



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του
Πανεπιστημίου Πατρών

ΣΙΑΒΕΣΤΡΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΜΠΟΥΚΟΥΒΑΛΑ

A.M.:227326

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής

N° 378

Πάτρα, Οκτώβριος 2014



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του
Πανεπιστημίου Πατρών

ΣΙΑΒΕΣΤΡΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΜΠΟΥΚΟΥΒΑΛΑ

A.M.:227326

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ
ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΕΝΟΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής

N° 7326/2014

Πάτρα, Οκτώβριος 2014

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η διπλωματική εργασία με θέμα:

**" ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΦΟΡΤΙΣΗ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ"**

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών:

ΣΙΑΒΕΣΤΡΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΜΠΟΥΚΟΥΒΑΛΑ

(Α.Μ. 227326)

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις
14/10/2014

Ο Επιβλέπων

Ο Διευθυντής του Τομέα

Εμμανουήλ Τατάκης
Καθηγητής

Αντώνιος Αλεξανδρίδης
Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας: 227326/2014

**ΤΙΤΛΟΣ: " ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ
ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΕΝΟΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ”**

Φοιτητής: Μπουκουβάλας Σίλβεστρος του Δημητρίου

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το σχεδιασμό και την κατασκευή διάταξης φόρτισης ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος. Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Στα πλαίσια του θεσμού της πρακτικής άσκησης του τμημάτος, ένα τμήμα της εργασίας αυτής εκπονήθηκε στο τεχνικό γραφείο ΛΙΑΣΚΟΣ Ο.Ε.

Σκοπός είναι η κατασκευή ενός μετατροπέα πλήρους γέφυρας, που θα ελέγχει κατάλληλα μια μηχανή ξένης διέγερσης, η οποία συνδέεται μέσω ενός συστήματος μετάδοσης μ’ έναν κινητήρα με τελικό σκοπό την φόρτιση του κινητήρα με επιθυμητές ροπές για μελέτη της λειτουργικής συμπεριφοράς του.

Αρχικά αναλύθηκε ένα ηλεκτροκινητήριο σύστημα και μελετήσαμε τα επιμέρους τμήματα που το αποτελούν. Παρουσιάζονται διάφορα είδη φορτίων με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές ροπής-στροφών καθώς και εφαρμογές που χρησιμοποιούνται. Επίσης αναλύθηκε συνοπτικά η μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Στη συνέχεια αναλύθηκε ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας, οι τρόποι λειτουργίας του, με τους οποίους μπορεί να ελέγξει τη μηχανή συνεχούς ρεύματος ώστε να λειτουργεί στα τέσσερα τεταρτημόρια, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ανάλυση των μεθόδων κατάλληλης παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων.

Στο επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση τόσο των επιμέρους συστημάτων όσο και του ολικού συστήματος, με σκοπό να εξακριβωθεί η ορθή λειτουργία του πριν την κατασκευή. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του λογισμικού Simulink του Matlab .

Τέλος κατασκευάζεται η πειραματική διάταξη για να ληφθούν τα πειραματικά αποτελέσματα και να συγκριθούν με τα θεωρητικά, ώστε να εντοπιστούν και να δικαιολογηθούν τυχόν διαφορές μεταξύ της θεωρητικής ανάλυσης και των μετρήσεων στην πραγματική διάταξη, καθώς και για να εκτιμηθεί η απόδοση του συστήματος.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη διπλωματική αυτή εργασία υλοποιείται μια διάταξη για τη φόρτιση ενός κινητήρα με την επιθυμητή ροπή.

Πιο συγκεκριμένα, μελετάται και κατασκευάζεται ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας πλήρους γέφυρας μέσω του οποίου ελέγχουμε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Η ελεγχόμενη μηχανή συνδέεται με την βοήθεια ενός συστήματος μετάδοσης με τον κινητήρα, οπότε ελέγχοντας τη ροπή της είναι σαν να ασκούμε στον άξονα του κινητήρα τη ροπή που θέλουμε.

Αναλυτικά, στο **κεφάλαιο 1** αναφέρεται η δομή ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος. Τα βασικά του μέρη είναι ο κινητήρας, ο μηχανισμός μεταφοράς κίνησης και ο μηχανισμός παραγωγής έργου. Επίσης παρουσιάζονται διάφορα είδη φορτίων με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές ροπής-στροφών, την εξάρτησή τους από τον χρόνο και τη θέση. Τέλος γίνεται μια αναφορά στην μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Στο **κεφάλαιο 2** μελετάται ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας. Ο μετατροπέας αυτός είναι κατάλληλος για τον έλεγχο μηχανής ξένης διέγερσης γιατί επιτρέπει την λειτουργία της στα τέσσερα τεταρτημόρια. Επίσης, ο μετατροπέας αυτός μπορεί να λειτουργήσει και σαν μετατροπέας υποβιβασμού ή ανύψωσης τάσης. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μέθοδος ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων.

Στο **κεφάλαιο 3** υλοποιούνται οι προσομοιώσεις. Προσομοιώνεται ο μετατροπέας μας καθώς και οι επιμέρους λειτουργίες του για τον έλεγχο της μηχανής στα τέσσερα τεταρτημόρια. Επίσης προσομοιώνεται η ολική μας διάταξη, βοηθώντας μας να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για την ορθή λειτουργία του συστήματος.

Στο **κεφάλαιο 4** αναφέρεται λεπτομερώς η σχεδίαση και η κατασκευή των πλακετών που υλοποιούν την διάταξη του μετατροπέα πλήρους γέφυρας. Πιο συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο επιλέχτηκαν τα διακοπτικά στοιχεία ισχύος, ο μικροελεγκτής DSPIC30F2020 με τα περιφερειακά που διαθέτει και είναι απαραίτητα για τον έλεγχο του μετατροπέα, καθώς και τα επιμέρους ολοκληρωμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο **κεφάλαιο 5** γίνεται η δοκιμή του μετατροπέα και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα προκειμένου να συγκριθούν με τα θεωρητικά και να γίνουν οι απαραίτητες παρατηρήσεις.

Τέλος, καταγράφεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε και στα παραρτήματα ενσωματώνονται τα φυλλάδια των κατασκευαστών των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, τα τυπωμένα κυκλώματα των πλακετών που υλοποιήθηκαν καθώς και ο κώδικας του μικροελεγκτή για τον έλεγχο του μετατροπέα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου πρόσφερε.

Επίσης ευχαριστίες αρμόζουν σ' όλους τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές του Εργαστηρίου Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας για το ιδιαίτερα φιλικό κλίμα και τις συμβουλές που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Στέλιο Συρίγο, ο οποίος βοήθησε τα μέγιστα στην υλοποίηση αυτής της διπλωματικής με τις γνώσεις του και τις συμβουλές του και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ιωάννη Καρατζαφέρη για τη βοήθεια που μου πρόσφερε στη φάση της προσομοίωσης του συστήματος.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να πω στους φίλους μου για την στήριξη και την κατανόηση που μου πρόσφεραν, τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί στην φοιτητική μου ζωή, καθώς επίσης και στην οικογένεια μου, που με στήριξε και ήταν πάντα δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	2
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	2
1.1. Εισαγωγικά στοιχεία ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος	2
1.1.1 Ηλεκτρικές μηχανές	2
1.1.2 Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα	3
1.1.3 Σκοπός διπλωματικής εργασίας	5
1.2. Φορτία	8
1.2.2 Ροπή φορτίου σταθερή, ανεξάρτητη των στροφών	9
1.2.2 Ροπή φορτίου σταθερή, αλλά το πρόσημο εξαρτάται από τις στροφές	10
1.2.3 Ροπή φορτίου ανάλογη της ταχύτητας	10
1.2.4 Ροπή φορτίου ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας	11
1.2.5 Σταθερή ισχύς φορτίου	12
1.2.6 Εξάρτηση της ροπής φορτίου από την γωνία περιστροφής	12
1.2.7 Εξάρτηση της ροπής με τον χρόνο	13
1.3. Μηχανή συνεχούς ρεύματος	13
1.3.1. Κινητήρας ξένης διέγερσης	15
1.3.2. Κινητήρας παράλληλης διέγερσης	16
1.3.3. Κινητήρας με διέγερση σε σειρά	17
1.3.4. Κινητήρας σύνθετης διέγερσης	17
1.3.5. Γεννήτρια ξένης διέγερσης	18
1.3.6. Γεννήτρια παράλληλης διέγερσης	19
1.3.7. Γεννήτρια με διέγερση σε σειρά	19
1.3.8. Γεννήτρια σύνθετης διέγερσης	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	21
DC/DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΓΕΦΥΡΑ	21
2.1. Εισαγωγή	21
2.2. DC/DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ	22
2.2.1 Λειτουργία αριστερόστροφου κινητήρα	22
2.2.2 Λειτουργία αριστερόστροφης γεννήτριας	24
2.2.3 Λειτουργία δεξιόστροφου κινητήρα	26
2.2.4 Λειτουργία δεξιόστροφης γεννήτριας	27
2.3. Λειτουργία μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck)	29
2.3.1. Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος	30
2.3.2. Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής	32
2.4. Λειτουργία μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost)	34
2.4.1 Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος	35

2.4.2	Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής.....	36
2.5.	Μέθοδος παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα.....	39
2.5.1	Η μέθοδός της ζώνης υστέρησης.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3		41
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIMULINK/MATLAB		41
3.1.	Εισαγωγή	41
3.2.	Μοντελοποίηση της μηχανής συνεχούς ρεύματος	42
3.3.	Προσομοίωση του μετατροπέα σε λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο	44
3.3.1.	Το υποσύστημα “control system”	44
3.3.2.	Το υποσύστημα “converter”.....	46
3.3.3.	Το υποσύστημα “control motor”	46
3.3.4.	Αποτελέσματα προσομοίωσης κινητήρα στο πρώτο τεταρτημόριο	47
3.4.	Προσομοίωση του μετατροπέα σε λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο.....	50
3.4.1	Το υποσύστημα “control system”	50
3.4.1.	Το υποσύστημα “converter”.....	52
3.4.2.	Το υποσύστημα “control motor”.....	52
3.4.3.	Αποτελέσματα προσομοίωσης γεννήτριας στο δεύτερο τεταρτημόριο.....	52
3.5.	Προσομοίωση του μετατροπέα σε λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο	54
3.5.1.	Το υποσύστημα “control system”.....	54
3.5.2.	Το υποσύστημα “converter”.....	55
3.5.3.	Το υποσύστημα “control motor”.....	56
3.5.4.	Αποτελέσματα προσομοίωσης κινητήρα στο τρίτο τεταρτημόριο.....	56
3.6.	Προσομοίωση του μετατροπέα σε λειτουργία στο τέταρτο τεταρτημόριο.....	58
3.6.1.	Το υποσύστημα “control system”.....	58
3.6.2.	Το υποσύστημα “converter”.....	59
3.6.3.	Το υποσύστημα “control motor”.....	59
3.6.4.	Αποτελέσματα προσομοίωσης γεννήτριας στο τέταρτο τεταρτημόριο.....	59
3.7.	Προσομοίωση του φορτίου	62
3.7.1.	Το υποσύστημα “pulse control”.....	63
3.7.2.	Το υποσύστημα “converter”.....	65
3.7.3.	Το υποσύστημα “control machine”.....	65
3.7.4.	Αποτελέσματα προσομοίωσης του ελεγχόμενου συστήματος.....	66
3.8.	Αποτελέσματα προσομοίωση του συνολικού συστήματος	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		79
ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ		79
4.1.	Εισαγωγή	79

4.2.	Επιλογή μηχανής συνεχούς ρεύματος	79
4.3.	Κατασκευή πλακέτας ισχύος	80
4.3.1.	Επιλογή διακοπτικών στοιχείων ισχύος	80
4.3.2.	Πυκνωτές εισόδου	82
4.3.3.	Μετρητικό ρεύματος	82
4.3.4.	Επιλογή ψυκτικού	84
4.4.	Κατασκευή πλακέτας ελέγχου	87
4.4.1.	Επιλογή μικροελεγκτή	87
4.4.2.	Επιλογή ενισχυτή	94
4.4.3.	Επιλογή οπτοζεύκτη	96
4.4.4.	Επιλογή οδηγού παλμών	98
4.4.5.	Σχηματική απεικόνιση της πορείας των παλμών	100
4.5.	Μονάδα τροφοδοσίας	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		103
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ		103
5.1.	Εισαγωγή	103
5.2.	Λειτουργία μετατροπέα υποβιβασμού τάσης	104
5.3.	Λειτουργία μετατροπέα ανύψωσης τάσης	105
5.4.	Έλεγχος κλειστού βρόχου	107
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		111
ΠΑΡΑΤΗΜΑΤΑ		
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α– Σχηματικά και τυπωμένα κυκλώματα		114
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β– Κώδικες προγραμμάτων μικροελεγκτή		118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος

Από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα οι άνθρωποι προσπαθούν να βελτιώνουν τον τρόπο ζωής τους, ανακαλύπτοντας καινούργια στοιχεία, υλικά, μεθόδους με τις οποίες υλοποιούν πιο εύκολα, γρήγορα, με χαμηλό κόστος και ξεκούραστα τις ανάγκες τους.

1.1.1 Ηλεκτρικές μηχανές

Οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται είτε στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική (κινητήρας) είτε στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική (γεννήτρια). Η ίδια η μηχανή ανάλογα με την είσοδο της μπορεί να δουλέψει είτε σαν κινητήρας, εάν η είσοδος της είναι η ηλεκτρική ισχύς, είτε σαν γεννήτρια, εάν η είσοδος της είναι η μηχανική ισχύς. Η κύρια διάκριση των ηλεκτρικών μηχανών είναι ανάλογα με τη μορφή της ενέργειας που παράγουν ή καταναλώνουν και διακρίνονται σε μηχανές συνεχούς ρεύματος ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Η αρχή λειτουργίας όλων των ηλεκτρικών μηχανών βασίζεται στους ηλεκτρομαγνητικούς νόμους.

Ένα δύσκολο θέμα για τον ηλεκτρολόγο μηχανικό, είναι η σωστή επιλογή μιας ηλεκτρικής μηχανής που θα εξυπηρετεί τις ανάγκες του φορτίου χωρίς να υπολειτουργεί ή να υπερφορτώνεται. Επίσης δύσκολο θέμα είναι και ο προσδιορισμός του φορτίου καθώς πρέπει να γίνει προσεκτική μελέτη του ολικού συστήματος, να λάβουμε υπόψη μας παραμέτρους που δεν είναι γνωστές και συχνά μεταβάλλονται, όπως η τριβή κ.ά. Για τα είδη και τα χαρακτηριστικά των φορτίων θα αναφερθούμε αναλυτικά σ' άλλη ενότητα.

Η λειτουργική συμπεριφορά των ηλεκτρικών κινητήρων περιγράφεται από την χαρακτηριστική ροπή-στροφών. Αυτή η χαρακτηριστική πρέπει να ταιριάζει με την αντίστοιχη του φορτίου, έτσι ώστε να ικανοποιεί ο κινητήρας τις απαιτήσεις του φορτίου.

Στην πράξη υπάρχει μεγάλη ποικιλία από ηλεκτρικές μηχανές για να καταστεί δυνατή η αντιμετώπιση των πληθώρα των εφαρμογών, αφού κάθε μια από αυτές

έχει τις δικές τις απαιτήσεις. Για την σωστή επιλογή μιας ηλεκτρικής μηχανής πρέπει να λάβουμε υπόψη μας μια σειρά από στοιχεία.

Τα κύρια στοιχεία που κοιτάμε είναι η ονομαστική της ισχύς, η ροπή και ο αριθμός των στροφών. Στην συνέχεια, οι δυνατότητες ελέγχου της ταχύτητας, το μέγεθος της ροπής εκκίνησης και ανατροπής, η συμπεριφορά του κινητήρα στα μεταβατικά καθώς και η ροπή αδράνειας του. Τέλος ένας σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της μηχανής είναι ο βαθμός απόδοσης της, αφού αυτός μας δείχνει πόσο αποτελεσματική είναι η μηχανή μας. Για να έχουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης μιας μηχανής πρέπει να την λειτουργούμε όσον τον δυνατόν πιο κοντά στις ονομαστικές της συνθήκες.

1.1.2 Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα

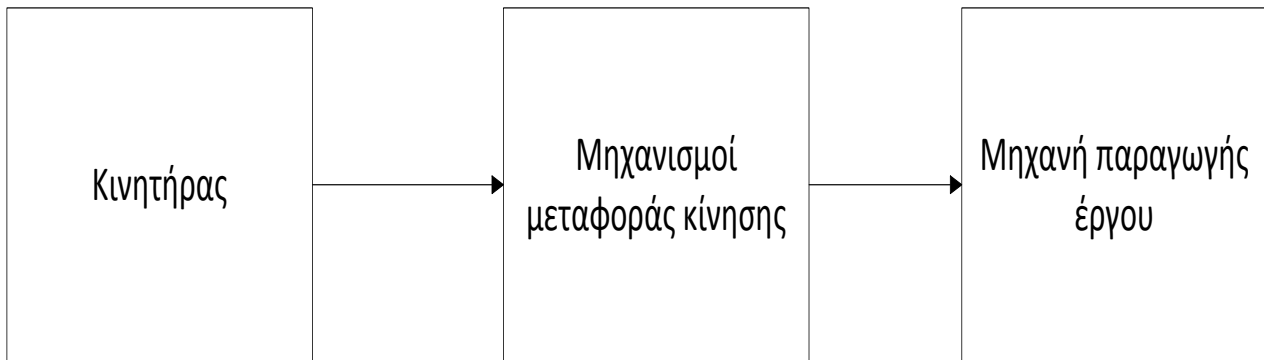
Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα περιλαμβάνουν τους μηχανισμούς εκείνους, που σκοπό έχουν να δημιουργήσουν κίνηση, δηλαδή μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική για την παραγωγή έργου που θα ικανοποιεί κάποια λειτουργία. Τα συστήματα αυτά μπορούμε να τα διακρίνουμε σε τρεις κατηγορίες:

- Στοιχειώδη συστήματα, εξασφαλίζουν κίνηση χωρίς έλεγχο ταχύτητας
- Αυτοματοποιημένα συστήματα, εκτελούν λειτουργίες αυτόματα και σ' ένα ευρύ φάσμα
- Σύνθετα αυτοματοποιημένα συστήματα, εκτελούν σύνθετες αυτοματοποιημένες λειτουργίες

Ένα ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- Ηλεκτρικός κινητήρας και συσκευή ελέγχου
- Μηχανισμός μεταφοράς κίνησης
- Μηχανισμός παραγωγής έργου

Τα μέρη των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων μπορεί να βρίσκονται σε ενιαία κατασκευή ή σε ξεχωριστές μονάδες. Με την ενιαία δομή έχουμε οικονομία συστήματος και χώρου αλλά δύσκολη συντήρηση. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζονται τα μέρη ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος.



Σχήμα 1.1: Δομή ηλεκτροκινητήριου συστήματος [9]

Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελεί το πιο σημαντικό τμήμα του ηλεκτροκινητήριου συστήματος, καθώς μια βλάβη του αδρανοποιεί όλο το σύστημα. Ο τρόπος επιλογής του κινητήρα αναφέρθηκε στην υποενότητα 1.1.1. Εάν στο σύστημα μας απαιτείται κι έλεγχος, τότε μαζί με τον κινητήρα χρειάζεται κι ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας, που ανάλογα με το είδος της μηχανής και του ελέγχου, επιλέγεται έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της αυτόματης διαδικασίας.

Οι μηχανισμοί μεταφοράς κίνησης είναι διατάξεις που συνδέουν τον άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα με την μηχανή παραγωγής έργου. Ανάλογα με το είδος τους, μπορεί να λειτουργήσουν με βοηθητική ενέργεια ή χωρίς βοηθητική ενέργεια. Διακρίνονται σε τέσσερεις κατηγορίες και είναι οι εξής:

- Συμπλέκτες
- Μετατροπείς ταχύτητας και ροπής
- Ενισχυτές ροπής
- Φρένα

Οι συμπλέκτες συνδέουν κι αποσυνδέουν τον άξονα της μηχανής με το φορτίο. Με την βοήθεια τους μπορούμε να λύσουμε τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι μηχανές στην εκκίνηση εξαιτίας της χαμηλής ροπής που διαθέτουν κατά την εκκίνηση. Δηλαδή στην αρχή η μηχανή ξεκινάει χωρίς φορτίο και μόλις φτάσει τις επιθυμητές στροφές και την κατάλληλη ροπή συνδέουμε το φορτίο. Επίσης μπορεί να προστατέψουν τη μηχανή μας από αιχμές στη ροπή του φορτίου.

Οι μετατροπείς ταχύτητας και ροπής χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή του κινητήρα στις στροφές και στην ροπή που απαιτεί το φορτίο. Οι μηχανές που διατίθενται στο εμπόριο έχουν συγκεκριμένο αριθμό στροφών και ροπής οπότε για

την προσαρμογή τους με το φορτίο χρειάζονται αυτοί οι μετατροπείς. Αυτοί οι μετατροπείς, μπορεί να είναι υπό τη μορφή γραναζιών ή ιμάντων. Οι τελευταίοι μπορούν να μεταφέρουν την κίνηση και σε απομακρυσμένους από τη μηχανή άξονες. Επίσης στροφαλοφόροι μηχανισμοί που μετατρέπουν μια κυκλική κίνηση σε γραμμική.

Τα φρένα όπου χρησιμοποιούνται για να συγκρατούμε τα μηχανικά στρεφόμενα μέρη σ' έναν επιθυμητό αριθμό στροφών και για ασφάλεια σε περίπτωση αύξησης της ροπής.

Τέλος οι ενισχυτές ροπής χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της μικρής ροπής που παράγει μια μηχανή. Συνήθως λειτουργούν με βοηθητική υδραυλική ενέργεια.

Όλες οι παραπάνω συσκευές έχουν ως στόχο την κατάλληλη προσαρμογή της μηχανής στις απαιτήσεις του φορτίου έτσι ώστε να τηρούνται οι απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής και να έχουμε όσο τον δυνατόν καλύτερο σύστημα. Δεν πρέπει να ξεχνάμε όμως ότι αυτές οι συσκευές έχουν απώλειες, γι' αυτό πρέπει να γίνεται σωστή επιλογή αυτών των συσκευών.

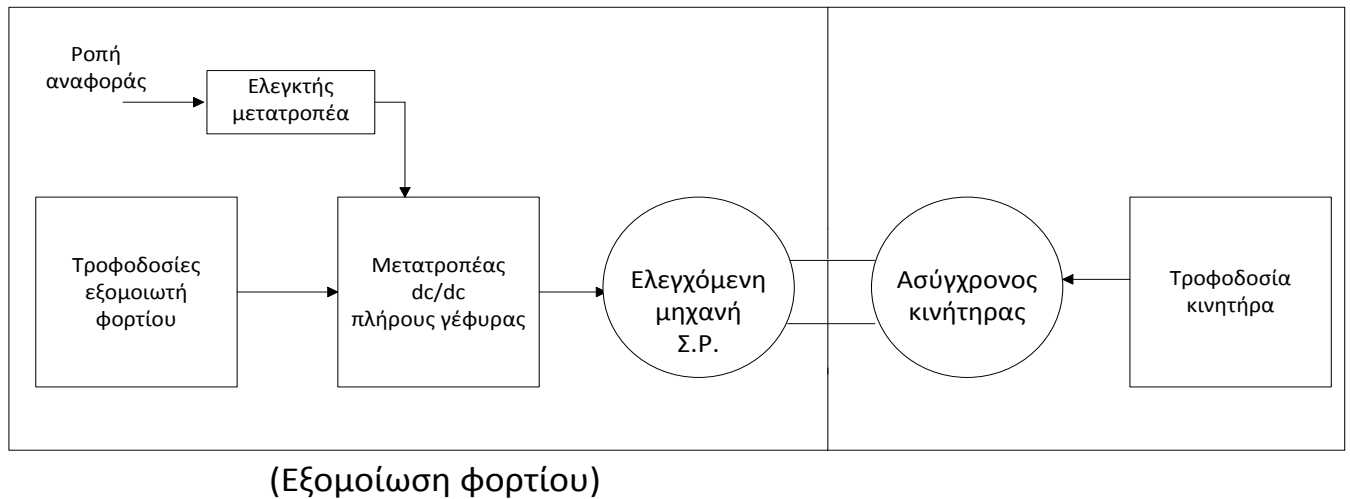
Η μηχανή παραγωγής έργου είναι στην ουσία το φορτίο που πρέπει να ικανοποιήσουμε. Στην ενότητα 1.2 θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των διάφορων ειδών φορτίου καθώς και των χαρακτηριστικών τους.

1.1.3 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική άσκηση έχει ως στόχο τη φόρτιση ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος. Δηλαδή ο χρήστης θα μας δίνει μια επιθυμητή ροπή που θέλει να εφαρμοστεί στον άξονα ενός κινητήρα κι εμείς θα πρέπει να την εφαρμόζουμε. Έτσι μ' αυτόν τον τρόπο θα μπορούμε να φορτίσουμε κάθε μηχανή μ' επιθυμητό εικονικό φορτίο και να μελετάμε τη λειτουργική της συμπεριφορά, τα διάφορα μεγέθη και χαρακτηριστικά στοιχεία της για διάφορα είδη φορτίων.

Επειδή κάθε κινητήρας μπορεί να περιστραφεί και προς τις δύο κατευθύνσεις τόσο με θετική όσο και με αρνητική ροπή, εμείς πρέπει να μπορούμε να εφαρμόσουμε όλες αυτές τις περιπτώσεις ροπής και φοράς περιστροφής στον άξονα του.

Για να μπορέσουμε να πετύχουμε το σκοπό μας, χρησιμοποιήσαμε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης και ένα μετατροπέα dc/dc πλήρους γέφυρας. Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζεται μια σύντομη απεικόνιση του συστήματος που θα αναλυθεί.



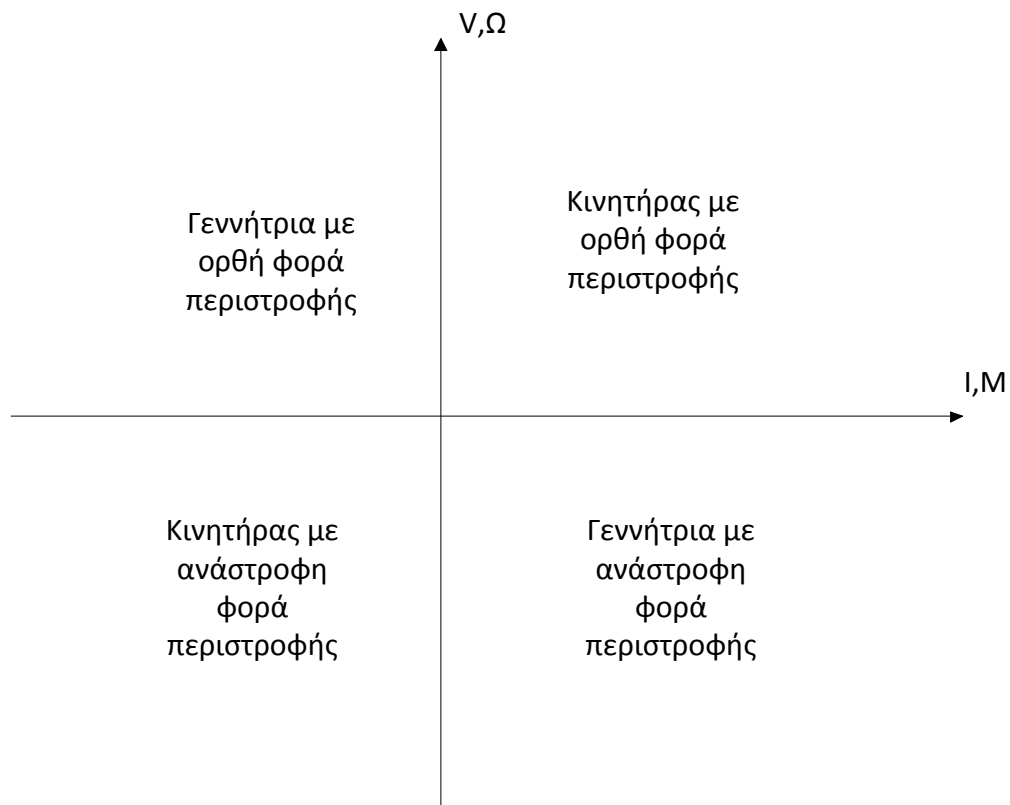
Σχήμα 1.2: Το συνολικό σύστημα

Η μηχανή που εξομοιώνει το φορτίο συμπλέκεται στον ίδιο άξονα με τον κινήτρου που θέλουμε να φορτίσουμε, οπότε οποιαδήποτε ροπή έχει αυτή η μηχανή εφαρμόζεται και στον κινήτρου.

Η ελεγχόμενη μηχανή πρέπει να λειτουργεί άλλες φορές σαν γεννήτρια κι άλλες σαν κινήτρου, ανάλογα με την επιθυμητή ροπή που θέλουμε να φορτίσουμε τον κινήτρου μας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να εξασκηθεί ροπή στον κινήτρου η ελεγχόμενη μηχανή πρέπει να δουλεύει σαν γεννήτρια και να της παρέχει ισχύ ο κινήτρου, με αποτέλεσμα η ροπή του κινήτρου να έχει αντίθετο πρόσημο με την ροπή της ελεγχόμενης μηχανής. Αντίθετα, όταν η ελεγχόμενη μηχανή λειτουργεί σαν κινήτρου παρέχει κι αυτή στον κινήτρου ισχύ, οπότε η ροπή της με την ροπή του κινήτρου έχουν το ίδιο πρόσημο.

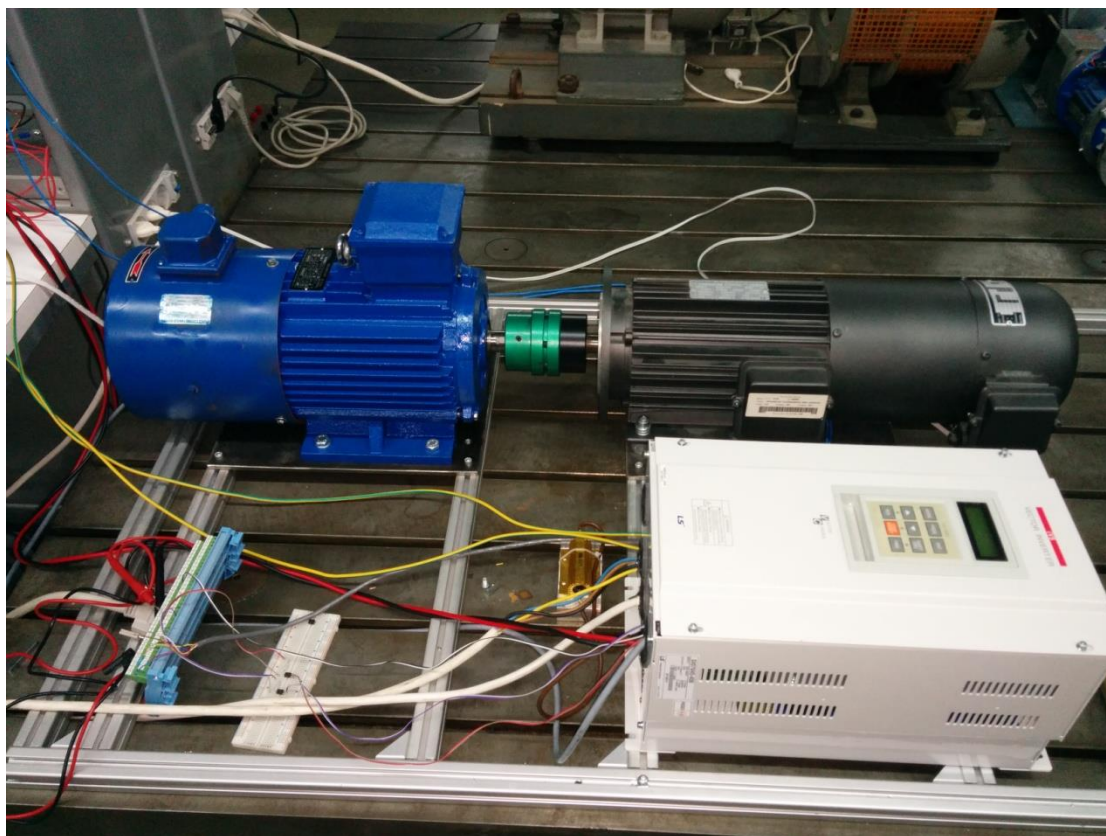
Για παράδειγμα, έστω ένας ανελκυστήρας ο οποίος όταν ανεβάζει άτομα, ασκεί στον κινήτρου ροπή αντίθετης φοράς κι έτσι τον φορτίζει, ενώ όταν κατεβάζει άτομα εξαιτίας της δύναμης της βαρύτητας, ασκεί στον κινήτρου ροπή ίδιας φοράς κι έτσι έχουμε υποβοήθηση του. Σ' αυτήν την περίπτωση μ' ένα κατάλληλο σύστημα θα μπορούσαμε να είχαμε και ανάκτηση ενέργειας. Για να υλοποιήσουμε το φορτίο που απεικονίζει την άρση των ατόμων, δουλεύουμε την ελεγχόμενη μηχανή σαν γεννήτρια ενώ για να υλοποιήσουμε το φορτίο που απεικονίζει την κάθοδο των ατόμων, σαν κινήτρου. Επίσης τόσο η μηχανή που εξομοιώνει το φορτίο όσο κι ο κινήτρου μπορούν να περιστραφούν προς τις δύο κατευθύνσεις.

Για τους παραπάνω λόγους πρέπει να λειτουργούμε τη μηχανή συνεχούς ρεύματος στα τέσσερα τεταρτημόρια, τόσο σαν κινητήρα όσο σαν γεννήτρια και προς τις δύο φορές περιστροφής. Επίσης πρέπει κι ο μετατροπέας μας να είναι αμφίδρομος, δηλαδή να μπορεί να παρέχει ισχύ και προς τις δύο κατευθύνσεις. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η λειτουργία της μηχανής στα τέσσερα τεταρτημόρια.



Σχήμα 1.3: Λειτουργία μηχανής συνεχούς ρεύματος στα τέσσερα τεταρτημόρια [12]

Τέλος το σχήμα 1.4 παρουσιάζει την πραγματική διάταξη του συστήματος μας.



Σχήμα 1.4: Το ηλεκτροκινητήριο σύστημα

Εδώ βλέπουμε την μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης (γκρι χρώμα) που εξομοιώνει το φορτίο της ασύγχρονης μηχανής (μπλε χρώμα). Η ασύγχρονη μηχανή αποτελεί τον κινητήρα του ηλεκτροκινητήριου συστήματος και ελέγχεται από έναν αντιστροφέα που μας επιτρέπει να ρυθμίζουμε τις στροφές της. Υπάρχει σύμπλεξη μεταξύ των αξόνων στις δύο μηχανές, οπότε έχουν κοινή ταχύτητα και ροπή.

1.2 Φορτία

Η μηχανή παραγωγής έργου είναι το φορτίο που πρέπει να ικανοποιηθεί το σύστημα μας. Στην πράξη υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από φορτία, καθώς οι εφαρμογές που υπάρχουν πρέπει να ικανοποιούν τις ανάγκες των ανθρώπων. Για να μπορέσουμε να βρούμε τη χαρακτηριστική ροπής-στροφών για ένα φορτίο πρέπει να ξέρουμε ακριβώς τις συνθήκες της εφαρμογής, φυσικούς νόμους για τον υπολογισμό όλων των δυνάμεων για να εξάγουμε την ολική ροπή, τις διαφορές μεταβολές που μπορούν να συμβούν στο σύστημα μας, τον τρόπο εφαρμογής και την φθορά των εξαρτημάτων με τα χρόνια.

Επίσης, υπάρχουν παράγοντες που δεν μπορούν να υπολογιστούν θεωρητικά αλλά μόνο προσεγγιστικά με πειράματα, όπως η τριβή, ενώ υπάρχουν και άλλοι που εξαρτώνται από μη ελέγξιμες παραμέτρους, όπως οι καιρικές συνθήκες. Έτσι ο ακριβής υπολογισμός της ροπής ενός φορτίου είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία.

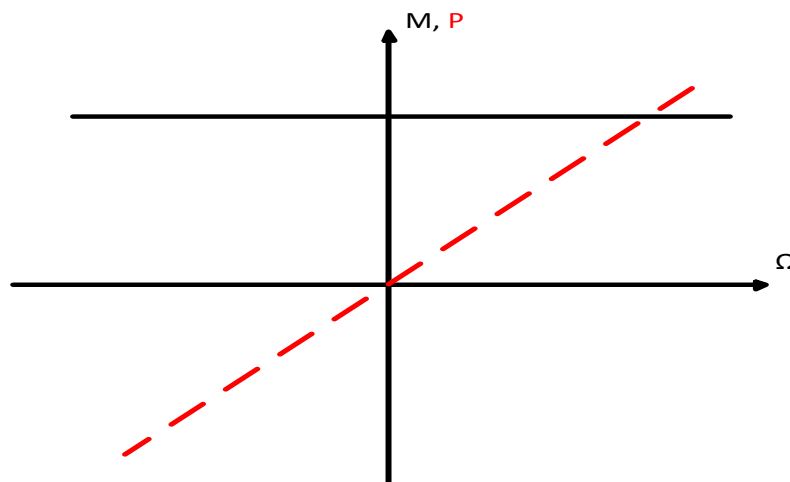
Δεδομένου ότι γνωρίζουμε την ροπή του φορτίου μπορούμε να βρούμε την ισχύ που απαιτείται για να ικανοποιήσει το φορτίο από την σχέση:

$$P_L = M_L \Omega \quad (1.1)$$

Δηλαδή η ισχύς είναι ανάλογη της ταχύτητας και της ροπής του φορτίου. Επίσης η ροπή του φορτίου μπορεί να εξαρτάται από την ταχύτητα ή να είναι ανεξάρτητη, να εξαρτάται από την γωνία περιστροφής, από τοπολογικές συνθήκες ή να είναι μια περιοδική συνάρτηση. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα βασικά είδη φορτίων με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις ροπής φορτίου-στροφών και ισχύς φορτίου-στροφών.

1.2.1 Ροπή φορτίου σταθερή, ανεξάρτητη των στροφών

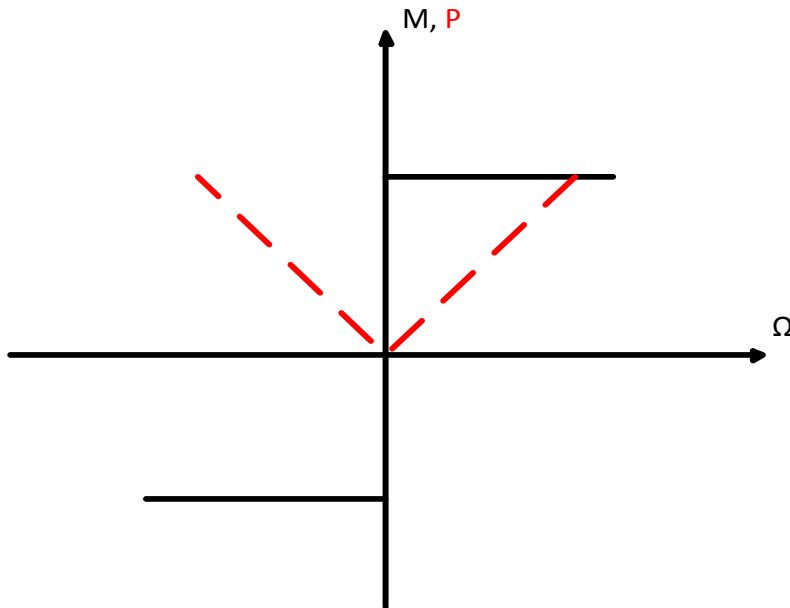
Σ' αυτήν την περίπτωση, η ροπή είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας ενώ η ισχύς ανάλογη της ταχύτητας. Έτσι απεικονίζουμε φορτία που έχουν σκοπό να αναιρούν την βαρύτητα και να προκαλούν παραμόρφωση ελαστικών σωμάτων. Εδώ όταν η ισχύς και η ταχύτητα είναι αρνητικές έχουμε προσφορά ενέργειας από το φορτίο στην μηχανή. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 1.5: Είδος φορτίου κι η αντίστοιχη ισχύς του [9]

1.2.2 Ροπή φορτίου σταθερή, αλλά το πρόσημο εξαρτάται από τις στροφές

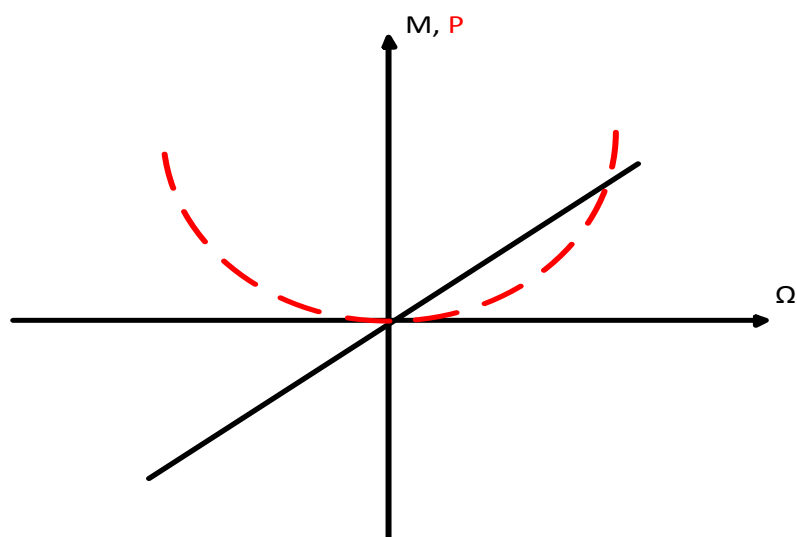
Σ' αυτού του είδους το φορτίο, το πρόσημο της ροπή εξαρτάται από το πρόσημο της ταχύτητας ενώ η ροπή είναι σταθερή σε μέγεθος σε σχέση με την ταχύτητα. Έτσι απεικονίζουμε φορτία που έχουν σκοπό να παράγουν ενέργεια τριβής. Εδώ η ισχύς είναι πάντα θετική οπότε δεν μπορούμε να έχουμε ανάκτηση ενέργειας σε καμία περίπτωση. Στο σχήμα 1.6 που ακολουθεί παρουσιάζετε το παραπάνω είδος φορτίου.



Σχήμα 1.6: Είδος φορτίου κι η αντίστοιχη ισχύς του [9]

1.2.3 Ροπή φορτίου ανάλογη της ταχύτητας

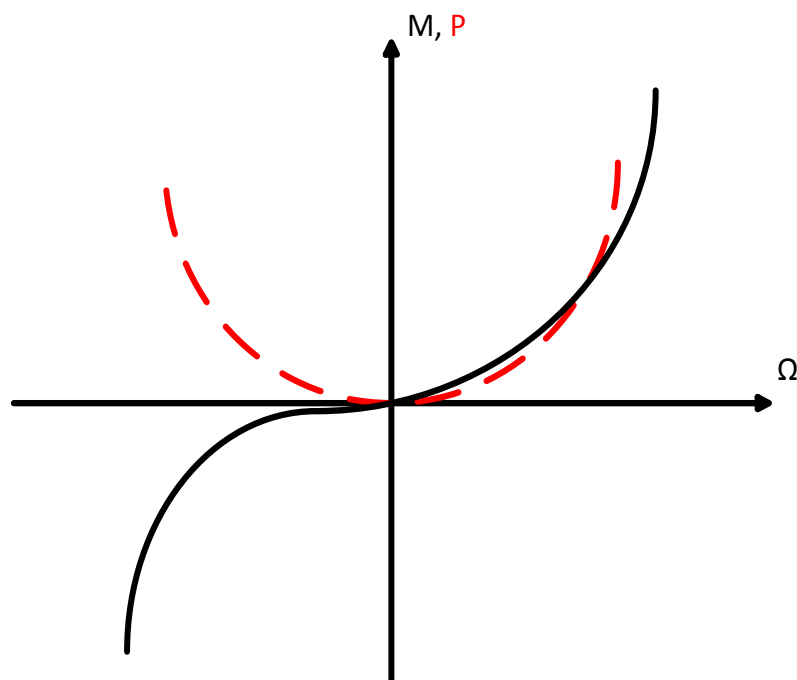
Σ' αυτήν την περίπτωση, η ροπή είναι ανάλογη της ταχύτητας ενώ η ισχύς ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Έτσι απεικονίζουμε φορτία που έχουν σκοπό να ισιώσουν ή να γυαλίσουν χαρτί, ύφασμα κ.ά. Επίσης οι ηλεκτρικές γεννήτριες και η ηλεκτρική πέδη. Το σχήμα 1.7 παρουσιάζει τις γραφικές παραστάσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 1.7: Είδος φορτίου κι η αντίστοιχη ισχύς του [9]

1.2.4 Ροπή φορτίου ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας

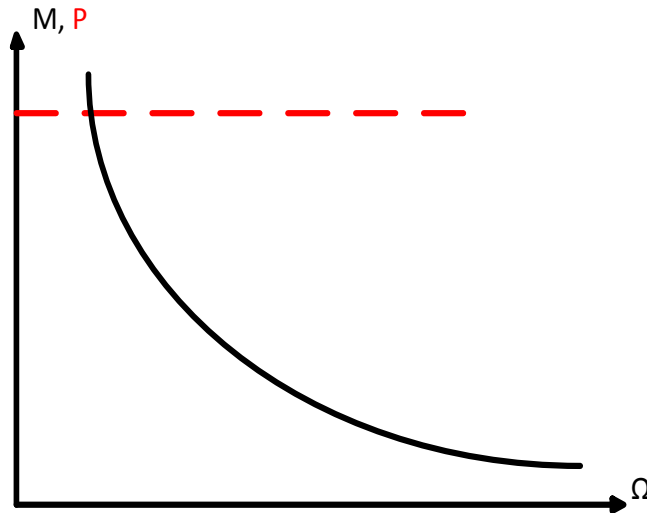
Εδώ, η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας ενώ η ισχύς ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας. Έτσι απεικονίζουμε φορτία που έχουν σκοπό να αντιμετωπίσουν τις τριβές υγρών ή αέρα. Στο σχήμα 1.8 παρουσιάζετε η γραφική παράσταση που περιγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 1.8: Είδος φορτίου κι η αντίστοιχη ισχύς του [9]

1.2.5 Σταθερή ισχύς φορτίου

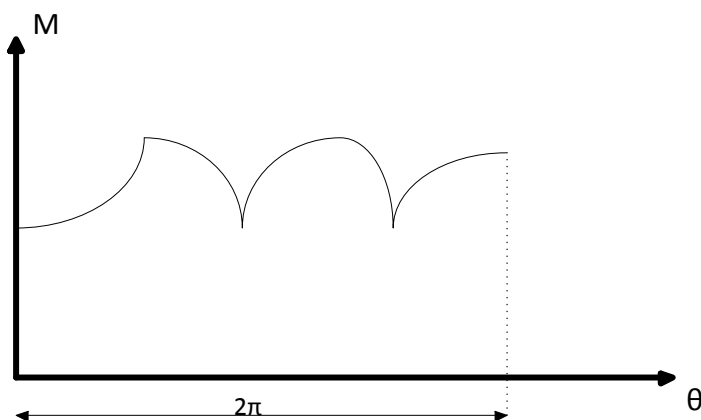
Σ' αυτήν την περίπτωση, η ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας ενώ η ισχύς παραμένει σταθερή. Έτσι απεικονίζονται φορτία για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή δύναμη και ταχύτητα ενώ η ροπή μεταβάλλεται. Στο σχήμα 1.9 βλέπουμε το είδος του φορτίου που περιγράψαμε.



Σχήμα 1.9: Είδος φορτίου κι η αντίστοιχη ισχύς του [9]

1.2.6 Εξάρτηση της ροπής φορτίου από την γωνία περιστροφής

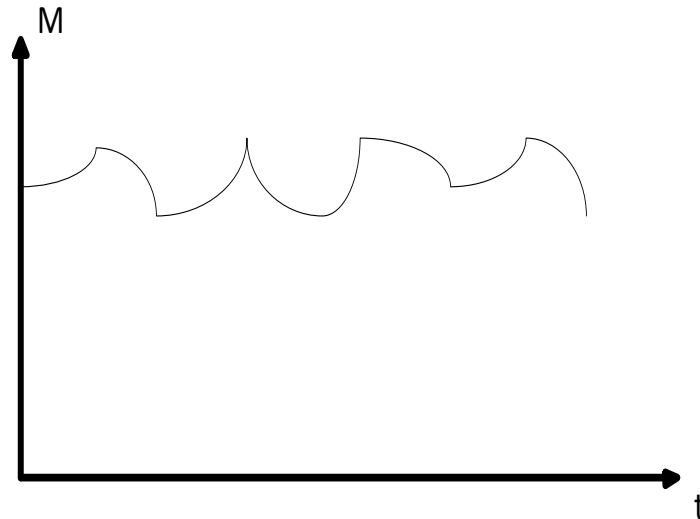
Σ' άλλη περίπτωση, η ροπή εξαρτάται από την θέση του άξονα περιστροφής. Έτσι απεικονίζουμε φορτία που έχουν στρόφαλο. Στο σχήμα 1.10 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που περιγράφηκαν.



