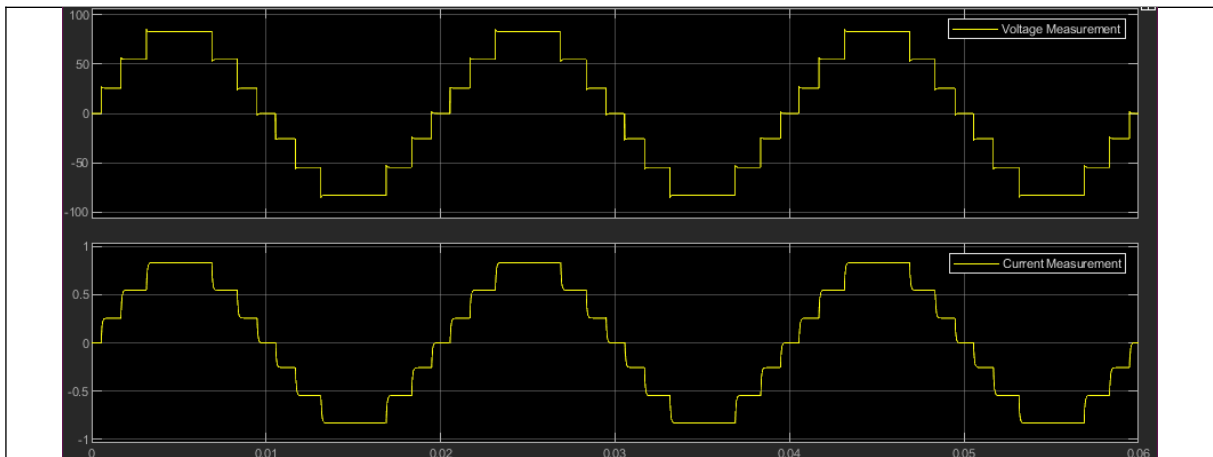


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕΛΕΤΗ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΚΩΤΟΥ
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ 7 ΕΠΙΠΕΔΩΝ



Του φοιτητή
Ταλιούρα Θωμά
Αρ. Μητρώου: 513327

Επιβλέπων
Κιοσκερίδης Ιορδάνης
Καθηγητής

Ημερομηνία 31/5/2024

Τίτλος Π.Ε. : Μελέτη, προσομοίωση και υλοποίηση τριφασικού συμμετρικού κλιμακωτού αντιστροφέα 7 επιπέδων.

Κωδικός Π.Ε. : 20217

Όνοματεπώνυμο φοιτητή : Ταλιούρας Θωμάς.

Όνοματεπώνυμο εισηγητή : Κιοσκερίδης Ιορδάνης.

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. : 29/10/2020

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. : 31/5/2024

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ταλιούρα Θωμά που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Στην Κωνσταντίνα

Πρόλογος

Η επιλογή ενός θέματος σχετικού με τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη πτυχιακή εργασία μου καθοδηγήθηκε από το ενδιαφέρον μου για την επίδραση που έχει αυτός ο τομέας στη σύγχρονη τεχνολογία. Τα ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία έχουν ως βάση τη μετατροπή και τον έλεγχο της ηλεκτρικής ενέργειας, βρίσκονται στο επίκεντρο πολλών εφαρμογών, από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ηλεκτρικά οχήματα μέχρι βιομηχανικούς αυτοματισμούς και ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης.

Η ενασχόλησή μου με αυτό το έργο, μου επέτρεψε να εμβαθύνω στις τοπολογίες των αντιστροφών πολλαπλών επιπέδων, στις τεχνικές ελέγχου και στις πρακτικές εφαρμογές τους. Η φάση της προσομοίωσης βελτίωσε τις δεξιότητές μου στη χρήση εργαλείων όπως το MATLAB Simulink, λογισμικό απαραίτητο για το σχεδιασμό και την ανάλυση πολύπλοκων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος. Η φάση της υλοποίησης βελτίωσε την πρακτική μου εμπειρία με διάφορα υλικά, ενισχύοντας την ικανότητά μου να μετατρέπω θεωρητικά μοντέλα σε εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο.

Αντιμέτωπισα προκλήσεις που σχετίζονται με τη κατανόηση περίπλοκων τοπολογιών, τον σχεδιασμό κυκλωμάτων, τον προγραμματισμό με το Arduino IDE, και την επιλογή εξαρτημάτων, μεταξύ πολλών άλλων. Εν τέλει, αυτή η πτυχιακή εργασία με προετοίμασε για μελλοντικές προσπάθειες στον τομέα, καθιστώντας με έναν πιο ικανό και σίγουρο μηχανικό.

Περίληψη

Στόχος αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη, η προσομοίωση και η υλοποίηση ενός τριφασικού, συμμετρικού, κλιμακωτού αντιστροφέα 7 επιπέδων. Θα διευκρινιστούν τα θεωρητικά του θεμέλια, θα προσομοιωθεί η συμπεριφορά του, και ο αντιστροφέας θα υλοποιηθεί τελικά, σε ένα φυσικό, πρωτότυπο μοντέλο.

Το θεωρητικό τμήμα αυτής της εργασίας επικεντρώνεται στην αποσαφήνιση των βασικών αρχών που διέπουν τη λειτουργία των αντιστροφέων. Εμβαθύνει στις θεμελιώδεις έννοιες των αντιστροφέων πολλαπλών επιπέδων, εξετάζοντας τα πλεονεκτήματά τους όσον αφορά την ποιότητα της κυματομορφής εξόδου, την απόδοση και τις τεχνικές διαμόρφωσης. Αυτή η ενότητα δημιουργεί ένα ισχυρό θεωρητικό πλαίσιο για τα επόμενα στάδια προσομοίωσης και υλοποίησης.

Στη φάση της προσομοίωσης χρησιμοποιείται το λογισμικό MATLAB Simulink R2018b για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου αντιστροφέα υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και σενάρια φορτίου. Αναπτύσσονται λεπτομερή μοντέλα κυκλωμάτων που ενσωματώνουν συσκευές ημιαγωγών και αλγόριθμους ελέγχου για να αναπαράγουν με ακρίβεια την απόδοση του πραγματικού κόσμου. Παράμετροι όπως η διακοπτική συχνότητα, ο δείκτης διαμόρφωσης πλάτους και η σύνθετη αντίσταση φορτίου ποικίλλουν συστηματικά για να αξιολογηθεί ο αντίκτυπός τους στην ποιότητα της κυματομορφής εξόδου, την απόδοση και την συνολική αρμονική παραμόρφωση.

Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει τη φυσική υλοποίηση του συγκεκριμένου αντιστροφέα. Η τοπολογία του αντιστροφέα μεταφράζεται σε μια πρακτική διάταξη, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η τοποθέτηση εξαρτημάτων, η θερμική διαχείριση και η ακεραιότητα του σήματος. Δυστυχώς, λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής και ορισμένων τεχνικών αστοχιών οι οποίες προέκυψαν κατά τη διάρκεια της υλοποίησης και της τελικής δοκιμής, το μοντέλο που κατασκευάστηκε δεν είναι λειτουργικό προς το παρόν. Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται οι βασικές αιτίες της αστοχίας, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων που σχετίζονται με την επιλογή των εξαρτημάτων, και προτείνονται διορθωτικά μέτρα για τον μετριασμό τέτοιων κινδύνων σε μελλοντικές επαναλήψεις σχεδιασμού.

Study, simulation and implementation of a three phase symmetrical cascaded H-bridge 7-level inverter

Thomas Taliouras

Abstract

The aim of this thesis is the study, simulation and implementation of a three-phase, symmetrical, cascaded 7-level inverter. Its theoretical foundations will be clarified, its behavior will be simulated, and the inverter will finally be implemented, in a physical, prototype model.

The theoretical part of this paper focuses on elucidating the basic principles governing the operation of inverters. It delves into the fundamental concepts of multilevel inverters, examining their advantages in terms of output waveform quality, performance, and modulation techniques. This section establishes a strong theoretical framework for the next stages of simulation and implementation.

In the simulation phase, MATLAB Simulink R2018b software is used to model the behavior of the particular inverter under various operating conditions and load scenarios. Detailed circuit models incorporating semiconductor devices and control algorithms are developed to accurately reproduce real-world performance. Parameters such as switching frequency, amplitude modulation index, and load impedance are systematically varied to evaluate their impact on output waveform quality, performance, and overall harmonic distortion.

The final stage includes the physical implementation of the particular inverter. Inverter topology is translated into a practical layout, considering factors such as component placement, thermal management, and signal integrity. Unfortunately, due to the complexity of the construction and some technical failures that occurred during the implementation and final testing, the built model is not currently functional. This section examines the root causes of failure, including issues related to component selection, and suggests corrective measures to mitigate such risks in future design iterations.

Ευχαριστίες

Εδώ θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα άτομα που με στήριξαν και με καθοδήγησαν σε όλη τη διαδρομή προς την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Κωνσταντίνο και Ζωή για την ηθική υποστήριξή τους.

Ευχαριστώ την κοπέλα μου Κωνσταντίνα για την υπομονή, την κατανόηση, και την συνεχή υποστήριξή της. Η ενθάρρυνση και η πίστη της στις ικανότητές μου υπήρξε πηγή δύναμης και έμπνευσης σε δύσκολες στιγμές.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής εργασίας μου, κ. Κιοσκερίδη για τον χρόνο του και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Εν τέλει, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν. Η βοήθειά τους μικρή ή μεγάλη, έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Σας ευχαριστώ.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Περιεχόμενα.....	8
Συντομογραφίες.....	12
Κεφάλαιο 1ο: Θεωρία αντιστροφών.....	15
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Μετατροπή DC σε AC : Η βασική αρχή λειτουργίας.....	18
1.3 Καταστάσεις λειτουργίας και τρόποι μεταγωγών.....	19
1.4 Η δίοδος ισχύος.....	20
1.5 Το BJT.....	23
1.6 Το MOSFET ισχύος.....	26
1.7 Τα thyristors.....	28
1.8 Το IGBT.....	31
1.9 Κατανάλωση ισχύος.....	34
1.10 Επίδραση αρμονικών συχνοτήτων.....	35
1.11 Οδηγοί ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.....	36
1.12 Είδη αντιστροφών.....	37
1.13 Εφαρμογές.....	40
1.14 Επίλογος.....	44
Κεφάλαιο 2ο: Τοπολογία CMLI 7 επιπέδων.....	46
2.1 Εισαγωγή.....	46
2.2 Βασική διάταξη.....	46
2.3 Αλγόριθμοι ελέγχου.....	49
2.4 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.....	51
2.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	52
2.6 Επίλογος.....	53
Κεφάλαιο 3ο: Προσομοίωση αντιστροφέα.....	54
3.1 Εισαγωγή.....	54
3.2 Μοντελοποίηση.....	54
3.3 Προσομοίωση και μετρήσεις.....	56

3.4 Επίλογος.....	64
Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση.....	65
4.1 Εισαγωγή.....	65
4.2 Υλικό.....	65
4.3 Προγραμματισμός υλικού.....	69
4.4 Μετρήσεις και αποτελέσματα υλοποίησης.....	70
4.5 Επίλογος.....	71
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας σε περιβάλλον Arduino IDE.....	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κυματομορφές ελέγχου PCA 9685.....	94
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : Κατανομή παλμών ελέγχου.....	95

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ανόρθωση.....	16
Σχήμα 1.2 : Αντιστροφή.....	16
Σχήμα 1.3 : Μετατροπή DC - DC.....	17
Σχήμα 1.4 : Μετατροπή AC - AC.....	18
Σχήμα 1.5: Τεταρτημόρια λειτουργίας διακοπών και μετατροπέων.....	20
Σχήμα 1.6: Κυκλωματικό σύμβολο διόδου.....	21
Σχήμα 1.7: Δίοδοι υψηλής ισχύος.....	22
Σχήμα 1.8: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης της διόδου ισχύος.....	23
Σχήμα 1.9: Κυκλωματικό σύμβολο BJT.....	24
Σχήμα 1.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης του BJT.....	25
Σχήμα 1.11: Κυκλωματικό σύμβολο του MOSFET.....	26
Σχήμα 1.12: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης του MOSFET.....	27
Σχήμα 1.13: Κυκλωματικό σύμβολο του SCR.....	28
Σχήμα 1.14: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης του SCR.....	29
Σχήμα 1.15: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης του DIAC.....	30
Σχήμα 1.16: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης του TRIAC.....	31
Σχήμα 1.17: Κυκλωματικό σύμβολο του IGBT.....	32
Σχήμα 1.18: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης του IGBT.....	33
Σχήμα 1.19: IGBT υψηλής ισχύος.....	34

Σχήμα 1.20: Ημιαγωγός διακόπτης ισχύος με περίβλημα τύπου TO-3, τοποθετημένος σε ψύκτρα η οποία ενσωματώνεται στο πίσω μέρος ενός σασί.....	34
Σχήμα 1.21: Διάγραμμα απεικόνισης απωλειών ισχύος κατα τη μεταγωγή των διακοπών.....	35
Σχήμα 1.22: Βασική δομή αντιστροφέα πηγής τάσης.....	38
Σχήμα 1.23: Βασική δομή αντιστροφέα πηγής ρεύματος.....	38
Σχήμα 1.24: Βασική δομή αντιστροφέα πηγής σύνθετης αντίστασης.....	39
Σχήμα 1.25: Εσωτερικό αντιστροφέα φωτοβολταϊκών. Οι μπλε πυκνωτές αποθηκεύουν ενέργεια και βελτιώνουν τη κυματομορφή εξόδου.....	41
Σχήμα 1.26: Μετατροπέας πηγής τάσης HVDC. Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε διατάξεις σταθμών point to point, back to back, υποθαλάσσιου / υπόγειου καλωδίου και παράκτιων σταθμών..	42
Σχήμα 1.27: Αντιστροφέας τέλειου ημιτόνου για στρατιωτικά οχήματα.....	44
Σχήμα 2.1: Τοπολογία πλήρους γέφυρας μετατροπέα.....	47
Σχήμα 2.2: Τοπολογία CMLI 7 επιπέδων.....	49
Σχήμα 2.3: Τυπική σύνθεση κυματομορφής εξόδου CMLI.....	51
Σχήμα 3.1: Αρχικοποίηση μεταβλητών του μοντέλου.....	55
Σχήμα 3.2: Δημιουργία παλμών ελέγχου.....	56
Σχήμα 3.3: Τάση ασυμμετρίας ουδέτερων σημείων αντιστροφέα - φορτίου.....	57
Σχήμα 3.4: Έντονα παραμορφωμένα χαρακτηριστικά φασικής τάσης και ρεύματος γραμμής.....	57
Σχήμα 3.5: Παραμορφωμένα χαρακτηριστικά πολικών τάσεων σε χρονικό συσχετισμό.....	58
Σχήμα 3.6: Τάση εξόδου του μετατροπέα H1 πριν την ανακατανομή των παλμών ελέγχου.....	59
Σχήμα 3.7: Τάση εξόδου του μετατροπέα H1 μετά την ανακατανομή των παλμών ελέγχου.....	60
Σχήμα 3.8: Φασική τάση και ρεύμα γραμμής με την ύπαρξη ουδέτερου αγωγού μεταξύ των ουδέτερων σημείων αντιστροφέα - φορτίου.....	60
Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστικά εξόδου με $R=100 \Omega$ και $L=5 \text{ mH}$	61
Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστικά εξόδου με $R=100 \Omega$ και $L=50 \text{ mH}$	62
Σχήμα 3.11: Χαρακτηριστικά εξόδου με $R=100 \Omega$ και $L=500 \text{ mH}$	62
Σχήμα 3.12: Δημιουργία παλμών ελεύθερης ροής.....	63
Σχήμα 4.1: Ηλεκτρονικό σχέδιο υλοποίησης του αντιστροφέα.....	65
Σχήμα 4.2: Τελικό πειραματικό πρωτότυπο του αντιστροφέα.....	66
Σχήμα 4.3: Πλακέτα Arduino Mega 2560 Rev3.....	68
Σχήμα 4.4: Περιφερειακή πλακέτα Adafruit PCA 9685.....	69
Σχήμα 4.5: Τυπική διάταξη πρωτοκόλλου επικοινωνίας I2C.....	70
Σχήμα 1: Παλμοί ελεύθερης ροής.....	94
Σχήμα 2: Παλμοί θετικής ημιπεριόδου 3ου επιπέδου μετατροπέων.....	94

Σχήμα 3: Παλμοί θετικής ημιπεριόδου 2ου επιπέδου μετατροπέων.....	95
Σχήμα 4: Παλμοί θετικής ημιπεριόδου 1ου επιπέδου μετατροπέων.....	95
Σχήμα 1: Μετατροπέας H3.....	96
Σχήμα 2: Ρεύμα εισόδου του μετατροπέα H3.....	96
Σχήμα 3: Τάση εξόδου του μετατροπέα H3.....	97
Σχήμα 4: Μετατροπέας H2.....	97
Σχήμα 5: Ρεύμα εισόδου του μετατροπέα H2.....	98
Σχήμα 6: Τάση εξόδου του μετατροπέα H2.....	98
Σχήμα 7: Μετατροπέας H1.....	99
Σχήμα 8: Ρεύμα εισόδου του μετατροπέα H1.....	99
Σχήμα 9: Τάση εξόδου του μετατροπέα H1.....	100

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις βέλτιστων χαρακτηριστικών εξόδου.....	63
--------------------------------------------------------------	----

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
DC	Συνεχές Ρεύμα (Direct Current)
AC	Εναλλασσόμενο Ρεύμα (Alternating Current)
THD	Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion)
UPS	Τροφοδοτικό Αδειάλειπτης Παροχής Ισχύος (Uninterruptable Power Supply)
HVDC	Συνεχές Ρεύμα Υψηλής Τάσης (High Voltage Direct Current)
HVAC	Εναλλασσόμενο Ρεύμα Υψηλής Τάσης (High Voltage Alternating Current)
SCR	Ελεγχόμενος Ανορθωτής Πυριτίου (Silicon Controlled Rectifier)
IGBT	Διπολικό Τρανζίστορ Μονωμένης Πύλης (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MOSFET	Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Ημιαγωγού Μεταλοξειδίου (Metaloxide Semiconductor Field Effect Transistor)
SOA	Ασφαλής Περιοχή Λειτουργίας (Safe Operation Area)
VFD	Οδηγός Μεταβλητής Συχνότητας (Variable Frequency Drive)
ASD	Οδηγός Ρυθμιζόμενης Ταχύτητας (Adjustable Speed Drive)
VSI	Αντιστροφέας Πηγής Τάσης (Voltage Source Inverter)
CSI	Αντιστροφέας Πηγής Ρεύματος (Current Source Inverter)
ZSI	Αντιστροφέας Πηγής Σύνθετης Αντίστασης (Z-Source Inverter)
ZVS	Μεταγωγή Μηδενικής Τάσης (Zero Voltage Switching)
ZCS	Μεταγωγή Μηδενικού Ρεύματος (Zero Current Switching)
EMC	Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility)
PID	Αναλογικός Ολοκληρωτικός Παράγωγος (Proportional Integral Derivative)
SVM	Διανυσμάτων Χώρου (Space Vector Modulation)
PWM	Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation)
PV	Φωτοβολταϊκός (Photovoltaic)
MPPT	Ιχνηλάτηση Μέγιστου Σημείου Ισχύος (Maximum Power Point Tracking)
USB	Οικουμενικός Σειριακός Δίαυλος (Universal Serial Bus)
CMLI	Κλιμακωτός Πολυεπίπεδος Αντιστροφέας (Cascaded Multilevel Inverter)

SCMLI	Συμμετρικός Κλιμακωτός Πολυεπίπεδος Αντιστροφέας (Symmetrical Cascaded Multilevel Inverter)
SPWM	Ημιτονική Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation)
SVPWM	Διαμόρφωση Εύρους Παλμών Διανυσμάτων Χώρου (Space Vector Pulse Width Modulation)
SHEPWM	Διαμόρφωση Εύρους Παλμών Επιλεκτικής Αρμονικής Εξάλειψης (Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation)
PSCPWM	Διαμόρφωση Εύρους Παλμών Φέροντος Μετατόπισης Φάσης (Phase Shifted Carrier Pulse Width Modulation)
LSCPWM	Διαμόρφωση Εύρους Παλμών Φέροντος Μετατόπισης Επιπέδου (Level Shifted Carrier Pulse Width Modulation)
MPC	Έλεγχος Προγνωστικού Μοντέλου (Model Predictive Control)
AI	Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)
NPC	Σύσφιξη Ουδέτερου Σημείου (Neutral Point Clamped)
FC	Πυκνωτές Εξισορρόπησης (Flying Capacitors)
PCB	Τυπωμένη Πλακέτα Κυκλώματος (Printed Circuit Board)

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφόρων μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος προκειμένου να μετατραπεί η έξοδος αυτών των πηγών σε μια πιο εκμεταλλεύσιμη μορφή. Ένα από τα πιο κύρια συστήματα σε αυτούς τους μετατροπείς είναι ο αντιστροφέας ισχύος (power inverter), ο οποίος μετατρέπει συνεχές ρεύμα DC σε εναλασσόμενο AC. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση αποδοτικών και αξιόπιστων αντιστροφέων είναι καίριας σημασίας για τα σημερινά ηλεκτρονικά ισχύος. Οι τριφασικοί, συμμετρικοί, κλιμακωτοί αντιστροφείς πλήρους γέφυρας (H-bridge) χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές λόγω της υψηλής αξιοπιστίας, της χαμηλής συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης THD και των γενικά καλών επιδόσεων. Ωστόσο, ο παραδοσιακός τριφασικός αντιστροφέας έχει συνήθως μόνο 2 ή 3 επίπεδα, με αποτέλεσμα ένα περιορισμένο εύρος τάσεων εξόδου και χαμηλή πυκνότητα ισχύος. Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια, έχουν προταθεί σαν λύσεις αντιστροφείς περισσότερων επιπέδων εξόδου.

Κεφάλαιο 1ο: Θεωρία αντιστροφών

1.1 Εισαγωγή

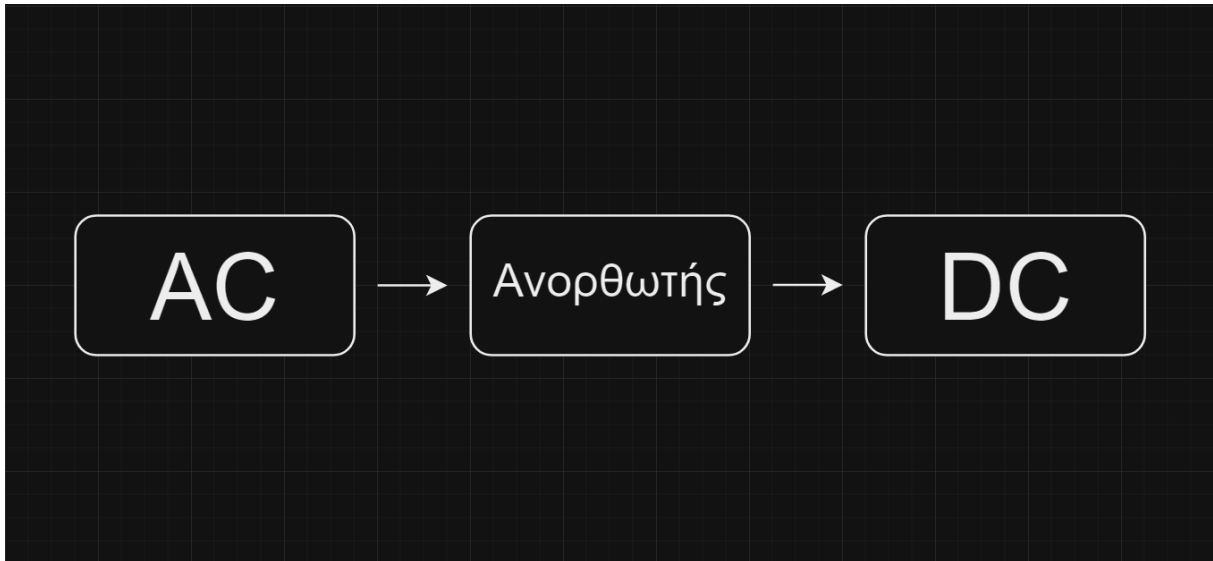
Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ένας κλάδος της ηλεκτρολογίας που ασχολείται με τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη, η οποία συνήθως περιλαμβάνει εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας. Περιλαμβάνουν τη μελέτη, το σχεδιασμό και την υλοποίηση διαφόρων ηλεκτρονικών συσκευών και κυκλωμάτων για την αποτελεσματική διαχείριση της ροής ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα που κυμαίνονται από μικρής κλίμακας ηλεκτρονικά ευρείας κατανάλωσης έως μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές.

Στον πυρήνα τους, τα ηλεκτρονικά ισχύος επικεντρώνονται στη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ διαφορετικών επιπέδων τάσης, ρεύματος και συχνοτήτων, συχνά με στόχο την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης, αξιοπιστίας και ελέγχου. Αυτό το πεδίο αποκτά κρίσιμο ρόλο σε πολλές εφαρμογές όπου η αποτελεσματική μετατροπή, ο έλεγχος και η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ουσιαστικής σημασίας, όπως συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα, οδηγούς βιομηχανικών κινητήρων, αδιάλειπτα τροφοδοτικά UPS και συστήματα μετάδοσης συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης HVDC.

Τα θεμελιώδη στοιχεία και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά ισχύος περιλαμβάνουν στοιχεία ημιαγωγών ισχύος όπως διόδους ισχύος, θυρίστορ SCR, GTO, DIAC, TRIAC, και τρανζίστορ τύπου IGBT και MOSFET, με νέους τύπους διακοπών ισχύος να παρουσιάζονται συνεχώς από τους κατασκευαστές. Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται για τη διακοπτική λειτουργία και τον έλεγχο της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος με ελάχιστες απώλειες, επιτρέποντας την αποτελεσματική μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος.

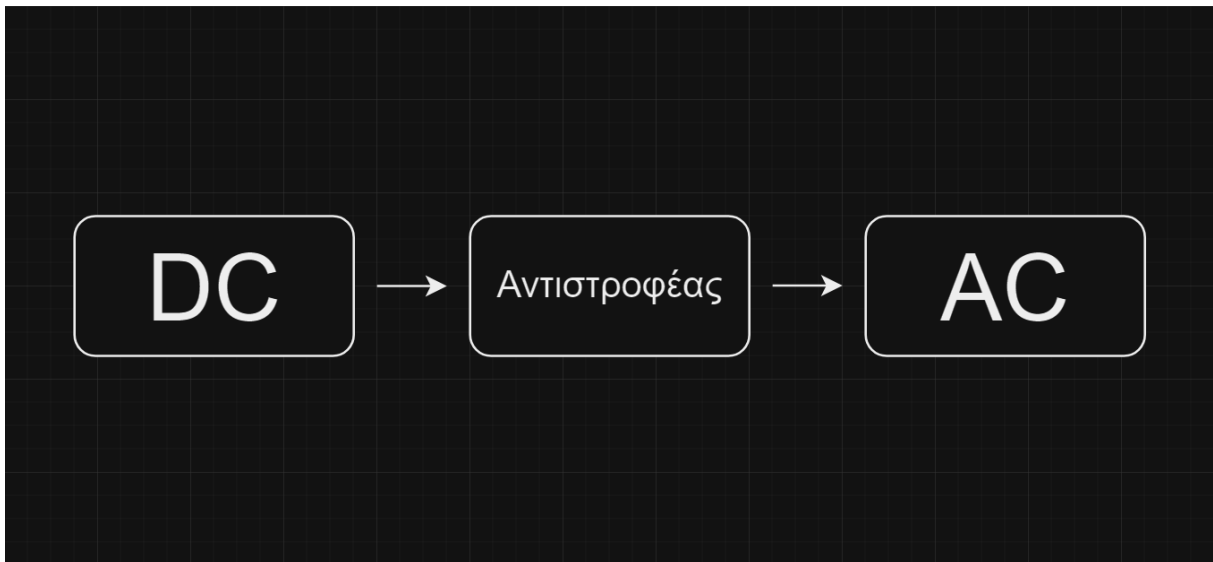
Οι κύριες λειτουργίες των ηλεκτρονικών ισχύος είναι οι εξής :

Μετατροπή AC-DC (Ανόρθωση) : Η ανόρθωση περιλαμβάνει τη μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος AC σε συνεχές ρεύμα DC επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος μόνο προς μία κατεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται τυπικά με τη χρήση στοιχείων ημιαγωγών όπως διόδους ή θυρίστορ διατεταγμένα σε τοπολογία ανορθωτή. Οι μονοφασικοί ανορθωτές μισού, ή πλήρους κύματος και οι τριφασικοί ανορθωτές είναι οι πιο κοινές διαμορφώσεις. Οι ανορθωτές μισού κύματος χρησιμοποιούν μία μόνο δίοδο για να επιτρέψουν να περάσουν μόνο οι θετικοί μισοί κύκλοι της κυματομορφής εναλλασσόμενου ρεύματος, με αποτέλεσμα την παλλόμενη έξοδο DC. Οι ανορθωτές πλήρους κύματος χρησιμοποιούν γέφυρες διόδου για να διορθώσουν τόσο τους θετικούς όσο και τους αρνητικούς μισούς κύκλους της κυματομορφής εναλλασσόμενου ρεύματος, παράγοντας πιο ομαλή έξοδο DC με μικρότερο κυματισμό. Οι τριφασικοί ανορθωτές χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές για να μετατρέψουν την τριφασική ισχύ AC σε ισχύ DC πιο αποτελεσματικά.



Σχήμα 1.1: Ανόρθωση.

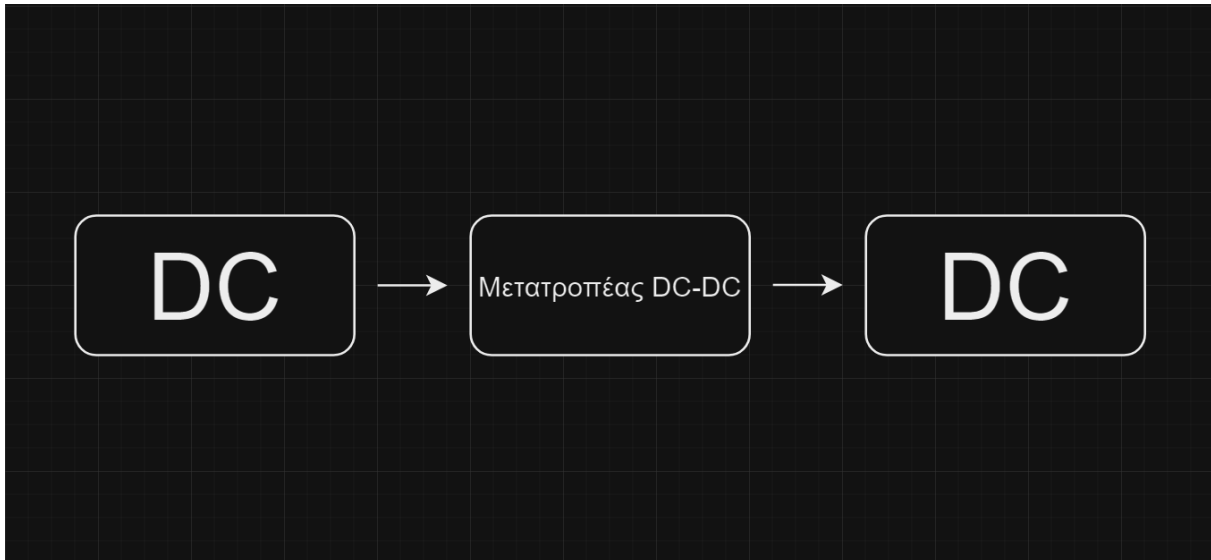
Μετατροπή DC-AC (Αντιστροφή) : Η αντιστροφή, περιλαμβάνει τη μετατροπή συνεχούς ρεύματος DC σε εναλλασσόμενο ρεύμα AC χρησιμοποιώντας συνήθως ημιαγωγούς διακόπτες IGBT ή MOSFET. Οι αντιστροφείς μπορούν να παράγουν κυματομορφές εξόδου AC με ρυθμιζόμενη τάση, συχνότητα και φάση. Λειτουργούν είτε διακόπτοντας ελεγχόμενα την σταθερή DC τάση εισόδου, είτε διατηρώντας μια σταθερή διακοπτική λειτουργία και ρυθμίζοντας την DC τάση κατάλληλα για να επιτευχθεί η επιθυμητή κυματομορφή AC στην έξοδο .



Σχήμα 1.2 : Αντιστροφή.

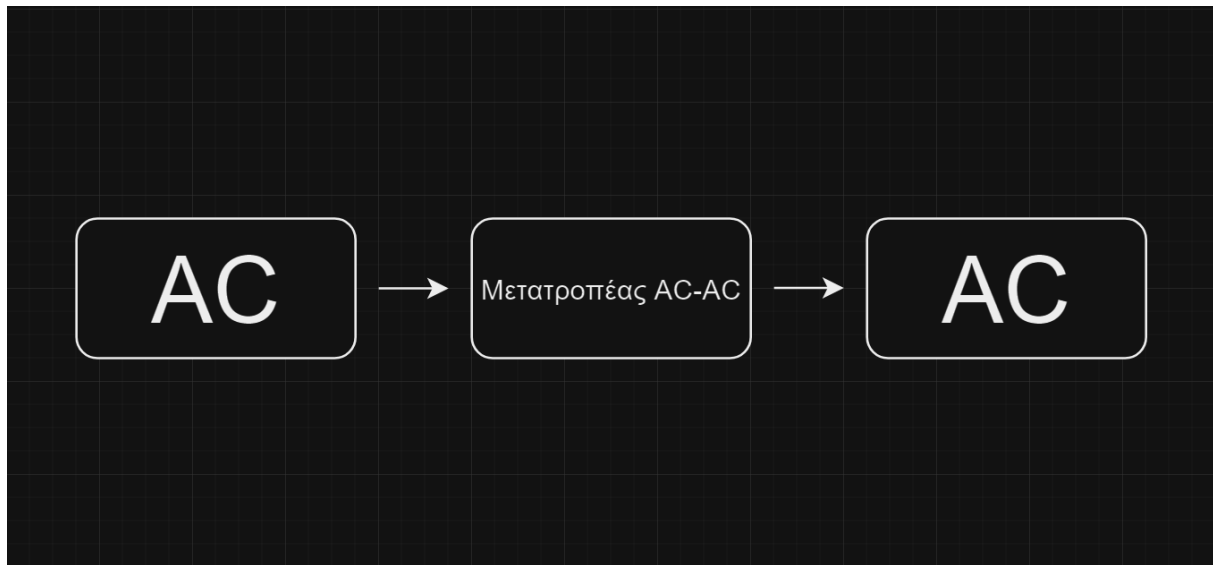
Μετατροπή DC-DC : Η μετατροπή DC-DC περιλαμβάνει τη μετατροπή ενός επιπέδου τάσης συνεχούς ρεύματος σε άλλο, ενώ διατηρείται μια σταθερή τάση εξόδου παρά τις διακυμάνσεις στην τάση εισόδου ή στις συνθήκες του φορτίου. Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες μετατροπέων DC-DC, συμπεριλαμβανομένων των μετατροπέων buck, boost, buck-boost και flyback. Οι μετατροπείς buck μειώνουν την τάση εισόδου σε μια χαμηλότερη τάση εξόδου ελέγχοντας τις διακοπτικές λειτουργίες

ενός τρανζίστορ και μιας διόδου. Οι μετατροπείς boost αυξάνουν την τάση εισόδου, ενώ οι μετατροπείς buck-boost μπορούν να ανεβάσουν και να μειώσουν την τάση εισόδου. Οι μετατροπείς flyback παρέχουν γαλβανική απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου και χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης. Αυτοί οι μετατροπείς λειτουργούν ελέγχοντας τον κύκλο λειτουργίας του ημιαγωγού διακόπτη για τη ρύθμιση της τάσης εξόδου.



Σχήμα 1.3 : Μετατροπή DC - DC.

Μετατροπή AC-AC : Η μετατροπή AC-AC περιλαμβάνει την αλλαγή της συχνότητας, του πλάτους ή της φάσης μιας τάσης AC χωρίς να αλλάξει το βασικό σχήμα της κυματομορφής της. Οι μετατροπείς AC-AC, γνωστοί και ως κυκλομετατροπείς, χρησιμοποιούν ημιαγωγούς διακόπτες ισχύος και αλγόριθμους ελέγχου για να προσαρμόσουν την τάση και τη συχνότητα εξόδου σύμφωνα με τις επιθυμητές προδιαγραφές. Διακρίνονται σε κυκλομετατροπείς ανύψωσης ή υποβιβασμού συχνότητας ανάλογα με το αν η συχνότητα εξόδου τους είναι αντίστοιχα μεγαλύτερη ή μικρότερη από την συχνότητα εισόδου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ελέγχου ταχύτητας κινητήρα, και μετατροπής συχνότητας. Οι ρυθμιστές τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος διατηρούν μια σταθερή τάση εξόδου παρά τις διακυμάνσεις στην τάση εισόδου ή τις διακυμάνσεις του φορτίου, συνήθως ρυθμίζοντας τη γωνία πυροδότησης των θυρίστορ στο κύκλωμα του μετατροπέα.



Σχήμα 1.4 : Μετατροπή AC - AC.

Διάφορες τεχνικές ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος και την ελαχιστοποίηση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης στα συστήματα AC, ενισχύοντας έτσι την απόδοση της διανομής και της χρήσης ισχύος. Προηγμένες τεχνικές όπως το soft-switching και το resonance switching, χρησιμοποιούνται για την ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά τη διακοπτική λειτουργία και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων.

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος απαιτεί βαθιά κατανόηση των ημιαγωγών διακοπών, των τοπολογιών κυκλωμάτων, των αλγορίθμων ελέγχου, της θερμικής διαχείρισης, της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) και της μηχανικής αξιοπιστίας. Οι μηχανικοί σε αυτόν τον τομέα πρέπει να διαθέτουν διεπιστημονικές γνώσεις που να καλύπτουν την ηλεκτρολογία, τη φυσική, την επιστήμη των υλικών και τη θεωρία ελέγχου για να αναπτύξουν καινοτόμες λύσεις για τις εξελισσόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων συστημάτων ισχύος.

