

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

1653

**ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΟΣ
ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ Ε.Ρ. ΜΕ IGBT ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΣ
ΜΕΣΩ ΜΙΚΡΟΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ ARDUINO DUE**

ΣΙΝΓΚ ΓΚΟΥΡΠΙΤ

ΚΟΤΣΙΑΙ ΛΕΝΤΙΟΝ

**ΕΠΟΠΤΕΥΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: ΓΕΩΡΓΑΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ,
ΔΑΛΛΑΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ**

ΠΑΤΡΑ - 2018

©2018, Copyright υπό Σίνγκ Γκουπρίτ και Κοτσιάι Λεντιόν.

All rights reserved.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζει την κατασκευή και τη λειτουργία ενός ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενης τάσης ο οποίος παλμοδοτείται μέσω του επεξεργαστή Arduino. Αυτός ο ρυθμιζόμενος διακόπτης έχει τη δυνατότητα να ελέγξει την εναλλασσόμενη τάση με ελάχιστες απώλειες. Ο ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενης τάσης ανήκει στη κατηγορία των διατάξεων των ηλεκτρονικών ισχύος που ο βασικός τους σκοπός είναι η διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος. Οι διατάξεις αυτές δεν παράγουν ισχύ αλλά την διαχειρίζονται. Η λειτουργία τους διαχωρίζονται σε τέσσερις βασικές υποκατηγορίες:

- 1.Ανορθωτική διάταξη (AC σε DC).
- 2.Αντιστροφέας (DC σε AC).
- 3.Μετατροπέας AC τάσης σε μια άλλη AC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά.
4. Μετατροπέας DC τάσης σε μια άλλη DC τάση.

Ο ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενης τάσης ανήκει στην 3^η κατηγορία των παραπάνω, και ελέγχει την RMS τιμή της τάσης φορτίου.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι κατηγορίες μετατροπέων ισχύος με τις αντίστοιχες εφαρμογές τους. Επιπλέον, αναλύεται η χρησιμότητα ενός μονοφασικού ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενης τάσης και ο τρόπος λειτουργίας του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σημαντικότερες τεχνικές παλμοδότησης, όπως η τεχνική παλμοδότησης PWM και η sPWM.

Στο τρίτο κεφάλαιο χωρίζεται το κύκλωμα της κατασκευής μας σε επιμέρους κυκλώματα. Το κάθε επιμέρους κύκλωμα στη συνέχεια αναλύεται ως προς τη χρησιμότητά του στο κύκλωμα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία προγραμματισμού του Arduino Due μέσω Simulink έτσι ώστε να επιτευχθεί ο έλεγχος ενεργός ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις πειραματικές δοκιμές που έγιναν, επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος βελτίωσης του συντελεστή ισχύς στην είσοδο του μετατροπέα.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια κατασκευής του μετατροπέα μας.

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους εποπτεύοντες της πτυχιακής εργασίας Δρ. Ηλ. Μηχ. κ. Γεωργάκα Κωνσταντίνο και τον Δρ. κ. Δάλλα Στέφανο για την πολύτιμη βοήθεια και τον χρόνο που αφιέρωσαν για την εκπόνηση της. Επίσης θα θέλαμε να εκφράσουμε την απέραντη ευγνωμοσύνη μας στις οικογένειές μας για την στήριξη που μας παρείχανε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας, είναι η σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία ενός μονοφασικού ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας με IGBT. Ο συγκεκριμένος εναλλασσόμενος διακόπτης τροφοδοτείται με AC τάση και στην έξοδό του παράγει μια μεταβαλλόμενη AC τάση σταθερής συχνότητας. Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να τροφοδοτήσει φορτία διαφόρων τύπων (π.χ. παθητικό, ηλεκτρικό κινητήρα, έμμεσα μία ανορθωτική γέφυρα κ.α.) και γίνεται ο έλεγχος ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα αυτού.

Η παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων πραγματοποιείται μέσω υψίσυχνης τεχνικής παλμοδότησης π.χ. ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM (Pulse Width Modulation). Με τέτοια τεχνική μπορούμε να πετύχουμε υψηλό συντελεστή ισχύος άρα και βελτιωμένη κυματομορφή ρεύματος δικτύου. Για την παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων IGBT χρησιμοποιείται ο επεξεργαστής **Arduino Due**. Η έξοδος του επεξεργαστή οδηγεί την πύλη του κάθε IGBT μέσω optocoupler και Driver. Ο προγραμματισμός του επεξεργαστή πραγματοποιείται σε περιβάλλον Simulink.

Το πλεονέκτημα του προγραμματισμού αυτού είναι ότι χρησιμοποιούνται σχηματικά blocks και έτσι αποφεύγεται επίπονη και χρονοβόρα εργασία για τη σύνταξη κώδικα. Επίσης, μ' αυτό τον τρόπο, σε περίπτωση που χρειαστεί κάποια αλλαγή στο μέλλον, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ εύκολα. Με τη χρήση αυτού του τρόπου προγραμματισμού είναι σημαντική και η δυνατότητα εξομοίωσης του κυκλώματος. Μ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η λήψη κάποιων ενδεικτικών αποτελεσμάτων πριν την οδήγηση των IGBT.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποτυπώνονται τόσο ως κυματομορφές μέσω παλμογράφου όσο και μέσω οργάνων μέτρησης στο εργαστήριο των ηλεκτρονικών ισχύος του ΤΕΙ Πάτρας. Εκεί θα πραγματοποιηθεί η κατασκευή του μετατροπέα και οι μετρήσεις. Τα αποτελέσματα καταγράφονται και αξιολογούνται μέσω διαγραμμάτων και καμπυλών, δίνοντας βάρος στο συντελεστή ισχύος και το βαθμός απόδοσης. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και ο προγραμματισμός του επεξεργαστή σε περιβάλλον Matlab/Simulink.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΈΝΝΟΙΕΣ	1
1.1. Εισαγωγή.....	1
1.1.1. Ιστορική εξέλιξη και εφαρμογές των ηλεκτρικών ισχύος.....	1
1.1.2. Δομή συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος	3
1.1.3. Κατηγορίες μετατροπών	3
1.2. Ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΛΜΟΔΟΤΗΣΗΣ	9
2.1. Παλμοδότηση των IGBT	9
2.2. Παλμοδοτήσεις με διακοπτική συχνότητα ίση με αυτή του δικτύου	9
2.3. Παλμοδοτήσεις με διακοπτική συχνότητα μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου	11
2.4. Δειγματοληψία σημάτων στον υπό κατασκευή μετατροπέα	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	15
3.1. Το πλάνο της κατασκευής.....	15
3.2. Δομή κυκλωμάτων του μετατροπέα.....	18
3.2.1. Κύκλωμα Ισχύος.....	18
3.2.1.1. Τα IGBT.....	18
3.2.1.2. Snubber.....	21
3.2.2. Κύκλωμα Παλμοδότησης.....	21
3.2.3. Κύκλωμα δειγματοληψίας της τάσης	26
3.2.4. Κύκλωμα δειγματοληψίας του ρεύματος.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ	31
4.1. Ο Μικροελεγκτής Arduino Due.....	31
4.2. MATLAB και Simulink	34
4.2.1. Παραδείγματα στο Simulink	34
4.2.2. Το πρόγραμμα για την παλμοδότηση και τον έλεγχο ισχύος	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	47
5.1. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 440Ω	47
5.1.1. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 440Ω με τεχνική παλμοδότησης PWM	48
5.1.2. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 440Ω με τεχνική παλμοδότησης sPWM.....	52
5.2. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 220Ω	57
5.2.1. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 220Ω με τεχνική παλμοδότηση PWM.....	58
5.2.2. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 220Ω με τεχνική παλμοδότησης sPWM.....	62
5.3. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 110Ω	68
5.3.1. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 110Ω με τεχνική παλμοδότησης PWM	68
5.3.2. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 110Ω με τεχνική παλμοδότησης sPWM.....	73
5.3.3. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 110Ω με LC φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα ..	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Τρόπος λειτουργίας και εισαγωγικές έννοιες

1.1. Εισαγωγή

1.1.1. Ιστορική εξέλιξη και εφαρμογές των ηλεκτρικών ισχύος

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είχαν σημαντική εξέλιξη μετά την ανακάλυψη του thyristor(SCR) το 1957 [1]. Σήμερα, σχεδόν σε όλες τις τεχνολογίες όπου απαιτείται ο έλεγχος της ισχύος χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος.

Η πρόοδος που σημειώνεται τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη νέων ημιαγωγικών διακοπών ισχύος, έχει οδηγήσει σε μεγάλη ανάπτυξη τον τομέα των συστημάτων ισχύος, ανοίγοντας νέα πεδία εφαρμογών. Οι νέες τεχνολογίες κατασκευής των ημιαγωγικών διακοπών, προσφέρουν σήμερα στοιχεία ικανά να χειριστούν υψηλές τάσεις και ρεύματα σε μεγάλες ταχύτητες και ταυτόχρονα με απλό τρόπο ελέγχου. Οι διακόπτες αυτοί (κυρίως transistors ισχύος) έχουν εκτοπίσει τα SCR από τις εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος.

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος χρησιμοποιούνται για: α) τη μετατροπή μιας εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή και το αντίθετο, β) μεταβολή του πλάτους ή/και της ενεργούς τιμή της τάσης και γ) για τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος ηλεκτρομηχανικών μεγεθών (π.χ. ροπής), βελτίωση της ποιότητας του ρεύματος του συστήματος μεταφοράς (π.χ. FACTS) και πλήθος άλλων εφαρμογών.

Στην ανάπτυξη των συστημάτων ισχύος έχει συμβάλει ιδιαίτερα και η πρόοδος της μικροηλεκτρονικής, η οποία έχει επιτρέψει την υλοποίηση εξαιρετικά ισχυρών ελεγκτών. Παλαιότερα η σχεδίαση της διάταξης ελέγχου βασιζόνταν σε αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Σήμερα μια μεγάλη ποικιλία μικροεπεξεργαστών, ειδικά σχεδιασμένων για εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, είναι διαθέσιμη από πολλούς κατασκευαστές. Με τη χρήση

των μικροεπεξεργαστών η υλοποίηση του ελεγκτή απλοποιείται σημαντικά[1]. Ταυτόχρονα είναι δυνατή η εκτέλεση πολύπλοκων τεχνικών ελέγχου, με παράλληλη αύξηση της αξιοπιστίας και ελαχιστοποίηση των διαστάσεων της διάταξης.

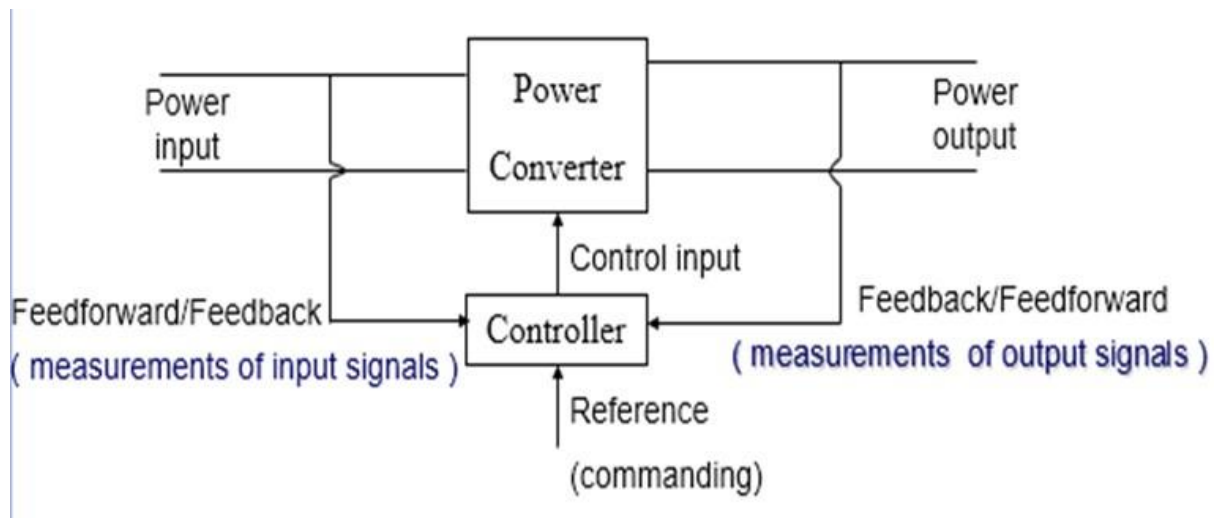
Λαμβάνοντας υπόψη τη βελτίωση των ημιαγωγικών στοιχείων, όπως και την ανάπτυξη των μικροελεγκτών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχό τους, γίνεται κατανοητό ότι οι σύγχρονες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος με ημιαγωγικούς διακόπτες προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως:

- **Μικρό όγκο και βάρος.**
- **Μικρές απώλειες, επομένως υψηλό βαθμό απόδοσης.**
- **Υψηλή αξιοπιστία.**
- **Πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά.**

Το αντικείμενο των ηλεκτρονικών ισχύος είναι τέτοιο ώστε να χρησιμοποιούνται σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Ενδεικτικά αναφέρονται οι κυριότερες:

- AC & DC κινητήρια συστήματα
- Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (FACTS)
- Συστήματα μεταφοράς συνεχούς τάσης υψηλής τιμής (HVDC)
- Τροφοδοτικά & UPS
- Διακόπτες και H/N στερεάς κατάστασης (Solid State Switches & Solid State Relays)
- Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου (fuel cells)
- Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
- Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας
- Επαγωγική θέρμανση
- Ροοστάτες
- Ηλεκτρικά οχήματα
- Επιταχυντές σωματιδίων
- Λαμπτήρες φθορισμού

1.1.2. Δομή συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος



Σχήμα 1.1: Γενικό σχηματικό σύστημα δομής συστήματος ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος μαζί με τον έλεγχο[1].

Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ένα γενικό σύστημα αποτελούμενο από ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος και τον έλεγχο του. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να διαβάζει κάποια σήματα (π.χ. την τάση ή το ρεύμα εισόδου και εξόδου) και έτσι να λαμβάνει αποφάσεις.

1.1.3. Κατηγορίες μετατροπέων

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος μετατρέπει την τάση εισόδου σε μια επιθυμητή τάση στην έξοδο. Όπως αναφέρθηκε και στον πρόλογο οι ηλεκτρικοί μετατροπείς χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες [2].

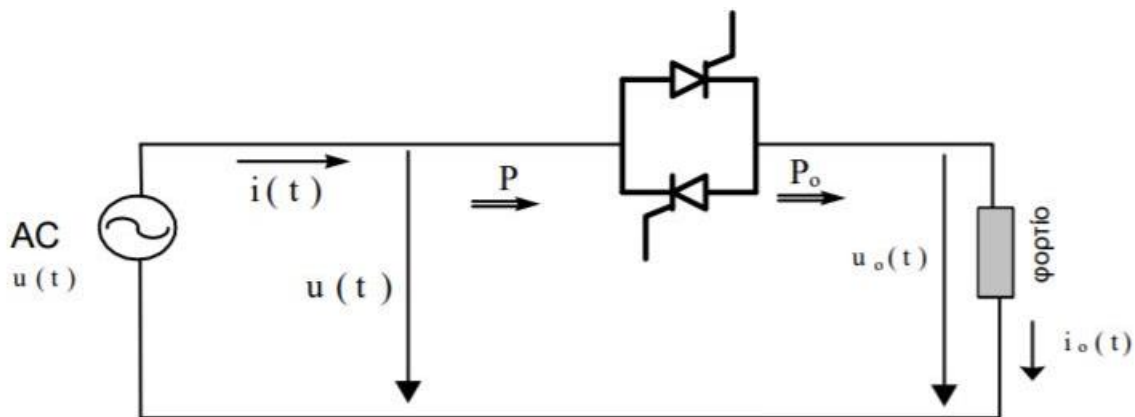
1. Μετατροπέας AC τάσης σε DC τάση (ανόρθωση)
2. Μετατροπέας DC τάσης σε AC τάση (αντιστροφή)
3. Μετατροπέας AC τάσης σε AC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά
4. Μετατροπέας DC τάσης σε DC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά

1.2. Ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας

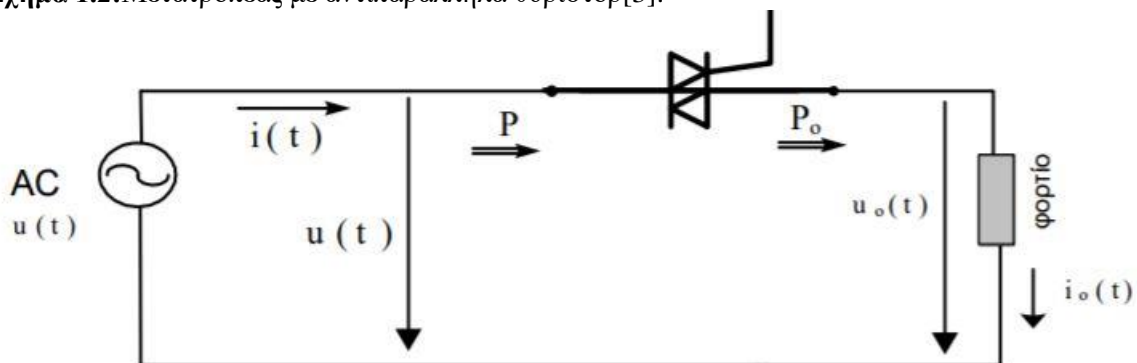
Ο μετατροπέας που θα κατασκευαστεί και θα μελετηθεί στην εργασία αυτή είναι ο ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενου ρεύματος η βασική τοπολογία και λειτουργία του οποίου αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Ο ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιείται για την μεταβολή της RMS τιμής της εναλλασσόμενης τάσης που εφαρμόζεται στο φορτίο. Αυτό γίνεται εφικτό με τον έλεγχο της παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων του ρυθμιζόμενου διακόπτη.

Ο ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να υλοποιηθεί με αντί-παράλληλα θυρίστορ, με triac ή με τρανζίστορ ισχύος (π.χ. IGBT). Όταν χρησιμοποιούνται θυρίστορ αντί triac οι απώλειες είναι χαμηλότερες και η ισχύς που διαχειρίζεται είναι πολύ υψηλότερη, όμως ο όγκος και το κόστος αυξάνονται καθώς υπάρχουν δύο θυρίστορ με δύο κυκλώματα παλμοδότησης. Στα παρακάτω σχήματα (σχ. 1.2 και 1.3) φαίνεται η τοπολογία του μετατροπέα αυτού[3].



Σχήμα 1.2:Μετατροπέας με αντιπαράλληλα θυρίστορ[3].

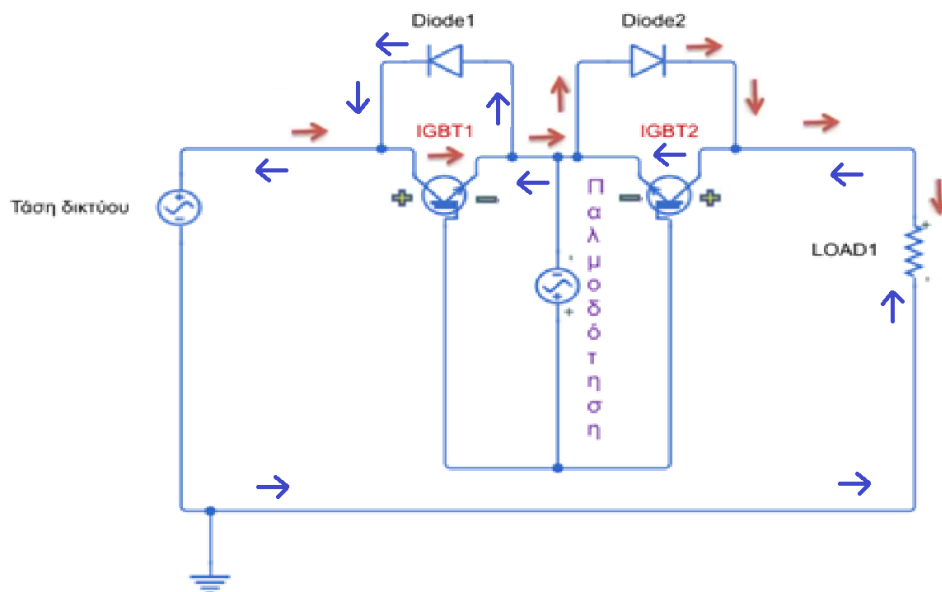


Σχήμα 1.3:Μετατροπέας με triac[3].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένας τέτοιος μετατροπέας μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι είναι οι εξής:

- Δύο θυρίστορ συνδεδεμένα αντιπαράλληλα
- Δύο IGBT συνδεδεμένα αντιπαράλληλα
- Με Triac (το οποίο έχει την ίδια λειτουργία με αυτής των δύο αντιπαράλληλα συνδεδεμένων θυρίστορ).

Εμείς χρησιμοποιούμε μια τοπολογία στην οποία δύο IGBT είναι συνδεδεμένα με τους εκπομπούς σε κοινό σημείο, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Στην τοπολογία αυτή η ροή του ρεύματος πραγματοποιείται μέσω ενός IGBT και της εσωτερικής διόδου του άλλου IGBT. Το πλεονέκτημα αυτού του μετατροπέα είναι ότι χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα παλμοδότησης και για τα δύο ημιαγωγικά στοιχεία, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος του. Επίσης, απλοποιείται το πρόγραμμα στον επεξεργαστή καθώς δεν χρειάζεται να είναι γνωστή ούτε η ημιπερίοδος της τάσης, ούτε η σειρά παλμοδότησης των IGBTs. Για περεταίρω βελτίωση του βαθμού απόδοσης μπορεί να προστεθεί δίοδος αντιπαράλληλα στο κάθε στοιχείο. Με τον τρόπο αυτό η διέλευση θα πραγματοποιείται από αυτή τη δίοδο και όχι από την εσωτερική του ημιαγωγικού στοιχείου.

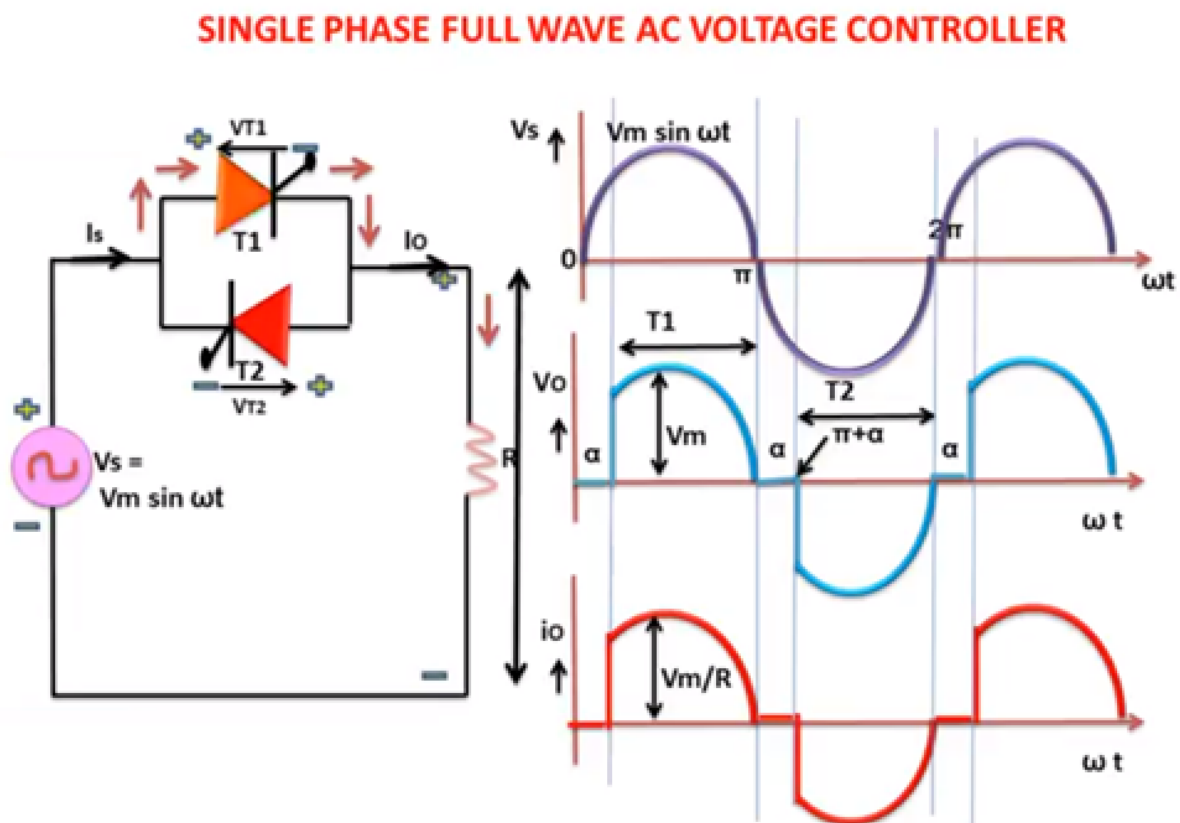


Σχήμα 1.4: Η τοπολογία του μετατροπέα της εργασίας.

Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας στις παραπάνω τρεις περιπτώσεις είναι σχεδόν η ίδια, η βασική διαφοροποίηση εντοπίζεται στην τεχνική παλμοδότησης. Συγκεκριμένα στον μετατροπέα με αντιπαράλληλα θυρίστορ και στον μετατροπέα με Triac χρησιμοποιείται η τεχνική παλμοδότησης με **γωνία καθυστέρησης α** . Ενώ στον μετατροπέα με δύο αντιπαράλληλα IGBT, χρησιμοποιούνται συνήθως υψίσυχνες τεχνικές παλμοδότησης όπως η **PWM** και η **sPWM**. Όλες αυτές οι τεχνικές παλμοδότησης αναλύονται στο δεύτερο κεφάλαιο.

Στην παρακάτω εικόνα (σχ.1.5) παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης δικτύου(μωβ), της τάσης φορτίου(γαλάζιο) και του ρεύματος φορτίου(Κόκκινο), ενώ το γράμμα 'α' αντιστοιχεί στην γωνία έναυσης των θυρίστορ.

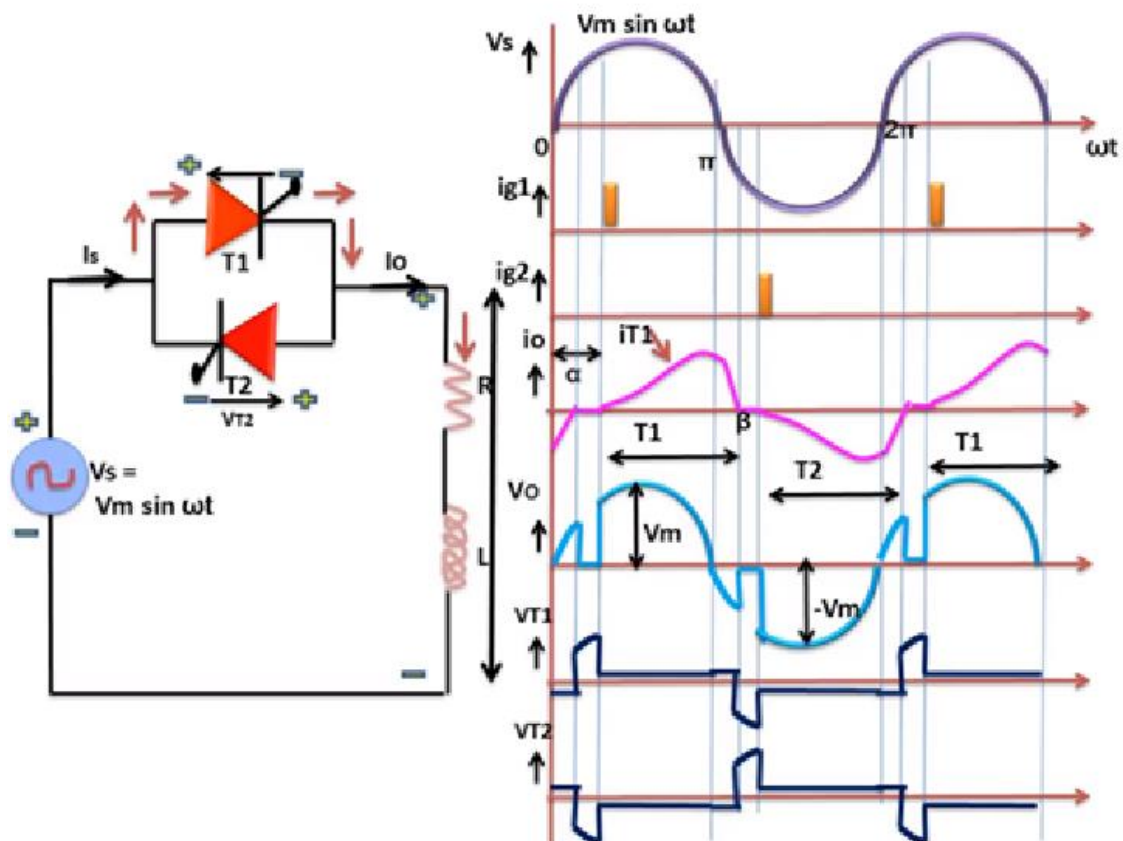


Σχήμα1.5: Λειτουργία ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενου ρεύματος για Ωμικό φορτίο[4].

Η γωνία έναυσης α , είναι ο χρόνος από τον μηδενισμό της στιγμιαίας τάσης του δικτύου μέχρι την στιγμή που αρχίζει να άγει το θυρίστορ, η αγωγή του οποίου συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή την οποία η στιγμιαία τάση δικτύου μηδενιστεί ξανά. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία έναυσης, τόσο μικρότερη είναι η αγωγή των θυρίστορ.

Συγκεκριμένα, στην παραπάνω διάταξη για την θετική ημιπερίοδο μπορεί να άγει μόνο το θυρίστορ T1, ενώ για την αρνητική ημιπερίοδο μπορεί να άγει μόνο το θυρίστορ T2. Η αγωγή και των δύο θυρίστορ εξαρτάται από την γωνία έναυσης. Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, όταν και τα δύο θυρίστορ δεν άγουν, η τάση του φορτίου είναι μηδέν, ενώ όταν άγει το ένα από τα δύο θυρίστορ τότε η τάση του φορτίου είναι ίδια με την τάση δικτύου, άρα συμπεραίνεται ότι η RMS τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο φορτίο εξαρτάται από την γωνία έναυσης, συγκεκριμένα, όταν η γωνία έναυσης μεγαλώνει, η τάση του φορτίου μειώνεται και αντίστροφα.

Πρέπει να αναφερθεί εδώ, ότι για στην περίπτωση ενός ωμικό-επαγωγικού φορτίου, η κυματομορφή του ρεύματος (σχ.1.6) θα είναι διαφορετική από την περίπτωση με ωμικό φορτίο. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η επαγωγή δεν αφήνει να κάνει απότομες μεταβολές.



Σχήμα1.6: Λειτουργία ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενου ρεύματος για Ωμικό-επαγωγικό φορτίο[4].

Εφαρμογές

Οι βασικές εφαρμογές του ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας είναι [3]:

- Έλεγχος έντασης λαμπτήρων.
- Ομαλή εκκίνηση κινητήρων (Soft Starting).
- Έλεγχος στροφών ασύγχρονων κινητήρων (σε στενά όρια).

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Όταν το φορτίο είναι σταθερό, τότε ο ρυθμιζόμενος διακόπτης μπορεί να αντικατασταθεί με έναν ροοστάτη ως εναλλακτική λύση, το βασικά πλεονεκτήματα αυτής της αντικατάστασης είναι το κόστος και η απλότητα της κατασκευής, όμως οι μεγάλες απώλειες ισχύος και το γεγονός ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει με μεταβλητό φορτίο είναι τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του ροοστάτη.

Έτσι, ο ρυθμιζόμενος διακόπτης έχει πλεονεκτήματα όπως :

- Υψηλός βαθμός απόδοσης
- Ευελιξία στον έλεγχο

Το βασικό μειονέκτημα του μετατροπέα αυτού είναι ότι οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος φορτίου δεν είναι ημιτονοειδείς, έχουμε δηλαδή εμφάνιση ανώτερων αρμονικών, οι οποίες αυξάνονται σημαντικά για χαμηλές τιμές της τάσης του φορτίου[5].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΛΜΟΔΟΤΗΣΗΣ

2.1. Παλμοδότηση των IGBT

Ένα σημαντικό κριτήριο κατηγοριοποίησης των τεχνικών παλμοδότησης είναι η διακοπτική συχνότητα, δηλαδή η συχνότητα των παλμών(συγκριτικά με την συχνότητα δικτύου). Συνεπώς υπάρχουν δύο κατηγορίες τεχνικών:

- Παλμοδοτήσεις με διακοπτική συχνότητα ίση με αυτή του δικτύου, π.χ. 50 Hz.
- Παλμοδοτήσεις με διακοπτική συχνότητα μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου, π.χ. 1kHz, 10kHz, κ.α.

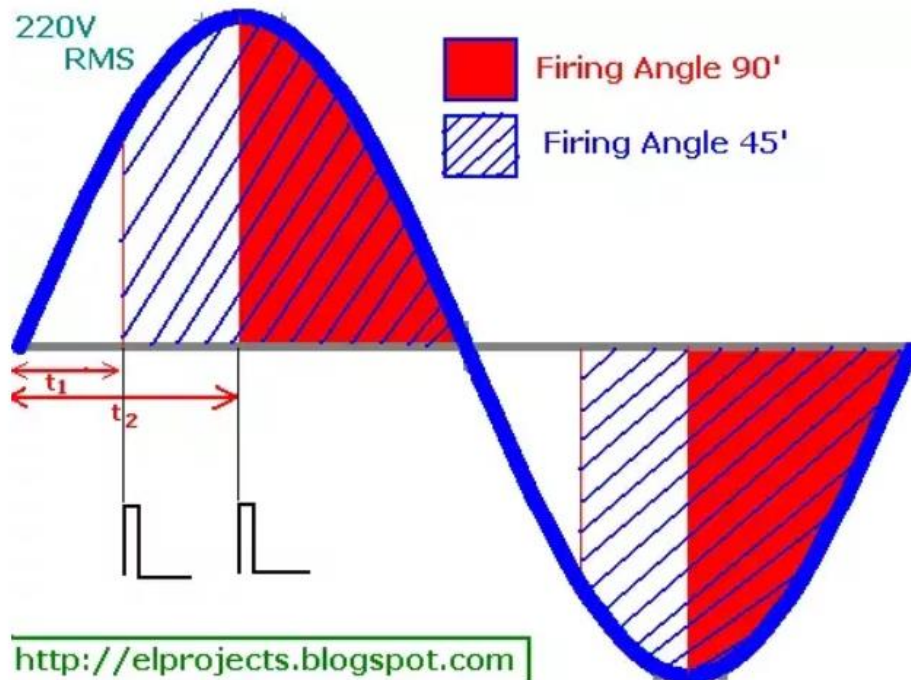
2.2. Παλμοδοτήσεις με διακοπτική συχνότητα ίση με αυτή του δικτύου

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται τρεις διαφορετικές τεχνικές [6]

- Με γωνία καθυστέρησης α .
- Με γωνία καθυστέρησης β .
- Με συνδυασμό των δύο παραπάνω τεχνικών

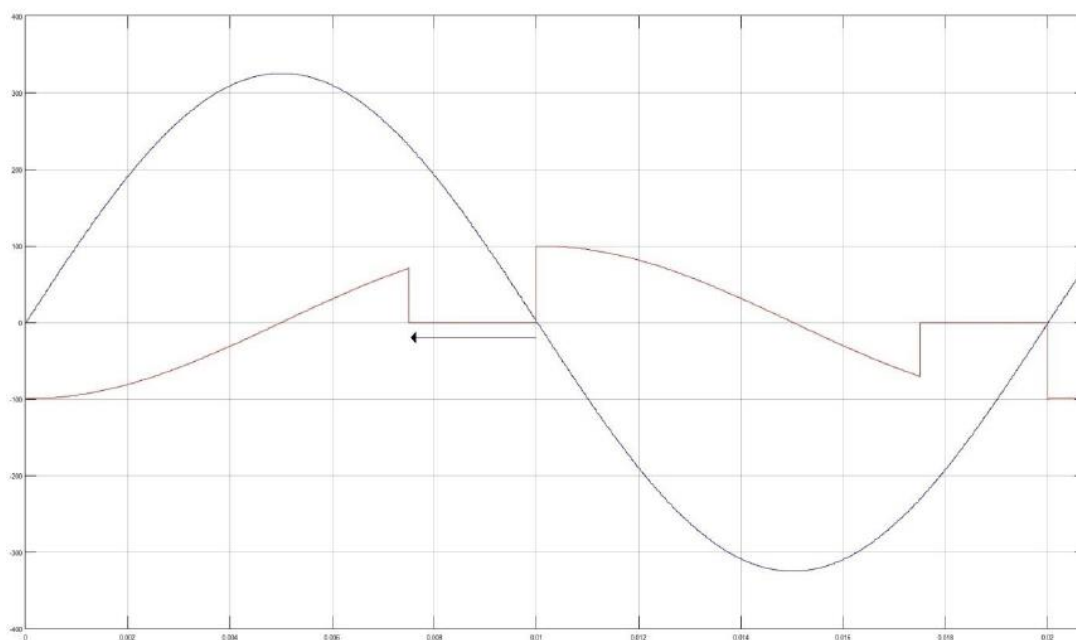
Η **τεχνική παλμοδότησης με γωνία καθυστέρησης α** είναι η πιο διαδομένη από τις παραπάνω. Η γωνία καθυστέρησης α είναι ο χρόνος κατά τον οποίο το ημιαγωγικό στοιχείο δε βρίσκεται σε αγωγή σε σύγκριση με την τάση δικτύου (παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σχ.1.5, σχ.1.6). Συγκεκριμένα, είναι το διάστημα από την έναρξη μιας περιόδου τάσης έως τη στιγμή που το ημιαγωγικό στοιχείο αρχίζει να άγει και να διαρρέεται από ρεύμα(σχ.2.1). Όσο καθυστερεί η έναυση των ημιαγωγικών στοιχείων, τόσο μειώνεται η ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο φορτίο (εμβαδόν στο σχ.2.1). Σε αυτήν την τεχνική είναι απαραίτητη η δειγματοληψία της τάσης δικτύου έτσι ώστε να επιτευχθεί ο συγχρονισμός των παλμών με την ημιτονοειδή τάση του δικτύου. Μέσω αυτής της τεχνικής

παλμοδότησης όσο αυξάνεται η γωνία έναυσης, τόσο καθυστερεί η βασική αρμονική του ρεύματος ως προς την τάση του δικτύου. Έτσι, εμφανίζεται επαγωγική συμπεριφορά του μετατροπέα, ενώ παράλληλα αυξάνονται οι ανώτερες αρμονικές του ρεύματος συγκριτικά με την βασική αρμονική. Για τους δύο αυτούς λόγους μειώνεται ο συντελεστής ισχύος.



Σχήμα 2.1: Γωνίες έναυσης $\alpha_1=45^\circ$ και $\alpha_2=90^\circ$ για χρόνους t_1 και t_2 [7].

Η **τεχνική παλμοδότησης με γωνία καθυστέρησης β** ελέγχει την σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων και όχι την έναυση όπως συμβαίνει με την τεχνική παλμοδότησης γωνίας καθυστέρησης α . Συγκεκριμένα η τεχνική παλμοδότησης με γωνία καθυστέρησης β είναι το χρονικό διάστημα από τον μηδενισμό του ρεύματος έως τον μηδενισμό της τάσης δικτύου(σχ.2.2).



Σχήμα 2.2: Παράδειγμα παλμοδότησης με γωνία προήγησης β [6].

Μέσω αυτής της τεχνικής παλμοδότησης όσο αυξάνεται η γωνία β , τόσο προηγείται η βασική αρμονική του ρεύματος ως προς την τάση του δικτύου. Έτσι, εμφανίζεται χωρητική συμπεριφορά του μετατροπέα με αποτέλεσμα και στην περίπτωση αυτή να αυξάνονται οι ανώτερες αρμονικές του ρεύματος συγκριτικά με την βασική αρμονική.

Η τρίτη τεχνική της κατηγορίας παλμοδοτήσεων με διακοπτική συχνότητα ίση με αυτή του δικτύου είναι αποτέλεσμα συνδυασμού της τεχνικής παλμοδότησης με γωνία καθυστέρησης α και της τεχνικής παλμοδότησης με γωνία καθυστέρησης β . Μέσω αυτής της τεχνικής ελέγχεται και η έναυση και η σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων του μετατροπέα, ώστε η βασική αρμονική του ρεύματος να παραμένει συμφασική με την τάση του δικτύου. Οι ανώτερες αρμονικές του ρεύματος όμως αυξάνονται συγκριτικά με την βασική αρμονική.

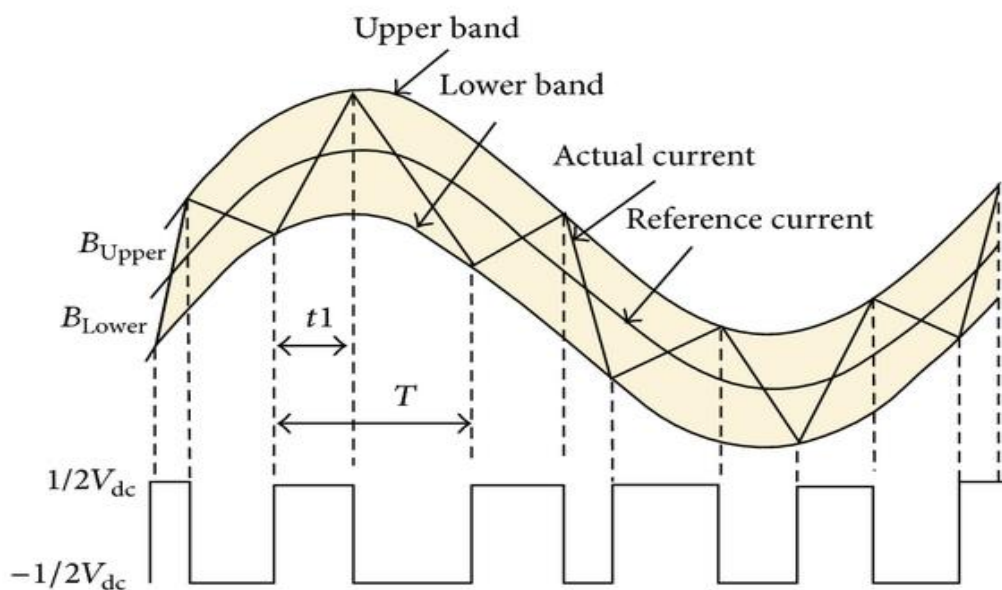
2.3. Παλμοδοτήσεις με διακοπτική συχνότητα μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου

Ενδεικτικά παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές τεχνικές [8], οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως και είναι από τις πιο κλασικές. Αυτές είναι:

- Τεχνική παλμοδότησης με έλεγχο βρόχου υστέρησης ρεύματος (hysteresis current control-HCC)

- Τεχνική παλμοδότησης-διαμόρφωσης εύρους παλμών(Pulse Width Modulation-PWM).
- Τεχνική παλμοδότησης ημιτονοειδούς διαμόρφωση εύρους παλμών (sinusoidal Pulse Width Modulation SPWM)

Στην τεχνική παλμοδότησης με έλεγχο βρόχου υστέρησης ρεύματος η παραγωγή παλμών πραγματοποιείται κατά την σύγκριση του πραγματικού ρεύματος με δύο αναφορές αυτού τις upper και lower trip point, οι οποίες καθορίζονται από τον κατασκευαστή. Το πραγματικό ρεύμα ακολουθεί συνεχώς την εντολή ρεύματος μέσα στην ζώνη υστέρησης, έτσι παράγονται οι απαιτούμενοι παλμοί για τον έλεγχο ημιαγωγικών στοιχείων του κυκλώματος (σχ.2.3) [9].



Σχήμα 2.3: Δημιουργία παλμών με τεχνική HCC[9].

Ο συντελεστής ισχύος είναι υψηλός σε αυτήν την τεχνική, όπως συχνά υψηλή είναι και η διακοπτική συχνότητα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα θερμικές απώλειες, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το βαθμό απόδοσης. Επίσης, η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή, με αποτέλεσμα τη δυσκολία σχεδιασμού ενός παθητικού φίλτρου ανώτερων αρμονικών.