Σχήμα 1.10: Είδος φορτίου κι η αντίστοιχη ισχύς του [9]

1.2.7 Εξάρτηση της ροπής με τον χρόνο

Σ' αυτήν την περίπτωση, η ροπή εξαρτάται από τον χρόνο. Έτσι απεικονίζουμε φορτία που μπορεί να αλλάζει η πυκνότητα, η τραχύτητα και η σύσταση των υλικών. Το φορτίο αυτού του είδους φαίνεται στο σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Είδος φορτίου κι η αντίστοιχη ισχύς του [9]

1.3 Μηχανή συνεχούς ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται παραπάνω από έναν αιώνα. Με την εμφάνιση των επαγωγικών κινητήρων έχουν χάσει την θέση που κατείχαν, ωστόσο είναι κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτείται ακριβής έλεγχος ταχύτητας.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στους ηλεκτρομαγνητικούς νόμους. Όταν η μηχανή μας λειτουργεί σαν γεννήτρια, εάν ένας αγωγός βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο και υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ τους, τότε παράγεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη στα άκρα αυτού του αγωγού.

$$V_{επ} = Bul \quad (1.2)$$

Αυτή η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου, του μήκους του αγωγού και της σχετικής ταχύτητας του πεδίου με τον αγωγό.

Όταν η μηχανή μας λειτουργεί σαν κινητήρας, εάν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε αναπτύσσονται δυνάμεις πάνω στον αγωγό.

$$F = BIl \quad (1.3)$$

Αυτές οι δυνάμεις είναι ανάλογες της έντασης του μαγνητικού πεδίου, του μήκους του αγωγού και του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τις μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος. Οι μηχανές Σ.Ρ. με βάση την αρχή λειτουργίας τους, διαθέτουν ψήκτρες και συλλέκτη οπότε παρουσιάζουν επιπρόσθετες απώλειες με χαμηλό βαθμό απόδοσης και θέλουν συχνή συντήρηση. Επίσης για την τροφοδοσία τους χρειάζεται πηγή συνεχούς τάσης, που μερικές φορές δεν είναι άμεσα διαθέσιμη. Τέλος η δομή τους είναι πιο σύνθετη από τις επαγωγικές μηχανές.

Αντίθετα είναι κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτείται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής μιας μηχανής καθώς οι σχέσεις που διέπουν την λειτουργία της είναι απλές και απαιτείται εύκολος έλεγχος.

Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος στην μόνιμη κατάσταση είναι οι ακόλουθες:

Η τάση στα άκρα του τυμπάνου δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_T = V_{\varepsilon\pi} \pm R_T I_T + V_\psi \quad (1.4)$$

όπου $V_{\varepsilon\pi}$ η τάση εξ' επαγωγής, R_T η αντίσταση τυμπάνου, I_T το ρεύμα τυμπάνου και V_ψ η τάση πάνω στις ψήκτρες. Το $-$ είναι για λειτουργία γεννήτριας και το $+$ για λειτουργία κινητήρα.

Η τάση εξ' επαγωγής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_{\varepsilon\pi} = C\Phi\Omega \quad (1.5)$$

όπου C είναι μια σταθερά της μηχανής και Φ η μαγνητική ροή της, ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο διέγερσης της μηχανής.

Η εσωτερική ροπή δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$M_{el} = C\Phi I_T \quad (1.6)$$

Η τάση στο τύλιγμα διέγερσης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_F = R_F I_F \quad (1.7)$$

Η προσλαμβανόμενη ισχύς δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{\pi\rho} = V_T I_T, \quad \text{για κινητήρα} \quad (1.8)$$

$$P_{\pi\rho} = V_{\varepsilon\pi} I_T = M\Omega, \quad \text{για γεννήτρια} \quad (1.9)$$

Η αποδιδόμενη ισχύς δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{\alpha\pi\sigma\delta} = M\Omega = V_{\varepsilon\pi} I_T, \quad \text{για κινητήρα} \quad (1.10)$$

$$P_{\alpha\pi\sigma\delta} = V_T I_T, \quad \text{για γεννήτρια} \quad (1.11)$$

Τέλος η ταχύτητα της μηχανής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Omega = \frac{V_T}{C\Phi} \pm \frac{R_T}{(C\Phi)^2} M \quad (1.12)$$

όπου + για γεννήτρια και – για κινητήρα. Εδώ βλέπουμε ότι για να ελέγξουμε την ταχύτητα της μηχανής πρέπει να ρυθμίσουμε τις αντίστοιχες παραμέτρους της σχέσης (1.12).

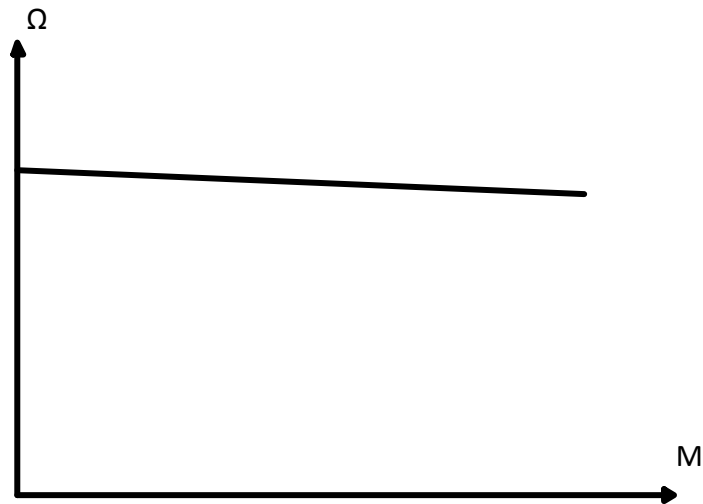
Η μηχανή συνεχούς ρεύματος, ανάλογα με τον τρόπο που έχουν συνδεθεί τα τυλίγματα της διέγερσης και του τυμπάνου, διακρίνεται στις εξής κατηγορίες:

- Μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης
- Μηχανή συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης
- Μηχανή συνεχούς ρεύματος με διέγερση σε σειρά
- Μηχανή συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης
- Μηχανή με μόνιμο μαγνήτη (εδώ δεν έχουμε τύλιγμα διέγερσης και το μαγνητικό πεδίο το δημιουργεί ο μαγνήτης, οπότε όχι έλεγχος στην μαγνητική ροή της μηχανής)

1.3.1 Κινητήρας ξένης διέγερσης

Για να λειτουργήσει η μηχανή μας σαν κινητήρας πρέπει να την τροφοδοτήσουμε με ηλεκτρική ισχύ. Η ταχύτητα τότε είναι χαμηλότερη από την ταχύτητα εν κενώ.

Εδώ το τύλιγμα της διέγερσης και του τυμπάνου είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε και η μαγνητική ροή μπορεί να είναι ανεξάρτητη από το φορτίο της μηχανής.

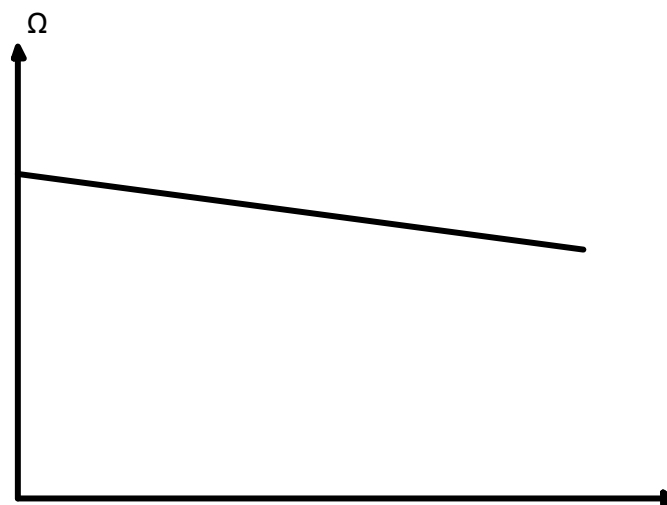


Σχήμα 1.12: Χαρακτηριστική ροπής-στροφών κινητήρα ξένης διέγερσης [5]

Παρατηρούμε ότι έχουμε μικρή πτώση της ταχύτητας αυξανόμενης της ροπής. Έτσι οι μηχανές αυτές είναι κατάλληλες για σταθερές στροφές αλλάζοντας το φορτίο και διατηρώντας σταθερή την μαγνητική ροή.

1.3.2 Κινητήρας παράλληλης διέγερσης

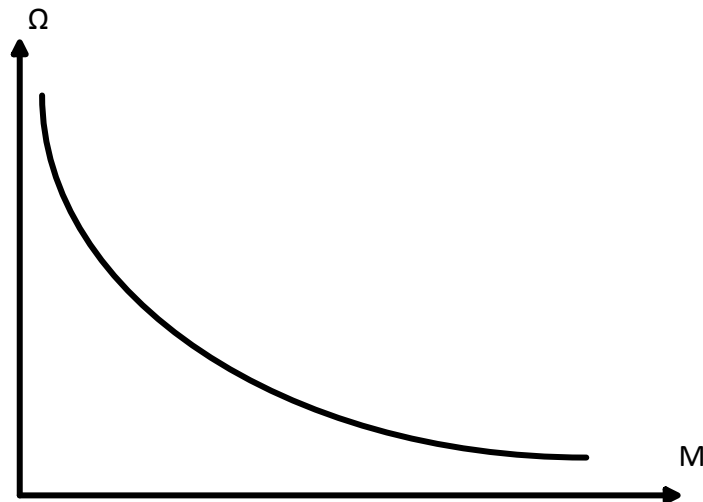
Εδώ το τύλιγμα της διέγερσης και του τυμπάνου συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους, οπότε η μαγνητική ροή μπορεί να είναι ανεξάρτητη από το φορτίο της μηχανής.



Σχήμα 1.13: Χαρακτηριστική ροπής-στροφών κινητήρα παράλληλης διέγερσης [5]

1.3.3 Κινητήρας με διέγερση σε σειρά

Εδώ το τύλιγμα της διέγερσης και του τυμπάνου είναι συνδεδεμένα σε σειρά, οπότε η μαγνητική ροή εξαρτάται άμεσα από το φορτίο της μηχανής καθώς στο τύλιγμα διέγερσης περνάει το ίδιο ρεύμα με το τύλιγμα τυμπάνου.

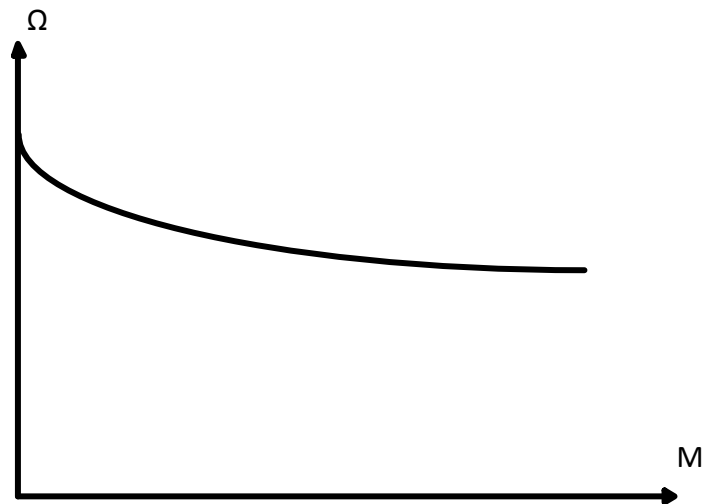


Σχήμα 1.14: Χαρακτηριστική ροπής-στροφών κινητήρα διέγερσης σε σειρά [5]

Για μικρές τιμές της ταχύτητας η ροπή γίνεται πολύ μεγάλη, ενώ για μικρές τιμές ροπής η ταχύτητα γίνεται πολύ μεγάλη. Αυτός ο κινητήρας βρίσκει εφαρμογή σε ηλεκτροκινητήρια συστήματα που απαιτείται μεγάλη ροπή εκκίνησης.

1.3.4 Κινητήρας σύνθετης διέγερσης

Εδώ το τύλιγμα της διέγερσης συνδέεται και σε σειρά και παράλληλα με το τύλιγμα του τυμπάνου, οπότε ανάλογα με την λειτουργία της μηχανής μπορούμε να λάβουμε κάποιες ιδιότητες της μηχανής με διέγερση παράλληλα και σε σειρά.

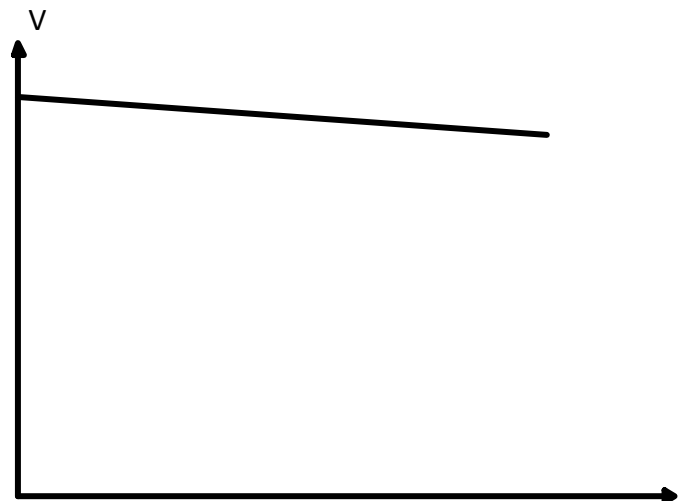


Σχήμα 1.15: Χαρακτηριστική ροπής-στροφών κινητήρα σύνθετης διέγερσης [5]

1.3.5 Γεννήτρια ξένης διέγερσης

Για να λειτουργήσει η μηχανή μας σαν γεννήτρια πρέπει να την τροφοδοτήσουμε με μηχανική ισχύ. Η ταχύτητα τότε είναι υψηλότερη από την ταχύτητα εν κενώ.

Εδώ το τύλιγμα της διέγερσης και του τυμπάνου είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε και η μαγνητική ροή μπορεί να είναι ανεξάρτητη από το φορτίο της μηχανής.

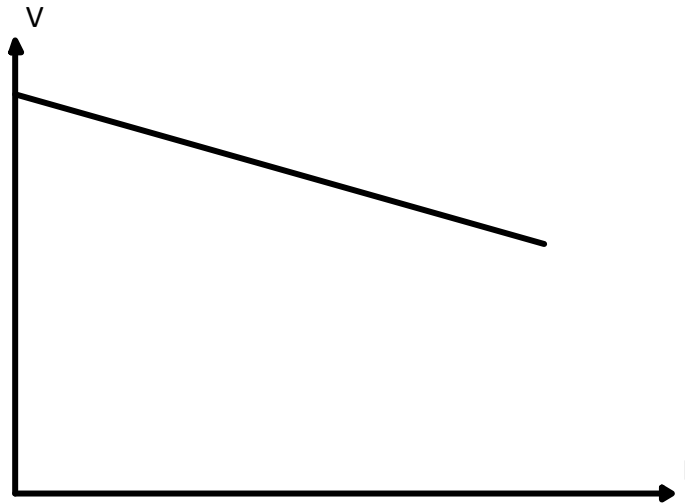


Σχήμα 1.16: Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος γεννήτριας ξένης διέγερσης [5]

Η γεννήτρια παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα τάσης επειδή η διέγερση μπορεί να διατηρηθεί εντελώς σταθερή εξαιτίας του ξένου δικτύου τροφοδοσίας της διέγερσης

1.3.6 Γεννήτρια παράλληλης διέγερσης

Εδώ το τύλιγμα της διέγερσης και του τυμπάνου συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους, οπότε η μαγνητική ροή μπορεί να είναι ανεξάρτητη από το φορτίο της μηχανής.

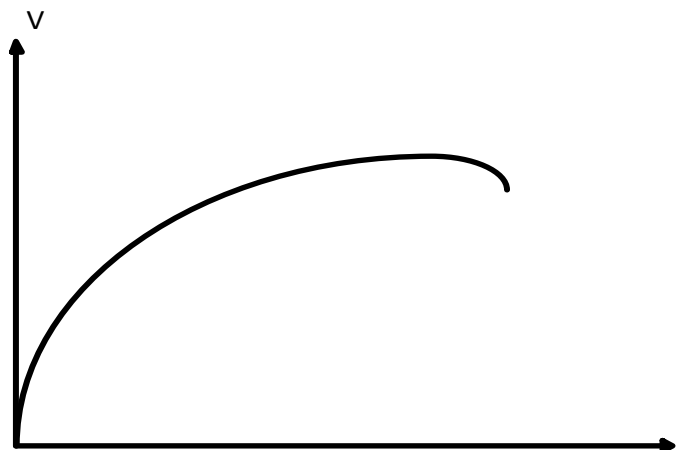


Σχήμα 1.17: Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος γεννήτρια παράλληλης διέγερσης [5]

Εδώ η γεννήτρια παρουσιάζει μεγαλύτερη πτώση τάσης με την αύξηση του φορτίου σε σχέση με την γεννήτρια ξένης διέγερσης.

1.3.7 Γεννήτρια με διέγερση σε σειρά

Εδώ το τύλιγμα της διέγερσης και του τυμπάνου είναι συνδεδεμένα σε σειρά, οπότε η μαγνητική ροή εξαρτάται άμεσα από το φορτίο της μηχανής καθώς στο τύλιγμα διέγερσης περνάει το ίδιο ρεύμα με το τύλιγμα τυμπάνου.

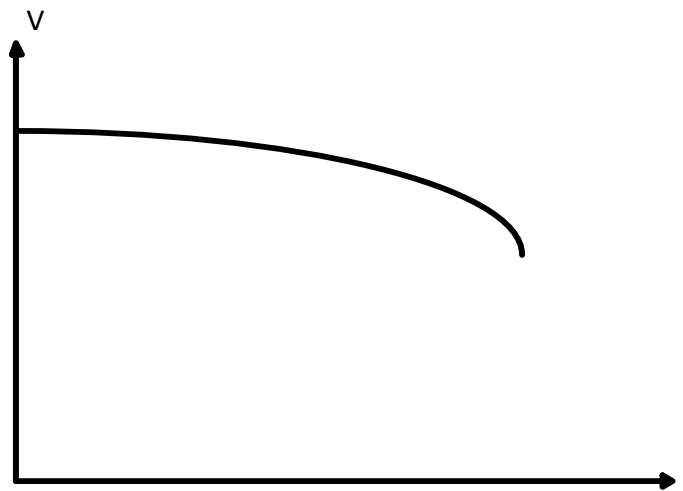


Σχήμα 1.18: Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος γεννήτριας διέγερσης σε σειρά [5]

Η τάση της γεννήτριας με διέγερση σε σειρά αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος και του φορτίου, όμως από ένα σημείο και έπειτα μειώνεται καθώς η πτώση τάσης $V_T = R_T I_T$ αυξάνεται.

1.3.8 Γεννήτρια σύνθετης διέγερσης

Εδώ το τύλιγμα της διέγερσης συνδέεται και σε σειρά και παράλληλα με το τύλιγμα του τυμπάνου, οπότε ανάλογα με την λειτουργία της μηχανής μπορούμε να λάβουμε κάποιες ιδιότητες της μηχανής με διέγερση παράλληλα και σε σειρά.



Σχήμα 1.19: Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος γεννήτριας διέγερσης σε σειρά [5]

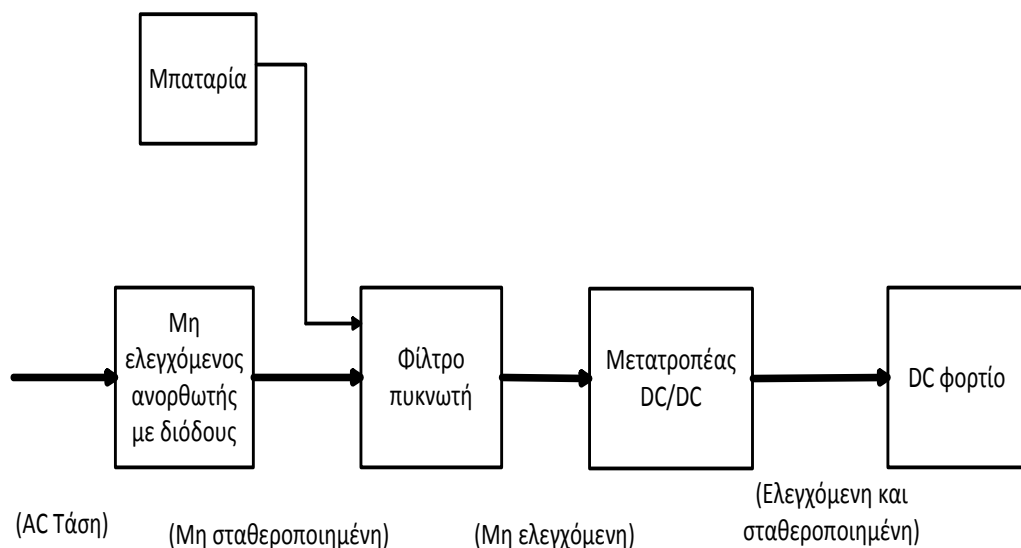
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

DC/DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Οι dc/dc μετατροπείς είναι διατάξεις ισχύος που επιτελούν τη μετατροπή μιας τάσης συνεχούς μορφής, σε μια άλλη συνεχή τάση με ρυθμιζόμενο σταθερό πλάτος ή και πολικότητα. Στους διακοπτικούς μετατροπείς, η μετατροπή της συνεχούς τάσης επιτελείται από διακόπτες, οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα. Ειδικότερα, η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται σε μεταβαλλόμενη τάση υψηλής συχνότητας. Η ελεγχόμενη συνεχής τάση εξόδου λαμβάνεται με φιλτράρισμα της παραγόμενης τάσης υψηλής συχνότητας.

Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε σταθεροποιημένες dc τροφοδοσίες διακοπτικού τύπου και σε εφαρμογές κινητήριων συστημάτων συνεχούς ρεύματος. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η λειτουργία τους.



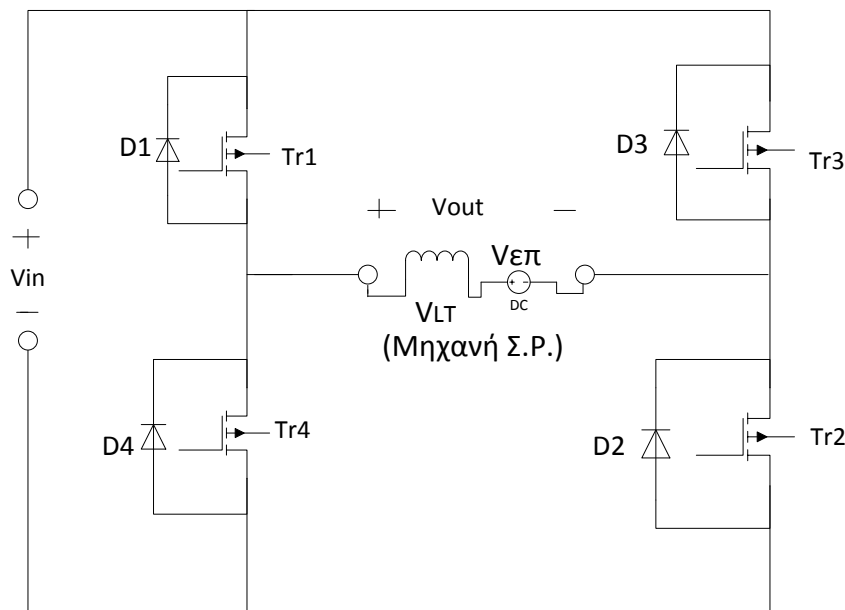
Σχήμα 2.1: Σύστημα μετατροπέα DC/DC [1]

Αρχικά έχουμε την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου η οποία ανορθώνεται μέσω ενός ανορθωτή δημιουργώντας μια συνεχή τάση χωρίς όμως να είναι σταθερή. Για να την σταθεροποιήσουμε χρησιμοποιούμε έναν πυκνωτή, οπότε έτσι λαμβάνουμε μια πλήρως σταθερή συνεχή τάση. Αυτή η τάση είναι μη ελεγχόμενη. Για να ελέγξουμε το εύρος ή και την πολικότητα της, χρησιμοποιούμε έναν dc/dc μετατροπέα. Αυτά τα

συστήματα μπορεί να είναι και αυτόνομα, οπότε την απαραίτητη ενέργεια μπορούμε να την λάβουμε από μια συστοιχία από μπαταρίες. Η τάση των μπαταριών είναι συνεχή οπότε δεν χρειάζεται σ' αυτήν την περίπτωση η ανορθωτική διάταξη.

2.2 DC/DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας απεικονίζεται στο σχήμα 2.2.



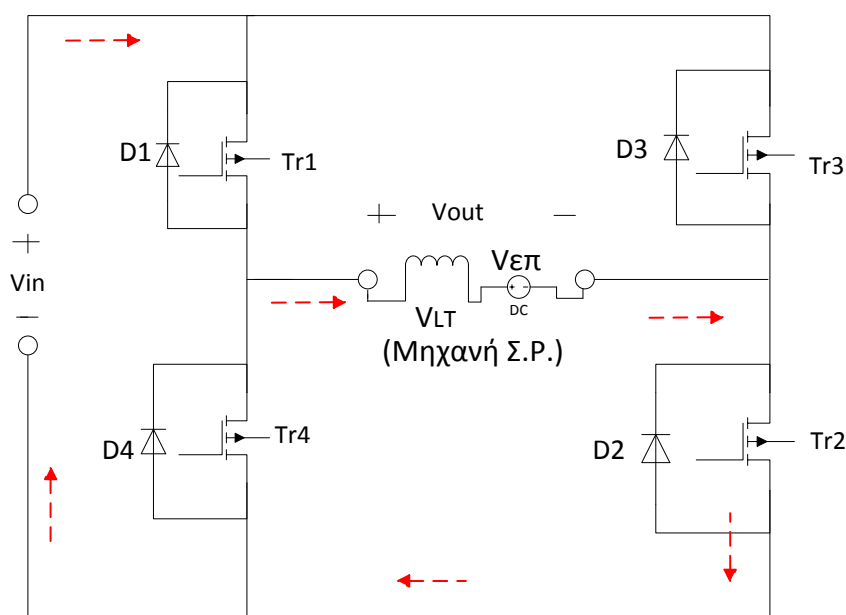
Σχήμα 2.2: DC/DC μετατροπέας πλήρους γέφυρας

Ο μετατροπέας αυτός είναι κατάλληλος για τον έλεγχο μηχανών συνεχούς ρεύματος καθώς επιτρέπει την λειτουργία της μηχανής στα τέσσερα τεταρτημόρια και επίσης ανάκτηση ενέργειας με κατάλληλο έλεγχο της παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων, χωρίς να αλλάξουμε την τοπολογία του μετατροπέα.

2.2.1 Λειτουργία αριστερόστροφου κινητήρα

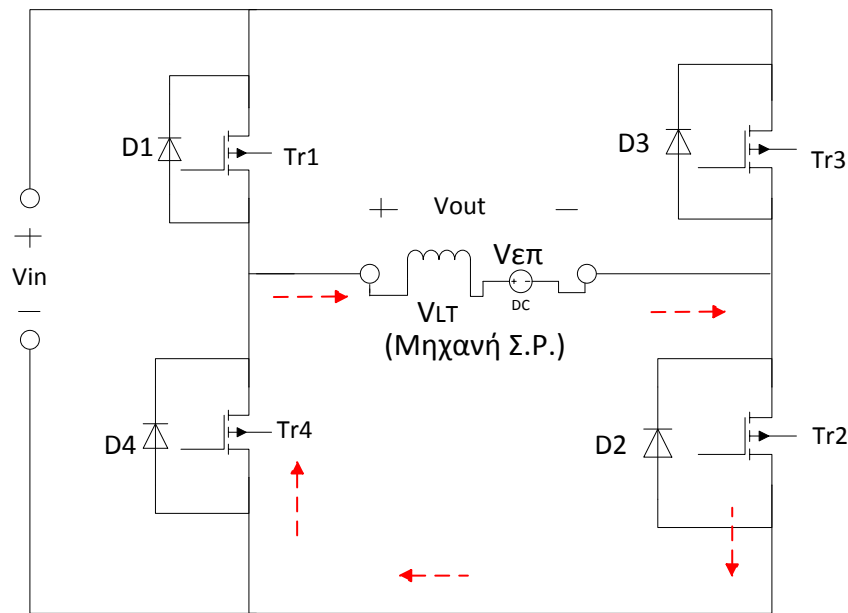
Για να λειτουργήσει η μηχανή μας σαν αριστερόστροφος κινητήρας πρέπει το τρανζίστορ Tr2 να είναι συνέχεια σε αγωγή και να παλμοδοτούμε σε κατάλληλες χρονικές στιγμές το τρανζίστορ Tr1. Μ' αυτόν τον τρόπο είναι σαν να έχουμε έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck), όπου η αναλυτική λειτουργία του θα περιγραφεί σ' επόμενη ενότητα.

Την χρονική στιγμή που το τρανζίστορ Tr1 άγει, η ενέργεια μεταφέρεται από την είσοδο στην μηχανή μέσω των Tr1-φορτίο-Tr2, ενώ όλα τ' άλλα διακοπτικά στοιχεία δεν άγουν. Όσο χρονικό διάστημα άγει το Tr1 ένα μέρος αυτής της ενέργειας αποθηκεύεται στην επαγωγή. Το σχήμα 2.3 θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη συγκεκριμένη λειτουργία όταν τα τρανζίστορ Tr1 και Tr2 άγουν.



Σχήμα 2.3: Λειτουργία αριστερόστροφου κινητήρα με Tr1 και Tr2 σε κατάσταση αγωγή

Στο επόμενο χρονικό διάστημα όπου το τρανζίστορ Tr1 δεν άγει η επαγωγή πρέπει να δώσει την ενέργεια που αποθήκευσε. Για να συμβεί αυτό, το πηνίο κρατάει σταθερή ροή του ρεύματος κι αλλάζει πολικότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αγωγή της διόδου D4 οπότε έχουμε ροή ενέργειας από τη μηχανή το Tr2 και την D4. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η συγκεκριμένη λειτουργία όταν Tr2 και D4 άγουν.



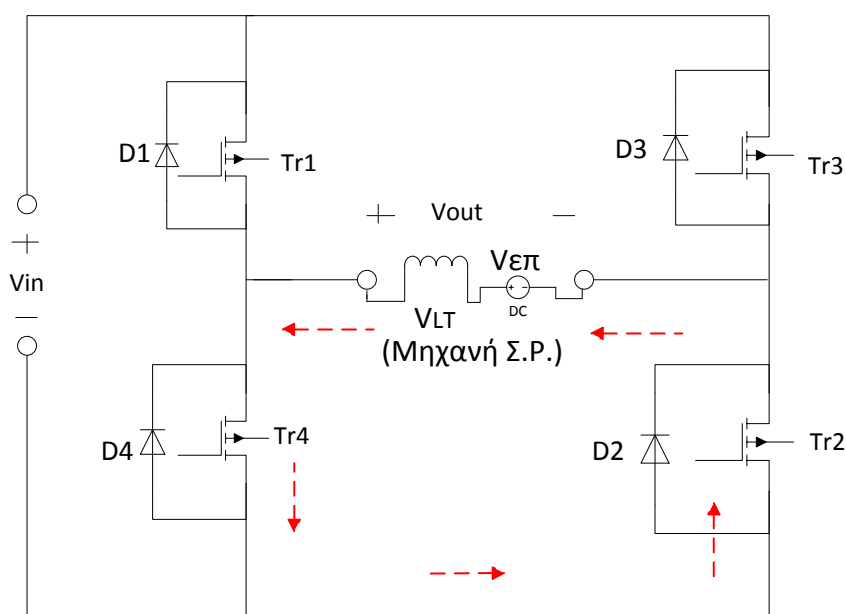
Σχήμα 2.4: Λειτουργία αριστερόστροφου κινητήρα με D4 και Tr2 σε κατάσταση αγωγής

2.2.2 Λειτουργία αριστερόστροφης γεννήτριας

Για να λειτουργήσει η μηχανή μας σαν αριστερόστροφη γεννήτρια πρέπει να παλμοδοτούμε σε κατάλληλες χρονικές στιγμές το τρανζίστορ Tr4. Μ' αυτόν τον τρόπο, είναι σαν να έχουμε έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost) του οποίου η αναλυτική λειτουργία του θα περιγραφεί σ' άλλη ενότητα.

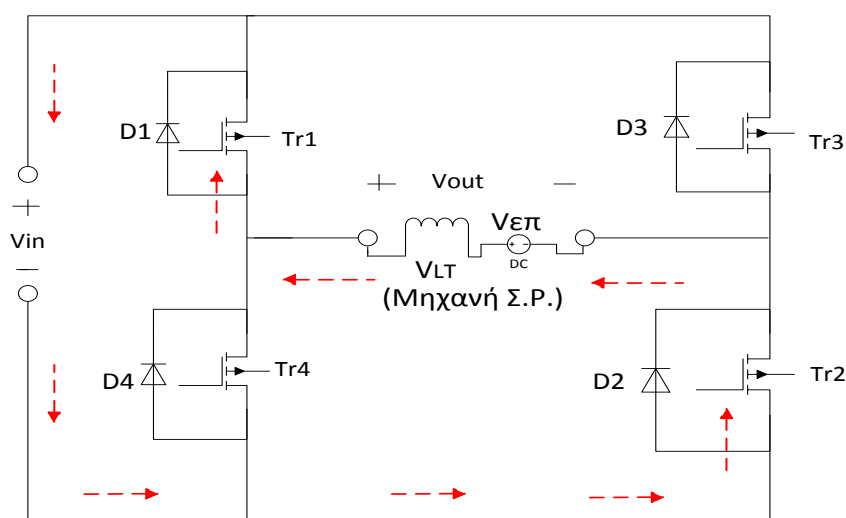
Εφόσον η μηχανή μας λειτουργεί σαν γεννήτρια παράγει μια συνεχή τάση V_{out} . Όμως η τάση αυτή είναι μικρότερη από την τάση που θέλουμε να πάρουμε στην είσοδο του μετατροπέα μας, που την ονομάζουμε V_{in} , γι' αυτό ο μετατροπέας λειτουργεί σαν μετατροπέα ανύψωσης τάσης για να πάρουμε την επιθυμητή τιμή τάσης στην είσοδο του.

Για να συμβεί αυτό πρέπει να παλμοδοτήσουμε το τρανζίστορ Tr4 για ένα χρονικό διάστημα οπότε έχουμε ροή ενέργειας από την μηχανή το Tr4 και την D2. Σ' αυτό το χρονικό διάστημα έχουμε αποθήκευση της ενέργειας στην επαγωγή. Το σχήμα 2.5 θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε την συγκεκριμένη λειτουργία όταν Tr4 και D2 άγουν.



Σχήμα 2.5: Λειτουργία αριστερόστροφης γεννήτριας με D2 και Tr4 σε κατάσταση αγωγής

Την επόμενη χρονική στιγμή όπου το τρανζίστορ Tr4 είναι ανοικτό η επαγωγή πρέπει να δώσει την ενέργεια που αποθήκευσε. Για να συμβεί αυτό, το πηνίο κρατάει σταθερή ροή του ρεύματος κι αλλάζει πολικότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αγωγή της διόδου D1 οπότε έχουμε ροή ενέργειας από την μηχανή την D1 την είσοδο και την D2. Το σχήμα 2.6 θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη συγκεκριμένη λειτουργία όταν D1 και D2 άγουν.

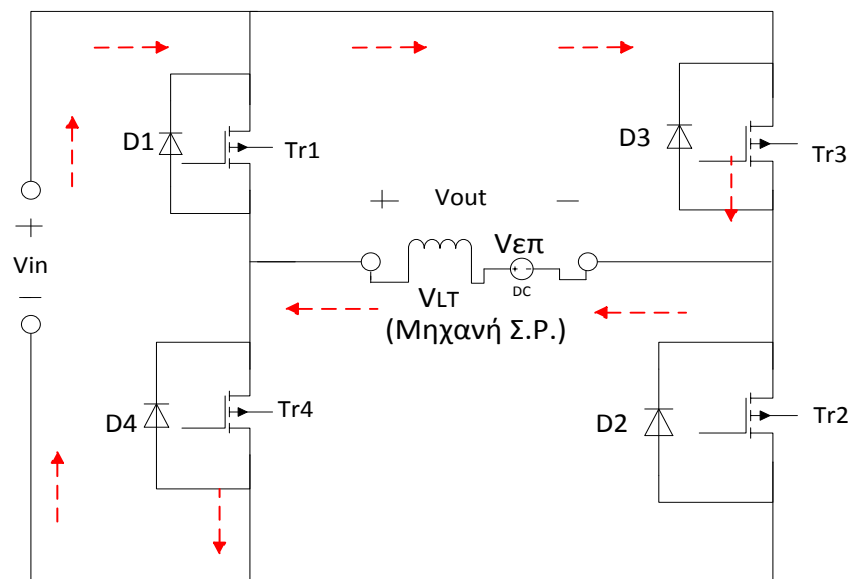


Σχήμα 2.6: Λειτουργία αριστερόστροφης γεννήτριας με D1 και D2 σε κατάσταση αγωγής

2.2.3 Λειτουργία δεξιόστροφου κινητήρα

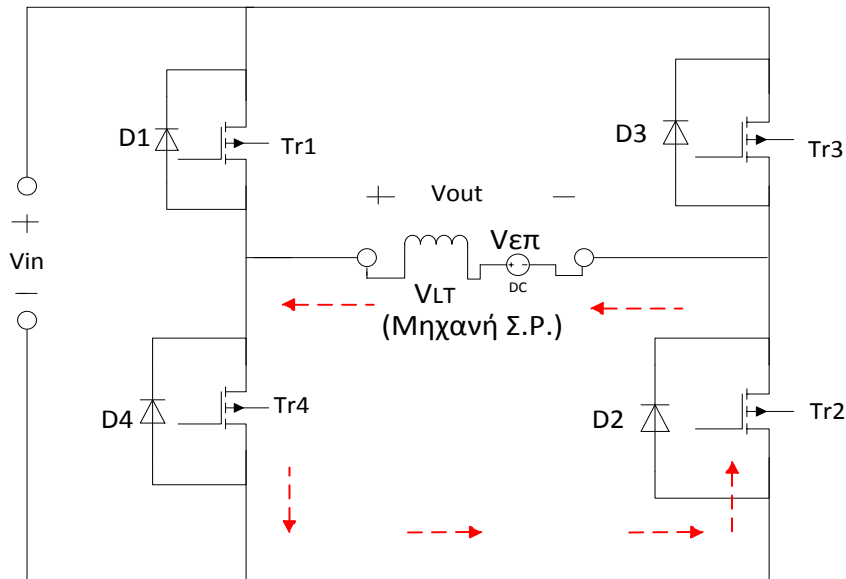
Για να λειτουργήσει η μηχανή μας σαν δεξιόστροφος κινητήρας πρέπει ν' αλλάξει πολικότητα η V_{out} . Για να συμβεί αυτό πρέπει το τρανζίστορ Tr4 να είναι συνέχεια σε αγωγή και να παλμοδοτούμε σε κατάλληλες χρονικές στιγμές το τρανζίστορ Tr3, αντίστοιχη λειτουργία με την υποενότητα 2.2.1, όταν δουλεύαμε την μηχανή μας σαν αριστερόστροφο κινητήρα με τον έλεγχο των τρανζίστορ Tr1 και Tr2. Μ' αυτόν τον τρόπο είναι σαν να έχουμε έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck) .

Την χρονική στιγμή που το τρανζίστορ Tr3 άγει η ενέργεια μεταφέρεται από την είσοδο στην έξοδο μέσω των Tr3-φορτίο-Tr4 ενώ όλα τ' άλλα διακοπτικά στοιχεία δεν άγουν. Όσο χρονικό διάστημα άγει το τρανζίστορ Tr3 ένα μέρος αυτής της ενέργειας αποθηκεύεται στην επαγωγή. Στο σχήμα 2.7 θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη συγκεκριμένη λειτουργία όταν τρανζίστορ Tr3 και Tr4 άγουν.



Σχήμα 2.7: Λειτουργία δεξιόστροφου κινητήρα με Tr3 και Tr4 σε κατάσταση αγωγής

Στο επόμενο χρονικό διάστημα όπου το τρανζίστορ Tr3 δεν άγει η επαγωγή πρέπει να δώσει την ενέργεια που αποθήκευσε. Για να συμβεί αυτό, το πηνίο κρατάει σταθερή ροή του ρεύματος κι αλλάζει πολικότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αγωγή της διόδου D2 οπότε έχουμε ροή ενέργειας από την μηχανή το Tr4 και την D2. Το σχήμα 2.8 θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη συγκεκριμένη λειτουργία όταν Tr4 και D2 άγουν.



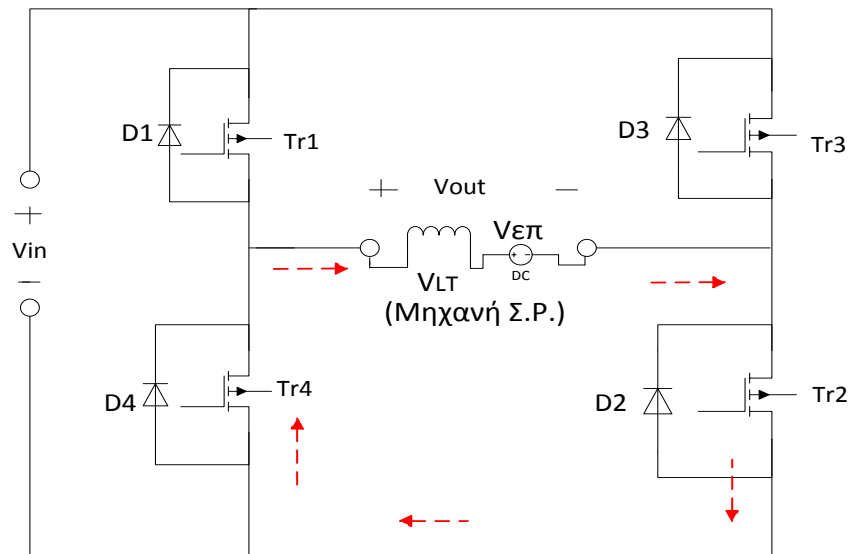
Σχήμα 2.8: Λειτουργία δεξιόστροφου κινητήρα με D2 και Tr4 σε κατάσταση αγωγής

2.2.4 Λειτουργία δεξιόστροφης γεννήτριας

Για να λειτουργήσει η μηχανή μας σαν δεξιόστροφη γεννήτρια πρέπει ν' αλλάξει φορά περιστροφής ο άξονας της μ' αποτέλεσμα να αλλάξει πολικότητα η $V_{επ}$ και κατά συνέπεια και η V_{out} . Για να συμβεί αυτό πρέπει να παλμοδοτούμε σε κατάλληλες χρονικές στιγμές το τρανζίστορ Tr2, κάτι ανάλογο που κάναμε και προηγουμένως όταν δουλεύαμε την μηχανή μας σαν αριστερόστροφη γεννήτρια με τον έλεγχο άλλου τρανζίστορ. Μ' αυτόν τον τρόπο είναι σαν να έχουμε έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost).

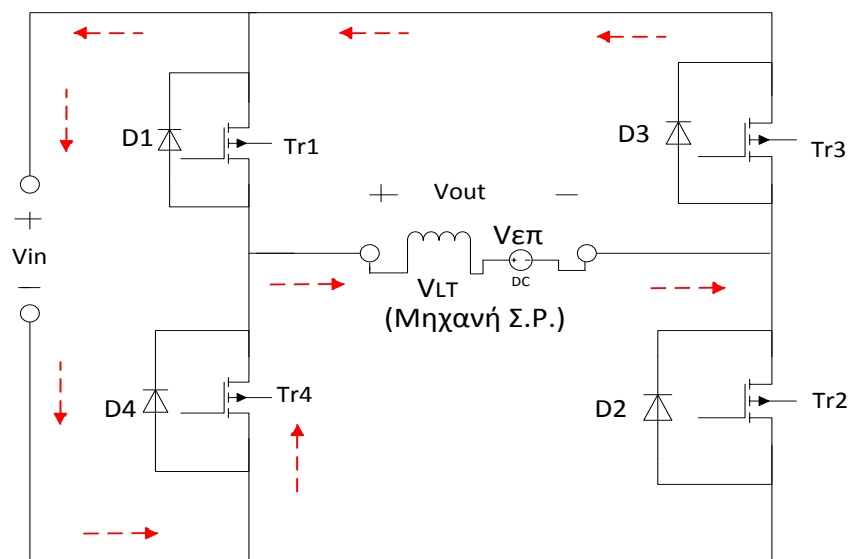
Εφόσον η μηχανή μας λειτουργεί σαν γεννήτρια παράγει μια συνεχή τάση V_{out} . Όμως η τάση αυτή είναι μικρότερη από την τάση που θέλουμε να πάρουμε στην είσοδο του μετατροπέα μας, που την ονομάζουμε V_{in} , γι' αυτό και δουλεύουμε τον μετατροπέα μας σαν μετατροπέα ανύψωσης τάσης για να πάρουμε την επιθυμητή τιμή τάσης στην είσοδο του μετατροπέα.

Για να συμβεί αυτό πρέπει να παλμοδοτήσουμε το τρανζίστορ Tr2 για ένα χρονικό διάστημα οπότε έχουμε ροή ενέργειας από την μηχανή το Tr2 και την D4. Σ' αυτό το χρονικό διάστημα έχουμε κι αποθήκευση ενός μέρους της ενέργειας στην επαγωγή. Το σχήμα 2.9 θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη συγκεκριμένη λειτουργία όταν Tr2 και D4 άγουν.



Σχήμα 2.9: Λειτουργία δεξιόστροφης γεννήτριας με D4και Tr2 σε κατάσταση αγωγής

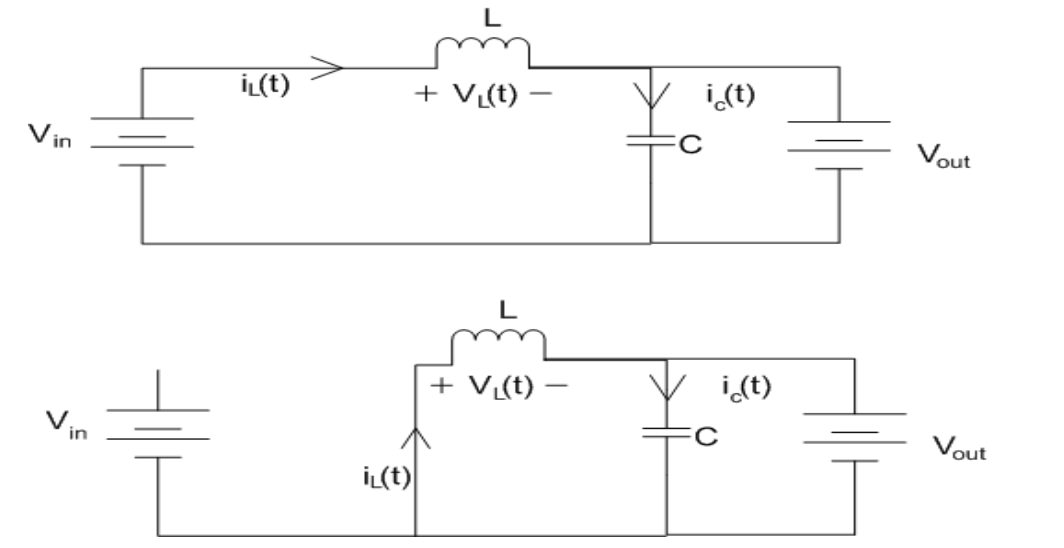
Την επόμενη χρονική στιγμή όπου το τρανζίστορ Tr2 δεν άγει η επαγωγή πρέπει να δώσει την ενέργεια που αποθήκευσε. Για να συμβεί αυτό, το πηνίο κρατάει σταθερή ροή του ρεύματος κι αλλάζει πολικότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αγωγή της διόδου D3 οπότε έχουμε ροή ενέργειας από την μηχανή την D3 την είσοδο και την D4. Το παρακάτω σχήμα θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη συγκεκριμένη λειτουργία όταν D3 και D4 άγουν.



Σχήμα 2.10: Λειτουργία δεξιόστροφης γεννήτριας με D4και D3 σε κατάσταση αγωγής

2.3 Λειτουργία μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck)

Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης μας παρέχει μια σταθερή και ελεγχόμενη συνεχή τάση με εύρος από μηδέν μέχρι V_{in} . Η τοπολογία του φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Τοπολογία buck μετατροπέα

Το χρονικό διάστημα που παλμοδοτούμε το τρανζίστορ η ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή στο φορτίο. Επίσης ένα μέρος από αυτήν την ενέργεια αποθηκεύεται στην επαγωγή, ενώ η διόδος ελεύθερης διέλευσης είναι σε αποκοπή. Όταν σταματήσουμε να παλμοδοτούμε το τρανζίστορ, την ενέργεια στο φορτίο την παρέχει η επαγωγή και ο πυκνωτής εξόδου. Αυτό συμβαίνει διότι η επαγωγή θέλοντας να κρατήσει ίδια ροή ρεύματος, αλλάζει πολικότητα κι έτσι κάνει την διόδο να άγει.

Ανάλογα με τον μηδενισμό ή όχι του ρεύματος στο πηνίο διακρίνουμε δύο περιπτώσεις λειτουργίας:

- Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος (CCM)
- Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος (DCM)

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει παρακάτω κάνουμε δύο παραδοχές. Πρώτον ότι ο μετατροπέας μας δουλεύει στη μόνιμη κατάσταση ,δηλαδή οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων επαναλαμβάνονται ακριβώς ίδιες σε κάθε περίοδο T_s . Δεύτερον τα στοιχεία του κυκλώματος που χρησιμοποιούνται είναι ιδανικά.