Συνοπτικά, τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ένας ζωτικής σημασίας κλάδος που στηρίζει την αποτελεσματική και αξιόπιστη μετατροπή, έλεγχο και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, παίζοντας έναν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της ενεργειακής απόδοσης, της βιωσιμότητας και της τεχνολογικής καινοτομίας στον σύγχρονο κόσμο.

1.2 Μετατροπή DC σε AC : Η βασική αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας της μετατροπής του DC σε AC είναι η χειραγώγηση της κατεύθυνσης και έντασης της κυματομορφής τάσης εξόδου, έτσι ώστε να παρομοιάζει μια ημιτονική κυματομορφή, η οποία και είναι χαρακτηριστική της AC εξόδου.

Σε ένα παραδοσιακό κύκλωμα αντιστροφέα, η αρχική DC τάση φιλτράρεται και σταθεροποιείται για να εξαλειφθούν οι κυματώσεις και να επιτευχθεί μια εξομαλυσμένη και σταθερή DC τάση. Αυτή η τάση μετά συνήθως διαμορφώνεται από κάποιο κύκλωμα ταλαντωτή το οποίο παράγει μια τετραγωνική κυματομορφή, η οποία είναι μη – ημιτονοειδής. Στο τέλος, αυτή η τετραγωνική κυματομορφή φιλτράρεται για να παραχθεί μια κυματομορφή η οποία μοιάζει πολύ με μια ημιτονοειδή κυματομορφή, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως AC έξοδος.

Η κυματομορφή εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να ρυθμιστεί για να ταιριάζει με τις εκάστοτε απαιτήσεις μιας εφαρμογής. Για παράδειγμα, η συχνότητα εξόδου ενός αντιστροφέα μπορεί να ρυθμιστεί για να λειτουργεί κινητήρες στη βέλτιστη ταχύτητά τους, ή να ταιριάζει με τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα μπορεί επίσης να ρυθμιστεί για να ταιριάζει με τα απαιτούμενα επίπεδα τάσης για διαφορετικές εφαρμογές.

Επιπλέον, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι κυκλωμάτων αντιστροφέων με ποικίλα επίπεδα πολυπλοκότητας και επιδόσεων από απλά, χαμηλής ισχύος σχέδια έως υψηλής ισχύος και υψηλών συχνοτήτων. Η επιλογή ενός κυκλώματος αντιστροφέα εξαρτάται από παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά μεγέθη εισόδου και εξόδου, η απόδοση και η ποιότητα της κυματομορφής εξόδου.

1.3 Καταστάσεις λειτουργίας και τρόποι μεταγωγών

Όλοι οι ημιαγωγοί διακόπτες ισχύος έχουν δύο καταστάσεις λειτουργίας : Την κατάσταση αποκοπής, και την κατάσταση αγωγιμότητας. Τα τρανζίστορς έχουν και μία τρίτη κατάσταση η οποία ονομάζεται ενεργός περιοχή, ωστόσο λόγω των υψηλών απωλειών ισχύος σε αυτή τη κατάσταση η λειτουργία των διακοπών στην ενεργό περιοχή είναι ανεπιθύμητη στις εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος.[1]

Στη κατάσταση αποκοπής, ο ιδανικός ημιαγωγός διακόπτης δεν επιτρέπει τη ροή του ρεύματος, ενώ η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος. Στους πραγματικούς ημιαγωγούς διακόπτες υπάρχει ένα εξαιρετικά μικρό ρεύμα διαρροής στη κατάσταση αποκοπής.

Στην κατάσταση αγωγιμότητας, ο ιδανικός ημιαγωγός διακόπτης επιτρέπει την ροή του ρεύματος με μηδενική τάση στα άκρα του. Η τάση στα άκρα του πραγματικού διακόπτη είναι μη μηδενική και ονομάζεται τάση αγωγιμότητας. Η τιμή της τάσης αγωγιμότητας έχει σημαντική επίδραση στις απώλειες ισχύος του διακόπτη. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν διάφορα υλικά και τεχνικές για την ελαχιστοποίηση της τάσης αγωγιμότητας των διακοπών.

Η τάση της πηγής τροφοδοσίας πρέπει να είναι μικρότερη από μία συγκεκριμένη μέγιστη τιμή η οποία είναι χαρακτηριστική για τον κάθε διακόπτη και ονομάζεται τάση διάσπασης ή τάση αποκοπής. Αν η τάση της πηγής τροφοδοσίας υπερβεί την τάση διάσπασης του διακόπτη, τότε αυτός καταστρέφεται από υπερθέρμανση. Επίσης, η πολικότητα της τάσης πηγής τροφοδοσίας πρέπει να είναι η σωστή.

Στους ιδανικούς ημιαγωγούς διακόπτες οι χρόνοι μεταβάσεων είναι μηδενικοί. Στους πραγματικούς ημιαγωγούς διακόπτες υπάρχει ένα χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μεταγωγή τους, και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. Κατά το διάστημα της μεταγωγής, στον διακόπτη εφαρμόζονται πολύ υψηλές τάσεις και ρεύματα ταυτόχρονα, οπότε ο χρόνος μεταγωγής θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με το διάστημα μόνιμης λειτουργίας του διακόπτη. Εκτός από το χρονικό διάστημα των μεταγωγών, έχει σημασία και ο τρόπος μεταβολής των τάσεων και ρευμάτων έτσι ώστε να μην προκαλούνται υπερτάσεις ή υπερρεντάσεις στο κύκλωμα ισχύος.

Η μεταγωγή από την κατάσταση αποκοπής του διακόπτη στην κατάσταση αγωγιμότητας ονομάζεται έναυση. Η μεταγωγή από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής ονομάζεται σβέση. Η σβέση των διακοπών είναι πιο χρονοβόρα και πιο δύσκολη από την έναυση.[2]

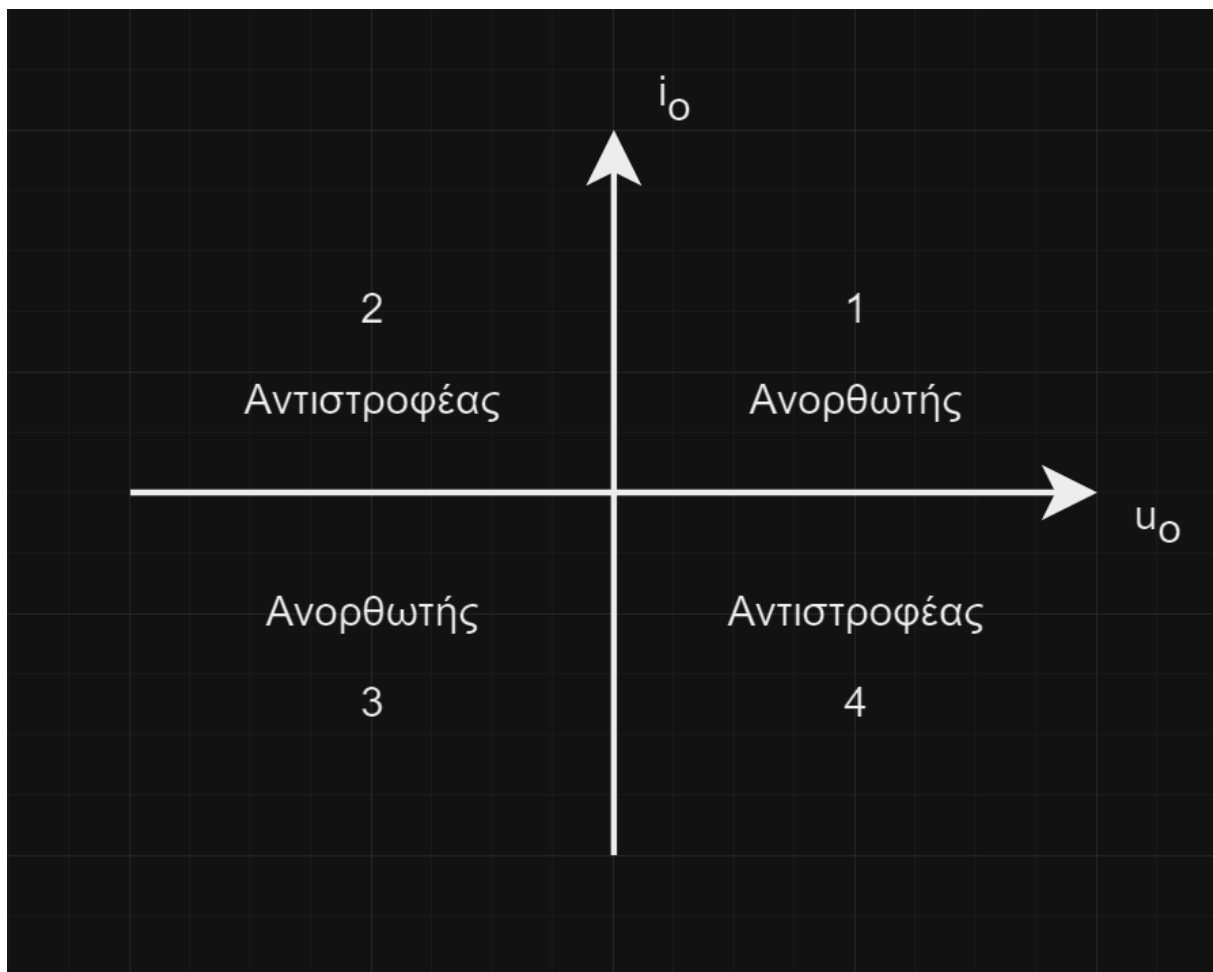
Ανάλογα με τον τρόπο που μεταβαίνουν στις καταστάσεις έναυσης και σβέσης οι διακόπτες κατατάσσονται σε τρεις συγκεκριμένες κατηγορίες :

Μη ελεγχόμενοι διακόπτες : Η έναυση και η σβέση αυτών των διακοπών επιβάλλεται αποκλειστικά από το κύκλωμα ισχύος, επομένως δεν έχουν ακροδέκτες ελέγχου, έχουν μόνο ακροδέκτες ισχύος. Η διόδος είναι ο κυριότερος διακόπτης σε αυτή τη κατηγορία.

Πλήρως ελεγχόμενοι διακόπτες : Η έναυση και η σβέση αυτών των διακοπών καθορίζεται απο ένα σήμα οδήγησης σε μορφή παλμών το οποίο εφαρμόζεται στον ακροδέκτη ελέγχου του διακόπτη. Τα τρανζίστορς είναι οι πιο διαδεδομένοι διακόπτες σε αυτή τη κατηγορία.

Μερικώς ελεγχόμενοι ή ημιελεγχόμενοι διακόπτες. Οι διακόπτες αυτής της κατηγορίας έχουν έναν ακροδέκτη ελέγχου απο τον οποίο καθορίζεται μόνο η έναυση του διακόπτη. Η σβέση καθορίζεται απο τη τάση ή το ρεύμα στο κύκλωμα ισχύος. Ο SCR είναι ο κύριος διακόπτης αυτής της κατηγορίας.

Οι ημιαγωγοί διακόπτες όπως και οι μετατροπείς τους οποίους απαρτίζουν, μπορούν να χαρακτηριστούν ως μετατροπείς ενός, δύο, ή τεσσάρων τεταρτημορίων ανάλογα με την πολικότητα της τάσης στους ακροδέκτες ισχύος κατα την αποκοπή και την φορά του ρεύματος κατα την αγωγιμότητα.

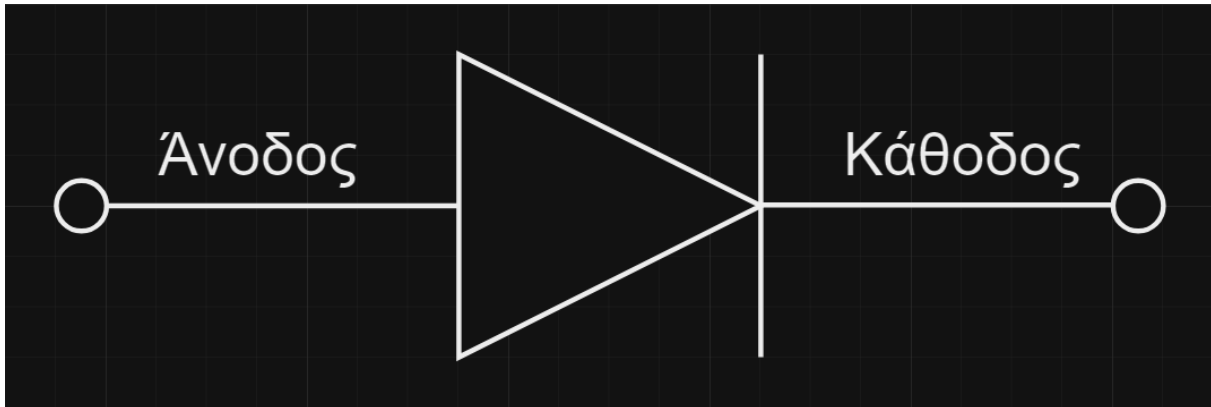


Σχήμα 1.5: Τεταρτημόρια λειτουργίας διακοπών και μετατροπέων.

1.4 Η διόδος ισχύος

Μια διόδος ισχύος αποτελείται κυρίως από έναν ημιαγωγό, συνήθως πυρίτιο (Si), με προσμίξεις άλλων στοιχείων που προστίθενται σκόπιμα για να δημιουργηθεί μια περιοχή φορέων θετικού φορτίου (τύπου p) και μια περιοχή φορέων αρνητικού φορτίου (τύπου n). Η περιοχή μεταξύ αυτών των δύο περιοχών αποτελεί μια ένωση, γνωστή ως επαφή p-n, η οποία είναι η καρδιά της διόδου. Η φυσική δομή μιας διόδου ισχύος περιλαμβάνει τυπικά δύο ακροδέκτες ισχύος : μια κάθοδο και μια

άνοδος. Η άνοδος είναι ο ακροδέκτης μέσω του οποίου το ρεύμα εισέρχεται, ενώ η κάθοδος είναι ο ακροδέκτης μέσω του οποίου το ρεύμα εξέρχεται από τη διάοδο. Το υλικό ημιαγωγών είναι τυπικά ντοπαρισμένο για την ενίσχυση της αγωγιμότητας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της διάοδου.



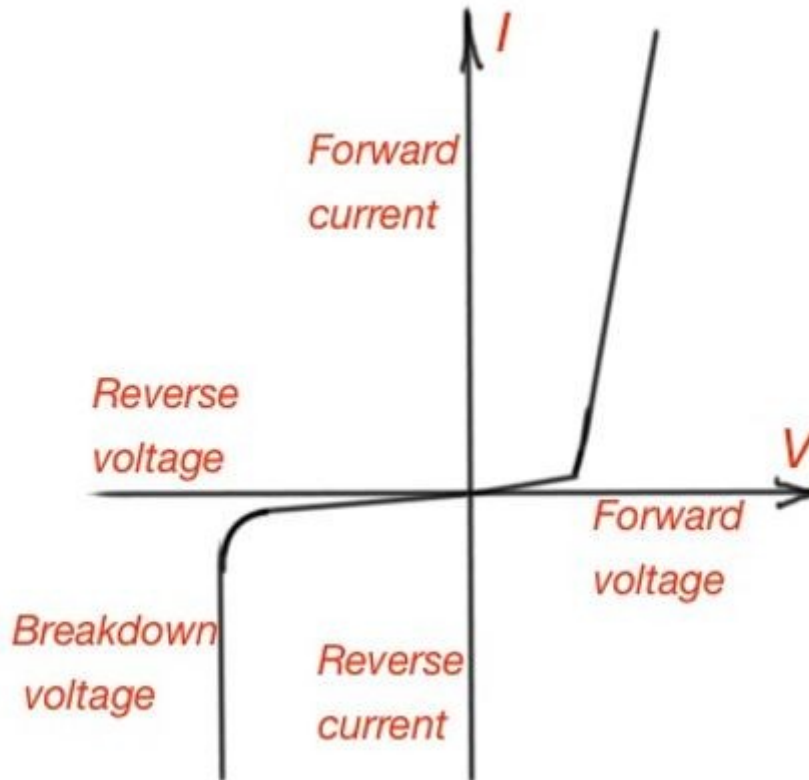
Σχήμα 1.6: Κυκλωματικό σύμβολο διάοδου.

Η λειτουργία μιας διάοδου ισχύος βασίζεται στη συμπεριφορά των φορέων φορτίου μέσα στο υλικό των ημιαγωγών. Όταν εφαρμόζεται ορθή πόλωση κατά μήκος της διάοδου, δηλαδή ο θετικός ακροδέκτης μιας πηγής τάσης συνδέεται με την περιοχή τύπου p και ο αρνητικός ακροδέκτης στην περιοχή τύπου n, οι περισσότεροι φορείς φορτίου (οπές στην περιοχή p και ηλεκτρόνια στην περιοχή n) ωθούνται προς την επαφή. Έτσι, μειώνεται το πλάτος της περιοχής εξάντλησης εντός της επαφής p-n, επιτρέποντας στο ρεύμα να ρέει μέσω της διάοδου με ελάχιστη αντίσταση. Αντίθετα, όταν εφαρμόζεται ανάστροφη πόλωση, η περιοχή εξάντλησης διευρύνεται, αποτρέποντας τη μεγάλη ροή ρεύματος. Ωστόσο, εάν η ανάστροφη τάση υπερβεί την ανάστροφη τάση διάσπασης της διάοδου, μπορεί να προκύψει βλάβη λόγω του φαινομένου χιονοστιβάδας, οδηγώντας σε ξαφνική αύξηση της ροής του αναστροφικού ρεύματος. [3]



Σχήμα 1.7: Δίοδοι υψηλής ισχύος.

Οι δίοδοι ισχύος παρουσιάζουν αρκετά σημαντικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Μια κρίσιμη παράμετρος είναι η τάση αγωγιμότητας V_F , η οποία αντιπροσωπεύει την τάση που απαιτείται για την ορθή πόλωση της διόδου και για την σημαντική ροή ρεύματος. Η ανάστροφη τάση διάσπασης V_{RBD} υποδεικνύει τη μέγιστη ανάστροφη τάση που μπορεί να αντέξει μια δίοδος χωρίς πρόβλημα. Επιπλέον, η ονομαστική τιμή ρεύματος I_F της διόδου και το ανάστροφο ρεύμα κόρου I_s είναι βασικές προδιαγραφές για το σχεδιασμό κυκλωμάτων και τη διασφάλιση αξιόπιστης λειτουργίας.



Σχήμα 1.8: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης της διόδου ισχύος.

Η τάση αγωγιμότητας της διόδου ισχύος μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με το ρεύμα ορθής πόλωσης σε υψηλές τιμές ρεύματος.

Η δυναμική συμπεριφορά της διόδου αφορά τις καταστάσεις μεταγωγών της. Τα σημεία που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η υπέρταση στα άκρα της κατά την έναυση, και το ανάστροφο ρεύμα κατά τη σβέση. Η υπέρταση δεν εμφανίζεται στις διόδους σήματος.

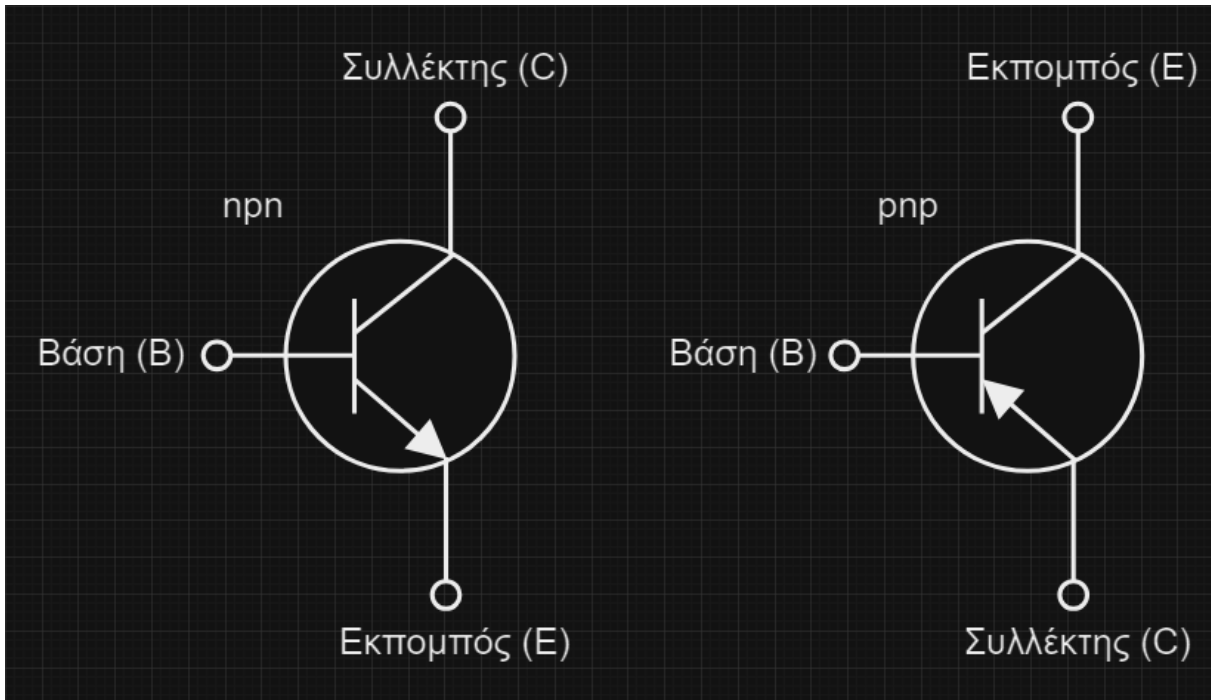
Η υπέρταση της διόδου οφείλεται σε δύο παράγοντες. Στην πτώση τάσης κατά μήκος της περιοχής ολίσθησης, και στην παρασιτική αυτεπαγωγή μεταξύ των ακροδεκτών και του κυρίως σώματος της διόδου.

Το ανάστροφο ρεύμα της διόδου αποκτά μια πολύ μεγάλη αρνητική τιμή πριν αποκτήσει την τιμή ισορροπίας του ανάστροφου ρεύματος κόρου. Προκαλείται από το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στην περιοχή ολίσθησης όσο η διάδος άγει. Το φορτίο αυτό δεν μπορεί να εξουδετερωθεί ακαριαία όταν η διάδος πολώνεται ανάστροφα, οπότε προκαλεί το μεγάλο ανάστροφο ρεύμα. [4]

1.5 Το BJT

Το τρανζίστορ ισχύος BJT είναι ένα στοιχείο τριών εμπλουτισμένων περιοχών, τριών ακροδεκτών, και αποτελείται είτε από μια δομή pnp είτε από μια δομή npn. Αυτά τα στρώματα σχηματίζουν δύο συνδέσεις p-n, οι οποίες είναι κρίσιμες για τη λειτουργία του τρανζίστορ. Οι ακροδέκτες χαρακτηρίζονται ως εκπομπός (E), βάση (B) και συλλέκτης (C). Η θεμελιώδης αρχή πίσω από τη λειτουργία του BJT είναι ο έλεγχος μιας μεγάλης ροής ρεύματος μεταξύ του συλλέκτη και του εκπομπού από ένα πολύ μικρότερο ρεύμα που εισέρχεται στη βάση. Αυτός ο ελεγχόμενος με ρεύμα

μηχανισμός διακρίνει τα BJT από άλλους τύπους τρανζίστορ, όπως τα τρανζίστορ με επίδραση πεδίου (FET), τα οποία ελέγχονται με τάση.



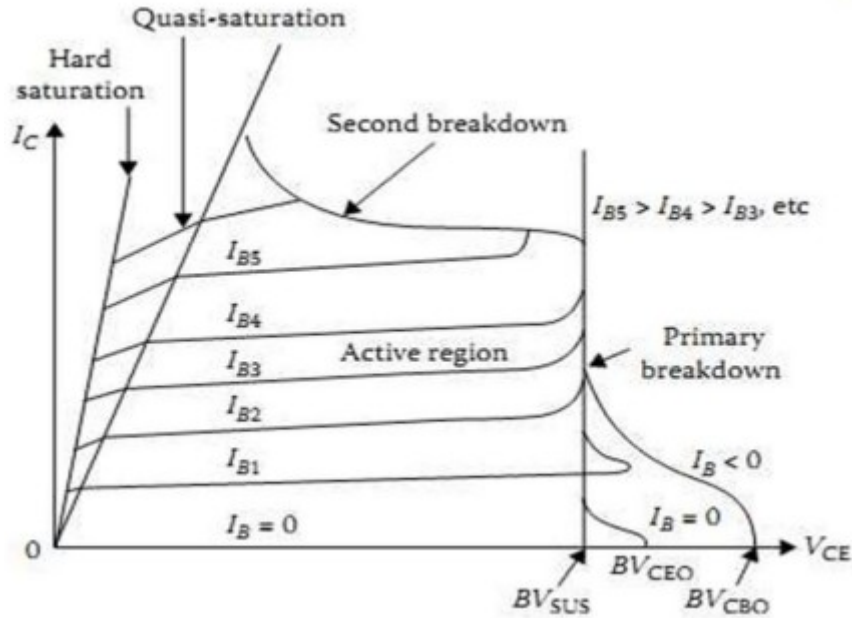
Σχήμα 1.9: Κυκλωματικό σύμβολο BJT.

Το τρανζίστορ ισχύος ηρη BJT, που είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση, αποτελείται από μια λεπτή βάση τύπου p που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο περιοχές τύπου n. Όταν εφαρμόζεται ορθή τάση πόλωσης στην επαφή βάσης-εκπομπού, τα ηλεκτρόνια από τον εκπομπού εγχέονται στη βάση. Η βάση, όντας λεπτή και ελαφρά ντοπαρισμένη, επιτρέπει στα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια να διαχέονται στην επαφή του συλλέκτη. Ένα μικρό μέρος των ηλεκτρονίων ανασυνδυάζεται με οπές στη βάση, συμβάλλοντας στο ρεύμα βάσης. Η πλειονότητα των ηλεκτρονίων που φτάνουν στην επαφή βάσης-συλλέκτη παρασύρονται στον συλλέκτη υπό την επίδραση της αντίστροφης πόλωσης σε αυτή την επαφή, με αποτέλεσμα το ρεύμα του συλλέκτη. Αυτή η ενίσχυση ρεύματος χαρακτηρίζεται από το κέρδος ρεύματος β , που ορίζεται ως ο λόγος του ρεύματος του συλλέκτη προς το ρεύμα βάσης ($\beta = I_C/I_B$).

Τα BJT ισχύος είναι ειδικά σχεδιασμένα για να χειρίζονται υψηλά ρεύματα και τάσεις, γεγονός που απαιτεί ορισμένες σχεδιαστικές . Το μέγεθος του τρανζίστορ αυξάνεται σε σύγκριση με τα BJT ελέγχου για τη καλύτερη θερμική διαχείριση της αυξημένης ισχύος. Η περιοχή του εκπομπού είναι ιδιαίτερα διευρυμένη για να δέχεται υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος, ενώ η διασφάλιση της αποτελεσματικής απαγωγής θερμότητας είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της λειτουργικής σταθερότητας του τρανζίστορ.

Οι ονομαστικές τάσεις και ρεύματα των BJT ισχύος είναι κρίσιμες προδιαγραφές που καθορίζουν την καταλληλότητά τους για διάφορες εφαρμογές. Αυτές οι ονομασίες περιλαμβάνουν τη μέγιστη τάση συλλέκτη-εκπομπού $V_{CE(max)}$, μέγιστο ρεύμα συλλέκτη $I_{C(max)}$ και μέγιστη απαγωγή ισχύος P_{max} . Η υπέρβαση αυτών των ορίων μπορεί να οδηγήσει σε πιθανή αστοχία, με τη θερμοκρασία του τρανζίστορ να αυξάνεται ανεξέλεγκτα, οδηγώντας σε πιθανή καταστροφή. Η ασφαλής περιοχή

λειτουργίας (SOA) είναι μια γραφική αναπαράσταση που οριοθετεί τους ασφαλείς συνδυασμούς τάσης και ρεύματος όπου το τρανζίστορ μπορεί να λειτουργήσει χωρίς πρόβλημα. Υπολογίζει παράγοντες όπως η δεύτερη διάσπαση, η οποία είναι μια κατάσταση σφάλματος λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής ρεύματος εντός του τρανζίστορ, που οδηγεί σε τοπική υπερθέρμανση.



Σχήμα 1.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης του BJT.

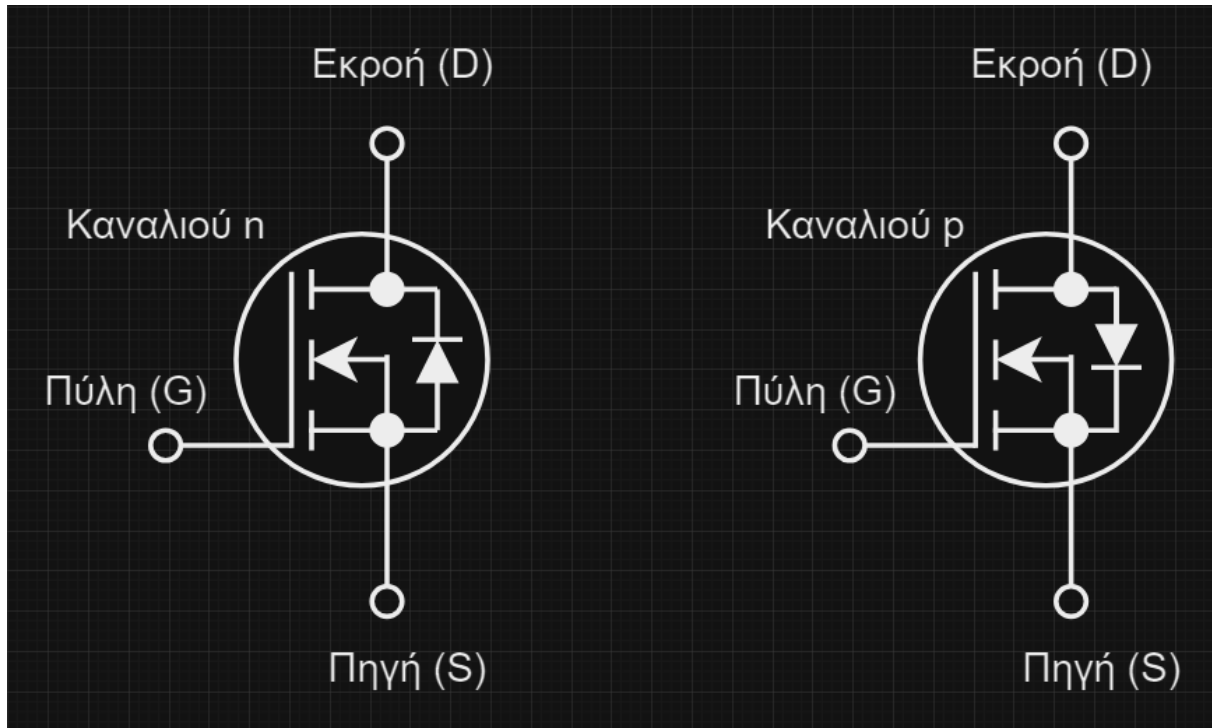
Τα BJT ισχύος εμφανίζουν επίσης ορισμένα δυναμικά χαρακτηριστικά που επηρεάζονται από τη φυσική κατασκευή και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Οι εγγενείς χωρητικότητες, όπως οι χωρητικότητες των επαφών εκπομπού - βάσης και συλλέκτη - βάσης, επηρεάζουν τη διακοπτική συμπεριφορά, με τις μεγαλύτερες χωρητικότητες γενικά να οδηγούν σε μικρότερες ταχύτητες μεταγωγών. Για να μετριαστεί αυτό, χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η μείωση του αποθηκευμένου φορτίου και η οδήγηση βάσης.

Η λειτουργία του BJT παράγει θερμότητα, η οποία επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του και μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του διακόπτη εάν δεν υπάρξει σωστή αντιμετώπιση. Οι τεχνικές διαχείρισης θερμότητας περιλαμβάνουν τη χρήση ψυκτρών, ανεμιστήρων ή προηγμένων συστημάτων ψύξης για τη διατήρηση μιας ασφαλούς θερμοκρασίας λειτουργίας. Επιπλέον, τα BJT λειτουργούν συχνά σε συνδυασμό με κυκλώματα θερμικής προστασίας που παρακολουθούν τη θερμοκρασία και προσαρμόζουν τις συνθήκες λειτουργίας για να αποτρέψουν την υπερθέρμανση.

Σε σύγκριση με άλλους διακόπτες ισχύος όπως τα MOSFET και τα IGBT, τα BJT προσφέρουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Συνήθως παρέχουν καλύτερη γραμμικότητα και χαμηλότερη πτώση τάσης κατά την κατάσταση αγωγιμότητας, καθιστώντας τα κατάλληλα για αναλογικές εφαρμογές και ενίσχυση ήχου. Ωστόσο, η ελεγχόμενη από το ρεύμα φύση τους οδηγεί σε υψηλότερες απαιτήσεις οδήγησης βάσης. [5] Επιπλέον, οι σχετικά χαμηλότερες ταχύτητες μεταγωγής των BJT σε σύγκριση με τα MOSFET τα καθιστούν λιγότερο ιδανικά για εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

1.6 Το MOSFET ισχύος

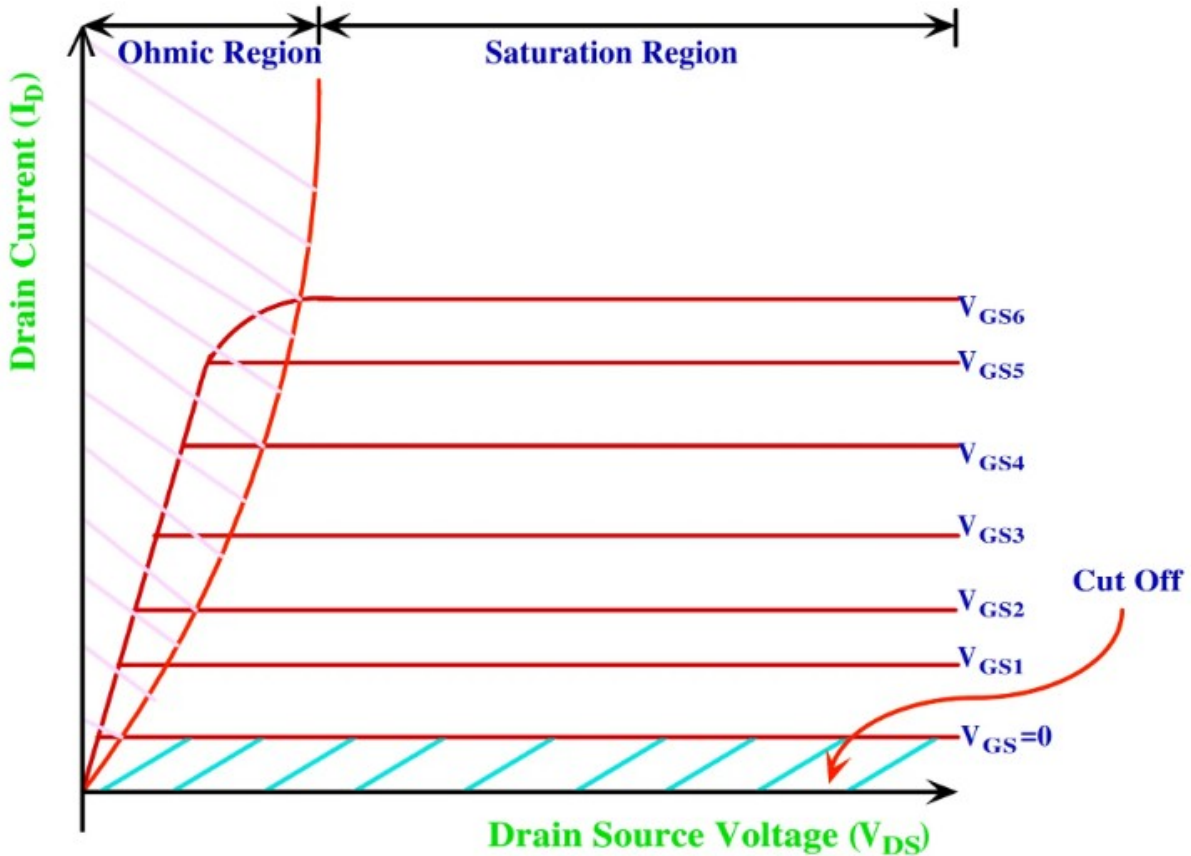
Η δομή του MOSFET αποτελείται από τρεις βασικούς ακροδέκτες : την πύλη (G), την εκροή (D) και την πηγή (S). Η πύλη χωρίζεται από το κανάλι με ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου, ένα μονωτικό, το οποίο επιτρέπει στη συσκευή να λειτουργεί με πολύ υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου. Αυτή η μόνωση πύλης είναι ζωτικής σημασίας για τα χαρακτηριστικά μεταγωγής του MOSFET, καθώς επιτρέπει στη συσκευή να ελέγχει μεγάλα ρεύματα με σχετικά μικρές τάσεις εισόδου.



Σχήμα 1.11: Κυκλωματικό σύμβολο του MOSFET.

Τα MOSFET ισχύος λειτουργούν ως διακόπτες που μπορούν να μεταβαίνουν στην έναυση και τη σβέση γρήγορα, κάτι που είναι καίριας σημασίας για τη μετατροπή ισχύος με υψηλή απόδοση. Διατίθενται σε δύο βασικούς τύπους: καναλιού n και καναλιού p. Τα MOSFET καναλιού n χρησιμοποιούνται συχνότερα λόγω της χαμηλότερης αντίστασης και της υψηλότερης ικανότητας αγωγής ρεύματος σε σύγκριση με τα MOSFET καναλιού p. Η αντίσταση $R_{ds(on)}$ είναι μια κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει την απώλεια ισχύος κατά τη λειτουργία. Οι χαμηλότερες τιμές $R_{ds(on)}$ είναι επιθυμητές καθώς υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση και επομένως χαμηλότερη απώλεια ισχύος όταν το MOSFET άγει.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των MOSFET ισχύος έναντι άλλων τύπων τρανζίστορ ισχύος, όπως τα BJT, είναι η ανώτερη ταχύτητα μεταγωγής τους. Αυτή η ταχύτητα οφείλεται στη λειτουργία των φορέων πλειονότητας των MOSFET, όπου μόνο ένας τύπος φορέα φορτίου (ηλεκτρόνια στο κανάλι n ή οπές στο κανάλι p) εμπλέκεται στη διαδικασία αγωγής [6]. Αντίθετα, τα BJT περιλαμβάνουν τόσο ηλεκτρόνια όσο και οπές, οδηγώντας σε πιο αργούς χρόνους μεταγωγής. Οι δυνατότητες γρήγορης μεταγωγής των MOSFET έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένες απώλειες ισχύος και υψηλότερη απόδοση στις εφαρμογές μεταγωγής.



