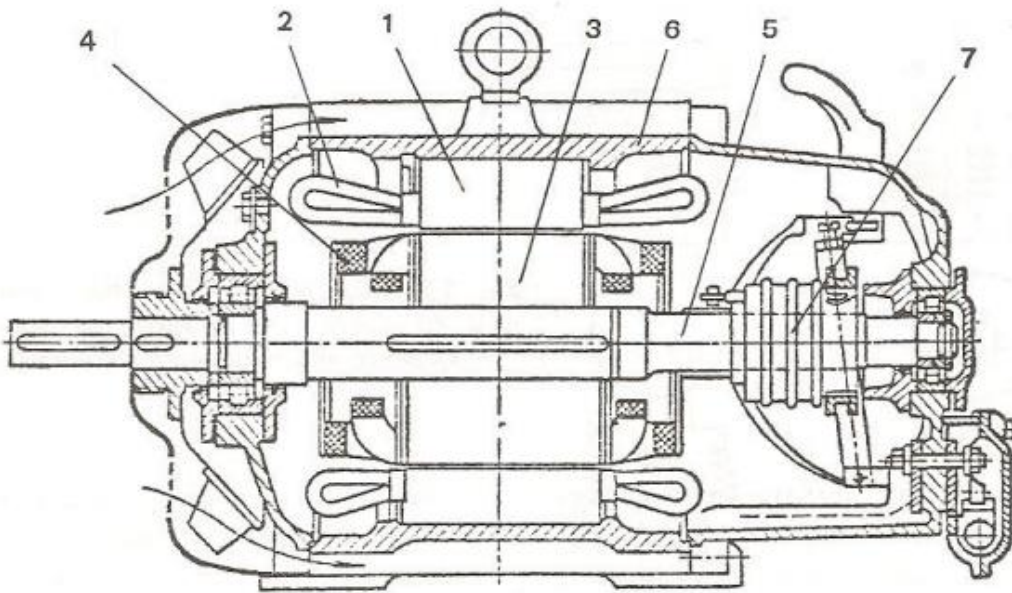
Μερικά από τα πλεονεκτήματα που έκαναν τους ασύγχρονους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού να χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές είναι τα εξής(Γεωργάλας, 2011):

- Μικρός συγκριτικά όγκος(ο οποίος διαρκώς μειώνεται με την πρόοδο της τεχνολογίας στον τομέα των μαγνητικών υλικών)
- Αντοχή σε σκληρές συνθήκες εργασίας
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Χαμηλό κόστος συντήρησης
- Απλός στην κατασκευή

Ως μηχανή βέβαια παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα:

- Χαμηλός συντελεστής ισχύος
- Μεγάλο ρεύμα εκκίνησης
- Δυσχέρεια στη ρύθμιση ταχύτητας

Στους επαγωγικούς κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, ο δρομέας φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετούνται ένα τριφασικό τύλιγμα, αντίστοιχο με εκείνο του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος στο δρομέα συνδέονται σχεδόν πάντα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του τυλίγματος αστέρα καταλήγουν σε ισάριθμους δακτυλίους που φέρει ο δρομέας. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σε αυτούς, είναι δυνατή η σύνδεση ρυθμιστικών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η τροποποίηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας-ροπής του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας(Παπαποστόλου & Ανδρέου).



Εικόνα 1.6: Διαμήκης τομή κινητήρα επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, τα κύρια μέρη των κινητήρων επαγωγής με τύλιγμα κλωβού είναι τα εξής:

1. Σίδηρο στάτη
2. Ακραία τυλίγματα στάτη
3. Σίδηρος δρομέα
4. Τύλιγμα κλωβού δρομέα
5. Άξονας
6. Κέλυφος
7. Δακτύλιοι

1.1.2. Χρήσεις ηλεκτρικών κινητήρων

Οι κινητήρες χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής του ανθρώπου:

- Παραγωγή μηχανικού έργου: πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας στην παραγωγή συνεπάγεται με εξοικονόμηση όλου του ηλεκτρικού συστήματος και επομένως και των φορτίων που το διέπουν.
- Βιομηχανία: περιέχει τις πιο «βαριές» καταναλώσεις σε ένα σύστημα. Η μεγάλη διαφορά σε ισχύ με τα υπόλοιπα φορτία τις καθιστά κεντρικά σημεία όσον αφορά τον σχεδιασμό των ηλεκτρικών συστημάτων, καθώς οι περισσότερες χρησιμοποιούν κινητήρια συστήματα.
- Μεγάλες κτιριακές εγκαταστάσεις: μεγάλος αριθμός κινητήρων χρησιμοποιούνται σε ξενοδοχεία, νοσοκομεία, κτίρια γραφείων κτλ.

- Υπόλοιπες χρήσεις κινητήρων: οικιακοί κινητήρες και γενικότερα κινητήρες με χαμηλή ισχύ, για παράδειγμα ψυγεία, αντλίες νερού, κλιματιστικά κλπ.



Εικόνα 1.7: Χρήσεις κινητήρων ανά μέγεθος ισχύος(Μπουντάκης, 2012)

1.2. Βαθμός απόδοσης ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων

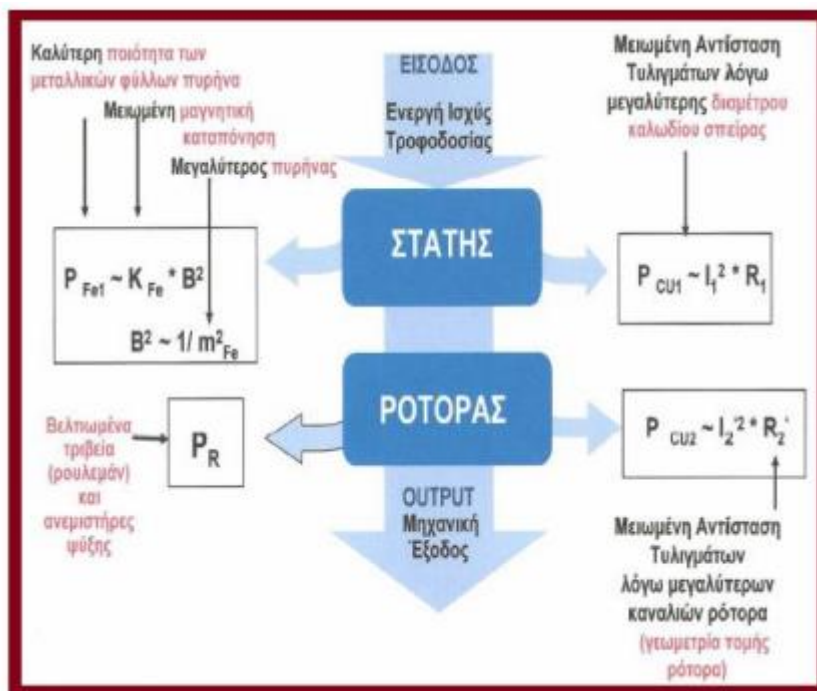
Ανάλογα με τη διάρθρωση των υποδομών παραγωγής και γενικά με το επίπεδο ανάπτυξης των χωρών, εκτιμάται ότι παγκοσμίως οι ηλεκτρικοί κινητήρες μετατρέπουν μεγάλο ποσό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. Στην αρχή της δεκαετίας του 2000, είχε εκτιμηθεί ότι, συνολικά στις χώρες του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης θα ήταν δυνατόν να εξοικονομηθεί ένα ποσό ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως των 130 TWh ετησίως, χρησιμοποιώντας στη βιομηχανία κινητήρες και διατάξεις οδήγησης νέας τεχνολογίας με βελτιωμένο βαθμό απόδοσης. Νεότερα στοιχεία αναφέρουν ότι, μόνο από τους κινητήρες ενός μεγάλου κατασκευαστικού οίκου, ο οποίος τα τελευταία σαράντα χρόνια έχει παραδώσει στις διάφορες εφαρμογές μερικά εκατομμύρια κινητήριων συστημάτων εναλλασσομένου ρεύματος, έχει εξοικονομηθεί ανά έτος ενέργεια της τάξεως των 140 TWh. Αυτό οφείλεται στη βελτίωση του βαθμού απόδοσης των κινητήρων κατά 3% στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010).

Επομένως, υπάρχει απαίτηση για υψηλό βαθμό απόδοσης των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων, το οποίο σημαίνει ελαχιστοποίηση των απωλειών. Ο σκοπός αυτής της ελαχιστοποίησης είναι αφενός η όσο το δυνατόν μειωμένη χρήση

των φυσικών ενεργειακών πόρων και αφετέρου η βελτίωση της διαδικασίας μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, με κριτήρια οικονομικά, περιβαλλοντολογικά και λιγότερων φθορών του συστήματος μετατροπής.

Σε όλα τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα χάνεται ένα ποσό ενέργειας λόγω των απωλειών των αγώγιμων και σιδηρομαγνητικών υλικών, των τριβών και άλλων επιπρόσθετων απωλειών. Οι απώλειες εξαρτώνται από τα χρησιμοποιούμενα υλικά, το σχεδιασμό των συνιστώντων στοιχείων του συστήματος, τις γεωμετρικές διαστάσεις, τον τρόπο λειτουργίας και τη συντήρηση. Η χαμένη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία πρέπει να απομακρύνεται από το σύστημα μέσω ενός συστήματος ψύξεως, διότι διαφορετικά προκαλεί καταπόνηση και φθορές με αποτέλεσμα να επέρχεται μείωση της διάρκειας ζωής και ενδεχομένως καταστροφή κάποιων συνιστώντων στοιχείων (Μπουντάκης, 2012). Εκτός από τις αρνητικές επιπτώσεις στο ίδιο το σύστημα, οι απώλειες ενέργειας προκαλούν οικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα, μειώνουν τους φυσικούς πόρους, δηλαδή επιδρούν αρνητικά στον άνθρωπο και στη ζωή γενικώς.

Ο βαθμός απόδοσης των ηλεκτρικών κινητήρων προσδιορίζεται από τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά καθώς και από τις συνθήκες λειτουργίας τους. Οι απώλειες των ηλεκτρικών μηχανών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: εκείνες που εξαρτώνται από το φορτίο και εκείνες που είναι ανεξάρτητες του φορτίου. Οι πρώτες εμφανίζονται στα αγώγιμα υλικά του στάτη και του δρομέα και είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος, το οποίο εξαρτάται από το εκάστοτε φορτίο. Οι άλλες είναι, με μεγάλη προσέγγιση σταθερές, δηλαδή ανεξάρτητες του φορτίου, αλλά εξαρτώνται από το μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται από την ηλεκτρική τάση. Πρόκειται για τις απώλειες στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν διαρρέονται από εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων), τις απώλειες τριβών στα έδρανα και τις απώλειες λόγω αντίστασης του ανέμου κατά την περιστροφή του δρομέα (Μπουντάκης, 2012).



Εικόνα 1.8: Απώλειες κινητήρα(Μπουντάκης, 2012)

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός κινητηρίου συστήματος διαμορφώνεται κυρίως από τις απώλειες του ηλεκτρικού κινητήρα, της διάταξης οδήγησης αυτού (μετατροπέας ηλεκτρικών μεγεθών), της διάταξης μηχανικής σύμπλεξης και του μηχανικού φορτίου. Οι τεχνολογικές εξελίξεις που σχετίζονται με την μείωση των απωλειών ενέργειας στοχεύουν στη βελτίωση τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μηχανικών υποσυστημάτων, τα οποία αποτελούν τα βασικά μέρη του συνολικού κινητηρίου συστήματος.

Η ηλεκτρική ισχύς που αναγράφεται στις πινακίδες των κινητήρων είναι η ισχύς που απορροφάει ο κινητήρας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η ωφέλιμη ισχύς, δηλαδή η ισχύς που μπορεί να καταναλωθεί από το φορτίο, προκύπτει μετά την αφαίρεση των απωλειών, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα που ακολουθεί:



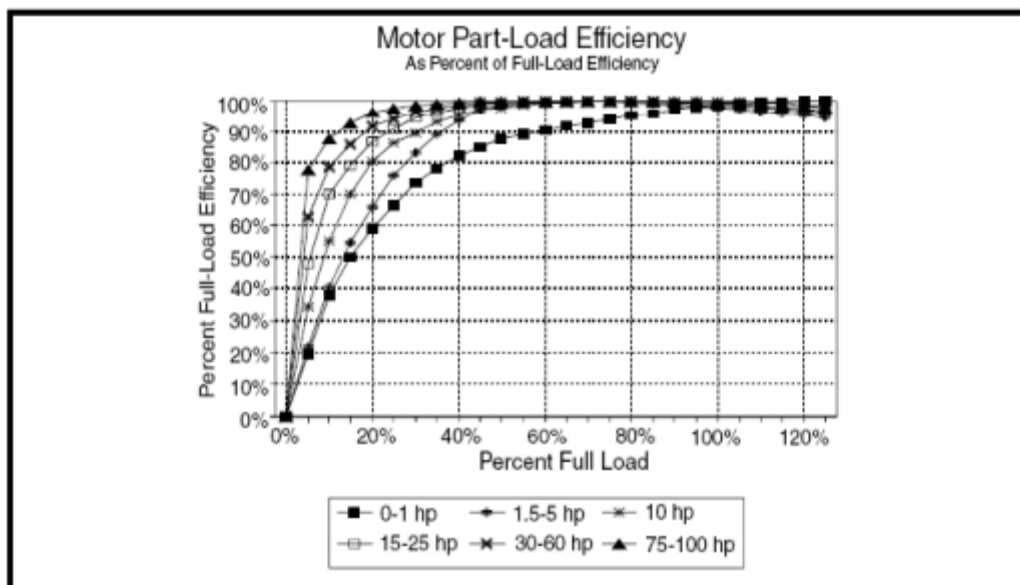
Εικόνα 1.9: Απώλειες κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα(Μπουντάκης, 2012)

Τα ποσοστιαία μεγέθη των απωλειών του κινητήρα παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 1.10: Ποσοστά απωλειών κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα(Μπουντάκης, 2012)

Αναφορικά με τις επιδράσεις του φορτίου των κινητήρων ως ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος στο βαθμό απόδοσης, το σχήμα που ακολουθεί παρέχει σημαντικές πληροφορίες(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010). Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης ως συνάρτηση του φορτίου, που εκφράζεται ως ποσοστό επί του ονομαστικού φορτίου με παράμετρο την ονομαστική ισχύ. Από τις καμπύλες του σχήματος αυτού μπορεί να εκτιμηθεί ο βαθμός απόδοσης κατά τη μεταβολή του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα, για ένα φάσμα μηχανών τυπικού μεγέθους, οι οποίες αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό στις διάφορες εφαρμογές.



Εικόνα 1.11: Βαθμός απόδοσης ασύγχρονων κινητήρων συναρτήσεως του φορτίου με παράμετρο την ονομαστική ισχύ(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010)

1.3. Εξοικονόμηση ενέργειας ηλεκτρικών κινητήρων

Η εξοικονόμηση ενέργειας γενικότερα είναι η διαδικασία της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς όμως να συνδυάζεται με μείωση της άνεσης ή της ποιότητας. Είναι η πιο αποδοτική μορφή ενέργειας γιατί δεν καταναλώθηκαν πόροι για την παραγωγή της, δεν υπάρχουν απώλειες κατά τη διανομή της, ούτε υπάρχουν επιπλέον οικονομικά έξοδα για να εγκατασταθεί ισχύ που δε χρειάζεται.

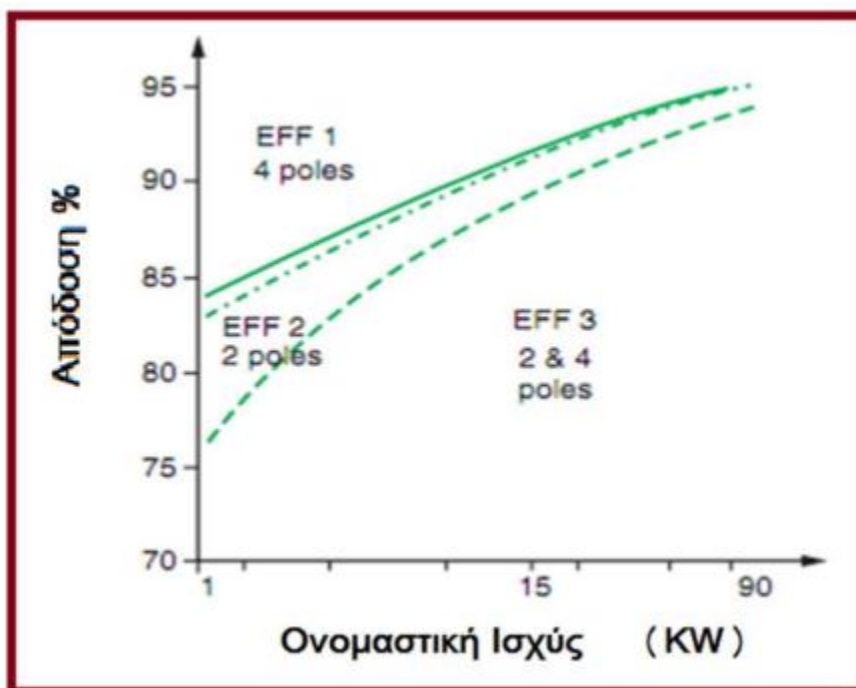
Στην απόφαση υλοποίησης οποιασδήποτε από τις ποικίλες τεχνολογικές παρεμβάσεις για εξοικονόμηση ενέργειας, καθοριστικό ρόλο παίζει πάντα η οικονομική αποδοτικότητά της. Με κατάλληλες μεθοδολογίες και με χρήση ορισμένων κριτηρίων, μπορεί να αξιολογηθεί η όλη επένδυση ως προς τη βιωσιμότητά της. Σε κάθε περίπτωση, το κόστος της ενέργειας και το κόστος του χρήματος έχει καθοριστική σημασία (Μπουντάκης, 2012).

Επισημαίνεται ότι με τη χρήση κινητήριων συστημάτων με βελτιωμένο βαθμό απόδοσης, τα οφέλη δεν είναι μόνο οικονομικά και περιβαλλοντικά. Επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας και οικονομικών πόρων, αλλά επιπλέον μειώνεται η παραγόμενη θερμότητα και μαζί και η σχετική καταπόνηση των κινητηρίων συστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται ευκολότερη η αντιμετώπιση των επιπτώσεων από καταπονήσεις αυτού του είδους, εξασφαλίζεται μεγαλύτερη αξιοπιστία και αυξάνεται η διάρκεια ζωής (Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010).

1.3.1. Ενέργειες διεθνών οργανισμών για εξοικονόμηση ενέργειας ηλεκτρικών κινητήρων

Η κατηγοριοποίηση των κινητήρων ξεκίνησε με την προτροπή της Κομισιόν. Σε συνεργασία με τους κατασκευαστές των κινητήρων συμφωνήθηκε να εφαρμοστούν τρεις κατηγορίες για τους κινητήρες, ανάλογα με τον βαθμό απόδοσης τους. Οι τρεις αυτές κατηγορίες αφορούσαν το 80% περίπου των παραγόμενων κινητήρων στην Ευρώπη ονομαστικής ισχύος από 1.1 μέχρι 90 kW. Οι τρεις αυτές επίσημες κλάσεις ήταν οι εξής:

- EFF1: συνεχόμενη χρήση, πολύ υψηλή απόδοση
- EFF2: συχνή χρήση, υψηλή απόδοση
- EFF3: σπάνια-περιστασιακή χρήση, χαμηλή απόδοση



Εικόνα 1.12: Κλάσεις κινητήρων και απόδοσή τους σε σχέση με την ονομαστική ισχύ και τον αριθμό των πόλων(Μπουντάκης, 2012)

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω της ευρωπαϊκής επιτροπής διατηρεί τον στόχο της βάσης δεδομένων για αποδοτικότητα των ηλεκτρικών μηχανών. Οι κυριότερες ενέργειες περιλαμβάνουν τα εξής:

- Κατηγοριοποίηση των κινητήρων και σήμανση της ενεργειακής τους κατανάλωσης
- Καθορισμός και εφαρμογή των προτύπων ενεργειακής απόδοσης
- Έρευνα, ανάπτυξη και επίδειξη προς όλους τους άμεσα εμπλεκόμενους με την ενέργεια
- Εθελοντικές συμφωνίες με κατασκευαστές γνήσιου εξοπλισμού [Original Equipment Manufacturers (OEM)]
- Προγράμματα πληροφόρησης (συνέδρια, μαθήματα, έντυπα)
- Τεχνικά Εργαλεία (Αλγόριθμοι υπολογισμών, βάσεις δεδομένων, κτλ)

Σε αυτό το πλαίσιο, το Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (JointResearchCenter – JRC) έχει αναπτύξει την ευρωπαϊκή βάση δεδομένων κινητήριων συστημάτων «EuroDEEM». Η στρατηγική για την ανάπτυξη του EuroDEEM έχει αναπτυχθεί ώστε να επιτευχθούν οι εξής στόχοι(Μπουντάκης, 2012):

- Διάθεση ευρωπαϊκού καταλόγου όλων των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων και των παραγώγων τους, και προσφορά λύσεων στην ενεργειακή απόδοση.
- Παροχή πληροφοριών στο πλαίσιο της βάσης δεδομένων οι οποίες είναι εύκολο να κατανοηθούν έτσι ώστε ακόμη και μη έμπειροι του είδους (π.χ.

ηλεκτρολόγοι, μηχανικοί εγκαταστάσεων, κλπ) να είναι σε θέση να επεξεργαστούν την βάση και να βρουν τις πληροφορίες που θέλουν.

- Λειτουργία του προγράμματος που να εξυπηρετεί και τους κατασκευαστές και τους καταναλωτές.
- Ακρίβεια των αποτελεσμάτων με μικρό αριθμό εισαγωγής εισόδων
- Δυνατότητα ανάπτυξης συστήματος ελέγχου καταναλώσεων κινητήριων συστημάτων σε μια εταιρία

1.3.1.1. Σημερινά δεδομένα

Στην προσπάθεια να καλυφθούν οι ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες, κρίθηκε επιτακτική η δημιουργία νέων κατηγοριών των ηλεκτρικών κινητήρων. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, σε συνεργασία με τη διεθνή ηλεκτροτεχνική επιτροπή (International Electrotechnical Commission – IEC), βαθμονόμησαν εκ νέου τους ασύγχρονους κινητήρες 50-60Hz με ισχύ από 0,75 kW μέχρι 375kW. Οι νέες κατηγορίες ονομάστηκαν IE από τα αρχικά International Efficiency και αντικατέστησαν από το 2010 της κατηγορίες EFF και τις προδιαγραφές τους.