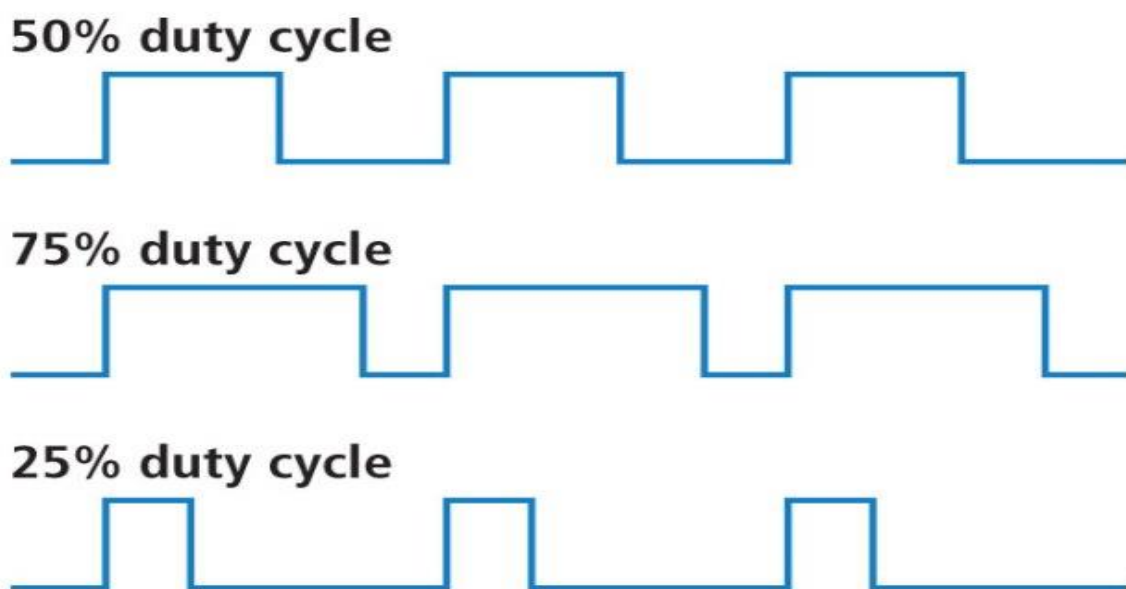
Η PWM είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική παλμοδότησης αυτής της κατηγορίας, γιατί έχει απλή παραγωγή παλμών και σταθερή διακοπτική συχνότητα. Οι παλμοί προκύπτουν από τη σύγκριση μιας τριγωνικής κυματομορφής με ένα σήμα σταθερής τάσης, το οποίο μπορεί να δοθεί απλά στον επεξεργαστή μέσω ενός ποτενσιόμετρου [8].

Όταν η τιμή της συνεχούς τάσης είναι μεγαλύτερη από αυτή της τριγωνικής κυματομορφής, δημιουργείται ένας παλμός· προκύπτει έτσι μια παλμοσειρά, στην οποία το εύρος των παλμών

είναι σταθερό για όλη την περίοδο της τάσης του δικτύου. Σε κάποιες περιπτώσεις μετατροπέων, όπως το δικό μας όπου τα IGBT έχουν κοινό εκπομπό, γίνεται να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα κύκλωμα παλμοδότησης για την έναυση και την σβέση των IGBT. Επίσης, στην τεχνική αυτή δεν είναι απαραίτητη η δειγματοληψία της τάσης δικτύου και του ρεύματος στο φορτίο καθώς οι παλμοί είναι σταθεροί και όμοιοι στη διάρκεια του χρόνου.

Το σταθερό εύρος παλμών και η σταθερή διακοπτική συχνότητα αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα, όμως ο χαμηλός συντελεστής ισχύος που εμφανίζει σε σχέση με την HCC είναι το βασικό της μειονέκτημα.

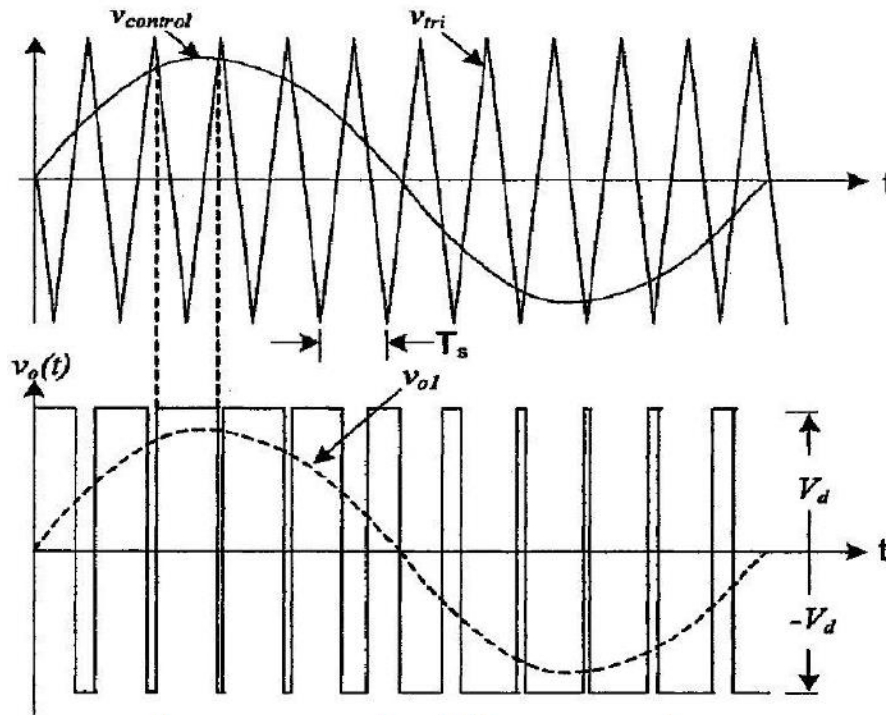
Στο σχήμα 2.4 εμφανίζονται τρεις περιπτώσεις ελέγχου με PWM. Όπου το Duty Cycle είναι 50%, 75% και 25% αντίστοιχα [10].



Σχήμα 2.4: Κυματομορφές παλμών για Duty Cycle: 50%, 75%, 25% και τεχνική παλμοδότησης PWM[10].

Παρόμοια με την προηγούμενη τεχνική είναι και η sPWM, όπου η σύγκριση της τριγωνικής κυματομορφής πραγματοποιείται με ένα ημίτονο ανάλογο της τάσης δικτύου και όχι με ένα σήμα σταθερής τάσης όπως συμβαίνει με την PWM. Σε αυτήν την τεχνική είναι αναγκαία η δειγματοληψία της τάσης δικτύου. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας παλμοσειράς που

το εύρος των παλμών μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου της τάσης δικτύου (σχ.2.5). Συγκεκριμένα, ο παλμός εμφανίζεται όταν το ημιτονοειδές σήμα είναι μεγαλύτερο από το τριγωνικό σήμα. Η sPWM υπερέχει έναντι των υπολοίπων, αφού εμφανίζει ταυτόχρονα υψηλό βαθμό απόδοσης και συγχρόνως υψηλό συντελεστή ισχύος [8].



Σχήμα 2.5: Δημιουργία παλμών με την τεχνική SPWM[6].

2.4. Δειγματοληψία σημάτων στον υπό κατασκευή μετατροπέα

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας, θα υλοποιηθούν οι τεχνικές παλμοδότησης PWM και sPWM, στην sPWM απαιτείται ο συγχρονισμός της παλμοδότησης με την τάση του δικτύου, επομένως χρειάζεται να γίνει η δειγματοληψία της τάσης του δικτύου. Επίσης θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος ισχύος, για τον οποίο εκτός από την δειγματοληψία της τάσης του δικτύου, χρειάζεται και η δειγματοληψία του ρεύματος εισόδου.

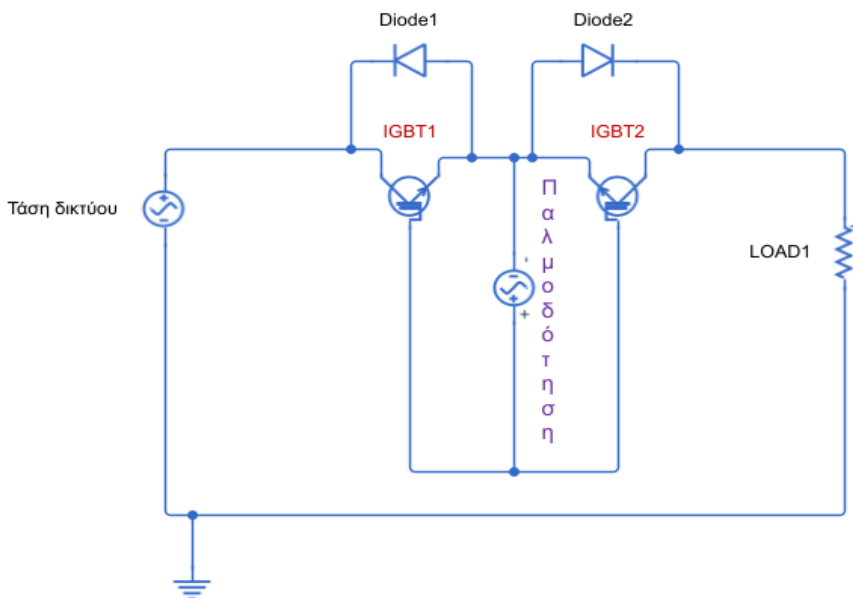
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανάλυση της δομής του Μετατροπέα

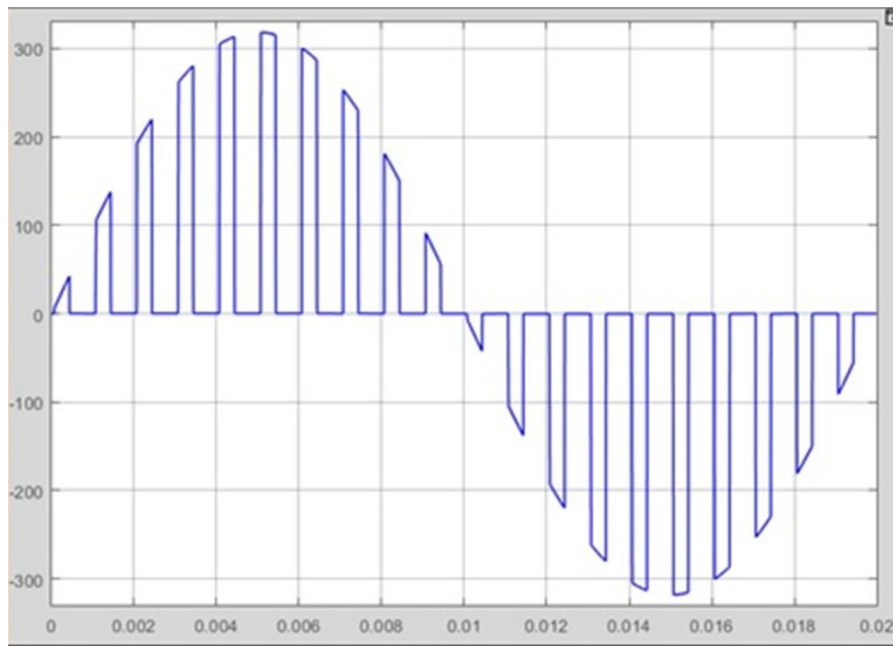
3.1. Το πλάνο της κατασκευής

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο μετατροπέας μας αποτελείται από 2 IGBT τα οποία έχουν εσωτερικά δομημένη μια δίοδο αντιπαράλληλα συνδεδεμένη και είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά, για την παλμοδότηση των 2 ημιαγωγικών στοιχείων χρησιμοποιείται μόνο ένα κύκλωμα παλμοδότησης. Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι αναγκαία τόσο η δειγματοληψία της τάσης δικτύου, όσο και η δειγματοληψία του ρεύματος, διότι θα χρησιμοποιηθεί η sPWM μέθοδος παλμοδότησης και θα επιτευχθεί ο έλεγχος ισχύος.

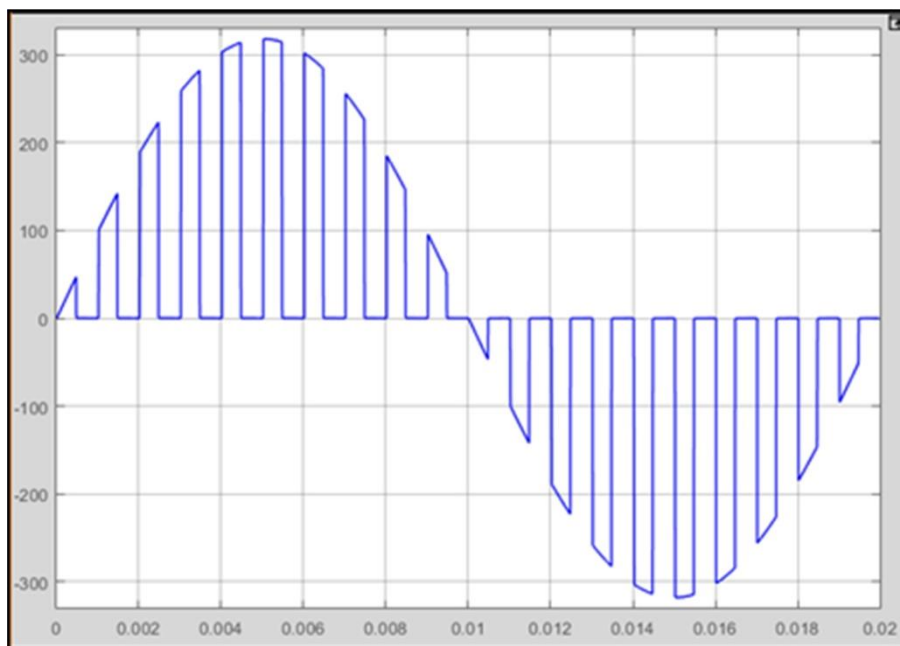
Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα μας, ενώ με μια συνεχή πηγή τάσης συμβολίζεται το κύκλωμα παλμοδότησης. Στα σχήματα 3.2, 3.3. και 3.4, παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης ωμικού φορτίου στην έξοδο του μετατροπέα για τρεις παλμοδοτήσεις με Duty-Cycle 35%, 50% και 70% αντίστοιχα.



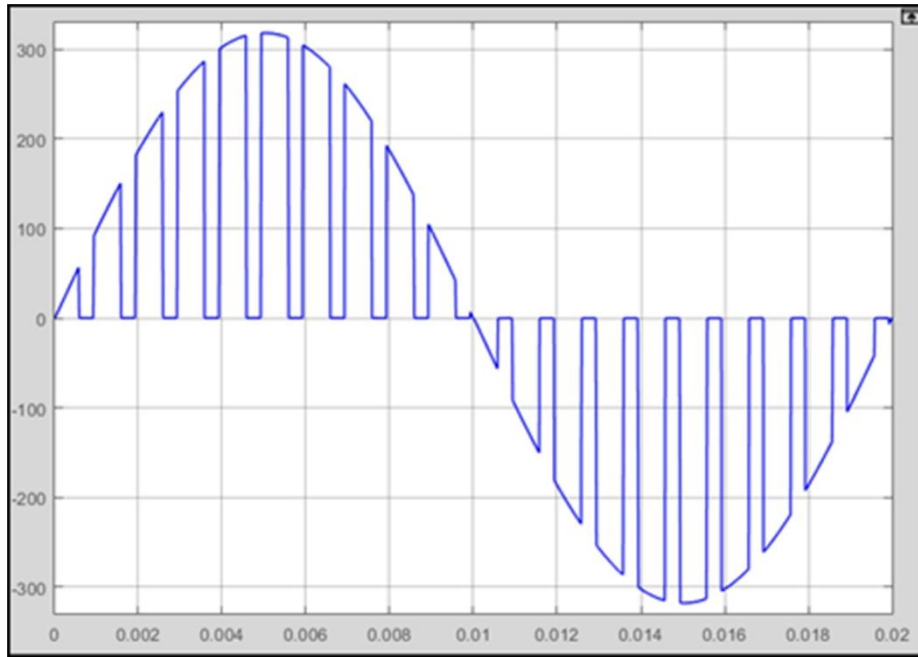
Σχήμα 3.1: Κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα.



Σχήμα 3.2: Παλμοδότηση με 35% Duty Cycle.

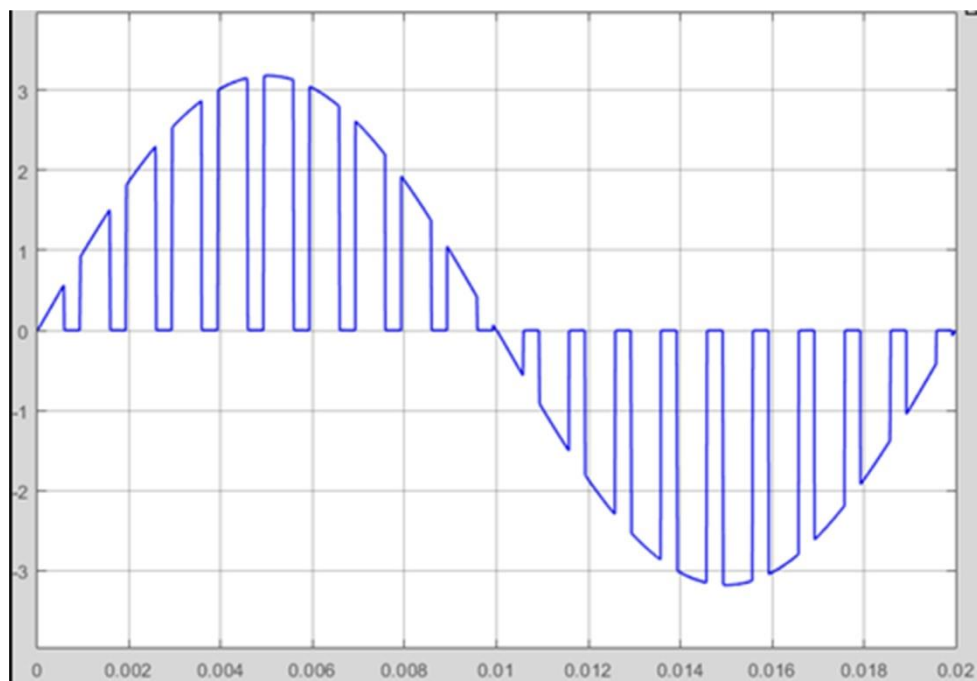


Σχήμα 3.3: Παλμοδότηση με 50% Duty Cycle.



Σχήμα 3.4: Παλμοδότηση με 70% Duty Cycle.

Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η κυματομορφή του ρεύματος φορτίου για την περίπτωση με 70% Duty Cycle και τεχνικής παλμοδότησης PWM. Η κυματομορφή του ρεύματος στην περίπτωση δε θα διαφέρει με την αντίστοιχη της τάσης για duty-cycle ίσο με 70%.



Σχήμα 3.5: Κυματομορφή ρεύματος με 70% Duty Cycle.

3.2. Δομή κυκλωμάτων του μετατροπέα

Το κύκλωμα του μετατροπέα χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους υποκυκλώματα.

1. Το κύκλωμα ισχύος
2. Το κύκλωμα παλμοδότησης
3. Το κύκλωμα δειγματοληψίας της τάσης
4. Το κύκλωμα δειγματοληψίας του ρεύματος

Τα πρώτα δύο κυκλώματα τοποθετήθηκαν στην βασική πλακέτα, το κύκλωμα δειγματοληψίας της τάσης τοποθετήθηκε σε μια ξεχωριστή πλακέτα, ενώ για το κύκλωμα δειγματοληψίας του ρεύματος τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας ρεύματος, ο οποίος συνδέεται εξωτερικά με τα στοιχεία του μετατροπέα. Τα στοιχεία και τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται η κατασκευή μας παρουσιάζονται στα παρακάτω κεφάλαια.

3.2.1.Κύκλωμα Ισχύος

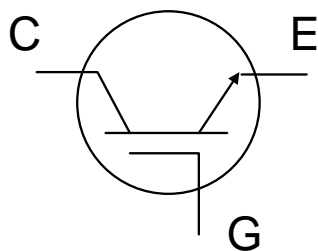
Τα βασικά στοιχεία του κυκλώματος ισχύος είναι:

1. Δύο IGBT, τα οποία έχουν εσωτερικά δομημένη αντιπαράλληλα μια δίοδο
2. Δύο Snubbers, τα οποία αποκλείουν τις υπερτάσεις πάνω στα IGBT.

3.2.1.1. Τα IGBT

Τα τρανζίστορ (transistors) ισχύος είναι ημιαγωγικά στοιχεία, τα οποία διαχειρίζονται μεγάλη ισχύ και χρησιμοποιούνται ως ελεγχόμενοι διακόπτες μέσω των οποίων ελέγχεται η τάση, το ρεύμα, η ισχύς, κ.α. ενός ηλεκτρικού φορτίου.

Υπάρχουν πολλοί τύποι τρανζίστορ ισχύος μερικοί από τους οποίους είναι τα MOSFET, τα IGCT, τα IGBT κ.α. Τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν ονομάζονται IGBT(σχ. 3.6) από τα αρχικά των λέξεων Isolated Gate Bipolar Transistor (διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης).

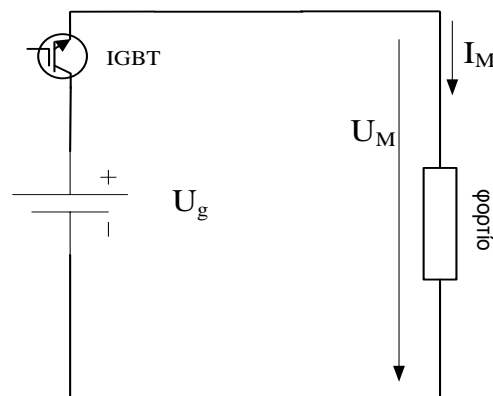


Σχήμα 3.6: Το γενικό σύμβολο του IGBT.

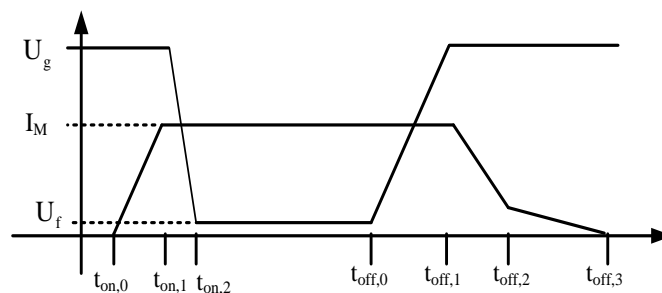
Το στοιχείο αυτό κατασκευάζεται από στρώσεις ημιαγωγικών υλικών των οποίων οι απολήξεις είναι ο συλλέκτης C (collector), ο εκπομπός E (emitter), και η πύλη G (gate). Συνοπτικά, η λειτουργία του έχει ως εξής:

Όταν το δυναμικό του συλλέκτη είναι υψηλότερο από το δυναμικό του εκπομπού (ορθά πολωμένο) και εφαρμόζεται παλμός μεταξύ πύλης και εκπομπού, τότε το IGBT γίνεται αγωγίμο (κλειστός διακόπτης) ενώ, όταν δεν εφαρμόζεται παλμός τότε το ημιαγωγικό στοιχείο σβήνει. Δηλαδή, σε αντίθεση με το θυρίστωρ, στο IGBT ελέγχεται τόσο η έναυση όσο και η σβέση. Αν δεν ισχύουν οι παραπάνω συνθήκες τότε το στοιχείο λειτουργεί ως ανοικτός διακόπτης. Αν η τάση του στοιχείου (όταν είναι στην αποκοπή) είναι υψηλότερη από μία κρίσιμη τιμή ή αν το ρεύμα περάσει μια κρίσιμη τιμή τότε το στοιχείο καταστρέφεται.

Στα σχήματα 3.7 και 3.8 περιγράφεται η έναυση και η σβέση του IGBT.



Σχήμα 3.7: Απλό κύκλωμα εφαρμογής του IGBT.



Σχήμα 3.8: Τάση και ρεύμα του IGBT κατά την έναυση και σβέση.

Έναυση (t_{on} , $0 < t < t_{on}$, $2 \approx 100 \text{ ns}$):

ton, 0 < t < ton, 1. Το ρεύμα από την τιμή μηδέν αυξάνεται ως την τιμή I_M (η τιμή αυτή εξαρτάται από το ηλεκτρικό κύκλωμα). Για το χρονικό αυτό διάστημα η τάση μένει αμετάβλητη λαμβάνοντας την αρχική της τιμή (U_g).

ton, 1 < t < ton, 2. Η τάση μειώνεται από την τιμή U_g στην τιμή U_f ενώ το ρεύμα έχει τιμή I_M . Η τιμή της τάσης U_f είναι η πτώση τάσης του ημιαγωγικού στοιχείου κατά την αγωγή και λαμβάνει αρκετά χαμηλή τιμή (τάξη μεγέθους $1,5 \text{ V} < U_f < 4 \text{ V}$).

Αγωγή: Το IGBT βρίσκεται σε αγωγή (**ton, 2 < t < toff, 0**), στο χρονικό διάστημα αυτό το ρεύμα λαμβάνει την τιμή του φορτίου I_M ενώ η τάση την τιμή U_f .

Σβέση (toff, 0 < t < toff, 3 ≈ 300 ns):

toff, 0 < t < toff, 1 Η τάση στα άκρα του IGBT αυξάνεται από την τιμή U_f στην U_g , ενώ το ρεύμα λαμβάνει τιμή I_M .

toff, 1 < t < toff, 2 Η τάση λαμβάνει τιμή U_g ενώ το ρεύμα μειώνεται από την τιμή I_M στην τιμή $I_M/10$.

toff, 2 < t < toff, 3 Η τάση λαμβάνει τιμή U_g ενώ το ρεύμα μειώνεται από την τιμή $I_M/10$ στην τιμή 0.

Τόσο κατά την έναυση όσο και κατά τη σβέση στο IGBT εμφανίζεται τάση και ρεύμα άρα ύπαρξη ισχύος. Αυτή η ισχύς μετατρέπεται σε θερμότητα επάνω στο IGBT και προφανώς είναι ανεπιθύμητη, διότι αφ' ενός μπορεί να καταστρέψει το στοιχείο αφ' εταίρου δημιουργεί απώλειες πάνω στο στοιχείο. Βέβαια, τα χρονικά διαστήματα έναυσης και σβέσης είναι πολύ μικρά, άρα οι **διακοπτικές τους απώλειες** είναι χαμηλές όταν η διακοπτική συχνότητα είναι χαμηλή (π.χ. 2 kHz). Προφανώς, καθώς αυξάνεται η διακοπτική συχνότητα αυξάνονται και οι διακοπτικές απώλειες.

Επίσης, απώλειες σε ένα IGBT εμφανίζονται κατά την αγωγή. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται **απώλειες αγωγής** και οφείλονται στην θέρμανση του ημιαγωγικού στοιχείου λόγω ροής του ρεύματος.

Και τα δύο IGBT που χρησιμοποιούνται είναι της εταιρίας **IXYS**, συγκεκριμένα το **IXYH40N90C3D1**, το οποίο έχει ενσωματωμένη αντιπαράλληλα μια δίοδο, και αντέχει τάση μέχρι και **900 Volt**, ρεύμα **40 Ampere**, έχει χαμηλή τάση αγωγής και πολύ μικρούς χρόνους έναυσης και σβέσης. Η πίσω πλευρά του IGBT έχει μια μεταλλική πλάκα, η οποία είναι εσωτερικά συνδεδεμένη με τον εκπομπό του IGBT. Αυτή η πλάκα προσκολλάται επάνω στην ψήκτρα και βοηθάει στην άμεση ψύξη του στοιχείου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

3.2.1.2. Snubber

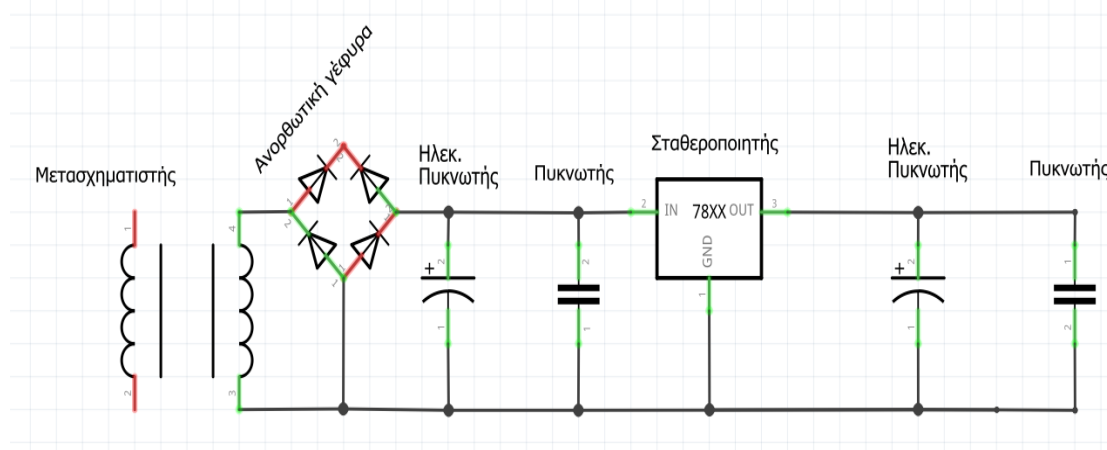
Το Snubber είναι ένας κλάδος του κυκλώματος που συνδέεται παράλληλα με τα ημιαγωγικά στοιχεία του. Υπάρχουν πολλών ειδών snubber. Εδώ χρησιμοποιείται ένα απλό παθητικό snubber το οποίο αποτελείται από έναν αντιστάτη και έναν πυκνωτή. Σκοπός του είναι να περιορίσει τις αιχμές της τάσης στα άκρα των IGBT κατά την έναυση και τη σβέση αυτών (κυρίως στη σβέση). Οι τιμές του κάθε Snubber είναι $R=68\Omega$ και $C=9.4\text{ nF}$.

3.2.2. Κύκλωμα Παλμοδότησης

Η παλμοδότηση των IGBT γίνεται μέσω Optodriver, ο οποίος πρέπει να τροφοδοτείται με συνεχή και σταθερή τάση ίση με 15 Volt. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ένα γαλβανικά απομονωμένο κύκλωμα τροφοδοσίας το οποίο στην έξοδο του να έχει σταθερή τάση 15Volt.

Το κύκλωμα τροφοδοσίας(σχ. 3.9) αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία.

1. Ένα Μ/Σ 230/20 V
2. Μία γέφυρα ανόρθωσης,
3. Δύο απλούς πυκνωτές
4. Δύο Ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές
5. Ένα Σταθεροποιητή τάσης



Σχήμα 3.9: Το κύκλωμα τροφοδοσίας του optodriver.

Όπως παρατηρούμε το τροφοδοτικό μας δέχεται στην είσοδό του τάση απευθείας από το δίκτυο της Δ.Ε.Η. και έπειτα το μετατρέπει σε DC τάση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω υποβιβασμού της τάσης από το μετασχηματιστή και στη συνέχεια ανορθώνεται από την ανορθωτική γέφυρα. Τα παθητικά εξαρτήματα συμβάλλουν στη σταθεροποίηση της τάσης.

Γενικά για τον Μ/Σ γνωρίζουμε ότι ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του είναι ίσος με τον λόγο των σπειρών του, δηλαδή:

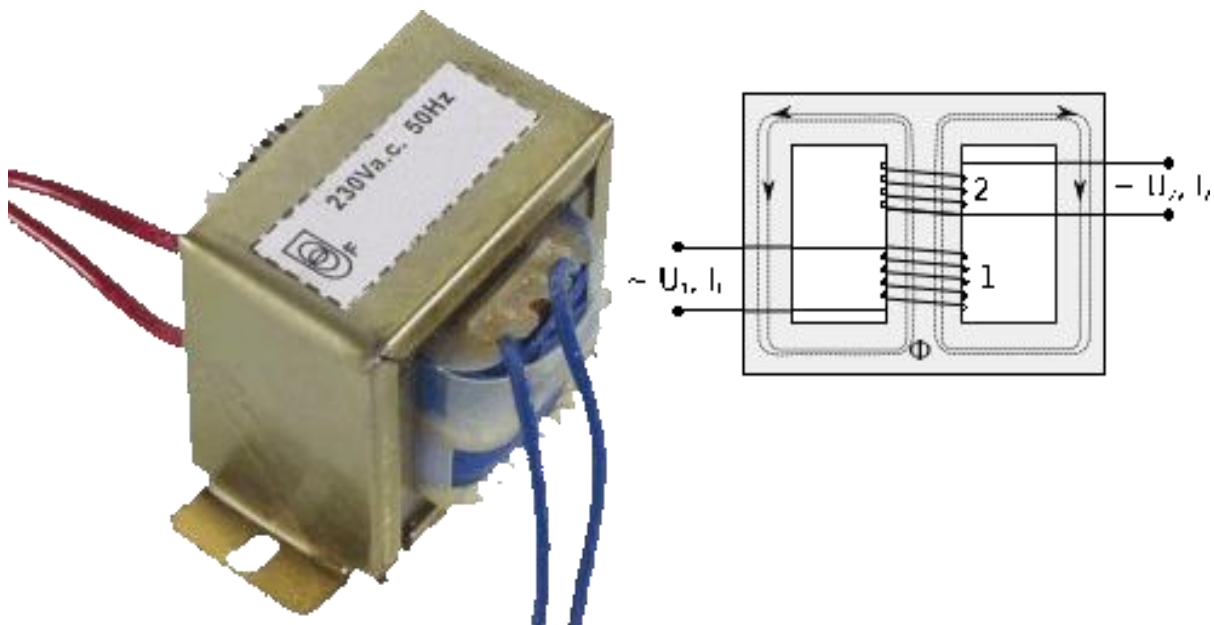
$$(U_{\text{prim}}/U_{\text{sec}}) = (N_1/N_2)$$

Η εκλογή του κατάλληλου μετασχηματιστή για μια τροφοδοτική διάταξη γίνεται με δύο βασικά κριτήρια:

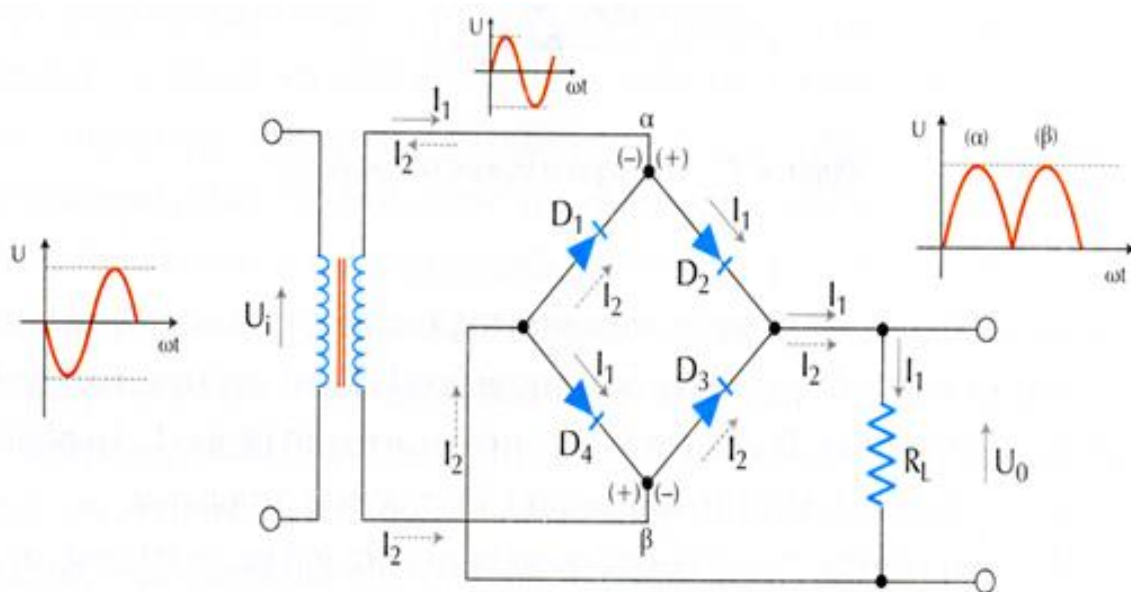
1. Η τάση εξόδου στο δευτερεύον του μετασχηματιστή να είναι τέτοια ώστε στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης να έχουμε την επιθυμητή DC τάση εξόδου.
2. Η ισχύς του μετασχηματιστή να είναι λίγο μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ εξόδου της τροφοδοτικής διάταξης, η οποία είναι:

$$P_{\text{εξόδου max}} = V_{\text{DCεξόδου}} * I_{\text{DCεξόδου max}}$$

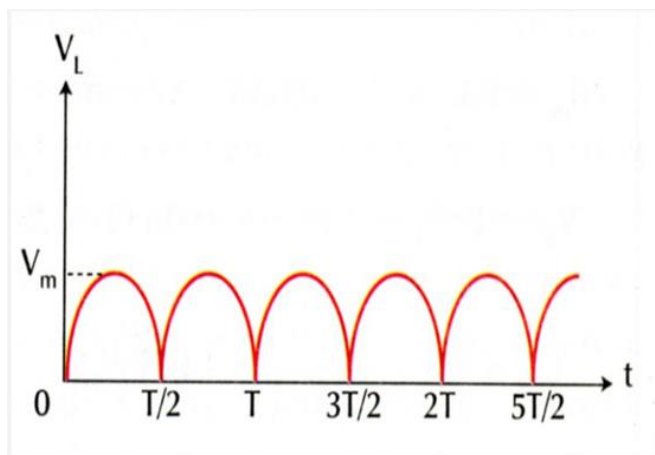
Ο Μ/Σ στην είσοδό του τροφοδοτείται με τάση 230V (1^{ov}) και στην έξοδό του (2^{ov}) υποβιβάζει την τάση στα 20V. Στη παρακάτω εικόνα (σχ.3.10) διακρίνεται ένας τέτοιος μετασχηματιστής. Στη συνέχεια η υποβιβασμένη τάση οδηγείται στη γέφυρα ανόρθωσης που συνίσταται από 4 διόδους που συνδέονται όπως στο σχήμα 3.11. Η γέφυρα ανόρθωσης ως εξάρτημα διαθέτει 2 ακροδέκτες για την είσοδο της εναλλασσόμενης τάσης 20V (διακρίνονται από το σύμβολο ~) και 2 ακροδέκτες εξόδου της συνεχούς τάσης που φέρουν τα χαρακτηριστικά (+) και (-). Και τελικά η μορφή της τάσης μετά την γέφυρα ανόρθωσης φαίνεται στο σχ.3.12.



Σχήμα 3.10: Μετασχηματιστής υποβιβασμού για το γραμμικό τροφοδοτικό του optodriver.



Σχήμα 3.11: Συνδεσμολογία ανορθωτικής γέφυρας.



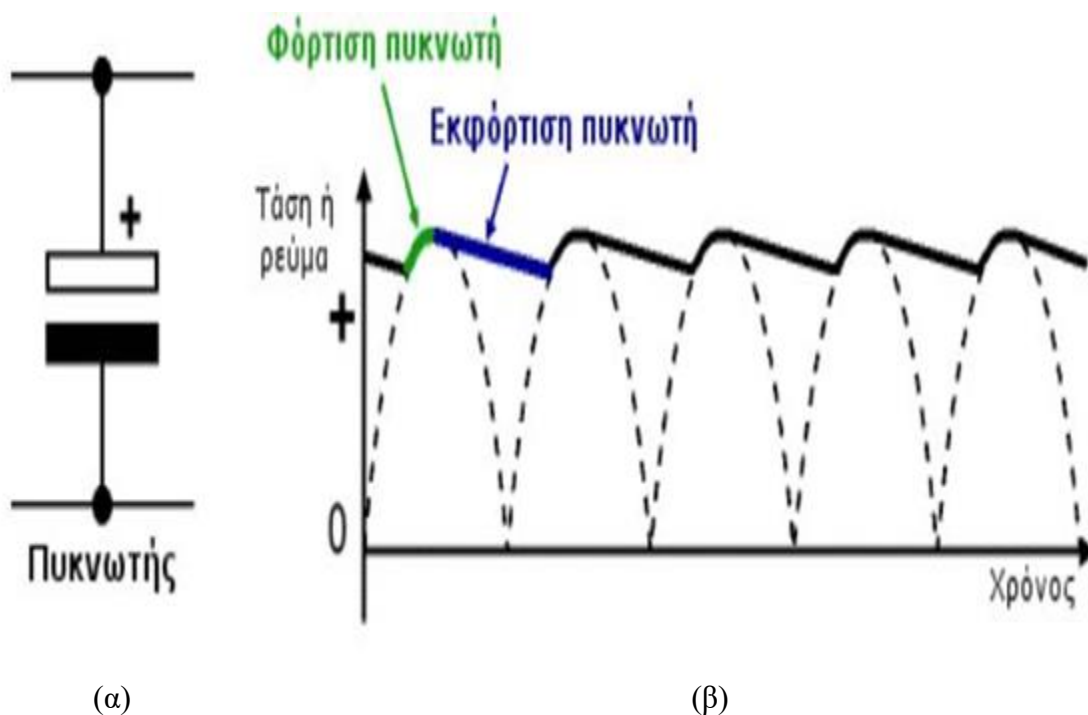
Σχήμα 3.12: Κυματομορφή της τάσης στην έξοδο της ανορθωτικής γέφυρας.

Ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής (σχ. 3.13) και ένας κεραμικός πυκνωτής συνδέεται παράλληλα με τη έξοδο της ανορθωτικής γέφυρας. Ο ρόλος των πυκνωτών είναι να σταθεροποιήσουν την τάση που έχει μετατραπεί από εναλλασσόμενη σε συνεχή αλλά με κυματώσεις.



Σχήμα 3.13: Φωτογραφία του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή.

Το σχήμα 3.14α παρουσιάζει το σύμβολο ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή όπου παρατηρούμε και την πολικότητά του, ενώ στο σχήμα 3.14β διακρίνουμε τη μη φιλτραρισμένη DC τάση (διακεκομμένη γραμμή) και την φιλτραρισμένη τάση (έντονη γραμμή) με τις περιοχές φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή.

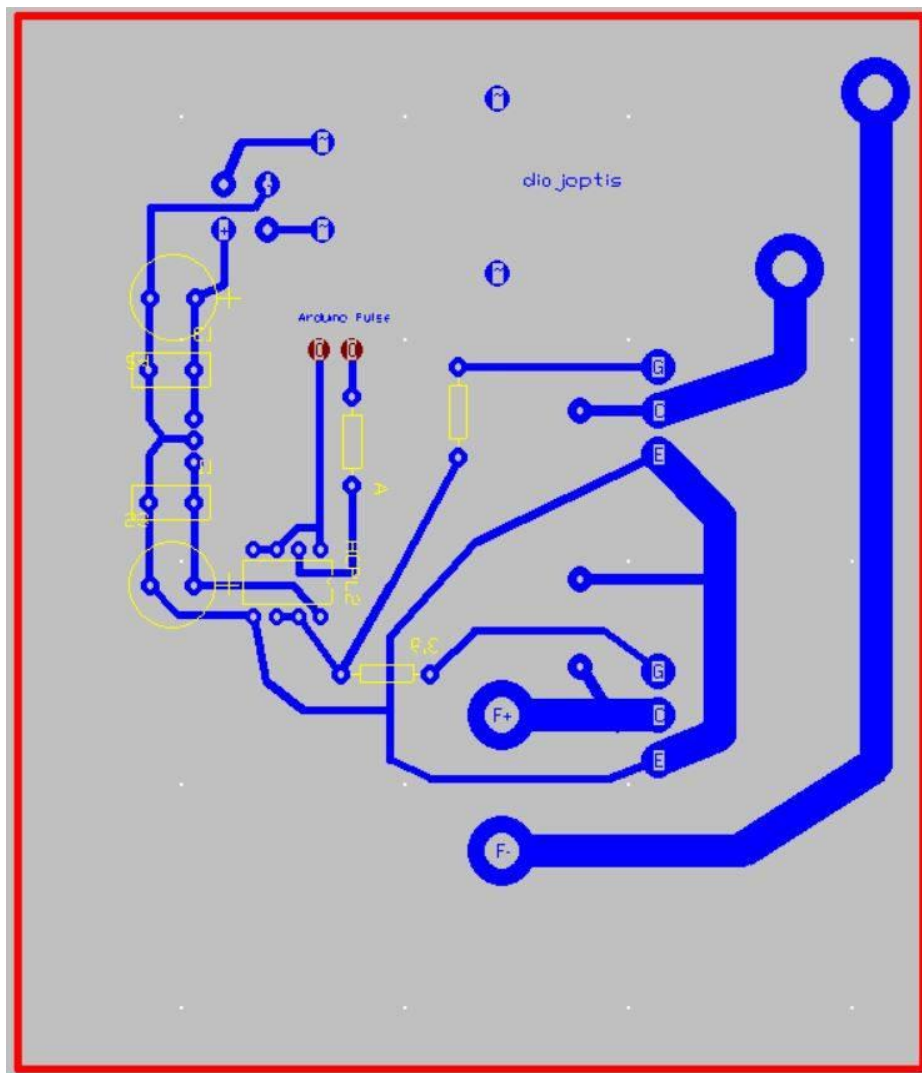


Σχήμα 3.14: Σύμβολο του πυκνωτή(α) και η κυματομορφή του φιλτραρίσματος της τάσης(β).