Σχήμα 1.12: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης του MOSFET.

Αυτές οι συσκευές συχνά χειρίζονται σημαντικά επίπεδα ισχύος, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική παραγωγή θερμότητας. Οι αποτελεσματικοί μηχανισμοί απαγωγής θερμότητας, όπως οι ψύκτρες και η σωστή διάταξη σε PCB, είναι απαραίτητοι για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας. Η θερμική αντίσταση επαφής-περιβλήματος και περιβλήματος-περιβάλλοντος είναι σημαντικές παράμετροι που βοηθούν στον σχεδιασμό κατάλληλων λύσεων ψύξης.

Τα MOSFET ισχύος χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να χειρίζονται υψηλές τάσεις και ρεύματα. Η μέγιστη τάση εκροής-πηγής $V_{DS(max)}$ και το συνεχές ρεύμα εκροής I_d είναι κρίσιμα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την καταλληλότητα ενός MOSFET για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα MOSFET υψηλής τάσης είναι ικανά να αντέχουν εκατοντάδες βολτ και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως τροφοδοτικά και ηλεκτροκινητήρες, ενώ τα MOSFET χαμηλής τάσης χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως μετατροπείς DC-DC και συστήματα διαχείρισης μπαταριών.

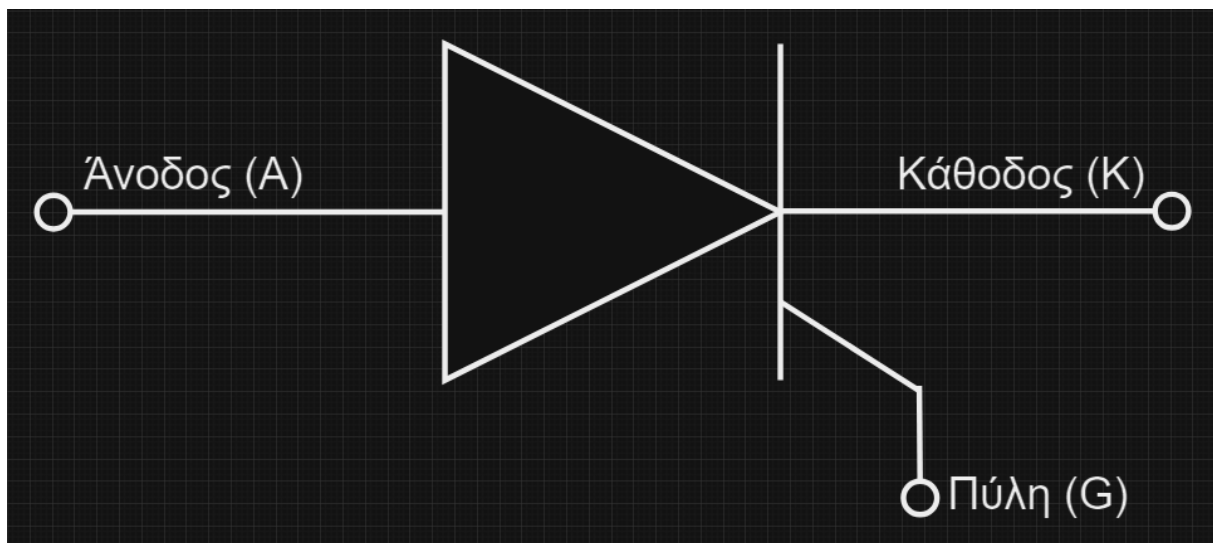
Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των MOSFET ισχύος είναι το φορτίο πύλης Q_G . Το φορτίο πύλης αντιπροσωπεύει τη συνολική φόρτιση που απαιτείται για την αλλαγή του MOSFET από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής. Οι χαμηλότερες τιμές φορτίου πύλης προτιμώνται για εφαρμογές υψηλής συχνότητας, καθώς απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την μεταγωγή, μειώνοντας έτσι τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του στοιχείου. Το κύκλωμα οδηγού της πύλης πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει επαρκές ρεύμα για να φορτίζει και να εκφορτίζει γρήγορα την χωρητικότητα της πύλης.

Η ενσωματωμένη δίοδος είναι ένα εγγενές μέρος της δομής του MOSFET, παρέχοντας μια διαδρομή για το ρεύμα σε συνθήκες ανάστροφης πόλωσης. Τα χαρακτηριστικά ανάστροφης αποκατάστασης

αυτής της διόδου είναι ζωτικής σημασίας σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν επαγωγικά φορτία, καθώς η κακή απόδοση της διόδου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απώλειες ισχύος και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η πρόοδος της τεχνολογίας των MOSFET οδήγησε στην ανάπτυξη διακοπών με βελτιωμένες ενσωματωμένες διόδους που εμφανίζουν ταχύτερους χρόνους αποκατάστασης και χαμηλότερο φορτίο ανάστροφης αποκατάστασης Q_{RR} .

1.7 Τα thyristors

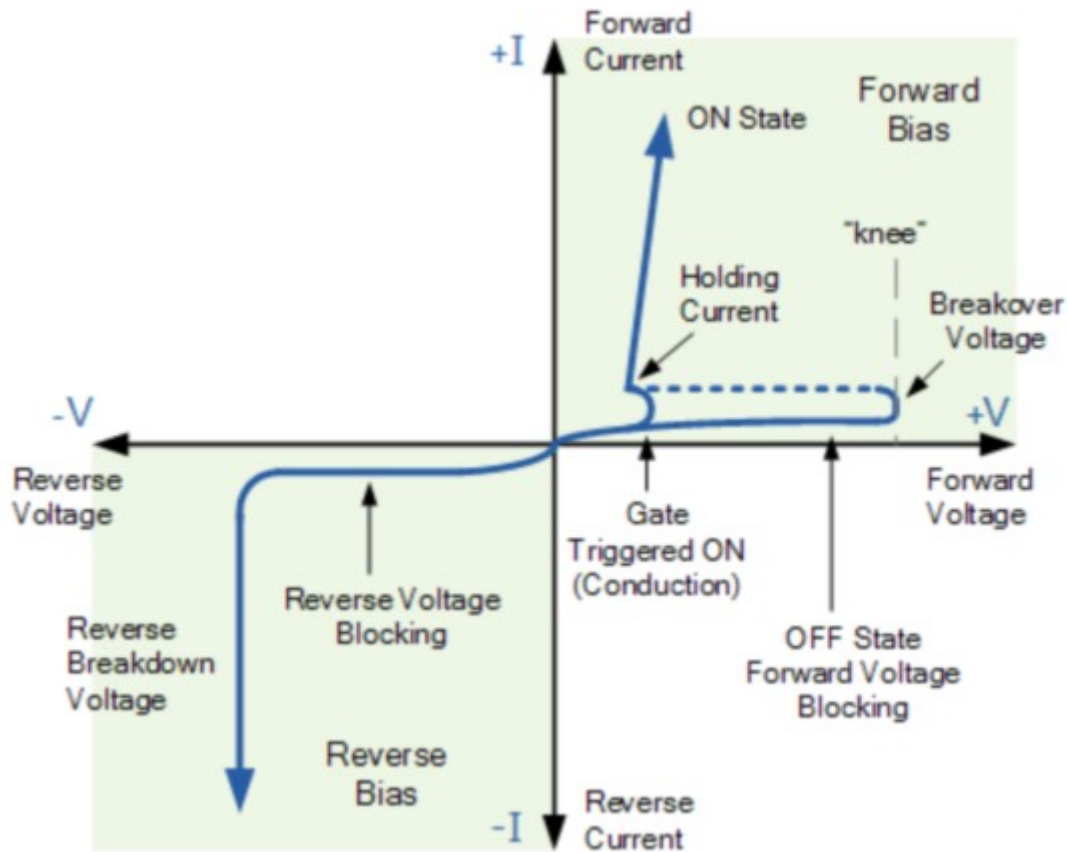
Τα θυρίστορ ανήκουν στην οικογένεια των ημιαγωγών διακοπών που χαρακτηρίζονται από τη δομή τεσσάρων στρωμάτων τους. Η βασική κατασκευή περιλαμβάνει τρεις συνδέσεις p-n, που σχηματίζουν τρεις περιοχές ημιαγωγών: την άνοδο (A), την κάθοδο (K) και την πύλη (G). Ο πιο συνηθισμένος τύπος θυρίστορ είναι ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR).



Σχήμα 1.13: Κυκλωματικό σύμβολο του SCR.

Ο SCR είναι ένας ημιαγωγός διακόπτης τεσσάρων στρωμάτων, που χαρακτηρίζεται από τρεις συνδέσεις pn και τέσσερα στρώματα ημιαγωγών, που συνήθως αποτελούνται από πυρίτιο. Η βασική δομή του περιλαμβάνει δύο ακροδέκτες ισχύος (άνοδο, κάθοδο) και έναν ακροδέκτη ελέγχου (πύλη). Οι SCR λειτουργούν ως δισταθείς διακόπτες, ικανοί να μεταφέρουν ρεύμα προς μία κατεύθυνση όταν ενεργοποιούνται και να διατηρούν αυτήν την αγωγιμότητα έως ότου το ρεύμα πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο ή η συσκευή απενεργοποιηθεί μέσω του εξωτερικού κυκλώματος.

Η λειτουργία του SCR βασίζεται στην ιδιότητα της μανδάλωσης [7]. Αρχικά, ο διακόπτης παραμένει στην αποκοπή μέχρι να εφαρμοστεί ένας σύντομος παλμός ρεύματος στον ακροδέκτη της πύλης. Αυτό το σήμα ξεκινά τη διαδικασία έναυσης, αναγκάζοντας τον SCR να μεταβεί σε κατάσταση χαμηλής αντίστασης, επιτρέποντας τη ροή ρεύματος από την άνοδο στην κάθοδο. Μόλις ενεργοποιηθεί, ο SCR παραμένει αγωγίμος ακόμη και μετά την αφαίρεση του σήματος πύλης, έως ότου το ρεύμα ανόδου πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο γνωστό ως ρεύμα συγκράτησης ή έως ότου ένα εξωτερικό κύκλωμα διακόψει τη ροή του ρεύματος.

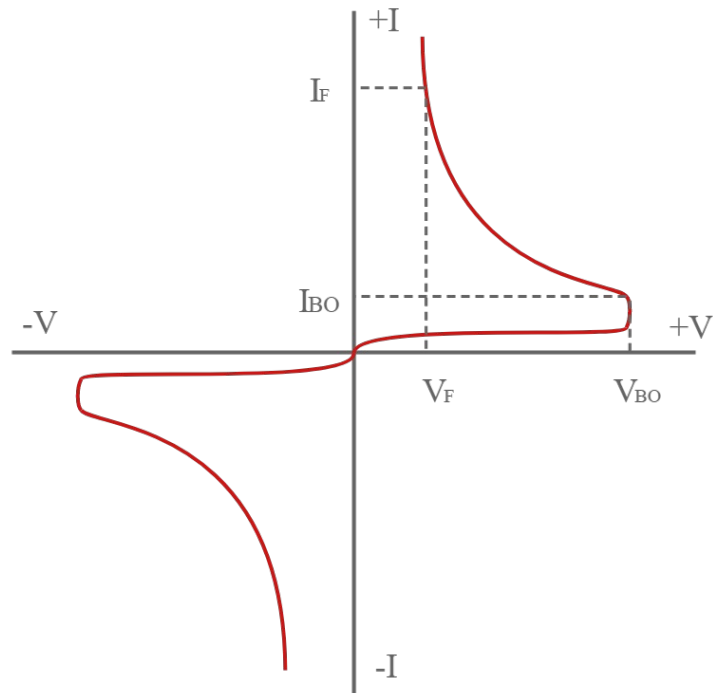


Σχήμα 1.14: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης του SCR.

Μία από τις κύριες παραμέτρους που ορίζουν τον SCR είναι η τάση αποκοπής V_{BO} , η οποία είναι η τάση στην οποία ο SCR μεταβαίνει στην κατάσταση ενεργοποίησης χωρίς ρεύμα πύλης. Αυτή η παράμετρος είναι κρίσιμης σημασίας σε εφαρμογές όπου ο SCR πρέπει να λειτουργήσει υπό συνθήκες υψηλής τάσης. Εξίσου σημαντικό είναι το ρεύμα σκανδαλισμού της πύλης, το οποίο είναι το ελάχιστο ρεύμα που απαιτείται για την ενεργοποίηση της συσκευής σε αγωγιμότητα.

Τα thyristor κατηγοριοποιούνται σε διάφορους τύπους με βάση τις συγκεκριμένες εφαρμογές και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Μερικοί από τους τύπους thyristor που χρησιμοποιούνται συνήθως περιλαμβάνουν ανορθωτές ελεγχόμενου πυριτίου (SCR), thyristor απενεργοποίησης πύλης (GTO), DIAC και TRIAC. Κάθε τύπος διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα προσαρμοσμένα στις διαφορετικές απαιτήσεις σε ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος [8].

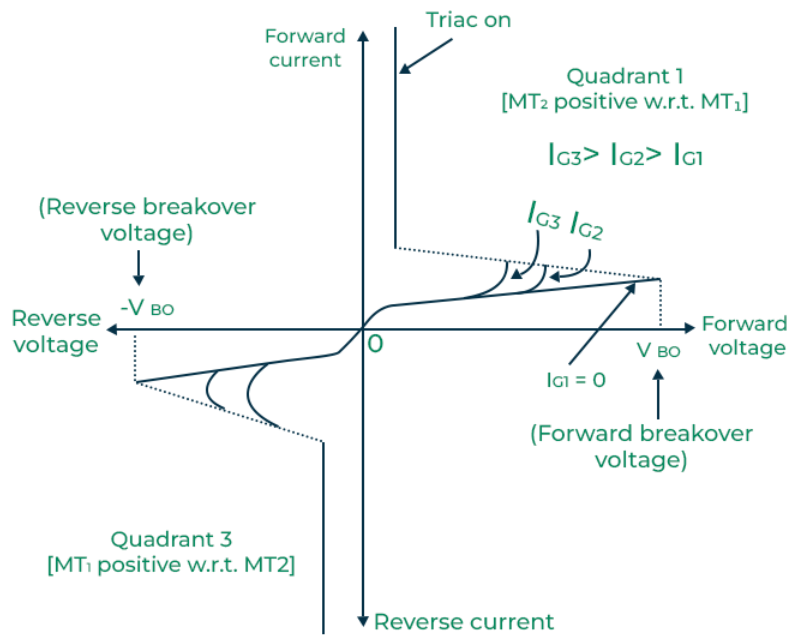
Το DIAC είναι μια αμφίδρομη δίοδος σκανδαλισμού που λειτουργεί χωρίς πύλη, κάτι που το κάνει να ξεχωρίζει από άλλες συσκευές ημιαγωγών. Δομικά, το DIAC αποτελείται από μια συμμετρική διαμόρφωση τεσσάρων στρωμάτων p-n-p-n, σχηματίζοντας μια αμφίδρομη συσκευή. Αυτή η συμμετρία του επιτρέπει να άγει ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις όταν ξεπεραστεί η τάση αποκοπής του. Αποτελείται από δύο ακροδέκτες: τον κύριο ακροδέκτη 1 (Main Terminal 1) και τον κύριο ακροδέκτη 2 (Main Terminal 2).



Σχήμα 1.15: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης του DIAC.

Η αρχή λειτουργίας του DIAC βασίζεται στην ικανότητά του να παραμένει σε κατάσταση αποκοπής έως ότου η εφαρμοζόμενη τάση φτάσει τη τάση αποκοπής. Μόλις αυτό συμβεί, το DIAC μεταβαίνει σε μια αγώγιμη κατάσταση χαμηλής αντίστασης, επιτρέποντας τη ροή ρεύματος. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τα DIAC ιδιαίτερα χρήσιμα για την ενεργοποίηση των TRIAC, καθώς παρέχουν μια απότομη μετάβαση από τις καταστάσεις αποκοπής σε κατάσταση αγωγιμότητας, διασφαλίζοντας έναν αξιόπιστο μηχανισμό ενεργοποίησης.

Το TRIAC επεκτείνει τη λειτουργικότητα του SCR επιτρέποντας τον έλεγχο της ροής ρεύματος και στις δύο κατευθύνσεις. Ουσιαστικά, μπορεί να θεωρηθεί ως δύο θυρίστορ που συνδέονται αντιπαράλληλα μέσα σε έναν μόνο διακόπτη, με τον οποίο μοιράζονται μια κοινή πύλη. Η δομή του TRIAC αποτελείται από πέντε στρώματα p-n-p-n-p και τρεις ακροδέκτες: τον κύριο ακροδέκτη 1 (MT1), τον κύριο ακροδέκτη 2 (MT2) και την πύλη (G).



Σχήμα 1.16: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης του TRIAC.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του TRIAC είναι η ικανότητα αμφίδρομης αγωγής του ρεύματος, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές AC. Το TRIAC μπορεί να μεταβεί σε αγωγιμότητα εφαρμόζοντας ένα μικρό ρεύμα στον ακροδέκτη της πύλης. Μόλις ενεργοποιηθεί, το TRIAC παραμένει σε αγώγιμη κατάσταση έως ότου το ρεύμα που άγει πέσει κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή συγκράτησης, οπότε και επανέρχεται στη μη αγώγιμη κατάστασή του.

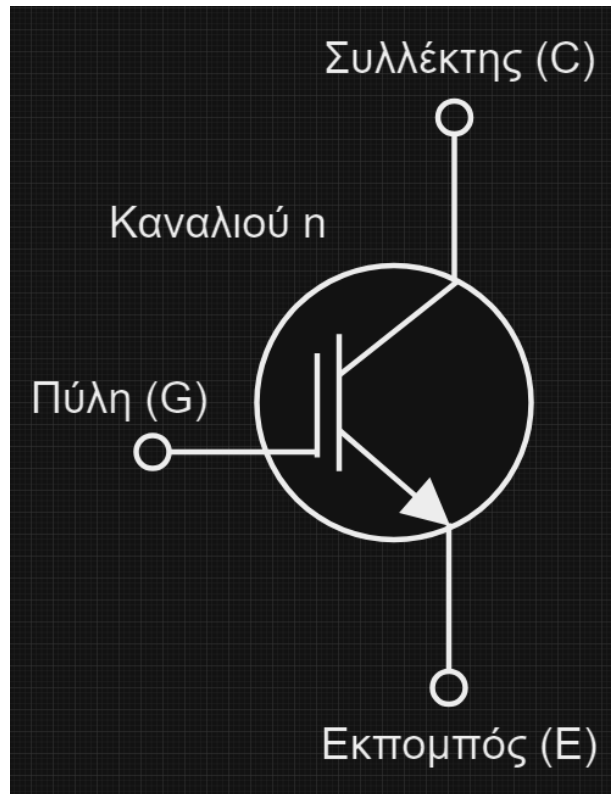
Το GTO αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία ημιαγωγών ισχύος, προσφέροντας τη δυνατότητα απενεργοποίησης μέσω σήματος πύλης, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα θυρίστορ που μπορούν να ενεργοποιηθούν μόνο από ένα σήμα πύλης και απαιτούν το ρεύμα να πέσει κάτω από το ρεύμα συγκράτησης για να απενεργοποιηθούν. Αυτός ο αμφίδρομος έλεγχος επιτυγχάνεται με την έγχυση ενός αρνητικού ρεύματος πύλης, το οποίο εξάγει τους φορείς φορτίου από τη συσκευή και την απενεργοποιεί.

Δομικά, το GTO είναι παρόμοιο με ένα συμβατικό θυρίστορ, που περιλαμβάνει τέσσερα στρώματα p-n-p-n και τρεις ακροδέκτες: την άνοδο (A), την κάθοδο (K) και την πύλη (G). Ωστόσο, η βασική διαφορά έγκειται στη δομή της πύλης, η οποία έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται τόσο τα ρεύματα ενεργοποίησης όσο και τα ρεύματα απενεργοποίησης.

1.8 Το IGBT

Το IGBT είναι ένας ημιαγωγός διακόπτης τριών ακροδεκτών, ο οποίος συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του MOSFET και του BJT. Οι ακροδέκτες είναι η πύλη (G), ο συλλέκτης (C) και ο εκπομπός (E). Η

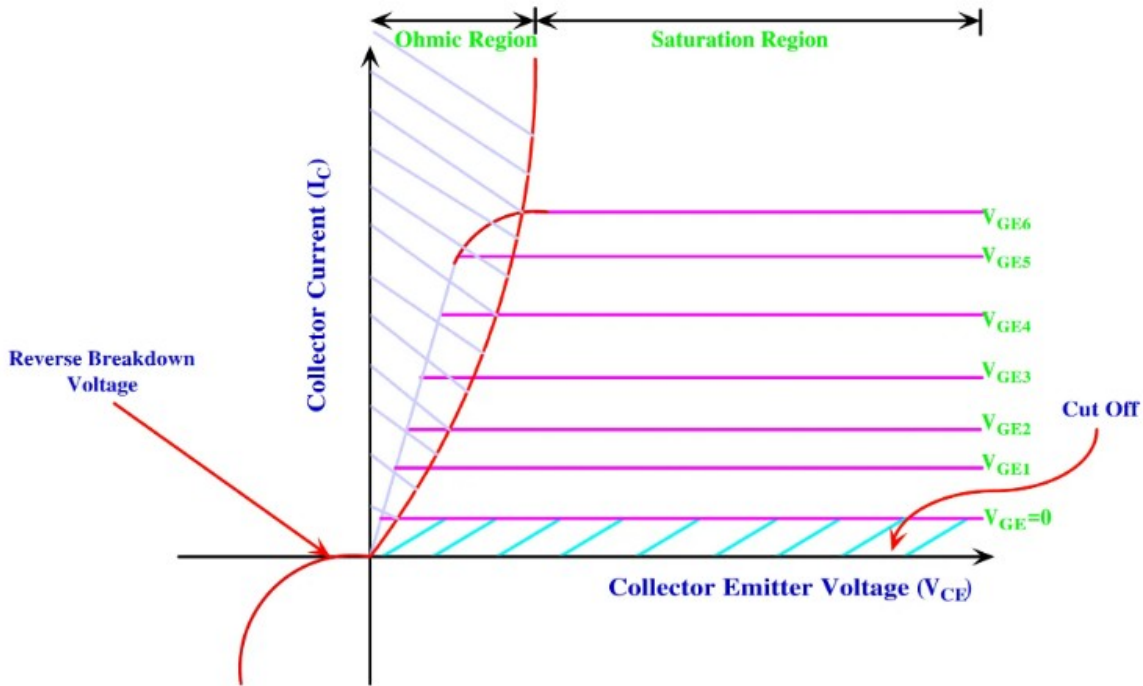
δομή ενός IGBT αποτελείται από τέσσερα στρώματα ημιαγωγού υλικού, συνήθως διατεταγμένα ως pnpn. Η συσκευή λειτουργεί με την εφαρμογή τάσης στον ακροδέκτη της πύλης, η οποία ελέγχει την αγωγιμότητα μεταξύ του συλλέκτη και του εκπομπού.



Σχήμα 1.17: Κυκλωματικό σύμβολο του IGBT.

Το πρωταρχικό πλεονέκτημα των IGBT είναι η υψηλή απόδοση και η μεγάλη ταχύτητα μεταγωγών του. Όταν εφαρμόζεται τάση στην πύλη, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο που ρυθμίζει την αγωγιμότητα της συσκευής. Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου, που σημαίνει ότι η συσκευή απαιτεί πολύ μικρό ρεύμα εισόδου για να ελέγξει ένα μεγάλο ρεύμα εξόδου. Αυτή είναι μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα BJT, τα οποία απαιτούν συνεχές ρεύμα εισόδου για τη διατήρηση της αγωγιμότητας.

Τα IGBT εκτιμώνται ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτούν δυνατότητες διαχείρισης υψηλής τάσης και υψηλού ρεύματος, όπως μετατροπείς, τροφοδοτικά, κινητήρες και άλλα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Η συσκευή μπορεί να χειριστεί μεγάλα επίπεδα ισχύος λόγω της υψηλής τάσης διάσπασης. Επιπλέον, η χαμηλή τάση κόρου στην κατάσταση αγωγιμότητας μειώνει τις απώλειες ισχύος, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση.



Σχήμα 1.18: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης του IGBT.

Οι εξελίξεις στον τομέα των ημιαγωγών διακοπών έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφόρων τύπων IGBT, όπως οι non-punch-through (NPT) και punch-through (PT). Τα NPT IGBT έχουν απλούστερη δομή και είναι πιο εύκολο να κατασκευαστούν, παρέχοντας καλή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τα PT IGBT, από την άλλη πλευρά, προσφέρουν χαμηλότερες πτώσεις τάσης στην κατάσταση αγωγιμότητας και μεγαλύτερες ταχύτητες μεταγωγής, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων [9].

Η εξέλιξη της τεχνολογίας IGBT συνεχίζεται με την ανάπτυξη νέων υλικών και δομών που στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης. Για παράδειγμα, το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) και το νιτρίδιο του γαλλίου (GaN) αναδεικνύονται ως πιθανές εναλλακτικές λύσεις στους ημιαγωγούς διακόπτες με βάση το πυρίτιο. Αυτά τα υλικά προσφέρουν ανώτερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, όπως υψηλότερες τάσεις διάσπασης, μεγαλύτερες ταχύτητες μεταγωγής και καλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Αυτά τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος επόμενης γενιάς.



Σχήμα 1.19: IGBT υψηλής ισχύος.

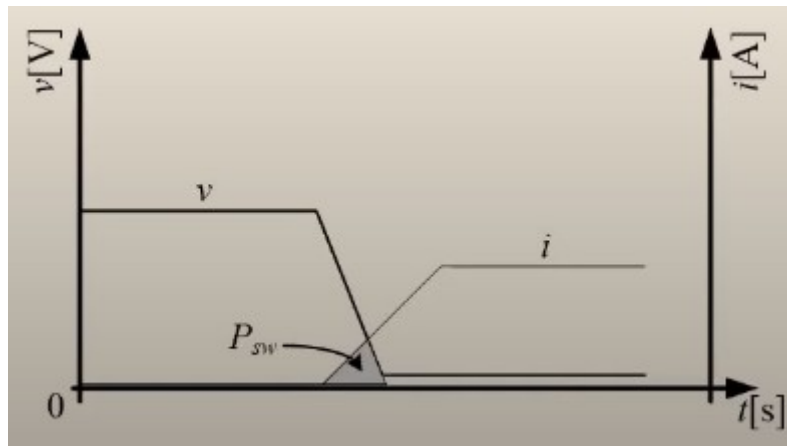
1.9 Κατανάλωση ισχύος

Οι απώλειες ισχύος προκαλούν τη θέρμανση των διακοπών. Έτσι, είναι αναγκαία η αξιοποίηση ψυκτικών μέσων για την απαγωγή της θερμότητας. Οι διατάξεις ψύξης είναι ανεπιθύμητες, καθώς αυξάνουν το κόστος και το μέγεθος των συστημάτων ισχύος. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό των ημιαγωγών πρέπει να διατηρείται κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή για την ασφαλή λειτουργία τους. Η απαίτηση για μεγάλο βαθμό απόδοσης αυξάνεται αναλογικά με την ισχύ που διαχειρίζονται οι μετατροπείς ισχύος.



Σχήμα 1.20: Ημιαγωγός διακόπτης ισχύος με περίβλημα τύπου TO-3, τοποθετημένος σε ψύκτρα η οποία ενσωματώνεται στο πίσω μέρος ενός σασί.

Η απαγωγή θερμότητας στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι μια κρίσιμη πτυχή για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας των ηλεκτρονικών συστημάτων. Στοιχεία ισχύος, όπως τρανζίστορ, δίοδοι και ολοκληρωμένα κυκλώματα, παράγουν θερμότητα κατά τη λειτουργία τους λόγω απωλειών αγωγής όταν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα και μεταγωγής όταν μεταβαίνουν στις καταστάσεις έναυσης και σβέσης. Κατά τη μεταγωγή, οι διακόπτες υποβάλλονται ταυτόχρονα σε υψηλές τάσεις και υψηλά ρεύματα, επομένως η ισχύς που καταναλώνεται πάνω τους είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με το διάστημα αγωγής. Λόγω του αμεητέου ρεύματος διαρροής κατά την κατάσταση αποκοπής, οι απώλειες ισχύος αγνοούνται [10].



Σχήμα 1.21: Διάγραμμα απεικόνισης απωλειών ισχύος κατά τη μεταγωγή των διακοπών.

Οι μεταβατικές απώλειες ισχύος συνδέονται γραμμικά με τη διακοπτική συχνότητα και τους χρόνους μεταγωγών των διακοπών. Όσο μικρότεροι είναι οι χρόνοι μεταβάσεων των διακοπών, τόσο μεγαλύτερη επιλέγεται η διακοπτική συχνότητά τους.

Η αποτελεσματική διαχείριση της θερμότητας είναι απαραίτητη για την πρόληψη της υπερθέρμανσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία της συσκευής, μειωμένη απόδοση και μειωμένη διάρκεια ζωής.

1.10 Επίδραση αρμονικών συχνοτήτων

Λόγω της διακοπτικής λειτουργίας των μετατροπέων, οι τάσεις και τα ρεύματα εισόδων και εξόδων δεν είναι καθαρής ημιτονικής μορφής όταν είναι εναλλασσόμενα ή απολύτως σταθερά όταν είναι συνεχή μεγέθη. Παρουσιάζουν αρμονικές συνιστώσες σε πολλαπλάσια της θεμελιώδους. Σε ορισμένους μετατροπείς ισχύος, οι αρμονικές συνιστώσες εμφανίζονται σε συχνότητες εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές μεγαλύτερες και πλάτη συγκρίσιμα με αυτά της θεμελιώδους συνιστώσας.

Το ρεύμα που απορροφά ένας ανορθωτής από το δίκτυο συνήθως είναι αρκετά παραμορφωμένο, δηλαδή μη ημιτονικό. Οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος παραμορφώνουν την τάση του δικτύου λόγω της εσωτερικής του αντίστασης. Επομένως, φορτία συνδεδεμένα στο δίκτυο ενδέχεται να επηρεαστούν αρνητικά. Τα αρμονικά ρεύματα προκαλούν πρόσθετη θέρμανση, υπερτάσεις λόγω φαινομένων συντονισμού και ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή [11].

Επομένως, για κάθε μετατροπέα είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του αρμονικού περιεχομένου των τάσεων και των ρευμάτων.

1.11 Οδηγοί ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Τα κυκλώματα οδήγησης (IC drivers) διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στα σύγχρονα ηλεκτρονικά, διευκολύνοντας τον ακριβή έλεγχο και το χειρισμό διαφόρων εξαρτημάτων μέσα σε ένα σύστημα. Αυτά τα κυκλώματα είναι απαραίτητα για την ενίσχυση των σημάτων, τη διανομή ισχύος και την οδήγηση φορτίων όπως κινητήρες και LED.

Είναι σχεδιασμένα για να διασυνδέουν την έξοδο χαμηλής ισχύος μιας ηλεκτρονικής συσκευής, όπως ένας μικροελεγκτής ή αισθητήρας, και τις απαιτήσεις υψηλής ισχύος ενός φορτίου, όπως ένας κινητήρας. Ρυθμίζοντας και παραμετροποιώντας τα σήματα από τη συσκευή ελέγχου, το κύκλωμα του οδηγού εξασφαλίζει την αποτελεσματική και αξιόπιστη λειτουργία του φορτίου ενώ προστατεύει τη συσκευή ελέγχου από υπερβολικά επίπεδα ρεύματος ή τάσης [12].

Ένα από τα κύρια ζητήματα στο σχεδιασμό των κυκλωμάτων οδήγησης IC είναι ο τύπος του φορτίου που οδηγείται. Διαφορετικά φορτία παρουσιάζουν διακριτά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, όπως σύνθετη αντίσταση, τάση και απαιτήσεις ρεύματος. Κατά συνέπεια, το κύκλωμα του οδηγού πρέπει να είναι προσαρμοσμένο ώστε να ταιριάζει με αυτά τα χαρακτηριστικά για να επιτευχθεί βέλτιστη απόδοση και απόδοση. Για παράδειγμα, η οδήγηση ενός κινητήρα υψηλού ρεύματος απαιτεί ένα κύκλωμα οδήγησης ικανό να χειρίζεται μεγάλες αιχμές ρεύματος και να παρέχει επαρκή παροχή ισχύος, ενώ η οδήγηση μιας συστοιχίας LED απαιτεί ακριβή ρύθμιση ρεύματος για τη διατήρηση της φωτεινότητας και της μακροζωίας της.

Η αρχιτεκτονική τους αποτελείται συνήθως από πολλά βασικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων των διόδων προστασίας εισόδου, των μετατοπιστών στάθμης, των ενισχυτών και των βαθμίδων ισχύος εξόδου. Οι δίοδοι προστασίας εισόδου προστατεύουν το κύκλωμα από μεταβατικές τάσεις και συνθήκες αντίστροφης πολικότητας, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα των σημάτων ελέγχου. Οι μετατοπιστές στάθμης προσαρμόζουν τα επίπεδα τάσης των σημάτων εισόδου ώστε να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις της εσωτερικής λογικής του κυκλώματος οδηγού, διευκολύνοντας τη συμβατότητα με διαφορετικές συσκευές ελέγχου. Οι ενισχυτές ενισχύουν και ρυθμίζουν τα σήματα εισόδου για να οδηγούν αποτελεσματικά τη βαθμίδα εξόδου, ενώ οι βαθμίδες ισχύος εξόδου παρέχουν το απαραίτητο ρεύμα και τάση στο φορτίο.

Επιπλέον, τα κυκλώματα αυτά συχνά ενσωματώνουν προηγμένα χαρακτηριστικά, όπως προστασία από υπερένταση, θερμική απενεργοποίηση και μηχανισμούς ανίχνευσης σφαλμάτων για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας. Η προστασία από υπερένταση αποτρέπει τη ζημιά στο κύκλωμα του οδηγού και το φορτίο περιορίζοντας τη ροή ρεύματος σε συνθήκες σφάλματος, ενώ οι μηχανισμοί θερμικής απενεργοποίησης προστατεύουν από υπερθέρμανση απενεργοποιώντας το κύκλωμα όταν οι θερμοκρασίες υπερβαίνουν τα ασφαλή όρια. Οι μηχανισμοί ανίχνευσης σφαλμάτων παρακολουθούν διάφορες παραμέτρους όπως τάση, ρεύμα και θερμοκρασία για να ανιχνεύσουν μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας και να ενεργοποιήσουν κατάλληλες αποκρίσεις, όπως σηματοδότηση σφάλματος ή τερματισμό λειτουργίας του συστήματος.

Εν κατακλείδι, τα κυκλώματα οδήγησης IC διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στα σύγχρονα ηλεκτρονικά, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο και χειρισμό διαφόρων φορτίων. Αξιοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες ημιαγωγών και έξυπνες τεχνικές σχεδιασμού, αυτά τα κυκλώματα προσφέρουν αποτελεσματική, αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Από τους κινητήρες κίνησης και τα LED μέχρι τον έλεγχο της διανομής ισχύος σε πολύπλοκα συστήματα, τα κυκλώματα οδήγησης IC χρησιμεύουν ως η ραχοκοκαλιά των σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση και λειτουργικότητα.

1.12 Είδη αντιστροφών

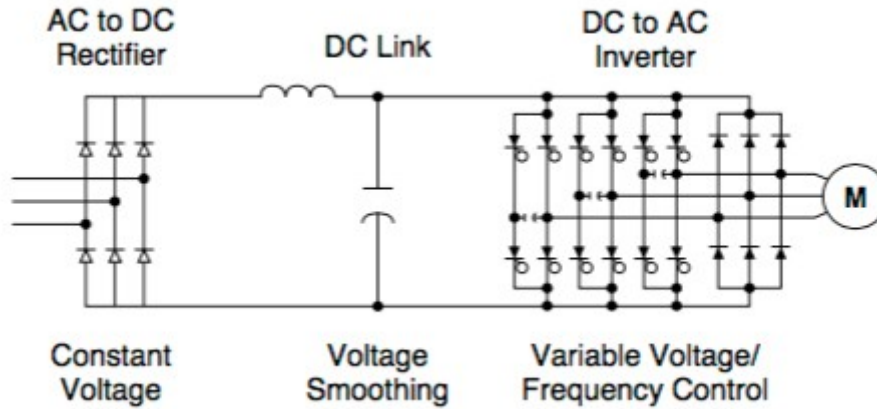
Οι τοπολογίες των αντιστροφών ισχύος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με κριτήριο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους, όπως για παράδειγμα με βάση την κυκλωματική δομή τους, το είδος και τον τρόπο μετάβασης των διακοπών τους, και τους αλγόριθμους ελέγχου τους.

Αρχικά, ως προς την μορφή της εναλλασσόμενης εξόδου τους διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς, με τους τριφασικούς να είναι οι πιο κοινοί. Ανάλογα με τη μορφή πηγής εισόδου τους κατηγοριοποιούνται σε αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI), αντιστροφείς πηγής ρεύματος (CSI), και αντιστροφείς πηγής σύνθετης αντίστασης (ZSI) [13].

Οι μονοφασικοί αντιστροφείς ισχύος μετατρέπουν την DC ισχύ από μια πηγή σε μια ενιαία ημιτονοειδή κυματομορφή AC με έναν αγωγό φάσης εξόδου και έναν ουδέτερο αγωγό. Σε περιοχές με μονοφασικό ηλεκτρικό δίκτυο, οι τυπικές τιμές τάσης για μονοφασικούς αντιστροφείς κυμαίνονται από 110 V έως 240 V, με συχνότητα 50 Hz ή 60 Hz ανάλογα με τα πρότυπα της χώρας. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε οικιακούς και μικρούς εμπορικούς χώρους όπου η ζήτηση ισχύος είναι σχετικά χαμηλή. Είναι κατάλληλοι για τροφοδοσία οικιακών συσκευών, συστημάτων φωτισμού και μικρών ηλεκτρονικών συσκευών.