Τα νέα στοιχεία που προστέθηκαν είναι (Μπουντάκης, 2012):

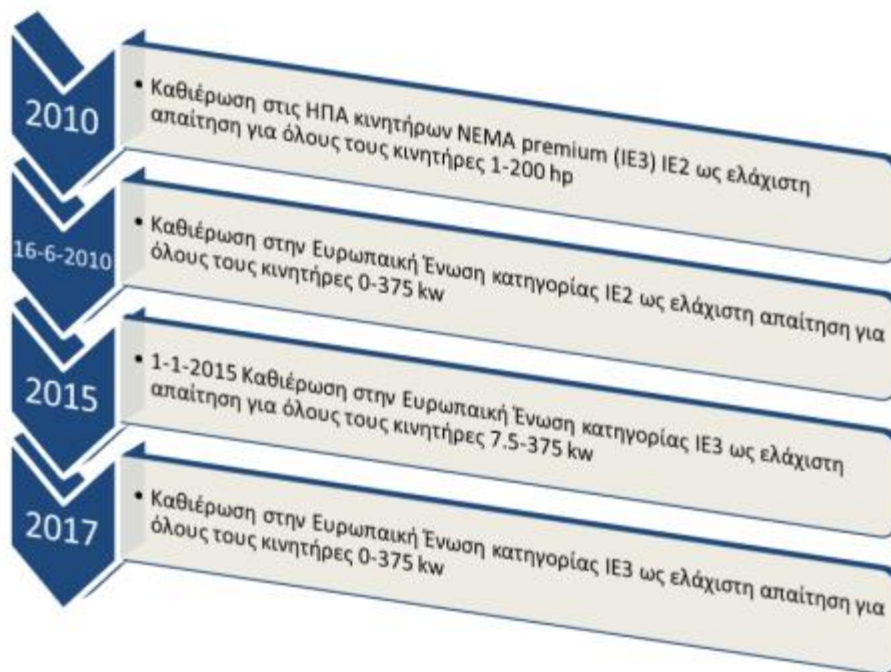
- Πλήρης κατάργηση της κατηγορίας EFF 3
- Αντιστοιχία της κατηγορίας IE1 με την EFF2, και της IE2 με την EFF1
- Δημιουργία νέας κατηγορίας υψηλότερης απόδοσης της EFF1
- Οι απαιτήσεις και οι προδιαγραφές διαφοροποιούνται ανάλογα την χώρα χρήσης του
- κινητήρα

Επισημαίνεται ότι η Βόρεια Αμερική έχει δημιουργήσει αντίστοιχες κατηγορίες γνωστές και ως NEMA για κινητήρες που δουλεύουν στα 60 Hz.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ		IE3 Προνομιακής ενεργειακής απόδοσης	NEMA Προνομιακής ενεργειακής απόδοσης
	EFF1	IE2 Υψηλής απόδοσης	NEMA Υψηλής Απόδοσης
	EFF2	IE1 Συμβατικής απόδοσης	
	Ευρωπαϊκή Ένωση		Βόρειος Αμερική

Εικόνα 1.13: Νέες κατηγορίες IE και NEMA, και η αντιστοιχία τους με τις EFF (Μπουντάκης, 2012)

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής έχουν θεσπίσει ένα χρονοδιάγραμμα στόχων, με απώτερο σκοπό τη χρησιμοποίηση μόνο κινητήρων κατηγορίας IE3 παγκοσμίως. Αυτό το μεταβατικό διάγραμμα παρατίθεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 1.14: Χρονοδιάγραμμα στόχων Ε.Ε. και Η.Π.Α.(Μπουντάκης, 2012)

1.3.1.2. Πλεονεκτήματα κατηγοριοποίησης κινητήρων

Είναι προφανές ότι η κατηγορία ενός κινητήρα και η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί σημαντικό κριτήριο για τον καταναλωτή. Υψηλότερη απόδοση κινητήρα συνεπάγεται λιγότερες απώλειες, άρα και λιγότερη κατανάλωση. Η εξοικονόμηση ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται μαζί με την χρήση του κινητήρα, ενώ η εξοικονόμηση χρημάτων επιφέρει πιο γρήγορα απόσβεση του κόστους του.

Η κατηγοριοποίηση των κινητήρων ωφελεί και τις εταιρίες που τους εμπορεύονται, καθώς με αυτόν τον τρόπο, η διαδικασία επιλογής απλοποιείται ακόμα περισσότερο με κεντρικό σημείο την απόδοση του κινητήρα. Η κοστολόγηση σαφώς και γίνεται πιο προσιτή ακόμα και για διαφορετικούς τύπους κινητήρων. Τέλος μπορεί η σήμανση να γίνει με παρόμοιο τρόπο και για αντλίες, βάνες, inverters κλπ., έτσι ώστε να γίνεται απλούστερος ο συνδυασμός όλων των παραπάνω(Μπουντάκης, 2012). Από την πλευρά των τεχνικών, η κατηγοριοποίηση διευκολύνει τη σύγκριση διαφορετικών προϊόντων υπό την ίδια βάση.

Τέλος, επισημαίνεται ότι ιδιαίτερα σημαντική είναι και η αποφυγή χρονοβόρων γραφειοκρατικών διαδικασιών με εθελοντική δέσμευση των κατασκευαστών ηλεκτροκινητήρων σε συγκεκριμένα πρότυπα.

1.3.1.3. Εξοικονόμηση ενέργειας – οφέλη αλλαγής κατηγορίας

Η λειτουργία των κινητήριων συστημάτων προσφέρει πολλές ευκαιρίες για εξοικονόμηση χρημάτων και μακροπρόθεσμα πέρα από το κόστος της αγοράς. Η ενεργειακή εξοικονόμηση με σωστή επιλογή του κινητήρα και της απόδοσης του, μπορεί να αποφέρει κέρδος εξίσου ή και περισσότερο από το κόστος που μπορεί να εξοικονομηθεί στην αγορά.

Η εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών κινητήρων θα μπορούσε να εξοικονομήσει για την Ευρώπη ένα σημαντικό ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, μπορεί να μειώσει την παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου και να σπρώξει προς τα κάτω το συνολικό περιβαλλοντικό κόστος της ηλεκτρικής παραγωγής. Τέλος οι Ενεργειακά Αποδοτικοί Κινητήρες (E.A.K.) μπορούν να μειώσουν το κόστος συντήρησης στις βιομηχανίες, όπως επίσης και να βελτιώσουν τις λειτουργίες τους.

Πιθανή πλήρης μετάβαση σε E.A.K. θα μπορούσε να οδηγήσει την E.E. σε εξοικονόμηση έως 202 δισ. kWh ηλεκτρικής ενέργειας, που ισοδυναμεί με μείωση κατά 10 ανά δισεκατομμύρια € ανά έτος, το λειτουργικό κόστος για τη βιομηχανία (Μπουρντάκης, 2012). Αυτοί που θα καρπωθούν αμέσως τα πλεονεκτήματά τους είναι οι βιομηχανίες, επειδή βελτιώνουν την παραγωγή τους και μειώνουν το κόστος τους. Η κοινωνία γενικότερα είναι επίσης ωφελημένη λόγω της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα καταναλώνουν περίπου το 65% της βιομηχανικής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Έχει υπολογιστεί δε το οικονομικό δυναμικό εξοικονόμησης σε 27 δισ. kWh ετησίως ή 4,33%. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρξει εξοικονόμηση πάνω από 1,04% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην E.E. (Chapman, DeAlmeida, & DeKeulenaer, 2004)

1.3.2. Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας λόγω ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και ελέγχου των κινητήρων

Σημαντικό μέρος των ενεργειακών απωλειών ενός κινητήρα είναι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του, καθώς επηρεάζουν ιδιαίτερα τη μείωση της απόδοσής του.

Μερικά από τα στοιχεία που μπορούν να μειώσουν την απόδοση ενός κινητήρα είναι τα εξής(Μπουντάκης, 2012):

- Ηλικία του κινητήρα
- Ισχύς του
- Ταχύτητα περιστροφής του
- Τύπος του κινητήρα
- Θερμοκρασία λειτουργίας του
- Επαναπεριέλξη του
- Φορτίο που εξυπηρετείται
- Κακή αντιστάθμιση

1.3.2.1. Αντικατάσταση κινητήρα

Η αντικατάσταση των κινητήρων αποτελεί την πιο εύκολη και προφανή λύση όσον αφορά τη μείωση των ενεργειακών απωλειών, ειδικά σε περιπτώσεις πεπαλαιωμένων κινητήρων που δεν πληρούν τις σύγχρονες προδιαγραφές. Αν και η αντικατάσταση κινητήρα φαίνεται εκ πρώτης όψεως η πιο δαπανηρή λύση, επισημαίνεται ότι το πραγματικό κέρδος επιτυγχάνεται σε βάθος χρόνου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πραγματικό κόστος δεν είναι ούτε το κόστος της αγοράς ούτε το κόστος της συντήρησης. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα κόστη στα διάφορα στάδια ζωής του κινητήρα.

Πίνακας 1.1: Σύγκριση κόστους στα διάφορα στάδια ζωής του κινητήρα(Μπουντάκης, 2012)

	1.5 kW	15kW	110kW
Κόστος συντήρησης	0.9%	0.2%	0.1%
Κόστος Αγοράς	2.3%	1.1%	0.9%
Κόστος λειτουργίας	96.8%	98.7%	99%

Παρατηρείται ότι το κόστος λειτουργίας φτάνει στους περισσότερους κινητήρες σε τιμές πάνω από90% επί του συνολικού κόστους ανεξαρτήτως ισχύος.

1.3.2.2. Επίδραση κατασκευαστικών χαρακτηριστικών κινητήρα

Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών κινητήρων και οι συνθήκες λειτουργίας τους προσδιορίζουν το βαθμό απόδοσής τους. Όπως αναλύθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι απώλειες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

Οι απώλειες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: αυτές που εξαρτώνται από το φορτίο και αυτές που είναι ανεξάρτητες του φορτίου. Οι απώλειες που εξαρτώνται από το φορτίο εμφανίζονται στα αγωγία υλικά του στάτη και του δρομέα και είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος που εξαρτάται από το φορτίο. Οι απώλειες που είναι ανεξάρτητες του φορτίου εξαρτώνται από το μαγνητικό πεδίο, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την ηλεκτρική τάση. Πρόκειται για τις απώλειες στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν διαρρέονται από εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων), τις απώλειες τριβών στα έδρανα και τις απώλειες λόγω αντίστασης του ανέμου με την περιστροφή του δρομέα (Μπουντάκης, 2012).

Σύμφωνα με επιστημονικές έρευνες, η επέμβαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητήρων μπορεί να επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα στην μείωση των απωλειών. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση περισσότερου χαλκού και μεγαλύτερης διατομής οδηγεί σε μείωση της αντίστασης των τυλιγμάτων ή των μπαρών του στάτη και του. Αυτό είναι εφικτό τροποποιώντας το σχεδιασμό των αυλακώσεων ή μειώνοντας το πάχος της μόνωσης μέχρι φυσικά τα επιτρεπόμενα όρια. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας υλικά με αυξημένη μαγνητική διαπερατότητα οι απώλειες υστέρησης μειώνονται. Τέλος, οι απώλειες που οφείλονται στα δινορευμάτα επιτυγχάνεται με μείωση του πάχους των ελασμάτων του πυρήνα.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται οι επιδράσεις των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών καθώς και το μέγεθος της ονομαστικής ισχύος ηλεκτρικών κινητήρων στις απώλειες και συνεπώς στο βαθμό απόδοσης. Συγκεκριμένα, η αντικατάσταση του αλουμινίου από το χαλκό στα τυλίγματα των κινητήρων μειώνει τις απώλειες κατά μέσο όρο 14,7%.

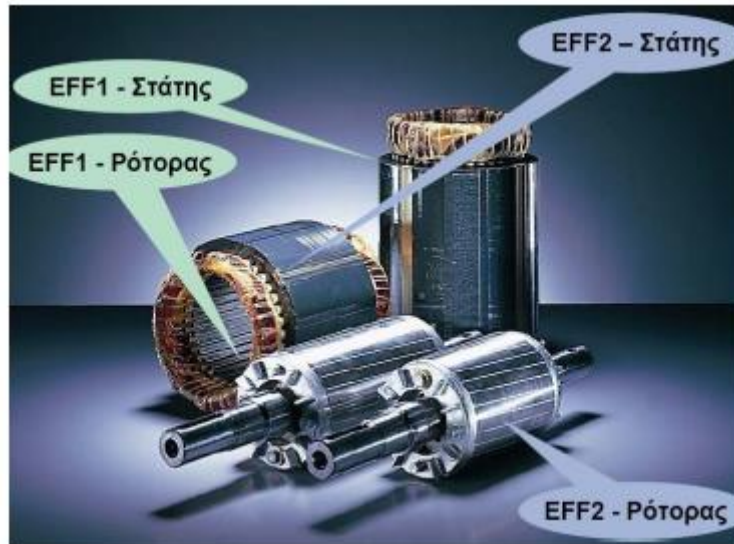
Πίνακας 1.2: Επίδραση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών και το μέγεθος της ονομαστικής ισχύος των ηλεκτρικών κινητήρων στις απώλειες και στο βαθμό απόδοσης (Darryl VanSon, Motor Test Results presented at Die Cast Copper Motor Workshop and Technology Demonstration Meeting, January 29, 2002, Denver, CO.)

			ΑΠΟΔΟΣΗ			
HP	KW	ΠΟΛΟΙ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΧΑΛΚΟΣ	ΔΙΑΦΟΡΑ	ΜΕΙΩΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ
4	3	4	83,2	86,4	3,2	19%
7,5	5,5	4	74	79	5	19,2%
10	7,5	4	85	86,5	1,5	10%
15	11	4	89,5	90,7	1,2	11,4%
25	19	4	90,9	92,5	1,6	17,6%
40	30	4	88,8	90,1	1,3	11,6%
120	90	2	91,4	92,8	1,4	16,3%
270	200	4	92	93	1	12,5%
						M.O. 14,7%

Διαπιστώνεται ότι η χρήση του χαλκού ως υλικού αγωγού για τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού αντί για αλουμινίου, επιφέρει σημαντική μείωση στις απώλειες του ρότορα. Ως αποτέλεσμα, προκύπτουν οι εξής διαφορές μεταξύ χαλκού και αλουμινίου:

- Η ολίσθηση υπό φορτίο η οποία είναι ανάλογη με τις απώλειες του ρότορα, είναι σημαντικά μικρότερη.
- Η καμπύλη ροπής στην περιοχή λειτουργίας είναι πολύ πιο απότομη.
- Η κατανομή της ροπής επιτυγχάνεται με ένα χαμηλότερο επίπεδο ολίσθησης.
- Η ροπή εκκίνησης, η οποία είναι ανάλογη με τις απώλειες ρότορα, είναι επίσης χαμηλότερη.

Σε σχέση με τον κινητήρα αλουμινίου στον ενεργειακά αποδοτικό κινητήρα με ρότορα χαλκού, μια αύξηση της ποσότητας σιδήρου θα χρειαστεί σε ελάχιστες περιπτώσεις, ή και καθόλου. Ο χαλκός αν και σημαντικό στοιχείο στη κατασκευή δεν αρκεί από μόνος του να επιφέρει αποτελέσματα. Ελασματοποιήσεις με μικρότερες προδιαγραφές απωλειών σιδήρου, και μεγαλύτερες διατομές περιελίξεων, είναι μερικά ακόμα από τα στοιχεία που χρειάζονται.



Εικόνα 1.15: Σύγκριση των ενεργών στοιχείων ηλεκτροκινητήρων EFF1 και EFF2(Νταμάτης, 2015)

Ανάλογα με ισχύ που παράγουν οι κινητήρες κατηγορίας EFF1 μπορούν να αυξήσουν τη λειτουργική τους απόδοση μέχρι και 10%, σε σύγκριση με τους κοινούς κινητήρες, το οποίο σημαίνει 10% μείωση των απωλειών. Για τους κινητήρες που έχουν υποστεί επαναπεριέλιξη του τυλίγματος διέγερσης, η απόδοσή τους μειώνεται 3 - 4% σε σχέση με τον αρχικό κινητήρα(Μπουντάκης, 2012).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι απώλειες στα διάφορα μέρη του κινητήρα, καθώς και τεχνικές μείωσής τους. Επισημαίνεται ότι οι απώλειες από ρεύματα eddyείναι οι απώλειες ισχύος σε συσκευές που χρησιμοποιούν αγωγίμους πυρήνες με περιέλιξη, όπως μετασχηματιστές και επαγωγικά πηνία, που οφείλεται στη μετατροπή των δημιουργούμενων ρευμάτων eddy μέσα στους πυρήνες με θερμότητα Joule.

Πίνακας 1.3: Απώλειες στα διάφορα μέρη του κινητήρα και τεχνικές μείωσής τους (Electrical Motors. Presentation from the Energy Efficiency Guide for Industry in Asia)

Είδος απωλειών	Επιλογές εξοικονόμησης
Σταθερές απώλειες (σιδήρου)	Χρήση λεπτότερων ελασμάτων, λιγότερες απώλειες πυρήνα χάλυβα μειώνουν τις απώλειες από ρεύματα eddy*. Σχεδιασμός μεγαλύτερου πυρήνα προσθέτει περισσότερο χάλυβα στην κατασκευή, το οποίο μειώνει τις απώλειες.
Απώλειες στάτη	Χρήση περισσότερου χαλκού και μεγαλύτερων αγωγών αυξάνει διατομή των τυλιγμάτων στάτη. Το αποτέλεσμα αυτού είναι να μειωθεί η αντίσταση των περιελίξεων και έτσι να αυξηθεί η ροή ρεύματος, πράγμα το οποίο μειώνει τις απώλειες.
Απώλειες ρότορα	Χρήση μεγαλύτερων διατομών αγωγών, μειώνει την αντίσταση και αυξάνει την ροή ρεύματος, μειώνοντας έτσι και εδώ τις απώλειες.
Απώλειες τριβών και περιελίξεων	Χρήση φτερωτών που είναι ειδικά σχεδιασμένες μπορούν να μειώσουν και τις απώλειες λόγω της κυκλοφορίας του αέρα.
Απώλειες φορτίου (μεταβαλλόμενες)	Χρήση αυστηρών ελέγχων των προδιαγραφών και της ποιότητας του φορτίου μπορεί να μειώσει τις σκεδαζόμενες απώλειες του.

Οι τυπικές απώλειες σε έναν επαγωγικό κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 1.4: Τυπικές απώλειες σε επαγωγικό κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος (Waide&Brunner)

Είδος απωλειών	Τιμές απωλειών (%)	Παράγοντες που επηρεάζουν αυτές τις απώλειες
Απώλειες στάτη	30-50	Υλικό και μέγεθος αγωγού του στάτη
Απώλειες Ρότορα	20-25	Υλικό και μέγεθος του αγωγού του ρότορα
Απώλειες Πυρήνα	20-25	Τύπος και ποιότητα μαγνητικού υλικού
Απώλειες Φορτίου	5-15	Κακή επιλογή κινητήρα για την εξυπηρέτηση φορτίου
Απώλειες περιστροφής και περιελίξεων	5-10	Σχεδίαση και κατάλληλη επιλογή της φτερωτής και τριβών

Συνοψίζοντας, χρησιμοποιούνται αρκετές μέθοδοι κατασκευής των κινητήρων με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων αυτών σε σχέση με τους παραδοσιακούς κινητήρες τυπικής απόδοσης. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι (Γεωργάλας, 2011):

- Η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας χαλκού στα τυλίγματα του στάτη με σκοπό τη μείωση των απωλειών χαλκού.
- Η αύξηση του μήκους του πυρήνα στο στάτη και στο δρομέα με σκοπό την αύξηση της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μαγνητικού κορεσμού της μηχανής και τελικά τη μείωση των απωλειών πυρήνα.
- Η χρήση περισσότερου χάλυβα στο στάτη της μηχανής, πράγμα που επιτρέπει τη μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας από τον κινητήρα προς το περιβάλλον ελαττώνοντας τη θερμοκρασία λειτουργίας. Μετά απ' αυτή την εξέλιξη ο ανεμιστήρας του δρομέα ξανασχεδιάστηκε, ώστε να μειωθούν οι απώλειες εξαερισμού.
- Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του στάτη είναι από ειδικό υψηλής ποιότητας ηλεκτρικό χάλυβα, ο οποίος παρουσιάζει μικρές απώλειες υστέρησης.
- Ο χάλυβας της μηχανής παράγεται σε εξαιρετικά μικρά πάχη (δηλαδή τα δυναμοελάσματα βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους) και διαθέτει μεγάλη εσωτερική ειδική αντίσταση. Οι δυο αυτές ιδιότητες τείνουν να μειώσουν τις απώλειες των δινορευμάτων.
- Η κατασκευή του κινητήρα γίνεται με μεγάλη προσοχή, ώστε το διάκενο να είναι ομοιόμορφο και να μειώνονται έτσι οι κατανεμημένες απώλειες του φορτίου.

1.3.2.3. Επίδραση διαστάσεων κινητήρα

Οι κινητήρες μεγάλου μεγέθους αν και είναι λιγότερο αποδοτικοί, συνήθως έχουν ακριβότερη τιμή από τους κοινούς κινητήρες. Οι κινητήρες γενικά λειτουργούν στην υψηλότερη απόδοσή με φορτίο 60 - 100% (πλήρες φορτίο). Η απόδοσή τους μειώνεται γρήγορα όσο μειώνεται το φορτίο κάτω από 50%. Στα προηγούμενα χρόνια, οι σχεδιαστές κινητήρων συνήθιζαν να κατασκευάζουν μεγάλους σε όγκο κινητήρες, για λόγους ασφαλείας και για να ελαχιστοποιήσουν το ρίσκο της αποτυχίας, ακόμα και σε περιπτώσεις που αυτό δεν ήταν απαραίτητο. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι τουλάχιστον το 1/3 των κινητήρων μεγάλου μεγέθους λειτουργούν με λιγότερο από 50% απόδοση με πλήρες φορτίο. Την ίδια στιγμή, με ένα μέσο φορτίο για ένα κινητήρα τον αναγκάζει να λειτουργεί με 60% της απόδοσης του κατά μέσο όρο. Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί ότι οι μεγάλων διαστάσεων κινητήρες συνεισφέρουν και στην αύξηση του συντελεστή ισχύος(Μπουντάκης, 2012).

Υπερδιαστασιολόγηση του κινητήρα είναι η εκλογή κινητήρα με επιπλέον χαρακτηριστικά από αυτά που επαρκούν ώστε να πραγματοποιήσει σωστά το έργο που πρόκειται να του ανατεθεί. Οι πιο συνηθισμένοι λόγοι υπερδιαστασιολόγησης του κινητήρα είναι οι εξής(Μπουντάκης, 2012):

- Υπερβολική προσαύξηση των συντελεστών ασφαλείας
- Κακή προσαρμογή του εκάστοτε συστήματος σε σχέση με το φορτίο που αναμένεται να τροφοδοτήσει
- Τήρηση παλαιότερων προδιαγραφών ξεπερασμένης τεχνολογίας
- Λανθασμένη εκλογή κινητήρα για τη χρήση που απαιτείται

Οι κινητήρες πρέπει να επιλέγονται με ισχύ ελαφρώς χαμηλότερη σε σχέση με το μέγιστο φορτίο. Επισημαίνεται ότι όλοι οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν έως και 15% παραπάνω από την ονομαστική τους ισχύ. Εάν ο κινητήρας λειτουργεί κάτω από 50% με πλήρες φορτίο, κρίνεται επιτακτική η αλλαγή των κινητήρων με μικρότερη χωρητικότητα (Μπουντάκης, 2012).

Ως παράδειγμα των συνεπειών υπερδιαστασιολόγησης κινητήρων, εξετάζεται ως παράδειγμα αντικατάσταση συμβατικού κινητήρα 10hp που λειτουργεί στο 40% της ονομαστικής του ισχύος με αποδοτικό κινητήρα 5hp. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν αφορούν ετήσια λειτουργία 2500 ωρών στο ενεργειακό σύστημα των ΗΠΑ (60 Hz).

Πίνακας 1.5: Πρώτο παράδειγμα αντικατάστασης κινητήρα με μικρότερη ισχύ (NorthwestFoodProcessorsAssociation-KnowledgeExchange)

Πλήρες φορτίο υπερδιαστασιολογημένου κινητήρα (rpm)	Απόδοση κινητήρα 5hp 1780rpm (%) της ονομαστικής ισχύος του	Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας (kWh)
1715	80,26	823
1720	80	849
1730	79,49	902
1740	78,98	955
1750	78,47	1007
1760	77,97	1059
Χωρίς προσαρμογή φορτίου		849

Πίνακας 1.6: Δεύτερο παράδειγμα αντικατάστασης κινητήρα με μικρότερη ισχύ(NorthwestFoodProcessorsAssociation-KnowledgeExchange)

Πλήρες φορτίο υπερδιαστασιολογημένου κινητήρα (rpm)	Απόδοση κινητήρα 5hr 1740rpm (%) της ονομαστικής ισχύος του	Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας (kWh)
1715	78,25	985
1720	78,01	1010
1730	77,52	1061
1740	77,03	1111
1750	76,55	1007
1760	76,08	1161
Χωρίς προσαρμογή φορτίου		803

1.3.2.4. Εξοικονόμηση ενέργειας και συντελεστής ισχύος ηλεκτρικού κινητήρα

Τα ωμικά ηλεκτρικά φορτία (αντιστάτες, λαμπτήρες πυρακτώσεως) απορροφούν από το δίκτυο μόνο ενεργό ισχύ (P) για την παραγωγή έργου. Σε αυτά τα φορτία, η ένταση του ρεύματος (I) που απορροφούν από το δίκτυο δεν έχει διαφορά φάσης από την τάση (V) του δικτύου.