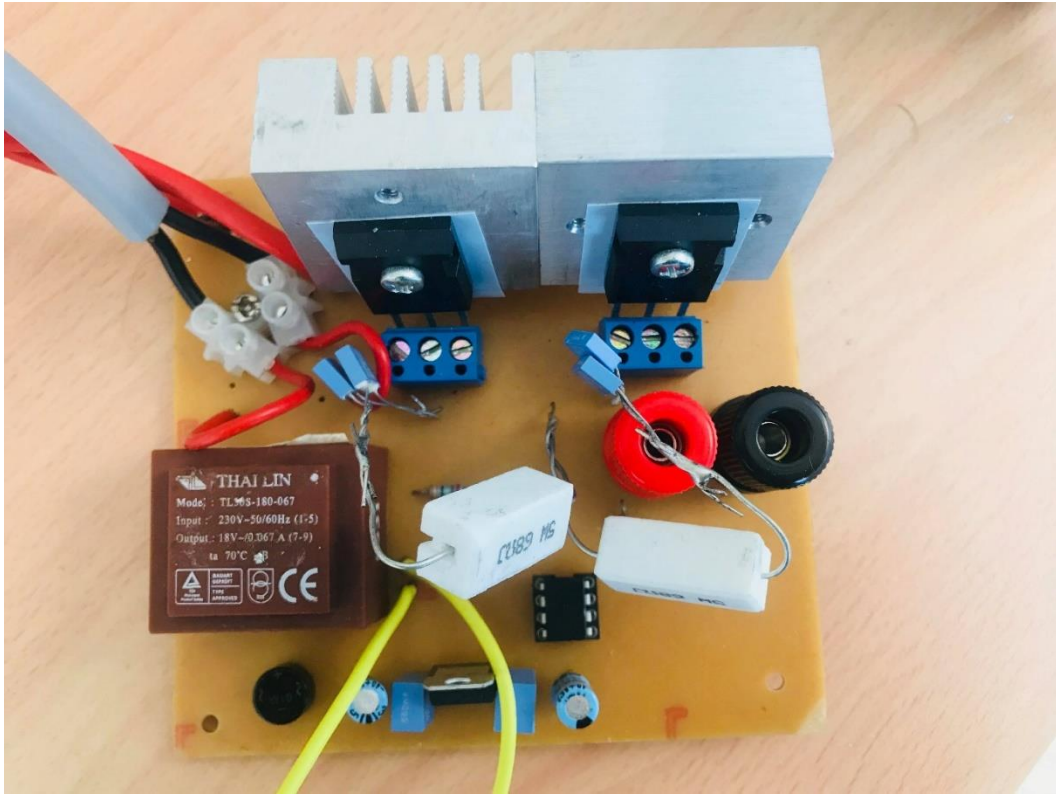
Ο **σταθεροποιητής** τάσης είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο είναι ρυθμισμένο σε κάποιες τάσεις εξόδου (π.χ. 5,15V) και συγκεκριμένο εύρος έντασης ρεύματος, διαθέτουν και κυκλώματα προστασίας από υπερφόρτιση και υπερθέρμανση. Είναι σημαντικό η τάση εισόδου τους να είναι μεγαλύτερη από τη σταθεροποιημένη τάση εξόδου, επειδή υπάρχει μια πτώση τάσης πάνω στο στοιχείο. Ο ρόλος του σταθεροποιητή είναι να εξαλείφει τις κυματώσεις της τάσης που απομένουν από τους πυκνωτές εξομάλυνσης και να αποδίδει μια τελείως σταθερή

τάση εξόδου. Μετά το σταθεροποιητικό τοποθετούμε έναν ηλεκτρολυτικό και έναν κεραμικό πυκνωτή προκειμένου να εξαλείψουν τυχόν εναπομείνουσες κυματώσεις της τάσης. Τελικά λαμβάνουμε μια σταθερή τάση η οποία είναι κατάλληλη να τροφοδοτήσουμε οποιαδήποτε συσκευή ή κύκλωμα.

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται το σχέδιο της βασικής πλακέτας που περιλαμβάνει το κύκλωμα ισχύος και το κύκλωμα παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων, ενώ στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η τελική πλακέτα που κατασκευάστηκε. Η παλμοδότηση γίνεται μέσω του επεξεργαστή ArduinoDue.



Σχήμα 3.15: Σχέδιο βασικής πλακέτας.



Σχήμα 3.16: Βασική πλακέτα.

3.2.3. Κύκλωμα δειγματοληψίας της τάσης

Τα 2 βασικά κριτήρια που πρέπει πάντοτε να πληρούνται για τις αναλογικές εισόδους του ArduinoDue είναι:

- α) οι τάσεις στις αναλογικές εισόδους να μην υπερβαίνουν τα 3.3Volt και
- β) οι τάσεις στις αναλογικές εισόδους να μην είναι αρνητικές.

Όπως είναι γνωστό η τάση του δικτύου είναι μια ημιτονοειδής συνάρτηση με πλάτος περί των 324Volt και συχνότητα 50Hz. Για να πληρούν τα 2 κριτήρια που αναφέραμε προηγουμένως, χρειάζεται:

1. Ο υποβιβασμός της τάσης να είναι κατάλληλος ώστε η V_{p-p} να κυμαίνεται στα 3V αντί για 648V (-324 ως 324 V).
2. Προσθήκη μιας DC συνιστώσας έτσι ώστε να μην λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Επομένως, για να γίνει η δειγματοληψία της τάσης δικτύου, το πρώτο βήμα είναι να υποβιβαστεί η τάση των 230 V στα 6 V με έναν Μ/Σ 230/6, δημιουργώντας με αυτό τον

τρόπο μία peak-to-peak τιμή ίση με 16.9706 V, και στην συνέχεια με τον διαιρέτη τάσης να προκύψει μία peak-to-peak τιμή ίση με 3 V.

Σε αυτήν την τάση προστίθεται εν σειρά μια DC τάση των 1.5 V, έτσι ώστε για να μην έχει αρνητικές τιμές.

Έχοντας υπόψη τα προαναφερόμενα οι 2 αντιστάσεις για τον διαιρέτη τάσης επιλέγονται $R_1=140k\Omega$ και $R_2= 30k\Omega$.

Παρακάτω επαληθεύονται οι τιμές των αντιστάσεων για διαιρέτη τάσης

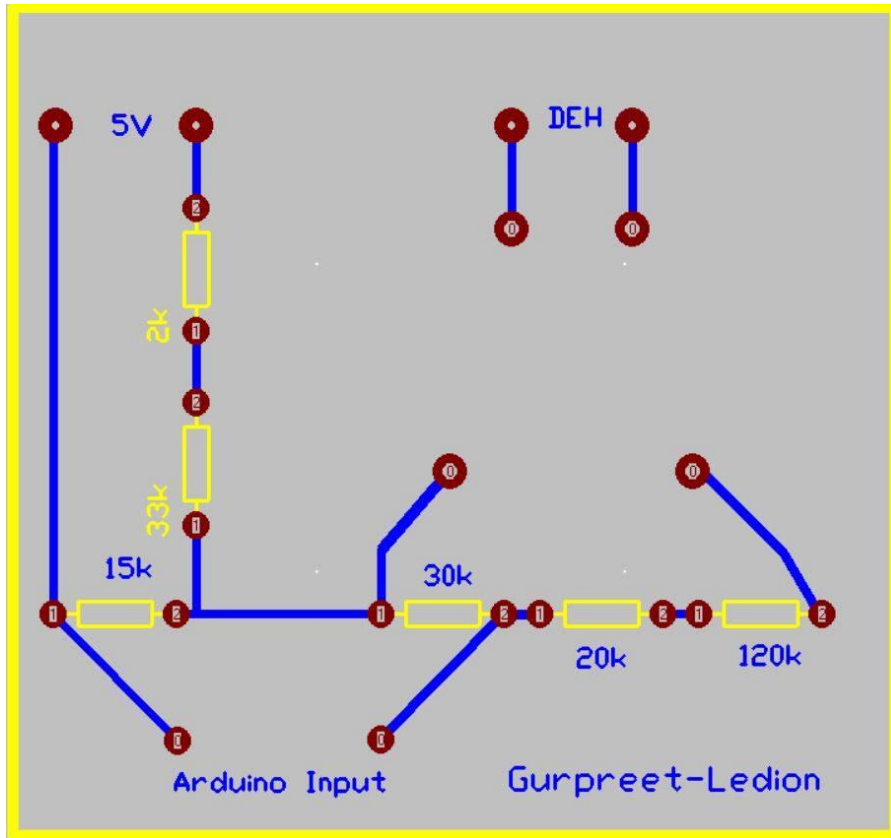
$$V_{R2} = (16.9706 * 30) / (140 + 30) = 2.9948 \text{ V.}$$

Για την DC συνιστώσα χρησιμοποιείται το τροφοδοτικό 5V του εμπορίου που στην είσοδο δέχεται την εναλλασσόμενη τάση των 230 Volt και βγάζει στην έξοδο του συνεχή και σταθερή τάση ίση με 5 Volt. Η τάση αυτή εφαρμόζεται στις δύο αντιστάσεις των 35k Ω και 15k Ω με αποτέλεσμα από τα άκρα της δεύτερης αντίστασης λαμβάνεται η σταθερή τάση του 1.5 Volt. Επειδή μερικές από τις παραπάνω αντιστάσεις δεν ήταν διαθέσιμες χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός άλλων αντιστάσεων.

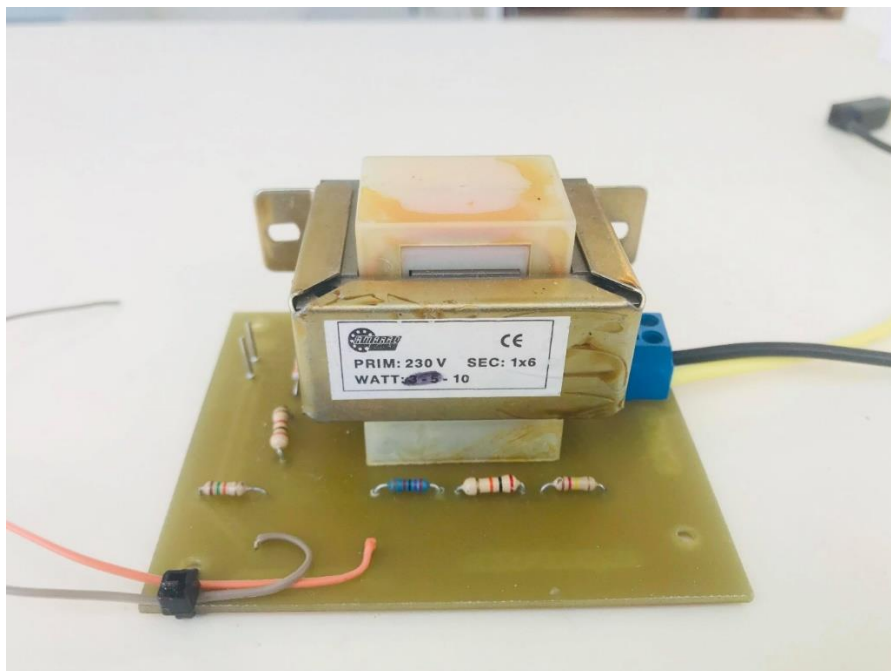
Το τελικό κύκλωμα δειγματοληψίας της τάσης αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

1. Έναν μετασχηματιστή 230/6 Volt
2. Μια αντίσταση των 120 k Ω
3. Μια αντίσταση των 20 k Ω
4. Μια αντίσταση των 30 k Ω
5. Μια αντίσταση των 15 k Ω
6. Μια αντίσταση των 33 k Ω
7. Μια αντίσταση των 2 k Ω
8. Ένα τροφοδοτικό με 5 Volt στην έξοδο

Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται το τελικό σχέδιο της πλακέτας της δειγματοληψίας της τάσης, ενώ το σχήμα 3.18 φαίνεται η ολοκληρωμένη αυτή πλακέτα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17, στο δευτερεύον του μετασχηματιστή συνδέονται σε σειρά οι αντιστάσεις 120 K Ω , 20 K Ω και 30 K Ω , στα άκρα της τελευταίας αντίστασης υπάρχει η εναλλασσόμενη τάση 3V. Σε αυτήν προστίθεται μια DC τάση των 1.5V, μέσω ενός διαιρέτη τάσης που αποτελείται από τρεις αντιστάσεις 33 K Ω , 2 K Ω και 15 K Ω , οι οποίες συνδέονται σε σειρά, και τροφοδοτούνται από την DC τάση 5V.



Σχήμα 3.17: Σχέδιο πλακέτας της δειγματοληψίας της τάσης.



Σχήμα 3.18: Αισθητήρας Τάσης.

3.2.4. Κύκλωμα δειγματοληψίας του ρεύματος

Για τη δειγματοληψία του ρεύματος χρησιμοποιείται ο αισθητήρας ρεύματος **ACS712**, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στο φαινόμενο Hall. Ο αισθητήρας αυτός τροφοδοτείται με συνεχή τάση ίση με 5 Volt, συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα ισχύος και βγάζει στην έξοδο του μια τάση που μεταβάλλεται ανάλογα με το ρεύμα που περνάει μέσα από αυτό. Ο αισθητήρας ρεύματος περιέχει μια DC συνιστώσα των 2.5 Volt, επομένως δεν χρειάζεται να προστεθεί επιπλέον DC συνιστώσα. Για μεγαλύτερη ακρίβεια θα μπορούσε να αφαιρεθεί μία DC συνιστώσα 1V, στα πλαίσια όμως αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν κρίνεται αναγκαίο κάτι τέτοιο. Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζεται ο αισθητήρας αυτός.



Σχήμα 3.19: Αισθητήρας ρεύματος.

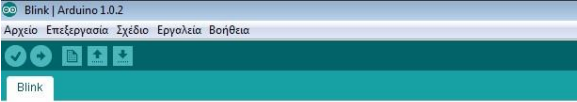
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ

4.1. Ο Μικροελεγκτής Arduino Due

Ο Arduino είναι μια πλακέτα ‘ανοικτού κώδικα’ με επεξεργαστή και περιφερειακά. Τα περιφερειακά του περιέχουν μονάδες εισόδου/εξόδου. Οι μονάδες εισόδου / εξόδου χωρίζονται σε Ψηφιακές και Αναλογικές. Υπάρχει μεγάλη πληθώρα συσκευών, συμβατών με τις πλακέτες Arduino. Στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιηθούν οι αναλογικές εισοδοί A/D για τη δειγματοληψία των κυματομορφών τάσης και ρεύματος και οι αναλογικές έξοδοι PWM για την παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων του μετατροπέα.

Το πρόγραμμα (ArduinoIDE) που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του Arduino είναι μια παραλλαγή της γλώσσας C/C++ και υποστηρίζει όλες τις βασικές εντολές και συναρτήσεις της γλώσσας C/C++. Ακολουθεί ένα παράδειγμα(σχ.4.1) προγράμματος στην γλώσσα αυτή [11].



```
Arduino IDE - Blink | Arduino 1.0.2
Αρχείο Επεξεργασία Σχέδιο Εργολογία Βοήθεια
Blink
/*
 * Blink
 * Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.
 *
 * This example code is in the public domain.
 */

// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
}

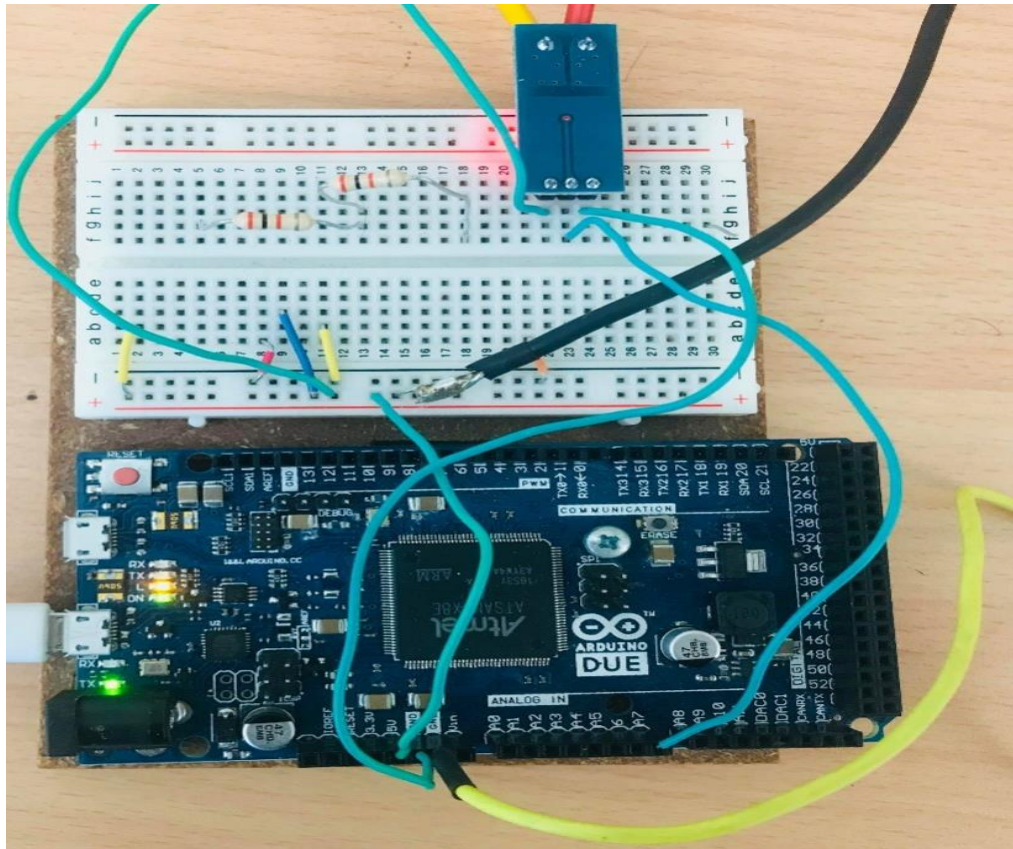
// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);             // wait for a second
  digitalWrite(led, LOW);  // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);             // wait for a second
}
```

Σχήμα 4.1: Περιβάλλον προγραμματισμού Arduino IDE [11].

Ο μικροεπεξεργαστής είναι της Atmel 91SAM3X8E των 32bit με πυρήνα ARM CORTEX-M3 και η τάση τροφοδοσίας του είναι στα 3,3V. Ο χρονισμός του βασίζεται σε ένα

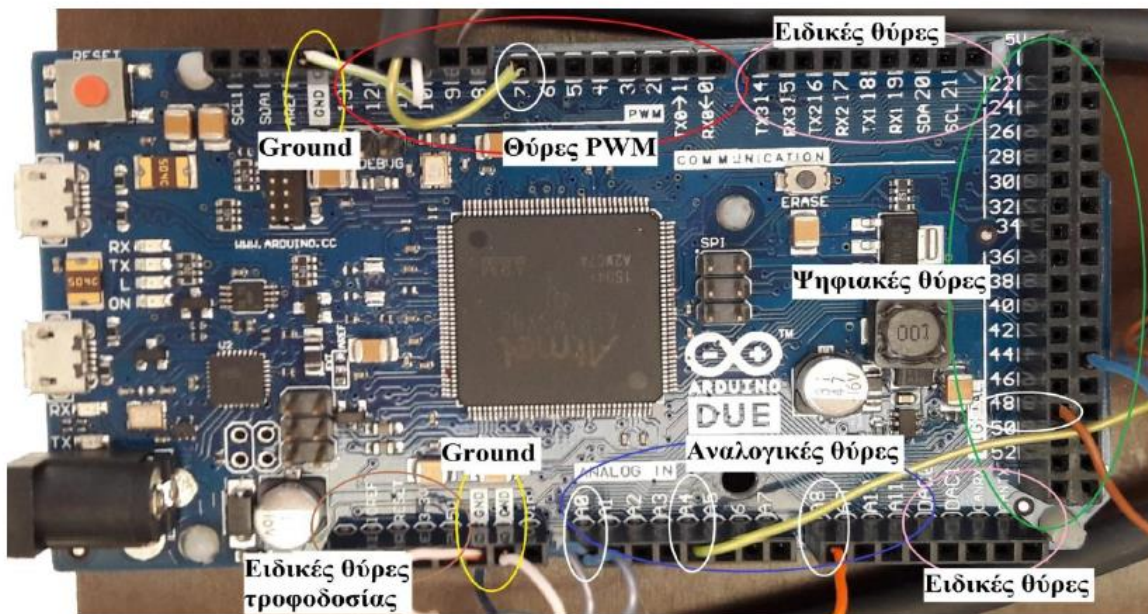
κρυσταλλικό ταλαντωτή των 84MHz. Ο μικροελεγκτής είναι προγραμματισμένος με ένα boot loader εκ κατασκευής έτσι ώστε να μη απαιτείται εξωτερικός προγραμματιστής. Παρακάτω αναφέρονται βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του Arduino Due:

- Τάση λειτουργίας: 3.3 V.
- Συνιστώμενη τάση εισόδου: 7-12V.
- Ελάχιστη τάση εισόδου: 6V.
- Μέγιστη τάση εισόδου:20V.
- Ψηφιακοί είσοδοι-έξοδοι: 54.
- Ακροδέκτες εξόδου PWM: 12.
- Αναλογικοί ακροδέκτες εισόδου: 12.
- Μνήμη: 512kb.
- Ταχύτητα ρολογιού: 84MHz
- Κουμπί επαναφοράς (Reset).
- Κουμπί διαγραφής.
- Μήκος: 101,53mm.
- Πλάτος:53,3mm.
- Βάρος: 36 gr.



Σχήμα 4.2: Ο Μικροελεγκτής Arduino Due.

Στο παρακάτω σχήμα (σχ. 4.3) φαίνονται αναλυτικά σημειωμένες οι θύρες εισόδου/εξόδου.



Σχήμα 4.3: Ο Arduino Due με τις Θύρες εισόδου-εξόδου του[6].

Ο προγραμματισμός του επεξεργαστή Arduino Due μπορεί να γίνει μέσω της εφαρμογής Arduino Ide, το οποίο όμως απαιτεί την άριστη γνώση της γλώσσας του Arduino. Αυτό μπορούμε να το αποφύγουμε εάν χρησιμοποιήσουμε το MATLAB/Simulink για τον προγραμματισμό. Αυτό είναι ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον και έτσι έχουμε την δυνατότητα να προγραμματίσουμε εύκολα και παράλληλα να κάνουμε δοκιμές με εξομοιώσεις.

Οι PWM αναλογικές έξοδοι του μικροεπεξεργαστή διευκολύνουν την διαδικασία προγραμματισμού, επειδή για κάθε τιμή από 0 μέχρι 255, το Duty Cycle των παλμών μεταβάλλεται ανάλογα. Συγκεκριμένα η τιμή 255 αντιστοιχεί στο 100% του Duty Cycle, η 127.5 αντιστοιχεί στο 50% κλπ.

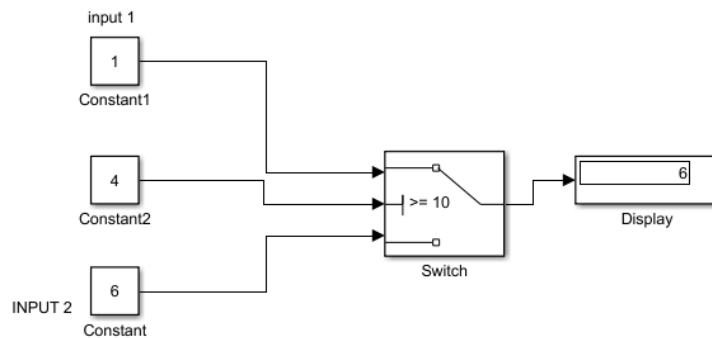
4.2. MATLAB και Simulink

Το MATLAB είναι ένα πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιείται σε ερευνητικές και άλλες εφαρμογές με επιστημονικούς υπολογισμούς [12]. Το Simulink είναι προέκταση του λογισμικού MATLAB. Όπως δηλώνεται και από το όνομα, ο βασικός του ρόλος είναι η προσομοίωση ηλεκτρομηχανικών συστημάτων. Η μοντελοποίηση γίνεται μέσα από ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) χωρίς να απαιτείται η πληκτρολόγηση στο παράθυρο εντολών του MATLAB [12]. Εκτός από την επίλυση αριθμητικών υπολογισμών παρέχει οπτικοποίηση των δεδομένων (γραφικές παραστάσεις) και τη δυνατότητα προγραμματισμού.

4.2.1. Παραδείγματα στο Simulink

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα στο Simulink, τα οποία έχουν άμεση ή έμμεση σχέση με το τελικό πρόγραμμα. Στο **παράδειγμα 1** (σχ. 4.4) παρουσιάζεται το πρόγραμμα στο Simulink για την λογική πράξη “**IF - ELSE**”. Αυτό το πρόγραμμα μπορεί να υλοποιηθεί στην εξομοίωση και στον προγραμματισμό.

IF ELSE LOGIC

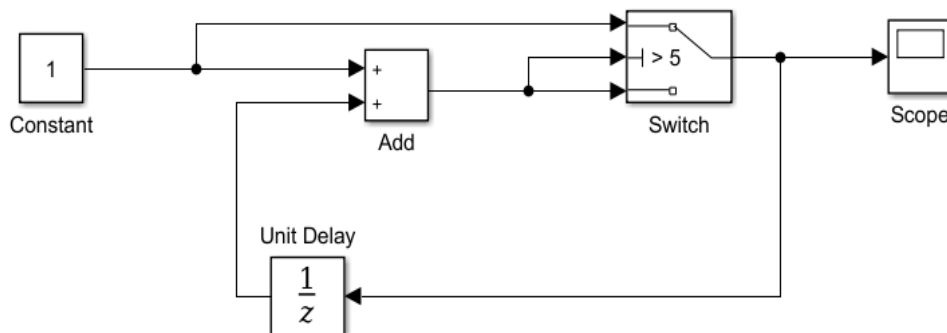


Σχήμα 4.4: Πρόγραμμα λογικής πράξης <<IF-ELSE>>.

Συγκεκριμένα στο παραπάνω σχήμα η μεσαία είσοδος του Μπλοκ 'Switch' (τιμή 10) συγκρίνεται με την τιμή Constant2 (τιμή 4). Αν αληθεύει η λογική πράξη, τότε στην έξοδο θα «περάσει» η **επάνω είσοδος** (Constant1) ίση με 1, στην αντίθετη περίπτωση θα έχουμε στην έξοδο την τιμή της **κάτω εισόδου** που έχει τιμή ίση με 6 (Constant).

Στο παράδειγμα 2 (σχ. 4.5) παρουσιάζεται ένας Counter που μετράει από 1 μέχρι το 5 και στην συνέχεια ξαναρχίζει από το 1. Αυτό το πρόγραμμα μπορεί να υλοποιηθεί μόνο για την εξομοίωση. Για τον προγραμματισμό κάποιου επεξεργαστή πρέπει να αντικατασταθεί το Block Unit Delay με άλλο Block διακριτών τιμών.

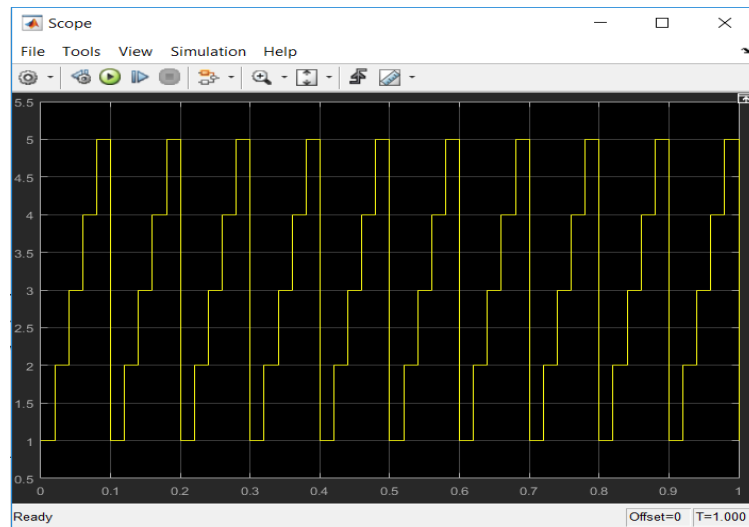
UP COUNTER



Σχήμα 4.5: Πρόγραμμα για την υλοποίηση ενός Counter.

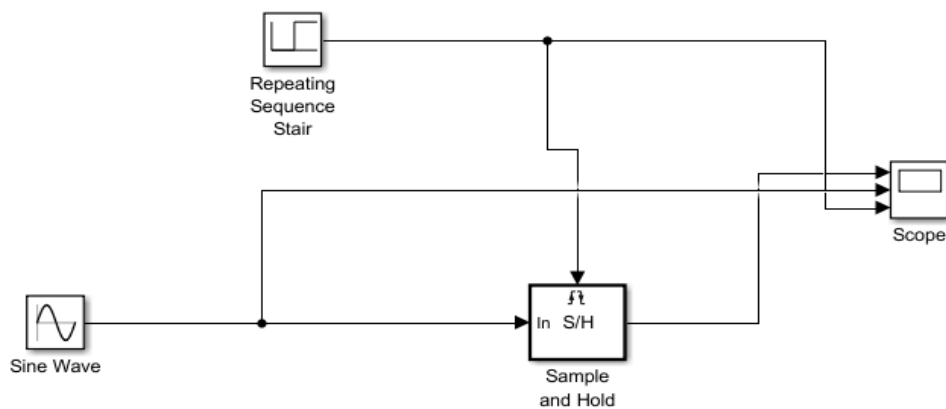
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το **SWITCH BLOCK** συγκρίνει την μεσαία του είσοδο με το αριθμό 5, και εάν αληθεύει η λογική έκφραση, τότε η άνω είσοδο του μπλοκ «περνάει» στην έξοδο του, στην αντίθετη περίπτωση «περνάει» η κάτω είσοδος που έχει τιμή ίση με το μετρητή, άρα η τιμή στην έξοδο θα αυξάνεται ανά 1 μονάδα μέχρι το 5 όπου στη συνέχεια θα

παίρνει ξανά την τιμή 1. Στο σχήμα 4,6 παρουσιάζεται σε περιβάλλον Simulink η γραφική παράσταση του Counter.



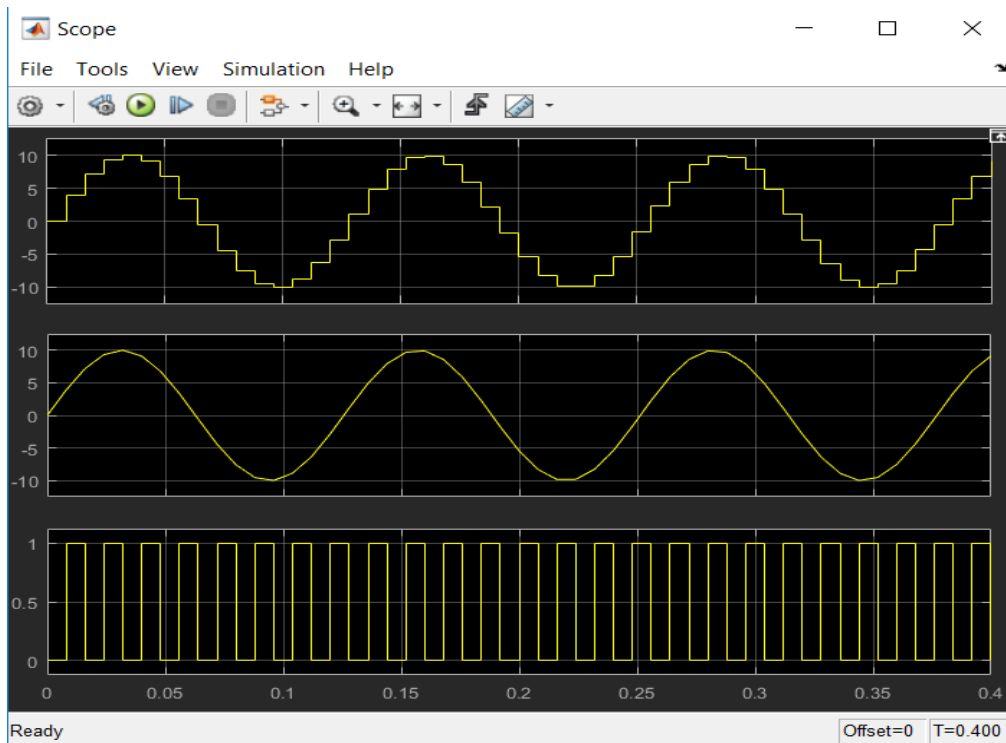
Σχήμα 4.6: Γραφική παράσταση της εξόδου του Counter.

Στο παράδειγμα 3 (σχ. 4.7) παρουσιάζεται το μπλοκ Sample and hold, που παίρνει δείγμα ανάλογα με τον παλμό στην πύλη που βρίσκεται στο πάνω μέρος του συγκεκριμένου μπλοκ (repeating sequence). Δηλαδή, όταν στην πύλη έχουμε την τιμή 1 από το μπλοκ repeating sequence, το μπλοκ του ημιτόνου εξάγει την τιμή που έχει τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Ύστερα κρατάει (συγκρατεί) αυτή την τιμή μέχρι το μπλοκ repeating sequence να δώσει τιμή 1 εκ' νέου.



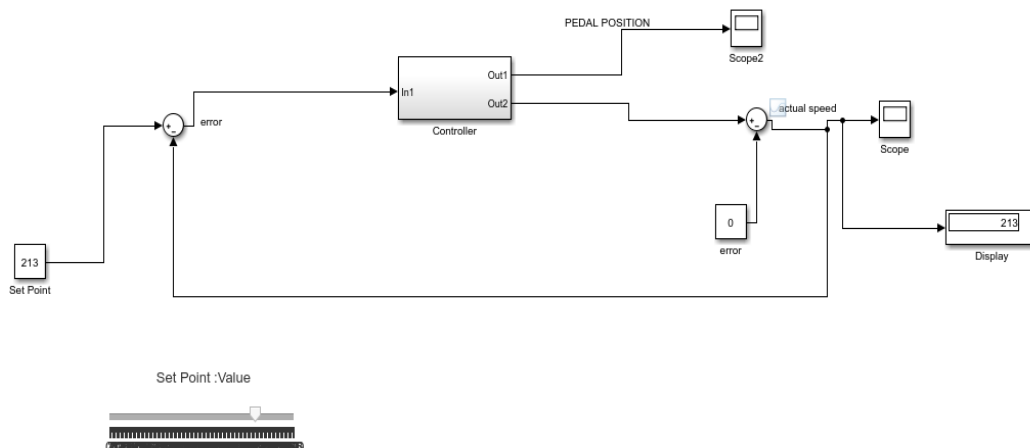
Σχήμα 4.7: Υλοποίηση του μπλοκ SampleandHold.

Τα αποτελέσματα μπορούμε να τα παρατηρήσουμε στις παρακάτω γραφικές(σχ. 4.8)



Σχήμα 4.8: Σήμα εισόδου (μεσαία), σήμα εξόδου (άνω), σήμα ελέγχου (κάτω).

Το παράδειγμα του σχήματος 4.9 που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκε ως βάση για το τελικό πρόγραμμα του Arduino. Συγκεκριμένα στο παράδειγμα αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία προγραμματισμού ενός κλειστού Συστήματος Αυτόματου Ελέγχου με την βοήθεια οποίου ελέγχουμε π.χ. την ταχύτητα ενός αυτοκίνητου.



Σχήμα 4.9: Κλειστό Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου.

Η διαδικασία είναι η εξής:

Στο Setpoint δηλώνεται η επιθυμητή ταχύτητα μέσω του Slider:Set Point Value. Στην συνέχεια το σήμα αυτό συγκρίνεται με την ανατροφοδότηση και δημιουργείται το σήμα σφάλματος. Το σφάλμα αυτό εισάγεται σε έναν ελεγκτή (π.χ. P ή P.I.) η έξοδος του οποίου ελέγχει την επιτάχυνση. Αν επιθυμούμε να επιταχύνουμε γρηγορότερα, τότε μπορούμε να εφαρμόσουμε μεγαλύτερο σφάλμα επεμβαίνοντας στο $\text{block error} = \text{constant}$ (0). Βεβαίως αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί και με άλλους τρόπους π.χ. με ένα κέρδος σε σειρά μετά το error στην έξοδο του αθροιστή.

4.2.2. Το πρόγραμμα για την παλμοδότηση και τον έλεγχο ισχύος

Πριν την υλοποίηση και σχεδίαση οποιουδήποτε πολύπλοκου προγράμματος, απαιτείται η περιγραφή και ανάλυση του προβλήματος. Στην συνέχεια το σύνθετο πρόβλημα χωρίζεται σε μικρότερα επιμέρους προβλήματα και εάν απαιτείται, αυτά τα επιμέρους προβλήματα χωρίζονται σε ακόμα απλούστερα και μικρότερα προβλήματα, με αποτέλεσμα τα απλά προβλήματα που προκύπτουν, να μπορούν να αντιμετωπιστούν χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία και ο προγραμματισμός τους να είναι απλός.

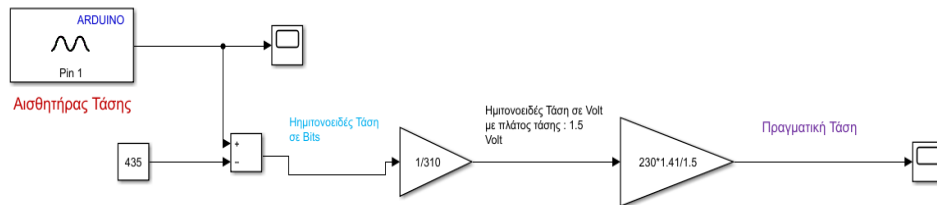
Επομένως το πρόγραμμα για την παλμοδότηση και τον έλεγχο ισχύος χωρίζεται σε εξής μέρη:

1. Δειγματοληψία τάσης δικτύου
2. Δειγματοληψία ρεύματος δικτύου
3. Υπολογισμός ενεργού τιμής τάσης και ενεργού τιμής ρεύματος
4. Υπολογισμός ενεργού ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα
5. Έλεγχος ισχύος

• Δειγματοληψία τάσης δικτύου

Η δειγματοληψία της τάσης δικτύου απαιτείται για να μετρηθεί η τιμή της ενεργού ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα. Επίσης, είναι αναγκαία για την sPWM παλμοδότηση, για το συγχρονισμό των παλμών με την τάση δικτύου. Ο προγραμματισμός για την δειγματοληψία

της τάσης φαίνεται στο σχήμα 4.10.



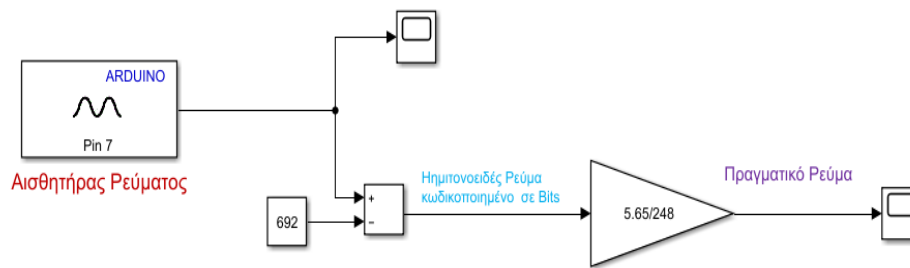
Σχήμα 4.10: Πρόγραμμα για την δειγματοληψία τάσης.

Ο **Analog to Digital** μετατρέπει τα δείγματα σε **bits**, δηλαδή τα **3.3Volt** μετατρέπονται σε **1024bits**. Στην περίπτωση μας ο αισθητήρας τάσης βγάζει στην έξοδο του ημιτονοειδές σήμα με τιμές οι οποίες κυμαίνονται από **0 μέχρι 3Volt**. Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, η dc συνιστώσα του αισθητήρα τάσης είναι περίπου **1.50 Volt**, που αντιστοιχεί σε **465 bits**. Όμως από τις μετρήσεις που πήραμε, εντοπίστηκε ότι η dc συνιστώσα είναι τελικά ίση με **1.40Volt**, που αντιστοιχεί σε **435 bits**.

Έτσι αρχικά αφαιρείται η dc συνιστώσα και στη συνέχεια η ημιτονοειδής τάση σε bits μετατρέπεται σε ημιτονοειδή τάση σε Volt με πλάτος τάσης ίσο με **1.5V**. Τέλος μετατρέπεται η τάση με πλάτος **1.5V** στην πραγματική τάση του δικτύου που έχει πλάτος τάσης ίσο με $230 \cdot 1.41 = 324V$.

- **Δειγματοληψία ρεύματος δικτύου**

Όπως η δειγματοληψία τάσης του δικτύου έτσι και η δειγματοληψία ρεύματος δικτύου απαιτείται για την μέτρηση της ενεργού ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα. Ο προγραμματισμός για την δειγματοληψία του ρεύματος είναι παρόμοιος με αυτόν της δειγματοληψίας της τάσης, με μόνες διαφορές ότι η dc συνιστώσα στον αισθητήρα ρεύματος είναι περίπου **2.5V** (λόγω του αισθητήρα ρεύματος) και ότι τα Gain θα έχουν διαφορετικές τιμές. Ο προγραμματισμός για την δειγματοληψία του ρεύματος φαίνεται παρακάτω (σχ. 4.11).



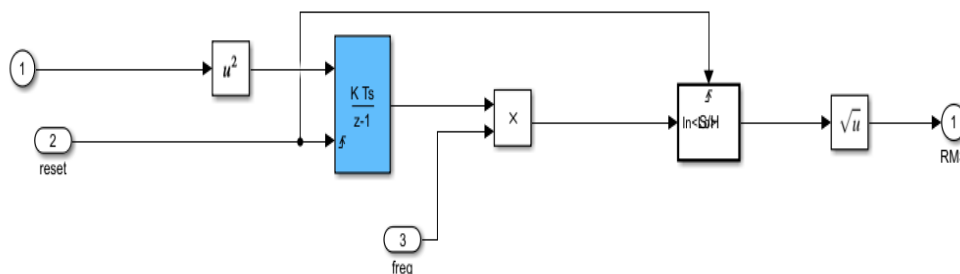
Σχήμα 4.11: Πρόγραμμα για την δειγματοληψία του ρεύματος.

- **Υπολογισμός ενεργού τιμής τάσης και ενεργού τιμής ρεύματος**

Ο υπολογισμός αυτών των δύο μεγεθών είναι σημαντικός, επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως επαλήθευση για το εάν το πρόγραμμα που σχεδιάστηκε είναι σωστό ή όχι. Η ενεργός τιμή της τάσης, δηλαδή η V_{rms} ισούται με:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (4.1)$$

Η παραπάνω πράξη μπορεί να υλοποιηθεί στο Simulink ως εξής:



Σχήμα 4.12: Πρόγραμμα υπολογισμού V_{rms} .

Συγκεκριμένα μέσω της εισόδου 1 εισέρχεται το σήμα της στιγμιαίας τάσης, ενώ μέσω της εισόδου 2 εισέρχεται το σήμα reset, το οποίο όταν έχει τιμή '1', ο ολοκληρωτής μηδενίζεται και αρχίζει την διαδικασία ολοκλήρωσης από την αρχή. Το σήμα reset εξάγει παλμούς με συχνότητα ίση με την συχνότητα της τάσης δικτύου, καθορίζοντας έτσι τα όρια ολοκλήρωσης στη σχέση 4.1. Η είσοδος 3 είναι η συχνότητα της τάσης του δικτύου, δηλαδή στην ουσία είναι το πηλίκο $1/T$ της σχέσης 4.1. Το πρόγραμμα για τον υπολογισμό της ενεργού τιμής του

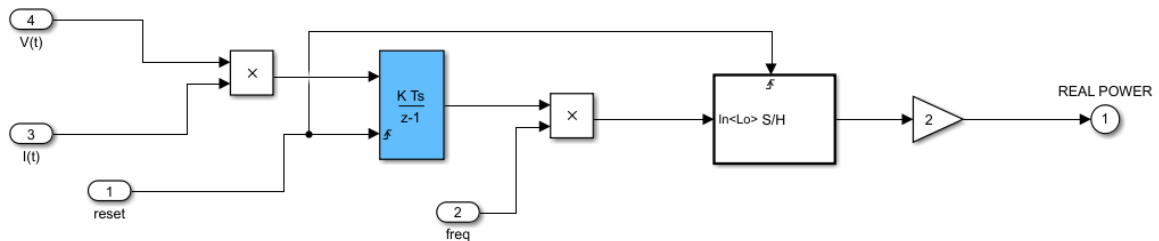
ρεύματος είναι παρόμοιο με αυτό της τάσης, με μόνη διαφορά ότι η είσοδος 1 θα λαμβάνει τιμές από την A/D είσοδο του ρεύματος.