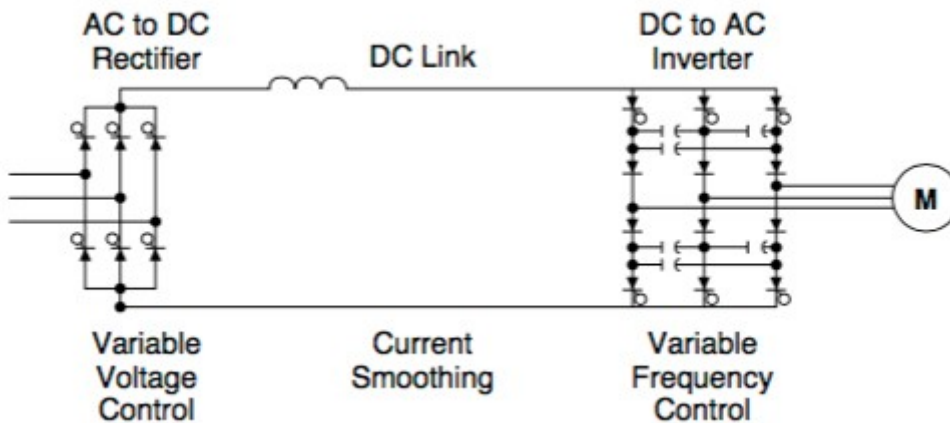
Οι τριφασικοί αντιστροφείς ισχύος μετατρέπουν την DC ισχύ σε τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές AC με διαφορά φάσης 120 μοιρών μεταξύ κάθε κυματομορφής. Συνήθως έχουν τρεις αγωγούς εξόδου : Τις φάσεις A, B, C και έναν ουδέτερο αγωγό. Σε βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές όπου υπάρχει τριφασικό ηλεκτρικό δίκτυο, οι τριφασικοί αντιστροφείς ισχύος έχουν συνήθως ονομαστικές τιμές τάσης που κυμαίνονται από 110 V έως 480 V ή υψηλότερες, με συχνότητα 50Hz ή 60Hz. Χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών κυρίως υψηλής ισχύος, όπως βιομηχανικά μηχανήματα, συστήματα HVAC, σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που συνδέονται με το δίκτυο. Οι τριφασικοί αντιστροφείς χρησιμοποιούν συχνά τοπολογίες οι οποίες περιλαμβάνουν πλήρεις γέφυρες τύπου H, ή πολλαπλά επίπεδα εξόδου. Αυτές οι τοπολογίες μπορούν να παρέχουν καλύτερες δυνατότητες διαχείρισης ισχύος και βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τους μονοφασικούς μετατροπείς.

Οι αντιστροφείς πηγής τάσης λειτουργούν λαμβάνοντας μια τάση εισόδου DC μετατρέποντάς την σε τάση εξόδου AC με ελεγχόμενο πλάτος και συχνότητα. Αυτή η μετατροπή συνήθως επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ημιαγωγών διακοπών όπως IGBT ή MOSFET. Χρησιμοποιούν συνήθως διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμού για τον έλεγχο της κυματομορφής της τάσης εξόδου. Μεταβάλλοντας το πλάτος των παλμών σε κάθε κύκλο λειτουργίας, η πραγματική τάση εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί διατηρώντας την επιθυμητή συχνότητα. Η έξοδος τους χαρακτηρίζεται από το πλάτος, τη συχνότητα και την ποιότητά της κυματομορφής. Το πλάτος και η συχνότητα μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του συνδεδεμένου φορτίου, ενώ η ποιότητα της κυματομορφής επηρεάζεται από τη διακοπτική συχνότητα και την τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Αυτοί οι αντιστροφείς απαιτούν εξελιγμένους αλγόριθμους ελέγχου για τη ρύθμιση της τάσης και του ρεύματος εξόδου, τη διασφάλιση της σταθερότητας και την προστασία του αντιστροφέα και του συνδεδεμένου εξοπλισμού από σφάλματα και υπερφορτίσεις. Οι τεχνικές ελέγχου, μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν τον έλεγχο αναλογικού ολοκληρωτικού παραγώγου (PID) και τη διαμόρφωση διανυσμάτων χώρου (SVM).



Σχήμα 1.22: Βασική δομή αντιστροφέα πηγής τάσης.

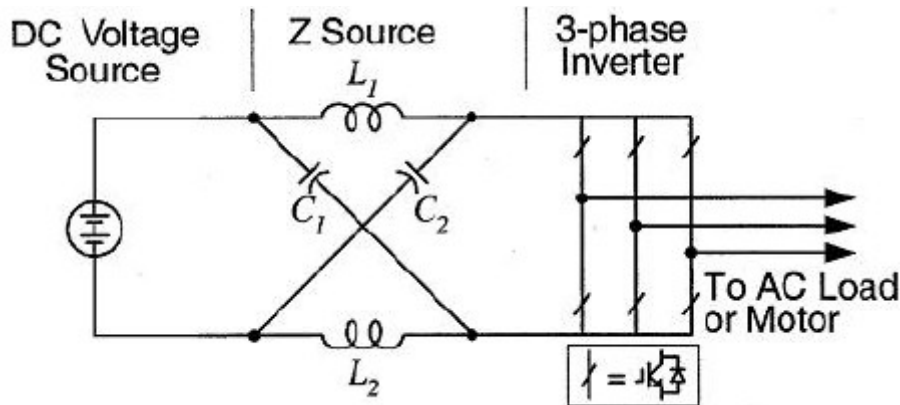
Σε αντίθεση με τους αντιστροφείς πηγής τάσης, οι οποίοι διατηρούν σταθερή τάση εισόδου, οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος διατηρούν σταθερό ρεύμα εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι η τάση και η συχνότητα εξόδου μπορούν να ρυθμιστούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φορτίου, διατηρώντας το ρεύμα εισόδου DC σταθερό. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές ελέγχου για τη ρύθμιση της τάσης εξόδου και της συχνότητας, όπως ο έλεγχος διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM), ο έλεγχος υστέρησης και ο προγνωστικός έλεγχος. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας διαφορετικές τοπολογίες, συμπεριλαμβανομένων τριφασικών μετατροπέων γέφυρας και αντιστροφέων πολλαπλών επιπέδων. Κάθε τοπολογία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογής. Η απόδοση και η ποιότητα ισχύος είναι σημαντικά ζητήματα στο σχεδιασμό των αντιστροφέων. Η απόδοση μπορεί να μεγιστοποιηθεί ελαχιστοποιώντας τις διακοπτικές απώλειες και βελτιστοποιώντας τους αλγόριθμους ελέγχου. Ζητήματα ποιότητας ισχύος όπως οι αρμονικές συνιστώσες και η παραμόρφωση τάσης μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω κατάλληλων τεχνικών φιλτραρίσματος και ελέγχου.



Σχήμα 1.23: Βασική δομή αντιστροφέα πηγής ρεύματος.

Η βασική τοπολογία ενός αντιστροφέα πηγής σύνθετης αντίστασης αποτελείται από ένα συγκεκριμένο δίκτυο σύνθετης αντίστασης (συνήθως αποτελούμενο από επαγωγές και πυκνωτές) που τοποθετείται μεταξύ της πηγής DC εισόδου και του κυκλώματος ισχύος του αντιστροφέα. Αυτοί οι

αντιστροφείς μπορούν να διαχειριστούν ένα ευρύτερο φάσμα διακυμάνσεων της τάσης εισόδου σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς. Αυτή η ευελιξία είναι χρήσιμη σε εφαρμογές όπου η τάση εισόδου μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις, όπως σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με διακοπτόμενες πηγές ενέργειας όπως ηλιακή ή αιολική ενέργεια. Μπορούν επίσης να αυξάνουν ή να μειώνουν την τάση εξόδου χωρίς την ανάγκη πρόσθετων εξαρτημάτων όπως μετατροπείς DC-DC ανύψωσης ή υποβιβασμού. Αυτή η δυνατότητα είναι χρήσιμη σε εφαρμογές όπου η τάση εξόδου πρέπει να είναι υψηλότερη από την τάση εισόδου.



Σχήμα 1.24: Βασική δομή αντιστροφέα πηγής σύνθετης αντίστασης.

Συνήθως, οι πρακτικοί μετατροπείς ισχύος αποτελούνται από περισσότερους από έναν στοιχειώδεις μετατροπείς. Επομένως, απαιτείται η αποσύζευξη των δύο μετατροπέων, έτσι ώστε ο κάθε ξεχωριστός μετατροπέας να μην επηρεάζει τη λειτουργία των υπολοίπων. Η αποσύζευξη συνήθως επιτυγχάνεται με στοιχεία αποθηκευσης ενέργειας, δηλαδή πυκνωτών ή επαγωγών.

Όλοι οι μετατροπείς ισχύος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σχετικά με τον τρόπο μεταγωγών των διακοπών τους :

Μετατροπείς με φυσική μετάβαση (natural, line, load commutated ή phase controlled converters) : Οι μετατροπείς με φυσική μετάβαση διακοπών βασίζονται στην AC τάση του ηλεκτρικού δικτύου ή σε συνθήκες που επιβάλλει το φορτίο, για τις μεταγωγές των διακοπών τους. Η λειτουργία αυτών των μετατροπέων είναι συγχρονισμένη με την παροχή AC. Οι δυνατότητες και οι χρήσεις τους είναι περιορισμένες. Η τάση εξόδου τους περιέχει τμήματα της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ισχυρές αρμονικές συνιστώσες στην είσοδο και την έξοδο του μετατροπέα.

Μετατροπείς εξαναγκασμένης μετάβασης : Οι διακόπτες στους μετατροπείς εξαναγκασμένης μετάβασης ελέγχονται αποκλειστικά από τη μονάδα ελέγχου της διάταξης ισχύος. Προσφέρουν πολύ υψηλή ικανότητα ελέγχου των διακοπών.

Μετατροπείς συντονισμού : Στους μετατροπείς συντονισμού (resonant converters), οι μεταγωγές των διακοπών επιτελούνται όταν η τάση στα άκρα τους ή το ρεύμα που τους διαρέει είναι μηδέν. Η ονομασία τους προέρχεται από το γεγονός ότι συνήθως σε αυτές τις τοπολογίες χρησιμοποιείται κάποιο κύκλωμα συντονισμού για τη λειτουργία τους. Οι δύο κυριότερες κατηγορίες είναι αυτές των μετατροπέων με μεταγωγές κατά τον μηδενισμό τάσης (ZVS), και μεταγωγές κατά τον μηδενισμό ρεύματος (ZCS).

1.13 Εφαρμογές

Η κύρια λειτουργία ενός αντιστροφέα είναι να μετατρέπει την τάση DC από την πηγή εισόδου σε τάση AC κατάλληλη για την τροφοδοσία φορτίων AC. Ανάλογα με τις απαιτήσεις εφαρμογής, οι μετατροπείς μπορούν να παράγουν ημιτονοειδείς ή τροποποιημένες εξόδους ημιτονοειδούς κύματος με ρυθμιζόμενα χαρακτηριστικά τάσης, συχνότητας και φάσης. Οι ημιτονοειδείς μετατροπείς παράγουν μια κυματομορφή εξόδου που μοιάζει πολύ με την ημιτονοειδή κυματομορφή της ισχύος του κοινού ηλεκτρικού δικτύου, εξασφαλίζοντας συμβατότητα με ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό και φορτία κινητήρων. Από την άλλη μεριά, οι μετατροπείς τροποποιημένου ημιτονοειδούς κύματος παρέχουν μια βαθμωτή προσέγγιση του ημιτονοειδούς κύματος και χρησιμοποιούνται συνήθως σε απλούστερες εφαρμογές όπου η ποιότητα της κυματομορφής είναι λιγότερο σημαντική.

Οι αντιστροφεείς ισχύος συναντώνται σε διάφορες περιοχές εφαρμογών, όπως :

Συστήματα ΑΠΕ : Οι αντιστροφεείς γεφυρώνουν το χάσμα ανάμεσα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και οι ανεμογεννήτριες, και στο ηλεκτρικό δίκτυο ή τα τοπικά συστήματα ισχύος. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι φωτοβολταϊκοί (PV) αντιστροφεείς μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος, κατάλληλου για την τροφοδοσία κατοικιών και επιχειρήσεων. Αυτοί οι μετατροπείς διατίθενται σε διάφορους τύπους, συμπεριλαμβανομένων των μετατροπέων στοιχειοσειρών (string inverters), μικρομετατροπέων (microinverters), και των βελτιστοποιητών ισχύος (power optimizers). Ενσωματώνουν επίσης χαρακτηριστικά όπως η ιχνηλάτηση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της ηλιακής συστοιχίας και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς και τα πρότυπα του δικτύου. Οι μετατροπείς στοιχειοσειρών χρησιμοποιούνται συνήθως σε οικιακές και εμπορικές εγκαταστάσεις, όπου πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται σε σειρά. Οι μικρομετατροπείς από την άλλη, εγκαθίστανται σε κάθε πλαίσιο ξεχωριστά, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως βελτιωμένη απόδοση υπο σκίαση και δυνατότητες παρακολούθησης για κάθε πλαίσιο. Οι βελτιστοποιητές ισχύος λειτουργούν σε συνδυασμό με μετατροπείς στοιχειοσειρών για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης κάθε πλαισίου σε μια σειρά (string).



Σχήμα 1.25: Εσωτερικό αντιστροφέα φωτοβολταϊκών. Οι μπλε πυκνωτές αποθηκεύουν ενέργεια και βελτιώνουν τη κυματομορφή εξόδου.

Διασυνδεδεμένα (Grid – Tied) Συστήματα : Στα διασυνδεδεμένα συστήματα οι αντιστροφεείς σύνδεσης δικτύου μετατρέπουν την ισχύ του συνεχούς ρεύματος που παράγεται από μια DC πηγή σε AC ρεύμα συγχρονισμένο με το κοινό ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτοί οι αντιστροφεείς διασφαλίζουν ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την δεδομένη πηγή ενέργειας ταιριάζει με την τάση, τη συχνότητα, και τη φάση φάση του δικτύου, επιτρέποντας την εξαγωγή της υπερβολικής ισχύος από το δίκτυο ή την έγχυση από το δίκτυο ανάλογα με τις ανάγκες. Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα με net metering επιτρέπουν στους ιδιοκτήτες σπιτιού και στις επιχειρήσεις να αντισταθμίζουν τους λογαριασμούς ρεύματος πουλώντας την πλεονάζουσα ηλιακή ενέργεια στο κοινό ηλεκτρικό δίκτυο.

Αυτόνομα (Off – Grid) Συστήματα : Σε απομακρυσμένες περιοχές ή τοποθεσίες εκτός ηλεκτρικού δικτύου όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη, τα αυτόνομα συστήματα βασίζονται σε αντιστροφεείς για να μετατρέψουν την ισχύ συνεχούς ρεύματος από μπαταρίες, φωτοβολταϊκά πλαίσια ή άλλες πηγές DC σε εκμεταλλεύσιμη ισχύ AC. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν συνήθως μια συστοιχία μπαταριών για την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας για χρήση όταν δεν είναι διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως κατά τη διάρκεια της νύχτας ή τις συννεφιασμένες

μέρες. Διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και διαμορφώσεις για να καλύπτουν διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος και σχέδια συστημάτων. Συχνά ενσωματώνουν χαρακτηριστικά όπως δυνατότητες φόρτισης μπαταρίας, ρύθμιση τάσης και αποσύνδεση χαμηλής τάσης για να εξασφαλίσουν την αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων ισχύος εκτός δικτύου.

Μεταφορά υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος HVDC : Τα συστήματα μεταφοράς HVDC αποτελούν κρίσιμο μέρος των σύγχρονων ηλεκτρικών δικτύων, επιτρέποντας την αποτελεσματική και αξιόπιστη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Στα συστήματα HVDC, οι μετατροπείς διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος AC σε συνεχές ρεύμα DC στο άκρο αποστολής και αντίστροφα στο άκρο λήψης της γραμμής μεταφοράς. Αυτή η διαδικασία μετατροπής εκτελείται σε σταθμούς μετατροπών εξοπλισμένους με ηλεκτρονικές συσκευές υψηλής ισχύος, όπως θυρίστορ ή IGBT για τη διαχείριση των επιπέδων υψηλής τάσης και ισχύος που εμπλέκονται στη μετάδοση HVDC.



Σχήμα 1.26: Μετατροπείς πηγής τάσης HVDC. Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε διατάξεις σταθμών point to point, back to back, υποθαλάσσιου / υπόγειου καλωδίου και παράκτιων σταθμών.

Εφεδρικά συστήματα τροφοδοσίας : Τα εφεδρικά συστήματα τροφοδοσίας, γνωστά και ως UPS, βασίζονται σε αντιστροφείς για την παροχή ρεύματος έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια διακοπών ή διακοπής ρεύματος στο δίκτυο. Τα συστήματα UPS αποτελούνται από μια συστοιχία μπαταριών, ένα κύκλωμα ανορθωτή και ένα κύκλωμα αντιστροφέα. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, ο ανορθωτής μετατρέπει συνεχώς το εναλλασσόμενο ρεύμα από το κοινό ηλεκτρικό δίκτυο σε συνεχές, για να φορτίσει τη συστοιχία μπαταριών. Όταν συμβαίνει διακοπή ρεύματος, το σύστημα UPS μεταβαίνει σε λειτουργία τροφοδοσίας από μπαταρίες και ο αντιστροφέας αρχίζει να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα από τις μπαταρίες σε εναλλασσόμενο για να τροφοδοτεί σημαντικά φορτία. Τα συστήματα UPS χρησιμοποιούνται ευρέως σε κέντρα δεδομένων, νοσοκομεία, εγκαταστάσεις τηλεπικοινωνιών και άλλες εφαρμογές όπου η αδιάλειπτη τροφοδοσία είναι απαραίτητη για την αποφυγή απώλειας δεδομένων, βλάβης εξοπλισμού ή διακοπής λειτουργίας.

Ηλεκτρικά οχήματα (EV) : Στα ηλεκτρικά οχήματα, οι αντιστροφείς ισχύος παίζουν κρίσιμο ρόλο στον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής του ηλεκτροκινητήρα. Μετατρέπουν την ισχύ συνεχούς ρεύματος από την μπαταρία του οχήματος σε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα για την κίνηση του κινητήρα. Επιπλέον, οι αντιστροφείς στα EV εκτελούν λειτουργίες όπως έλεγχος κινητήρα, αναγεννητική πέδηση και διόρθωση συντελεστή ισχύος για βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και της απόδοσης του οχήματος. Οι σύγχρονοι μετατροπείς EV ενσωματώνουν προηγμένες συσκευές ημιαγωγών όπως IGBT ή MOSFET καρβιδίου του πυριτίου (SiC) για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη μεγιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος. Ο σχεδιασμός και η απόδοση του αντιστροφέα είναι κρίσιμοι παράγοντες για τον καθορισμό της συνολικής απόδοσης, της αυτονομίας και της οδηγικής εμπειρίας των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τηλεπικοινωνίες : Οι αντιστροφείς τροφοδοτούν την τηλεπικοινωνιακή υποδομή, όπως πύργους κυψέλης, σταθμούς βάσης, επαναλήπτες και κόμβους επικοινωνίας σε απομακρυσμένες ή εκτός δικτύου τοποθεσίες. Αυτοί οι αντιστροφείς μετατρέπουν την ισχύ DC από μπαταρίες, φωτοβολταϊκά συστήματα ή γεννήτριες πετρελαίου σε AC για τη λειτουργία τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων πομποδεκτών, ενισχυτών, δρομολογητών και κεραίων. Σχεδιάζονται για υψηλή αξιοπιστία, απόδοση και δυνατότητες απομακρυσμένης παρακολούθησης για να διασφαλίζουν αδιάλειπτες υπηρεσίες επικοινωνίας σε περιοχές με αναξιόπιστη ή περιορισμένη πρόσβαση στο κοινό ηλεκτρικό δίκτυο. Εκτός από την παροχή κύριας ισχύος, οι αντιστροφείς σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών μπορεί επίσης να ενσωματώνουν λειτουργίες φόρτισης μπαταριών και εφεδρικής τροφοδοσίας για τη συνέχεια της υπηρεσίας κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος.

Βιομηχανικές εφαρμογές : Σε βιομηχανικές συνθήκες, οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται εκτενώς σε ηλεκτροκινητήρες και σε οδηγούς ρυθμιζόμενης ταχύτητας ASD για τον έλεγχο της ταχύτητας, της ροπής και της κατεύθυνσης των κινητήρων AC. Οι ASD βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση προσαρμόζοντας την ταχύτητα του κινητήρα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φορτίου, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας και το λειτουργικό κόστος. Οι αντιστροφείς βιομηχανικής ποιότητας έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν σε σκληρά περιβάλλοντα, υψηλές θερμοκρασίες και ηλεκτρικό θόρυβο που συναντώνται συνήθως σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Στρατιωτικές εφαρμογές : Σε στρατιωτικές επιχειρήσεις, οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία ενός ευρέος φάσματος εξοπλισμού κρίσιμου για την αποστολή, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων επικοινωνίας, συστημάτων ραντάρ, εξοπλισμού επιτήρησης, νοσοκομείων πεδίου και κέντρων διοίκησης σε απομακρυσμένα ή αустηρά περιβάλλοντα. Οι αντιστροφείς που προορίζονται για στρατιωτική χρήση έχουν σχεδιαστεί για να πληρούν τις αυστηρές απαιτήσεις για ανθεκτικότητα, αξιοπιστία, ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και ασφάλεια. Αυτοί οι μετατροπείς συχνά τοποθετούνται σε οχήματα, αεροσκάφη, πλοία και βάσεις για να παρέχουν εναλλασσόμενο ρεύμα για ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα που είναι απαραίτητα για στρατιωτικές αποστολές. Εκτός από τους τυπικούς αντιστροφείς, οι στρατιωτικές εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιούν εξειδικευμένους μετατροπείς για συγκεκριμένους σκοπούς, όπως μετατροπή συχνότητας, ρύθμιση τάσης και ρύθμιση ισχύος για την κάλυψη των επιχειρησιακών αναγκών του στρατού.



Σχήμα 1.27: Αντιστροφέας τέλειου ημιτόνου για στρατιωτικά οχήματα.

Οικιακές εφαρμογές : Οι φορητοί αντιστροφέες χρησιμοποιούνται συνήθως από τους καταναλωτές για να μετατρέψουν την ισχύ συνεχούς ρεύματος από μπαταρίες οχημάτων ή φορητές πηγές ενέργειας σε εναλλασσόμενο ρεύμα για τη φόρτιση φορητών υπολογιστών, smartphone, tablet και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών. Αυτοί οι αντιστροφέες είναι συμπαγείς, ελαφροί και φορητοί, καθιστώντας τους ιδανικούς για χρήση σε αυτοκίνητα, φορτηγά, σκάφη και υπαίθριες δραστηριότητες, όπως το κάμπινγκ. Οι φορητοί αντιστροφέες είναι διαθέσιμοι σε διάφορα μεγέθη και ονομαστική ισχύ για να ταιριάζουν σε διαφορετικές συσκευές και σενάρια χρήσης. Συνήθως διαθέτουν πολλαπλές πρίζες AC, θύρες USB και χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως προστασία υπερφόρτωσης και διακοπή λειτουργίας χαμηλής τάσης για την αποφυγή ζημιών στις συνδεδεμένες συσκευές και τις μπαταρίες του οχήματος.

1.14 Επίλογος

Αυτό το κεφάλαιο προσπάθησε να αποκαλύψει την περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ θεωρίας και πρακτικής εφαρμογής, δίνοντας έμφαση στον κεντρικό ρόλο που διαδραματίζουν οι διακόπτες ισχύος ημιαγωγών στα σύγχρονα ηλεκτρονικά ισχύος.

Οι διακόπτες ισχύος ημιαγωγών, η καρδιά των ηλεκτρονικών ισχύος, είναι οι βασικοί παράγοντες για την αποτελεσματική μετατροπή και διαχείριση ενέργειας. Μέσα από μια εξερεύνηση διαφόρων τύπων όπως διόδους, BJT, θυρίστορ, MOSFET και IGBT, έχουμε εμβαθύνει στα μοναδικά χαρακτηριστικά, τις αρχές λειτουργίας και τις κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοσή τους. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία ημιαγωγών έχουν προωθήσει τις δυνατότητες αυτών των διακοπών, επιτρέποντας υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη αξιοπιστία και πιο συμπαγή σχέδια.

Επιπλέον, οι εφαρμογές αυτών των διακοπών ισχύος εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα, υπογραμμίζοντας την ευελιξία και την αναγκαιότητα τους. Από τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα και τους βιομηχανικούς αυτοματισμούς έως τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης και τα τροφοδοτικά, ο αντίκτυπος των ηλεκτρονικών ισχύος είναι βαθύς και εκτεταμένος. Κάθε εφαρμογή παρουσιάζει το δικό της σύνολο προκλήσεων και απαιτήσεων, οδηγώντας σε συνεχή καινοτομία και προσαρμογή στον τομέα των συσκευών ημιαγωγών.

Τα θεωρητικά θεμέλια που τίθενται σε αυτό το κεφάλαιο παρέχουν ένα στέρεο υπόβαθρο για την κατανόηση των πολυπλοκοτήτων που εμπλέκονται στο σχεδιασμό και την υλοποίηση ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι η θεωρία πρέπει πάντα να συμπληρώνεται από πραγματικές δοκιμές. Η φύση των ηλεκτρονικών ισχύος απαιτεί μια συνεργιστική προσέγγιση, όπου η θεωρητική γνώση και τα εμπειρικά δεδομένα συγκλίνουν για να προωθήσουν τις τεχνολογικές προόδους.

Κεφάλαιο 2ο: Τοπολογία CMLI 7 επιπέδων

2.1 Εισαγωγή

Οι κλιμακωτοί μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων έχουν αναδειχθεί ως βασική τεχνολογία στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, βελτιώνοντας σημαντικά την απόδοση διαφόρων ηλεκτρικών συστημάτων. Αυτοί οι μετατροπείς έχουν σχεδιαστεί για να συνθέτουν μια επιθυμητή τάση εξόδου από πολλαπλά επίπεδα τάσεων εισόδου DC, που συνήθως προέρχονται από τροφοδοτικά, πυκνωτές ή μπαταρίες. Χρησιμοποιώντας περισσότερες από μία κυψέλες μετατροπών, οι CMLI μπορούν να επιτύχουν υψηλότερα επίπεδα τάσης και ισχύος χωρίς την ανάγκη μετασχηματιστών, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος [14].

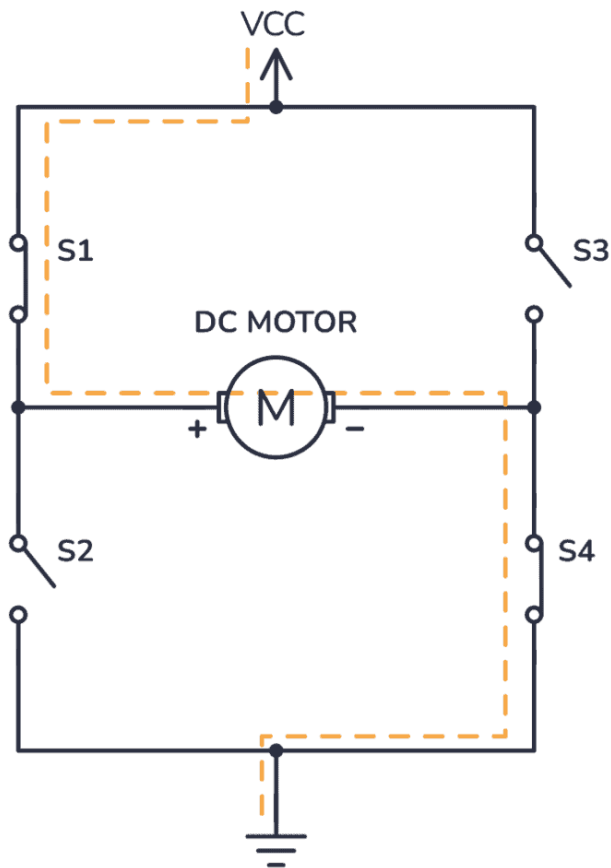
Η λειτουργία των CMLI εξαρτάται από εξελιγμένους αλγόριθμους ελέγχου που διαχειρίζονται τις μεταγωγές των ημιαγωγών ισχύος για την παραγωγή της επιθυμητής κυματομορφής τάσης. Αυτοί οι αλγόριθμοι είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του μετατροπέα, την ελαχιστοποίηση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης και τη βελτίωση της απόδοσης. Αυτό το κεφάλαιο αναφέρει τις πιο διαδεδομένες στρατηγικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται στους CMLI, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης πλάτους παλμού, της διαμόρφωσης διανύσματος χώρου και άλλων προηγμένων τεχνικών. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα μοναδικά χαρακτηριστικά τους, όπως η πολλαπλότητα, η επεκτασιμότητα και η ανοχή σφαλμάτων, τα οποία διακρίνουν τους CMLI από άλλες τοπολογίες μετατροπών.

Τα πλεονεκτήματα των CMLI είναι αρκετά, όπως μειωμένες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, χαμηλότερες απώλειες μεταγωγής και βελτιωμένη ποιότητα ισχύος. Ωστόσο, παρουσιάζουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η αυξημένη πολυπλοκότητα στον έλεγχο και ο υψηλότερος αριθμός εξαρτημάτων, που μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία και το κόστος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπόσχεται να βελτιώσει την απόδοση και την αξιοπιστία των CMLI, καθιστώντας τα πιο βιώσιμα για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

2.2 Βασική διάταξη

Η τοπολογία CMLI 7 επιπέδων βασίζεται στον μονοφασικό μετατροπέα πλήρους γέφυρας. Επομένως, είναι απαραίτητη η κατανόηση της δομής και λειτουργίας της συνδεσμολογίας του μονοφασικού μετατροπέα πλήρους γέφυρας, έτσι ώστε να γίνει ευκολότερη η ανάλυση ολόκληρου του συγκεκριμένου αντιστροφέα.

Ο μονοφασικός μετατροπέας πλήρους γέφυρας γνωστός και ως μετατροπέας H-bridge αποτελείται από 4 ημιαγωγούς διακόπτες των οποίων η διάταξη θυμίζει το γράμμα H. Ο μετατροπέας περιλαμβάνει δύο σκέλη, με δύο πλήρως ελεγχόμενους διακόπτες στο κάθε σκέλος. Συνήθως, αντίθετα και παράλληλα με τους ελεγχόμενους διακόπτες συνδέονται δίοδοι. Οι δίοδοι είναι προαιρετικές όταν οι ελεγχόμενοι διακόπτες είναι MOSFET, καθώς είναι ενσωματωμένες στη δομή κάθε MOSFET. Επίσης, κάποια IGBT κατασκευάζονται με ενσωματωμένη την συγκεκριμένη δίοδο έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον μετατροπέα.



Σχήμα 2.1: Τοπολογία πλήρους γέφυρας μετατροπέα.

Απο τους δύο διακόπτες του κάθε σκέλους, ο ένας είναι σε αγωγιμότητα και ο άλλος σε αποκοπή έτσι ώστε η τάση εξόδου του κάθε σκέλους να εξαρτάται μόνο από τη κατάσταση των διακοπών και όχι από τη φορά του ρεύματος στο συνδεδεμένο φορτίο. Η φορά του ρεύματος στο φορτίο καθορίζει την ροή του μέσω του διακόπτη ή μέσω της διόδου [15].

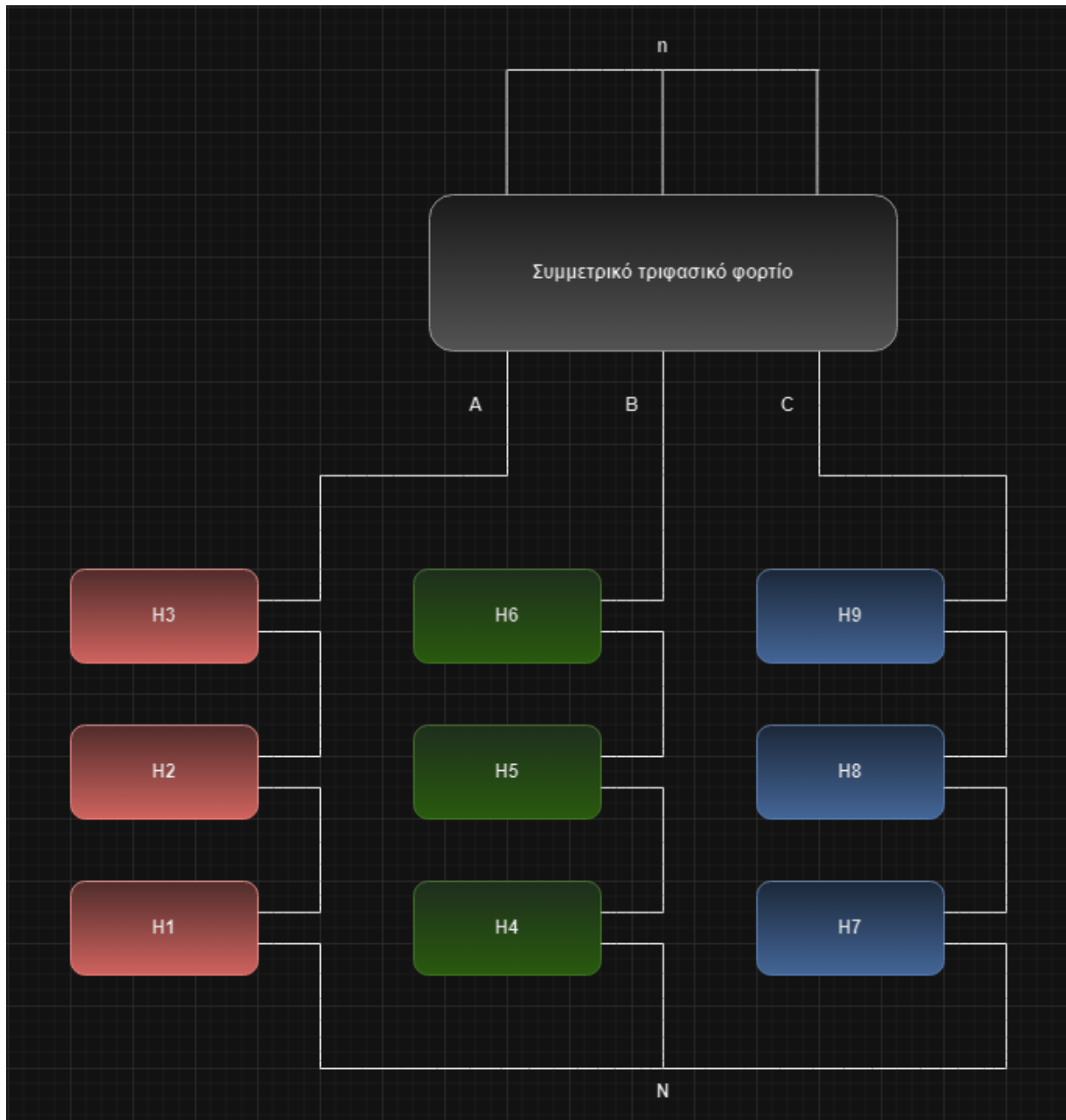
Στα πρακτικά κυκλώματα η απαίτηση να είναι μόνο ο ένας διακόπτης κάθε σκέλους σε αγωγή και ο άλλος σε αποκοπή είναι ανέφικτος επειδή οι χρόνοι έναυσης και σβέσης των διακοπών δεν είναι μηδενικοί. Μεταξύ της σβέσης ενός διακόπτη και της έναυσης του άλλου μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα το οποίο ονομάζεται νεκρός χρόνος (dead time, blanking time), το οποίο είναι απαραίτητο για την ασφαλή μεταγωγή των διακοπών κάθε σκέλους. Αν οι δύο διακόπτες του ίδιου σκέλους βρεθούν ταυτόχρονα σε αγωγιμότητα βραχυκυκλώνουν την πηγή εισόδου, με αποτέλεσμα την ακαριαία αύξηση του ρεύματος σε πολύ υψηλές τιμές. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται shoot – through fault και η αντιμετώπιση της είναι αρκετά δύσκολη. Η διάρκεια του νεκρού χρόνου εξαρτάται από τη ταχύτητα μεταγωγής των διακοπών.

Όταν ο μετατροπέας τροφοδοτεί επαγωγικό φορτίο, υπάρχουν χρονικά διαστήματα στα οποία το γινόμενο της στιγμιαίας τάσης και του στιγμιαίου ρεύματος είναι θετικό, και διαστήματα που είναι αρνητικό. Όταν είναι θετικό, η στιγμιαία ισχύς ρέει από τον μετατροπέα προς το φορτίο, επομένως ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας. Όταν είναι αρνητικό, η στιγμιαία ισχύς ρέει από το φορτίο

προς τον μετατροπέα, οπότε ο μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής. Σε μία περίοδο τάσης εξόδου, ο μετατροπέας λειτουργεί 2 φορές ως αντιστροφέας και 2 φορές ως ανορθωτής. Καθώς η μέση ισχύς της περιόδου είναι θετική, ρέει δηλαδή από την DC είσοδο προς την AC έξοδο, ο μετατροπέας χαρακτηρίζεται ως αντιστροφέας. Επομένως, οι αντιστροφείς απαιτούν αμφίδρομη ροή ισχύος και λειτουργούν και στα 4 τεταρτημόρια του επιπέδου $i_o - u_o$.

Ο μονοφασικός μετατροπέας πλήρους γέφυρας μπορεί να χειριστεί μεγάλα ποσά ισχύος και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου $i_o - u_o$. Επιτρέπει δηλαδή την ανάπτυξη θετικής ή αρνητικής τάσης στην έξοδο ενώ το ρεύμα ρέει με οποιαδήποτε φορά. Επομένως μπορεί να επιτελέσει και τα 4 είδη μετατροπών ισχύος, ανάλογα με τον τρόπο ελέγχου των διακοπών του [16].

