



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

MSc in
ROBOTICS

Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στην Ρομποτική
Διπλωματική Εργασία

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Βασίλειος Βλάχου

AM:110

Επιβλέποντες Καθηγητές: Δημήτριος Ευσταθίου

Σταύρος Βολογιαννίδης

**Εφαρμογή Διάφορων Τεχνικών Ελέγχου σε Σύγχρονες Μηχανές
Μόνιμων Μαγνητών σε Εφαρμογές Ανελκυστήρων**



**Application of Various Control Techniques to Permanent Magnet Synchronous
Machines (PMSM) for Elevator Applications**

Σέρρες, Απρίλιος 2024

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.	Θεωρητικό υπόβαθρο ανελκυστήρων.....	15
1.1.	Εισαγωγή	15
1.2.	Βασικός ρόλος ανελκυστήρων: Ανάλυση, Σχεδίαση και Συνεισφορά στην Σύγχρονη Κοινωνία	15
1.3.	Ιστορική εξέλιξη τεχνολογιών ανύψωσης.....	16
1.4.	Τύποι ανελκυστήρων	16
1.5.	Συγκριτική μελέτη ηλεκτροκίνητων ανελκυστήρων με τους υδραυλικούς ανελκυστήρες.....	17
1.6.	Κατηγοριοποίηση τεχνολογίας ανελκυστήρων	19
1.6.1.	Υδραυλικοί ανελκυστήρες.....	19
1.6.2.	Ηλεκτροκίνητοι ανελκυστήρες.....	20
1.7.	Ανάλυση Κύκλου Λειτουργίας Θαλάμου.....	27
Κεφάλαιο 2.	Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης	30
2.1.	Εισαγωγή	30
2.2.	Πηγή Ισχύος.....	31
2.3.	Ηλεκτρονικά ισχύος.....	32
2.3.1.	Εισαγωγή	32
2.3.2.	Κατηγοριοποίηση Μετατροπέων.....	33
2.3.3.	Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα με την χρήση τους	34
2.3.4.	Ημιαγωγικά στοιχεία μετατροπέων ισχύος	35
2.3.5.	Τριφασικός αντιστροφέας	42
2.3.5.1.	Δομή κυκλώματος αντιστροφέα	42
2.3.5.2.	Τάσεις εξόδου αντιστροφέα.....	43
2.4.	Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών	44
2.4.1.	Εισαγωγή	44
2.4.2.	Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM).....	46
2.4.3.	Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών με διανύσματα χώρου (SVPWM).....	50
2.5.	Ηλεκτρική Μηχανή.....	54
2.5.1.	Εισαγωγή	54
2.5.2.	Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος (DC Motor)	56
2.5.3.	Επαγωγικός Ηλεκτρικός Κινητήρας (Induction Motor-IM).....	57
2.5.4.	Ηλεκτρικός Κινητήρας Μαγνητικής Αντίδρασης (Switched Reluctance Motor)	58
2.5.5.	Ηλεκτρικός Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor).....	59
2.5.5.1.	Εισαγωγή.....	59
2.5.5.2.	Αρχή λειτουργίας σύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων	59
2.5.5.3.	Πλεονεκτήματα Ηλεκτρικών Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών.....	60
2.5.5.4.	Χαρακτηριστικά μαγνητικών υλικών	61
2.5.5.5.	Κατασκευαστική δομή μηχανής μόνιμων μαγνητών	61
2.5.5.5.1.	Σύγχρονοι κινητήρες εσωτερικών μαγνητών.....	63
2.5.6.	Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη	65
Κεφάλαιο 3.	Τεχνικές ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών.....	70

3.1.	Βαθμωτός έλεγχος (Scalar Control).....	70
3.2.	Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control-FOC).....	71
3.3.	Άμεσος έλεγχος ροπής (Direct Torque Control-DTC).....	77
3.4.	Μη γραμμικός έλεγχος – Ασαφείς ελεγκτές.....	78
3.4.1.	Εισαγωγή στους ασαφείς ελεγκτές.....	79
3.4.2.	Ασαφή σύνολα.....	80
3.4.3.	Λογικές πράξεις.....	80
Κεφάλαιο 4.	Τεχνικές έλεγχου μηχανής μόνιμων μαγνητών.....	82
4.1.	Πειραματικές καμπύλες κύκλου λειτουργίας ανελκυστήρα.....	82
4.1.1.	Εξοικονόμηση ενέργειας με την τεχνική VVVF (Variable Voltage Variable Frequency).....	86
4.2.	Ανάλυση ροής Μετρήσεων κινητήριου συστήματος ανελκυστήρα.....	88
4.3.	Προσομοίωση τεχνικών έλεγχου σε σύγχρονους κινητήρες μόνιμωνμαγνητών.....	97
4.3.1.	Δυναμικό μοντέλο PMSM με τριφασική τροφοδοσία δικτύου.....	97
4.3.2.	Τροφοδοσία Inverter στον κινητήρα PMSM-Ανοιχτού βρόγχου (Open Loop).....	101
4.3.3.	Έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (FOC) PMSM με χρήση αντιστροφέα.....	109
4.3.4.	Ελεγκτές ταχύτητας (speed controller) στην PMSM.....	115
4.3.5.	Δυναμικό μοντέλο προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control-FOC).....	117
4.3.6.	Δυναμικό μοντέλο με την χρήση ασαφή ελεγκτή (Fuzzy Logic Controller).....	118
Κεφάλαιο 5.	Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	124
5.1.	Συμπεράσματα.....	124
5.2.	Βασικά σημεία συμβολής της διπλωματικής εργασίας.....	126
5.3.	Μελλοντικές προτάσεις.....	126
5.4.	Προτάσεις για επιπλέον διερεύνηση στην επιστήμη.....	127

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω πως είμαι ο συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται σε αυτήν. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς, είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Ρομποτική του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος.

Βασίλειος Βλάχου

Απρίλιος 2024

Περίληψη

Η διαχρονική εξέλιξη της βιομηχανίας των ανελκυστήρων αποτελεί αναμφίβολα ένα σημαντικό πεδίο έρευνας λόγω του συνδυασμού ηλεκτρολογικών, ηλεκτρονικών και μηχανολογικών συστημάτων μεταξύ τους. Άλλωστε η εξέλιξη τους τα κατέστησε να αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι στην καθημερινότητα των πολιτών καθώς εντοπίζονται σε συνεχείς και επαναλαμβανόμενες κινήσεις τους ως ένα κρίσιμο μέσο μεταφοράς τους. Αρχικά η καθοριστική τους συμβολή εντοπίζεται στις ασφαλείς μετακινήσεις τους καθώς για την χρήση και την λειτουργία τους λαμβάνονται υπ' όψη βασικοί παράμετροι και πληρούνται διάφορα πρωτόκολλα ασφαλείας. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς και μετακίνησης μεγάλων φορτίων όπου ανάλογα με τις προδιαγραφές και την ταχύτητα του ανελκυστήρα διαμορφώνεται και ο καθορισμός των κινήσεων του. Η πιο βασική παράμετρος όμως αφορά τον τύπο ανελκυστήρα καθώς στην αγορά διακρίνονται πολλά και διαφορετικά είδη που χαρακτηρίζονται από την ευελιξία και την λειτουργικότητα τους. Αναλύοντας κανείς την διεθνή βιβλιογραφία θα διαπιστώσει ότι η μελέτη εκτός από τις ηλεκτρολογικές διερευνήσεις θα επικεντρωθεί και στις μηχανολογικές. Η διπλωματική εργασία αποσκοπεί στο να διερευνηθούν τα ηλεκτρολογικά μέρη του κινητήριου συστήματος ενός ηλεκτρομηχανικού ασανσέρ που αποτελεί σήμερα την κύρια τεχνολογία λειτουργίας και κατασκευής των ανελκυστήρων. Ο ηλεκτροκινητήρας άλλωστε που αποτελεί και το κύριο μέσο μετάδοσης της κίνησης του κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός από τους κατασκευαστές ώστε να επιτευχθούν καλύτερες αποδόσεις λειτουργίας τόσο του συνολικού συστήματος όσο και του ηλεκτρικού κινητήρα και μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας. Η σωστή λειτουργικότητα του ηλεκτροκινητήρα στηρίζεται κατά κύριο λόγο στα ηλεκτρονικά ισχύος και στην χρήση τους. Με την χρήση κατάλληλα σχεδιασμένου μετατροπέα και διαμόρφωση κατάλληλων τεχνικών ελέγχου τα οποία αποτελούν δύο βασικές συνιστώσες σωστής λειτουργικότητας του συστήματος κίνησης.

Με την παρούσα διπλωματική εργασία προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής κατάλληλου ηλεκτροκινητήρα ο οποίος έρχεται σε συνάρτηση με την ταχύτητα και εφαρμογή του ανελκυστήρα. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής μηχανής τροποποιούνται ανάλογα με την εφαρμογή που θέλουμε να διερευνήσουμε. Η μελέτη μας θα εστιαστεί στην συγκριτική ανάλυση διάφορων τεχνικών ελέγχου σε ηλεκτρική μηχανή

υποβοηθούμενη από μόνιμους μαγνήτες υψηλής απόδοσης και χαμηλών απωλειών προκειμένου οι τελικές γραφικές παραστάσεις που θα εξαχθούν να αναδείξουν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τις κατηγορίες ελέγχου που εφαρμόστηκαν και ποια τεχνική είναι κατάλληλη ώστε να χρησιμοποιηθεί στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε ~~επτά~~ ~~επιμέρους~~ πέντε κεφάλαια. Στην αρχή πραγματοποιείται μία γενικότερη αναφορά στην εξέλιξη της τεχνολογίας των ανελκυστήρων. Επιπλέον, αναλύεται ο συνολικός κύκλος λειτουργίας του συστήματος κίνησης με την χρήση πειραματικών καμπυλών σε σύγκριση με τις προσομοιωμένες ώστε να διαπιστωθεί ο σωστός προγραμματισμός που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας. Στη συνέχεια, το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στις ηλεκτρικές μηχανές, με ιδιαίτερη έμφαση στις σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών. Παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά, ενώ αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που τις έχουν καθιερώσει στη βιομηχανία των ανελκυστήρων. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια γενική εισαγωγή στο μαθηματικό μοντέλο της μηχανής μόνιμου μαγνήτη και εξετάζεται η τροποποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος με την ενσωμάτωση των απωλειών. Επιπλέον, δίνεται έμφαση στον σημαντικό ρόλο των ηλεκτρονικών ισχύος, απαραίτητων για την οδήγηση του κινητήρα, και παρουσιάζονται οι κατηγορίες ελέγχου που θα χρησιμοποιηθούν για τις προσομοιώσεις. Σε επίπεδο προσομοίωσης, θα χρησιμοποιηθούν τα εργαλεία από το προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB/Simulink προκειμένου να προσομοιωθούν και να συγκριθούν μεταξύ τους οι διάφορες τεχνικές ελέγχου. Τέλος, πραγματοποιείται ανάλυση των χρήσιμων συμπερασμάτων που προκύπτουν από τη μελέτη, ενώ προτείνονται μελλοντικές προεκτάσεις που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο επιπλέον έρευνας.

Λέξεις- Κλειδιά: Ηλεκτροκίνητος ανελκυστήρας, Σύγχρονη Ηλεκτρική Μηχανή υποβοηθούμενη από μόνιμους μαγνήτες, Ρύθμιση ταχύτητας ανελκυστήρα, Τριφασικός αντιστροφάας, Τεχνικές ελέγχου, Έλεγχος ανοιχτού βρόγχου, Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου, Έλεγχος με ασαφείς ελεγκτές, Αναλογικοί, Ολοκληρωτικοί ελεγκτές, Άμεσος έλεγχος ροπής.

Abstract

The evolution of the lift industry over time is undoubtedly an important field of research due to the combination of electrical, electronic and mechanical systems. Besides, their evolution has made them an important part in the daily life of citizens as they are identified in their continuous and repetitive movements as a critical means of transportation. Initially, their decisive contribution can be found in their safe movement as their use and operation take into account key parameters and comply with various safety protocols. In addition, the possibility of transporting and moving large loads is given, where, depending on the specifications and the speed of the lift, the definition of its movements is also formed. However, the most basic parameter concerns the type of lift, as there are many different types of lift on the market, characterized by their flexibility and functionality. The thesis will focus on the study of the mechanical in addition to the electrical elements of an elevator. More specifically, the thesis aims to study the electrical parts of the drive system of an electromechanical elevator, which is currently the main operating and manufacturing technology of elevators. The electric motor, which is also the main means of transmission, is considered particularly important by manufacturers in order to achieve better operating efficiency of both the overall system and the electric motor and greater energy saving. The proper functionality of the electric motor relies primarily on the use of the power electronics. More specifically, properly designed inverter and appropriate configuration of control techniques, are two key components to deliver optimal drive system functionality.

This thesis presents the selection of a suitable electric motor as a function the speed and application of the lift. It is worth noting, that the technical characteristics of the electric motor are modified according to the application we have to explore. The study will focus on the comparative analysis of different control techniques in a high efficiency and low loss permanent magnet assisted electric motor. The final graphs extracted will highlight important conclusions about the control techniques applied and which technique is suitable to be used in the specific application.

The thesis is divided into five chapters. At the beginning a general reference to the development of elevator technology is presented. In addition, the overall operating cycle of the drive system is analyzed using experimental curves compared to simulated ones in order to establish the

correct system configuration that can lead to significant energy saving. The second chapter focuses on electrical machines, with particular emphasis on modern permanent magnet machines. Detailed information on their construction characteristics is provided, and the advantages and disadvantages that have established them in the lift industry are analyzed. In chapter three, an introduction to the mathematical model of the permanent magnet machine is presented and the modification of the equivalent circuit by incorporating losses is discussed. In addition, the important role of power electronics, necessary for driving the motor, is emphasized and the control techniques to be used for the simulations are presented. At the simulation level, the tools from the MATLAB/Simulink programming environment will be used in order to simulate and compare the different control techniques. Finally, the conclusions drawn from the study are presented and ideas that can be the subject of further research are suggested.

Keywords: Electric elevator, Permanent magnet synchronous motor, Inverter, Open Loop control, close loop control, Field-oriented control, Fuzzy Logic controllers, PI controller, PID controller, direct torque control.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ευστάθιο Δημήτριο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Βολογιαννίδη Σταύρο για την ευκαιρία που μου παρείχαν να εργαστώ πάνω σε αυτό το ενδιαφέρον θέμα και για τη στήριξή τους στη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι εποικοδομητικές τους παρατηρήσεις και ο χρόνος που διέθεσαν για την αξιολόγηση αποτέλεσαν καθοριστικοί παράγοντες για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.

Στη συνέχεια, θέλω να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου. Η αμέριστη στήριξή τους και η απέραντη πίστη τους αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη όλων των στόχων μου. Επιπλέον, ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ προς τα αδέρφια μου, τα οποία αποτελούν όχι μόνο πηγή έμπνευσης, αλλά και αξιόλογα παραδείγματα στην επιστημονική και επαγγελματική μου πορεία.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σαγρή Δημήτριο για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε στη μελέτη και παρουσίαση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, καθώς επίσης και για τις πολύτιμες γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος στη Ρομποτική.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω με τον πιο ειλικρινή τρόπο την κοπέλα μου, Ανατολή, η οποία δεν σταμάτησε ποτέ να με στηρίζει με υπομονή και κατανόηση κατά την διάρκεια της προσπάθειας αυτής. Ήταν πάντα στο πλευρό μου αποτελώντας τον μεγαλύτερο μου υποστηρικτή τόσο στις καλές όσο και στις δύσκολες στιγμές όποτε την χρειαζόμουν.

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1.1 Βασικά κατασκευαστικά μέρη υδραυλικού ανελκυστήρα.....	20
Εικόνα 1.2 Ηλεκτρομηχανικός ανελκυστήρας (ανελκυστήρας έλξης)	21
Εικόνα 1.3 Φρεάτιο κίνησης ανελκυστήρα	22
Εικόνα 1.4 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ηλεκτρομηχανικού ανελκυστήρα	22
Εικόνα 1.5 Geared επαγωγικός κινητήρας	23
Εικόνα 1.6 Gearless σύγχρονος κινητήρας μόνιμωνμαγνητών	23
Εικόνα 1.7 Βάση τοποθέτησης ηλεκτρικής μηχανής	24
Εικόνα 1.8 Τροχαλία τριβής	25
Εικόνα 1.9 Συρματόσχοινα ανύψωσης ανελκυστήρα	25
Εικόνα 1.10 Μεταλλικές πλάκες	26
Εικόνα 1.11 Αντίβαρο ηλεκτρομηχανικού ανελκυστήρα	27
Εικόνα 1.12 Τυπικός κύκλος λειτουργίας ανελκυστήρα	28
Εικόνα 2.1 Διάγραμμα συστήματος μετάδοσης κίνησης	30
Εικόνα 2.2 Χαρακτηριστικές λειτουργίες ηλεκτρικής μηχανής.....	31
Εικόνα 2.3 Κατηγοριοποίηση συσσωρευτών	32
Εικόνα 2.4 Κατηγοριοποίηση ημιαγωγικών στοιχείων	34
Εικόνα 2.5 Εφαρμογές ημιαγωγικών στοιχείων.....	35
Εικόνα 2.6 Κατηγοριοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος	35
Εικόνα 2.7 Σύμβολο διόδου	36
Εικόνα 2.8 Δομική κατασκευή και σύμβολο θυρίστορ	37
Εικόνα 2.9 Transistor npn.....	38
Εικόνα 2.10 Transistor pnp.....	38
Εικόνα 2.11 Σύμβολο απεικόνιση BJT.....	38
Εικόνα 2.12 Εξωτερική δομική αναπαράσταση BJT	40
Εικόνα 2.13 Καμπύλες διπολικό τρανζίστορ επαφής.....	41
Εικόνα 2.14 Ισοδύναμο κύκλωμα IGBT	40
Εικόνα 2.15 Συμβολισμός ελεγχόμενου διπολικού τρανζίστορ με μεμονωμένη πύλη (IGBT).....	40
Εικόνα 2.16 Δομικά χαρακτηριστικά GTO	41
Εικόνα 2.17 Σύμβολο GTO	41
Εικόνα 2.18 Κατασκευαστική δομή και σύμβολο MOSFET.....	42
Εικόνα 2.19 Δομική λειτουργία αντιστροφέα τάσης.....	43

Εικόνα 2.20 Τριφασικός αντιστροφέας δύο επιπέδων	43
Εικόνα 2.21 Τεχνικές διαμόρφωσης μετατροπέων ισχύος	45
Εικόνα 2.22 Κατηγοριοποίηση τεχνικών PWM.....	46
Εικόνα 2.23 Τεχνική SPWM	47
Εικόνα 2.24 Καμπύλες διαμόρφωσης πλάτους και συχνότητας	49
Εικόνα 2.25 Πιθανοί συνδυασμοί διακοπτικών καταστάσεων λειτουργίας τριφασικού αντιστροφέα	50
Εικόνα 2.26 Τριφασική τάση τροφοδοσίας αντιστροφέα	51
Εικόνα 2.27 Περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς	52
Εικόνα 2.28 Αλγόριθμος SVPWM.....	54
Εικόνα 2.29 Είδη Ηλεκτρικών Μηχανών.....	55
Εικόνα 2.30 Σταθερό μέρος κινητήρα συνεχούς ρεύματος.....	56
Εικόνα 2.31 Κινητό μέρος κινητήρα συνεχούς ρεύματος.....	57
Εικόνα 2.32 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.....	57
Εικόνα 2.33 Ηλεκτρικός κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης.....	58
Εικόνα 2.34 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο	60
Εικόνα 2.35 Κατηγορίες τυλιγμάτων (Α) Διανεμημένα τυλίγματα, (Β) Συγκεντρωμένα τυλίγματα.....	62
Εικόνα 2.36 Radial flux permanent magnet synchronous motor	62
Εικόνα 2.37 Axial flux permanent magnet synchronous motor.....	63
Εικόνα 2.38 Κατηγορίες μηχανών μόνιμωνμαγνητών	63
Εικόνα 2.39 Εσωτερική διαμόρφωση interior permanent magnet	64
Εικόνα 2.40 Εσωτερικό μέρος surface-mounted permanent magnet	65
Εικόνα 2.41 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής.....	65
Εικόνα 2.42 Διαμόρφωση πεδίου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη κατά d και q άξονα.....	66
Εικόνα 3.1 Δομικό διάγραμμα βαθμωτού ελέγχου v/f	71
Εικόνα 3.2 Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (FOC).....	73
Εικόνα 3.3 Αλγόριθμος Field Oriented Control	75
Εικόνα 3.4 Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Παράγωγος Ελεγκτής.....	76
Εικόνα 3.5 Τεχνική ελέγχου DTC	78
Εικόνα 3.6 Πράξεις με την χρήση ασαφούς λογικής	81
Εικόνα 4.1 Αναλυτής κραδασμών QS3 henning	82

Εικόνα 4.2 Ανοδική κίνηση μηχανικού ανελκυστήρα gearless με οδήγηση VVVF	83
Εικόνα 4.3 Καθοδική κίνηση μηχανικού ανελκυστήρα gearless με οδήγηση VVVF.....	84
Εικόνα 4.4 Καμπύλες κίνησης ανελκυστήρα: (α) Γραμμική ταχύτητα θαλάμου, (β) Γραμμική επιτάχυνση θαλάμου	85
Εικόνα 4.5 Καμπύλες μηχανικών χαρακτηριστικών κινητήρα: (α) Ταχύτητα κινητήρα, (β) Ηλεκτρομαγνητική ροπή κινητήρα	91
Εικόνα 4.6 Ισχύς κινητήρα για τις 3 φορτίσεις θαλάμου	93
Εικόνα 4.7 Διάγραμμα ροής συνολικού κινητήριου συστήματος ανελκυστήρα.....	94
Εικόνα 4.8 Power Quality Analyzer Hioki PW3390.....	95
Εικόνα 4.9 Ενεργειακός αναλυτής Fluke power logger 1735 σε συνδεσμολογία με τις 3 φάσεις	96
Εικόνα 4.10 Πειραματική διάταξη στο φρεάτιο ανελκυστήρα	96
Εικόνα 4.11 Μετασχηματισμός Park-Clark	97
Εικόνα 4.12 Block Ηλεκτρομαγνητικής ροπής.....	98
Εικόνα 4.13 Block Ηλεκτρικής ταχύτητας.....	98
Εικόνα 4.14 Block Ηλεκτρικό μέρος	98
Εικόνα 4.15 Μαθηματικό μοντέλο PMSM	99
Εικόνα 4.16 Καμπύλη Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής-Χρόνου σε κενό φορτίο.....	99
Εικόνα 4.17 Καμπύλη γωνιακής ταχύτητας-χρόνου	100
Εικόνα 4.18 Χρονική αποκατάσταση ταλαντωτικής συμπεριφοράς ροπής-ταχύτητας.....	100
Εικόνα 4.19 Ρεύματα τριών φάσεων για λειτουργία κενού φορτίου, μεγεθυμένο σε χρονικό πλαίσιο όπου αναδεικνύεται η ημιτονοειδή απόκριση.....	101
Εικόνα 4.20 Τροφοδοσία κινητήρα PMSM με Inverter και SPWM.....	101
Εικόνα 4.21 Ηλεκτρομαγνητική ροπή υπό κενό φορτίο	102
Εικόνα 4.22 Γωνιακή ταχύτητα κινητήρα.....	103
Εικόνα 4.23 Ρεύμα εξόδου αντιστροφέα.....	103
Εικόνα 4.24 Ρεύμα εξόδου κινητήρα	104
Εικόνα 4.25 Τάση εξόδου αντιστροφέα	105
Εικόνα 4.26 Τάση εξόδου αντιστροφέα με φίλτρο.....	105
Εικόνα 4.27 Ονομαστικό ρεύμα κινητήρα	106
Εικόνα 4.28 Ροπή κινητήρα σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας	106
Εικόνα 4.29 Ρεύματα με μεταβατικό φαινόμενο στα 0.5sec.....	107

Εικόνα 4.30 Ταχύτητα με μεταβατικό φαινόμενο στα 0.5sec	108
Εικόνα 4.31 Ηλεκτρομαγνητική ροπή με μεταβατικό φαινόμενο στα 0.5sec.....	108
Εικόνα 4.32 Δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης FOC	109
Εικόνα 4.33 Block PI ελεγκτή ταχύτητας	109
Εικόνα 4.34 Block PI ελεγκτή ρεύματος κατά q-άξονα.....	109
Εικόνα 4.35 Block PI ελεγκτή ρεύματος κατά d-άξονα.....	110
Εικόνα 4.36 Ρεύματα που εξάγονται από τον inverter.....	110
Εικόνα 4.37 Τάση εξόδου αντιστροφέα που τροφοδοτείται ο κινητήρας	111
Εικόνα 4.38 Ρεύμα εξόδου κινητήρα PMSM.....	111
Εικόνα 4.39 Σφάλμα ρεύματος αναφοράς ($[\text{id}]_{\text{ref}}$) και ρεύματος εξόδου κινητήρα κατά d-άξονα	112
Εικόνα 4.40 Σφάλμα ρεύματος αναφοράς ($[\text{iq}]_{\text{ref}}$) και ρεύματος εξόδου κινητήρα κατά q-άξονα	113
Εικόνα 4.41 Σφάλμα ταχύτητα αναφοράς ($[\text{wm}]_{\text{ref}}$) και ταχύτητας εξόδου ηλεκτρικής μηχανής	113
Εικόνα 4.42 Δυναμικό μοντέλο PI ελεγκτές ταχύτητας.....	114
Εικόνα 4.43 Έλεγχος ταχύτητας για διαφορετικά γ	114
Εικόνα 4.44 Ρεύματα για διαφορετικά γ	115
Εικόνα 4.45 Δυναμικό μοντέλο PMSM με PID Controller.....	116
Εικόνα 4.46 Έλεγχος ταχύτητας για διαφορετικά γ	116
Εικόνα 4.47 Ρεύματα για διαφορετικά γ	116
Εικόνα 4.48 Έλεγχος με την μέθοδο προσανατολισμένου πεδίου (FOC).....	117
Εικόνα 4.49 Έλεγχος ταχύτητας με την μέθοδο προσανατολισμένου πεδίου	117
Εικόνα 4.50 Τριφασικά ρεύματα εξόδου κινητήρα.....	118
Εικόνα 4.51 Δυναμικό μοντέλο PMSM με Fuzzy Logic Controller	118
Εικόνα 4.52 Βασική δομή ασαφή ελεγκτή.....	118
Εικόνα 4.53 Είσοδος συνάρτησης συμμετοχής σφάλματος ταχύτητας	118
Εικόνα 4.54 Είσοδος συνάρτησης συμμετοχής παράγωγος σφάλματος ταχύτητας	118
Εικόνα 5.55 Έξοδος συστήματος ασαφή ελεγκτή.....	118
Εικόνα 4.56 Διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου με ασαφή ελεγκτή.....	118

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1 Τυπολογία τεχνικής SPWM.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πίνακας 2 Συνδυασμοί κατάστασης λειτουργίας αντιστροφέα εφαρμόζοντας την τεχνική SVPWM	54
Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών μηχανών	57
Πίνακας 4 Βασικά μεγέθη παραμετροποίησης μηχανής μόνιμων μαγνητών	6968
Πίνακας 5 Τυπολόγιο ελεγκτών ρεύματος και ταχύτητας	74
Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά Acceleration sensor QS3 henning	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά μηχανικού συστήματος ανελκυστήρα.....	89
Πίνακας 8 Προδιαγραφές κινητήρα ανελκυστήρα.....	93
Πίνακας 9 Ονομαστικά χαρακτηριστικά σύγχρονου κινητήρα μόνιμωνμαγνητών	94
Πίνακας 10 Συνδυασμός συναρτήσεων μεταφοράς.....	94

Κεφάλαιο 1. Θεωρητικό υπόβαθρο ανελκυστήρων

1.1. Εισαγωγή

Η δημιουργία νέων καινοτομιών αποτελεί ένα βασικό κομμάτι της βιομηχανίας που έρχεται σε συνάρτηση με την εξέλιξη νέων τεχνολογιών, με την εισαγωγή του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) και της μηχανικής μάθησης (Machine Learning) στην ζωή μας [1]. Τα παραπάνω αποσκοπούν σε νέα συστήματα περισσότερο αποδοτικά και ασφαλή προς χρήση [2]. Στην συγκεκριμένη κατηγορία συγκαταλέγονται και οι ανελκυστήρες οι οποίοι προσδίδουν αυτονομία σε όλους τους χρήστες τους. Ο γενικότερος στόχος όλων των βιομηχανιών αφορά κυρίως τον κατάλληλο σχεδιασμό νέων συστημάτων τα οποία θα ανταποκρίνονται στις άμεσες ανάγκες των ανθρώπων [3].

Στην αρχή θα εστιάσουμε σε μία γενική εισαγωγή η οποία θα στηρίζεται στην ιστορική αναδρομή και στην διαχρονική εξέλιξη των ανελκυστήρων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις σύγχρονες εφαρμογές που μπορούμε να τους συναντήσουμε. Επιπλέον, θα αναφερθούμε στην κύρια δομή και στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που αποτελούν μέρη ενός τέτοιου κινητήριου συστήματος.

1.2. Βασικός ρόλος ανελκυστήρων: Ανάλυση, Σχεδίαση και Συνεισφορά στην Σύγχρονη Κοινωνία

Οι ανελκυστήρες, ως εγκαταστάσεις που ανυψώνουν και μεταφέρουν μεγάλα φορτία, ανεξάρτητα εάν πρόκειται για ανθρώπους ή αντικείμενα, αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της ζωής σε πολυώροφα κτήρια. Οι ανελκυστήρες εξασφαλίζουν ασφαλή και αποτελεσματική μετακίνηση, αποφεύγοντας την κούραση της ανάβασης και της κατάβασης σε κλιμακοστάσια [4]. Από τα αρχαία χρόνια έως την σύγχρονη εποχή, οι ανελκυστήρες έχουν υποστεί διαρκείς εξελίξεις, αποτελώντας αντικείμενο επιστημονικών ερευνών για την βελτίωση της μεταφοράς. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι η παραδοσιακή χρήση σχοινιών από τους καλόγερους στα Μετέωρα, αποδεικνύοντας την σύνδεση της τεχνολογίας με την επιβίωση και τον πολιτισμό. Με αυτή την εξέλιξη, οι ανελκυστήρες δεν αποτελούν μόνο μηχανικά μέσα μετακίνησης αλλά

και σημαντικό κομμάτι της ιστορίας και τεχνολογίας, συνδυάζοντας αποτελεσματικότητα με την ιστορία της ανθρωπότητας [5].

1.3. Ιστορική εξέλιξη τεχνολογιών ανύψωσης

Το κρίσιμο βήμα προς την δημιουργία των ανελκυστήρων βασίστηκε στην θεωρία του ατέρμονου κοχλία, παρέχοντας την κατάλληλη ώθηση προκειμένου να εξελιχθεί η συγκεκριμένη τεχνολογία, η οποία διαδραμάτισε κεντρικό ρόλο στην εξέλιξη της μηχανικής των ανυψώσεων. Αυτή η σημαντική θεωρία πρωτοεμφανίστηκε το 236 π.Χ. από ένα από τους πιο σπουδαίους επιστήμονες της εποχής, τον Αρχιμήδη. Η εξέλιξη αυτή άνοιξε τον δρόμο για την εφαρμογή μηχανισμών ανύψωσης σε διάφορους τομείς που ακολούθησε όλα τα επόμενα χρόνια και εξακολουθεί να υφίστανται ακόμα και σήμερα. Παρόμοιες τεχνικές ανύψωσης χρησιμοποιήθηκαν εκείνα τα χρόνια και σε άλλες χώρες [6].

Με την αρχαία θεωρία της υδροβίδας, η προσπάθεια επικεντρώθηκε στην δημιουργία αξιόπιστων ανελκυστήρων, με βασικό στόχο την παροχή ασφάλειας στους επιβάτες. Ειδικότερα, από το 1853 ο Elisha Otis παρουσίασε μία νέα και καινοτόμο διάταξη που στηριζόταν στο εγχείρημα της παροχής ασφάλειας. Η πλατφόρμα, που κινείται μεταξύ δύο οδηγών, κόβει το σχοινί κατά την ανύψωση, αλλά ένα σύστημα ασφαλείας τη διατηρεί σταθερή. Με βάση την συγκεκριμένη διάταξη αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν οι πρώτοι υδραυλικοί ανελκυστήρες [7].

Ωστόσο, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στους ηλεκτρομηχανικούς ανελκυστήρες, με την εξέλιξη τους να χρονολογείται περίπου το 1889. Η κινητήρια διάταξη που δημιουργήθηκε περιελάμβανε έναν ηλεκτρικό κινητήρα και ένα τύμπανο περιέλιξης. Με την εισαγωγή του ηλεκτρισμού το 1894, εμφανίστηκαν τα πρώτα χειριστήρια με κουμπιά, ενώ το 1985 παρουσιάστηκε ανυψωτική συσκευή με αυλακωτή τροχαλία στην κορυφή του φρεατίου [8].

1.4. Τύποι ανελκυστήρων

Η παγκόσμια βιβλιογραφία αναδεικνύει μια συνεχή εξέλιξη στην τεχνολογία των ανελκυστήρων, ξεκινώντας από την αρχαιότητα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και συνεχίζοντας ακόμα και σήμερα με εντυπωσιακούς ρυθμούς. Στην βιομηχανία των

ανελκυστήρων διακρίνουμε δύο βασικούς τύπους τους **υδραυλικούς** και τους **ηλεκτρομηχανικούς** ανελκυστήρες [9].

Οι υδραυλικοί ανελκυστήρες πρωτοεμφανίστηκαν από τα παλαιότερα χρόνια και εξελίχθηκαν σε μία ανυψωτική διάταξη που χρησιμοποιεί ηλεκτροκίνητη αντλία. Αυτή η αντλία μεταφέρει υδραυλικό ρευστό σε μία ανυψωτική μονάδα, παρέχοντας την αναγκαία ενέργεια για την ανύψωση του ανελκυστήρα. Παρόλο που, τα παλαιότερα χρόνια ήταν ευρεία η εξέλιξη τους, όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει περιοριστεί αισθητά [10].

Σαφέστατα οι προσπάθειες των βιομηχανιών που επικεντρώθηκαν στην εύρεση νέων, καινοτόμων, πιο οικολογικών και οικονομικότερων μέσων επηρέασε και τους ανελκυστήρες. Οι ηλεκτροκίνητοι ανελκυστήρες αναδείχτηκαν ως εναλλακτική επιλογή όπου η λειτουργία τους σχετίζεται κατά κύριο λόγο στο αντίβαρο. Ο ηλεκτροκινητήρας παρέχει την κατάλληλη ηλεκτρική ισχύ προκειμένου να δοθεί η απαραίτητη ώθηση στον θάλαμο και συνεπώς να ανυψωθεί το φορτίο [11].

Ο σχεδιασμός του ηλεκτροκινητήρα αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο, έχει σχεδιαστεί ώστε να αντιμετωπίσει τόσο το βάρος του θαλάμου όσο και το επιπλέον βάρος του φορτίου. Ο μηχανισμός μετάδοσης της κίνησης ρυθμίζεται μέσω μιας τροχαλίας τριβής, ενώ η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξαρτάται και από την ποιότητα των συρματόσχοινων [12].

Γενικά, όσον αφορά τους μηχανικούς ανελκυστήρες, υπάρχει διάκριση μεταξύ του ανελκυστήρα τυμπάνου που χρησιμοποιείται σε ελάχιστες περιπτώσεις σε σχέση με τον ανελκυστήρα έλξεως που περιλαμβάνει την τροχαλία τριβής και το αντίβαρο.

1.5. Συγκριτική μελέτη ηλεκτροκίνητων ανελκυστήρων με τους υδραυλικούς ανελκυστήρες

Πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας όπου φτάνουν και το 35% ενώ με την χρήση αναγεννητικής πέδησης μπορούν να αγγίζουν και το 50%. Η απουσία κιβωτίου ταχυτήτων περιορίζει τις μηχανικές απώλειες του συστήματος. Οι απώλειες αυτές

οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη τριβής στα δόντια των γραναζιών που προκαλούν απώλειες ενέργειας σε θερμότητα [13].

- Τεχνολογία φιλικότερη στο περιβάλλον [14].
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του ανελκυστήρα καθώς η μεγαλύτερη αντοχή τους σε κραδασμούς αυξάνει και τον χρόνο ζωής των κινητήρων [15].
- Απλή λειτουργικότητα κατά την χρήση τους περιορίζοντας σημαντικά τα κόστη συντήρησης.
- Μη απαραίτητη η παρουσία μηχανοστασίου καθώς χρησιμοποιείται η τεχνολογία MRL (Machine Room-Less) και χρησιμοποιούνται κυρίως σε κτήρια που θέλουν εξοικονόμηση χώρου.
- Δεν υπάρχει περιορισμός όσον αφορά το ύψος του κτηρίου, την ταχύτητα κίνησης του και στις ζεύξεις που μπορεί να εκτελέσει.

Μειονεκτήματα:

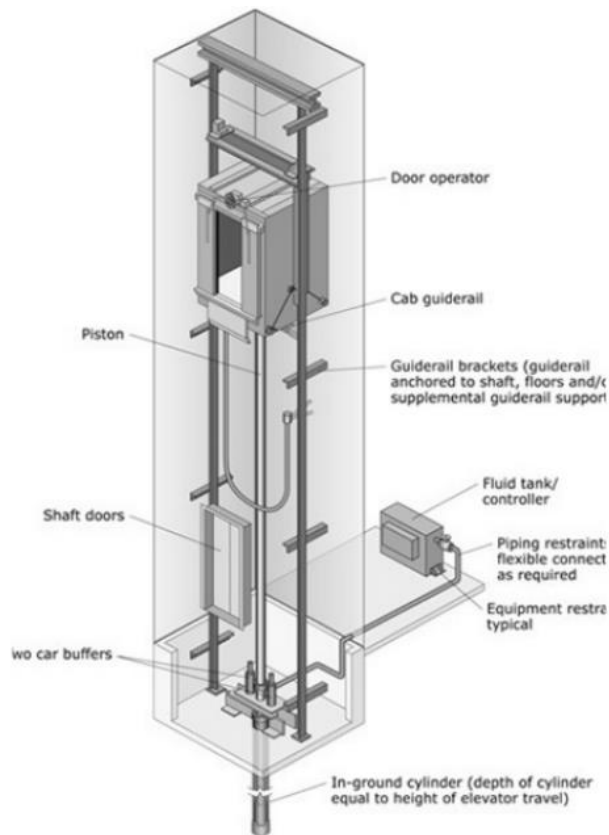
- Δυσκολία εγκατάστασης του.
- Υψηλό κόστος εγκατάστασης διότι απαιτείται και η παρουσία ηλεκτροκινητήρα.
- Δυνατότητα εξυπηρέτησης μικρότερου αριθμού ανθρώπων σε σχέση με τον υδραυλικό διότι ο θάλαμος είναι μικρότερος με την παρουσία του αντίβαρου.
- Δεν διαθέτουν ενσωματωμένους μηχανισμούς απεγκλωβισμού στην περίπτωση διακοπής ηλεκτρικού ρεύματος.
- Δυσκολία στην ευελιξία σχεδιασμού κτηρίων και εξοικονόμησης χώρου με την παρουσία του μηχανοστασίου [16].

Πραγματοποιώντας μια συγκριτική διερεύνηση βάσει των προαναφερθέντων δεδομένων, μπορούμε να συμπεράνουμε η κάθε κατηγορία ανελκυστήρων έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατά την λειτουργία της, τα οποία είναι προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Ωστόσο, ένας κύριος λόγος που οι μηχανικοί ανελκυστήρες επιλέγονται σε πολλές εφαρμογές είναι η έμφαση στους ηλεκτρικούς κινητήρες και την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος [16]. Αυτό συνδυάζεται με την ανάγκη για αυξημένα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, παρέχοντας παράλληλα υψηλά επίπεδα ασφάλειας των χρηστών [17].

1.6. Κατηγοριοποίηση τεχνολογίας ανελκυστήρων

1.6.1. Υδραυλικοί ανελκυστήρες

Η λειτουργία του υδραυλικού ανελκυστήρα βασίζεται σε μια αντλία, η οποία έχει ως βασικό σκοπό τη μεταφορά ρευστού από το δοχείο λαδιού προς τον κύλινδρο, παρέχοντας έτσι ανοδική κίνηση στον θάλαμο. Αντίστοιχα, η καθοδική κίνηση επιτυγχάνεται χάρη στην επίδραση της βαρύτητας (g). Με τη χρήση ενός εξειδικευμένου συστήματος ελέγχου, που ρυθμίζεται από ένα μπλοκ βαλβίδων, επιτυγχάνεται η επιστροφή του ρευστού στο καζάνι. Η ροή του ρευστού, η οποία ρυθμίζεται ακριβώς από το μπλοκ βαλβίδων, επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της κίνησης του ανελκυστήρα [18]. Κατά τη μεταφορά του ρευστού από το δοχείο στον κύλινδρο, παρέχεται η ανοδική κίνηση, ενώ με την επιστροφή του ρευστού στο καζάνι, επιτυγχάνεται η καθοδική κίνηση. Αυτό το προηγμένο σύστημα ελέγχου εξασφαλίζει τη σταθερή και ασφαλή λειτουργία του ανελκυστήρα, επιτρέποντας ακριβείς κινήσεις κατά την ανύψωση και την καθοδική κίνηση. Μέσω αυτού του μηχανισμού, η μεταφορά επιβατών ή φορτίων γίνεται αποτελεσματικά και με ασφάλεια [19],[20],[21].



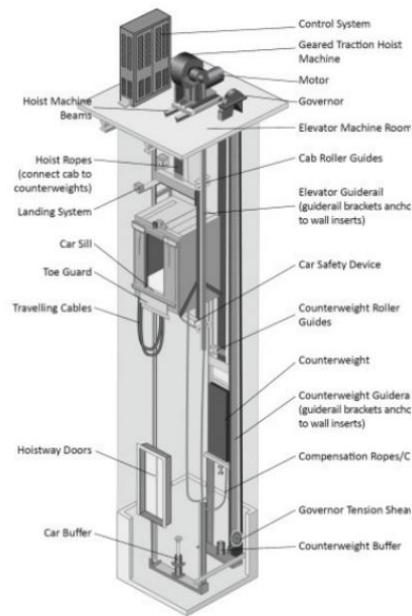
Εικόνα 1.1 Βασικά κατασκευαστικά μέρη υδραυλικού ανελκυστήρα

- **Αντλία λαδιού:** Η οποία είναι υπεύθυνη για την μεταφορά του υδραυλικού ρευστού από το δοχείο λαδιού στον κύλινδρο, προσφέροντας την κατάλληλη κίνηση στον θάλαμο [22].
- **Δοχείο λαδιού:** Ένα δοχείο το οποίο περιέχει το υδραυλικό ρευστό, το οποίο μεταφέρεται από την αντλία.
- **Κύλινδρος-Έμβολο:** Ο κύλινδρος λαμβάνει το υδραυλικό ρευστό και μετακινεί αναλόγως το έμβολο για να ανυψώσει ή να κατεβάσει τον θάλαμο [23].
- **Μπλοκ βαλβίδων:** Το μπλοκ βαλβίδων ελέγχει την ροή του υδραυλικού ρευστού και επιτρέπει την κατεύθυνση της κίνησης, επιτυγχάνοντας έτσι την κατάλληλη κατεύθυνση του θαλάμου.

1.6.2. Ηλεκτροκίνητοι ανελκυστήρες

Οι μηχανικοί ανελκυστήρες χαρακτηρίζονται και ανελκυστήρες τριβής καθώς ο άξονας του κινητήρα είναι προσαρμοσμένος στην τροχαλία τριβής. Τα συρματόσχοινα συγκρατούν από την μία πλευρά το φορτίο και από την άλλη το αντίβαρο. Σε αρκετούς ανελκυστήρες παρατηρούμε και επιπλέον τροχαλίες προκειμένου να βελτιώσουν το σύστημα μετάδοσης κίνησης [24].

Αναμφίβολα, οι ηλεκτροκίνητοι ανελκυστήρες αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία ασανσέρ σήμερα. Οι αποτελεσματικές μετακινήσεις σε μεγάλα κτήρια και πολυκατοικίες κατέστησε αναγκαία την χρήση ηλεκτροκινητήρων. Με τη χρήση κατάλληλων συρματόσχοινων, τροχαλιών και αντιβάρου, μπορεί να δημιουργηθεί ένα ασφαλές και αποτελεσματικό κινητήριο σύστημα [25]. Ωστόσο, επιπρόσθετα απαιτούνται κατάλληλα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ισχύος για να παρέχουν ακριβή έλεγχο της ταχύτητας και του ρεύματος. Για την τέλεια λειτουργία του ανελκυστήρα με πλήρη ασφάλεια επιλέγονται ως τρόπος οδήγησης του με Inverter Variable Voltage Variable Frequency (VVVF) [26].



Εικόνα 1.2 Ηλεκτρομηχανικός ανελκυστήρας (ανελκυστήρας έλξης)

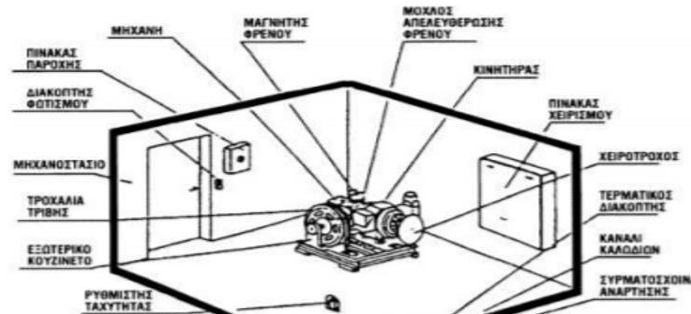
Ένας ηλεκτροκίνητος ανελκυστήρας αποτελείται από [27]:

- Θάλαμος
 - Συρματόσχοινα
 - Ηλεκτρικός κινητήρας
 - Τροχαλία τριβής
 - Σύστημα κατευθύνσεων
 - Αντίβαρο
- **Φρεάτιο:** Αποτελεί τον κύριο χώρο κίνησης του ανελκυστήρα, στον οποίο στηρίζονται βασικά στοιχεία όπως το φορτίο του θαλάμου, το αντίβαρο και το βάρος αντιστάθμισης. Είναι ζωτικής σημασίας να διατηρούνται οι απαραίτητες συνθήκες ασφάλειας στα τοιχώματα του ανελκυστήρα, προκειμένου η μεταφορά των χρηστών να επιτυγχάνεται χωρίς κινδύνους [28]. Επιπλέον, κατά τη διαδικασία κατασκευής του φρεατίου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένες προδιαγραφές που αφορούν το βάρος του θαλάμου, το ύψος που μπορεί να φτάσει, καθώς και τις διαστάσεις του που σχετίζονται κυρίως με τις θύρες [29].