- **Υπολογισμός της ενεργού ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα**

Για να είναι δυνατός ο έλεγχος της ενεργού ισχύς στην είσοδο του μετατροπέα, απαιτείται η ανατροφοδότηση της πραγματικής τιμής της ενεργού ισχύς στο σύστημα ελέγχου. Συνεπώς στο πρόγραμμα πρέπει να υπολογίζεται συνεχώς η ενεργός ισχύς, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (4.2)$$

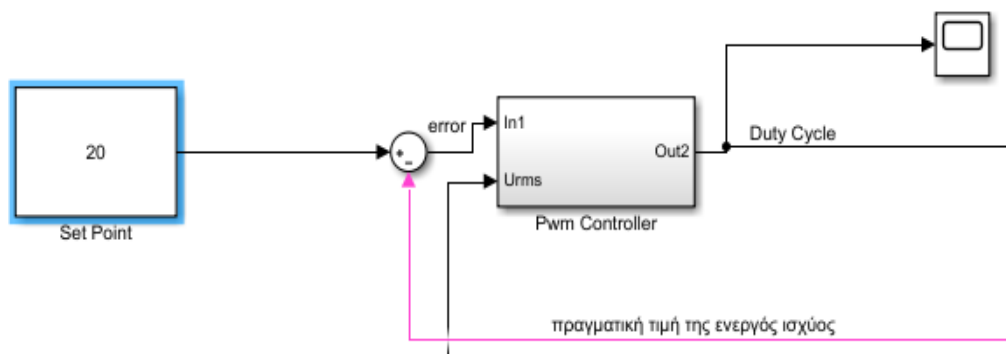
Συγκεκριμένα οι στιγμιαίες τιμές της τάσης δικτύου και του ρεύματος δικτύου πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους, στην συνέχεια το γινόμενο αυτό ολοκληρώνεται και τέλος όλο αυτό πολλαπλασιάζεται με το πηλίκο 1/T. Στο σχήμα φαίνεται το πρόγραμμα για τη συγκεκριμένη διαδικασία.



Σχήμα 4.13: Πρόγραμμα υπολογισμού ενεργού ισχύος.

- **Έλεγχος Ισχύος**

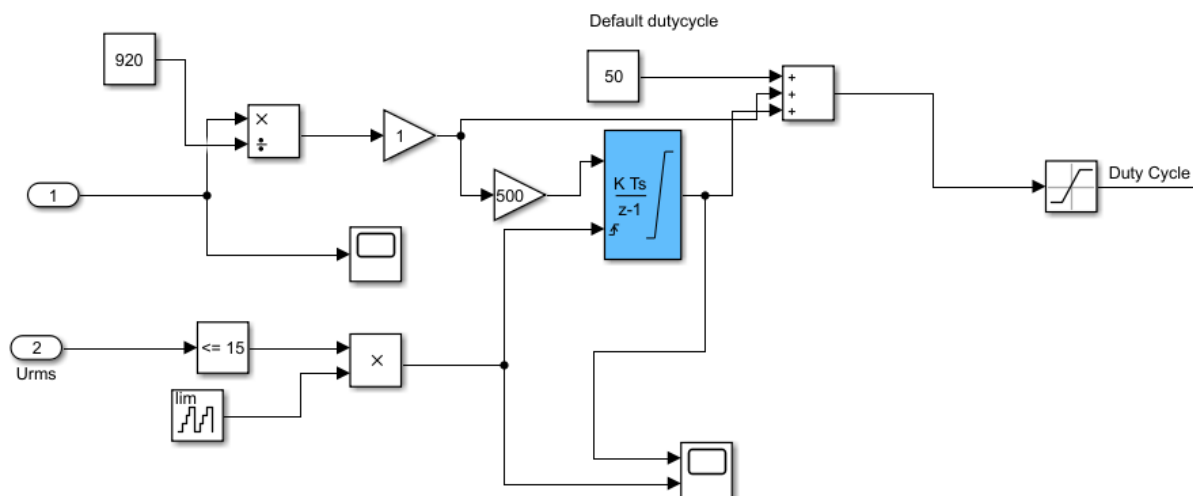
Το πρόγραμμα για τον έλεγχο ισχύος (σχ. 4.14) βασίζεται στο παράδειγμα 4 που παρουσιάστηκε προηγουμένως.



Σχήμα 4.14: Πρόγραμμα για έλεγχο της ενεργού ισχύος.

Συγκεκριμένα η πραγματική τιμή της ενεργού ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα ανατροφοδοτείται και συγκρίνεται με το Set Point. Η διαφορά των δύο αυτών τιμών είναι το σήμα σφάλματος, το οποίο οδηγείτε στο υποσύστημα 'PwmController', το οποίο με τη σειρά του εξάγει την τιμή του Duty Cycle (0 έως 255) για να οδηγηθεί στην PWM έξοδο του Arduino.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το υποσύστημα 'PWM Controller'(σχ. 4.15).



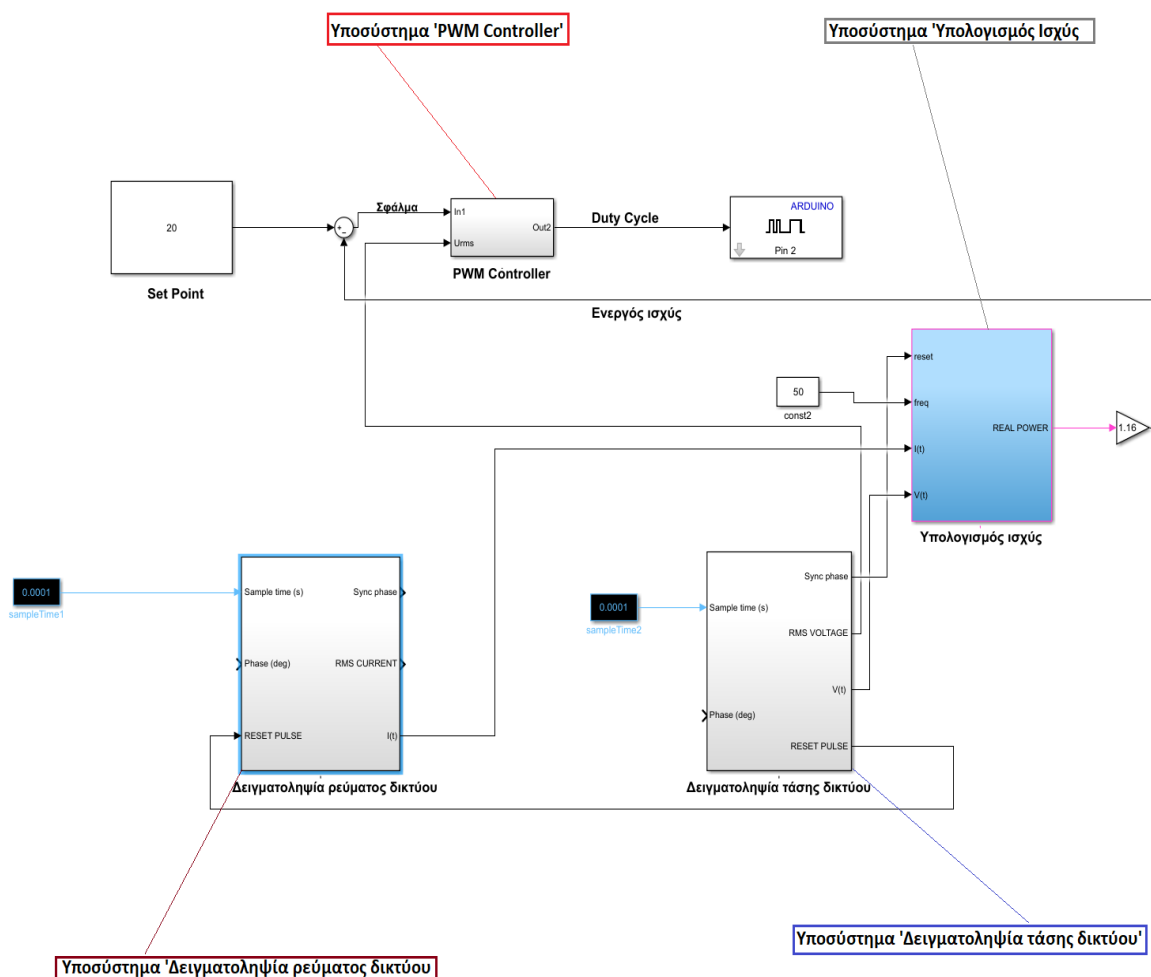
Σχήμα 4.15: Υποσύστημα 'PWM Controller'.

Η τιμή 920 που δηλώνεται μέσω constant είναι η μέγιστη ισχύς στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ο συγκεκριμένος μετατροπέας. Ο λόγος αυτής της οριοθέτησης είναι επειδή ο αισθητήρας ρεύματος που χρησιμοποιείται, μπορεί να μετρήσει τιμές ρεύματος μέχρι 5A. Επίσης, κατά τη δειγματοληψία του ρεύματος μπορεί η ακρίβεια να είναι μεγαλύτερη για τιμές ρεύματος μέχρι 4A. Το Duty Cycle δεν ρυθμίζεται άμεσα, αλλά μέσω ενός ολοκληρωτή, υλοποιώντας έτσι I-ελεγκτή (integral). Επίσης, το duty cycle επηρεάζεται όχι μόνο από την

έξοδο του ολοκληρωτή αλλά και ανάλογα-P (proportional) με το σήμα σφάλματος, Υλοποιώντας με αυτό τον τρόπο ένα P-I ελεγκτή (Proportional-Integer Control). Με αυτό το τρόπο το Duty Cycle μεταβάλλεται ομαλά. Συγκεκριμένα όσο μικραίνει το σήμα σφάλματος, τόσο πιο αργά μεταβάλλεται και το Duty Cycle. Επιπλέον στην έξοδο τοποθετήθηκε ένα **Saturation block** με ελάχιστη και μέγιστη τιμή το 0 και 255 αντίστοιχα, καθώς το 0 αντιστοιχεί στο 0% του Duty Cycle και το 255 στο 100%.

- **Το τελικό πρόγραμμα**

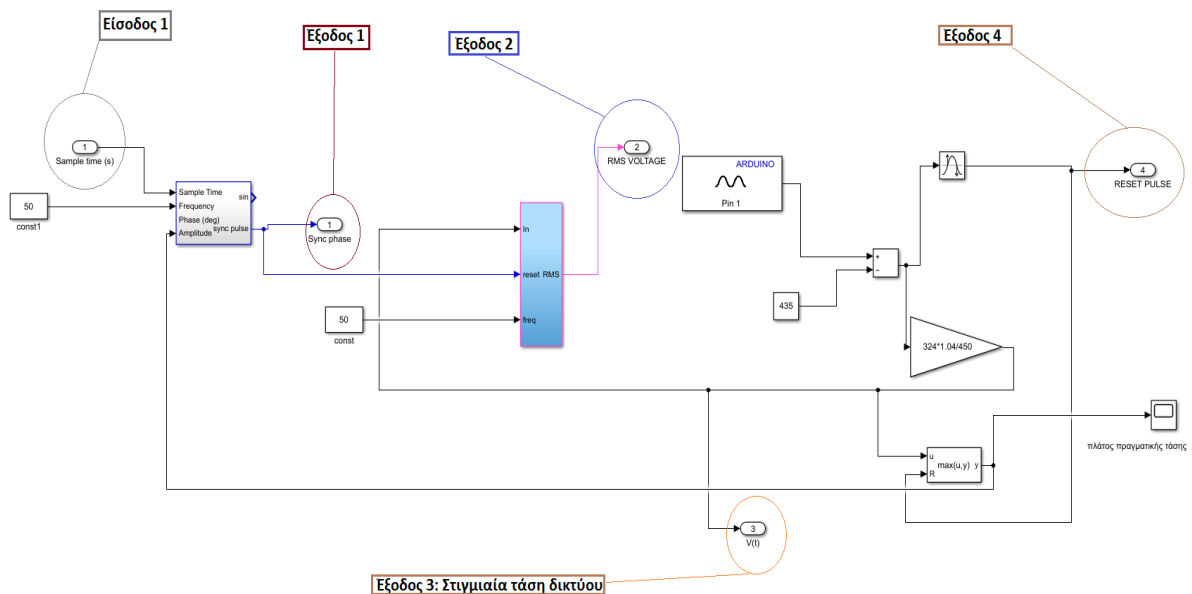
Στην συνέχεια παρουσιάζεται το τελικό πρόγραμμα και τα επιμέρους μπλοκ που το υλοποιούν.



Σχήμα 4.16: Το τελικό πρόγραμμα.

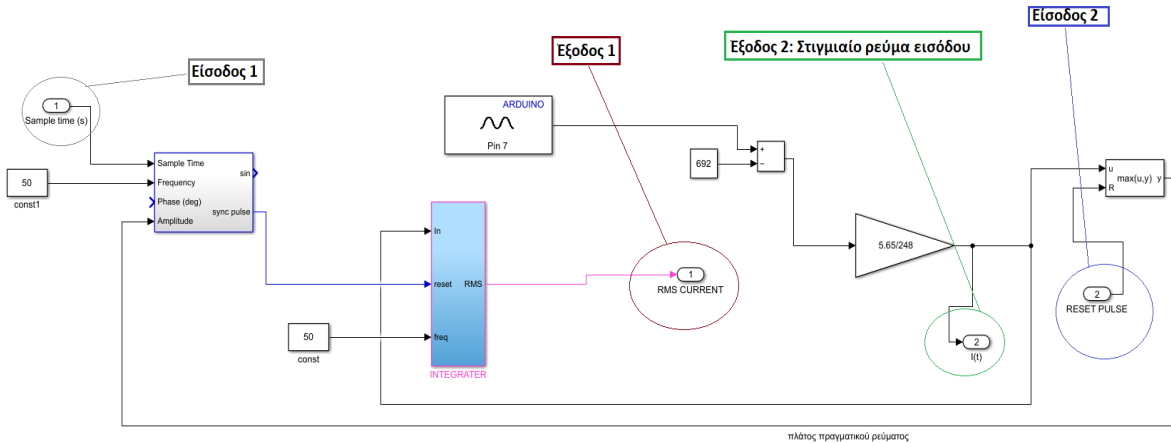
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16, το υποσύστημα ‘Δειγματοληψία ρεύματος δικτύου’ και το υποσύστημα ‘Δειγματοληψία τάσης δικτύου’ δειγματοληπτούν και εξάγουν το ρεύμα εισόδου

και την τάση εισόδου αντίστοιχα, τα οποία οδηγούνται στο υποσύστημα ‘Υπολογισμός ισχύς’, το οποίο με την σειρά του υπολογίζει και εξάγει την τιμή της ενεργού ισχύος εισόδου, αυτή συγκρίνεται με την τιμή του Setpoint, έτσι δημιουργείται το σφάλμα της ισχύς και οδηγείται στο υποσύστημα ‘PWM Controller’ για να επεξεργαστεί και να υπολογιστεί η τιμή του Duty Cycle.



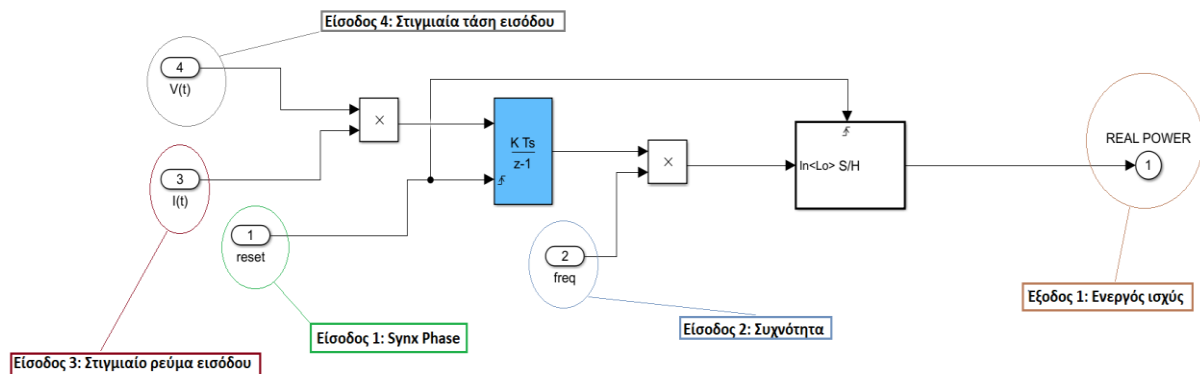
Σχήμα 4.17: Υποσύστημα ‘Δειγματοληψία τάσης δικτύου’.

Στο εσωτερικό μέρος του υποσυστήματος ‘Δειγματοληψία τάσης δικτύου’(σχ.4.17) παρατηρούμε με λεπτομέρεια όλες τις εισόδους και τις εξόδους, συγκεκριμένα η είσοδος 1 είναι το Sample time που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμά μας, ενώ η έξοδος 1 είναι το sync phase, η οποία οδηγείται στο υποσύστημα ‘υπολογισμός Ισχύς’, για να μηδενίσει τον ολοκληρωτή. Η έξοδος 2 είναι η RMS τιμή της τάσης εισόδου, η έξοδος 3 είναι η στιγμιαία τάση του δικτύου, η οποία μας χρειάζεται για τον υπολογισμό της ενεργού ισχύς, και τέλος η έξοδος 4 είναι το Reset Pulse, το οποίο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του πλάτους της δειγματοληπτόμενης τάσης και του ρεύματος.



Σχήμα 4.18: Υποσύστημα ‘Δειγματοληψία ρεύματος δικτύου’.

Στο εσωτερικό μέρος του υποσυστήματος ‘Δειγματοληψία ρεύματος δικτύου’(σχ.4.18) διακρίνουμε με λεπτομέρεια όλες τις εισόδους και τις εξόδους, συγκεκριμένα η είσοδος 1 είναι το Sample time. Η είσοδος 2 είναι το Reset Pulse, το οποίο είναι η έξοδος 4 του υποσυστήματος ‘Δειγματοληψία τάσης δικτύου’. Η έξοδος 1 είναι η RMS τιμή του ρεύματος εισόδου, και τέλος, η έξοδος 2 είναι το στιγμιαίο ρεύμα εισόδου, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενεργός τιμής της ισχύς.



Σχήμα 4.19: Υποσύστημα ‘Υπολογισμός Ισχύς’.

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.19, το υποσύστημα ‘Υπολογισμός Ισχύς’ έχει τέσσερις εισόδους και μία έξοδο, συγκεκριμένα η είσοδος 1 είναι το Sync Phase, η οποία κάθε φορά που έχει τιμή ίση με 1, μηδενίζει τον ολοκληρωτή, η είσοδος 2 είναι η συχνότητα που δηλώνουμε και έχει τιμή ίση με 50, η είσοδος 3 είναι το στιγμιαίο ρεύμα εισόδου και η είσοδος

4 είναι η στιγμιαία τάση εισόδου, και οι τέσσερεις αυτές είσοδοι χρησιμοποιούνται για το υπολογισμό της ενεργός ισχύς, η οποία οδηγείται στην έξοδος 1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά την ολοκλήρωση του κατασκευαστικού μέρους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σχετικά με την λειτουργία του μετατροπέα. Ο στόχος αυτών των μετρήσεων είναι η επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του μετατροπέα και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη λειτουργία του. Έτσι, ο μετατροπέας δοκιμάζεται και εξάγονται αποτελέσματα σχετικά με το βαθμό απόδοσης, την ποιότητα του ελέγχου και αξιολογούνται κάποιες κλασικές τεχνικές παλμοδότησης.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε έλεγχος ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα. Αυτό ισχύει για όλες τις παρακάτω μετρήσεις. Ως φορτίο χρησιμοποιήθηκε ωμική αντίσταση με τις παρακάτω τιμές:

1. 440 Ohm.
2. 220 Ohm.
3. 110 Ohm.

Και για τα τρία ήδη φορτίων χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές παλμοδότησης PWM και sPWM.

5.1. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 440Ω

Θεωρητικά η μέγιστη ισχύ του φορτίου θα είναι περίπου $P_{\max} = 230^2/440 = 120\text{W}$. Επομένως το Set Point της ισχύος δηλώνεται από 20 μέχρι 120W με βήμα 10W. Στην συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων για τις δύο περιπτώσεις τεχνικών παλμοδότησης (PWM και sPWM).

5.1.1. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 440Ω με τεχνική παλμοδότησης PWM

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση της τεχνικής παλμοδότησης PWM και για ωμικό φορτίο 440Ω. Πραγματοποιείται έλεγχος της ισχύος εισόδου ορίζοντας διάφορες τιμές (επιθυμητή ισχύς) και αποτυπώνονται στον πίνακα 1 οι εξής τιμές: V_{rms} ενεργός τιμή τάσης εισόδου και εξόδου, I_{rms} ενεργός τιμή ρεύματος εισόδου και εξόδου, P ενεργός ισχύς, S φαινόμενη ισχύς, η βαθμός απόδοσης. Η φαινόμενη ισχύς υπολογίζεται από το γινόμενο $S = V_{rms} * I_{rms}$, ο συντελεστής ισχύος $PF = (P/S)$ και ο βαθμός απόδοσης $\eta = P_{εξ} / P_{εισ}$.

Επιθυμητή Ισχύς(W)	Είσοδος					Έξοδος			Βαθμός απόδοσης	Duty Cycle
	$V_{rms}(V)$	$I_{rms}(A)$	$P_{εισ}(W)$	$S_{εισ}(VA)$	$PF_{εισ}$	$V_{rms}(V)$	$I_{rms}(A)$	$P_{εξ}(W)$	η	%
20	229	0.20	24	45.8	0.524	50	0.21	19.4	0.80	19
30	229	0.25	32.2	57.25	0.563	68	0.25	27.5	0.85	27
40	229	0.30	45.3	68.7	0.66	93	0.30	39.6	0.87	36
50	229	0.34	56.7	77.86	0.728	118	0.34	50.86	0.89	46
60	229	0.38	68.3	87.02	0.785	143	0.38	63.53	0.93	56
70	229	0.425	80.4	97.50	0.825	169	0.41	73.96	0.92	66
80	229	0.475	92.5	109	0.85	194	0.45	85.18	0.92	76
90	229	0.52	104	120	0.865	218	0.49	97.19	0.93	85
100	229	0.57	115	130.7	0.88	243	0.52	105.64	0.91	95
105	229	0.58	120	133	0.90	250	0.54	114.44	0.95	98

Πίνακας 1: Πειραματικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές της επιθυμητής ισχύος με την χρήση της τεχνικής παλμοδότησης PWM χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

Όπως παρατηρούμε η τάση εισόδου του μετατροπέα είναι σταθερή, αφού αυτή είναι η τάση του δικτύου, ενώ η τάση στο φορτίο μεταβάλλεται ανάλογα με την επιθυμητή τιμή της ισχύος που απαιτείται. Με τον ίδιο τρόπο μεταβάλλεται και το ρεύμα εξόδου, το οποίο στην ουσία είναι ίδιο με το ρεύμα εισόδου. Παρατηρούμε επίσης ότι η ισχύς στην είσοδο του μετατροπέα δεν είναι ακριβώς ίδια με την επιθυμητή ισχύ καθώς στον αισθητήρα ρεύματος εμφανίζονται παράσιτα με την αύξηση της ισχύος. Μια άλλη παρατήρηση είναι για το συντελεστή ισχύος ο οποίος λαμβάνει χαμηλές τιμές της για χαμηλή ισχύ. Αυτό είναι ένα γνωστό φαινόμενο στην PWM και οφείλεται στην υψηλή τιμή των ανώτερων αρμονικών του ρεύματος ως προς τη βασική αρμονική του. Περιγραφικά εξηγείται πως: «η διάρκεια αγωγής είναι μικρή και έτσι τα κενά είναι αυξημένα».

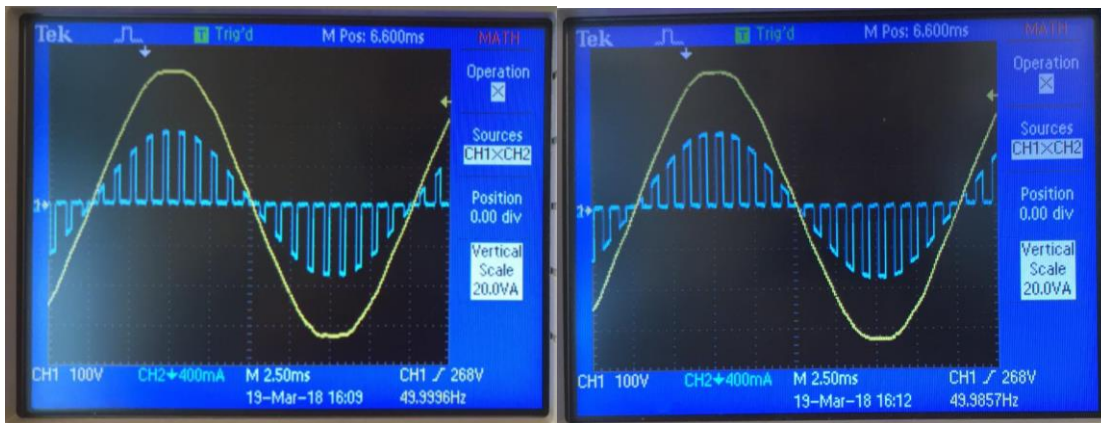
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα της τάσης εισόδου και του ρεύματος εισόδου για διάφορες τιμές του Set Point (επιθυμητή τιμή της ενεργού ισχύος).



(α)

(β)

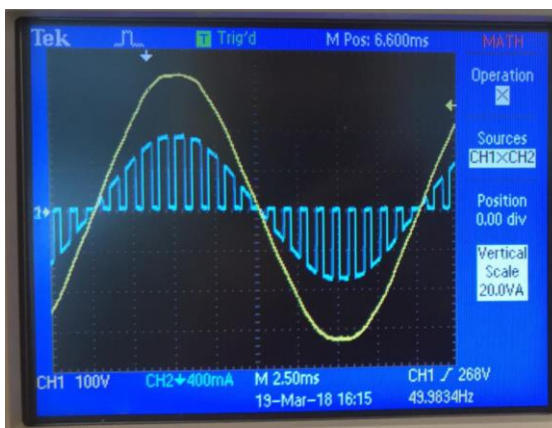
Σχήμα 5.1: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ: (α) 20 Watt και (β) 30 Watt με παλμοδότηση PWM.



(α)

(β)

Σχήμα 5.2: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ: (α) 40 Watt και (β) 50 Watt με παλμοδότηση PWM.

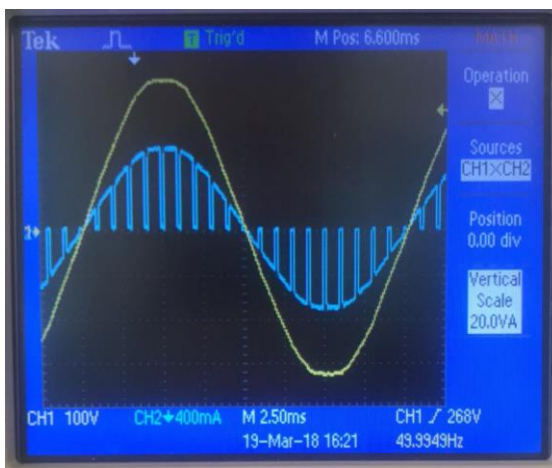


(α)

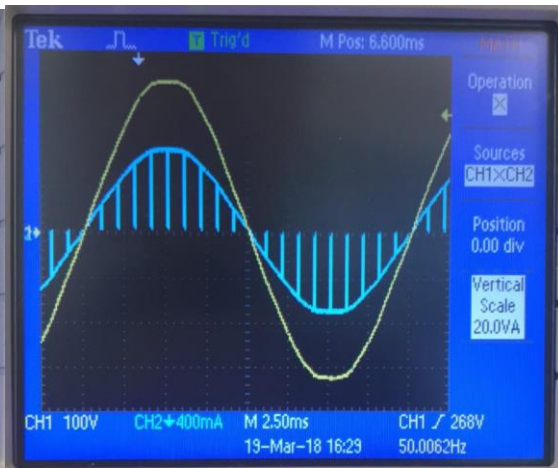


(β)

Σχήμα 5.3: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ: (α) 60 Watt και (β) 70 Watt με παλμοδότηση PWM.



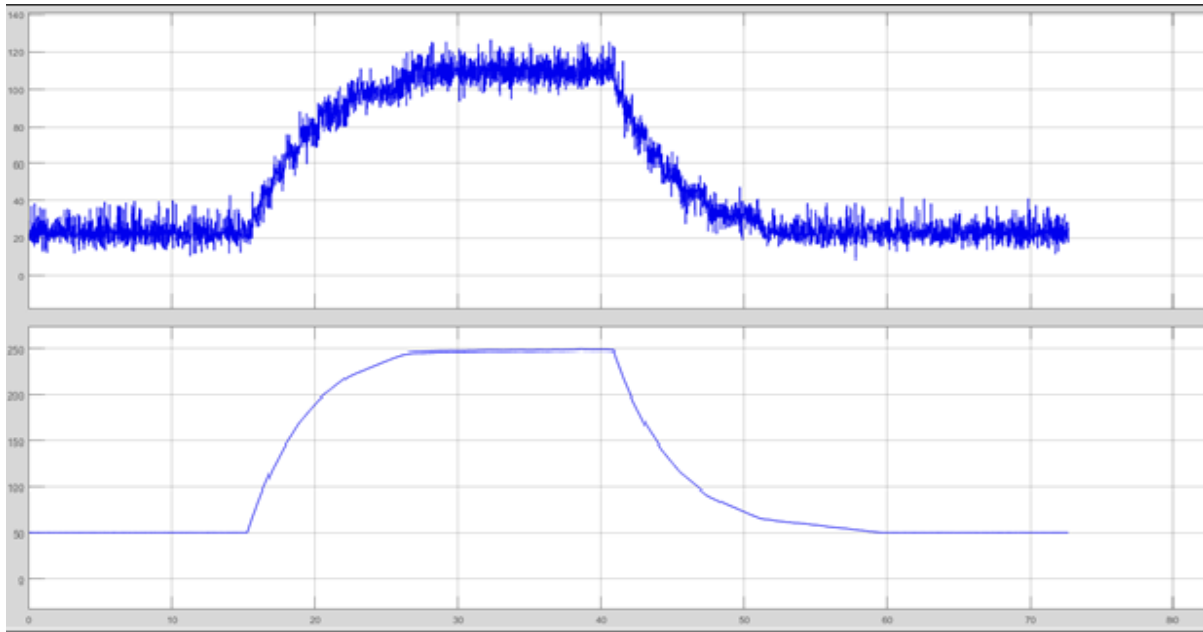
(α)



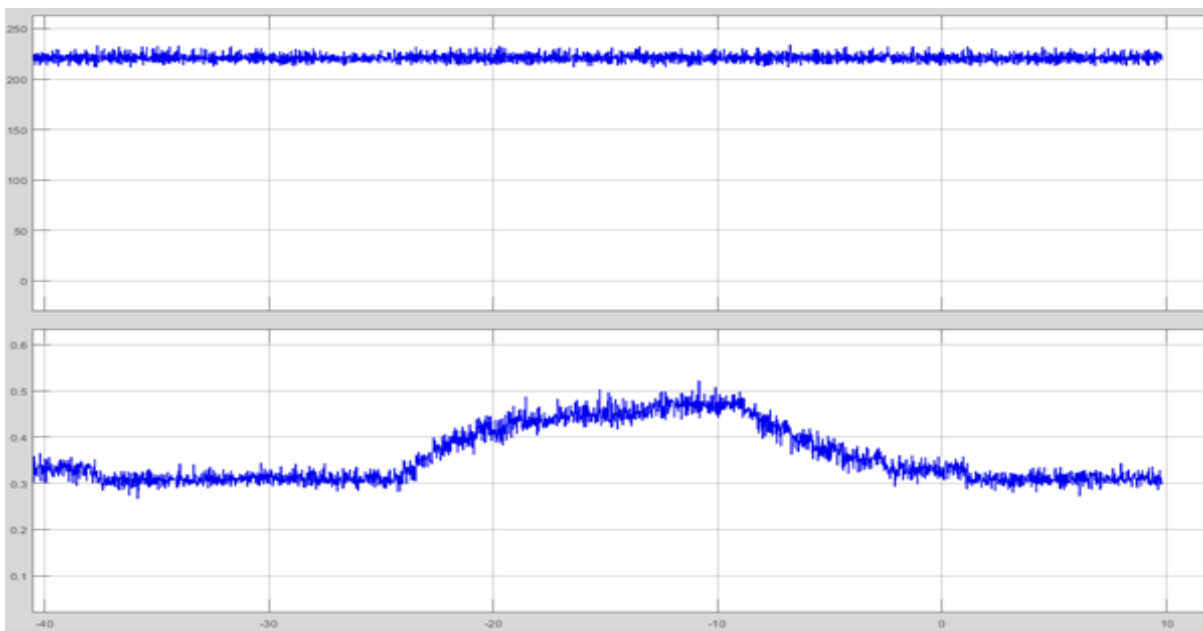
(β)

Σχήμα 5.4: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ: (α) 80 Watt και (β) 100 Watt με παλμοδότηση PWM.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται πώς μεταβάλλεται η ισχύς, το Duty Cycle, η ενεργός τιμή της τάσης και η ενεργός τιμή του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο, όταν αλλάζουμε την επιθυμητή ισχύς από 20W στα 110W και αντίστροφα.



Σχήμα 5.5: Μεταβολή ισχύος (επάνω) και Duty Cycle (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 20W στα 110W και αντίστροφα.



Σχήμα 5.6: Μεταβολή τάσης εισόδου (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 20W στα 110 W και αντίστροφα.

Όπως παρατηρούμε το σύστημα μας μπορεί να μεταβάλλει την ισχύ από την χαμηλότερη στην μέγιστη σε 10 δευτερόλεπτα περίπου, αυτό γίνεται για να αποφύγουμε τις απότομες μεταβολές της ισχύς, άρα και του ρεύματος. Ο χρόνος αυτός μπορεί να μειωθεί αρκετά, όμως, δεν θα είχαμε τη δυνατότητα να καταγράψουμε το αποτέλεσμα του ελέγχου με τα διαθέσιμα εργαλεία. Επίσης, το «θόλωμα» που εμφανίζεται οφείλεται τόσο στην αδυναμία τέλει καταγραφής

(από τη σειριακή του Arduino), όσο και σε πραγματικά φαινόμενα (παράσιτα και ακρίβεια δειγματοληψίας).

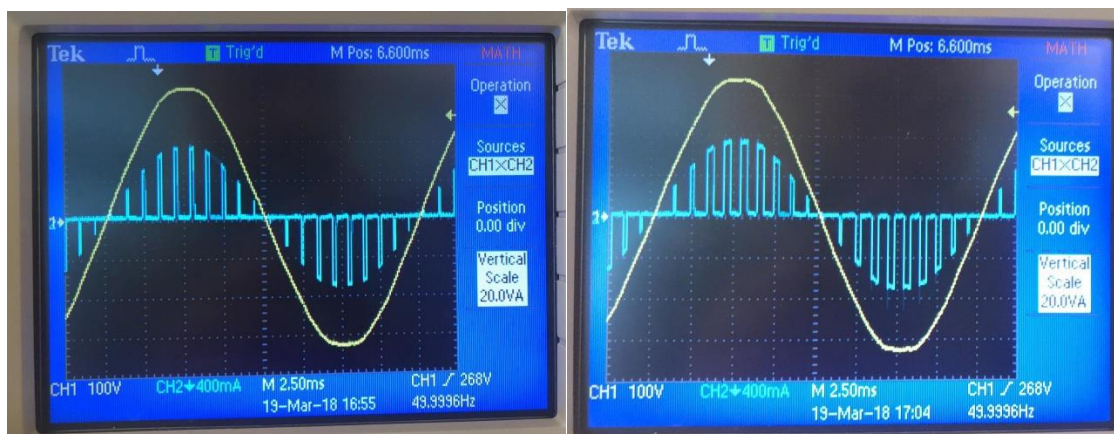
5.1.2. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 440Ω με τεχνική παλμοδότησης sPWM

Επιθυμητή Ισχύς(W)	Είσοδος					Έξοδος			Βαθμός απόδοσης	Duty Cycle
	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εισ} (W)	S _{εισ} (VA)	PF _{εισ}	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εξ} (W)	η	%
20	228	0.24	27	54.7	0.49	68	0.24	24	0.88	0-27
30	228	0.28	37	63.84	0.58	87	0.28	32	0.865	0-36
40	228	0.31	48.5	70.7	0.68	107	0.31	42.3	0.871	0-44
50	228	0.35	61.5	79.8	0.77	126	0.35	53.9	0.875	0-58
60	228	0.38	69	86.65	0.79	146	0.38	65.5	0.920	0-70
70	228	0.42	81.3	95.76	0.85	165	0.42	77.6	0.955	0-78
80	228	0.44	90	100.32	0.9	180	0.44	85.20	0.945	0-90
88	228	0.46	98	104.42	0.94	191	0.46	92.30	0.941	0-99

Πίνακας 2: Πειραματικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές της επιθυμητής ισχύος με την χρήση της τεχνικής παλμοδότησης sPWM χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

Όπως βλέπουμε στον παραπάνω πίνακα, το Duty Cycle στην περίπτωση της sPWM παλμοδότησης, μεταβάλλεται ανάλογα με την στιγμιαία τάση δικτύου, από το 0 μέχρι μια τιμή η οποία εξαρτάται από την τιμή της επιθυμητής ισχύος. Παρατηρείται επίσης ότι ο βαθμός απόδοσης είναι βελτιωμένος συγκριτικά με την περίπτωση της τεχνικής παλμοδότησης PWM. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνεται η διάρκεια των παλμών στη μέγιστη τάση και έτσι αυξάνεται και η διάρκεια του ρεύματος στη μέγιστη ροή ισχύος.

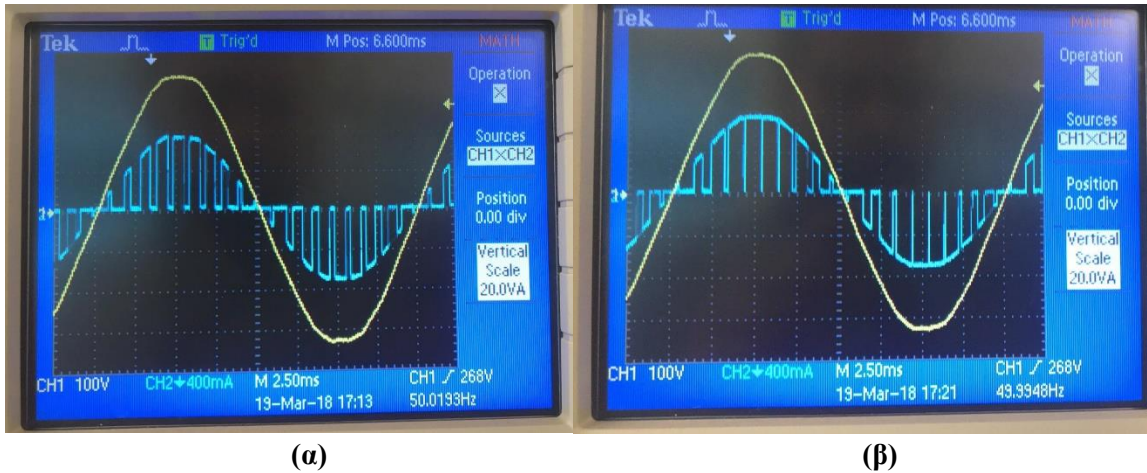
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα της τάσης εισόδου και του ρεύματος εισόδου για διάφορες τιμές του Set Point.



(α)

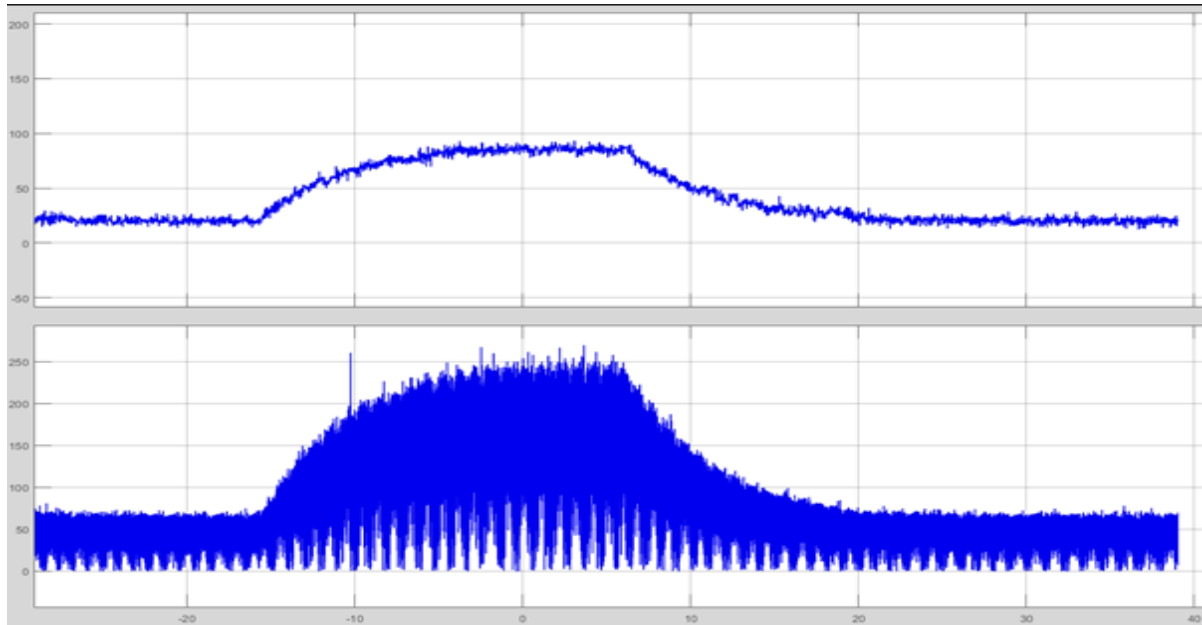
(β)

Σχήμα 5.7: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ: (α) 20 Watt και (β) 40 Watt με παλμοδότηση sPWM.

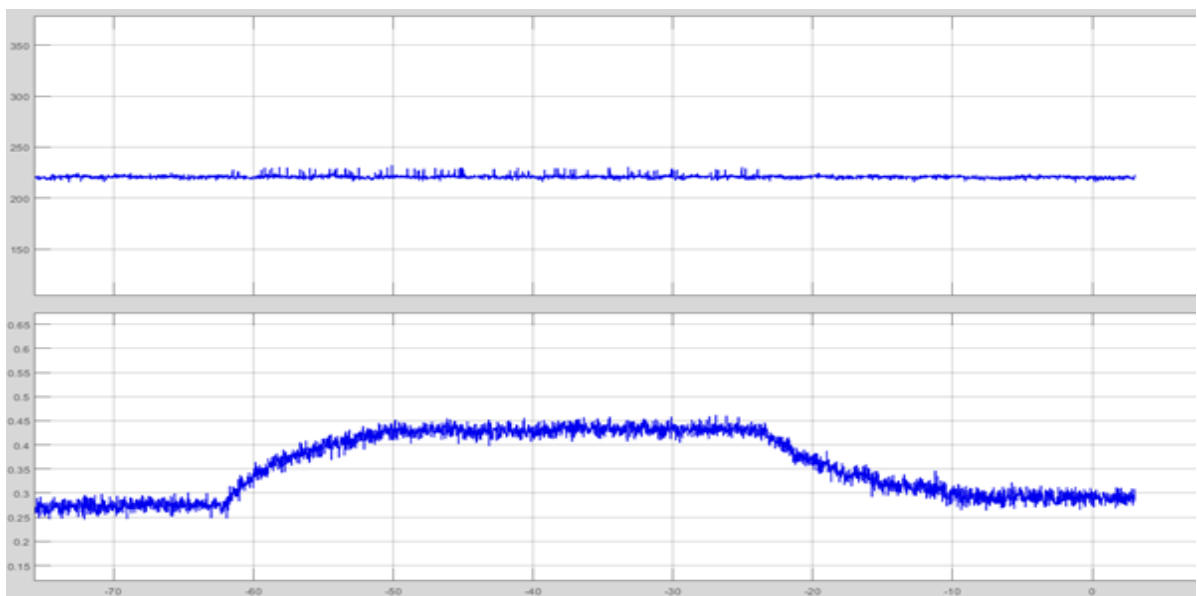


Σχήμα 5.8: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ: (α) 60 Watt και (β) 88 Watt με παλμοδότηση sPWM.