Αντιθέτως, η πλειοψηφία των γραμμικών ηλεκτρικών φορτίων μίας εγκατάστασης χρειάζονται, εκτός από ενεργό ισχύ για να παράγουν έργο, και άεργο ισχύ (Q) για την δημιουργία και διατήρηση του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται για την λειτουργία τους. Τα φορτία αυτά καλούνται επαγωγικά. Στα επαγωγικά φορτία η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα προπορεύεται της τάσεως κατά μια γωνία φ η οποία καλείται διαφορά φάσεως. Παράδειγμα τέτοιων φορτίων είναι οι ασύγχρονοι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στις παραγωγικές διαδικασίες βιομηχανιών και βιοτεχνιών, οι ανελκυστήρες και κυλιόμενες κλίμακες, τα ηλεκτρικά αντλητικά συστήματα, ανεμογεννήτριες ορισμένων τεχνολογιών, κάποια από τα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς, τα κλιματιστικά μηχανήματα, και οι οικιακές συσκευές (ψυγεία, πλυντήρια κτλ). Αξίζει να σημειωθεί ότι το 80% της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται σε επαγωγικά φορτία(Μπουντάκης, 2012).

Ο βαθμός κατανάλωσης άεργου ισχύος από τα φορτία αυτά εκφράζεται με το εξής μέγεθος: Συντελεστής Ισχύος (cosφ), το οποίο αντιστοιχεί στο λόγο της κατανάλωσης ενεργού ισχύος προς φαινόμενη ισχύ του φορτίου.

Σε αντίθεση με τα επαγωγικά φορτία, τα χωρητικά φορτία (πυκνωτές) παράγουν άεργο ισχύ. Επομένως, όταν αυτά βρίσκονται σε κυκλώματα μαζί με επαγωγικά

φορτία προσφέρουν ένα μέρος της άεργου ισχύος (αντισταθμίζουν) που αυτά θα απορροφούσαν από το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η απορρόφηση άεργου ισχύος από το δίκτυο και κατ' επέκταση προκαλείται και μείωση της συνολικής απορροφημένης ισχύος. Παρόλα αυτά, χρειάζεται προσοχή στη σχεδίαση της αντιστάθμισης, καθώς η υπερβολική αντιστάθμιση μπορεί να βλάψει εξίσου ή ακόμα και περισσότερο το σύστημα.

Ένα σωστά αντισταθμισμένο φορτίο παρουσιάζει συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα (για παράδειγμα 0,95-0,99), ενώ ένα φορτίο χωρίς αντιστάθμιση παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές (για τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες 0,8-0,85). Επισημαίνεται ότι μιλώντας για ονομαστικό συντελεστή ισχύος ενός κινητήρα αυτός ορίζεται για την τάση και ένταση της θεμελιώδους συχνότητας των 50Hz και σε 100% φόρτισή του (Μπουντάκης, 2012).

Εάν ο κινητήρας κινεί φορτίο μικρότερο από το ονομαστικό του τότε ο συντελεστής ισχύος του μειώνεται, όπως προκύπτει και από τον πίνακα που ακολουθεί. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πρέπει να αποφεύγεται η, για λόγους επιπλέον ασφάλειας, υπερδιαστασιολόγηση ενός κινητήρα. Ένας υποδιαστασιολογημένος κινητήρας δεν θα μπορεί να κινήσει το φορτίο σε περιπτώσεις χαμηλής τάσεως τροφοδοσίας ή σε περίπτωση απαίτησης πρόσθετης ροπής. Επιπλέον, θα υπερφορτίζεται και θα έχει αυξημένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Αντιθέτως, ένας υπερδιαστασιολογημένος κινητήρας δεν θα έχει δυσκολία να κινήσει το φορτίο του σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά θα έχει μειωμένο συντελεστή ισχύος.

Πίνακας 1.7: Συντελεστής ισχύος και φορτίο κινητήρα(Electric)

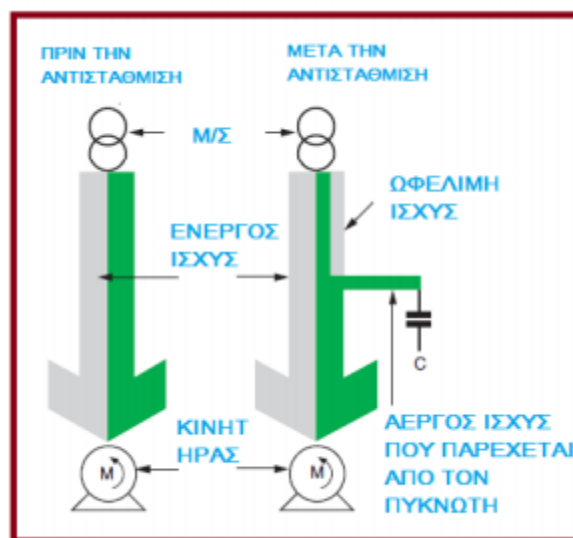
Κινητήρας	cosφ
Φορτίο επαγωγικού κινητήρα 0%	0,17
Φορτίο επαγωγικού κινητήρα 25%	0,55
Φορτίο επαγωγικού κινητήρα 50%	0,73
Φορτίο επαγωγικού κινητήρα 75%	0,8
Φορτίο επαγωγικού κινητήρα 100%	0,85

Αναφορικά με τη διαστασιολόγηση των χωρητικών μονάδων, το άεργο ρεύμα που παρέχει ο πυκνωτής στο φορτίο δεν πρέπει, σε καμία περίπτωση, να ξεπεράσει το 90% του ρεύματος εν κενώ του κινητήρα. Σε αντίθετη περίπτωση ο κινητήρας θα υποστεί υπεραντιστάθμιση. Το φαινόμενο της υπεραντιστάθμισης είναι ανεπιθύμητο διότι σε περίπτωση διακοπής της παροχής ο κινητήρας θα εμφανίσει αρνητική ολίσθηση και κατ' επέκταση θα λειτουργήσει ως γεννήτρια (υπερδιέγερση) ανυψώνοντας την τάση της εγκατάστασης προκαλώντας βλάβες στον εξοπλισμό. Επιπλέον, η επιστροφή της άεργου ενέργειας στο δίκτυο, που θα προκληθεί από την

υπεραντιστάθμιση, απαγορεύεται από την ΔΕΗ γιατί προκαλεί αύξηση της τάσεως στο δίκτυο διανομής και μεταφοράς.

Τέλος, επισημαίνεται ότι μείωση των απωλειών μπορεί να επιτευχθεί και στο ηλεκτρικό σύστημα τροφοδοσίας μειώνοντας τα ηλεκτρικά ρεύματα μέσω της μείωσης των ανώτερων αρμονικών και της άεργου ισχύος.

Σε περίπτωση διόρθωσης του συντελεστή ισχύος σε επαγωγικούς κινητήρες μέσω αντιστάθμισης με σύνδεση πυκνωτή, ο πυκνωτής συνδέεται απευθείας στους ακροδέκτες του κινητήρα. Μετά την εφαρμογή αντιστάθμισης στον κινητήρα, το ρεύμα του συνδυασμού κινητήρα-πυκνωτή θα μειωθεί, με την προϋπόθεση βέβαια ότι δεν έχει μεταβληθεί το φορτίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα σημαντικό μέρος της άεργου συνιστώσας του κινητήρα τροφοδοτείται από τον πυκνωτή, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.16: Αντιστάθμιση κινητήρα με πυκνωτή(Electric)

Υπάρχουν οι εξής τρεις τρόποι αντιστάθμισης:

- Μεμονωμένη αντιστάθμιση: Χρησιμοποιείται σε μεγάλα επαγωγικά φορτία με σημαντικό συντελεστή χρησιμοποίησης. Σε αυτήν την περίπτωση, ο πυκνωτής συνδέεται και αποσυνδέεται ταυτόχρονα με το φορτίο και με αυτόν τον τρόπο γίνεται χρήση του ίδιου εξοπλισμού ζεύξης και προστασίας.
- Ομαδική αντιστάθμιση: Χρησιμοποιείται όταν τα συνδεδεμένα φορτία έχουν κοινό κύκλο λειτουργίας (κινητήρες του ίδιου μηχανήματος). Σε αυτήν την περίπτωση, μια ομάδα φορτίων με κοινή παροχή αντισταθμίζεται από μία σταθερή χωρητικότητα.
- Κεντρική αντιστάθμιση: Εφαρμόζεται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου υπάρχουν διάφορα σενάρια λειτουργίας και ως εκ τούτου και μεταβλητή απαίτηση άεργου ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση, εγκαθίστανται αυτόματες συστοιχίες πυκνωτών στην είσοδο της εγκατάστασης. Μέσω ηλεκτρονικού

ελεγκτή παρακολουθείται το $\cos\phi$ στην είσοδο της εγκατάστασης και γίνεται αντίστοιχη σύνδεση ή αποσύνδεση πυκνωτών στην εγκατάσταση.

Όπως επισημάνθηκε και ανωτέρω, η υπερβολική αντιστάθμιση εγκυμονεί κινδύνους.

Όταν ένας κινητήρας οδηγεί ένα φορτίο υψηλής αδράνειας, ο κινητήρας συνεχίζει να περιστρέφεται και μετά την διακοπή της τροφοδοσίας του. Λόγω της μαγνητικής αδράνειας του κυκλώματος του ρότορα, θα δημιουργηθεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στις περιελίξεις του στάτη για ένα μικρό χρονικό διάστημα μετά την διακοπή τροφοδοσίας. Όταν δεν υπάρχει αντιστάθμιση, αυτό θα οδηγήσει σε πλήρη απενεργοποίηση του κινητήρα μετά από ένα δυο κύκλους λειτουργίας (Παπαποστόλου & Ανδρέου).

Οι πυκνωτές αντιστάθμισης δημιουργούν ένα τριφασικό ασθενές φορτίο για το αλλοιωμένο πλέον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο αναγκάζει το ρεύμα του πυκνωτή να ρέει μέσω των τυλιγμάτων του στάτη. Τα ρεύματα του στάτη παράγουν με την σειρά τους ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στον ρότορα το οποίο ενεργεί υπό τον ίδιο άξονα και με την ίδια κατεύθυνση ακριβώς όπως και πριν με το μαγνητικό πεδίο που αλλοιώθηκε. Η ροή του ρότορα αυξάνεται ατά συνέπεια αυξάνεται το ρεύμα του στάτη επομένως αυξάνεται και η τάση στα άκρα του κινητήρα, μερικές φορές και σε επικίνδυνο σημείο. Αυτό ακριβώς είναι το φαινόμενο της αυτοδιέγερσης και είναι ένας από τους λόγους που οι μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος, αντί να βελτιωθεί η λειτουργία τους με την αντιστάθμιση, χειροτερεύει.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι μέγιστες τιμές αέργου ισχύος που μπορούν να αντισταθμιστούν χωρίς να δημιουργείται αυτοδιέγερση για τριφασικούς κινητήρες 230/400V.

Πίνακας 1.8: Όρια αντιστάθμισης τριφασικών κινητήρων 230/400V(Μπουντάκης, 2012)

Ονομαστική Ισχύς		Επιτρεπτό όριο σε kvar			
		Ταχύτητα περιστροφής (rpm)			
kW	Hp	3000	1500	1000	750
22	30	6	8	9	10
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
110	150	24	29	33	37
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
280	380	57	63	70	79
450	610	87	93	107	117

Συνοψίζοντας, η απορρόφηση άεργου ισχύος από ένα κινητήριο σύστημα, οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, σε αυξημένες θερμικές απώλειες, σε μείωση του συντελεστή λειτουργίας του συστήματος και τέλος σε υπερθέρμανση και καταπόνηση του εξοπλισμού.

Κεφάλαιο 2: Εξοικονόμηση ενέργειας στα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα με χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος για τον έλεγχο αυτών

2.1. Πλεονεκτήματα σύγχρονων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1950, όταν εμφανίστηκε η περιοχή των Ηλεκτρονικών Ισχύος με τον ελεγχόμενο ανορθωτή πυριτίου (SCR), η εξέλιξη μέχρι σήμερα ήταν ραγδαία. Με τις νέες τεχνικές κατασκευής των θυρίστορ βελτιώθηκαν όλα τα χαρακτηριστικά τους και σήμερα πλέον υπάρχει δυνατότητα διαμόρφωσης ισχύος της τάξης των εκατοντάδων MW. Μετά τα θυρίστορ, αναπτύχθηκαν άλλα ημιαγωγία διακοπτικά στοιχεία με βελτιωμένα χαρακτηριστικά για βιομηχανικές εφαρμογές, όπως τα TRIAC, τα θυρίστορ GTO, BJT, MOSFET ισχύος, IGBT, SIT, SITH, MCT κ.ά. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ισχύος με εφαρμογή στη βιομηχανία είναι οι εξής(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου):

- Ανορθωτικές διατάξεις
- Μετατροπείς συνεχούς τάση σε συνεχή
- Αντιστροφείς τάσης
- Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι μια ιδιαίτερη κατηγορία ηλεκτρονικών διατάξεων, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας. Μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος αναφέρεται και ως μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάγκη για την επεξεργασία της ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει από το γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς παρέχεται με σταθερά χαρακτηριστικά. Συνήθως η διαθέσιμη πηγή ισχύος (δίκτυο ισχύος), είναι μια τριφασική πηγή σταθερής τάσης και συχνότητας.

Οι διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος έχουν πρωτεύοντα ρόλο στην εφαρμογή της ηλεκτρικής ισχύος οπουδήποτε απαιτείται ρύθμιση της τάσης, του ρεύματος ή της συχνότητας μιας πηγής. Στην καρδιά των διατάξεων ισχύος βρίσκονται τα ημιαγωγία στοιχεία που λειτουργούν σαν διακόπτες με σκοπό τη διαμόρφωση της ισχύος που ρέει προς το φορτίο.

Η ραγδαία ανάπτυξη του κλάδου των ηλεκτρονικών ισχύος τα τελευταία χρόνια έδωσε τη δυνατότητα για αντικατάσταση των παλιών ηλεκτρομηχανικών μετατροπέων ισχύος με νέες ηλεκτρονικές διατάξεις, τόσο σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όσο και σε οικιακές συσκευές καθημερινής χρήσης με σημαντικά πλεονεκτήματα. Στην ανάπτυξη των συστημάτων ισχύος έχει συμβάλει ιδιαίτερα και η πρόοδος της μικροηλεκτρονικής, η οποία έχει επιτρέψει την υλοποίηση εξαιρετικά ισχυρών ελεγκτών. Παλαιότερα η σχεδίαση της διάταξης ελέγχου, βασιζόνταν σε αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Σήμερα μια μεγάλη ποικιλία μικροεπεξεργαστών, ειδικά σχεδιασμένων για εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, είναι διαθέσιμη από πολλούς κατασκευαστές. Με τη χρήση των μικροεπεξεργαστών η υλοποίηση του ελεγκτή απλοποιείται σημαντικά. Ταυτόχρονα είναι δυνατή η

εκτέλεση πολύπλοκων τεχνικών ελέγχου, με παράλληλη αύξηση της αξιοπιστίας και ελαχιστοποίηση των διαστάσεων της διάταξης. Έτσι, οι σύγχρονες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος με ημιαγωγούς διακόπτες προσφέρουν τα εξής πλεονεκτήματα, έναντι των ηλεκτρομηχανικών διατάξεων(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου):

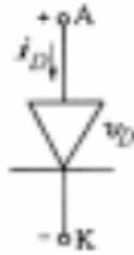
- Ελάχιστες ανάγκες για συντήρηση, δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές δεν έχουν κινητά μέρη.
- Στις περισσότερες βιομηχανικές συσκευές, δυνατότητα αυτοπροστασίας από εξωτερικές αστοχίες και ειδοποίηση του χειριστή για τυχόν βλάβες της συσκευής.
- Μικρό όγκο και βάρος σε σχέση με τις ηλεκτρομηχανικές διατάξεις.
- Σχετικά μικρό κόστος αγοράς και συντήρησης.
- Μικρές απώλειες, επομένως υψηλό βαθμό απόδοσης. Για ορισμένες διατάξεις ο συντελεστής απόδοσης ξεπερνάει το 90%.
- Δεν υπάρχει απαίτηση για ισχυρές βάσεις στήριξης, λόγω της έλλειψης κινητών μερών.
- Αθόρυβη λειτουργία.
- Υψηλή αξιοπιστία, αμεσότητα και ακρίβεια στη ρύθμιση των χαρακτηριστών εξόδου.
- Πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά.

2.2. Είδη σύγχρονων ηλεκτρονικών ισχύος

Στην παρούσα ενότητα της διπλωματικής εργασίας γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των κυριότερων ημιαγωγίμων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά ισχύος, τόσο σε κλασσικές όσο και στις πλέον σύγχρονες εφαρμογές.

2.2.1. Δίοδος ισχύος

Η δίοδος ισχύος είναι μη ελεγχόμενο διακοπτικό στοιχείο με συμπεριφορά που εξαρτάται από τις επιβαλλόμενες τάσεις και ρεύματα. Επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος μόνο προς μια κατεύθυνση αποτελώντας μη ελεγχόμενο ανορθωτή. Χρησιμοποιείται κυρίως για ανόρθωση και ως «δίοδος ελευθέρως ροής» όταν συνδέεται παράλληλα και αντίστροφα με το φορτίο για να παρέχει ένα δρόμο ελεύθερης ροής των επαγωγικών ρευμάτων από το φορτίο και να αποκλεισθεί η ανάπτυξη επικίνδυνων υψηλών επαγωγικών αντίστροφων τάσεων.

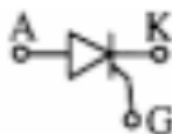


Εικόνα 2.1: Συμβολισμός της διόδου ισχύος(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.2. Θυρίστορ (SCR, Thyristor)

Το θυρίστορ είναι διακοπτικό στοιχείο με τέσσερα ημιαγωγία στρώματα και τρεις ακροδέκτες. Έχει τη δυνατότητα να χειριστεί ισχύ από δεκάδες W μέχρι MW, τη μεγαλύτερη ισχύ από όλα τα ημιαγωγία στοιχεία και με ταχύτητα λειτουργίας μέχρι 10kHz. Η ροή του ρεύματος μεταξύ ανόδου και καθόδου γίνεται προς μία φορά, αλλά είναι δυνατός ο έλεγχος της αγωγής με ένα μικρό σχετικά ρεύμα στην πύλη του θυρίστορ. Σημειώνεται ότι αν και η έναυση γίνεται με απλή εφαρμογή κατάλληλου παλμού, η σβέση δεν μπορεί να γίνει από την πύλη αλλά απαιτεί άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις.

Το θυρίστορ αποτελεί το πιο κοινό στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος και βρίσκει πολλές εφαρμογές. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι ελεγχόμενοι ανορθωτές, οι αντιστροφείς και γενικά η ρύθμιση ισχύος προς το φορτίο. Ειδικά για τους μετατροπείς μεγάλης ισχύος, το θυρίστορ απαιτεί ιδιαίτερη φροντίδα για την προστασία και την επαρκή ψύξη του.



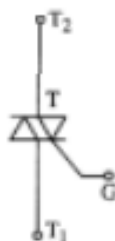
Εικόνα 2.2: Συμβολισμός του θυρίστορ(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.3. Triac

Όπως υποδηλώνει η ονομασία του, το στοιχείο Triac έχει τρεις ακροδέκτες και μπορεί να χειριστεί εναλλασσόμενο ρεύμα. Επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις χωρίς διάκριση, ενώ η αγωγή ή όχι του ρεύματος ελέγχεται με

σήμα στην πύλη. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να διαμορφώσει φτάνει σε αρκετές δεκάδες kW. Κύρια εφαρμογή είναι ο έλεγχος εναλλασσόμενου ρεύματος σε διατάξεις για έλεγχο φωτισμού, θερμοκρασίας ή μικρών κινητήρων, όπως ανεμιστήρων.

Το Triac είναι το μοναδικό ημιαγωγικό στοιχείο που μπορεί πραγματικά να χειριστεί μεγάλη ισχύ και για αυτό το λόγο σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συνήθως δύο αντιπαράλληλα thyristor.

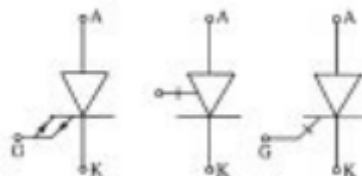


Εικόνα 2.3: Συμβολισμός του Triac(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.4. GTO

Το GTO (Gate-Turn-Off) thyristor ανήκει στην οικογένεια των thyristor, με πρόσθετο χαρακτηριστικό ότι ένας αρνητικός παλμός στην πύλη μπορεί να το θέσει σε αποκοπή, κάτι που επιτυγχάνεται με ειδική διαμόρφωση των ημιαγωγικών στρωμάτων κατά τη φάση της κατασκευής. Η σχεδίαση μετατροπών με GTO είναι απλούστερη συγκριτικά με το thyristor.

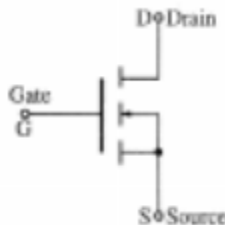
Τα χαρακτηριστικά ισχύος και ταχύτητας των GTO βρίσκονται μεταξύ αυτών των thyristor και αυτών των τρανζίστορ. Τυπικές εφαρμογές τους είναι: μετατροπές dc-dc, αντιστροφείς και ανορθωτές.



Εικόνα 2.4: Συμβολισμοί του GTO(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.5. BJT

Το διπολικό τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor, BJT) είναι γνωστό και ως ενισχυτής σήματος, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε διατάξεις ισχύος. Συμπεριφέρεται ως διακόπτης με έλεγχο από τη βάση. Η ευκολία έναυσης και αποκοπής με εφαρμογή και απομάκρυνση ενός σήματος στη βάση κάνει αυτό το στοιχείο προτιμότερο για μετατροπείς σε ποικίλες εφαρμογές. Το μεγάλο μειονέκτημα των BJT είναι ότι δεν μπορούν να υφίστανται αντίστροφες τάσεις πάνω από μερικές δεκάδες Volt, γεγονός που αποκλείει τις εφαρμογές διαμόρφωσης ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος, εκτός αν χρησιμοποιηθεί δίοδος σε σειρά. Η ταχύτητα λειτουργίας των BJT είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με τα θυρίστορ, αλλά η μέγιστη ισχύς τους είναι πολύ μικρότερη. Αποτελούν το ταχύτερο στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος με αρκετές εφαρμογές σε χαμηλής ισχύος αντιστροφείς και μετατροπείς dc-dc.

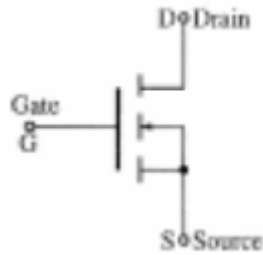


Εικόνα 2.5: Συμβολισμοί του BJT (Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.6. MOSFET

Το MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) είναι γνωστό από παλαιότερα, αλλά τη δεκαετία του 1980 τροποποιήθηκε ώστε να μπορεί να χειριστεί μεγαλύτερη ισχύ και εισήλθε στο χώρο των ηλεκτρονικών ισχύος. Ο έλεγχος της ροής ρεύματος γίνεται μέσω σήματος τάσης στην πύλη. Συνήθως, τα MOSFET βρίσκονται σε αποκοπή μέχρι την εφαρμογή κατάλληλου σήματος, όμως υπάρχει και μια ειδική κατηγορία αυτών των στοιχείων που συμπεριφέρονται αντίστροφα.

Το κύριο πλεονέκτημα των MOSFET είναι η μεγάλη συχνότητα λειτουργίας τους που ξεπερνά τα 100 kHz, ενώ η ισχύς τους περιορίζεται σε μερικά kW. Όμως, για αυτή την ισχύ έχουν προτιμότερα χαρακτηριστικά συγκριτικά με άλλα στοιχεία, όπως ο μικρός χρόνος έναυσης και σβέσης. Λόγω της υψηλής τους ταχύτητας, είναι κατάλληλα για εφαρμογές διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM), διακοπτικά τροφοδοτικά, επαγωγική θέρμανση, ηλεκτροσυγκόλληση και φωτισμό φθορισμού με υψηλή συχνότητα, ειδικά για φορητές συσκευές και οχήματα.