Η συγκεκριμένη κατηγορία αντιστροφέα αποτελείται από πολλαπλούς μονοφασικούς μετατροπείς πλήρους γέφυρας συνδεδεμένους σε σειρά, και διατεταγμένους σε αστέρα στην περίπτωση του τριφασικού αντιστροφέα. Ο συμμετρικός σχεδιασμός υποδηλώνει ότι κάθε μετατροπέας τροφοδοτείται από μια ξεχωριστή αλλά πανομοιότυπη πηγή τάσης DC, που οδηγεί σε ίσα επίπεδα τάσης εξόδου όλες τις κυψέλες μετατροπέων. Καθώς αυτή η τοπολογία αποτελείται από σειρές κυψελών μετατροπής ισχύος, η τάση και το επίπεδο ισχύος ανα φάση μπορεί να αυξηθεί εύκολα. Η φασική τάση εξόδου μπορεί να εκφραστεί ως $V_{An}=V_{H1}+V_{H2}+V_{H3}$ καθώς όλοι οι μετατροπείς είναι συνδεδεμένοι σε σειρά. Συγκεκριμένα, οι DC πηγές τάσης τους συνδέονται σε σειρά, μέσω των ημιαγωγών διακοπών. Κάθε μονοφασικός μετατροπέας πλήρους γέφυρας μπορεί να παρέχει 3 επίπεδα τάσης εξόδου : V_{dc} , 0 και $-V_{dc}$. Με τον κατάλληλο έλεγχο των διακοπών κάθε μετατροπέα μπορεί να επιτευχθεί η ελάχιστη αρμονική παραμόρφωση. Οι αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων προσφέρουν υψηλότερο αριθμό επιπέδων τάσης εξόδου, μεγαλύτερο απ' το διλάσιο των αριθμών των DC πηγών. Ειδικότερα, για n μετατροπείς πλήρους γέφυρας, ο αριθμός των επιπέδων της συνολικής τάσης εξόδου είναι $2n+1$ [17].



Σχήμα 2.2: Τοπολογία CMLI 7 επιπέδων.

2.3 Αλγόριθμοι ελέγχου

Οι αλγόριθμοι ελέγχου για τους CMLI παίζουν καθοριστικό ρόλο όσον αφορά τις επιδόσεις τους, με αρκετά είδη αλγορίθμων να εφαρμόζονται. Οι πιο διαδεδομένες κατηγορίες είναι οι εξής :

Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) : Η PWM είναι η πιο βασική και διαδεδομένη μέθοδος για τον έλεγχο της τάσης εξόδου και τη συχνότητα των αντιστροφών. Ειδικότερα, στους CMLI οι πιο κοινές τεχνικές PWM είναι οι εξής :

α) Ημιτονοειδής PWM (SPWM) : Αυτή η τεχνική ρυθμίζει την έξοδο του μετατροπέα συγκρίνοντας ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς με ένα τριγωνικό σήμα φέροντος υψηλής συχνότητας,

γεγονός που βοηθά στη μείωση του αρμονικού περιεχομένου στην κυματομορφή εξόδου. Είναι μια από τις απλούστερες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

β) PWM με διανύσματα χώρου (SVPWM) : Αυτή η μέθοδος παρέχει καλύτερη χρήση της τάσης του διαύλου DC και δημιουργεί λιγότερη αρμονική παραμόρφωση σε σύγκριση με την SPWM. Περιλαμβάνει την αναπαράσταση των τριφασικών τάσεων ως διανύσματα σε ένα δισδιάστατο επίπεδο και βελτιστοποιεί τις σειρές μεταγωγών των διακοπών για να επιτευχθεί η επιθυμητή έξοδος.

γ) PWM με επιλεκτική αρμονική εξάλειψη (SHEPWM) : Αυτή η τεχνική στοχεύει στην εξάλειψη συγκεκριμένων αρμονικών χαμηλότερης τάξης λύνοντας μη γραμμικές εξισώσεις για τον προσδιορισμό των γωνιών μεταγωγών των διακοπών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές υψηλής ισχύος όπου η συνολική αρμονική παραμόρφωση είναι σημαντική.

δ) Διαμόρφωση εύρους παλμών με μετατόπιση φάσης φέροντος (PSCPWM) : Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται ευρέως σε αντιστροφείς CMLI λόγω της απλότητας και της αποτελεσματικότητάς του. Κάθε κυψέλη μετατροπέα διαμορφώνεται με ένα σήμα μετατοπισμένης φάσης, το οποίο μειώνει τη συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης εξόδου.

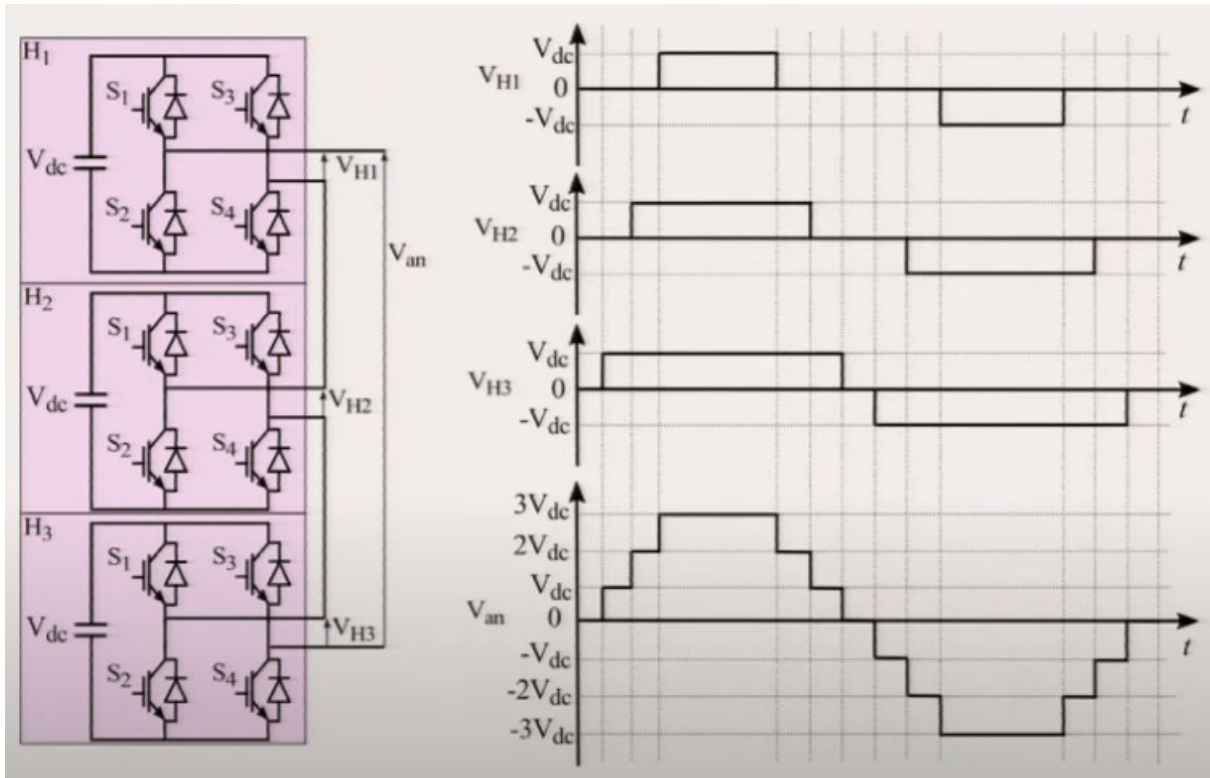
ε) Διαμόρφωση εύρους παλμών με μετατόπιση πλάτους φέροντος (LSCPWM) : Εδώ, τα φέροντα σήματα για διαφορετικές κυψέλες μετατροπέων μετατοπίζονται σε επίπεδα τάσης και όχι σε φάση. Αυτή η τεχνική είναι αποτελεσματική στην εξισορρόπηση της τάσης σε διαφορετικές κυψέλες και παρέχει καλή αρμονική απόδοση.

Προγνωστικός έλεγχος μοντέλου (Model Predictive Control) : Η MPC είναι μια σύγχρονη μέθοδος ελέγχου που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο του συστήματος για να προβλέψει τη μελλοντική συμπεριφορά του και να βελτιστοποιήσει τις εισόδους ελέγχου. Μπορεί να παρέχει εξαιρετική δυναμική απόδοση και να χειρίζεται πολλαπλούς περιορισμούς και στόχους, όπως η ελαχιστοποίηση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης και η εξισορρόπηση της ισχύος μεταξύ των κυψελών [18].

Υβριδικός έλεγχος : Οι υβριδικοί αλγόριθμοι ελέγχου συνδυάζουν δύο ή περισσότερες τεχνικές για να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματά τους και να βελτιώσουν τα μειονεκτήματά τους.

Οι αλγόριθμοι ελέγχου AI αποτελούν τομείς σημαντικής έρευνας και εφαρμογής στον τομέα της ηλεκτρολογίας. Οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής και της βαθιάς μάθησης, εφαρμόζονται όλο και περισσότερο για τη βελτίωση των επιδόσεων, της απόδοσης και της αξιοπιστίας όλων των μετατροπέων ισχύος. Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη έχουν αναπτυχθεί για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των παραδοσιακών μεθόδων, ιδιαίτερα στην αντιμετώπιση πολύπλοκων, μη γραμμικών και δυναμικών συστημάτων.

Στο πρωτότυπο μοντέλο που υλοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος απλής βαθμωτής διαμόρφωσης, χαμηλής διακοπτικής συχνότητας. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στο γεγονός ότι οι φασικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα διασταυρώνονται με μια κυματομορφή τέλει ημιτόνου σε ίσα σημεία στον άξονα y . Αυτή η τεχνική διαμόρφωσης μπορεί να υπολογίσει τις ανεξάρτητες γωνίες μεταγωγών των διακοπών πολύ πιο απλά από τις παραδοσιακές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν ανάλυση σειρών Fourier, και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα είδη κλιμακωτών αντιστροφών [19].



Σχήμα 2.3: Τυπική σύνθεση κυματομορφής εξόδου CMLI.

Ειδικότερα, οι τιμές στις οποίες επιλέγονται οι μεταβάσεις των ζευγαριών των διακοπών είναι ίσες με $V_{dc}/2$ για την τοπολογικά πρώτη απο κάτω προς τα πάνω κυσέλη μετατροπέα, $(V_{dc}/2)+V_{dc}$ για την δεύτερη, και $(V_{dc}/2)+(2V_{dc})$ για την τρίτη. Έτσι, συγκρίνοντας μια ελεγχόμενη κυματομορφή τέλειου ημιτόνου πλάτους V_{sin} με τις παραπάνω σταθερές τιμές μπορεί να καθοριστεί η συχνότητα διακοπτικής λειτουργίας και εξόδου, η τάση εξόδου, και ο δείκτης διαμόρφωσης πλάτους m , για τον οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση ισχύει ότι $m=V_{sin}/(3V_{dc})$ [20].

Με τη ρύθμιση του δείκτη διαμόρφωσης πλάτους ρυθμίζεται ταυτόχρονα η ισορροπία ανάμεσα σε μια ποιοτική κυματομορφή εξόδου όσον αφορά την αρμονική παραμόρφωση, και την ποσότητα ισχύος στο φορτίο.

2.4 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά

Μία από τις πιο σημαντικές δυνατότητες των μονοφασικών μετατροπέων πλήρους γέφυρας είναι η πολλαπλότητα των καταστάσεων λειτουργίας τους, δηλαδή οι διαφορετικοί συνδυασμοί καταστάσεων των διακοπών που μπορούν να παράγουν το ίδιο επίπεδο τάσης εξόδου. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του μετατροπέα με διάφορους τρόπους, όπως η εξισορρόπηση του φορτίου σε διαφορετικές κυσέλες, η μείωση των απωλειών μεταγωγών και η ελαχιστοποίηση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης [21].

Για ένα δεδομένο επίπεδο τάσης εξόδου, μπορεί να υπάρχουν πολλαπλές έγκυρες διαμορφώσεις διακοπών. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξισορρόπηση της ισχύος και των θερμικών καταπονήσεων σε μεμονωμένες κυσέλες. Για παράδειγμα, εάν το ζητούμενο επίπεδο τάσης εξόδου είναι μηδέν, κάθε μονοφασικός μετατροπέας πλήρους γέφυρας μπορεί να το παράγει είτε θέτοντας όλους τους διακόπτες του σε κατάσταση αποκοπής, είτε θέτοντας μόνο τους άνω ή τους κάτω

διακόπτες του σε κατάσταση αγωγής. Επομένως, όταν δύο τέτοιοι μετατροπείς συνδεθούν σε σειρά, για τάση εξόδου ίση με V_{dc} , αρκεί να παράγει τάση εξόδου ίση με V_{dc} μόνο ο ένας από τους 2 μετατροπείς.

Έτσι, εάν παρουσιαστεί σφάλμα ή κάποια τεχνική αστοχία σε μία από τις κυψέλες μετατροπέων, ο μετατροπέας μπορεί να μεταβεί σε μια εναλλακτική κατάσταση που εξακολουθεί να επιτυγχάνει την επιθυμητή τάση εξόδου χωρίς κάποια μόνιμη διακοπή [22].

Η πολλαπλότητα της κατάστασης μεταγωγής στους μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων παρέχει σημαντική ευελιξία στο σχεδιασμό και τη λειτουργία αυτών των συστημάτων. Με την αποτελεσματική διαχείριση των διαφόρων συνδυασμών μεταγωγής, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της απόδοσης και η ενίσχυση της αξιοπιστίας, καθιστώντας αυτούς τους αντιστροφείς μια πολύ καλή λύση για διάφορες εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής ποιότητας κυματομορφής.

Κάθε κυψέλη μετατροπέα έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται ένα μέρος του συνολικού φορτίου. Εξασφαλίζοντας ότι κανένας διακόπτης δεν επιβαρύνεται υπερβολικά, βελτιώνεται η συνολική αξιοπιστία του μετατροπέα. Αυτό μειώνει την πιθανότητα αστοχίας λόγω θερμικής υπερφόρτωσης ή υπερβολικής καταπόνησης σε οποιοδήποτε διακόπτη καθώς κάθε κυψέλη μοιράζεται ίση ποσότητα φορτίου. Έτσι, ελαχιστοποιείται η ηλεκτρική και θερμική καταπόνηση των μεμονωμένων κυψελών, οδηγώντας σε μια πιο ισορροπημένη λειτουργία. Με την επιλογή κατάλληλων καταστάσεων μεταγωγών που κατανέμουν ομοιόμορφα τη διακοπτική λειτουργία μεταξύ των κυψελών, μπορεί να επιτευχθεί ίση κατανομή φορτίου.

2.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Οι αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων και οι παραδοσιακοί αντιστροφείς 3 επιπέδων χρησιμοποιούνται και οι δύο σε συστήματα μετατροπής ισχύος, ιδιαίτερα σε εφαρμογές μέσης προς υψηλή τάση. Κάθε τοπολογία έχει τα μοναδικά της χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Όσον αφορά την βασική δομή των CMLI, αποτελούνται από πολλούς μετατροπείς πλήρους γέφυρας συνδεδεμένους σε σειρά. Κάθε κυψέλη πλήρους γέφυρας μπορεί να δημιουργήσει τρία επίπεδα τάσης ($+V_{dc}$, 0, $-V_{dc}$). Το επίπεδο τάσης εξόδου καθορίζεται από τον αριθμό των επιμέρους κυψελών. Οι CMLI απαιτούν γενικά μεγάλο αριθμό διακοπών και ξεχωριστές πηγές DC για κάθε κυψέλη. Σχετικά με την δομή των παραδοσιακών αντιστροφών 3 επιπέδων, συνήθως διαμορφώνονται ως μετατροπείς με σύσφιξη ουδέτερου (NPC) ή πυκνωτών εξισορρόπησης (FC). Παράγουν επίσης τρία επίπεδα τάσης ($+V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$) και χρησιμοποιούν λιγότερους διακόπτες σε σύγκριση με τους CMLI, αλλά απαιτούν διόδους σύσφιξης και πυκνωτές εξισορρόπησης [23].

Σχετικά με την πολυπλοκότητα του ελέγχου των CMLI, απαιτούνται πιο περίπλοκοι αλγόριθμοι για τη διαχείριση του μεγάλου αριθμού διακοπών και πηγών DC. Η διατήρηση της ίδιας τάσης στις πολλαπλές πηγές DC είναι ζωτικής σημασίας και προσθέτει στην πολυπλοκότητα του ελέγχου. Όσο για τους παραδοσιακούς αντιστροφείς, συνήθως έχουν απλούστερους αλγόριθμους ελέγχου σε σύγκριση με τους μετατροπείς CMLI. Απαιτούν συγκεκριμένες τεχνικές για τη διατήρηση της σωστής τάσης ουδέτερου σημείου, αλλά είναι γενικά λιγότερο περίπλοκες από την εξισορρόπηση DC τάσεων εισόδου σε μετατροπείς CMLI.

Οι αντιστροφείς CMLI προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό και την υλοποίηση αυτής της τοπολογίας.

Λόγω των πολλαπλών επιπέδων τάσης εξόδου, οι συγκεκριμένοι αντιστροφείς παράγουν κυματομορφές που είναι πιο κοντά σε ένα καθαρό ημίτονο, με αποτέλεσμα χαμηλότερη συνολική αρμονική παραμόρφωση. Οι πιο ομαλές κυματομορφές εξόδου μειώνουν τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, γεγονός το οποίο είναι σημαντικό για την προστασία του ευαίσθητου εξοπλισμού και τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Η αρθρωτή δομή του αντιστροφέα επιτρέπει την εύκολη πρόσθεση περισσότερων κυψελών μετατροπών, κάτι που είναι εξαιρετικά χρήσιμο για εφαρμογές που απαιτούν διαφορετικά επίπεδα τάσης ή ισχύος. Επίσης, ενισχύει την αξιοπιστία, καθώς η αστοχία σ'έναν διακόπτη ή έναν μετατροπέα γέφυρας δεν οδηγεί απαραίτητα σε αστοχία ή διακοπή λειτουργίας ολόκληρου του αντιστροφέα. Τα ελαττωματικά στοιχεία μπορούν να παρακαμφθούν με τον κατάλληλο έλεγχο ή να αντικατασταθούν. Κάθε μετατροπέας ασχολείται με ένα μέρος του συνολικού φορτίου, το οποίο μειώνει την καταπόνηση στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα ισχύος, επιτρέποντας τη χρήση εξαρτημάτων χαμηλότερης ονομαστικής τιμής και ενδεχομένως οικονομικότερα. Οι συγκεκριμένοι αντιστροφείς μπορούν να χρησιμοποιήσουν διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σύμφωνα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις των εφαρμογών [24].

Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα των CMLI είναι το γεγονός ότι κάθε κυψέλη μετατροπέα απαιτεί και από μία γαλβανικά απομονωμένη πηγή DC, η οποία μπορεί να περιπλέξει τον σχεδιασμό του τροφοδοτικού και να αυξήσει το κόστος του συστήματος. Ο αυξημένος αριθμός εξαρτημάτων και η ανάγκη για πολλά γαλβανικά απομονωμένα τροφοδοτικά περιπλέκει το σχεδιασμό, τον έλεγχο και την υλοποίηση. Με περισσότερα εξαρτήματα, η πιθανότητα αστοχίας αυξάνεται, οδηγώντας σε υψηλότερες απαιτήσεις συντήρησης. Ενώ η αρθρωτή δομή παρέχει μεγάλη αξιοπιστία, το σφάλμα κάποιου στοιχείου εξακολουθεί να επηρεάζει την απόδοση του αντιστροφέα και απαιτεί ενέργειες συντήρησης. Το φυσικό μέγεθος του αντιστροφέα μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο λόγω των πολλών κυψελών και των σχετικών στοιχείων τους. Η ανάγκη για μετασχηματιστές γαλβανικής απομόνωσης και πρόσθετα εξαρτήματα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο αρχικό κόστος σε σύγκριση με απλούστερες τοπολογίες μετατροπών. Η διαχείριση και ο συγχρονισμός όλων των κυψελών με μετατροπείς πλήρους γέφυρας απαιτεί εξελιγμένους αλγόριθμους ελέγχου, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα όλου του συστήματος ελέγχου. Η ομοιόμορφη κατανομή τάσης σε όλες τις κυψέλες μπορεί να είναι δύσκολη, ειδικά υπό συνθήκες δυναμικού φορτίου, και απαιτεί προσεκτική παρακολούθηση και έλεγχο.

2.6 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο, εξερευνήσαμε το περίπλοκο τοπίο των κλιμακωτών μετατροπών πολλαπλών επιπέδων, τονίζοντας τον καινοτόμο σχεδιασμό και τις αρχές λειτουργίας τους.

Τα μοναδικά χαρακτηριστικά των CMLI, όπως η αρθρωτή δομή και η επεκτασιμότητα τους, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με την ικανότητα παραγωγής κυματομορφών τάσης υψηλής ποιότητας, τοποθετούν τα CMLI ως μια ανώτερη εναλλακτική σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες μετατροπών. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα και ο αριθμός των υλικών θέτουν ζητήματα που απαιτούν συνεχή καινοτομία στις στρατηγικές ελέγχου και στις μεθοδολογίες σχεδιασμού. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου, που παρουσιάστηκε στο τέλος αυτού του κεφαλαίου θα υλοποιηθεί πειραματικά και πρακτικά στις επόμενες φάσεις της προσομοίωσης και της υλοποίησης.

Κεφάλαιο 3ο: Προσομοίωση αντιστροφέα

3.1 Εισαγωγή

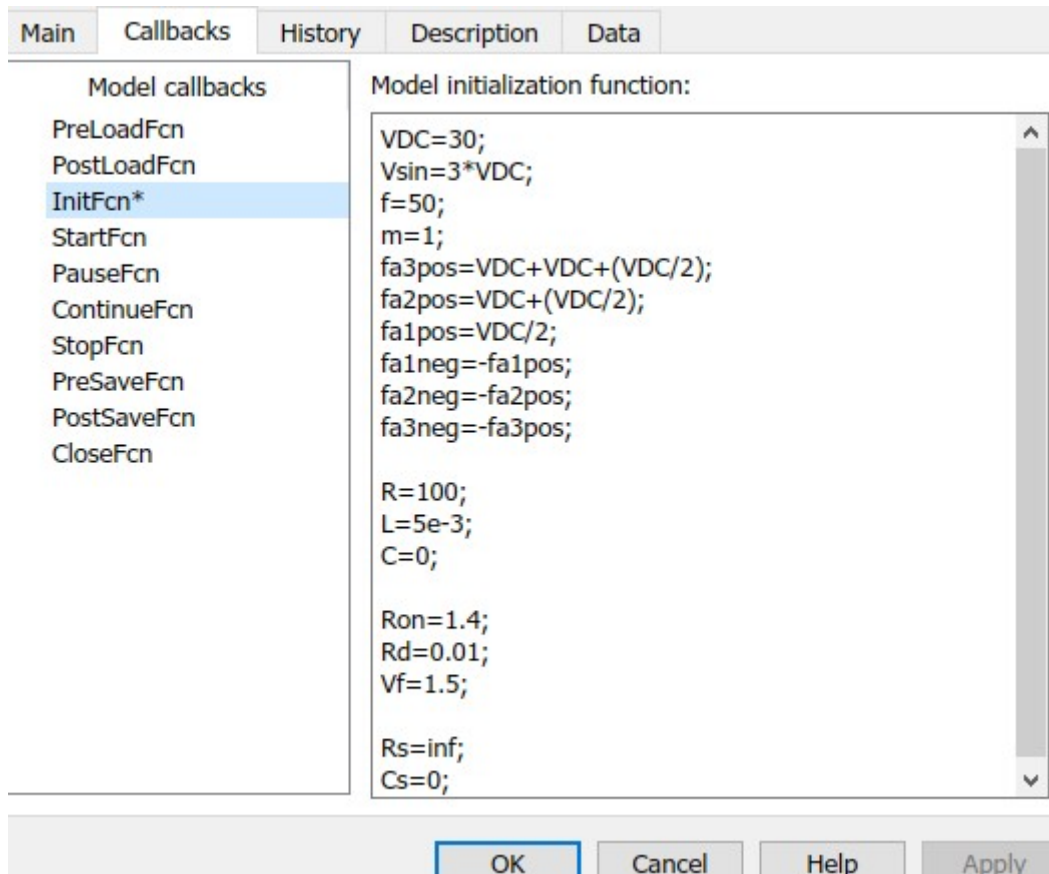
Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στη μεθοδολογία της προσομοίωσης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγόριθμου ελέγχου για CMI. Ξεκινά με μια επισκόπηση των εργαλείων και των πλατφορμών προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται, ακολουθούμενη από μια λεπτομερή περιγραφή των μοντέλων μετατροπέων και των συστημάτων ελέγχου που εφαρμόζονται στο περιβάλλον προσομοίωσης. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις παραμέτρους και τις διαμορφώσεις που είναι κρίσιμες για την ακριβή αναπαραγωγή συνθηκών του πραγματικού κόσμου.

3.2 Μοντελοποίηση

Το πρωτότυπο κύκλωμα προτού υλοποιηθεί, προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab Simulink R2018b. Το συγκεκριμένο λογισμικό αποτελεί ένα πανίσχυρο εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται εκτενώς στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος για μοντελοποίηση, προσομοίωση, και ανάλυση δυναμικών συστημάτων.

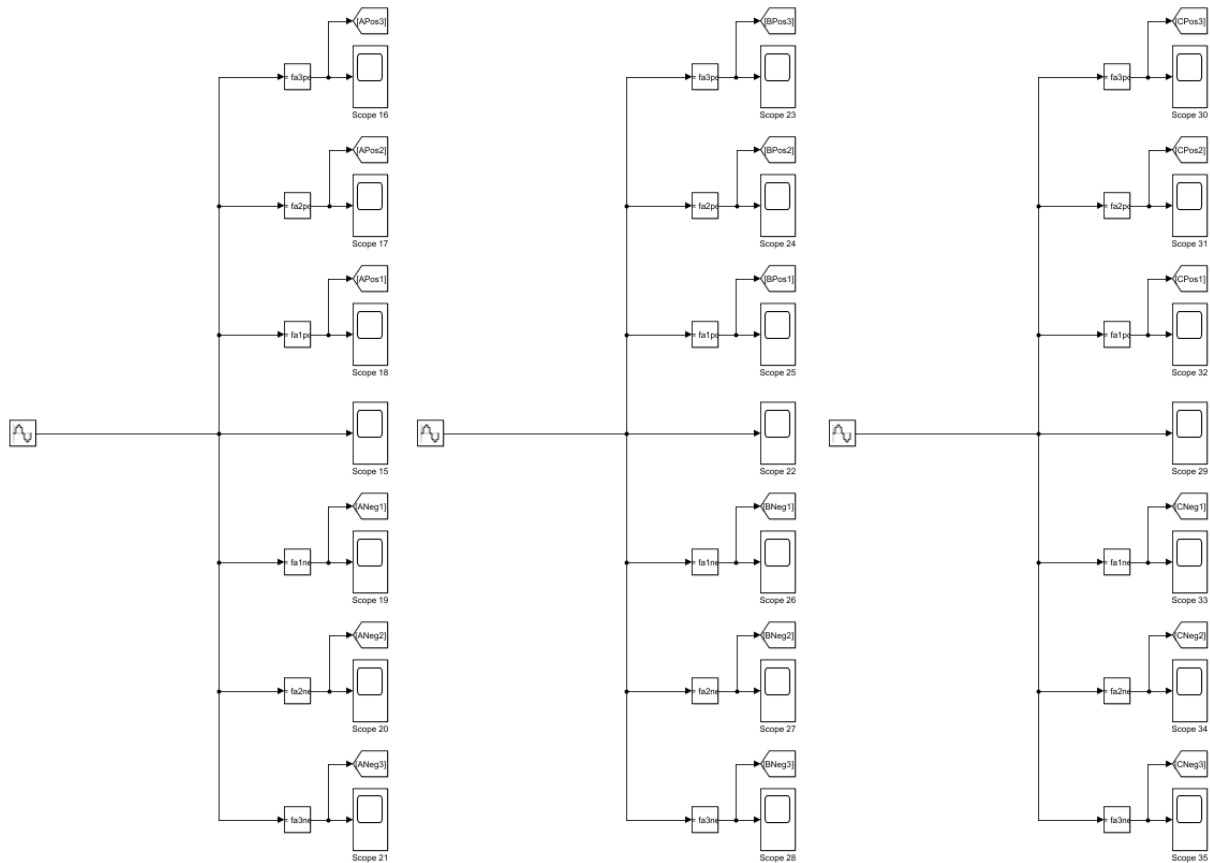
Αναφέρεται ότι στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των υλικών σύμφωνα με τα φύλλα δεδομένων (data sheets) των κατασκευαστών όπου και στον βαθμό που ήταν αυτό δυνατό [25-35].

Ως αλγόριθμος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων επιλέχθηκε ο ode23tb (stiff/TR-BDF2). Ξεκινώντας με την μοντελοποίηση των 36 διακοπών τύπου MOSFET, σε συνολικά 9 κυψέλες μετατροπέων πλήρους γέφυρας με 3 κυψέλες μετατροπέων ανα φάση, οι τιμές εσωτερικών αντιστάσεων R_{on} τέθηκαν ίσες με 1.4Ω , για τάση οδήγησης $10V$. Η αντίσταση της εσωτερικής διόδου ορίστηκε ίση με $0,01\Omega$, και η τάση ορθής πόλωσης της εσωτερικής διόδου ίση με $1.5V$. Δεν μοντελοποιήθηκαν τα εσωτερικά δικτυώματα τύπου snubber. Όσον αφορά τις πηγές τάσεων DC, και οι 9 τέθηκαν ίσες με $30V$. Ως συμμετρικό τριφασικό φορτίο μοντελοποιήθηκαν 3 σύνθετες αντιστάσεις αποτελούμενες η κάθε μία από έναν αντιστάτη 100Ω σε σειρά με μια επαγωγή $5mH$, και τοποθετήθηκαν σε διάταξη φορτίου αστέρα.



Σχήμα 3.1: Αρχικοποίηση μεταβλητών του μοντέλου.

Όσο για τον έλεγχο των MOSFET, η διακοπτική συχνότητα ορίστηκε στα 50Hz. Οι θετικές και αρνητικές τιμές αναφοράς με τις οποίες διασταυρώνεται το ημίτονο ελέγχου είναι κοινές και στις 3 φάσεις, ωστόσο ορίστηκαν ξεχωριστά για την θετική και την αρνητική ημιπερίοδο. Ως $fa1pos$ (firing angle 1 positive) ορίστηκε η τιμή αναφοράς όλων των θετικών ημιπεριόδων των μετατροπέων H1,H4,H7 με βάση το σχήμα 2.2. Όσο το ημίτονο ελέγχου είναι μεγαλύτερο από αυτή την τιμή αναφοράς, ο παλμός ελέγχου των διακοπών βρίσκεται σε κατάσταση λογικού 1. Αντίστοιχα για την αρνητική ημιπερίοδο με τις μεταβλητές $faXneg$. Ως ημίτονα ελέγχου για κάθε φάση του αντιστροφέα χρησιμοποιήθηκαν 3 πανομοιότυπα σήματα με μόνη διαφορά την απαραίτητη αλλαγή φάσης.

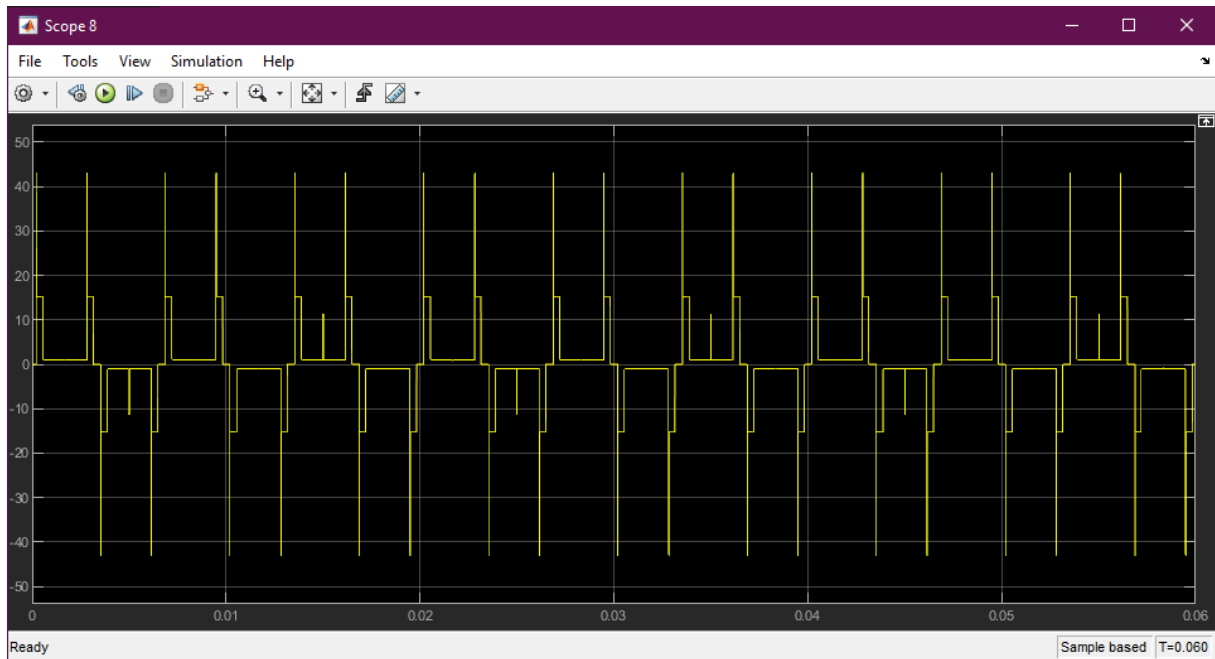


Σχήμα 3.2: Δημιουργία παλμών ελέγχου.

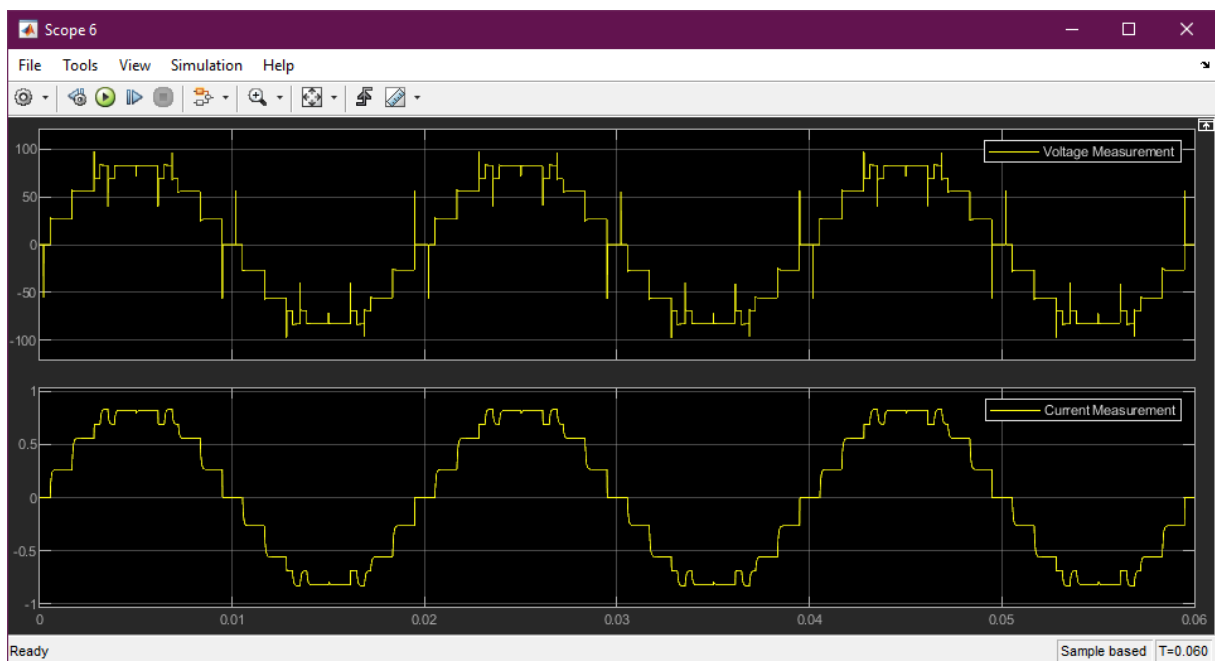
3.3 Προσομοίωση και μετρήσεις

Με την αρχική μοντελοποίηση του αντιστροφέα ολοκληρωμένη, μπορούμε να προχωρήσουμε στην προσομοίωση όλου του συστήματος.

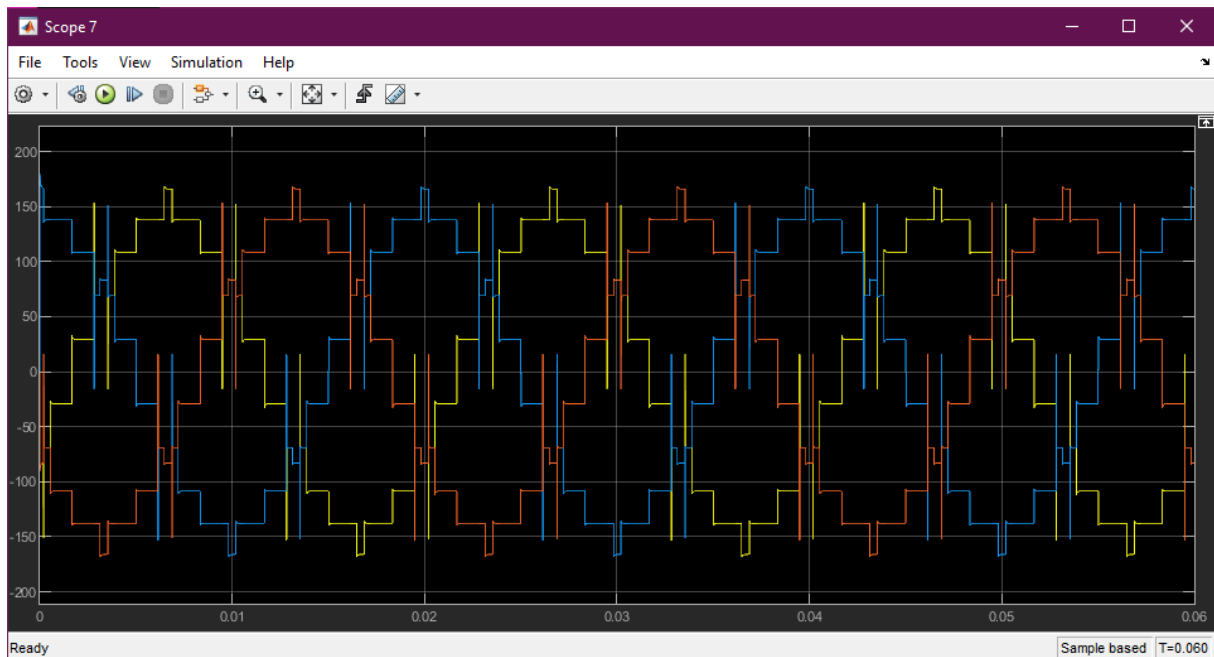
Αρχικά, τα φασικά και πολικά χαρακτηριστικά εξόδου, είναι αρκετά παραμορφωμένα. Λόγω της διακοπτικής λειτουργίας του αντιστροφέα προκαλούνται ασύμμετρες τάσεις και ρεύματα στα κοινά σημεία του αντιστροφέα και του φορτίου. Στα συμμετρικά τριφασικά συστήματα χωρίς την ύπαρξη ουδέτερου αγωγού μεταξύ των κοινών σημείων πηγής και συμμετρικού φορτίου δεν υπάρχει μονοπάτι επιστροφής για την διέλευση ασύμμετρων ρευμάτων, οπότε η έξοδος παραμορφώνεται.