Όπως παρατηρούμε στα παλμογραφήματα, ο λόγος κατάτμησης, δηλαδή το Duty Cycle, είναι μεγαλύτερο όταν η στιγμιαία τιμή στις τάσης εισόδου πλησιάζει το πλάτος τάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή στην τεχνική παλμοδότηση sPWM, η σύγκριση στις τριγωνικής κυματομορφής πραγματοποιείται με την στιγμιαία τάση του δικτύου. Για το λόγο αυτό δημιουργείται μια παλμοσειρά που το εύρος των παλμών μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου στις τάσης δικτύου. Αυτό συνήθως βελτιώνει και το PF συγκριτικά με την PWM. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται πώς μεταβάλλεται η ισχύς, το Duty Cycle, η ενεργός τιμή της τάσης και η ενεργός τιμή του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο, όταν αλλάζουμε την επιθυμητή ισχύ από 20 στα 88 και αντίστροφα.

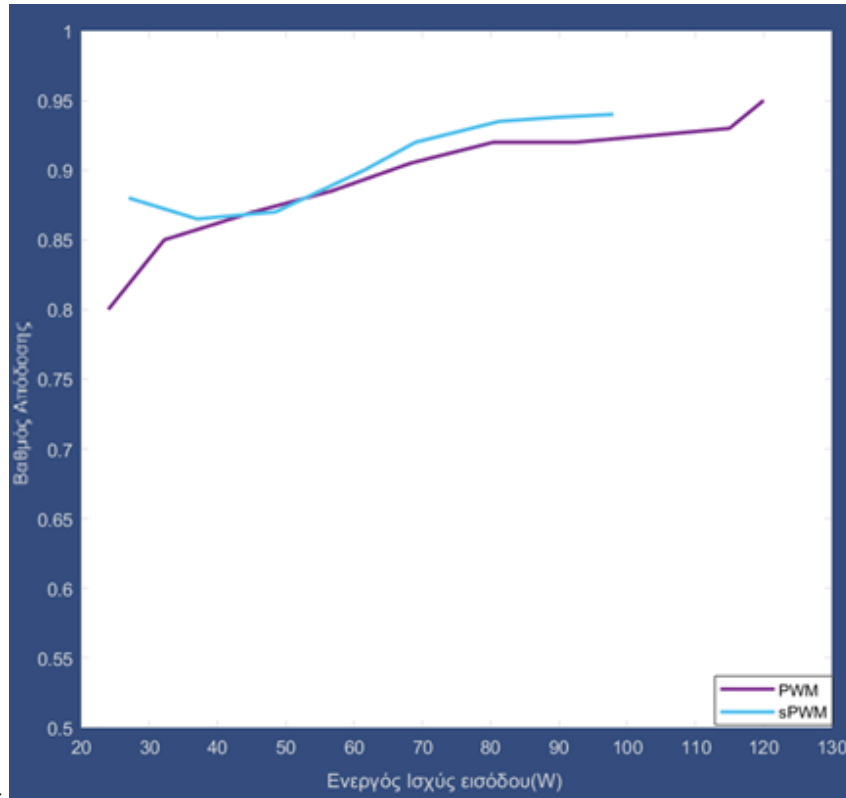


Σχήμα 5.9: Μεταβολή ισχύος (επάνω) και Duty Cycle (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 20W στα 88 W και αντίστροφα.

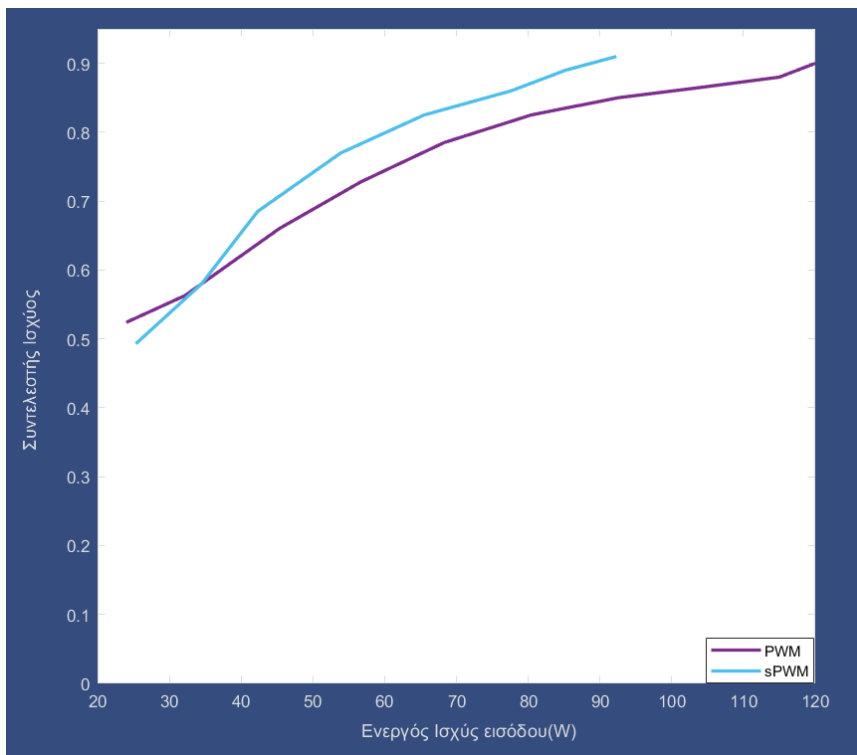


Σχήμα 5.10: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 20W στα 88W και αντίστροφα.

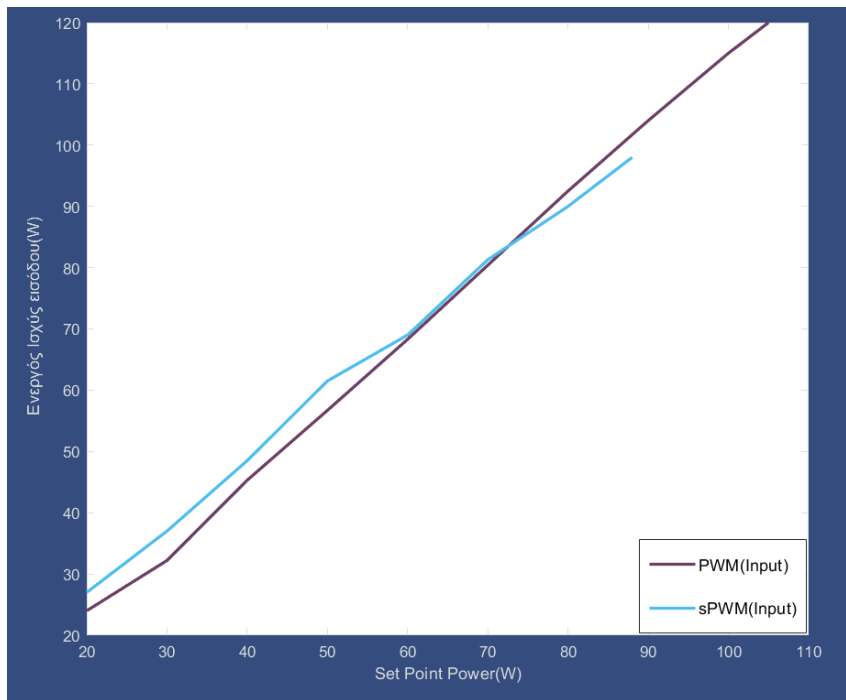
Στα σχήματα 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του βαθμού απόδοσης και συντελεστή ισχύος ως προς την ενεργός ισχύς εισόδου για τις δύο τεχνικές παλμοδότησης, ενώ στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η ενεργός ισχύς στην είσοδο του μετατροπέα ως προς το Set Point ισχύος.



Σχήμα 5.11: Γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος εισόδου για τις παλμοδοτήσεις PWM και sPWM.

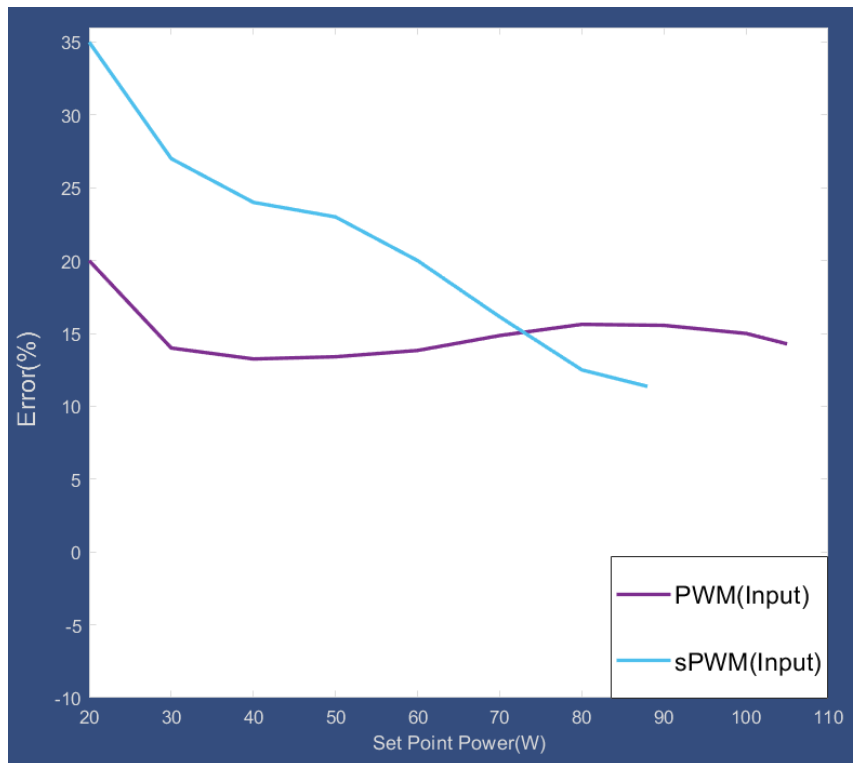


Σχήμα 5.12: Γραφική παράσταση του συντελεστή ισχύος ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος εισόδου για τις παλμοδοτήσεις PWM και sPWM.



Σχήμα 5.13: Γραφική παράσταση της μετρούμενης ενεργού ισχύος εισόδου ως προς την επιθυμητή τιμή της ισχύος για τις παλμοδοτήσεις PWM και sPWM.

Παρατηρούμε ότι η ενεργός ισχύς εξόδου και για τις δύο τεχνικές παλμοδότησης είναι μικρότερη από την ισχύ εισόδου και πιο κοντά στην επιθυμητή ισχύ που δηλώνεται. Αυτό οφείλεται τόσο στις απώλειες αγωγής όσο και στις διακοπτικές απώλειες οι οποίες στην προκειμένη περίπτωση είναι αρκετά μειωμένες. Στην καμπύλη του σχήματος 5.14 παρουσιάζεται το σφάλμα (της μετρούμενης τιμής της ενεργού ισχύος) ως συνάρτηση της επιθυμητής ενεργού ισχύος ($error = (P_{μετρ} - P_{επιθ}) / P_{επιθ}$).



Σχήμα 5.14: Γραφική παράσταση του σφάλματος της μετρούμενης ενεργού ισχύος εισόδου ως προς την επιθυμητή τιμή της ισχύος για τις παλμοδοτήσεις PWM και sPWM.

5.2. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 220Ω

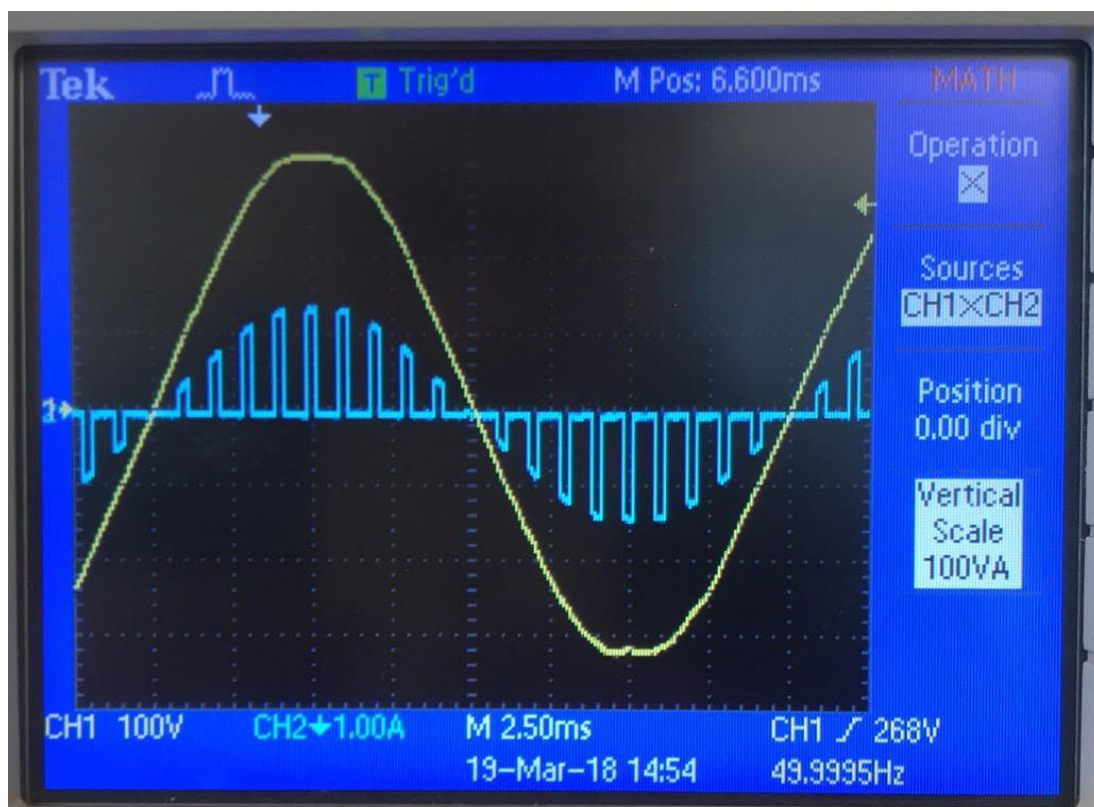
Όπως για το ωμικό φορτίο 440Ω, έτσι και για το ωμικό φορτίο 220Ω πάρθηκαν και καταγράφηκαν οι μετρήσεις χρησιμοποιώντας τις τεχνικές παλμοδότησης PWM και sPWM. Στο τέλος της υποενότητας σχολιάζονται οι διαφορές που διαπιστώθηκαν στις μετρήσεις αυτών των δύο φορτίων.

5.2.1. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 220Ω με τεχνική παλμοδότησης PWM

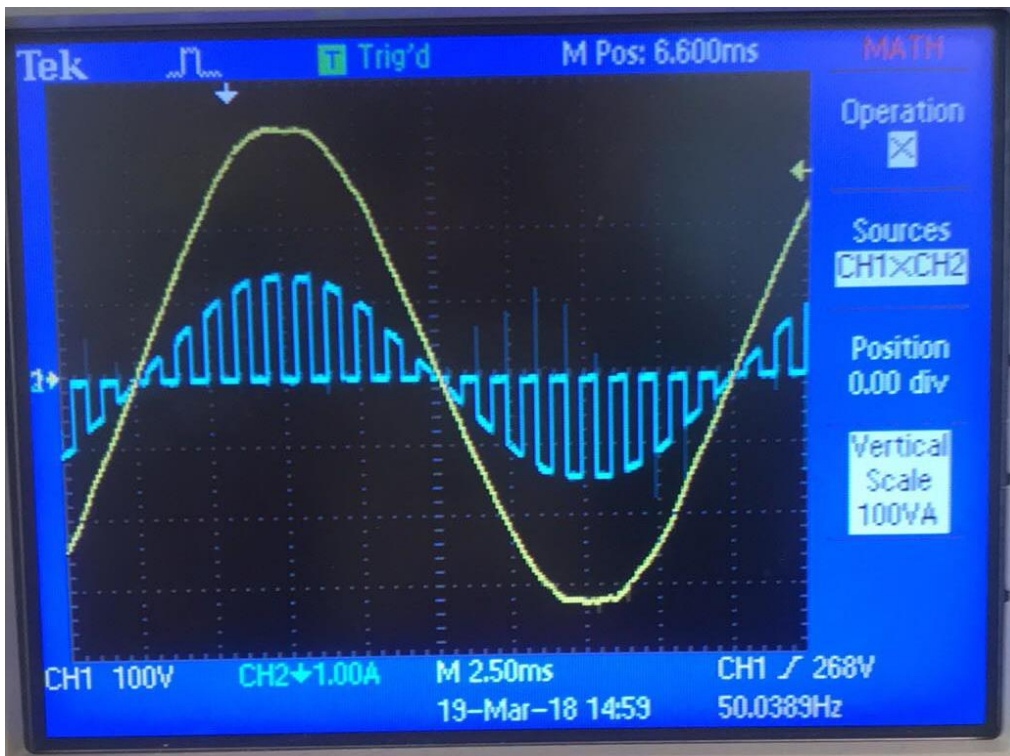
Επιθυμητή Ισχύς(W)	Είσοδος					Έξοδος			Βαθμός απόδοσης	Duty Cycle
	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εισ} (W)	S _{εισ} (VA)	PF _{εισ}	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εξ} (W)	η	%
50	228.6	0.50	57	114.3	0.50	75	0.50	55	0.96	25
75	228.6	0.60	85	137.16	0.62	100	0.60	79	0.93	36
100	228.6	0.68	110	155	0.71	125	0.70	101	0.98	46
125	228.6	0.75	134	171	0.78	147	0.76	127	0.94	56
150	228.6	0.82	157	187	0.84	168	0.83	151.55	0.965	67
175	228.6	0.94	186	216	0.86	190	0.91	178.2	0.958	77
200	228.6	1.04	210	238.5	0.88	210	0.97	198.55	0.9455	86
225	228.6	1.14	235	261.1	0.9	230	1.05	224.42	0.950	98

Πίνακας 3: Πειραματικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές της επιθυμητής ισχύος με την χρήση της τεχνικής παλμοδότησης PWM χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

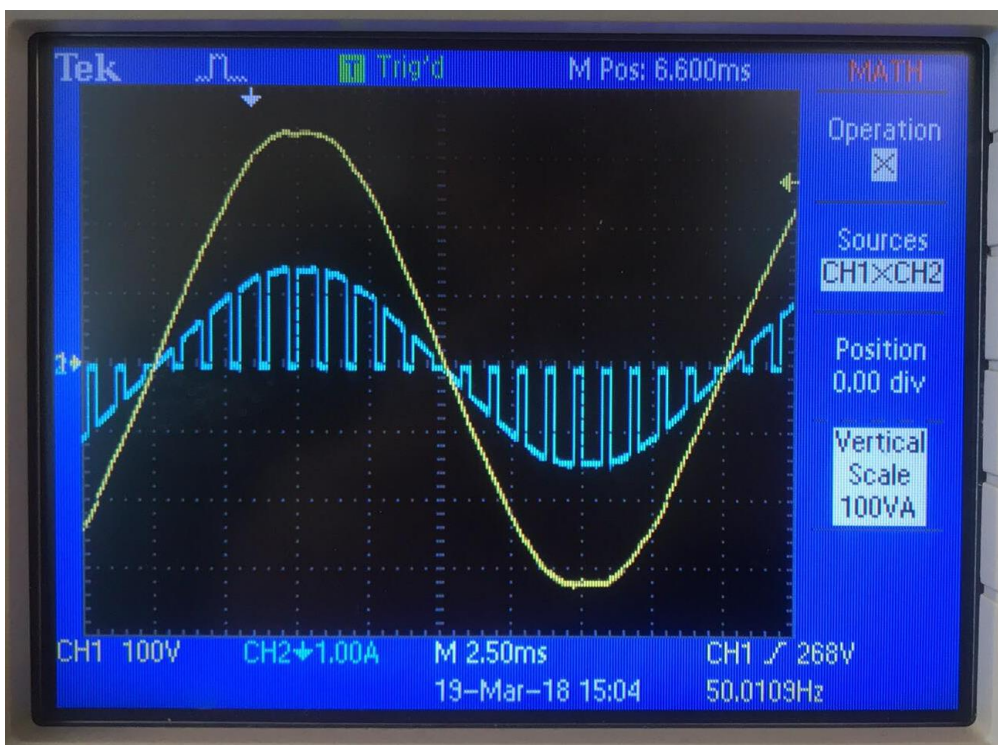
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα της τάσης εισόδου και του ρεύματος εισόδου για διάφορες τιμές του Set Point.



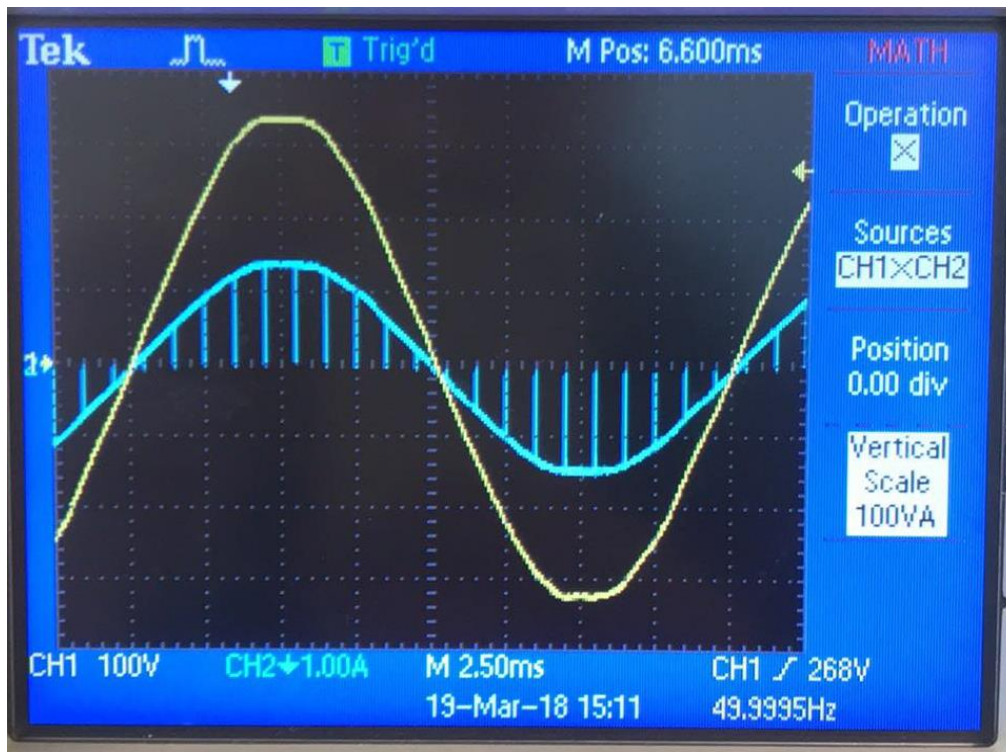
Σχήμα 5.15: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 50 Watt με παλμοδότηση PWM.



Σχήμα 5.16: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 100 Watt με παλμοδότηση PWM.

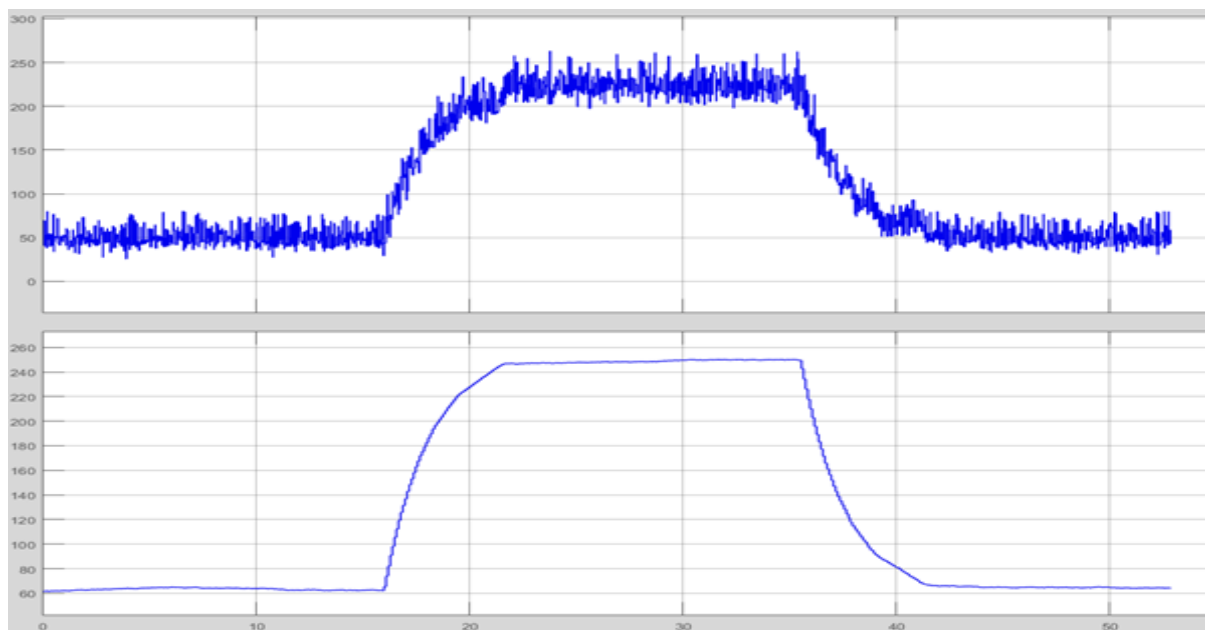


Σχήμα 5.17: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 150 Watt με παλμοδότηση PWM.

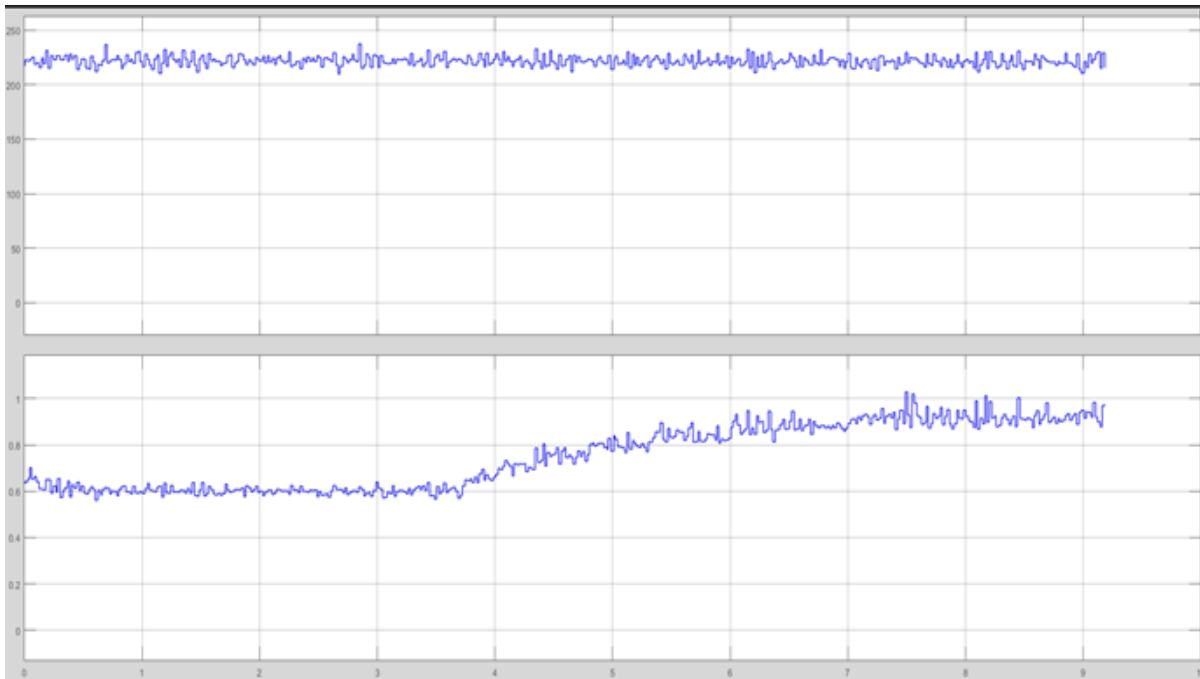


Σχήμα 5.18: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 225 Watt με παλμοδότηση PWM.

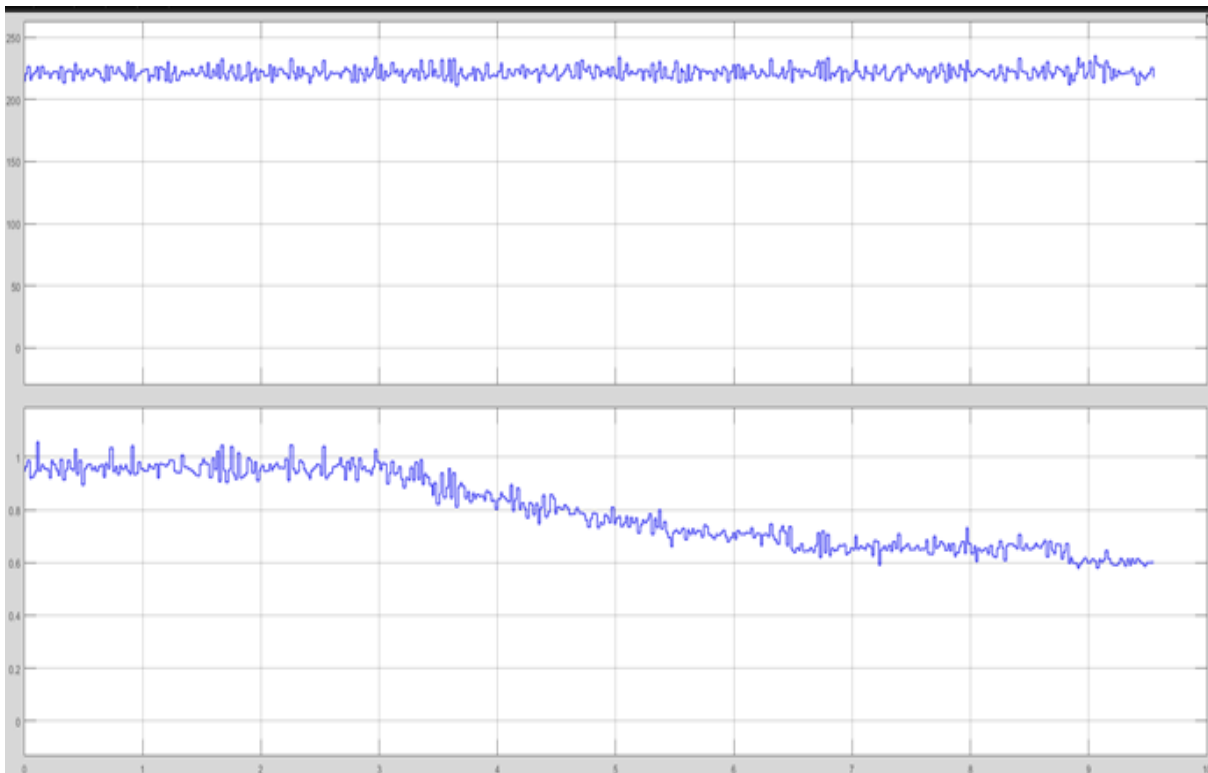
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται πώς μεταβάλλεται η ισχύς, το Duty Cycle, η ενεργός τιμή της τάσης και η ενεργός τιμή του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο, όταν αλλάζουμε την επιθυμητή ισχύ από 50W στα 225W και αντίστροφα.



Σχήμα 5.19: Μεταβολή ισχύος (επάνω) και Duty Cycle (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 50W στα 225W και αντίστροφα.



Σχήμα 5.20: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 50W στα 225W.



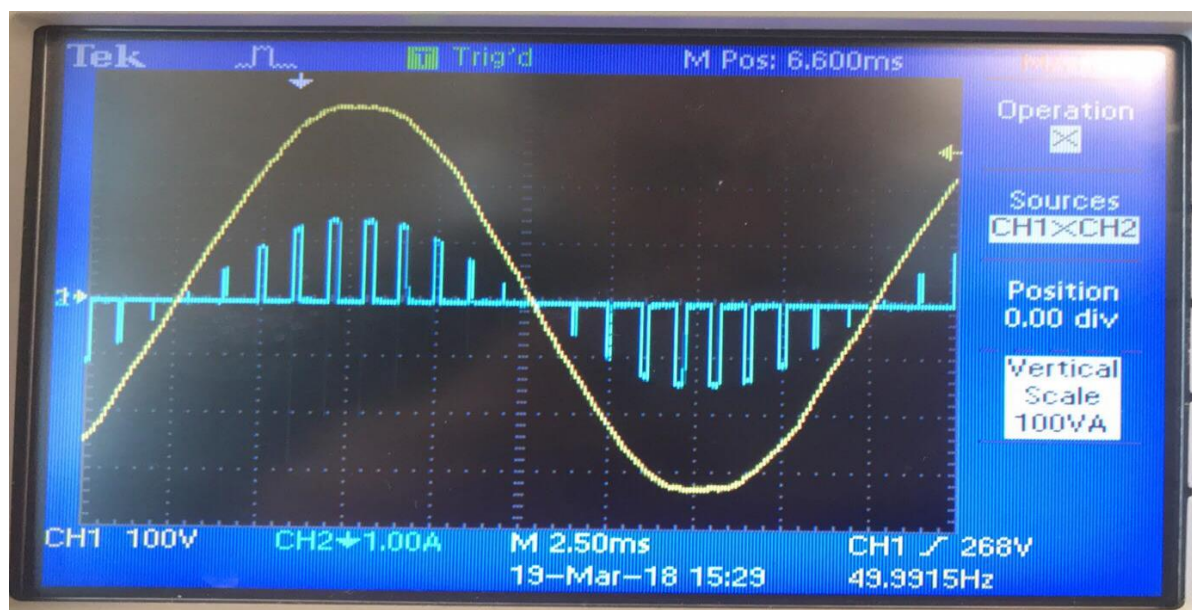
Σχήμα 5.21: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 225W στα 50W.

5.2.2. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 220Ω με τεχνική παλμοδότηση sPWM

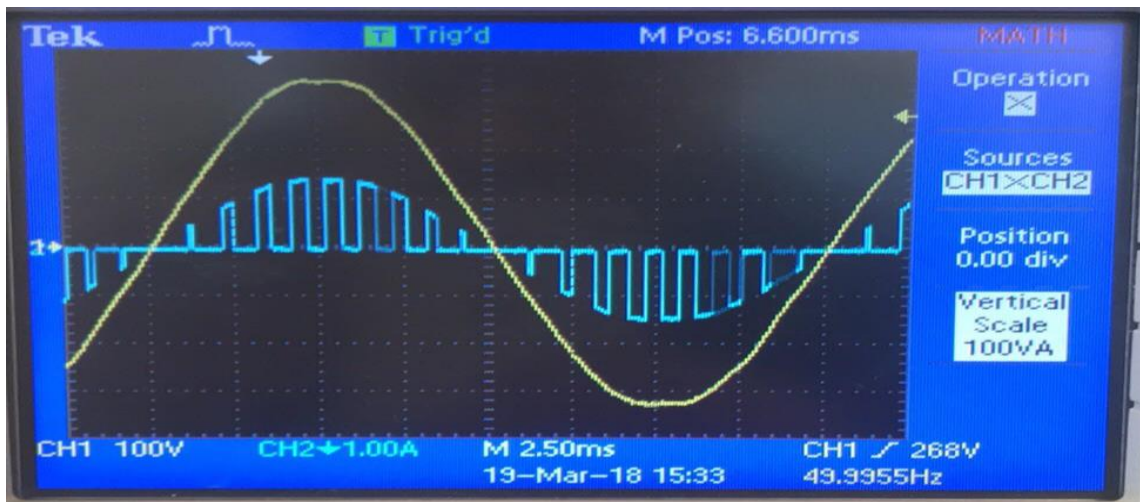
Επιθυμητή Ισχύς(W)	Είσοδος					Έξοδος			Βαθμός απόδοσης	Duty Cycle
	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εισ} (W)	S _{εισ} (VA)	PF _{εισ}	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εξ} (W)	η	%
50	228.6	0.51	60	116.58	0.51	73	0.51	57.22	0.953	0-30
75	228.6	0.60	82.3	137.16	0.6	92	0.6	79.2	0.962	0-39
100	228.6	0.70	108	160	0.67 5	123	0.7	107.8	0.998	0-59
125	228.6	0.78	144	178.3	0.8	149	0.78	133.8	0.93	0-70
150	228.6	0.85	169	194.3	0.87	173	0.85	158.9	0.94	0-82
175 (max)	228.6	0.945	199	216	0.92	193	0.90	178.2	0.90	0-98

Πίνακας 4: Πειραματικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές της επιθυμητής ισχύος με την χρήση της τεχνικής παλμοδότησης sPWM χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

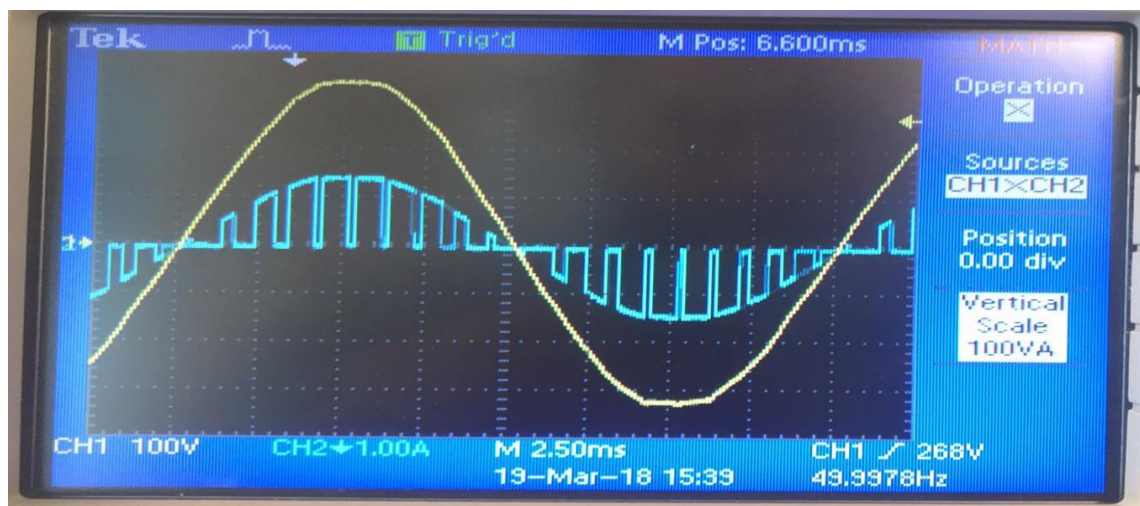
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα της τάσης εισόδου και του ρεύματος εισόδου για διάφορες τιμές του Set Point.



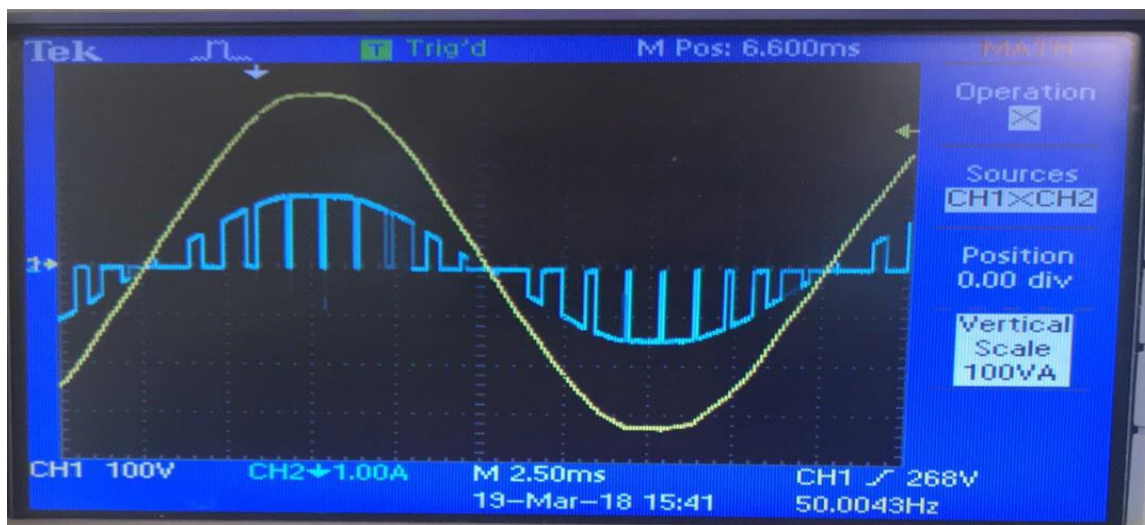
Σχήμα 5.22: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 50 Watt με παλμοδότηση sPWM.



Σχήμα 5.23: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 100 Watt με παλμοδότηση sPWM.

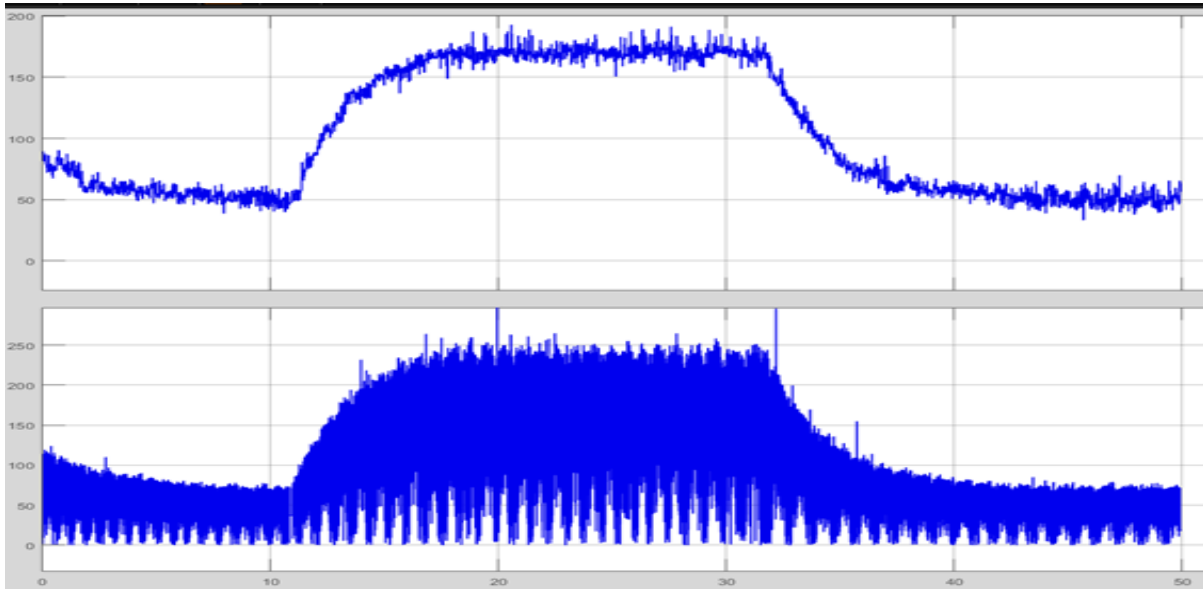


Σχήμα 5.24: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 150 Watt με παλμοδότηση sPWM.