2.3.1 Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος

Ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης λειτουργεί στη συνεχή αγωγή, όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα σ' όλη τη διάρκεια της περιόδου T_S . Με βάση τις κυματομορφές που φαίνονται στο σχήμα 2.12 μπορούμε να εξάγουμε τις βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του μετατροπέα στη συνεχή αγωγή.

Στη μόνιμη κατάσταση το ρεύμα στο πηνίο στην αρχή και στο τέλος της περιόδου έχει την ίδια τιμή οπότε η μέση τιμή της τάσης στο πηνίο είναι μηδέν. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} V_L &= \int_0^{\infty} v_L(t) dt = 0 \Rightarrow \int_0^{t_{on}} (V_{in} - V_o) dt + \int_{t_{on}}^{T_S} -V_o dt = 0 \\ &\Rightarrow (V_{in} - V_o) \delta T_S - V_o (1 - \delta) T_S = 0 \\ &\Rightarrow \delta = \frac{V_o}{V_{in}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η τάση εξόδου εξαρτάται μόνο από τον λόγο κατάτμησης δ εφόσον η τάση εισόδου είναι σταθερή.

Θεωρούμε τον μετατροπέα ιδανικό οπότε η ισχύς εισόδου ισούται με την ισχύ εξόδου αφού δεν έχουμε απώλειες. Οπότε:

$$P_{in} = P_o \Rightarrow V_{in} I_{in} = V_o I_o \Rightarrow I_o = \frac{V_{in} I_{in}}{V_o} \Rightarrow I_o = \frac{I_{in}}{\delta} \quad (2.2)$$

Από την κυματομορφή του ρεύματος στο πηνίο μπορούμε να βρούμε τη σχέση μεταξύ του ρεύματος εξόδου και των ακραίων τιμών των ρευμάτων του πηνίου. Δηλαδή το ρεύμα εξόδου είναι το εμβαδόν του ρεύματος του πηνίου οπότε:

$$I_o = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \quad (2.3)$$

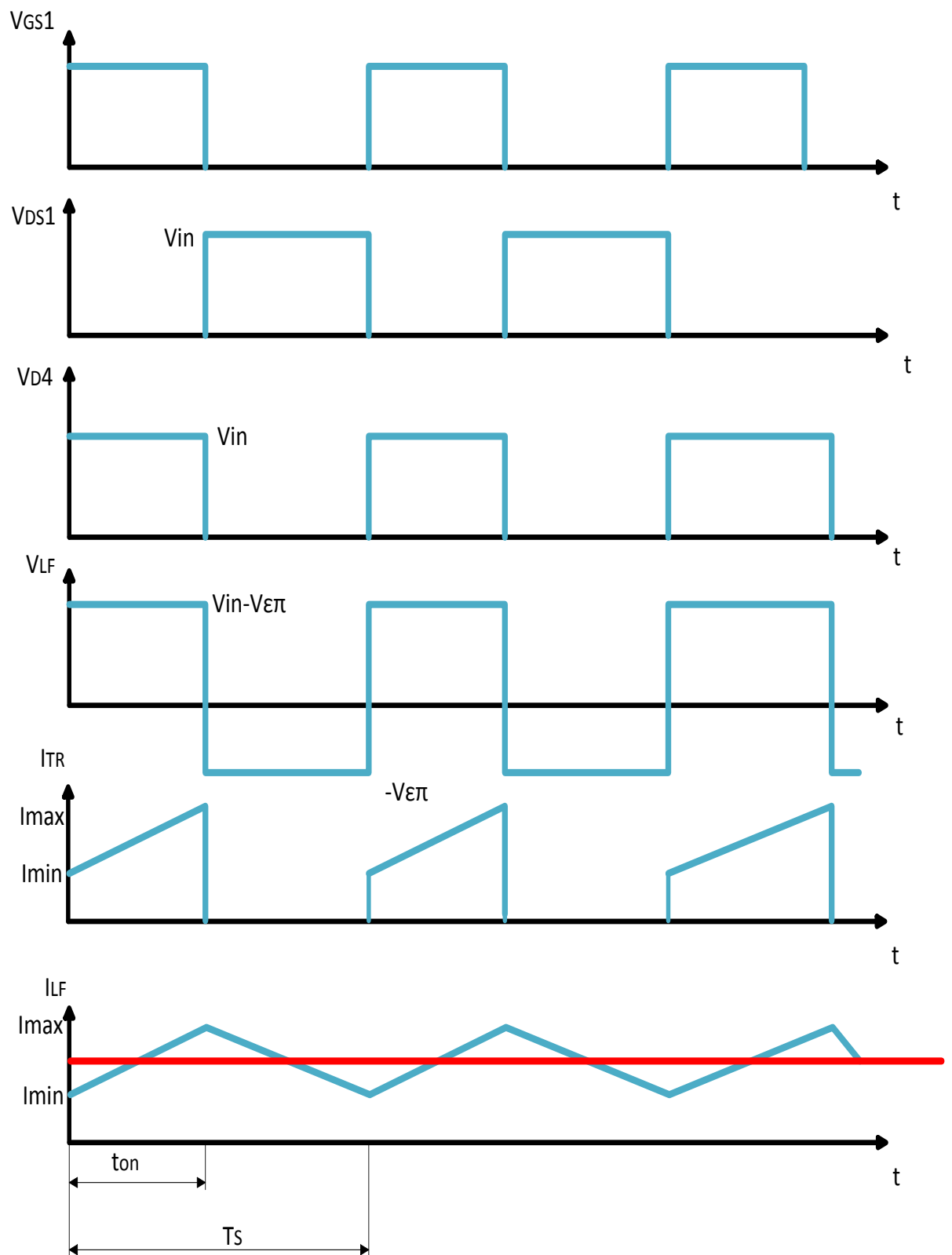
Τέλος η διακύμανση του ρεύματος του πηνίου δίνεται με ολοκλήρωση της σχέσης:

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

στο διάστημα μιας περιόδου οπότε έχουμε:

$$I_{\max} - I_{\min} = \frac{V_o}{V_{in}} (1 - \delta) T_S \quad (2.4)$$

Στο σχήμα 2.12 φαίνονται οι κυματομορφές χαρακτηριστικών μεγεθών του μετατροπέα στη συνεχή αγωγή.



Σχήμα 2.12: Κυματομορφές buck στη συνεχή αγωγή [2]

2.3.2 Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος

Κατά τη λειτουργία του μετατροπέα στην ασυνεχή αγωγή, υπάρχει κάποιο χρονικό διάστημα στο οποίο το ρεύμα της επαγωγής γίνεται μηδέν μέσα σε μια περίοδο. Το οριακό ρεύμα είναι αυτό που γίνεται μηδέν ακριβώς όταν συμπληρώνεται μια περίοδος. Αυτό σημαίνει ότι $I_{\min}=0$ οπότε σύμφωνα με τις σχέσεις (2.3), (2.4) έχουμε:

$$I_{o,b} = \frac{V_o}{L_F} (1 - \delta) T_S \quad (2.5)$$

Δεδομένου ότι έχουμε μηδενισμό στο ρεύμα του πηνίου, δεν ισχύουν οι εξισώσεις της λειτουργίας συνεχούς αγωγής οπότε με βάση τις κυματομορφές που φαίνονται στο σχήμα 2.13 έχουμε :

$$\begin{aligned} V_L &= \int_0^{\infty} v_L(t) dt = 0 \Rightarrow \int_0^{t_{on}} (V_{in} - V_o) dt + \int_{t_{on}}^{\Delta_1} -V_o dt = 0 \\ \Rightarrow (V_{in} - V_o) \delta T_S - V_o (1 - \delta) \Delta_1 &= 0 \\ \Rightarrow V_o &= \frac{\delta}{\delta + \Delta_1} V_{in} \end{aligned} \quad (2.6)$$

όπου Δ_1 είναι ο χρόνος εκφόρτισης του πηνίου.

Για να υπολογίσουμε τον χρόνο Δ_1 πρέπει να κοιτάξουμε τις κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης του πηνίου οπότε:

$$I_{\max} = \frac{V_o}{L_F} \Delta_1 T_S \quad (2.7)$$

και

$$I_o = I_{\max} (\delta + \Delta_1) \frac{T_S}{2} \quad (2.8)$$

Από σχέσεις (2.7), (2.8) και λύνοντας ως προς $\delta + \Delta_1$ έχουμε:

$$\delta + \Delta_1 = \frac{2L_F I_o}{V_o T_S \Delta_1} \quad (2.9)$$

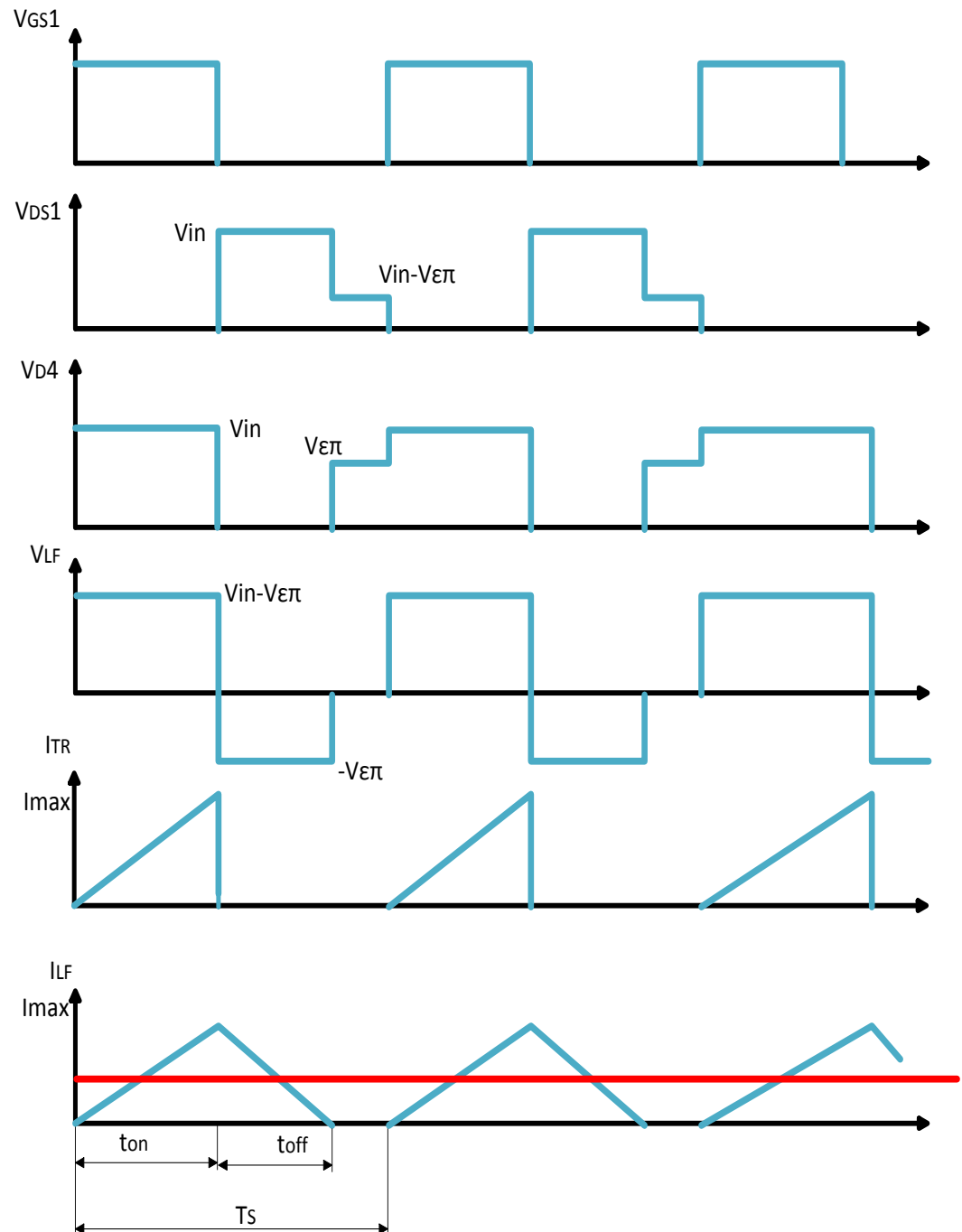
Από σχέσεις (2.6), (2.9) έχουμε:

$$\Delta_1 = \frac{2L_F I_o}{\delta V_{in} T_S} \quad (2.10)$$

Από σχέσεις (2.6), (2.10) έχουμε:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + 2 \frac{I_o}{V_{in} T_S / L_F}} \quad (2.11)$$

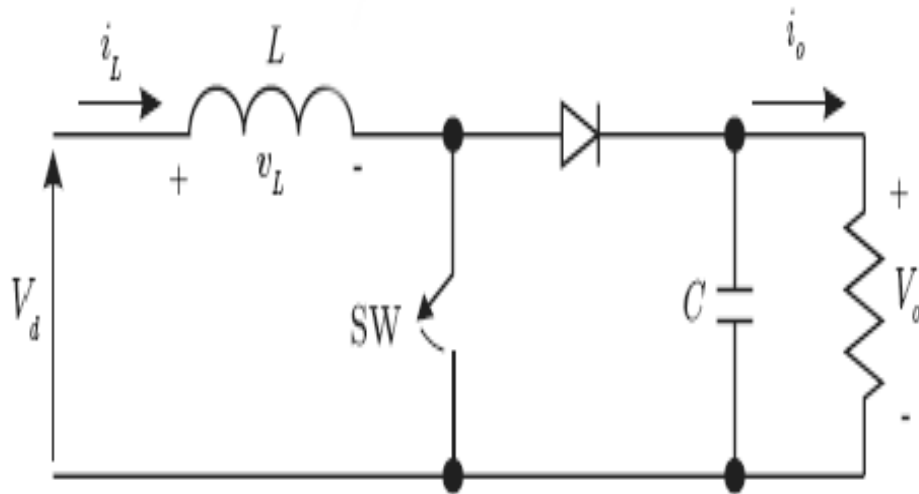
Στο σχήμα 2.13 φαίνονται οι κυματομορφές χαρακτηριστικών μεγεθών του μετατροπέα στην ασυνεχή αγωγή.



Σχήμα 2.13: Κυματομορφές buck στην ασυνεχή αγωγή [2]

2.4 Λειτουργία μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost)

Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης μας παρέχει μια σταθερή και ελεγχόμενη συνεχή τάση, με εύρος από V_{in} μέχρι μια μεγάλη τιμή. Η τοπολογία του φαίνεται στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Τοπολογία boost μετατροπέα

Το χρονικό διάστημα που παλμοδοτούμε το τρανζίστορ η ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή στην επαγωγή όπου την αποθηκεύει, ενώ η διόδος ελεύθερης διέλευσης είναι σε αποκοπή. Όταν σταματήσουμε να παλμοδοτούμε το τρανζίστορ, την ενέργεια στο φορτίο την παρέχει η επαγωγή και η πηγή. Αυτό συμβαίνει διότι η επαγωγή θέλει να δώσει την ενέργεια της, οπότε κρατάει ίδια τη ροή του ρεύματος κι αλλάζει πολικότητα, γι' αυτό έχουμε κι ανύψωση της τάσης αφού πλέον $V_o = V_{in} + V_L$, ενώ η διόδο άγει αφού πολώνεται ορθά κι έτσι δημιουργείται δρόμος για την ροή του ρεύματος στο φορτίο .

Ανάλογα με τον μηδενισμό ή όχι του ρεύματος στο πηνίο διακρίνουμε δύο περιπτώσεις λειτουργίας:

- Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος (CCM)
- Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος (DCM)

2.4.1 Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος

Ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης λειτουργεί στη συνεχή αγωγή όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα σ' όλη τη διάρκεια της περιόδου T_s . Με βάση τις κυματομορφές που φαίνονται στο σχήμα 2.15 μπορούμε να εξάγουμε τις βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία του μετατροπέα στην συνεχή αγωγή.

Στην μόνιμη κατάσταση το ρεύμα στο πηνίο στην αρχή και στο τέλος της περιόδου έχει την ίδια τιμή οπότε η μέση τιμή της τάσης στο πηνίο είναι μηδέν. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} V_L &= \int_0^{\infty} v_L(t) dt = 0 \Rightarrow \int_0^{t_{on}} V_{in} dt + \int_{t_{on}}^{T_s} (V_{in} - V_o) dt = 0 \\ &\Rightarrow V_{in} \delta T_s + (V_{in} - V_o)(1 - \delta) T_s = 0 \\ &\Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - \delta} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η τάση εξόδου εξαρτάται μόνο από τον λόγο κατάτμησης δ εφόσον η τάση εισόδου είναι σταθερή. Επίσης βλέπουμε ότι για $\delta=1$ η τάση εξόδου γίνεται θεωρητικά άπειρη αλλά στην πράξη αυτό δεν συμβαίνει. Δεν δουλεύουμε ποτέ σ' αυτήν την περιοχή τον μετατροπέα μας, γιατί θα καταστρέψουμε τα στοιχεία του. Στην πράξη η τάση εξόδου μπορεί να γίνει τέσσερις με πέντε φορές μεγαλύτερη.

Θεωρούμε τον μετατροπέα ιδανικό οπότε η ισχύς εισόδου ισούται με την ισχύ εξόδου αφού δεν έχουμε απώλειες. Οπότε:

$$P_{in} = P_o \Rightarrow V_{in} I_{in} = V_o I_o \Rightarrow I_o = \frac{V_{in} I_{in}}{V_o} \Rightarrow I_o = I_{in} (1 - \delta) \quad (2.13)$$

Από την κυματομορφή του ρεύματος στο πηνίο μπορούμε να βρούμε τη σχέση μεταξύ του ρεύματος εισόδου και των ακραίων τιμών των ρευμάτων του πηνίου. Δηλαδή το ρεύμα εισόδου είναι το εμβαδόν του ρεύματος στο πηνίο οπότε:

$$I_{in} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \quad (2.14)$$

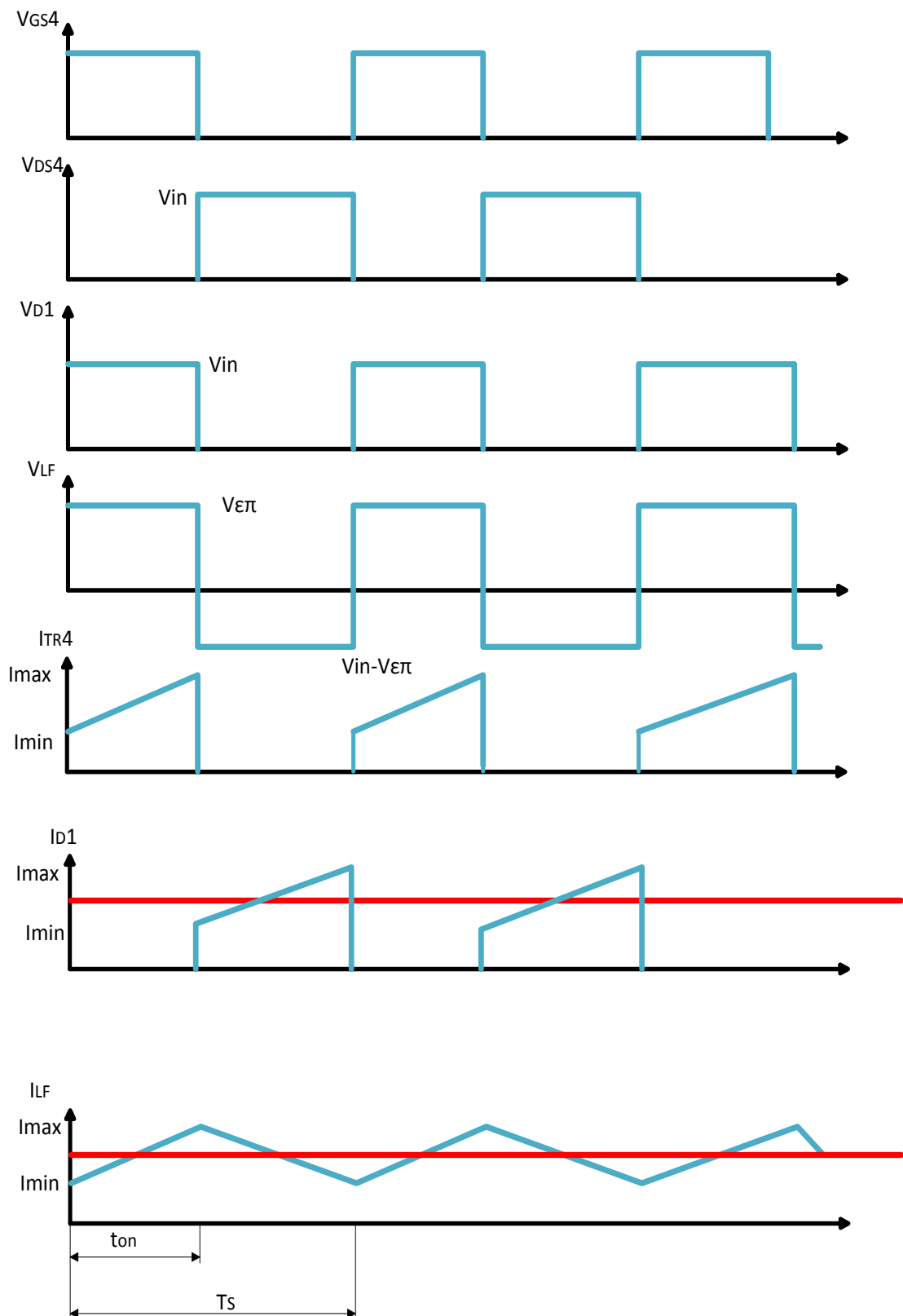
Τέλος η διακύμανση του ρεύματος του πηνίου δίνεται με ολοκλήρωση της σχέσης:

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

στο διάστημα μιας περιόδου οπότε έχουμε:

$$I_{\max} - I_{\min} = \frac{V_{in}}{L_F} \delta T_s \quad (2.15)$$

Στο σχήμα 2.15 φαίνονται οι κυματομορφές χαρακτηριστικών μεγεθών του μετατροπέα στη συνεχή αγωγή:



Σχήμα 2.15: Κυματομορφές boost στη συνεχή αγωγή [2]

2.4.2 Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος

Κατά τη λειτουργία του μετατροπέα στην ασυνεχή αγωγή, υπάρχει κάποιο χρονικό διάστημα στο οποίο το ρεύμα της επαγωγής γίνεται μηδέν μέσα σε μια περίοδο. Το οριακό ρεύμα είναι αυτό που γίνεται μηδέν ακριβώς όταν συμπληρώνεται μια περίοδος. Αυτό σημαίνει ότι $I_{\min}=0$ οπότε σύμφωνα με τις σχέσεις (2.13), (2.14) έχουμε:

$$I_{o,b} = \frac{I_{\max}}{2} (1 - \delta) \quad (2.16)$$

Από την κυματομορφή του ρεύματος στο πηνίο και την κλίση της ευθείας έχουμε ότι:

$$I_{\max} = \frac{V_{in}}{L_F} \delta T_S \quad (2.17)$$

Δεδομένου ότι έχουμε μηδενισμό στο ρεύμα του πηνίου, δεν ισχύουν οι εξισώσεις της λειτουργίας συνεχούς αγωγής οπότε με βάση τις κυματομορφές που φαίνονται στο σχήμα 2.16 έχουμε :

$$\begin{aligned} V_L &= \int_0^{\infty} v_L(t) dt = 0 \Rightarrow \int_0^{t_{on}} V_{in} dt + \int_{t_{on}}^{\Delta_1} (V_{in} - V_o) dt = 0 \\ \Rightarrow V_{in} \delta T_S + (V_{in} - V_o)(1 - \delta) \Delta_1 &= 0 \\ \Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} - 1 &= \frac{\delta}{\Delta_1} \end{aligned} \quad (2.18)$$

όπου Δ_1 είναι ο χρόνος εκφόρτισης του πηνίου.

Το ρεύμα εξόδου ισούται με τη μέση τιμή του ρεύματος της διόδου οπότε:

$$I_o = \frac{I_{\max}}{2} \Delta_1 \quad (2.19)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.16), (2.18) έχουμε:

$$I_o = \frac{V_{in}}{2 L_F} \delta \Delta_1 T_S \quad (2.20)$$

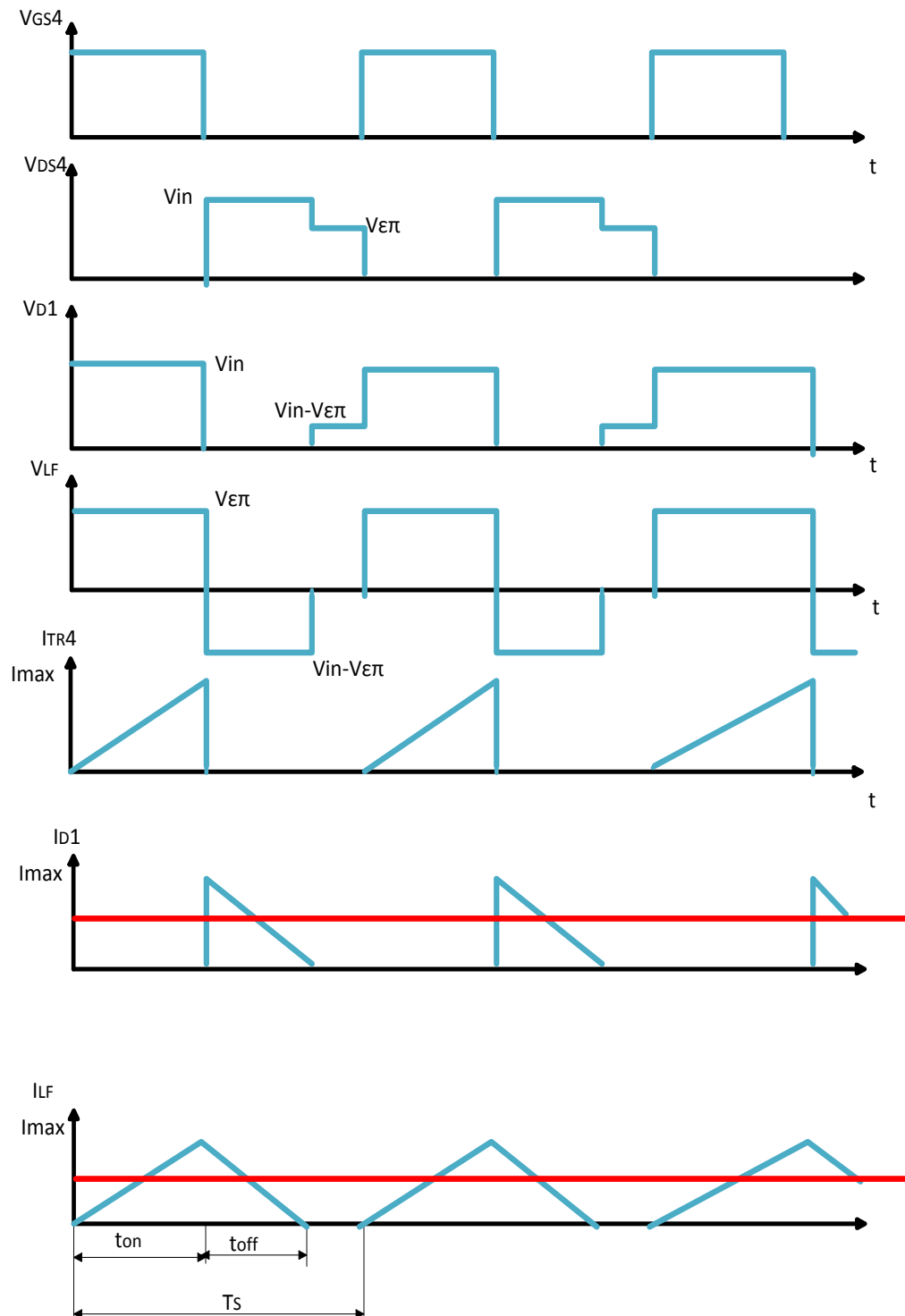
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.17), (2.19) και εκτελώντας πράξεις έχουμε:

$$V_o = V_{in} \frac{\delta^2 + 2 I_N}{2 I_N} \quad (2.21)$$

όπου:

$$I_N = \frac{I_o L_F}{V_{in} T_S} \quad (2.22)$$

Στο σχήμα 2.16 φαίνονται οι κυματομορφές χαρακτηριστικών μεγεθών του μετατροπέα στην ασυνεχή αγωγή,



Σχήμα 2.16: Κυματομορφές boost στην ασυνεχή αγωγή [2]

2.5 Μέθοδος παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι ελέγχου των διακοπτικών ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), η μέθοδος ελέγχου PID, η μέθοδος ελέγχου με ολίσθηση στον χώρο κατάστασης, μέθοδοι ελέγχου ρεύματος κ.ά. Αυτές οι μέθοδοι έχουν διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κι ανάλογα με την κάθε εφαρμογή επιλέγεται η πιο αποτελεσματική.

Οι μέθοδοι ελέγχου ρεύματος διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Η μέθοδος της μέγιστης τιμής με σταθερή συχνότητα
- Η μέθοδος της ελάχιστης τιμής με σταθερή συχνότητα
- Η μέθοδος ζώνης υστέρησης

2.5.1 Η μέθοδος της ζώνης υστέρησης

Επιλέξαμε να ελέγξουμε τα διακοπτικά μας στοιχεία με τη μέθοδο της ζώνης υστέρησης. Η λογική αυτού του ελέγχου είναι η εξής:

Καθορίζεται μια μέση τιμή ρεύματος που διαρρέει το πηνίο καθώς επίσης κι ένα μικρό εύρος απόκλισης από την επιθυμητή τιμή. Κάθε χρονική στιγμή μετράμε την τιμή του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο και τη συγκρίνουμε με τα όρια του ρεύματος που έχουμε επιλέξει κι ανάλογα, εάν το ρεύμα βρίσκεται στα επιθυμητά όρια ή όχι, παλμοδοτούμε κατάλληλα τα διακοπτικά στοιχεία μας. Έστω ότι θέλουμε μια τιμή ρεύματος I_{ref} κι όριο απόκλισης του ρεύματος Δi τότε παλμοδοτούμε τα στοιχεία μας με τον ακόλουθο τρόπο:

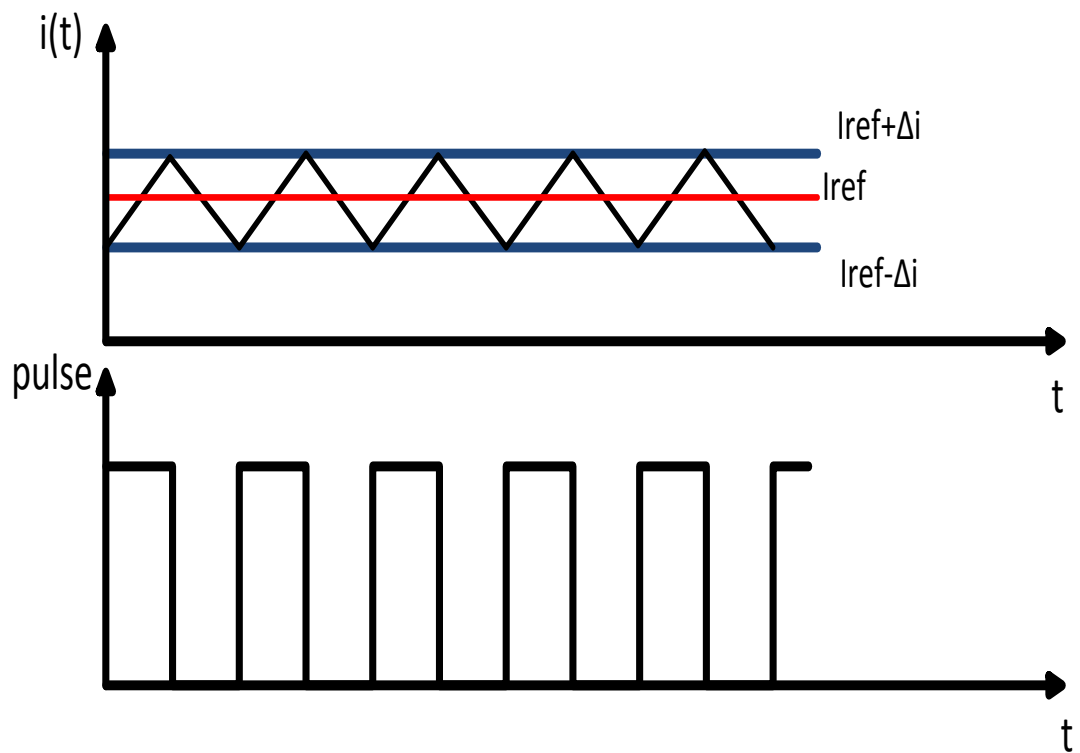
Εάν $i(t) < I_{ref} - \Delta i$ τότε $V_{GS} = \text{High}$

Εάν $i(t) > I_{ref} + \Delta i$ τότε $V_{GS} = \text{Low}$

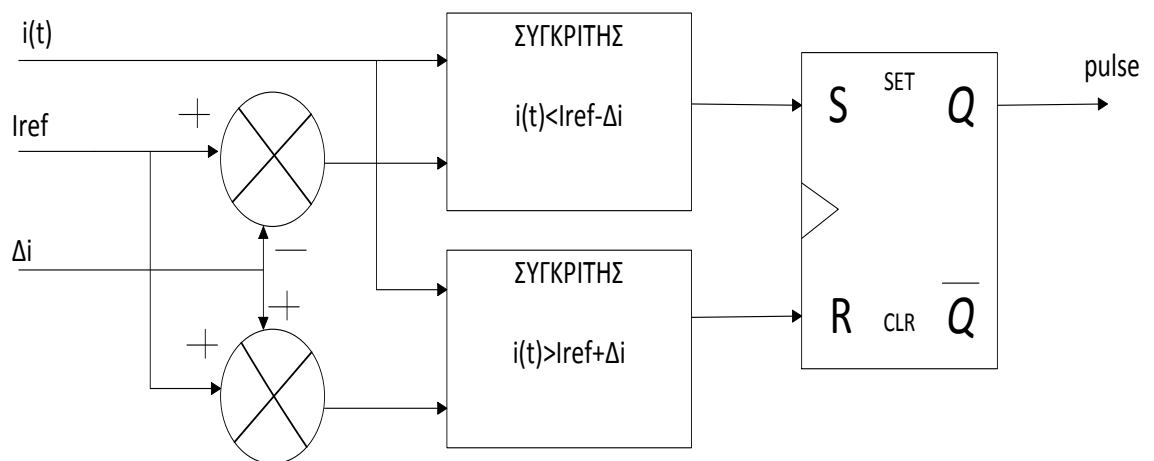
έτσι έχουμε φραγή του ρεύματος μέσα σε προκαθορισμένα όρια. Για να λειτουργήσει σωστά αυτή η μέθοδος πρέπει η μέτρηση του ρεύματος να γίνεται σωστά, με καλή ακρίβεια και τα δείγματα να λαμβάνονται σε μικρά χρονικά διαστήματα.

Μπορούμε να μικρύνουμε το εύρος του ρεύματος Δi μέχρι ένα όριο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διακοπτική συχνότητα των ημιαγωγικών στοιχείων εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από το εύρος ρεύματος οπότε μικρό εύρος μεγάλης διακοπτικής συχνότητας κι έτσι αυξημένες διακοπτικές απώλειες.

Τα σχήματα 2.17 και 2.18 θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε καλύτερα την τεχνική ελέγχου ρεύματος με ζώνη υστέρησης.



Σχήμα 2.17: Λειτουργία του ελεγκτή υστέρησης



Σχήμα 2.18: Υλοποίηση του ελεγκτή υστέρησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB/SIMULINK

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των επιμέρους συστημάτων όσο και η ολική διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, οι προσομοιώσεις των μηχανών, που θα χρησιμοποιηθούν με τα πραγματικά τους χαρακτηριστικά, των πηγών τροφοδοσίας, των διακοπτικών στοιχείων καθώς και τα κυκλώματα ελέγχου τους. Τέλος, η προσομοίωση του μετατροπέα πλήρους γέφυρας καθώς και οι επιμέρους λειτουργίες του στα τέσσερα τεταρτημόρια, τόσο σαν διάταξη υποβιβασμού τάσης όσο και σαν διάταξη ανύψωσης τάσης. Οι προσομοιώσεις αυτές μας βοηθάνε να κατανοήσουμε καλύτερα τη λειτουργία των επιμέρους μονάδων και ολόκληρου του συστήματος. Επίσης να επιλέξουμε κατάλληλα κάποια στοιχεία του συστήματος και να ελέγξουμε την ορθή λειτουργία του, κοιτάζοντας γραφικές παραστάσεις και διαγράμματα έτσι ώστε να προχωρήσουμε στη συνέχεια στην κατασκευή με όσο το δυνατόν καλύτερη θεωρητική ανάλυση.

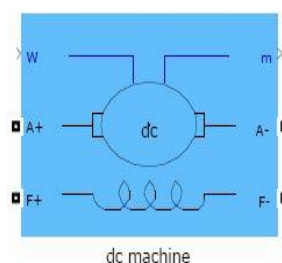
Στην αρχή θα προσομοιώσουμε τον μετατροπέα μας λειτουργώντας τον σαν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης ή σαν μετατροπέα ανύψωσης τάσης, κλειστού βρόχου με έλεγχο υστέρησης για τη λειτουργία μιας μηχανής με την επιθυμητή τιμή ροπής. Ο τελικός στόχος θα είναι να εφαρμόζουμε στον άξονα ενός κινητήρα την επιθυμητή ροπή που θέλουμε, συμπλεκτάροντας στον άξονά του μια άλλη μηχανή που την ελέγχουμε κατάλληλα.

Οι προσομοιώσεις είναι ένα εργαλείο που μας δίνει μια εικόνα του συστήματος. Δεν πρέπει να συγχέουμε τη θεωρία με την πράξη, γιατί στην πράξη πολλές φορές έχουμε διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος μας, καθώς υπάρχουν παράγοντες που ούτε η θεωρία ούτε ο υπολογιστής μπορεί να τους λάβει υπόψη του.

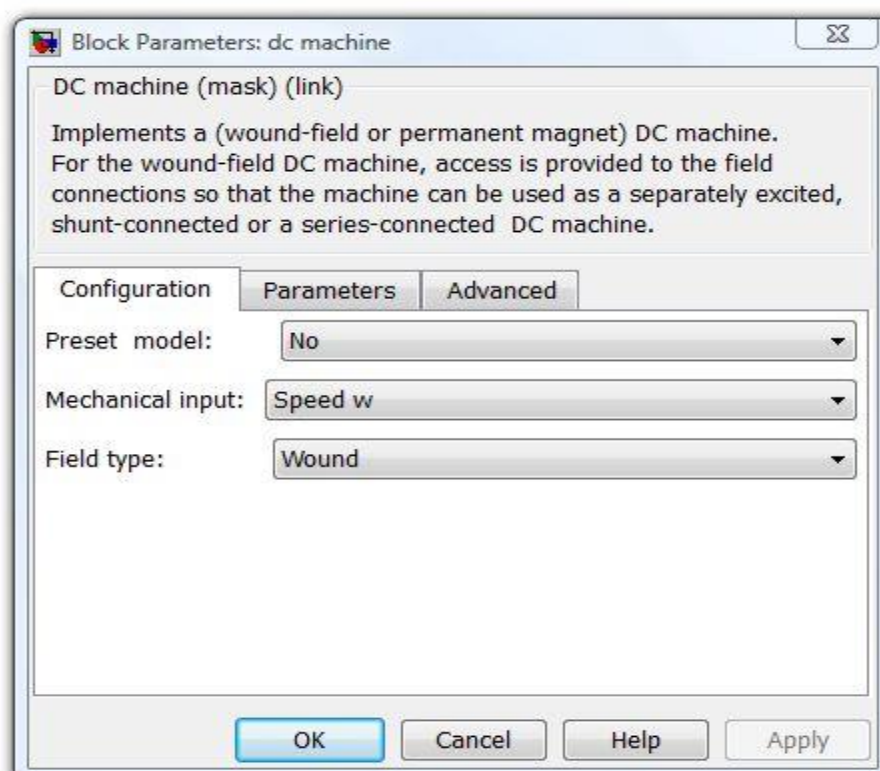
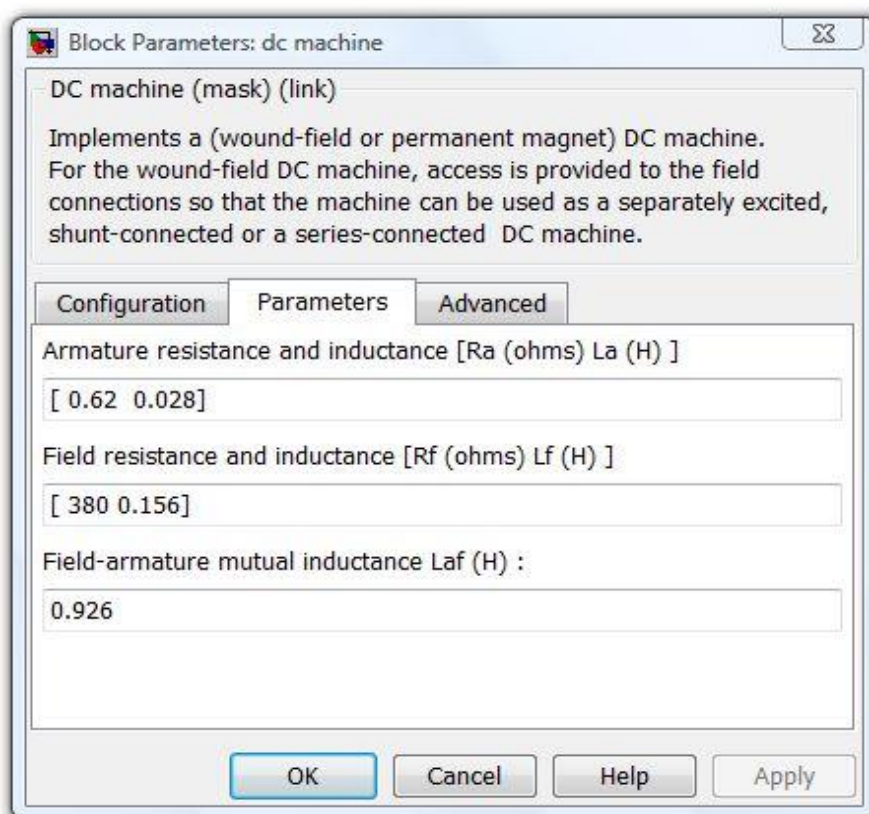
3.2 Μοντελοποίηση της μηχανής συνεχούς ρεύματος

Με τη βοήθεια του Simulink μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορα έτοιμα μοντέλα από πολλά επιστημονικά πεδία αφού περιέχει ένα μεγάλο αριθμό βιβλιοθηκών για διάφορες εφαρμογές. Έτσι το μοντέλο της μηχανής συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιήσαμε βρισκόταν στη βιβλιοθήκη SimPowerSystem και μας βοηθάει να προσομοιώσουμε την dc μηχανή. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται “block DC Machine” και μας παρέχει τη δυνατότητα να επιλέξουμε μια καθορισμένη μηχανή που διαθέτει ή να δημιουργήσουμε τη δικιά μας, με βάση τα στοιχεία που διαθέτει στην πραγματικότητα. Αυτό γίνεται ανοίγοντας το παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων και επιλέγοντας “Configuration-Preset model-no”. Επίσης εκεί παρέχεται η δυνατότητα να επιλέξουμε την είσοδο της μηχανής έτσι ώστε αυτή να λειτουργεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας μέσω των επιλογών “Configuration- Mechanical Input-Speed(w)” για γεννήτρια ή “Configuration- Mechanical Input-Torque(TL)” για κινητήρα. Τέλος στο ίδιο παράθυρο υπάρχει η δυνατότητα να επιλέξουμε, εάν η μηχανή μας θα έχει διέγερση από πηγή τάσης ή με μόνιμο μαγνήτη “ Configuration-Field type-Wound” ή “Configuration- Field type- Permanent Magnet”.

Εφόσον δεν έχουμε επιλέξει ένα καθορισμένο μοντέλο μηχανής πρέπει να ρυθμίσουμε τα χαρακτηριστικά που θα έχει η μηχανή μας. Αυτό γίνεται στο παράθυρο ρυθμίσεων παραμέτρων επιλέγοντας “Parameters”. Εκεί μπορούμε να επιλέξουμε τις επιθυμητές τιμές των αντιστάσεων της διέγερσης και του τυμπάνου, των επαγωγών του τυμπάνου και της διέγερσης και αν είναι κινητήρας έχουμε επιλογή για τη ροπή αδράνειας και την αρχική ταχύτητα. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται αυτές οι ενέργειες:



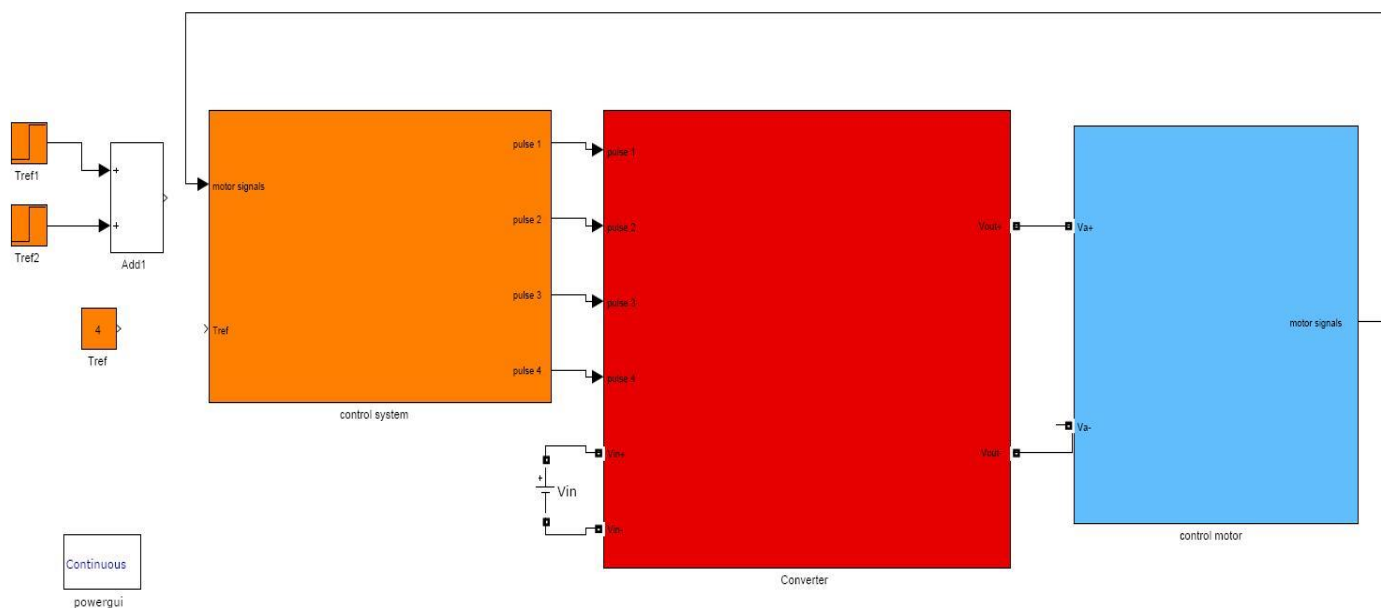
Σχήμα 3.1: Το block διάγραμμα της μηχανής συνεχούς ρεύματος



Σχήμα 3.2: Παράθυρα ρύθμισης παραμέτρων μηχανής

3.3 Προσομοίωση του μετατροπέα σε λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο

Όπως έχουμε αναφέρει και σ' άλλο κεφάλαιο ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας μπορεί να λειτουργήσει στα τέσσερα τεταρτημόρια και να επιτρέψει σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος, να λειτουργήσει τόσο σαν γεννήτρια όσο και σαν κινητήρας, είτε δεξιόστροφα είτε αριστερόστροφα. Εδώ θα υλοποιήσουμε τη λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος σαν έναν ελεγχόμενο κινητήρα κατά την ορθή φορά, δηλαδή θετική ταχύτητα, δίνοντας στην έξοδό του την επιθυμητή θετική ροπή. Το δομικό διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 3.3:

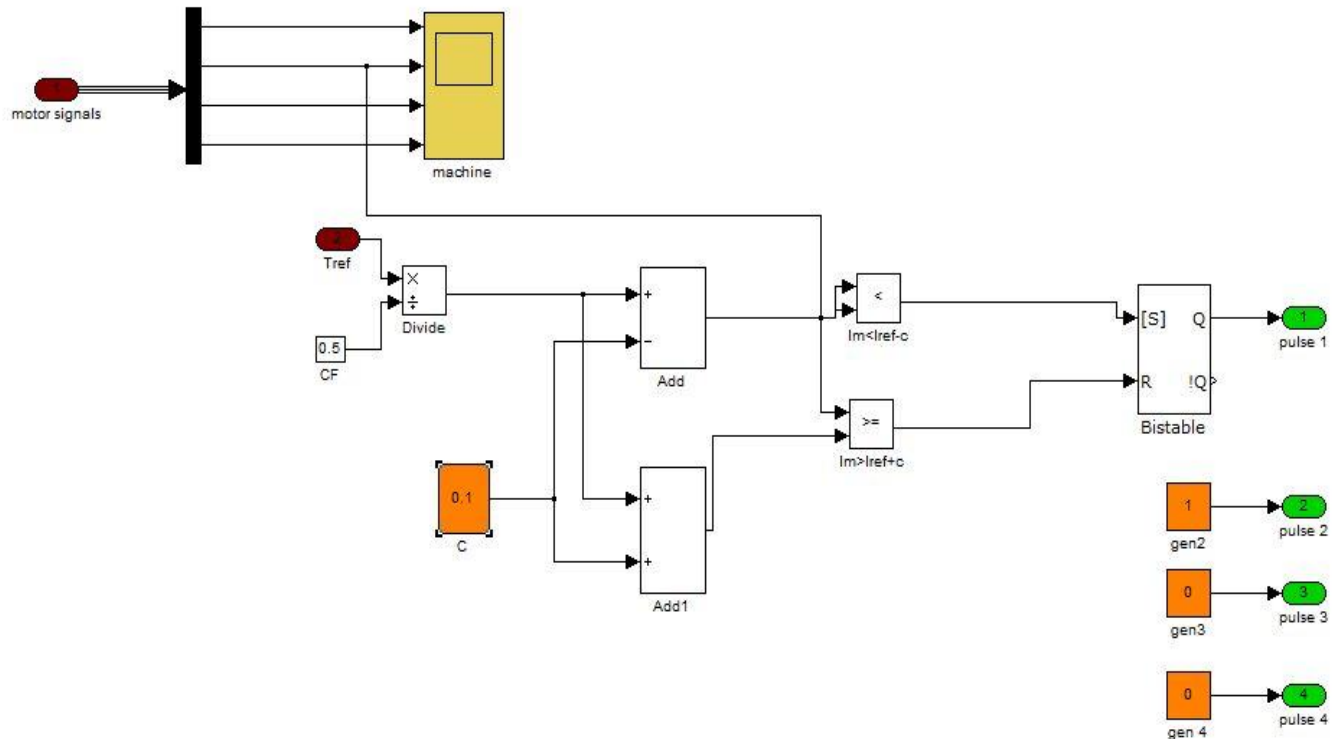


Σχήμα 3.3: Δομικό διάγραμμα buck στο πρώτο τεταρτημόριο

3.3.1 Το υποσύστημα “control system”

Αυτό το υποσύστημα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του μετατροπέα, την παραγωγή παλμών για τα διακοπτικά στοιχεία του μετατροπέα καθώς επίσης και για την είσοδο της επιθυμητής θετικής ροπής που θα του δίνει ο χρήστης. Αυτή η ροπή

μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή αλλά ποτέ αρνητική, αφού δουλεύουμε στο πρώτο τεταρτημόριο με θετική ταχύτητα και ροπή.

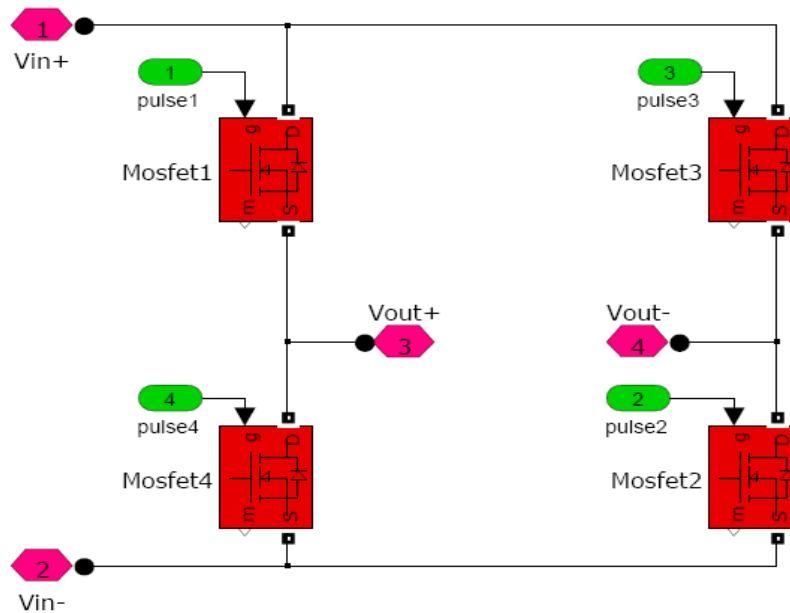


Σχήμα 3.4: Το υποσύστημα “control system”

Στο σχήμα 3.4 βλέπουμε τον αναλυτικό έλεγχο που κάνει αυτή η μονάδα. Δέχεται σαν είσοδο την ροπή αναφοράς που επιθυμεί ο χρήστης να εφαρμοστεί στον άξονα της μηχανής και το σήμα ρεύματος του τυμπάνου της ελεγχόμενης μηχανής συνεχούς ρεύματος, για να μπορέσει να υλοποιήσει τον έλεγχο κλειστού βρόχου. Παράγει τους επιθυμητούς παλμούς στα διακοπτικά στοιχεία με τη μέθοδο της υστέρησης του ρεύματος. Εδώ συγκρίνεται το ρεύμα της μηχανής με το επιθυμητό ρεύμα έτσι ώστε να μας δίνει την απαιτούμενη ροπή. Δηλαδή εάν $i(t) \leq I_{ref} - c$ τότε δίνουμε παλμό στο τρανζίστορ Tr1 ενώ εάν $i(t) \geq I_{ref} + c$ σβήνουμε το τρανζίστορ Tr1. Έτσι παλμοδοτούμε το τρανζίστορ Tr1, ενώ το τρανζίστορ Tr2 είναι συνεχώς σε αγωγή και τα άλλα δύο τρανζίστορ συνεχώς σε αποκοπή.

3.3.2 Το υποσύστημα “converter”

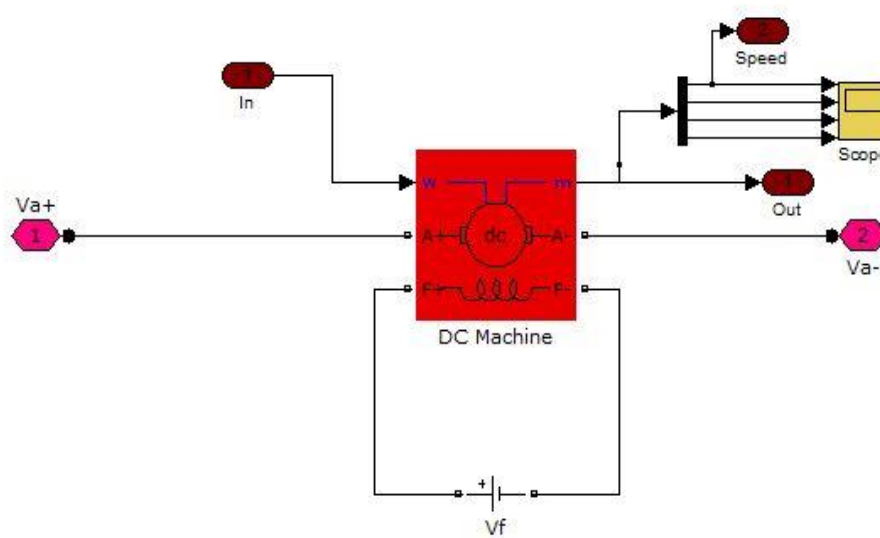
Αυτό το υποσύστημα περιλαμβάνει το μετατροπέα πλήρους γέφυρας με την συνεχή πηγή τροφοδοσίας των 180 Volts χωρίς να μεταβάλλεται. Δέχεται σαν εισόδους τους τέσσερις παλμούς για τα διακοπτικά στοιχεία και τροφοδοτεί με συνεχή τάση τη μηχανή.



Σχήμα 3.5: Το υποσύστημα “converter”

3.3.3 Το υποσύστημα “control motor”

Αυτό το υποσύστημα περιλαμβάνει τη μηχανή συνεχούς ρεύματος, που εδώ λειτουργεί σαν κινητήρας στρεφόμενος με θετική φορά. Επίσης έχουμε μια συνεχή πηγή τροφοδοσίας για το τύλιγμα διέγερσης στα 210 Volts. Επίσης από την ελεγχόμενη μηχανή λαμβάνουμε κάποια σήματα εξόδου που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο κλειστού βρόχου.

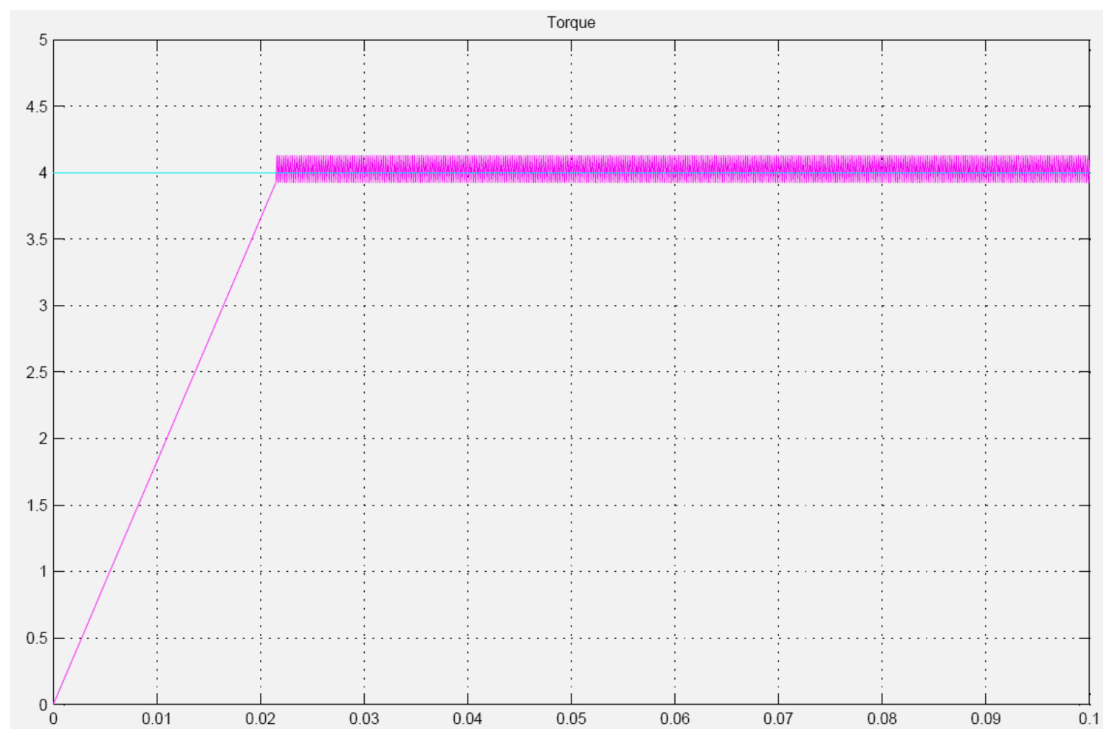


Σχήμα 3.6: Υποσύστημα “control machine”

3.3.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης κινητήρα στο πρώτο τεταρτημόριο

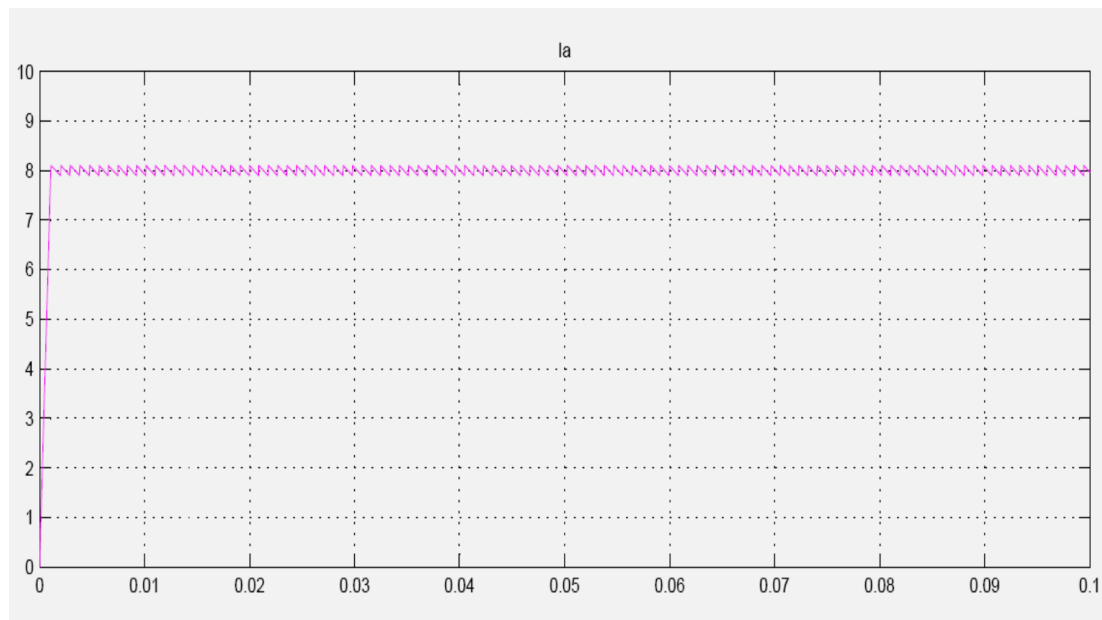
Έστω ότι θέλουμε να εφαρμόσουμε στον άξονα μιας μηχανής μια θετική ροπή και ο κινητήρας να στρέφεται με θετική ταχύτητα.

Για σταθερή ροπή στον άξονα της μηχανής $T_{ref}=4\text{Nm}$ έχουμε τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 3.7: Πραγματική ροπή και ροπή αναφοράς στον άξονα του κινητήρα

Εδώ βλέπουμε την πραγματική ροπή της μηχανής (ροζ χρώμα) που ταλαντώνεται γύρω από την ροπή αναφοράς (μπλε χρώμα). Επίσης η ταχύτητα του κινητήρα είναι σταθερή.

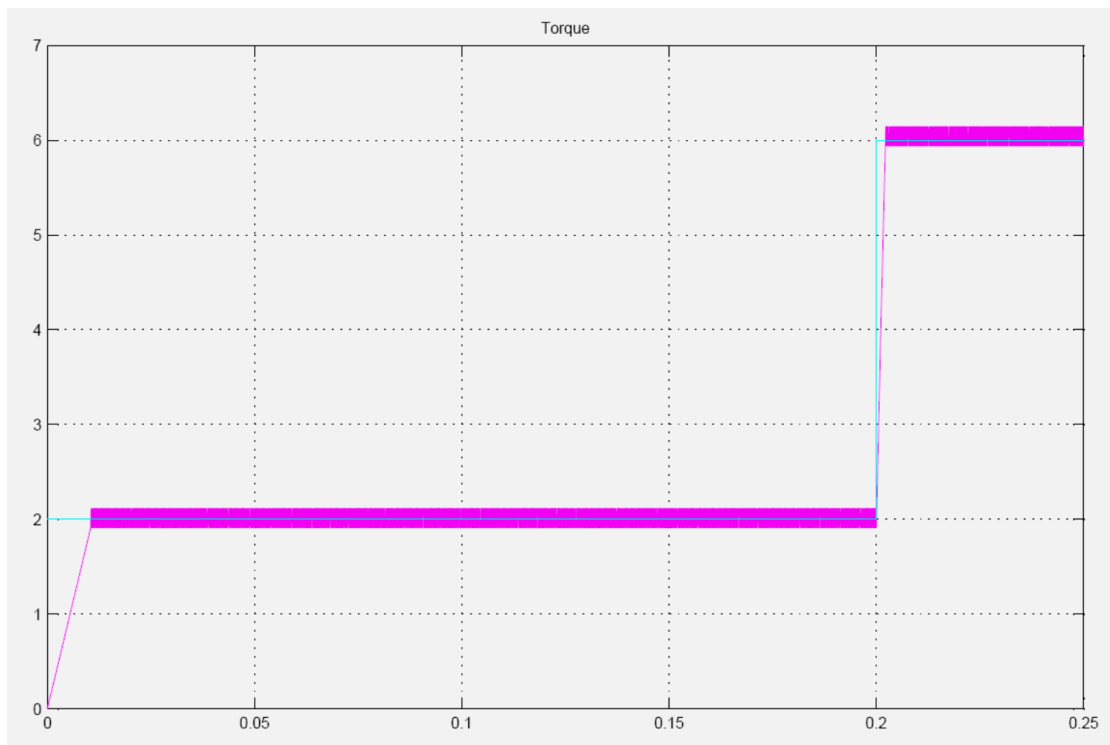


Σχήμα 3.8: Ρεύμα τυμπάνου του κινητήρα

Η γραφική παράσταση του ρεύματος του κινητήρα έχει ακριβώς την ίδια μορφή με αυτήν της ροπής στον άξονα του κινητήρα, αφού η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος τυμπάνου για μηχανή ξένης διέγερσης. Έτσι στην συνέχεια δεν θα παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος τυμπάνου.

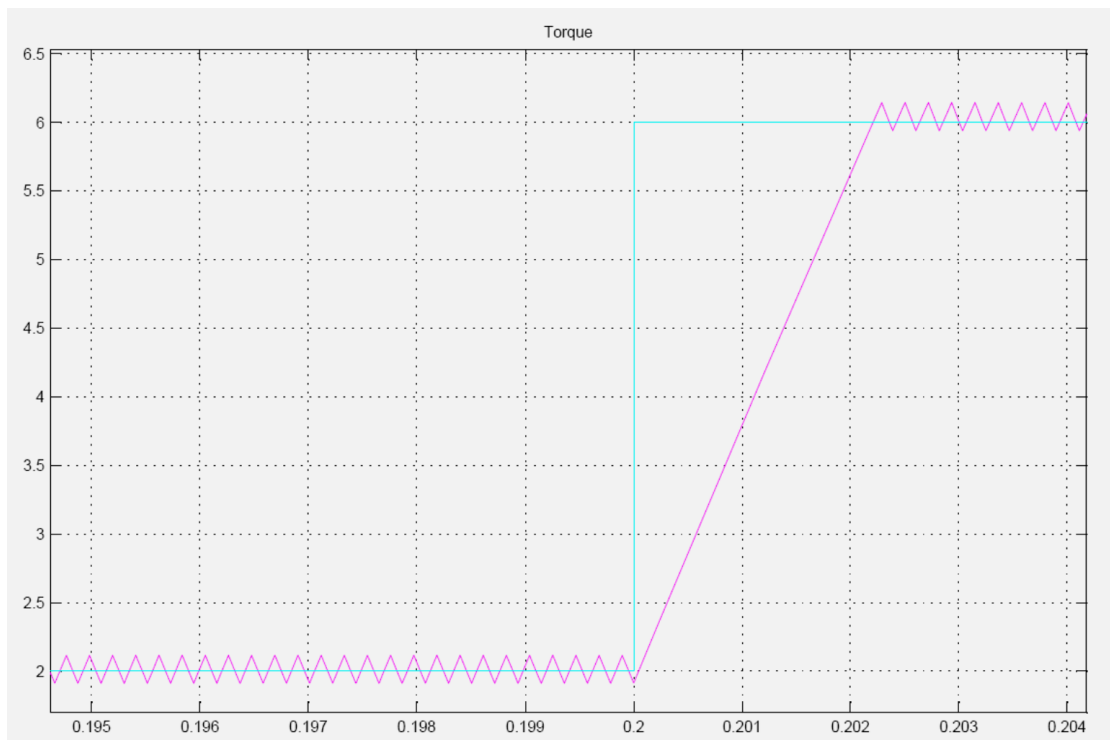
Εδώ βλέπουμε ότι η ροπή του κινητήρα συναντάει την ροπή αναφοράς σε χρόνο $t=20\text{ms}$. Αυτός ο χρόνος είναι πολύ μικρός και στην πράξη διαφέρει καθώς εδώ έχουμε αγνοήσει τα μηχανικά μέρη της μηχανής κι ελέγχουμε ηλεκτρικά μεγέθη με γρήγορες σταθερές χρόνου. Επίσης η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας είναι $f_s=5\text{kHz}$.

Για μεταβλητή ροπή στον άξονα της μηχανής από $T_{ref}=2\text{Nm}$ στα $T_{ref}=6\text{Nm}$ την χρονική στιγμή $t=0.2\text{s}$ έχουμε τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 3.9: Πραγματική ροπή και ροπή αναφοράς στον άξονα του κινητήρα

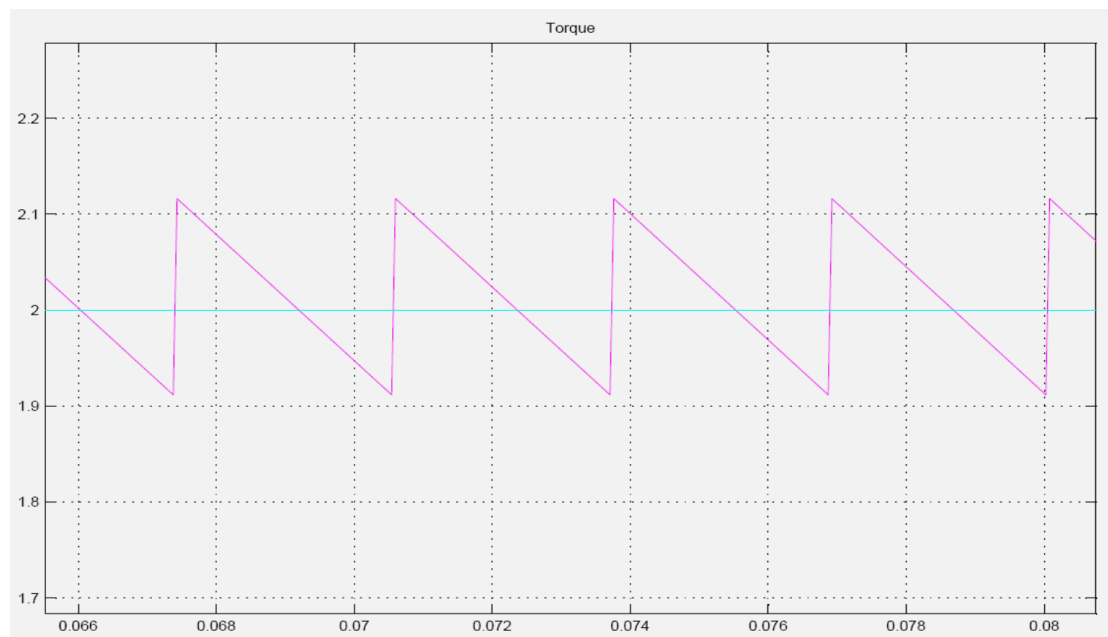
Εδώ βλέπουμε ότι η απόκριση της ροπής είναι πολύ γρήγορη αφού εξαρτάται από το ρεύμα που είναι ηλεκτρικό μέγεθος κι έχει πολύ γρήγορες σταθερές χρόνου.



Σχήμα 3.10: Μεγέθυνση σχήματος 3.9

Εδώ βλέπουμε ότι η ροπή στον άξονα της μηχανής ακολουθεί την βηματική αλλαγή της ροπής αναφοράς σε χρόνο περίπου $t=2\text{ms}$. Λογικό αφού η ροπή στον άξονα για να πάει από τα 0Nm στα 2Nm κάνει περισσότερο χρόνο από το να πάει από τα 2Nm στα 6Nm , αφού εδώ δεν έχουμε τα αρχικά μεταβατικά φαινόμενα.

Τέλος στο σχήμα 3.9 η ροπή παρουσιάζει ταλαντώσεις γύρω από την πραγματική ροπή. Το ακόλουθο σχήμα θα μας δείξει αυτές τις ταλαντώσεις κάνοντας την κατάλληλο μεγέθυνση.



Σχήμα 3.11: Κυμάτωση της πραγματικής ροπής σε σχέση με την ροπή αναφοράς

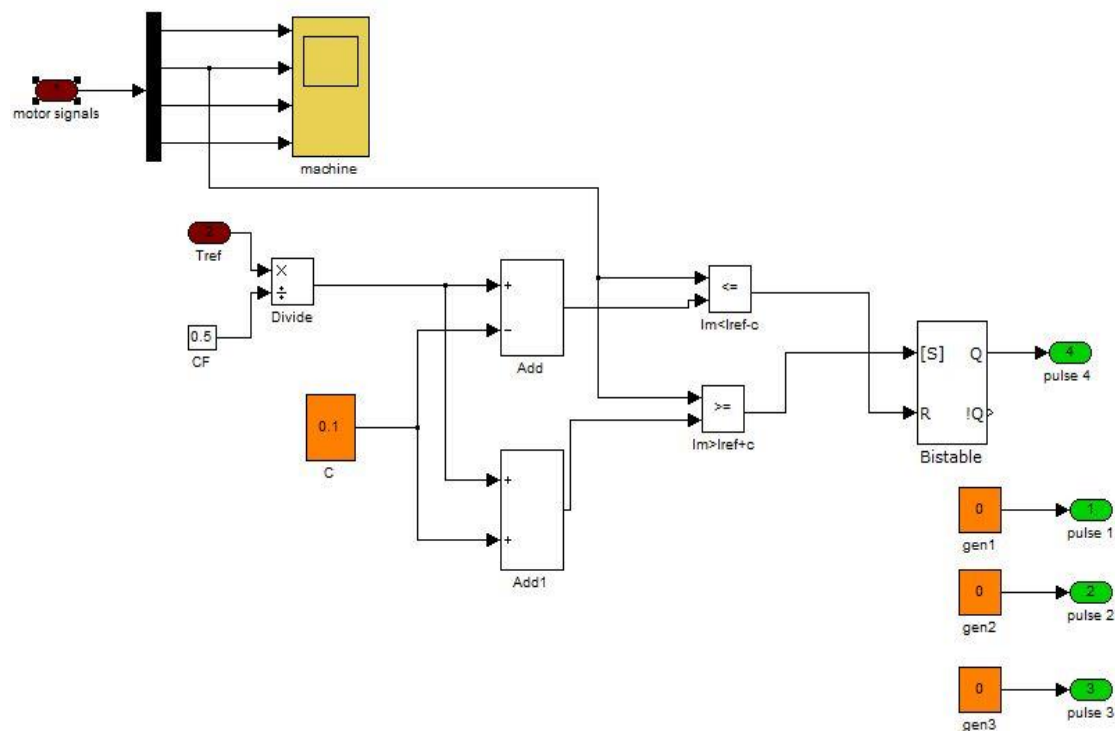
3.4 Προσομοίωση του μετατροπέα σε λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο

Εδώ θα υλοποιήσουμε τη λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος σαν μια ελεγχόμενη γεννήτρια κατά την ορθή φορά περιστροφής, δηλαδή θετική ταχύτητα, δίνοντας στην έξοδο του την επιθυμητή αρνητική ροπή. Η γεννήτρια θα λειτουργεί στις ονομαστικές στροφές 3000rpm παράγοντας μια συνεχής τάση χαμηλότερη από τα 180 Volts της πηγής εισόδου γι' αυτό χρησιμοποιούμε τον μετατροπέα μας σαν boost για να πετύχουμε ανάκτηση ενέργειας, στέλνοντας ενέργεια στην πηγή εισόδου.

Το δομικό διάγραμμα είναι το ίδιο με το σχήμα 3.3.

3.4.1 Το υποσύστημα “control system”

Αυτό το υποσύστημα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του μετατροπέα, την παραγωγή παλμών για τα διακοπτικά στοιχεία του μετατροπέα καθώς επίσης και για την είσοδο της επιθυμητής αρνητικής ροπής που θα του δίνει ο χρήστης. Αυτή η ροπή μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή αλλά ποτέ θετική, αφού δουλεύουμε στο δεύτερο τεταρτημόριο με θετική ταχύτητα και αρνητική ροπή.



Σχήμα 3.12: Υποσύστημα “control system”

Εδώ βλέπουμε τον αναλυτικό έλεγχο που κάνει αυτή η μονάδα. Δέχεται σαν είσοδο κάποια ροπή που θέλει ο χρήστης να εφαρμοστεί στον άξονα της μηχανής και κάποια σήματα της μηχανής για να μπορέσει να υλοποιήσει τον έλεγχο κλειστού βρόχου. Παράγει τους επιθυμητούς παλμούς στα διακοπτικά στοιχεία με την μέθοδο υστέρησης του ρεύματος. Εδώ συγκρίνεται το ρεύμα της μηχανής με το επιθυμητό ρεύμα έτσι ώστε να μας δίνει την απαιτούμενη ροπή. Δηλαδή εάν $i(t) \geq I_{ref} + c$ τότε δίνουμε παλμό στο τρανζίστορ Tr4 ενώ εάν $i(t) \leq I_{ref} - c$ σβήνουμε το τρανζίστορ Tr4. Θέλει προσοχή εδώ στον έλεγχο των ανισοτήτων γιατί το ρεύμα άλλαξε φορά και είναι αρνητικό. Έτσι παλμοδοτούμε το τρανζίστορ Tr4, ενώ τα άλλα τρία διακοπτικά στοιχεία είναι συνεχώς σε αποκοπή.

3.4.2 Το υποσύστημα “converter”

Το υποσύστημα αυτό είναι ίδιο με αυτό του σχήματος 3.5 με τη μόνη λειτουργική διαφορά ότι εκεί η ενέργεια πήγαινε από την πηγή στον κινητήρα και ο μετατροπέας μας λειτουργούσε σαν buck, ενώ εδώ η ενέργεια πηγαίνει από την γεννήτρια στην είσοδο και ο μετατροπέας μας λειτουργεί σαν boost.

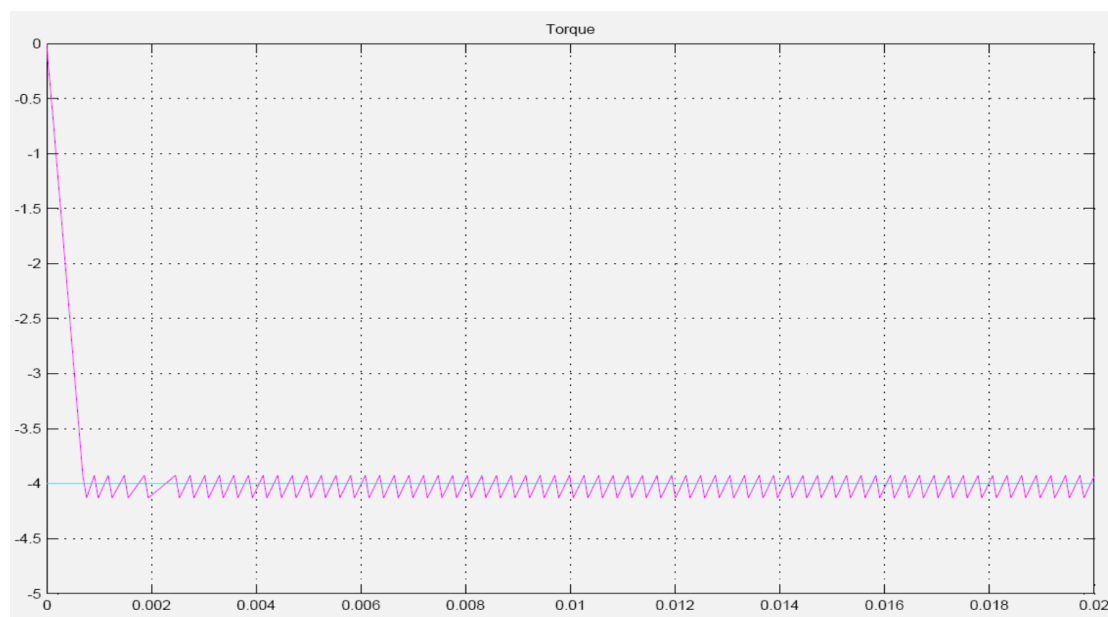
3.4.3 Το υποσύστημα “control motor”

Το υποσύστημα αυτό είναι ίδιο με αυτό του σχήματος 3.6 με τη μόνη διαφορά ότι η μηχανή στην προηγούμενη περίπτωση ήταν κινητήρας ενώ εδώ είναι γεννήτρια με σταθερό αριθμό στροφών 3000 rpm οπότε και σταθερή παραγόμενη dc τάση.

3.4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης γεννήτριας στο δεύτερο τεταρτημόριο

Έστω ότι θέλουμε να εφαρμόσουμε στον άξονα μιας μηχανής μια αρνητική ροπή, οπότε πρέπει να έχουμε γεννήτρια και να στρέφεται με θετική ταχύτητα.

Για σταθερή ροπή στον άξονα της μηχανής $T_{ref} = -4\text{Nm}$ έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

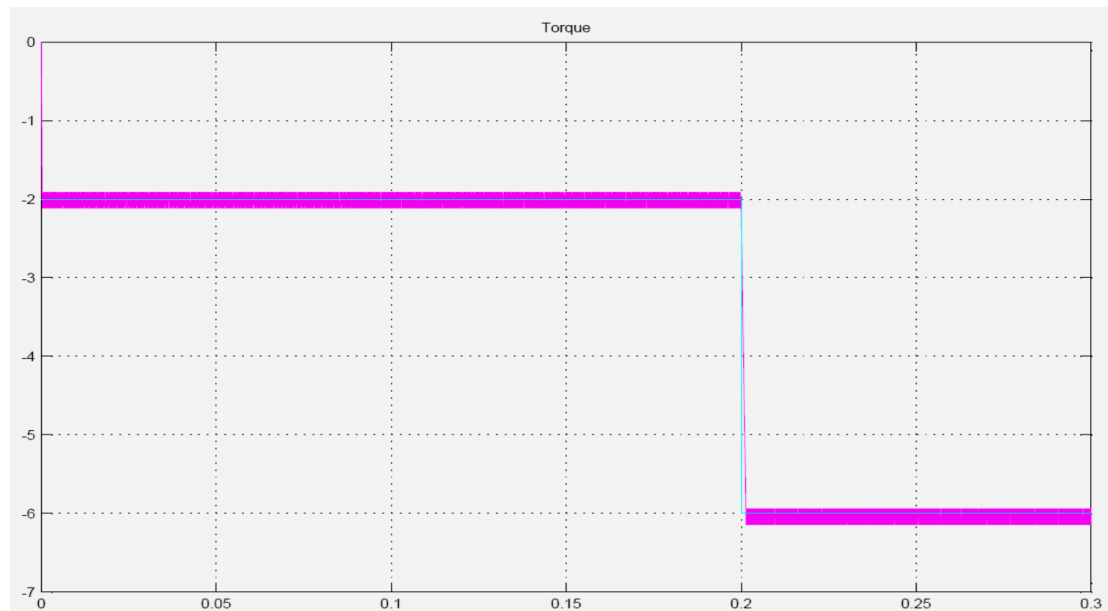


Σχήμα 3.13: Πραγματική ροπή και ροπή αναφοράς στον άξονα της γεννήτριας

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση όπου η μηχανή μας λειτουργούσε σαν κινητήρας και μας παρείχε μια θετική ροπή με πολύ γρήγορη απόκριση, έτσι κι εδώ έχουμε μια αρνητική ροπή με γρήγορη απόκριση λόγω των ηλεκτρικών μεγεθών της

μηχανής που έχουν μικρές σταθερές χρόνου περίπου $t=1\text{ms}$. Η διακοπτική συχνότητα κι εδώ είναι $f_s=3\text{kHz}$ αφού τα στοιχεία.

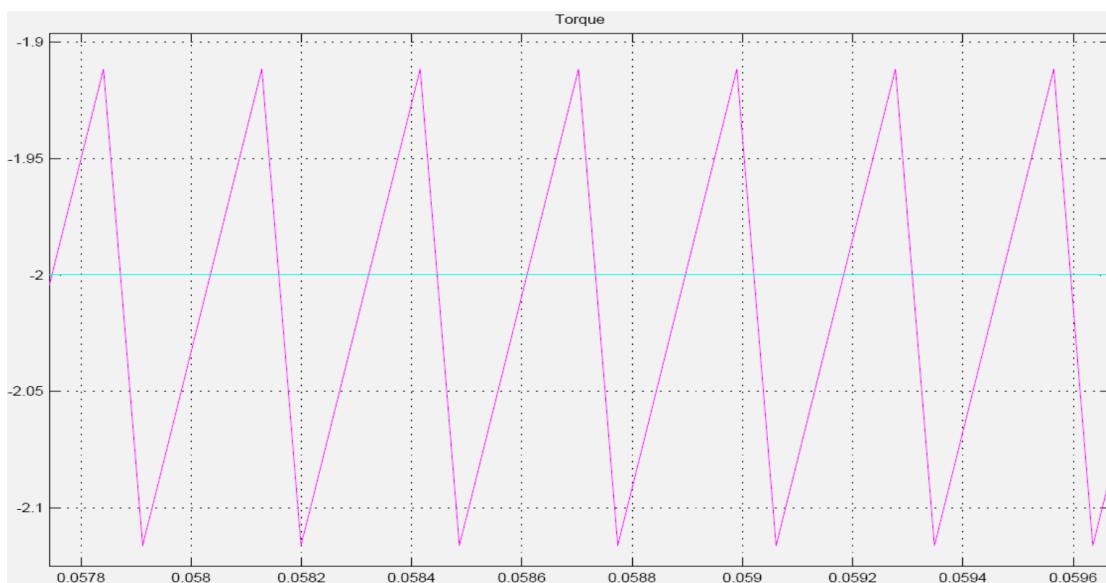
Για μεταβλητή ροπή στον άξονα της μηχανής από $T_{\text{ref}}=-2\text{Nm}$ στα $T_{\text{ref}}=-6\text{Nm}$ την χρονική στιγμή $t=0.2\text{s}$ έχουμε τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 3.14: Πραγματική ροπή και ροπή αναφοράς στον άξονα της γεννήτρια

Ο χρόνος που χρειάζεται η ροπή στον άξονα να ακολουθήσει την ροπή ανάφορας είναι ίδιος με αυτόν του σχήματος 3.10 αφού δεν αλλάζουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Η αντίστοιχη κυμάτωση της πραγματικής ροπής σε σχέση με την ροπή αναφοράς φαίνεται στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Κυμάτωση της πραγματικής ροπής σε σχέση με την ροπή αναφοράς

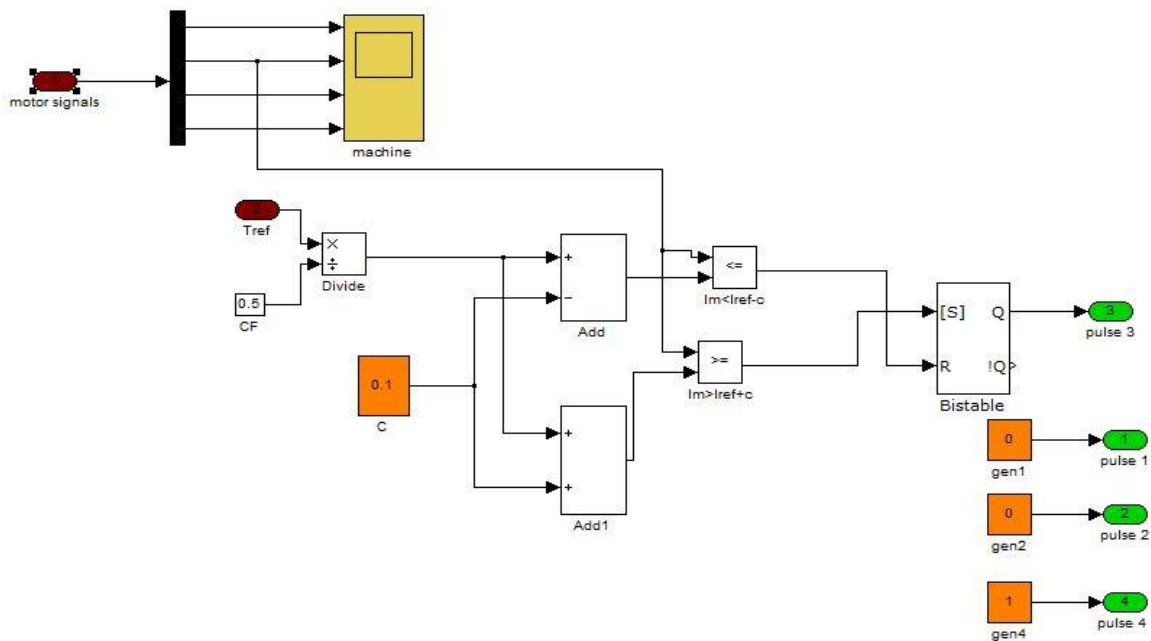
3.5 Προσομοίωση του μετατροπέα σε λειτουργία στο τρίτο τεταρτημόριο

Εδώ θα υλοποιήσουμε τη λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος σαν έναν ελεγχόμενο κινητήρα κατά την ανάστροφη φορά περιστροφής, δηλαδή αρνητική ταχύτητα, δίνοντας στην έξοδο του την επιθυμητή αρνητική ροπή.

Το δομικό διάγραμμα είναι παρόμοιο με αυτό του σχήματος 3.3.

3.5.1 Το υποσύστημα “control system”

Αυτό το υποσύστημα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του μετατροπέα, την παραγωγή παλμών για τα διακοπτικά στοιχεία του μετατροπέα καθώς επίσης και για την είσοδο της επιθυμητής αρνητικής ροπής που θα του δίνει ο χρήστης. Αυτή η ροπή μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή αλλά ποτέ θετική, αφού δουλεύουμε στο τρίτο τεταρτημόριο με αρνητική ταχύτητα και αρνητική ροπή.



Σχήμα 3.16: Υποσύστημα “control system”

Εδώ βλέπουμε τον αναλυτικό έλεγχο που κάνει αυτή η μονάδα. Δέχεται σαν είσοδο κάποια ροπή που θέλει ο χρήστης να εφαρμοστεί στον άξονα της μηχανής και κάποια σήματα της μηχανής, για να μπορέσει να υλοποιήσει τον έλεγχο κλειστού βρόχου. Παράγει τους επιθυμητούς παλμούς στα διακοπτικά στοιχεία με τη μέθοδο υστέρησης του ρεύματος. Εδώ συγκρίνεται το ρεύμα της μηχανής με το επιθυμητό ρεύμα έτσι ώστε να μας δίνει την απαιτούμενη ροπή. Δηλαδή εάν $i(t) \geq I_{ref} + c$ τότε δίνουμε παλμό στο τρανζίστορ Tr3 ενώ εάν $i(t) \leq I_{ref} - c$ σβήνουμε το τρανζίστορ Tr3. Έτσι παλμοδοτούμε το τρανζίστορ Tr3, ενώ το τρανζίστορ Tr4 είναι συνεχώς σε αγωγή και τα άλλα δύο τρανζίστορ συνεχώς σε αποκοπή. Θέλει προσοχή εδώ στον έλεγχο των ανισοτήτων γιατί το ρεύμα αλλάξε φορά και είναι αρνητικό.

3.5.2 Το υποσύστημα “converter”

Το υποσύστημα αυτό είναι αντίστοιχο με αυτό του σχήματος 3.5, με την μόνη λειτουργική διαφορά ότι εκεί ο κινητήρας στρεφόταν με θετική φορά περιστροφής κι είχε και θετική ροπή, ενώ εδώ στρέφεται με αρνητική φορά περιστροφής οπότε έχει κι αρνητική ροπή, αφού είναι κινητήρας.

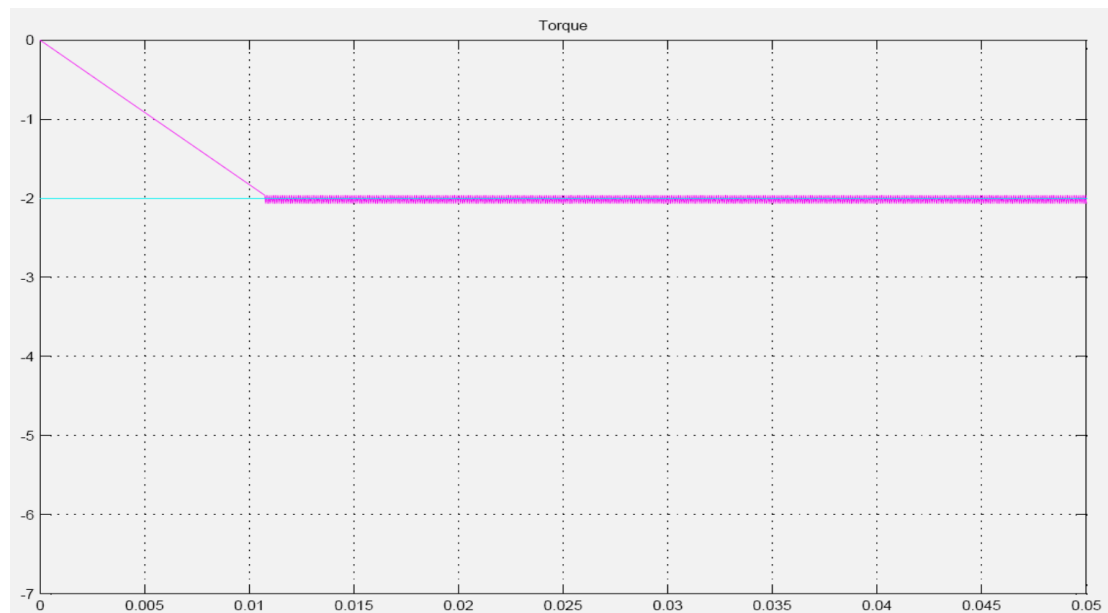
3.5.3 Το υποσύστημα “control motor”

Το υποσύστημα αυτό είναι ακριβώς ίδιο με αυτό του σχήματος 3.6 αφού λειτουργούμε την μηχανή μας σαν κινητήρα με σταθερό όμως αριθμό στροφών.

3.5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης κινητήρα στο τρίτο τεταρτημόριο

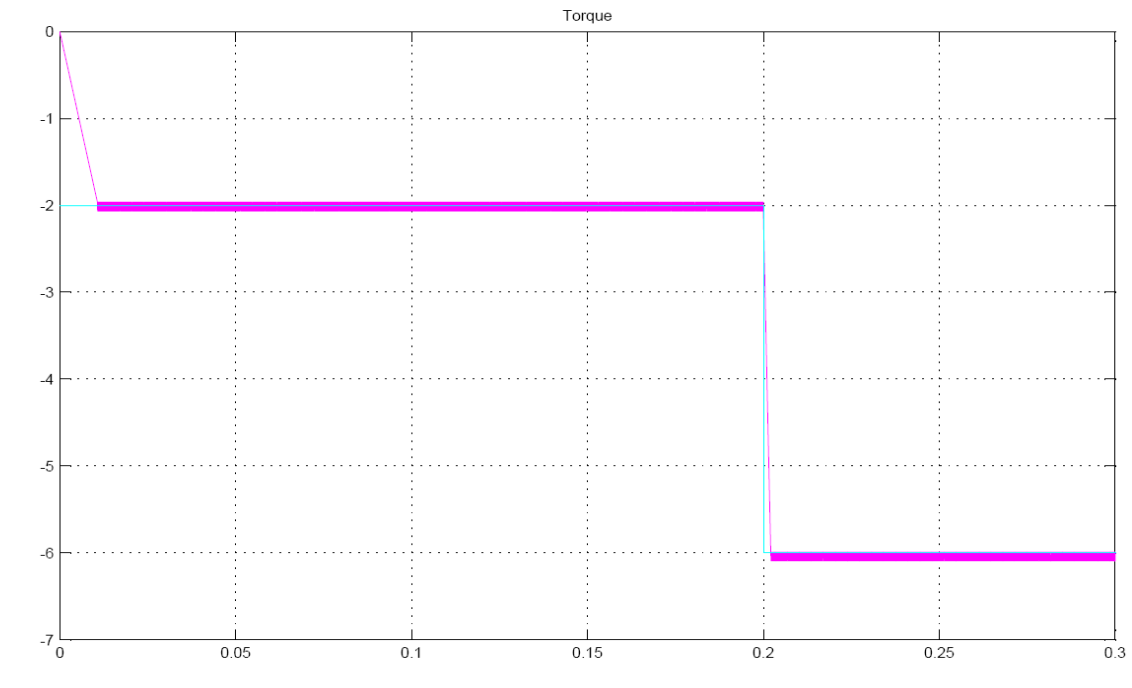
Έστω ότι θέλουμε να εφαρμόσουμε στον άξονα μιας μηχανής μια αρνητική ροπή και ο κινητήρας να στρέφεται με αρνητική ταχύτητα οπότε έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Για σταθερή ροπή στον άξονα της μηχανής $T_{ref}=-2Nm$ έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

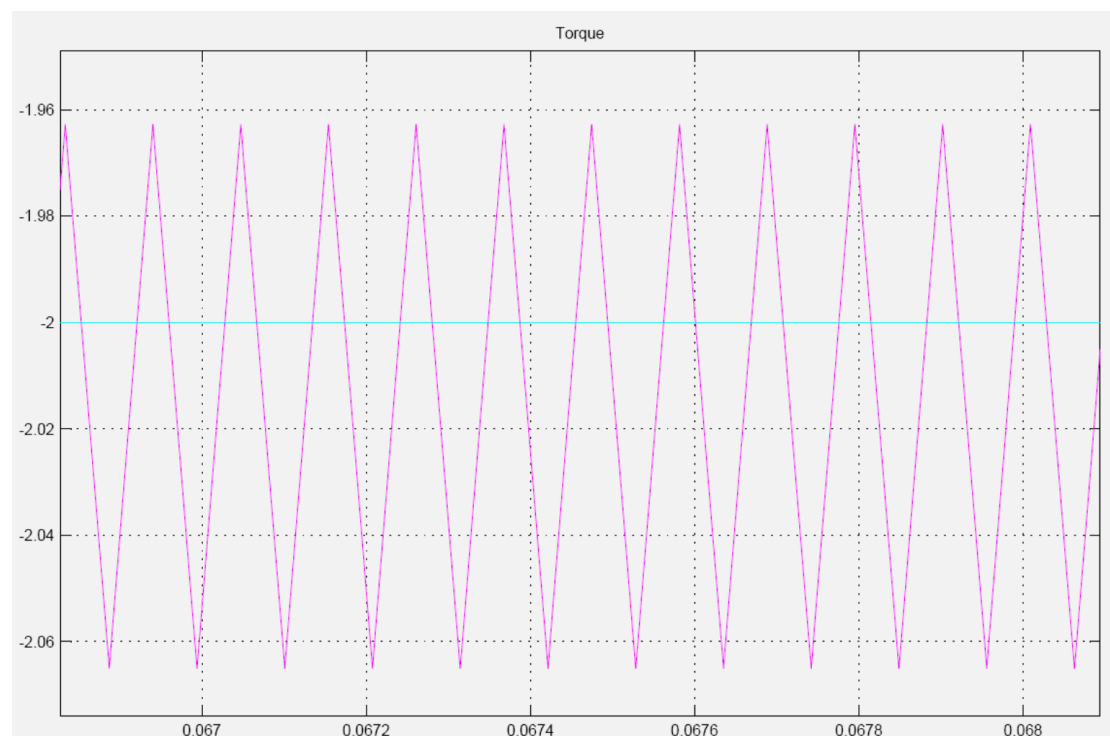


Σχήμα 3.17: Πραγματική ροπή και ροπή αναφοράς στον άξονα του κινητήρα

Για μεταβλητή ροπή στον άξονα της μηχανής από $T_{ref}=-2Nm$ στα $T_{ref}=-4Nm$ την χρονική στιγμή $t=0.2s$:



Σχήμα 3.18 : Ροπή στον άξονα του κινητήρα



Σχήμα 3.19: Κυμάτωση της πραγματικής ροπής σε σχέση με την ροπή αναφοράς

Η απόκριση του συστήματος στις μεταβολές της ροπής αναφοράς και η διακοπτική συχνότητα είναι ίδια με την λειτουργία του συστήματος μας στο πρώτο τεταρτημόριο,

όπου κι εκεί η μηχανή μας λειτουργούσε σαν κινητήρας, αφού δεν υπάρχει καμία μεταβολή στα χαρακτηριστικά της μηχανής και στα όρια του έλεγχου υστέρησης ρεύματος.

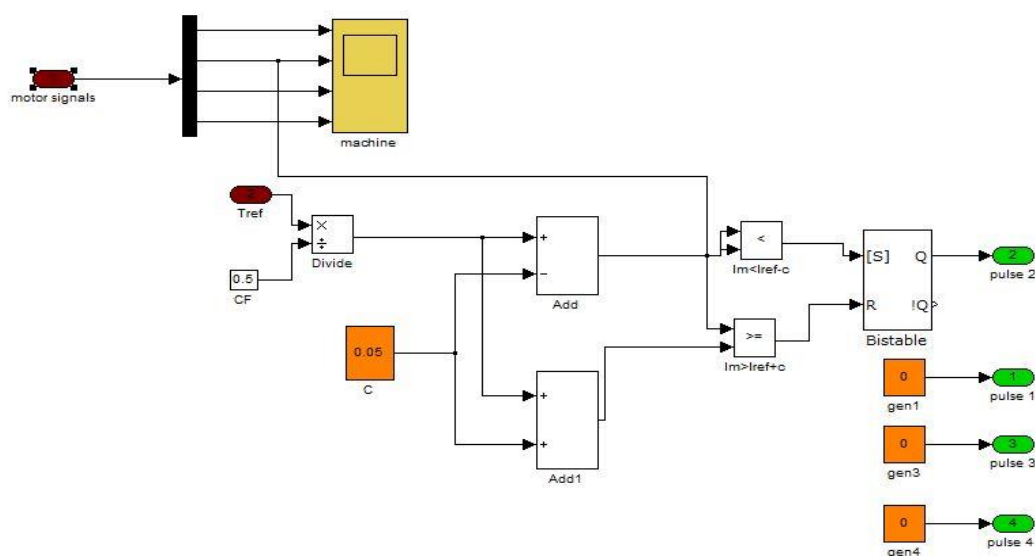
3.6 Προσομοίωση του μετατροπέα στο τρίτο τεταρτημόριο

Εδώ θα υλοποιήσουμε την λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος σαν μια ελεγχόμενη γεννήτρια κατά την ανάστροφη φορά περιστροφής, δηλαδή θετική ταχύτητα, δίνοντας στην έξοδό της την επιθυμητή αρνητική ροπή. Η γεννήτρια θα λειτουργεί στις ονομαστικές στροφές 3000rpm παράγοντας μια dc, ανάστροφη από πριν τάση, χαμηλότερη από τα 180 Volts της πηγής εισόδου γι' αυτό χρησιμοποιούμε τον μετατροπέα μας σαν boost για να πετύχουμε ανάκτηση ενέργειας, στέλνοντας ενέργεια στην πηγή εισόδου.

Κι εδώ έχουμε το ίδιο δομικό διάγραμμα με το σχήμα 3.3.

3.6.1 Το υποσύστημα “control system”

Αυτό το υποσύστημα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του μετατροπέα, την παραγωγή παλμών για τα διακοπτικά στοιχεία του μετατροπέα καθώς επίσης και για την είσοδο της επιθυμητής αρνητικής ροπής που θα του δίνει ο χρήστης. Αυτή η ροπή μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή αλλά ποτέ αρνητική, αφού δουλεύουμε στο τέταρτο τεταρτημόριο με αρνητική ταχύτητα και θετική ροπή.



Σχήμα 3.20: Υποσύστημα “control system”

Εδώ βλέπουμε τον αναλυτικό έλεγχο που κάνει αυτή η μονάδα. Δέχεται σαν είσοδο κάποια ροπή που θέλει ο χρήστης να εφαρμοστεί στον άξονα της μηχανής και κάποια σήματα της μηχανής, για να μπορέσει να υλοποιήσει τον έλεγχο κλειστού βρόχου. Παράγει τους επιθυμητούς παλμούς στα διακοπτικά στοιχεία με τη μέθοδο υστέρησης του ρεύματος. Εδώ συγκρίνεται το ρεύμα της μηχανής με το επιθυμητό ρεύμα έτσι ώστε να μας δίνει την απαιτούμενη ροπή. Δηλαδή εάν $i(t) \leq I_{ref} - c$ τότε δίνουμε παλμό στο τρανζίστορ Tr2 ενώ εάν $i(t) \geq I_{ref} + c$ σβήνουμε το τρανζίστορ Tr2. Έτσι παλμοδοτούμε το τρανζίστορ Tr2, ενώ τα άλλα τρία διακοπτικά στοιχεία είναι συνεχώς σε αποκοπή.

3.6.2 Το υποσύστημα “converter”

Το υποσύστημα αυτό είναι ίδιο με αυτό του σχήματος 3.5, με την μόνη λειτουργική διαφορά ότι εκεί η ενέργεια πήγαινε από την πηγή στον κινητήρα και ο μετατροπέας μας λειτουργούσε σαν μετατροπέας υποβιβασμού τάσης ενώ εδώ η ενέργεια πηγαίνει από την γεννήτρια στην είσοδο και ο μετατροπέας μας λειτουργεί σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης.

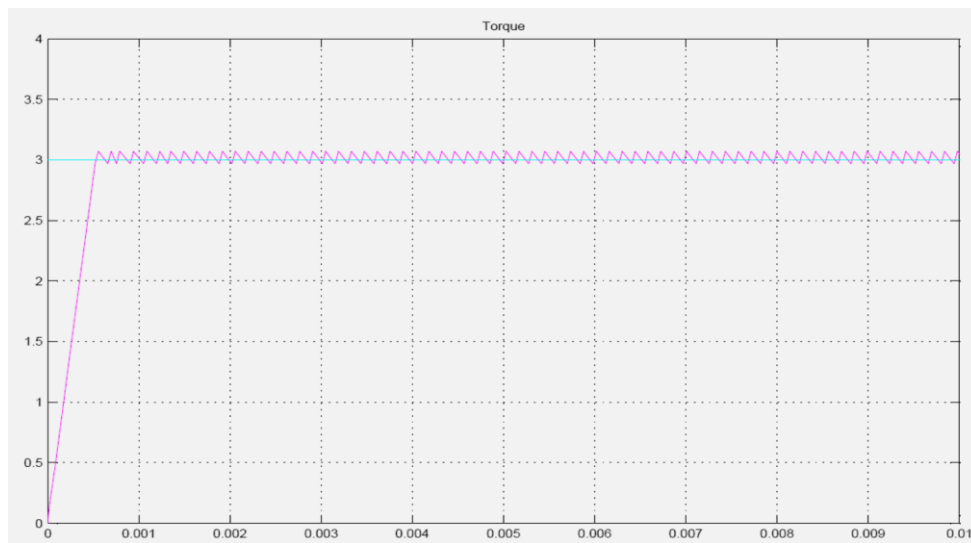
3.6.3 Το υποσύστημα “control motor”

Το υποσύστημα αυτό παρουσιάστηκε προηγουμένως στο σχήμα 3.6, με τη μόνη διαφορά ότι η μηχανή εκεί ήταν κινητήρας ενώ εδώ είναι γεννήτρια με σταθερό αριθμό στροφών 3000 rpm οπότε και σταθερή παραγόμενη συνεχή τάση.

3.6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης γεννήτριας στο τέταρτο τεταρτημόριο

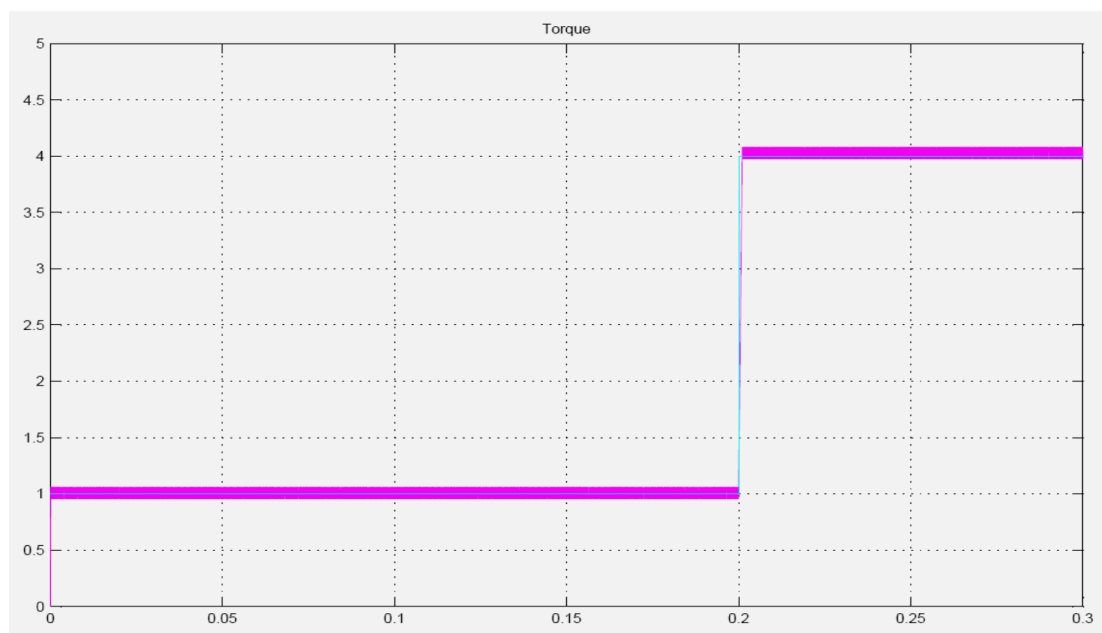
Έστω ότι θέλουμε να εφαρμόσουμε στον άξονα μιας μηχανής μια θετική ροπή και η γεννήτρια να στρέφεται με αρνητική ταχύτητα.

Για σταθερή ροπή στον άξονα της μηχανής $T_{ref}=3Nm$ έχουμε:

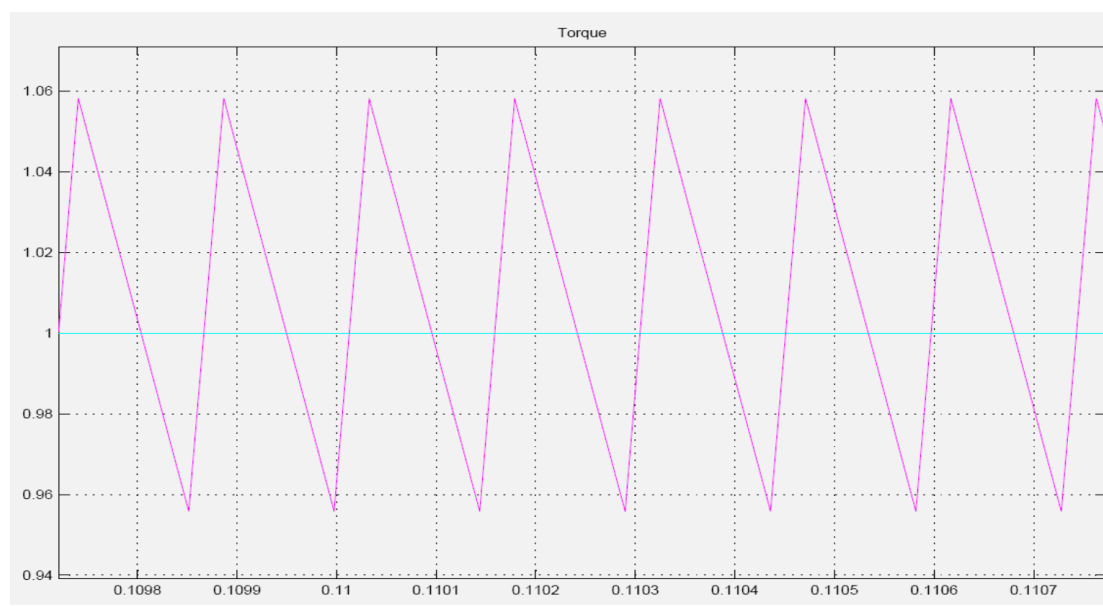


Σχήμα 3.21: Ροπή στον άξονα της γεννήτριας

Για μεταβλητή ροπή στον άξονα της μηχανής από $T_{ref} = 1\text{Nm}$ στα $T_{ref} = 4\text{Nm}$ την χρονική στιγμή $t=0.2\text{s}$ έχουμε τα εξής αποτελέσματα:



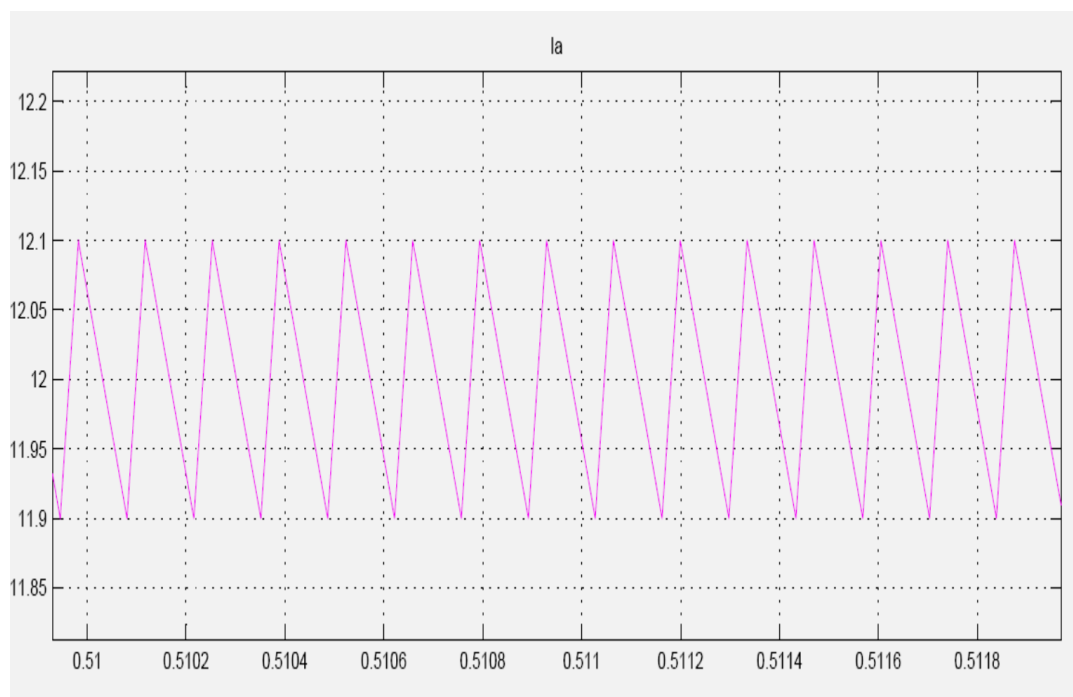
Σχήμα 3.22: Ροπή στον άξονα της γεννήτριας



Σχήμα 3.23: Κυμάτωση της πραγματικής ροπής σε σχέση με την ροπή αναφοράς

Η απόκριση του συστήματος στις μεταβολές της ροπής αναφοράς και η διακοπτική συχνότητα είναι ίδια με την λειτουργία του συστήματος μας στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου κι εκεί η μηχανή μας λειτουργούσε σαν γεννήτρια, αφού δεν υπάρχει καμία μεταβολή στα χαρακτηριστικά της μηχανής και στα όρια του έλεγχου υστέρησης ρεύματος.

Σ' όλα τα σχήματα που παρουσιάζουν χαρακτηριστικές ροπής ή ρεύματος η παχιά γραμμή παρουσιάζει την κυμάτωση ανάλογα με το εύρος που εμείς ορίζουμε, απλά δεν μπορούμε να την δούμε, γιατί δεν θα είχαμε μια εποπτική εικόνα των μεγεθών που θέλουμε να μελετήσουμε. Όμως καλό θα ήταν να έχουμε μια αντίληψη αυτής της κυμάτωσης. Έστω ότι επιθυμούμε ροπή $T_a=6\text{Nm}$ οπότε το ρεύμα θα είναι $I_a=12\text{A}$ αφού η μηχανή μας έχει $C\Phi=0,5$. Εμείς επιλέγουμε ένα όριο κυμάτωση, οπότε η παρακάτω εικόνα θα μας βοηθήσει να δούμε αυτό το φαινόμενο και πώς το ρεύμα μας περιορίζεται μέσα στα επιθυμητά όρια.

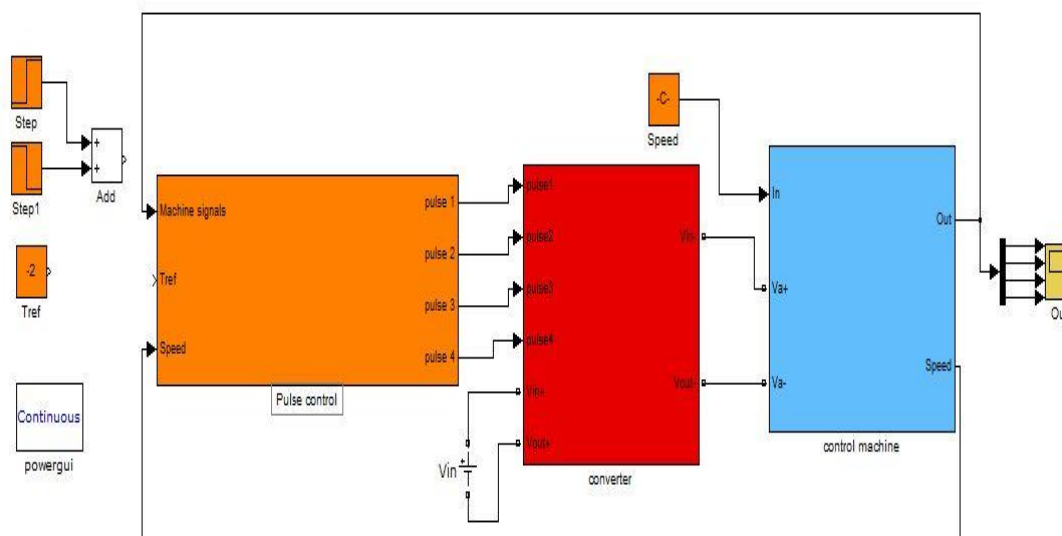


Σχήμα 3.24: Κυμάτωση του ρεύματος στο πηνίο μέσα σε καθορισμένα όρια

3.7 Προσομοίωση του φορτίου

Το σύστημα αυτό προσομοιώνει το φορτίο του ηλεκτροκινητήριου συστήματος που θέλουμε να φορτίσουμε. Στην επόμενη ενότητα θα βάλουμε και τον κινητήρα για να τον φορτίσουμε με την επιθυμητή ροπή συμπλέκοντας τους άξονες των δύο μηχανών μεταξύ τους. Έτσι η μηχανή που ελέγχουμε θα ασκεί στον κινητήρα την επιθυμητή ροπή και επειδή είναι σε κοινό άξονα θα έχουν και την ίδια ταχύτητα.

Σ' αυτήν την ενότητα ο χρήστης θα μπορεί να επιλέγει ότι ροπή θέλει στην μηχανή, με οποιαδήποτε ταχύτητα και υλοποιώντας τον κατάλληλο έλεγχο ο μετατροπέας θα αναγνωρίζει σε ποιο τεταρτημόριο πρέπει να δουλέψει η ελεγχόμενη μηχανή δίνοντας παλμούς στα κατάλληλα διακοπτικά στοιχεία, σε αντίθεση με πριν που σε κάθε λειτουργία έπρεπε να επιλέξεις το κατάλληλο πρόσημο ροπής και ταχύτητας. Το δομικό διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 3.25:



Σχήμα 3.25: Δομικό διάγραμμα του ελεγχόμενου συστήματος

Εδώ βλέπουμε τα τρία υποσυστήματα, δηλαδή το σύστημα ελέγχου και παραγωγής παλμών, το μετατροπέα πλήρους γέφυρας και την ελεγχόμενη μηχανή. Επίσης έχουμε την πηγή σταθερής τάσης που όταν λειτουργεί η μηχανή μας σαν κινητήρας παρέχει ενέργεια, ενώ όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια λαμβάνει ενέργεια. Τέλος έχουμε την αναφορά ροπής που θέλουμε να εφαρμόσουμε στον άξονα της ελεγχόμενης μηχανής που μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή, θετική ή αρνητική και την ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής που κι αυτή μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική και την επιλέγουμε εμείς σ' αυτήν την περίπτωση ενώ στην επόμενη ενότητα θα επιβάλλεται από τον κινητήρα.

3.7.1 Το υποσύστημα “pulse control”

Το υποσύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την παραγωγή ροπής στον άξονα της μηχανής συμφωνά με την ροπή αναφοράς, δίνοντας κατάλληλους παλμούς στα διακοπτικά στοιχεία. Μ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η επιθυμητή ροπή στον άξονα της μηχανής. Η μέθοδος ελέγχου διαφέρει με τις προηγούμενες, γιατί εδώ αναγνωρίζει αυτόματα σε ποιο τεταρτημόριο θα δουλέψει η ελεγχόμενη μηχανή συνεχούς ρεύματος, που προσομοιώνει το φορτίο, και παλμοδοτεί τα κατάλληλα διακοπτικά στοιχεία.

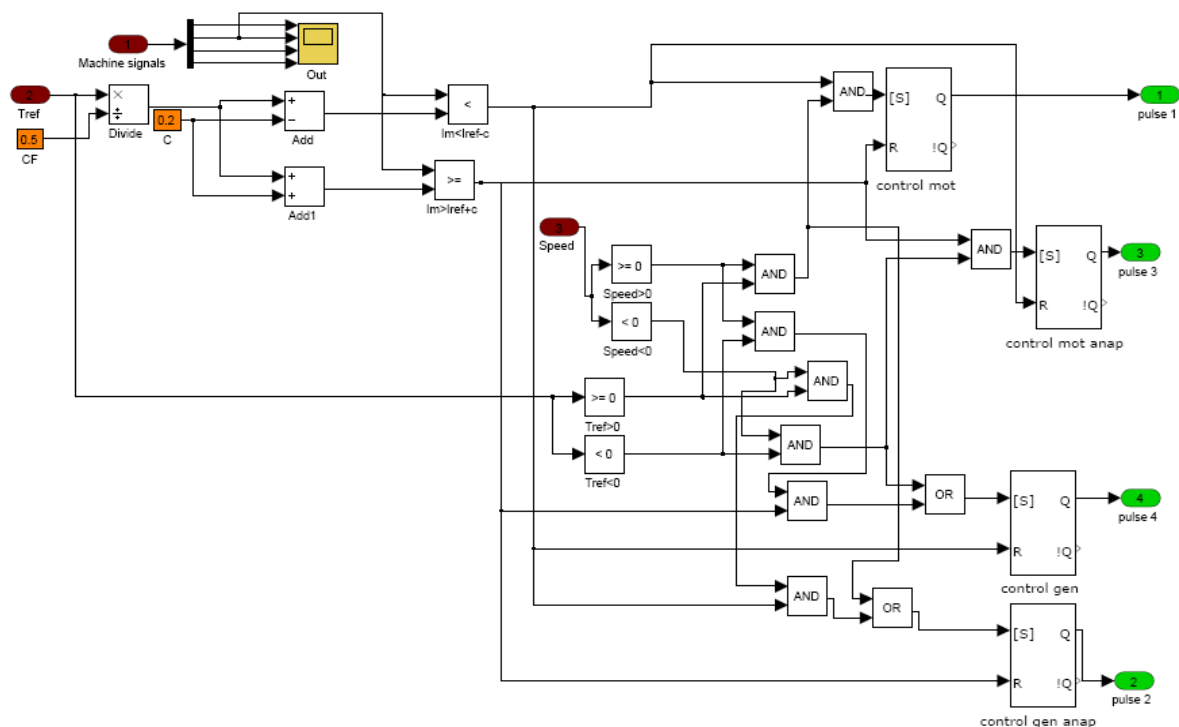
Εάν $T > 0$ και $\Omega > 0$ τότε η μηχανή δουλεύει στο πρώτο τεταρτημόριο σαν κινητήρας και ο μετατροπέας σαν μετατροπέας υποβιβασμού τάσης, με τρανζίστορ Tr2 συνέχεια σε αγωγή και τρανζίστορ Tr1 σε αγωγή εάν $i(t) < I_{ref} - c$ και σε αποκοπή εάν $i(t) > I_{ref} + c$.

Εάν $T < 0$ και $\Omega > 0$ τότε η μηχανή δουλεύει στο δεύτερο τεταρτημόριο σαν γεννήτρια και ο μετατροπέας σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης, με τρανζίστορ Tr4 σε αγωγή εάν $i(t) > I_{ref} + c$ και σε αποκοπή εάν $i(t) < I_{ref} - c$.

Εάν $T < 0$ και $\Omega < 0$ τότε η μηχανή δουλεύει στο τρίτο τεταρτημόριο σαν κινητήρας και ο μετατροπέας σαν μετατροπέας υποβιβασμού τάσης, με τρανζίστορ Tr3 συνέχεια σε αγωγή και τρανζίστορ Tr4 σε αγωγή εάν $i(t) > I_{ref} + c$ και σε αποκοπή εάν $i(t) < I_{ref} - c$.

Εάν $T > 0$ και $\Omega < 0$ τότε η μηχανή δουλεύει στο τέταρτο τεταρτημόριο σαν γεννήτρια και ο μετατροπέας σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης, με τρανζίστορ Tr2 σε αγωγή εάν $i(t) < I_{ref} - c$ και σε αποκοπή εάν $i(t) > I_{ref} + c$.

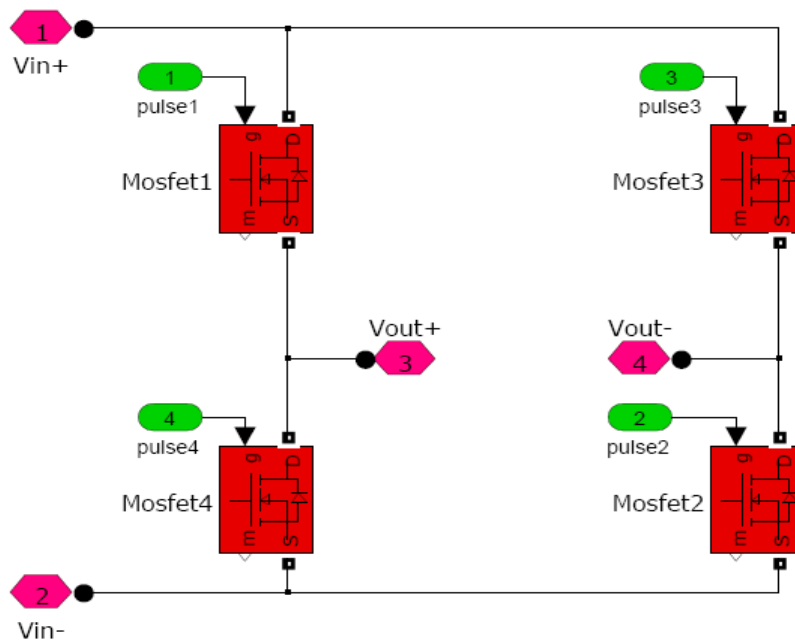
Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να βγάλουμε όλες τις συνθήκες ελέγχου για το κάθε διακοπτικό στοιχείο καθώς και το πότε και το πώς πρέπει να το παλμοδοτούμε. Το σχήμα 3.26 παρουσιάζει το κύκλωμα ελέγχου:



Σχήμα 3.26: Το υποσύστημα “pulse control”

3.7.2 Το υποσύστημα “converter”

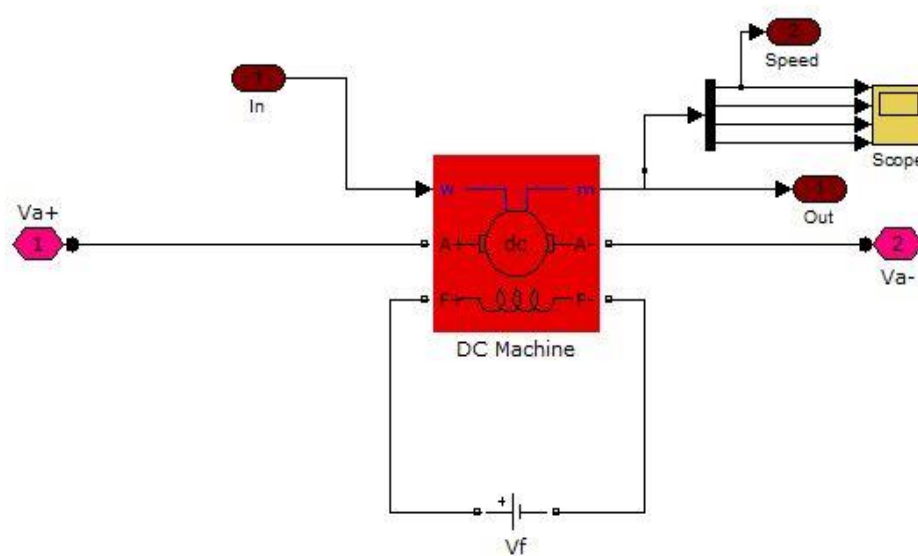
Στο υποσύστημα αυτό παρουσιάζεται ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας με τα τέσσερα διακοπτικά του στοιχεία και τα σήματα παλμοδότησης του. Επίσης βλέπουμε το σημείο που συνδέεται η μηχανή και η πηγή τροφοδοσίας.



Σχήμα 3.27: Το υποσύστημα “converter”

3.7.3 Το υποσύστημα “control machine”

Στο υποσύστημα αυτό έχουμε τη μηχανή μας που την τροφοδοτούμε με την έξοδο του μετατροπέα, μια dc τάση για τη διέγερσή της και ένα σήμα εισόδου για την ταχύτητά της. Αυτή μας δίνει σήματα εξόδου για διάφορα χρήσιμα μεγέθη που χρησιμοποιούμε στον έλεγχο κλειστού βρόχου.

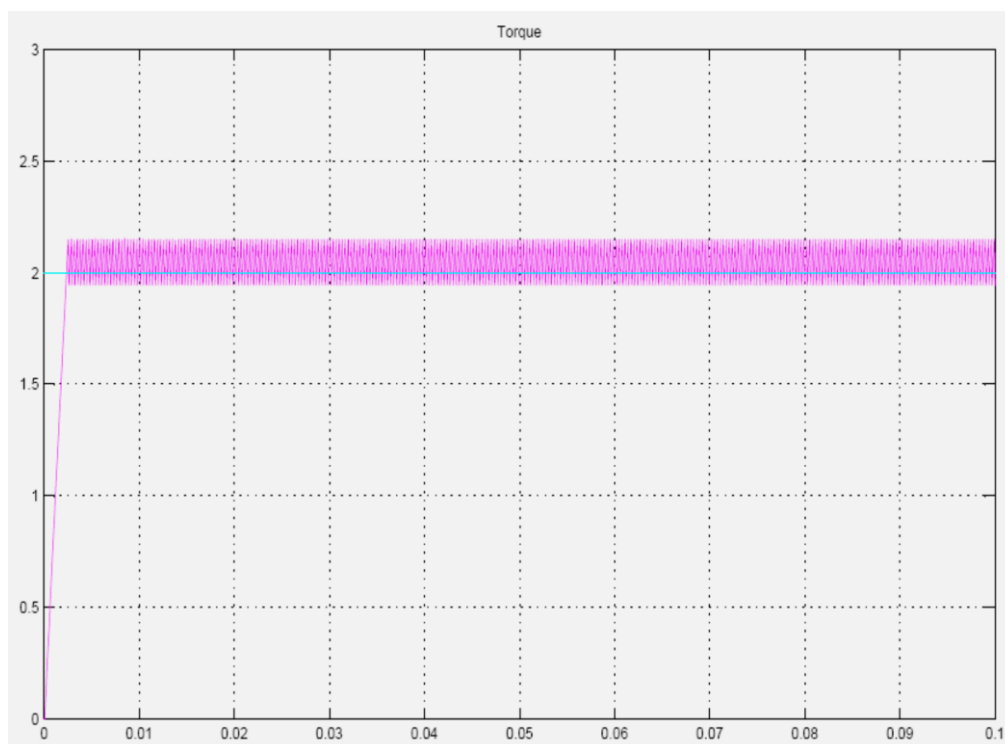


Σχήμα 3.28: Το υποσύστημα “control machine”

3.7.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης του ελεγχόμενου συστήματος

Σ’ αυτήν την υποενότητα θα παρουσιάσουμε μερικές γραφικές παραστάσεις για διάφορες στροφές και ταχύτητες.

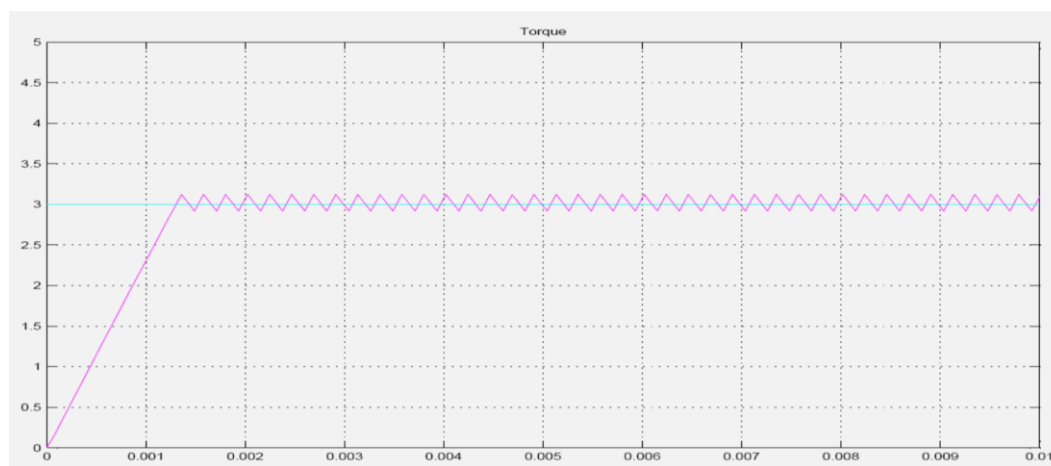
Για ροπή 2Nm και στροφές 3000rpm με θετική φορά περιστροφής έχουμε:



Σχήμα 3.29:Λειτουργία κινητήρα στο πρώτο τεταρτημόριο

Εδώ επιλέξαμε θετική ροπή και ταχύτητα οπότε το σύστημα μας αντιλαμβάνεται αυτόματα ότι για να έχουμε αυτά τα χαρακτηριστικά πρέπει η ελεγχόμενη μηχανή μας να λειτουργήσει σαν κινητήρας στο πρώτο τεταρτημόριο. Η απόκριση του συστήματος μας είναι αρκετά γρήγορη $t=7\text{ms}$, αφού ελέγχουμε ηλεκτρικά μεγέθη με μικρές σταθερές χρόνου. Η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας είναι $f_s=1,25\text{kHz}$.

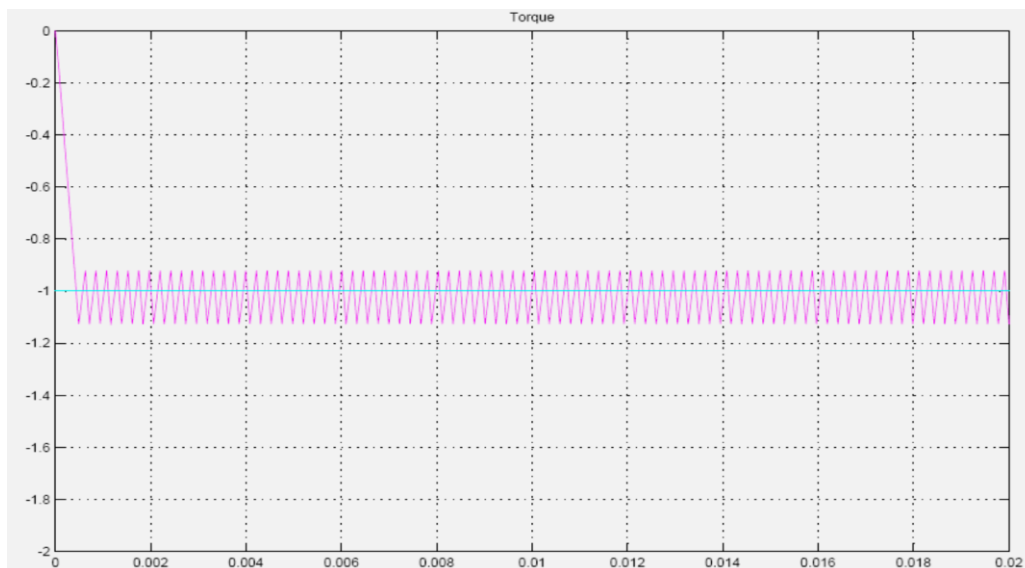
Για ροπή θετική 3Nm αλλά με αρνητική φορά περιστροφής -1500rpm :



Σχήμα 3.30: Λειτουργία γεννήτριας στο δεύτερο τεταρτημόριο

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την κυμάτωση της ροπής στον άξονα της μηχανής γύρω από την ροπή αναφοράς. Σ' αυτήν την περίπτωση για να εφαρμόσουμε στον άξονα της μηχανής θετική ροπή με ανάποδη φορά περιστροφής, πρέπει να λειτουργήσει η μηχανή μας σαν γεννήτρια στο δεύτερο τεταρτημόριο. Η απόκριση του συστήματος μας είναι αρκετά γρήγορη $t=2\text{ms}$, αφού ελέγχουμε ηλεκτρικά μεγέθη με μικρές σταθερές χρόνου. Η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας είναι $f_s=3,8\text{kHz}$. Οι αλλαγές στα παραπάνω μεγέθη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση οφείλονται στο γεγονός ότι η ταχύτητα εδώ είναι διαφορετική οπότε αλλάζει η τάση εξ' επαγωγής της μηχανής κι έτσι έχουμε αλλαγή της διακοπτικής συχνότητας και της απόκρισης του συστήματος.

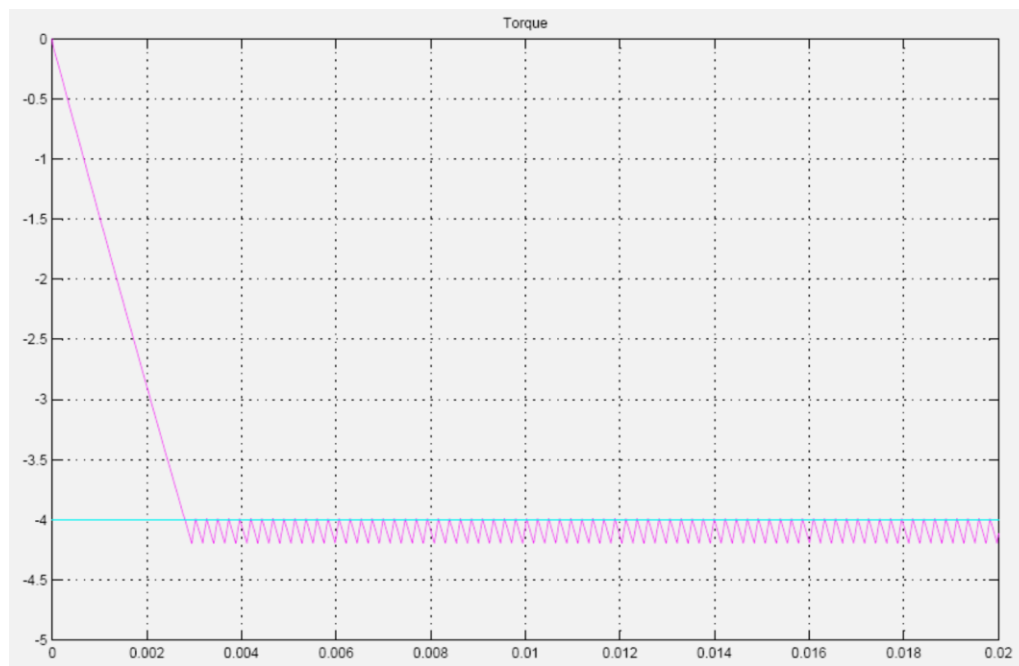
Στο επόμενο σχήμα εφαρμόζουμε αρνητική ροπή -1Nm και με αντίθετη φορά περιστροφής με ταχύτητα -1500rpm :



Σχήμα 3.31: Λειτουργία κινητήρα στο τρίτο τεταρτημόριο

Η απόκριση του συστήματος μας είναι αρκετά γρήγορη $t=1\text{ms}$, αφού ελέγχουμε ηλεκτρικά μεγέθη με μικρές σταθερές χρόνου. Η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας είναι $f_s=3,8\text{kHz}$

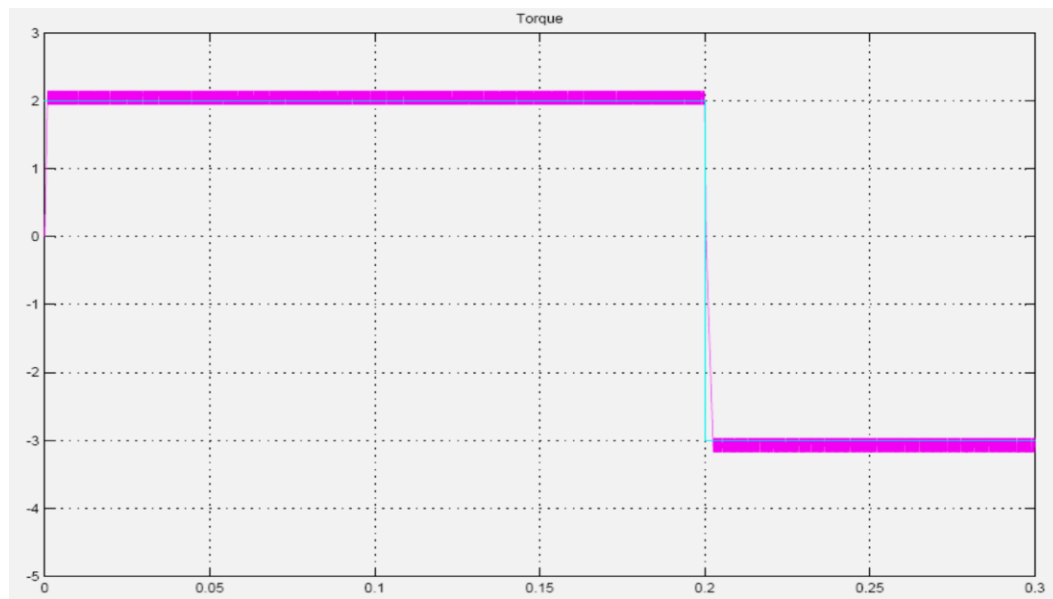
Μια επιπλέον περίπτωση είναι να εφαρμόσουμε αρνητική ροπή -4Nm αλλά αυτήν την φορά με θετική ταχύτητα 1500rpm . Σ' αυτήν την περίπτωση η μηχανή μας πρέπει να λειτουργήσει σαν γεννήτρια στο τέταρτο τεταρτημόριο. Το σχήμα 3.32 απεικονίζει αυτήν την λειτουργία:



Σχήμα 3.32: Λειτουργία γεννήτριας στο τέταρτο τεταρτημόριο

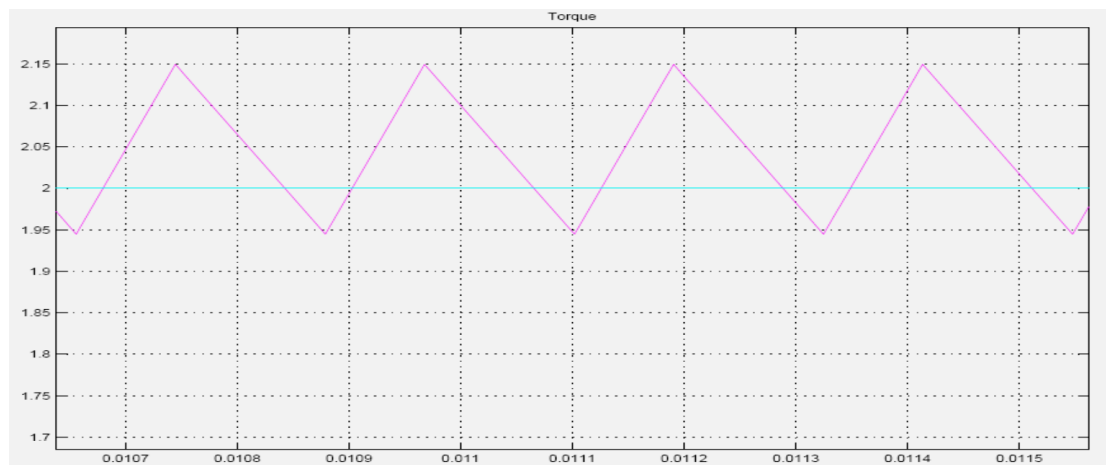
Κι εδώ η απόκριση του συστήματος μας είναι αρκετά γρήγορη $t=3\text{ms}$, αφού ελέγχουμε ηλεκτρικά μεγέθη με μικρές σταθερές χρόνου. Η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας είναι $f_s=3,8\text{kHz}$ ίδια με πριν αφού δεν άλλαξε η ταχύτητα μας.

Τέλος θα εφαρμόσουμε μια μεταβλητή ροπή από 2Nm να γίνεται την χρονική στιγμή $t=0.2\text{s}$ -3Nm και με ταχύτητα περιστροφής 3000rpm . Εδώ η μηχανή μας θα έχει άλλη λειτουργία στο πρώτο χρονικό διάστημα με θετική ροπή όπου θα λειτουργεί σαν κινητήρας στο πρώτο τεταρτημόριο κι άλλη για αρνητική ροπή όπου θα λειτουργεί σαν γεννήτρια στο δεύτερο τεταρτημόριο. Το σχήμα 3.33 παρουσιάζει αυτήν την περίπτωση:



Σχήμα 3.33: Λειτουργία μηχανής με μεταβλητή ροπή στον άξονα της

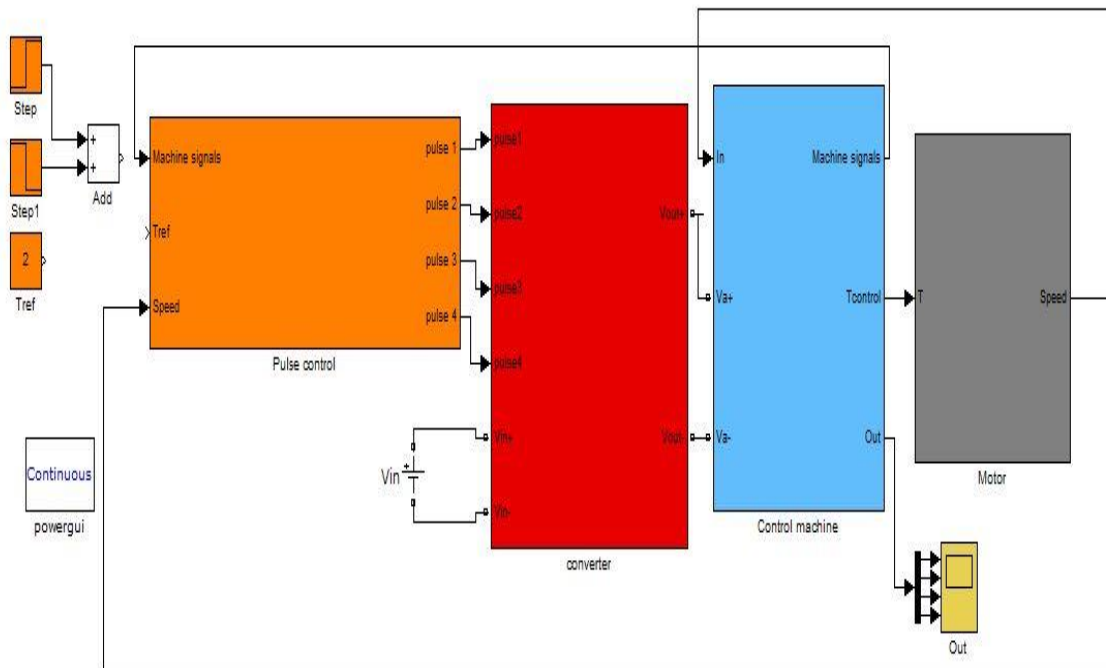
Εδώ για να δούμε καλύτερα την κυμάτωση της ροπής κάνοντας μεγέθυνση στην παραπάνω γραφική παράσταση οπότε:



Σχήμα 3.34: Κυμάτωση ροπής στον άξονα της ελεγχόμενης μηχανής

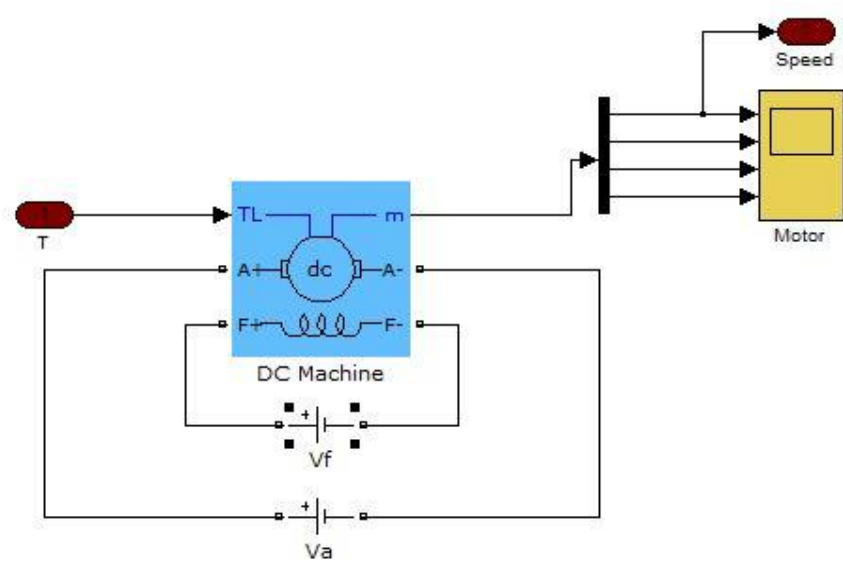
3.8 Αποτελέσματα προσομοίωση του συνολικού συστήματος

Το συνολικό σύστημα διαφέρει από το προηγούμενο σύστημα καθώς εδώ προσομοιώνουμε και ο κινητήρας του κυρίου ηλεκτροκινητήριου συστήματος. Το δομικό διάγραμμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.35: Δομικό διάγραμμα του ολικού συστήματος

Ο κινητήρας αυτός συνδέεται στον ίδιο άξονα με τη μηχανή που ελέγχουμε, οπότε επιβάλλεται σ' αυτόν η επιθυμητή ροπή. Μας καθορίζει όμως την ταχύτητα περιστροφής εφόσον βρίσκονται στον ίδιο άξονα με την μηχανή που εξομοιώνει το φορτίο μας. Ο κινητήρας που δεν ελέγχουμε θα μπορούσε να ήταν οποιασδήποτε μορφής κινητήρας που θέλουμε να ασκήσουμε στον άξονα του κάποιου είδους ροπή. Στην περίπτωση μας, για πιο απλό μοντέλο προσομοίωσης, επιλέξαμε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, του οποίου το δομικό του διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 3.3.



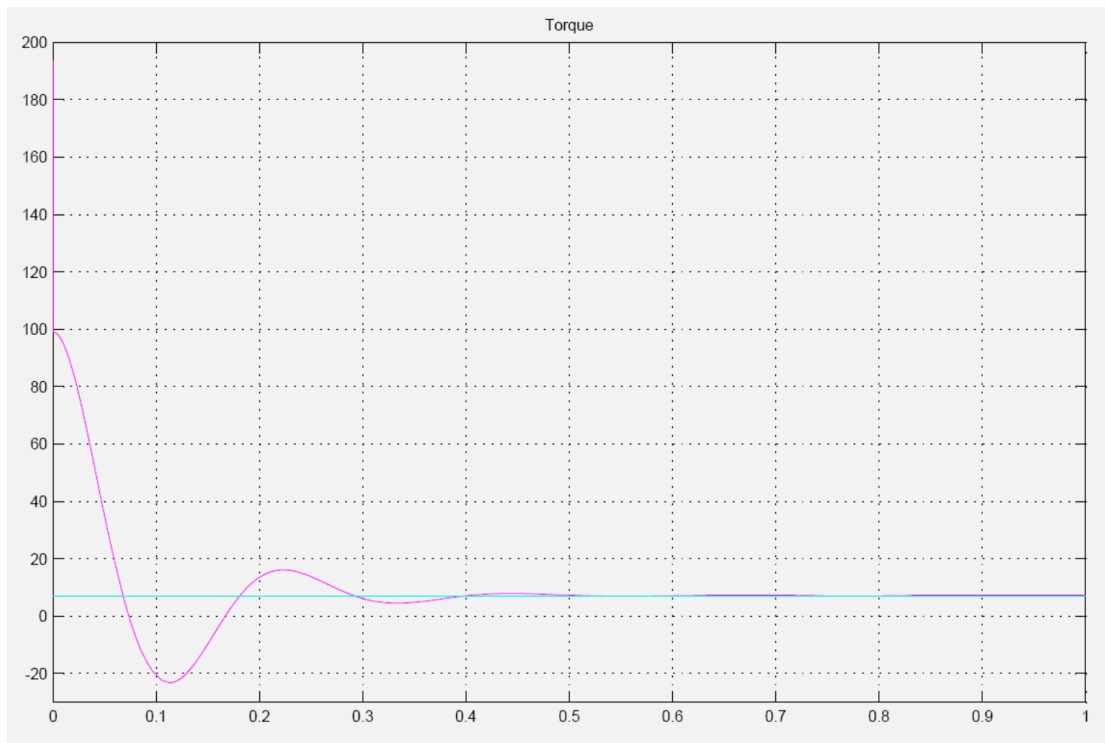
Σχήμα 3.36: Μη ελεγχόμενος κινητήρας

Εδώ βλέπουμε τον κινητήρα που ασκούμε στον άξονά του την επιθυμητή ροπή κι αυτός επηρεάζει την ταχύτητα αφού βρίσκεται στον ίδιο άξονα με την ελεγχόμενη μηχανή. Επίσης οι τροφοδοσίες του είναι ανεξάρτητες, από άλλες πηγές και δεν έχουν σχέση με το υπόλοιπο σύστημα.

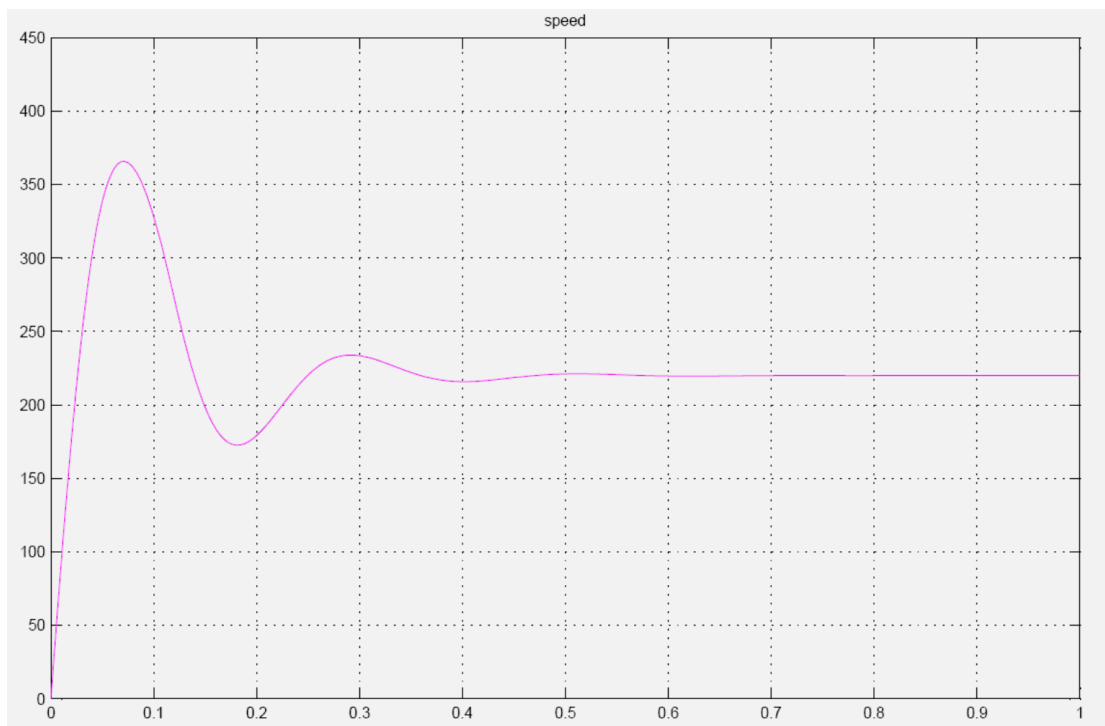
Ο μετατροπέας μας και η ελεγχόμενη μηχανή είναι ακριβώς ίδια με την προηγούμενη ενότητα.

Στη συνέχεια θα παραθέσουμε κάποιες προσομοιώσεις για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του συστήματος και να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

Για μια θετική ροπή 6Nm και ταχύτητα μη ελεγχόμενη που καθορίζεται από τον κινητήρα έχουμε τις αντίστοιχες γραφικές:



Σχήμα 3.37: Ροπή στον άξονα του κινητήρα

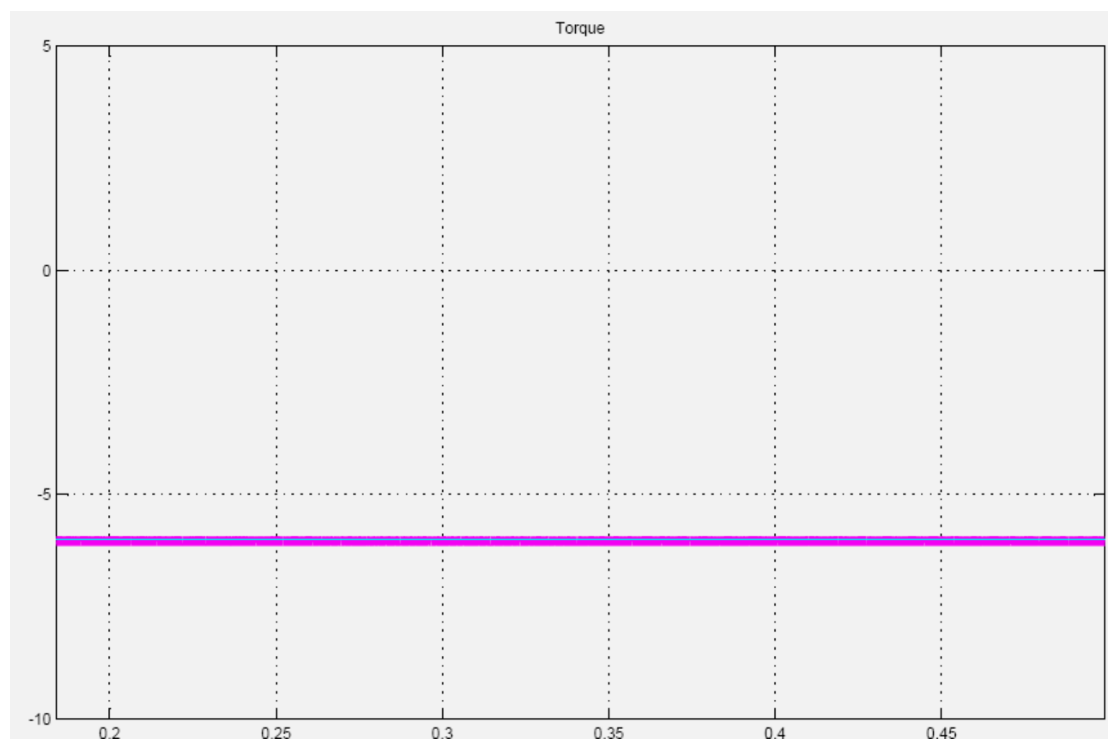


Σχήμα 3.38: Ταχύτητα στον άξονα του κινητήρα

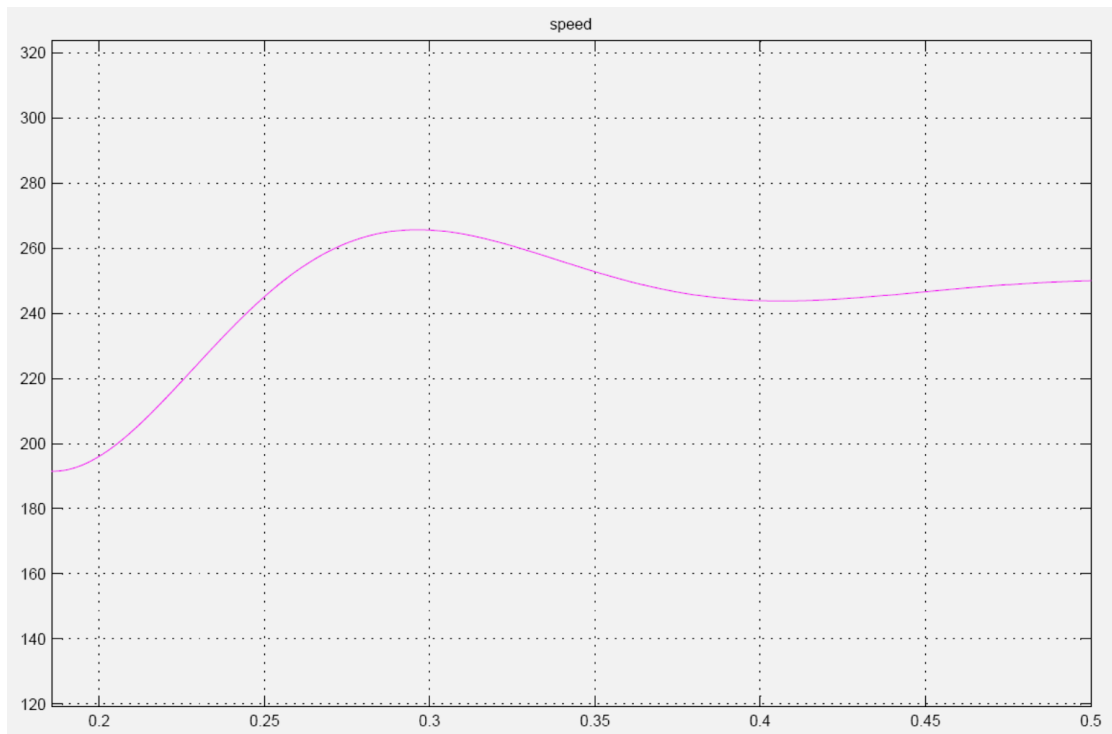
Εδώ το σύστημα μου ξεκινάει από μηδενικές στροφές και φτάνει στην μόνιμη κατάσταση σε χρόνο $t=0,4s$. Ο χρόνος αυτός είναι αρκετά μεγάλος αφού στην μηχανή συνεχούς ρεύματος υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των στροφών και της επαγόμενης τάσης και κατ' επέκταση και του ρεύματος που θέλουμε να ελέγξουμε. Οι στροφές είναι μηχανικό μέγεθος οπότε έχουν μεγάλες σταθερές χρόνου γι' αυτό κι η απόκριση του συστήματος μας είναι μεγάλη.

Στην συνέχεια δεν θα παρουσιάζουμε στις γραφικές μας παραστάσεις τα αρχικά μεταβατικά αλλά τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν ώστε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

Μια άλλη περίπτωση είναι η εφαρμογή αρνητικής ροπής $-6Nm$ με θετική φορά περιστροφής.

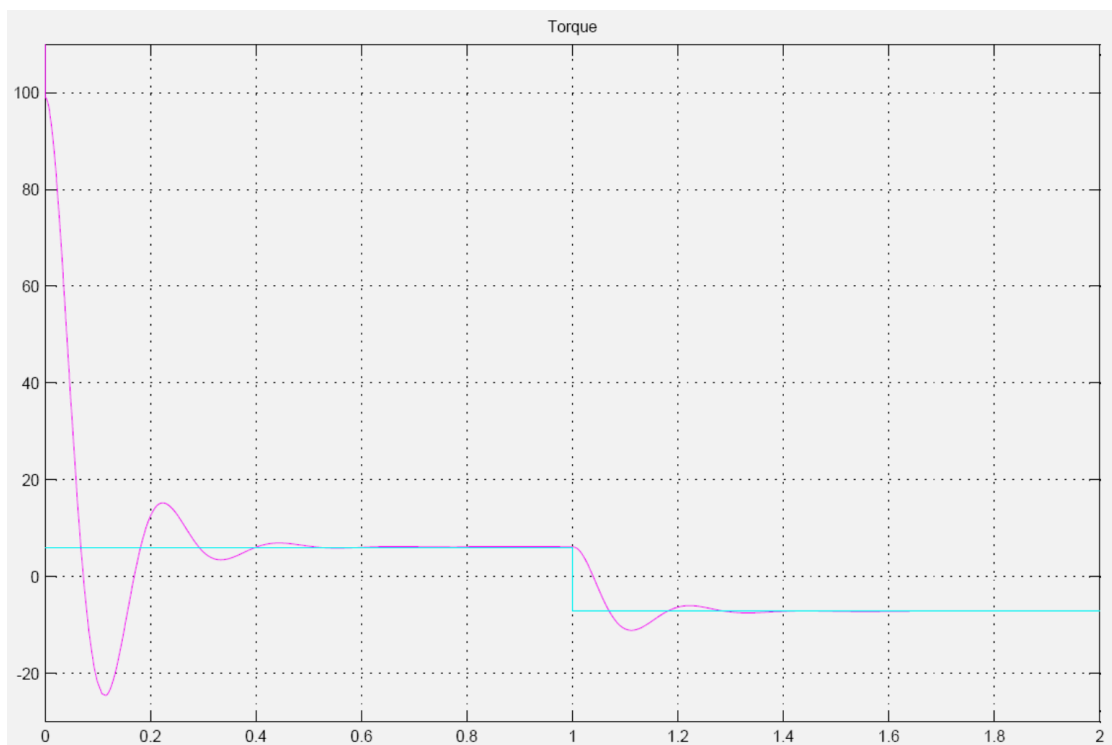


Σχήμα 3.39: Ροπή στον άξονα του κινητήρα

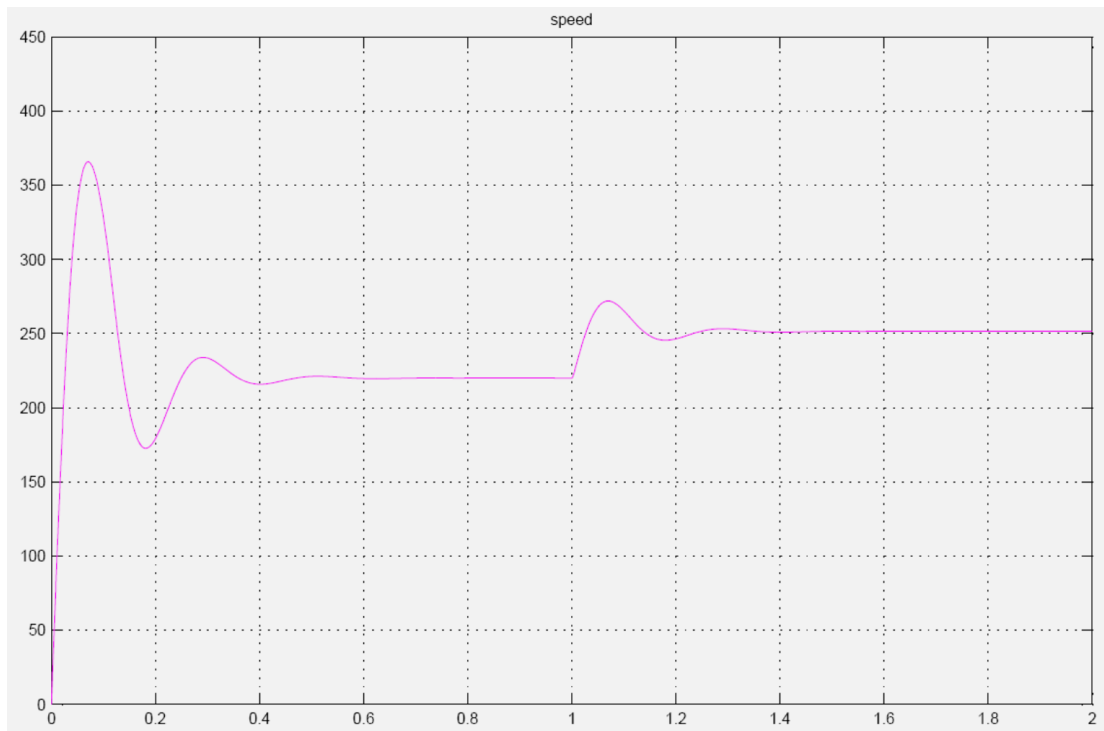


Σχήμα 3.40: Ταχύτητα στον άξονα του κινητήρα

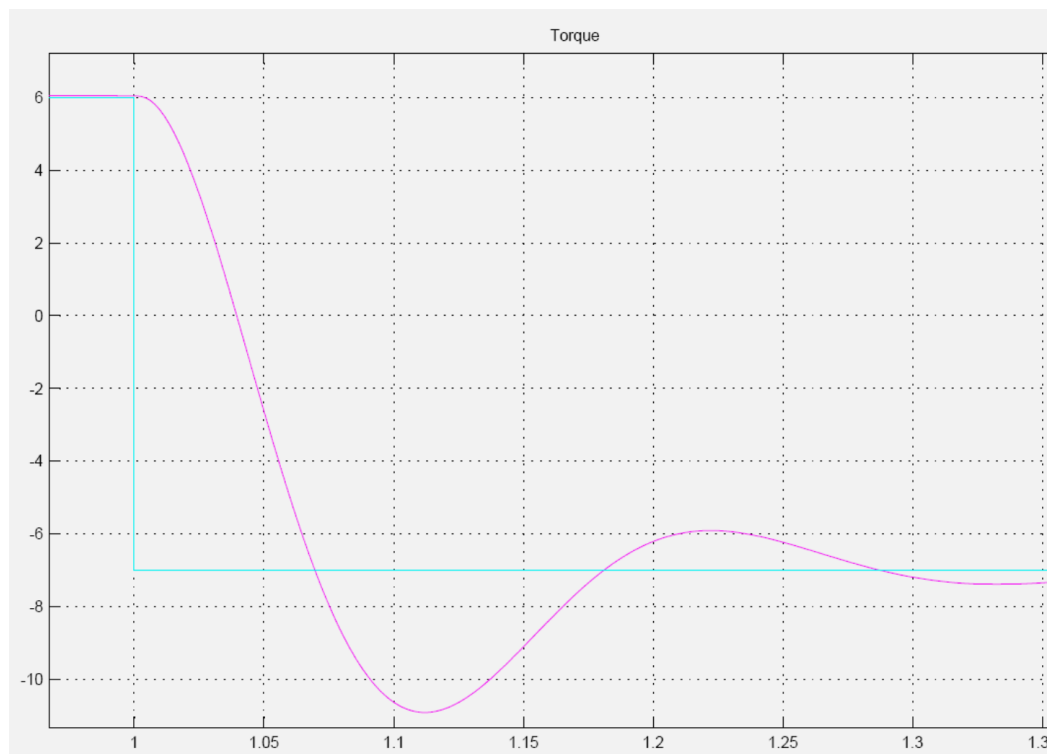
Τέλος θα εφαρμόσουμε μια μεταβλητή ροπή από 6Nm σε -7Nm. Η αλλαγή της ροπής θα γίνει την χρονική στιγμή $t=1s$.



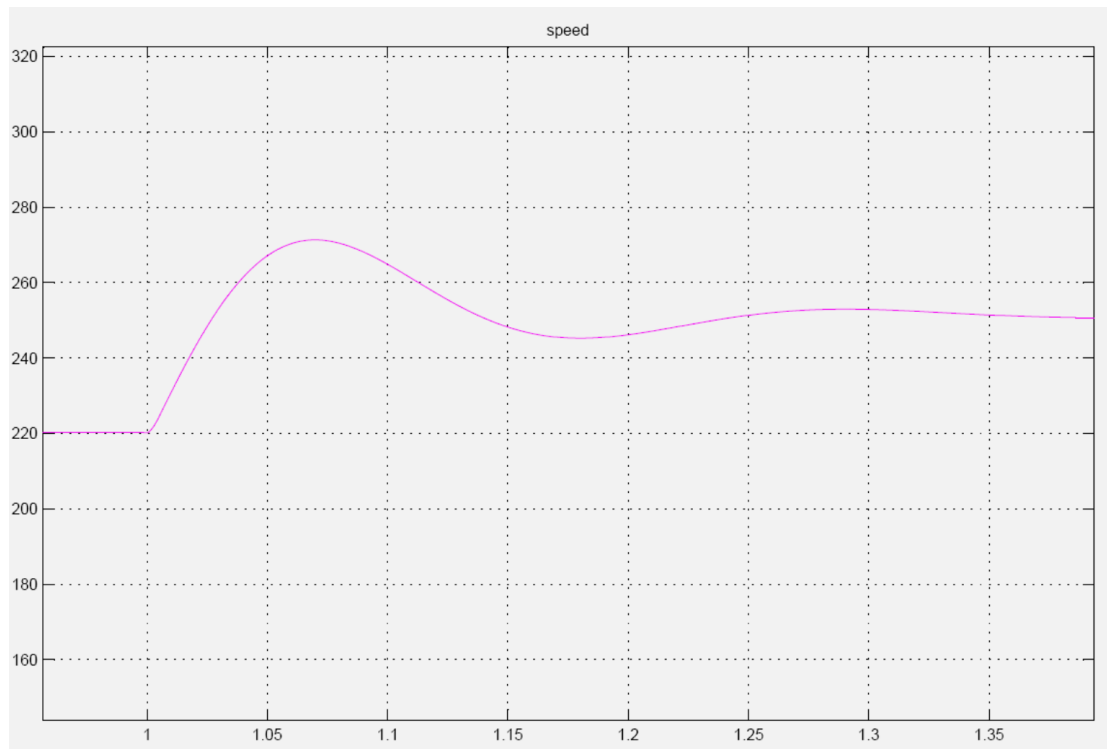
Σχήμα 3.43: Ροπή στον άξονα του κινητήρα



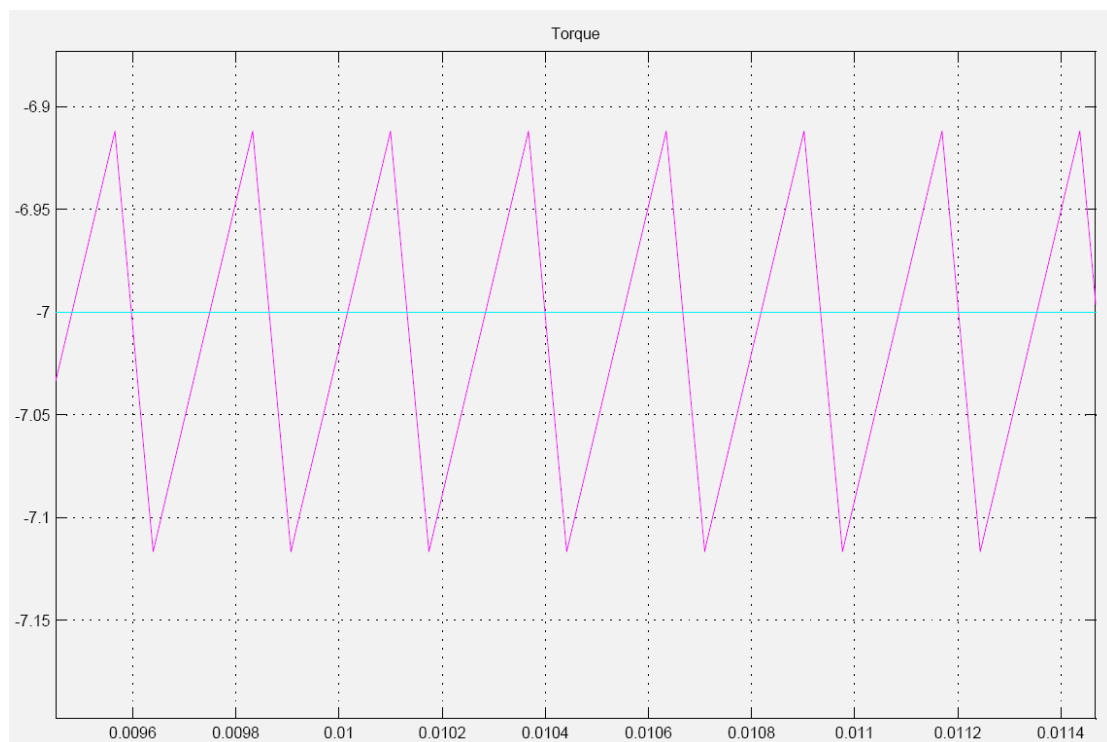
Σχήμα 3.44: Ταχύτητα στον άξονα του κινητήρα



Σχήμα 3.45: Μεγέθυνση του σχήματος 3.43 στο σημείο της βηματικής αλλαγής της ροπής



Σχήμα 3.46: Μεγέθυνση του σχήματος 3.44 στο σημείο της βηματικής αλλαγής της ροπής



Σχήμα 3.47: Κυμάτωση της ροπής σε σχέση με την ροπή αναφοράς

Στο σημείο αυτό βλέπουμε ότι για μια μεταβολή της ροπής από 6Nm σε -7Nm η απόκριση του συστήματος μας ήταν $t=0,4s$. Ο χρόνος αυτός είναι μεγάλος σε σχέση με τον χρόνο απόκρισης όπου ελέγχαμε μόνο ηλεκτρικά μεγέθη κι ήταν της τάξης των ms. Αυτό συμβαίνει διότι έχουμε μηχανικά μεγέθη όπως η ταχύτητα, με αργές σταθερές χρόνου, οπότε έχουν και μεγαλύτερο χρόνο απόσβεσης. Αυτό επηρεάζει και την ροπή αφού για τις μηχανές συνεχούς ρεύματος υπάρχει εξάρτηση της ταχύτητας με την ροπή. Επίσης το σχήμα 3.47 μας παρουσιάζει την κυμάτωση της ροπής σε σχέση με την ροπή αναφοράς μας.

Στα σχήματα αυτής της ενότητας βλέπουμε μια διαφορά σε σχέση με τα προηγούμενα στον χρόνο απόκρισης της ροπής. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των μηχανικών μεγεθών που έχουν μεγάλες σταθερές χρόνου σε σχέση με τα ηλεκτρικά μεγέθη. Στην προηγούμενη ενότητα οι στροφές της μηχανής ήταν σταθερές και θεωρητικά η μηχανή ήταν σαν να ξεκινάει από αυτές τις στροφές ενώ εδώ αρχίζει η μηχανή σταδιακά να επιταχύνεται μέχρι την σταθερή ταχύτητα που θα φτάσει στη μόνιμη κατάσταση. Επίσης αυτή η ταλάντωση οφείλεται στο σύστημα που εκτελεί αποσβενομένη ταλάντωση, διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

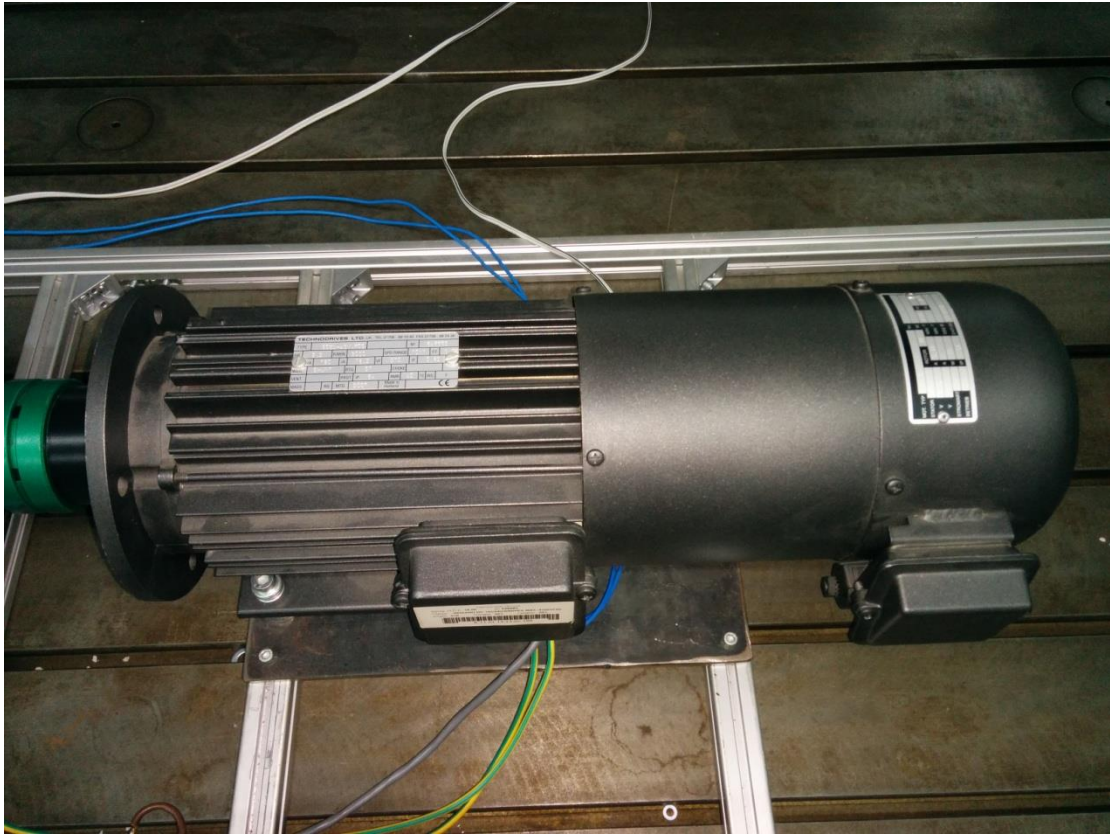
4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Ο τρόπος υλοποίησης της πλακέτας ισχύος και της πλακέτας ελέγχου καθώς και η επιλογή των επιμέρους στοιχείων που τις αποτελούν. Η κάθε μία μονάδα που αναφέραμε προηγουμένως, υλοποιήθηκε πάνω σε τυπωμένη πλάκα χαλκού διπλής όψης. Τα απαραίτητα σχέδια των τυπωμένων κυκλωμάτων κάθε πλακέτας έγιναν με τη χρήση του δωρεάν λογισμικού KiCad.

4.2 Επιλογή μηχανής συνεχούς ρεύματος

Η μηχανή που επιλέξαμε να ελέγξουμε για να λειτουργήσει σαν μια διάταξη φόρτισης ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος είναι μια μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, η CR/1659 της εταιρείας Transdrive Engineering Services Ltd.

Σύμφωνα με τις κατάλληλες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σ' άλλη διπλωματική εργασία [24] υπολογίστηκε η ονομαστική αντίσταση τυμπάνου $R_T=0,62\Omega$ και η ονομαστική μαγνητική ροή $C\Phi=0,5 \text{ Vs/rad}$. Επίσης η μηχανή αυτή διαθέτει ονομαστική ισχύς $2,2\text{kW}$ με ονομαστικό ρεύμα $15,2\text{A}$ και ονομαστικές στροφές 3000rpm . Τέλος η ονομαστική τάση λειτουργίας στο τύλιγμα του τυμπάνου είναι 180V ενώ στο τύλιγμα της διέγερσης 210V . Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και τις εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος (παράγραφος 1.3) στην μόνιμη κατάσταση μπορούμε να υπολογίσουμε οποιοδήποτε άλλο μέγεθος μας είναι απαραίτητο. Στην συνέχεια παρουσιάζεται μια εικόνα της μηχανής συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή μας.



Σχήμα 4.1: Η μηχανή συνεχούς ρεύματος της διάταξης

4.3 Κατασκευή πλακέτας ισχύος

Η κατασκευή του μετατροπέα πλήρους γέφυρας, που επιλέξαμε να κατασκευάσουμε, αποτελείται από τέσσερα διακοπτικά στοιχεία ισχύος, πυκνωτές που τοποθετούνται στην είσοδο για φίλτρο εισόδου καθώς κι ένα μετρητικό ρεύματος. Να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο ότι θεωρούμε ξεχωριστή μονάδα το τμήμα οδήγησης των παλμών ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων και θα τη μελετήσουμε ξεχωριστά.

4.3.1 Επιλογή διακοπτικών στοιχείων ισχύος

Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος έχουν πολυπλοκότερη δομή από τα αντίστοιχα στοιχεία χαμηλής ισχύος. Αυτό οφείλεται στις τροποποιήσεις που έχουν υποστεί στην δομή τους για να αντέχουν σε υψηλές τάσεις και ρεύματα. Τα ιδιαίτερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, που απαιτείτε να διαθέτουν τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος είναι:

- Οι υψηλές τάσεις διάσπασης
- Η ικανότητα διέλευσης υψηλών τιμών ρεύματος
- Οι μικρές πτώσεις τάσης σε κατάσταση αγωγής
- Οι χαμηλές αντιστάσεις αγωγής
- Οι μικρές τιμές του ρεύματος διαρροής
- Οι μικροί διακοπτικοί χρόνοι έναυσης και σβέσης

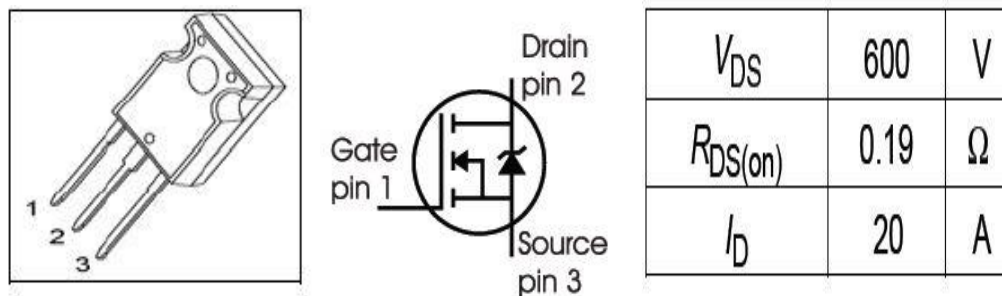
Τα διακοπτικά στοιχεία που επιλέξαμε για τον μετατροπέα μας είναι τα MOSFET ισχύος. Η επιλογή αυτή έγινε για τους εξής λόγους:

- Το mosfet είναι ένα ελεγχόμενο από τάση διακοπτικό στοιχείο με αποτέλεσμα η ισχύς που απαιτείται για την παλμοδότηση του, είναι χαμηλή
- Έχει μικρούς χρόνους έναυσης και σβέσης, οι οποίοι δεν εξαρτώνται από την θερμοκρασία με άμεσο αποτέλεσμα να δουλεύουν σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες
- Υπάρχει η δυνατότητα εύκολου παραλληλισμού
- Λόγω της δομής τους, τα mosfet ισχύος διαθέτουν εσωτερικά μια δίοδο, οπότε είναι κατάλληλα για εφαρμογές σε γέφυρες που απαιτείται μια αντιπαράλληλη δίοδο μειώνοντας το κόστος της διάταξης και προσφέροντας οικονομία σε χώρο

Το μοναδικό μειονέκτημα που έχουν τα mosfet, είναι η υψηλή αντίσταση αγωγής με αποτέλεσμα να έχουμε αυξημένες απώλειες αγωγής.

Για την ορθή επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων πρέπει να αντέχουν την μέγιστη τάση αποκοπής, την αντοχή στην ενεργό τιμή του μέγιστου ρεύματος καθώς και στην συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα μας. Με βάση την διάταξη μας, η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στο κύκλωμα μας είναι η τάση εισόδου 180V που πρέπει τα διακοπτικά στοιχεία να μπορούν να την αποκόπτουν και μέγιστο ρεύμα το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής 15,2A, που εάν διαρρεύσει μεγαλύτερο θα καταστρέψει την μηχανή μας . Αυτά ισχύουν και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής, τόσο για κινητήρα όσο και για γεννήτρια. Η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα μας για την υλοποίηση του έλεγχου υστέρησης είναι περίπου στα 10kHz και εξαρτάται από την ακρίβεια στα όρια του ρεύματος που θέλουμε. Μια καλή επιλογή για τις απαιτήσεις που έχουμε είναι τα MOSFET SPW20N60S5 της εταιρείας

Infineon Technologies, τα οποία αντέχουν τάση μεταξύ υποδοχής-πηγής $V_{DS} = 600V$ και ρεύμα διέλευσης $I_D = 20A$. Επίσης έχει αντίσταση αγωγής $0,19\Omega$.



Σχήμα 4.2: Το mosfet ισχύος

Η παλμοδότηση του γίνεται με παλμούς εύρους 15V. Για προστασία του διακοπτικού στοιχείου τοποθετούμε παράλληλα στο τρανζίστορ μια δίοδο zener, με την κάθοδο της στο gate και την άνοδο της στο source. Έτσι εάν από κάποιο σφάλμα δώσουμε έναν παλμό με μεγάλη τάση θα καταρρεύσει η δίοδος και το ρεύμα θα περάσει από αυτήν και δεν θα καταστρέψει το διακοπτικό στοιχείο. Για την ροή του ρεύματος προς την αντίθετη φορά κατά την εκφόρτιση του ρεύματος της επαγωγής άγει η εσωτερική αντιπαράλληλη δίοδος του mosfet οπότε προσφέρει έναν δρόμο διαφυγής του ρεύματος.

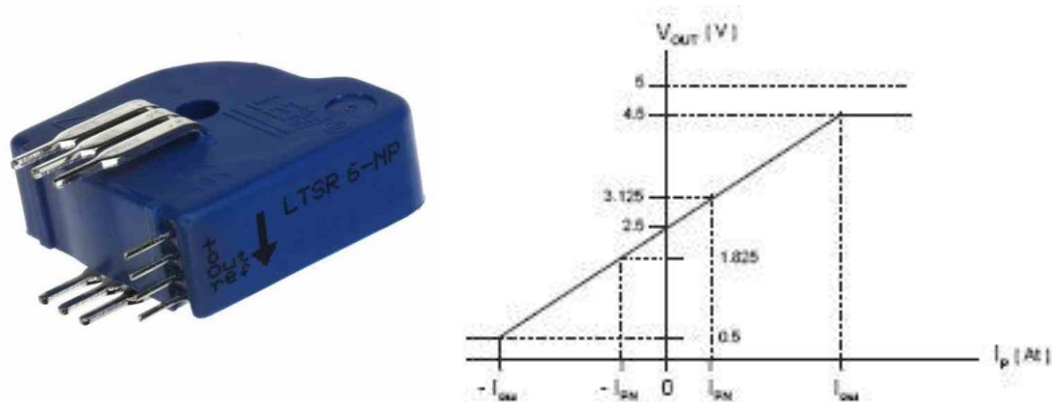
4.3.2 Πυκνωτές εισόδου

Παράλληλα με την είσοδο του μετατροπέα τοποθετούμε δύο πυκνωτές, έναν πυκνωτή πολυπροπυλενίου κι έναν ηλεκτρολυτικό. Η σύνδεση αυτή των πυκνωτών έχει ως στόχο να μειώσει τις παρασιτικές επαγωγές των γραμμών καθώς και να σταθεροποιήσει την τάση εισόδου από μικρές μεταβολές. Η επιλογή τους γίνεται με βάση την χωρητικότητα τους και την τάση εισόδου που αντέχουν στα άκρα τους. Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής έχει χωρητικότητα $1\mu F$ και τάση αντοχής 400V, ενώ ο πυκνωτής πολυπροπυλενίου έχει χωρητικότητα 10nF και τάση αντοχής 400V.

4.3.3 Μετρητικό ρεύματος

Για να μπορέσουμε να ελέγξουμε κατάλληλα τον μετατροπέα μας και να υλοποιήσουμε τον έλεγχο κλειστού βρόχου, πρέπει να μετράμε το ρεύμα που διαρρέει

το πηνίο της μηχανής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε το μετρητικό ρεύματος LEM LTS 6-NP.



Σχήμα 4.3: Το μετρητικό ρεύματος και η χαρακτηριστική λειτουργίας του

Το μετρητικό αυτό έχει την δυνατότητα να μετρήσει ρεύμα από -19,2A έως 19,2A ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του.

Number of primary turns	Primary nominal current rms I_m [A]	Nominal output voltage V_{out} [V]	Primary resistance R_p [mΩ]	Primary Insertion Inductance L_p [μH]	Recommended connections
1	± 6	2.5 ± 0.625	0.18	0.013	
2	± 3	2.5 ± 0.625	0.61	0.05	
3	± 2	2.5 ± 0.625	1.62	0.12	

Σχήμα 4.4: Συνδεσμολογία LEM για επιθυμητή τιμή ρεύματος

Το μετρητικό ρεύματος μετράει κάποιο ρεύμα και το μετατρέπει σ' αντίστοιχη τάση με βάση τον εξής τύπο:

$$V_{out} = 2,5 + 0,625 \frac{I_P}{I_{PN}} \quad (4.1)$$

Όπου I_P είναι η πραγματική τιμή του ρεύματος σε A και I_{PN} ανάλογα με την συνδεσμολογία μπορεί να πάρει τιμή 2,3,6. Εμείς επειδή θέλουμε να μετρήσουμε ρεύμα μέχρι $\pm 15A$ θα επιλέξουμε την πρώτη συνδεσμολογία. Η τάση που μας δίνει

το μετρητικό είναι από 0,5 V έως 2,5V για αρνητικά ρεύματα και 2,5V έως 4,5V για θετικά ρεύματα. Η ακριβής τιμή της τάσης εξόδου του μετρητικού δίνεται από την σχέση (6.1) για $I_{PN}=6$ και I_P με το ρεύμα που μετράει σε A.

4.3.4 Επιλογή ψυκτικού

Σε κάθε εφαρμογή με ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος είναι απαραίτητη η ψύξη τους, οπότε πρέπει να λάβουμε μέριμνα χρησιμοποιώντας κάποιο ψυκτικό σώμα. Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος παρουσιάζουν απώλειες αγωγής, οι οποίες εξαρτώνται από την αντίσταση αγωγής του στοιχείου και διακοπτικές απώλειες κατά την έναυση και σβέση του στοιχείου που εξαρτώνται από την συχνότητα λειτουργίας του στοιχείου.

Για τον υπολογισμό του απαραίτητου ψυκτικού σώματος χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$R_{\Theta,sa} = \frac{T_j - T_a}{P_{LOSS,TOTAL}} - (R_{\Theta,jc} + R_{\Theta,cs}) \quad (4.2)$$

όπου $R_{\Theta,sa}$ η θερμική αντίσταση του ψυκτικού σώματος, T_j η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου, T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος, P_{loss} το ποσό της εκλυόμενης θερμότητας, $R_{\Theta,jc}$ η θερμική αντίσταση μεταξύ επαφής και συσκευασίας του ημιαγωγικού στοιχείου, και $R_{\Theta,cs}$ η θερμική αντίσταση μεταξύ θήκης και ψυκτικού.

Για να βρούμε τις συνολικές απώλειες του mosfet τόσο κατά την αγωγή του, όσο και τις διακοπτικές απώλειες του χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο τύπο:

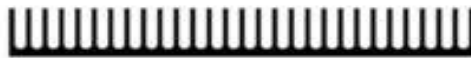
$$P_{LOSS} = I_{RMS}^2 R_{DS,on} + \frac{I_{min} V_{in}}{2} t_{on} f_s + \frac{I_{max} V_{in}}{2} t_{off} f_s \quad (4.3)$$

όπου I_{rms} η ενεργός τιμή του ρεύματος του στοιχείου κατά την αγωγή, R_{DSon} η αντίσταση αγωγής του στοιχείου, V η μέγιστη τιμή της τάσης στο στοιχείο, I_{min} η τιμή του ρεύματος κατά την έναυση του στοιχείου, I_{max} η τιμή του ρεύματος κατά τη σβέση του στοιχείου, f_s η διακοπτική συχνότητα, t_{on} και t_{off} ο χρόνος έναυσης και σβέσης του στοιχείου αντίστοιχα.

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τις τιμές: $I_{rms}=15A$, $R_{DSon}=0,19\Omega$, $V_{in}=180V$, $I_{min}=14,9A$, $I_{max}=15,1$, $t_{on}=145ns$, $t_{off}=160ns$, $f_s=20kHz$, οι απώλειες σε κάθε MOSFET κατά την ονομαστική λειτουργία στην χειρότερη περίπτωση ισούνται με $P_{MOSFET}=47W$.

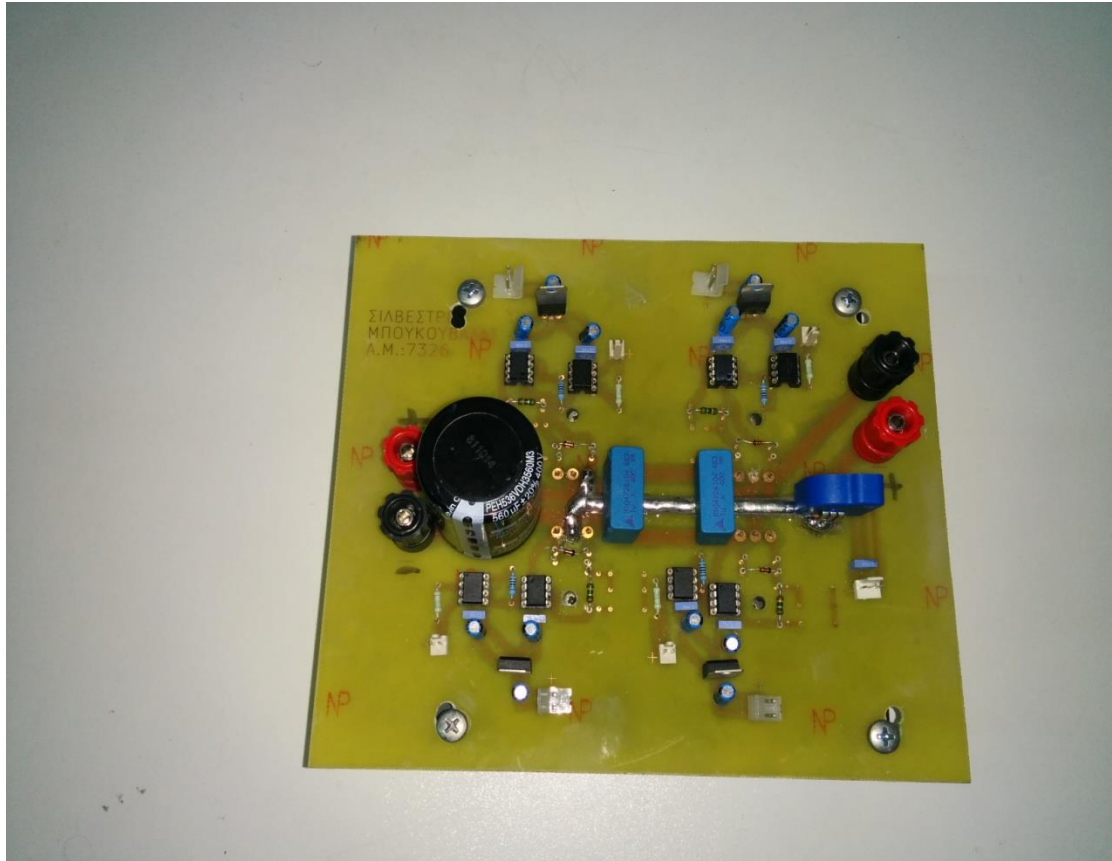
Από το φυλλάδιο κατασκευαστή προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των ημιαγωγικών στοιχείων είναι $T_j=125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ η θερμική αντίσταση μεταξύ επαφής και συσκευασίας του ημιαγωγικού στοιχείου $R_{\theta,jc}$ είναι $0,6\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ για το MOSFET και $0,75\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ για τη δίοδο. Για μια τυπική τιμή της θερμικής αντίστασης μεταξύ συσκευασίας και ψυκτικού ($R_{\theta,cs}=0,5\text{ }^{\circ}\text{C/W}$) και για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_a=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, η θερμική αντίσταση του ψυκτικού ισούται με $R_{\theta,sa}=0,75\text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

Είναι προφανές ότι η τιμή της θερμικής αντίστασης του ψυκτικού σώματος που θα επιλεγεί πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της υπολογισθείσας τιμής. Για την εφαρμογή μας, επιλέξαμε το ψυκτικό σώμα της εταιρίας Aavid Thermalloy, διαστάσεων $200\times 200\times 25\text{ mm}$ και θερμικής αντίστασης $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

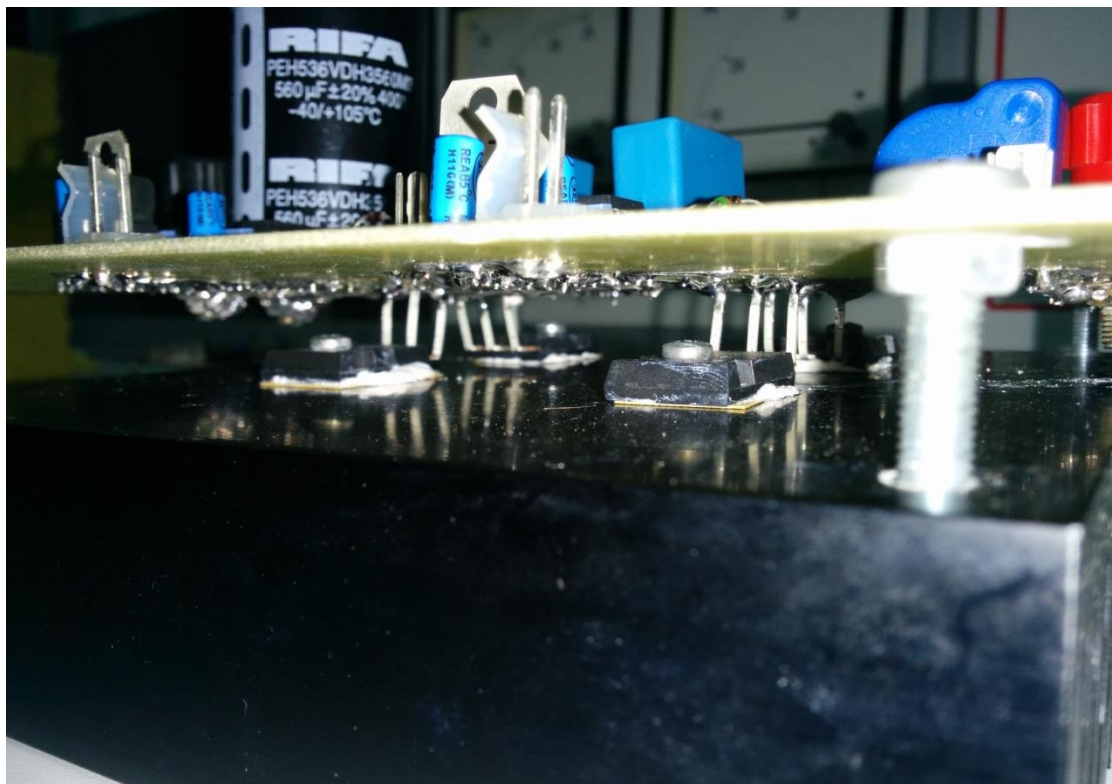


Σχήμα 4.5: Το ψυκτικό σώμα της εφαρμογής μας

Στην συνέχεια απεικονίζεται η πλακέτα του κυκλώματος ισχύος πλήρους γέφυρας. Στο σχήμα 4.6 μπορούμε να δούμε τον μεγάλο ηλεκτρολυτικό πυκνωτή, τους δύο πυκνωτές πολυπροπυλενίου, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που είναι απαραίτητα για την τροφοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων καθώς επίσης και το μετρητικό ρεύματος. Στο σχήμα 4.7 μπορούμε να διακρίνουμε τα τέσσερα ημιαγωγικά στοιχεία καθώς επίσης και τον τρόπο τοποθέτησης τους πάνω στο ψυκτικό σώμα για την απαγωγή της θερμότητας τους.



Σχήμα 4.6: Κάτοψη του μετατροπέα ισχύος



Σχήμα 4.7: Άποψη του μετατροπέα ισχύος

4.4 Κατασκευή πλακέτας ελέγχου

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε τον τρόπο με τον οποίο επιλέξαμε τα ολοκληρωμένα κυκλώματα για την παλμοδότηση των διακοπτικών στοιχείων. Επίσης θα περιγράψουμε την λειτουργία δύο ολοκληρωμένων, για την απομόνωση και την ενίσχυση των παλμών. Τα συγκεκριμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα ελέγχουν σήματα μικρής ισχύος γι' αυτό και τα παραθέτουμε σ' αυτή την ενότητα. Όμως τα τοποθετήσαμε στην πλακέτα ισχύος, για να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα διακοπτικά στοιχεία με σκοπό τη μείωση του θορύβου και των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

4.4.1 Επιλογή μικροελεγκτή

Ο μικροελεγκτής είναι ένας τύπος μικροεπεξεργαστή στον οποίο έχουν ενσωματωθεί διάφορες περιφερειακές μονάδες με συνέπεια να είναι περισσότερο αυτόνομος από έναν απλό μικροεπεξεργαστή γενικού σκοπού. Εκτός από την αριθμητική και λογική μονάδα (ALU), τη μονάδα ελέγχου (CU) και τους καταχωρητές μνήμης (memory registers), στον μικροελεγκτή είναι ενσωματωμένο το ρολόι, μνήμη RAM για αποθήκευση δεδομένων, μνήμη ROM ή Flash memory για αποθήκευση του προγράμματος, μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και αντίστροφα (A/D Converters), εξειδικευμένα περιφερειακά όπως γεννήτρια PWM κλπ. Επομένως, πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο υψηλού βαθμού ολοκλήρωσης που εκτελεί αριθμητικές και λογικές λειτουργίες, καθώς και τις απαραίτητες λειτουργίες ελέγχου.

Ενσωματώνοντας τη μνήμη και τα υπόλοιπα περιφερειακά σε ένα πακέτο μειώνεται η υπολογιστική ισχύς. Υπάρχουν, όμως, και σημαντικά πλεονεκτήματα του ενσωματωμένου συστήματος, τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Μειωμένο κόστος συστήματος, σε σχέση με την υλοποίηση του από ανεξάρτητες μονάδες.
- Μικρό μέγεθος.
- Ανθεκτικότητα στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, καθώς οι διασυνδέσεις με τα περιφερειακά είναι εσωτερικές του chip.

- Αυτάρκεια-Αυτονομία, λόγω της ενσωμάτωσης όλων των απαραίτητων περιφερειακών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής DSPIC30F2020 της εταιρείας Microchip. Πρόκειται για ένα μικροελεγκτή με δυνατότητες DSP (Digital Signal Processing), ο οποίος διαθέτει τα απαραίτητα περιφερειακά για τον έλεγχο μετατροπών ισχύος. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι:

- Προγραμματίζεται σε γλώσσα C.
- Διαθέτει ένα σετ 83 εντολών με ευέλικτη διευθυνσιοδότηση.
- 512 bytes μνήμης RAM .
- 12 Kbytes Flash memory για τα προγράμματα.
- 16 x 16 bits πίνακες καταχωρητών εργασίας.
- Ταχύτητα εκτέλεσης εντολών έως και 30 MIPS.
- 32 πηγές διακοπών (interrupt sources).
- 3 εξωτερικές πηγές διακοπών (external interrupt sources).
- 4 διακοπές trap στον επεξεργαστή.
- 8 επίπεδα προτεραιότητας, επιλεγόμενα από το χρήστη, για κάθε πηγή διακοπών.

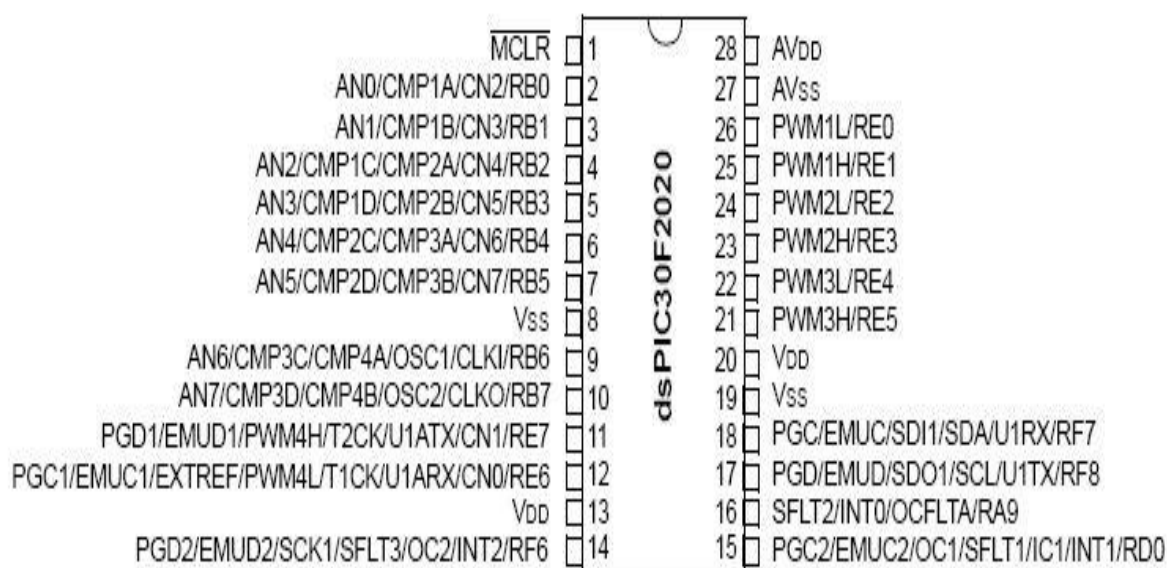
Τα σημαντικότερα περιφερειακά που ενσωματώνονται στον μικροελεγκτή είναι τα ακόλουθα:

- 4 Γεννήτριες PWM.
- 1 Χρονιστής (Timer) των 16 bits.

- 1 Χρονιστής Γενικού Σκοπού (General Purpose Timer) των 32 bits, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν 2 χρονιστές των 16 bits.
- Ένας 10 bit A/D Μετατροπέας με 5 κανάλια S/H και μέγιστο ρυθμό μετατροπής στα 2 Msps.
- 2 μονάδες Ασύγχρονης Επικοινωνίας (UART).
- Άλλες μονάδες επικοινωνίας βασισμένες στα πρωτόκολλα SPI και I²C

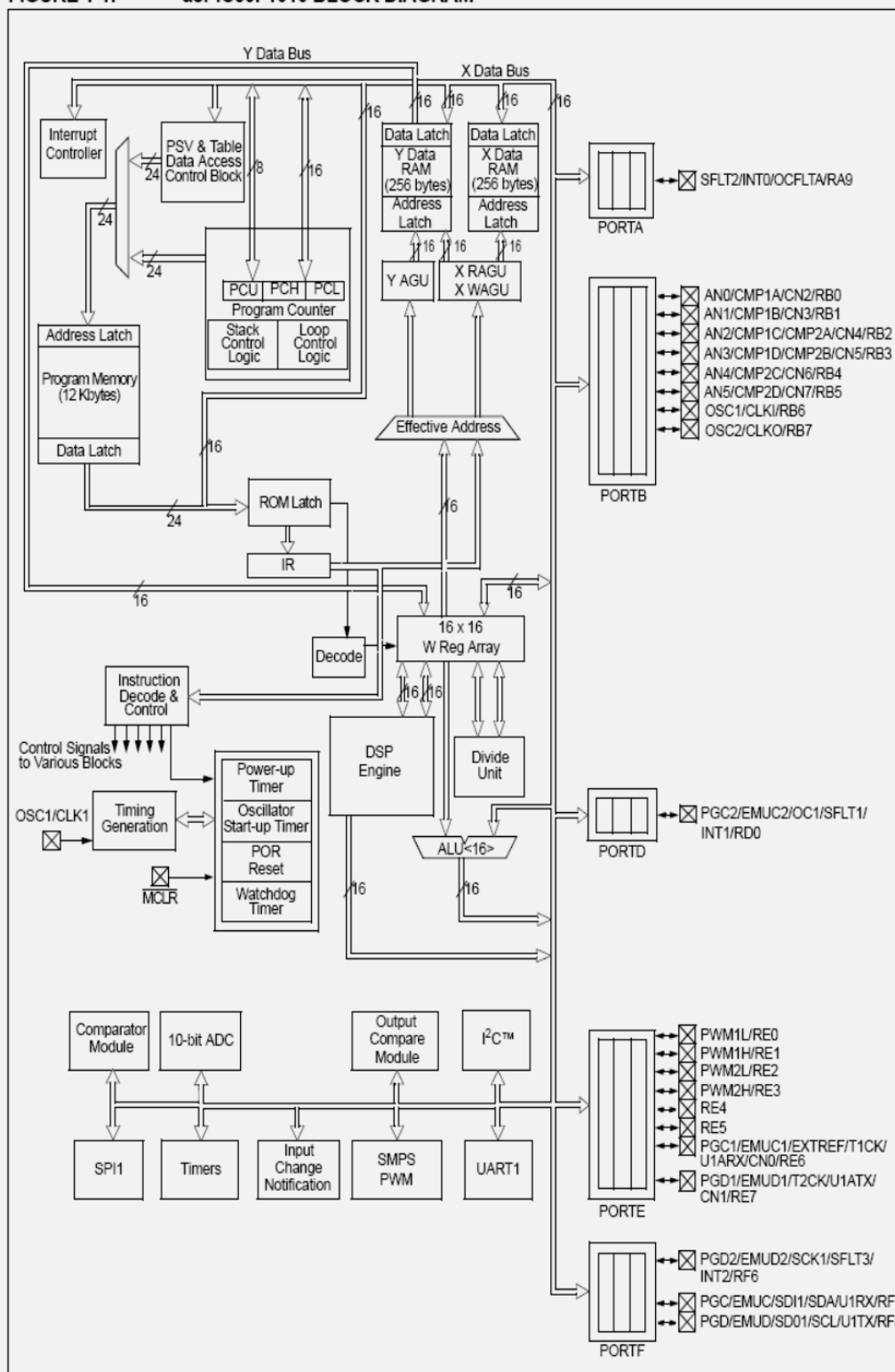
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια σχήματα που θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε καλύτερα τον συγκεκριμένο μικροελεγκτή:

28-Pin SDIP and SOIC



Σχήμα 4.8 :Το pin διάγραμμα του μικροελεγκτή dsPIC30F2020

FIGURE 1-1: dsPIC30F1010 BLOCK DIAGRAM



Σχήμα 4.9 :Το δομικό διάγραμμα του μικροελεγκτή dsPIC30F2020

TABLE 1-2: PINOUT I/O DESCRIPTIONS FOR dsPIC30F2020

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN7	I	Analog	Analog input channels.
AVDD	P	P	Positive supply for analog module.
AVss	P	P	Ground reference for analog module.
CLKI CLKO	I O	ST/CMOS —	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLK0 in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
EMUD EMUC EMUD1 EMUC1 EMUD2 EMUC2	I/O I/O I/O I/O I/O I/O	ST ST ST ST ST ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin. ICD Primary Communication Channel clock input/output pin. ICD Secondary Communication Channel data input/output pin. ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin.
IC1	I	ST	Capture input.
INT0 INT1 INT2	I I I	ST ST ST	External interrupt 0 External interrupt 1 External interrupt 2
SFLT1 SFLT2 SFLT3 PWM1L PWM1H PWM2L PWM2H PWM3L PWM3H PWM4L PWM4H	I I I O O O O O O O O O	ST ST ST — — — — — — — — —	Shared Fault Pin 1 Shared Fault Pin 2 Shared Fault Pin 3 PWM 1 Low output PWM 1 High output PWM 2 Low output PWM 2 High output PWM 3 Low output PWM 3 High output PWM 4 Low output PWM 4 High output
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active low Reset to the device.
OC1-OC2 OCFLTA	O I	— —	Compare outputs. Output Compare Fault pin
OSC1 OSC2	I I/O	CMOS —	Oscillator crystal input. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLK0 in FRC and EC modes.
PGD PGC PGD1 PGC1 PGD2 PGC2	I/O I I/O I I/O I	ST ST ST ST ST ST	In-Circuit Serial Programming™ data input/output pin. In-Circuit Serial Programming clock input pin. In-Circuit Serial Programming data input/output pin 1. In-Circuit Serial Programming clock input pin 1. In-Circuit Serial Programming data input/output pin 2. In-Circuit Serial Programming clock input pin 2.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
I = Input P = Power

Σχήμα 4.10: Περιγραφή της λειτουργίας των pins του μικροελεγκτή

TABLE 1-2: PINOUT I/O DESCRIPTIONS FOR dsPIC30F2020 (CONTINUED)

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
RB0-RB7	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
RA9	I/O	ST	PORTA is a bidirectional I/O port.
RD0	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE7	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF6, RF7, RF8	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI #1.
SDI1	I	ST	SPI #1 Data In.
SDO1	O	—	SPI #1 Data Out.
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C™.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I ² C.
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 Receive.
U1TX	O	—	UART1 Transmit.
U1ARX	I	ST	Alternate UART1 Receive.
U1ATX	O	O	Alternate UART1 Transmit.
CMP1A	I	Analog	Comparator 1 Channel A
CMP1B	I	Analog	Comparator 1 Channel B
CMP1C	I	Analog	Comparator 1 Channel C
CMP1D	I	Analog	Comparator 1 Channel D
CMP2A	I	Analog	Comparator 2 Channel A
CMP2B	I	Analog	Comparator 2 Channel B
CMP2C	I	Analog	Comparator 2 Channel C
CMP2D	I	Analog	Comparator 2 Channel D
CMP3A	I	Analog	Comparator 3 Channel A
CMP3B	I	Analog	Comparator 3 Channel B
CMP3C	I	Analog	Comparator 3 Channel C
CMP3D	I	Analog	Comparator 3 Channel D
CMP4A	I	Analog	Comparator 4 Channel A
CMP4B	I	Analog	Comparator 4 Channel B
CN0-CN7	I	ST	Input Change notification inputs Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
EXTREF	I	Analog	External reference to Comparator DAC

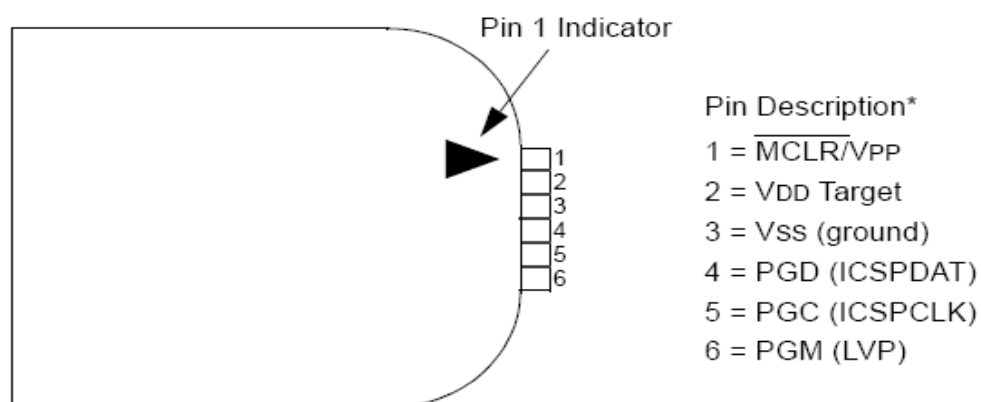
Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
I = Input P = Power

Σχήμα 4.11: Περιγραφή της λειτουργίας των pins του μικροελεγκτή

Για την επικοινωνία του υπολογιστή με τον μικροελεγκτή και τον προγραμματισμό του, χρησιμοποιήθηκε το αναπτυξιακό πρόγραμμα MPLAB X IDE v2.10. Αυτό το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα προγραμματισμού του μικροελεγκτή σε γλώσσα C η οποία είναι πιο εύχρηστη από την γλώσσα Assembly. Επίσης ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει σε πραγματικό χρόνο και το πρόγραμμα μπορεί να σου παρέχει γρήγορη εύρεση σφαλμάτων. Η σύνδεση του υπολογιστή με τον μικροελεγκτή γίνεται μέσω μιας συσκευής που παρέχει η Microchip, το Pickit 3. Οι τρόποι σύνδεσης του Pickit3 με τον υπολογιστή και με τον μικροελεγκτή στην πλακέτα ελέγχου φαίνονται στα σχήματα 4.12 και 4.13.



Σχήμα 4.12: Σύνδεση Pickit 3 με υπολογιστή και πλακέτα μικροελεγκτή



Σχήμα 4.13: Αναλυτική σύνδεση των pins του μικροελεγκτή με το Pickit 3

Ο μικροελεγκτής δεν χρησιμοποιείται μόνο για την παραγωγή παλμών, αλλά μπορεί να υλοποιήσει ένα μεγάλο πλήθος εντολών ελέγχου, ικανοποιώντας οποιαδήποτε λειτουργία θέλουμε να πραγματοποιήσουμε στον μετατροπέα μας αρκεί να δημιουργήσουμε το κατάλληλο πρόγραμμα και να έχουμε επιλέξει τους απαραίτητους ακροδέκτες του στην πλακέτα ελέγχου.

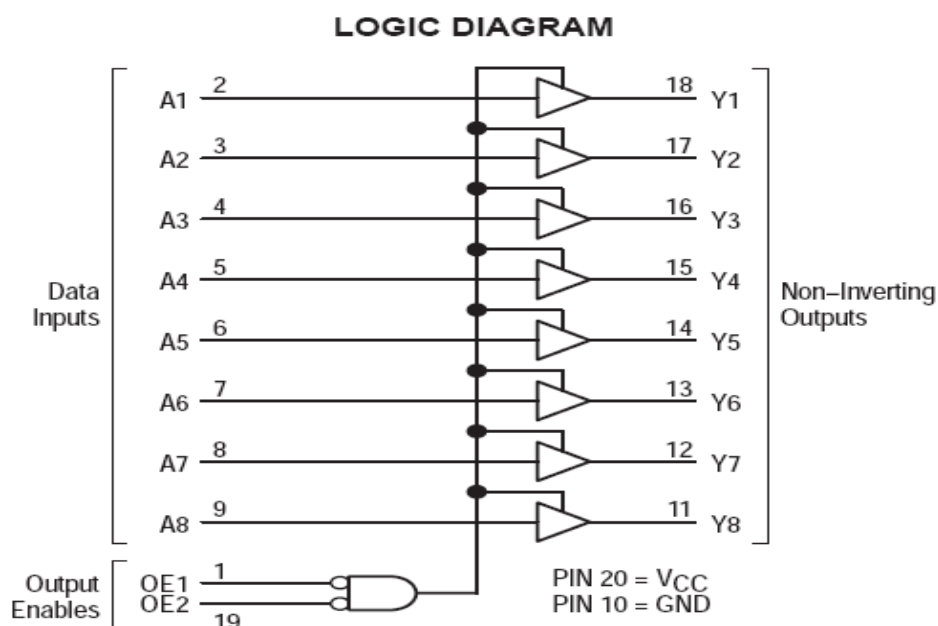
Όσο αναφορά την συγκεκριμένη διπλωματική, οι ακροδέκτες του μικροελεγκτή V_{DD} (pin 13), V_{DD} (pin 20) καθώς και του αναλογικού AV_{DD} (pin 28), έχουν συνδεθεί με την τροφοδοσία των +5V, ενώ οι ακροδέκτες V_{SS} (pin 8), V_{SS} (pin 19) καθώς και του αναλογικού AV_{SS} (pin 27) συνδέονται με τη γείωση. Χρησιμοποιούμε τον ακροδέκτη $\overline{MCLR}$ (pin 1) για να κάνουμε reset τον μικροελεγκτή και οι ακροδέκτες PGD2(pin 14) PGC2(pin 15) για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή. Χρησιμοποιούμε τους ακροδέκτες 2,4,6,7,9 για αναλογικές εισόδους ή για απλές εισόδους-εξόδους του μικροελεγκτή ή μπορεί για κάποιες λειτουργίες που απαιτείται ρολόι. Επίσης οι ακροδέκτες 11,21,23,24,25,26 για απλές εισόδους-εξόδους ή για λειτουργία PWM. Τέλος οι ακροδέκτες 17,18 χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή εάν χρειαστεί στο μέλλον.

4.4.2 Επιλογή ενισχυτή

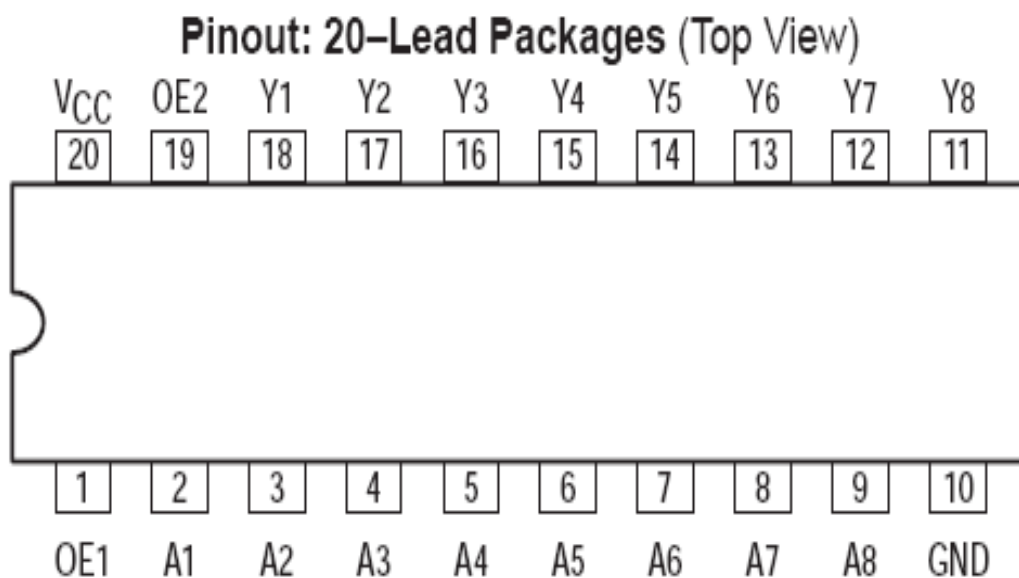
Οι παλμοί που παράγονται από τον μικροελεγκτή δεν είναι ικανοί να κάνουν τα διακοπτικά στοιχεία να έρθουν σε αγωγή. Επίσης για την ασφάλεια του μικροελεγκτή πρέπει να έχουμε απομόνωση μεταξύ του κυκλώματος ελέγχου και του κυκλώματος ισχύος. Έτσι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια σειρά από ολοκληρωμένα στοιχεία που το καθένα από αυτά επιτελεί το δικό του έργο.

Οι παλμοί μόλις παράγονται από τον μικροελεγκτή πηγαίνουν στον ενισχυτή ρεύματος. Αυτό γίνεται διότι ο μικροελεγκτής δεν μπορεί να παρέχει το επιθυμητό ρεύμα που απαιτείται για να οδηγήσουν τα τρανζίστορ. Επιλέγουμε έναν ενισχυτή ρεύματος, τον 75HC541 ο οποίος είναι 8 εισόδων-8 εξόδων. Η τροφοδοσία του είναι 5V και δεν αντιστρέφει τους παλμούς στην έξοδο του. Επίσης διαθέτει δύο ακροδέκτες ελέγχου. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου, πρέπει στις εισόδους του να τοποθετήσουμε αντιστάσεις γιατί στην περίπτωση που ο μικροελεγκτής βρεθεί σε κατάσταση υψηλής εμπίδησης και υπάρξει κάποιος θόρυβος, μπορεί να ενεργοποιεί τις εισόδους του ενισχυτή χωρίς να είναι επιθυμητό. Οι αντιστάσεις αυτές λέγονται pull-down αντιστάσεις και έχουν τιμή

10κΩ. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα λειτουργίας του ενισχυτή ρεύματος.



Σχήμα 4.14: Λογικό διάγραμμα του ενισχυτή ρεύματος 75HC541



Σχήμα 4.15: Λειτουργικό διάγραμμα του ενισχυτή ρεύματος 75HC541

FUNCTION TABLE

Inputs			Output Y
OE1	OE2	A	
L	L	L	L
L	L	H	H
H	X	X	Z
X	H	X	Z

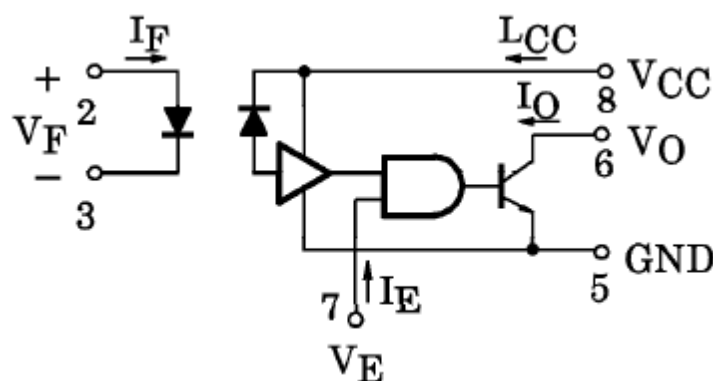
Z = High Impedance

X = Don't Care

Σχήμα 4.16: Πίνακας αληθείας των pins ελέγχου του ενισχυτή ρεύματος 75HC541

4.4.3 Επιλογή οπτοζεύκτη

Για λόγους ασφάλειας πρέπει το κύκλωμα ισχύος να είναι απομονωμένο από το κύκλωμα ελέγχου. Για να συμβεί αυτό πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια συσκευή που να εξασφαλίζει αυτήν την απομόνωση. Υπάρχει η γαλβανική και η οπτική απομόνωση. Εμείς επιλέγουμε ένα ολοκληρωμένο 6N137, που μας προσφέρει οπτική απομόνωση. Αυτό διαθέτει μια φωτοδίοδο κι ένα τρανζίστορ ελεγχόμενο από φως στην βάση του, οπότε όταν η είσοδος είναι high η δίοδος παράγει φώς και κάνει το τρανζίστορ να άγει και να δίνει high στην έξοδο. Αυτό φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.17: Δομικό διάγραμμα του οπτοζεύκτη 6N13

Διαβάζοντας το εγχειρίδιο λειτουργίας του οπτοζεύκτη βλέπουμε ότι υπάρχει περιορισμός στο ρεύμα εισόδου της συσκευής. Για να μπορέσουμε να είμαστε μέσα στα καθορισμένα όρια πρέπει να τοποθετήσουμε αντίσταση στην είσοδο του

ολοκληρωμένου. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η βέλτιστη λειτουργία του οπτοζεύκτη είναι όταν για τάση εισόδου 5V, το ρεύμα εισόδου κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 6,3mA και 10mA. Επομένως, η αντίσταση εισόδου μπορεί να λάβει τιμές από 793Ω έως 500Ω. Για την εφαρμογή μας επιλέξαμε $R_{in} = 650\Omega$. Επειδή η τοπολογία της συσκευής είναι ανοικτού συλλέκτη μεταξύ των ακροδεκτών V_O και V_{CC} του ολοκληρωμένου πρέπει να τοποθετήσουμε μια αντίσταση. Για την εφαρμογή μας επιλέξαμε $R_{OUT} = 1k\Omega$. Αυτή η συσκευή διαθέτει κι έναν ακροδέκτη ελέγχου η λειτουργία του οποίου θα παρουσιαστεί στο σχήμα 4.18.

INPUT	ENABLE	OUTPUT
H	H	L
L	H	H
H	L	H
L	L	H

Σχήμα 4.18: Λειτουργία του ENABLE pin του οπτοζεύκτη 6N137

Τέλος, ο οπτοζεύκτης αντιστρέφει τους παλμούς οπότε στην συνέχεια πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια άλλη συσκευή που να τους επαναφέρει στην αρχική τους μορφή.

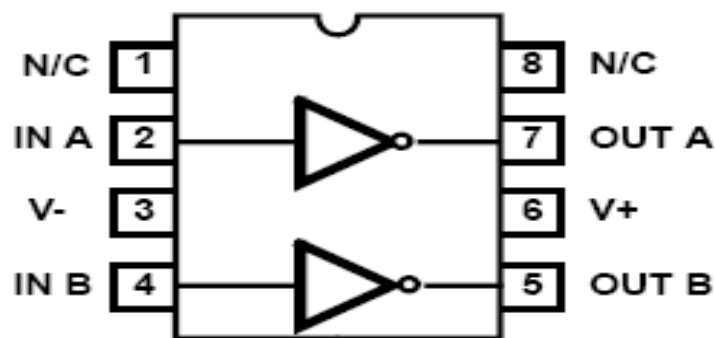


- 1 : N.C.
- 2 : ANODE
- 3 : CATHODE
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : OUTPUT (OPEN COLLECTOR)
- 7 : ENABLE
- 8 : VCC

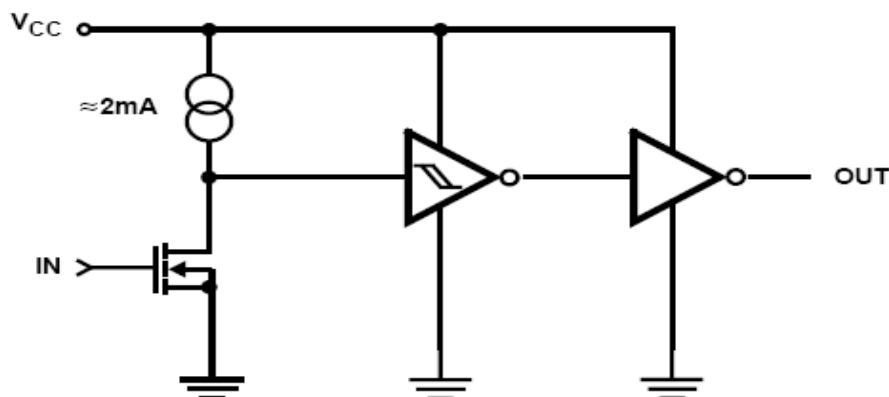
Σχήμα 4.19: Λειτουργικό διάγραμμα του οπτοζεύκτη 6N137

4.4.4 Επιλογή οδηγού παλμών

Για να μπορέσουν τα τρανζίστορ(mosfet) να έρθουν σε αγωγή πρέπει το εύρος των παλμών να είναι 15V. Για να συμβεί αυτό, οι παλμοί μας οδηγούνται σ' ένα ολοκληρωμένο, που ονομάζεται οδηγός παλμών και διαμορφώνει το εύρος των παλμών από τα 5V στα 15V. Για την εφαρμογή μας επιλέγουμε το ολοκληρωμένο ICL7667. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο διαθέτει δύο κανάλια εισόδων και δύο εξόδων, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα ή να γεφυρωθούν σ' ένα, όπως επιλέχτηκε στην περίπτωση μας. Επίσης η τάση τροφοδοσίας του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου είναι 15V. Εκτός από την αλλαγή του εύρους του παλμού, ο οδηγός παλμών αντιστρέφει τους παλμούς και σε συνδυασμό με την αντιστροφή που πραγματοποιεί και ο οπτοζεύκτης ο τελικός παλμός είναι ο ίδιος που δημιούργησε ο μικροελεγκτής, με τις ιδιότητες όμως που του πρόσφερε το κάθε ολοκληρωμένο.

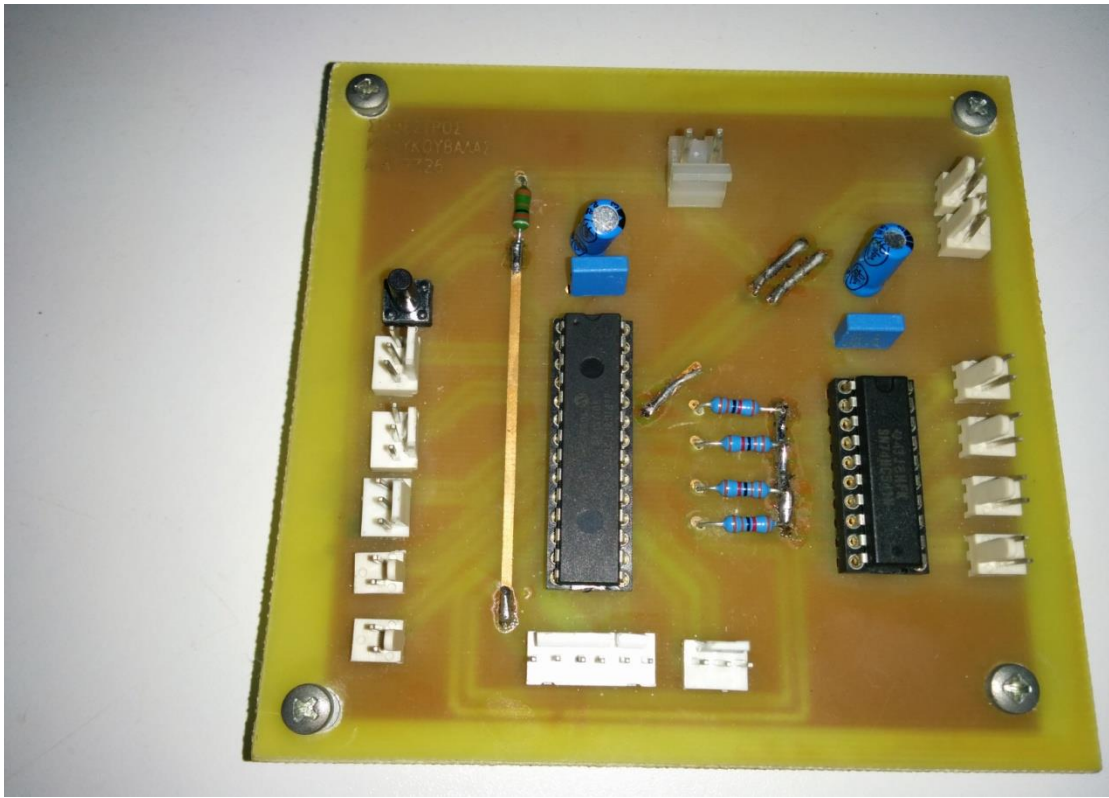


Σχήμα 4.20: Σχηματικό διάγραμμα του οδηγού παλμών ICL7667

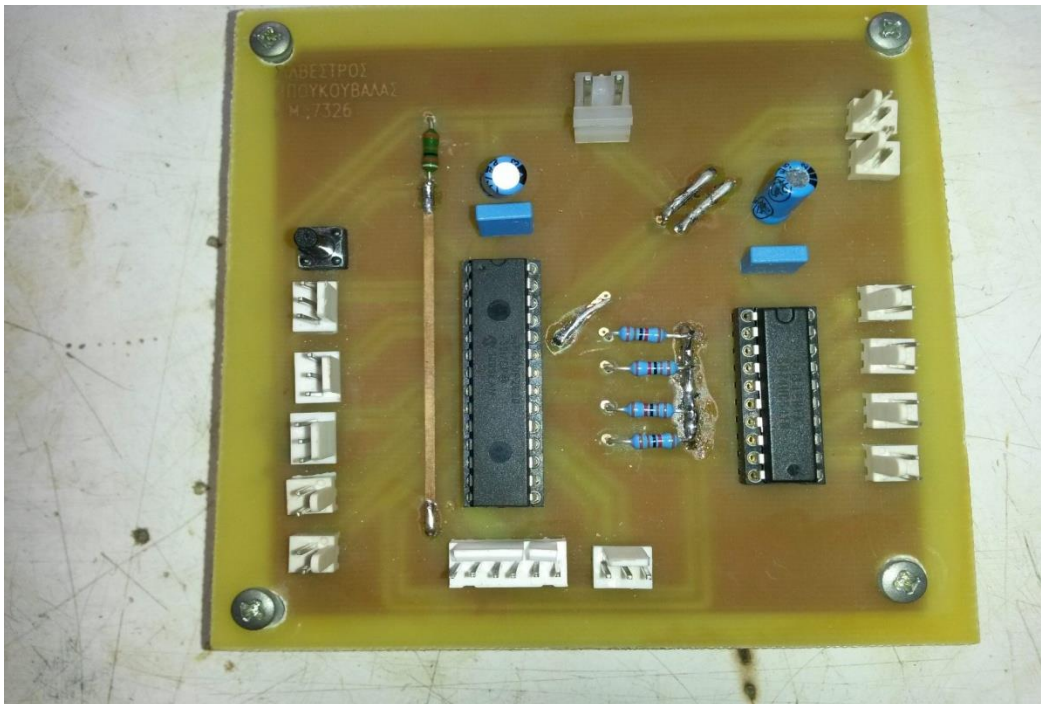


Σχήμα 4.21: Λειτουργικό διάγραμμα του οδηγού παλμών ICL7667

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η πλακέτα του ελέγχου.



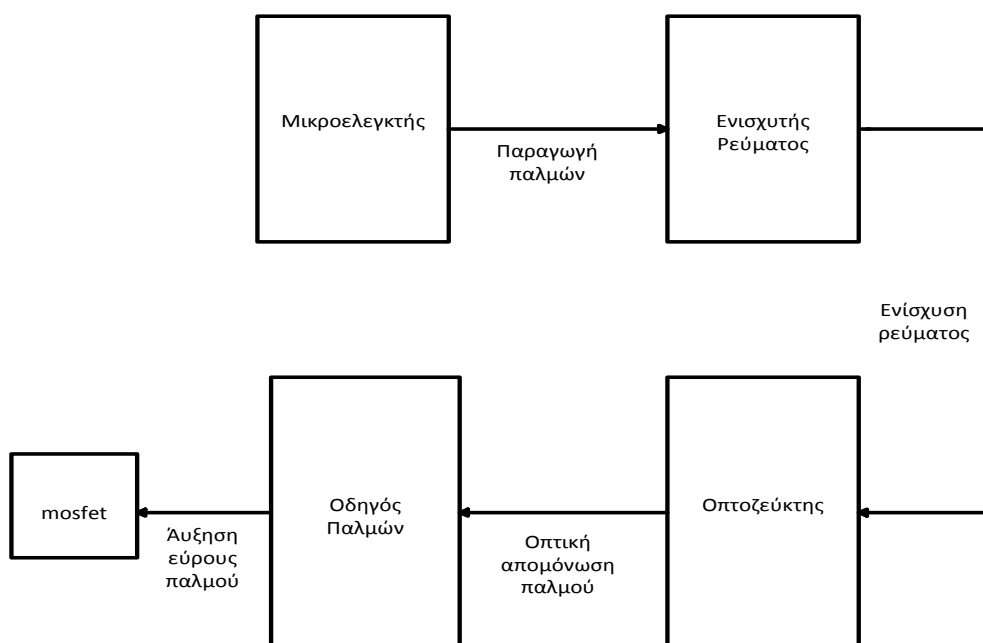
Σχήμα 4.22: Κάτοψη της πλακέτας ελέγχου



Σχήμα 4.23: Άποψη της πλακέτας ελέγχου

4.4.5 Σχηματική απεικόνιση της πορείας των παλμών

Από την παραγωγή του παλμού στον μικροελεγκτή μέχρι την παλμοδότηση των mosfet ο παλμός χρειάστηκε πολλές τροποποιήσεις για να μπορέσει να κάνει τα mosfet να άγουν. Η λειτουργία των επιμέρους ολοκληρωμένων που βοήθησαν σ' αυτές τις τροποποιήσεις περιγράφηκε παραπάνω. Οι οπτοζεύκτες και οι οδηγοί παλμών βρίσκονται στην πλακέτα ισχύος για να είναι όσο τον δυνατόν πιο κοντά στα mosfet για να μειώσουμε τις παρεμβολές και τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, ενώ ο ενισχυτής ρεύματος κι ο μικροελεγκτής στην πλακέτα ελέγχου. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την πορεία του παλμού από τον μικροελεγκτή μέχρι το mosfet:



Σχήμα 4.24: Πορεία παλμών από τον μικροελεγκτή μέχρι το mosfet

4.5 Μονάδα τροφοδοσίας

Για την λειτουργία όλων των ολοκληρωμένων πρέπει να παρέχουμε την απαραίτητη ισχύς. Για να συμβεί αυτό χρειάζονται οι κατάλληλες τάσεις τροφοδοσίας. Αυτές παρέχονται από τροφοδοτικά συνεχούς τάσης.

Ο μετατροπέας μας αποτελείται από τέσσερα διακοπτικά στοιχεία, οπότε το καθένα διαθέτει τον δικό του οπτοζεύκτη και οδηγό παλμών. Οι οπτοζεύκτες λειτουργούν σε συνεχής τάση 5V ενώ οι οδηγοί παλμών σε συνεχής τάση 15V. Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιούμε τέσσερα τροφοδοτικά συνεχούς τάσης των 15V, ένα για κάθε οδηγό παλμών, και για να τροφοδοτήσουμε τους οπτοζεύκτες

χρησιμοποιούμε το ολοκληρωμένο LM7805, που είναι ένα γραμμικό τροφοδοτικό υποβιβασμού τάσης, όπου στην είσοδο του λαμβάνει συνεχής τάση 15V και στην έξοδο του δίνει συνεχής τάση 5V. Για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή και του ενισχυτή ρεύματος, ολοκληρωμένα που λειτουργούν με συνεχής τάση τροφοδοσίας 5V, απαιτείται ένα επιπλέον τροφοδοτικό συνεχούς τάσης 5V.

Άρα θέλουμε τέσσερα τροφοδοτικά συνεχούς τάσης 15V και ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσης 5V. Το ρεύμα που μπορεί να παρέχει κάθε τέτοιο τροφοδοτικό είναι της τάξης των 1-2A και το κάθε ολοκληρωμένο τραβάει ρεύμα λίγα mA, οπότε δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα για την ισχύ που μπορεί να δώσει κάθε τροφοδοτικό αφού ικανοποιεί πλήρως το φορτίο του. Το σχήμα 4.25 παρουσιάζει την πλακέτα των τροφοδοτικών.



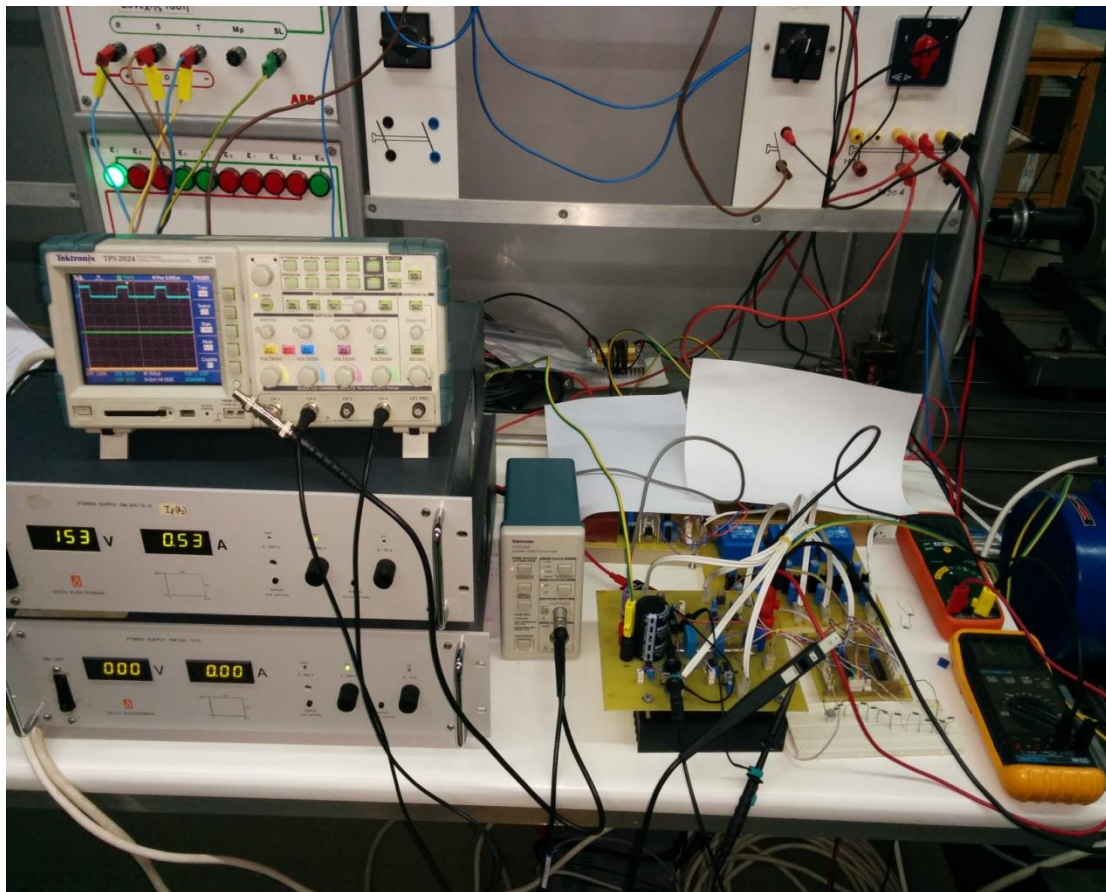
Σχήμα 4.25: Πλακέτα τροφοδοτικών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

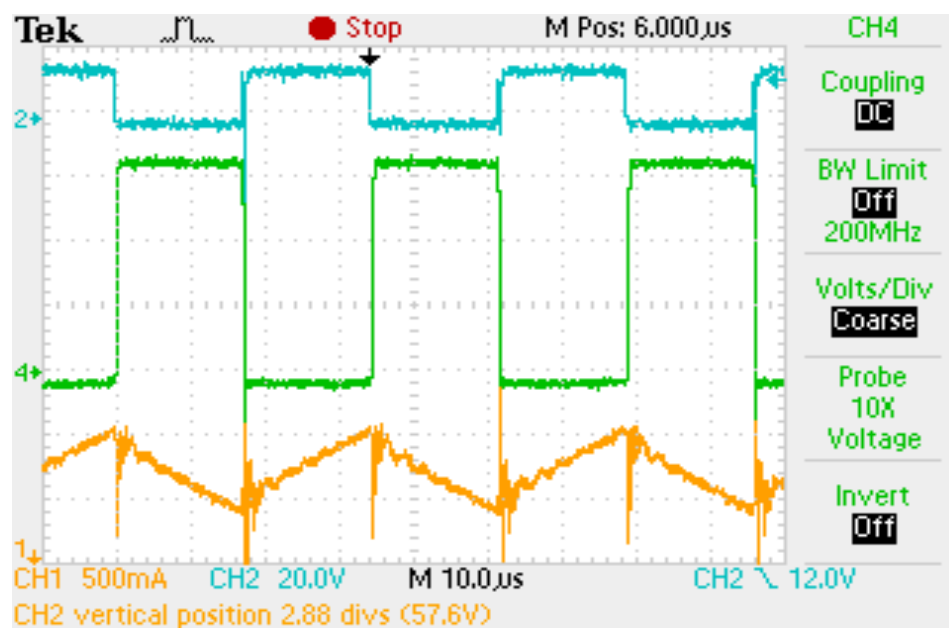
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την ορθή λειτουργία της διάταξης μας, με σκοπό την επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων. Η εικόνα 5.1 παρουσιάζει την διάταξη μας καθώς και τις απαραίτητες τροφοδοσίες και όργανα μέτρησης για την λήψη των κατάλληλων μετρήσεων.



Σχήμα 5.1: Η διάταξη των μετρήσεων

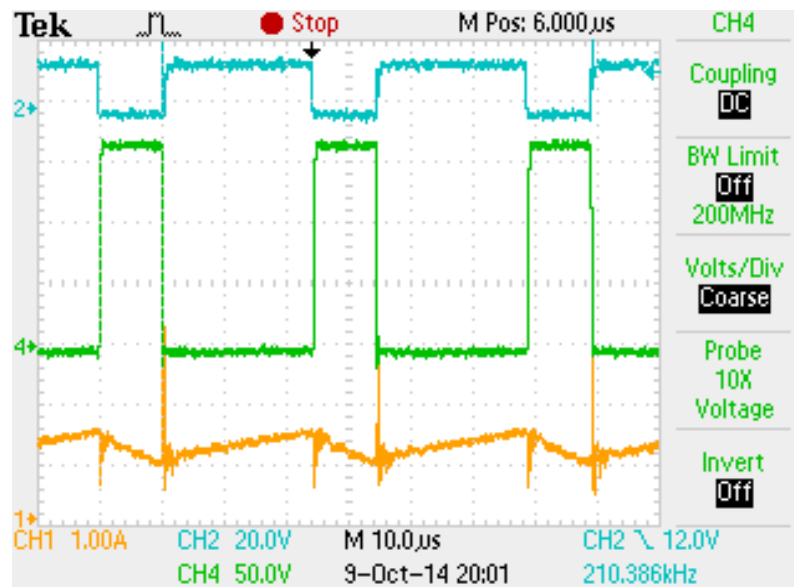
5.2 Λειτουργία μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Στην περίπτωση αυτή ο μετατροπέας μας λειτουργεί σαν μετατροπέας υποβιβασμού τάσης. Η μηχανή συνεχούς ρεύματος που ελέγχουμε και προσομοιώνει το φορτίο, ασκεί στον άξονα του κινητήρα μια όμοιας φοράς ροπής οπότε βοηθάει την κίνηση του. Στην διάταξη που είχαμε στο εργαστήριο ο ασύγχρονος κινητήρας ελεγχόταν από έναν αντιστροφέα που δεν επιτρέπει την λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα στην περιοχή πέδη, αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την λειτουργία της ελεγχόμενης μηχανής συνεχούς ρεύματος εν κενό κι έτσι δεν μπορούσαμε να εφαρμόσουμε μεγάλη ροπή στον άξονα της. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με τάση εισόδου 150V, λόγο κατάτμησης $\delta=0,5$ και συχνότητα λειτουργίας 30kHz.



Σχήμα 5.2: Η οθόνη του παλμογράφου για $\delta=0,5$. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι: Τάση ελέγχου, τάση διακοπτικού στοιχείου, ρεύμα τυμπάνου μηχανής

Οι αντίστοιχες κυματομορφές παρουσιάζονται στο σχήμα 5.3., με την μόνη διαφορά στον λόγο κατάτμησης $\delta=0,7$.

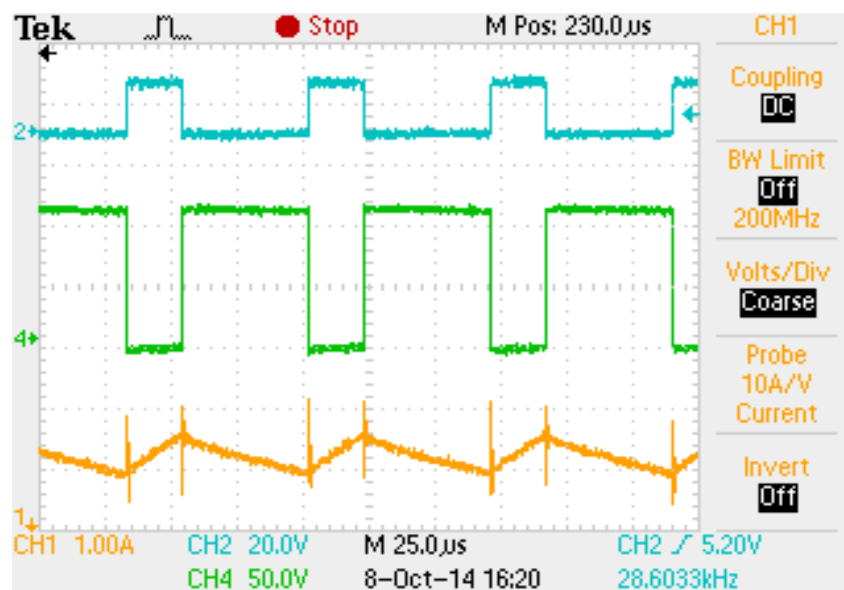


Σχήμα 5.3: Η οθόνη του παλμογράφου για $\delta=0,7$. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι: Τάση ελέγχου, τάση διακοπτικού στοιχείου, ρεύμα τυμπάνου μηχανής

Παρατηρούμε τον θόρυβο που έχει το ρεύμα μας στην λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Αυτό είναι λογικό, καθώς ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης είναι ένας αρκετά θορυβώδης μετατροπέας. Επίσης ο μετατροπέας μας λειτουργεί στην περιοχή συνεχούς αγωγής ρεύματος.

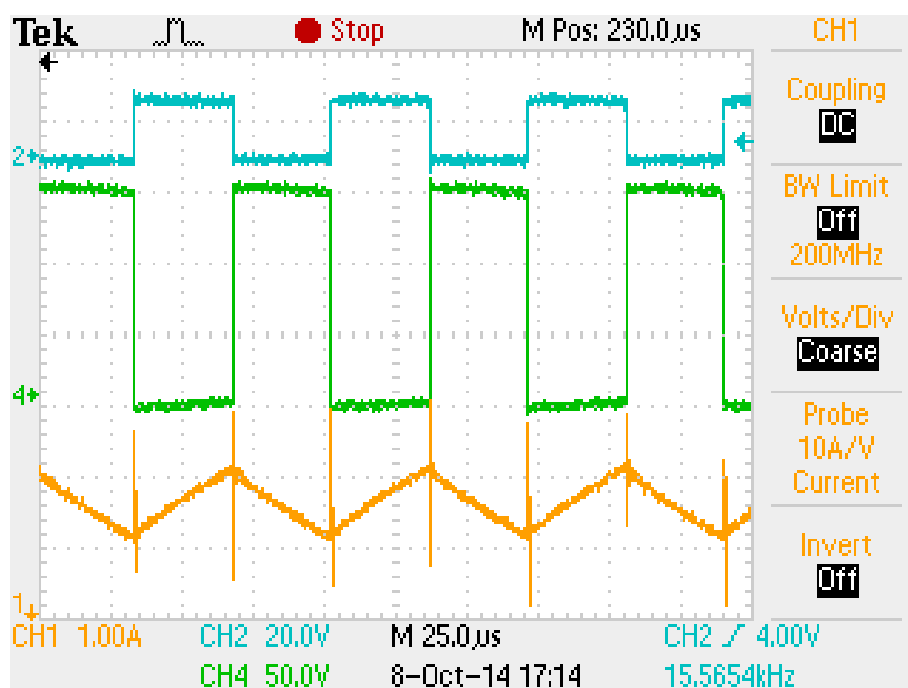
5.3 Λειτουργία μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Στην περίπτωση αυτή ο μετατροπέας μας λειτουργεί σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Η μηχανή συνεχούς ρεύματος που ελέγχουμε λειτουργεί σαν γεννήτρια με φορτίο μια αντίσταση, για να ελέγξουμε την ορθή λειτουργία του μετατροπέα μας σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του μετατροπέα ανύψωσης τάσης για τάση εισόδου 71,3V λόγω κατάτμησης $\delta=0,3$, συχνότητα λειτουργίας 30kHz και το φορτίο είναι 50Ω. Η τάση εξόδου είναι 102V.



Σχήμα 5.4: Η οθόνη του παλμογράφου για $\delta=0,3$. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι: Τάση ελέγχου, τάση διακοπτικού στοιχείου, ρεύμα τυμπάνου μηχανής

Στο σχήμα 5.5 βλέπουμε τις ίδιες γραφικές με την μόνη διαφορά ότι εδώ ο λόγος κατάτμησης είναι $\delta=0,5$. Επίσης η τάση εξόδου αλλάζει και είναι 135V.



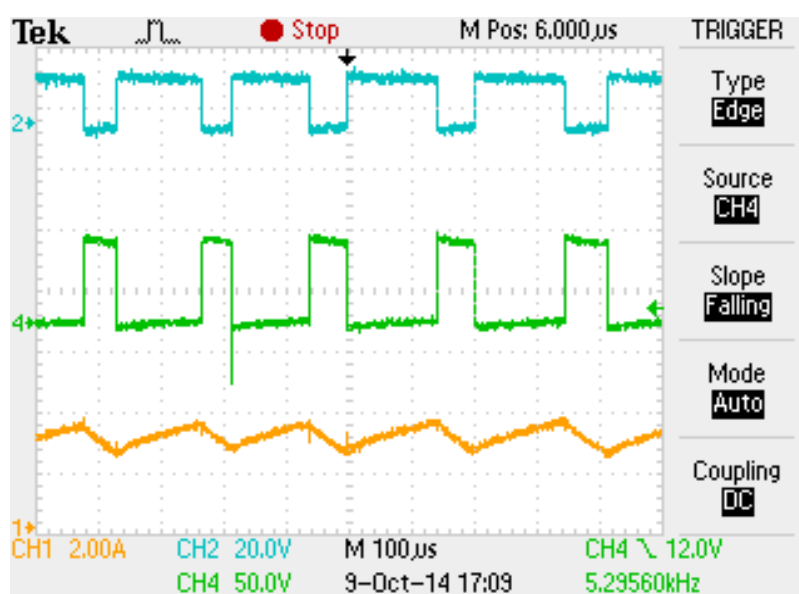
Σχήμα 5.5: Η οθόνη του παλμογράφου για $\delta=0,3$. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι: Τάση ελέγχου, τάση διακοπτικού στοιχείου, ρεύμα τυμπάνου μηχανής

Με την βοήθεια των παραπάνω κυματομορφών επιβεβαιώθηκε η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και τα πειραματικά αποτελέσματα προσεγγίζουν τα θεωρητικά. Επίσης η λειτουργία του μετατροπέα ήταν στην συνεχή αγωγή ρεύματος.

5.4 Έλεγχος κλειστού βρόχου

Στην ενότητα αυτή θα υλοποιήσουμε τον έλεγχο κλειστού βρόχου. Εμείς επιθυμούμε να επιβάλλουμε στον άξονα του κινητήρα μια ροπή αναφοράς και για να συμβεί αυτό πρέπει να ελέγξουμε το ρεύμα της μηχανής συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Αυτό γίνεται με την μέθοδο ελέγχου υστέρησης ρεύματος.

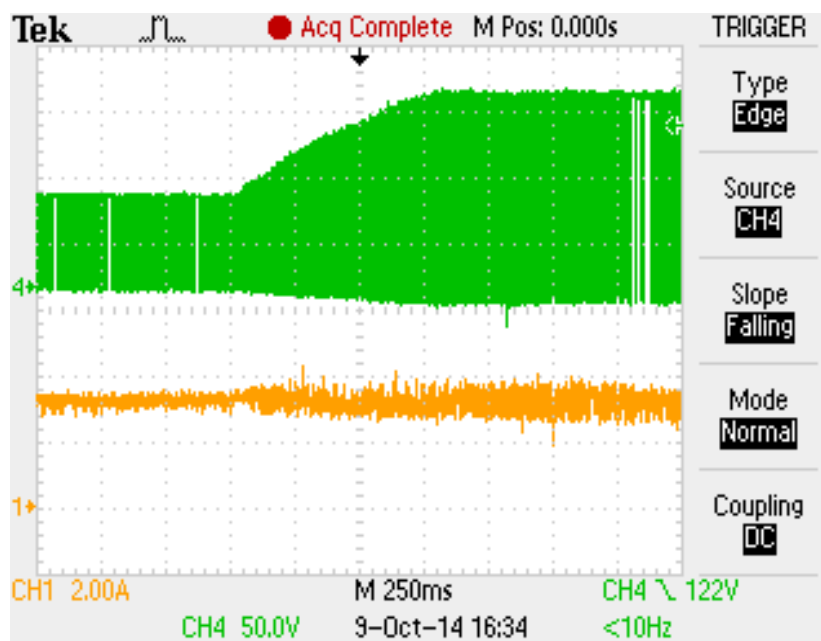
Για να φορτίσω τον ασύγχρονο κινητήρα με ροπή 1,5Nm, η μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης πρέπει να δουλεύει σαν γεννήτρια με ρεύμα 3A δεδομένου ότι $C\Phi=0,5$. Το σχήμα 5.5 μας δείχνει τις ακόλουθες κυματομορφές.



Σχήμα 5.6: Η οθόνη του παλμογράφου για ροπή 1,5 Nm. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι: Τάση ελέγχου, τάση διακοπτικού στοιχείου, ρεύμα τυμπάνου μηχανής

Εδώ βλέπουμε ότι η κυμάτωση του ρεύματος στο τύμπανο της μηχανής είναι 0,7A και η συσκευή μας δουλεύει με συχνότητα 6kHz. Θα μπορούσαμε να έχουμε μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας της συσκευής και με μικρότερη κυμάτωση στο ρεύμα, όμως ο μικροελεγκτής μας έχει ένα καθορισμένο χρόνο δειγματοληψίας και τα δείγματα που θα λαμβάναμε δεν θα ήταν αρκετά έτσι ώστε να λειτουργήσει σωστά ο έλεγχος μας, με αποτέλεσμα να είχαμε λανθασμένη έναυση και σβέση του διακοπτικού μας στοιχείου. Επίσης όσο αυξάνεται η διακοπτική συχνότητα, αυξάνονται και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές με αποτέλεσμα στην έναυση και την σβέση του διακοπτικού στοιχείου να είχαμε υπερεντάσεις και θα έπρεπε να αγνοήσουμε δείγματα οπότε δεν γινόταν σωστός έλεγχος.

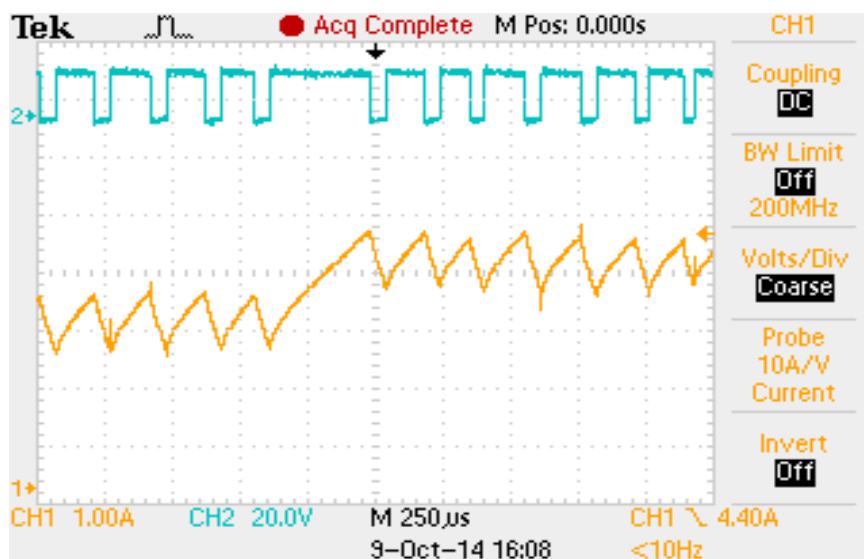
Στην συνέχεια εφαρμόσαμε μια βηματική αλλαγή στις στροφές του ασύγχρονου κινητήρα με την βοήθεια του αντιστροφέα που τον ελέγχει θέλοντας να διατηρήσουμε σταθερή την ροπή στον άξονα του. Αυτό είχα σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης τυμπάνου της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος, όμως το ρεύμα παρέμεινε σταθερό. Αυτό δείχνει την ορθή λειτουργία του ελέγχου μας αφού για σταθερή ροπή απαιτείται σταθερό ρεύμα της γεννήτριας. Το σχήμα 5.7 μας δείχνει αυτήν την λειτουργία.



Σχήμα 5.7: Η οθόνη του παλμογράφου. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι: Τάση διακοπτικού στοιχείου, ρεύμα τυμπάνου μηχανής

Εδώ βλέπουμε ότι για μεταβολή της τάσης από τα 80V στα 170V το ρεύμα του τυμπάνου της γεννήτριας είναι περίπου σταθερό. Ο παλμογράφος σαρώνει τον χρόνο πολύ αργά για να μπορέσουμε να δούμε την μεταβολή της τάσης αφού για ν' αλλάξει η τάση πρέπει ν' αλλάξουν οι στροφές στην γεννήτρια κι επειδή οι στροφές είναι μηχανικό μέγεθος χρειάζεται αρκετός χρόνος.

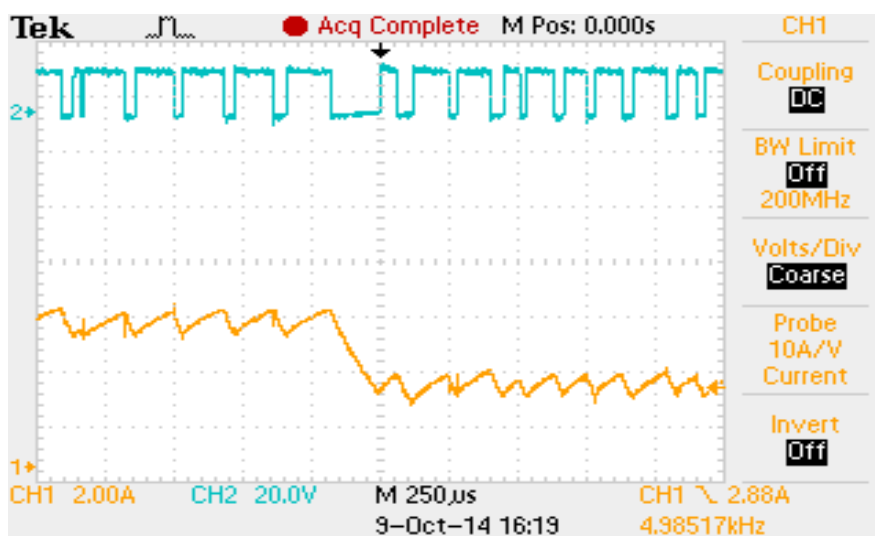
Μια άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι η βηματική αύξηση της ροπής. Στο σχήμα 5.8 αλλάζουμε την ροπή αναφοράς μας από 1,5Nm σε 2 Nm. Αρα πρέπει να δούμε αντίστοιχη αλλαγή του ρεύματος από 3A σε 4A.



Σχήμα 5.8: Η οθόνη του παλμογράφου για μια βηματική αύξηση της ροπής. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι: Τάση ελέγχου, ρεύμα τυμπάνου μηχανής

Εδώ βλέπουμε την βηματική αλλαγή του ρεύματος τυμπάνου. Η απόκριση του συστήματος μας είναι $375\mu\text{s}$, περίπου μια μίση φορά η διακοπτική περίοδος. Αυτό δείχνει ότι ο έλεγχος υστέρησης ρεύματος είναι αρκετά γρήγορος και ακριβής. Επίσης η διακοπτική συχνότητα δεν άλλαξε αφού δεν εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος αλλά από την κυμάτωση του που εδώ είναι σταθερή.

Για μια βηματική μείωση της ροπής αναφοράς από τα 3Nm στα 2Nm το σχήμα 5.9 μας παρουσιάζει την αλλαγή στο ρεύμα του τυμπάνου της μηχανής.



Σχήμα 5.9: Η οθόνη του παλμογράφου για μια βηματική μείωση της ροπής. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι: Τάση ελέγχου, ρεύμα τυμπάνου μηχανής

Η απόκριση του συστήματος μας είναι 200μs, περίπου μια φορά η διακοπτική περίοδος ακόμα πιο γρήγορη από την προηγούμενη περίπτωση που είχαμε βηματική αύξηση της ροπής. Αυτό δείχνει ότι ο έλεγχος υστέρησης ρεύματος είναι αρκετά γρήγορος και ακριβής. Επίσης η διακοπτική συχνότητα δεν άλλαξε αφού δεν εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος αλλά από την κυμάτωση του που εδώ είναι σταθερή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

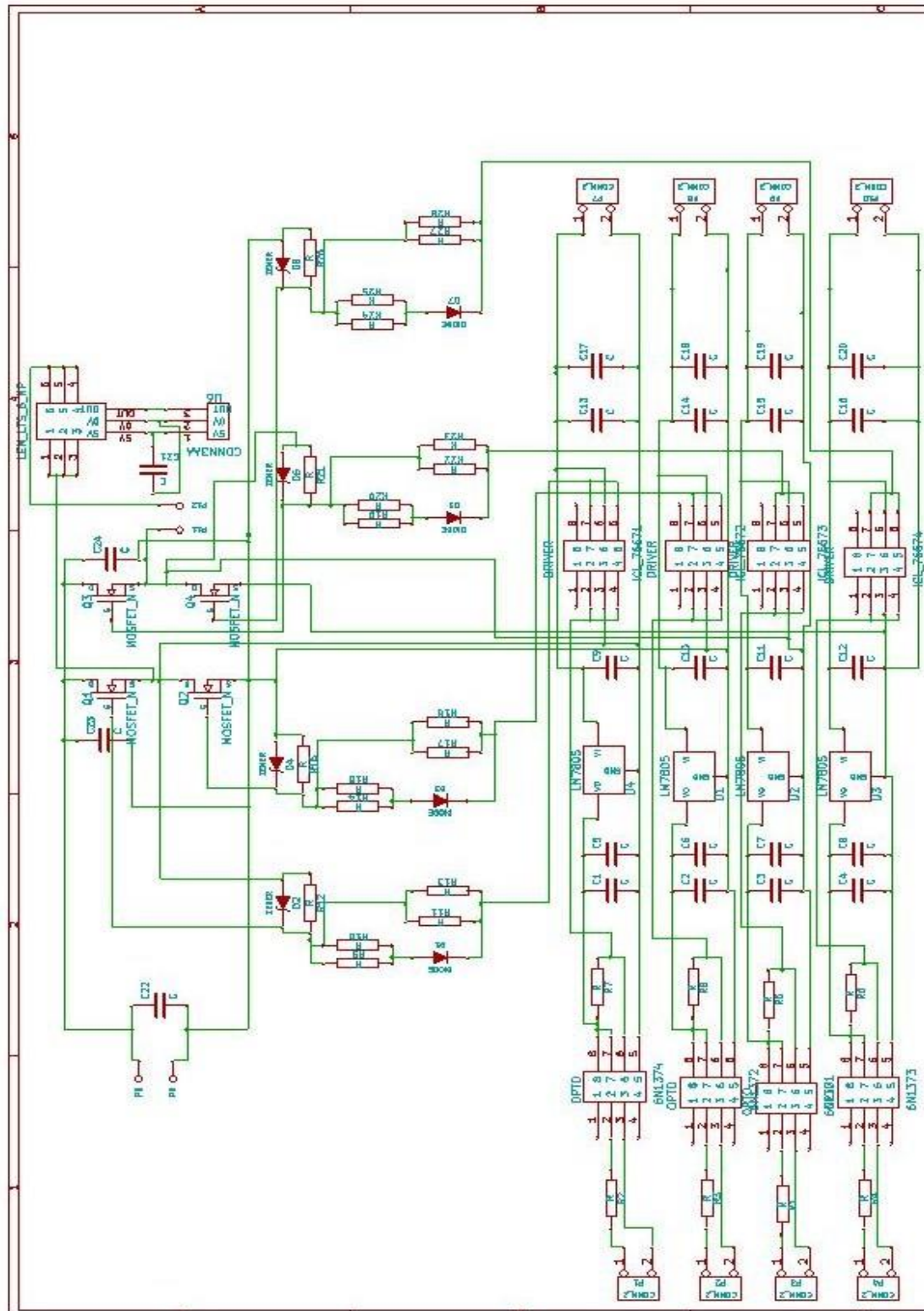
- [1] N.Mohan/T.Undelan/W.Robbins, “ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ”, 3η Έκδοση, Α,Τζιόλα Εκδόσεις, Θεσσαλονίκη, 2010.
- [2] Ε. Κ. Τατάκης, «Ηλεκτρονικά στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές», Σημειώσεις ομότιτλου μαθήματος, Πάτρα 2003.
- [3] Αθανάσιος Ν. Σαφάκας «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2008.
- [4] Ε. Κ. Τατάκης, «Σημειώσεις εργαστηρίου ηλεκτρονικών ισχύος II», Πάτρα, Φεβρουάριος 2009.
- [5] Αθ. Ν. Σαφάκας, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Α» Τόμος 1, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2004
- [6] Stephen Chapman, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ», 4η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2001
- [7] Charles Hubert, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ», Εκδόσεις ίων, 2008
- [8] M. Rashid “Power Electronics Handbook” Academic Press, 2001
- [9] Αθ. Ν. Σαφάκας, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2009
- [10] R. KRISHNAN, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ», Πανεπιστήμιο Virginia Tech, 2001
- [11] Ιορδάνης Κιοσκερίδης, «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ», Εκδόσεις Τζιόλα, 2008
- [12] Στέφανος Ν. Μανιάς, «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2012
- [13] Paul Krause, Oleg Wasynczuc, Scott Sudhoff, “ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY AND DRIVE SYSTEMS”, second edition, iee press, 2002
- [14] Stylianos P. Syrigos, Ioannis Ch. Karatzaferis and Emmanuel C. Tatakis, "four-quadrant fully controlled mechanical load simulator", university of Patras
- [15] G. Spiazzi/P. Mattavelli/L. Rossetto “Sliding Mode Control Of DC-DC converters”, Dept. of Electronics and Informatics, Dept. of Electrical Engineering, University of Padova.
- [16] Ramanarayanan. Venkataramanan, “Sliding mode control of power converters”, Ph.D dissertation, California Institute of Technology, Pasadena California, May 6, 1986.
- [17] Na Su/ Dehong Xu/ Min Chen/ Junbing Tao, “Study of Bi-Directional Buck-Boost Converter with Different Control Methods”, in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Harbin, China, September 3-5, 2008.

- [18] Power Electronics Technology: <http://powerelectronics.com/>
- [19] Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/>
- [20] Εργαστήριο εκπαιδευτικής τεχνολογίας και πολυμέσων:
<http://etam8-16.blogspot.gr/>
- [21] LEM website: <http://www.lem.com>
- [22] Microchip, «dsPIC30F Family Reference Manual»
- [23] Datasheetcatalog website: <http://www.datasheetcatalog.com/>
- [24] Διπλωματική Εργασία Ιωάννη Καρατζαφέρη, «Μελέτη και κατασκευή διάταξης για τον έλεγχο κινητήρα ενός ηλεκτρικού οχήματος με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
- [25] Διπλωματική Εργασία Στέλιου Συρίγου, «Μελέτη και κατασκευή εργαστηριακής διάταξης φόρτισης του ηλεκτρικού κινητήρα ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012.
- [26] Διπλωματική Εργασία Γεώργιου Πυρρή, «Διερεύνηση της λειτουργίας συστήματος διασύνδεσης ανεμογεννήτριας με το δίκτυο χαμηλής τάσης-κατασκευή αντιστροφέα τάσης», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012
- [27] google :https://www.google.gr/?gws_rd=ssl
- [28] <http://www.alldatasheet.com/>
- [29] <http://www.microchip.com/>

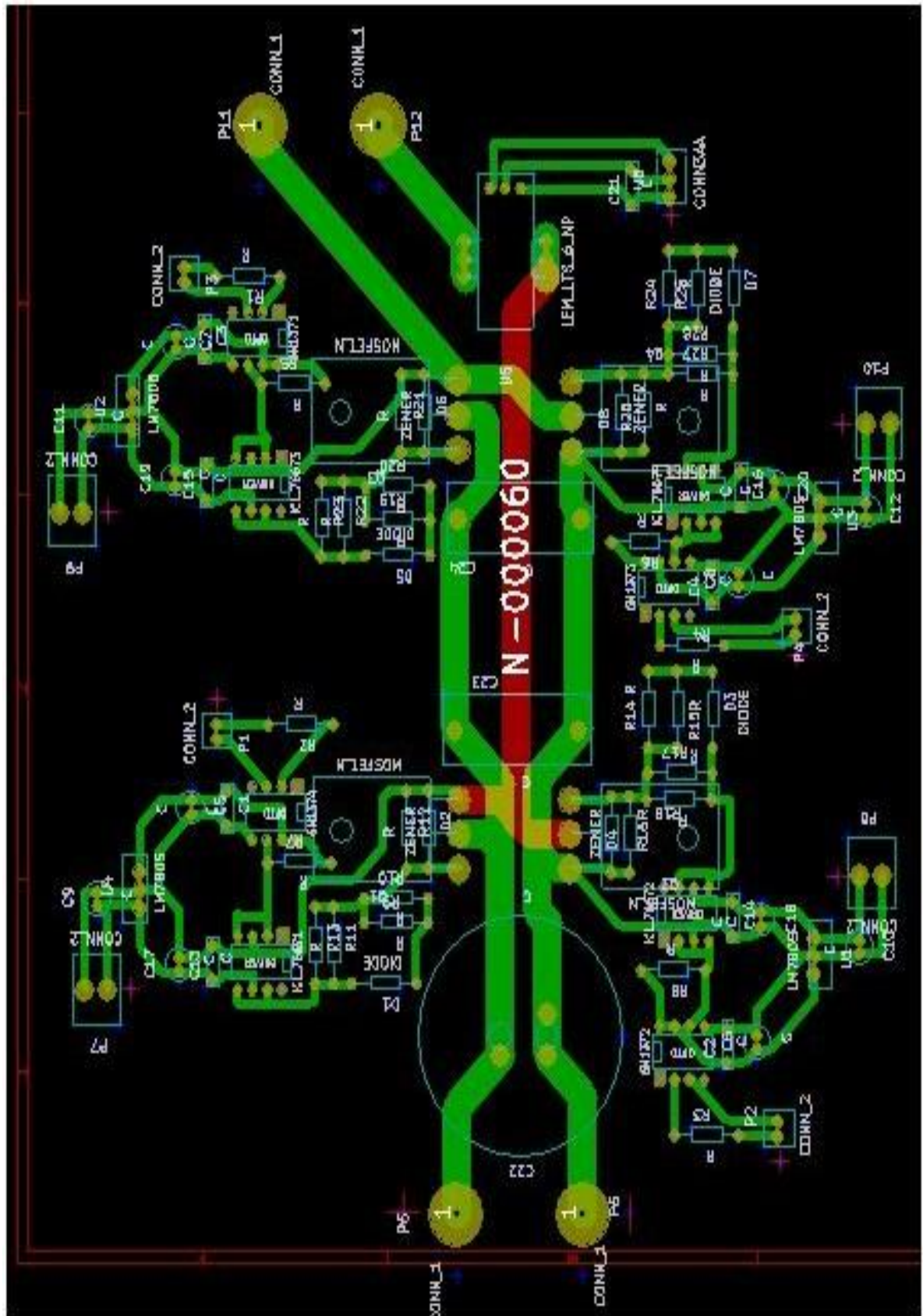
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σχηματικά και τυπωμένα κυκλώματα

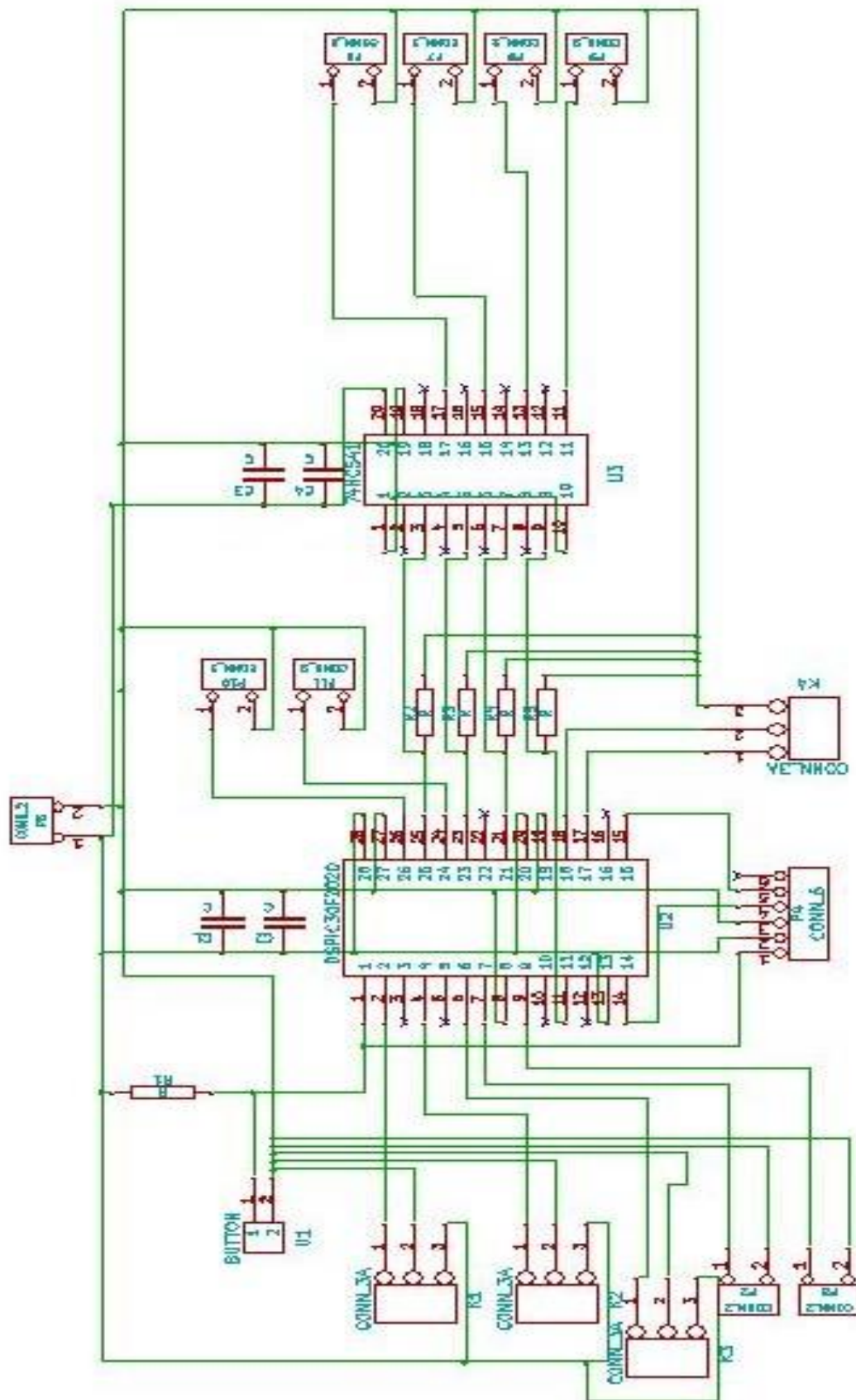
Σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα πλήρους γέφυρας:



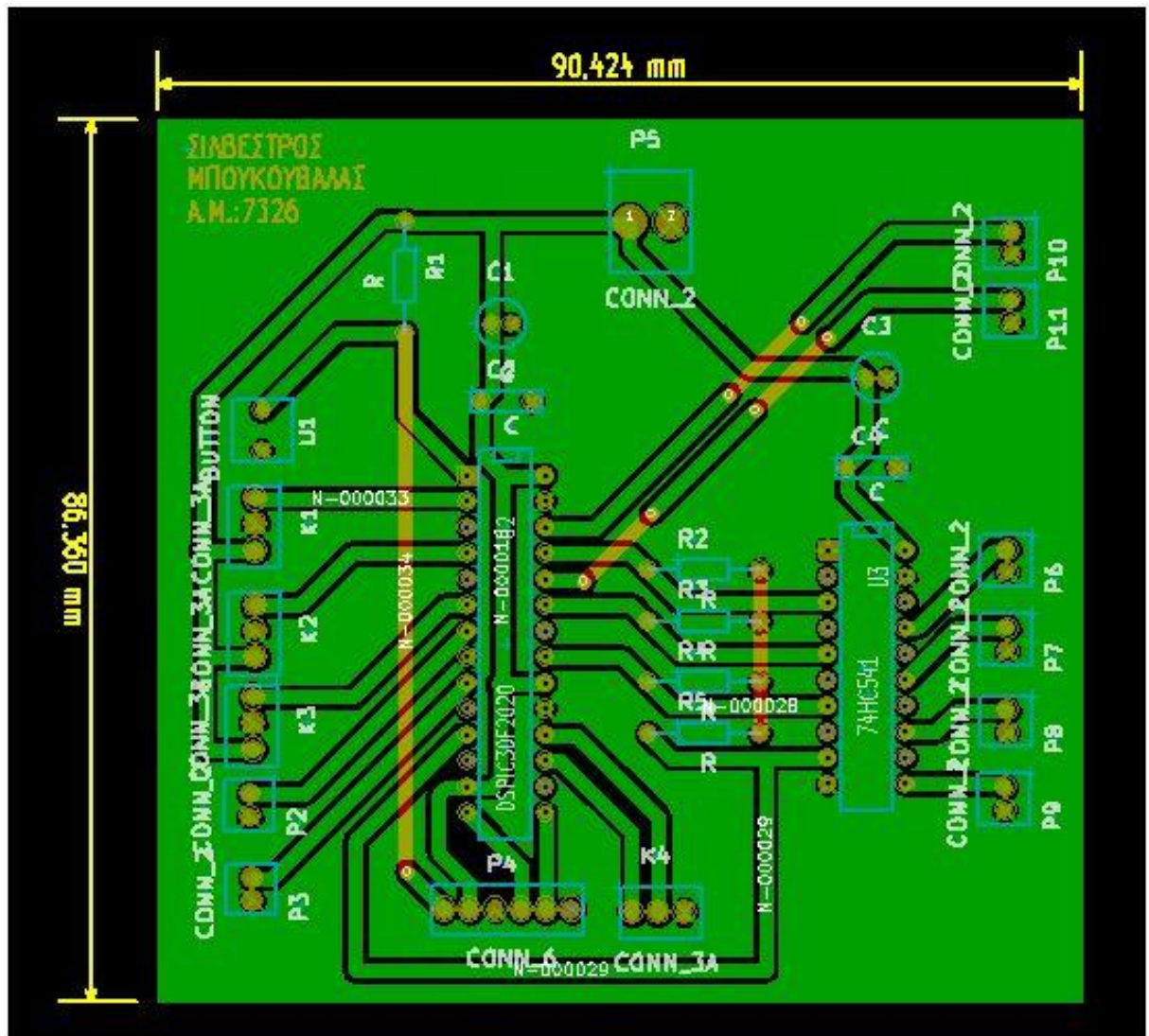
Τυπωμένο κύκλωμα του μετατροπέα πλήρους γέφυρας:



Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας ελέγχου:



Τυπωμένο διάγραμμα της πλακέτας ελέγχου:



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Κώδικες προγραμμάτων μικροελεγκτή

Λειτουργία του μετατροπέα σαν buck για έλεγχο ανοικτού βρόχου με απλή PWM:

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "p30f2020.h"

#define period 17999 /*17999 gia 50kHz*/
#define value_PDC1 9000 /* δ=0,5*/

void init_PWM (void);

int main(int argc, char** argv) {
    init_PWM();
    TRISE=0x0000;
    PORTE=0x0008; /* ON transistor 2*/
    while(1){
        }

    return 0;//return (EXIT_SUCCESS);
}

void init_PWM (void){
    PTCON = 0x0000; /*Reset PWM module*/

    PWMCON1bits.DTC = 2; /*Disable dead time PWM1*/
    PWMCON1bits.IUE = 1; /*Immediate update to PDC1*/
    IOCON1bits.PENH = 1; /*PWM1_High pin controlled by PWM*/
    IOCON1bits.PMOD = 1; /*PWM1_High pin in independent mode*/
    PTPER = period;
```

```

PDC1 = value_PDC1;
PTCON= 0x8000; /*Start PWM modulde*/
}

```

Λειτουργία του μετατροπέα σαν boost για έλεγχο ανοικτού βρόχου με απλή PWM:

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "p30f2020.h"

#define period 17999 /*17999 gia 50kHz*/
#define value_PDC4 9000 /*  $\delta=0,5$ */

void init_PWM (void);

int main(int argc, char** argv) {
    init_PWM();
    TRISE=0x0000;

    while(1){
        }

    return 0;//return (EXIT_SUCCESS);
}

void init_PWM (void){
    PTCON = 0x0000; /*Reset PWM module*/

    PWMCON4bits.DTC = 2; /*Disable dead time PWM1*/
    PWMCON4bits.IUE = 1; /*Immediate update to PDC1*/
    IOCON4bits.PENH = 1; /*PWM1_High pin controlled by PWM*/
    IOCON4bits.PMOD = 1; /*PWM1_High pin in independent mode*/
    PTPER = period;
}

```

```

PDC4 = value_PDC1;
PTCON= 0x8000; /*Start PWM modulde*/
}

```

Έλεγχος κλειστού βρόχου με την μέθοδο της υστέρησης ρεύματος για την επιθυμητή ροπή στον άξονα της ελεγχόμενης μηχανής:

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "p30f2020.h"

#define    TIMER_PERIOD 15 /* Set the timer period for 0,5 µsec and
Tcy=21,9MHz*/
#define c 10 /*orio reymatos 0,2A*/

void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _ADCInterrupt(void);

int Iref,Imeas,i;

int main(int argc, char** argv) {

    /* Set up the ADC Module */

    ADCONbits.ADSIDL = 0;    /* Operate in Idle Mode */
    ADCONbits.FORM    = 0;    /* Output in Integer Format */
    ADCONbits.EIE     = 0;    /* No Early Interrupt */
    ADCONbits.ORDER   = 0;    /* Even channel first */
    ADCONbits.SEQSAMP = 1;    /* Sequential Sampling Enabled */
    ADCONbits.ADCS     = 3;    /* Clock Divider is set up for
Fadc/10=24MHz */

```

```

    ADPCFG = 0xFFFFA;          /* AN0 and AN2 are analog inputs */
    ADSTAT = 0;                /* Clear the ADSTAT register */
    ADCPC0bits.TRGSRC0        = 0xC;    /* Trigger conversion on TMR1 Prd
Match */

    ADCPC0bits.IRQEN0         = 1;    /* Enable the interrupt */
    ADCPC0bits.TRGSRC1        = 0xC;
    ADCPC0bits.IRQEN1         = 1;
    /* Set up Timer1 */

    T1CON          = 0;          /* Timer with 0 prescale */
    TMR1 = 0;            /* Clear the Timer counter */
    PR1             = TIMER_PERIOD; /* Load the period register */

    /* Set up the Interrupts */

    IFS0bits.ADIF      = 0;      /* Clear AD Interrupt Flag */
    IFS0bits.T1IF = 0;    /* Clear Timer1 Interrupt Flag */
    IEC0bits.T1IE = 0;    /* Timer Interrupt is not needed */
    IPC2bits.ADIP      = 4;      /* Set ADC Interrupt Priority */
    IEC0bits.ADIE      = 1;      /* Enable the ADC Interrupt */

    /* Enable ADC and Timer */
    ADCONbits.ADON     = 1;      /* Start the ADC module */
    T1CONbits.TON       = 1;      /* Start the Timer */

    TRISE=0X0000;

    while(1){

        if(Iref>532){
            if(1.6*Imeas<Iref+297 && i>5){

```

```

        PORTE=0x000A;
        i=0;
    }
    else if(1.6*I meas>Iref+317 && i>5){
        PORTE=0x0008;
        i=0;
    }

}

else if(Iref<491){
    if(1.6*I meas>Iref+317 && i>5){
        PORTE=0x0080;
        i=0;
    }
    else if(1.6*I meas<Iref+297 && i>5){
        PORTE=0x0000;
        i=0;
    }

}

else{
    PORTE=0x0000;
}

}

return 0;//return (EXIT_SUCCESS);
}

```

```

void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _ADCInterrupt(void)
{
    /* AD Conversion complete interrupt handler */

    i=i+1;
    IFS0bits.ADIF = 0;          /* Clear ADC Interrupt Flag */
    Imeas=ADCBUF0;              /* Get the conversion result */
    Iref=ADCBUF2;
    ADSTATbits.P0RDY = 0;      /* Clear the ADSTAT bits */
    ADSTATbits.P1RDY = 0;

}

```

ABSTRACT

This thesis deals with the design and construction of a torque simulator device for an electric drive system. The thesis was conducted in the Laboratory of Electromechanical Energy Conversion, Department of Electrical and Computer Engineering of the University of Patras.

The aim is to build a full-bridge converter, which will properly control a separately fed dc-machine, which is connected via a transmission system with a motor. The final goal is to load the engine with the desirable torque, in order to study its functional behavior.

Initially we analyzed an electric drive system and studied the individual parts that make it up. We presented various kinds of loads with their corresponding torque-speed characteristic and applications in which they are used. We also analyzed, succinctly, the functional behavior of a DC machine.

Then we analyzed the full-bridge inverter and its modes of operation, through which the DC machine can be controlled and operate in all four quadrants. Afterwards, methods for the proper pulse-control strategy of switching elements were studied.

The next step was the simulation of both, subsystems as long as the overall system, in order to check the proper operation before construction.

The simulations were performed using the software Simulink of Matlab.

Finally the experimental setup was constructed, in order to obtain the experimental results and to compare them with the theoretical, to identify and justify any differences between the theoretical analysis and measurements on the real device, and to evaluate the system performance.