Εικόνα 2.6: Συμβολισμός του MOSFET(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.7. IGBT

Το IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980. Συνδυάζει τα χαρακτηριστικά ενός MOSFET με τα χαρακτηριστικά ενός BJT και αποτελεί σημαντικό στοιχείο ισχύος. Η λειτουργία του IGBT στηρίζεται στην αγωγή του με την εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη, ενώ με την αφαίρεσή της συμβαίνει σβέση. Η συχνότητα λειτουργίας ενός τυπικού IGBT είναι μέχρι περίπου 50 kHz, ενώ η μέγιστη ισχύς που μπορεί να χειριστεί είναι μικρότερη από μερικές δεκάδες εκατοντάδες kW. Βρίσκει ίδιες εφαρμογές με το BJT, όμως με καλύτερα χαρακτηριστικά. Συνήθεις εφαρμογές είναι μετατροπείς dc-dc και αντιστροφεείς.

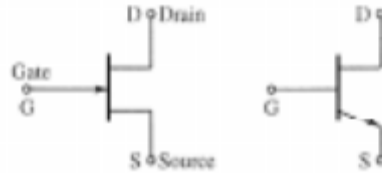


Εικόνα 2.7: Συμβολισμοί του IGBT(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.8. SIT

Το SIT (Static Induction Transistor) θεωρείται το ανάλογο του JFET (Junction Field Effect Transistor) στα ηλεκτρονικά ισχύος. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι αντίστοιχα με αυτά του MOSFET, με τη διαφορά ότι μπορεί να ελέγξει μεγαλύτερη ισχύ με μικρότερη συχνότητα λειτουργίας. Επομένως, από πλευράς ισχύος και ταχύτητας λειτουργίας, το SIT τοποθετείται μεταξύ του MOSFET και του BJT.

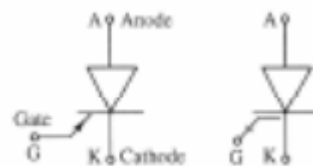
Ένα σημαντικό μειονέκτημα του SIT είναι η μεγάλη πτώση τάσης κατάσταση αγωγής και η μικρή ικανότητα αντοχής σε αντίστροφη τάση. Το SIT δεν συναντάται συχνά σε διατάξεις, αλλά βρίσκει εφαρμογή στην επαγωγική θέρμανση και σε άλλες διατάξεις ισχύος που απαιτούν μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας.



Εικόνα 2.8: Συμβολισμοί του SIT(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.9. SITH

Το SITH (Static Induction Thyristor) έχει ημιαγωγική δομή αντίστοιχη με αυτή του θυρίστορ, αλλά συμπεριφέρεται ως δίοδος με δυνατότητα ελέγχου παρόμοια με του SIT. Το SITH βρίσκεται κανονικά σε κατάσταση αγωγής, όπως η δίοδος, αλλά με την εφαρμογή αρνητικής τάσης στην πύλη τίθεται σε αποκοπή για όσο διάστημα διαρκεί αυτή η τάση. Η συχνότητα λειτουργίας φτάνει τυπικά μέχρι 3 kHz και η ισχύς μέχρι περίπου 200 kVA. Λόγω κατασκευαστικών περιορισμών η ικανότητα αντοχής σε αντίστροφη τάση είναι περιορισμένη. Όπως και το SIT, οι εφαρμογές του SITH δεν είναι συχνές, η κυριότερη είναι η επαγωγική θέρμανση. Ωστόσο, θεωρείται ότι μπορεί να βρει περισσότερες εφαρμογές σε μετατροπείς dc-dc, αντιστροφείς και ανορθωτές.



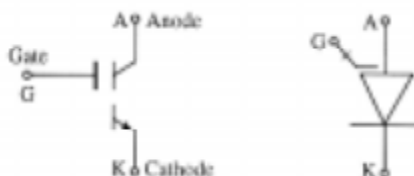
Εικόνα 2.9: Συμβολισμοί του SITH(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.10. MCT

Το MCT (MOS Controlled Thyristor) είναι ο συνδυασμός ενός GTO με δύο MOSFET. Το πρώτο MOSFET χρησιμοποιείται για την έναυση του GTO και το δεύτερο MOSFET για τη σβέση του. Το πλεονέκτημα του συνδυασμού των τριών αυτών στοιχείων σε ένα στοιχείο είναι ότι η έναυση επιτυγχάνεται με μικρότερη ισχύ και

μεγαλύτερη ταχύτητα. Η συχνότητα λειτουργίας του MCT μπορεί να φθάσει μέχρι περίπου τα 20 kHz, οπότε είναι συγκρίσιμο με ένα τυπικό IGBT. Όμως, το MCT πλεονεκτεί έναντι του IGBT στη μικρή πτώση τάσης σε αγωγή. Ο συμβολισμός του MCT μπορεί να είναι διαφορετικός ανάλογα με την κατασκευή.

Το μειονέκτημα του MCT είναι η μικρή ικανότητα αντοχής σε αντίστροφη τάση, αλλά θεωρείται ότι έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει άλλα στοιχεία και να καλύψει μεγάλο εύρος εφαρμογών.



Εικόνα 2.10: Συμβολισμός του MCT(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.2.11. Άλλα στοιχεία

Εκτός από τα παραπάνω στοιχεία, υπάρχουν και άλλα στοιχεία ισχύος με χαρακτηριστικά ισχύος και ταχύτητας μεταξύ της υψηλής ισχύος και χαμηλής ταχύτητας του θυρίστορ και της μικρής ισχύος και υψηλής ταχύτητας του MOSFET. Αυτά τα στοιχεία αποσκοπούν στην κάλυψη ειδικών απαιτήσεων ισχύος και ταχύτητας, συναντώνται σπανιότερα και σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Τέτοια στοιχεία είναι τα εξής(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου):

- ASCR (Assymetric Silicon Control Rectifier)
- GATT (Gate Assisted Turn-Off Thyristor)
- RCT (Reverse Conducting Thyristor)

2.3. Σύγχρονες διατάξεις και μετατροπείς ισχύος

Όπως αναλύθηκε και ανωτέρω, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση εφαρμογών, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς με θυρίστορ (μεγάλα φορτία υπό υψηλές τάσεις και μεγάλα ρεύματα) ή τρανζίστορ ισχύος με σπουδαιότερο εκπρόσωπο το IGBT (για μικρότερης κλίμακας ισχύ) κ.ο.κ. Ειδικά στις περιπτώσεις υψηλών συχνοτήτων λειτουργίας των μετατροπέων, για παράδειγμα 500kHz, χρησιμοποιούνται τρανζίστορ MOSFET. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετατροπείς συντονισμού, οι οποίοι γενικά είναι μικρής ισχύος.

Ανάλογα με τη μορφή της ισχύος εισόδου και εξόδου, οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας (ισχύος) που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία διακρίνονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες(Μαλέσιος & Παπαδόπουλος, 2009):

- Μετατροπείς ac-dc ή ανορθωτές (Rectifiers): Ανορθωτές ονομάζονται οι διατάξεις ισχύος, οι οποίες μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Ανάλογα με τη μορφή της εναλλασσόμενης εισόδου οι ανορθωτές διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς (διφασικούς, τριφασικούς, εξαφασικούς). Ακόμη, διακρίνονται σε ελεγχόμενους και μη ελεγχόμενους, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μεταβαλλόμενη ή σταθερή.
- Μετατροπείς dc-ac ή Αντιστροφείς (Inverters): Οι αντιστροφείς μετατρέπουν την ενέργεια συνεχούς μορφής σε εναλλασσόμενη. Η λειτουργία τους είναι δηλαδή αντίθετη από εκείνη των ανορθωτών. Η έξοδος των αντιστροφών είναι μονοφασική είτε πολυφασική (συνήθως τριφασική). Επίσης, η συχνότητα και το πλάτος της τάσης ή του ρεύματος εξόδου είναι ελεγχόμενα.
- Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (dc-dc converters, choppers): Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη συνεχή τάση με ορισμένο πλάτος και πολικότητα σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος ή/και πολικότητα. Διακρίνονται σε μετατροπείς υποβιβασμού (step-down) και ανύψωσης (step-up) της τάσης, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της τάσης εισόδου. Ακόμη, διακρίνονται σε μετατροπείς με απομόνωση και χωρίς απομόνωση της εξόδου από την είσοδό τους
- Μετατροπείς εναλλασσόμενου ρεύματος ή Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters): Οι κυκλομετατροπείς μετατρέπουν απευθείας, την εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας, σε εναλλασσόμενη τάση με ρυθμιζόμενο πλάτος και συχνότητα. Ο κυκλομετατροπέας ονομάζεται υποβιβασμού συχνότητας (step-down) όταν η συχνότητα εξόδου είναι μικρότερη της συχνότητας εισόδου. Διαφορετικά χαρακτηρίζεται ως ανύψωσης συχνότητας (step-up). Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω διάκριση των μετατροπέων ισχύος δεν είναι απόλυτα ακριβής, καθώς προϋποθέτει ότι η ροή της ισχύος είναι μονόδρομη, από την είσοδο προς την έξοδο του μετατροπέα. Στην πραγματικότητα, η ροή της ισχύος στους περισσότερους μετατροπείς είναι αμφίδρομη. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς μπορεί να ρέει και από την έξοδο του μετατροπέα προς την είσοδό του. Η αμφίδρομη ροή της ισχύος εξηγείται ενδεικτικά στην περίπτωση του μετατροπέα που χαρακτηρίστηκε ως "ανορθωτής". Ο μετατροπέας αυτός λειτουργεί συμβατικά ως ανορθωτής, δηλαδή μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση εισόδου σε συνεχή τάση στην έξοδο. Στην περίπτωση αυτή η ροή της ισχύος είναι θετική, από την είσοδο στην έξοδο του μετατροπέα. Ο ίδιος μετατροπέας με κατάλληλο έλεγχο των διακοπών του μπορεί να λειτουργήσει και ως αντιστροφέας, μεταφέροντας αρνητική ισχύ. Σε αυτή την περίπτωση, ο μετατροπέας μεταφέρει ισχύ συνεχούς μορφής από την έξοδό του, στο εναλλασσόμενο δίκτυο. Η αμφίδρομη ροή της ισχύος προϋποθέτει ότι ο μετατροπέας

μπορεί να λειτουργήσει και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου i_o - u_o όπου, i_o είναι το ρεύμα εξόδου και u_o η τάση εξόδου του μετατροπέα. Σ' ένα μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων η φορά του ρεύματος i_o μπορεί να αντιστραφεί, ενώ η πολικότητα της u_o μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος. Ο συμβατικός ανορθωτής με SCR λειτουργεί μόνο στα δύο από τα τέσσερα τεταρτημόρια και ειδικότερα στο πρώτο και το δεύτερο.

Είναι αρκετά συνηθισμένο για μια ολοκληρωμένη συσκευή να αποτελείται από συνδυασμό τοπολογιών των παραπάνω κατηγοριών. Οι διατάξεις ηλεκτρονικών στοιχείων μπορούν να ταξινομηθούν με διαφορετικά κριτήρια. Με βάση την ισχύ, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου):

- Διατάξεις χαμηλής ισχύος και υψηλής διακοπτικής συχνότητας: Βασικό κριτήριο σχεδιασμού για διατάξεις χαμηλής ισχύος αποτελεί η ελαχιστοποίηση του κόστους και του μεγέθους τους. Αυτές οι συσκευές λειτουργούν σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες, γεγονός που επιτρέπεται από την ισχύ τους και επιβάλλεται από το μικρό τους μέγεθος, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα απαιτούμενα φίλτρα για την εξάλειψη των ανώτερων αρμονικών.
- Διατάξεις υψηλής ισχύος: σε διατάξεις υψηλής ισχύος, ακόμα και μια μικρή βελτίωση του συντελεστή απόδοσης μπορεί να σημαίνει εξοικονόμηση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Για αυτό το λόγο, εκτός από την ελαχιστοποίηση του κόστους, βασικό κριτήριο του σχεδιασμού των συσκευών μεγάλης ισχύος αποτελεί η βελτίωση του συντελεστή απόδοσης.

Ανάλογα με τον τρόπο μετάβασης των διακοπτικών τους στοιχείων, οι μετατροπείς ισχύος διακρίνονται ακόμη σε τρεις κατηγορίες(Μαλέσιος & Παπαδόπουλος, 2009):

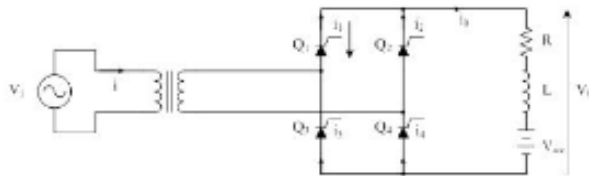
- Μετατροπείς με φυσική μετάβαση (natural, line, loadcommutated ή phasecontrolledconverters): Οι διακόπτες των μετατροπέων με φυσική μετάβαση ανοίγουν ή και κλείνουν με τη βοήθεια της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου (εισόδου), ή των συνθηκών που επιβάλλει το φορτίο. Οι μετατροπείς με φυσική μετάβαση έχουν περιορισμένες δυνατότητες και χρήσεις. Η τάση εξόδου των μετατροπέων με φυσική μετάβαση αποτελείται από τμήματα της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ισχυρές αρμονικές συνιστώσες στην είσοδο και την έξοδο του μετατροπέα. Έτσι, ένας αντιστροφέας τάσης δεν μπορεί να ανήκει στην κατηγορία των μετατροπέων με φυσική μετάβαση. Αντίθετα, οι τυπικοί ανορθωτές με διόδους ή SCR και οι κυκλομετατροπείς υποβιβασμού της συχνότητας, είναι μετατροπείς με φυσική μετάβαση.
- Μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση (forcecommutated ή switch-modeconverters): Η κατάσταση των διακοπών στους μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση ορίζεται αποκλειστικά από τη μονάδα ελέγχου της διάταξης ισχύος. Οι διακόπτες των μετατροπέων αυτών λειτουργούν συνήθως

σε υψηλές συχνότητες και έτσι μπορούν να θεωρηθούν ως διακοπτικοί ενισχυτές ισχύος με υψηλό κέρδος (switching-mode power amplifiers).

- Μετατροπείς συντονισμού (resonant converters): Η έναυση και η σβέση των διακοπών στους μετατροπείς συντονισμού επιτελείται όταν η τάση στα άκρα τους, ή/και το ρεύμα που τους διαρρέει, είναι μηδέν. Επειδή οι περισσότερες τοπολογίες των μετατροπέων αυτών απαιτούν κάποιο κύκλωμα συντονισμού LC, επικράτησε να ονομάζονται μετατροπείς συντονισμού. Τα πλεονεκτήματα των μετατροπέων συντονισμού έναντι των δύο προηγούμενων τύπων είναι ότι περιορίζονται δραστικά οι μεταβατικές απώλειες ισχύος στους διακόπτες και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

2.3.1. Μη ελεγχόμενοι ανορθωτές

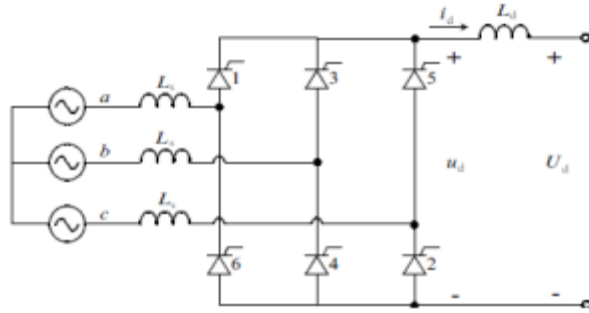
Η μονοφασική ανορθωτική γέφυρα είναι μία από τις απλούστερες αλλά πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις ισχύος. Η τάση εισόδου της γέφυρας είναι η ημιτονοειδής τάση του δικτύου. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η τοπολογία μιας κλασσικής γέφυρας ανόρθωσης με τέσσερις διόδους. Η κυμάτωση στην έξοδο μπορεί να ελαττωθεί με την προσθήκη πυκνωτή ή πηνίου εξομάλυνσης.



Εικόνα 2.11: Τοπολογία μονοφασικής ανορθωτικής γέφυρας με διόδους (Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

Η μονοφασική ανορθωτική γέφυρα χρησιμοποιείται σε όλα τα τροφοδοτικά οικιακών συσκευών με κυκλώματα που απαιτούν συνεχή τάση για να λειτουργήσουν και για ισχύ που ξεκινά από μερικά Watt. Σε βιομηχανικές εφαρμογές, η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται μόνο για μικρή ισχύ. Η χρήση σε μεγαλύτερη ισχύ αποφεύγεται λόγω της κυμάτωσης της τάσης εξόδου που δημιουργεί απαίτηση για ογκώδεις διατάξεις εξομάλυνσης.

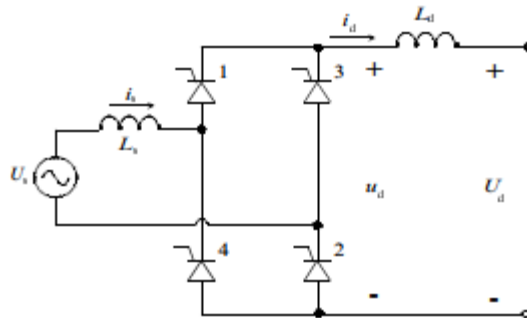
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη τριφασικής γέφυρας ανόρθωσης με έξι διόδους. Η τριφασική ανορθωτική γέφυρα παράγει στην έξοδό της μια συνεχή τάση πολύ καλής ποιότητας με ελάχιστες κυματώσεις (χωρίς εξομάλυνση, η κυμάτωση είναι μόλις 6,5%). Αφού στους βιομηχανικούς χώρους είναι δεδομένη η ύπαρξη τριφασικής παροχής, η τριφασική γέφυρα χρησιμοποιείται κατά κόρον σε βιομηχανικές εφαρμογές. Γενικά, χρησιμοποιείται όπου απαιτείται συνεχή τάση σταθερού πλάτους. Επιπλέον, αποτελεί τη διάταξη που τροφοδοτεί τους αντιστροφείς ισχύος με τη συνεχή τάση που χρειάζεται για τη λειτουργία τους.



Εικόνα 2.12: Τοπολογία τριφασικής ανορθωτικής γέφυρας με διόδους(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

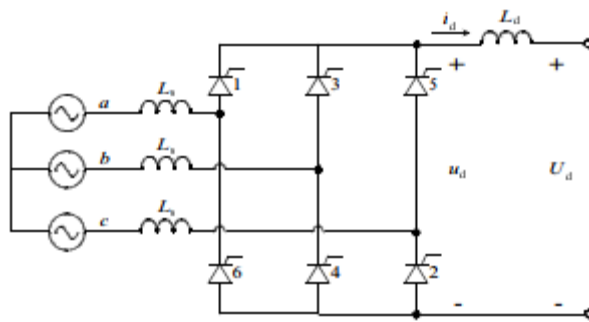
2.3.2. Ελεγχόμενοι ανορθωτές

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη μονοφασικής γέφυρας με τέσσερα θυρίστορ. το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της γέφυρας είναι η μεγάλη κυμάτωση της τάσης στην έξοδο και για αυτό το λόγο απαιτείται η χρήση διάταξης εξομάλυνσης στην έξοδο.



Εικόνα 2.13: Τοπολογία ελεγχόμενης μονοφασικής ανορθωτικής γέφυρας(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η τοπολογία της τριφασικής γέφυρας με έξι θυρίστορ. Μεταβάλλοντας τη γωνία έναυσης των θυρίστορ επιτρέπεται ο έλεγχος του πλάτους της τάσης εξόδου της γέφυρας. Εάν στην έξοδο είναι συνδεδεμένο ένα ενεργητικό φορτίο (φορτίο που μπορεί να προσφέρει ισχύ), είναι δυνατό η γέφυρα να λειτουργήσει και ως αντιστροφέας προσφέροντας ισχύ στο δίκτυο τροφοδοσίας.



Εικόνα 2.14: Τοπολογία ελεγχόμενης τριφασικής ανορθωτικής γέφυρας(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

Η τριφασική ανορθωτική γέφυρα με θυρίστορ αποτελεί βέλτιστη λύση για μετατροπή ισχύος από εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή. Χρησιμοποιείται με μεγάλη επιτυχία στη βιομηχανία σε ηλεκτροχημικές διαδικασίες (επιμεταλλώσεις, ανοδίωση, παραγωγή υγραερίου, επεξεργασία αλουμινίου, επεξεργασία μετάλλων), στον έλεγχο μηχανών συνεχούς ρεύματος, στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχές ρεύμα, σε ηλεκτρομαγνήτες, στη φόρτιση μπαταριών κ.ά.

2.3.3. Μετατροπείς συνεχούς τάση σε συνεχή

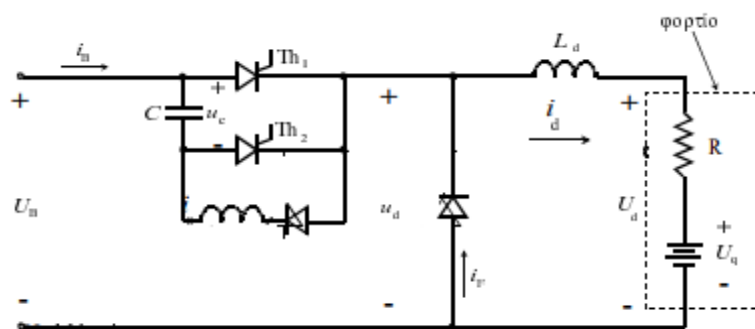
Αυτοί οι μετατροπείς εκτελούν μετατροπή συνεχούς τάσης σε συνεχή διαφορετικού πλάτους. Σε αντίθεση με τους γραμμικούς μετατροπείς, οι διακοπτικοί μετατροπείς εμπεριέχουν ένα ενδιάμεσο στάδιο μετατροπής σε τάση παλμικής μορφής υψηλής συχνότητας και επιτυγχάνεται υψηλός συντελεστής απόδοσης. Στη συνέχεια αυτή η παλμική τάση υφίσταται ανόρθωση και εξομάλυνση ώστε να λαμβάνεται η συνεχής τάση της εξόδου. Πολλές φορές η τάση εισόδου περιέχει κυματώσεις, οπότε ο έλεγχος της διάταξης πρέπει να είναι γρήγορος, ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή μέση τιμή της τάσης στην έξοδο. Για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου, χρησιμοποιείται κατάλληλο φίλτρο και για μετατροπείς μικρής ισχύος, όπου πρωταρχικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του όγκου, επιδιώκεται μεγάλη διακοπτική συχνότητα.

Όσον αφορά την παλμοδότηση, αυτοί οι μετατροπείς έχουν συνήθως σταθερή διακοπτική συχνότητα. Πρακτικά, η συχνότητα λειτουργίας κυμαίνεται στην περιοχή από 50 έως 200 kHz ανάλογα με την ισχύ εξόδου. Η ροή ρεύματος του μετατροπέα μπορεί να είναι συνεχής (δηλαδή ροή ρεύματος από το πηνίο εξομάλυνσης καθ' όλη τη διάρκεια της διακοπτικής περιόδου) ή ασυνεχής.