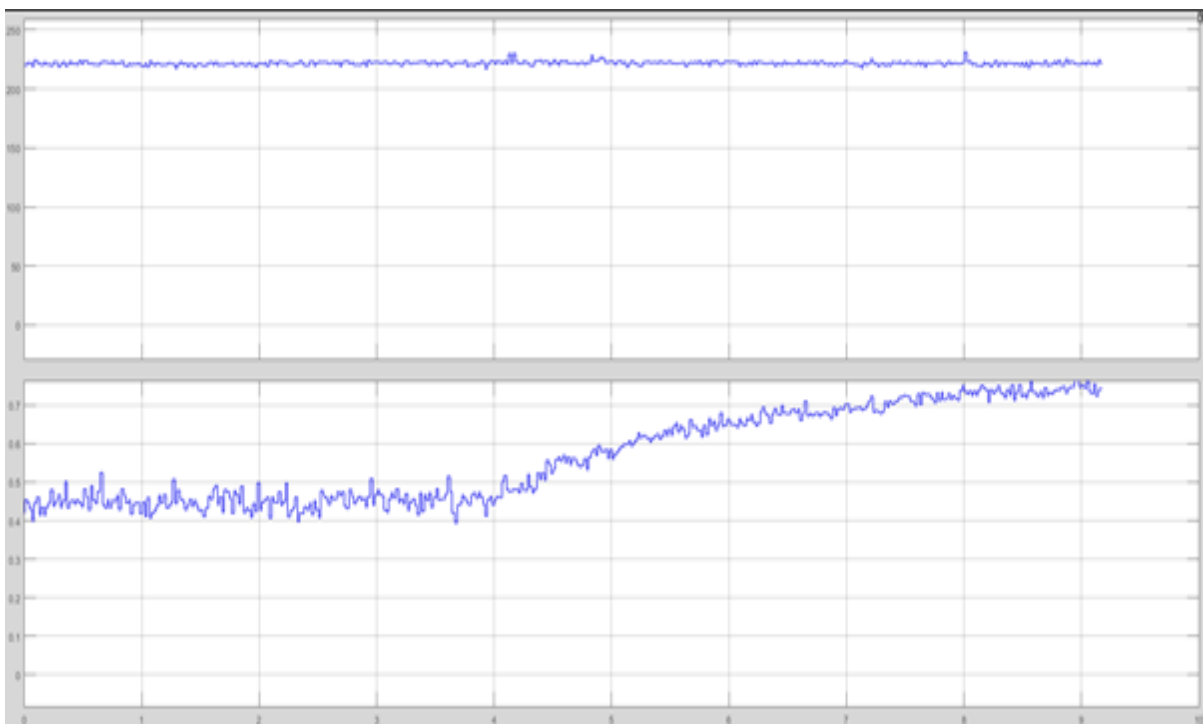


Σχήμα 5.25: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 175 Watt με παλμοδότηση sPWM.

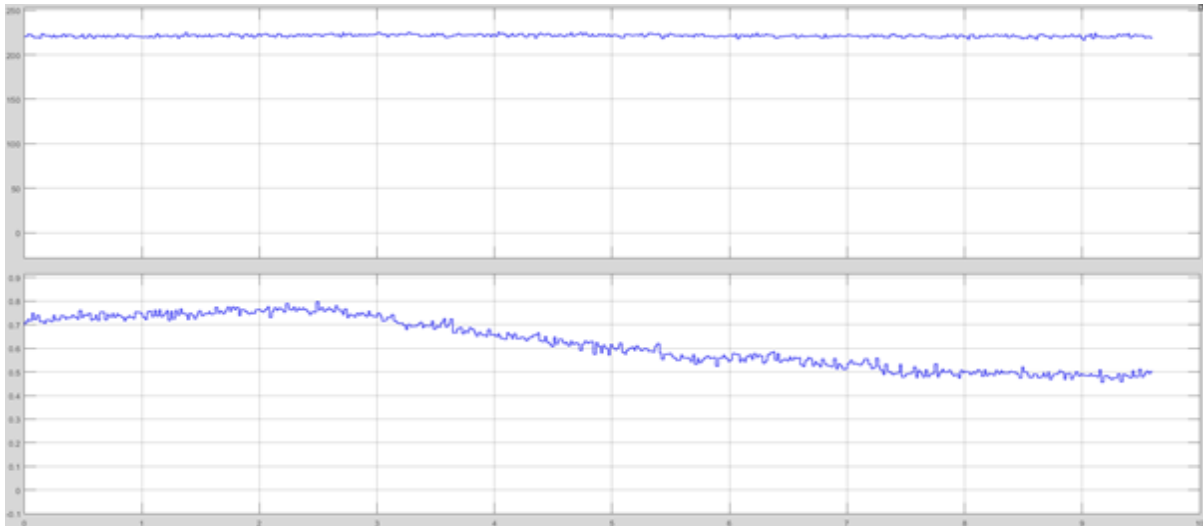
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται πώς μεταβάλλεται η ισχύς, το Duty Cycle , η ενεργός τιμή της τάσης και η ενεργός τιμή του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο, όταν αλλάζουμε την επιθυμητή ισχύς από 50W στα 175W και αντίστροφα.



Σχήμα 5.26: Μεταβολή ισχύος (επάνω) και Duty Cycle (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 50W στα 175W και αντίστροφα.

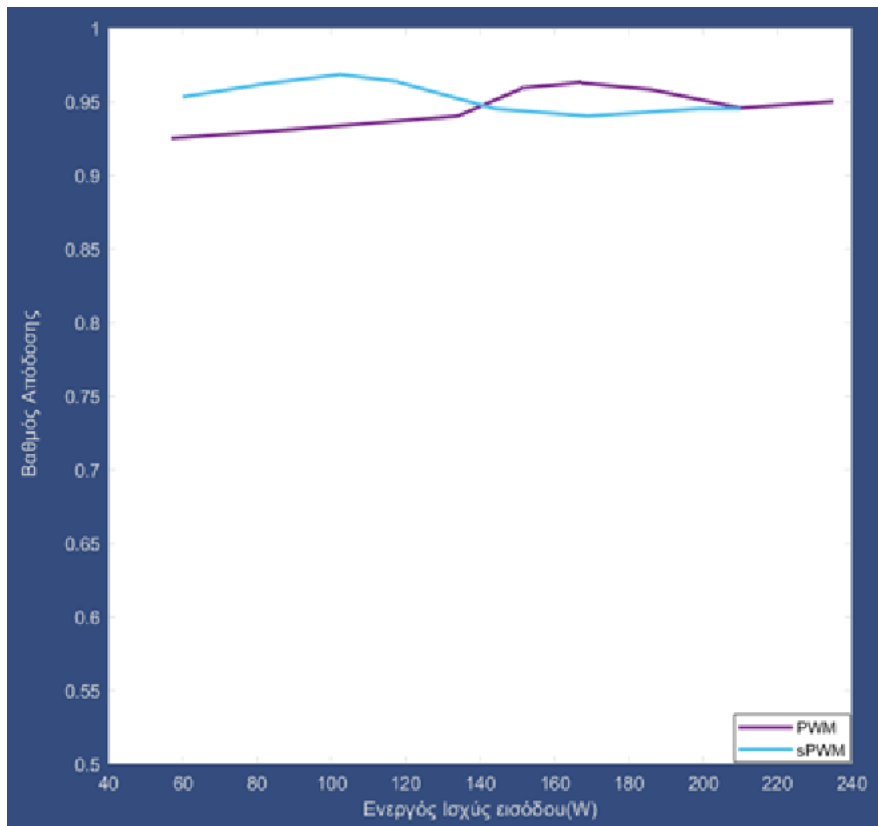


Σχήμα 5.27: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 50W στα 175W.

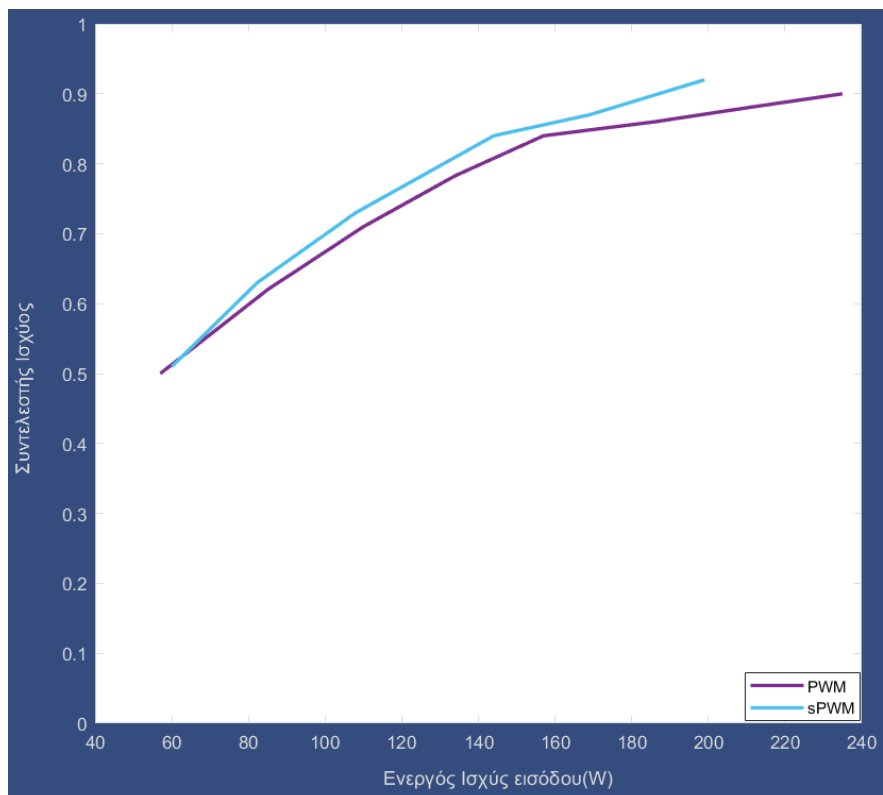


Σχήμα 5.28: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 175W στα 50W.

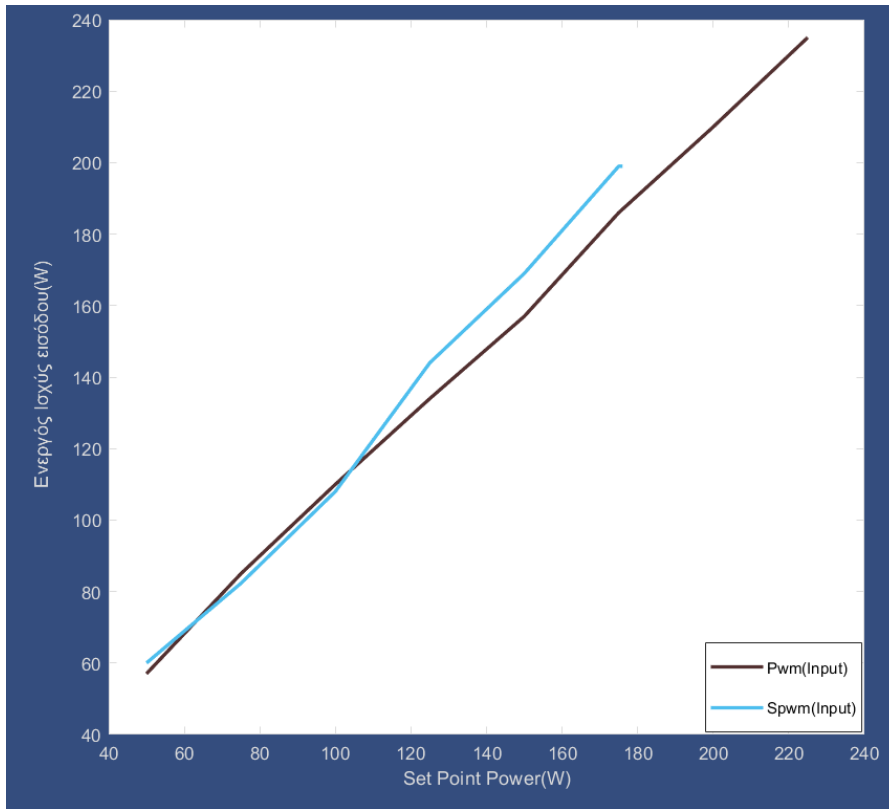
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του βαθμού απόδοσης, συντελεστή ισχύος, πραγματικής ενεργού ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα και πραγματικής ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα ως προς το Set Point ισχύς, και γραφικές παραστάσεις του σφάλματος ενεργούς ισχύς σε σχέση με το Set point. Στις γραφικές παραστάσεις αυτές συγκρίνονται οι δύο παλμοδοτήσεις. Στα σχήματα 5.29 και 5.30 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος ως προς την ενεργός ισχύς εισόδου για τις δύο τεχνικές παλμοδότησης, ενώ στα σχήματα 5.31 και 5.32 παρουσιάζονται οι γραφική παράσταση της μετρούμενης ενεργός ισχύς(σχ.5.31) και η γραφική παράσταση του σφάλματος μετρούμενης ενεργός ισχύς(σχ.5.32) ως προς το Set Point.



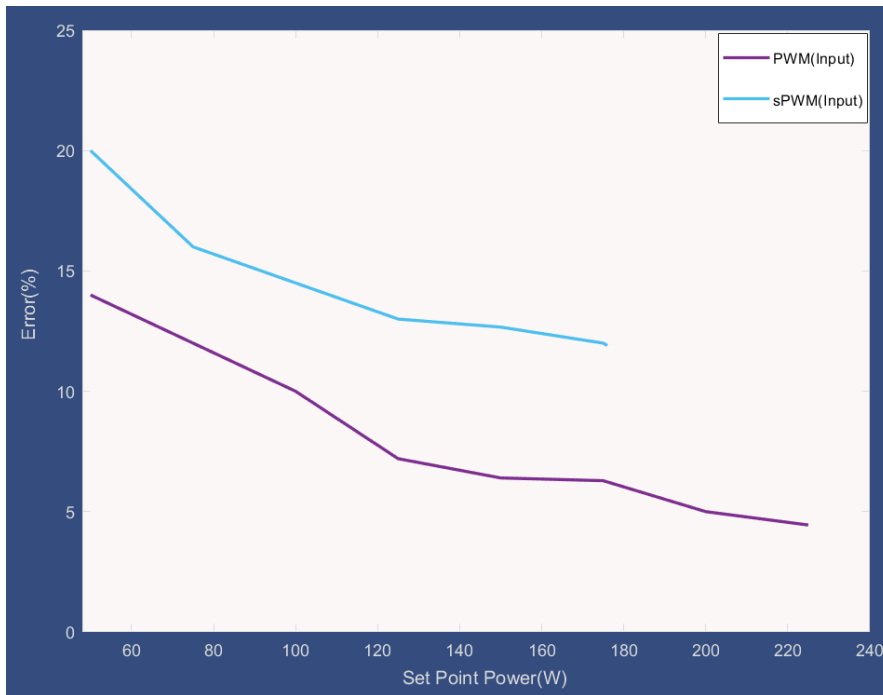
Σχήμα 5.29: Γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος εισόδου για τις παλμοδοτήσεις PWM και sPWM.



Σχήμα 5.30: Γραφική παράσταση του συντελεστή ισχύος ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος εισόδου για τις παλμοδοτήσεις PWM και sPWM.



Σχήμα 5.31: Γραφική παράσταση της μετρούμενης ενεργού ισχύος εισόδου ως προς την επιθυμητή τιμή της ισχύος για τις παλμοδοτήσεις PWM και sPWM.



Σχήμα 5.32: Γραφική παράσταση του σφάλματος της μετρούμενης ενεργού ισχύος εισόδου ως προς την επιθυμητή τιμή της ισχύος για τις παλμοδοτήσεις PWM και sPWM.

Όπως στην περίπτωση του ωμικού φορτίου 440Ω, έτσι και στην περίπτωση του ωμικού φορτίου 220Ω, ο συντελεστής ισχύος είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση χρησιμοποίησης της τεχνικής παλμοδότησης sPWM σε σχέση με την PWM. Παρατηρούμε ότι για τις χαμηλές τιμές της ενεργού ισχύος, εμφανίζεται χαμηλός συντελεστής ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα λόγω της ύπαρξης αρμονικών, με αποτέλεσμα να απαιτείται η βελτίωσή του. Αυτό γίνεται με τη χρήση LC φίλτρου στην είσοδο του μετατροπέα. Επιπλέον παρατηρούμε ότι το βέλτιστο του βαθμού απόδοσης εμφανίζεται σε διαφορετικές τιμές της ενεργού ισχύος εισόδου και εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου αφού το ρεύμα διαφέρει στις δύο παλμοδοτήσεις, επομένως διαφέρουν και οι απώλειες. Επίσης, παρατηρούμε ότι το σφάλμα βελτιώνεται καθώς αυξάνουμε την ισχύ, διότι η ποιότητα της δειγματοληψίας βελτιώνεται με την αύξηση της ισχύος. οπότε μεταβάλλεται και το σφάλμα.

5.3. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 110Ω

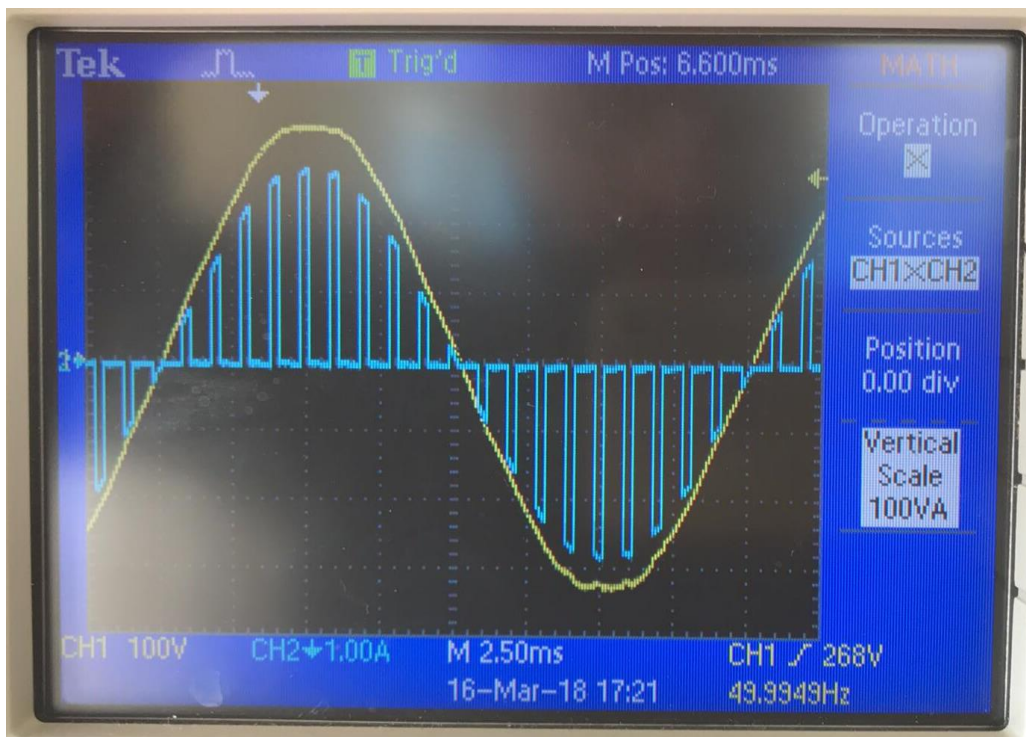
Όπως στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις φορτίων, έτσι και για το ωμικό φορτίο 110Ω, πάρθηκαν και καταγράφηκαν οι παρακάτω μετρήσεις: Ισχύς εισόδου/εξόδου, Ρεύμα εισόδου/εξόδου, Τάση εισόδου/εξόδου, κλπ, με και χωρίς τη χρήση LC φίλρου.

5.3.1. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 110Ω με τεχνική παλμοδότησης PWM

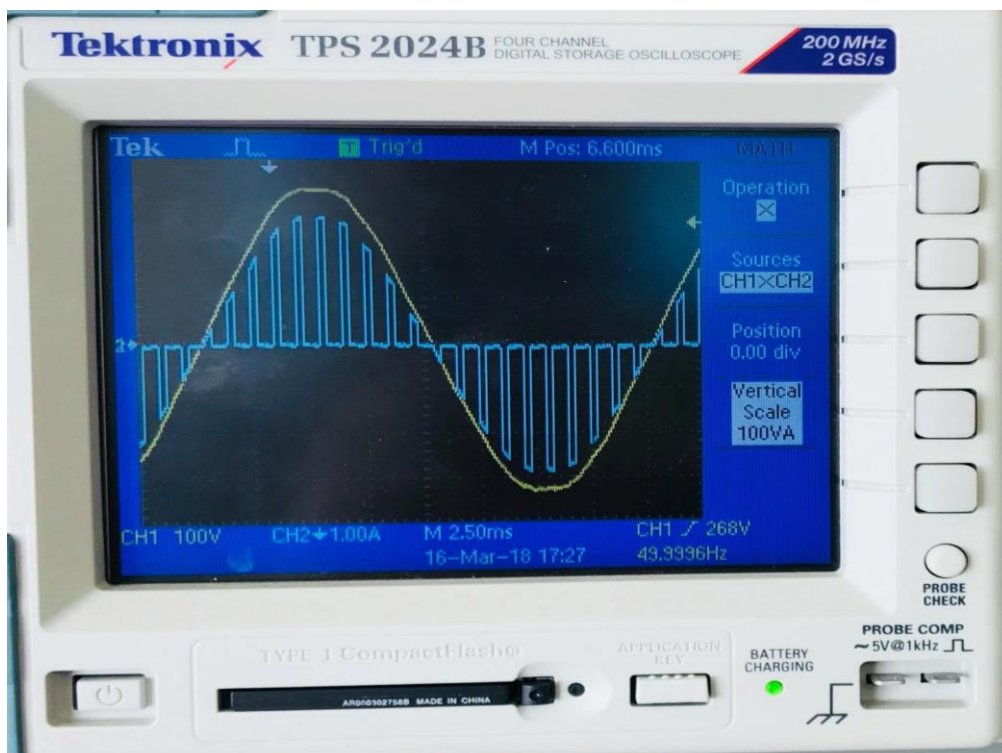
Επιθυμητή Ισχύς(W)	Είσοδος					Έξοδος			Βαθμός απόδοσης	Duty Cycle
	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{είσ} (W)	S _{είσ} (VA)	PF _{είσ}	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εξ} (W)	η	%
100	230	1.05	125	241.77	0.51	80	1.03	116.69	0.93	26
150	230	1.23	175	284.3	0.61	102	1.21	161.05	0.92	36
200	230	1.36	225	312.8	0.72	126	1.37	206.45	0.91	47
250	230	1.50	272	345	0.79	150	1.50	247.5	0.90	57
300	230	1.63	325	374.9	0.86	170	1.63	292.25	0.90	67
350	230	2.09	405	481.90	0.88	208	1.92	364.5	0.90	86
400	230	2.27	470	522	0.90	226	2.07	423	0.90	96

Πίνακας 5: Πειραματικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές της επιθυμητής ισχύος με την χρήση της τεχνικής παλμοδότησης PWM χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

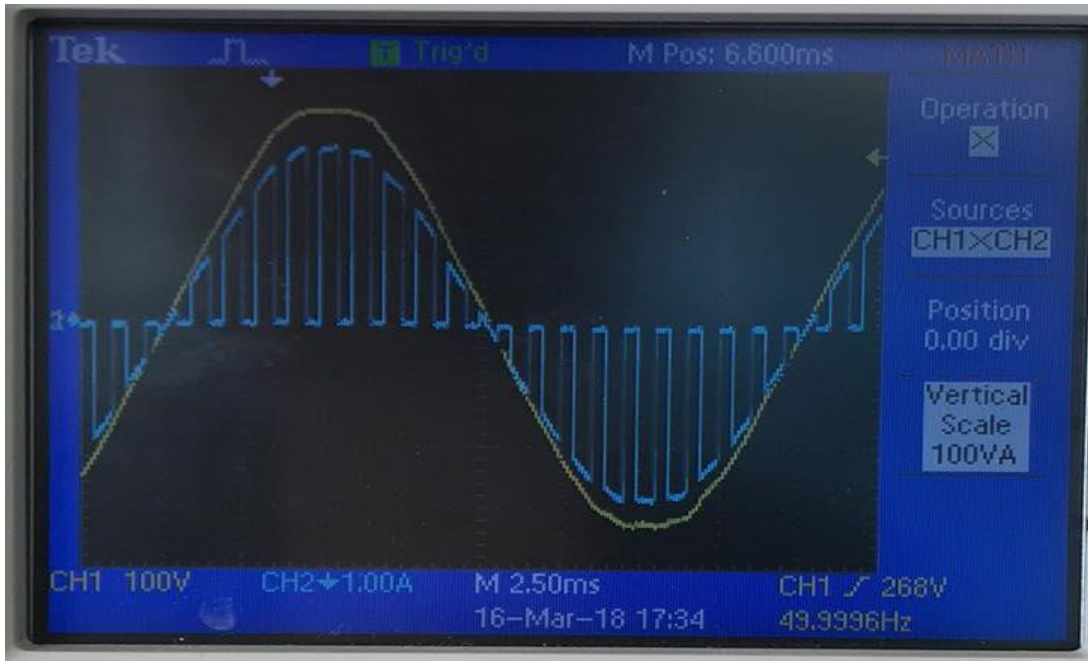
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα της τάσης εισόδου και του ρεύματος εισόδου για διάφορες τιμές του Set Point.



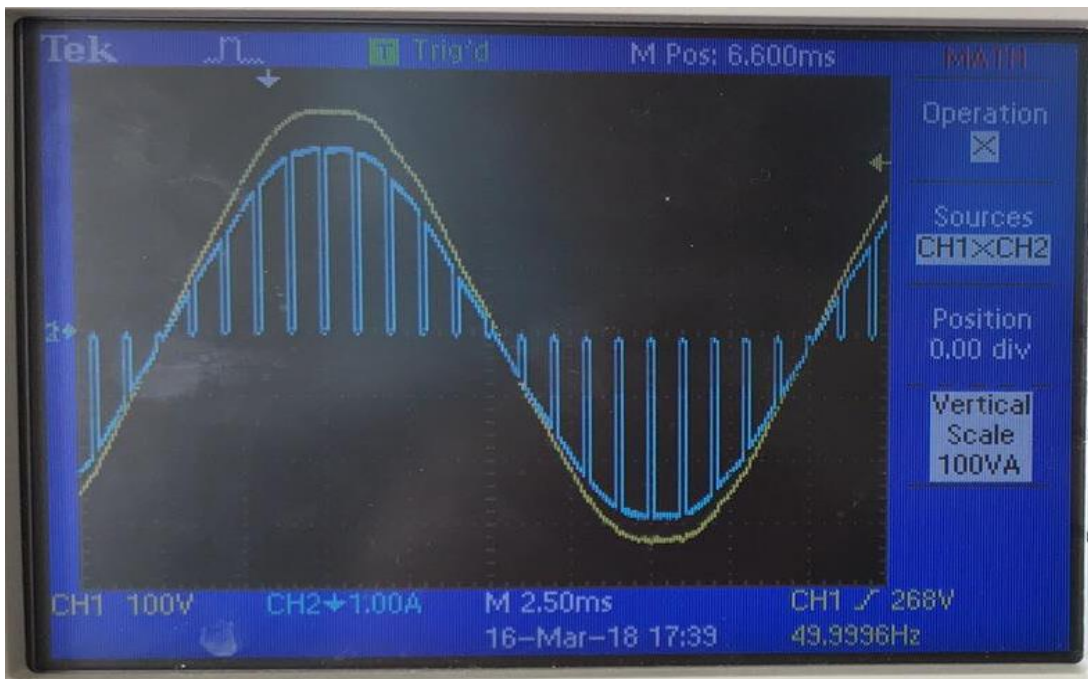
Σχήμα 5.33: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 100 Watt με παλμοδότηση PWM.



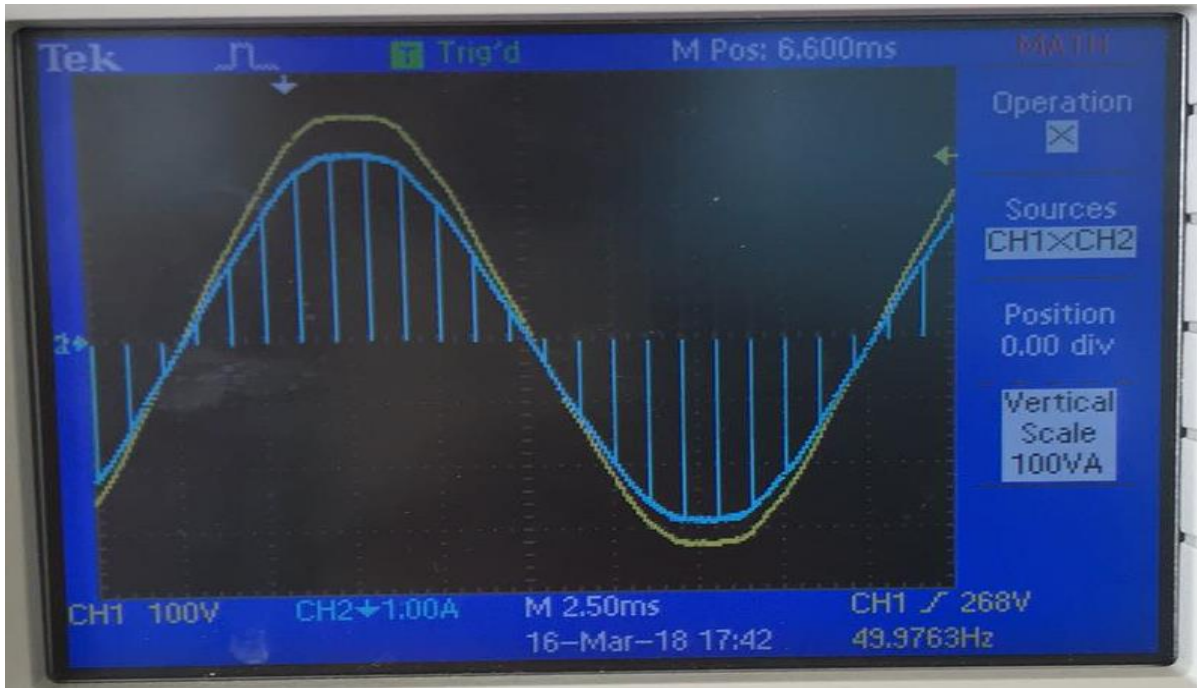
Σχήμα 5.34: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 150 Watt με παλμοδότηση PWM.



Σχήμα 5.35: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 250 Watt με παλμοδότηση PWM.

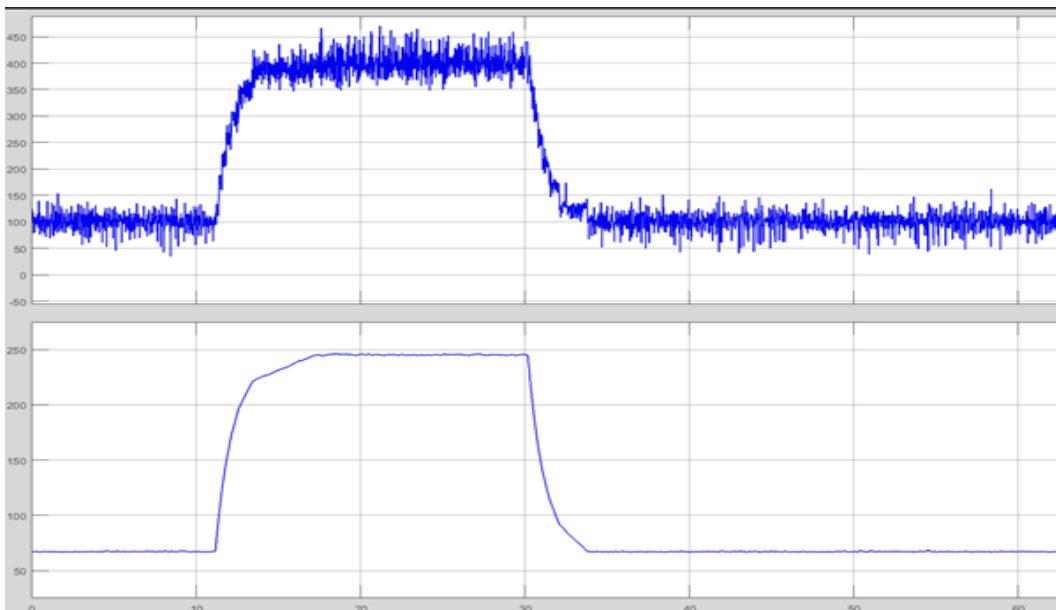


Σχήμα 5.36: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 350 Watt με παλμοδότηση PWM.

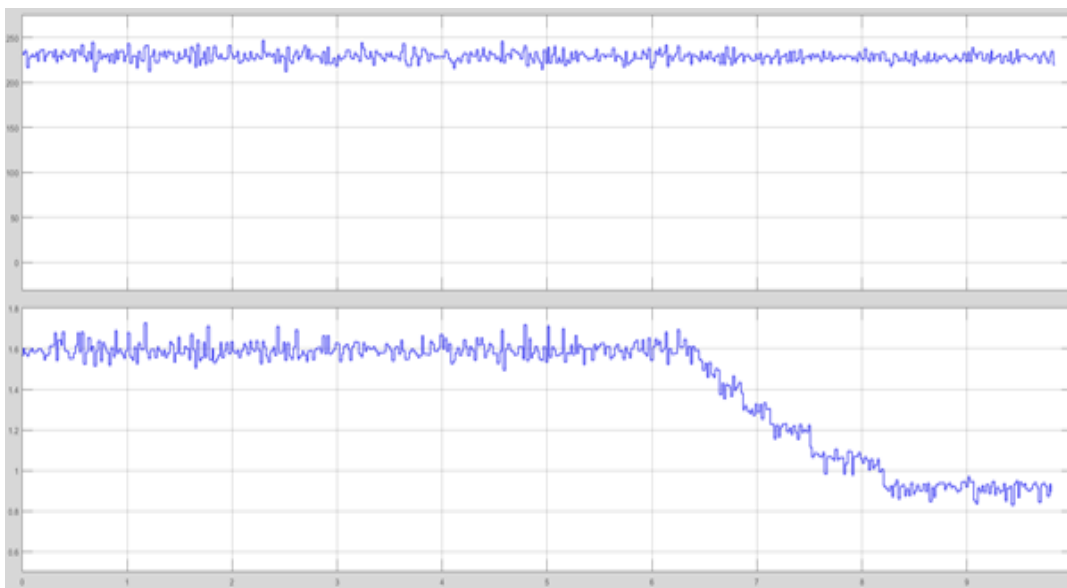


Σχήμα 5.37: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 400 Watt με παλμοδότηση PWM.

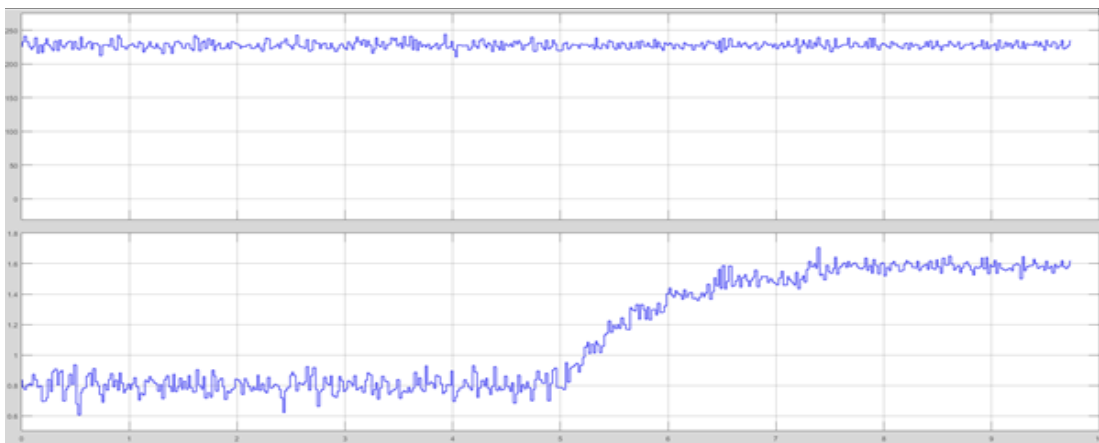
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται πώς μεταβάλλεται η ισχύς, το Duty Cycle, η ενεργός τιμή της τάσης και η ενεργός τιμή του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο, όταν αλλάζουμε την επιθυμητή ισχύς από 100W στα 400W και αντίστροφα.



Σχήμα 5.38: Μεταβολή ισχύος (επάνω) και Duty Cycle (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 100W στα 400W.



Σχήμα 5.39: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 400W στα 100W.



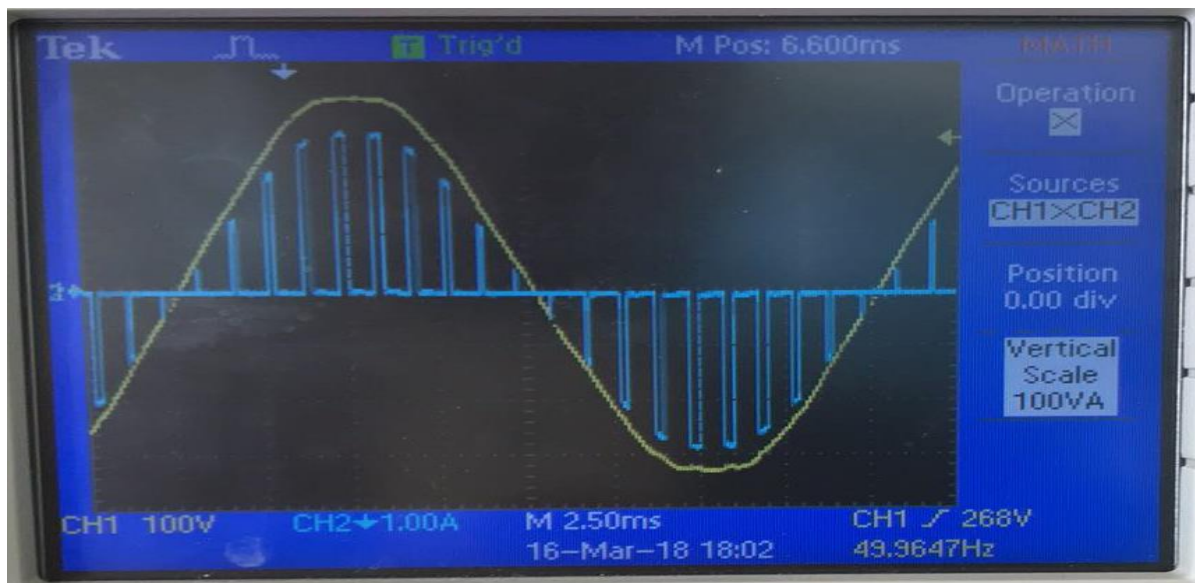
Σχήμα 5.40: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 100W στα 400W.

5.3.2. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 110Ω με τεχνική παλμοδότησης sPWM

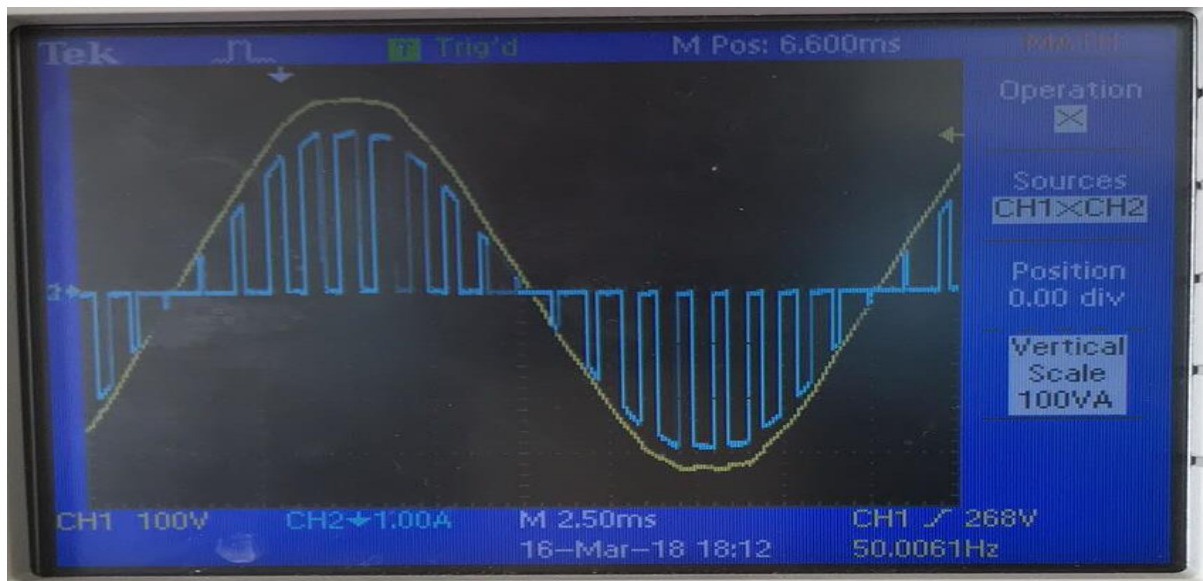
Επιθυμητή Ισχύς(W)	Είσοδος					Έξοδος			Βαθμός απόδοσης	Duty Cycle
	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εισ} (W)	S _{εισ} (VA)	PF	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εξ} (W)	η	%
100	230	1.02	117	234.6	0.50	75	1.02	114.44	0.978	0-27
150	230	1.20	160	276	0.58	95	1.20	158.40	0.996	0-39
200	230	1.40	230	322	0.715	125	1.40	215.6	0.937	0-57
250	230	1.55	280	356	0.785	150	1.55	264.27	0.943	0-69
300	230	1.70	335	391	0.857	175	1.70	317.9	0.949	0-84
350	230	1.89	400	434.80	0.92	193	1.86	380	0.95	0-98

Πίνακας 6: Πειραματικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές της επιθυμητής ισχύος με την χρήση της τεχνικής παλμοδότησης sPWM χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

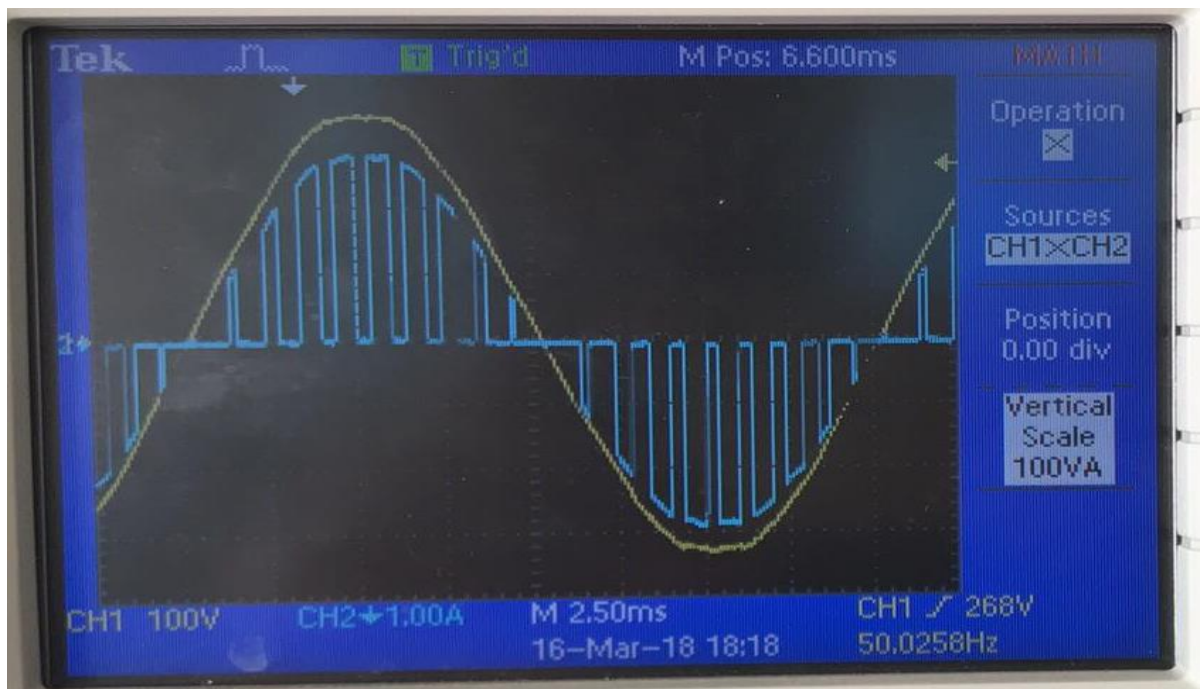
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα της τάσης εισόδου και του ρεύματος εισόδου για διάφορες τιμές του Set Point.