Σχήμα 3.3: Τάση ασυμμετρίας ουδετέρων σημείων αντιστροφεία - φορτίου.



Σχήμα 3.4: Έντονα παραμορφωμένα χαρακτηριστικά φασικής τάσης και ρεύματος γραμμής.



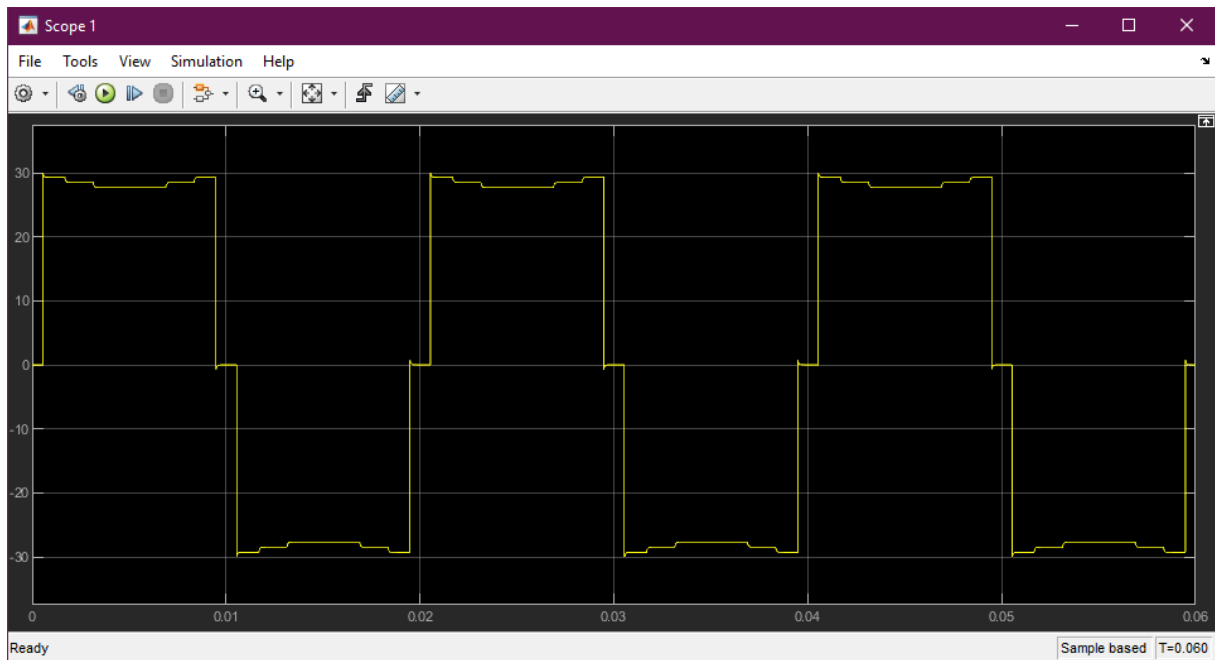
Σχήμα 3.5: Παραμορφωμένα χαρακτηριστικά πολικών τάσεων σε χρονικό συσχετισμό.

Σημειώνεται ότι οι παλμοί οδήγησης των διακοπών της προσομοίωσης, κατανεμήθηκαν χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της πολλαπλότητας και όχι με βάση την παραδοσιακή σύνθεση της κυματομορφής εξόδου σε αυτούς τους αντιστροφείς. Κύριος στόχος είναι η εξισορρόπηση των DC ρευμάτων των πηγών τροφοδοσίας και της ισοκατανομής χρόνου αγωγής σε κάθε μετατροπέα.

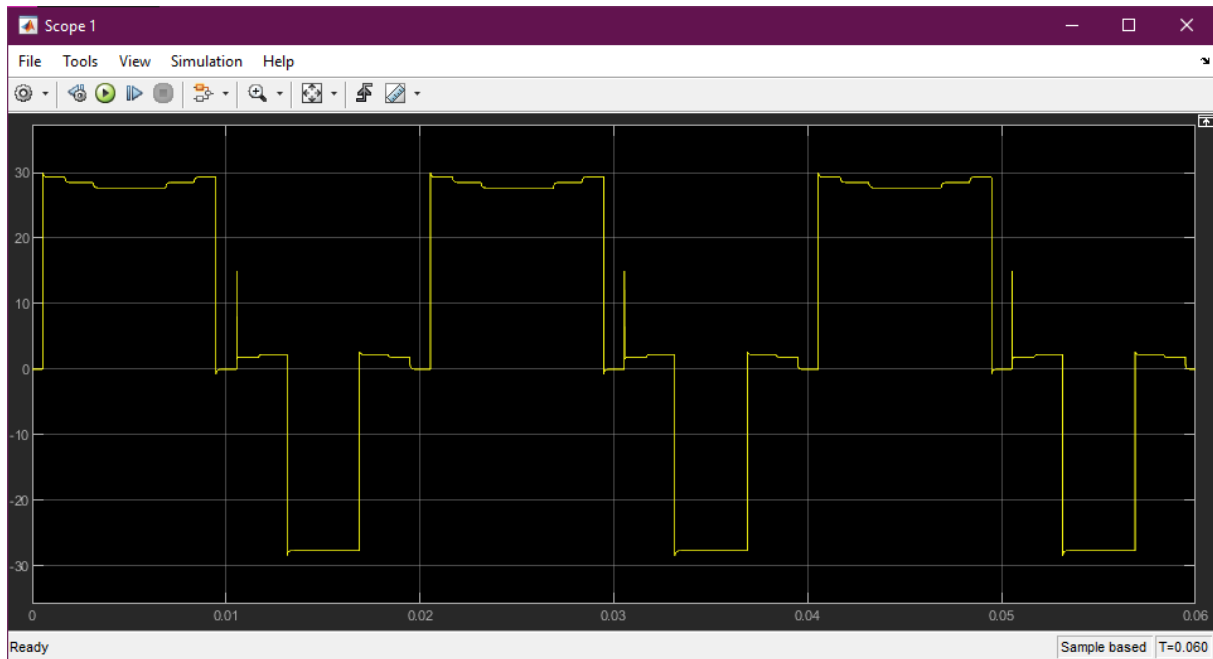
Αυτό τυπικά επιτυγχάνεται εάν η κάθε κυψέλη μετατροπέα παράγει στην έξοδο τρεις διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας και επαναλαμβάνοντάς τους ανα συγκεκριμένο αριθμό περιόδων, ανάλογα με τη τοπολογία και τον αλγόριθμο του αντιστροφέα. Έτσι, σε αυτή τη περίπτωση ένας μετατροπέας μπορεί για παράδειγμα κατά την 1η περίοδο λειτουργίας να παράγει το 2ο επίπεδο εξόδου, κατά τη 2η περίοδο λειτουργίας το 3ο επίπεδο εξόδου, και κατά την 3η περίοδο το 1ο επίπεδο εξόδου. Αυτή η τεχνική αν και είναι πολύ αποτελεσματική, περιπλέκει περισσότερο και την προσομοίωση αλλά και το στάδιο υλοποίησης του αντιστροφέα. Η μέθοδος που επιλέχθηκε για την βελτιστοποίηση των χρόνων αγωγής του κάθε μετατροπέα είναι η εξής :

Παρατηρείται ότι οι μετατροπείς H1,H4,H7 ήγαγαν σχεδόν σε όλο το διάστημα της περιόδου, καθώς είναι οι υπεύθυνοι για την παραγωγή του πρώτου επιπέδου τάσης εξόδου με τον μεγαλύτερο κύκλο εργασίας, ενώ οι H3,H6,H9 ήγαγαν ελάχιστα, μιας και δημιουργούν αντίστοιχα το τρίτο επίπεδο εξόδου με τον μικρότερο κύκλο εργασίας. Αλλάζοντας τους παλμούς ελέγχου των τοπολογικά κάτω

αριστερά διακοπών των άνω και κάτω μετατροπέων σε κάθε φάση, κατά τη διάρκεια της αρνητικής περιόδου το πρώτο επίπεδο αρνητικής τάσης εξόδου δημιουργείται από τους H3,H6,H9 και όχι από τους H1,H4,H7, οι οποίοι πλέον συνθέτουν το τρίτο αρνητικό επίπεδο τάσης. Έτσι, μειώνεται ο συνολικός κύκλος εργασίας των H1,H4,H7 και αυξάνεται αυτός των H3,H6,H9. Το δεύτερο επίπεδο των κεντρικών μετατροπέων παραμένει ως έχει, καθώς ο κύκλος εργασίας τους είναι πλέον πολύ κοντά στους κύκλους εργασίας των τοπολογικά άνω και κάτω μετατροπέων.

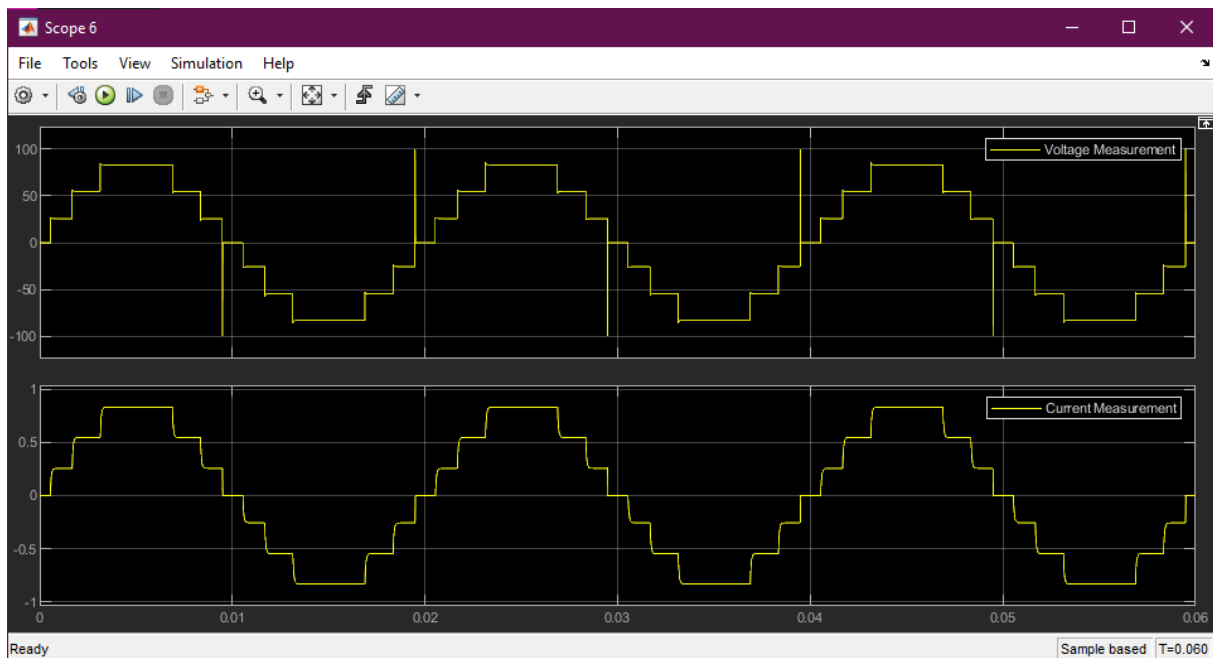


Σχήμα 3.6: Τάση εξόδου του μετατροπέα H1 πριν την ανακατανομή των παλμών ελέγχου.



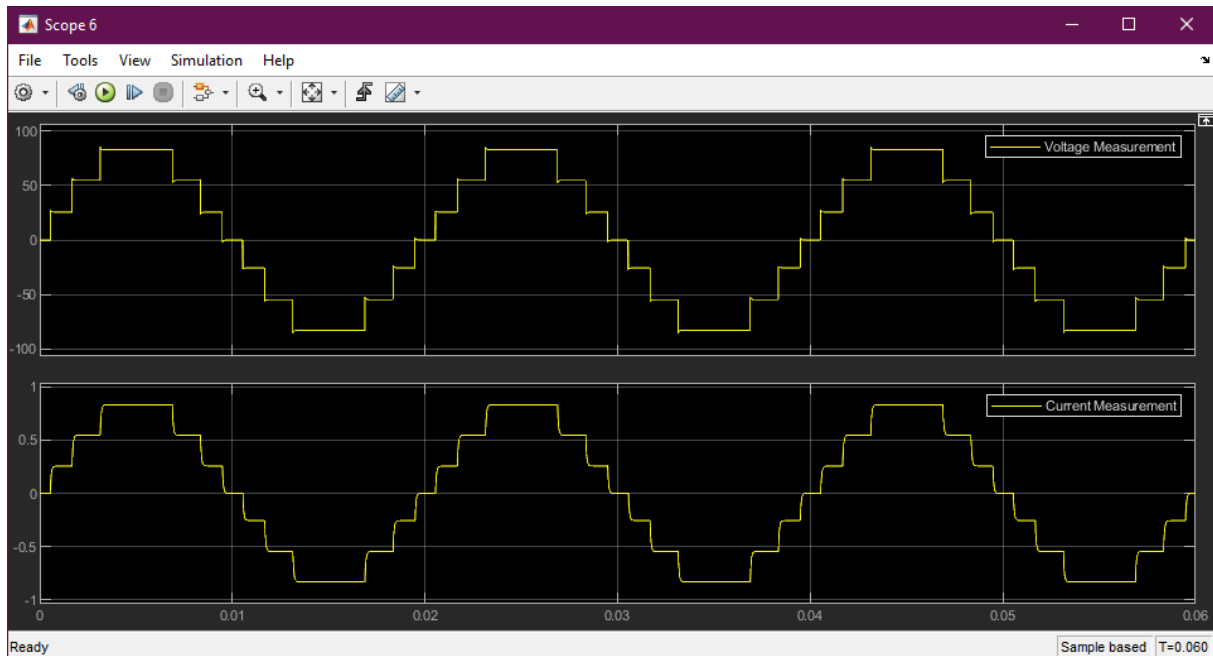
Σχήμα 3.7: Τάση εξόδου του μετατροπέα H1 μετά την ανακατανομή των παλμών ελέγχου.

Με την ύπαρξη του ουδέτερου αγωγού, παρατηρούνται έντονες αιχμές υπερτάσεων σε συγκεκριμένα σημεία των κυματομορφών εξόδου. Αυτό είναι ανεπιθύμητο φαινόμενο, καθώς αυξάνεται η καταπόνηση των διακοπών, η συνολική αρμονική παραμόρφωση τάσης, και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

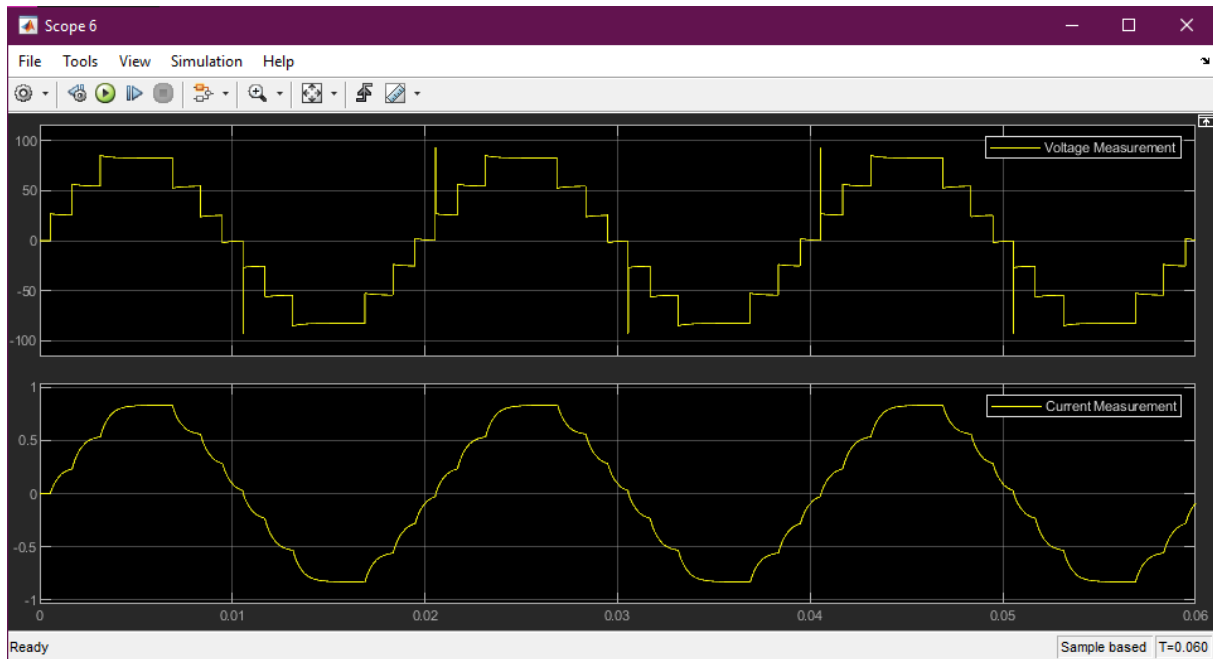


Σχήμα 3.8: Φασική τάση και ρεύμα γραμμής με την ύπαρξη ουδέτερου αγωγού μεταξύ των ουδέτερων σημείων αντιστροφεία - φορτίου.

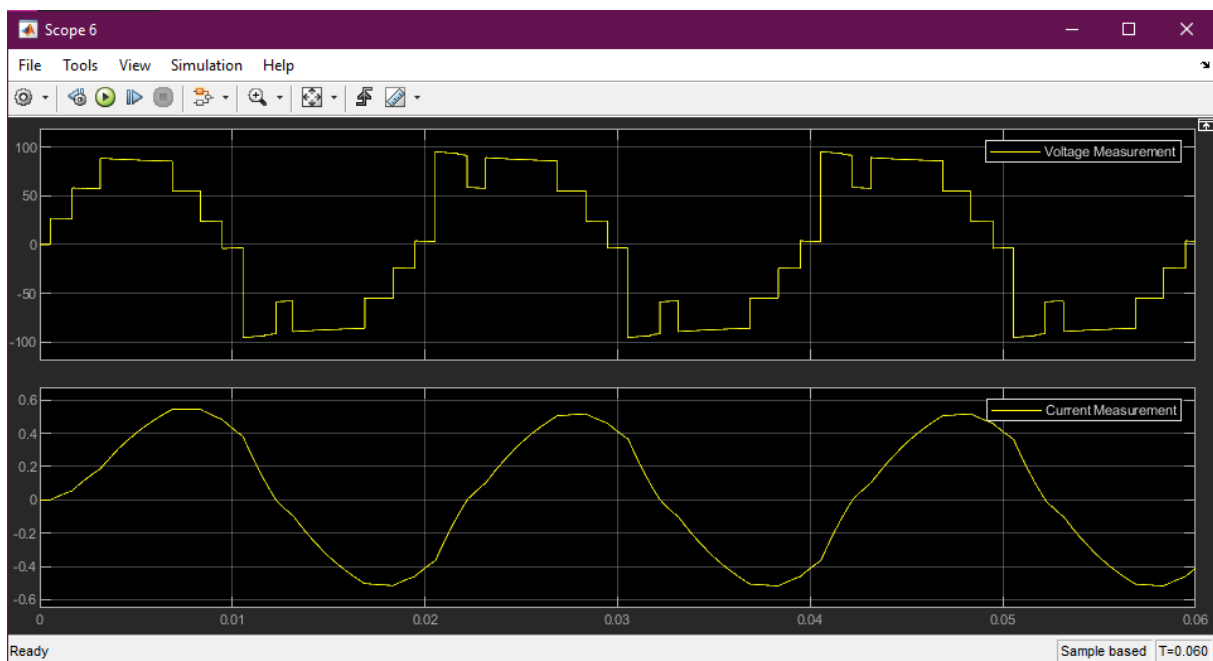
Το φαινόμενο φείλεται στην επαγωγική συμπεριφορά του φορτίου. Παρατηρείται ότι το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή μηδενίζεται σχεδόν ακαριαία κατά τη διάρκεια των υπερτάσεων. Μια τεχνική μετρίασης του φαινομένου είναι η λειτουργία ελεύθερης ροής γνωστή ως freewheeling. Με βάση αυτή τη τεχνική, κατά τη διάρκεια της μηδενικής τάσης εξόδου, τα άκρα του φορτίου θα βραχυκυκλώνονται μέσω συγκεκριμένων διακοπών, παρακάμπτοντας εντελώς τις πηγές DC τροφοδοσίας. Ουσιαστικά, μέσω του κατάλληλου ελέγχου των διακοπών δημιουργείται ένα μονοπάτι ελεύθερης ροής για το αποθηκευμένο ρεύμα της επαγωγής, έτσι ώστε να αποφεύγεται όσο γίνεται, ο σχεδόν ακαριαίος μηδενισμός του. Επειδή το χρονικό διάστημα της λειτουργίας ελεύθερης ροής είναι συγκεκριμένο σε κάθε περίοδο, είναι περιορισμένη και η τιμή της αποθηκευμένης ενέργειας στην επαγωγή η οποία μπορεί να κυκλοφορήσει σε αυτό το διάστημα χωρίς να επηρεάσει σημαντικά την κυματομορφή εξόδου. Η αύξηση της τιμής της επαγωγής σε μεγαλύτερες τιμές αναπόφευκτα επαναφέρει τις επαγωγικές αιχμές υπερτάσεων αλλά με μικρότερο πλάτος. Επίσης, τις προεκτείνει χρονικά, και μετά από μια συγκεκριμένη τιμή παραμορφώνει εντελώς την κυματομορφή τάσης εξόδου.



Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστικά εξόδου με $R=100 \Omega$ και $L=5 \text{ mH}$.

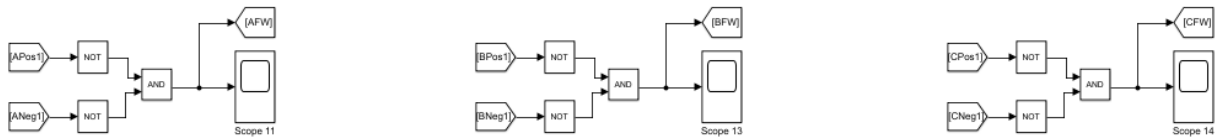


Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστικά εξόδου με $R=100 \Omega$ και $L=50 \text{ mH}$.



Σχήμα 3.11: Χαρακτηριστικά εξόδου με $R=100 \Omega$ και $L=500 \text{ mH}$.

Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα της πολλαπλότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε οι 2 άνω είτε οι 2 κάτω διακόπτες ταυτόχρονα σε κάθε μετατροπέα πλήρους γέφυρας για την λειτουργία ελεύθερης ροής. Οι παλμοί οδήγησης ελεύθερης ροής προστίθενται στο κανονικό σήμα ελέγχου των διακοπών.



Σχήμα 3.12: Δημιουργία παλμών ελεύθερης ροής.

Όσο για τις μετρήσεις των βέλτιστων χαρακτηριστικών στην προσομοίωση με $R=100\Omega$ και $L=5mH$ μετρήθηκαν τα εξής :

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις βέλτιστων χαρακτηριστικών εξόδου.

	$V_{sin}=44V_p$	$V_{sin}=74V_p$	$m=1$	$m=2$	$m=1000$
Φασική ενεργός ισχύς εξόδου:	4,67 W	18,74 W	35,43 W	51,11 W	55,86 W
Φασική άεργος ισχύς εξόδου:	0,07 VAR	0,29 VAR	0,55 VAR	0,8 VAR	0,87 VAR
Φασική φαινόμενη ισχύς:	4,67 VA	18,74 VA	35,43 VA	51,11 VA	55,87 VA
Πλάτος φασικής τάσης εξόδου:	25,56 V _p	54,67 V _p	83,03 V _p	83,03 V _p	83,03 V _p
Ενεργός τιμή φασικής τάσης εξόδου:	22,56 V _{rms}	43,92 V _{rms}	60,01 V _{rms}	73,56 V _{rms}	83 V _{rms}
THD τάσης εξόδου:	29,6 %	17,02 %	12,77 %	24,22 %	48,25 %
Πλάτος ρεύματος γραμμής:	255,6 mA	546,7 mA	830,3 mA	830,3 mA	830,3 mA
Ενεργός τιμή ρεύματος γραμμής:	224,8 mArms	438,2 mArms	599,1 mArms	734,8 mArms	826,3 mArms
THD ρεύματος γραμμής:	28,35 %	15,8 %	11,44 %	23,77 %	47,13 %
Πλάτος	51,13 V _p	109,3 V _p	166,1 V _p	166,1 V _p	166,1 V _p

πολικών τάσεων:					
Ενεργός τιμή πολικών τάσεων:	38,07 Vrms	75,57 Vrms	103,6 Vrms	124,2 Vrms	135,6 Vrms
THD πολικών τάσεων:	18,88 %	12,14 %	10,53 %	7,37 %	47,13 %
Συντελεστής ισχύος $\cos(\varphi)$:	1	1	1	1	1
Απόδοση ισχύος:	79,6 %	89,2%	91,5%	88,5%	77,7%

3.4 Επίλογος

Αξιοποιώντας το λογισμικό MATLAB / Simulink, μπορέσαμε να αναπαράγουμε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας, διασφαλίζοντας ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι υλοποιήσιμος.

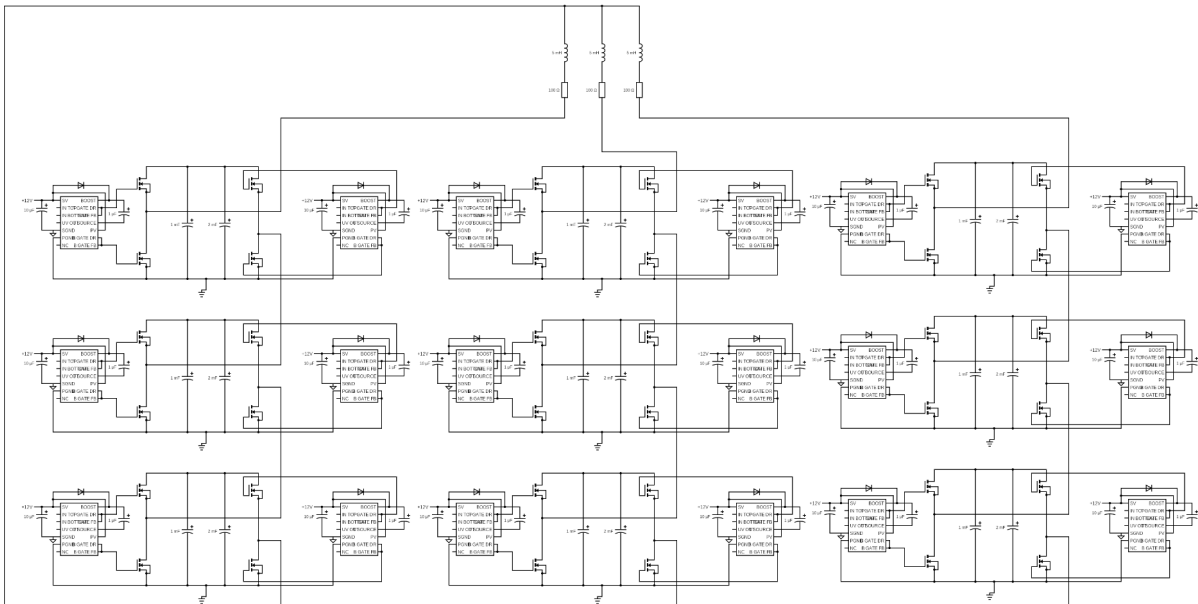
Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από αυτή τη μελέτη προσομοίωσης παρέχουν μια ισχυρή βάση για την πειραματική φάση. Επικυρώνουν το θεωρητικό πλαίσιο και προσφέρουν πολύτιμα δεδομένα που θα πληροφορήσουν τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των φυσικών συστημάτων μετατροπέα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπογραμμίζουν πιθανές περιοχές για περαιτέρω βελτιστοποίηση, προτείνοντας κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη.

Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση

4.1 Εισαγωγή

Η φάση υλοποίησης αυτής της πτυχιακής εργασίας αντιπροσωπεύει την μετάβαση από τις θεωρητικές και προσομοιωμένες έννοιες στην πρακτική εφαρμογή. Με βάση τα αποτελέσματα από τη φάση της προσομοίωσης, ξεκίνησε η πρακτική κατασκευή του αντιστροφέα, και η ενσωμάτωση του αλγόριθμου ελέγχου που αναπτύχθηκε νωρίτερα. Αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο για την επικύρωση της πραγματικής απόδοσης του σχεδιασμένου συστήματος, καθώς εκθέτει τον αντιστροφέα σε πρακτικούς περιορισμούς και συνθήκες λειτουργίας που δεν μπορούν να αποτυπωθούν πλήρως σε προσομοιώσεις.

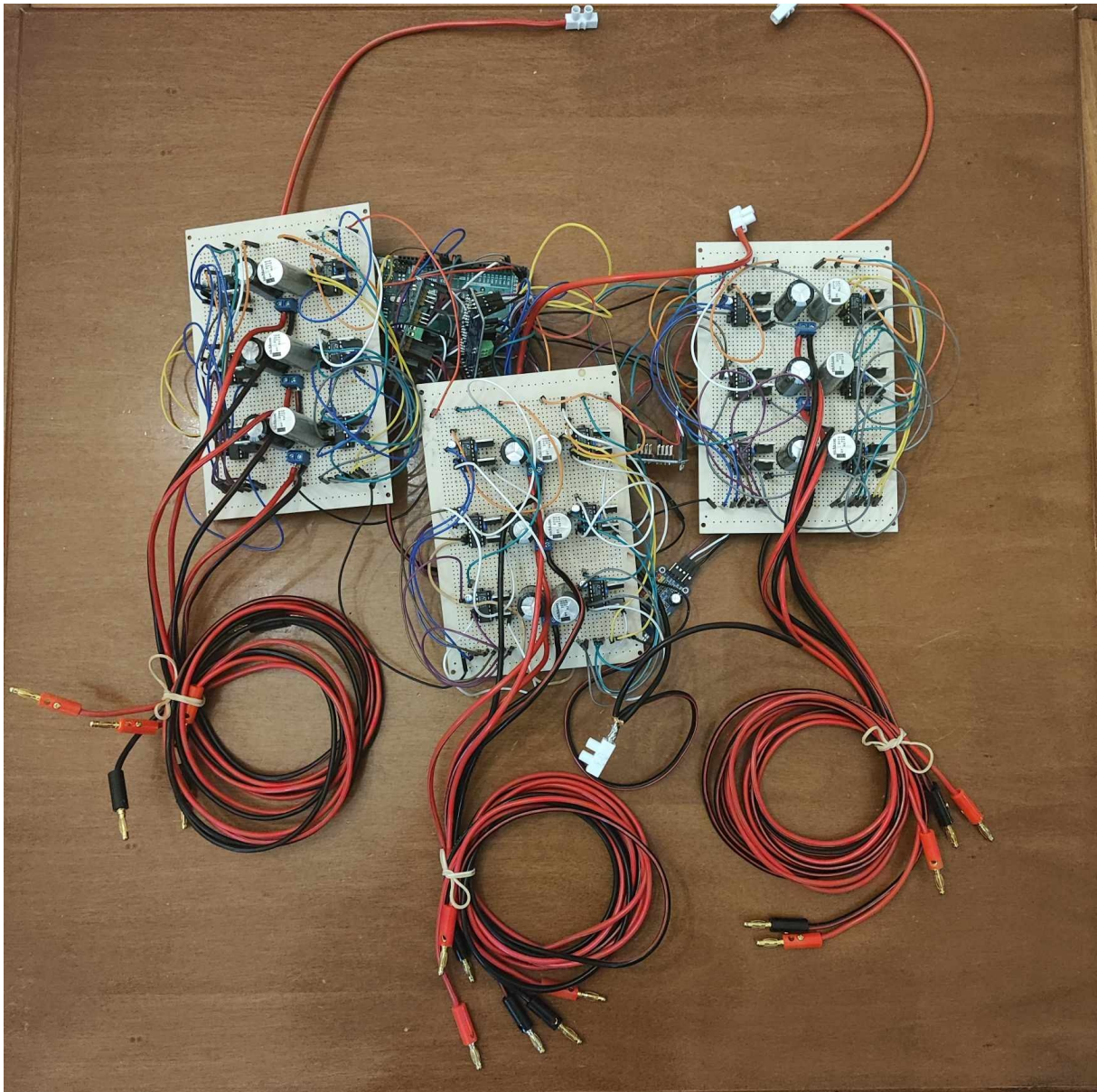
Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τη διαδικασία υλοποίησης του CMLI, ξεκινώντας με την επιλογή των εξαρτημάτων υλικού, το σχεδιασμό και τη συναρμολόγηση των μονάδων του αντιστροφέα και την ενσωμάτωση του αλγόριθμου ελέγχου στο σύστημα.



Σχήμα 4.1: Ηλεκτρονικό σχέδιο υλοποίησης του αντιστροφέα.

4.2 Υλικό

Το πρωτότυπο μοντέλο κατασκευάστηκε σε 3 διάτρητες πλακέτες τύπου dot PCB λόγω κόστους, περιορισμών και διαθεσιμότητας των υπόλοιπων στοιχείων. Η κάθε διάτρητη πλακέτα αντιπροσωπεύει την κάθε φάση στην οποία υπάρχουν οι αντίστοιχοι 3 μονοφασικοί μετατροπείς πλήρους γέφυρας συνδεδεμένοι σε σειρά.



Σχήμα 4.2: Τελικό πειραματικό πρωτότυπο του αντιστροφέα.

Ως κυκλώματα οδήγησης των MOSFET χρησιμοποιήθηκαν οι οδηγοί μισής γέφυρας (half bridge) LT1160, οπότε ο καθένας από τους 9 μετατροπείς αποτελείται από 2 οδηγούς μισής γέφυρας. Όλοι οι οδηγοί περιλαμβάνουν οπτική απομόνωση των σημάτων ελέγχου από την πλευρά του κυκλώματος ισχύος, προστασίες υπερτάσεων, υπερεντάσεων, shoot through και αντιστάθμιση νεκρού χρόνου. Όλοι οι οδηγοί μοιράζονται έναν κόμβο τροφοδοσίας 12V και έναν κοινό κόμβο γείωσης σημάτων. Στην πλευρά ισχύος, η κάθε πλήρης γέφυρα μετατροπέα έχει την δική της, ξεχωριστή γείωση, η οποία είναι στον κόμβο των πηγών των δύο κάτω διακοπών του κάθε μετατροπέα και οδηγείται στον αντίστοιχο ακροδέκτη γείωσης ισχύος των 2 αντίστοιχων οδηγών.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα των οδηγών των MOSFET απαιτούν επιπλέον στοιχεία για την σωστή λειτουργία τους, σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή. Επομένως χρειάστηκαν επιπλέον στοιχεία όπως δίοδοι σήματος και ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές, τα οποία δεν υπάρχουν στην

προσομοίωση. Η επιλογή και συνδεσμολογία αυτών των υλικών βασίστηκε στο προτεινόμενο διάγραμμα τυπικής λειτουργίας του κατασκευαστή των οδηγών.

Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε ολοκληρωμένο κύκλωμα οδηγού χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον :

α) Ένας πυκνωτής αλουμινίου 25V 10μF για την αποσύζευξη της γραμμής τροφοδοσίας και της γείωσης σήματος του οδηγού.

β) Ένας πυκνωτής αλουμινίου 25V 1μF ως πυκνωτής bootstrap.

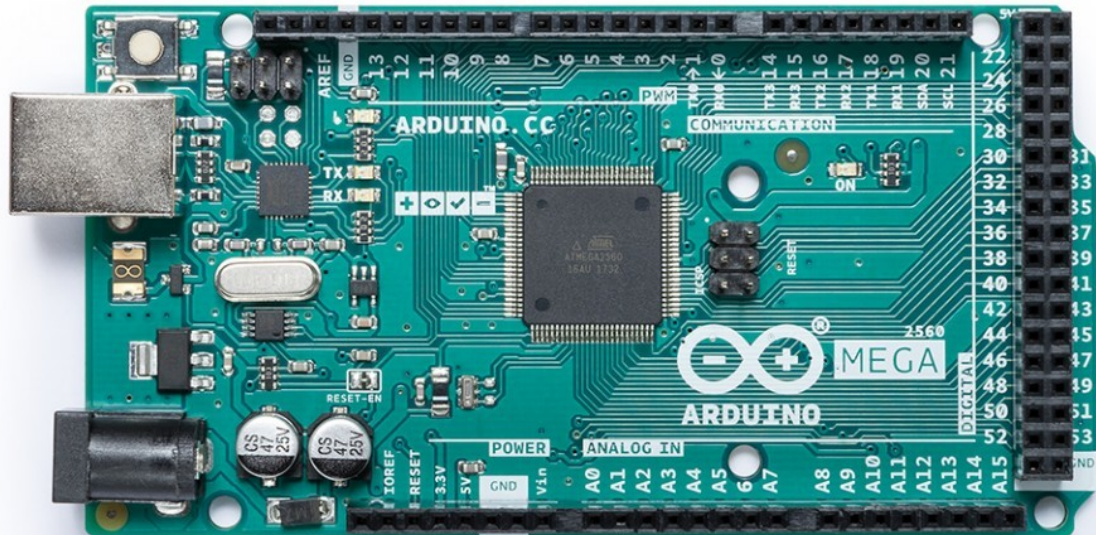
γ) Ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής αλουμινίου 63V 1000μF. Στο φύλλο κατασκευαστή η τιμή του συγκεκριμένου πυκνωτή είναι 100V, αλλά για μέγιστη τιμή τάσης 60V, όχι 30V στα οποία υλοποιείται ο αντιστροφέας.

δ) Μία δίοδος σήματος 1N4148 100V 200mA.

Επίσης, παράλληλα με τον πυκνωτή 63V 1000μF, είναι συνδεδεμένος ακόμα ένας πυκνωτής 63V 2000μF. Αυτός ο πυκνωτής συνδέθηκε για περαιτέρω εξομάλυνση της τάσης τροφοδοσίας του μετατροπέα. Θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί η τοποθέτηση των 2 ξεχωριστών πυκνωτών με την αντικατάστασή τους από έναν πυκνωτή 63V 3000μF, ωστόσο αυτή η διαπίστωση έγινε κατά τη φάση της υλοποίησης.

Ως ακροδέκτες ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν βραχυκυκλωτήρες. Όσον αφορά τους αγωγούς εισόδων και εξόδων ισχύος χρησιμοποιήθηκε πολύκλωνος αγωγός χαλκού διατομής 2,5mm.

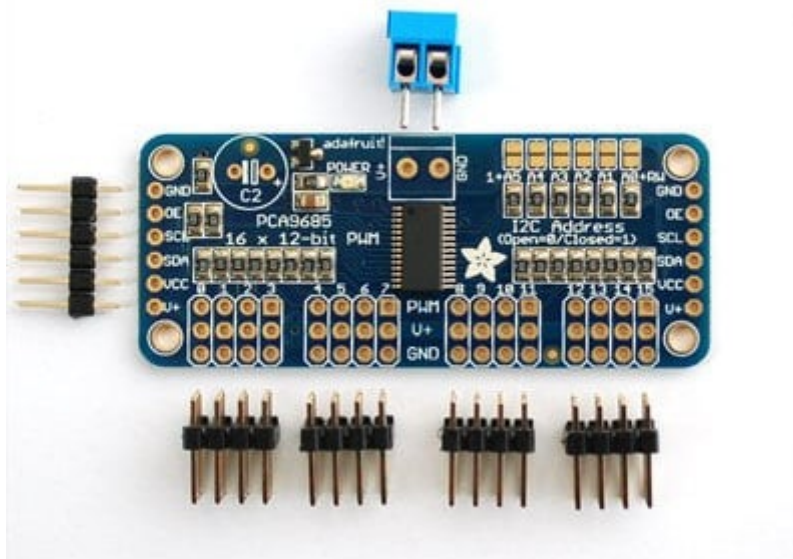
Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των διακοπών βασίζεται στο Arduino Mega 2560 Rev3, και στα περιφερειακά εξαρτήματα τύπου PCA 9685.



Σχήμα 4.3: Πλακέτα Arduino Mega 2560 Rev3.

Το Arduino Mega 2560 Rev3 είναι μια πλακέτα μικροελεγκτή η οποία βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega 2560. Έχει σχεδιαστεί για κατασκευές οι οποίες απαιτούν αρκετές ακίδες εισόδων / εξόδων. Τα προγράμματα του Arduino γράφονται σε μια απλοποιημένη έκδοση της C++. Παρέχεται επίσης μια ευρεία γκάμα βιβλιοθηκών για διάφορους αισθητήρες, οθόνες, και πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Το περιφερειακό τύπου PCA 9685 είναι ένας οδηγός PWM 16 καναλιών. Συνήθως χρησιμοποιείται για τον έλεγχο LED και σερβοκινητήρων σε κατασκευές ρομποτικής και συστημάτων φωτισμού.



Σχήμα 4.4: Περιφερειακή πλακέτα Adafruit PCA 9685.

4.3 Προγραμματισμός υλικού

Το πειραματικό μοντέλο απο άποψη αυτόματου ελέγχου, είναι σχεδιασμένο και υλοποιημένο σαν σύστημα ανοικτού βρόχου.

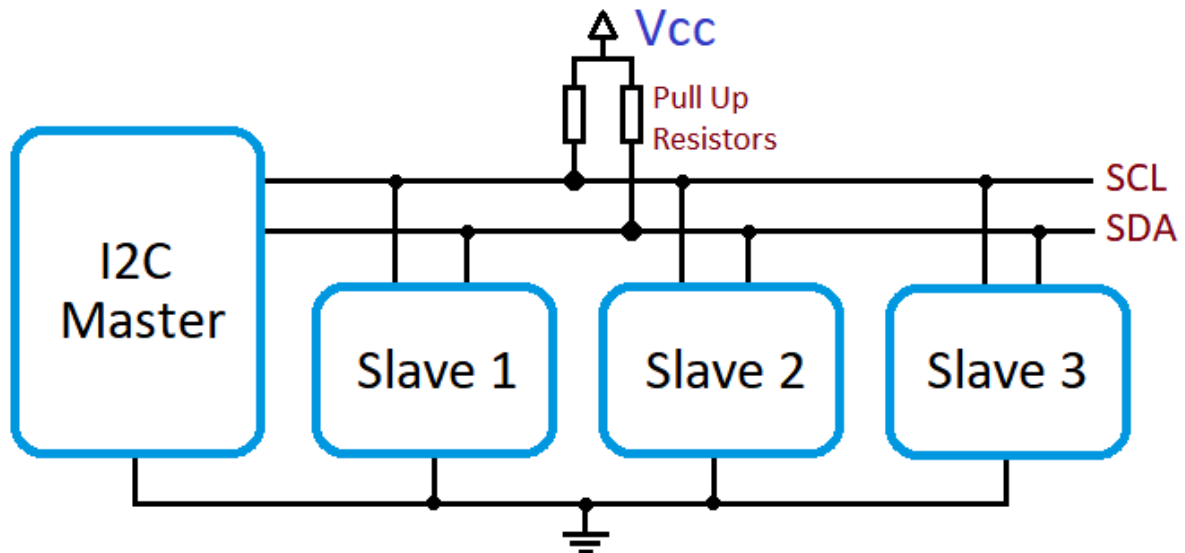
Η επικοινωνία του Arduino και των περιφερειακών εξαρτημάτων PCA 9685 επιτυγχάνεται με την βοήθεια του πρωτοκόλλου επικοινωνίας I2C.

Το I2C λειτουργεί σε μια αρχιτεκτονική master (Arduino) – slave (PCA 9685) όπου η κύρια συσκευή master ελέγχει το σήμα του ρολογιού και ξεκινά την επικοινωνία με συσκευές slave [35]. Η master συσκευή μπορεί να στείλει εντολές και να ζητήσει δεδομένα από τις slave συσκευές, οι οποίες ανταποκρίνονται μόνο όταν τους απευθύνεται η master. Κάθε συσκευή στο δίαυλο I2C αναγνωρίζεται από μια μοναδική διεύθυνση 7-bit ή 10-bit, διασφαλίζοντας την επικοινωνία με τη σωστή συσκευή ανά πάσα στιγμή.

Το υλικό του I2C αποτελείται από δύο αμφίδρομες γραμμές ανοιχτής εκροής: Τη γραμμή σειριακών δεδομένων SDA και τη γραμμή σειριακού ρολογιού SCL. Και οι δύο γραμμές οδηγούνται σε μια θετική τάση μέσω αντιστάσεων. Η επικοινωνία στο δίαυλο I2C περιλαμβάνει την master συσκευή που παράγει ένα σήμα ρολογιού στη γραμμή SCL και μεταδίδει δεδομένα στη γραμμή SDA. Δεδομένου ότι ο δίαυλος χρησιμοποιεί μια τοπολογία ανοιχτής εκροής, οι συσκευές μπορούν να οδηγήσουν τη γραμμή μόνο σε λογικό 0, διασφαλίζοντας ότι ο δίαυλος είναι κοινόχρηστος, καθώς πολλές συσκευές μπορούν να τραβήξουν τη γραμμή σε λογικό 0 χωρίς να βλάψουν η μία την άλλη.

Η μετάδοση δεδομένων στο δίαυλο I2C ακολουθεί μια συγκεκριμένη σειρά. Η επικοινωνία ξεκινά με μια συνθήκη START, όπου ο master τραβάει τη γραμμή SDA σε λογικό 0 ενώ το SCL είναι σε λογικό 1. Αυτό σηματοδοτεί όλες τις συνδεδεμένες συσκευές ότι ξεκινά η επικοινωνία. Ακολουθώντας τη συνθήκη START, ο master μεταδίδει τη διεύθυνση της στοχευμένης συσκευής slave μαζί με ένα bit ανάγνωσης/εγγραφής. Ο slave επιβεβαιώνει τραβώντας τη γραμμή SDA σε λογικό 0 κατά τη διάρκεια του παλμού επιβεβαίωσης του ρολογιού που δημιουργείται από τον master.

Μετά την επιβεβαίωση διεύθυνσης, μεταδίδονται bytes δεδομένων. Κάθε byte έχει μήκος 8 bit και ακολουθείται από ένα bit επιβεβαίωσης. Για byte δεδομένων που αποστέλλονται από τον master, ο slave επιβεβαιώνει τη λήψη τραβώντας τη γραμμή SDA σε λογικό 0 κατά τη διάρκεια του ένατου παλμού ρολογιού. Αντίθετα, όταν ο slave στέλνει δεδομένα, ο master το αναγνωρίζει τραβώντας τη γραμμή SDA σε λογικό 0. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να μεταδοθούν όλα τα δεδομένα. Η επικοινωνία τελειώνει με μια συνθήκη STOP, όπου ο master τραβάει τη γραμμή SDA σε λογικό 1 ενώ το SCL βρίσκεται σε λογικό 1, σηματοδοτώντας το τέλος της συναλλαγής και ελευθερώνοντας το δίαυλο για άλλες λειτουργίες.



Σχήμα 4.5: Τυπική διάταξη πρωτοκόλλου επικοινωνίας I2C.

Τα συγκεκριμένα περιφερειακά PCA λόγω του μικροελεγκτή του τους, αντιλαμβάνονται ένα χρονικό διάστημα της περιόδου ως έναν ακέραιο αριθμό από το 0 έως και το 4095. Επομένως, οι μεταγωγές των διακοπών πρέπει να μεταφραστούν στους αντίστοιχους αριθμούς μέσω του λογισμικού Arduino IDE και έπειτα να σταλούν στα αντίστοιχα κανάλια εξόδου των περιφερειακών. Χρησιμοποιήθηκαν 4 περιφερειακά τύπου PCA 9685, ένα για καθεμία από τις 3 φάσεις, και ένα για τους παλμούς ελεύθερης ροής.

4.4 Μετρήσεις και αποτελέσματα υλοποίησης

Δυστυχώς, λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής και ορισμένων τεχνικών αστοχιών κατά τη διάρκεια της φάσης της υλοποίησης, το πειραματικό μοντέλο δεν είναι λειτουργικό. Οι τεχνικές αστοχίες θα μπορούσαν να οφείλονται σε σε σχεδιαστικά λάθη, ασυμβατότητα υλικού, ή σφάλματα σχετικά με τη λογική ελέγχου.

Αρχικά, το μοντέλο κατά την υλοποίηση θα περιείχε την λειτουργία της ελεύθερης ροής του ρεύματος μέσω των κάτω διακοπών των μετατροπέων πλήρους γέφυρας. Ωστόσο, λόγω περιορισμών των περιφερειακών PCA 9685 σχετικά με τη συχνότητα λειτουργίας του κάθε περιφερειακού ξεχωριστά αλλά και των περιορισμένων ακμών πυροδότησης ανα περίοδο, η συγκεκριμένη λειτουργία δεν ενσωματώθηκε τελικά.

Κατα την τελική δοκιμή του πειραματικού μοντέλου στο εργαστήριο, δεν επιτεύχθηκε η λήψη κάποιας κυματομορφής τάσης εξόδου. Μετά απο έναν σύντομο έλεγχο μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι ενώ τα σήματα ελέγχου συχνότητας 50 Hz απο τα περιφερειακά PCA 9685 οδηγούνταν αποτελεσματικά στα κυκλώματα οδηγών των διακοπών, οι αντίστοιχοι παλμοί εξόδου των οδηγών για τους ακροδέκτες πύλης των MOSFET αντιστοιχούσαν σε σταθερές συχνότητες 15 Hz για τους κάτω και 1,5 kHz για τους πάνω διακόπτες.

4.5 Επίλογος

Αυτή η πτυχιακή εργασία στηρίχθηκε στη βασική, θεωρητική μελέτη των ηλεκτρονικών ισχύος με έμφαση στους ημιαγωγούς διακόπτες και τις εφαρμογές των αντιστροφών. Η θεωρητική ανάλυση κατέδειξε τα πιθανά πλεονεκτήματα των μετατροπών πολλαπλών επιπέδων σε σχέση με τους παραδοσιακούς, όπως η μειωμένη αρμονική παραμόρφωση, οι χαμηλότερες απώλειες μεταγωγής και η επεκτασιμότητα. Η προσομοίωση επιβεβαίωσε αυτά τα πλεονεκτήματα και παρείχε πληροφορίες για την απόδοση του μετατροπέα υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και δύο διαφορετικών διακοπτικών μοτίβων.

Παρά την επιτυχημένη φάση προσομοίωσης, η πρακτική εφαρμογή αντιμετώπισε προκλήσεις, ιδιαίτερα με τα περιφερειακά τύπου PCA 9685 αλλά και με τα κυκλώματα οδήγησης των MOSFET. Αυτά τα προβλήματα οδήγησαν στην αποτυχία του πρωτοτύπου να λειτουργήσει όπως προβλεπόταν. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται υπογραμμίζουν την κρίσιμη σημασία του σωστού κυκλώματος οδηγού σε σχέδια μετατροπών πολλαπλών επιπέδων.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Η προσομοίωση απέδειξε την πιθανή λειτουργία του αντιστροφέα με τη βοήθεια του MATLAB / Simulink. Προσομοιώθηκαν τα χαρακτηριστικά της διάταξης του συγκεκριμένου τύπου αντιστροφέα όπως η πολλαπλότητα, οι διαφορές λόγω αυξομείωσης του δείκτη διαμόρφωσης πλάτους, η συμπεριφορά του αντιστροφέα με διάφορες τιμές ωμικού – επαγωγικού φορτίου και εξηγήθηκε η λογική με την οποία ισοκατανεμήθηκε ο χρόνος αγωγής των μετατροπέων.

Όσον αφορά την υλοποίηση, μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στην συμβατότητα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων οδηγών τους, αλλά και των αποκλειστικών μονάδων ελέγχου. Θα μπορούσαν επίσης να είχαν επιλεγθεί MOSFET με χαμηλότερη τιμή $R_{DS(on)}$, για καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, το ξεχωριστό κόστος του κάθε διακόπτη κάνει την συνολική διάταξη πολύ πιο κοστοβόρα, λόγω του μεγάλου αριθμού των MOSFET που χρησιμοποιούνται. Η υλοποίηση σε τυπωμένη πλακέτα PCB ενώ διευκολύνει πολύ την αρκετά περίπλοκη σε σχέση με τη διάτρητη πλακέτα κατανομή των υλικών και των ακροδεκτών τους, εισάγει το κομμάτι της γνώσης του σχεδιασμού τυπωμένων πλακετών PCB, το οποίο συνοδεύεται από τη γνώση και εξοικείωση με αντίστοιχο λογισμικό, αλλά και υλικό όπως εξαρτήματα και σταθμούς κολλήσεων υλικών SMD.

Σχετικά με τον τελικό έλεγχο λειτουργίας, είναι κρίσιμος ο έλεγχος με παλμογράφο όλων των PWM σημάτων και των σημάτων πύλης των MOSFET στα συγκεκριμένα σημεία του κυκλώματος. Ο βαθμωτός έλεγχος της κάθε κυψέλης μετατροπέα ξεχωριστά για τον πιο εύκολο εντοπισμό σφαλμάτων επίσης συνίσταται.

Παρά την προσεκτική ενσωμάτωση του αλγόριθμου ελέγχου, ο μετατροπέας δεν λειτούργησε όπως έπρεπε. Αυτό το αποτέλεσμα, αν και απογοητευτικό, παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις πολυπλοκότητες και τους περιορισμούς που είναι εγγενείς στη μετάβαση από την προσομοίωση στη φυσική υλοποίηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1-12],[15,16,20] Κιοσκερίδης Ιορδάνης, Ηλεκτρονικά Ισχύος. Εκδόσεις Τζιόλα 2016, 2008.
- [13] Mahyar Khosravi, Sepehr Najafi Larijani , Seyed Saeed Fazel “Analytical Review of Voltage Source, Current Source and Impedance Source Inverters for Electrical Drive Applications” Conference Paper · October 2016
- [14] Y. Suresh, J. Venkataramanaiah, Anup Kumar Panda, C. Dhanamjayulu, P. Venugopal, “ Investigation on cascade multilevel inverter with symmetric, asymmetric, hybrid and multi-cell configurations ” Received 30 September 2014; revised 2 June 2016; accepted 18 September 2016
- [17,19] Othman Hassan Abdalla, Hesham Norallah, Ahmed Annhwi, Fawaz Fathi, “A Simple Staircase Modulation for A Cascaded H-bridge Multilevel Inverter ” Available online at www.ejournals.uofk.edu UofKEJ Vol. 9 Issue 2 pp. 18-24(Augustus 2019)
- [18] P. Cortés , A. Wilson, S. Kouro , J. Rodr´ıguez and H. Abu-Rub, “Model Predictive Control of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters”
- [21-24] IIT Delhi July 2018, “Cascaded H-bridge Multilevel Converters” <https://www.youtube.com/watch?v=NdGtyOZ6Vv8>
- [25] Analog Devices “Gate Drivers Half-/Full-Bridge N-Ch Pwr MOSFET Drvrs,” [LT1160CN#PBF Datasheet \(PDF\)](#)
- [26] Vishay / Siliconix “IRF830APBF-BE3,” [IRF830APBF-BE3 Datasheet](#)
- [27] Nichicon “Aluminium Electrolytic Capacitors - Radial Leaded 63V 2000uf 20% AEC-Q200,” [UBY1J202MHL Datasheet \(PDF\)](#)
- [28] KEMET “Aluminium Electrolytic Capacitors - Radial Leaded 63V 1000uF 105C 10k Hour Radial,” [EST108M063AM3AA Datasheet \(PDF\)](#)
- [29] KEMET “Aluminium Organic Polymer Capacitors 25Volt 10uF RAD 5Khr ESR=70 mOhms,” [A758BG106M1EDAE070 Datasheet \(PDF\)](#)
- [30] TDK “Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - Leaded 25V 1uF X7R 10% RAD LS:2.5mm AECQ200 ” [FA18X7R1E105KRU06 Datasheet \(PDF\)](#)
- [31] Diotec Semiconductor “Diodes - General Purpose, Power, Switching Small Signal Diode, DO-35, 100V, 0.2A, 175C ” [1N4148 Datasheet \(PDF\)](#)
- [32] TE Connectivity “IC & Component Sockets 14P DIP SKT 300 CL LADDER, ” [1-2199298-3 Datasheet \(PDF\)](#)
- [33] Arduino “Mega 2560 Rev3” Product Reference Manual SKU: A000067
- [34] Adafruit “PCA 9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller ” Rev. 4 — 16 April 2015
- [35] Posted by Scott Campbell | DIY Electronics | 61 “BASICS OF THE I2C COMMUNICATION PROTOCOL” <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας σε περιβάλλον Arduino IDE

Τα παραρτήματα μπορούν να είναι περισσότερα από ένα. Αριθμούνται με γράμματα του Ελληνικού αλφάβητου (Α, Β, Γ, ...).

Στα παραρτήματα παρουσιάζονται πληροφορίες που δεν είναι κρίσιμες για την εργασία, αλλά σημαντικές για την απόδειξη συμπερασμάτων που αναπτύχθηκαν στην εργασία. Περιέχουν κώδικα λογισμικού, ερωτηματολόγια και απαντήσεις σε ερωτηματολόγια, κτλ.

Σε αυτό το παράρτημα, επισυνάπτεται ο κώδικας ελέγχου του Arduino και των περιφερειακών τύπου Adafruit στο περιβάλλον του Arduino IDE.

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>
```

```
Adafruit_PWMServoDriver pwmA = Adafruit_PWMServoDriver(0x40);
```

```
Adafruit_PWMServoDriver pwmB = Adafruit_PWMServoDriver(0x41);
```

```
Adafruit_PWMServoDriver pwmC = Adafruit_PWMServoDriver(0x42);
```

```
Adafruit_PWMServoDriver pwmF = Adafruit_PWMServoDriver(0x43);
```

```
float VDC = 30; // Τάση πηγών τροφοδοσίας.
```

```
float VDC_half = VDC / 2;
```

```
float mod_index = 1; // Δείκτης διαμόρφωσης πλάτους.
```

```
float sineamp = VDC * 3 * mod_index; // Πλάτος ημιτόνου αναφοράς.
```

```
float VDC_low = VDC_half; // Τάση σύγκρισης ημιτόνου με το επίπεδο 1.
```

```
float VDC_mid = VDC_half + VDC; // Τάση σύγκρισης ημιτόνου με το επίπεδο 2.
```

```
float VDC_high = VDC_half + VDC + VDC; // Τάση σύγκρισης ημιτόνου με το επίπεδο 3.
```

```
float angle_low_rads = asin( VDC_low / sineamp ); // Υπολογισμοί τόξου ημιτόνου.
```

```
float angle_mid_rads = asin( VDC_mid / sineamp );
```

```
float angle_high_rads = asin( VDC_high / sineamp );
```

```
int angle_low = ( angle_low_rads / ( 2*PI ) ) * 4096; // Υπολογισμοί γωνίας πυροδότησης αναφοράς.
```

```
int angle_mid = ( angle_mid_rads / ( 2*PI ) ) * 4096;
```

```
int angle_high = ( angle_high_rads / ( 2*PI ) ) * 4096;
```

```

int fosc = 20e6; // Συχνότητα slave ταλαντωτών Adafruit PCA 9685.
int f = 50; // Συχνότητα διακοπτικής λειτουργίας.
float T = 1 / f; // Περίοδος διακοπτικής λειτουργίας.

int A = 0; // Διαδοχή φάσεων.
int B = 4096 / 3;
int C = ( 4096 / 3 ) * 2;

int A_low1 = A + angle_low; // Γωνίες πυροδότησης φάσης A, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 1.
int A_low2 = A + 2048 - angle_low;
int A_low3 = A + 2048 + angle_low; // Γωνίες πυροδότησης φάσης A, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 1.
int A_low4 = A + 4096 - angle_low;

int A_mid1 = A + angle_mid; // Γωνίες πυροδότησης φάσης A, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 2.
int A_mid2 = A + 2048 - angle_mid;
int A_mid3 = A + 2048 + angle_mid; // Γωνίες πυροδότησης φάσης A, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 2.
int A_mid4 = A + 4096 - angle_mid;

int A_high1 = A + angle_high; // Γωνίες πυροδότησης φάσης A, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 3.
int A_high2 = A + 2048 - angle_high;
int A_high3 = A + 2048 + angle_high; // Γωνίες πυροδότησης φάσης A, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 3.
int A_high4 = A + 4096 - angle_high;

int B_low1 = B + angle_low; // Γωνίες πυροδότησης φάσης B, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 1.
int B_low2 = B + 2048 - angle_low;
int B_low3 = B + 2048 + angle_low; // Γωνίες πυροδότησης φάσης B, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 1.
int B_low4 = B + 4096 - angle_low;

```

```

int B_mid1 = B + angle_mid; // Γωνίες πυροδότησης φάσης B, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 2.
int B_mid2 = B + 2048 - angle_mid;
int B_mid3 = B + 2048 + angle_mid; // Γωνίες πυροδότησης φάσης B, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 2.
int B_mid4 = B + 4096 - angle_mid;

int B_high1 = B + angle_high; // Γωνίες πυροδότησης φάσης B, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 3.
int B_high2 = B + 2048 - angle_high;
int B_high3 = B + 2048 + angle_high; // Γωνίες πυροδότησης φάσης B, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 3.
int B_high4 = B + 4096 - angle_high;

int C_low1 = C + angle_low; // Γωνίες πυροδότησης φάσης C, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 1.
int C_low2 = C + 2048 - angle_low;
int C_low3 = C + 2048 + angle_low; // Γωνίες πυροδότησης φάσης C, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 1.
int C_low4 = C + 4096 - angle_low;

int C_mid1 = C + angle_mid; // Γωνίες πυροδότησης φάσης C, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 2.
int C_mid2 = C + 2048 - angle_mid;
int C_mid3 = C + 2048 + angle_mid; // Γωνίες πυροδότησης φάσης C, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 2.
int C_mid4 = C + 4096 - angle_mid;

int C_high1 = C + angle_high; // Γωνίες πυροδότησης φάσης C, θετικής ημιπεριόδου, επιπέδου 3.
int C_high2 = C + 2048 - angle_high;
int C_high3 = C + 2048 + angle_high; // Γωνίες πυροδότησης φάσης C, αρνητικής ημιπεριόδου,
επιπέδου 3.
int C_high4 = C + 4096 - angle_high;

int F_wheelAon = A + 4096 - ( 2 * angle_low ); // Παλμοί ελεύθερης ροής.

```

```
int F_wheelAoff = A + 4096 + ( 2 * angle_low );
int F_wheelBon = B + 4096 - ( 2 * angle_low );
int F_wheelBoff = B + 4096 + ( 2 * angle_low );
int F_wheelCon = C + 4096 - ( 2 * angle_low );
intF_wheelCoff = C + 4096 + ( 2 * angle_low );
;
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
  Serial.begin(9600); //Έναρξη σειριακής επικοινωνίας.
```

```
  Wire.begin(); //Έναρξη επικοινωνίας I2C.
```

```
  pwmA.begin();
```

```
  pwmA.setOscillatorFrequency(fosc);
```

```
  pwmA.setPWMFreq(f);
```

```
  pwmB.begin();
```

```
  pwmB.setOscillatorFrequency(fosc);
```

```
  pwmB.setPWMFreq(f);
```

```
  pwmC.begin();
```

```
  pwmC.setOscillatorFrequency(fosc);
```

```
  pwmC.setPWMFreq(f);
```

```
  pwmF.begin();
```

```
  pwmF.setOscillatorFrequency(fosc);
```

```
  pwmF.setPWMFreq(2*f);
```

```
  pinMode(2, INPUT); // Ορισμός I/O pins για τους 6 freewheeling διακόπτες της φάσης A.
```

```
pinMode(3, INPUT);  
pinMode(4, OUTPUT); // LOW LEFT A
```

```
pinMode(5, INPUT);  
pinMode(6, INPUT);  
pinMode(7, OUTPUT); // LOW RIGHT A
```

```
pinMode(8, INPUT);  
pinMode(9, INPUT);  
pinMode(10, OUTPUT); // MID LEFT A
```

```
pinMode(11, INPUT);  
pinMode(12, INPUT);  
pinMode(13, OUTPUT); // MID RIGHT A
```

```
pinMode(22, INPUT);  
pinMode(23, INPUT);  
pinMode(24, OUTPUT); // HIGH LEFT A
```

```
pinMode(25, INPUT);  
pinMode(26, INPUT);  
pinMode(27, OUTPUT); // HIGH RIGHT A
```

```
pinMode(28, INPUT); // Ορισμός I/O pins για τους 6 freewheeling διακόπτες της φάσης B.  
pinMode(29, INPUT);  
pinMode(30, OUTPUT); // LOW LEFT B
```

```
pinMode(31, INPUT);  
pinMode(32, INPUT);  
pinMode(33, OUTPUT); // LOW RIGHT B
```

```
pinMode(34, INPUT);  
pinMode(35, INPUT);  
pinMode(36, OUTPUT); // MID LEFT B
```

```
pinMode(37, INPUT);  
pinMode(38, INPUT);  
pinMode(39, OUTPUT); // MID RIGHT B
```

```
pinMode(40, INPUT);  
pinMode(41, INPUT);  
pinMode(42, OUTPUT); // HIGH LEFT B
```

```
pinMode(43, INPUT);  
pinMode(44, INPUT);  
pinMode(45, OUTPUT); // HIGH RIGHT B
```

```
pinMode(46, INPUT); // Ορισμός I/O pins για τους 6 freewheeling διακόπτες της φάσης C.  
pinMode(47, INPUT);  
pinMode(48, OUTPUT); // LOW LEFT C
```

```
pinMode(49, INPUT);  
pinMode(50, INPUT);  
pinMode(51, OUTPUT); // LOW RIGHT C
```

```
pinMode(A0, INPUT);  
pinMode(A1, INPUT);  
pinMode(A2, OUTPUT); // MID LEFT C
```

```
pinMode(A3, INPUT);  
pinMode(A4, INPUT);  
pinMode(A5, OUTPUT); // MID RIGHT C
```

```

pinMode(A6, INPUT);
pinMode(A7, INPUT);
pinMode(A8, OUTPUT); // HIGH LEFT C

pinMode(A9, INPUT);
pinMode(A10, INPUT);
pinMode(A11, OUTPUT); // HIGH RIGHT C

delay(1000);
}

void loop()
{

if( A_low1 >= 4096 ) // Έλεγχος υπερχείλισης γωνιών φάσης A.
{
A_low1 = A_low1 - 4096;
}
if( A_low2 >= 4096 )
{
A_low2 = A_low2 - 4096;
}
if( A_low3 >= 4096 )
{
A_low3 = A_low3 - 4096;
}
if( A_low4 >= 4096 )
{
A_low4 = A_low4 - 4096;
}
if( A_mid1 >= 4096 )
{

```

```
A_mid1 = A_mid1 - 4096;
}
if( A_mid2 >= 4096 )
{
A_mid2 = A_mid2 - 4096;
}
if( A_mid3 >= 4096 )
{
A_mid3 = A_mid3 - 4096;
}
if( A_mid4 >= 4096 )
{
A_mid4 = A_mid4 - 4096;
}
if( A_high1 >= 4096 )
{
A_high1 = A_high1 - 4096;
}
if( A_high2 >= 4096 )
{
A_high2 = A_high2 - 4096;
}
if( A_high3 >= 4096 )
{
A_high3 = A_high3 - 4096;
}
if( A_high4 >= 4096 )
{
A_high4 = A_high4 - 4096;
}
```

```
if( B_low1 >= 4096 ) //Έλεγχος υπερχείλισης γωνιών φάσης B.
{
    B_low1 = B_low1 - 4096;
}
if( B_low2 >= 4096 )
{
    B_low2 = B_low2 - 4096;
}
if( B_low3 >= 4096 )
{
    B_low3 = B_low3 - 4096;
}
if( B_low4 >= 4096 )
{
    B_low4 = B_low4 - 4096;
}
if( B_mid1 >= 4096 )
{
    B_mid1 = B_mid1 - 4096;
}
if( B_mid2 >= 4096 )
{
    B_mid2 = B_mid2 - 4096;
}
if( B_mid3 >= 4096 )
{
    B_mid3 = B_mid3 - 4096;
}
if( B_mid4 >= 4096 )
{
    B_mid4 = B_mid4 - 4096;
```

```
}  
if( A_high1 >= 4096 )  
{  
    B_high1 = B_high1 - 4096;  
}  
if( B_high2 >= 4096 )  
{  
    B_high2 = B_high2 - 4096;  
}  
if( B_high3 >= 4096 )  
{  
    B_high3 = B_high3 - 4096;  
}  
if( B_high4 >= 4096 )  
{  
    B_high4 = B_high4 - 4096;  
}
```

```
if( C_low1 >= 4096 ) // Έλεγχος υπερχείλισης γωνιών φάσης C.  
{  
    C_low1 = C_low1 - 4096;  
}  
if( C_low2 >= 4096 )  
{  
    C_low2 = C_low2 - 4096;  
}  
if( C_low3 >= 4096 )  
{  
    C_low3 = C_low3 - 4096;
```

```
    }  
if( C_low4 >= 4096 )  
    {  
        C_low4 = C_low4 - 4096;  
    }  
if( C_mid1 >= 4096 )  
    {  
        C_mid1 = C_mid1 - 4096;  
    }  
if( C_mid2 >= 4096 )  
    {  
        C_mid2 = C_mid2 - 4096;  
    }  
if( C_mid3 >= 4096 )  
    {  
        C_mid3 = C_mid3 - 4096;  
    }  
if( C_mid4 >= 4096 )  
    {  
        C_mid4 = C_mid4 - 4096;  
    }  
if( C_high1 >= 4096 )  
    {  
        C_high1 = C_high1 - 4096;  
    }  
if( C_high2 >= 4096 )  
    {  
        C_high2 = C_high2 - 4096;  
    }  
if( C_high3 >= 4096 )  
    {  
        C_high3 = C_high3 - 4096;  
    }
```

```
if( C_high4 >= 4096 )
```

```
{
```

```
    C_high4 = C_high4 - 4096;
```

```
}
```

```
if( F_wheelAon >= 4096 ) //Έλεγχος υπερχείλισης γωνιών freewheeling.
```

```
{
```

```
    F_wheelAon = F_wheelAon - 4096;
```

```
}
```

```
if( F_wheelAoff >= 4096 )
```

```
{
```

```
    F_wheelAoff = F_wheelAoff - 4096;
```

```
}
```

```
if( F_wheelBon >= 4096 )
```

```
{
```

```
    F_wheelBon = F_wheelBon - 4096;
```

```
}
```

```
if( F_wheelBoff >= 4096 )
```

```
{
```

```
    F_wheelBoff = F_wheelBoff - 4096;
```

```
}
```

```
if( F_wheelCon >= 4096 )
```

```
{
```

```
    F_wheelCon = F_wheelCon - 4096;
```

```
}
```

```
if( F_wheelCoff >= 4096 )
```

```
{
```

```
    F_wheelCoff = F_wheelCoff - 4096;
```

```
}
```

```
pwmA.setPWM(0,A_low1,A_low2); // I2C Slave 0x40
```

```
pwmA.setPWM(1,A_mid1,A_mid2);
```

```
pwmA.setPWM(2,A_high1,A_high2);
```

```
pwmA.setPWM(4,A_low3,A_low4);
```

```
pwmA.setPWM(5,A_mid3,A_mid4);
```

```
pwmA.setPWM(6,A_high3,A_high4);
```

```
pwmA.setPWM(8,A_low1,A_low2);
```

```
pwmA.setPWM(9,A_mid1,A_mid2);
```

```
pwmA.setPWM(10,A_high1,A_high2);
```

```
pwmA.setPWM(12,A_low3,A_low4);
```

```
pwmA.setPWM(13,A_mid3,A_mid4);
```

```
pwmA.setPWM(14,A_high3,A_high4);
```

```
pwmB.setPWM(0,B_low1,B_low2); // I2C Slave 0x41
```

```
pwmB.setPWM(1,B_mid1,B_mid2);
```

```
pwmB.setPWM(2,B_high1,B_high2);
```

```
pwmB.setPWM(4,B_low3,B_low4);
```

```
pwmB.setPWM(5,B_mid3,B_mid4);
```

```
pwmB.setPWM(6,B_high3,B_high4);
```

```
pwmB.setPWM(8,B_low1,B_low2);
```

```
pwmB.setPWM(9,B_mid1,B_mid2);
```

```
pwmB.setPWM(10,B_high1,B_high2);
```

```
pwmB.setPWM(12,B_low3,B_low4);
```

```
pwmB.setPWM(13,B_mid3,B_mid4);
```

```
pwmB.setPWM(14,B_high3,B_high4);
```

```
pwmC.setPWM(0,C_low1,C_low2); // I2C Slave 0x42
```

```
pwmC.setPWM(1,C_mid1,C_mid2);
```

```
pwmC.setPWM(2,C_high1,C_high2);
```

```
pwmC.setPWM(4,C_low3,C_low4);
```

```
pwmC.setPWM(5,C_mid3,C_mid4);
```

```
pwmC.setPWM(6,C_high3,C_high4);
```

```
pwmC.setPWM(8,C_low1,C_low2);
```

```
pwmC.setPWM(9,C_mid1,C_mid2);
```

```
pwmC.setPWM(10,C_high1,C_high2);
```

```
pwmC.setPWM(12,C_low3,C_low4);
```

```
pwmC.setPWM(13,C_mid3,C_mid4);
```

```
pwmC.setPWM(14,C_high3,C_high4);
```

```
pwmF.setPWM(0,F_wheelAon,F_wheelAoff); // I2C Slave 0x43, freewheeling.
```

```
pwmF.setPWM(1,F_wheelAon,F_wheelAoff);
```

```
pwmF.setPWM(2,F_wheelAon,F_wheelAoff);
```

```
pwmF.setPWM(3,F_wheelAon,F_wheelAoff);
```

```
pwmF.setPWM(4,F_wheelBon,F_wheelBoff);
```

```
pwmF.setPWM(5,F_wheelBon,F_wheelBoff);
```

```
pwmF.setPWM(6,F_wheelBon,F_wheelBoff);
```

```
pwmF.setPWM(7,F_wheelBon,F_wheelBoff);
```

```
pwmF.setPWM(8,F_wheelCon,F_wheelCoff);
```

```
pwmF.setPWM(9,F_wheelCon,F_wheelCoff);  
pwmF.setPWM(10,F_wheelCon,F_wheelCoff);  
pwmF.setPWM(11,F_wheelCon,F_wheelCoff);
```

```
if ( digitalRead(2) == HIGH || digitalRead(3) == HIGH) // Ψηφιακή έξοδος σημάτων φάσης Α με  
σήματα freewheeling, έλεγχος.
```

```
{  
  digitalWrite(4, HIGH);
```

```
}
```

```
else
```

```
{  
  digitalWrite(4, LOW);
```

```
}
```

```
if ( digitalRead(5) == HIGH || digitalRead(6) == HIGH)
```

```
{  
  digitalWrite(7, HIGH);
```

```
}
```

```
else
```

```
{  
  digitalWrite(7, LOW);
```

```
}
```

```
if ( digitalRead(8) == HIGH || digitalRead(9) == HIGH)
```

```
{  
  digitalWrite(10, HIGH);
```

```
}
```

```
else
```

```
{  
  digitalWrite(10, LOW);
```

```
}
```

```
if ( digitalRead(11) == HIGH || digitalRead(12) == HIGH)
```

```
{
```

```
    digitalWrite(13, HIGH);
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
    digitalWrite(13, LOW);
```