Εικόνα 1.2 Φρεάτιο κίνησης ανελκυστήρα

- Μηχανοστάσιο:** Αποτελεί τον πυρήνα της λειτουργίας του ανελκυστήρα. Συνολικά, περιλαμβάνει την ηλεκτρική μηχανή, την τροχαλία τριβής που αποτελεί το σημείο επαφής όπου μεταδίδεται η κίνηση από τον ηλεκτροκινητήρα στα συρματόσχοινα. Ο ρόλος της είναι καθοριστικός για τη σταθερότητα της μεταφοράς και την προστασία στην εμφάνιση οποιουδήποτε προβλήματος [30]. Όσον αφορά τον πίνακα αυτοματισμού, περιλαμβάνει τα συστήματα ελέγχου και τον μετατροπέα, εξασφαλίζοντας το συντονισμό των λειτουργιών για την ασφαλή και αποτελεσματική χρήση του ανελκυστήρα. Το μηχανοστάσιο σύμφωνα με την παρακάτω Εικόνα 1.4 τοποθετείται κυρίως στο επάνω μέρος του ασανσέρ, αναλαμβάνοντας τον κύριο ρόλο καθορισμού και ρύθμισης της κίνησης που θα εκτελέσει [31].

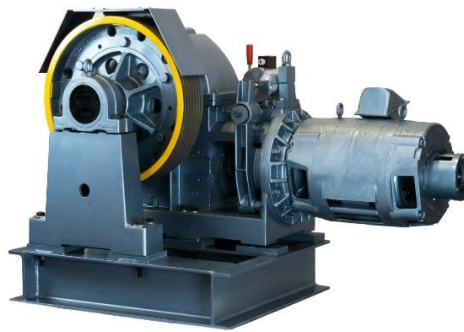


Εικόνα 1.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ηλεκτρομηχανικού ανελκυστήρα

- Ηλεκτρικός Κινητήρας:** Ο ηλεκτροκινητήρας αναδεικνύεται ως το κυριότερο στοιχείο του κινητήριου συστήματος του ανελκυστήρα, εκτελώντας τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική. Ο άξονας της μηχανής συνδέεται με την τροχαλία τριβής, παρέχοντας ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία συνδέεται με τα συρματόσχοινα για τη μετάδοση κίνησης στον θάλαμο [32].

Στη διαδικασία ανύψωσης και καθόδου του θαλάμου, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι ηλεκτρικών μηχανών. Στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν οι επαγωγικοί κινητήρες με μειωτήρα (geared) [33], ενώ σήμερα έχουν αναπτυχθεί οι κινητήρες μόνιμωνμαγνητών χωρίς μειωτήρα (gearless). Ο όρος "μειωτήρας" αναφέρεται στο κιβώτιο ταχυτήτων του κινητήρα [34].

Ο βασικός στόχος είναι η υιοθέτηση μεθόδων εξοικονόμησης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την πραγματικότητα ότι ο ανελκυστήρας καταναλώνει ενέργεια ακόμα και κατά τη διάρκεια της αναμονής. Κατά την κάθοδο του θαλάμου, κατά το φρενάρισμα του θαλάμου, η ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει ως γεννήτρια, δηλαδή να ανακτήσει ενέργεια και να την επιστρέψει στο δίκτυο, μετατρέποντας τη μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική. Η εν λόγω διαδικασία αποτελεί μια επιπρόσθετη μέθοδο εξοικονόμησης ενέργειας που μπορεί να φτάσει το 50%-60% [35].



Εικόνα 1.4 Geared επαγωγικός κινητήρας



Εικόνα 1.5 Gearless σύγχρονος κινητήρας μόνιμωνμαγνητών

- **Βάση τοποθέτησης ηλεκτρικής μηχανής:** Η βάση τοποθέτησης της ηλεκτρικής μηχανής πρέπει να κατασκευάζεται με ιδιαίτερη προσοχή και σταθερότητα, καθώς επάνω σε αυτήν στηρίζεται ο ηλεκτροκινητήρας και πραγματοποιείται η αποτελεσματική μετάδοση της κίνησης. Πάνω στην συγκεκριμένη βάση υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης με φορτίο προκειμένου ο ηλεκτροκινητήρας να λειτουργήσει ως γεννήτρια [36]. Η κατασκευή της βάσης προσαρμόζεται σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές της μηχανής, εξασφαλίζοντας την απόλυτη συμβατότητα και ασφάλεια λειτουργίας. Η σταθερότητα της βάσης είναι κρίσιμη για την απρόσκοπτη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα και, κατά συνέπεια, του ανελκυστήρα [37].



Εικόνα 1.6 Βάση τοποθέτησης ηλεκτρικής μηχανής

- **Τροχαλία τριβής:** Η περιστροφική κίνηση του ανελκυστήρα μπορεί να προέρχεται είτε από τη ροπή του ηλεκτροκινητήρα, όπως στην περίπτωση σύγχρονης μηχανής μόνιμωνμαγνητών, είτε από επαγωγική μηχανή. Η τροχαλία τριβής, μέσω των δυνάμεων, μεταδίδει την απαιτούμενη κίνηση στα συρματόσχοινα [38].



Εικόνα 1.7 Τροχαλία τριβής

- **Συρματόσχοινα:** Σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς, τα συρματόσχοινα θα πρέπει να είναι περισσότερα από τρία. Τα συρματόσχοινα αποτελούν ουσιαστικά το σύστημα σύνδεσης μεταξύ του θαλάμου και της τροχαλίας τριβής. Κατασκευάζονται από χαλύβδινες ίνες με κυλινδρική μορφή, χαρακτηρίζονται από μεγάλο μήκος και μικρή διατομή. Παρά την ευαισθησία τους στη φθορά λόγω του υψηλού φορτίου, των τριβών και της έντονης εφελκυστικής δύναμης (F), τα συρματόσχοινα ξεχωρίζουν για τη σταθερότητα που προσφέρουν στο κινητήριο σύστημα. Τέλος, λόγω της ανθεκτικότητάς τους στον χρόνο, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην συντήρησή τους, εξασφαλίζοντας τη συνεχή ασφάλεια και λειτουργία του ανελκυστήρα [39].



Εικόνα 1.8 Συρματόσχοινα ανύψωσης ανελκυστήρα

- **Οδηγοί (Ράγες):** Οι οδηγοί θαλάμου και οι οδηγοί αντίβαρου είναι δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το είδος του ανελκυστήρα. Οι διαφορές τους αφορούν κυρίως την κατασκευαστική τους δομή και τον ρόλο που διαδραματίζουν στη λειτουργία του

ανελκυστήρα. Οι οδηγοί θαλάμου πακτώνονται με ακρίβεια και σταθερότητα στο δάπεδο ή στο κάτω μέρος του φρεατίου. Η σωστή εγκατάσταση είναι καθοριστική για την αποφυγή συγκρούσεων. Ο ρόλος τους είναι να συνδράμουν στην κατακόρυφη κίνηση του θαλάμου [40]. Αποτελούν σημαντικό μέρος της υποδομής του ανελκυστήρα, καθώς διασφαλίζουν τη σωστή καθοδήγηση του θαλάμου κατά τη διάρκεια της ανύψωσης και της κατάβασης. Αντίστοιχα, οι οδηγοί αντίβαρου τοποθετούνται κατά μήκος ολόκληρου του φρεατίου και αποτελούνται συνήθως από μεταλλικές πλάκες. Ο ρόλος τους είναι να συμβάλλουν στην κατακόρυφη λειτουργία του ανελκυστήρα. Βοηθούν στη σταθεροποίηση και την ομαλή κίνηση του αντίβαρου, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στη συνολική απόδοση του συστήματος.



Εικόνα 1.9 Μεταλλικές πλάκες

- **Αντίβαρο:** Η βασική δομή του ανελκυστήρα αποτελείται από δύο κύρια μέρη: το πλαίσιο και το αντίβαρο. Το αντίβαρο διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο, καθώς προσφέρει αντιστάθμιση για το φορτίο που ανυψώνει ο θάλαμος και εξασφαλίζει την απαραίτητη τριβή στα συρματόσχοινα του κινητήριου συστήματος. Κατά γενικότητα, η λειτουργία του αντίβαρου και η χρήση της βαρύτητας καθορίζουν την εργασία του ηλεκτροκινητήρα, συγκεκριμένα το ρεύμα, την τάση και την ενέργεια που καταναλώνει ανάλογα με το φορτίο που ανυψώνει κάθε φορά [41]. Ο υπολογισμός του βάρους του αντίβαρου προκύπτει από το άθροισμα του βάρους του θαλαμίσκου (G) και του μισού ωφέλιμου φορτίου (Q). Η δρώσα δύναμη (F) προκύπτει από την παρακάτω σχέση [42]:

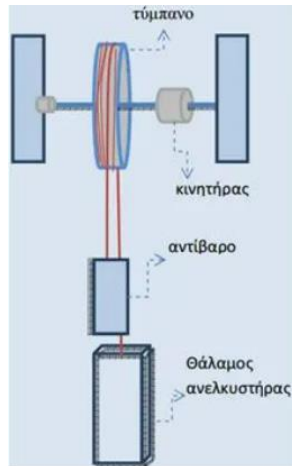
$$F = B + Q - G \quad (1.1)$$

$$G = B + \frac{1}{2}Q \quad (1.2)$$

Όπου: B: Συνολικό βάρος θαλάμου (Kg)

Q: Συνολικό φορτίο επιβατών (Kg)

G: Βάρος αντίβαρου (Kg)



Εικόνα 1.10 Αντίβαρο ηλεκτρομηχανικού ανελκυστήρα.

1.7. Ανάλυση Κύκλου Λειτουργίας Θαλάμου

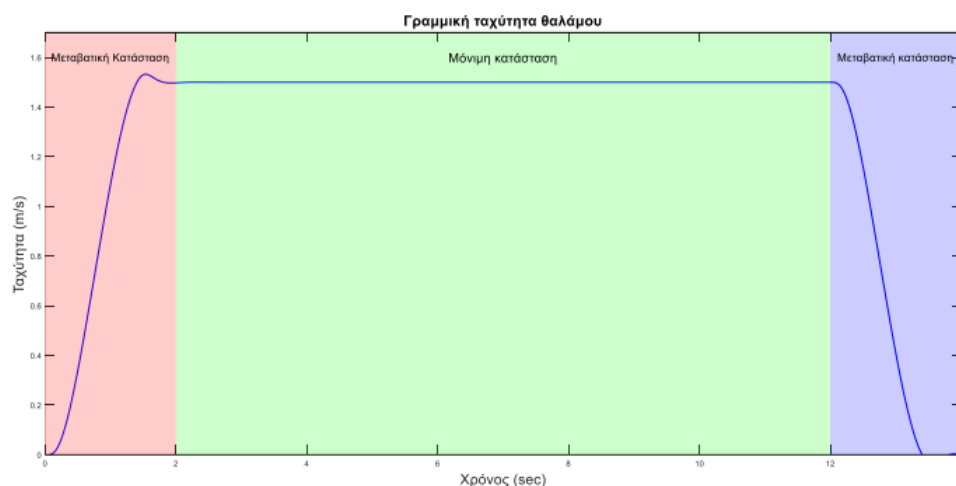
Εκτός από τα ηλεκτρικά μεγέθη ενός ηλεκτροκίνητου ανελκυστήρα σημαντικό ρόλο αποτελούν και τα μηχανολογικά μεγέθη. Ιδιαίτερα στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εστιάσουμε στην ταχύτητα κίνησης του ανελκυστήρα και κατά επέκταση στον κύκλο λειτουργίας του [43]. Γενικότερα, διαπιστώνουμε μία διαφοροποίηση επιλογής των ηλεκτρικών μηχανών ανάλογα με την ταχύτητα του ανελκυστήρα και το φορτίο που καλείται να σηκώσει ο θάλαμος σε διάφορες χρήσεις του. Επιπλέον, η ταχύτητα που επιτυγχάνει ο ανελκυστήρας εξαρτάται από το ύψος του κτηρίου και την τύπο του ανελκυστήρα. Η διαφοροποίηση αυτή ισχύει καθώς όσο περισσότερους ορόφους καλείται να εξυπηρετήσει σε κάθε κίνηση του τόσο μεγαλύτερη είναι και η ταχύτητα του. Οι βασικοί παράγοντες καθορισμού της ταχύτητας κίνησης του θαλάμου είναι [44]:

- 1) Ο αριθμός των επιβατών
- 2) Ο τύπος του ανελκυστήρα
- 3) Το μήκος και το ύψος του κτηρίου
- 4) Ο αριθμός των στάσεων (το χρονικό διάστημα όπου ο ανελκυστήρας είναι stand-by)

Στην χώρα μας στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ανελκυστήρες μεσαίας ταχύτητας που κυμαίνεται από 1 έως 2 m/sec [45] ενώ σε πολυώροφα κτήρια σε χώρες όπως η Κίνα η ταχύτητα τους μπορεί να φτάσει τα 20m/sec. Στην μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας

θα αναλύσουμε και θα μελετήσουμε έναν τυπικό ανελκυστήρα με μέγιστη ονομαστική ταχύτητα 1m/sec που χρησιμοποιείται σε κτήριο 6 ορόφων.

Τα τρία κύρια στάδια ενός τυπικού συστήματος κίνησης του ανελκυστήρα είναι η επιταχυνόμενη, σταθερή και η επιβραδυνόμενη κίνηση που εκτελεί ο θάλαμος στην διάρκεια μίας διαδρομής [46]. Στην περίπτωση εκτέλεσης στους ενδιάμεσους ορόφους τα δύο μεταβατικά στάδια (επιταχυνόμενης και επιβραδυνόμενης κίνησης) παραμένουν τα ίδια, ενώ ο χρόνος εκτέλεσης της σταθερής πορείας μεταβάλλεται. Το δεύτερο μέγεθος που προσαρμόζεται στην ταχύτητα είναι η ροπή του κινητήρα, η οποία εξαρτάται από τις ασκούμενες δυνάμεις στον θάλαμο κατά την διάρκεια επιταχυνόμενης κίνησης.



Εικόνα 1.11 Τυπικός κύκλος λειτουργίας ανελκυστήρα

Οι δυνάμεις αυτές περιλαμβάνουν το βάρος του θαλάμου, τον αριθμό των επιβατών καθώς και τις τριβές που προκύπτουν από τα μηχανικά μέρη του συστήματος όπως τα συρματόσχοινα, τα έδρανα κλπ. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω των σύγχρονων μηχανών μόνιμωνμαγνητών που δεν περιλαμβάνουν κιβώτιο ταχυτήτων η σχέση μετάδοσης είναι 1:1. Ένα από τα πιο κύρια μεγέθη που μειώνει την δαπανώμενη ενέργεια είναι το αντίβαρο. Το φορτίο του αντίβαρου και το φορτίο που καλείται να εξυπηρετήσει σε κάθε στάση καθορίζουν το ρεύμα και την ισχύ που καταναλώνει ο ηλεκτροκινητήρας σε κάθε κίνηση που εκτελεί ο ανελκυστήρας. Η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από την σχέση:

$$N = \frac{Fu}{102n} \text{ (kW)} \quad (1.3)$$

Όπου: F: Δρώσα δύναμη (Kg)

u: Ταχύτητα κίνησης θαλάμου (m/sec)

n: Απόδοση συστήματος ανελκυστήρα

Η απόδοση n του συστήματος κίνησης του ανελκυστήρα είναι μικρότερη από την απόδοση της ηλεκτρικής μηχανής.

Η ταχύτητα κίνησης του θαλάμου υπολογίζεται ως εξής:

$$u = \frac{\pi D K n}{60} \quad (1.4)$$

Όπου:

D: Διάμετρος της τροχαλίας τριβής (m)

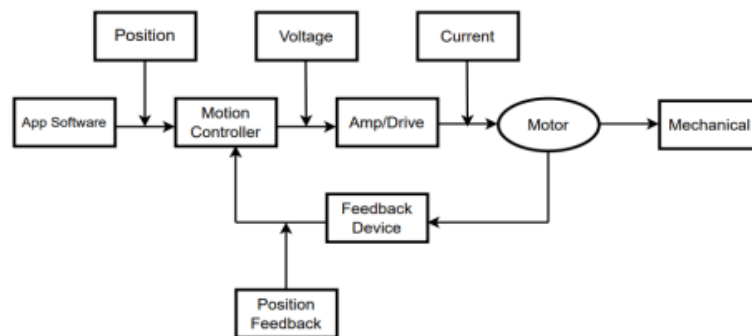
K: Σχέση μετάδοσης

n: Ονομαστική ταχύτητα κινητήρα (rpm)

Κεφάλαιο 2. Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης

2.1. Εισαγωγή

Η βασική δομή ενός συστήματος κίνησης ανελκυστήρα εξαρτάται από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 13, ο ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτείται από μια πηγή ισχύος μέσω ενός μετατροπέα. Η μονάδα ελέγχου του συστήματος λαμβάνει πληροφορίες μέσω σημάτων ανάδρασης από τον ηλεκτρικό κινητήρα [47]. Έπειτα, οι εντολές αυτές μεταφέρονται στον μετατροπέα, ο οποίος ρυθμίζει την ταχύτητα του ανελκυστήρα. Ο στόχος του συστήματος ελέγχου είναι να επιτύχει αρχικά μια επιταχυνόμενη κίνηση, στη συνέχεια να σταθεροποιηθεί, και τέλος να εκτελεστεί επιβραδυνόμενη κίνηση, εξασφαλίζοντας έτσι τη μεταφορά του χρήστη από έναν όροφο στον άλλο [48]. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόκριση του κινητήριου συστήματος, διασφαλίζοντας ομαλή κίνηση του θαλάμου. Αυτό το σύστημα επιτρέπει την ομαλή και ασφαλή μετακίνηση του ανελκυστήρα, ενώ οι λειτουργίες ελέγχου διασφαλίζουν τη σωστή απόκριση στις εντολές και τις συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα συστήματος μετάδοσης κίνησης

Η σχεδίαση ενός κινητήριου συστήματος μετάδοσης κίνησης στον τομέα της ηλεκτρικής κίνησης στηρίζεται στις αρχές που επιδιώκουν την μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας και αποτελεσματική λειτουργία. Ένας βασικός στόχος είναι η δημιουργία ενός συστήματος που επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ενέργειας μεταξύ πηγής και φορτίου [49]. Η λειτουργία αυτή στηρίζεται στην συνεχή εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος που θα αναλύσουμε στο παρακάτω κεφάλαιο. Οι σύγχρονοι κινητήρες συνδυάζουν προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου

με αποδοτικούς μετατροπείς ενέργειας, επιτρέποντας τον έλεγχο ροής ενέργειας σε ποικίλες συνθήκες λειτουργίας [50].

Ο καθορισμός της λειτουργίας μίας ηλεκτρικής μηχανής καθορίζεται από την σχέση ροπής-ταχύτητας που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2. Αναλύοντας το πρόσημο της ροπής σε σχέση με την ταχύτητα, όταν είναι το ίδιο, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Στο σύστημα του ανελκυστήρα, αυτή η κατάσταση παρατηρείται κατά την επιτάχυνση ή την κίνηση με σταθερή ταχύτητα του ανελκυστήρα. Αντίθετα, όταν ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια, η κινητική ενέργεια του φορτίου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και μπορεί να επιστραφεί μέρος αυτής της ενέργειας στο δίκτυο. Το γεγονός αυτό παρατηρείται στην περίπτωση της επιβραδυνόμενης κίνησης του ανελκυστήρα κατά το φρενάρισμα του [51]. Η δυνατότητα αναγεννητικής πέδησης επιτρέπει την εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστό που αγγίζει το 50%-60% προκαλώντας την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος γενικότερα.



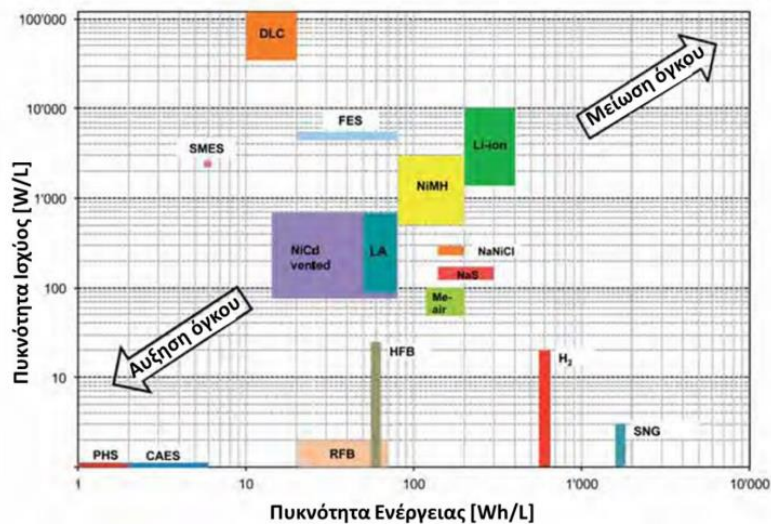
Εικόνα 2.2 Χαρακτηριστικές λειτουργίες ηλεκτρικής μηχανής.

2.2. Πηγή Ισχύος

Για τη βέλτιστη χρήση πηγών ισχύος στο σύστημα κίνησης του ανελκυστήρα, χρησιμοποιούνται συσσωρευτές ως μέσα αποθήκευσης ενέργειας. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας μπαταριών είναι κρίσιμη για την επίτευξη αυτών των στόχων και είναι προσαρμοσμένες στην εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθούν [52]. Αρχικά, η χρήση μπαταριών μολύβδου-οξέος προκάλεσε προβλήματα λόγω της χαμηλής διάρκειας ζωής και της χαμηλής πυκνότητας ισχύος. Είναι σημαντικό να επιλεγούν μπαταρίες που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση, την αξιοπιστία, και τη διάρκεια ζωής τους [53]. Η εξέλιξη στον τομέα οδήγησε στη δημιουργία εναλλακτικών επιλογών μπαταριών, όπως:

- **Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (NiCd):** Διακρίνονται για την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, αλλά έχουν χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος.

- **Μπαταρίες Νικελίου-Μετάλλου-Υδριδίου (NiMH):** Προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και βελτιωμένη πυκνότητα ισχύος.
- **Μπαταρίες ιόντων Λιθίου (Li-ion):** Παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, είναι ελαφριές και έχουν μικρό μέγεθος, αλλά έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής.
- **Μπαταρίες ιόντων Λιθίου-Ιόντων Πολυμερών(Li-ion Polymer):** Παρόμοιες με τις μπαταρίες Li-ion αλλά με ευελιξία στον σχεδιασμό και χαμηλότερο κόστος παραγωγής.



Εικόνα 2.3 Κατηγοριοποίηση συσσωρευτών

Προκειμένου να επιτευχθεί επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας, η τροφοδότηση των μπαταριών μπορεί να πραγματοποιείται μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ. Με αυτήν την προσέγγιση, επιτυγχάνεται η δημιουργία «πράσινων» ανελκυστήρων, όπου η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δίνει τη δυνατότητα επιπλέον εξοικονόμησης ενέργειας [54] περίπου 4%-5% σε σχέση με άλλους εναλλακτικούς τρόπους. Αυτή η προσέγγιση, εκτός από τη βιωσιμότητα, προστατεύει το περιβάλλον και συμβάλλει στην επίτευξη μεγαλύτερης αποδοτικότητας κατά την λειτουργία του συστήματος.

2.3. Ηλεκτρονικά ισχύος

2.3.1. Εισαγωγή

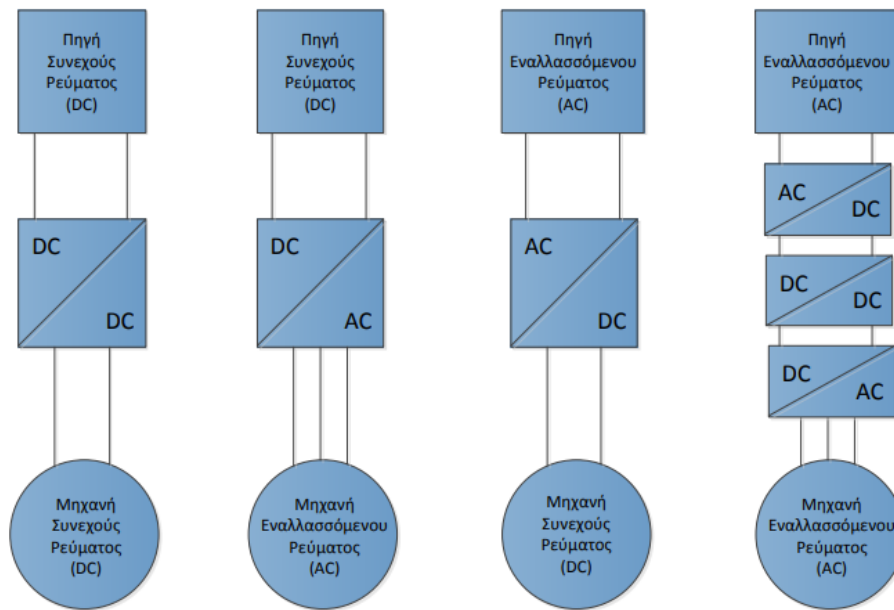
Η ανάγκη για βελτιωμένες επιδόσεις και ακρίβεια στον έλεγχο της ηλεκτρικής ενέργειας και, κατ' επέκταση, των ηλεκτρικών μηχανών, υπογραμμίζει τη σημασία των ηλεκτρονικών ισχύος. Όπως φαίνεται και στο δομικό διάγραμμα ενός συστήματος κίνησης, ο μετατροπέας ισχύος

διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην αποτελεσματική οδήγηση του κινητήρα [55]. Η λειτουργία του βασίζεται στη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από την πηγή σε κατάλληλο ρεύμα και τάση. Τα πρώτα ημιαγωγικά στοιχεία ξεκίνησαν την δεκαετία του 1950. Στην σημερινή εποχή, με τη χρήση πολυεπίπεδων μετατροπέων, επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την εμφάνιση αρμονικών φαινομένων. Αυτές οι προηγμένες τεχνολογικές εξελίξεις συντελούν στη δημιουργία αποδοτικότερων συστημάτων κίνησης, εξασφαλίζοντας σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία, ενώ παράλληλα μειώνουν την επίδραση στο περιβάλλον και προωθούν τη βιώσιμη ενέργεια [56]. Τα εν λόγω συστήματα είναι σχεδιασμένα για να αντιμετωπίζουν τις σύγχρονες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης και αξιοπιστίας, προωθώντας παράλληλα την καινοτομία στον τομέα της ηλεκτροκίνησης.

2.3.2. Κατηγοριοποίηση Μετατροπέων

Για τη σωστή επιλογή μετατροπέα ισχύος, απαιτείται η διερεύνηση δύο βασικών παραμέτρων που σχετίζονται με τον τύπο της πηγής ενέργειας και την ηλεκτρική μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή. Έτσι, διακρίνουμε τις ακόλουθες κατηγορίες [57]:

- **Μετατροπέας ισχύος πηγής από συνεχή τάση (DC) σε συνεχή τάση (DC).** Η πηγή ενέργειας είναι μπαταρίες DC και αφορούν μηχανές DC. Χρησιμοποιείται κυρίως στα φωτοβολταϊκά συστήματα.
- **Μετατροπέας ισχύος από συνεχή τάση (DC) σε εναλλασσόμενη τάση (AC).** Η πηγή ενέργειας είναι μπαταρίες DC και αφορούν μηχανές IM και PMSM. Αποτελεί την κύρια κατηγορία επιλογής μετατροπέα στην βιομηχανία των ανελκυστήρων.
- **Μετατροπέας ισχύος από εναλλασσόμενη τάση (AC) σε συνεχή τάση (DC).** Η πηγή ενέργειας είναι το δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης και αφορούν μηχανές DC. Σε αυτήν την περίπτωση η τροφοδοσία πραγματοποιείται απευθείας από το δίκτυο.
- **Μετατροπέας ισχύος από εναλλασσόμενη τάση (AC) σε εναλλασσόμενη τάση (AC).** Η πηγή ενέργειας είναι το δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης και αφορούν μηχανές IM και PMSM. Χρησιμοποιείται γενικότερα στις εφαρμογές που περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες για την απευθείας σύνδεση με το δίκτυο.



Εικόνα 2.4 Κατηγοριοποίηση ημιαγωγικών στοιχείων

2.3.3. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα με την χρήση τους

Τα **κύρια προτερήματα** χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος είναι τα εξής [58]:

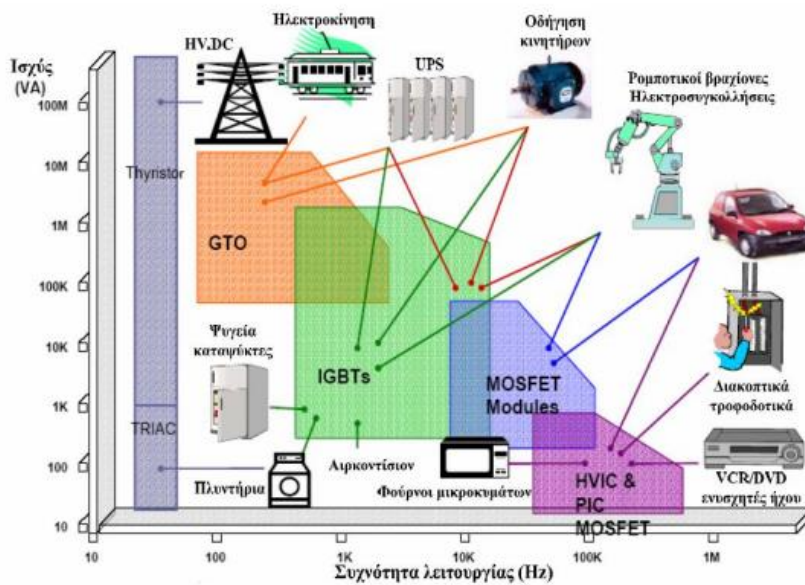
- ✓ Καλύτερη απόδοση
- ✓ Περιορισμένο κόστος, βάρος και συντήρηση
- ✓ Αθόρυβη λειτουργία
- ✓ Δυνατότητες ελέγχου της ταχύτητας του ανελκυστήρα

Αντίστοιχα, τα **μειονεκτήματα** χρήσης τους αφορούν [59]:

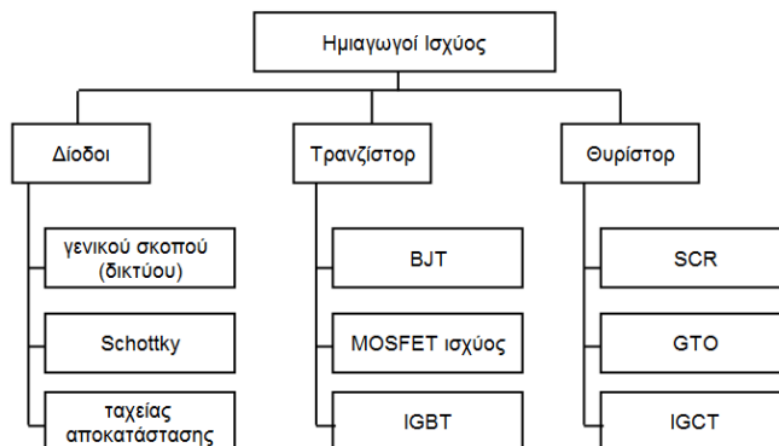
- ✓ Το κύριο ζήτημα προκύπτει από την ύπαρξη αρμονικών τόσο στην τάση όσο και στο ρεύμα. Αυτές οι αρμονικές επιφέρουν παραμορφώσεις στις κυματομορφές, απαιτώντας από τον χρήστη να χρησιμοποιήσει αντίστοιχα φίλτρα για τη μείωση της παραμόρφωσης [60]. Η χρήση φίλτρων ενδέχεται να αυξήσει το κόστος της εφαρμογής. Επιπλέον, οι προβληματισμοί σχετικά με την παραμόρφωση των κυματομορφών μπορούν να αντιμετωπιστούν με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος, με τη δημιουργία πολυεπίπεδων μετατροπέων που έχουν χαμηλές διακοπτικές απώλειες.
- ✓ Ένα επιπλέον πρόβλημα που προκύπτει είναι η μετατόπιση του ρεύματος και της τάσης, που οδηγεί σε μείωση του συντελεστή ισχύος και αυξάνει την άεργη ισχύ. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτεί προηγμένες τεχνικές και ενδέχεται να επιφέρει περαιτέρω πολυπλοκότητα στη συσκευασία και στη λειτουργία του συστήματος.

2.3.4. Ημιαγωγικά στοιχεία μετατροπών ισχύος

Οι βελτιωμένες επιδόσεις και ο έλεγχος της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και των ηλεκτρικών μηχανών, αυξάνεται με την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Η βασική λειτουργία τους είναι να παράγουν κατάλληλη τάση και ρεύμα για βέλτιστη προσαρμογή στο χρησιμοποιούμενο φορτίο [61]. Η ισχύς εισόδου παρέχεται συνήθως από το δίκτυο, με συχνότητα 50 ή 60Hz. Η γωνία φάσης ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα εισόδου εξαρτάται από τον έλεγχο και την τοπολογία του μετατροπέα ισχύος. Επίσης, υπογραμμίζεται ότι υπάρχουν διάφορες τοπολογίες μετατροπών που χρησιμοποιούνται σε διάφορα συστήματα ελέγχου [62].



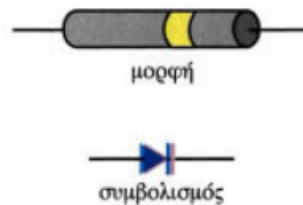
Εικόνα 2.5 Εφαρμογές ημιαγωγικών στοιχείων



Εικόνα 2.6 Κατηγοριοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος

Τα σημαντικότερα ημιαγωγικά στοιχεία είναι τα εξής:

- **Δίοδος:** Η κατάσταση ανοίγματος ή κλεισίματος μιας διόδου εξαρτάται από την τάση που επιβάλλεται στα άκρα της. Συγκεκριμένα, όταν η τάση είναι θετική, η διόδος λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα, ενώ όταν είναι αρνητική, λειτουργεί ως ανοιχτό κύκλωμα. Καταρχήν, η διόδος έχει ως βασικό σκοπό τον περιορισμό της ροής της αγωγιμότητας. Συνεπώς, διαμορφώνει τη ροή του ρεύματος, επιτρέποντάς το να κινείται μόνο προς μία κατεύθυνση και αποτρέποντας την κίνησή του προς την αντίθετη. Σε περιπτώσεις όπου το κύκλωμα απαιτεί ροή προς μία κατεύθυνση, μπορεί να απαιτηθούν περισσότερες από μία διόδοι [63]. Η εξέλιξη της ηλεκτρονικής ισχύος και ο στόχος ελαχιστοποίησης των απωλειών του συστήματος έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη και κατασκευή διόδων από ημιαγωγικά υλικά όπως το πυρίτιο ή το γερμάνιο. Σήμερα, οι περισσότερες διόδοι βασίζονται στον ημιαγωγό p-n επαφών [64]. Αυτό σημαίνει ότι η ροή του ρεύματος μπορεί να πραγματοποιηθεί από την p μεριά προς την n, αλλά όχι στην αντίθετη κατεύθυνση. Οι διάφορες κατηγορίες διόδων, όπως οι ανορθωτικές διόδοι, οι διόδοι ταχείας ή υπερταχείας ανάκτησης και οι διόδοι Schottky, αντιπροσωπεύουν διάφορες εφαρμογές με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αποτελούν το βασικό εξάρτημα ηλεκτρονικών ισχύος και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως η τηλεόραση, το ραδιόφωνο και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές.



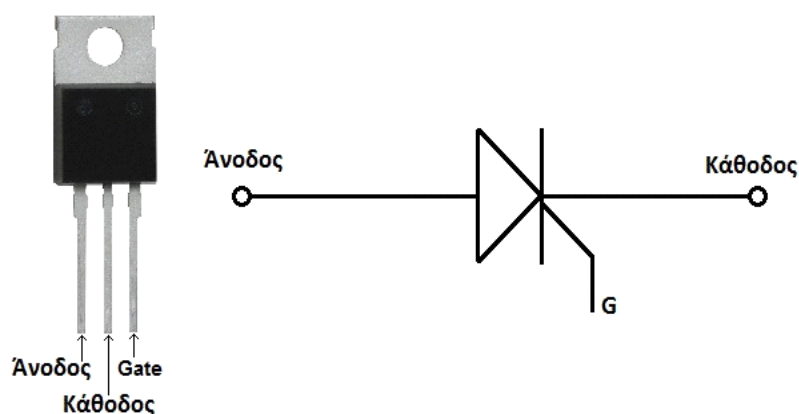
Εικόνα 2.7 Σύμβολο διόδου

- **Θυρίστορ:** Η ύπαρξη μιας επιπλέον πύλης στο θυρίστορ σε σχέση με την απλή διόδο επιτρέπει τον έλεγχο της λειτουργίας του με την εφαρμογή ενός παλμού στην είσοδό του. Κατά την περίπτωση όπου η τάση στα άκρα είναι θετική και ο παλμός είναι θετικός, το θυρίστορ ενεργοποιείται (κατάσταση ON). Αντίθετα, όταν η τάση στα άκρα είναι αντίθετη και ο παλμός είναι αρνητικός, το θυρίστορ αποκόπτει το ρεύμα (κατάσταση OFF). Ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR) αποτελείται από τέσσερις ημιαγωγικές στρώσεις και τρεις ακροδέκτες [65]. Οι διακοπτικές συχνότητες για τα γρήγορα θυρίστορ κυμαίνονται στα 2000-3000 Hz, ενώ για

θυρίστορ που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στο δίκτυο φτάνουν τα 400 Hz. Τα βασικά δομικά στοιχεία του είναι τα εξής:

- 1) Το ημιαγωγικό στοιχείο
- 2) Το περίβλημα
- 3) Ακροδέκτες
- 4) Το σώμα απαγωγής θερμότητας

Το θυρίστορ διαθέτει τρεις ακροδέκτες, ενώ τα θυρίστορ υψηλής ισχύος διαθέτουν τέσσερις ακροδέκτες. Προκειμένου να προφυλαχθούν από καιρικές συνθήκες, εφοδιάζονται με πλαστικό περίβλημα. Λόγω των υψηλών ρευμάτων που αναπτύσσονται και του μικρού όγκου τους, παράγονται υψηλές θερμοκρασίες. Οι σοβαρές επιπτώσεις περιλαμβάνουν προβλήματα καταστροφής και τη μεταβολή της λειτουργικής συμπεριφοράς τους. Για την αποφυγή αυτών των συνεπειών, τοποθετείται μια ψήκτρα στο πάνω μέρος του θυρίστορ [66].

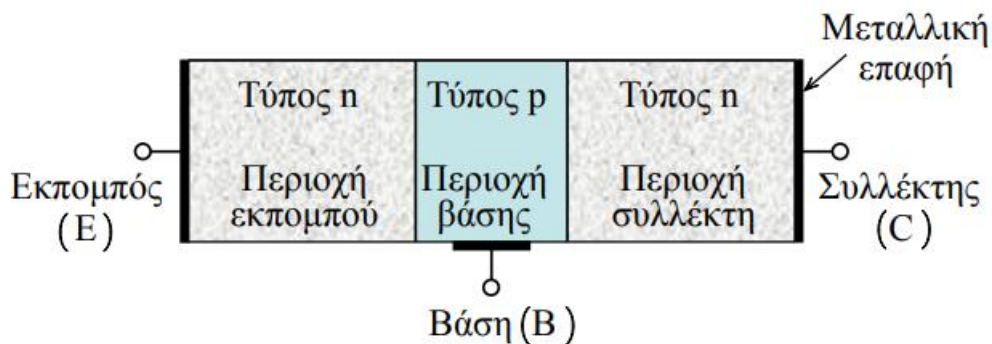


Εικόνα 2.8 Δομική κατασκευή και σύμβολο θυρίστορ

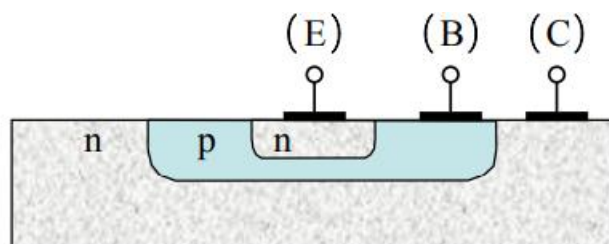
- **Ελεγχόμενοι διακόπτες:** Αναπτύσσονται κυρίως για την οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων, τα ημιαγωγικά στοιχεία αποτελούν την πιο σημαντική κατηγορία στον χώρο. Η γενική λειτουργία τους εξαρτάται από τους παλμούς που δέχονται στην είσοδό τους. Αν ο παλμός είναι θετικός, το ημιαγωγικό στοιχείο βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, όπου ο παλμός είναι αρνητικός, βρίσκεται σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι ελεγχόμενων διακοπών, επιλεγμένοι βάσει των χαρακτηριστικών της εφαρμογής, και κάθε κατηγορία διαθέτει τα πλεονεκτήματά της, καθώς και τα μειονεκτήματά της. Οι κύριοι τύποι ελεγχόμενων διακοπών είναι:
 - Διπολικά τρανζίστορ ένωσης (Bipolar Junction Transistors, BJT)

- Διπολικά τρανζίστορ με μεμονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT)
- Θυρίστορ με σβέση μέσω πύλης (Gate Turn Off Thyristors, GTO)
- Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου οξειδίου και αγωγού (MOSFET)

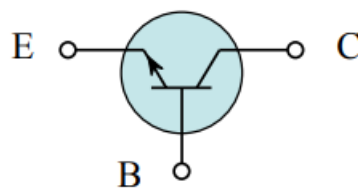
1) Το διπολικό τρανζίστορ επαφής (BJT) περιλαμβάνει ένα κρύσταλλο πυριτίου ή γερμανίου, όπου ένα λεπτό στρώμα τύπου p τοποθετείται ανάμεσα σε δύο περιοχές τύπου n, δημιουργώντας ένα τρανζίστορ τύπου npn. Αντίστοιχα, όταν ένα λεπτό στρώμα τύπου n τοποθετείται ανάμεσα σε δύο περιοχές τύπου p, προκύπτει ένα τρανζίστορ τύπου pnp. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δομή του BJT επιτρέπει τον έλεγχο του ρεύματος μέσω της βάσης, καθιστώντας το καίριο εξάρτημα σε πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές. Το npn BJT χρησιμοποιείται κυρίως για ενισχυτικές εφαρμογές, ενώ το pnp BJT βρίσκει ευρεία χρήση σε διάφορες εφαρμογές ενός αντίθετου σήματος.



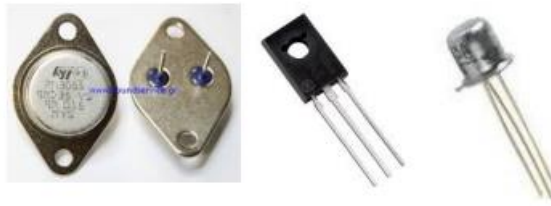
Εικόνα 2.9 Transistor npn



Εικόνα 2.10 Transistor pnp

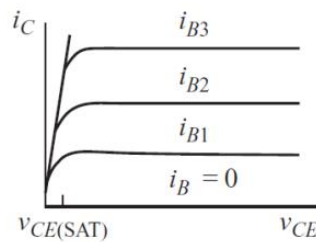


Εικόνα 2.11 Σύμβολο απεικόνιση BJT



Εικόνα 2.12 Εξωτερική δομική αναπαράσταση BJT

Όσον αφορά την κατάσταση λειτουργίας ενός διπολικού τρανζίστορ επαφής, αυτή επιτυγχάνεται μέσω της παροχής επαρκούς ρεύματος, ώστε το BJT να οδηγηθεί σε κορεσμό. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ρεύμα βάσης, το θυρίστορ δεν μπορεί να τεθεί σε λειτουργία. Σημειώνεται ότι, για να ενεργοποιηθεί το BJT, πρέπει να υπάρχει επαρκές ρεύμα βάσης που θα οδηγήσει τον τρανζίστορ σε κορεσμό. Σε περίπτωση μηδενικού ρεύματος βάσης, η λειτουργία του θυρίστορ δεν είναι εφικτή.

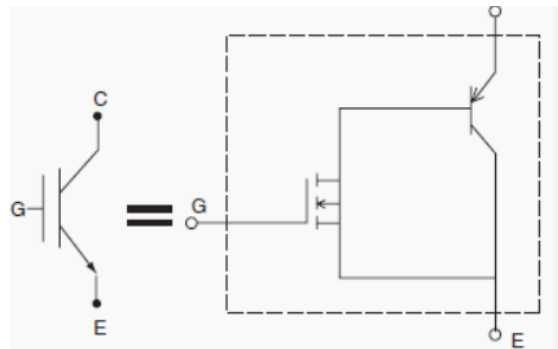


Εικόνα 2.13 Καμπύλες διπολικό τρανζίστορ επαφής

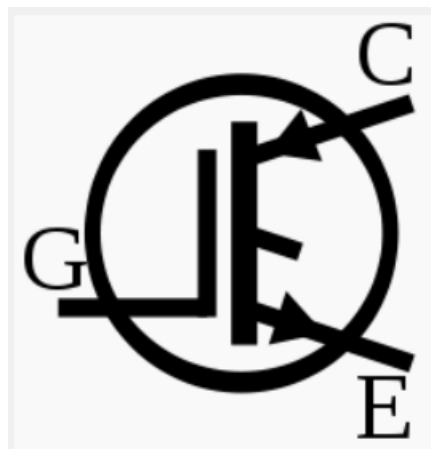
Με βάση τα βασικά χαρακτηριστικά των ημιαγωγικών στοιχείων που προαναφέρθηκαν, παρατηρούμε ότι τα κριτήρια για την επιλογή ελεγχόμενων διακοπών επικεντρώνονται στην απόδοση και την ισχύ του συστήματος που επιθυμούμε να μελετήσουμε. Στις σύγχρονες εφαρμογές, τα κύρια ημιαγωγικά στοιχεία που επιλέγονται για χρήση στις εφαρμογές είναι τα IGBT λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν στις διακοπτικές συχνότητες και τις απώλειές τους.

2) Τα διπολικά τρανζίστορ με μεμονωμένη πύλη (IGBT) αποτελούν έναν εξελιγμένο συνδυασμό (υβριδικό), διπολικού τρανζίστορ επαφής και τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου οξειδίου και αγωγού, όπου το δεύτερο οδηγεί το πρώτο. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή σύνθετη αντίσταση, με χαμηλή πτώση τάσης αλλά υψηλή ταχύτητα, προσφέροντας ευελιξία στις εφαρμογές υψηλής ισχύος. Η διαδικασία ενεργοποίησης του IGBT είναι παρόμοια με εκείνη των λογικών πυλών, όπου θετική τάση μεταξύ πύλης και πομπού ενεργοποιεί τον διακόπτη, ενώ για απενεργοποίηση, το σήμα πύλης γίνεται μηδενικό ή λίγο

αρνητικό. Για την ενεργοποίηση του θυρίστορ, απαιτείται ένα ρεύμα συλλέκτη που προκαλεί σημαντική πτώση τάσης. Κατά την κατασκευή της πλακέτας, ο κατασκευαστής πρέπει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή ώστε το ρεύμα συλλέκτη να μην προκαλεί μανδάλωση. Τα IGBT έχουν εξελιχθεί σε προτιμώμενη επιλογή λόγω της ικανότητάς τους να αντιμετωπίζουν υψηλές συχνότητες διακοπής και να παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες ισχύος. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές που απαιτούν αποτελεσματικό έλεγχο και υψηλή απόδοση σε συνθήκες υψηλής συχνότητας λειτουργίας.



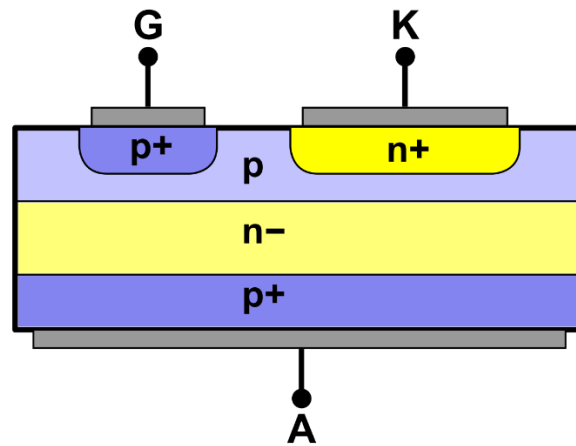
Εικόνα 2.14 Ισοδύναμο κύκλωμα IGBT



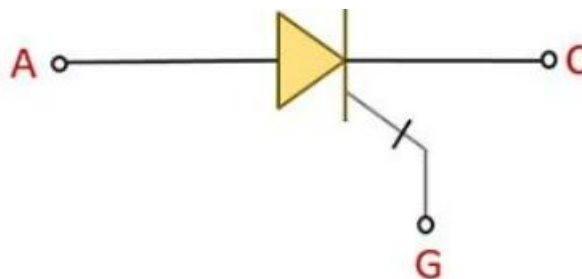
Εικόνα 2.15 Συμβολισμός ελεγχόμενου διπολικού τρανζίστορ με μεμονωμένη πύλη (IGBT).

3) Το GTO (Gate Turn Off Thyristor) ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των θυρίστορ και αποτελεί ένα διακοπτικό στοιχείο που αποτελείται από τρεις ακροδέκτες. Ευρέως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ισχύ, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα ρύθμισης τόσο της τάσης όσο και του ρεύματος. Η βασική του διαφορά από το SCR είναι η δυνατότητα έναυσης και σβέσης μέσω της πύλης. Η σβέση στο GTO επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αρνητικού παλμού τάσης στην πύλη. Τα GTO χρησιμοποιούνται ευρέως σε

εφαρμογές μηχανών DC, προσφέροντας υψηλή ισχύ. Κατάλληλα για διάφορες εφαρμογές, τα GTO διακρίνονται σε συμμετρικά και ασύμμετρα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Όσον αφορά τα δομικά χαρακτηριστικά, το GTO αποτελείται από πολλές ημιαγωγικές κυψέλες, καθεμία αποτελούμενη από 4 στρώματα P-N-P-N. Ο τρόπος σύνθεσής τους επηρεάζει την απόδοση του GTO. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διάφορα στρώματα που απαρτίζουν τα δομικά χαρακτηριστικά ενός GTO, καθώς και το σχηματικό (σύμβολο) του.



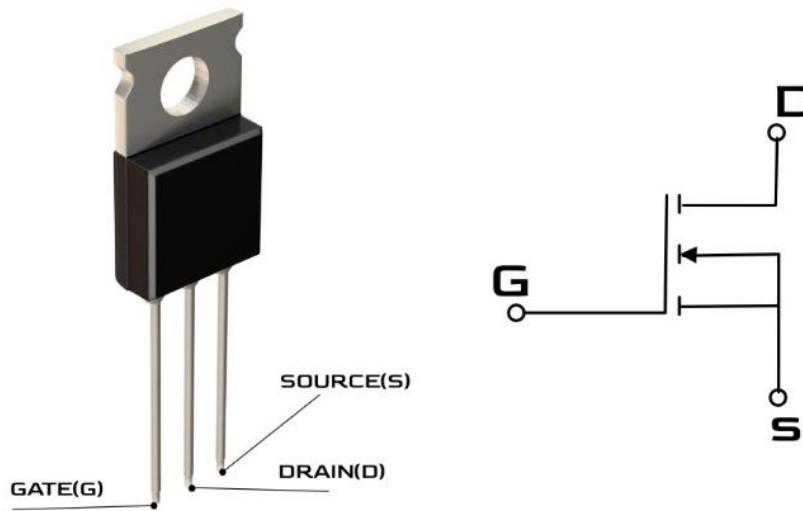
Εικόνα 2.16 Δομικά χαρακτηριστικά GTO



Εικόνα 2.17 Σύμβολο GTO

4) Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, στα οποία περιλαμβάνονται και τα MOSFET, ανήκουν σε μία κατηγορία η οποία επιτρέπει τον έλεγχο της διέλευσης του ρεύματος και τη δημιουργία κατάλληλου πεδίου. Αντίθετα με τις διπολικές διατάξεις, αυτές οι ελεγχόμενες διατάξεις δεν απαιτούν υψηλά ρεύματα. Μπορούν να κατασκευαστούν είτε ως ανεξάρτητες συσκευές είτε ως μέρη ενός ενιαίου ολοκληρωμένου κυκλώματος. Η επιλογή τους είναι συχνά προτιμητέα σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή τάση και ισχύ, λόγω του μικρού ρεύματος πύλης που παρατηρείται λόγω του μεμονωμένου στρώματος μεταξύ πύλης και καναλιού. Το μεμονωμένο αυτό στρώμα μπορεί να κατασκευαστεί είτε από μεταλλική πύλη, που μπορεί να προέλθει είτε

από κάποιο κανάλι πυριτίου είτε από διοξείδιο του πυριτίου. Η μικρή ισχύς και η δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της τάσης καθιστούν τα MOSFET ιδανική επιλογή για πολλές εφαρμογές.

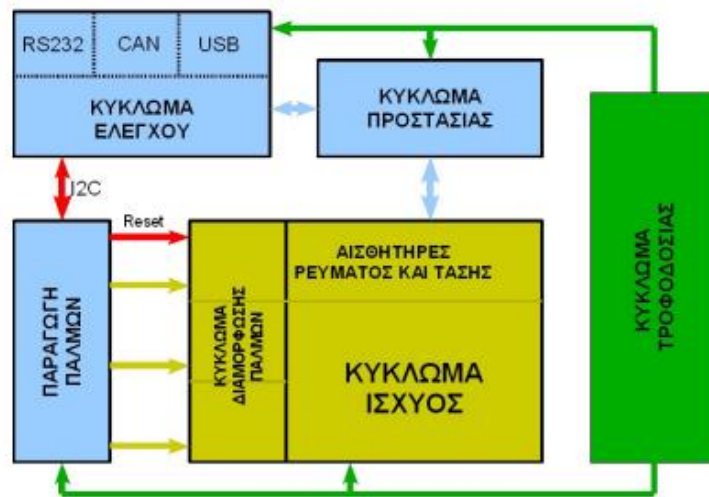


Εικόνα 2.18 Κατασκευαστική δομή και σύμβολο MOSFET.

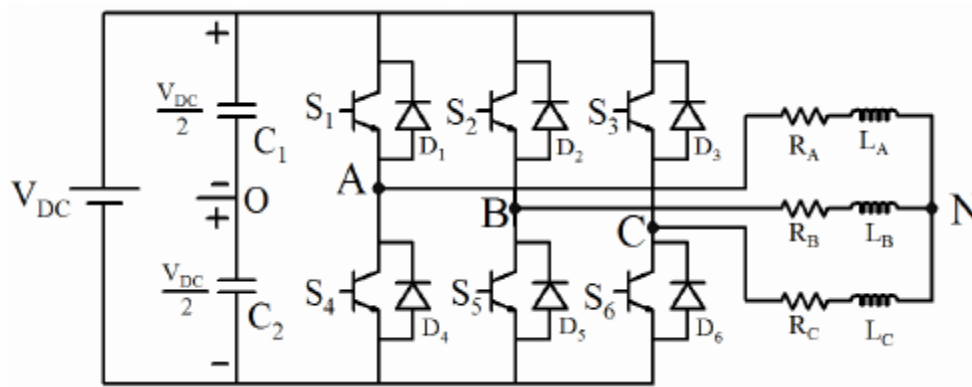
2.3.5. Τριφασικός αντιστροφέας

2.3.5.1. Δομή κυκλώματος αντιστροφέα

Στις εικόνες 31 και 32 που ακολουθούν, παρουσιάζεται η κυκλωματική αναπαράσταση ενός τριφασικού μετατροπέα που τροφοδοτεί έναν κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Το κύκλωμα αποτελείται από τρεις ομοιόμορφες ημιγέφυρες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα με την τάση συνεχούς ρεύματος (DC) στην είσοδο του αντιστροφέα. Στο κύκλωμα εμπεριέχονται έξι διακοπτικά στοιχεία και έξι διόδοι. Η διεργασία λειτουργίας επιτυγχάνεται με την αλλαγή της κατάστασης των διακοπτικών στοιχείων, επιτρέποντας την μεταφορά της ενέργειας από την πηγή στον κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες. Το κύκλωμα παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας που παρέχονται στον κινητήρα, ενισχύοντας την αποδοτικότητα της διαδικασίας [67].



Εικόνα 2.19 Δομική λειτουργία αντιστροφέα τάσης



Εικόνα 2.20 Τριφασικός αντιστροφέας δύο επιπέδων [68].

2.3.5.2. Τάσεις εξόδου αντιστροφέα

Βασισμένοι στην αναπαράσταση του τριφασικού αντιστροφέα στην Εικόνα 2.20, αναδεικνύεται η κρίσιμη λειτουργία της ημιγέφυρας. Προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία ισχυρών βραχυκυκλωμάτων στην είσοδο, είναι απαραίτητο οι διακόπτες να μην άγουν ταυτόχρονα, ιδίως οι διακόπτες της ημιγέφυρας. Στην περίπτωση όπου ο διακόπτης V_1 είναι κλειστός (άγει), ο διακόπτης V_4 είναι ανοιχτός (κατάσταση αποκοπής) τότε η τάση στον αντίστοιχο κόμβο θα είναι $+V_{dc}$. Αντίστοιχα, όταν ο διακόπτης V_4 είναι κλειστός και ο διακόπτης V_1 βρίσκεται είναι ανοιχτός τότε σε αυτήν την περίπτωση η τάση στον κόμβο είναι 0. Αυτές οι συνθήκες εξασφαλίζουν την αποτροπή της συγχρόνισης των διακοπών και την

αποφυγή βραχυκυκλωμάτων στην είσοδο του αντιστροφέα. Οι **πολικές τάσεις** του αντιστροφέα δίνονται από τις σχέσεις [69]:

$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \quad (2.1)$$

$$V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \quad (2.2)$$

$$V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \quad (2.3)$$

Λόγω του γεγονότος ότι οι φασικές τάσεις του φορτίου είναι συμμετρικές τότε ισχύει ότι το $V_{an}=V_{bn}=V_{cn}=0$ επομένως προκύπτει η σχέση:

$$V_{n0} = (V_{a0} + V_{b0} + V_{c0})/3 \quad (2.4)$$

Σύμφωνα με τα στοιχεία της μηχανής PMSM όταν είναι σε συνδεσμολογία αστέρα (Y) η τάση εξόδου του αντιστροφέα πρέπει να είναι φασική επομένως ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$V_{an} = (V_{ab} - V_{ca}) / 3 \quad (2.5)$$

$$V_{bn} = (V_{bc} - V_{ab}) / 3 \quad (2.6)$$

$$V_{cn} = (V_{ca} - V_{bc}) / 3 \quad (2.7)$$

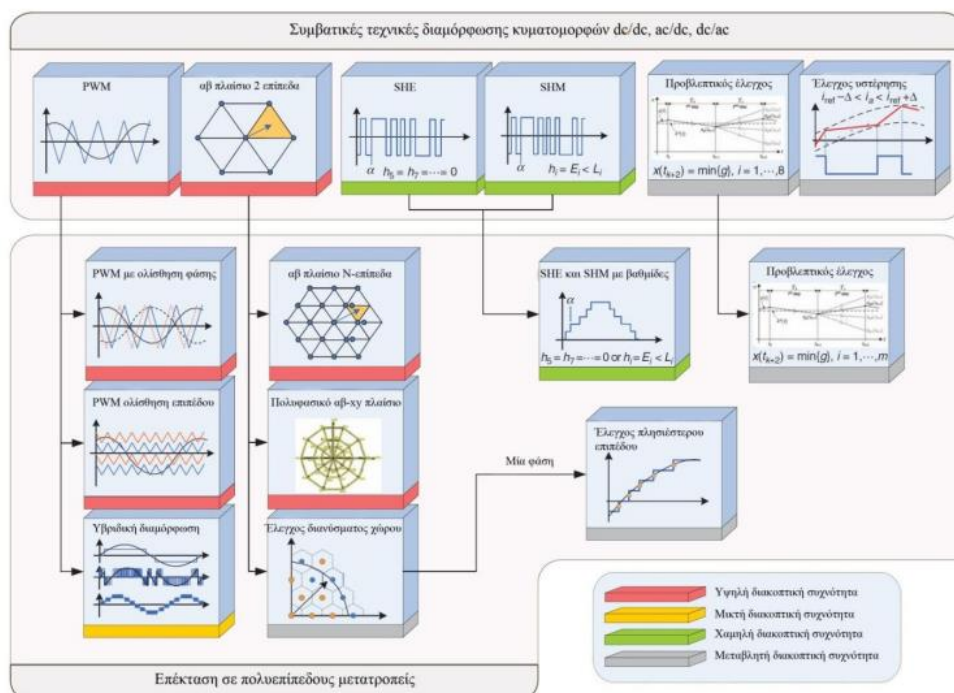
$$V_{n0} = (V_{an} + V_{bn} + V_{cn})/3 \quad (2.8)$$

2.4. Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών

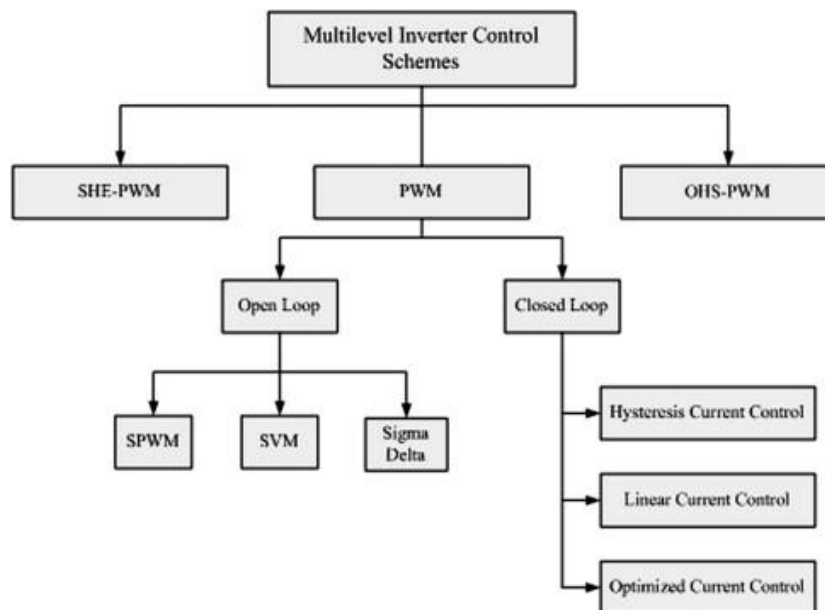
2.4.1. Εισαγωγή

Η ρύθμιση του πλάτους παλμών, γνωστή και ως Pulse Width Modulation (PWM), αποτελεί σημαντική τεχνική στον έλεγχο του συστήματος, ειδικά στην οδήγηση αντιστροφέων διάφορων τοπολογιών. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί ένα ψηφιακό κύκλωμα για τη δημιουργία αναλογικού σήματος. Τα κύρια πλεονεκτήματα της, που αφορούν την απλότητα εφαρμογής, τις υψηλές επιδόσεις και την δυνατότητα διατήρησης σταθερής διακοπτικής συχνότητας, την καθιστούν δημοφιλή στις βιομηχανικές εφαρμογές. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι οι κυματομορφές εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να δημιουργήσουν έντονα αρμονικά φαινόμενα που επηρεάζουν την γενική λειτουργία του κινητήριου συστήματος. Άλλωστε, σε αρκετές έρευνες έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή τεχνικών περιορισμού των αρμονικών ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες σε συγκεκριμένες λειτουργικές καταστάσεις [70].

Στην περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανών σε εφαρμογές ανελκυστήρων, τα έντονα αρμονικά φαινόμενα στην έξοδο του αντιστροφέα μπορούν να προκαλέσουν θόρυβο, δονήσεις και κραδασμούς που ενδέχεται να οδηγήσουν σε σοβαρές φθορές του θαλάμου [71]. Μία λύση για τη βελτίωση των κυματομορφών είναι η χρήση ηλεκτρονικών φίλτρων στην έξοδο του αντιστροφέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξομάλυνση των κυματομορφών και τη μείωση των αρμονικών φαινομένων. Ωστόσο, αυτή η λύση είναι συχνά δαπανηρή και ογκώδης. Η τεχνική του Pulse Width Modulation (PWM) αποτελεί επίσης αποτελεσματική λύση για τη διαχείριση των αρμονικών φαινομένων [72]. Με βάση τη σύγκριση δύο σημάτων αναφοράς με ένα τριγωνικό σήμα φέρων, η τεχνική αυτή ρυθμίζει την αγωγή των ελεγχόμενων διακοπών του αντιστροφέα. Είναι σημαντικό να επιλέγεται μια κατάλληλη κατηγορία διαμόρφωσης εύρους παλμών, λαμβάνοντας υπόψη την οδήγηση και τον έλεγχο της ηλεκτρικής μηχανής. Αυτό εξασφαλίζει τη συμφωνία του αρμονικού φάσματος με το σήμα αναφοράς και τη μείωση των αρμονικών φαινομένων. Με αυτόν τον τρόπο, επιλύονται τα προβλήματα που προκαλούνται από τα αρμονικά φαινόμενα, χωρίς την ανάγκη χρήσης δαπανηρών και ογκωδών ηλεκτρονικών φίλτρων.



Εικόνα 2.21 Τεχνικές διαμόρφωσης μετατροπών ισχύος

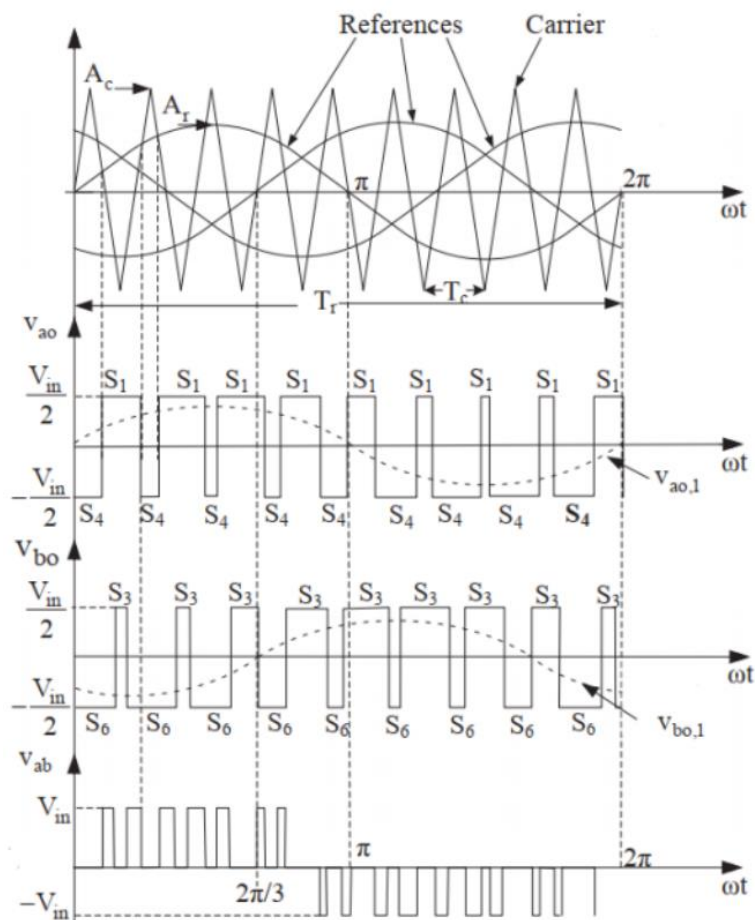


Εικόνα 2.22 Κατηγοριοποίηση τεχνικών PWM [73].

2.4.2. Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM)

Η ρύθμιση του ανοίγματος ή του κλεισίματος των διακοπών αποτελεί βασικό στοιχείο ενός συστήματος ηλεκτροκίνησης. Για να επιτευχθεί αυτή η ρύθμιση, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές εύρους παλμών, όπως η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM). Η SPWM αποτελεί την κύρια επιλογή για την τροφοδοσία ενός τριφασικού αντιστροφέα σε βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς παρέχει έλεγχο της τάσης εξόδου με μείωση των αρμονικών. Η χρήση της SPWM είναι διαδεδομένη λόγω της ικανότητάς της να επιτυγχάνει ακριβή ρύθμιση της τάσης εξόδου, με ελάχιστες αρμονικές παρεμβολές. Επιπλέον, η SPWM επιτρέπει την παράλληλη μετατόπιση της ανώτερης αρμονικής, μειώνοντας έτσι την επίδρασή της σε σχέση με τη θεμελιώδη συχνότητα [74].

Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών βασίζεται στη δημιουργία ημιτονοειδών σημάτων αναφοράς, τα οποία έχουν ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης 120° . Αυτά τα σήματα συγκρίνονται με ένα τριγωνικό σήμα φέροντος. Σε περίπτωση που το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το τριγωνικό φέρον σήμα, δίνεται παλμός έναυσης στο αντίστοιχο διακοπτικό στοιχείο, δηλαδή ο συγκριτής εκδίδει σήμα ON. Σε αντίθετη περίπτωση, εκδίδεται σήμα OFF. Η συχνότητα του τριγώνου είναι ίση με τη διακοπτική συχνότητα των ημιαγωγικών στοιχείων (f_s) [75].



Εικόνα 2.23 Τεχνική SPWM

Πίνακας 1 Τυπολογία τεχνικής SPWM

Περιγραφή	Παράμετρος
Συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους	$m_a = V_{ref}/V_{carrier}$ [76]
Συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας	$m_f = F_{ref}/F_{carrier}$ [76]
Πλάτος πολικής τάσης 1 ^{ης} αρμονικής	$V_{LL,1} = \sqrt{3} \times m_a \times V_{dc}/2$
RMS τιμή πολικής τάσης 1 ^{ης} αρμονικής	$V_{rms,1} = \sqrt{3} \times m_a \times V_{dc}/(2\sqrt{2})$

Όπου:

V_{ref} : Πλάτος σήματος αναφοράς

$V_{carrier}$: Πλάτος τριγωνικού σήματος (φέρων σήμα)

F_{ref} : Συχνότητα σήματος αναφοράς

$F_{carrier}$: Συχνότητα τριγωνικού σήματος (φέροντος)

Γραμμική περιοχή με $m_a \leq 1$

Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της φασικής τάσης δίνεται από την σχέση:

$$V_a = m_a \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.9)$$

Η rms τιμή για την πολική τάση ορίζεται ως εξής:

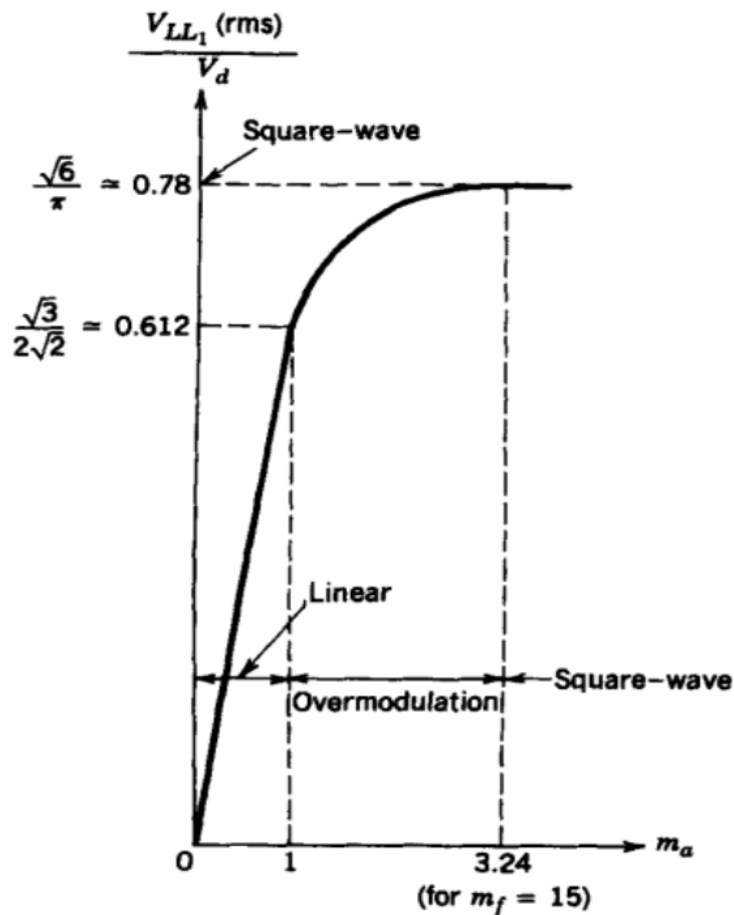
$$V_b = m_a \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_{dc} \quad (2.10)$$

Η μέγιστη rms τιμή για την πολική τάση ορίζεται ως εξής:

$$V_{ab(max)} \approx 0.612V_{dc} \quad (2.11)$$

Υπερδιαμόρφωση

Η υπερδιαμόρφωση είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται όταν το πλάτος των σημάτων αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το φέρον σήμα. Σε αυτήν την περίπτωση, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας δεν αυξάνεται γραμμικά με τον συντελεστή m_a , αλλά το σύστημα επέρχεται σε κατάσταση κορεσμού, με αποτέλεσμα ο αντιστροφέας στην έξοδό του να παράγει ένα τετραγωνικό παλμό. Η υπερδιαμόρφωση, λόγω της δημιουργίας έντονου αρμονικού φαινομένου, χρησιμοποιείται σπάνια και κυρίως σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν μεγάλες απαιτήσεις σε τάση, υπερβαίνοντας τη μέγιστη τάση της γραμμικής περιοχής [77].



Εικόνα 2.24 Καμπύλες διαμόρφωσης πλάτους και συχνότητας

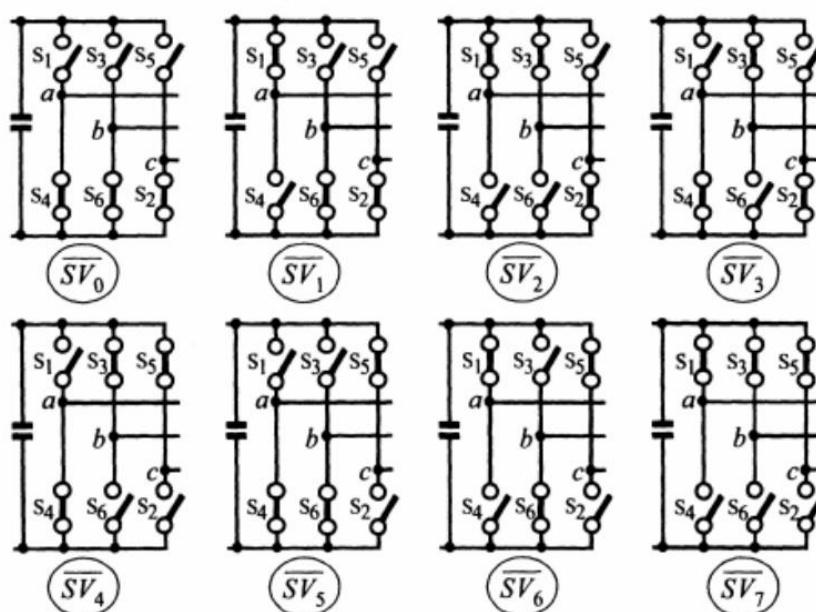
Η συχνότητα του σήματος αναφοράς, που εκφράζεται με τον συντελεστή συχνότητας m_f , είναι κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος. Αυτή η συχνότητα καθορίζει τη θεμελιώδη συχνότητα της τάσης εξόδου, με επίδραση στη μετατόπιση της τάσης σε υψηλότερες συχνότητες και ρεύματα. Η αυξημένη συχνότητα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των παραμορφώσεων στις κυματομορφές και τη μείωση των αρμονικών [76]. Παρατηρώντας την Εικόνα 2.24 όπου παρατηρούμε ότι το πηνίο L, λειτουργώντας ως φίλτρο, ελαχιστοποιεί τις απώλειες πυρήνα, βελτιώνοντας την απόδοση της μηχανής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα λιγότερη ανάγκη για φίλτρα, μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος. Όσον αφορά τον αντιστροφέα, πρέπει να δίνεται προσοχή στη διακοπτική συχνότητα, καθώς αυτή πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προϋποθέσεις και όρια για να αποφευχθούν απώλειες.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου παλμοδότησης, όπως αναφέρεται, έχει πολλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν ελκυστική για την οδήγηση κινητήρων. Αρχικά, αφορούν την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου καθώς έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε

πολλούς ηλεκτρικούς κινητήρες, γεγονός που την καθιστά κλασική και αξιόπιστη. Επιπλέον, το κόστος είναι χαμηλό σε σύγκριση με άλλες τεχνικές. Αυτό την καθιστά οικονομικά αποδοτική, ιδίως σε βιομηχανικές εφαρμογές.

2.4.3. Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών με διανύσματα χώρου (SVPWM)

Η μέθοδος διαμόρφωσης εύρους παλμών με τη χρήση διανυσμάτων χώρου αποτελεί μία από τις πιο ισχυρές τεχνικές ελέγχου για συστήματα κίνησης γενικά. Στον περιορισμένο χώρο των διακοπών ενός αντιστροφέα, υπάρχουν συνολικά 8 πιθανοί συνδυασμοί. Δύο από αυτούς αφορούν τη βραχυκύκλωση της εξόδου, ενώ οι υπόλοιποι 6 αφορούν τα διανύσματα στο διφασικό επίπεδο a, b . Στην παρακάτω Εικόνα 2.25 απεικονίζονται γραφικά όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για έναν τριφασικό αντιστροφέα. Αυτή η τεχνική παρέχει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των διαφορετικών συνδυασμών διακοπών για τον έλεγχο του συστήματος, προσφέροντας έτσι ευελιξία και αποτελεσματικότητα στη λειτουργία του αντιστροφέα [78].



Εικόνα 2.25 Πιθανοί συνδυασμοί διακοπτικών καταστάσεων λειτουργίας τριφασικού αντιστροφέα

Τα κύρια πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνικής ελέγχου σε σχέση με άλλες παρόμοιες τεχνικές PWM είναι τα εξής [79],[80]:

- **Υψηλή αποδοτικότητα:** Η τεχνική αυτή προσφέρει αυξημένη αποδοτικότητα στην λειτουργία του συστήματος.
- **Ευελιξία ελέγχου:** Παρέχει την δυνατότητα ελέγχου τόσο της μεταβλητής συχνότητας όσο και του πλάτους τάσης, προσφέροντας έτσι ευελιξία στην προσαρμογή του συστήματος.

- **Μικρότερος αριθμός απωλειών κατά την αλλαγή κατάστασης**
- **Ψηφιακής διαμόρφωση (DSP):** Αποτελεί μία σύγχρονη τεχνική επεξεργασίας και βελτιστοποίησης σημάτων που κυριαρχεί στον χώρο της τεχνολογίας καθώς μπορούμε να το συναντήσουμε σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές.
- **Υψηλή αξιοπιστία:** Σύμφωνα με μετρήσεις, παρουσιάζει αξιοπιστία περίπου 15.5% υψηλότερη σε σύγκριση με άλλες παρόμοιες τεχνικές.
- **Υψηλή τάση εξόδου:** Τόσο η φασική τάση εξόδου όσο και η τάση γραμμής είναι σημαντικά μεγαλύτερες, προσφέροντας υψηλότερη απόδοση του συστήματος.

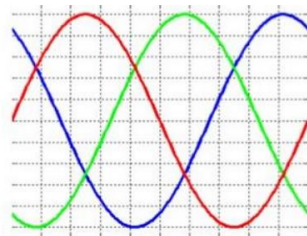
Η τεχνική ελέγχου Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) βασίζεται στην ανάπτυξη της θεωρίας που αφορά την περιστροφή του μαγνητικού πεδίου τριών φάσεων. Χρησιμοποιείται ως τεχνική ελέγχου λόγω των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, καθώς και της δυνατότητας εξαγωγής βελτιωμένων αποτελεσμάτων. Με την εφαρμογή της SVPWM, επιτυγχάνεται ο μετασχηματισμός από το πεδίο των τριών φάσεων σε πεδίο δύο φάσεων. Αυτός ο μετασχηματισμός μπορεί να υλοποιηθεί είτε σε σταθερό πλαίσιο αναφοράς είτε σε ένα σύστημα περιστρεφόμενου πλαισίου αναφοράς [81]. Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται οι τρεις ημιτονοειδείς τάσεις αναφοράς σε σχέση με τον χρόνο, που λειτουργούν ως σήμα αναφοράς στον μετατροπέα. Το peak της κυματομορφής χαρακτηρίζεται ως το πλάτος της.

Οι βασικές εξισώσεις για την περιγραφή των τριφασικών τάσεων είναι οι εξής:

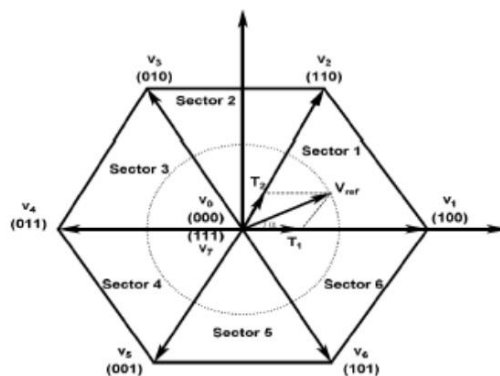
$$V_a = V\pi \cdot \sin(\omega t) \quad (2.12)$$

$$V_b = V\pi \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.13)$$

$$V_c = V\pi \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.14)$$



Εικόνα 2.26 Τριφασική τάση τροφοδοσίας αντιστροφέα



Εικόνα 2.27 Περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς

Οι τύποι για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Clark είναι ο εξής:

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Αντίστοιχα ο τύπος για τον μετασχηματισμό από το πεδίο abc (τριών φάσεων) σε dq (δύο φάσεων) είναι ο εξής:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Αρχή λειτουργίας της τεχνικής SVPWM

Όπως παρατηρούμε στον παρακάτω πίνακα πρόκειται για έναν μετατροπέα πηγής τάσης όπου διακρίνουμε το φορτίο και την μηχανή μόνιμου μαγνήτη. Ο μετατροπέας αποτελείται από έξι διακόπτες S1,S2,S3,S4,S5 και S6 αντίστοιχα. Η λειτουργία των διακοπών ελέγχεται από τις καταστάσεις ON/OFF λειτουργώντας με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως το SPWM. Δηλαδή όταν ένα άνω τρανζίστορ είναι ON, τότε οι διακόπτες S1,S3 και S5 θα άγουν δηλαδή οι αντίστοιχες καταστάσεις θα είναι ίσο με 1, ενώ αντίθετα στην περίπτωση όπου οι διακόπτες S2, S4 και S6 δεν άγουν τότε οι καταστάσεις θα ισούται με 0. Με αυτόν ακριβώς τον τρόπο θα ρυθμίζεται η λειτουργία ON/OFF [82].

Ο αντιστροφέας εφαρμόζοντας την συγκεκριμένη τεχνική διαμόρφωσης παλμών έχει 8 διαφορετικούς συνδυασμούς για την ON/OFF κατάσταση. Από την στιγμή που θα έχει κατάλληλα οριστεί η λειτουργία του άνω τρανζίστορ τότε σε αυτήν την περίπτωση θα

ρυθμιστεί κατάλληλα και η λειτουργία του κάτω. Ο Πίνακας 1 απεικονίζει τους διάφορους συνδυασμούς στην λειτουργία του αντιστροφέα εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη τεχνική SVPWM.

Πίνακας 2 Συνδυασμοί κατάστασης λειτουργίας αντιστροφέα εφαρμόζοντας την τεχνική SVPWM

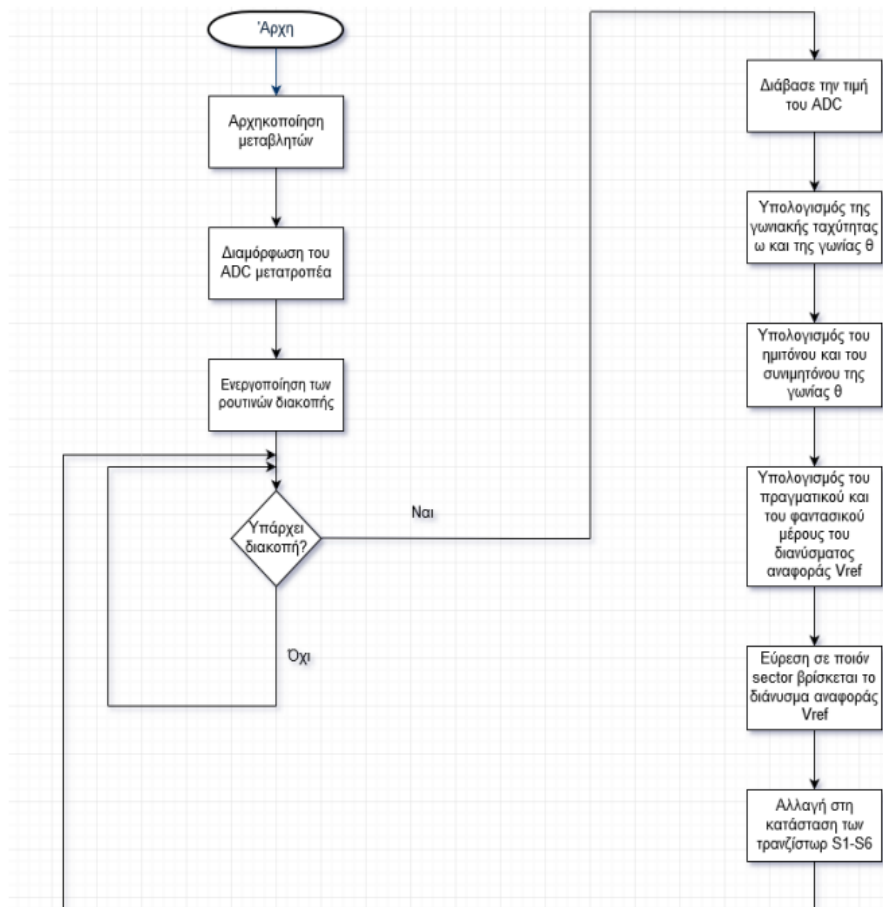
Διανύσματα Τάσης ($\times V_{dc}$)	Καταστάσεις			Τάσεις εξόδου ($\times V_{dc}$)			Τάσεις γραμμής ($\times V_{dc}$)		
	a	b	c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
$\vec{V}_0 = 0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\vec{V}_1 = \frac{2}{3} e^{j\frac{\pi}{3}}$	0	0	1	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	1	0	-1
$\vec{V}_2 = \frac{2}{3} e^{j\frac{2\pi}{3}}$	0	1	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	1	-1
$\vec{V}_3 = \frac{2}{3} e^{j\pi}$	0	1	1	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	-1	1	0
$\vec{V}_4 = \frac{2}{3} e^{j\frac{4\pi}{3}}$	1	0	0	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	0	1
$\vec{V}_5 = \frac{2}{3} e^{j\frac{5\pi}{3}}$	1	0	1	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	-1	1
$\vec{V}_6 = \frac{2}{3} e^{j2\pi}$	1	1	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	-1	0
$\vec{V}_7 = 0$	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Βήματα υλοποίησης του αλγορίθμου SVPWM

Τα βήματα για την υλοποίηση της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών SVPWM είναι τα εξής:

- Υπολογισμός της τάσης V_d , V_q αλλά και της γωνίας θ χρησιμοποιώντας τους παραπάνω μετασχηματισμούς.
- Υπολογισμός των χρόνων T_1 , T_2 και T_0 .
- Υπολογισμός των χρονικών διαστημάτων προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι αλλαγές κατάστασης των τρανζίστορ από το S_1 έως το S_6 .

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Draw.io στην παρακάτω Εικόνα 2.28 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής προκειμένου να υλοποιηθεί η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών SVPWM.



Εικόνα 2.28 Αλγόριθμος SVPWM

2.5. Ηλεκτρική Μηχανή

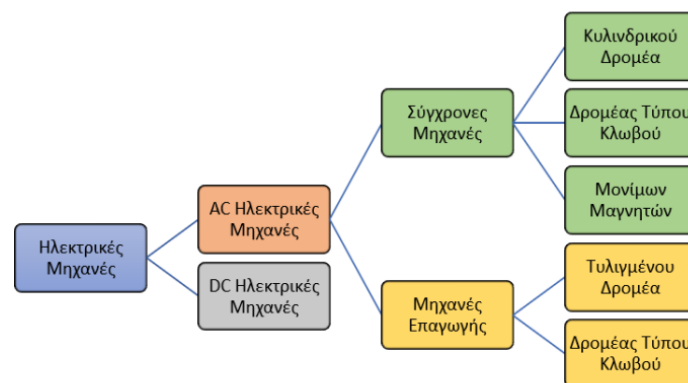
2.5.1. Εισαγωγή

Η λειτουργικότητα της ηλεκτρικής μηχανής αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία ενός κινητήριου συστήματος. Η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών βασίζεται σε διάφορα κριτήρια, όπως η τάση τροφοδοσίας, ο αριθμός των φάσεων, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα [83]. Ωστόσο, εκτός από αυτήν την κατηγοριοποίηση βάσει της εφαρμογής, υπάρχουν σημαντικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται για την αποτελεσματική λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών. Ένας θεμελιώδης στόχος είναι η επίτευξη υψηλής απόδοσης του κινητήρα, η οποία σχετίζεται με τις απώλειες της μηχανής και του κινητήριου συστήματος γενικά. Ένας επιπλέον παράγοντας είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος, καθώς καθορίζει την ικανότητα του κινητήρα να παράγει ενέργεια.

Επιπλέον, η υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές είναι σημαντική για εφαρμογές που απαιτούν ισχύ και δύναμη σε χαμηλές ταχύτητες [84]. Όλα τα παραπάνω καθιστούν απαραίτητη την κατάλληλη σχεδίαση του κινητήρα, χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες όπως λαμαρίνες χαμηλών απωλειών και προηγμένα υλικά μαγνητών. Επιπλέον, η χρήση αποδοτικών συστημάτων ψύξης και η εφαρμογή σύγχρονων υλικών μείωσης απωλειών είναι ζωτικής σημασίας.

Η υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, κυρίως για ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανελκυστήρων. Σε αυτές τις εφαρμογές, απαιτείται όχι μόνο μεγάλη ισχύς αλλά και υψηλή μηχανική ροπή για να παρέχει κίνηση για την άνοδο ή κατάβαση του θαλάμου. Οι ηλεκτροκινητήρες που προορίζονται για αυτές τις εφαρμογές πρέπει να είναι σχεδιασμένοι με έμφαση στην παροχή υψηλής ροπής σε χαμηλές στροφές, προκειμένου να εξασφαλίζουν αποτελεσματική λειτουργία. Στον χώρο της ηλεκτροκίνησης, συναντάμε διάφορους τύπους ηλεκτρικών μηχανών που καλύπτουν τις σύγχρονες ανάγκες. Οι βασικοί τύποι περιλαμβάνουν τους [85], [86]:

- Ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC Motor)
- Επαγωγικός κινητήρας (Induction Motor, IM)
- Σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας υποβοηθούμενος από μόνιμους μαγνήτες (Permanent Magnet Synchronous Electrical Motor, PMSM)
- Ηλεκτρικός κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης (Switched Reluctance Motor)



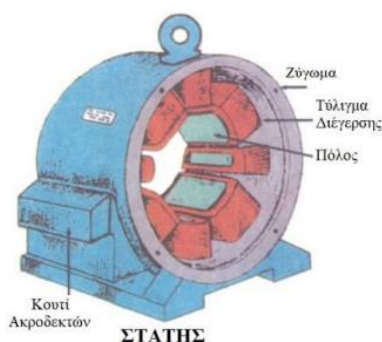
Εικόνα 2.29 Είδη Ηλεκτρικών Μηχανών

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών μηχανών

	DC Κινητήρας	Κινητήρας Επαγωγής	Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών	Κινητήρας Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης	Κινητήρας Σύγχρονης Μαγνητικής Αντίστασης
Πυκνότητα Ισχύος	2,5	3,5	5	3,5	3,5
Απόδοση	2,5	3,5	5	3,5	3,5
Έλεγχος	5	4	4	3	4
Αξιοπιστία	3	5	4	5	5
Τεχνολογική Ωριμότητα	5	5	4	4	4
Κόστος	4	5	3	4,5	4,5
Σύνολο	22	26	25	23,5	24,5

2.5.2. Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος (DC Motor)

Τα κύρια λειτουργικά στοιχεία ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος περιλαμβάνουν το πεδίο διέγερσης στον στάτη και το πεδίο τυμπάνου στον δρομέα του. Για τη διατήρηση του πεδίου του στάτη σταθερό, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι συλλέκτες ή ψήκτρες. Ο έλεγχος του κινητήρα επικεντρώνεται κυρίως στα ρεύματα διέγερσης και τυμπάνου. Η εξέλιξη στους τομείς των ηλεκτρονικών ισχύος και των καινοτόμων τεχνικών ελέγχου οδήγησε στην εφαρμογή των κινητήρων σε σύγχρονες εφαρμογές, αρχίζοντας από τους επαγωγικούς κινητήρες και συνεχίζοντας με τους κινητήρες μόνιμων μαγνητών οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές [87]. Τα μειονεκτήματα αφορούν την ανάγκη ύπαρξης ψηκτρών στον συλλέκτη. Αυτές οι ψήκτρες χρησιμοποιούνται για την μηχανική ανόρθωση της παραγόμενης τάσης από το τύμπανο. Επιπλέον, λόγω του υψηλού κόστους συντήρησης και της ανάγκης για υψηλή αξιοπιστία στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, η προσοχή στράφηκε στους κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών (BLDC) [88].



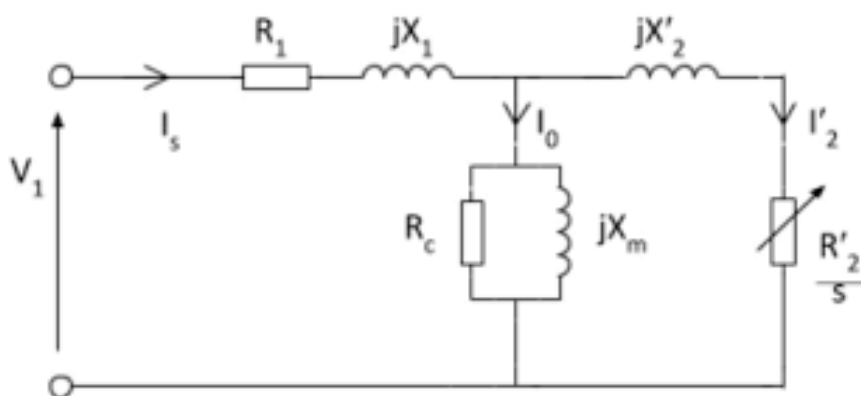
Εικόνα 2.30 Σταθερό μέρος κινητήρα συνεχούς ρεύματος



Εικόνα 2.31 Κινητό μέρος κινητήρα συνεχούς ρεύματος

2.5.3. Επαγωγικός Ηλεκτρικός Κινητήρας (Induction Motor-IM)

Οι επαγωγικοί κινητήρες, ή ασύγχρονοι κινητήρες, παραμένουν ένας από τους βασικούς τύπους κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, αντικαθιστώντας τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, και αποτελούνται από τον στάτη και τον δρομέα. Τα βασικά πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν τη μεγάλη αξιοπιστία, το χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης, καθώς και τη χαμηλή πολυπλοκότητα λόγω της απλότητας της κατασκευής τους. Η αρχή λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα βασίζεται στη δημιουργία ενός πεδίου διέγερσης που προκύπτει εξαιτίας της επαγωγής από το πεδίο του στάτη. Ο δρομέας στρέφεται μαζί με το πεδίο του στάτη σε συγχρονισμένη ταχύτητα, με μια μικρή ολίσθηση. Η οδήγηση του απαιτεί την χρήση κατάλληλου μετατροπέα, δίνοντας την δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας για τον έλεγχο της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής [89].



Εικόνα 2.32 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.

2.5.4. Ηλεκτρικός Κινητήρας Μαγνητικής Αντίδρασης (Switched Reluctance Motor)

Η λειτουργία ενός ηλεκτρικού κινητήρα με μαγνητική αντίδραση βασίζεται στην εκτυπότητα των πόλων στάτη και δρομέα, που δημιουργεί μια μεταβλητή αντίσταση στο μαγνητικό κύκλωμα τους. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των μηχανών είναι η απουσία τυλίγματος διέγερσης και μαγνητών στον δρομέα. Αν και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως το χαμηλό κόστος και η απλότητα κατασκευής. Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα που περιλαμβάνουν τη σχετικά μικρή πυκνότητα ισχύος, τον περιορισμένο βαθμό απόδοσης, την υψηλή κυμάτωση της ροπής, τον πολύπλοκο έλεγχο και τον έντονο ακουστικό θόρυβο. Επομένως, ενδέχεται να απαιτηθούν πιο εξελιγμένα ηλεκτρονικά ισχύος για τη μείωση των αρμονικών και των ταλαντώσεων, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία τους [90].



Εικόνα 2.33 Ηλεκτρικός κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης.

2.5.5. Ηλεκτρικός Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor)

2.5.5.1. Εισαγωγή

Ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των σύγχρονων κινητήρων. Η κύρια διαφορά του από τους επαγωγικούς κινητήρες είναι ότι οι μαγνήτες που τοποθετούνται στον δρομέα δημιουργούν το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο, εξαλείφοντας την ανάγκη για διέγερση εξ' επαγωγής όπως στους επαγωγικούς κινητήρες. Με αυτό τον τρόπο, παρατηρούνται μικρότερες απώλειες χαλκού, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη απόδοση που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει το 99%. Επιπλέον, προσφέρει χαμηλότερη θερμοκρασία και αξιοπιστία στη λειτουργία του συστήματος. Η υψηλή απόδοση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερης πυκνότητας ισχύος και, επομένως, την κατασκευή ενός ελαφρύτερου κινητήρα. Αυτοί είναι μερικοί από τους λόγους που οι ηλεκτρικοί κινητήρες μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιούνται ευρέως, τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο, καθώς και σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης όπως ηλεκτρικά οχήματα και ανελκυστήρες [91],[92]. Επιπλέον, υπάρχει ενδιαφέρον για την έρευνα σε νέα μαγνητικά υλικά που απαιτούν περαιτέρω μελέτη σχετικά με τις απώλειες. Παρά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν και μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος των μαγνητικών υλικών. Τέλος, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις θερμοκρασιακές μεταβολές των μόνιμων μαγνητών, καθώς συνεχείς και έντονες μεταβολές μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρά λειτουργικά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένης της απομαγνήτισης.

2.5.5.2. Αρχή λειτουργίας σύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων

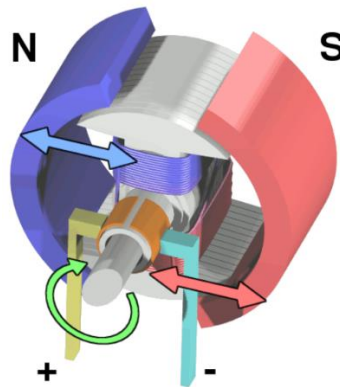
Όπως κάθε κινητήρας, έτσι και οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών αποτελούνται από δύο βασικά μέρη. Ο στάτης αποτελεί το σταθερό εξωτερικό μέρος του κινητήρα, ενώ ο δρομέας αποτελεί το περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα και περιλαμβάνει ορισμένα τυλίγματα χαλκού. Για να επιτευχθούν βέλτιστα αποτελέσματα τόσο στην απόδοση του κινητήρα όσο και στην επίδοση του κινητήριου συστήματος, επιλέγονται κυρίως τριφασικοί κινητήρες, όπου η διαφορά φάσης των τυλιγμάτων είναι 120 μοίρες. Σε έναν σύγχρονο κινητήρα, το περιστρεφόμενο πεδίο δημιουργείται όταν τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτηθούν από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, με ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης 120 μοιρών. Επομένως, δημιουργούνται δύο μαγνητικά πεδία: ένα στρεφόμενο λόγω του στάτη και ένα σταθερό λόγω του δρομέα. Η ύπαρξη αυτών των δύο πεδίων, με τη σωστή ευθυγράμμισή τους, προκαλεί την

απαραίτητη ροπή, επιτρέποντας στον κινητήρα να περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή ορίζεται ως εξής:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.17)$$

Όπου: f : Συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα

p : Πόλοι ηλεκτρικής μηχανής (σταθερό μέγεθος)



Εικόνα 2.34 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

2.5.5.3. Πλεονεκτήματα Ηλεκτρικών Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών μηχανών μόνιμων μαγνητών περιλαμβάνουν [93]:

- **Μεγαλύτερη απόδοση:** Η ελαχιστοποίηση των απωλειών και η εξάλειψη του ρεύματος διέγερσης οδηγούν σε υψηλότερη απόδοση της μηχανής.
- **Μικρότερο μέγεθος και βάρος:** Η απουσία συστημάτων διέγερσης και ψύξης συνεισφέρει στη μείωση του μεγέθους και του βάρους της μηχανής, οδηγώντας σε μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.
- **Απλούστερη κατασκευή και λειτουργία:** Η εξάλειψη της πηγής συνεχούς τάσης και των συστημάτων ψύξης συμβάλλει στην απλούστευση της κατασκευής και της λειτουργίας της μηχανής.

Αντίστοιχα τα **μειονεκτήματα** της χρήσης των μόνιμων μαγνητών είναι [94]:

- **Αυξημένο κόστος αγοράς των μαγνητικών υλικών:** Το υψηλό κόστος αγοράς των μαγνητικών υλικών μπορεί να αποτελέσει παράγοντα περιορισμού.

- **Πολυπλοκότητα ελέγχου ηλεκτρικής μηχανής:** Η ελεγκσιμότητα της ηλεκτρικής μηχανής μπορεί να παρουσιάσει προκλήσεις λόγω της σύνθεσης των μόνιμων μαγνητών.
- **Ανθεκτικότητα σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές μεταβολές:** Ορισμένες θερμοκρασιακές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα απομαγνήτισης, αν και αυτό εξαρτάται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται.

2.5.5.4. Χαρακτηριστικά μαγνητικών υλικών

Ο εν λόγω τύπος κινητήρα ξεχωρίζει από τους άλλους λόγω της χρήσης μαγνητικών υλικών στον δρομέα, τα οποία δημιουργούν το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο. Τα κύρια μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους τύπους μηχανών είναι τα εξής [95]:

1) Φερίτης: Ανακαλύφθηκε τη δεκαετία του 1930 και χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του χαμηλού κόστους και της ευρείας διαθεσιμότητας πρώτης ύλης. Ωστόσο, παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα ισχύος και προβλήματα σε υψηλές θερμοκρασίες.

2) Αλουμίνιο-Νικέλιο-Κοβάλτιο: Ανακαλύφθηκε τη δεκαετία του 1940. Είναι ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά παρουσιάζει χαμηλή μαγνητική αντίσταση.

3) Σαμάριο-Κοβάλτιο: Ανακαλύφθηκε τη δεκαετία του 1960 και προσφέρει υψηλή μαγνητική αντίσταση και πυκνότητα ισχύος. Ωστόσο, είναι δαπανηρό λόγω της σπανίας φύσης του.

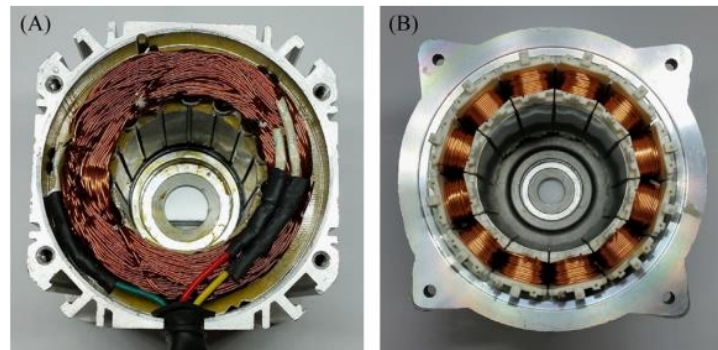
4) Νεοδύμιο-Σίδηρος-Βόριο: Αποτελεί το κύριο μαγνητικό υλικό στις μηχανές μόνιμων μαγνητών. Παρήχθη για πρώτη φορά το 1984 και συνδυάζει καλύτερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος σε σχέση με το Σαμάριο.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτών των υλικών, πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα πιθανά μειονεκτήματα, όπως το κόστος, η ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και η δυνατότητα απομαγνήτισης.

2.5.5.5. Κατασκευαστική δομή μηχανής μόνιμων μαγνητών

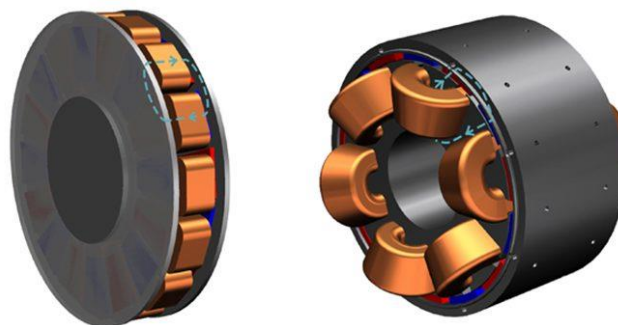
Τα βασικά στοιχεία ενός ηλεκτρικού κινητήρα περιλαμβάνουν τον στάτη και τον δρομέα. Στον δρομέα τοποθετούνται μαγνήτες με σκοπό να δημιουργήσουν ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Αντίστοιχα, ο στάτης περιλαμβάνει ένα τριφασικό, ημιτονοειδές τύλιγμα που παράγει μια ροή ρευμάτων που περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Ενώ χρησιμοποιούνται συχνά συγκεντρωμένα τυλίγματα σε σύγχρονες εφαρμογές, παρόλο που προκαλούν περιττές αρμονικές, υπάρχουν επίσης και τυλίγματα που διανέμονται. Το συγκεντρωμένο τύλιγμα

προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα, αλλά η προτίμηση για τη χρήση διανεμημένων τυλιγμάτων είναι επίσης ευρέως διαδεδομένη [96].



Εικόνα 2.35 Κατηγορίες τυλιγμάτων: (A) Διανεμημένα τυλίγματα, (B) Συγκεντρωμένα τυλίγματα

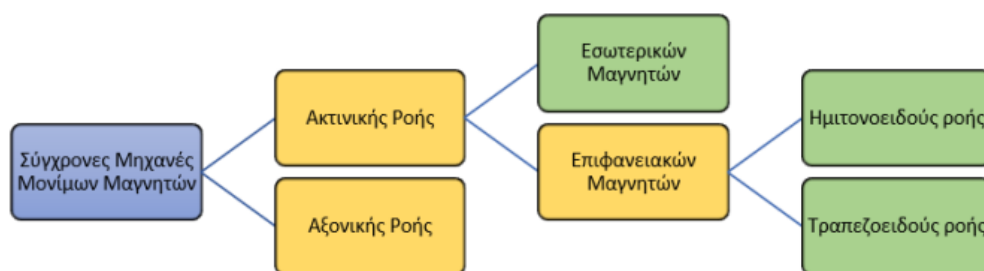
Ένα από τα βασικά κριτήρια ταξινόμησης των σύγχρονων μηχανών μόνιμων μαγνητών αφορά τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής, χωρίζοντάς την σε δύο κατηγορίες: αξονική (axial) και ακτινική (radial) ροή [97]. Στις μηχανές αξονικής ροής, ο δρομέας είναι κυλινδρικός και περιστρέφεται στο εσωτερικό του στάτη, δημιουργώντας μια μαγνητική ροή που διασχίζει το διάκενο ακτινικά [98]. Αντίθετα, στις μηχανές ακτινικής ροής, ο δρομέας έχει μορφή δίσκου και περιστρέφεται παράλληλα με τον στάτη, παράγοντας μαγνητική ροή που διασχίζει το διάκενο αξονικά. Αυτή η διάκριση είναι κυρίως σημαντική για κινητήρες με πολλούς πόλους, όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται στην πρόωση πλοίων. Αυτοί οι κινητήρες απαιτούν υψηλή ισχύ και χαμηλή ταχύτητα, και η επιλογή μεταξύ αξονικής και ακτινικής ροής εξυπηρετεί τις συγκεκριμένες απαιτήσεις αυτών των εφαρμογών.



Εικόνα 2.36 Radial flux permanent magnet synchronous motor



Εικόνα 2.37 Axial flux permanent magnet synchronous motor



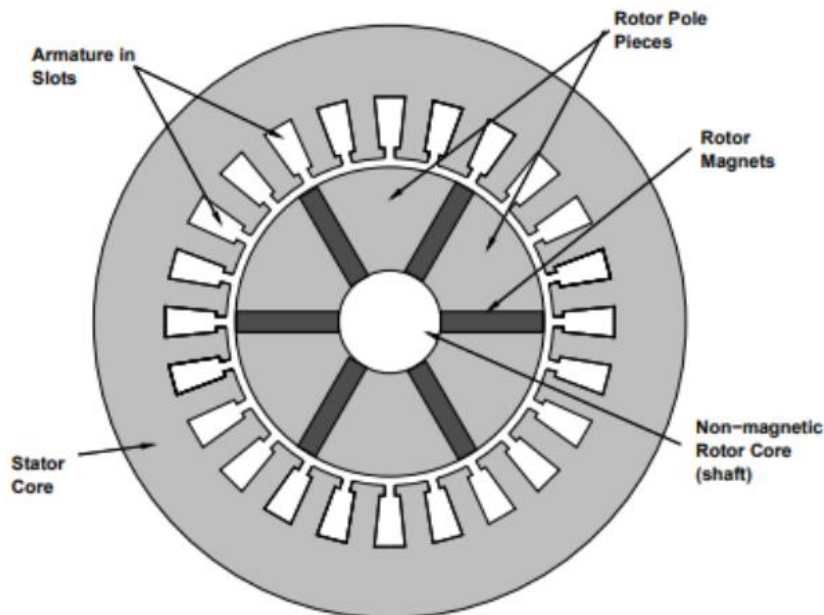
Εικόνα 2.38 Κατηγορίες μηχανών μόνιμων μαγνητών.

2.5.5.5.1. Σύγχρονοι κινητήρες εσωτερικών μαγνητών

Οι μηχανές μόνιμων μαγνητών χαρακτηρίζονται από σημαντική πολυπλοκότητα, καθώς η διαμόρφωση των εσωτερικών μαγνητών επηρεάζει τα χαρακτηριστικά τους. Εκμεταλλευόμενες τον όγκο του δρομέα, δημιουργείται υψηλή πυκνότητα ισχύος, καθιστώντας τις κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες. Η πολυπλοκότητα αυτών των μηχανών εξασφαλίζει επίσης τη μηχανική αντοχή του δρομέα, που αντέχει σε λειτουργία υψηλών ταχυτήτων, μειώνοντας τον κίνδυνο αποκόλλησης των μαγνητών [99]. Οι μαγνήτες, θωρακισμένοι από τον πυρήνα του σιδήρου στον δρομέα, συνεισφέρουν στην αυξημένη αξιοπιστία. Στην κατηγορία αυτή των ηλεκτρικών μηχανών, υπάρχει μεγάλη ποικιλία τοπολογιών, καθώς η κατασκευή επηρεάζει την τοποθέτηση και τον τρόπο τοποθέτησης των

μαγνητών στον δρομέα. Συνήθως, οι μοντέρνες μηχανές μόνιμων μαγνητών εμφανίζουν μεγάλη εκτυπότητα, με αποτέλεσμα οι αυτεπαγωγές κατά d-q άξονα να είναι διαφορετικές. Βάσει της τοποθέτησης των μαγνητών στον δρομέα, οι μηχανές αυτές διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες.

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες τοποθέτησης των μαγνητών στον δρομέα και μία από αυτές αφορά τους κινητήρες με εσωτερικούς μαγνήτες. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι η αξιοποίηση του όγκου του δρομέα για τη δημιουργία υψηλής πυκνότητας ισχύος και η δυνατότητα λειτουργίας σε πολύ υψηλές ταχύτητες, χωρίς τον κίνδυνο αποκόλλησης των μαγνητών λόγω του θωρακισμού τους από τον πυρήνα σιδήρου του δρομέα. Παρά την έντονη έρευνα σε αυτό το πεδίο, τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι η υψηλή εκτυπότητα και η πολύπλοκη σχεδίαση τους, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος κατασκευής [100].

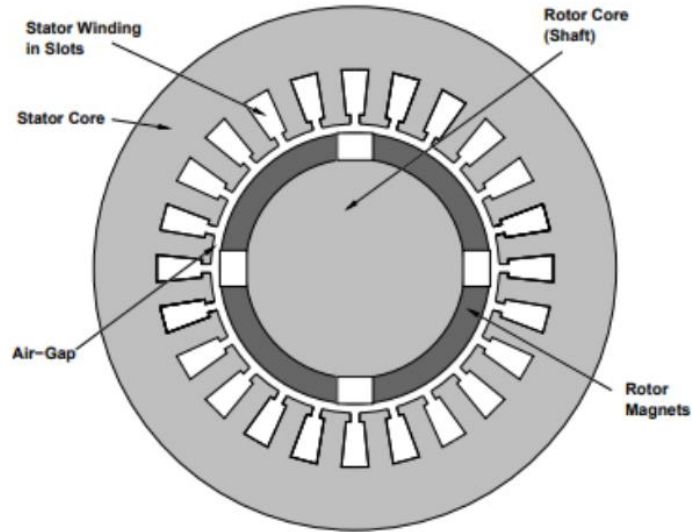


Εικόνα 2.39 Εσωτερική διαμόρφωση interior permanent magnet

- **Κινητήρες μόνιμων μαγνητών με επιφανειακούς μαγνήτες**

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες τοποθέτησης των μαγνητών στον δρομέα, και μία από αυτές είναι οι κινητήρες με εσωτερικούς μαγνήτες. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι η δημιουργία υψηλής πυκνότητας ισχύος με δυνατότητα λειτουργίας σε πολύ υψηλές ταχύτητες, ενώ ο θωρακισμός των μαγνητών από τον πυρήνα σιδήρου του δρομέα εξαλείφει τον κίνδυνο αποκόλλησής τους [101]. Παρόλο που αυτοί οι κινητήρες έχουν εντυπωσιακό ερευνητικό

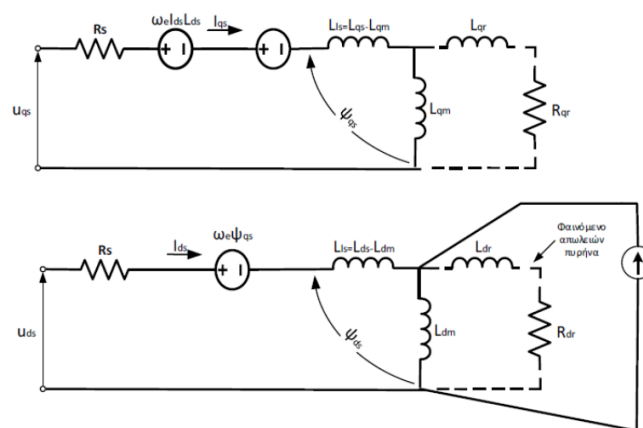
δυναμικό, τα βασικά τους μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την υψηλή εκτυπότητα και την πολύπλοκη σχεδίαση, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος συντήρησης.



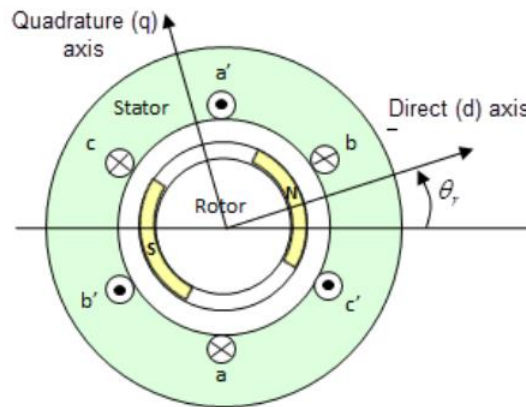
Εικόνα 2.40 Εσωτερικό μέρος surface-mounted permanent magnet

2.5.6. Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη

Στην παρακάτω Εικόνα 2.41 διακρίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη. Τα ηλεκτρικά μεγέθη καθορίζουν την ισχύ εισόδου του κινητήρα ενώ αντίστοιχα τα μηχανικά την ισχύ εξόδου.



Εικόνα 2.41 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής



Εικόνα 2.42 Διαμόρφωση πεδίου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη κατά d και q άξονα

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το **ηλεκτρικό μέρος της μηχανής** είναι:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{Vd + Lq\omega_e i_q - R_s i_d}{L_d} \quad (2.18)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{Vq - R_s i_q - Ld\omega_e i_d - \Phi_m \omega_e}{L_q} \quad (2.19)$$

Η εξίσωση που περιγράφει το **μηχανικό μέρος της μηχανής** και αφορά την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \times (T_m - T_L - b \times \omega_m) \quad (2.20)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (2.21)$$

Η **ηλεκτρομαγνητική ροπή** του κινητήρα ορίζεται ως εξής:

$$T_e = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} \times ((L_d - L_q) \times i_d i_q + \Phi_m \times i_q) \quad (2.22)$$

Για να ενσωματώσουμε τις απώλειες αλλά και να υπολογίσουμε την συνολική απόδοση του κινητήρα οι εξισώσεις μετασχηματίζονται ως εξής:

$$V_d = R_a i_{od} - \omega L_q i_{oq} \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \quad (2.23)$$

$$V_q = R_a i_{oq} + \omega L_q i_{od} \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) + \omega \lambda \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \quad (2.24)$$

$$i_{od} = i_d - i_{cd} \quad (2.25)$$

$$i_{oq} = i_q - i_{cq} \quad (2.26)$$

$$i_{cd} = - \frac{\omega p L_d i_{oq}}{R_c} \quad (2.27)$$

$$i_{cq} = \frac{\omega(\lambda + L_d i_{oq})}{R_c} \quad (2.28)$$

Οι **απώλειες ενέργειας** που μπορούμε να συναντήσουμε σε ένα κινητήρα είναι οι εξής:

- **Απώλειες Χαλκού:** Η προέλευσή τους οφείλεται στη θέρμανση λόγω της ροής του ρεύματος και της αντίστασης περιέλιξης του στάτη. Συνεπώς, αυτές οι απώλειες είναι ανάλογες τόσο με το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα όσο και με την αντίσταση των τυλιγμάτων. Αποτελούν το σημαντικότερο ποσοστό των συνολικών απωλειών που παρουσιάζει ο κινητήρας. Η σωστή διαχείριση αυτών των απωλειών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη αποδοτικής λειτουργίας του κινητήρα.

$$W_{Cu} = R_a \times (i_d^2 + i_q^2) \quad (2.29)$$

- **Απώλειες Σιδήρου:** Προέρχονται από το σύνολο των απωλειών υστέρησης και των δινορευμάτων που ενδέχεται να παρουσιάσουν ο στάτης και ο δρομέας αντίστοιχα. Η ακριβής ποσότητα αυτών των απωλειών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων του ονομαστικού ρεύματος, της αντίστασης των τυλιγμάτων και των συχνοτήτων λειτουργίας του κινητήρα. Η διαχείριση αυτών των απωλειών είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση της αποτελεσματικής λειτουργίας του κινητήρα.

$$W_{Fe} = R_c \times (i_{cd}^2 + i_{cq}^2) \quad (2.30)$$

- **Κατανεμημένες απώλειες:** Αποτελούν ένα εξαιρετικά μικρό ποσοστό των συνολικών απωλειών που παρουσιάζει ο κινητήρας, καταλαμβάνοντας περίπου το 1% της ισχύος εξόδου του κινητήρα ($1\% \times P_{out}$).
- **Αρμονικές απώλειες:** Οι αρμονικές απώλειες προκύπτουν από τη μη ημιτονοειδή τάση που δημιουργείται από την τροφοδοσία του κινητήρα. Η ύπαρξη αρμονικών ρεύματος μπορεί να επηρεάσει τόσο τις απώλειες χαλκού όσο και τις απώλειες σιδήρου.

- **Μηχανικές απώλειες:** Οι μηχανικές απώλειες είναι αποτέλεσμα των μηχανικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και οφείλονται κυρίως σε απώλειες λόγω τριβής, ανεμισμού και απωλειών περιστροφής που μπορούν να παρουσιαστούν κατά τη λειτουργία του κινητήρα, ιδίως όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο.

$$W_{μηχ.} = B \times \omega_r \quad (2.31)$$

- **Συνολικές ηλεκτρικές απώλειες:** Οι συνολικές ηλεκτρικές απώλειες αποτελούν το άθροισμα των απωλειών χαλκού και σιδήρου που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του κινητήρα.

$$W_{ηλεκτ.} = W_{Cu} + W_{Fe} \quad (2.32)$$

- **Συνολικές απώλειες κινητήρα:** Αποτελούν το άθροισμα των ηλεκτρικών και μηχανικών απωλειών που εμφανίζει ο κινητήρας.

$$W_{Losses} = W_{ηλεκτ.} + W_{μηχ.} \quad (2.33)$$

- **Συντελεστής βαθμού απόδοσης:** Είναι ο λόγος της ισχύος εξόδου του κινητήρα σε σχέση με την ισχύ εισόδου.

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + W_{Losses}} \quad (2.34)$$

Πίνακας 4 Βασικά μεγέθη παραμετροποίησης μηχανής μόνιμων μαγνητών

Παράμετροι	Σύμβολα	Μονάδα μέτρησης
Αντίσταση Τυλίγματος	R_s	Ohm (Ω)
Αυτεπαγωγή κατά d-άξονα	L_d	Henry (H)
Αυτεπαγωγή κατά q-άξονα	L_q	Henry (H)
Μαγνητική ροή	p_m	Weber (Wb)
Πόλοι μηχανής	P	-

Συντελεστής τριβών	B	N*m
Ροπή Αδράνειας	J	Kg*m ²

Κεφάλαιο 3. Τεχνικές ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών

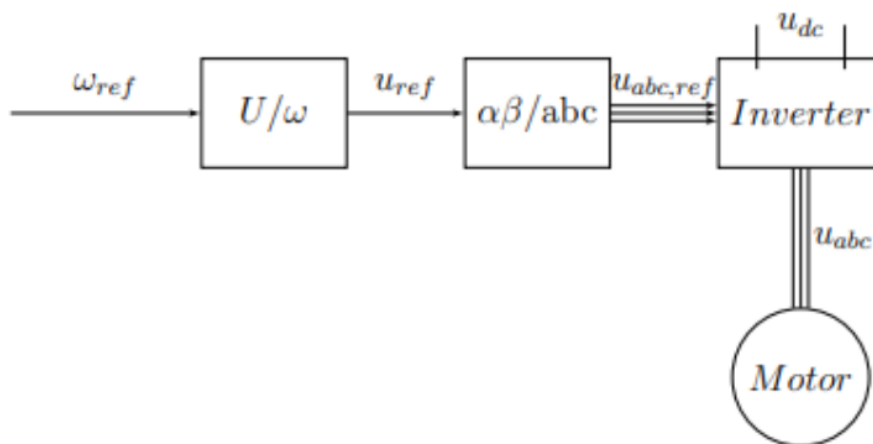
Είναι εμφανές ότι για την αποτελεσματική λειτουργία ενός συστήματος μετατροπέα και ηλεκτρικής μηχανής απαιτείται η εφαρμογή κατάλληλης τεχνικής ελέγχου. Οι τεχνικές ελέγχου πρέπει να προσαρμόζονται τόσο στα χαρακτηριστικά του κινητήρα όσο και του μετατροπέα, προκειμένου να εξάγουν αποτελέσματα υψηλής απόδοσης. Διακρίνονται διάφορες στρατηγικές ελέγχου, οι οποίες, ανάλογα με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο και τον τρόπο κατασκευής τους, διαφέρουν σε απλότητα και πολυπλοκότητα. Οι βασικοί λόγοι που επηρεάζουν την πολυπλοκότητα μιας στρατηγικής ελέγχου είναι η ανάγκη μεταβλητής συχνότητας, η παρουσία συγκεκριμένων αρμονικών φαινομένων, καθώς και η απαιτούμενη ποιότητα ισχύος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε ιδιαίτερα στον διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμένο πεδίο και τη χρήση του Proportional Integral (PI) controller. Ωστόσο, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση και με άλλες τεχνικές ελέγχου και διάφορους τύπους ελεγκτών, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόκριση του συστήματος και να αναδειχθεί η γενική λειτουργία των ελεγκτών. Μερικές από τις βασικές τεχνικές ελέγχου είναι [102]:

- Βαθμωτός έλεγχος ανοιχτού βρόγχου
- Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου
- Άμεσος έλεγχος ροπής
- Ασαφείς ελεγκτές για έλεγχο ρεύματος και ταχύτητας κινητήρα

3.1. Βαθμωτός έλεγχος (Scalar Control)

Η τεχνική ελέγχου ανοιχτού βρόγχου, που αποτελούσε την πιο διαδεδομένη και παραδοσιακή προσέγγιση, δεν περιλαμβάνει ανάδραση και εφαρμόζεται ευρέως τόσο σε μηχανές επαγωγής όσο και σε μηχανές με μόνιμους μαγνήτες. Η δομή και ο αλγοριθμικός τρόπος υλοποίησης αυτής της τεχνικής είναι αρκετά απλοί, βασιζόμενη σε δύο βασικά στοιχεία: τον λόγο τάσης και τη συχνότητα. Συγκεκριμένα, ο στόχος είναι να διατηρηθεί σταθερός ο λόγος V_s/f_s διατηρώντας τη μαγνητική ροή του στάτη σταθερή, παράγοντας έτσι μέγιστη ροπή [103]. Κάθε τεχνική ελέγχου παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην περίπτωση των μηχανών επαγωγής, αυτές δεν υφίστανται έντονο αποσυγχρονισμό, καθιστώντας τον βαθμωτό έλεγχο σχετικά εύκολο στην υλοποίησή του. Στις μηχανές με μόνιμους μαγνήτες, η εφαρμογή

του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμένο πεδίο επικρατεί λόγω της έμφασης στην απόδοση. Τα δύο βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι η απλότητα και το χαμηλό κατασκευαστικό κόστος [104]. Ωστόσο, τα μειονεκτήματα συνδέονται με τη λειτουργία των μηχανών με μόνιμους μαγνήτες. Λόγω της μη γραμμικότητάς τους, είναι ευαίσθητες στις μεταβολές των μεταβλητών ελέγχου, επιβάλλοντας τη χρήση ανάδρασης για τη δημιουργία κλειστού βρόγχου με ελεγκτές. Παρατηρείται επίσης σε υψηλές ταχύτητες η απώλεια ευστάθειας, οδηγώντας σε αποσυγχρονισμό της μηχανής, ιδίως όταν αυτή δεν περιλαμβάνει τυλίγματα απόσβεσης. Η λύση σε αυτήν την περίπτωση είναι η εφαρμογή ανάδρασης και η δημιουργία κλειστού βρόγχου με τη χρήση ελεγκτών.



Εικόνα 3.1 Δομικό διάγραμμα βαθμωτού ελέγχου v/f.

3.2. Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control-FOC)

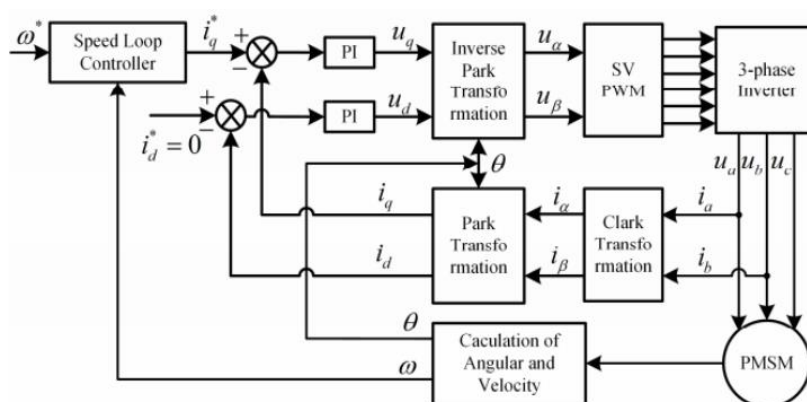
Η τεχνική διανυσματικού ελέγχου αποτελεί την πιο διαδεδομένη προσέγγιση. Τα βασικά μειονεκτήματα του βαθμωτού ελέγχου, ιδίως όσον αφορά στις αυξημένες απαιτήσεις για δυναμική απόκριση του συστήματος, οδήγησαν στην ανάγκη για την υιοθέτηση της τεχνικής διανυσματικού ελέγχου. Ο διανυσματικός έλεγχος ανήκει στον ευρύτερο χώρο των τεχνικών ελέγχου κλειστού βρόγχου, περιλαμβάνοντας αναδράσεις. Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές, η τεχνική διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου χρησιμοποιείται ευρέως, ιδίως σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές επιδόσεις [105]. Η χρήση μικροεπεξεργαστών διευκολύνει ακόμη περισσότερο τη διαδικασία αυτή.

Η τεχνική διανυσματικού ελέγχου, όπως υποδηλώνει και το όνομά της, βασίζεται στις δύο συνιστώσες d-q, οι οποίες εκφράζονται ως διανύσματα. Παρά το αυξημένο κόστος σε σύγκριση με την τεχνική βαθμωτού ελέγχου, η υψηλή ακρίβεια και η εξαιρετική ποιότητα ελέγχου αποτελούν τα κύρια πλεονεκτήματά της. Συνοπτικά, τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής διανυσματικού ελέγχου περιλαμβάνουν [106]:

- **Ευρύ εύρος ταχυτήτων:** Η τεχνική διανυσματικού ελέγχου προσφέρει ένα ικανοποιητικό εύρος ταχυτήτων, επιτρέποντας την ευέλικτη λειτουργία του συστήματος.
- **Ρυθμιζόμενη ταχύτητα και ρεύμα:** Με τη χρήση κατάλληλων ελεγκτών, η τεχνική διανυσματικού ελέγχου επιτρέπει τη ρύθμιση τόσο της ταχύτητας όσο και του ρεύματος, παρέχοντας ακρίβεια και ευελιξία.
- **Μηδενισμός των ωμικών απωλειών:** Η τεχνική αυτή συνεισφέρει στον μηδενισμό των ωμικών απωλειών, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος.
- **Μείωση της κυμάτωσης της ροής:** Η τεχνική διανυσματικού ελέγχου συμβάλλει στη μείωση της κυμάτωσης της ροής, εξασφαλίζοντας ομαλή λειτουργία.
- **Προστασία από υπερτάσεις:** Η τεχνική προσφέρει αποτελεσματική προστασία από υπερτάσεις, κυρίως σε περιπτώσεις απώλειας ελέγχου ρεύματος.
- **Προστασία από απομαγνητισμό:** Εξασφαλίζει προστασία από τον απομαγνητισμό των μόνιμων μαγνητών, διατηρώντας την απόδοση του συστήματος.
- **Καλή συμπεριφορά στην μεταβατική κατάσταση:** Η τεχνική διανυσματικού ελέγχου επιδεικνύει καλή συμπεριφορά στη μεταβατική κατάσταση, εξασφαλίζοντας ομαλή μετάβαση σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

Ο γενικός σκοπός του αλγόριθμου επικεντρώνεται στις βασικές μεταβλητές που παρακολουθούν το ηλεκτρικό και μηχανικό μέρος της μηχανής, δηλαδή τα ρεύματα κατά d-q άξονα και τη γωνιακή ταχύτητα ω_m . Σε αυτήν την προσέγγιση, χρησιμοποιούνται ελεγκτές PI για κάθε μεταβλητή. Κάθε ελεγκτής δέχεται τη διαφορά μεταξύ ενός σήματος αναφοράς και των πραγματικών μετρούμενων αποτελεσμάτων ρεύματος και ταχύτητας, αντίστοιχα. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2, οι ελεγκτές PI για τα ρεύματα i_d , i_q , και ω_m παίρνουν μέρος στον έλεγχο της συστοιχίας. Μέσω των ελεγκτών ρεύματος, παράγονται τα αντίστοιχα σήματα εισόδου. Με τη χρήση κατάλληλου μετασχηματισμού σε α , β άξονα, αυτά τα σήματα εισόδου εισάγονται σε μια μονάδα PWM (Pulse Width Modulation), SPWM (Sinusoidal Pulse Width

Modulation), ή SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation), ανάλογα με τη διαμόρφωση του εύρους παλμών που απαιτείται για την οδήγηση του αντιστροφέα [107].



Εικόνα 3.2 Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (FOC)

Η λειτουργία των βρόχων ρεύματος και ταχύτητας είναι η εξής:

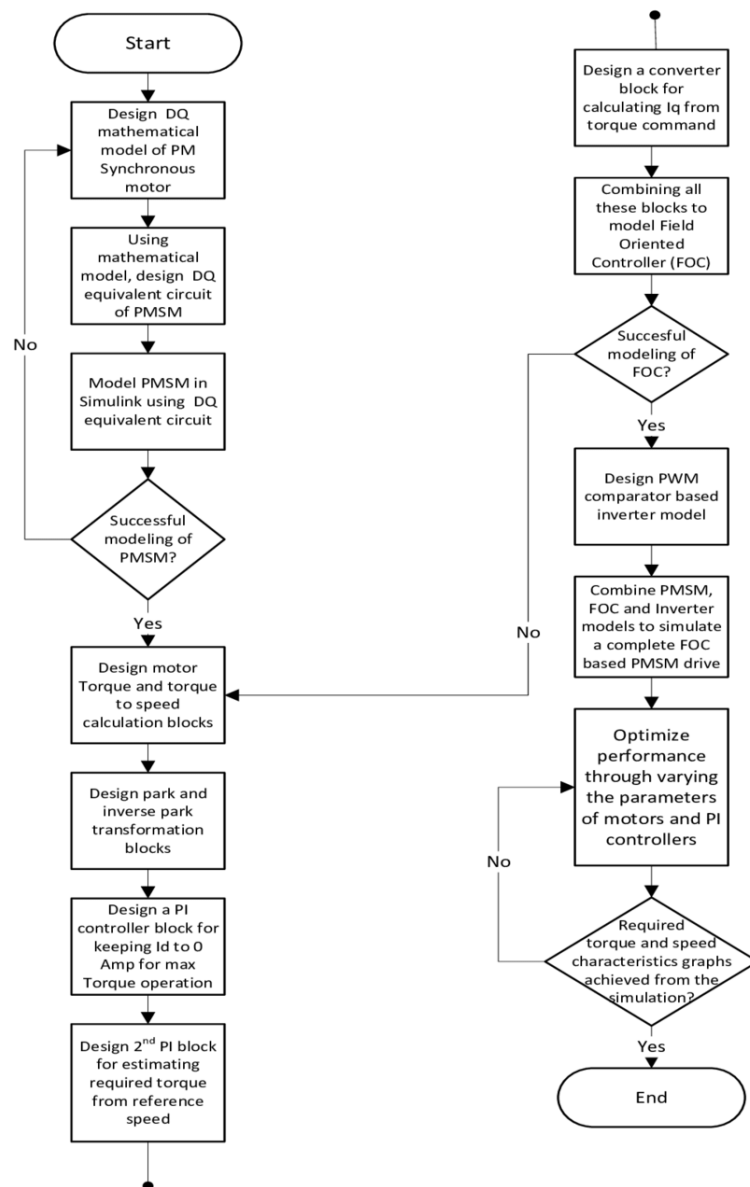
- **Βρόχος ρεύματος i_d :** Αποτελεί μία σημαντική πτυχή του ελέγχου στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Κατά την αναφορά του ρεύματος, επιλέγεται $i_d = 0$ καθιστώντας τον έλεγχο αρκετά απλό. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η απόξευση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής του κινητήρα από τον άξονα d. Αυτή η επιλογή είναι κατάλληλη όταν οι αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων ($L_d = L_q$) είναι ίδιες. Ωστόσο, υπάρχει η περίπτωση της εξασθένησης πεδίου, όπου παρατηρείται μείωση της ροπής με αυξανόμενη ταχύτητα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το $i_d \neq 0$, ειδικά σε περιπτώσεις έκτυπων πόλων όπου το $L_d \neq L_q$. Έτσι, για την μελέτη της πρώτης περίπτωσης το $i_d < 0$, ενώ στην δεύτερη περίπτωση το $i_d > 0$. Η υπολογιστική διαδικασία για το i_d μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες τεχνικές προσδιορισμού, λαμβάνοντας υπόψη στρατηγικές μέγιστης ροπής, ισχύος, αλλά και μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Αφού υπολογιστεί η διαφορά μεταξύ του σήματος αναφοράς και της πραγματικής τιμής του ρεύματος, ο ελεγκτής PI παράγει το σήμα της τάσης V_d το οποίο αποτελεί και την είσοδο του συστήματος.
- **Βρόχος ρεύματος i_q :** Η λειτουργία του βρόχου ρεύματος i_q είναι ουσιαστικά παρόμοια με τον βρόχο ρεύματος i_d . Σε αυτόν τον βρόχο, η διαφορά μεταξύ του σήματος αναφοράς και της πραγματικής τιμής του ρεύματος παράγει το σήμα τάσης εισόδου V_q . Η μοναδική διαφορά που παρατηρείται συνδέεται με το σήμα αναφοράς που προέρχεται από τον ελεγκτή της ταχύτητας.

- **Βρόχος ταχύτητας ω_m :** Αυτό προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ της ταχύτητας αναφοράς και της μηχανικής ταχύτητας στην έξοδο του συστήματος, αποτελώντας τον κύριο ρυθμιστή του σήματος αναφοράς για τον ελεγκτή i_q .

Το βασικό πρόβλημα στην συγκεκριμένη εφαρμογή αφορά τον κατάλληλο σχεδιασμό των **ελεγκτών PI** που προκύπτει από τις εξισώσεις του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5 Τυπολόγιο ελεγκτών ρεύματος και ταχύτητας

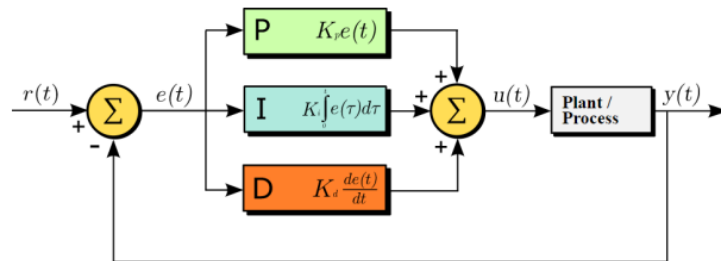
Είδη Ελεγκτών	Τύποι Ελεγκτή
Ρεύματος κατά d-άξονα (P)	$K_{pd} = a_c L_d$
Ρεύματος κατά d-άξονα (I)	$K_{id} = a_c^2 L_d$
Ρεύματος κατά q-άξονα (P)	$K_{pq} = a_c L_q$
Ρεύματος κατά q-άξονα (I)	$K_{iq} = a_c^2 L_q$
Εύρος ζώνης ελεγκτή ρεύματος	$a_c \leq 0.04\omega_s$
Αναλογικό κέρδος ελεγκτή ταχύτητας (P)	$K_{ps} = a_s J \frac{4}{3P\lambda_m}$
Ολοκληρωτικό κέρδος ελεγκτή ταχύτητας (I)	$K_{is} = a_s B \frac{4}{3P\lambda_m}$
Εύρος ζώνης ελεγκτή ταχύτητας	$a_s \leq 0.1a_c$



Εικόνα 3.3 Αλγόριθμος Field Oriented Control

Εκτός από τη χρήση του PI controller, προβλέπεται και η χρήση του Proportional – Integral – Derivative (PID) controller για την ανάλυση της συμπεριφοράς και των αποκρίσεων στην έξοδο του συστήματος. Ένας PID controller αποτελείται από τρία βασικά μέρη: αναλογικό, ολοκληρωτικό και το διαφορικό μέρος. Στην παρακάτω Εικόνα 3.4 απεικονίζεται ένα σύστημα ανάδρασης κλειστού βρόγχου, στο οποίο φαίνονται όλοι οι προαναφερθέντες όροι. Οι τρεις όροι του PID controller συνεργάζονται για τον καλύτερο έλεγχο του συστήματος. Ο όρος P προσφέρει ανταπόκριση ανάλογα με το σφάλμα, ο όρος I διορθώνει τυχόν υπολείμματα του σφάλματος με τον χρόνο, ενώ ο όρος D προσθέτει αποσβεννύμενη αντίδραση σε αλλαγές του σφάλματος. Η συνδυασμένη χρήση αυτών των όρων επιτρέπει στον PID controller να

προσαρμόζει την έξοδο του συστήματος με ακρίβεια, επιτυγχάνοντας βελτιωμένη απόκριση και απόδοση [108].



Εικόνα 3.4 Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Παράγωγος Ελεγκτής

Οι τρεις όροι του PID controller διαθέτουν ένα κέρδος, το οποίο αποτελεί το βασικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί. Είναι αναγκαίο να ρυθμιστούν κατάλληλα, καθώς η σωστή λειτουργία του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάλληλη παραμετροποίησή τους. Κάθε όρος έχει τη δική του λειτουργία και σημασία, ανάλογα με την επίδραση που θέλουμε να επιτύχουμε στο σύστημα. Η διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων αυτών των όρων είναι κρίσιμη για τη σταθερότητα και απόδοση του συστήματος ελέγχου. Η επιλογή κατάλληλων τιμών κέρδους απαιτεί τόσο θεωρητικές αναλύσεις όσο και τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων, με σκοπό τη βέλτιστη προσαρμογή στις διάφορες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

- **Αναλογικός όρος (P):** Ο αναλογικός όρος λειτουργεί ελέγχοντας το σύστημα, με σκοπό τη μείωση του σφάλματος. Κατά την αύξηση του σφάλματος, ο αναλογικός όρος αυξάνει τη δράση ελέγχου, με στόχο τη μείωση του σφάλματος. Ωστόσο, η υπερβολική αύξηση μπορεί να οδηγήσει σε ταλαντώσεις και ακόμα και αστάθεια του συστήματος [109].
- **Ολοκληρωτικός όρος (I):** Συνεισφέρει στην μείωση του σφάλματος, αθροίζοντας το σφάλμα. Όταν το σφάλμα είναι μικρό, ο ολοκληρωτικός όρος προκαλεί μεταβολή στο σήμα ελέγχου, προσπαθώντας να εξαλείψει το σφάλμα. Αυτό μπορεί, ωστόσο, να οδηγήσει σε έντονο κορεσμό του συστήματος, επηρεάζοντας το σήμα ελέγχου [109].
- **Διαφορικός όρος (D):** Ο διαφορικός όρος αντιδρά στις έντονες μεταβολές, παρέχοντας την ανάλογη αντίδραση ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα. Η χρήση αυτού του όρου απαιτεί προσεκτική ρύθμιση, καθώς μπορεί να δημιουργήσει έντονα σήματα με θόρυβο [109].

Ένας PID ελεγκτής έχει την μορφή:

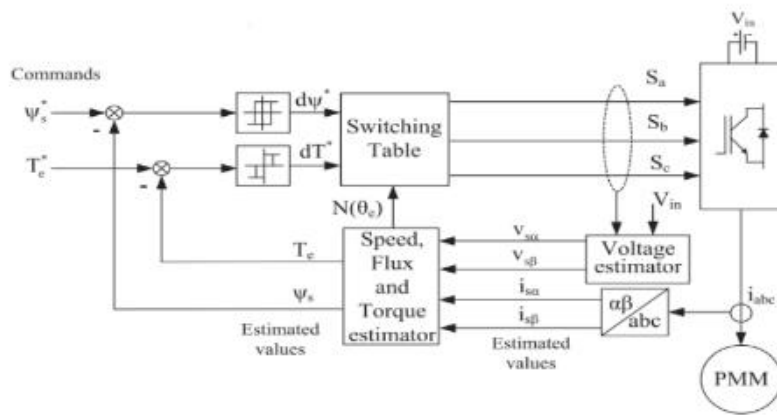
$$u(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d \quad (3.1)$$

3.3. Άμεσος έλεγχος ροπής (Direct Torque Control-DTC)

Η τεχνική ελέγχου DTC (Direct Torque Control) αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '80, συμπίπτοντας με την εποχή της έκτασης του προσανατολισμένου πεδίου. Αυτή η τεχνική διαφέρει σημαντικά από το FOC (Field-Oriented Control), με την κύρια διαφορά να επικεντρώνεται στην απόζευξη της ροπής και της μαγνητικής ροής. Γενικά, η DTC μοιάζει αρκετά με την τεχνική του βαθμωτού ελέγχου, απαιτώντας την ύπαρξη αντιστάτη στάτη για τη λειτουργία του. Για τη μέτρηση και την εκτίμηση της γωνίας της μαγνητικής ροής, συνήθως χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας Hall στο διάκενο. Η DTC εφαρμόζεται σε διάφορες παραλλαγές, με τη χρήση ελεγκτή υστέρησης να είναι η συνηθισμένη. Το δομικό διάγραμμα του συστήματος κίνησης ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με την τεχνική ελέγχου DTC, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5.

Αντιλαμβανόμαστε από την τοπολογία του συστήματος κίνησης ότι οι τάσεις του ορθού και εγκάρσιου άξονα επιλέγονται με βάση τα σήματα αναφοράς της ροπής και της πεπλεγμένης ροής στην είσοδο του συστήματος. Επίσης υπάρχει ένας εκτιμητής που εκτιμά τις πραγματικές τιμές και τις αφαιρεί από τα σήματα αναφοράς, ενώ τα σφάλματα εισέρχονται στον ελεγκτή υστέρησης. Οι έξοδοι εισέρχονται στον πίνακα επιλογής διακοπτικής κατάστασης, ο οποίος αποτελεί το στάδιο πριν από την τεχνική SVPWM. Η διακοπτική κατάσταση σχετίζεται με τη διαμόρφωση παλμών, εφαρμόζοντας την τεχνική SVPWM, όπου οι παλμοί που προκύπτουν τροφοδοτούν τον αντιστροφέα. Επιπλέον, η διακοπτική συχνότητα καθορίζεται βάσει του εύρους της ζώνης υστέρησης, ενσωματώνοντας έτσι την αποτελεσματικότερη λειτουργία του συστήματος [110].

Κάθε τεχνική ελέγχου φέρει τα δικά της προτερήματα και μειονεκτήματα. Στην περίπτωση της τεχνικής DTC, υπάρχουν ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα που συνέβαλαν στη διάδοσή της. Το κύριο πλεονέκτημα είναι το μειωμένο υπολογιστικό κόστος, καθώς η τεχνική δεν απαιτεί τη χρήση PI Controller, διαμόρφωση παλμών PWM, ή ακόμα και την απαίτηση γνώσης της γωνίας του δρομέα. Η απλότητα της είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, ενώ η μη ανάγκη για περίπλοκους ελεγκτές συμβάλλει στη μείωση του συνολικού κόστους. Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η τεχνική DTC παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, αντιμετωπίζει υψηλή κυμάτωση στη ροπή, την πεπλεγμένη ροή και το ρεύμα του στάτη. Αυτά τα προβλήματα μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος κίνησης και απαιτούν προσεκτική ρύθμιση και εξειδικευμένες τεχνικές για την αντιμετώπισή τους [111].



Εικόνα 3.5 Τεχνική ελέγχου DTC.

3.4. Μη γραμμικός έλεγχος – Ασαφείς ελεγκτές

Η ανάλυση των τεχνικών ελέγχου ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των γραμμικών τεχνικών, οι οποίες εφαρμόζονται κυρίως σε συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος, παρουσιάζοντας εξαιρετικά αποτελέσματα. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των τεχνικών εστιάζονται σε πτυχές όπως η δυνατότητα αυτοματοποιημένης μετάβασης από ένα μη ευσταθές σύστημα σε ένα ευσταθές, ακολουθώντας μια συγκεκριμένη διαδικασία ανάλυσης. Επιπλέον, προσφέρουν τη δυνατότητα μελέτης της ευστάθειας του συστήματος κλειστού βρόγχου, προκειμένου να επιτευχθεί μια αξιόπιστη λύση για τη γενικότερη λειτουργία του. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τις γραμμικές τεχνικές ελέγχου ιδιαίτερα χρήσιμες, ενώ παρέχουν τη δυνατότητα για σταθερές και αξιόπιστες λύσεις στην συγκεκριμένη εφαρμογή [112].

Εξίσου σημαντικά, τα βασικά μειονεκτήματα αυτών των γραμμικών τεχνικών ελέγχου συνδέονται με την ανάγκη για ανάλυση και προσδιορισμό των παραμέτρων ενός ηλεκτρικού συστήματος κίνησης, καθώς και με την επίδρασή τους σε συστήματα ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος. Ένα από τα σημαντικά μειονεκτήματα αφορά την ταχεία αντίδρασή τους, προκαλώντας τις αλλαγές στις παραμέτρους κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Αυτό οδηγεί στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλές παράμετροι που μπορούν να υποστούν αλλαγές, ακόμα και ελάχιστες, επηρεάζοντας την απόκρισή τους. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα μειονεκτήματα και να βελτιωθεί η απόκριση του συστήματος, έχει πραγματοποιηθεί μια προσπάθεια εισαγωγής μη γραμμικών τεχνικών ελέγχου. Ανάμεσα σε αυτές συγκαταλέγονται οι ασαφείς ελεγκτές. Αυτές οι προσεγγίσεις στοχεύουν στο να επιτύχουν ταχύτερες αποκρίσεις και να μειώσουν την

εξάρτηση από τις παραμέτρους, βελτιώνοντας έτσι την συνολική απόδοση του συστήματος [113].

3.4.1. Εισαγωγή στους ασαφείς ελεγκτές

Όπως προαναφέρθηκε εκτενώς, η κατηγορία των ελεγκτών PI αποτελεί κύρια επιλογή στα μοντέλα ελέγχου. Παρόλο που αυτοί οι ελεγκτές χαρακτηρίζονται από πλεονεκτήματα, όπως η σχετική απλότητα και η ευκολία εφαρμογής, παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, η κυμάτωση της ταχύτητας κατά τη μεταβατική κατάσταση αναδεικνύει μια αδυναμία στον PI έλεγχο να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις απότομες αλλαγές κατά την εκκίνηση ή τον τερματισμό του συστήματος. Αυτό οδηγεί σε ανεπιθύμητες διακυμάνσεις στην ταχύτητα, με ενδεχόμενες επιπτώσεις στην ακρίβεια του ελέγχου. Επιπλέον, το χρονικό διάστημα μεταβατικής κατάστασης αντιπροσωπεύει τον χρόνο που απαιτείται από το σύστημα για να επιτύχει τη σταθερή κατάσταση μετά από μια διαταραχή. Το σημαντικό χρονικό διάστημα αυτό μπορεί να είναι αποδεκτό σε ορισμένες εφαρμογές, αλλά σε άλλες όπου απαιτείται γρήγορη απόκριση, μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μειονέκτημα [113].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι περιορισμοί του PI ελέγχου δεν περιορίζονται μόνο στα χρονικά διαστήματα μεταβατικής κατάστασης και την κυμάτωση της ταχύτητας. Από πλευράς μαθηματικού μοντέλου, οι απροσδόκητες αποκλίσεις μεταξύ του πραγματικού συστήματος και του μοντέλου μπορεί να οδηγήσουν σε ακατάλληλη απόκριση του ελεγκτή. Σε πολλές περιπτώσεις, το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος είναι προσεγγιστικό και ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζει ακριβώς την πραγματική συμπεριφορά. Η χρήση ασαφούς ελέγχου προσφέρει μια εναλλακτική λύση, καθώς δεν εξαρτάται στενά από το μαθηματικό μοντέλο. Η ασάφεια επιτρέπει τη χρήση συνόλων και κανόνων που αντικαθιστούν την ακριβή μαθηματική περιγραφή, επιτρέποντας στο σύστημα να προσαρμόζεται καλύτερα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Με την χρήση ασαφούς ελέγχου η μαθηματική αβεβαιότητα γίνεται πιο αποτελεσματική, ενώ η εκμετάλλευση της ανθρώπινης λογικής και σκέψης επιτρέπει μια πιο ευέλικτη προσέγγιση στην επίλυση προβλημάτων ελέγχου.

Ορίζοντας τις συνθήκες λειτουργίας μέσω της ανθρώπινης σκέψης, βασιζόμαστε σε λογικά δεδομένα και απαιτούμε την απόκτηση των απαραίτητων γνώσεων που θα μας οδηγήσουν σε συνετά συμπεράσματα και στη δημιουργία επεξεργάσιμων δεδομένων. Επισημαίνεται, συνεπώς, ο κρίσιμος ρόλος που διαδραματίζουν οι ασαφείς ελεγκτές ως ακριβείς και ασφαλείς μέθοδοι ρύθμισης και διαχείρισης εντολών στο σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι

εντολές προέρχονται από έναν έμπειρο χρήστη, ο οποίος βασίζεται στην προσωπική του εμπειρία για να αξιολογήσει το σύστημα. Συνεπώς, οι ασαφείς ελεγκτές διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην επίτευξη ακριβών και ασφαλών ρυθμίσεων, επιτρέποντας την προσαρμογή του συστήματος σε ποικίλες συνθήκες λειτουργίας. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη συνεργασία της τεχνολογίας με την ανθρώπινη εμπειρία, δημιουργώντας ένα ισχυρό συνδυασμό που εξυπηρετεί την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος.

3.4.2. Ασαφή σύνολα

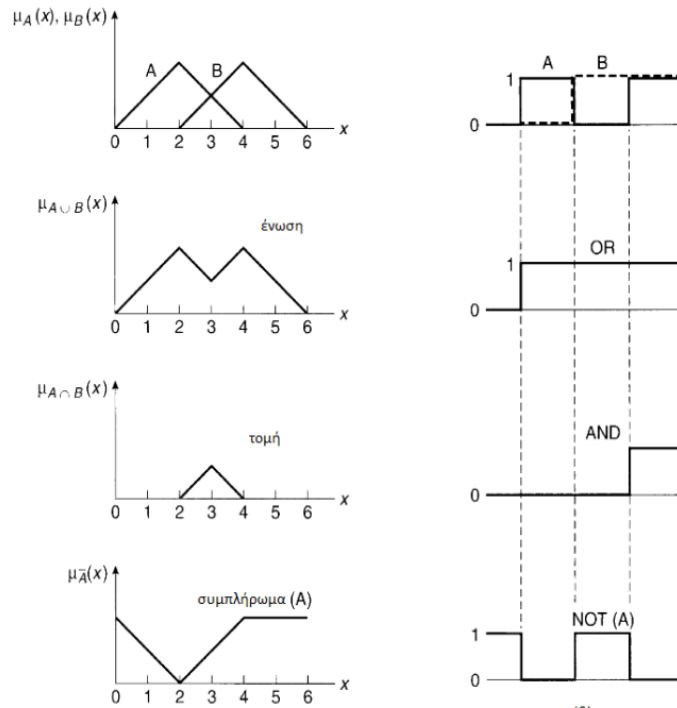
Συνολικά, ο τρόπος λειτουργίας ενός ασαφούς ελεγκτή βασίζεται στη λογική της άλγεβρας Boole, δηλαδή στην αναπαράσταση με λογικά 0 ή 1. Ειδικότερα, ο όρος "ασαφή σύνολα" αναφέρεται στη διαφοροποίηση που εφαρμόζεται στα όρια, καθώς ένα αντικείμενο μπορεί να ανήκει σε δύο σύνολα, λαμβάνοντας τιμές 0 ή 1. Η συνάρτηση συμμετοχής καθορίζει το ποσοστό στο οποίο ένα αντικείμενο ανήκει σε ένα συγκεκριμένο σύνολο. Η χρήση ασαφών συνόλων επιτρέπει την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας και της πολυπλοκότητας στην αναπαράσταση των συνθηκών λειτουργίας. Αντί να περιορίζεται σε ακριβείς τιμές 0 ή 1, η θεώρηση της ασάφειας επιτρέπει μια πιο ευέλικτη προσέγγιση, αντικαθιστώντας τις αυστηρές κατηγοριοποιήσεις με συμμετοχή σε διάφορα σύνολα. Με αυτόν τον τρόπο, οι ασαφείς ελεγκτές αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για τη διαχείριση της αβεβαιότητας και την αντιμετώπιση πολύπλοκων καταστάσεων σε συστήματα ελέγχου.

Επιπλέον, ο καθορισμός της συνάρτησης συμμετοχής βασίζεται στην ακρίβεια και τις απαιτήσεις ελέγχου του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι, ανάλογα με τον τρόπο χειρισμού του χρήστη και τις εντολές ελέγχου που δίνονται στο σύστημα, υπάρχει δυνατότητα διαχωρισμού της περιοχής ελέγχου σε επιμέρους τμήματα. Οι συναρτήσεις συμμετοχής μπορεί να λάβουν διάφορες μορφές, όπως τριγωνική, τραπεζοειδής, Gaussian, σιγμοειδής, ή οποιαδήποτε άλλη μορφή θεωρείται κατάλληλη από τον χρήστη. Συγκεκριμένα, σε συστήματα ελέγχου που αφορούν την ηλεκτρική μετάδοση κίνησης, όπως οι ηλεκτρικές μηχανές, συχνά επιλέγεται η τριγωνική μορφή για τις συναρτήσεις συμμετοχής. Αυτή η επιλογή επιτρέπει τον ευέλικτο και αποτελεσματικό προγραμματισμό του ελεγκτή, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ευκολία προσαρμογής στις απαιτήσεις κάθε συγκεκριμένης εφαρμογής.

3.4.3. Λογικές πράξεις

Οι πράξεις με τη χρήση της ασαφούς λογικής βασίζονται στην άλγεβρα Boole. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι πράξεις OR (Η), AND (ΚΑΙ) και NOT (ΟΧΙ) για τα σύνολα A και B. Με

αυτόν τον τρόπο, οι τιμές που προκύπτουν μπορούν να είναι είτε 0 είτε 1, επιτυγχάνεται έτσι μια απεικόνιση των λογικών πράξεων με τη χρήση ασαφών συνόλων.



Εικόνα 3.6 Πράξεις με την χρήση ασαφούς λογικής

- **Ένωση:** Μέσω της πράξης ένωσης των δύο συνόλων προκύπτει το σύνολο $C=A \cup B$. Έτσι, η συνάρτηση συμμετοχής για το σύνολο C δίνεται από τη μορφή: $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$. Αυτή η πράξη αντιστοιχεί στη λογική πράξη OR της άλγεβρας Boole, χρησιμοποιώντας λογικές πύλες.
- **Τομή:** Με την πράξη της τομής των συνόλων A και B προκύπτει από το σύνολο $C=A \cap B$. Επομένως, η συνάρτηση συμμετοχής για το C είναι της μορφής: $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$. Αυτή η πράξη αντιστοιχεί στη λογική πράξη AND της άλγεβρας Boole, χρησιμοποιώντας λογικές πύλες.
- **Συμπλήρωμα:** Το συμπλήρωμα ενός συνόλου A συμβολίζεται ως A^- . Η συνάρτηση συμμετοχής σε αυτήν την πράξη είναι: $\mu_{A^-}(x) = 1 - \mu_A(x)$. Αυτή η πράξη αντιστοιχεί στη λογική πράξη NOT της άλγεβρας Boole.

Κεφάλαιο 4. Τεχνικές ελέγχου μηχανής μόνιμων μαγνητών

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει το πειραματικό μέρος όπου χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες καμπύλες προσομοίωσης ανάλυσης του κύκλου λειτουργίας του ανελκυστήρα σε διάφορες λειτουργικές καταστάσεις καθώς και τις προσομοιωμένες καμπύλες που σχετίζονται με την συγκριτική ανάλυση διάφορων τεχνικών ελέγχου προκειμένου να εξαχθεί η συμπεριφορά του συστήματος σε κάθε περίπτωση.

4.1. Πειραματικές καμπύλες κύκλου λειτουργίας ανελκυστήρα

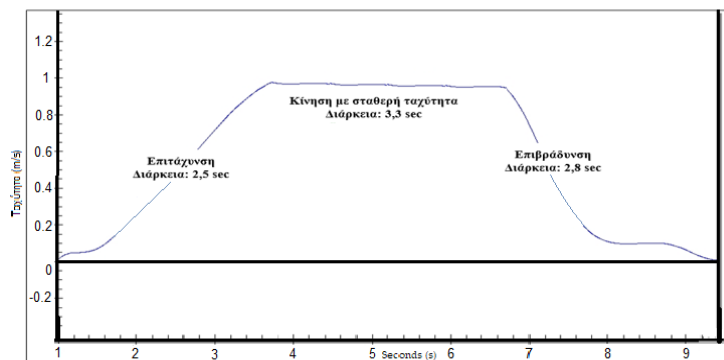
Όπως προαναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο ένα από τα βασικά μέρη μελέτης της λειτουργίας του ανελκυστήρα είναι η ανάλυση του κύκλου λειτουργίας του ανελκυστήρα κατά τα στάδια λειτουργίας του. Στις παρακάτω εικόνες παρατηρούμε τον κύκλο λειτουργίας θαλάμου ανελκυστήρα κατά την ανοδική και κατά την καθοδική κίνηση του. Οι πειραματικές καμπύλες προσομοίωσης προγραμματίστηκαν μέσω του Acceleration sensor QS3 της εταιρείας henning που λειτουργεί ως αισθητήρας κραδασμών και τα δεδομένα εξάγονται μέσω του λογισμικού που δίνεται από την εταιρεία.



Εικόνα 4.1 Αναλυτής κραδασμών QS3 henning

Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά Acceleration sensor QS3 henning

Τύπος	Χαρακτηριστικά
Measuring axes	X,Y,Z axis
Χωρητικότητα Μπαταρίας	4,5 Ah
Εσωτερική μνήμη	8 GByte
Ρυθμός δειγματοληψίας X,Y,Z	1000 Hz
Εύρος Θερμοκρασίας	0-50°C
Χρήσεις	Ανάλυση κραδασμών, ήχου, διάγνωση βλαβών κινητήρα, ρουλεμάν, μετατροπέα συχνότητας, ρύθμιση ταχύτητας, επιτάχυνσης, επιβράδυνσης



Εικόνα 4.2 Ανοδική κίνηση μηχανικού ανεκυστήρα gearless με οδήγηση VVVF

Καταναλισκόμενη ενέργεια (άδειος):

$$E = (2,5\text{sec} \times 2\text{kW} + 3,3\text{sec} \times 0,93\text{kW} + 2,8\text{sec} \times 1,52 \text{ kW}) \times 1000/3600 = 3,42\text{Wh}$$

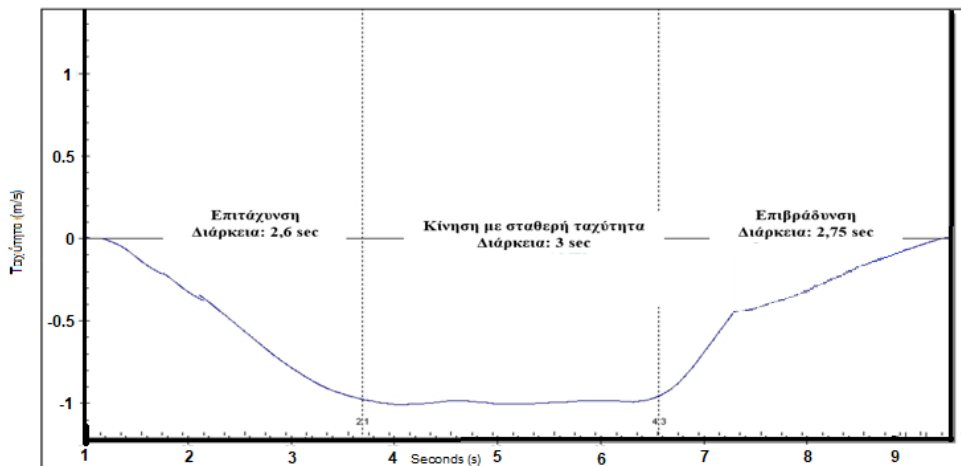
Καταναλισκόμενη ενέργεια (500 Kg):

$$E = (2,5\text{sec} \times 0,92\text{kW} + 3,3\text{sec} \times 1,22\text{kW} + 2,8\text{sec} \times 0,9 \text{ kW}) \times 1000/3600 = 2,45\text{Wh}$$

Καταναλισκόμενη ενέργεια (1000 Kg):

$$E = (2,5\text{sec} \times 1,97\text{kW} + 3,3\text{sec} \times 4,8\text{kW} + 2,8\text{sec} \times 2,43 \text{ kW}) \times 1000/3600 = 7,65\text{Wh}$$

Οι παραπάνω μετρήσεις για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας και των μετρήσεων του ρεύματος και της ισχύος που καταναλώνει ο ηλεκτροκινητήρας για κάθε φορτίο που εξυπηρετεί σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε χρησιμοποιήθηκαν τα όργανα μέτρησης που απεικονίζονται παρακάτω. Στην Εικόνα 4.9 απεικονίζεται η σύνδεση του ενεργειακού αναλυτή (Energy Analyzer) Fluke power logger 1735 ο οποίος συνδέεται με τον πίνακα αυτοματισμού του ανελκυστήρα στις 3 φάσεις. Ενώ στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζεται ο power quality analyzer της εταιρείας Hioki PW 3390 ο οποίος διακρίνεται για την ακρίβεια των μετρήσεων, τον χρόνο δειγματοληψίας καθώς και το πλήθος των δεδομένων που μπορεί να αποθηκεύσει καλύπτοντας μεγάλο πλήθος συχνοτήτων. Για την απόκτηση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το Gennect One προκειμένου να ανακτηθούν τα δεδομένα και οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 4.3 Καθοδική κίνηση μηχανικού ανελκυστήρα gearless με οδήγηση VVVF

Καταναλισκόμενη ενέργεια (άδειος):

$$E = (2,6\text{sec} \times 2,1\text{kW} + 3\text{sec} \times 5,4\text{kW} + 2,75\text{sec} \times 2,3\text{kW}) \times 1000/3600 = 7,77\text{Wh}$$

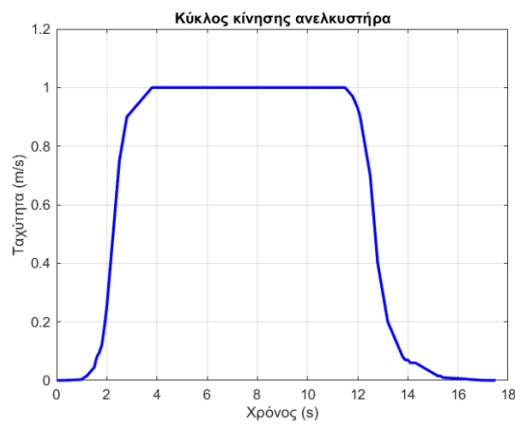
Καταναλισκόμενη ενέργεια (500 Kg):

$$E = (2,6\text{sec} \times 0,92\text{kW} + 3\text{sec} \times 1,5\text{kW} + 2,75\text{sec} \times 0,9\text{kW}) \times 1000/3600 = 2,6\text{Wh}$$

Καταναλισκόμενη ενέργεια (1000 Kg):

$$E = (2,6\text{sec} \times 1,83\text{kW} + 3\text{sec} \times 0,86\text{kW} + 2,75\text{sec} \times 1,47\text{kW}) \times 1000/3600 = 3,16\text{Wh}$$

Στα επόμενα διαγράμματα αποτυπώνονται η γραμμική ταχύτητα του θαλάμου, η ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα, η επιτάχυνση, η κατανάλωση ενέργειας και η ροπή που απαιτείται να εξυπηρετήσει ο κινητήρας σε κάθε μεταβολή του φορτίου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα μας. Αρχικά χρησιμοποιώντας τις καμπύλες κίνησης των εικόνων 64 και 65 αντίστοιχα, απεικονίσαμε στον X και Y άξονα πόσο αντιστοιχεί για κάθε χρόνο η γραμμική ταχύτητα κίνησης του θαλάμου. Όλα αυτά τα δεδομένα προσομοιώθηκαν με κώδικα στο λογισμικό Matlab και εισάγονται ώστε να επεξεργαστούν από το αρχείο Excel χρησιμοποιώντας την εντολή: `xlsread('C:\Users\billv\OneDrive\Desktop\Curves.xlsx')`. Από την καμπύλη της επιτάχυνσης μπορούμε να διακρίνουμε ένα έντονο φαινόμενο κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνση που είναι αποτέλεσμα των κραδασμών του ανελκυστήρα.



(α)



(β)

Εικόνα 4.4 Καμπύλες κίνησης ανελκυστήρα: (α) Γραμμική ταχύτητα θαλάμου, (β) Γραμμική επιτάχυνση θαλάμου

4.1.1. Εξοικονόμηση ενέργειας με την τεχνική VVVF (Variable Voltage Variable Frequency)

Με την τεχνική VVVF δίνεται η δυνατότητα προγραμματισμού της ταχύτητας του ανελκυστήρα ανάλογα με τον ρυθμό και την μορφή που επιθυμεί ο χρήστης κατά την κίνηση του θαλάμου. Ανάλογα, με την συγκεκριμένη διαμόρφωση της μπορεί να επιτευχθούν και ανάλογα ποσά εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς αν η καμπύλη προγραμματιστεί να είναι με απότομο φρενάρισμα κατά το σταμάτημα του ανελκυστήρα υπάρχουν δυνατότητες επιστροφής μέρος της ενέργειας στο δίκτυο και λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής ως γεννήτρια. Ο χρήστης προγραμματίζει και εισάγει στην μνήμη του μετατροπέα την επιθυμητή καμπύλη ης ταχύτητας του ανελκυστήρα, καθώς και την πρώτη παράγωγο (επιτάχυνση) και τη δεύτερη παράγωγο της ταχύτητας (υπέρβαση της επιτάχυνσης). Με την εισαγωγή της καμπύλης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2 και 4.3 στην κατάλληλη μορφή, επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της επιθυμητής ταχύτητας και μέγιστη δυνατή άνεση των επιβατών κατά την διάρκεια της διαδρομής. Η πραγματική ταχύτητα του ανελκυστήρα προσαρμόζεται από τον κεντρικό υπολογιστή με την χρήση του κωδικοποιητή, η οποία έχει προγραμματιστεί στη μνήμη του υπολογιστή. Έτσι επιτυγχάνεται ο έλεγχος της συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα, ώστε να μπορεί να προσαρμόσει την πραγματική ταχύτητα στην επιθυμητή τιμή. Λόγω του γεγονότος ότι η σύγκριση είναι σχεδόν συνεχής, η πραγματική καμπύλη είναι πρακτικά η ίδια με τον στόχο ελέγχου. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται αισθητή βελτίωση της ταχύτητας λειτουργίας, ιδίως κατά την εκκίνηση και την διακοπή. Οι εξισώσεις της τάσης και της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής δίνονται ως εξής:

$$V = Ri + \frac{d}{dt}Li \quad (4.1)$$

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) i^T \frac{\partial L}{\partial \theta} i = J \frac{dW_m}{dt} + bW_m + T_f \quad (4.2)$$

όπου W_m είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (rad/sec), P είναι ο αριθμός των πόλων, J είναι η σταθερά της αδράνειας του δρομέα και του φορτίου (Kgm^2), b είναι η σταθερά τριβής του κινητήρα λόγω απωλειών (Nm / rad/sec) και T_f είναι η συνιστώσα της ροπής του φορτίου που δεν περιλαμβάνεται στις σταθερές J και b .

Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e ενός κινητήρα είναι συνάρτηση των ρευμάτων που απορροφά ο κινητήρας σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή προς τη γωνιακή ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα:

$$T_e = \frac{P_e}{W_m} \quad (4.3)$$

Η ροπή του ηλεκτροκινητήρα εξισορροπεί την απαιτούμενη μηχανική ροπή του φορτίου και των απωλειών και δίνεται ως εξής:

$$T_m = T_{Losses} + T_{Load} \quad (4.4)$$

Η εξίσωση που καθορίζει τη μηχανική ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα είναι:

$$T_e - T_m = J \frac{dW_m}{dt} \quad (4.5)$$

Όπου για $T_e > T_m$ ο ηλεκτροκινητήρας επιταχύνει, όταν $T_e = T_m$ ο κινητήρας κινείται με σταθερή ταχύτητα και όταν $T_e < T_m$ ο ηλεκτροκινητήρας επιβραδύνει.

Η ισχύς εξόδου του κινητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα ανύψωσης του φορτίου και την δρώσα δύναμη, επομένως ισχύει η σχέση:

$$N = \frac{Fu}{102n} \quad (4.6)$$

Όπου F είναι η δρώσα δύναμη (Kg), u είναι η ταχύτητα κίνησης θαλάμου (m/sec) και n είναι η συνολική απόδοση του συστήματος.

Η ταχύτητα κίνησης του θαλάμου προκύπτει από την εξίσωση:

$$u = \frac{\pi D K n}{60} \quad (4.7)$$

Όπου D είναι η διάμετρος της τροχαλίας τριβής (m), K είναι η αναλογία του μειωτήρα αναφοράς και προκύπτει με βάση την σχέση μετάδοσης, n είναι ο αριθμός των στροφών του ηλεκτροκινητήρα (rpm).

Το παραγόμενο έργο σχετίζεται με το φορτίο F που καλείται να εξυπηρετήσει ο κινητήρας κατά την διάρκεια της κίνησης του και την απόσταση S που διανύει.

$$W = FS \quad (4.8)$$

Η μέση ισχύς κατά τη διάρκεια ενός χρόνου d_t ορίζεται ως ο λόγος του έργου d_w και του ισοδύναμου χρόνου d_t , προκύπτει προσεγγιστικά αν θεωρηθεί ότι το σχήμα της καμπύλης ταχύτητας είναι τραπέζιο οπότε ισχύει ότι: $P = dw/dt$

$$S = V_{max} \left[T - \frac{(t_1 + t_3)}{2} \right] \quad (4.9)$$

Όπου $t_1 = V_{max}/C_1$ είναι ο χρόνος επιταχυνόμενης κίνησης, $t_3 = V_{max}/C_2$ είναι ο χρόνος επιβραδυνόμενης κίνησης με V_{max}, C_1, C_2 είναι η μέγιστη ταχύτητα της τροχιάς σταθερής ταχύτητας του ανελκυστήρα, η επιτάχυνση και η επιβράδυνση του ανελκυστήρα αντίστοιχα.

Εισάγοντας στην εξίσωση (4.9) τις μεταβλητές V_{max}, C_1, C_2 προκύπτει ότι:

$$S = V_{max} T - \frac{1}{2} V_{max}^2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \quad (4.10)$$

Η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τον ανελκυστήρα κατά μήκος της απόστασης S μεταξύ δύο στάσεων με σταθερό φορτίο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E = \frac{9,81F}{n} \left[V_{max} T - \frac{1}{2} V_{max}^2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \right] \quad (4.11)$$

Έτσι προκύπτει ότι η εξοικονόμηση ενέργειας εξαρτάται από την ομαλοποίηση της κίνησης του ανελκυστήρα δηλαδή όσο ομαλότερη είναι η επιτάχυνση και η επιβράδυνση του θαλάμου τόσο μεγαλύτερο είναι και το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας. Το βασικό συμπέρασμα έρχεται σε αντίθεση με τον συνολικό χρόνο διαδρομής του ανελκυστήρα και την γρήγορη εξυπηρέτηση των επιβατών.

4.2. Ανάλυση ροής Μετρήσεων κινητήριου συστήματος ανελκυστήρα

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς για διαφορετικό φορτίο διαπιστώνουμε ότι η καταναλισκόμενη ενέργεια για τον άδειο ανελκυστήρα είναι μεγαλύτερη από τον ανελκυστήρα με φορτίο 500 Kg. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη του αντίβαρου μέσω του οποίου πραγματοποιείται η ανάρτηση του θαλάμου δηλαδή από την μία μεριά κρέμεται ο θάλαμος και το φορτίο και από την άλλη κρέμεται το αντίβαρο. Το βάρος του αντίβαρου υπολογίζεται με σκοπό να έχουμε την μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας για το μισό φορτίο περίπου.

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά μηχανικού συστήματος ανελκυστήρα

Ωφέλιμο Φορτίο Θαλάμου	Q=1050Kg
Βάρος Άδειου Θαλάμου	Pθ=990Kg
Βάρος Αντιβάρου	G=1500Kg
Στατικό φορτίο	2500 Kg
Ονομαστική ταχύτητα ανελκυστήρα	U=1m/sec
Ροπή αδράνειας μηχανής και τροχαλίας τριβής	J = 0.5 Kg ^m ²
Ακτίνα τροχαλίας τριβής	R = 0.15 m

Οι δοκιμές για τα πειράματα θα πραγματοποιηθούν με την εναλλαγή τριών διαφορετικών φορτίων δηλαδή **0Kg, 500Kg και 1000Kg**

- Στην περίπτωση **κενού φορτίου** ισχύει ότι: Pθ=990Kg

Η δρώσα δύναμη με **άδειο θάλαμο (0 Kg)** είναι: $F = G - P\theta = 1500\text{Kg} - 990\text{Kg} = 510\text{Kg}$

Στην περίπτωση αυτή διαπιστώνουμε ότι το αντίβαρο είναι πιο βαρύ από το άδειο θάλαμο.

$$F = m \times g = 510\text{Kg} \times 9.81\text{m/sec}^2 = 5003.1\text{N}$$

Η ισχύς φορτίου είναι $P_{\text{φορ.}} = F \times u = 5003.1\text{N} \times 1\text{m/sec} = 5003.1\text{W} = 5\text{kW}$

- Στην περίπτωση με το **μισό ονομαστικό φορτίο (500 Kg)** του θαλάμου η δρώσα δύναμη υπολογίζεται ως εξής:

$$F = P\theta + Q/2 - G = 990\text{Kg} + 500\text{Kg} - 1500\text{Kg} = 1510\text{Kg} - 1500\text{Kg} = 10\text{Kg}$$

Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας δεν σηκώνει καθόλου φορτίο, αλλά καλύπτει μόνο τις απώλειες και τις τριβές του επομένως έτσι και έχει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

$$F = m \times g = 10\text{Kg} \times 9.81\text{m/sec}^2 = 98.1\text{N}$$

$$P_{\text{φορ.}} = F \times u = 98.1\text{N} \times 1\text{m/sec} = 98.1\text{W}$$

- Στην περίπτωση με το **πλήρες φορτίου (1000 Kg)** του θαλάμου η δρώσα δύναμη υπολογίζεται ως εξής:

$$P\theta + Q = 990\text{Kg} + 1000\text{Kg} = 1990\text{Kg}$$

$$F = P\theta + Q - G = 1990\text{Kg} - 1500\text{Kg} = 490\text{Kg}$$

$$F = m \times g = 490\text{Kg} \times 9.81 \text{ m/sec}^2 = 4806.9\text{N}$$

$$\text{Η ισχύς φορτίου είναι } P_{\text{φορ.}} = F \times u = 4806.9\text{N} \times 1\text{m/sec} = 4806.9\text{W} = 4.8069\text{W}$$

Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 5 όπου απεικονίζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του συστήματος κίνησης μπορούμε να υπολογίσουμε την ροπή του κινητήρα με βάση την εξίσωση:

$$T_m = (P + Q) \times (g + a) \times R - G \times (g - a) \times R + J \frac{a}{R} \quad (4.12)$$

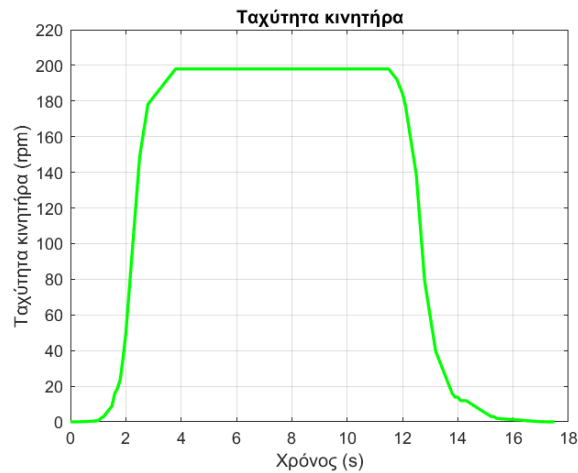
Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς από την ανάλυση του θαλάμου το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει αφορά την δρώσα δύναμη F η οποία εφαρμόζεται κάθε φορά στον κινητήρα και καλείται να τον κινήσει είναι υπεύθυνη για το μέγεθος της κατανάλωσης. Για την άνοδο επομένως ισχύει ότι όσο το αντίβαρο είναι μικρό θα υπάρχει μεγάλη κατανάλωση στο πλήρες φορτίο ενώ αντίστοιχα αν ο υπολογισμός του αντιβάρου είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που πρέπει τότε σε αυτήν την περίπτωση θα υπάρχει μεγάλη κατανάλωση με άδειο φορτίο. Αντίστοιχα, όσον αφορά την καθοδική κίνηση ισχύουν όλοι οι υπολογισμοί που προαναφέρθηκαν. Τα συμπεράσματα που βγήκαν και αφορούν την κάθοδο του ανελκυστήρα είναι ότι όσο το αντίβαρο είναι μικρό θα υπάρχει μεγάλη κατανάλωση στο άδειο φορτίο, ενώ αντίστοιχα εάν το αντίβαρο έχει υπολογιστεί αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που πρέπει τότε θα υπάρχει μεγάλη κατανάλωση με πλήρες φορτίο.

Με βάση τον παρακάτω πίνακα διαπιστώνουμε ότι πρόκειται για έναν κινητήρα υψηλής απόδοσης και χαμηλών απωλειών. Η διαμόρφωση του ηλεκτρικού κινητήρα αποτελεί και βασικό στοιχείο γενικότερης λειτουργίας του συστήματος καθώς όσο μεγαλύτερη απόδοση έχει ο κινητήρας τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση του συστήματος κίνησης του ανελκυστήρα άρα και περισσότερες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας του. Επομένως προκύπτει ότι:

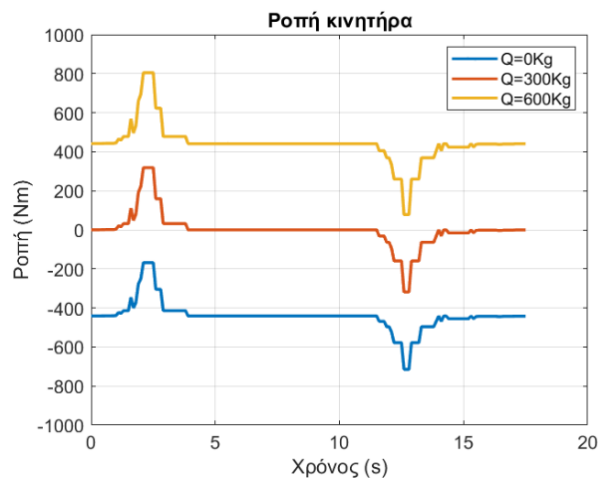
$$n (\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \Rightarrow P_{in} = \frac{P_{out}}{n(\%)} = \frac{8200}{0.9} \Rightarrow P_{in} = 9111.11\text{W}$$

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 33}{20} = \frac{3960}{20} = 198 \text{rpm}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 198}{60} = 20.72 \text{rad/sec}$$



(α)



(β)

Εικόνα 4.5 Καμπύλες μηχανικών χαρακτηριστικών κινητήρα: (α) Ταχύτητα κινητήρα, (β) Ηλεκτρομαγνητική ροπή κινητήρα

$T_{rated} = 395 \text{Nm}$

$P_{cu} = 3 \times R_s \times I^2 = 3 \times 0.53 \times (20.7)^2 = 681.29 \text{W}$ (Απώλειες Χαλκού)

Επιπλέον γνωρίζουμε από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που είχαμε στη διάθεσή μας από την εταιρεία ότι ο κινητήρας έχει απώλειες 192W όταν είναι σταματημένος. Πειραματικά για να υπολογίσουμε τις μηχανικές απώλειες του κινητήρα στο σύστημα

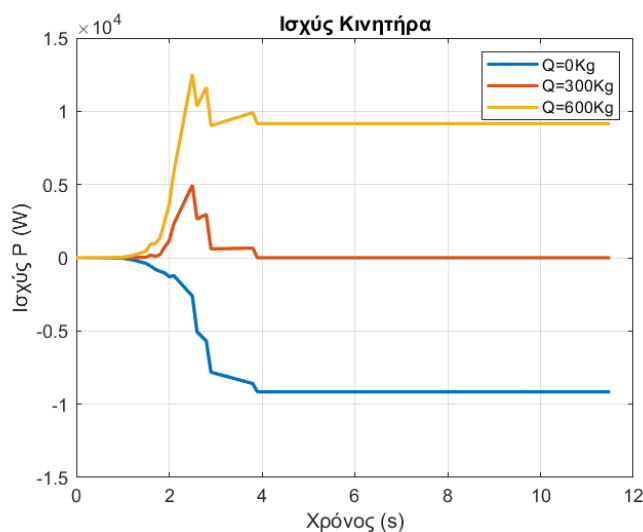
ανελκυστήρα ο κινητήρας θα πρέπει να ήταν ανεξάρτητος του φορτίου και να λειτουργούσε σε λειτουργία κενού φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο η ισχύς που θα εμφανιστεί στην συγκεκριμένη κατάσταση θα αντιστοιχεί μόνο στις μηχανικές απώλειες λειτουργίας.

Με την χρήση του power analyzer έχουμε την δυνατότητα να μετρήσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα δηλαδή το ρεύμα και την τάση και με αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ εισόδου του κινητήρα αλλά και τις απώλειες χαλκού του κινητήρα κατά την διάρκεια των διαδρομών που εκτελεί με τον θάλαμο. Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την ισχύ εξόδου του κινητήρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ροτόμετρο ώστε ο αναλυτής να υπολογίζει την $P_{out} = T \times \omega$ όπου η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα είναι σταθερή επειδή οι πόλοι του κινητήρα είναι συγκεκριμένοι και η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας σταθερή. Όμως επειδή δεν διαθέτουμε ροτόμετρο μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ εξόδου του κινητήρα υπολογίζοντας την $P_{φορτίου} + P_{μηχ, απωλ, συστήματος} = 4806.9W + 902W = 5606.9W$. Οι μηχανικές απώλειες 902W προκύπτουν γνωρίζοντας ότι η απόδοση του φρεατίου από την εταιρεία είναι 79% άρα έχουμε μία διαφορά περίπου 11% σε σχέση με την απόδοση του κινητήρα. Επιπλέον γνωρίζουμε ότι $P_{in} = P_{rot} + P_{cu}$, στις απώλειες περιστροφής που θα υπολογίζουμε συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες πυρήνα σιδήρου και έχουμε τις κατανεμημένες απώλειες (0.1% P_{out} κινητήρα) που θεωρείται ένας αμελητέος αριθμός, μηχανικές απώλειες συστήματος φρεατίου. Επιπλέον, αν χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερο αριθμό κλήσεων από το ισόγειο στον 7^ο όροφο χρησιμοποιώντας τον συγκεκριμένο τύπο θαλάμου θα παρατηρήσουμε μεγαλύτερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με την περίπτωση όπου ο ανελκυστήρας δεχτεί μικρότερο αριθμό κλήσεων σε καθημερινή βάση.

Σε ένα κύκλο λειτουργίας του ανελκυστήρα όπου ο θάλαμος κινείται από το ισόγειο στον 7^ο όροφο με βάση την Εικόνα 4.5 (α) και (β) γίνεται εμφανές ότι ο κινητήρας λειτουργεί σε σταθερή τιμή ροπής για περίπου στο 70% του χρόνου κίνησης του καθώς μετά τα 3.9 sec ο κινητήρας λειτουργεί στην μόνιμη του κατάσταση στα 400 Nm με ταχύτητα 198 rpm. Επιπλέον, στην περίπτωση κενού φορτίου παρατηρούμε αρνητική ροπή σημείο που καταδεικνύει ότι για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια δίνοντας επιπλέον δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Όσον αφορά την ισχύ που καταναλώνει ο ηλεκτροκινητήρας εξαρτάται από το φορτίο που καλείται να εξυπηρετήσει σε κάθε λειτουργική του κατάσταση. Η ανάλυση στηρίζεται στα δύο

ακραία σενάρια λειτουργίας με το κενό και πλήρες ονομαστικό φορτίο του θαλάμου, ενώ για το μισό φορτίο η ισχύς είναι η ελάχιστη.



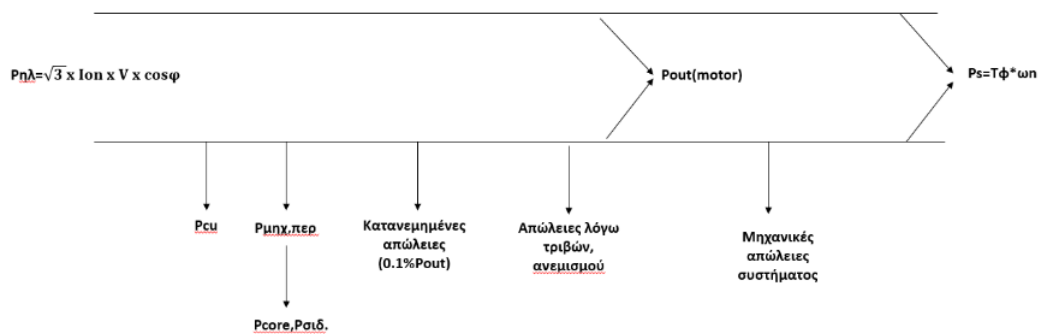
Εικόνα 4.6 Ισχύς κινητήρα για τις 3 φορτίσεις θαλάμου

Με βάση το διάγραμμα της Εικόνας 4.6 παρατηρούμε την λειτουργία του κινητήρα χρησιμοποιώντας ένα σενάριο τριών διαφορετικών φορτίσεων του ανελκυστήρα, με το μισό ονομαστικό φορτίο (300Kg) και με το πλήρες φορτίο (600Kg). Στην περίπτωση 0Kg παρατηρούμε αρνητική ισχύ κατά την ανοδική κίνηση του θαλάμου, επειδή το αντίβαρο κινείται καθοδικά και η επίδραση της βαρύτητας δίνει την δυνατότητα επιπλέον εξοικονόμησης ενέργειας του συστήματος. Συνοψίζοντας με βάση τα διαγράμματα που αφορούν την ροπή και την ισχύ του κινητήρα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας για τις ακραίες τιμές:

Πίνακας 8 Προδιαγραφές κινητήρα ανελκυστήρα

	Χαρακτηριστικό	Ποσότητα
Περίπτωση με πλήρες ονομαστικό φορτίο θάλαμο (χειρότερο σενάριο)	Ονομαστική Ισχύς	8000W
	Ονομαστική ροπή	441Nm
	Μέγιστη ροπή	700Nm
Περίπτωση με μισό ονομαστικό φορτίο	Ονομαστική Ισχύς	0W
	Ονομαστική ροπή	0Nm

θαλάμου (ευνοϊκότερο σενάριο)	Μέγιστη ροπή	395Nm
Περίπτωση κενού φορτίου θαλάμου	Ονομαστική Ισχύς	-8000W
	Ονομαστική ροπή	-441Nm
	Μέγιστη ροπή	700Nm

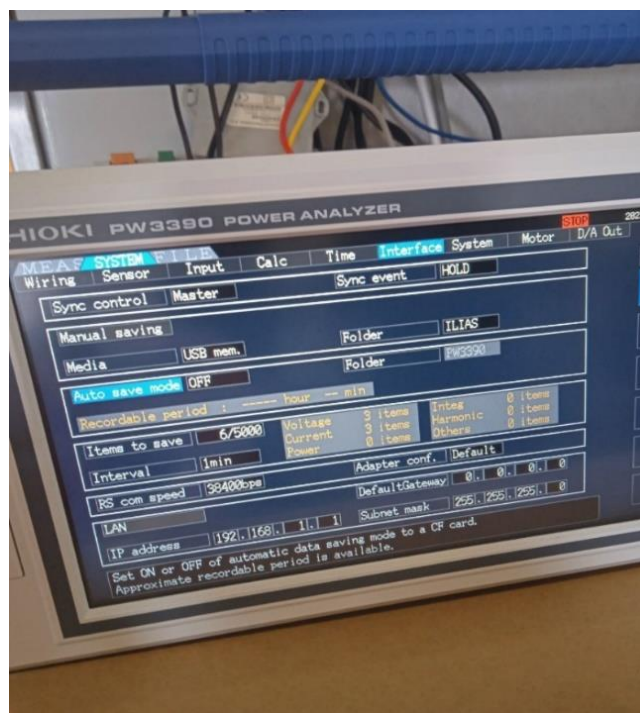


Εικόνα 4.7 Διάγραμμα ροής συνολικού κινητήριου συστήματος ανελκυστήρα.

Πίνακας 9 Ονομαστικά χαρακτηριστικά σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών

Ονομαστική ισχύ εξόδου κινητήρα	8200W = 8.2kW
Απόδοση κινητήρα	a = 90%
Ονομαστικό ρεύμα κινητήρα	I _{rated} = 20.7A
Ρεύμα εκκίνηση (0,7m/sec ²)	I _{start,current} = 29.56A
Ονομαστική τάση κινητήρα	V = 360Volt (πολική)
Ονομαστική ροπή κινητήρα	T _{rated} = 395Nm
Ονομαστικές στροφές κινητήρα	n = 198rpm
Συχνότητα	f = 33Hz

Πόλοι	P=20
Αυτεπαγωγές d-q άξονα	0.0099H
Συνολική αντίσταση τυλιγμάτων (80°C)	$R_{s,total} = 1.59\Omega$, $R_s = 0.53\Omega$
Συνδεσμολογία Αστέρα	Y
Συντελεστής ισχύος	$\cos\phi = 0.85$
Ροπή Αδράνειας κινητήρα	$J = 0.0049 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
Συντελεστής απόσβεσης	$B = 0.000991 \text{ Nm}$
Μαγνητική ροή	$\phi_m = 0.99 \text{ Wb}$
DC Τάση τροφοδοσίας	400 V
Είδος κινητήρα	Permanent magnet motor internal rotor



Εικόνα 4.8 Power Quality Analyzer Hioki PW3390



Εικόνα 4.9 Ενεργειακός αναλυτής Fluke power logger 1735 σε συνδεσμολογία με τις 3 φάσεις

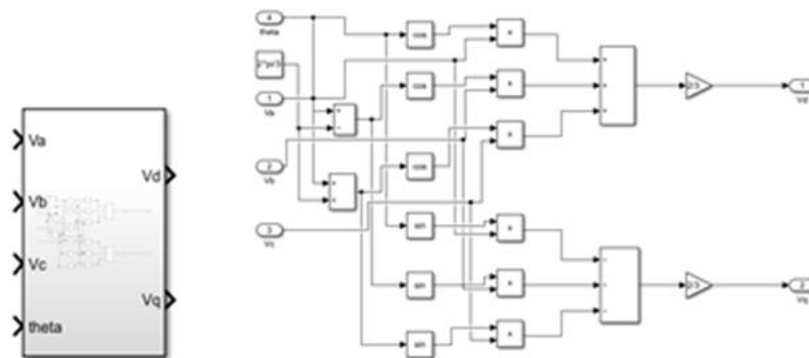


Εικόνα 4.10 Πειραματική διάταξη στο φρεάτιο ανελκυστήρα

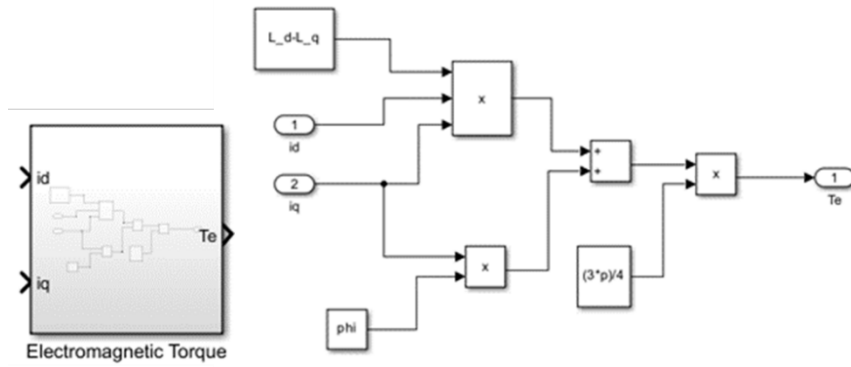
4.3. Προσομοίωση τεχνικών ελέγχου σε σύγχρονους κινητήρες μόνιμωνμαγνητών

4.3.1. Δυναμικό μοντέλο PMSM με τριφασική τροφοδοσία δικτύου

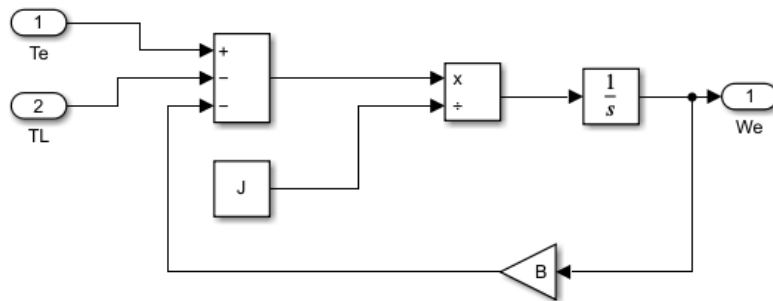
Αρχικά η πρώτη προσομοίωση στηρίζεται στην κατασκευή του δυναμικού μοντέλου της μηχανής PMSM με βάση τις διαφορικές εξισώσεις που προαναφέρθηκαν και αναλύθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο χρησιμοποιώντας στην είσοδο μία ημιτονοειδή τριφασική τροφοδοσία που παρέχεται από το δίκτυο. Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση χρησιμοποιείται σε πραγματικό χρόνο μόνο με λειτουργία του κινητήρα υπό κενό φορτίο επομένως το $T_L = 0$ άρα περιμένουμε ένα πολύ μικρό ρεύμα και σχεδόν μηδενική ροπή κατά την λειτουργία του κινητήρα. Παρακάτω απεικονίζονται τα Block διαγράμματα όπου εισάγονται οι διαφορικές εξισώσεις από το ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής μόνιμωνμαγνητών που περιγράψαμε στο 2^ο Κεφάλαιο και αφορούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά όπως τα ρεύματα κατά d-q άξονα και μηχανικά χαρακτηριστικά όπως η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.



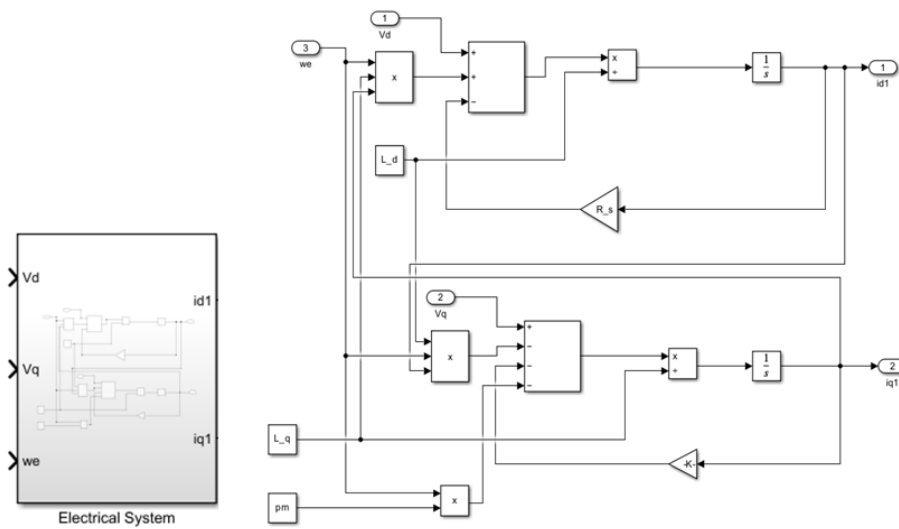
Εικόνα 4.11 Μετασχηματισμός Park-Clark



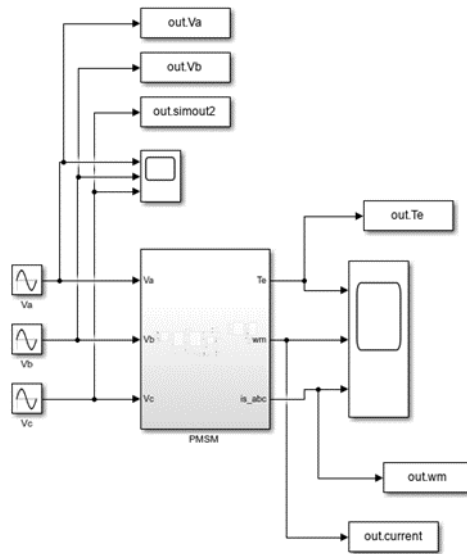
Εικόνα 4.12 Block Ηλεκτρομαγνητικής ροπής



Εικόνα 4.13 Block Ηλεκτρικής ταχύτητας

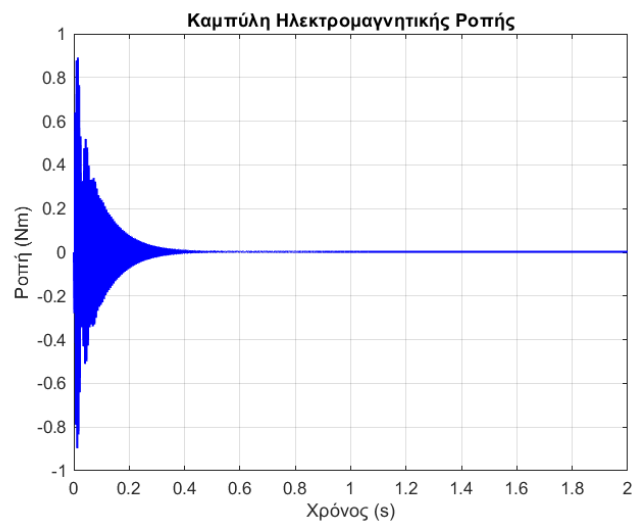


Εικόνα 4.14 Block Ηλεκτρικό μέρος



Εικόνα 4.15 Μαθηματικό μοντέλο PMSM

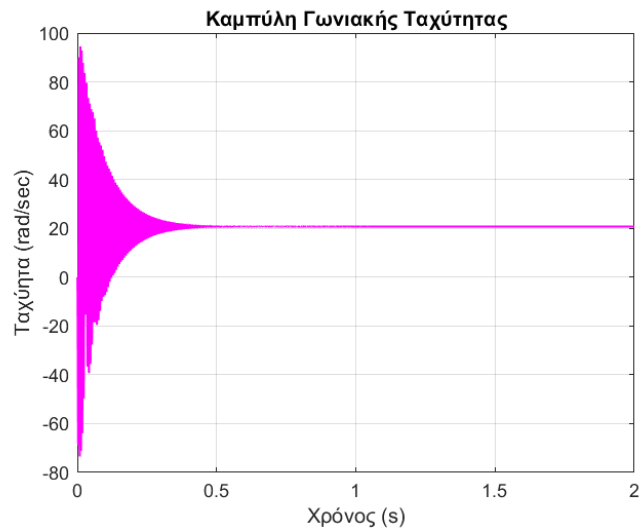
Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν:



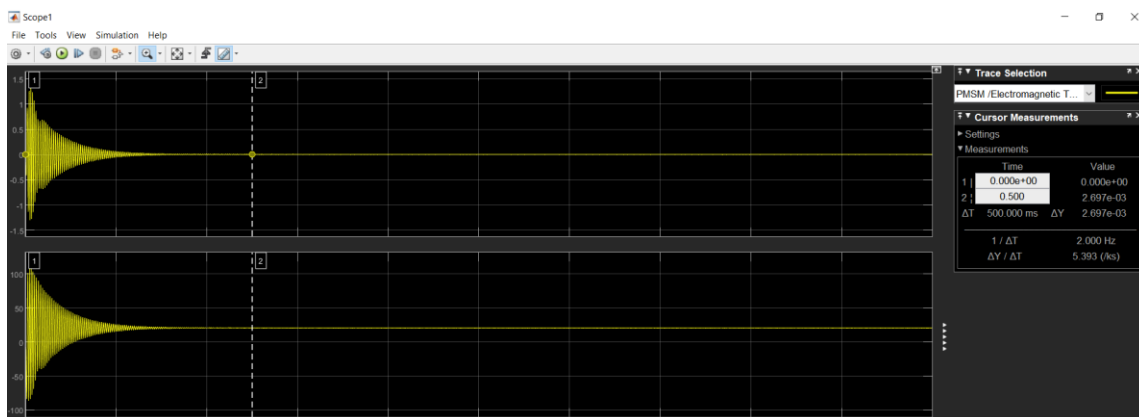
Εικόνα 4.16 Καμπύλη Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής-Χρόνου σε κενό φορτίο

Με βάση τα αποτελέσματα της καμπύλης της ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρούμε μία ροπή με ένα έντονο μεταβατικό κατά την εκκίνηση του κινητήρα και μία σταθεροποίηση στην συνέχεια σε μία μόνιμη κατάσταση στην τιμή 0 μετά από 0.4 sec. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι απολύτως λογικό καθώς ο κινητήρας λειτουργεί υπό κενό φορτίο με απώλειες σχεδόν μηδενικές κατά την εκκίνηση του. Επιπλέον, το έντονο μεταβατικό

φαινόμενο οφείλεται στην απουσία ελεγκτών όπου θα παρατηρήσουμε στις επόμενες προσομοιώσεις μία ομαλοποίηση των καμπυλών λειτουργίας του κινητήρα.



Εικόνα 4.17 Καμπύλη γωνιακής ταχύτητας-χρόνου

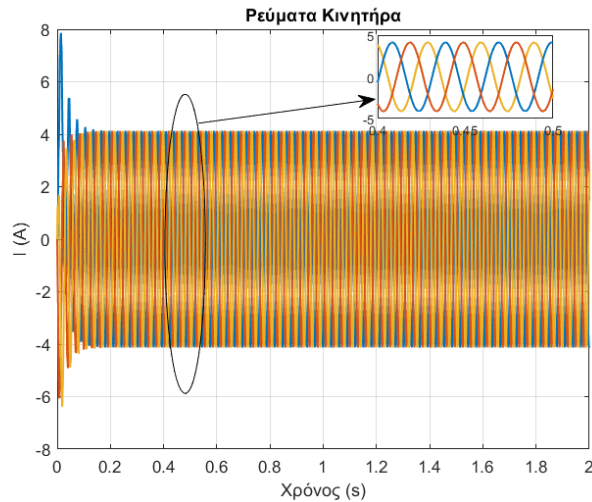


Εικόνα 4.18 Χρονική αποκατάσταση ταλαντωτικής συμπεριφοράς ροπής-ταχύτητας

Χρησιμοποιώντας τις γραφικές δυνατότητες του Simulink αναπαριστώντας τις καμπύλες τόσο της ηλεκτρομαγνητικής ροπής όσο και της ταχύτητας του κινητήρα μπορούμε να διαπιστώσουμε μία αποκατάσταση στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα περίπου στα 0.5sec.

Με βάση την Εικόνα 4.19 όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα αναπαράστασης των ημιτονοειδών ρευμάτων λειτουργίας θα διαπιστώσουμε ένα πολύ χαμηλό ρεύμα περίπου στα 4 A. Το γεγονός αυτό οφείλεται καθώς η προσομοίωση μας πραγματοποιήθηκε υπό κενό φορτίο και στην σχετικά μικρή ημιτονοειδή τάση τροφοδοσίας στην είσοδο του συστήματος η οποία

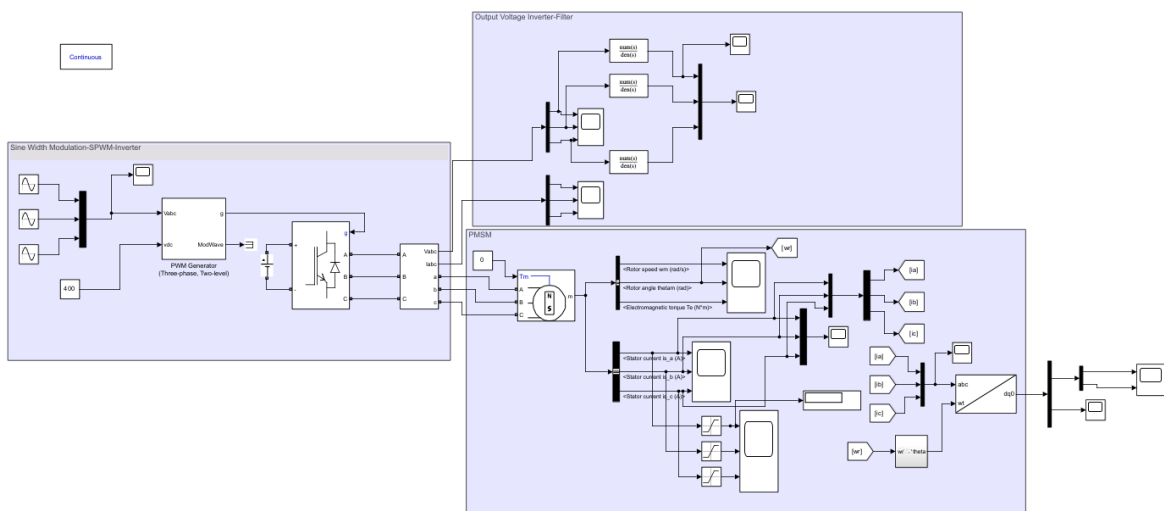
τροφοδοτεί τον κινητήρα, καθώς τάση και ρεύμα είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα με βάση τον νόμο του Ohm.



Εικόνα 4.19 Ρεύματα τριών φάσεων για λειτουργία κενού φορτίου, μεγεθυμένο σε χρονικό πλαίσιο όπου αναδεικνύεται η ημιτονοειδή απόκριση

4.3.2. Τροφοδοσία Inverter στον κινητήρα PMSM-Ανοιχτού βρόγχου (Open Loop)

Η επόμενη προσομοίωση αποτελεί μία επέκταση του μαθηματικού μοντέλου που αναλύσαμε στην ενότητα 4.2.1 καθώς τώρα η τροφοδοσία του κινητήρα θα πραγματοποιείται με την παρέμβαση αντιστροφέα και ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM).

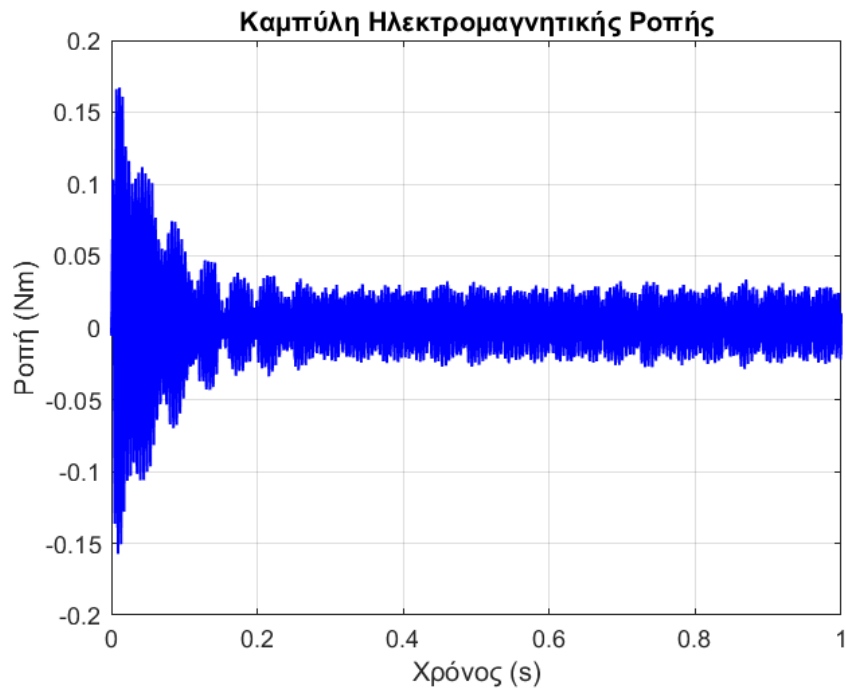


Εικόνα 4.20 Τροφοδοσία κινητήρα PMSM με Inverter και SPWM

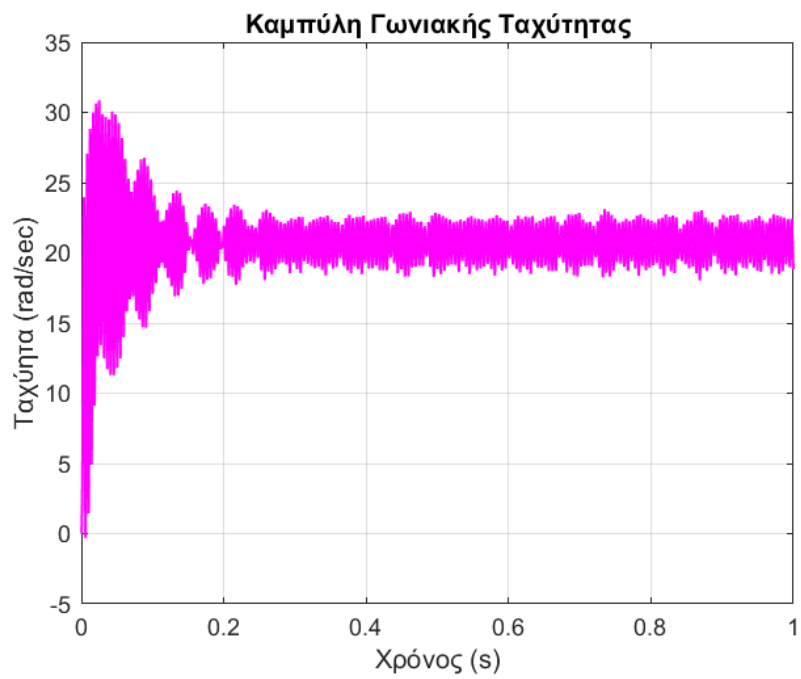
Τα βασικά μέρη κατασκευής του μοντέλου είναι ο κινητήρας ο οποίος εξάγεται από την βιβλιοθήκη του Simulink, το Block PWM generator όπου ορίζουμε την διακοπτική συχνότητα.

Αντίστοιχα είναι απαραίτητη η χρήση του powergui προκειμένου η δειγματοληψία να γίνει πιο πυκνή.

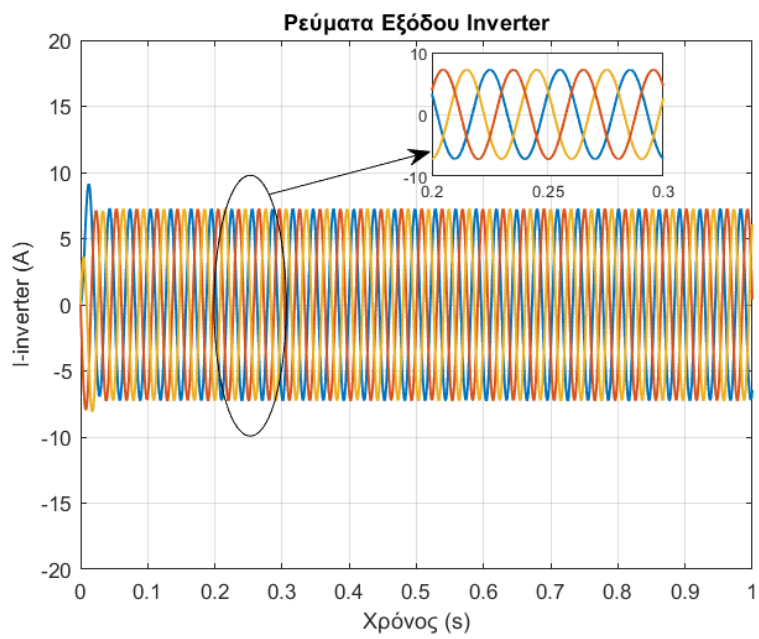
Με την χρήση του μοντέλου που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.21 προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:



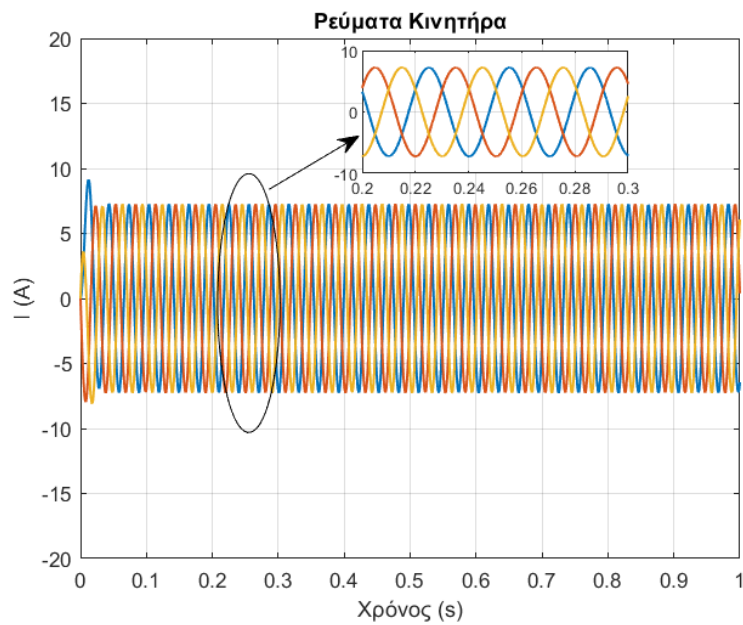
Εικόνα 4.21 Ηλεκτρομαγνητική ροπή υπό κενό φορτίο



Εικόνα 4.22 Γωνιακή ταχύτητα κινητήρα

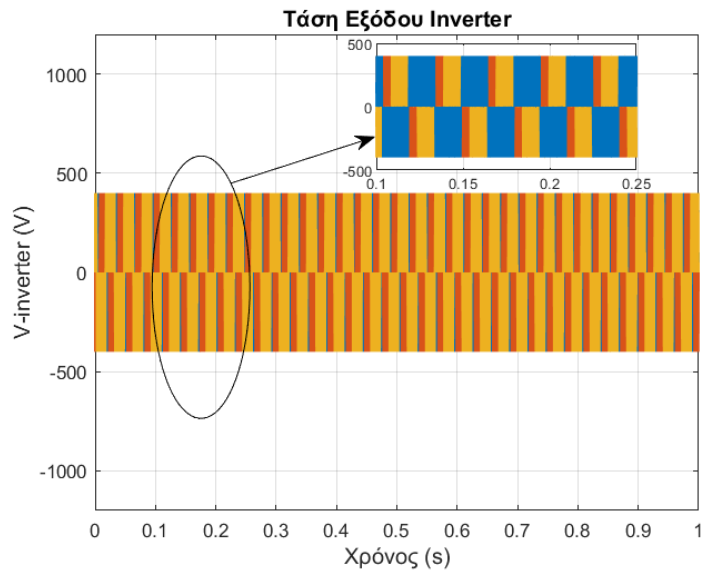


Εικόνα 4.23 Ρεύμα εξόδου αντιστροφέα

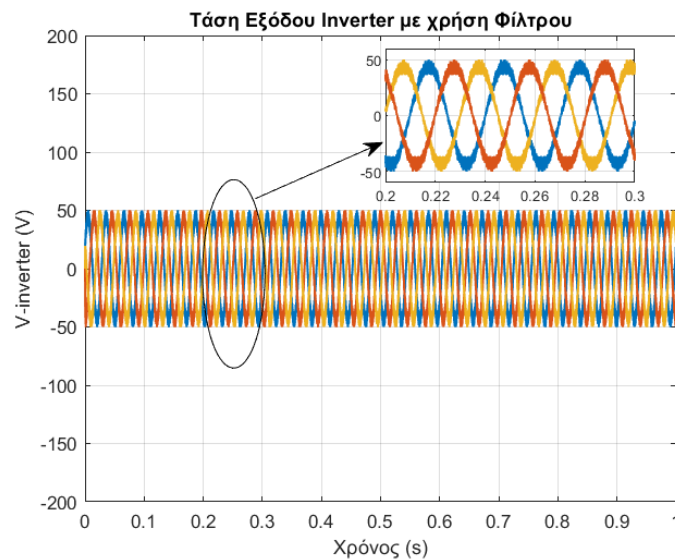


Εικόνα 4.24 Ρεύμα εξόδου κινητήρα

Με βάση τα ρεύματα τόσο στην έξοδο του κινητήρα όσο και του μετατροπέα διαπιστώνουμε ακριβώς το ίδιο ρεύμα και στις δύο γραφικές παραστάσεις. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό διότι παρόλο που όπως φαίνεται το ρεύμα είναι λίγο τροποποιημένο λόγω της ύπαρξης του μετατροπέα για να επαληθεύσουμε την ορθή λειτουργία του δυναμικού μοντέλου τόσο το ρεύμα όσο και η τάση στην έξοδο του inverter πρέπει να είναι ακριβώς ίδια. Επιπλέον, για την μη εμφάνιση επιπλέον αρμονικών φαινομένων στο σύστημα χρησιμοποιούμε μία ιδιαίτερα μεγάλη διακοπτική συχνότητα $f_s = 12\text{kHz}$.



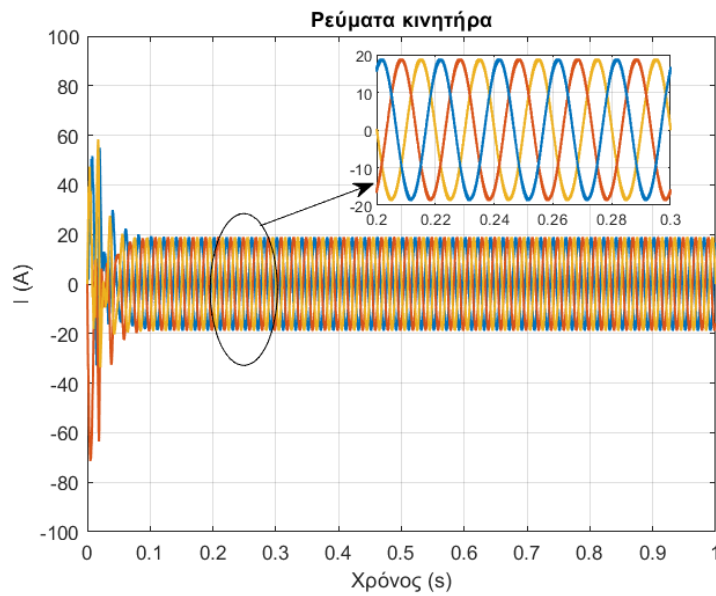
Εικόνα 4.25 Τάση εξόδου αντιστροφέα



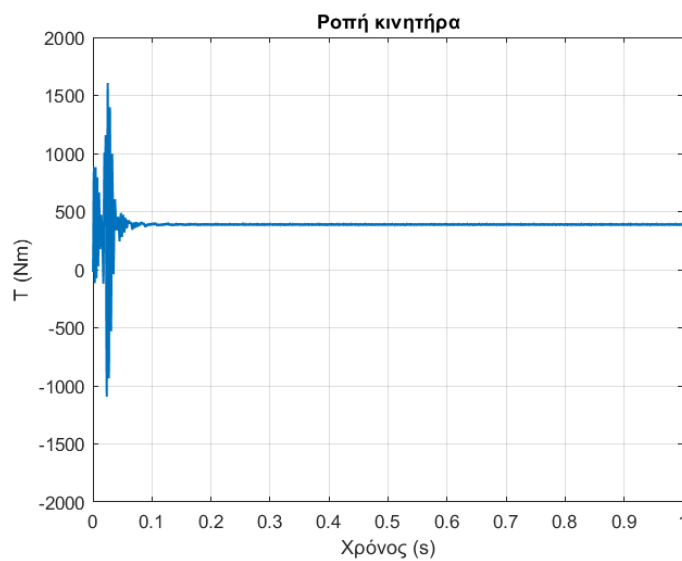
Εικόνα 4.26 Τάση εξόδου αντιστροφέα με φίλτρο

Προκειμένου να μπορέσουμε να μελετήσουμε την τάση που εξάγει ο inverter τοποθετούμε ένα απλό φίλτρο πρώτης τάξης και διαπιστώνουμε ότι το αποτέλεσμα στην Εικόνα 4.26 ότι ταιριάζει με την ημιτονοειδή τάση στην είσοδο του συστήματος.

Για να φτάσουμε στα ονομαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα μεταβάλλουμε το φορτίο τροφοδοσίας του κινητήρα. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι για να φτάσουμε στην ονομαστική ροπή του κινητήρα το φορτίο του κινητήρα είναι πολύ κοντά με την ροπή του κινητήρα και θα πρέπει να συμβαδίζει με την απόδοση του κινητήρα.



Εικόνα 4.27 Ονομαστικό ρεύμα κινητήρα



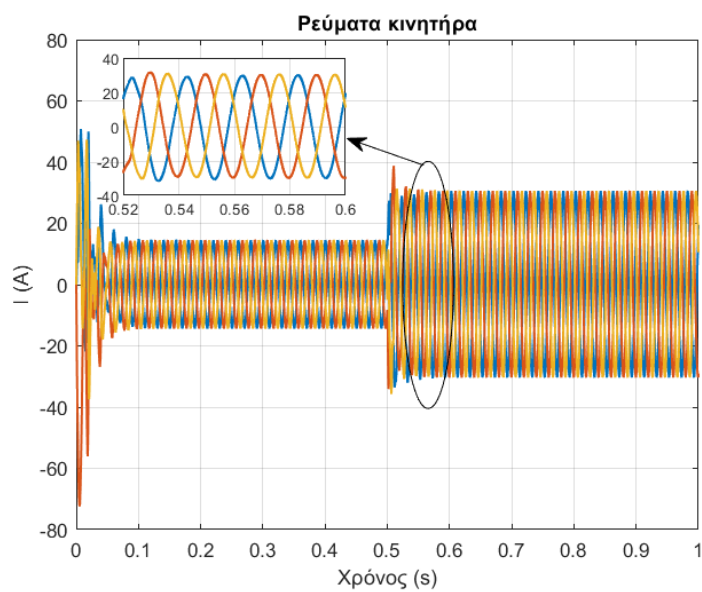
Εικόνα 4.28 Ροπή κινητήρα σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Όπως παρατηρούμε τόσο στο διάγραμμα απεικόνισης των ρευμάτων όσο και της ροπής του κινητήρα υπάρχει ένα έντονο μεταβατικό φαινόμενο το οποίο είναι αποτέλεσμα της απουσίας ελεγκτών. Όπως είναι λογικό με την εφαρμογή PI, PID ελεγκτών ανάλογα φυσικά και με την ρύθμιση τους θα υπήρχε ένας γρηγορότερος χρόνος αποκατάστασης της ταλαντωτικής συμπεριφοράς αλλά και μικρότερο μεταβατικό φαινόμενο κατά την εκκίνηση του κινητήρα. Άλλωστε οι ελεγκτές αποτελούν βασικό στοιχείο ρύθμισης της ταχύτητας του κινητήρα στις

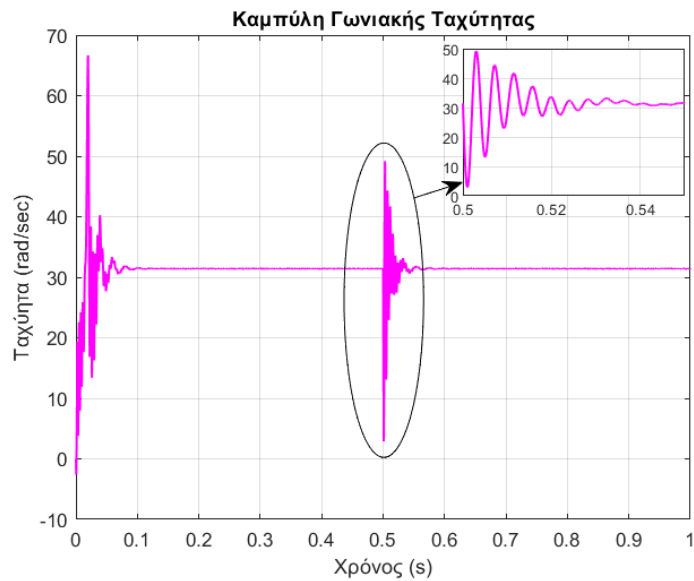
εφαρμογές ανελκυστήρα που εξετάζουμε τόσο για λόγους ασφάλειας των χρηστών όσο και του κινητήρα.

- Δημιουργία χρονικού βήματος $t=0.5\text{sec}$

Η επόμενη προσομοίωση περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός μεταβατικού φαινομένου στο χρονικό διάστημα 0.5 sec όπου επιλέγουμε το μεταβατικό φαινόμενο να αρχίζει από τα 15A και να ολοκληρώνεται στα 25A ώστε να πετύχουμε το μεταβατικό να συμβαδίζει με το μεταβατικό που εμφανίζει ο κινητήρας στα 29 A.

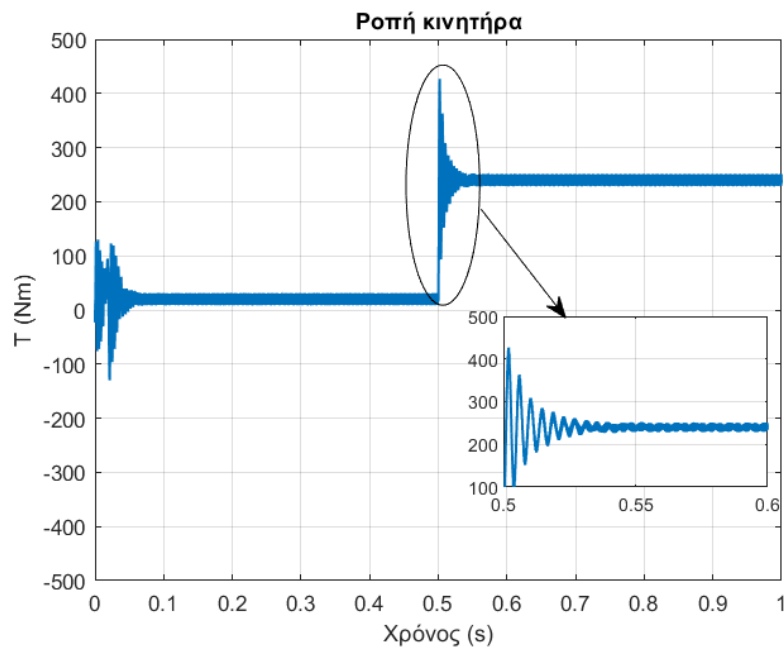


Εικόνα 4.29 Ρεύματα με μεταβατικό φαινόμενο στα 0.5sec



Εικόνα 4.30 Ταχύτητα με μεταβατικό φαινόμενο στα 0.5sec

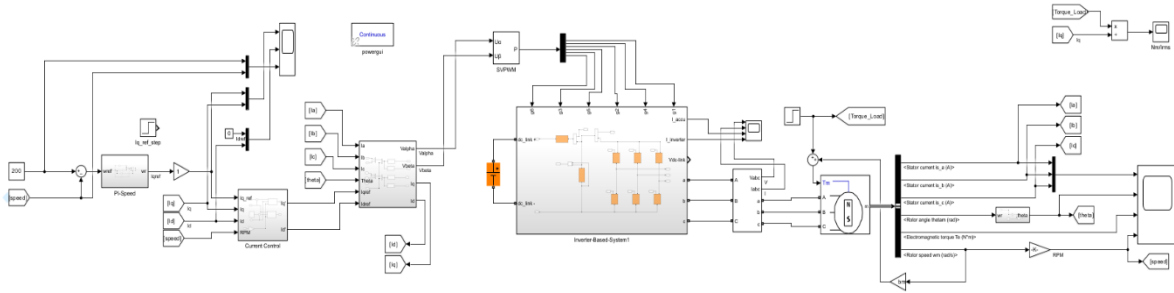
Σύμφωνα με την παραπάνω Εικόνα 4.30 στα 0.5sec παρατηρούμε ένα έντονο μεταβατικό φαινόμενο όπου η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα φτάνει περίπου την διπλάσια γωνιακή ταχύτητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην τεχνολογία VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) που διαθέτει ο inverter δηλαδή την δυνατότητα χειροκίνητης μεταβολής της συχνότητας που συνεπάγεται είτε αύξηση είτε μείωση της γωνιακής ταχύτητας ανάλογα με την κίνηση που εκτελεί ο ανελκυστήρας σε εκείνη την χρονική στιγμή.



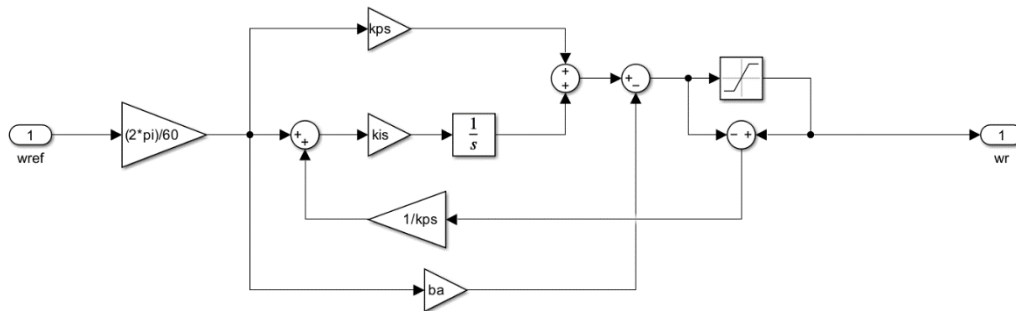
Εικόνα 4.31 Ηλεκτρομαγνητική ροπή με μεταβατικό φαινόμενο στα 0.5sec

4.3.3. Έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (FOC) PMSM με χρήση αντιστροφέα

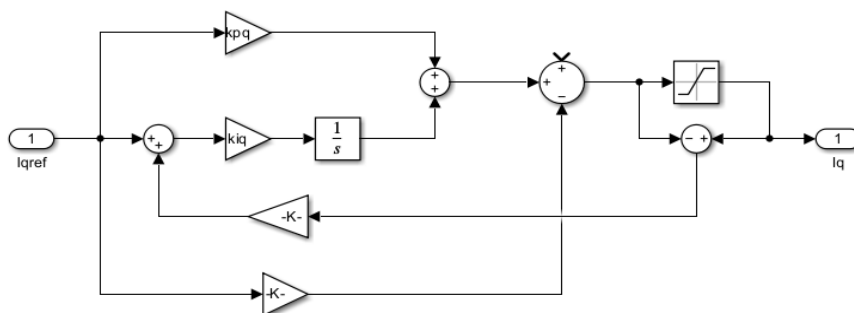
Το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης περιλαμβάνει την μέθοδο προσανατολισμένου πεδίου σε κινητήρα PMSM, την χρήση inverter και τον προσδιορισμό των ελεγκτών τόσο για το ρεύμα όσο και για τη ταχύτητα.



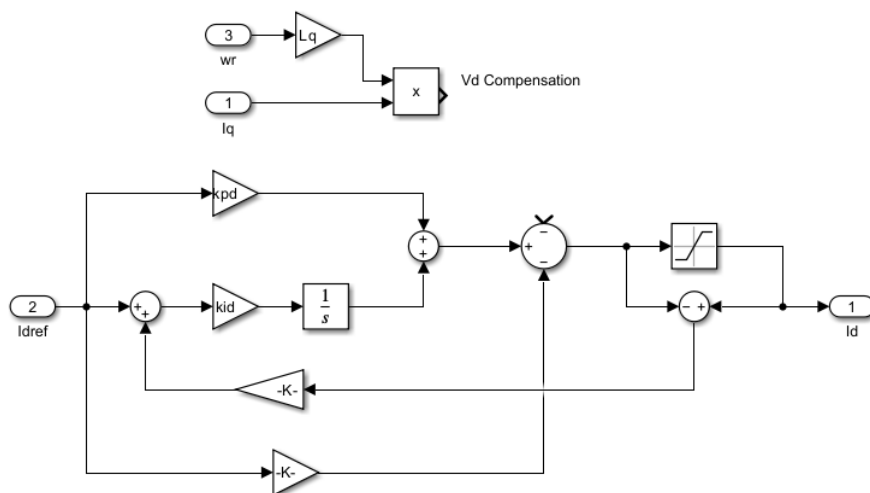
Εικόνα 4.32 Δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης FOC



Εικόνα 4.33 Block PI ελεγκτή ταχύτητας



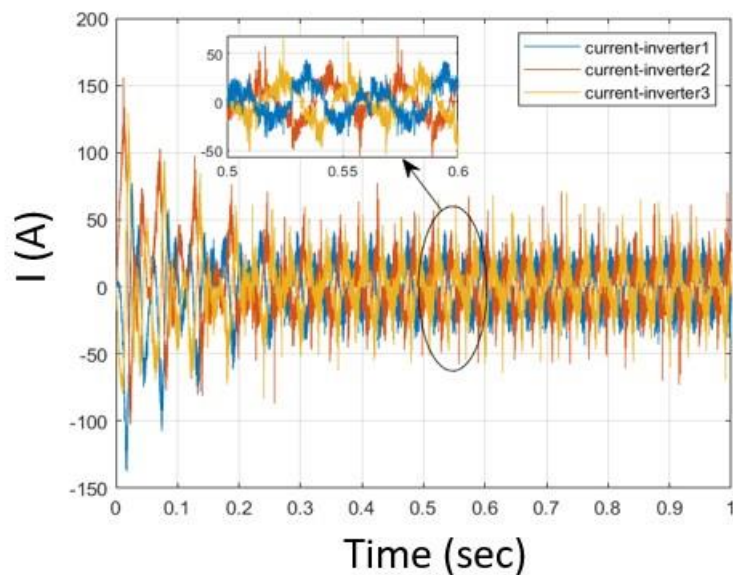
Εικόνα 4.34 Block PI ελεγκτή ρεύματος κατά q-άξονα



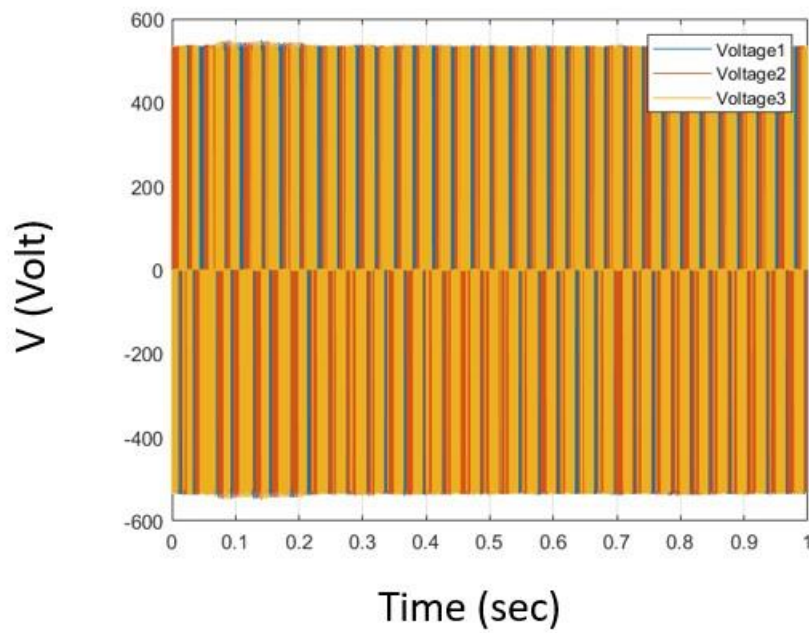
Εικόνα 4.35 Block PI ελεγκτή ρεύματος κατά d-άξονα

Με την ολοκλήρωση του δυναμικού μοντέλου ολοκληρώνουμε την προσομοίωση οπότε προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- Ταχύτητα αναφοράς $W_{ref} = 200$ rpm

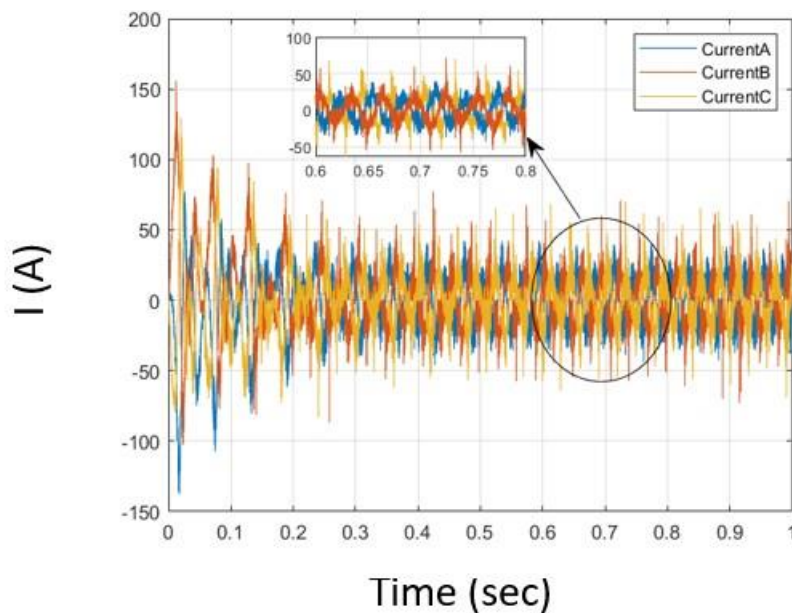


Εικόνα 4.36 Ρεύματα που εξάγονται από τον inverter

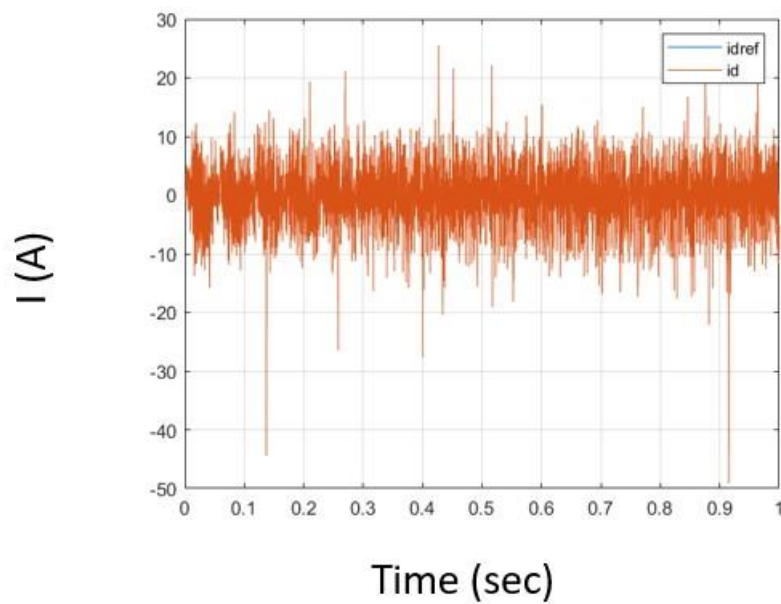


Εικόνα 4.37 Τάση εξόδου αντιστροφεία που τροφοδοτείται ο κινητήρας

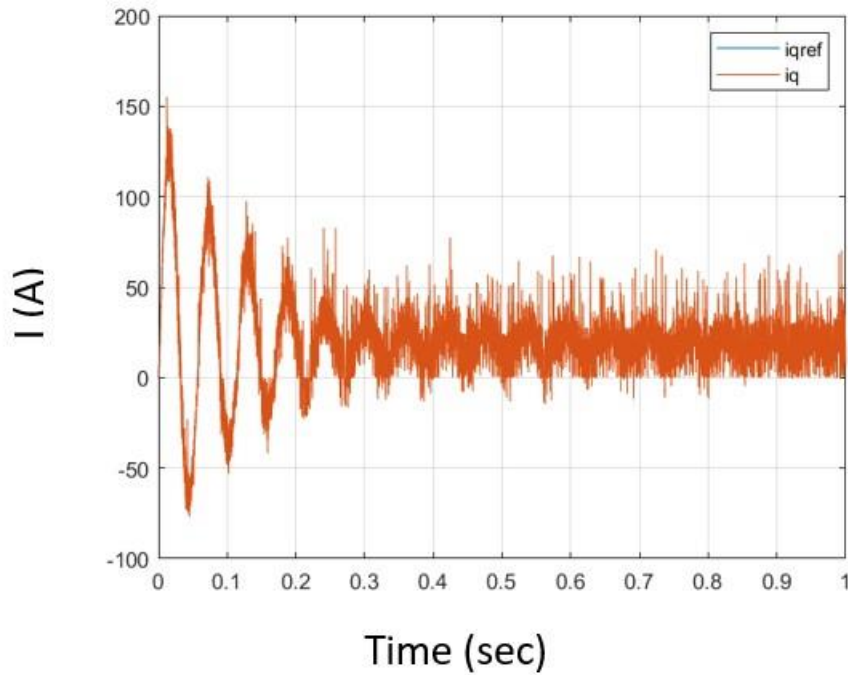
Όπως παρατηρούμε με βάση τα ρεύματα και την τάση που εξάγονται από τον inverter διαπιστώνουμε ότι το ρεύμα που εξάγεται από τον μετατροπέα είναι ακριβώς το ίδιο με το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα. Επιπλέον, διαπιστώνουμε την ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών που είναι η τάση που εξάγεται από τους ελεγκτές.



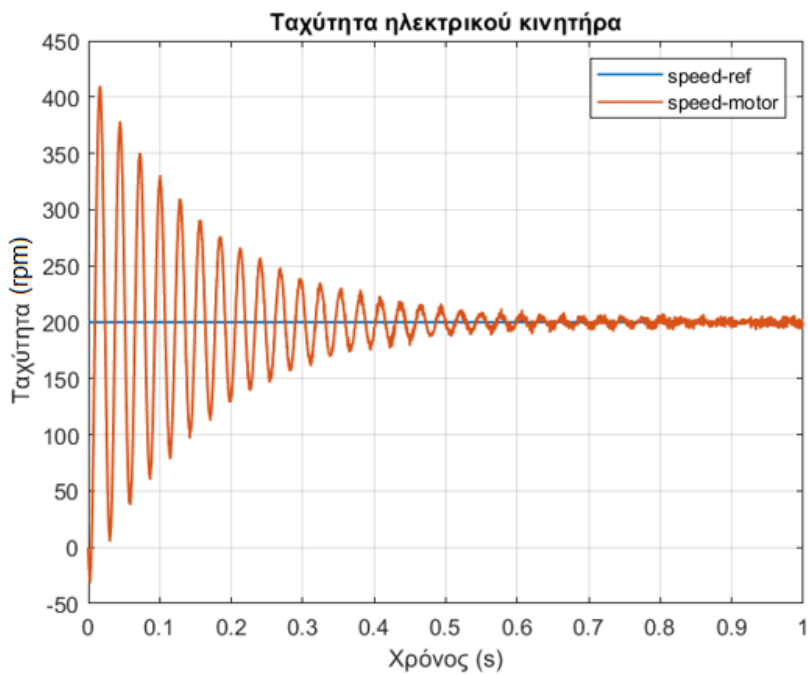
Εικόνα 4.38 Ρεύμα εξόδου κινητήρα PMSM



Εικόνα 4.39 Σφάλμα ρεύματος αναφοράς (id_{ref}) και ρεύματος εξόδου κινητήρα κατά d-άξονα. Από τις Εικόνες 4.38, 4.39 παρατηρούμε το ίδιο ρεύμα του σήματος αναφοράς με το σήμα που εξάγεται από την μηχανή. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι οι ελεγκτές των ρευμάτων προσδιορίστηκαν σωστά. Το έντονο φαινόμενο που αφορά τα ρεύματα εξόδου της μηχανής οφείλεται στην εισαγωγή του αντιστροφέα δημιουργώντας επιπλέον αρμονικές στο σύστημα. Το ίδιο ακριβώς συμπέρασμα προκύπτει και για την καμπύλη της ταχύτητας στην Εικόνα 4.41 όπου παρατηρούμε ότι επιστρέφει στην μόνιμη κατάσταση μετά από 0.8sec.



Εικόνα 4.40 Σφάλμα ρεύματος αναφοράς (i_q _ref) και ρεύματος εξόδου κινητήρα κατά q-άξονα

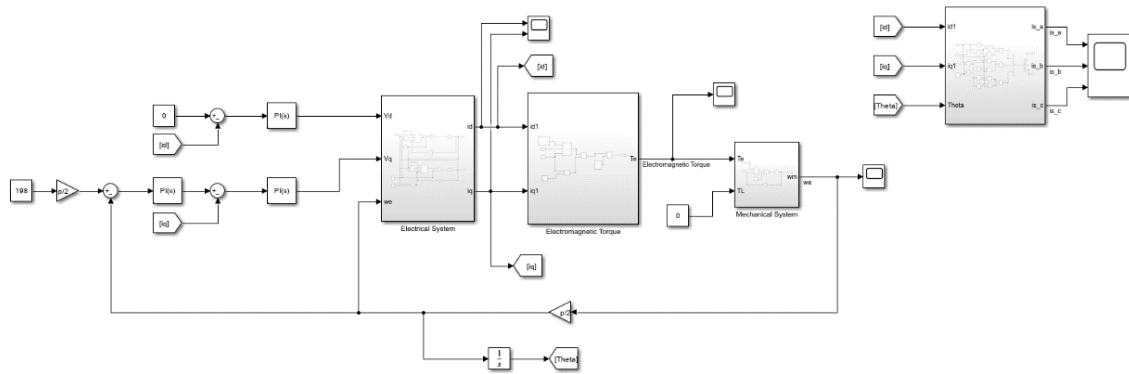


Εικόνα 4.41 Σφάλμα ταχύτητα αναφοράς (ω_m _ref) και ταχύτητας εξόδου ηλεκτρικής μηχανής

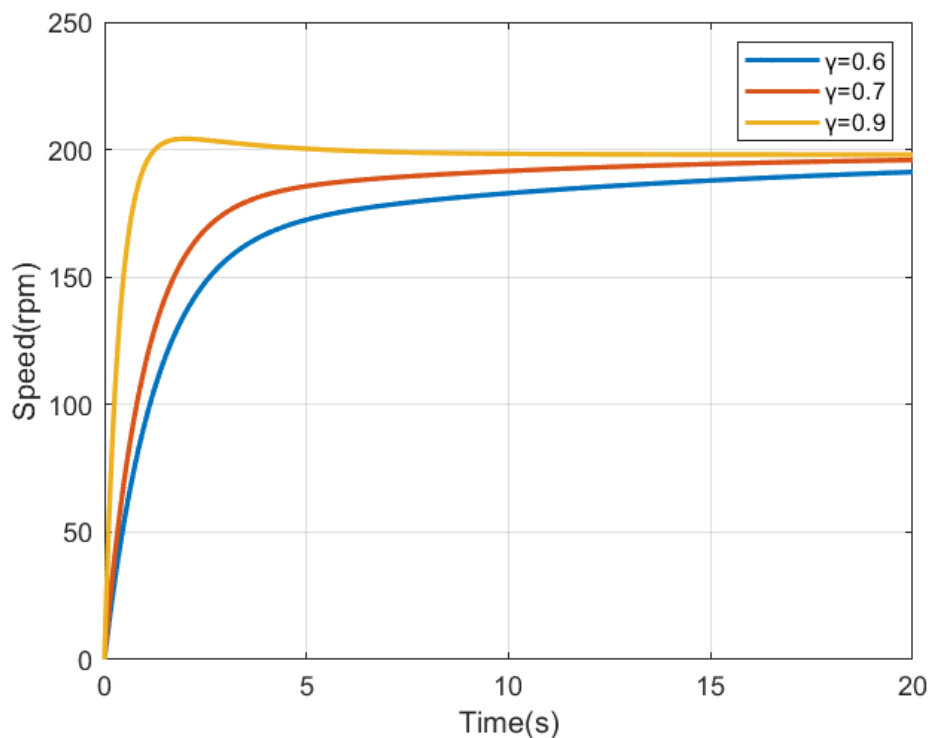
4.2.4 Ελεγκτές ταχύτητας (speed controller) στην PMSM

Η επόμενη προσομοίωση στηρίζεται στον προσδιορισμό της απόκρισης και της συμπεριφοράς της ταχύτητας του κινητήρα με βάση τους PI ελεγκτές ταχύτητας. Για να μπορέσουμε να

φτιάξουμε το δυναμικό μοντέλο θα χρησιμοποιήσουμε τις ηλεκτρικές και μηχανικές εξισώσεις από το ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη που αναπτύχθηκαν παραπάνω καθώς και τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των όρων P,I. Επομένως προκύπτει το εξής δυναμικό μοντέλο:



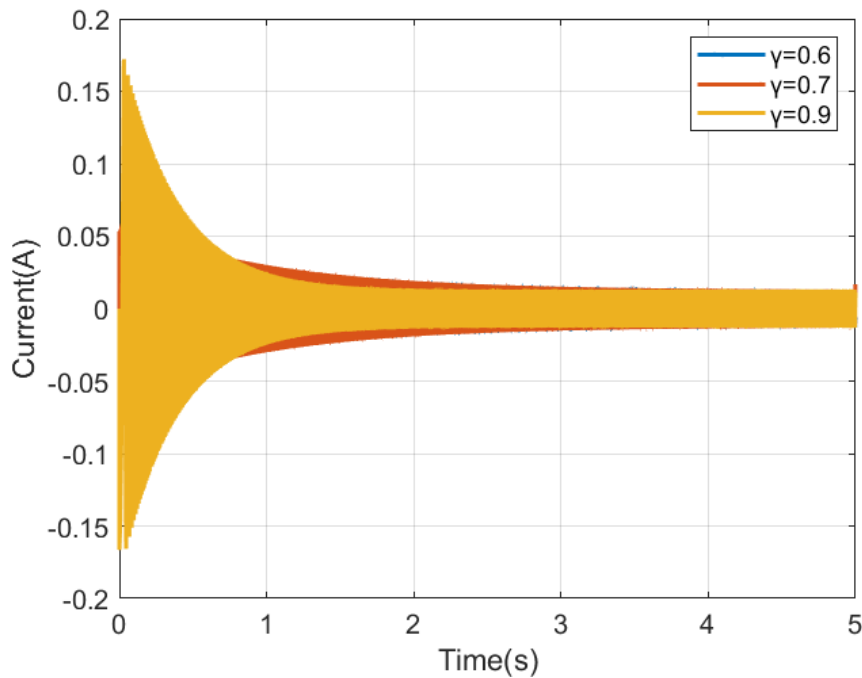
Εικόνα 4.42 Δυναμικό μοντέλο PI ελεγκτές ταχύτητας



Εικόνα 4.43 Έλεγχος ταχύτητας για διαφορετικά γ

Στην παραπάνω Εικόνα 4.43 παρατηρούμε τον έλεγχο της ταχύτητας για τρεις διαφορετικούς συντελεστές υπερύψωσης όπου μπορούμε να εξάγουμε διαφοροποιήσεις για κάθε μία περίπτωση. Η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης είναι $t=20\text{sec}$ και παρατηρήθηκε ότι στις

περιπτώσεις για $\gamma=0.6$ και $\gamma=0.7$ παρόλο το σύστημα λειτουργεί καλύτερα, εμφανίζει μία χρονική καθυστέρηση στην αποκατάσταση μόνιμης κατάστασης στην ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα. Αντίστοιχα, για $\gamma=0.9$ παρατηρούμε μία ταχύτερη χρονική αποκατάσταση της μόνιμης κατάστασης αλλά με εμφάνιση μίας ταλαντωτικής συμπεριφοράς όπου επιφέρει αστάθεια στην λειτουργία του συστήματος γενικότερα.

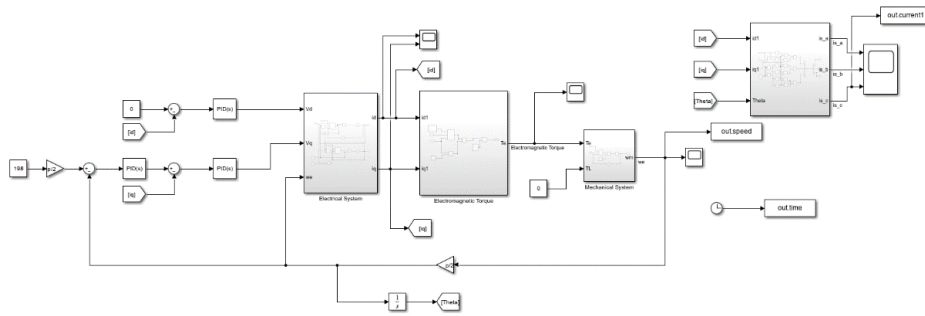


Εικόνα 4.44 Ρεύματα για διαφορετικά γ

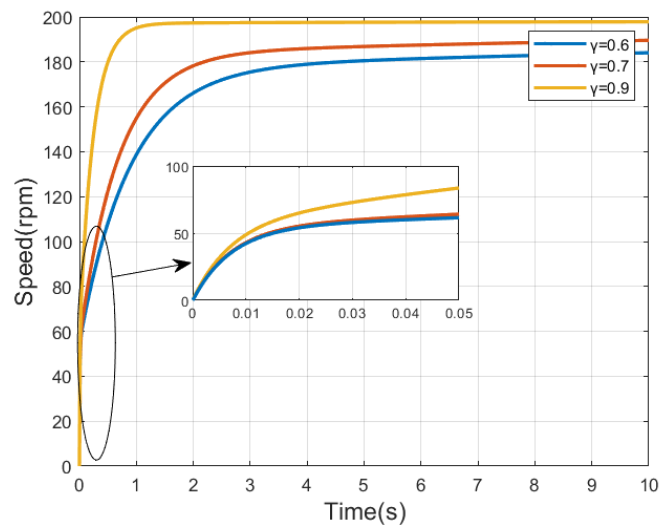
Όσον αναφορά τα ρεύματα παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα τη διαφοροποίησή τους με βάση το γ , καθώς στις περιπτώσεις $\gamma=0.6$ και $\gamma=0.7$ η λειτουργία του ρεύματος είναι σχεδόν ίδια ενώ στην περίπτωση $\gamma=0.9$ παρατηρείται ένα πιο έντονο μεταβατικό φαινόμενο στην εκκίνηση του κινητήρα.

4.3.4. Ελεγκτές ταχύτητας (speed controller) στην PMSM

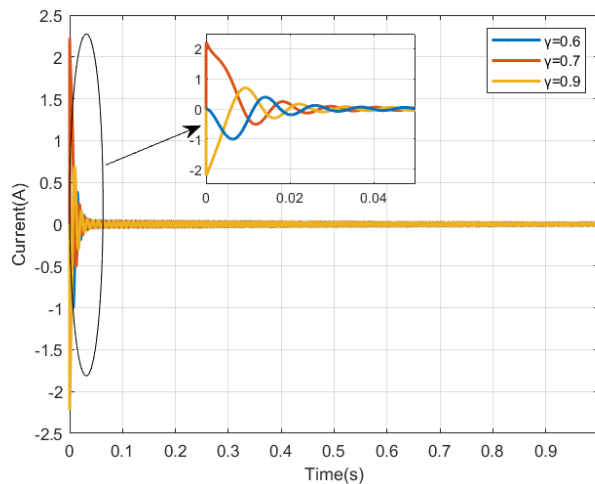
Για την εφαρμογή του PID ελεγκτή θα χρησιμοποιήσουμε την επιλογή του controller από την βιβλιοθήκη που διαθέτει το Matlab/Simulink. Όπως παρατηρήθηκε παραπάνω όσο μικρότερο είναι το ζ τόσο πιο πολύ μεγάλη είναι η εμφάνιση ενός έντονου μεταβατικού φαινομένου, επομένως μεταβάλλουμε το ζ προκειμένου να έχουμε μικρότερη ταλαντωτική συμπεριφορά του συστήματος. Παρακάτω απεικονίζονται η ταχύτητα και τα ρεύματα για τρεις διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις.



Εικόνα 4.45 Δυναμικό μοντέλο PMSM με PID Controller



Εικόνα 4.46 Έλεγχος ταχύτητας για διαφορετικά γ



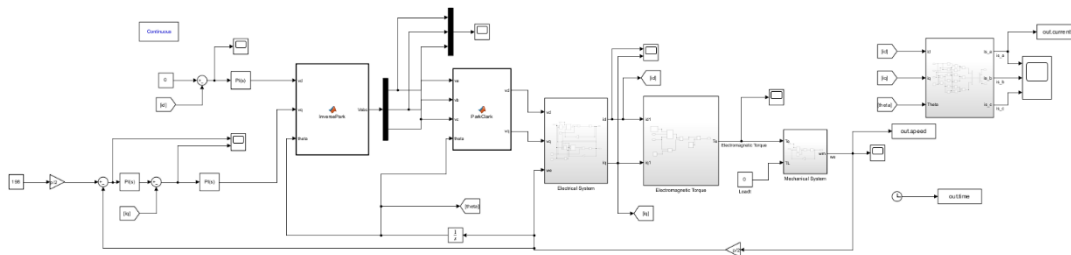
Εικόνα 4.47 Ρεύματα για διαφορετικά γ

Με βάση τις γραφικές παραστάσεις τόσο του ρεύματος όσο και της ταχύτητας παρατηρούμε μία μείωση της απόκρισης του συστήματος κατά την εκκίνηση από την μεταβολή τόσο του ζ

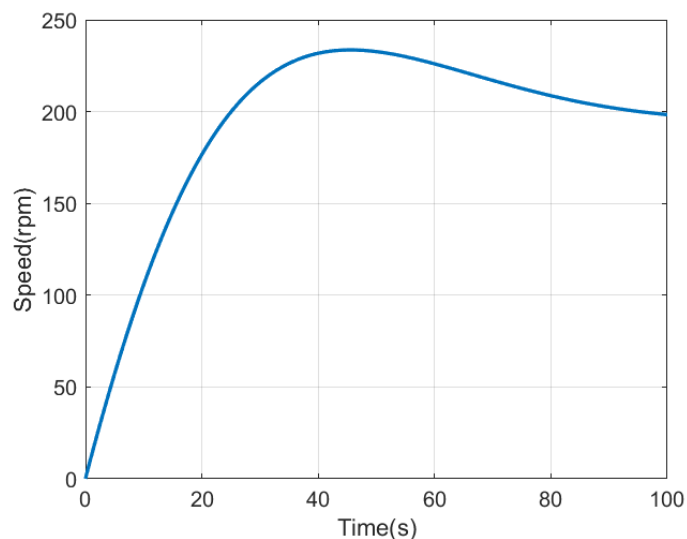
όσο και την εφαρμογή του PID controller. Στο διάγραμμα της ταχύτητας παρατηρούμε μία ομαλοποίηση της με μικρότερο χρόνο αποκατάστασης στην μόνιμη κατάσταση ενώ αντίστοιχα στα ρεύματα αυξάνεται το μεταβατικό εκκίνησης κατά 92% το οποίο οφείλεται στην αύξηση του ζ.

4.3.5. Δυναμικό μοντέλο προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control-FOC)

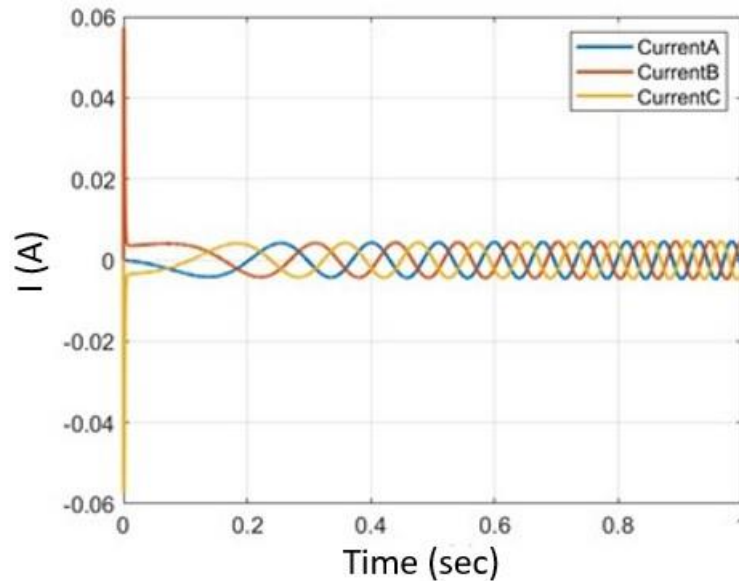
Έχοντας σχεδιάσει τους PI ελεγκτές τόσο για το ρεύμα όσο και για την ταχύτητα στην υποενότητα 4.2.3 το επόμενο βήμα αφορά την ενσωμάτωση των block διαγραμμάτων με τις εξισώσεις Park-Clark προκειμένου να διαπιστώσουμε το ρόλο των ελεγκτών στον προσανατολισμό του πεδίου κατά d-q άξονα. Οι εξισώσεις του μετασχηματισμού προκύπτουν από τη χρήση του Matlab κώδικα που παρουσιάζεται στο παράρτημα (για τη δημιουργία συναρτήσεων όμως θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και Block διαγράμματα).



Εικόνα 4.48 Έλεγχος με την μέθοδο προσανατολισμένου πεδίου (FOC)



Εικόνα 4.49 Έλεγχος ταχύτητας με την μέθοδο προσανατολισμένου πεδίου



Εικόνα 4.50 Τριφασικά ρεύματα εξόδου κινητήρα

Με βάση τις καμπύλες των Εικόνων 4.49,4.50 μπορούμε να διαπιστώσουμε ορισμένες διαφοροποιήσεις με την εφαρμογή ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου. Αρχικά, όσον αφορά το ρεύμα εξόδου του κινητήρα διαπιστώνουμε μία ταχύτερη απόσβεση στην μόνιμη κατάσταση σε σχέση με την τεχνική speed controller. Επιπλέον, όσον αφορά την ταχύτητα παρατηρούμε πιο αργή μετάβαση στην μόνιμη κατάσταση καθώς για να φτάσει τα 198rpm πρέπει να περάσουν 100sec δηλαδή 5 φορές το χρόνο που χρησιμοποιήσαμε στις προηγούμενες προσομοιώσεις.

4.3.6. Δυναμικό μοντέλο με την χρήση ασαφή ελεγκτή (Fuzzy Logic Controller)

Η επόμενη διερεύνηση αφορά την χρήση ασαφή ελεγκτή προκειμένου χρησιμοποιώντας ασαφείς συναρτήσεις να μπορέσουμε να ρυθμίσουμε κατάλληλα την ταχύτητα του κινητήρα. Τα βασικά τμήματα του ασαφούς ελεγκτή είναι:

- 1) Η προσαρμογή των κανόνων οι οποίοι στηρίζονται στις εντολές if-then προκειμένου να αναδείξουν ότι αν συμβεί αυτή η περίπτωση τότε.
- 2) Τις συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών συνόλων, που στηρίζονται σε ασαφείς κανόνες.
- 3) Την ασαφοποίηση που μετατρέπει τις εισόδους σε ασαφείς μεταβλητές.
- 4) Την αποσαφοποίηση που μετατρέπει τις ασαφείς μεταβλητές σε εξόδους συστήματος.

Για να μπορέσουμε να δοκιμάσουμε μία εναλλακτική περίπτωση προκειμένου να δούμε την λειτουργία του συστήματος σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήσαμε fuzzy logic ελεγκτές

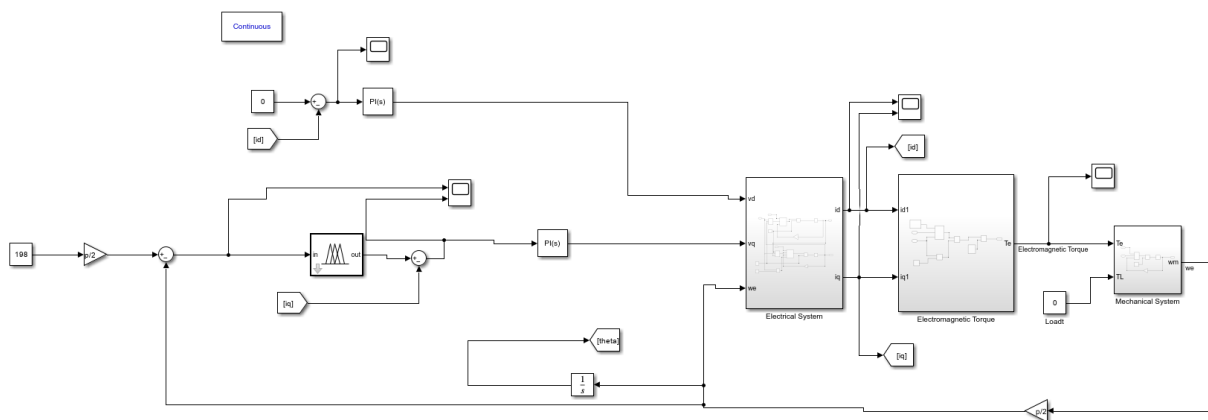
προκειμένου να προσδιορίσουμε την ταχύτητα του κινητήρα με την εφαρμογή της εναλλακτικής μορφής ελεγκτή. Οι κανόνες των συναρτήσεων που ορίσαμε είναι λίγοι προκειμένου να μην κάνουμε το σύστημα μας πολύπλοκο και έτσι να ελαχιστοποιήσουμε τον χρόνο εκτέλεσης του δυναμικού μοντέλου. Ο ελεγκτής αποτελείται από τους συνδυασμούς τριών συναρτήσεων (μεταφορά σφάλματος, της παραγώγου και της εξόδου του συστήματος) όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10 Συνδυασμός συναρτήσεων μεταφοράς

Ταχύτητα/Παράγωγος Σφάλματος ταχύτητας	Positive	Zero	Negative
Positive	Positive	Positive	Zero
Zero	Positive	Zero	Negative
Negative	Zero	Negative	Negative

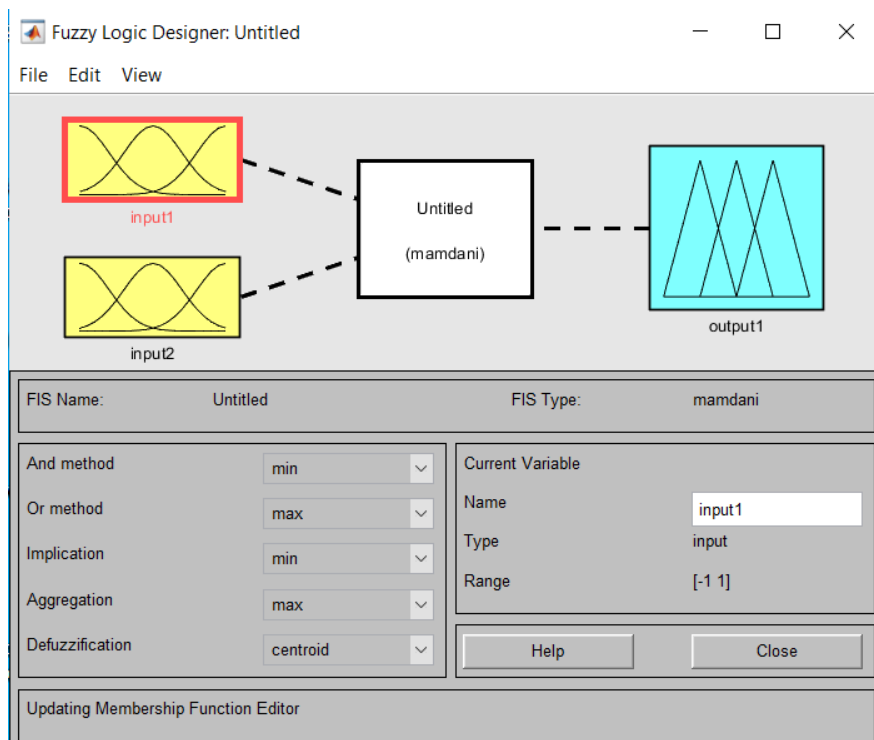
Στον παραπάνω Πίνακα 8 μπορούμε να διαπιστώσουμε τον διαφορετικό συνδυασμό των συναρτήσεων μεταφοράς του συστήματος το οποίο αποτελείται από δύο εισόδους input1 και input2 που αντιπροσωπεύουν το σφάλμα της ταχύτητας και την παράγωγο του σφάλματος οπότε και η έξοδος output1 αντίστοιχα.

Στην παρακάτω Εικόνα 4.51 απεικονίζεται το δυναμικό μοντέλο με χρήση ασαφών ελεγκτών για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του κινητήρα ενώ η χρήση των PI ελεγκτών για τον έλεγχο του ρεύματος παρέμειναν ίδιοι και προσδιορίστηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

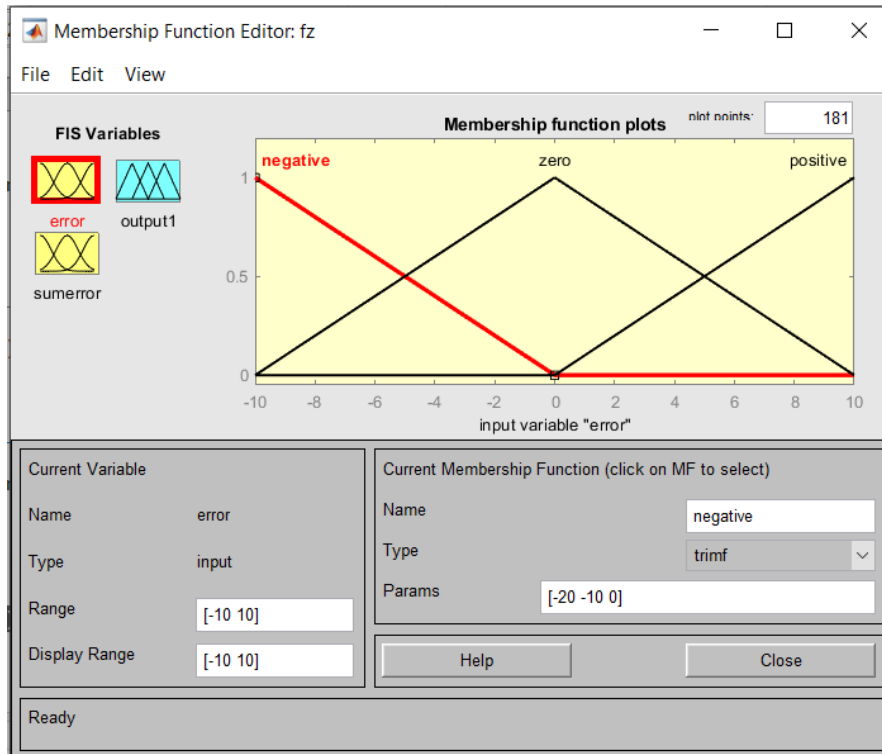


Εικόνα 4.51 Δυναμικό μοντέλο PMSM με Fuzzy Logic Controller

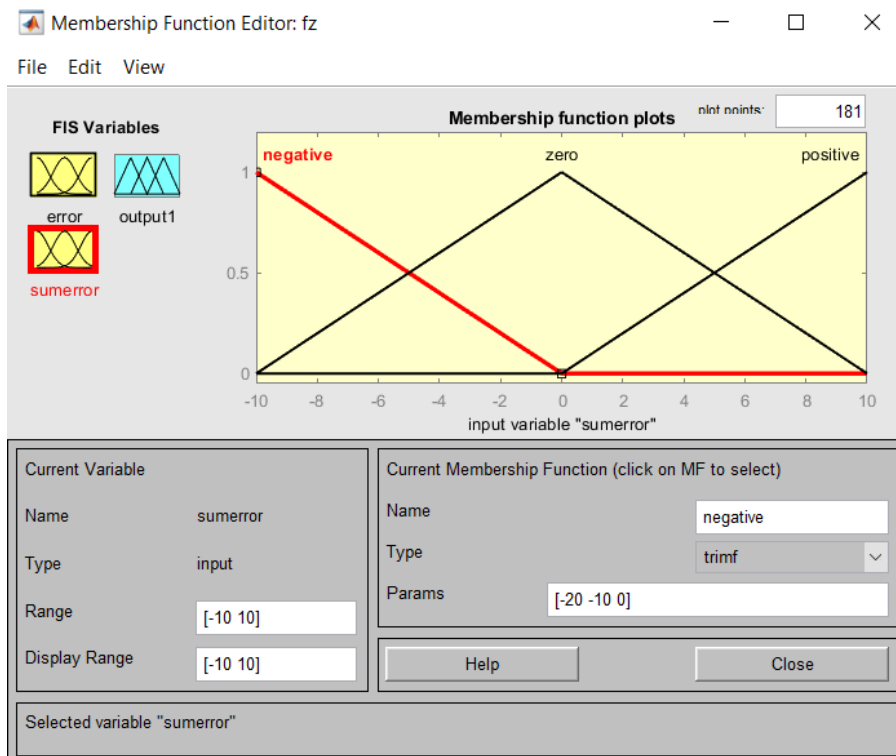
Στις παρακάτω εικόνες 4.52,4.53 παρατηρούμε τις ρυθμίσεις του ελεγκτή όπου στο κίτρινο πλαίσιο απεικονίζονται οι εισοδοί του συστήματος που αφορούν το σφάλμα του ελεγκτή καθώς και την παράγωγο του σφάλματος. Αντίστοιχα, στο μπλε πλαίσιο αναπαρίσταται η έξοδος του συστήματος, με άσπρο πλαίσιο αναπαρίσταται οι λεκτικοί κανόνες που θα χρησιμοποιήσουμε με τις αντιστοιχίες των συναρτήσεων συμμετοχής.



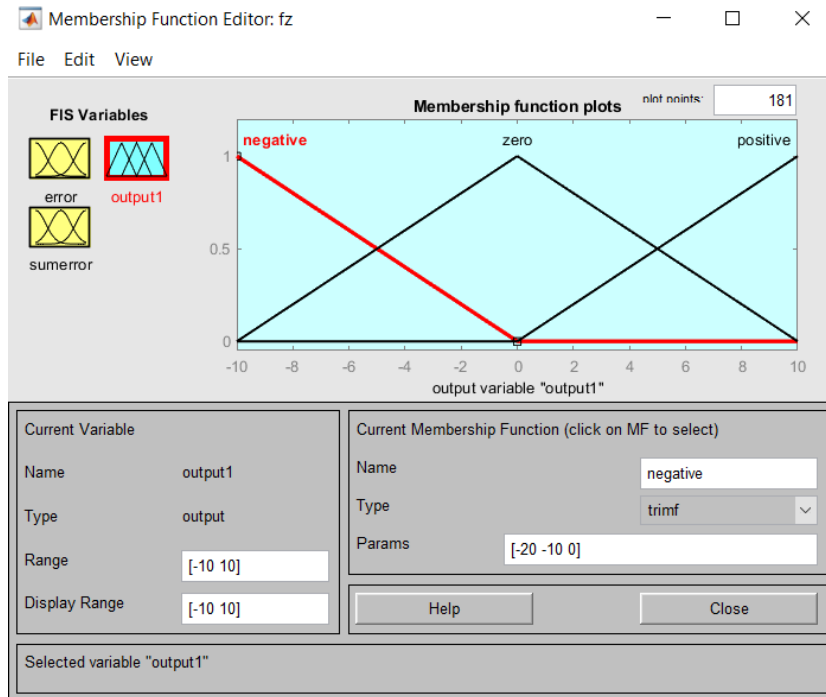
Εικόνα 4.52 Βασική δομή ασαφούς ελεγκτή



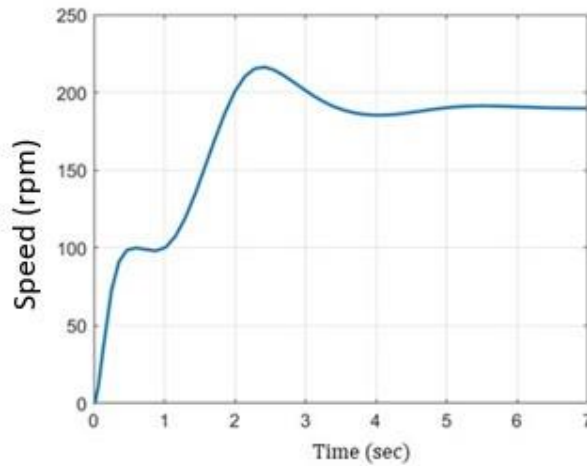
Εικόνα 4.53 Είσοδος συνάρτησης συμμετοχής σφάλματος ταχύτητας



Εικόνα 4.54 Είσοδος συνάρτησης συμμετοχής παράγωγος σφάλματος ταχύτητας



Εικόνα 4.55 Έξοδος συστήματος ασαφούς ελεγκτή



Εικόνα 4.56 Διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου με ασαφή ελεγκτή

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα της Εικόνας 4.56 μπορούμε να διακρίνουμε το διάγραμμα ταχύτητας σε συνάρτηση με τον χρόνο όπου μπορούμε να διαπιστώσουμε εύκολο ότι η ταχύτητα παρουσιάζει ιδιαίτερα ταλαντωτική συμπεριφορά με καθυστέρηση του χρόνου αποκατάστασης της μόνιμης λειτουργίας. Επιπλέον, για περίπου 1 sec παρατηρείται ένα μεταβατικό φαινόμενο αρκετά έντονο όπου δημιουργούν επιπλέον κραδασμούς στον

ανεγκυστήρα θέτοντας σε κίνδυνο την λειτουργία του συστήματος αλλά και των χρηστών γενικότερα.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

5.1. Συμπεράσματα

Με βάση την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω τόσο σε θεωρητικό όσο και σε επίπεδο προσομοιώσεων προκύπτουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα που εξάγονται με την συγκεκριμένη μελέτη. Αρχικά, διαπιστώνουμε το σημαντικό ρόλο που διαδραματίζουν οι ηλεκτρικές μηχανές στην τεχνολογία των ανελκυστήρων τόσο σε θέματα απόδοσης όσο και σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας του συστήματος γενικότερα. Επιπλέον, γίνεται εύκολα αντιληπτή η στροφή της βιομηχανίας των ανελκυστήρων στις σύγχρονες μηχανές μόνιμωνμαγνητών (PMSM) οι οποίες στις μέρες μας παρουσιάζουν πολύ μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον καθιστώντας τις κυρίαρχες σε πάρα πολλές βιομηχανικές εφαρμογές.

Σε σημαντικό ποσοστό βέβαια όλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οφείλονται στην οδήγηση των ηλεκτρικών μηχανών που πραγματοποιείται με την χρήση κατάλληλων μετατροπέων-ηλεκτρονικών ισχύος. Συγκεκριμένα, στις εφαρμογές ανελκυστήρων χρησιμοποιούνται νέας τεχνολογίας inverter (VVVF) οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να προσαρμόζουν τον κινητήρα με την γενικότερη λειτουργία του συστήματος κίνησης. Διαθέτουν κατάλληλο σύστημα προγραμματισμού της καμπύλης κίνησης του ανελκυστήρα ώστε με τον κατάλληλο προγραμματισμό της να υπάρχουν δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Χρήσιμο είναι επίσης να τονίσουμε με την μελέτη της βιβλιογραφίας έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών τεχνικών ελέγχου τόσο της ταχύτητας όσο και του ρεύματος του κινητήρα με χρήση διάφορων ελεγκτών και συνδυασμών όπου η κάθε τεχνική διαθέτει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στην λειτουργία του συστήματος γενικότερα.

Όσον αφορά το πρακτικό κομμάτι η διερεύνηση μας στηρίχθηκε στο συνδυασμό διαφορετικών τεχνικών ελέγχου προκειμένου να διερευνηθεί η λειτουργία του συστήματος με τις μεταβολές διάφορων παραμέτρων. Η μελέτη μας στηρίχθηκε σε έναν σύγχρονο κινητήρα μόνιμωνμαγνητών υψηλής απόδοσης, χαμηλών απωλειών που χρησιμοποιείται για θάλαμο ανελκυστήρα με μικρό αριθμό κλήσεων και ονομαστική ταχύτητα στο 1m/sec. Η τεχνική βαθμωτού ελέγχου v/f ανοιχτού βρόχου κρίνεται ακατάλληλη για τον έλεγχο PMSM. Στην προσομοίωση που υλοποιήθηκε τόσο τα ρεύματα ορθού όσο και εγκάρσιου άξονα λαμβάνουν υπερβολικά μεγάλες τιμές, παρατηρούμε έναν μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης της μόνιμης κατάστασης τόσο για την ταχύτητα όσο και για το ρεύμα αλλά και ιδιαίτερα ένα έντονο μεταβατικό φαινόμενο κατά την εκκίνηση του κινητήρα που δεν δικαιολογείται σε σχέση με

την ομαλή κίνηση που εκτελεί ο ανελκυστήρας σύμφωνα πάντα με τις πειραματικές καμπύλες προσομοίωσης.

Όσον αναφορά την τεχνική προσανατολισμένου πεδίου (FOC) αποτυπώθηκαν οι αποκρίσεις του συστήματος με καλύτερα αποτελέσματα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα σφάλματα τόσο για την ταχύτητα αναφοράς όσο και για τα ρεύματα d και q άξονα απέδειξαν με τις χαρακτηριστικές καμπύλες ότι δουλεύουν οι ελεγκτές ανταποκρίνονται σωστά δείχνοντας ότι με την κατάλληλη ρύθμιση των ελεγκτών PI, για το συγκεκριμένο σύστημα έχει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την διερεύνηση σε θεωρητικό επίπεδο. Επιπλέον, αποτυπώθηκε και ένας έντονος θόρυβος που οφείλεται στην παρουσία του μετατροπέα και προφανώς με την εφαρμογή κατάλληλων φίλτρων στην έξοδο του θα ήταν δυνατό να κατασταλούν οι αρμονικές παραμορφώσεις ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο για τον κινητήρα. Η μέθοδος FOC παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλά ρεύματα που φτάνουν και το 50% του ονομαστικού, που όμως αποσβένουν ταχύτερα, χωρίς να δημιουργούν σημαντικά προβλήματα στην κυμάτωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Προφανώς είναι απόλυτα λογικό να εμφανίζεται κάποιο μεταβατικό φαινόμενο στο σύστημα καθώς κατά την εκκίνηση του κινητήρα υπάρχει ένα μικρό χρονικό διάστημα όπου το ρεύμα καλείται να σταθεροποιηθεί στην μόνιμη του κατάσταση.

Μία σημαντική διαφοροποίηση που παρατηρήθηκε στον έλεγχο ανοιχτού βρόχου και στο FOC ήταν η διαφορά του θορύβου που εμφανίστηκε στην περίπτωση προσανατολισμένου πεδίου. Τα ρεύματα που προέρχονται από μικρή διακοπτική συχνότητα περιέχουν θόρυβο αρμονικών συχνοτήτων. Όταν αυξηθεί η διακοπτική συχνότητα θα μειωθεί ο θόρυβος όπως έγινε στην περίπτωση ανοιχτού βρόχου. Άρα συμπεραίνουμε το ρόλο της διακοπτικής συχνότητας λαμβάνοντας υπόψη τις διακοπτικές απώλειες, και τον ρόλο των ηλεκτρονικών ισχύος που ρυθμίζουν και την λειτουργία όλου συστήματος. Η ύπαρξη των αρμονικών φαινομένων δημιουργεί μία μικρή κυμάτωση στην παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Ο κατάλληλος σχεδιασμός των PI ελεγκτών στηρίζεται στις γραμμικές εξισώσεις όπου εκφράζουν τα πλαίσια αναφοράς κατά d - q άξονα. Τόσο η ταχύτητα όσο και το ρεύμα ορίζονται ως διαταραχές που εξομαλύνονται με την χρήση των ελεγκτών PI μέσω του βρόχου ανάδρασης. Για τον προσδιορισμό των ελεγκτών χρησιμοποιούνται συναρτήσεις πρώτης τάξης απλές στην μορφή τους και εφαρμόζεται η μέθοδος αντιστοίχισης πόλων. Οι βασικοί σχεδιαστικές παράμετροι είναι ο συντελεστής απόσβεσης ζ του συστήματος αλλά και η φυσική συχνότητα $f_{nominal}$.

Όσον αναφορά την εφαρμογή του fuzzy logic controller σε σύγκριση με την χρήση PI,PID ελεγκτή μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο PI και ο PID ελεγκτής παράγουν καλύτερα αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απόλυτα λογικό καθώς οι PI, PID ελεγκτές προκύπτουν με βάση μαθηματική επίλυση του προβλήματος ελέγχου και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην αντίθετη περίπτωση οι ασαφείς ελεγκτές έχουν σχεδιαστεί με εμπειρικό τρόπο και με τη διαμόρφωση όπως επιθυμεί ο ίδιος ο χρήστης, δημιουργώντας ανάλογα με την περίπτωση που θέλει έναν μικρό ή έναν μεγάλο αριθμό συναρτήσεων συμμετοχής. Ένα κοινό σημείο που αξίζει να σημειωθεί είναι το γεγονός ότι όλες οι τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ανταποκρίνονται ιδιαίτερα καλά στην προσπάθεια προσαρμογής του συστήματος στην λειτουργία του κινητήρα και του ανελκυστήρα γενικότερα.

5.2. Βασικά σημεία συμβολής της διπλωματικής εργασίας

Με την παρούσα διπλωματική εργασία αναδεικνύονται βασικά σημεία της επιστήμης:

- 1) Μοντελοποίηση και ανάλυση βασικών συνιστωσών σε κινητήρια συστήματα ανελκυστήρων.
- 2) Ανάπτυξη και συγκριτική διερεύνηση διάφορων τεχνικών ελέγχου τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης όσο και σε πραγματικά δεδομένα μετρήσεων.
- 3) Εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που αφορούν τις αποκρίσεις του συστήματος κίνησης σε διάφορους τύπους ελεγκτών, καθώς και μελέτη διάφορων λειτουργικών καταστάσεων και μεταβολών κατά την λειτουργία του κινητήρα.
- 4) Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης των διαφορετικών ελεγκτών.

5.3. Μελλοντικές προτάσεις

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας μπορούν να προκύψουν μελλοντικές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση που σχετίζονται με:

- Χρήση-μοντελοποίηση αναγεννητικής πέδησης και συγκριτική ανάλυση με την εφαρμογή VVVF για εξοικονόμηση ενέργειας.
- Εύρεση τεχνικών καταστολής και περιορισμού των αρμονικών φαινομένων στα παραπάνω μοντέλα ελέγχου.

- Εφαρμογή φίλτρων ανώτερης τάξης κυρίως στην τεχνική SPWM όπου παρατηρείται έντονο το φαινόμενο του θορύβου για καλύτερες κυματομορφές.
- Επανασχεδιασμός των ελεγκτών λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη δυναμική ενός ανελκυστήρα όπως η σχέση μετάδοσης, μηχανική αντοχή από ρουλεμάν, απώλειες συρματόσχοινων, υπολογισμός συνολικής απόδοσης συστήματος.
- Ενσωμάτωση ελεγκτών με την χρήση νευρωνικών δικτύων.
- Ενσωμάτωση κατανάλωσης ενέργειας και ενεργειακής απόδοσης κτηρίων με την εφαρμογή ορισμένων ενεργειακών προτύπων.
- Βελτίωση του σχεδιασμού πολυεπίπεδου αντιστροφέα με καλύτερα αποτελέσματα για την λειτουργία του κινητήρα.
- Υλοποίηση τεχνικής ελέγχου με μεγαλύτερη ανοχή στις διαταραχές τόσο τις εξωτερικές όσο και τις παραμετρικές.
- Εφαρμογή περισσότερων συναρτήσεων συμμετοχής στην περίπτωση των fuzzy logic controller προκειμένου να μειωθεί η ενδεχόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μηχανικών χαρακτηριστικών του κινητήρα.

5.4. Προτάσεις για επιπλέον διερεύνηση στην επιστήμη

Είναι σκόπιμο να αναφερθούν και ορισμένες επιπλέον ιδέες, που αποτελούν βασικές ερευνητικές προτάσεις, που βρίσκονται στην αιχμή της τεχνολογίας:

- Η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για τον αυτόματο έλεγχο και την πρόβλεψη πιθανών βλαβών που μπορεί να εμφανίσει ο κινητήρας.
- Η χρήση αισθητήρων ακριβείας μπορεί να συμβάλλει στη συλλογή δεδομένων μεγάλου όγκου για την επεξεργασία τους. Τα δεδομένα αυτά με τη χρήση της τεχνολογίας Internet of Things μπορούν να εμφανίζονται σε μία πλατφόρμα και να απεικονίζουν τα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο.
- Η χρήση εξελικτικών αλγορίθμων και γενετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης με σκοπό να προσδιορίζονται οι βέλτιστες λύσεις για την λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής αλλά και του συστήματος κίνησης γενικότερα.

Βιβλιογραφία

- [1] Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R. και Gonzalez, E. S., «Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability,» *Sustainable Operations and Computers*, τόμ. 3, pp. 203-217, January 2022.
- [2] Coatanroch, G., Nausedaite, R., Lavallee, M. V., Oomens, I., Botterman, M., Cave, J., Cloosterman, E., Thebert, C. και Alleweldt, F., «New technologies and new digital solutions for improved safety of products on the interval market,» 06 2022.[Ηλεκτρονικό].Available:[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/703348/IPOL_STU\(2022\)703348_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/703348/IPOL_STU(2022)703348_EN.pdf) [Πρόσβαση 06 01 2024].
- [3] Palacin, J., Bitria, R., Rubies, E. και Clotet, E., «A Procedure for Taking a Remotely Controlled Elevator with an Autonomous Mobile Robot on 2D LIDAR,» *Sensors*, τόμ. 23, pp. 1-21, July 2023.
- [4] Al-Kodmany, K., «Tall Buildings and Elevators: A Review of Recent Technological Advances,» *Buldings*, τόμ. 5, pp. 1070-1104, September 2015.
- [5] Poullos, I., «Living sites: The Past in the Present – The monastic site the Meteora,Greece,»2008.[Ηλεκτρονικό]Available:<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1444472/1/U591777%20Redacted.PDF> [Πρόσβαση 06 01 2024].
- [6] Yannopoulos, S. I., Lyberatos, G., Theodossiou, N., Li, W., Valipour, M., Tamburrino, A. και Angelakis, A. N. «Evaluation of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries Worldwide,» *water*, τόμ. 7, pp. 5031-5060, September 2015.
- [7] Gray, L. E., «A Brief History of Lift Safety Devices 1835-1935,» *12th Symposium on Lift & Escalator Technologies, Northampton, UK*, 22 September 2021.
- [8] Gray, L. E., «A History of the Passenger Elevator in the 19th Century,» 2020. [Ηλεκτρονικό]Available:https://skyscraper.org/wordpress/wp-content/uploads/2020/08/Gray_Elevator_History_Chapter_Four.pdf [Πρόσβαση 09 01 2024].
- [9] Al-Kodmany, K., «Elevator Technology Improvements: A Snapshot,» *Encyclopedia*, τομ. 3, pp. 530-548, April 2023.

- [10] Panwar, U., Guryal, Y., Srivastara, S., Singhal, P. και Singh, A.P., «OPERATING MECHANISM AND DESIGN OF HYDRAULIC SCISSOR LIFT,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, τόμ. 6, pp. 3981-3988, April 2019.
- [11] Abdulmalik, O., Akonyi, N., Balarinwa, G.O., Chima, L.O., Amony, M.C και Mgbemena, C.O., «The Design of A One-Man Passenger Electric Elevator,» *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*, τόμ. 2, pp. 806-811, November 2014.
- [12] Arrasate, X., McCloskey, A., Hernandez, X. και Telleria, A., «Optimum Design of Traction Electrical Machines in Lift Installations,» *12th Symposium on Lift & Escalator Technologies, Northampton, UK, 22 September 2021.*
- [13] Minav, T., Laurila, L. και Pyrhonen, J., «Analysis of electro-hydraulic lifting system's energy efficiency with direct electric drive pump control,» *Automation in Construction*, τόμ. 30, pp. 144-150, March 2013.
- [14] Rotger-Griful, S., Jacobsen, R.H., Brewer, R.S. και Rasmussen, M.K., «Green lift: Exploring the demand response potential of elevators in Danish buildings,» *Energy Research & Social Science*, τόμ. 32, pp. 55-64, October 2017.
- [15] Esteban, E., Iturrospe, A., Isasa, I. και Salgado, O. «Vibration-based condition monitoring for residential lifts,» *26th International Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management Congress-Comadem 2013, Helsinki, Finland, 11-13 June 2013.*
- [16] Patrao, C., Rivet, L., Fong, J. και De Almeida, A. «Energy efficient elevators and escalators,» ECEEE 2009, [Ηλεκτρονικό]Available: https://www.eceee.org/static/media/uploads/site-2/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2009/Panel_4/4.037/paper.pdf.
- [17] Wu, C.Z. «Design of Electrical Control System Elevator Based on VVVF,» *2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), Jabalpur, India, 12-14 December 2015, pp. 1490-1492.*
- [18] Vasileios V.I., Karakatsanis, T.S. και Kladas, A.G. «Energy Savings in Elevators by Using a Particular Permanent-Magnet Motor Drive,» *Energies*, τόμ. 16, pp. 1-30, June 2023.

- [19] Xue, R., Wang, H., Xie, Z., Chen, D., Cao, T. και Zou, H. «Research on hydraulic system of hydraulic elevator,» *6th International Conference on Machinery, Materials Environment, Biotechnology and Computer (MMEBC 2016), Tianhin, China, January 2016*, pp. 1374-1377.
- [20] Murthy, A.S. και Taylor, D.G. «Control of a Hydraulic Elevator with a Variable-Speed Pump,» *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, USA, 21-23 October 2018*, pp. 2245-2250.
- [21] Joshi, H. και Bhokare, R. «Control and Automation: Safety Improvement in Elevator,» *2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA), Pune, India, 17-18 August 2017*.
- [22] Mohammed, F., Mohammed, J. και Modammed, H. «Manufacturing of Electro-hydraulic Elevator System Controlled by PLC,» *Anbar Journal of Engineering Science*, τομ. 2019, pp. 1-8, January 2019.
- [23] Ji, H., Mikelsons, L., Kempf, K., Schramm, D., Rexroth, B. και Am Main, L., «Using Static Parametric Design to Support Systems Engineering of Industrial Automation Systems,» *9th International Modelica Conference, Munich, Germany, 3-5 September 2012*, pp. 971-980.
- [24] Al-Kodmany, K. «Smart elevator systems,» *Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research*, τομ. 6, pp. 41-54, March 2023.
- [25] Fernandes Neto, T.R. και Pontes, R.S.T. «Design of a Counterweight Elevator Prototype Using a Linear Motor Drive,» *IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, Turkey, 03-05 May 2007*, pp. 376-380.
- [26] Othman, S.A., Mohammed, J.A.K. και Mahel, F. «Variable Speed Drives in Electric Elevator Systems: A Review,» *Journal of Physics Conference Series*, τομ. 1973, pp. 1-20, August 2021.
- [27] Osama, M. και Azim, O.A. «Implementation and performance analysis of an elevator electric motor drive system,» *12th International Middle-East Power System Conference, Aswan, Egypt, 12-15 March 2008*, pp. 114-118.
- [28] De Almeida, A.T., Ferreira, F.J.T.E., Patrao, C. και Fong, J. «Characterization and Energy Performance of Elevators and Escalators Technologies,» *Nantes, France, September 2009*, pp. 91-105.

- [29] Niedostatkiewicz, M., Majewski, T. και Ziolkowski, P. «Design errors of the external lift shaft and their negative impact on the operation of the clinic building,» *MATEC Web of Conference 284 (ICSF 2019)*, pp. 1-11.
- [30] Wang, L. «Analysis and Discussion on Emergency Rescue Inspection Case of Machine Roomless Elevator by Data,» *Journal of Physics: Conference Series*, τομ. 2425, pp. 1-6, 2023.
- [31] Liu, Y., Wang, W. και Li, Y. «Realization of Contractless Elevator Control Panel System Based on Voice Interaction Technology,» *3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation*, 10-12 November 2021, pp. 591-594.
- [32] Rachev, S., Dimitrova, K., Koeva, D. και Dimitrov, L. «Starting Processes in Electric Drive of a Passenger Elevator,» *The Journal of CIEES*, τομ. 1, pp. 40-49, June 2021.
- [33] Mohammed, J.A. και Shuraiji, A.L. «Modeling of DC Elevator Motor Drive for Mid-rise Building,» *Engineering and Technology Journal*, τομ. 31, pp. 2320-2342, November 2013.
- [34] Yetis, H. και Mese, E. «Design of IPM Synchronous Motor for Gearless Elevator Applications,» *International Conference on Engineering Technology an Innovation (ICETI), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina*, March 2017, pp. 1-6.
- [35] Kermani, M., Shirdare, E., Abbasi, S., Parise, G. και Martirano, L. «Elevator Regenerative Energy Applications with Ultracapacitor and Battery Energy Storage Systems in Complex Buildings,» *Energies*, τομ. 14, pp. 1-16, June 2021.
- [36] Ford, P.J., Amiri, E. και Mendrela, E. «Electric elevator drive with position control,» *Electrical Engineering*, τομ. 98, pp. 1-13, May 2016.
- [37] Das, D., Kumaresan, N., Nayanar, V., Sam, K.N., Gounden, A.N. «Developmenet of BLDC Motor-Based Elevator System Suitable for DC Mocrogrid,» *IEEE Transacrions on Mechanotronics*, τομ. 21, pp. 1552-1560, June 2016.
- [38] Guo, Y., Zhang, D., Zhang, X., Wang, D. και Wang, S. «A New Transmission Theory of ‘‘Global Dynamic Wrap Angle’’ for Friction Hoist Conbining Suspended and Wrapped Wire Rope,» *Applied Sciences*, τομ. 10, pp. 1-17, February 2020.

- [39] Seelam, A.B., Jawed, M.S. και Krishanmurthy, S.H. «Design and analysis of elevator wire ropes,» *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, τομ. 12, pp. 1-8, August 2021.
- [40] Feng, S., Chen, J. και Liang, Y. «Introduction of an Elevator Guide Shoe with Position and Lateral Force Monitoring Function,» *Journal of Physics: Conference Series*, τομ. 2264, pp. 1-5, 2022.
- [41] Tukia, T., Uimonen, S., Siikonen, M.L., Hakala, H. και Lehtonen, M. «A study for improving the energy efficiency of lifts with adjustable counterweight,» *Buildings Services Engineering Research and Technology*, τομ. 38, pp. 421-435, March 2017.
- [42] Karakatsanis, T.S. «Modeling of Elevators as drivings systems,» *International Association of Elevator Engineering (IAEE), Thessaloniki, Greece*, June 2008.
- [43] Kei, T.W., Vai, M.I. και Un, C.S. «Design of S-curve Direct Landing Position Control System for Elevator Using Microcontroller,» *World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA*, October 2012.
- [44] Qiu, L., Zhou, H., Wang, Z., Lou, W., Zhang, S. και Zhang, L. «A Stepped-Segmentation Method for the High-Speed Theoretical Elevator Car Air Pressure Curve Adjustment,» *Energies*, τομ. 13, pp. 1-21, May 2020.
- [45] Zubia, K. «TIME,DISTANCE,SPEED,ACCELERATION AND JERK IN ELEVATOR STARTING AND STOPPING,» *liftscalatorlibrary.org*, pp. 277-286, 1996.
- [46] Peng, Q., Jiang, A., Yuan, H., Huang, G., He, S. και Li, S. «Study on Theoretical Model and Test Method of Vertical Vibration of Elevator Tracriion System,» *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-12, March 2020.
- [47] Sambhavi, Y.V. και Ramachandran, V. «A technical review of modern traction inverter systems used in electric vehicle applications,» *Energy Reports*, τομ. 10, pp. 3885-3907, October 2023.
- [48] Chen, M., Yin, J. και Liu, F. «Design of Elevator Control System Based on PLC and Frequency Conversion Technology,» *International Conference on Measuring Technology and Mechanotronics Automation (ICMTMA), Changsha, China*, pp. 276-278, February 2018.

- [49] Nguyen, C.T., Walker, P.D., Zhou, S. και Zhang, N. «Optimal sizing and energy management of an electric vehicle powertrain equipped with two motors and multi-gear ratios,» *Mechanism and Machine Theory*, τομ. 167, January 2022.
- [50] Junior, M.E.T.S. και Freitas, L.C.G. «Power Electronics for Modern Sustainable Power Systems: Distributed Generation, Microgrids and Smart Grids-A Review,» *Sustainability*, τομ. 14, pp. 1-22, March 2022.
- [51] Chapman, S.J. «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC,» 5^η Έκδοση, Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- [52] Esquivel, J.P., Castellarnau, M., Gasso, S. και Sabate, N. «Paper-based batteries as sustainable power source for disposable electronic devices,» *International Conference and Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems, Barcelona, Spain*, pp. 114-117, April 2019.
- [53] May, G.J., Davidson, A. και Monahov, B. «Lead batteries for utility energy storage: A review,» *Journal of Energy Storage*, τομ. 15, pp. 145-157, November 2017.
- [54] Sirsi, R. και Kamath, D. «Energy Efficient Elevators and Technologies,» *IEEE India Council International Conference (INDICON), Roorkee, India*, December 2017.
- [55] Maroti, P.K., Padmanaban, S., Bhaskar, M.S., Ramachandaramurthy, V.K. και Blaabjerg, F. «The state-of-the art of power electronics convertes configurations in electric vehicle technologies,» *Power Electronics Devices and Components*, τομ. 1, 1000001, November 2021.
- [56] Qashqai, P., Sheikholeslami, A., Vahedi, H. και Al-Hadded, K. «A Review on Multilevel Converter Topologies for Electric Transportation Applications,» *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Montreal, Canada*, October 2015.
- [57] Bhaskar, M.S., Ramachandaramurthy, V.K., Padmanaban, S., Blaabjerg, F., Ionel, D.M., Mitolo, M. και Almakhles, D. «Survey of DC-DC Non-Isolated Topologies for Unidirectional Power Flow in Fuel Cell Vehicles,» *IEEE Access*, τομ. 8, pp. 178130-178166, September 2020.
- [58] Elasser, A. και Chow, T.S.P. «Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems,» *Proceedings of the IEEE*, τομ. 90, pp. 969-986, June 2002.

- [59] Alatise, O., Deb, A., Bashar, E., Gonzalez, J.O., Jahdi, S. και Issa, W. «A Review of Power Electronic Devices for Heavy Goods Vehicles Electrification: Performance and Reliability,» *Energies*, τομ. 16, pp. 1-25, May 2023.
- [60] Sher, H. και Eltamaly, A.M. «Harmonics reduction techniques: A survey,» *International Review on Modelling and Simulations*, τομ. 4, pp. 3135-3147, January 2011.
- [61] Kassakian, J.G. και Jahns, T.M. «Evolving and Emerging Applications of Power Electronics in Systems,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, τομ. 1, pp. 47-58, June 2013.
- [62] Vishnuram, P., Ramachandiran, G., Ramasamy, S. και Dayalan, S. «A comprehensive overview of power converter topologies for induction heating applications,» *International Transactions on Electrical Energy Systems*, doi: 10.1002/2050-7038.12554, June 2020.
- [63] Rafin, S.M.S.H., Ahmed, R., Haque, M.A., Hossain, M.A. και Mohammed, O.A. «Power Electronics Revolutionized: A Comprehensive Analysis of Emerging Wide and Ultrawide Bandgap Devices,» *Micromachines*, τομ. 14, pp. 1-61, October 2023.
- [64] Jiya, I.N. και Gouws, R. «Overview of Power Electronics Switches: A Summary of the Past, State-of-the-Art and Illumination of the Future,» *Micromachines*, τομ. 11, pp. 1-29, December 2020.
- [65] Przybilla, J., Dorn, J., Barthelmeß, R., Werdehausen, U.K., Schulze, H.J. και Niedernostheide, F.J. «Diodes and Thyristor-past, present and future,» *European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain*, September 2009.
- [66] Larshminarayanan, V. και Stiraam, N. «The effect of temperature on the reliability of electronic components,» *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), Bangalore, India*, January 2014.
- [67] Zhu, S., Huang, J., Wang, B., Sun, Y. και Tong, X. «Event-Triggered Model Predictive Control of Three-phase Grid-connected Inverter with Operation State Consideration,» *Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Hefei, China*, pp. 791-796, August 2020.
- [68] Book, G., Balakrishna, P., Brosch, A., Schenke, M., Hanke, S., Kirchgassner, W. και Wallscheid, O. «Transferring Online Reinforcement Learning for Electric Motor Control From

Simulation to Real-World Experiments,» *IEEE Open Journal of Power Electronics*, τoμ. 2, pp. 187-201, March 2021.

[69] Zhao, H., Wu, Q.M.J. και Kawamura, A. «An accurate approach of nonlinearity compensation for VSI inverter output voltage,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τoμ. 19, pp. 1029-1035, July 2004.

[70] Patel, M.A., Patel, A.R., Vyas, D.R. και Patel, K.M. «Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement,» *International Journal of Recent Trends in Engineering*, τoμ. 1, pp. 99-102, May 2009.

[71] Qiu, X. και Li, X. «Research on Elevator Operation Harmonic Current Characteristics Analysis and Electrical Fire Detection Technology,» *Journal of Physics: Conference Series*, τoμ. 2396, pp. 1-8, 2022.

[72] Ruiz-Gonzalez, A., Heredia-Larrubia, J.R., Perez-Hidalgo, F.M. και Meco-Gutierrez, M.J. «Discontinuous PWM Strategy with Frequency Modulation for Vibration Reduction in Asynchronous Motor,» *Machines*, τoμ. 11, pp. 99-102, July 2023.

[73] Bopche, M.U. και Kapoor, P.V. «Comparative Analysis of Modulation Technique in Three Level Cascaded H-Bridge Inverter,» *International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS), Nagpur, India*, pp. 301-306, June 2018.

[74] Raju, N.I., Islam, M.S. και Uddin, A.A. «Sinusoidal PWM Signal Generation Technique for Three Phase Voltage Source Inverter with Analog Circuit & Simulation of PWM Inverter for Standalone Load & Micro-grid System,» *International Journal of Renewable Energy Research*, τoμ. 3, pp. 647-658, 2013.

[75] Reddy, N.B., Ch, S.B. και Rao, S.N. «Comparison of Modulation Techniques for Multilevel Inverter fed Permanent Magnet Synchronous Motor,» *International Journal of Engineering Science and Technology*, τoμ. 2, pp. 5206-5214, October 2010.

[76] Pechlivanidou, M.S.C. και Kladas, A.G. «Winding Structure Impact On High Speed Permanent Magnet Motor Efficiency,» *International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain*, pp. 2283-2289, September 2022.

- [77] Gangurde, J.A. και Thakre, M.P. «Comparative Analysis of PWM Overmodulation Techniques in Three Phase Two Level Voltage Source Inverter,» *International Conference on Contents, Computing & Communication*, February 2022.
- [78] Reney, D. «Modeling and Simulation of Space Vector PWM Inverter» *International Conference on Devices and Communications (ICDeCOM), Mesra, India*, February 2011.
- [79] Yousef, A.Y. «Space Vector Pulse Width Modulation Technique» *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE)*, τομ. 15, pp. 159-165, May 2015.
- [80] Ahmed, W. και Ali, S.M.U. «Comparative study of SVPWM (space vector pulse width modulation) & SPWM (sinusoidal pulse width modulation) based three phase voltage source inverters for variable speed drive» *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, τομ. 51, pp. 1-8, 2013.
- [81] Sawant, C.T. και Patil, D.R. «Analysis, simulation and implementation of space vector pulse width modulation inverter» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, τομ. 03, pp. 2163-2172, April 2016.
- [82] Handawi, E., Khater, F. και Shaltout, A. «Analysis, simulation and implementation of space vector pulse width modulation inverter» *International Conference on Applications of Electrical Engineering, Giza, Egypt*, pp. 124-131, January 2006.
- [83] El Hadraoui, H., Zegrari, M., Chebak, A., Laayati, O. και Guennouni, N. «A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles» *World Electric Vehicle Journal*, τομ. 13, pp. 1-28, April 2022.
- [84] El-Refaie, A. «Toward a Sustainable More Electrified Future: The Role of Electrical Machines and Drives» *IEEE Electrification Magazine*, τομ. 7, pp. 49-59, March 2019.
- [85] Chernyshev, A.D., Lisovskaya, T.A. και Lisovskiy, R.A. «Comparative analysis of different electrical motor types as a traction drive part in electrical transmission» *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, St. Petersburg, Russia*, May 2017.
- [86] Solomon, D.G., Greco, A., Masselli, C., Gundabattini, E., Rassiah, R.S. και Kuppan, R. «A Review on Methods to Reduce Weight and to Increase Efficiency on Electric Motors Using

Lightweight Materials, Novel Manufacturing Processes, Magnetic Materials and Cooling Methods» *International Information and Engineering Technology Association*, τομ. 44, pp. 1-14, February 2020.

[87] Bose, B.K. «Power Electronics and Motor Drives-Technology Advances, Trends and Applications» *IEEE International Conference on Industrial Technology, Hong Kong, China*, December 2005.

[88] Bai, L. «Electric drive system with BLDC motor» *International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan*, April 2011.

[89] Diaz, A., Saltares, R., Rodriguez, C., Nunez, R.F., Ortiz-Rivera, E.I., Llorente, J.G. «Induction motor equivalent circuit for dynamic simulation» *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, USA*, May 2009.

[90] Ahn, J.W. και Lukman, G.F. «Switched reluctance motor: Research trends and overview» *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, τομ. 2, pp. 339-347, December 2018.

[91] Beser, E.K. «Electrical equivalent circuit for modelling permanent magnet synchronous motor» *Journal of Electrical Engineering*, τομ. 72, pp. 176-183, June 2021.

[92] Huang, Q., Huang, Q., Guo, H. και Cao, J. «Design and research of permanent magnet synchronous motor controller for electric vehicle» *Energy & Engineering*, τομ. 11, pp. 112-126, September 2022.

[93] Mishra, A., Agarwal, P. και Srivastava, S.P. «A comprehensive analysis and implementation of vector control of permanent magnet synchronous motor» *International Journal of Power and Energy Conversion*, τομ. 5, pp. 1-23, January 2014.

[94] Shrivastava, R.G., Diagamane, M.B. και Vaishnav, S.R. «Literature Review of Permanent Magnet AC Motors Drive for Automotive Application» *Buletin Teknik Elektro dan Informatika*, τομ. 1, pp. 7-14, March 2012.

[95] Petrov, I. και Pyrhonen, J. «Performance of Low-Permanent Magnet Material in PM Synchronous Machines» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τομ. 60, pp. 2131-2138, June 2013.

- [96] Koch, S.F., Peter, M. και Fleischer, J. «Lightweight design and manufacturing of components for high-performance electric motors» *Procedia CIRP*, τoμ. 66, pp. 283-288, December 2017.
- [97] Husain, T., Hasan, I., Sozer, Y., Husain, I. και Muljadi, E. «A comprehensive review of permanent magnet transverse flux machines for direct drive applications» *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, USA*, pp. 1255-1262, October 2017.
- [98] Yazdi, M.A., Saied, S.A. και Mirimani, S.M. «Design and construction of new axial-flux permanent magnet motor» *IET Electric Power Applications*, τoμ. 14, pp. 2389-2394, August 2020.
- [99] Shen, J., Qin, X. και Wang, Y. «High-speed permanent magnet electrical machines-applications, key issues and challenges» *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, τoμ. 2, pp. 23-33, March 2018.
- [100] Sharma, A. και Phadke, B.N. «Advantages of IPM Motor in Electrical Propulsion Over Other Motors for Electrical Vehicles» *International Journal of Scientific Progress and Research (IJSPPR)*, τoμ. 14, pp. 1-3, 2015.
- [101] Sudha, B., Vadde, A. και Sachin, S. «A review: high power density motors for electric vehicles» *Journal of Physics Conference Series*, τoμ. 1706, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012057>, December 2020.
- [102] Pindoriya, R.M., Mishra, A.K., Rajpurohit, B.S. και Kumar, R. «Performance analysis of control strategies of permanent magnet synchronous motor» *IEEE Region 10 Conference (TENCON), Singapore*, pp. 3224-3227 November 2016.
- [103] Parmar, Y., Patel, P., Pancholi, N., Thakor, C. και Mali, U. «Scalar control of Permanent Magnet Synchronous Motor» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, τoμ. 03, pp. 364-366, December 2016.
- [104] Patel, F., Ahir, J. και Patel, P., «Control Theory For Permanent Magnet Synchronous Motor-A Review» *Asian Journal of Convergence in Technology*, τoμ. V.
- [105] Bida, V.M., Samokhvalov, D.V. και Al-Mahturi, F.S. «PMSM vector control techniques-A survey» *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic*

Engineering (ElConRus), Moscow and St. Peterburg, Russia, pp. 577-581, January-February 2018.

[106] Furmanik, M., Gorel, L., Konvicny, D. και Rafajdus, P. «Comparative Study and Overview of Field-Oriented Control Techniques for Six-Phase PMSMs» *Applied Sciences*, τομ. 11, pp. 1-16, August 2021.

[107] Gora, R., Biswas, R., Garg, R.K. και Nangia, U. «Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Driven Electric Vehicle And Its Performance Analysis» *IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Kuala Lumpur, Malaysia*, pp. 1-6, September 2021.

[108] Ang, K.H., Chong, G. και Li, Y. «PID control system analysis, design, and technology, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, τομ. 13, pp. 559-576, June 2005.

[109] Wu, H., Su, W. και Liu, Z. «PID controllers: Design and tuning methods» *9th IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications, Hangzhou, China*, pp. 808-813, June 2014.

[110] Bossoufi, B., Karim, M., Lagrioui, A. και Ionitta, S. «Performance analysis of Direct Torque Control (DTC) for synchronous machine permanent magnet (PMSM) » *IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Pitesti, Romania, pp. 237-242, September 2010.

[111] Morales-Caporal, R., Leal-Lopez, M.E., Rangel-Magdaleno, J. de Jesus, Sandre-Hernandez, O. και Cruz-Vega, I. «Direct torque control of a PMSM-drive for electric vehicle applications» *International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, Cholula, Mexico, pp. 232-237, February 2018.

[112] Albertos, P., Sala, A., Olivares, M. «Fuzzy Logic Controllers. Methodology, Advantages and Drawbacks» *X Congreso Espanol sobre Tecnologias y Logica Fuzzy (ESTYLF), Sevilla, Espana*, September 2000.

[113] Behrooz, F., Marium, N., Marhaban, M.H., Radzi, M.A.M. και Ramli, A.R. «Review of Control Techniques for HVAC Systems-Nonlinearity Approaches Based on Fuzzy Cognitive Maps» *Energies*, τομ. 11, pp. 1-41, February 2018.

Παράρτημα

Κώδικας δήλωσης μεταβλητών και ελεγκτών ισοδύναμου κυκλώματος PMSM:

```
% Εισαγωγή παραμέτρων κινητήρα PMSM
R_s=1.51; % Αντίσταση τυλιγμάτων κινητήρα [Ω]
L_d=0.0099; % Αυτεπαγωγή κατά d-άξονα [H]
L_q=0.0099; % Αυτεπαγωγή κατά q-άξονα [H]
pm=0.99; % Μαγνητική ροή [Wb]
p=20; % Πόλοι κινητήρα [Σταθερός αριθμός]
Kt=1.5*p*pm;
TL=0;
Fc=100000;
Tcs=1e-5;
B=0.000991; % Συντελεστής απόσβεσης [Nm]
J=0.0049; % Ροπή Αδράνειας [Kgm^2]
%% Current Controller
zeta=5.5;
gamma1=0.6;
wn=(1/(1-gamma1))*(R_s/L_q);
Kcq=(2*zeta*wn*L_q)-R_s;
t_iq=(2*zeta*wn*L_q-R_s)/(wn^2*L_q);
%% Speed Controller
gamma2=0.6;
wns=(1/(1-gamma2))*(B/J);
Kcs=(2*zeta*wns-(B/J))/((1.5*p^2*pm)/J);
t_is=(2*zeta*wns-(B/J))/(wns^2);
%% Διάγραμμα Ελεγκτή Ταχύτητας
figure;
plot(time,speed3,time,speed2,time,speed1,'LineWidth',2);
legend('γ=0.6','γ=0.7','γ=0.9');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Speed(rpm)');
grid on
% Διάγραμμα Ελεγκτή Ρεύματος
figure;
plot(time,current1,time,current2,time,current3,'LineWidth',2);
legend('γ=0.6','γ=0.7','γ=0.9');
xlabel('Time(s)');
```

```
ylabel('Current(A)')
grid on
%% Plot Speed-Time
plot(time,speed,'LineWidth',2)
xlabel('Time(s)');
ylabel('Speed(rpm)')
grid on
%% Plot Current-Time
plot(time,current1,time,current2,time,current3','LineWidth',2)
xlabel('Time(s)');
ylabel('Speed(rpm)')
legend('CurrentA','CurrentB','CurrentC')
grid on
```