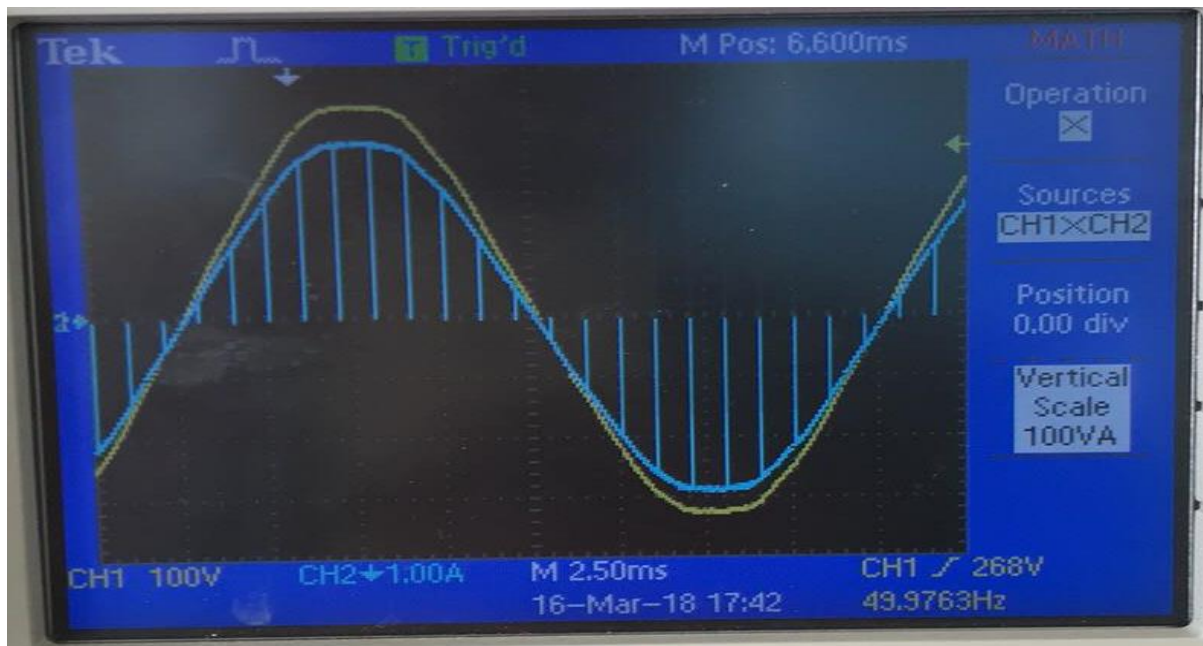
Σχήμα 5.41: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 100 Watt με παλμοδότηση sPWM.



Σχήμα 5.42: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 200 Watt με παλμοδότηση sPWM.

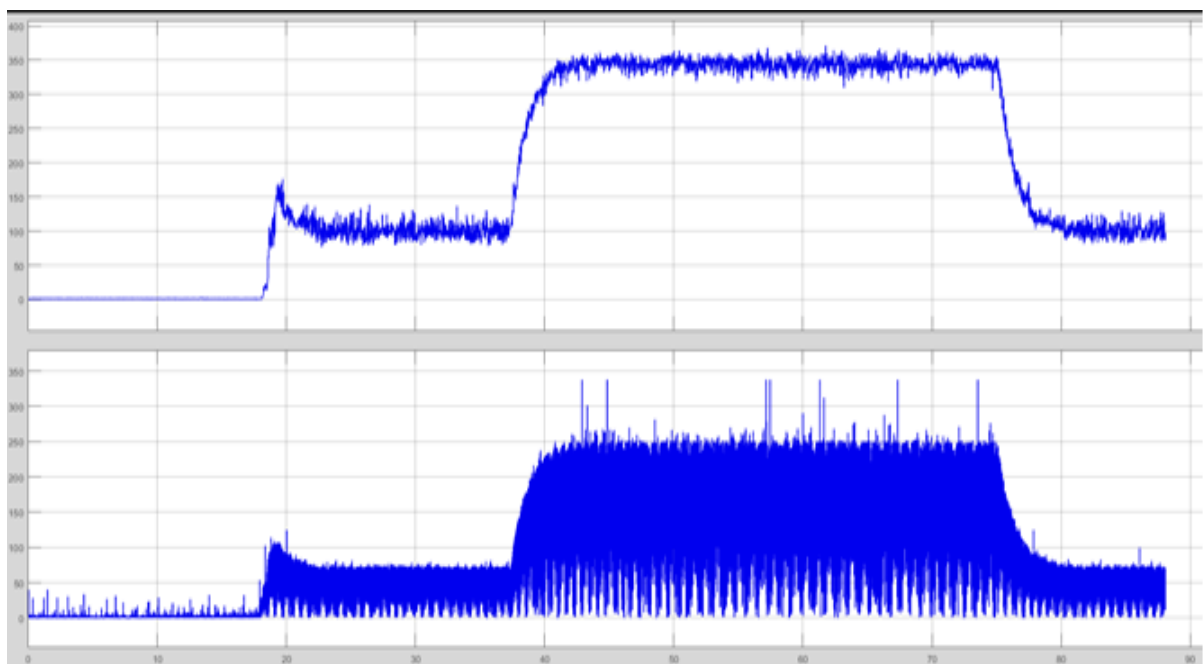


Σχήμα 5.43: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 250 Watt με παλμοδότηση sPWM.

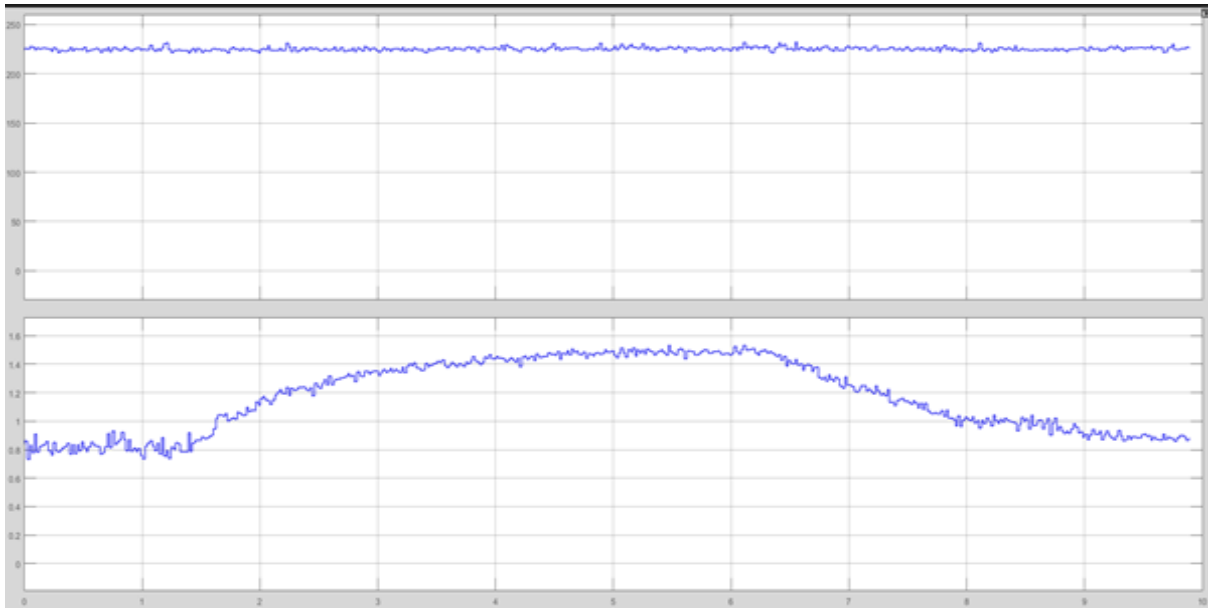


Σχήμα 5.44: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 350 Watt με παλμοδότηση sPWM.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται πώς μεταβάλλεται η ισχύς, το Duty Cycle, η ενεργός τιμή της τάσης και η ενεργός τιμή του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο, όταν αλλάζουμε την επιθυμητή ισχύς από 100W στα 350W και αντίστροφα.



Σχήμα 5.45: Μεταβολή ισχύος (επάνω) και Duty Cycle (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 100W στα 350W και αντίστροφα.

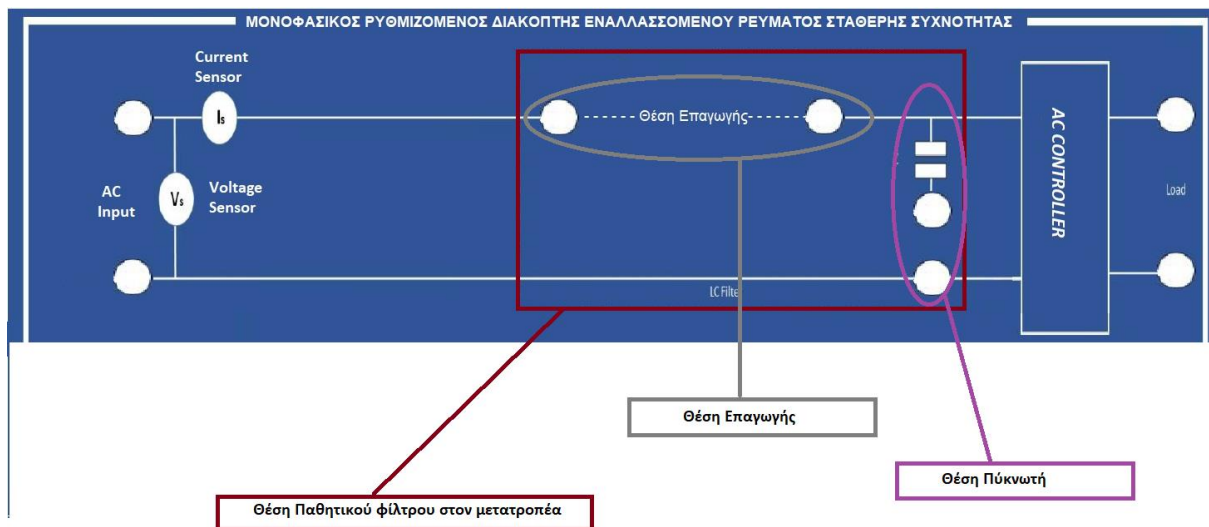


Σχήμα 5.46: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 100W στα 350W και αντίστροφα.

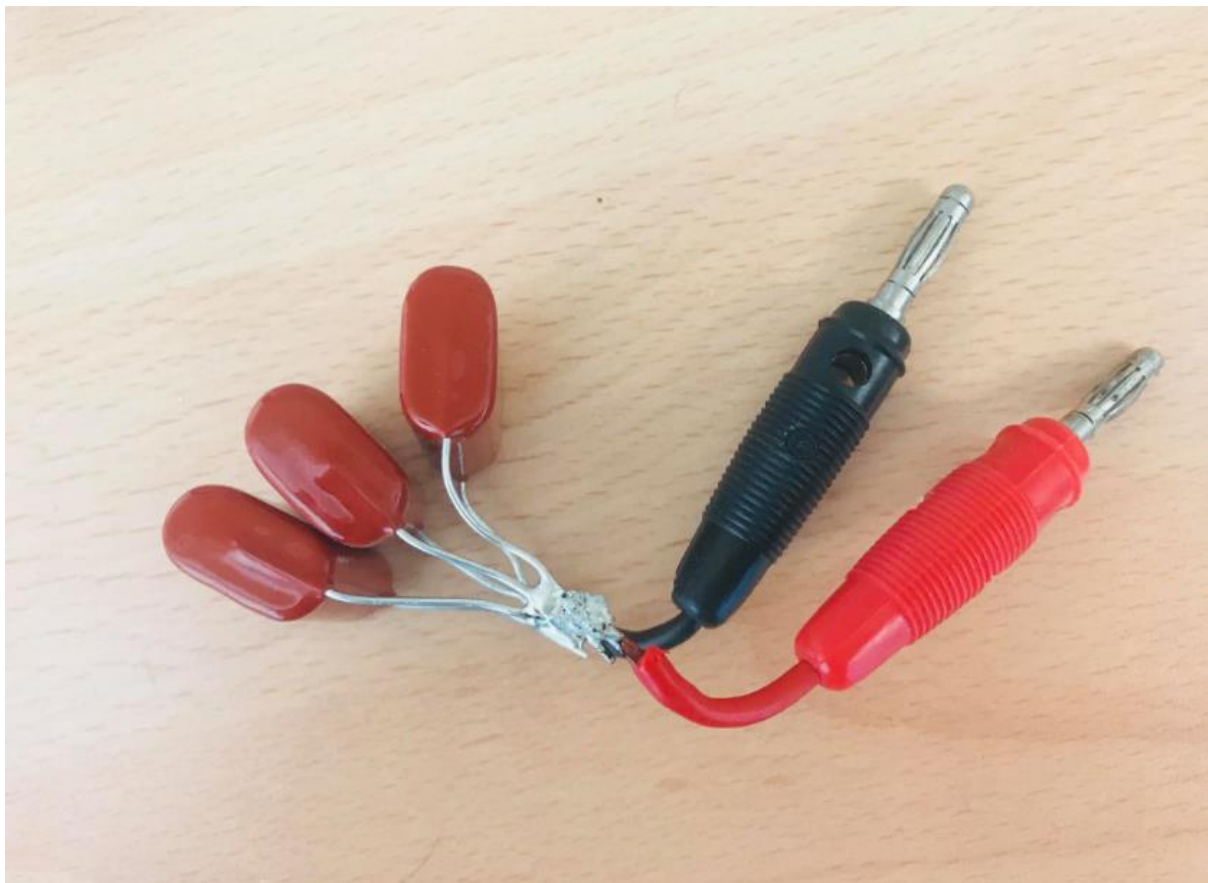
5.3.3. Μετρήσεις για ωμικό φορτίο 110Ω με LC φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα

Όπως διαπιστώνεται σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, όταν το Duty Cycle έχει χαμηλή τιμή, ο συντελεστής ισχύος είναι επίσης χαμηλός κοντά στο 0.50. Συγκεκριμένα, ο τρόπος λειτουργίας του IGBT με διακοπές ρεύματος προκαλεί αύξηση των ανώτερων αρμονικών του ρεύματος ως προς τη βασική αρμονική του. Αποτέλεσμα της παρουσίας αυτών των αρμονικών είναι η αύξηση της άεργου ισχύος στο σύστημα. Για τον λόγο αυτόν, έγινε η προσπάθεια για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Ύστερα από τις δοκιμές καταλήξαμε στην τοποθέτηση L-C φίλτρου στην είσοδο του μετατροπέα, με τιμές $L=114\text{ mH}$, $C=4.5\mu\text{F}$.

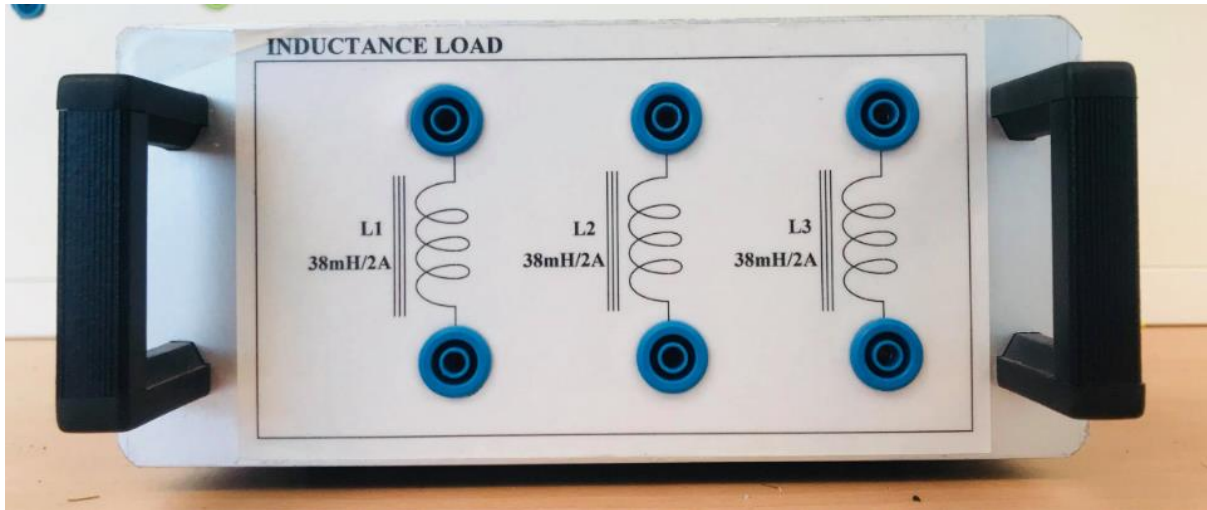
Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.47, το πηνίο συνδέεται εν σειρά με το δίκτυο, ενώ ο πυκνωτής συνδέεται παράλληλα σε αυτό. Δηλαδή, υλοποιούμε ένα κατωδιαβατό φίλτρο δευτέρας τάξεως.



Σχήμα 5.47: Θέση του φίλτρου στην πρόσοψη του μετατροπέα.



Σχήμα 5.48: Οι πυκνωτές του φίλτρου.

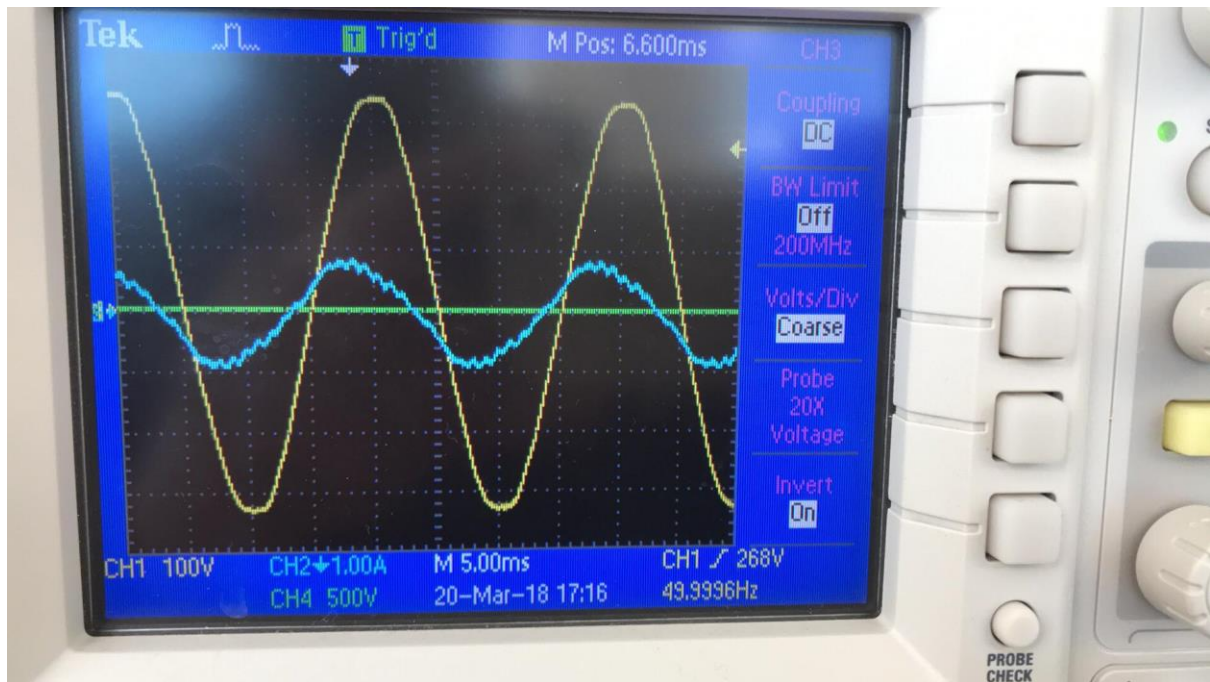


Σχήμα 5.49: Η επαγωγή του φίλτρου.

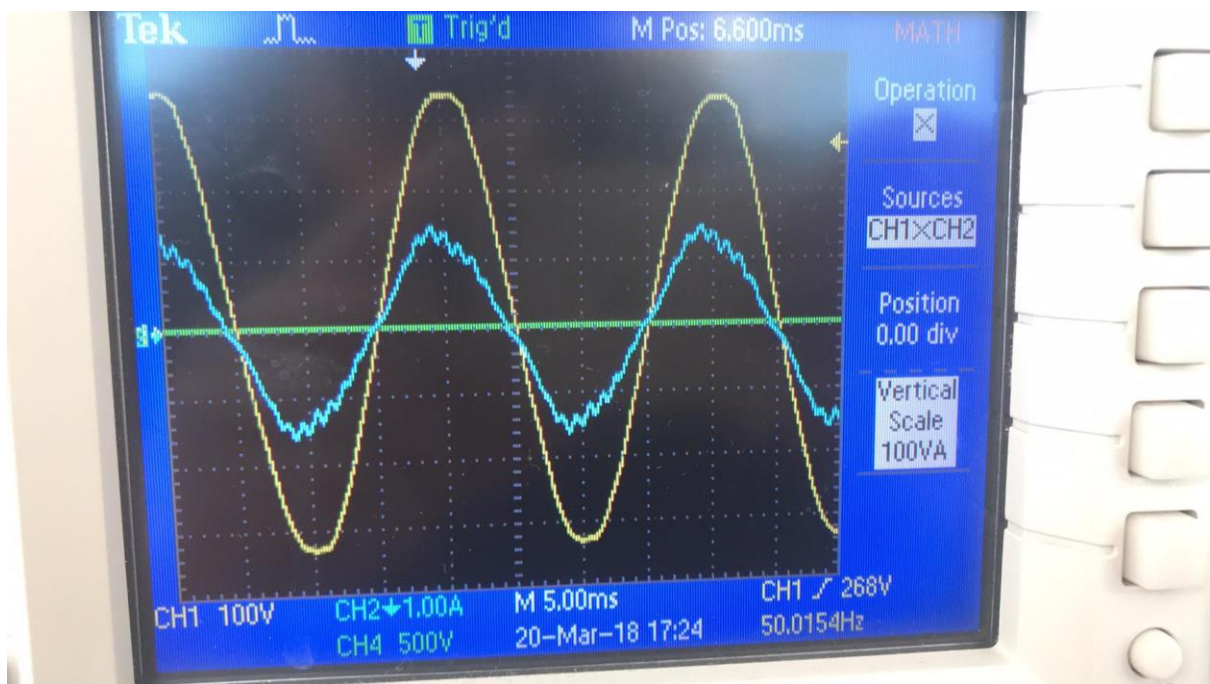
Εδώ πρέπει να επισημανθεί, ότι η δοκιμή με φίλτρου είναι δυνατόν να γίνει μόνο για την τεχνική παλμοδότησης PWM. Για την sPWM παλμοδότηση δεν γίνεται καθώς απαιτείται η δειγματοληψία της τάσης εισόδου στον μετατροπέα, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο συγχρονισμός των παλμών με την τάση αυτή, όμως όπως βλέπουμε στο σχήμα 5.47, ο αισθητήρας τάσης έχει τοποθετηθεί στο δίκτυο και όχι στην είσοδο του μετατροπέα (μετά το φίλτρο), επομένως έπρεπε να κατασκευαστεί ένας επιπλέον αισθητήρας τάσης, πράγμα που απαιτεί επιπλέον κόστος και υπολογιστική ισχύ. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας μετρήσεων για ωμικό φορτίο 110Ω με χρήση LC φίλτρου.

Επιθυμητή Ισχύς(W)	Είσοδος					Έξοδος			Βαθμός απόδοσης	Duty Cycle
	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{ειξ} (W)	S _{ειξ} (VA)	PF _{ειξ}	V _{rms} (V)	I _{rms} (A)	P _{εξ} (W)	η	%
100	229	0.55	113	134.5	0.84	63	0.92	93.1	0.823	20
150	229	0.78	170	180	0.94	88	1.14	142	0.84	30
200	229	0.99	225	227	0.98	113	1.32	191	0.85	43
250	229	1.25	286	288	0.99	140	1.48	241	0.842	56
300	229	1.45	330	333	0.99	160	1.60	281.6	0.853	67
350	229	1.70	384	390	0.98	185	1.72	325.42	0.847	80
400	229	2.01	444	459	0.97	210	1.85	376.5	0.848	97

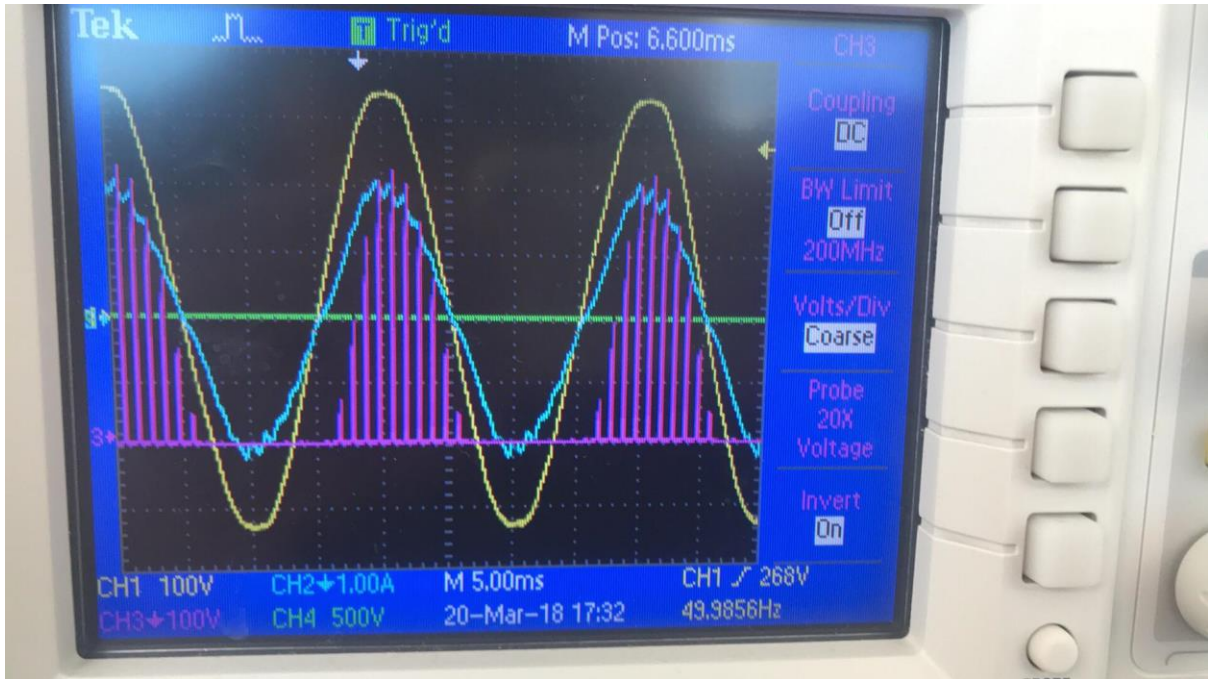
Πίνακας 7: Πειραματικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές της επιθυμητής ισχύος με την χρήση της τεχνικής παλμοδότησης PWM με φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.



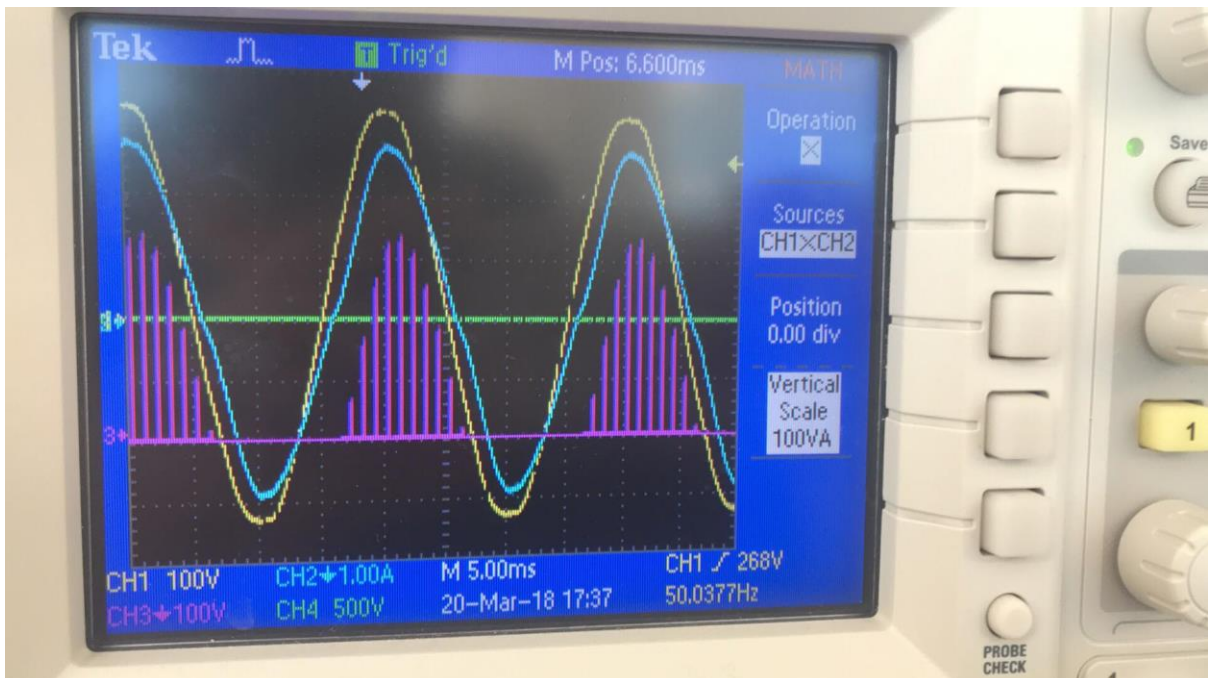
Σχήμα 5.50: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 100 Watt με παλμοδότηση PWM με φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα.



Σχήμα 5.51: Τάση εισόδου (κίτρινο) και ρεύμα εισόδου (μπλε) για επιθυμητή ισχύ 200 Watt με παλμοδότηση PWM με φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα.



Σχήμα 5.52: Τάση εισόδου (κίτρινο), ρεύμα εισόδου (μπλε) και τάση ανόδου-καθόδου του IGBT για επιθυμητή ισχύ 300 Watt με παλμοδότηση PWM με φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα.

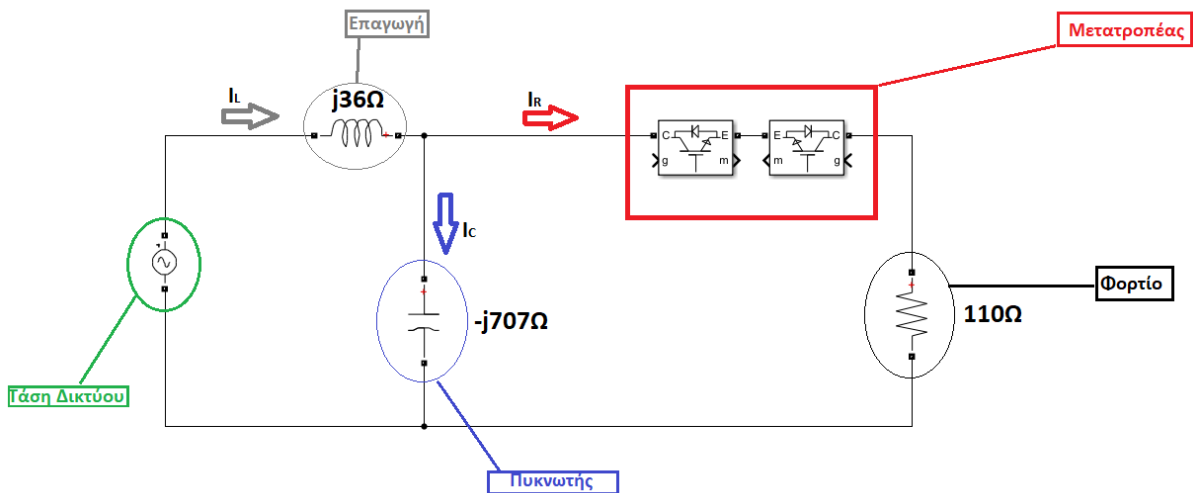


Σχήμα 5.53: Τάση εισόδου (κίτρινο), ρεύμα εισόδου (μπλε) και τάση ανόδου-καθόδου του IGBT για επιθυμητή ισχύ 400 Watt με παλμοδότηση PWM με φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα.

Όπως φαίνεται στα παραπάνω παλμογραφήματα, με την ενσωμάτωση του LC φίλτρου στην είσοδο του μετατροπέα, το ρεύμα εισόδου αποκτάει σχεδόν ημιτονοειδή μορφή. Έτσι, μειώνονται σε ένα ικανοποιητικό βαθμό οι αρμονικές και αυξάνεται ο συντελεστής ισχύος σε σχέση με πριν. Όμως παρατηρούμε ότι για χαμηλότερες τιμές ισχύος και τιμές που πλησιάζουν την μέγιστη τιμή της ισχύος στο φορτίο, το ρεύμα εισόδου έχει διαφορά φάσης με την τάση εισόδου. Αυτό έχει αρνητική επίπτωση στις χαμηλές τιμές της ισχύος.

Ο λόγος για τον οποίο έχουμε διαφορά φάσης έχει να κάνει με την θέση και τις τιμές των αντιστάσεων των στοιχείων του φίλτρου. Για μικρές τιμές ρεύματος φορτίου το ρεύμα στον πυκνωτή είναι σημαντικότερο. Άρα το X_c το οποίο είναι υψηλότερης τιμής του X_L δημιουργεί προήγηση του ρεύματος εισόδου. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 5.54, το συνολικό ρεύμα εισόδου ($I_{εισ}$) ταυτίζεται με το ρεύμα στην επαγωγή το οποίο είναι το διανυσματικό άθροισμα των:

- Ρεύμα I_R
- Ρεύμα I_C

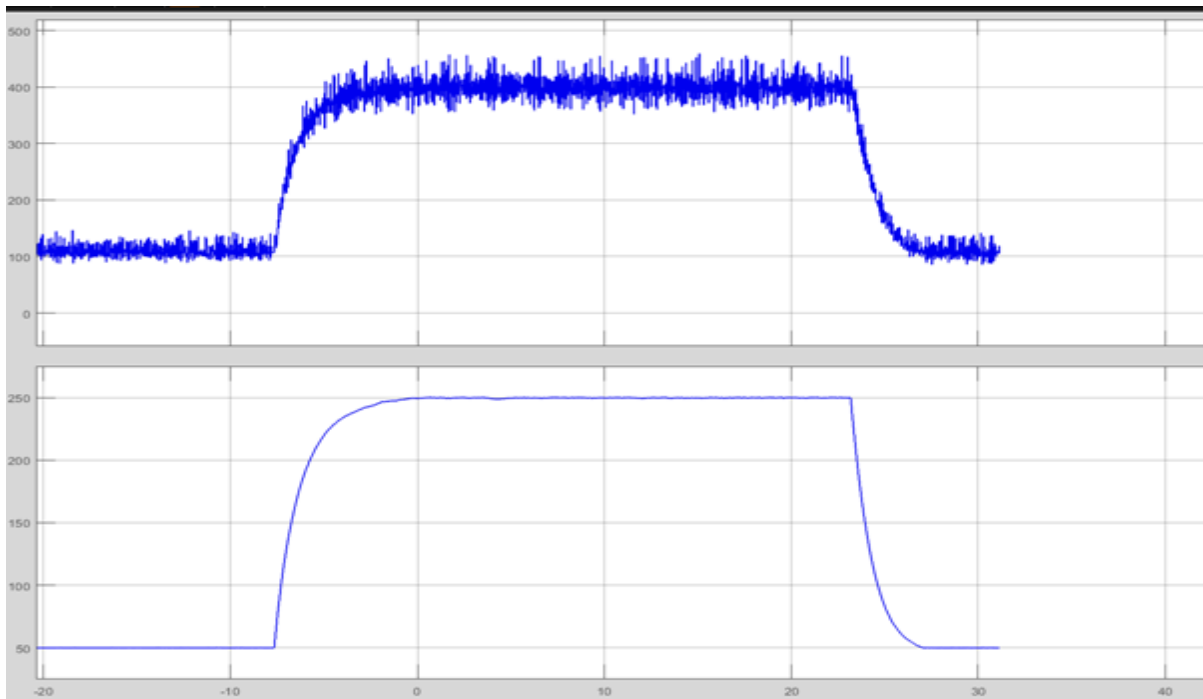


Σχήμα 5.54: Ροή ρευμάτων ύστερα με την τοποθέτηση του φίλτρου.

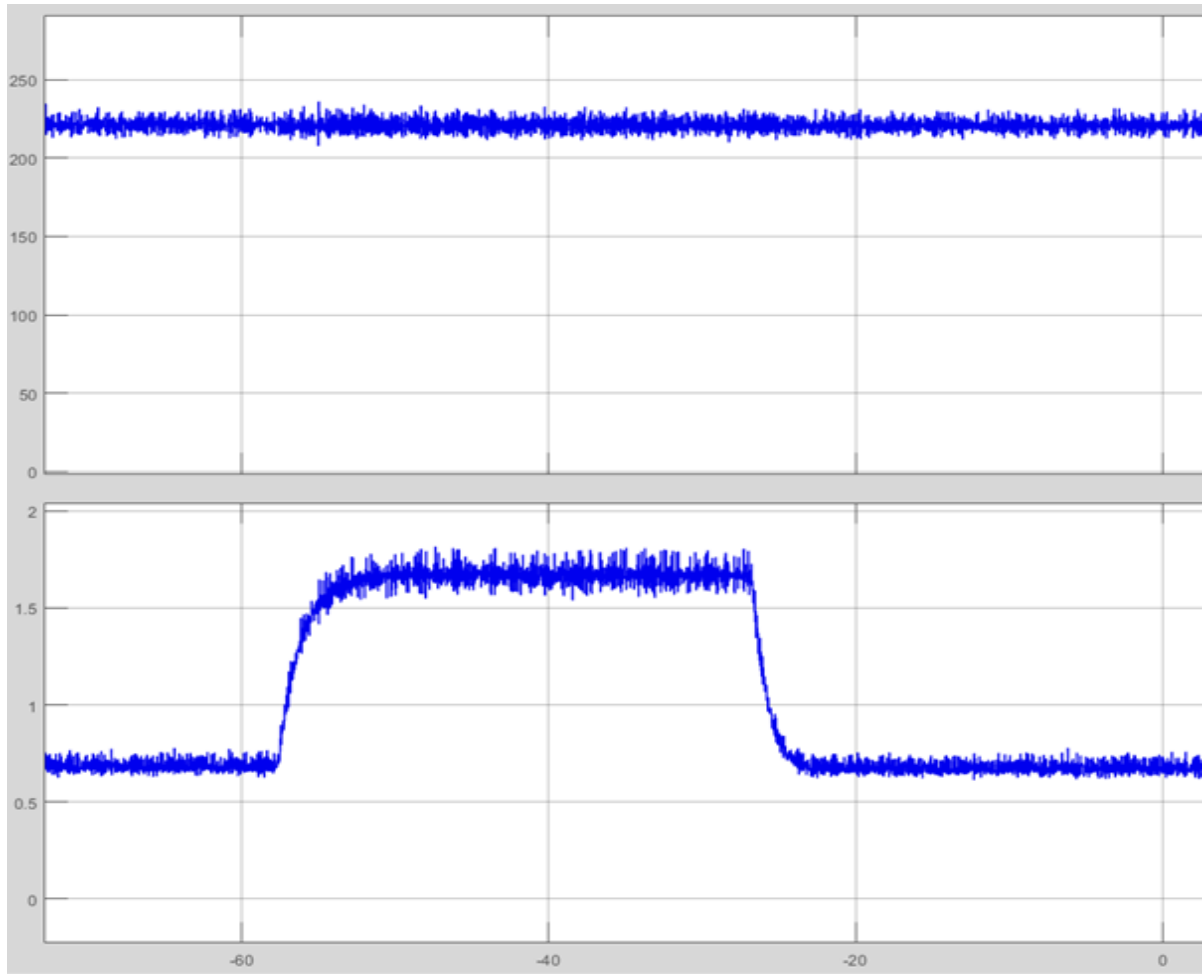
Για χαμηλότερες τιμές της ισχύς, το ρεύμα στο φορτίο είναι πολύ μικρό, άρα το κύκλωμα μας έχει συμπεριφορά ενός LC κυκλώματος, όπου $X_c=707\Omega$ και $X_L=36\Omega$, με αποτέλεσμα το ρεύμα εισόδου να παρουσιάζει διαφορά φάσης με την τάση του δικτύου, με το ρεύμα να προηγείται της τάσης. Μεγαλώνοντας την ισχύ αρχίζει να περνάει μεγαλύτερο ρεύμα στο φορτίο σε σχέση με πριν, το ρεύμα στην επαγωγή αυξάνεται επίσης, ενώ το ρεύμα στον πυκνωτή παραμένει σχεδόν σταθερό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρόλος της επαγωγής ενώ μειώνεται ο ρόλος του πυκνωτή στο κύκλωμα. Επομένως, για ενδιάμεσες τιμές της ισχύος η

επαγωγή «αναιρεί» τον πυκνωτή και έχουμε συντελεστή ισχύος που φτάνει την μονάδα και το ρεύμα εισόδου να γίνεται συμφασικό με την τάση δικτύου. Μεγαλώνοντας την ισχύ ακόμη περισσότερο και φτάνοντας κοντά στην μέγιστη τιμή αυτής, το ρεύμα στο φορτίο γίνεται ακόμη μεγαλύτερο και καθαρό ημιτονοειδές, το ρεύμα στην επαγωγή αυξάνεται επίσης, ενώ το ρεύμα στο πυκνωτή παραμένει σταθερό, με αποτέλεσμα ο ρόλος του πυκνωτή να γίνεται πολύ μικρός, το κύκλωμα έχει συμπεριφορά RL κυκλώματος, με αποτέλεσμα το ρεύμα εισόδου να παρουσιάζει διαφορά φάσης με την τάση του δικτύου, με την τάση να προηγείται του ρεύματος.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η μεταβολή της ισχύος, του Duty Cycle , της ενεργού τιμής της τάσης και της ενεργού τιμής του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο, όταν αλλάζουμε την επιθυμητή ισχύς από 100W στα 400W και αντίστροφα.

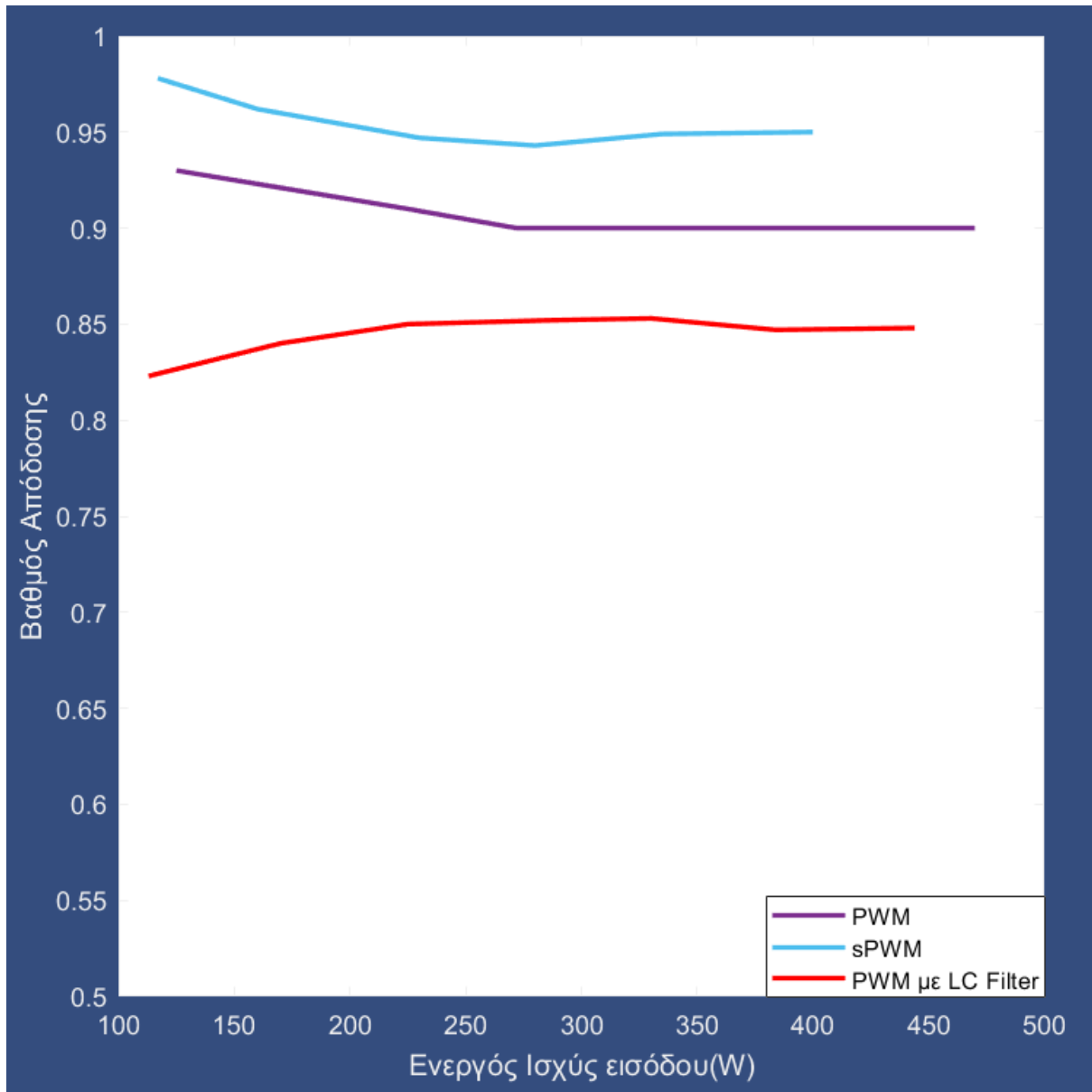


Σχήμα 5.55: Μεταβολή ισχύος (επάνω) και Duty Cycle (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 100W στα 400W και αντίστροφα.