```
}
```

```
if ( digitalRead(22) == HIGH || digitalRead(23) == HIGH)
```

```
{
```

```
    digitalWrite(24, HIGH);
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
    digitalWrite(24, LOW);
```

```
}
```

```
if ( digitalRead(25) == HIGH || digitalRead(26) == HIGH)
```

```
{
```

```
    digitalWrite(27, HIGH);
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
    digitalWrite(27, LOW);
```

```
}
```

```
if ( digitalRead(28) == HIGH || digitalRead(29) == HIGH) // Ψηφιακή έξοδος σημάτων φάσης B με  
σήματα freewheeling, έλεγχος.
```

```
{
```

```
    digitalWrite(30, HIGH);
```

```
}  
else  
{  
    digitalWrite(30, LOW);  
}  
  
if ( digitalRead(31) == HIGH || digitalRead(32) == HIGH)  
{  
    digitalWrite(33, HIGH);  
}  
else  
{  
    digitalWrite(33, LOW);  
}  
  
if ( digitalRead(34) == HIGH || digitalRead(35) == HIGH)  
{  
    digitalWrite(36, HIGH);  
}  
else  
{  
    digitalWrite(36, LOW);  
}  
  
if ( digitalRead(37) == HIGH || digitalRead(38) == HIGH)  
{  
    digitalWrite(39, HIGH);  
}  
else  
{  
    digitalWrite(39, LOW);  
}
```

```
if ( digitalRead(40) == HIGH || digitalRead(41) == HIGH)
{
    digitalWrite(42, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(42, LOW);
}
```

```
if ( digitalRead(43) == HIGH || digitalRead(44) == HIGH)
{
    digitalWrite(45, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(45, LOW);
}
```

```
if ( digitalRead(46) == HIGH || digitalRead(47) == HIGH) // Ψηφιακή έξοδος σημάτων φάσης C με  
σήματα freewheeling, έλεγχος.
```

```
{
    digitalWrite(48, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(48, LOW);
}
```

```
if ( digitalRead(49) == HIGH || digitalRead(50) == HIGH)
{
    digitalWrite(51, HIGH);
}
else
```

```
{  
  digitalWrite(51, LOW);  
}
```

```
if ( digitalRead(A0) == HIGH || digitalRead(A1) == HIGH)  
{  
  digitalWrite(A2, HIGH);  
}  
else  
{  
  digitalWrite(A2, LOW);  
}
```

```
if ( digitalRead(A3) == HIGH || digitalRead(A4) == HIGH)  
{  
  digitalWrite(A5, HIGH);  
}  
else  
{  
  digitalWrite(A5, LOW);  
}
```

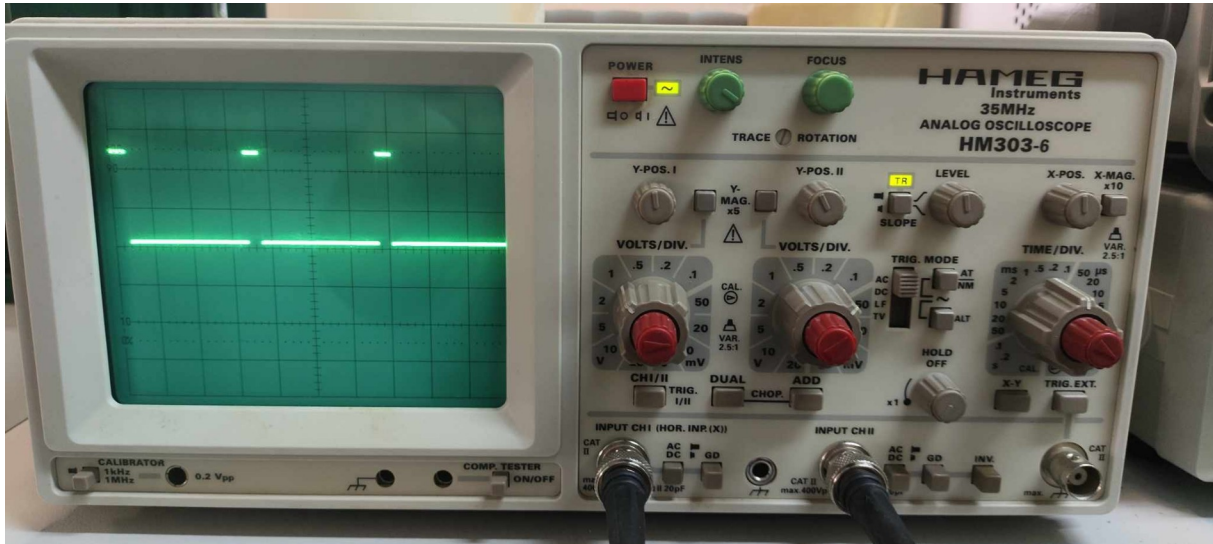
```
if ( digitalRead(A6) == HIGH || digitalRead(A7) == HIGH)  
{  
  digitalWrite(A8, HIGH);  
}  
else  
{  
  digitalWrite(A8, LOW);  
}
```

```
if ( digitalRead(A9) == HIGH || digitalRead(A10) == HIGH)  
{
```

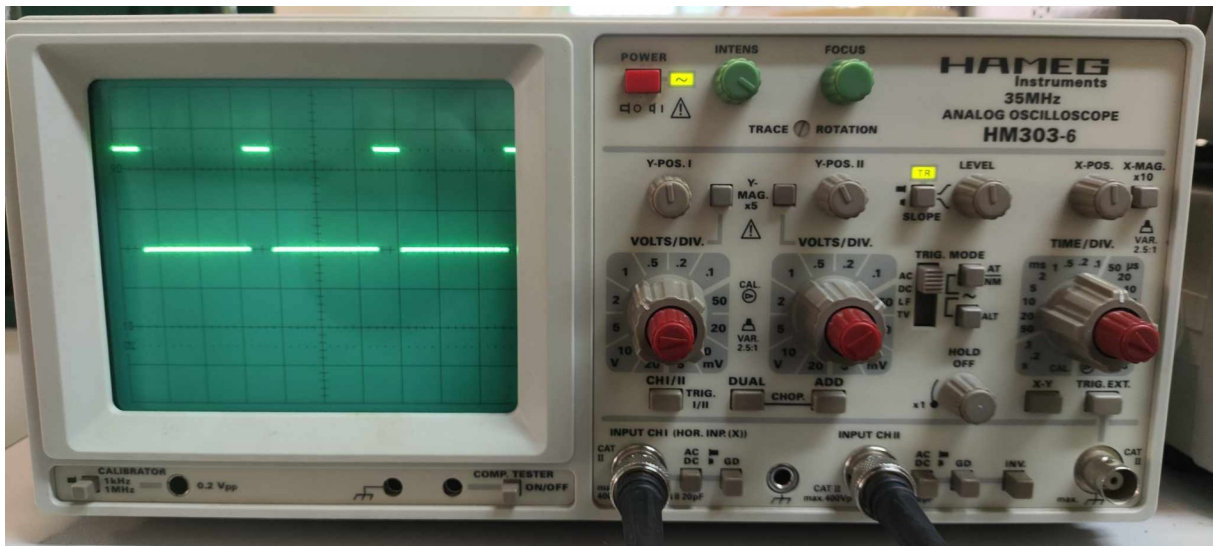
```
    digitalWrite(A11, HIGH);  
  }  
  else  
  {  
    digitalWrite(A11, LOW);  
  }  
}
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κυματομορφές ελέγχου PCA 9685

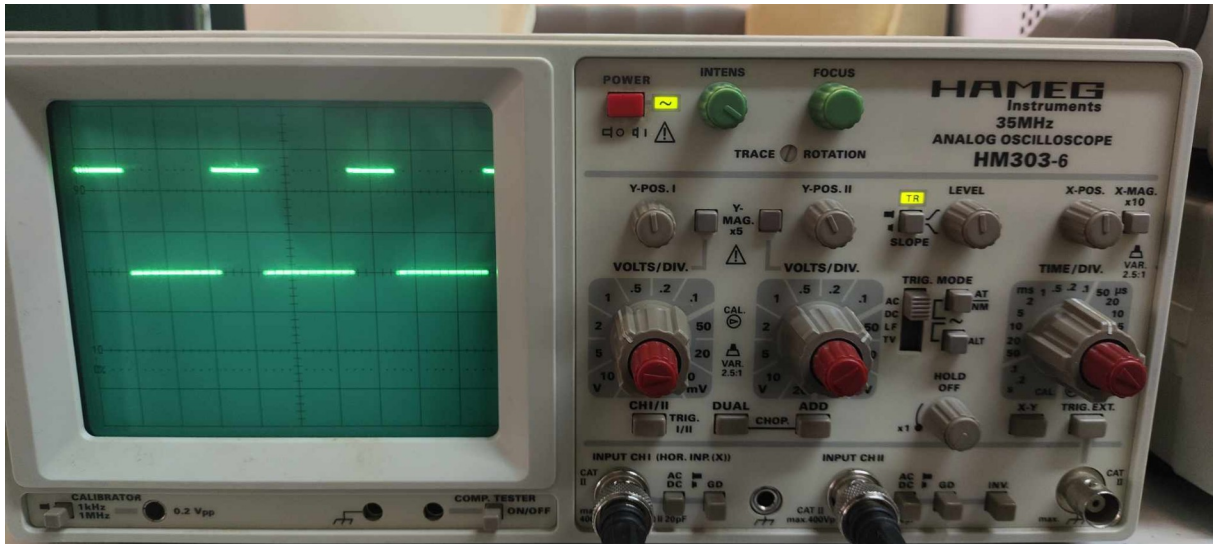
Σε αυτό το παράρτημα επισυνάπτονται οι 4 κυματομορφές των διαφόρων κύκλων λειτουργίας για δείκτη διαμόρφωσης πλάτους $m=1$ στη φάση Α.



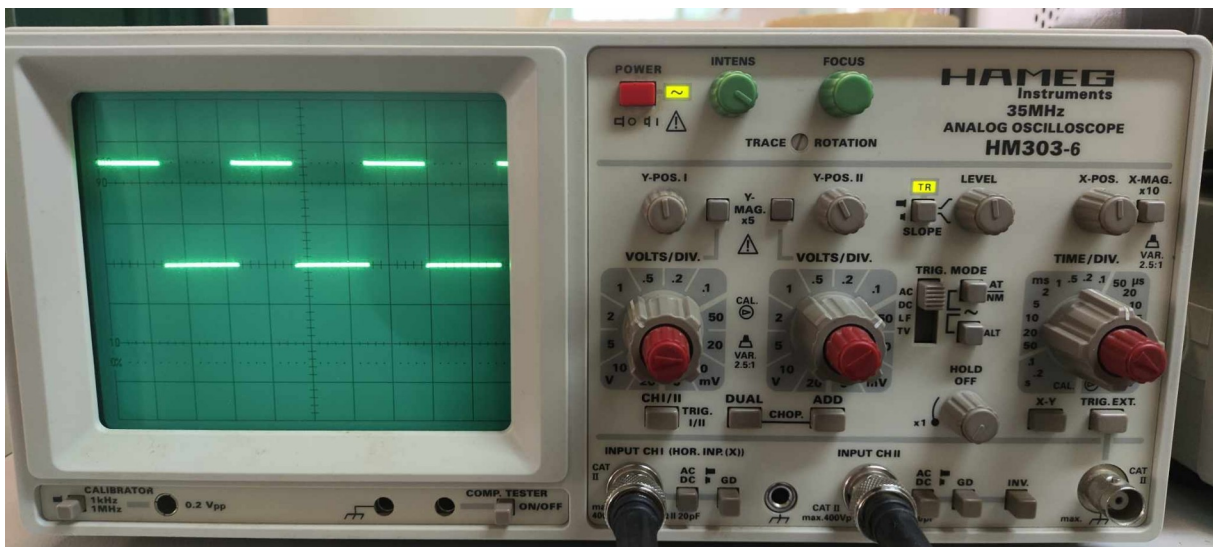
Σχήμα 1: Παλμοί ελεύθερης ροής.



Σχήμα 2: Παλμοί θετικής ημιπερίόδου 3ου επιπέδου μετατροπέων.



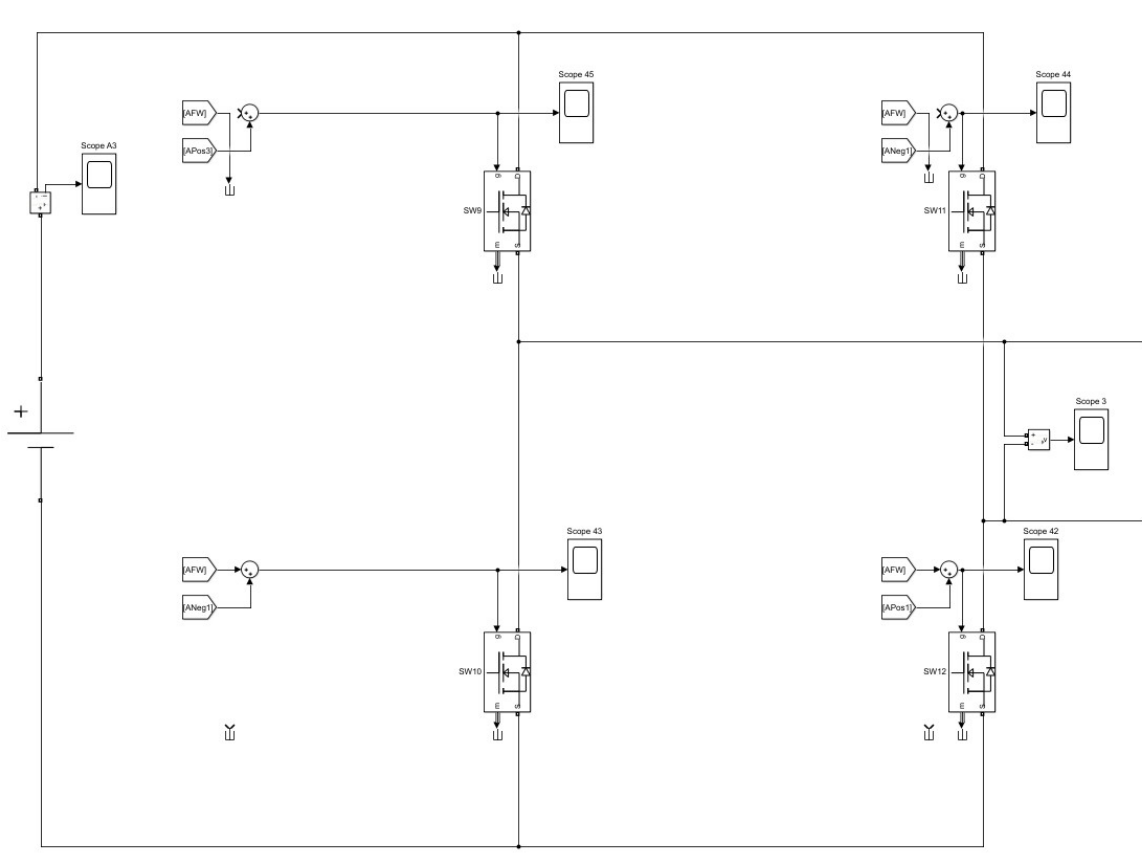
Σχήμα 3: Παλμοί θετικής ημιπεριόδου 2ου επιπέδου μετατροπέων.



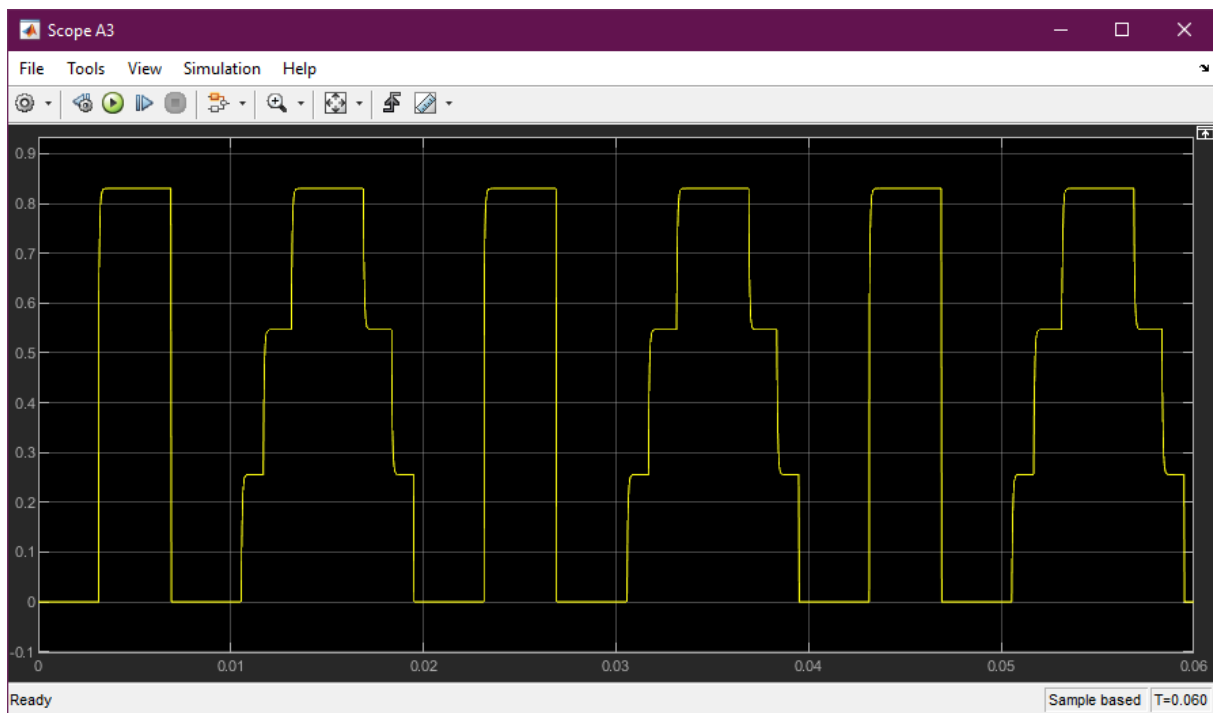
Σχήμα 4: Παλμοί θετικής ημιπεριόδου 1ου επιπέδου μετατροπέων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : Κατανομή παλμών ελέγχου

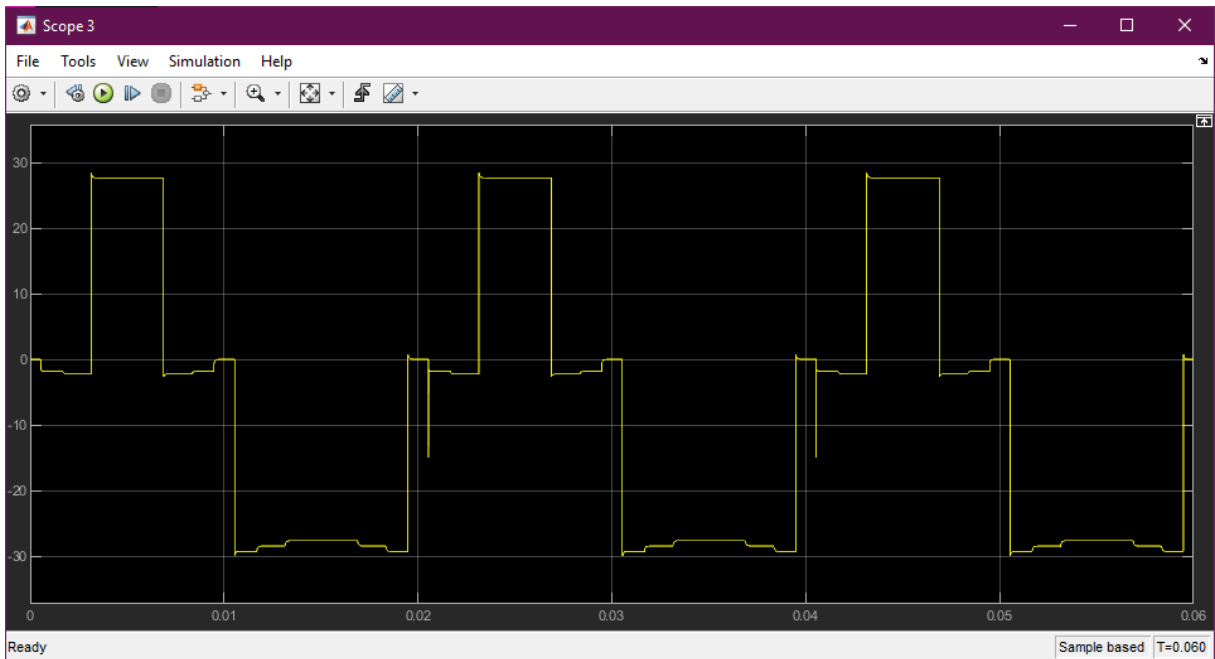
Η κατανομή των παλμών ελέγχου πραγματοποιήθηκε με βάση το σχέδιο της προσομοίωσης. Σε αυτό το παράρτημα επισυνάπτονται οι μεταροπείς κάθε επιπέδου της φάσης Α με τους αντίστοιχους παλμούς ελέγχου και τα πιο ισορροπημένα ρεύματα εισόδου. Υπενθυμίζεται ότι στα σχήματα 3.2 και 3.12 παρουσιάζεται η δημιουργία του κάθε παλμού ελέγχου και ελεύθερης ροής.



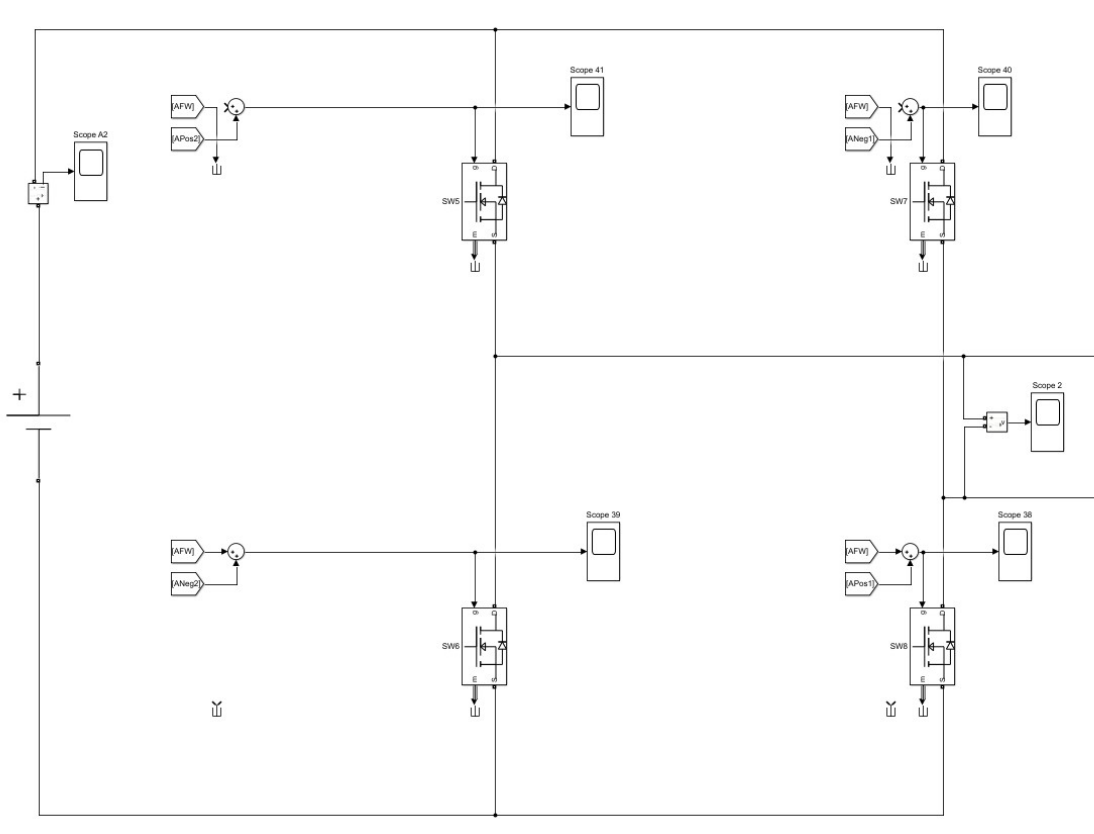
Σχήμα 1: Μετατροπέας Η3.



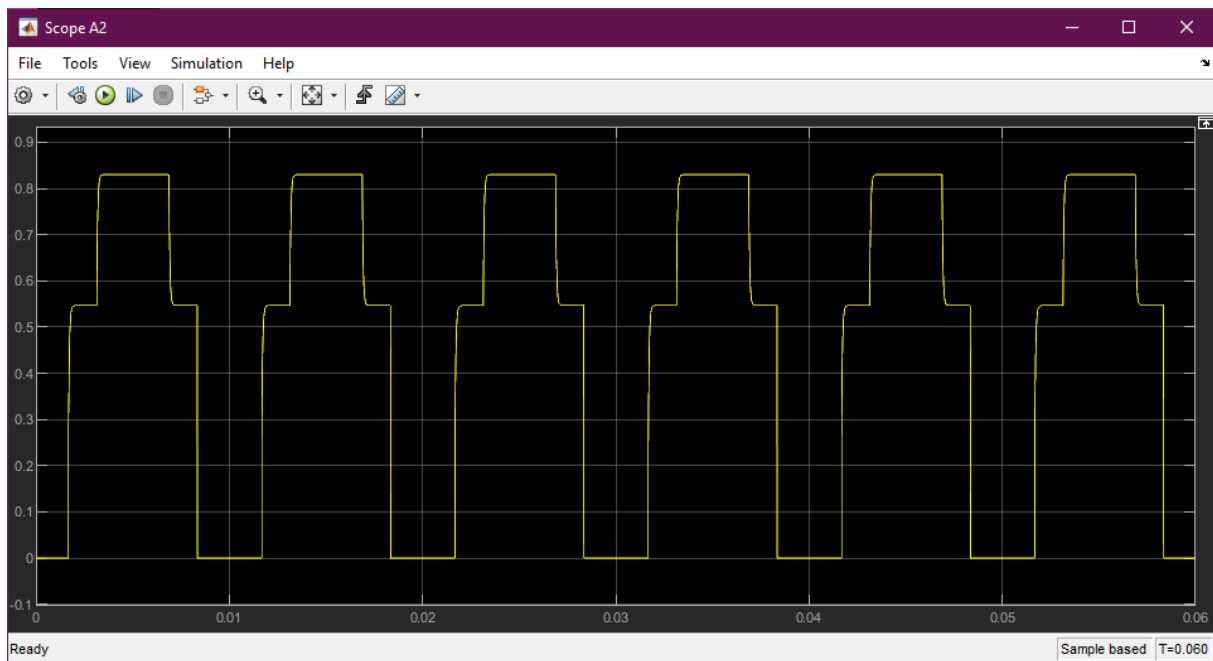
Σχήμα 2: Ρεύμα εισόδου του μετατροπέα Η3.



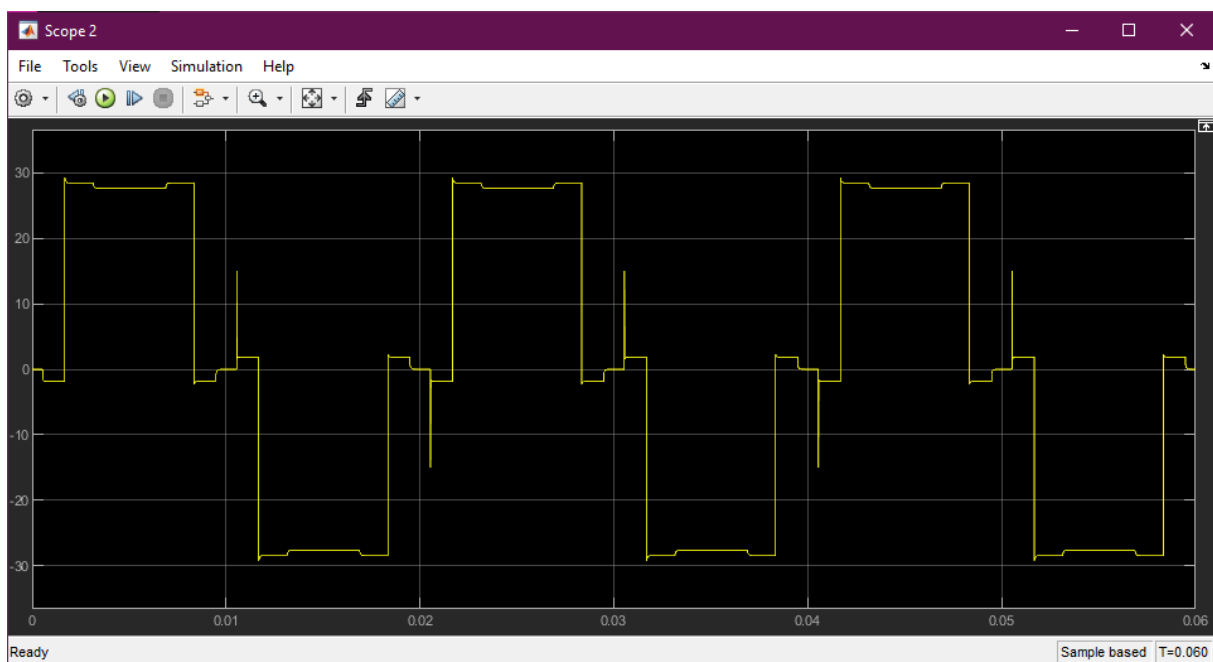
Σχήμα 3: Τάση εξόδου του μετατροπέα Η3.



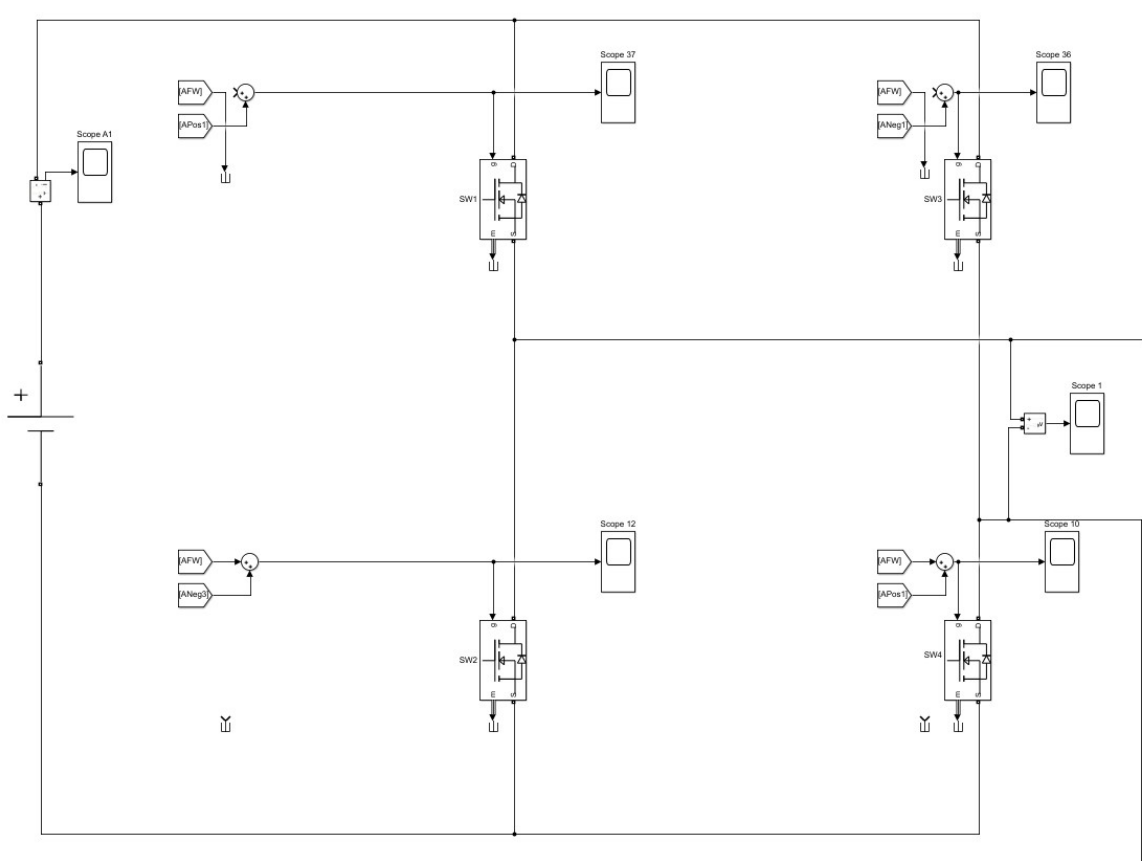
Σχήμα 4: Μετατροπέας Η2.



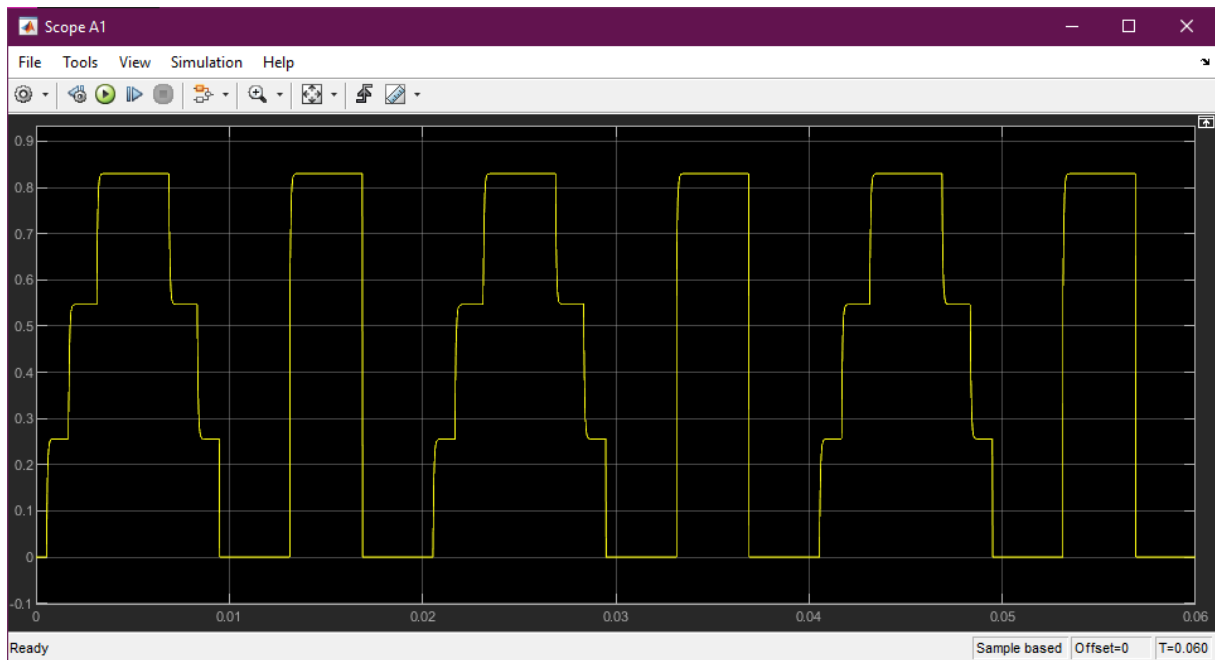
Σχήμα 5: Ρεύμα εισόδου του μετατροπέα Η2.



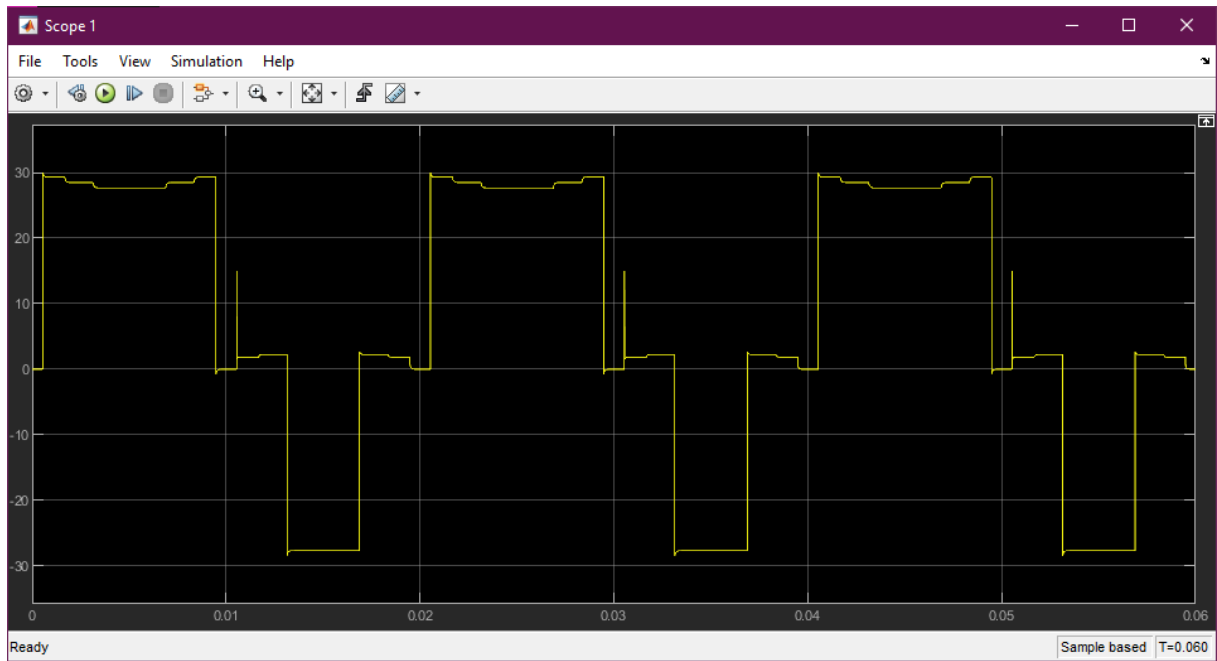
Σχήμα 6: Τάση εξόδου του μετατροπέα Η2.



Σχήμα 7: Μετατροπέας H1.



Σχήμα 8: Ρεύμα εισόδου του μετατροπέα H1.



Σχήμα 9: Τάση εξόδου του μετατροπέα Η1.