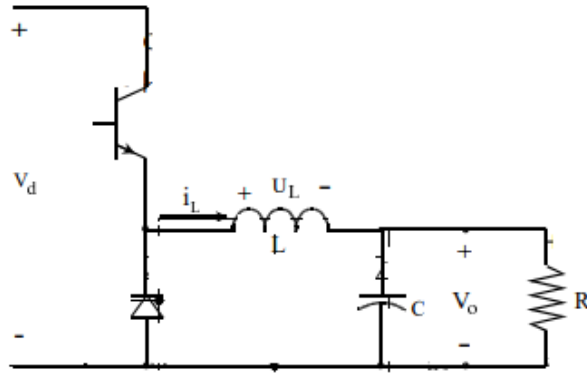
Η κύρια χρήση αυτών των μετατροπέων είναι τροφοδοτικά ηλεκτρονικών υπολογιστών, φορτιστές συσσωρευτών και ειδικά συσσωρευτών UPS. Σε μεγαλύτερη ισχύ, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένοι μετατροπείς συνεχούς τάση σε συνεχή(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου):

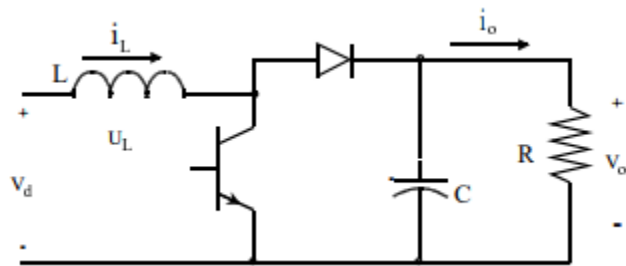
- Ρυθμιστής συνεχούς τάσης με θυρίστορ: ο ρυθμιστής συνεχούς τάσης χρησιμοποιεί δύο θυρίστορ για να ελέγξει την ισχύ που παρέχεται σε έναν καταναλωτή συνεχούς ρεύματος. Το δεύτερο θυρίστορ χρησιμοποιείται για τη σβέση του πρώτου και αντίστροφα. Αυτός ο ρυθμιστής λειτουργεί σε χαμηλή διακοπτική συχνότητα (μέχρι 2 kHz) και χρησιμοποιείται κυρίως για έλεγχο μηχανών συνεχούς ρεύματος.
- Τοπολογία υποβιβασμού τάσης (buck): Μεταβάλλοντας το λόγο κατάτμησης στην τυπική τοπολογία buck, γίνεται δυνατή η μεταβολή της τάσης εξόδου του μετατροπέα σε αναλογία με το λόγο κατάτμησης. Η τοπολογία υποβιβασμού τάσης βρίσκει εφαρμογές στην κατασκευή παλμοτροφοδοτικών και στην οδήγηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος.
- Τοπολογία ανύψωσης τάσης (boost): η τοπολογία ανύψωσης τάσης χρησιμοποιείται στην κατασκευή παλμοτροφοδοτικών και για τον έλεγχο κινητήρων συνεχούς ρεύματος (για την ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση).
- Τοπολογία ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης (buck- boost): αυτός ο μετατροπέας αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων και επιτυγχάνει ανύψωση και υποβιβασμό της τάσης εισόδου. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή παλμοτροφοδοτικών.
- Τοπολογία forward: ο μετατροπέας forward είναι παρόμοιος με το μετατροπέα buck όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας, με βασικότερη διαφορά την ύπαρξη του μετασχηματιστή. Αυτός ο μετασχηματιστής είναι κατάλληλα κατασκευασμένος ώστε να λειτουργεί στη διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα (χρήση πυρήνων από φερίτη).
- Μετατροπέας flyback: ο μετατροπέας flyback είναι αντίστοιχος του μετατροπέα buck–boost, με προσθήκη του μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση.



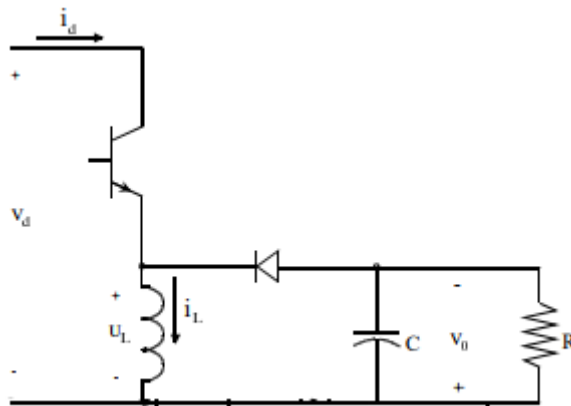
Εικόνα 2.15: Ρυθμιστής ρεύματος με θυρίστορ(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)



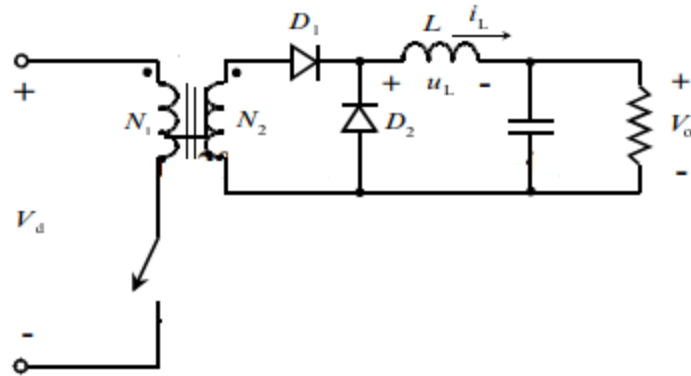
Εικόνα 2.16: Μετατροπέας τύπου buck(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)



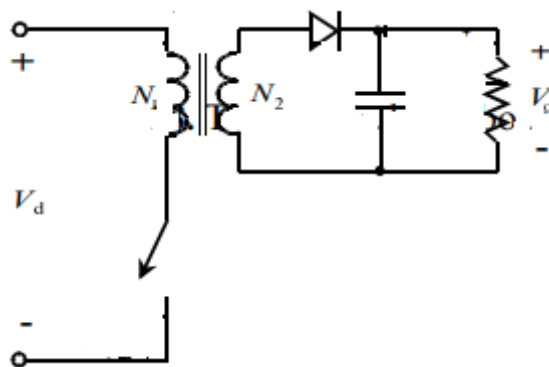
Εικόνα 2.17: Μετατροπέας τύπου boost(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)



Εικόνα 2.18: Τοπολογία buck – boost(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)



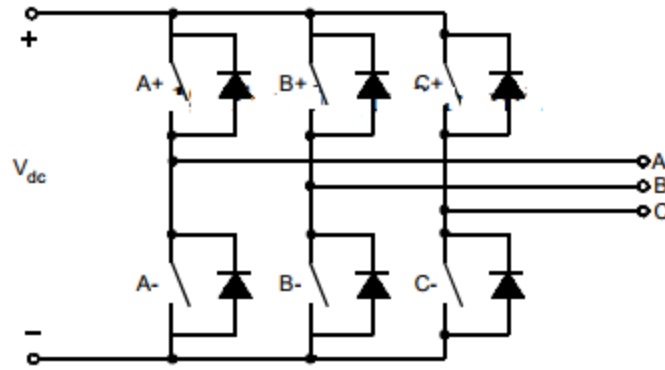
Εικόνα 2.19: Τοπολογία forward(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)



Εικόνα 2.20: Τοπολογία flyback(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.3.4. Αντιστροφείς

Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθεται η τοπολογία του κυκλώματος ισχύος ενός τριφασικού αντιστροφέα τάσης τροφοδοτούμενου από συνεχή τάση.

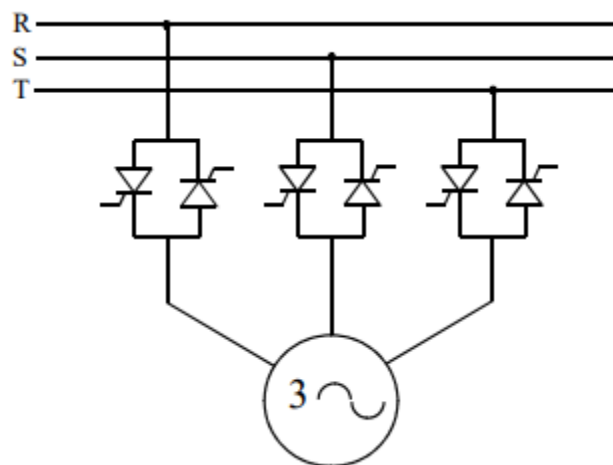


Εικόνα 2.21: Τριφασικός αντιστροφέας(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

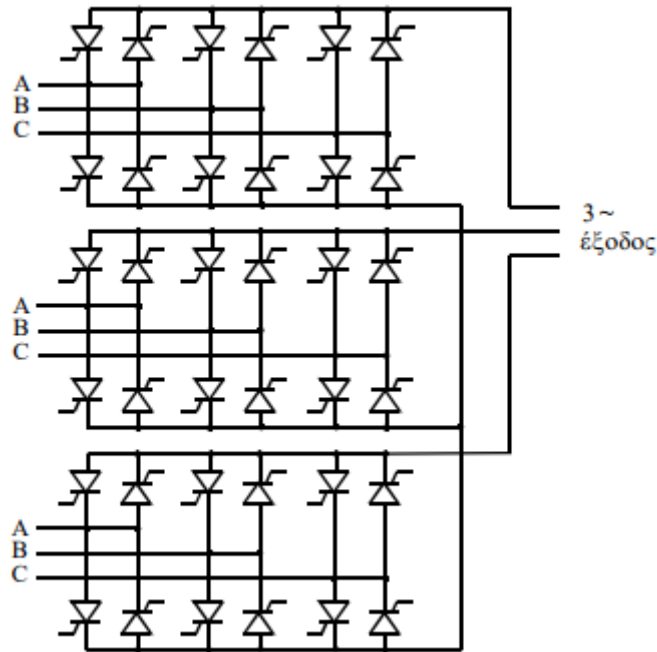
Οι διακόπτες στο παραπάνω σχήμα συμβολίζουν τα ημιαγώγιμα στοιχεία ισχύος με ελεγχόμενη έναυση και σβέση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν chopper, BJT, MOSFET ισχύος, IGBT. Κάθε κλάδος του αντιστροφέα αποτελείται από ένα ζεύγος στοιχείων τα οποία παλμοδοτούνται μέσω κατάλληλης τεχνικής παλμοδότησης με συμπληρωματικούς παλμούς.

2.3.5. Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη

Αυτή η κατηγορία των μετατροπέων μπορεί να υποδιαιρεθεί σε δύο υποκατηγορίες: στους μετατροπείς που μετατρέπουν εναλλασσόμενη τάση σε εναλλασσόμενη ίδιας συχνότητας και μεταβλητού πλάτους και σε εκείνους που μετατρέπουν εναλλασσόμενη τάση σε εναλλασσόμενη διαφορετικής συχνότητας και πλάτους. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αντιπαράλληλες γέφυρες με θυρίστορ και στη δεύτερη οι κυκλικοί μετατροπείς ή κυκλομετατροπείς.



Εικόνα 2.22: Γέφυρα με αντιπαράλληλα θυρίστορ(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)



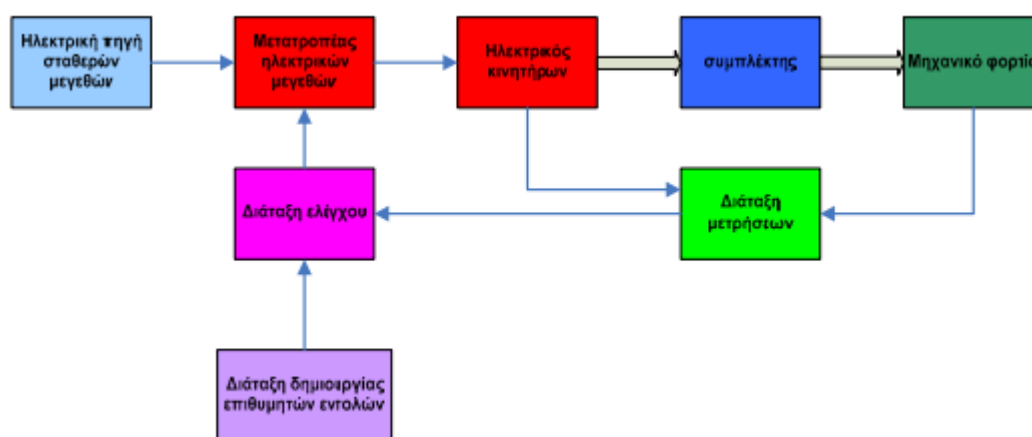
Εικόνα 2.23: Κύκλωμα ισχύος κυκλομετατροπέα(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

2.4. Εξοικονόμηση ενέργειας ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων με τη χρήση ελεγχόμενων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος

Με την έλευση των ηλεκτρονικών ισχύος δόθηκε στους μηχανικούς η δυνατότητα να κατασκευάσουν προηγμένες διατάξεις ελέγχου και να αναπτύξουν τους απαραίτητους για αυτές αλγορίθμους. Ιδιαίτερα με τους μετατροπείς ισχύος δόθηκε η δυνατότητα τροφοδοσίας των κινητήριων με τάσεις μεταβλητού πλάτους και συχνότητας, γεγονός που επέτρεψε τον πλήρη έλεγχό τους με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο. Σημαντικό ρόλο βεβαίως διαδραμάτισε και η εισαγωγή νέων και διαρκώς εξελισσόμενων τεχνικών ελέγχου, οι οποίες σήμερα επιτρέπουν τον έλεγχο με ηλεκτρονικό τρόπο όπως για παράδειγμα μέσω ενός ψηφιακού ή ενός αναλογικού υπολογιστή. Κάθε σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών προδιαγραφών συνοδεύεται απαραίτητως από τον κατάλληλο μετατροπέα ισχύος για τον οποίο έχει εγκατασταθεί και αναπτυχθεί το κατάλληλο υλικό και λογισμικό ελέγχου.

Για ένα δεδομένο φορτίο ο κινητήρας μετατρέπει ένα αντίστοιχο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010). Ένας σημαντικός αριθμός κινητηρίων συστημάτων έχει την απλή μορφή, όπου δεν απαιτείται συστηματικός αυτόματος έλεγχος, όπως είναι κάποια συστήματα αντλιών, ανεμιστήρων, ανυψωτικών μηχανημάτων κτλ. Υπάρχει όμως ένας πολύ μεγάλος

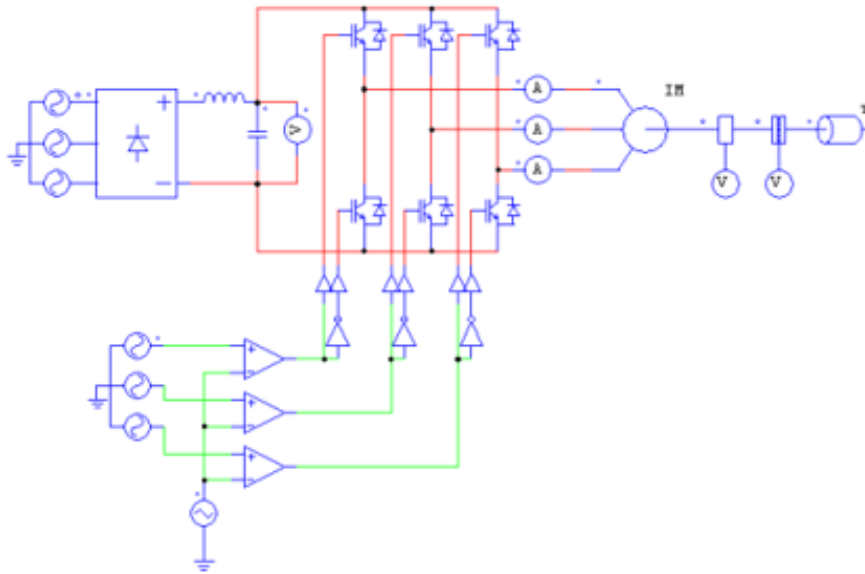
αριθμός ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων, στα οποία είναι απαραίτητος ο έλεγχος της λειτουργίας τους, με σκοπό να επιτυγχάνεται η διατήρηση ορισμένων μεγεθών σε επιθυμητές τιμές, σταθερές ή χρονικά μεταβαλλόμενες σύμφωνα με προβλεπόμενο χρονοδιάγραμμα. Ως παραδείγματα μπορούν να αναφερθούν αντλητικά συστήματα ελεγχόμενης λειτουργίας, εργαλειομηχανές, ηλεκτροκίνητα οχήματα, κλιματιστικά μηχανήματα, πλήθος βιομηχανικών διατάξεων για τη διεκπεραίωση της παραγωγικής διαδικασίας όπως είναι η χαρτοποιία, η ποτοποιία, η παραγωγή τροφίμων γενικώς, η κλωστοϋφαντουργία κτλ. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η βασική δομή ενός ελεγχόμενου ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι η τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα με μεταβλητά ηλεκτρικά μεγέθη, για παράδειγμα μεταβλητή συχνότητα, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η παραγόμενη ροπή στον άξονά του ή η ταχύτητά του να μεταβάλλονται κατάλληλα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φορτίου και γενικά σύμφωνα με προδιαγραφόμενη επιθυμητή λειτουργία (επιθυμητές εντολές).



Εικόνα 2.24: Βασική δομή ελεγχόμενου ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010)

Ο έλεγχος των μηχανών επαγωγής είναι πολύ πιο πολύπλοκος από αυτών των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι δύο κύριες πηγές δυσκολιών είναι η ανάγκη εξόδου μεταβλητής συχνότητας και η μη γραμμικότητα και πολυπλοκότητα του αναλυτικού μοντέλου της μηχανής, που εντείνεται ακόμα περισσότερο αν ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα για τις τιμές των παραμέτρων του(Γεωργάλας, 2011).

Στην εικόνα που ακολουθεί παρατίθεται εξομοίωση ελέγχου ενός επαγωγικού κινητήρα:



Εικόνα 2.25: Εξομοίωση ελέγχου επαγωγικού κινητήρα(Γεωργάλας, 2011)

2.4.1. Κύκλωμα ισχύος

Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη ενότητα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το Mosfet (MetalOxideSemiconductorFieldEffectTransistor) είναι ημιαγωγικό στοιχείο τριών ακροδεκτών στο οποίο η πύλη ελέγχει τη ροή του ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου που είναι η πηγή και η υποδοχή.

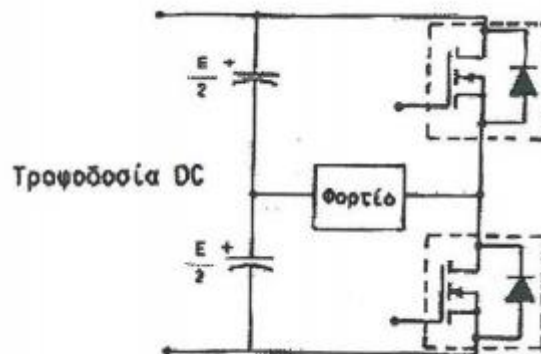
Εάν συγκριθούν οι χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος ενός Mosfet και ενός τρανζίστορ ισχύος, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το Mosfet λέγεται ότι είναι ημιαγωγικό στοιχείο τάσης, ενώ το τρανζίστορ στοιχείο ρεύματος.
- Η αντίσταση αγωγής του Mosfet είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αγωγής του τρανζίστορ.
- Το Mosfet είναι καλύτερη πηγή σταθερού ρεύματος συγκριτικά με το τρανζίστορ.

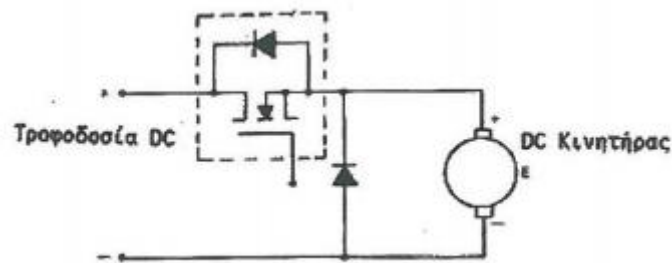
Στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, τα Mosfet λειτουργούν σαν διακόπτες για τον έλεγχο της ισχύος φορτίου όπως γίνεται και με τα τρανζίστορ ισχύος. Επομένως το Mosfet λειτουργεί είτε στην περιοχή αποκοπής (cut-off region), όταν δεν άγει, είτε στην ωμική περιοχή όταν άγει.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά κυκλώματα εφαρμογών για τα Mosfet. Στο πρώτο σχήμα παρουσιάζεται ένας μετατροπέας dc-dc σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας όπου τα κύρια ημιαγωγικά στοιχεία είναι Mosfet. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα chopper που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα

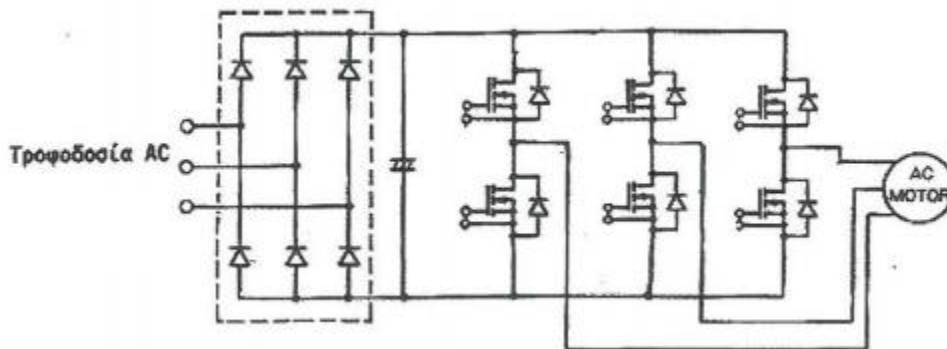
συνεχούς ρεύματος. Στο τελευταίο σχήμα παρουσιάζεται ένα κύκλωμα ενός τριφασικού αντιστροφέα dc-ac, ο οποίο οδηγεί ένα κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.



Εικόνα 2.26: Κύκλωμα μετατροπέα dc-dc σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας



Εικόνα 2.27: Κύκλωμα chopper για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα



Εικόνα 2.28: Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα

Τα τμήματα που αποτελούν ένα τυπικό κινητήριο σύστημα είναι τα εξής(Γεωργάλας, 2011):

- Μονάδα ελέγχου: περιέχει ελεγκτές οι οποίοι συγκρίνοντας το σήμα αναφοράς και το σήμα ανάδρασης δημιουργούν τον κλειστό βρόγχο ανάδρασης. Η μονάδα αυτή υλοποιεί κάποιον αλγόριθμο ελέγχου, την “λογική” που οδηγεί το κινητήριο σύστημα στην επιθυμητή κατάσταση

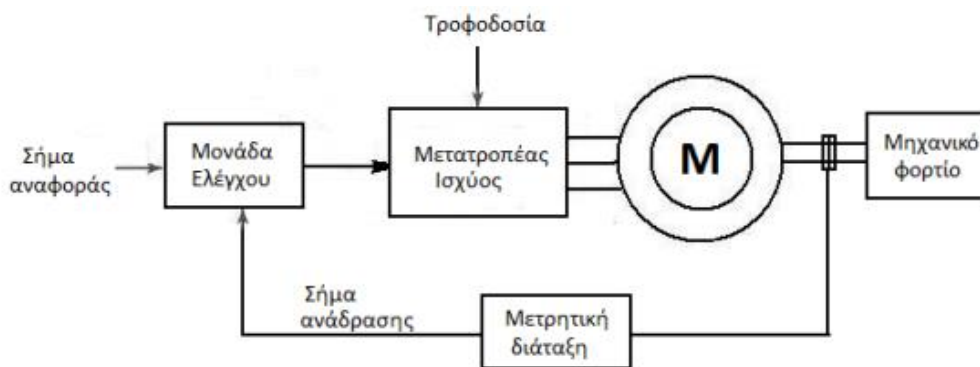
λειτουργίας. Η έξοδος της μονάδας ελέγχου είναι ένα σήμα τάσεως, ρεύματος ή συχνότητας, που ελέγχει το μετατροπέα ισχύος.

- Μετατροπέας ισχύος: τροφοδοτεί τον κινητήρα με ρεύμα και τάση. Ο μετατροπέας ισχύος τροφοδοτείται με dc τροφοδοσία, που προκύπτει από το δίκτυο με την μεσολάβηση ανορθωτικής διάταξης. Ο έλεγχος των διακοπτικών του στοιχείων γίνεται με την χρήση του σήματος που λαμβάνεται από την έξοδο της μονάδας ελέγχου.
- Μετρητικές διατάξεις: χρησιμοποιούνται για την δημιουργία σημάτων ανάδρασης. Ανάλογα τις ανάγκες για τη λειτουργία της μονάδας ελέγχου, μετρούνται μεγέθη όπως ταχύτητα δρομέα, ρεύμα, μαγνητική ροή, τάση κτλ. Οι μετρητικές διατάξεις μετατρέπουν τις μετρήσεις αυτές σε σήματα τάσης ώστε να επεξεργασθούν από την μονάδα ελέγχου.

Στη γενική τους μορφή, τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης αποτελούν ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά συστήματα που αποτελούνται από τις εξής βαθμίδες(Γεωργάλας, 2011):

- Πηγή ισχύος
- Μετατροπέας ισχύος
- Ηλεκτρική μηχανή
- Φορτίο
- Σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου

Το κύκλωμα ισχύος περιλαμβάνει επίσης τις βαθμίδες της πηγής ισχύος, του μετατροπέα ισχύος, της ηλεκτρικής μηχανής και του φορτίου. Το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει και την βαθμίδα του συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου.



Εικόνα 2.29: Τυπικό κύκλωμα ισχύος(Γεωργάλας, 2011)

Μεταξύ τους αυτές οι βαθμίδες διασυνδέονται διότι μέσω του κυκλώματος ισχύος υπάρχει ροή μεγάλης ποσότητας ενέργειας (συγκριτικά με το κύκλωμα ελέγχου) και η ενέργεια αυτή έχει την ιδιότητα να είναι αμφίδρομη μεταξύ των βαθμίδων. Είναι δυνατόν δηλαδή είτε ηλεκτρική ενέργεια να μετατρέπεται και να μεταφέρεται προς την ηλεκτρική μηχανή, η οποία τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρικός κινητήρας, και να αποδίδει ως μηχανική στο φορτίο, είτε περίσσεια μηχανικής ενέργειας που διαθέτει το φορτίο να μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία

μέχρι τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρική γεννήτρια, και να επιστρέφει μέσω του μετατροπέα προς την πηγή ηλεκτρικής ισχύος.

Από την άλλη, το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει όλο εκείνο το υλικό και το λογισμικό που είναι απαραίτητο για την παρακολούθηση και τις δράσεις ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Το κύκλωμα ελέγχου λαμβάνει μετρήσεις (αναδράσεις) από κατάλληλα αισθητήρια (παραδείγματος χάριν για τα ρεύματα ή τις τάσεις των φάσεων, την ταχύτητα του δρομέα, την μαγνητική ροή εντός της μηχανής κ.ά.) παρατηρεί, συγκρίνει και εκτιμά χαρακτηριστικά και κρίσιμα μεγέθη του συστήματος και μέσω ενός αλγορίθμου ελέγχου τροποποιεί μέσω κατάλληλης παλμοδότησης των ηλεκτρονικών ισχύος, το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης εισόδου της ηλεκτρικής μηχανής, ώστε το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης να έχει την επιθυμητή απόκριση(Γεωργάλας, 2011).

Η κάθε μία από τις παραπάνω βαθμίδες απαιτείται να λειτουργεί με την μέγιστη απόδοση και με την καλύτερη δυνατή συνεργασία με τις υπόλοιπες βαθμίδες ώστε το συνολικό σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα. Η σύγχρονη τάση μάλιστα για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών απαιτήσεων προστάζει το συνολικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση του συστήματος μετατροπέα-μηχανής-συστήματος ελέγχου, έτσι ώστε η αλληλεπίδρασή τους κατά την λειτουργία να δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Με την τεχνολογική ανάπτυξη και βελτίωση των ηλεκτρονικών ισχύος έχει μειωθεί το κόστος των ηλεκτρονικών στοιχείων οδήγησης των κινητήριων συστημάτων ενώ έχει αυξηθεί η αξιοπιστία τους. Ως αποτέλεσμα, ο έλεγχος των κινητήριων συστημάτων συμφέρει οικονομικά σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, ενώ προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για την αντιμετώπιση σχεδόν οποιουδήποτε προβλήματος ελέγχου. Πλέον, χρησιμοποιούνται σε μια πολύ ευρεία περιοχή ισχύος, από συστήματα μεταβλητής ταχύτητας αντλιών για την ρύθμιση της ροής, μέχρι πολύ ακριβείς ελεγκτές θέσης των ρομπότ.

Η χρήση ελεγχόμενων κινητήριων συστημάτων σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές προκύπτει από τους εξής λόγους(Γεωργάλας, 2011):

- Προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας, αύξηση της παραγωγής και παράλληλη μείωση του κόστους της.
- Πολλές εφαρμογές απαιτούν τη λειτουργία του κινητήρα σε μεταβλητή ταχύτητα ή απαιτούν έλεγχο θέσης.
- Προσφέρουν βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος, ελέγχοντας το ρυθμό επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων των μηχανών.

Η επιλογή του κινητήριου συστήματος εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής καθώς διαφορετικές τεχνικές και συστήματα ελέγχου φέρουν άλλα χαρακτηριστικά ακρίβειας και απόκρισης, φυσικά με διαφορετικό οικονομικό κόστος και πολυπλοκότητα. Ακόμη, το είδος και το μέγεθος του κινητήρα που

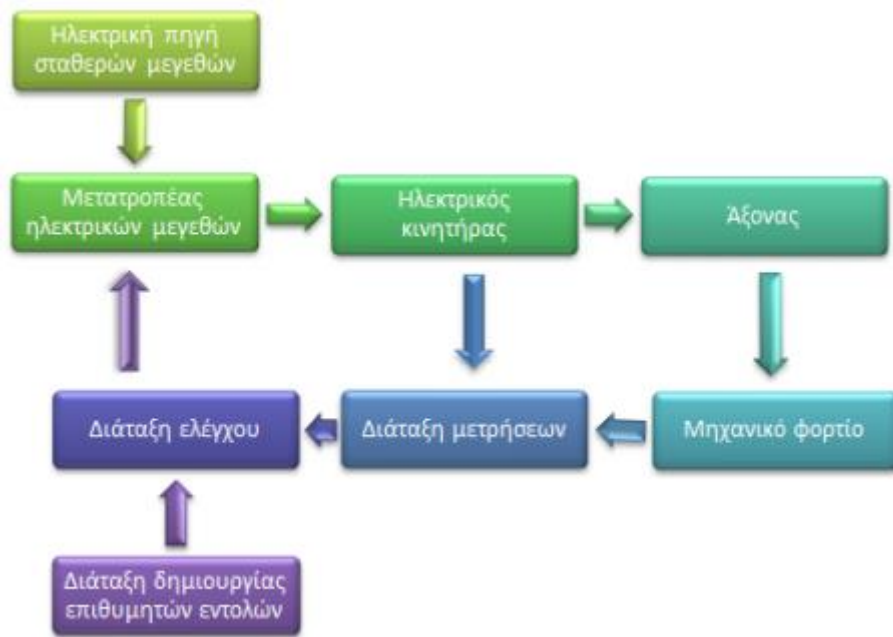
χρησιμοποιείται στην εκάστοτε εφαρμογή επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος.

2.4.2. Ρύθμιση και έλεγχος ηλεκτρικού κινητήρα

Η ισχύς των ηλεκτρικών κινητήρων αρχίζει από πολύ μικρά μεγέθη (για παράδειγμα mW) και εκτείνεται στην περιοχή των MW. Ειδικότερα στη βιομηχανία, η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική επιτυγχάνεται, ολοένα και περισσότερο, από τις ηλεκτρικές μηχανές οι οποίες τροφοδοτούνται και ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Η τεχνολογία αυτή ξεκίνησε να αναπτύσσεται στη δεκαετία του 1960 και σήμερα, μετά από δεκαετίες, έχει φθάσει σε πολύ υψηλό επίπεδο ανάπτυξης. Στη σημερινή εποχή έχουν κατακτηθεί δύο στόχοι: α) ο σύγχρονος σχεδιασμός και οι βελτιώσεις στην κατασκευή των ηλεκτρικών κινητήρων έχουν οδηγήσει σε πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (της τάξεως του 97%) χρησιμοποιώντας βελτιωμένα υλικά (αγώγιμα, μονωτικά, σιδηρομαγνητικά) και εφαρμόζοντας προωθημένες μεθόδους υπολογισμού (για παράδειγμα πεπερασμένα στοιχεία), και β) οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος με τη χρήση νέων ημιαγωγικών ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος και νέες μεθόδους διακοπτικής λειτουργίας που πραγματοποιούνται μέσω μικροϋπολογιστικών διατάξεων, έχουν κατακτήσει πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (της τάξεως 98%), μεγάλη αξιοπιστία, καλή δυναμική συμπεριφορά και λογικό κόστος (Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010).

Ως γνωστόν, για ένα δεδομένο φορτίο ο κινητήρας μετατρέπει ένα αντίστοιχο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια. Ένας σημαντικός αριθμός κινητήριων συστημάτων έχει την απλή μορφή, όπου δεν απαιτείται συστηματικός αυτόματος έλεγχος. Τέτοια παραδείγματα είναι κάποια συστήματα αντλιών, ανεμιστήρων, ανυψωτικών μηχανημάτων, κλπ.

Υπάρχει όμως και ένας πολύ μεγάλος αριθμός ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων στα οποία είναι απαραίτητος ο έλεγχος της λειτουργίας τους, με σκοπό να επιτυγχάνεται η διατήρηση ορισμένων μεγεθών σε επιθυμητές τιμές, σταθερές ή χρονικά μεταβαλλόμενες σύμφωνα με προβλεπόμενο χρονοδιάγραμμα. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι η τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα με μεταβλητά ηλεκτρικά μεγέθη, όπως μεταβλητή συχνότητα, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η παραγόμενη ροπή στον άξονά του ή η ταχύτητα του να μεταβάλλονται κατάλληλα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φορτίου και γενικά σύμφωνα με προδιαγραφόμενη επιθυμητή λειτουργία (Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010).



Εικόνα 2.30: Βασική δομή ελεγχόμενου κινητήριου συστήματος(Μπουντάκης, 2012)

Οι τρόποι ελέγχου ενός κινητήρα είναι οι εξής:

- Λόγος V/F σταθερός
- Μεταβλητή ροπή
- Έλεγχος αυτόματης ρύθμισης ροπής
- Διανυσματικός έλεγχος
- Έλεγχος με εξοικονόμηση ενέργειας
- Έλεγχος κινητήρα μόνιμου μαγνήτη



Εικόνα 2.31: Διαφορές μεταξύ των συμβατικών τρόπων ελέγχου και ρυθμιστών στροφών(Μπουντάκης, 2012)

Η χρήση αντιστροφών, εκτός από την πλήρη ρύθμιση στροφών, επιφέρει και τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα:

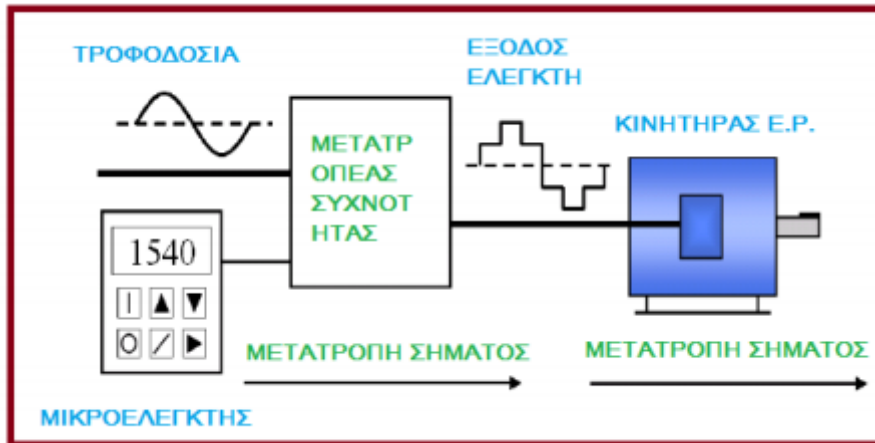
- Ομαλή εκκίνηση και ρυθμιζόμενη με μικρό ρεύμα εκκίνησης
- Ομαλή πέδηση
- Αύξηση ροπής εκκίνησης
- Δυνατότητα αυτόματης ή προγραμματιζόμενης ρύθμισης
- Πλήρης έλεγχος στροφών
- Εξοικονόμηση ενέργειας
- Δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής χωρίς επιπλέον διακόπτες
- Αυξημένη προστασία κινητήρα

2.5. Τεχνολογίες ελέγχου κινητήρων

2.5.1. Έλεγχος του κινητήριου συστήματος με μικροελεγκτές

Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών χαμηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας λειτουργίας, με κυρίαρχα στοιχεία τους μικροϋπολογιστές, έχει διαδραματίσει πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των συστημάτων με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Οι κατάλληλα προγραμματιζόμενοι μικροϋπολογιστές μπορούν να οδηγήσουν τους ηλεκτρικούς κινητήρες κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να διεκπεραιώνουν τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο ανταποκρινόμενοι σε ποικίλες απαιτήσεις. Επισημαίνεται ότι, στα ελεγχόμενα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό η τεχνολογία των σύγχρονων εξελιγμένων ηλεκτρονικών διατάξεων χαμηλής ισχύος (Μπουντάκης, 2012).

Επισημαίνεται ότι η εξοικονόμηση ενέργειας δεν επιτυγχάνεται μόνο από τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης του ηλεκτρικού υποσυστήματος, που αποτελείται από ηλεκτρονικό μετατροπέα και ηλεκτρικό κινητήρα, αλλά και από τις βελτιώσεις του μηχανικού υποσυστήματος καθώς και της διαδικασίας λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος που περιλαμβάνει τις μονάδες ελέγχου βασιζόμενες σε μικροϋπολογιστικά συστήματα.



Εικόνα 2.32: Έλεγχος κινητήρα με μικροελεγκτή και μετατροπέα συχνότητας(Μπουντάκης, 2012)

2.5.2. Αυξομείωση στροφών του κινητήριου συστήματος με μετατροπέα ισχύος

Η χρήση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (θυρίστορ, τρανζίστορ ισχύος, MOSFET ισχύος, IGBT) καθιστά δυνατό τον ακριβή έλεγχο της κινητικής κατάστασης των ηλεκτρικών κινητήρων σε μια ευρεία περιοχή λειτουργίας με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο. Τα προηγμένα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα, με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών αυτόματου ελέγχου αλλά και ηλεκτρονικών ισχύος, επιτυγχάνουν έλεγχο ροπής και ταχύτητας σχεδόν σε όλο το εύρος λειτουργίας τους, δηλαδή έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της μετατρεπόμενης ποσότητας ισχύος. Κατά αυτό τον τρόπο προσφέρουν δυνατότητες για σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας(Μπουντάκης, 2012).

Η χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο ειδικά για τον έλεγχο των ηλεκτρονικών κινητήρων, παίζουν πρωταρχικό ρόλο στη μείωση των απωλειών και επομένως στην εξοικονόμηση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Σύμφωνα με έρευνες, η χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων συχνότητας για κινητήρια συστήματα μεσαίου μεγέθους, σε όλο τον πλανήτη, οδηγεί σε εξοικονόμηση μίας ποσότητας ενέργειας της τάξεως των 227 TWh, ποσότητα η οποία αντιστοιχεί στην παραγωγή 144 σταθμών παραγωγής που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα(Northwest Food Processors Association-Knowledge Exchange).

Πίνακας 2.1: Τύποι μετατροπέων ισχύος(Μπουντάκης, 2012)

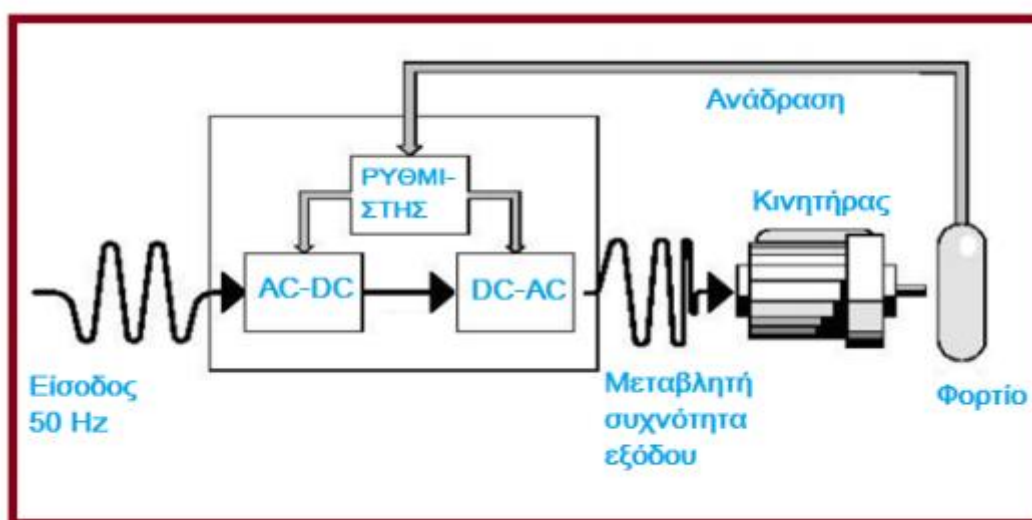
Τάση Πηγής Ισχύος	Τάση Τροφοδοσίας Ηλεκτρικής Μηχανής	Μετατροπέας που απλώς θα καταστήσει δυνατή τη λειτουργία της μηχανής	Μετατροπέας που θα ελέγξει τη λειτουργία της μηχανής
Συνεχής	Συνεχής	Ελεγχόμενος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές	Ελεγχόμενος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές
	Εναλλασσόμενη	Αντιστροφέας	Ελεγχόμενος Αντιστροφέας
Εναλλασσόμενη	Συνεχής	Ανορθωτής	Ελεγχόμενος Ανορθωτής
	Εναλλασσόμενη	(Γενικά δεν απαιτείται) Πιθανώς όμως να απαιτείται Μ/Σ ή Αντιστροφέας	Ελεγχόμενος ή μη Ανορθωτής ελεγχόμενος Αντιστροφέας

2.5.3. Αυξομείωση στροφών του κινητήριου συστήματος με μετατροπέα συχνότητας

Η πλειονότητα των ηλεκτροκινητήρων που χρησιμοποιούνται σε συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (ΘΕΚ) και συστήματα μεταφοράς νερού, είναι ασύγχρονοι κινητήρες τύπου κλωβού. Η ευρεία χρήση τους οφείλεται στη σχετικά χαμηλή τιμή αγοράς, το χαμηλό κόστος συντήρησης και την υψηλή αξιοπιστία τους. Ωστόσο, η μοναδική δυνατότητα ελέγχου του αριθμού στροφών τέτοιου κινητήρα συνίσταται στην τροποποίηση της συχνότητας του ρεύματος εισόδου (εναλλασσόμενο ρεύμα): Εδώ λοιπόν εφαρμόζεται η αρχή του Μετατροπέα Συχνότητας (ΜΣ).

Οι μετατροπείς συχνότητας είναι γνωστοί με πολλές ονομασίες, όπως αναστροφείς, συστήματα κίνησης μεταβλητής ταχύτητας (VSD), συστήματα κίνησης μεταβλητής συχνότητας (VFD), αυξομειωτές στροφών ή μετατροπείς συχνότητας. Όλοι αυτοί οι χαρακτηρισμοί βασίζονται στην ίδια αρχή: μία ηλεκτρονική διάταξη για το αδιαβάθμητο έλεγχο του αριθμού στροφών των ηλεκτροκινητήρων. Τα σύγχρονα συστήματα VFD έχουν ωστόσο και άλλα χρήσιμα χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα λειτουργίες ελέγχου και προστασίας για άλλα στοιχεία του συστήματος.

Η σχέση μεταξύ μεταβλητών, όπως η πίεση, η παροχή, ο αριθμός στροφών άξονα και η κατανάλωση ρεύματος μπορεί να εκφραστεί με τους νόμους της αλληλοεπίδρασης. Από αυτούς τους κανόνες προκύπτει ότι η αύξηση της ογκομετρικής παροχής είναι ανάλογη του αριθμού στροφών, ενώ η πίεση είναι ανάλογη του τετραγώνου του αριθμού στροφών. Το σημαντικότερο από την άποψη της εξοικονόμησης ενέργειας είναι ότι η κατανάλωση ρεύματος είναι ανάλογη του αριθμού στροφών στην τρίτη δύναμη. Αυτό συνεπάγεται ότι μία μικρή μείωση του αριθμού στροφών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο περιορισμό της κατανάλωσης ρεύματος. για παράδειγμα, στο 75% του αριθμού στροφών η παροχή ανέρχεται σε ποσοστό 75%, ωστόσο είναι απαραίτητο μόλις το 42% της κατανάλωσης ρεύματος που θα απαιτούνταν για την πλήρη παροχή. Εάν η παροχή περιορισθεί στο 50%, η κατανάλωση ρεύματος μειώνεται στο 12,5%(Μπουντάκης, 2012).



Εικόνα 2.33: Ηλεκτρικός κινητήρας με μετατροπέα συχνότητας (Waide & Brunner)

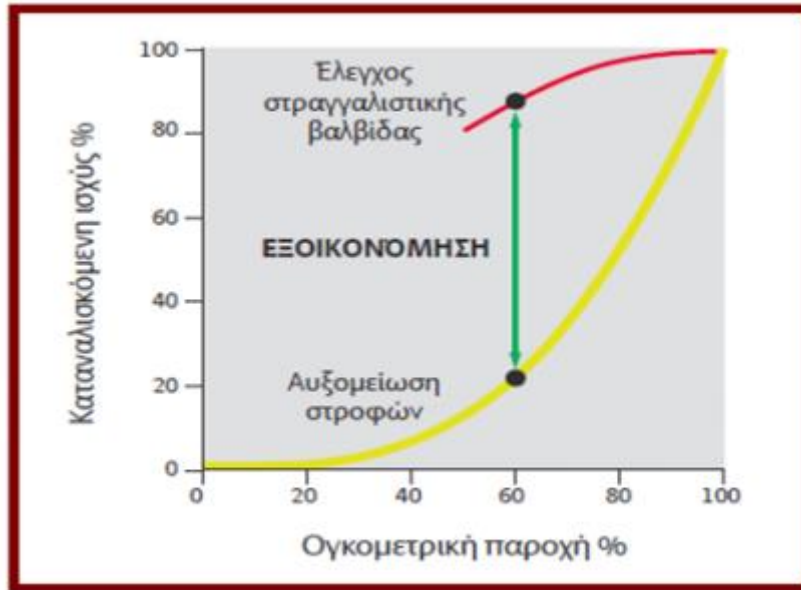
Τα συστήματα Μετατροπέων Συχνότητας λειτουργούν συνήθως με βάση μία ευθέως ανάλογης σχέσης συχνότητας- τάσης. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση αύξησης της συχνότητας/του αριθμού στροφών του κινητήρα κατά 10% αυξάνει επίσης κατά 10% η τάση. Ορισμένοι Μετατροπέες Συχνότητας έχουν επίσης μια επιπρόσθετη λειτουργία, τη «Βελτιστοποίηση ροής», με την οποία βελτιστοποιείται το επίπεδο τάσης μέσω της προσαρμογής αυτής της σχέσης. Αυτή η λειτουργία μπορεί να αποδώσει μία πρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 5%. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα απενεργοποίησης του ανεμιστήρα ψύξης όταν αυτός δεν είναι απαραίτητο να λειτουργεί. Αυτό μια ακόμα επιπλέον τη εξοικονόμηση ενέργειας και παρατείνει τη διάρκεια ζωής του μοναδικού κινούμενου μέρους του Μετατροπέα Συχνότητας.

2.5.4. Σύγκριση της αυξομείωσης στροφών του κινητήριου συστήματος με άλλες μεθόδους ελέγχου παροχής

Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι που παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου της παροχής του κινητήριου συστήματος είναι οι εξής(Μπουντάκης, 2012):

- Στραγγαλισμός με την βοήθεια κλαπέτων ή βαλβίδων. Δηλαδή προσθήκη επιπλέον αντιστάσεων στην διαδρομή του υγρού ώστε η ροή στην έξοδο να είναι πιο ισχυρή και έτσι η κατανάλωση να είναι η λιγότερη δυνατή.
- Χρήση βαλβίδων εισαγωγής σε φυγοκεντρικούς για περιορισμό του ρεύματος αέρα στον ανεμιστήρα.
- Χρήση συνεκτικών συμπλεκτών και δινορευμάτων για έλεγχο της ροπής στρέψης μεταξύ του ανεμιστήρα και κινητήρα.
- Έλεγχος με χρήση on/off.
- Ρύθμιση της κλίσης των πτερυγίων σε αξονικούς ανεμιστήρες η γωνία των πτερυγίων του ανεμιστήρα μεταβάλλεται για τον έλεγχο της ογκομετρικής παροχής.
- Στις αντλίες πρόσθεση επιπλέον γραμμής στην διαδρομή του υγρού προς τα πίσω έτσι ώστε να υπάρχει επιπλέον διαδρομή και να ξαναγυρίζει το υγρό στην δεξαμενή.

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι ελέγχου της παροχής έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι δεν επηρεάζουν άμεσα την κατανάλωση ρεύματος. Ασφαλώς και υπάρχουν δυνατότητες μείωσης της κατανάλωσης ρεύματος σε μερικά από αυτά τα στοιχεία, αλλά καμία από αυτές δεν είναι αποδοτική όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας όσο η χρήση συστημάτων ελέγχου του αριθμού των στρόφων με μετατροπέα συχνότητας, επειδή ο κινητήρας εξακολουθεί να λειτουργεί με πλήρη ισχύ. Τέλος ένας συνδυασμός και των δυο, δηλαδή του ελέγχου παροχής και του ελέγχου στροφών θα απέφερε ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση.



Εικόνα 2.34: Σύγκριση μεταξύ στραγγαλιστικού ελέγχου και αυξομείωσης στροφών με παροχή 60% (Ενεργειακή αποδοτικότητα χάρη στην αυξομείωση στροφών συστήματος κίνησης με μετατροπέα συχνότητας)

2.6. Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας σε κινητήρια συστήματα μέσω ελεγχόμενων μετατροπέων ισχύος

Με τη χρήση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (θυρίστορ, τρανζίστορ ισχύος, MOSFET ισχύος, IGBT) είναι δυνατός ο ακριβής έλεγχος της κινητικής κατάστασης των ηλεκτρικών κινητήρων σε μια ευρεία περιοχή λειτουργίας με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο. Τα προηγμένα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνικές αυτόματου ελέγχου αλλά και ηλεκτρονικά ισχύος επιτυγχάνουν έλεγχο ροπής και ταχύτητας σχεδόν σε όλο το εύρος λειτουργίας τους, δηλαδή έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της μετατρεπόμενης ποσότητας ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο προσφέρουν δυνατότητες για σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι απώλειες ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος εξαρτώνται κυρίως από τις διακοπτικές απώλειες και της απώλειες αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και δευτερευόντως από όποια άλλα παθητικά ηλεκτρικά στοιχεία χρησιμοποιούνται στο μετατροπέα. Επίσης ο γενικός σχεδιασμός του μετατροπέα και η ποιότητα των συνιστώντων στοιχείων επηρεάζουν τις απώλειές του. Οι δυνατότητες μείωσης αυτών των απωλειών βασίζονται πρωτίτως σε δύο παράγοντες, την ανάπτυξη νέων ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (μείωση διακοπτικών απωλειών και απωλειών αγωγής) και τη βελτίωση του συνολικού σχεδιασμού του μετατροπέα.

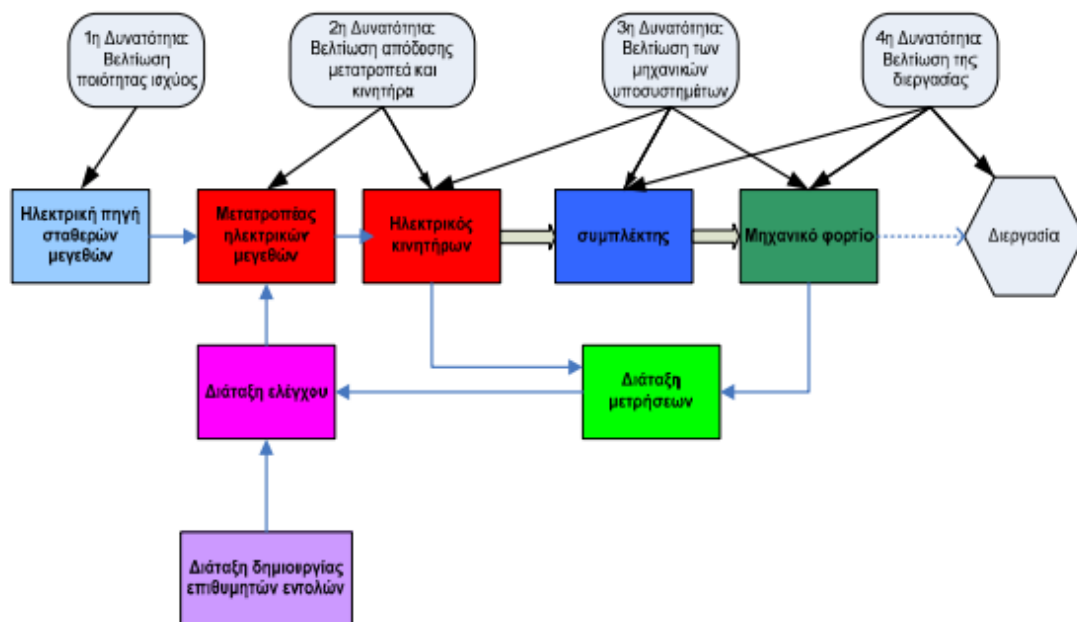
Σε διεθνές επίπεδο, η βασική έρευνα στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος στοχεύει στην επίλυση βασικών προβλημάτων, όπως (Παπαποστόλου & Ανδρέου):

- Μείωση των διακοπτικών απωλειών προερχόμενες από την υψίσυχνη διακοπτική λειτουργία των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.
- Βελτίωση του συντελεστή ισχύος, που σημαίνει μείωση της άεργου ισχύος και συνεπώς και της φαινόμενης ισχύος, με άμεσο αποτέλεσμα τη βελτίωση της διαστασιολόγησης των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων που παράγουν, μεταφέρουν και διανέμουν ηλεκτρική ενέργεια, προφανώς για το εκάστοτε επιθυμητό ποσό ενεργού (ωφέλιμης) ισχύος.
- Μείωση των ανώτερων αρμονικών που προκαλούνται από την αναγκαία χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και που διαχέονται στα ηλεκτρικά δίκτυα και επομένως προκαλούν σοβαρά προβλήματα τόσο στο ενεργειακό σύστημα όσο και στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Πρέπει να αντιμετωπιστεί τόσο η άεργος ισχύς που οφείλεται σε ανώτερες αρμονικές (πέραν της βασικής αρμονικής) όσο και η αντιμετώπιση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.
- Απλούστευση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων χαμηλής ισχύος (τάξεως mW,W), που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, τα οποία στη σημερινή εποχή είναι κατάλληλα να λειτουργούν και να αντέχουν σε τάσεις της τάξεως των 5 kV και σε ρεύματα της τάξεως των 5 kA. Η απλούστευση αυτή οδηγεί σε μείωση της πολυπλοκότητας και επομένως σε αύξηση της αξιοπιστίας.
- Εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών του περιβάλλοντος λειτουργίας των συσκευών και συστημάτων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, όπως είναι η λειτουργία σε περιβάλλον αυξημένης θερμοκρασίας, μηχανικών καταπονήσεων, χημικών επιδράσεων κτλ.
- Διάγνωση και αντιμετώπιση σφαλμάτων τα οποία είναι αναπόφευκτα, όπως είναι τα βραχυκυκλώματα, οι κατασκευαστικές αστοχίες, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κτλ. Σοβαρά προβλήματα αντιμετωπίζονται τόσο σε πειραματικές όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές από την εμφάνιση παρασιτικών τάσεων προερχόμενες από ποικίλα και συνήθως άγνωστα αίτια, που υποβαθμίζουν τη λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και μερικές φορές οδηγούν σε αδιέξοδα.
- Μελέτη γενικά βελτιωμένου σχεδιασμού για τη μείωση του κόστους. Ο παράγοντας κόστος παίζει μεγάλο ρόλο στη δημιουργία διαφόρων τοπολογιών ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, διότι λόγω του μεγάλου μεγέθους που συνήθως έχουν αυτές οι διατάξεις οι επενδύσεις κεφαλαίου είναι πολύ υψηλές.

Σπουδαίο ρόλο στην ανάπτυξη των συστημάτων με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος παίζει η εξέλιξη των ηλεκτρονικών χαμηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας λειτουργίας, με κυρίαρχα στοιχεία τους μικροϋπολογιστές, οι οποίοι κατάλληλα προγραμματιζόμενοι μπορούν να οδηγήσουν τους ηλεκτρικούς κινητήρες κατά

τρόπο, ώστε να διεκπεραιώνουν τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο ανταποκρινόμενοι σε ποικίλες απαιτήσεις. Επισημαίνεται ότι, στα ελεγχόμενα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό η τεχνολογία των σύγχρονων εξελιγμένων ηλεκτρονικών διατάξεων χαμηλής ισχύος.

Επισημαίνεται ότι η εξοικονόμηση ενέργειας δεν επιτυγχάνεται μόνο από τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης του ηλεκτρικού υποσυστήματος, που αποτελείται από ηλεκτρονικό μετατροπέα και ηλεκτρικό κινητήρα, αλλά και από τις βελτιώσεις του μηχανικού υποσυστήματος καθώς και της διαδικασίας λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος που περιλαμβάνει τις μονάδες ελέγχου βασιζόμενες σε μικροϋπολογιστικά συστήματα. Μείωση επίσης των απωλειών μπορεί να επιτευχθεί και στο ηλεκτρικό σύστημα τροφοδοσίας μειώνοντας τα ηλεκτρικά ρεύματα μέσω της μείωσης των ανώτερων αρμονικών και της αέργου ισχύος. Οι δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας συνοψίζονται στην εικόνα που ακολουθεί(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010):



Εικόνα 2.35: Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα κινητήριο σύστημα(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010)

Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη στα πλαίσια του προγράμματος «Motor Challenge Programme», που αφορούσε τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα στη βιομηχανία για της ευρωπαϊκές χώρες, αντικαθιστώντας τα υπάρχοντα κινητήρια συστήματα με πιο προηγμένα η Ευρώπη μπορεί να εξοικονομήσει 202 δισεκατομμύρια kWh που ισοδυναμεί με εξοικονόμηση 10 δισεκατομμυρίων ευρώ ανά έτος στο λειτουργικό κόστος των βιομηχανιών. Αναλυτικά στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2.2: Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας σε κινητήρια συστήματα σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης(www.abb.com)

Table: Savings potential for motor systems in the EU is over 200 billion kWh annually.

	Savings potential (billion kWh/year)					
	EU-15	EU-25	France	Germany	Italy	UK
High efficiency motors	24	27	4	6	4	3
Variable speed drives	45	50	8	10	7	6
Application part of the motor systems (pumps, fans, compressors)	112	125	19	26	17	15
Total electricity savings potential	181	202	31	42	28	24

Source: Energy Efficient Motor Driven Systems, The Motor Challenge Programme

Κεφάλαιο 3: Εφαρμογές στη βιομηχανία

3.1. Χρήση ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων στη βιομηχανία

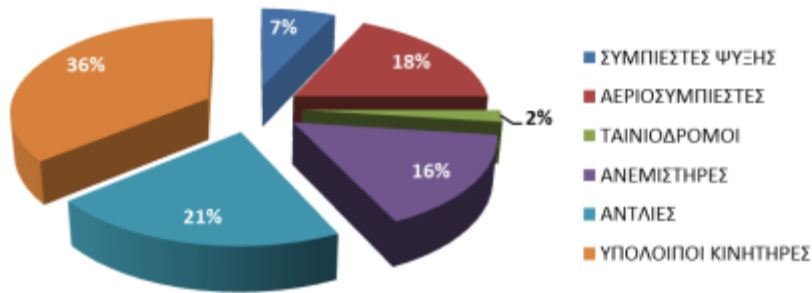
Το συνολικό ποσοστό ενέργειας που διατίθεται στην κατανάλωση υπό μορφή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται περίπου στο 40%. Η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται στην βιομηχανία, σε όλες τις παραγωγικές μονάδες, στο φωτισμό, στις οικιακές συσκευές, σε επισκευαστικές μονάδες, στα μέσα μεταφοράς αλλά και στα επερχόμενα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Με εξαίρεση το φωτισμό, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται στην ηλεκτροκίνηση, δηλαδή καταναλώνεται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες που ανέρχονται σε ένα τεράστιο αριθμό πάνω στον πλανήτη, προσφέρονται όμως για εξοικονόμηση ενέργειας με διάφορους τρόπους.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, περισσότερο από το 40% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως καταναλώνεται σε εφαρμογές της βιομηχανίας, και τα δύο τρίτα αυτής χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικούς κινητήρες. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, που ρυθμίζουν την ταχύτητα αυτών των κινητήρων, μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωσή τους έως και 50 % σε μερικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά ακόμη μόνο το 10% αυτών των κινητήρων συνδυάζονται με τέτοιους μετατροπείς.

Σύμφωνα με την έρευνα «Εξοικονόμηση ενέργειας από τη χρήση ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων μέσω ελεγχόμενων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος» η οποία είχε διεξαχθεί για τις ευρωπαϊκές χώρες, τα κινητήρια συστήματα είναι υπεύθυνα για το 69% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία και για το 38% στις οικιακές εφαρμογές, το οποίο σε απόλυτες τιμές αντιστοιχεί σε 575 και 186 TWh αντιστοίχως ανά έτος. Οι αντλίες, οι ανεμιστήρες και οι συμπιεστές που κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες αποτελούν τα πιο σημαντικά φορτία ως προς την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στις βιομηχανίες (το 62%) όσο και στον τομέα των υπηρεσιών (το 82%). Από τα στοιχεία προκύπτει ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα στο ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας, επομένως είναι σημαντικό ο βαθμός απόδοσης των κινητήρων αυτών να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερος (DeAlmeida, Fonseca, & Bertoldi, 2003).

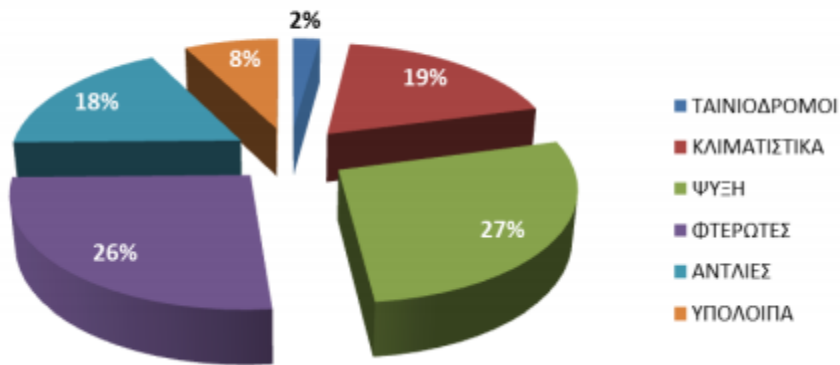
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατίθενται η χρήση των κινητήριων συστημάτων στους τομείς της βιομηχανίας και των υπηρεσιών.

Χρήση κινητήρων στην βιομηχανία



Εικόνα 3.1: Ποσοστιαία ενεργειακή κατανάλωση ανά κατηγορία εφαρμογής κινητήριων συστημάτων στη βιομηχανία για τις ευρωπαϊκές χώρες(DeAlmeida, Fonseca, & Bertoldi, 2003)

Χρήση κινητήρων στις υπηρεσίες



Εικόνα 3.2: Ποσοστιαία ενεργειακή κατανάλωση ανά κατηγορία εφαρμογής κινητήριων συστημάτων στον τομέα υπηρεσιών για τις ευρωπαϊκές χώρες(DeAlmeida, Fonseca, & Bertoldi, 2003)

3.2. Βιομηχανικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος

Οι εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος είναι οι εξής:

- Διακοπτικά τροφοδοτικά (dc) σε υπολογιστές, και συσκευές γραφείου
- Συστήματα αδιάλειπτης παροχής (UPS)
- Συστήματα ελέγχου κινητήρων dc, επαγωγικών, σύγχρονων, κλπ.
- Ρομποτική, Εργαλειομηχανές και κινητήρια συστήματα ακριβείας στην βιομηχανία

- Φωτισμός (ηλεκτρονικά ballasts)
- Επαγωγική θέρμανση στην βιομηχανία
- Συγκολλήσεις, επιμεταλώσεις
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (μετατροπείς ac-dc και dc-ac)
- Έλεγχος άεργου ισχύος σε ac συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκά, αιολικά συστήματα)
- Φόρτιση μπαταριών (από mW μέχρι kW)
- Ηλεκτρικά αυτοκίνητα
- Ηλεκτρικά τρένα
- Τροφοδοσία τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, δορυφορικών συστημάτων και αεροσκαφών

Σκοπός των Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος είναι ο μετασχηματισμός των κυματομορφών των ηλεκτρικών μεγεθών, όπως είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, ή αντίστροφα η μετατροπή συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη, μεταβάλλοντας τη συχνότητα και την ενεργό τιμή αυτής. Μέσω αυτών των μετατροπών επιτυγχάνεται η τροφοδοσία των διαφόρων ηλεκτρικών φορτιών, παραδείγματος χάριν μηχανών συνεχούς ρεύματος, μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος κτλ., όπου ιδιαίτερη σημασία έχει ο έλεγχος της ποσότητας ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του χρήστη, οι οποίες συνήθως είναι αρκετά πολύπλοκες (Μαλέσιος & Παπαδόπουλος, 2009).

Επισημαίνεται ότι οι διαδικασίες μετατροπών ενέργειας διεκπεραιώνονται από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος με τη βοήθεια ηλεκτρονικών διατάξεων χαμηλής ισχύος, κυρίως δε μέσω μικροεπεξεργαστών και γενικά της ψηφιακής τεχνολογίας. Αυτό είναι αναγκαίο, διότι τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος στην ουσία είναι διακοπτικές μονάδες, των οποίων η διακοπτική λειτουργία διεκπεραιώνεται με εντολές προερχόμενες από ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα κατάλληλα προγραμματισμένα σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις των φορτίων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η εφαρμογή των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στην ηλεκτροκίνηση στη βιομηχανία, όπου η κίνηση των διαφόρων μηχανών παραγωγής έργου γίνεται μέσω ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ή εναλλασσομένου ρεύματος. Τα βιομηχανικά ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα είναι, σχεδόν πάντα, ελεγχόμενα, δηλαδή η ταχύτητα ή η ροπή και συνεπώς η παρεχόμενη ισχύς ως συνάρτηση του χρόνου πρέπει να ακολουθεί δεδομένο χρονοδιάγραμμα με ακρίβεια, ταχύτητα και αξιοπιστία. Οι απαιτήσεις αυτές αποθηκεύονται ως πληροφορία σε μικροϋπολογιστές και η απόκλιση της πραγματικής κατάστασης από την επιθυμητή δημιουργεί κατάλληλα σήματα, με βάση τα οποία οδηγείται ένας μετατροπέας παράγοντας τα αναγκαία ηλεκτρικά μεγέθη. Τέτοια παραδείγματα είναι τα εξής: τσιμεντοβιομηχανία, χαρτοποιία, μεταλλοβιομηχανία, κλωστοϋφαντουργία, βιομηχανίες τροφών και ποτών, αντλιοστάσια, εργαλειομηχανές για την επεξεργασία μετάλλου και άλλων υλικών, κτλ.

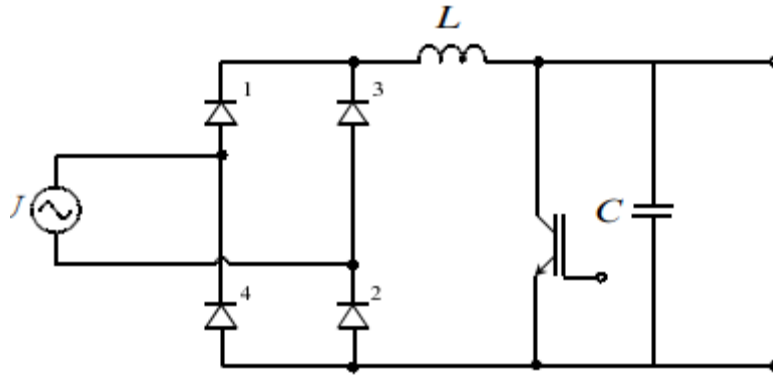
Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά μερικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που συναντώνται συχνότερα στη βιομηχανία.

3.2.1. Συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)

Πολλές φορές είναι απαραίτητο να τροφοδοτούνται συσκευές για κρίσιμες εφαρμογές των η οποίων η λειτουργία δεν μπορεί να διακοπεί λόγω τυχαίας διακοπής της τροφοδοσίας από το δίκτυο. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν υπολογιστές που χρησιμοποιούνται σε κρίσιμες εφαρμογές και ιατρικές συσκευές σε νοσοκομειακές μονάδες(Μητρνίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου). Για την τροφοδοσία τέτοιων συσκευών χρησιμοποιούνται τα συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS).

3.2.2. Διόρθωση συντελεστή ισχύος

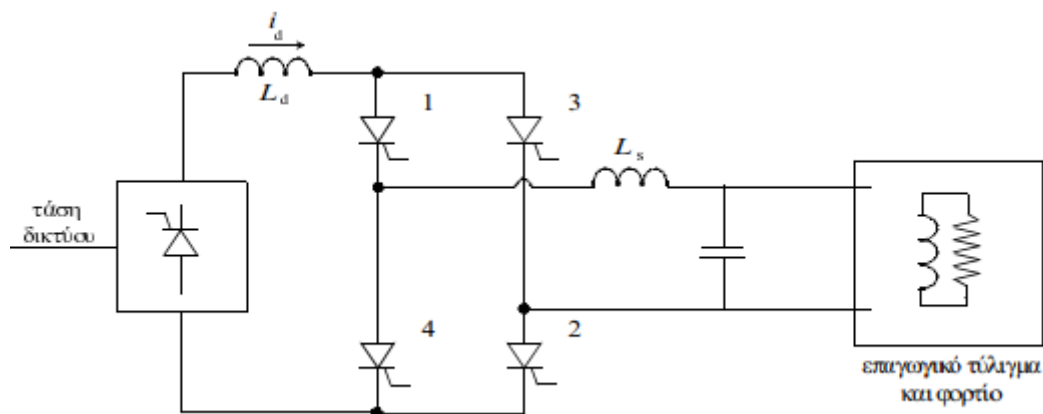
Η εμφάνιση άεργου ισχύος στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος που τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση αποτελεί μειονέκτημα, όπως εξάλλου και πολλών άλλων συσκευών εναλλασσόμενου ρεύματος. Η άεργος ισχύς ταλαντώνεται μεταξύ της τροφοδοσίας και του φορτίου χωρίς να προσφέρει ωφέλιμο έργο, ως αποτέλεσμα η εκμετάλλευση των γραμμών μεταφοράς είναι ελλιπής. Στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος η άεργος ισχύς μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες: αυτή που δημιουργείται από τη βασική αρμονική του ρεύματος και αυτή που οφείλεται σε ανώτερες αρμονικές. Η άεργος ισχύς που οφείλεται στην πρώτη αρμονική (που είναι και η μεγαλύτερη σε ισχύ) μπορεί να απαλειφθεί με διατάξεις διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, όπως απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί, και χρησιμοποιείται σε διατάξεις μετατροπής εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή. Το τρανζίστορ του σχήματος παλμοδοτείται με κατάλληλο τρόπο από ένα λογικό κύκλωμα, ώστε η βασική αρμονική του ρεύματος εισόδου να προκύπτει τελικά συμφασική με την ημιτονοειδή τάση τροφοδοσίας.



Εικόνα 3.3: Διόρθωση συντελεστή ισχύος(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

3.2.3. Επαγωγική θέρμανση

Με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης, ένα σημαντικό μέρος της παραγόμενης θερμότητας διαφεύγει στο περιβάλλον. Η απόδοση είναι σαφώς μεγαλύτερη εάν χρησιμοποιηθεί επαγωγική θέρμανση. Η λειτουργία αυτών των διατάξεων βασίζεται στη θέρμανση ενός αγωγίμου σώματος λόγω ρευμάτων επαγωγής όταν βρεθεί σε μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα κύκλωμα συντονισμού. Η τιμή της συχνότητας του κυκλώματος ποικίλλει ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή: μικρές συχνότητες είναι κατάλληλες για τήξη μετάλλων, ενώ μεγάλες συχνότητες (της τάξης των εκατοντάδων kHz) χρησιμοποιούνται για συγκόλληση, σκλήρυνση, σφυρηλάτηση μετάλλων κτλ.



Εικόνα 3.4: Διάταξη επαγωγικής θέρμανσης(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

3.2.4 Ηλεκτροσυγκολλήσεις

Σε αυτές τις διατάξεις, η ενέργεια για τη συγκόλληση μετάλλων παρέχεται από τη δημιουργία τόξου μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, το ένα από τα οποία είναι το προς συγκόλληση μέταλλο. Για τη συγκόλληση απαιτείται μεγάλο ρεύμα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια τυπική διάταξη αυτού του είδους είναι της τάξης των 50V και 500A. Ο μετασχηματιστής στην είσοδο της διάταξης είναι απαραίτητος για την επίτευξη της γαλβανικής απομόνωσης. Η ύπαρξη της γαλβανικής απομόνωσης κρίνεται σημαντική, τόσο λόγω της προστασίας του χειριστή της συσκευής, όσο και λόγω του γεγονότος ότι λόγω της σκέδασης του μετασχηματιστή περιορίζονται οι πτώσεις τάσης στην είσοδο της διάταξης κατά τη λειτουργία της. (Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

3.2.5. Φωτισμός με λαμπτήρες φθορισμού σε υψηλή συχνότητα

Ένα σημαντικό ποσοστό της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως χρησιμοποιείται σε φωτισμό. Το ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας για φωτισμό είναι κατά μέσο όρο περίπου 15% για κατοικίες και 30% για τους χώρους εργασίας (γραφεία και καταστήματα). Για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας, χρησιμοποιούνται λαμπτήρες φθορισμού οι οποίοι είναι από τρεις έως τέσσερις φορές πιο αποδοτικοί από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Η επίτευξη επιπλέον εξοικονόμησης ενέργειας είναι δυνατή με τη χρήση λαμπτήρων φθορισμού υψηλής συχνότητας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της απόδοσης κατά περίπου 20% έως 30%. Η τροφοδοσία ενός ζεύγους λαμπτήρων φθορισμού με τάση υψηλής συχνότητας γίνεται από ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Μεταξύ του μετατροπέα και της πηγής τροφοδοσίας μεσολαβεί φίλτρο ώστε να μη μεταδίδονται οι ανώτερες αρμονικές στο δίκτυο τροφοδοσίας. (Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου).

3.3. Ειδικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στη βιομηχανία

Η αλματώδης εξέλιξη των ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος και η μαζική παραγωγή τους από βιομηχανικές μονάδες ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970. Η παγκόσμια βιομηχανία ανταποκρίθηκε πολύ γρήγορα σε αυτή τη νέα τεχνολογία και στη

σημερινή εποχή ο συντριπτικός αριθμός των βιομηχανιών χρησιμοποιούν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος για τις διάφορες φάσεις παραγωγής τους (Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου).

Οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος γνώρισαν μεγάλη επιτυχία στη βιομηχανία λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν με κυριότερη την εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία, δεδομένων των τεράστιων αναγκών για ενέργεια και των περιορισμένων ενεργειακών πόρων, έχει γίνει επιτακτική. Χάρη στη διακοπτική λειτουργία αυτών των συστημάτων επιτυγχάνονται ρυθμίσεις που μέχρι πριν λίγα χρόνια απαιτούσαν την ύπαρξη ωμικών αντιστάσεων, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις θερμικές απώλειες. Σε εφαρμογές κίνησης, η χρήση της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί ακόμα και η διάρκεια ζωής των κινητήρων, αφού πλέον ξεκινούν και σταματούν πιο ήπια και χωρίς αιχμές τάσης και ρεύματος. Υπήρξε επιπλέον η δυνατότητα λειτουργίας κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς περιορισμό της ταχύτητάς τους από τη συχνότητα του δικτύου, ενώ για όλους τους κινητήρες οι ρυθμίσεις γίνονται με μεγαλύτερη ευκολία και ακρίβεια και τα συστήματα ελέγχου τους παρέχουν ευελιξία και προσαρμοστικότητα στις νέες συνθήκες λειτουργίας.

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είναι ότι με τη χρήση τους αντικαθιστούν σε πολλές εφαρμογές τους μηχανικούς μετατροπείς. Αντί για ρύθμιση μηχανικών μεγεθών γίνεται ρύθμιση ηλεκτρικών μεγεθών (τα οποία με τη χρήση των μικροεπεξεργαστών μπορούν να μεταφραστούν σε πληροφορία) τα οποία είναι περισσότερο ελέγξιμα, αλλά παρέχουν και τη δυνατότητα ελέγχου από απόσταση. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατός ο κεντρικός έλεγχος διεργασιών, ακόμη και ολόκληρων γραμμών παραγωγής, μέσω δικτύων με προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές. Ακόμα, γίνεται πιο εύκολος ο εντοπισμός σφαλμάτων και δυσλειτουργιών σε κάποιο σημείο μιας διαδικασίας. Με την αυτοματοποίηση και τον τηλεέλεγχο γίνεται δυνατή η ρύθμιση παραμέτρων της διαδικασίας παραγωγής και η άμεση επέμβαση σε περίπτωση σφάλματος.

Από την άλλη πλευρά, οι κατασκευάστριες εταιρίες παράγουν μαζικά και προσφέρουν μεγάλη ποικιλία συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος, ώστε να είναι δυνατή η εύρεση της οικονομικότερης λύσης για κάθε εφαρμογή. Τα ημιαγώγιμα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις ισχύος εξελίσσονται συνεχώς επιφέροντας συνεχή βελτίωση όλων των χαρακτηριστικών.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

Στοιχείο	V _{max} (V)	I _{max} (A)	Πλεγμασ με	Πτώση τάσης (V)	Διακοπτική Συχνότητα (Hz)	Προστασία
Θυρίστορ	6000	3500	Ρεύμα	1,9	<400	διακοπή παλμοδότησης ή υπερταχεία ασφάλεια
Triac	800	40	Ρεύμα	1,4	<400	διακοπή παλμοδότησης ή υπερταχεία ασφάλεια
GTO	4500	3000	Ρεύμα	4	<2000	διακοπή παλμοδότησης ή υπερταχεία ασφάλεια
Darlington BJT	1200	800	Ρεύμα	1,9	<10000	διακοπή παλμοδότησης
MOSFET ισχύος	500	50	Τάση	3,2	100000	διακοπή παλμοδότησης
IGBT	1200	400	Τάση	3,2	20000	διακοπή παλμοδότησης
SIT	1200	300	Τάση	18	70000	διακοπή παλμοδότησης
SITH	1200	300	Ρεύμα	4	20000	διακοπή παλμοδότησης ή υπερταχεία ασφάλεια
MCT	600	60	Τάση	1.1		διακοπή παλμοδότησης ή υπερταχεία ασφάλεια

Πίνακας 3.2: Βιομηχανικές διατάξεις των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

Στοιχείο	Εφαρμογές
Θυρίστορ	Πλεγμασ μηχανών DC, Φωτισμός, θέρμανση, Αντιστάθμιση αέργου ισχύος
Triac	Πλεγμασ φωτισμού και θέρμανσης, Πλεγμασ μηχανών AC
GTO	Πλεγμασ μηχανών, UPS, Αντιστάθμιση αέργου ισχύος, Επαγωγική θέρμανση
Darlington BJT	Πλεγμασ μηχανών, UPS, Αντιστάθμιση αέργου ισχύος και αρμονικών, Παλμοτροφοδοτικά
MOSFET ισχύος	Παλμοτροφοδοτικά, Πλεγμασ κινητήρων DC Brushless, Ηλεκτρονικοί διακόπτες
IGBT	Πλεγμασ κινητήρων AC, UPS, Αντιστάθμιση αέργου ισχύος και αρμονικών, Παλμοτροφοδοτικά
SIT	Επαγωγική θέρμανση, Γεννήτριες υπερήχων, Γεννήτριες FM/AM
SITH	Επαγωγική θέρμανση, Αντιστάθμιση αέργου ισχύος
MCT	Πλεγμασ μηχανών AC, UPS, Αντιστάθμιση αέργου ισχύος και αρμονικών

Πίνακας 3.3: Βιομηχανικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος(Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου)

Διάταξη	Εφαρμογές
Ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα με θυρίστορ	Επιμεταλλώσεις, ανοδίωση, παραγωγή υγραερίου, επεξεργασία αλουμινίου, επεξεργασία μετάλλων, έλεγχος μηχανών συνεχούς ρεύματος, μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχές ρεύμα, ηλεκτρομαγνήτες, φορτιστές μπαταριών
Ρυθμιστής συνεχούς ρεύματος με θυρίστορ	έλεγχος μηχανών συνεχούς ρεύματος
Τοπολογία buck και τοπολογία forward	παλμοτροφοδοτικά, έλεγχος μηχανών συνεχούς ρεύματος
Τοπολογία boost	παλμοτροφοδοτικά, ανάκτηση ενέργειας κατά το σταμάτημα μηχανών συνεχούς ρεύματος
Τοπολογία buck-boost και τοπολογία flyback	παλμοτροφοδοτικά
Γέφυρες έξι παλιών	αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές, μίκτες, centrifuges, μεταφορικές ταινίες, εργαλειομηχανές, δυναμόμετρα, σπαστήρες, μίκτες
Αντιστροφείας PWM	έλεγχος κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος
Γεφυρές με αντιπαράλληλα θυρίστορ	ομαλοί εκκινήτες τριφασικών κινητήρων (soft starters), έλεγχος στρופן ασύγχρονων κινητήρων, ρύθμιση έντασης λαμπτήρων, έλεγχος θέρμανσης
κυκλικοί μετατροπείς	έλεγχος μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής ισχύος, επαγωγική θέρμανση

Κεφάλαιο 4: Πειραματική επιβεβαίωση ενεργειακής απόδοσης ηλεκτρικού κινητήρα

4.1. Έρευνες και πειράματα παγκόσμιου βεληνεκούς που επιβεβαιώνουν το θέμα μας

Ο αριθμός των ηλεκτρικών μηχανών και ειδικότερα εκείνων που λειτουργούν ως κινητήρες, σε παγκόσμια κλίμακα, είναι πάρα πολύ μεγάλος (της τάξεως πολλών δισεκατομμυρίων). Το μέγεθος της ισχύος των διαφόρων ηλεκτρικών κινητήρων εκτίνεται από τους κινητήρες πολύ μικρής ισχύος (της τάξεως mW) μέχρι τους κινητήρες μερικών δεκάδων MW (π.χ. ονομαστική ισχύς 30 MW). Όλοι αυτοί οι κινητήρες καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας κατά τη διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και έτσι μιλούμε για βαθμό απόδοσης των ηλεκτρικών κινητήρων.

Στη συνέχεια θα επισημανθούν χαρακτηριστικά αριθμητικά στοιχεία για ηλεκτρικούς κινητήρες και τις ενεργειακές επιδόσεις αυτών συνοψίζοντας τα παραπάνω στοιχεία, για την πειραματική και ερευνητική επιβεβαίωση του θέματος.

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι χωρίς δεύτερη σκέψη πιο γρήγορος και πιο αποδοτικός τρόπος σε σχέση με την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Τα τελευταία 30 χρόνια καταγράφεται ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (σχεδόν τριπλασιασμός) σε έρευνα του Οργανισμού «International Energy Agency» το 2007.

Πάνω από το 40% της παγκόσμιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται σε βιομηχανικές εφαρμογές και τα δύο τρίτα αυτής χρησιμοποιείται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, που ρυθμίζουν την ταχύτητα αυτών των κινητήρων, μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωσή τους έως και 50 % σε μερικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά ακόμη μόνο το 10% αυτών των κινητήρων συνδυάζονται με τέτοιους μετατροπείς.

Σε έρευνα που είχε διεξαχθεί ειδικά για τις ευρωπαϊκές χώρες, όπως αναφέρθηκε, τα κινητήρια συστήματα είναι υπεύθυνα για το 69% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία και για το 38% στις οικιακές εφαρμογές, το οποίο σε απόλυτες τιμές αντιστοιχεί σε 575 και 186 TWh αντιστοίχως ανά έτος. Οι αντλίες, οι ανεμιστήρες και οι συμπιεστές που κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες αποτελούν τα πιο σημαντικά φορτία ως προς την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στις βιομηχανικές (το 62 %) όσο και στον τομέα των υπηρεσιών (το 82 %). Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα στο ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς ο βαθμός απόδοσης των κινητήρων αυτών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερος.

Ο βαθμός απόδοσης των ηλεκτρικών κινητήρων προσδιορίζεται από τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά καθώς και από τις συνθήκες λειτουργίας τους. Οι απώλειες των ηλεκτρικών μηχανών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες.

Εκείνες που εξαρτώνται από το φορτίο και εκείνες που είναι ανεξάρτητες του φορτίου. Οι πρώτες εμφανίζονται στα αγωγία υλικά του στάτη και του δρομέα και είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος, το οποίο εξαρτάται από το εκάστοτε φορτίο. Οι άλλες είναι, με μεγάλη προσέγγιση σταθερές, δηλαδή ανεξάρτητες του φορτίου, αλλά εξαρτώνται από το μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται από την ηλεκτρική τάση. Πρόκειται για τις απώλειες στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν διαρρέονται από εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων), τις απώλειες τριβών στα έδρανα και τις απώλειες λόγω αντίστασης του ανέμου κατά την περιστροφή του δρομέα.

Επιστημονικές έρευνες κατέδειξαν ότι πρέπει να επεμβαίνουμε στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κινητήρων, προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των απωλειών. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση περισσότερου χαλκού και μεγαλύτερης διατομής οδηγεί σε μείωση της αντίστασης των τυλιγμάτων ή των μπαρών του στάτη και του δρομέα. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί τροποποιώντας το σχεδιασμό των αυλακώσεων ή μειώνοντας το πάχος της μόνωσης μέχρις ενός σημείου. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας υλικά με αυξημένη μαγνητική διαπερατότητα μπορούμε να μειώσουμε τις απώλειες υστέρησης, ενώ μειώνοντας το πάχος των ελασμάτων του πυρήνα επιτυγχάνουμε μείωση των απωλειών που οφείλονται στα δινορεύματα. Σε ό,τι αφορά τις επιδράσεις του φορτίου των κινητήρων ως ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος στο βαθμό απόδοσης.

Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα καταναλώνουν περίπου το 65% της βιομηχανικής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Έχει υπολογιστεί δε το οικονομικό δυναμικό εξοικονόμησης σε 27 δισ. kWh ετησίως ή 4,33%. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρξει εξοικονόμηση πάνω από 1,04% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε.(Chapman, DeAlmeida, &DeKeulenaer, 2004)

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η έρευνα που διεξήχθη στα πλαίσια του προγράμματος «Motor Challenge Programme», που αφορούσε τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα στη βιομηχανία για της ευρωπαϊκές χώρες. Αντικαθιστώντας τα υπάρχοντα κινητήρια συστήματα με πιο προηγμένα, η Ευρώπη μπορεί να εξοικονομήσει 202 δισεκατομμύρια kWh που ισοδυναμεί με εξοικονόμηση 10 δισεκατομμυρίων ευρώ ανά έτος στο λειτουργικό κόστος των βιομηχανιών.

(Σαφάκας & Τσοτουλίδης, 2010)

Διαβάζοντας τα παραπάνω, αντιλαμβανόμαστε πόσο σημαντική είναι η **Εξοικονόμηση ενέργειας από την χρήση ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων μέσω ελεγχόμενων ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος.**

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προοπτικές

5.1. Συμπεράσματα

Για ένα δεδομένο φορτίο ο κινητήρας μετατρέπει ένα αντίστοιχο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια. Ένας σημαντικός κινητηρίων συστημάτων έχει την απλή μορφή, όπου δεν απαιτείται συστηματικός αυτόματος έλεγχος, όπως είναι κάποια συστήματα αντλιών, ανεμιστήρων, ανυψωτικών μηχανημάτων κ.λ.π. Υπάρχει όμως ένας πολύ μεγάλος αριθμός ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων, στα οποία είναι απαραίτητος ο έλεγχος της λειτουργίας τους, με σκοπό να επιτυγχάνεται η διατήρηση ορισμένων μεγεθών σε επιθυμητές τιμές, σταθερές ή χρονικά μεταβαλλόμενες.

Σε όλα τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα χάνεται ένα ποσό ενέργειας λόγω των απωλειών των αγωγίων και σιδηρομαγνητικών υλικών, των τριβών και άλλων επιπρόσθετων απωλειών. Οι απώλειες εξαρτώνται από τα χρησιμοποιούμενα υλικά, το σχεδιασμό των συνιστώντων στοιχείων του συστήματος, τις γεωμετρικές διαστάσεις, τον τρόπο λειτουργίας και τη συντήρηση. Η χαμένη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία πρέπει να απομακρύνεται από το σύστημα μέσω ενός συστήματος ψύξεως, διότι διαφορετικά προκαλεί καταπόνηση και φθορές με αποτέλεσμα να επέρχεται μείωση της διάρκειας ζωής και ενδεχομένως καταστροφή κάποιων συνιστώντων στοιχείων.

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί ένα δυναμικό πεδίο στην σύγχρονη εποχή, διαδραματίζει ήδη σημαντικό ρόλο στην καθημερινότητα του ανθρώπου, ενώ τα επόμενα χρόνια αναμένεται να γίνει ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες διαβίωσης σύμφωνα με τις τάσεις της κοινωνίας, τόσο από πλευράς προστασίας του περιβάλλοντος όσο και από πλευράς εξοικονόμησης χρημάτων. Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα αποτελούν σημαντικό παράγοντα του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, και είναι υπεύθυνα για σημαντικότερα ποσοστά κατανάλωσης ανά τον κόσμο και ανά τομείς εφαρμογής(Μπουντάκης, 2012).

Η τροφοδοσία και ο έλεγχος των ηλεκτρικών μηχανών μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος έχει αναπτυχθεί σε πολύ υψηλό επίπεδο στις μέρες μας συντελώντας στην κατασκευή ηλεκτρικών κινητήρων με πολύ υψηλή απόδοση (της τάξεως του 97%). Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος με τη χρήση νέων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και νέες μεθόδους διακοπτικής λειτουργίας που χρησιμοποιούνται μέσω μικροπολογιστικών διατάξεων, έχουν κατακτήσει πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης, μεγάλη αξιοπιστία, καλή δυναμική συμπεριφορά και λογικό κόστος(Καπετανίδης, 2015).

Με τη χρήση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (θυρίστορ, τρανζίστορ ισχύος, MOSFET ισχύος, IGBT) είναι δυνατός ο ακριβής έλεγχος της κινητικής κατάστασης των ηλεκτρικών κινητήρων σε μια ευρεία περιοχή λειτουργίας με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο. Τα προηγμένα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα χρησιμοποιώντας

σύγχρονες τεχνικές αυτόματου ελέγχου αλλά και ηλεκτρονικά ισχύος επιτυγχάνουν έλεγχο ροπής και ταχύτητας σχεδόν σε όλο το εύρος λειτουργίας τους, δηλαδή έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της μετατρεπόμενης ποσότητας ισχύος. Κατ' αυτό τον τρόπο προσφέρουν δυνατότητες για σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

5.2. Προοπτικές

Πέρα από τη μελέτη των ημιαγωγικών στοιχείων και διατάξεων που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, το πεδίο των ηλεκτρονικών ισχύος περιλαμβάνει ακόμα τη μελέτη της τοπολογίας των μετατροπέων, την ανάλυση και προσομοίωση της λειτουργίας τους, την ανάπτυξη τεχνικών ελέγχων και πρόβλεψη άλλων διατάξεων ελέγχου μαζί με το απαραίτητο λογισμικό. Η ταχεία εξέλιξη των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, η κατασκευή και διάθεση στο εμπόριο μικροεπεξεργαστών με μεγάλη υπολογιστική ισχύ, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα και οι τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DigitalSignalProcessing, DSP), μαζί με την ανάπτυξη σύγχρονων τεχνικών ελέγχου συνέβαλαν καθοριστικά σε αυτή την εξέλιξη.

Με τη διαδεδομένη χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας από το χώρο των ηλεκτρονικών ισχύος, η Ελληνική βιομηχανία, η οικονομία και η κοινωνία γενικότερα μπορούν να ωφεληθούν από τη σημαντική εξοικονόμηση πόρων, την αύξηση της ανταγωνιστικότητας των προϊόντων τους, τη βελτίωση των υπηρεσιών και τη μικρότερη οικολογική επίδραση στο περιβάλλον. Για να επιτευχθεί αυτό, θα απαιτηθεί μια σειρά πολιτικών και οικονομικών μέτρων για τη χρηματοδότηση μιας τέτοιας προόδου στη βιομηχανία. Τα ερευνητικά και εκπαιδευτικά ιδρύματα της Ελλάδας που κατέχουν ένα αναγνωρισμένο και ανταγωνιστικό επιστημονικό επίπεδο και τεχνογνωσία, πρέπει να προσανατολισθούν σε απλές εφαρμογές χρήσιμες για την Ελληνική βιομηχανία και οικονομία (Μητρονίκας, Παπαδόπουλος, Σαφάκας, Λαδακάκος, & Ιωαννίδου).

Βιβλιογραφία

- Chapman, D., De Almeida, A., & De Keulenaer, H. (2004). Energy Efficient Motor Driven Systems. *European Copper Institute. Motor Challenge*. Belgium.
- Chapter L-Power factor correction and harmonic filtering. (n.d.). Στο S. Electric.
- De Almeida, A., Fonseca, P., & Bertoldi, P. (2003). *Energy-efficient motor systems in the industrial and in the services sectors in the European Union: characterisation, potentials, barriers and policies*.
- Electrical Motors. Presentaion from the Energy Efficiency Guide for Industry in Asia*. (n.d.). Ανάκτηση από www.energyefficiencyasia.org.
- Northwest Food Processors Association-Knowledge Exchange. (n.d.).
- Waide, P., & Brunner, C. (n.d.). *Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems*.
- www.abb.com. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www02.abb.com/db/db0003/db002698.nsf/0/>.
- Γεωργάλας, Σ. (2011). *Σύγχρονοι Μέθοδοι Ελέγχου Κινητήρων*. Καβάλα.
- Ενεργειακή αποδοτικότητα χάρη στην αυξομείωση στροφών συστήματος κίνησης με μετατροπέα συχνότητας*. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.centraline.com>.
- Ζαφειράκης, Γρηγόριος. (2012). *Μελέτη και κατασκευή για ρύθμιση στροφών ενός dc κινητήρα (ισχύος 2 kW) μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσεως*. Αθήνα.
- Ιωαννίδου, Μ. (2008). *Έξυπνα Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Κτίρια και Βιομηχανίες*. Αθήνα.
- Καπετανίδης, Β. (2015). *Συστήματα Ειδικών Ηλεκτρικών Κινητήρων*.
- Καρλής, Α. (2002). *Πανεπιστημιακές Παραδόσεις του Μαθήματος Συστήματα Ηλεκτρικών Μηχανών για Κίνηση και Ηλεκτροπαραγωγή*. Ξάνθη.
- Κορομηλάς, Γ., & Μαρής, Γ. (2011). *Μελέτη και Κατασκευή Κυκλώματος Ελέγχου Αντιστροφέα και Έλεγχος Τριφασικού Ασύγχρονου Κινητήρα*. Πειραιάς.
- Μαλατέστας, Π., & Μανιάς, Α. (2002). *Ηλεκτρική Κίνηση*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Μαλέσιος, Ε., & Παπαδόπουλος, Μ. (2009). *Εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος στην παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας*. Καβάλα.
- Μανιάς, Α. (2000). *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Εκδόσεις Συμεών.
- Μητρονίκας, Ε., Παπαδόπουλος, Π., Σαφάκας, Α., Λαδακάκος, Π., & Ιωαννίδου, Μ. (n.d.). *Σύγχρονα Ηλεκτρονικά Στοιχεία και Διατάξεις Ισχύος για βιομηχανική χρήση*.

- Μπουντάκης, Ε. (2012). *Δυνατότητες Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Κινητήρια Συστήματα και πιθανή συνεισφορά τους ως ευέλικτα φορτία*. Ηράκλειο.
- Νταμάτης, Χ. (2015). *Συστήματα ελέγχου λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα και αποτίμηση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας*. Πάτρα.
- Παπαποστόλου, Γ., & Ανδρέου, Δ. (n.d.). *Μελέτη και εφαρμογή διαφόρων μεθόδων ελέγχου ασύγχρονου τριφασικούκινητήρα με τη βοήθεια αντιστροφέα*. Πειραιάς.
- Σαμουρέλης, Α. (2004). *Μελέτη Κατασκευαστικών και Λειτουργικών Χαρακτηριστικών Νέων Ηλεκτρονικών Στοιχείων Ισχύος*. Πάτρα.
- Σαφάκας, Α., & Τσοτουλίδης, Σ. (2010). *Εξοικονόμηση Ενέργειας από τη χρήση ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων μέσω ελεγχόμενων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος – Εφαρμογές στη βιομηχανία και στα μέσα μεταφοράς*. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.
- Τατάκης, Εμμανουήλ. (2015). *Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές*. Πάτρα.
- Τσαμπούρης, Ε. (2008). *Έλεγχος κινητήρων επαγωγής με κριτήρια ελαχιστοποίησης απωλειών*. Αθήνα.
- Ψωμιάδης, Δημήτριος. (2004). *Ηλεκτρικές μηχανές I και II*. Εκδόσεις Ίων.