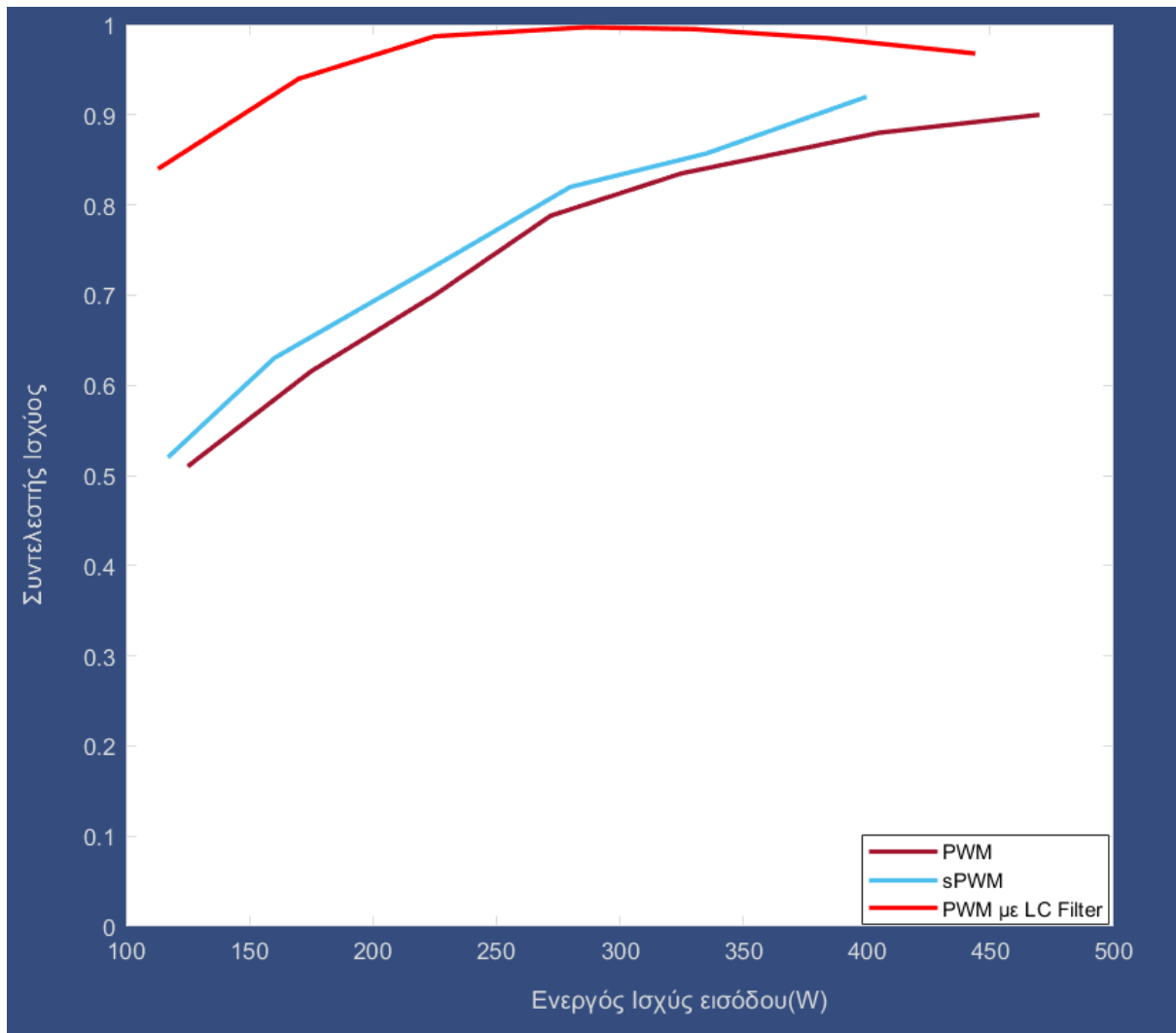


Σχήμα 5.56: Μεταβολή τάσης (επάνω) και ρεύματος (κάτω) σε συνάρτηση με τον χρόνο για Set Point από 100W στα 400W και αντίστροφα.

Στα σχήματα 5.57 και 5.58 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος ως προς την ενεργός ισχύς εισόδου για τις δύο τεχνικές παλμοδότησης, ενώ στα σχήματα 5.59 και 5.60 παρουσιάζονται οι γραφική παράσταση της μετρούμενης ενεργός ισχύς(σχ.5.59) και η γραφική παράσταση του σφάλματος μετρούμενης ενεργός ισχύς(σχ.5.60) ως προς το Set Point.

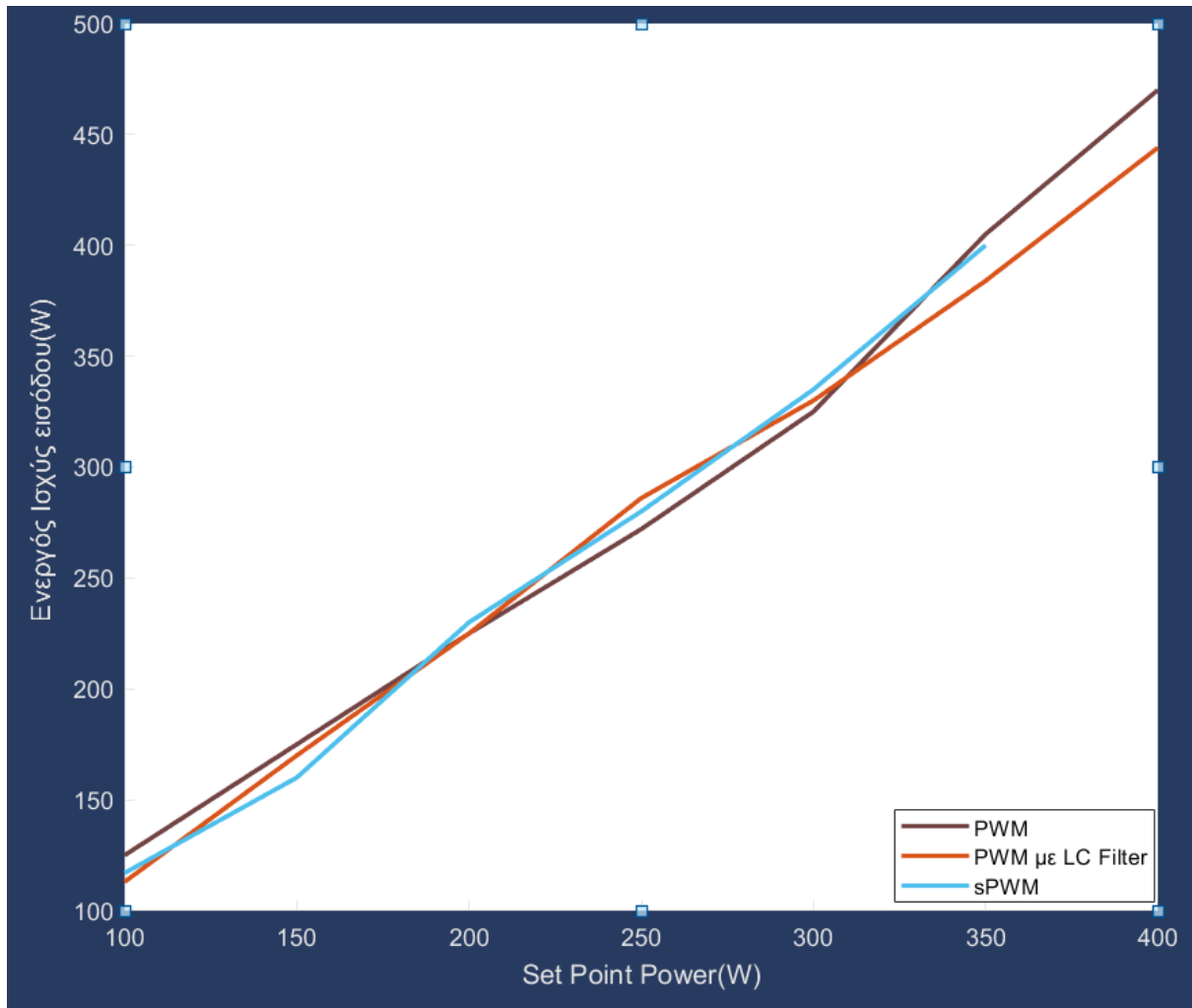


Σχήμα 5.57: Γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος εισόδου για τις παλμοδοτήσεις PWM, sPWM και PWM με LC φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα.

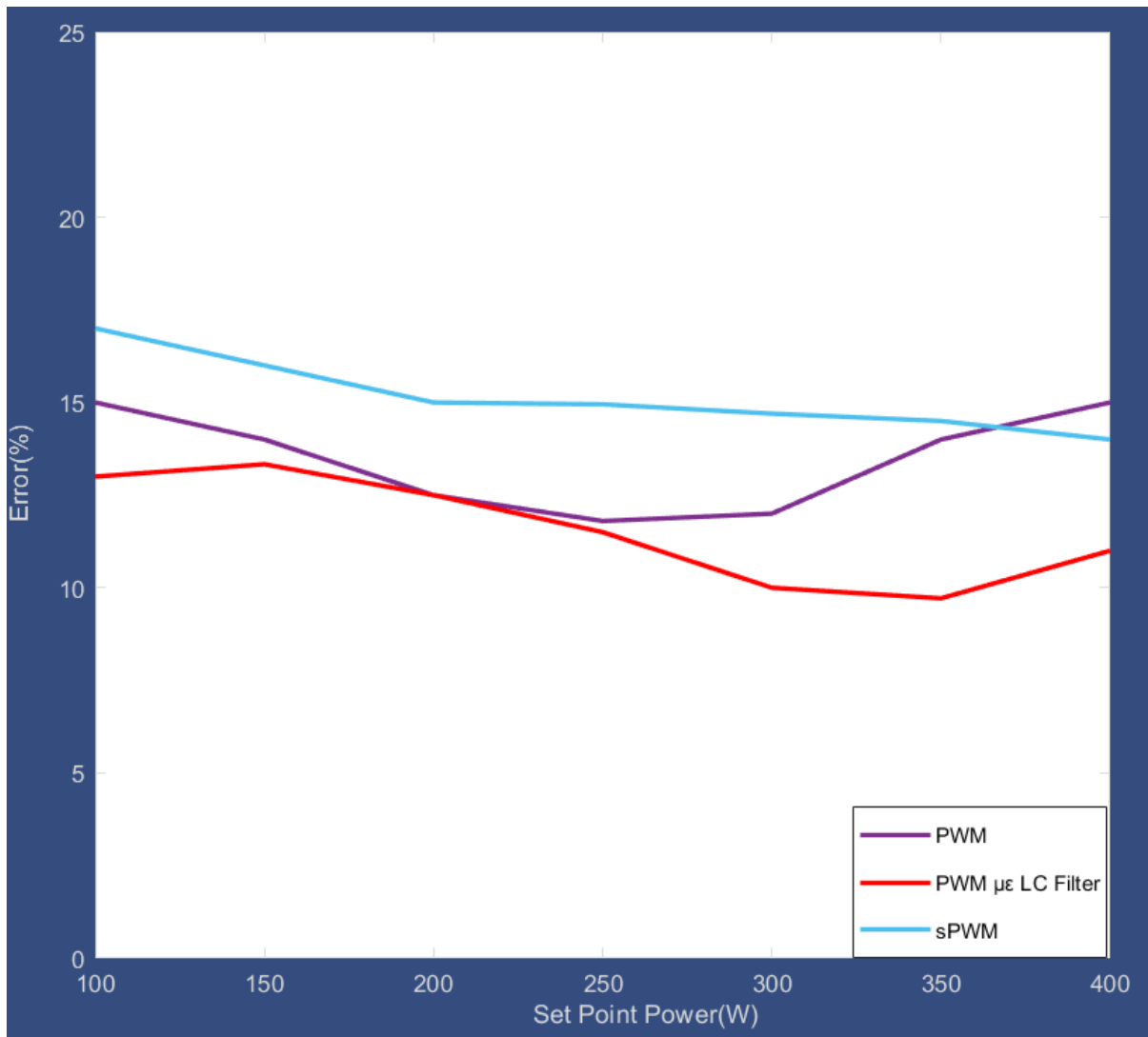


Σχήμα 5.58: Γραφική παράσταση του συντελεστή ισχύος ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος εισόδου για τις παλμοδοτήσεις PWM, sPWM και PWM με LC φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο συντελεστής ισχύος μετά την χρησιμοποίησης του LC φίλτρου στην είσοδο του μετατροπέα βελτιώνεται σημαντικά για μεγάλα όρια της ισχύος. Επίσης, ο βαθμός απόδοσης στην περίπτωση με φίλτρο μειώνεται λόγω απωλειών του φίλτρου που χρησιμοποιείται. Σχετικά με το σφάλμα ισχύει ότι γράψαμε νωρίτερα. Δηλαδή, αυτό εξαρτάται από τα παράσιτα στη δειγματοληψία και την ακρίβεια των αισθητήρων.



Σχήμα 5.59: Γραφική παράσταση της μετρούμενης ενεργού ισχύος εισόδου ως προς την επιθυμητή τιμή της ισχύος για τις παλμοδοτήσεις PWM, sPWM και PWM με LC φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα.



Σχήμα 5.60: Γραφική παράσταση του σφάλματος της μετρούμενης ενεργού ισχύος εισόδου ως προς την επιθυμητή τιμή της ισχύος για τις παλμοδοτήσεις PWM, sPWM και PWM με LC φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα.

Τέλος παρατηρώντας το σύνολο των γραφικών του σφάλματος της μετρούμενης ενεργού ισχύος σε σχέση με την επιθυμητή ενεργό ισχύ συμπεραίνεται ότι, η μέση τιμή του σφάλματος ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα είναι περίπου 12%, δηλαδή στην είσοδο του μετατροπέα έχουμε ισχύ 12% παραπάνω από την επιθυμητή που δηλώνουμε μέσω Set Point. Αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα μας μετράει 12% λιγότερη ισχύ από ότι στην πραγματικότητα. Για παράδειγμα εάν στο Set Point έχουμε δηλώσει ισχύ 100 W, το πρόγραμμα θα μετρήσει 100W αλλά η μετρούμενη ενεργός ισχύς φτάνει τα 112 W περίπου. Αυτό μπορούμε να το αποφύγουμε εάν στην έξοδο του μπλοκ που μετράει την ενεργό ισχύ, βάλουμε ένα Gain με τιμή κέρδος **1.12**. Αν πάλι κάποιος επιθυμεί μεγαλύτερη ακρίβεια τότε, μπορεί να εισάγει μία εξίσωση η οποία θα είναι το αποτέλεσμα ενός curve fitting.

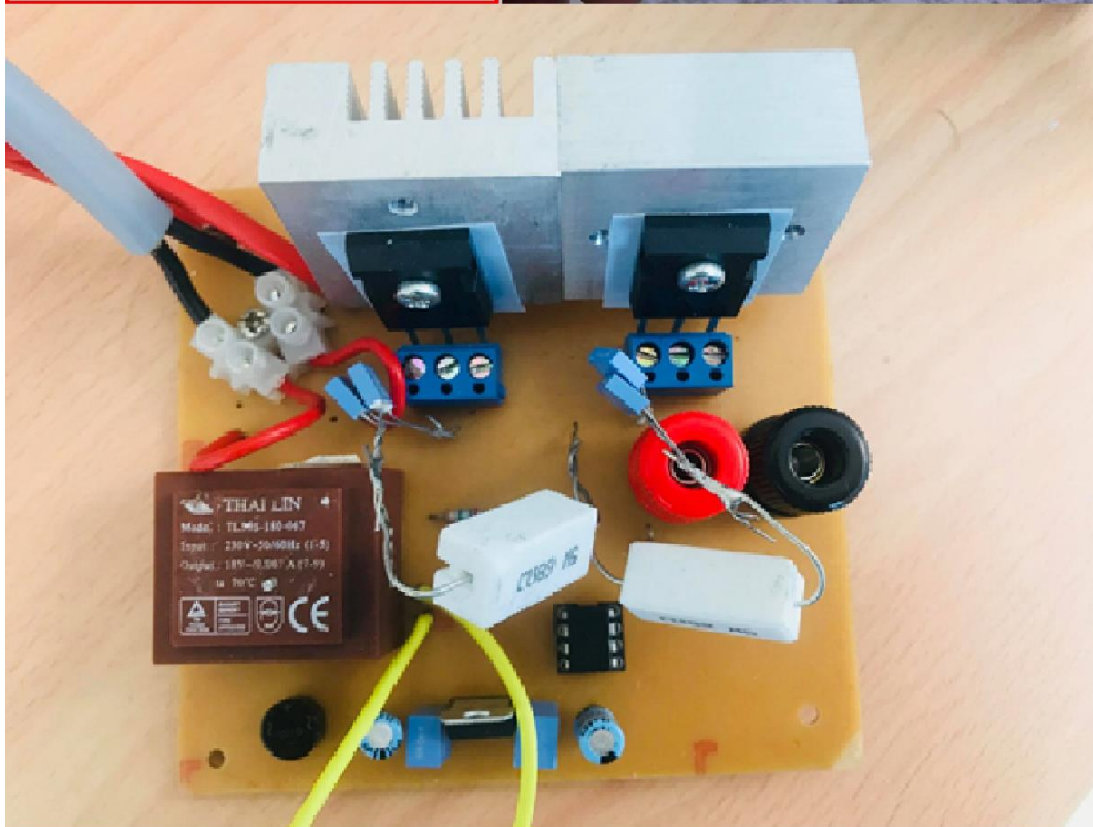
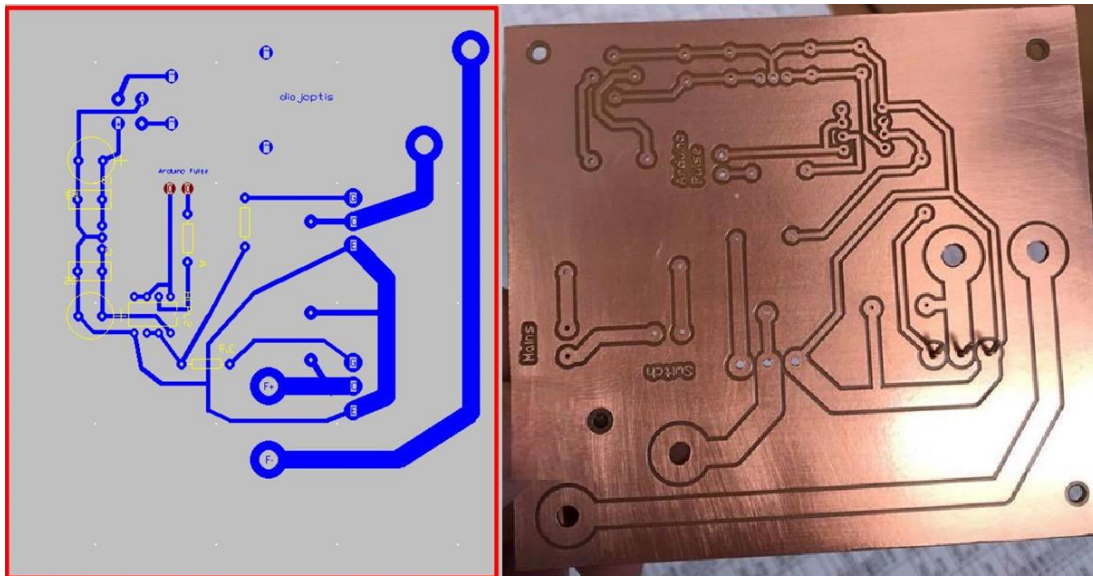
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

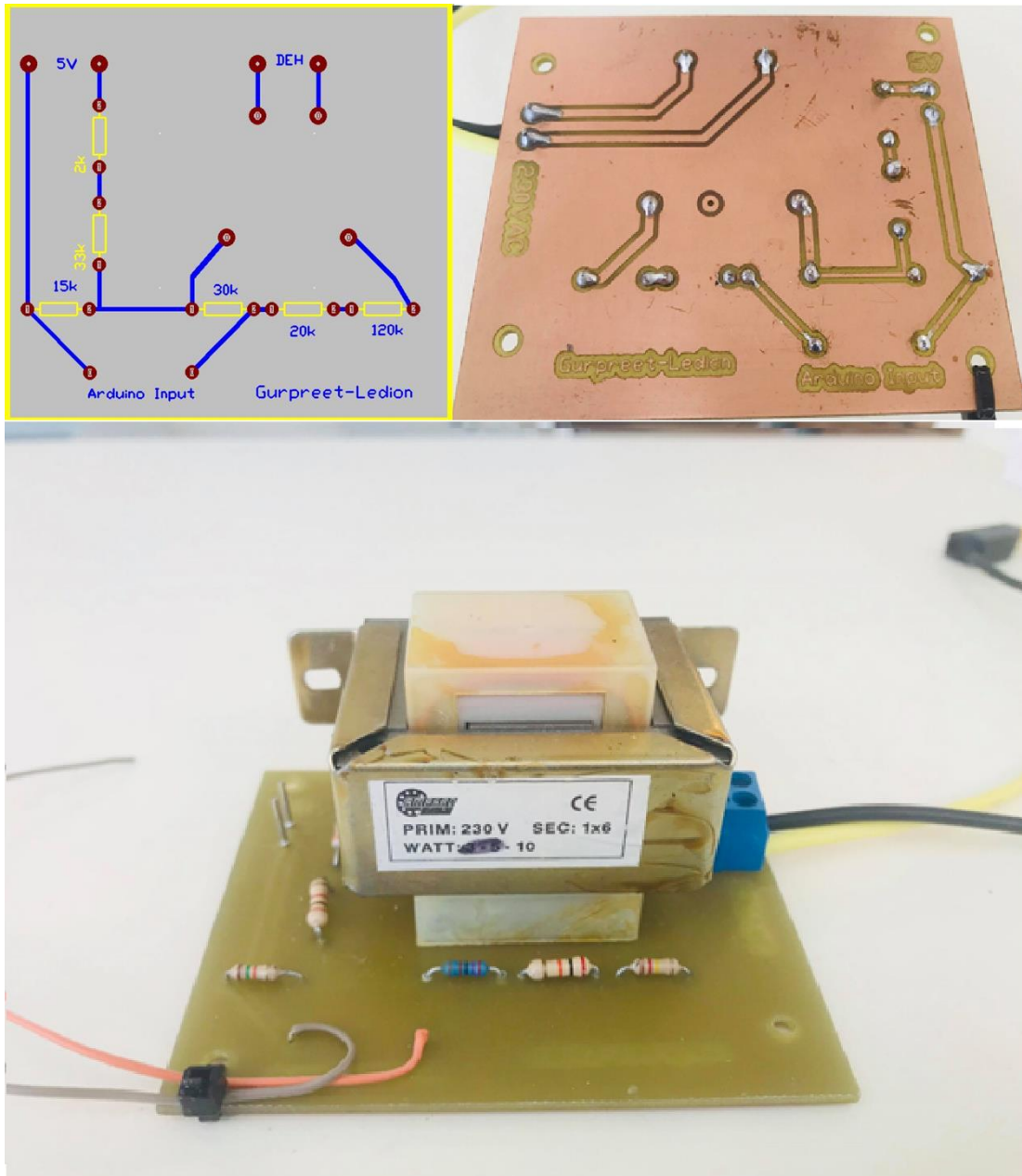
Στην συνέχεια παρουσιάζεται όλη η διαδικασία, από το σχέδιο στο Traxmaker μέχρι την τελική κατασκευή του μετατροπέα.

Αφού αναλύθηκαν τα κυκλώματα που χρειαζόμασταν για την υλοποίηση του μετατροπέα, φτιάχτηκαν τα σχέδια αυτών των πλακετών στο Traxmaker. Στην συνέχεια οι πλακέτες αυτές εκτυπώθηκαν στο Πανεπιστήμιο της Πάτρας. Αμέσως μετά εμφανίζονται τα διάφορα στάδια της κατασκευής της βασικής πλακέτας-κύκλωμα ισχύος (σχ.6.1) και της πλακέτας του αισθητήρα τάσης (σχ.6.2). Έχοντας πλέον έτοιμες τις πλακέτες του μετατροπέα λήφθησαν οι μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο. Επακόλουθο των θετικών αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πάρθηκαν ήταν η τοποθέτηση του κάθε τμήματος του μετατροπέα σε έναν ενιαίο χώρο-κουτί, ώστε να μπορεί να τεθεί σε λειτουργία με ασφάλεια. Ως μονωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε ο βακελίτης, πάνω στον οποίο κατανεμήθηκαν χωροταξικά οι πλακέτες και τα υπόλοιπα εξαρτήματα του μετατροπέα. Στο σχήμα 6.3 φαίνονται τα εξαρτήματα του μετατροπέα πριν μπουν στο πλαίσιο-κουτί, ενώ στο σχήμα 6.4 φαίνεται η κατανομή των εξαρτημάτων πάνω στο μονωτικό υλικό βακελίτη. Στο σχήμα 6.5 φαίνεται το εσωτερικό μέρος του κουτιού αφού τοποθετήθηκαν μέσα τα τμήματα του μετατροπέα. Παράλληλα με την τοποθέτηση των πλακετών στο κουτί, σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του PAINΤ η πρόσοψη του μετατροπέα(σχ.6.6). Στο επάνω μέρος αυτής αποδίδεται με ακρίβεια το κύκλωμα ισχύος. Στο κάτω μέρος εμφανίζονται οι θύρες για τα παλμογραφήματα. Επόμενο βήμα ήταν η εκτύπωση του σχεδίου σε ένα πλαστικό αυτοκόλλητο. Στην συνέχεια έγιναν με ακρίβεια οι τρύπες πάνω στην πρόσοψη έτσι ώστε να τοποθετηθούν οι μπόρνες και ο διακόπτης. Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η πρόσοψη του μετατροπέα αφού είχαν μπει οι μπόρνες και ο διακόπτης.

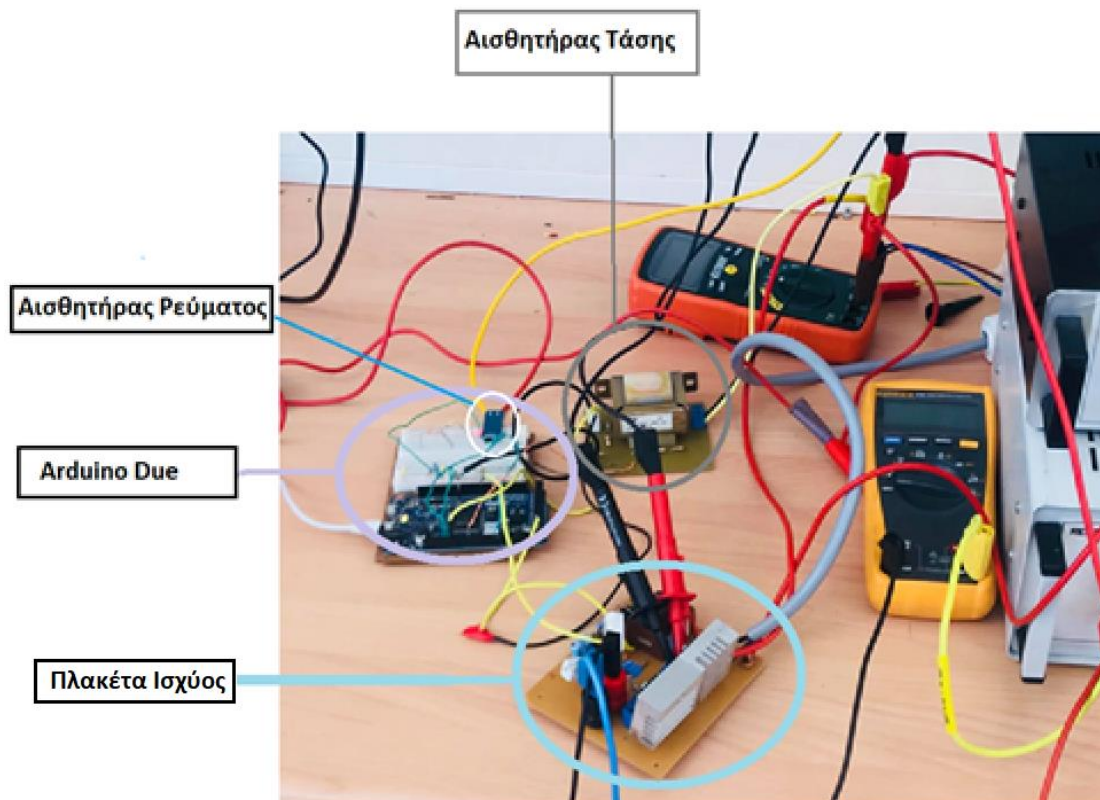
Τέλος, στα σχήματα 6.8 – 6.10 παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη κατασκευή.



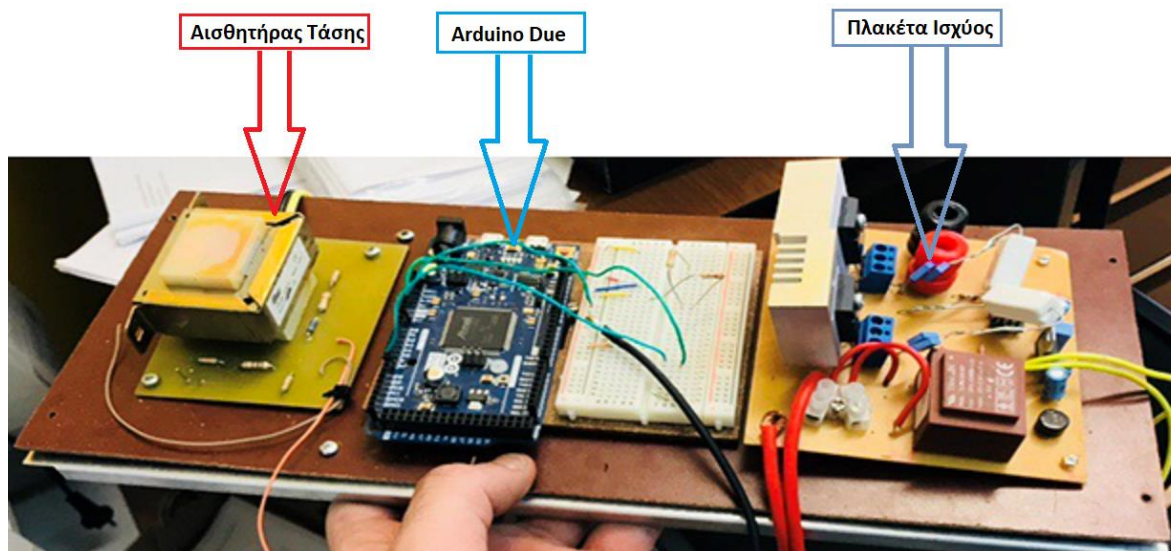
Σχήμα 6.1: Στάδια κατασκευής της βασικής πλακέτας-κύκλωμα ισχύος.



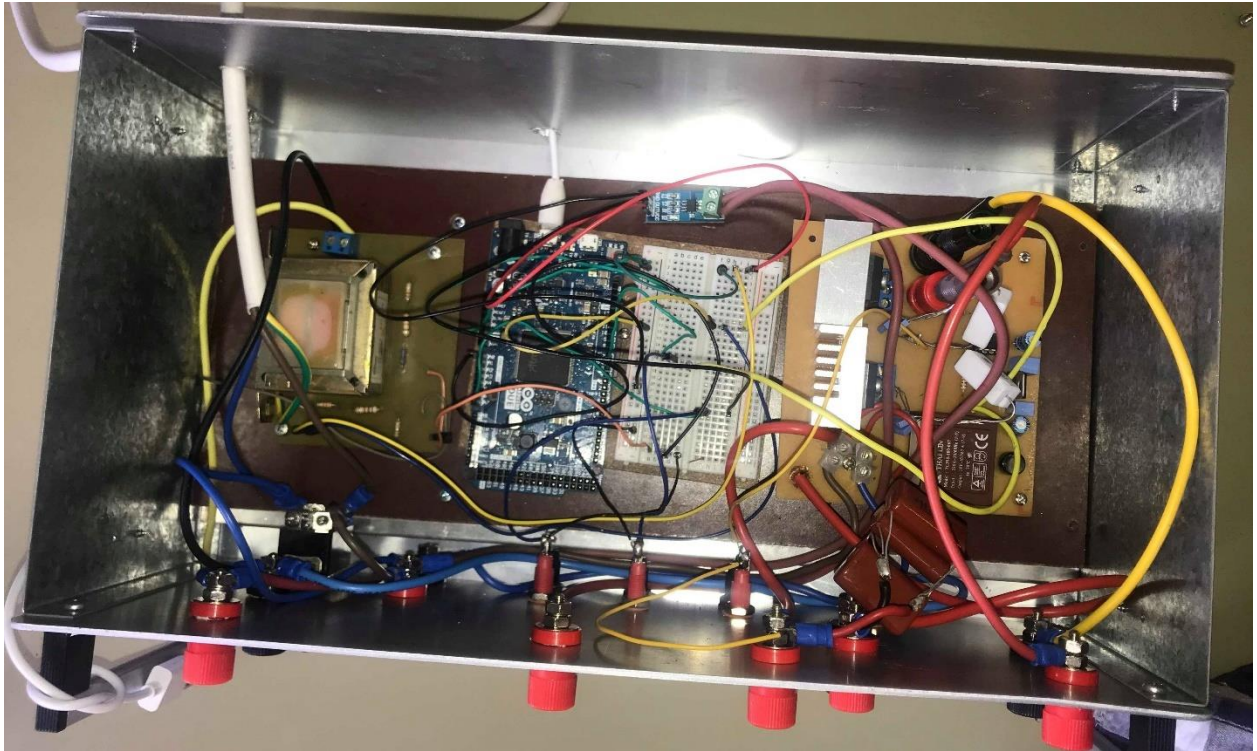
Σχήμα 6.2: Στάδια κατασκευής της πλακέτας του αισθητήρα τάσης.



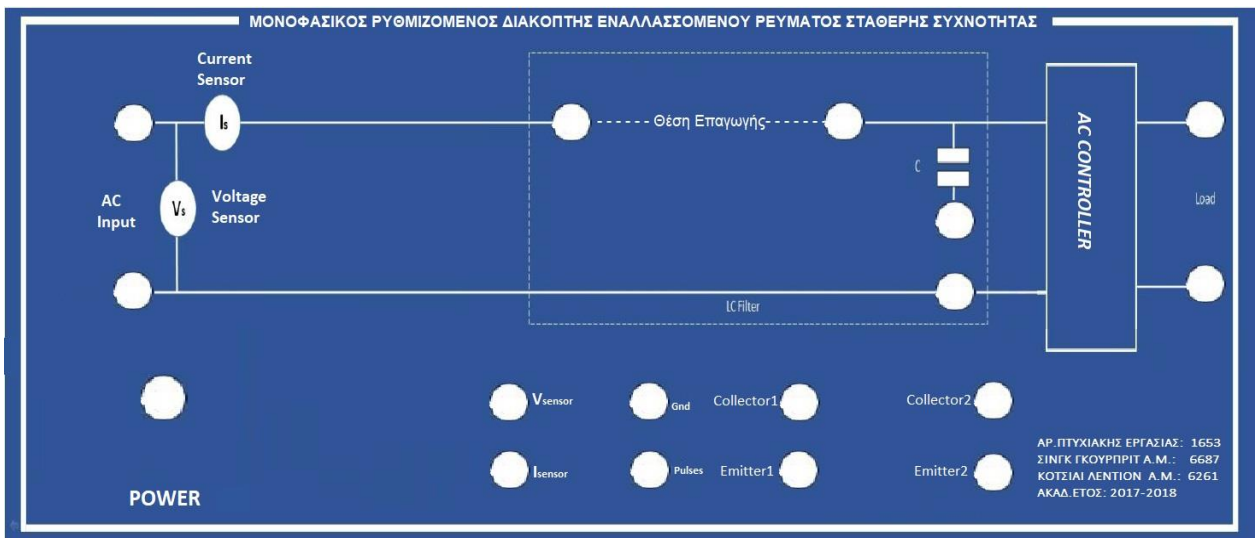
Σχήμα 6.3: Τα τμήματα του μετατροπέα πριν την τοποθέτηση τους στο πλαίσιο-κουτί.



Σχήμα 6.4: Κατανομή των τμημάτων του μετατροπέα πάνω στο μονωτικό υλικό βακελίτη πριν την τοποθέτηση τους στο πλαίσιο-κουτί.



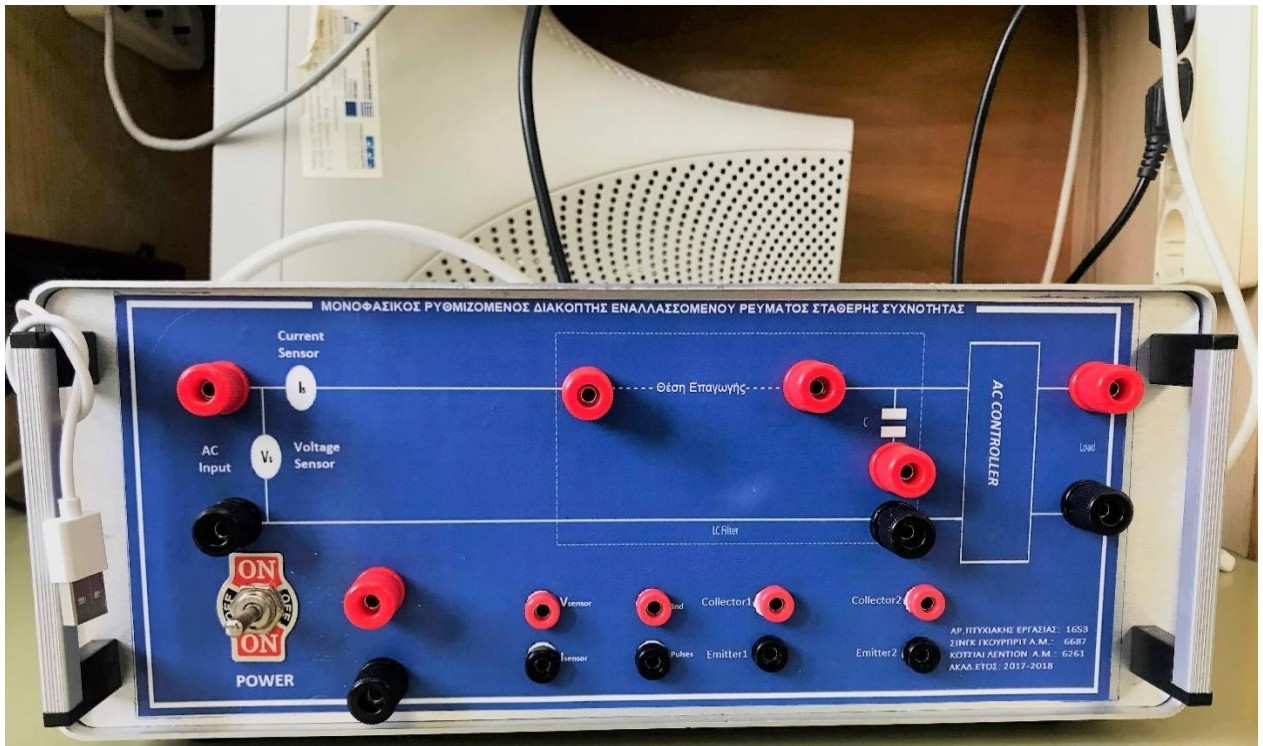
Σχήμα 6.5: Το εσωτερικό μέρος του κουτιού.



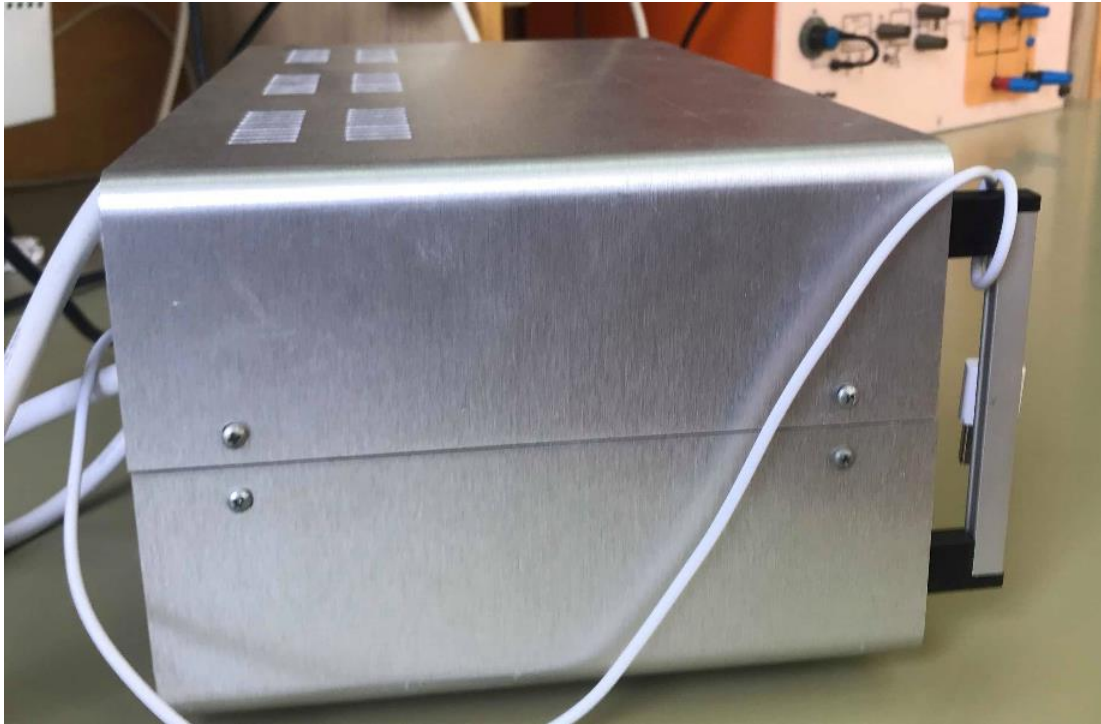
Σχήμα 6.6: Σχέδιο πρόσοψης του μετατροπέα.



Σχήμα 6.7: Η πρόσοψη του μετατροπέα.



Σχήμα 6.8: Ολοκληρωμένη κατασκευή (Μπροστινό μέρος).



Σχήμα 6.9: Ολοκληρωμένη κατασκευή (Πλάγια όψη).



Σχήμα 6.10: Ολοκληρωμένη κατασκευή (Πίσω όψη).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Springer-Verlag, "Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems, A Sourcebook of Topologies, Control and Integration", 2013, London
- [2] <http://epc.web.cern.ch/content/what-power-converter>.
- [3] Κωνσταντίνος Γεωργάκας, "Ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας", Διαφάνειες διαλέξεων, 2014, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=rZu2X65dKKE>
- [5]. <http://www.completepowerelectronics.com/ac-voltage-converters-phase-controlled-converters-an-introduction/>
- [6] Ασουκίδης Ανδρέας, Βασιλόπουλος Ηλίας, "Μελέτη και κατασκευή μονοφασικού ηλεκτρονικού ανορθωτή για έλεγχο ισχύος μηχανής συνεχούς ρεύματος με διόρθωση συντελεστή ισχύος", 2017 Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
- [7] <http://elprojects.blogspot.gr/2011/01/rms-voltage-control-circuit-with.html>
- [8] Κωνσταντίνος Γεωργάκας, "Μελέτη άεργου ισχύος και μέθοδοι βελτίωσης συντελεστή ισχύος και βαθμού απόδοσης συστημάτων μετατροπής ενέργειας αποτελούμενα από ηλεκτρονικούς μετατροπείς εξαναγκασμένης μετάβασης", 2009. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας
- [9] https://www.researchgate.net/figure/Diagram-of-hysteresis-current-control_fig17_274510368
- [10] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/pulse-width-modulation/duty-cycle>
- [11] <http://learning.grobotronics.com/el/getting-started/arduino-uno/>
- [12] Θεόδωρος Γ. Γεωργόπουλος, Αθανάσιος Κ. Κυριανάκης, "Μονοφασικός αντιστροφέας με IGBT ελεγχόμενος μέσω επεξεργαστή Arduino Due", 2015 Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας