



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή μετατροπέα  
AC/DC/AC για τον έλεγχο στροφών τριφασικού  
επαγωγικού κινητήρα με την μέθοδο σταθερού  
λόγου  $V/f$ »**

του φοιτητή:

**Θεοχάρη Παπουτσή**

**Αριθμός Μητρώου: 4742**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Κωνσταντίνος Γ. Γεωργάκας, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

ΑΘΗΝΑ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021



Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Πάτρα, Ημερομηνία

#### ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Κωσταντίνος Γεωργάκας
2. Βασίλειος Χαραλαμπάκος,
3. Αναστάσιος Δροσόπουλος

#### Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή

*Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.*

*Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή **Θεοχάρη Παπουτσή** που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.*



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της προπτυχιακής μου φοίτησης στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Ως την ελάχιστη δυνατή μνεία, στη συγκεκριμένη παράγραφο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της. Ιδιαίτερα:

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Κωνσταντίνο Γεωργάκα, για την πολύτιμη υποστήριξή του, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, και κυρίως για την επιμονή του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που επέδειξε από την αρχή έως το τέλος.

Επίσης, ευχαριστώ και την Γραμματεία του Τμήματος για την πολύτιμη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και τη σύντροφό μου, για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση, την κατανόηση και την υπομονή τους.

Θεοχάρης Παπουτσής



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η επίτευξη του ελέγχου στροφών - ροπής ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα με τη, μέθοδο ελέγχου **Σταθερού Λόγου  $V/f$**  (Τάσης / Συχνότητας).

Για να επιτευχθεί αυτό, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα σύστημα ηλεκτρονικού μετατροπέα, το οποίο αποτελείται από το κύκλωμα ισχύος, το κύκλωμα ελέγχου και από τις βοηθητικές τροφοδοσίες. Εντός της προκείμενης εργασίας, ο αναγνώστης μπορεί να βρει μια περιεκτική και γενική ανάλυση των προαναφερθέντων.

Ο έλεγχος του μετατροπέα DC/AC πραγματοποιήθηκε με την τεχνική Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation - **SPWM**). Ειδικότερα, εξετάζονται τα κυκλώματα ισχύος, τα οποία αποτελούνται από την ανορθωτική διάταξη και τη διάταξη του αντιστροφέα. Η ανορθωτική διάταξη, ανορθώνει τριφασική συμμετρική πηγή τάσεως, ενώ η διάταξη του αντιστροφέα αντιστρέφει την ανορθωμένη τάση σε εναλλασσόμενη καθώς μεταβάλλει τη συχνότητα και την τάση στην έξοδο του. Ο αντιστροφέας υλοποιήθηκε με ημιαγωγικούς ελεγχόμενους διακόπτες IGBTs σε διάταξη εξαπαλμικής γέφυρας, τα οποία παλμοδοτούνται από κατάλληλους ενισχυτές σήματος οδήγησης των IGBTs (gate drives).

Εν συνεχεία, το κύκλωμα ελέγχου του συστήματος αποτελείται από έναν μικροελεγκτή ψηφιακού επεξεργαστή σήματος. Ο μικροελεγκτής προγραμματίστηκε έτσι, ώστε να παρέχει τους απαραίτητους παλμούς αγωγής των IGBTs καθώς και τις ενδείξεις των τάσεων, των ρευμάτων και της συχνότητας σε μια LCD οθόνη, ενώ υπάρχουν και μπουτόν (pcb switch) για τον χειρισμό του συστήματος. Οι βοηθητικές τροφοδοσίες που απαιτούνται για τη λειτουργία των gate drives, του μικροελεγκτή, της LCD οθόνης και όλων των απαραίτητων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων προέρχονται από ένα τροφοδοτικό, το οποίο κατασκευάστηκε με τοπολογία Flyback.



## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to achieve the control of speed and torque of an asynchronous three-phase motor of squirrel-cage rotor, using the **Fixed Ratio (Voltage / Frequency)** control method.

In order to achieve this, and as a part of this thesis, an electronic converter system was designed and built. This electronic converter system consists of the power circuit, the control circuit and the auxiliary power supplies. Within this thesis, the reader can find a comprehensive and general analysis of all the aforementioned.

The converter was tested by using the Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) technique. In particular, the power circuits, which consist of the rectifier device and the inverter device, are examined. The rectifier device rectifies a three-phase symmetrical voltage source, while the inverter device inverts the DC to a three-phase voltage as it changes the frequency and voltage at its output.

Moreover, the inverter was implemented with IGBTs semiconductor-controlled switches in a six-pulse bridge arrangement, which are pulsed by suitable IGBTs (gate drives). The system control circuit then consists of a digital signal processor microcontroller. The microcontroller is programmed to provide the necessary IGBTs's power pulses as well as voltage, current and frequency readings on an LCD display, and there are buttons (pcb switch) in order to operate the system. The auxiliary power supplies required for the operation of the gate drives, the microcontroller, the LCD screen and all the necessary integrated circuits come from a power supply, which was built with Flyback topology.



## ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η παρούσα εργασία εκπονείται στα πλαίσια της τετραετούς υποχρεωτικής φοίτησης στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, και αποτελεί το επιστέγασμα αυτής. Πρόκειται για την μελέτη, τη σχεδίαση και την κατασκευή ενός μετατροπέα AC/DC/AC για τον έλεγχο τριφασικού επαγωγικού κινητήρα με την μέθοδο σταθερού λόγου  $V/f$  (Τάσης / Συχνότητας).

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι ηλεκτρικών μηχανών, αναλύονται συνοπτικά οι κατηγορίες αυτών και παρουσιάζεται αυτή με την οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, και συγκεκριμένα ο ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα. Είναι ευρέως γνωστό, πως για να υπάρξει υψηλή ροπή σε μικρότερες στροφές από αυτές που συνιστά ο εκάστοτε κατασκευαστής, χωρίς παράλληλα να υπερφορτίζεται ο κινητήρας, ακολουθείται η μέθοδος ελέγχου Σταθερού Λόγου  $V/f$ .

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος, στις κατηγορίες αυτών, και εξηγείται ο λόγος εμβάθυνσης μόνο στους τριφασικούς μετατροπείς ισχύος AC/DC και DC/AC, καθώς στοχεύει στην εισαγωγή του αναγνώστη στους μετατροπείς ισχύος οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο τελευταίο κεφάλαιο για την υλοποίηση του συστήματος οδήγησης τριφασικού εναλλασσόμενου επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Το τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζει τους μικροελεγκτές και καταγράφονται τα πλεονεκτήματα χρήσης μικροελεγκτών.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε ένας μικροελεγκτής με ενσωματωμένη μονάδα επεξεργασίας σήματος, διότι παρέχει αναλογικές μονάδες εισόδου-εξόδου PWM και επιπλέον γίνεται συνοπτική περιγραφή των επιμέρους μονάδων που χρησιμοποιηθήκαν για την υλοποίηση του μετατροπέα. Στο τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται η αναλυτική παρουσίαση της σχεδίασης του μετατροπέα AC/DC/AC που κατασκευάστηκε για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής.

Οι μορφές της τάσης και του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα και οι παλμοί έναυσης των IGBTs όπως απεικονίζονται στις κυματομορφές του παραρτήματος, είναι οι αναμενόμενες.

Θεοχάρης Παπουτσής



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	1
<b>ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ</b> .....	1
Εισαγωγή.....	1
1. Ηλεκτρικές στρεφόμενες μηχανές.....	1
1.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (DC).....	2
1.2 Κινητήρες AC .....	3
1.2.1 Ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα .....	4
1.2.2 Ασύγχρονος κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα .....	7
1.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα κινητήρων τριφασικού ασύγχρονου βραχυκυκλωμένου δρομέα έναντι κινητήρα DC ξένης διέγερσης.....	8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	9
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ</b> .....	9
Εισαγωγή.....	9
2. Μετατροπείας Ισχύος AC/DC.....	10
2.1 Εισαγωγή στους Μετατροπείς Ισχύος AC/DC.....	10
2.1.1 Μονοφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση.....	11
2.1.2 Τριφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση .....	13
2.1.3 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανόρθωση.....	17
2.2 Μετατροπείας Ισχύος DC/AC.....	21
2.2.1 Εισαγωγή στον μετατροπέα ισχύος DC/AC .....	21
2.2.2 Αντιστροφείς με μισή και πλήρη γέφυρα (μονοφασικοί) .....	23
2.2.3 Τριφασικός αντιστροφέας.....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	36
<b>ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ</b> .....	36
Εισαγωγή.....	36
3.1 Χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή DSPIC30F4011 [11].....	39
3.2 Το μπλοκ διάγραμμα του μικροελεγκτή DSPIC30F4011.....	42
3.2.1 Περιγραφή των ακροδεκτών του μικροελεγκτή DSPIC30F4011.....	43
3.2.2 Συνοπτική περιγραφή των μονάδων του μικροελεγκτή που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία .....	44
3.2.3 Λειτουργικό Προγραμματισμού του Μικροελεγκτή .....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> .....	50
<b>ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ AC/DC/AC</b> .....	50



Εισαγωγή.....	50
4.1 Μετατροπές AC/DC.....	51
4.2 Μετατροπές DC/AC.....	55
4.3 Βοηθητικά κυκλώματα τροφοδοσίας.....	60
4.4 Μονάδα ελέγχου και διεπαφής του χρήστη.....	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>70</b>
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>70</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>75</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>77</b>
<b>ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ .....</b>	<b>77</b>





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

#### Εισαγωγή

Ηλεκτρική μηχανή ορίζεται η συσκευή που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Μια τέτοια συσκευή, όταν χρησιμοποιείται για την μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια (generator). Όταν η συσκευή μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται κινητήρας (motor).<sup>[1]</sup> Έτσι, επειδή οποιαδήποτε ηλεκτρική μηχανή μπορεί να μετατρέψει ενέργεια και προς τις δύο κατευθύνσεις είναι δυνατό κάθε τέτοια μηχανή να χρησιμοποιηθεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Σχεδόν όλες οι υπάρχουσες γεννήτριες και κινητήρες μετατρέπουν ενέργεια από την μια μορφή στην άλλη μέσω της δράσης ενός μαγνητικού πεδίου. Μια άλλη συγγενική συσκευή είναι και ο μετασχηματιστής (transformer). Μετασχηματιστής είναι η συσκευή που μετατρέπει εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια με συγκεκριμένο πλάτος τάσης και συχνότητα σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια με διαφορετικό πλάτος τάσης αλλά ίδια συχνότητα. Οι μετασχηματιστές δηλαδή είναι ηλεκτρικές μηχανές οι οποίες δεν έχουν στρεφόμενα μέρη.

Οι τρεις παραπάνω κατηγορίες ηλεκτρικών συσκευών είναι πανταχού παρούσες στη σύγχρονη ζωή. Στο σύγχρονο σπίτι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι το βασικό εξάρτημα των περισσότερων οικιακών συσκευών και στους χώρους εργασίας κινούν σχεδόν όλα τα εργαλεία. Φυσικά, οι γεννήτριες είναι απαραίτητες για την παραγωγή ενέργειας που κινεί τους παραπάνω κινητήρες. Οι μετασχηματιστές βοηθούν σ' αυτή τη διαδικασία μεταφοράς μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας ανάμεσα στα σημεία παραγωγής και κατανάλωσης της.

#### 1. Ηλεκτρικές στρεφόμενες μηχανές

Ο Ηλεκτρικός Κινητήρας είναι μια διάταξη που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα. Τον συναντάμε καθημερινά σε απλές ή σύνθετες χρήσεις και διακρίνεται σε δυο βασικές κατηγορίες:

---

<sup>[1]</sup> Ορισμός Ηλεκτρικής Μηχανής από Wikipedia. Διαθέσιμο στο: [el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρική\\_μηχανή](http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρική_μηχανή)



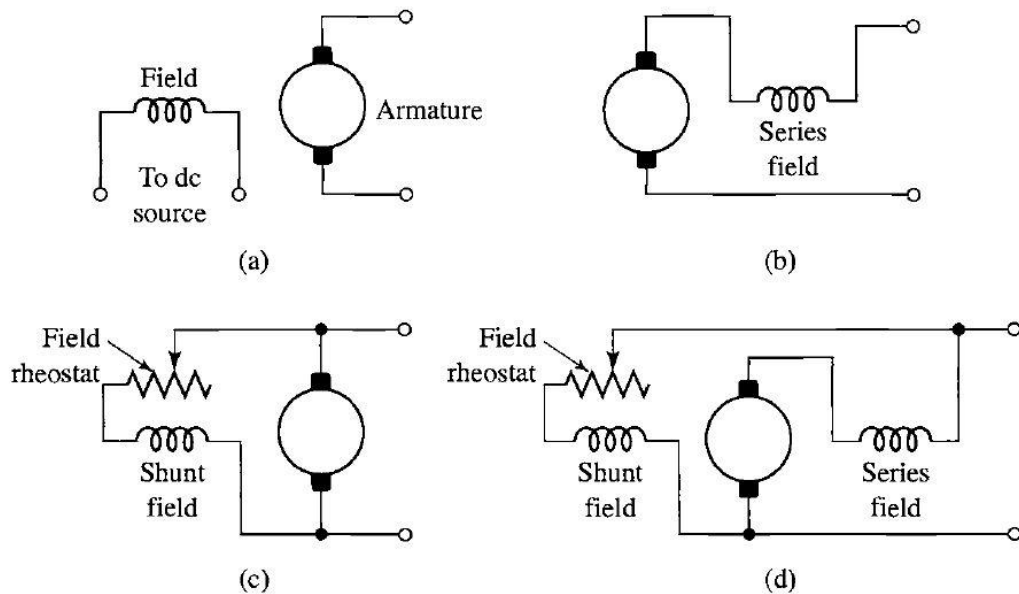
- Κινητήρες DC
- Κινητήρες AC

## 1.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (DC)

Τα βασικά μέρη ενός κινητήρα DC είναι ο στάτης και ο ρότορας. Ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα (κορμός της μηχανής), τους μαγνητικούς πόλους, το τύλιγμα διέγερσης, τους βοηθητικούς πόλους και τις ψήκτρες. Ο ρότορας αποτελείται από τον άξονα, το επαγωγικό τύμπανο (πυρήνας και τύλιγμα δρομέα) και τους συλλέκτες.

Οι DC κινητήρες χωρίζονται σε επί μέρους κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης της διέγερσης:

- Ξένης διέγερσης (a)
- Εν σειρά διέγερσης (b)
- Παράλληλης διέγερσης (c)
- Σύνθετης διέγερσης (d)



Σχήμα 1.1 Κατηγορίες των DC κινητήρων<sup>[2]</sup>

<sup>[2]</sup> A.E. Fitzgerald, Electric Machinery, 6<sup>η</sup> έκδοση, Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>, σελ. 361, σχήμα 7.4



## 1.2 Κινητήρες AC

Οι ανάγκες των σύγχρονων κοινωνιών για κίνηση διάφορων μηχανημάτων τόσο στην βιομηχανία όσο και στις οικιακές εφαρμογές επέβαλαν τη δημιουργία μια ποικιλίας ειδών και τύπων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Είτε τριφασικοί είτε μονοφασικοί υπάγονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Σύγχρονοι κινητήρες
- Ασύγχρονοι κινητήρες

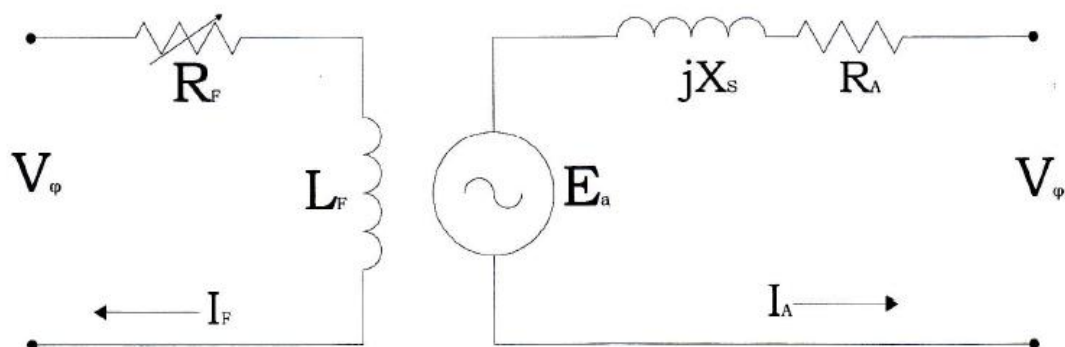
Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι όμοιοι στην κατασκευή με τις σύγχρονες γεννήτριες. Στους κινητήρες αυτούς χρειάζεται συνήθως μια συνεχής τάση που τροφοδοτεί το δρομέα έτσι ώστε, να δημιουργηθεί ένα μαγνητικό πεδίο μέσα στον κινητήρα. Το πεδίο που δίνει την κίνηση είναι το στρεφόμενο ομογενές πεδίο που δημιουργεί την τροφοδοσία. Τα δύο πεδία περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα και μπορούμε να πούμε ότι ουσιαστικά ο δρομέας «κυνηγά» τον στάτη με αποτέλεσμα την περιστροφή του. Η ταχύτητα δίνεται από την σχέση:

$$n_m = n_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

όπου:  $f$  η συχνότητα τροφοδοσίας και

$P$  οι πόλοι της μηχανής.

Το ισοδύναμο κύκλωμα απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 1.2 Ανά φάση κύκλωμα του σύγχρονου κινητήρα

Με βάση το παραπάνω κύκλωμα ισχύει:

$$E_A = V_\phi - jX_s \cdot I_A - R_A \cdot I_A$$



Οι σύγχρονοι κινητήρες όταν λειτουργούν με υπερδιέγερση έχουν χωρητικό χαρακτήρα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και χωρίς φορτίο για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες που ονομάζονται και επαγωγικοί, λόγω του ότι η τάση στο δρομέα (που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα) ουσιαστικά επάγεται στα τυλίγματά του από το πεδίο του στάτη, αντί να προσφέρεται σε αυτό από κάποια εξωτερική ηλεκτρική σύνδεση. Η χαρακτηριστική διαφορά του ασύγχρονου κινητήρα από τον σύγχρονο, εντοπίζεται στο γεγονός ότι για να κινηθεί δεν είναι απαραίτητη η τροφοδότησή του με συνεχές ρεύμα διέγερσης.

Μια επαγωγική μηχανή μπορεί να λειτουργεί τόσο ως γεννήτρια, όσο και ως κινητήρας, τα μειονεκτήματα ωστόσο στην περίπτωση που λειτουργεί ως γεννήτρια είναι πολλά και έτσι σπανίως χρησιμοποιείται καθ' αυτόν τον τρόπο. Έτσι συνήθως, οι επαγωγικές μηχανές αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

Ένας ασύγχρονος κινητήρας έχει τον ίδιο στάτη με μία σύγχρονη μηχανή, ενώ ο δρομέας του έχει διαφορετική δομή που ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

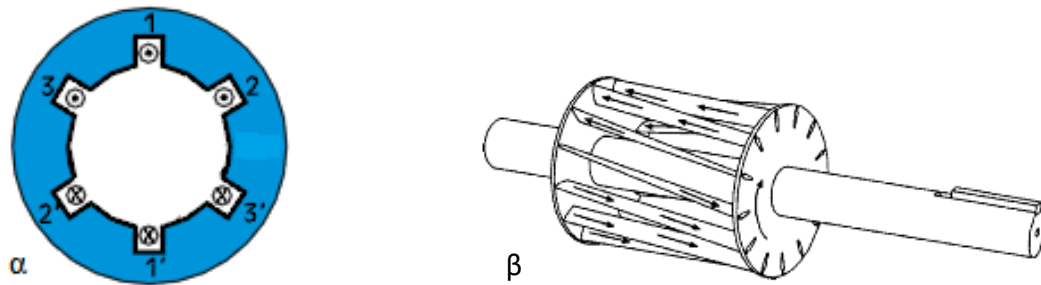
- Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα
- Κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα

### **1.2.1 Ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα**

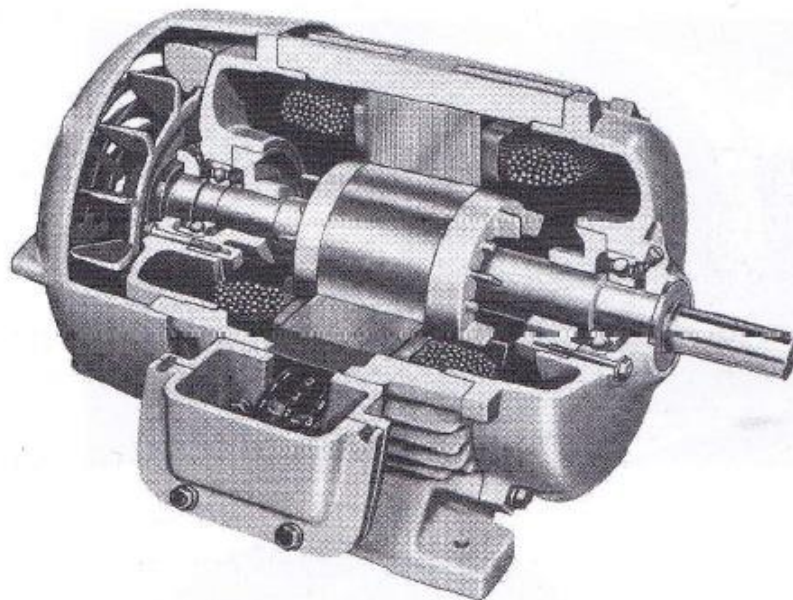
Ένας ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα αποτελείται από τον στάτη και το δρομέα. Το τριφασικό τύλιγμα της ασύγχρονης μηχανής βρίσκεται στον στάτη, όπου τοποθετείται περιμετρικά μέσα σε αυλακώσεις του σιδηρομαγνητικού υλικού. Ο δρομέας με την σειρά του αποτελείται και αυτός από αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετούνται αγώγιμοι ράβδοι που συγκολλούνται στα δυο άκρα με στεφάνια βραχυκύκλωσης και σχηματίζουν το τύλιγμα κλωβού.<sup>[3]</sup>

---

<sup>[3]</sup> Ηλεκτρικές Μηχανές, Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια Τομέας Ηλεκτρολογικός, Κεφάλαιο 4, ενότητα 4.1.2, σελ. 212



Σχήμα 1.3 α. Τριφασικό τύλιγμα στο στάτη<sup>[4]</sup>. β. Τύλιγμα κλωβού δρομέα.<sup>[5]</sup>



Σχήμα 1.4 Κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού σε τομή<sup>[6]</sup>

Όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί από τριφασική συμμετρική πηγή τότε έχουμε στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο από το στάτη που διαρρέει το εσωτερικό

<sup>[4]</sup> Ηλεκτρικές Μηχανές, Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια Τομέας Ηλεκτρολογικός, Κεφάλαιο 4, ενότητα 4.1.2, σελ. 212 σχήμα 4.4

<sup>[5]</sup> Ηλεκτρικές Μηχανές, Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια Τομέας Ηλεκτρολογικός, Κεφάλαιο 4, ενότητα 4.2, σελ. 2 σχήμα 4.4

<sup>[6]</sup> Εικόνα από: Stephen J. Charman, Ηλεκτρικές Μηχανές, 4<sup>η</sup> έκδοση, σελ. 461 σχήμα 7-3(α)



της ηλεκτρικής μηχανής. Η ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη καλείται «Σύγχρονη Ταχύτητα  $n_s$ » και δίνεται από την σχέση:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

όπου:  $f$  η συχνότητα και  
 $P$  οι πόλοι της μηχανής

Αυτό το μαγνητικό πεδίο επάγει τάση στο δρομέα δημιουργώντας νέο μαγνητικό πεδίο το οποίο παρασύρεται από το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η τάση που επάγεται σε κάποιον από τους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται από την σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Το μέγεθος που περιγράφει αυτήν την κίνηση είναι η ολίσθηση.

$$s(\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100$$

Εάν επιλύσουμε τις δυο παραπάνω σχέσεις ως προς τις στροφές του δρομέα  $n_r$  προκύπτει:

$$n_r = n_s \cdot (1 - s)$$

Η συχνότητα της επαγόμενης τάσης του δρομέα  $f_2$  συνδέεται με την συχνότητα του δικτύου με την παρακάτω σχέση:

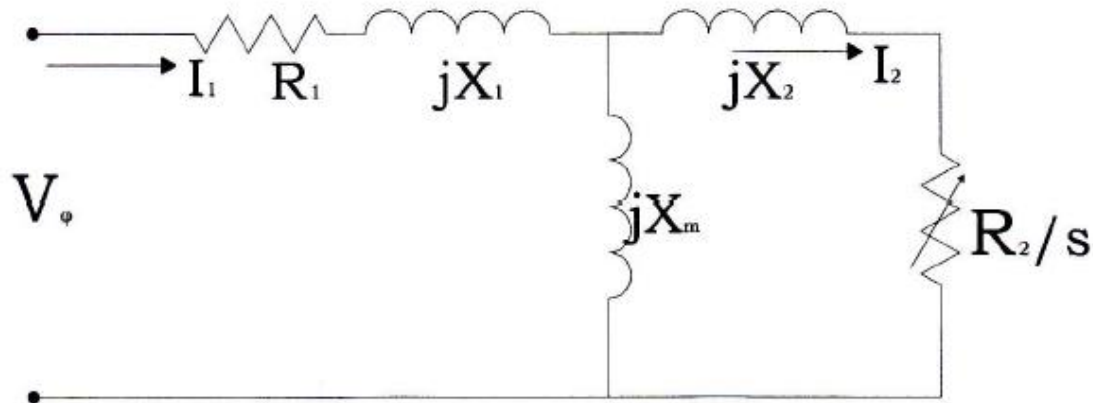
$$f_2 = \frac{P}{2} \cdot \frac{n_s - n_r}{60} \cdot 100 = sf_1$$

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε, πως για να μεταβάλουμε τις στροφές ενός ασύγχρονου κινητήρα, πρέπει να μεταβληθεί η ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου.

Δηλαδή, αυξομειώνοντας τη συχνότητα τροφοδοσίας της ασύγχρονης μηχανής ρυθμίζουμε τις στροφές του κινητήρα. Αν όμως η ενεργός τιμή της επιβαλλόμενης τάσεως παραμείνει υψηλή, τότε υπάρχει κίνδυνος υπερέντασης στα τυλίγματα του στάτη αφού μειώνοντας την συχνότητα μειώνονται και οι αντιδράσεις του κινητήρα  $XL$  καθώς και η αντίσταση ολίσθησης του δρομέα.

$$XL = 2\pi \cdot f_1 \cdot L$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ασύγχρονου κινητήρα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

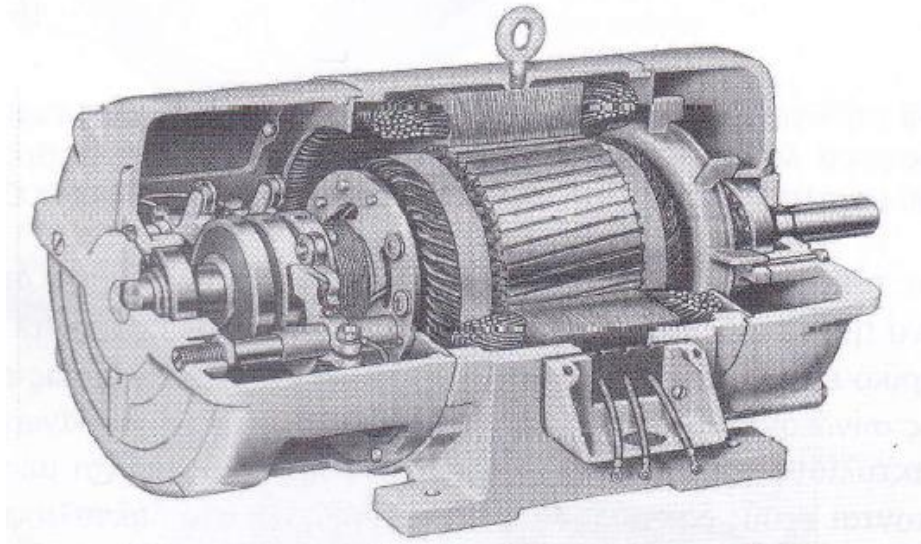


Σχήμα 1.5 Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του ασύγχρονου κινητήρα

### 1.2.2 Ασύγχρονος κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα

Ο ασύγχρονος κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τυλίγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο, ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις ενός τέτοιου τυλίγματος συνδέονται σε συνδεσμολογία αστέρα ή τριγώνου (συνήθως σε αστέρα), ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Οι αγωγοί του δρομέα συνδέονται ηλεκτρικά μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίους. Έτσι τα ρεύματα στο δακτυλιοφόρο δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες και επιπλέον είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα του δρομέα. Η τελευταία δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα επεξεργασίας της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.





Σχήμα 1.6 Επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα σε τομή<sup>[7]</sup>

### 1.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα κινητήρων τριφασικού ασύγχρονου βραχυκυκλωμένου δρομέα έναντι κινητήρα DC ξένης διέγερσης

#### Κινητήρες DC ξένης διέγερσης:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εύκολα ελέγξιμα (από κυκλώματα ελέγχου). Ευστάθεια στον έλεγχο. Σταθερή ταχύτητα και στροφές.	Κόστος αγοράς. Μετατροπή της τάσης από AC σε DC Όγκος, Βάρος. Πολλά κατασκευαστικά μέρη που χρειάζονται συντήρηση. Χαμηλότερος βαθμός απόδοσης.

#### Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ελάχιστη συντήρηση. Μικρό βάρος και όγκος. Μικρό κόστος αγοράς. Υψηλότερος βαθμός απόδοσης.	Δυσκολία και πολυπλοκότητα στον έλεγχο. Μικρότερη ευστάθεια από τους DC κινητήρες.

<sup>[7]</sup>Εικόνα από: Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές, 4<sup>η</sup> έκδοση, σελ. 462 σχήμα 7-5





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

#### Εισαγωγή

Η αποστολή των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος με την ευρεία έννοια του όρου, είναι η επεξεργασία και ο έλεγχος της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή τάσεων και ρευμάτων με βέλτιστα διαμορφωμένη μορφή, κατάλληλη για το χρησιμοποιούμενο φορτίο. Αυτό το ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος συνήθως το ονομάζουμε ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Η ισχύς εισόδου του μετατροπέα ισχύος παρέχεται συνήθως -χωρίς αυτό να αποτελεί τον κανόνα- από το δίκτυο (μονοφασικό ή τριφασικό) και έχει συχνότητα 50 ή 60 Hz. Η γωνία φάσης ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα εισόδου εξαρτάται από την τοπολογία και τον έλεγχο του μετατροπέα ισχύος. Η επεξεργασμένη έξοδος (τάση, ρεύμα, συχνότητα, αριθμός φάσεων) επιλέγεται ώστε να ταιριάζει στο φορτίο. Αν ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή τάσης, το ρεύμα εξόδου και η διαφορά φάσης ανάμεσα στο ρεύμα και την τάση εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του φορτίου. Συνήθως η έξοδος του μετατροπέα ισχύος συγκρίνεται με μια επιθυμητή τιμή (είσοδο αναφοράς) και το μεταξύ τους σφάλμα ελαχιστοποιείται με τη βοήθεια ενός ελεγκτή.

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη, η οποία οφείλεται στη συμβολή αρκετών παραγόντων. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η εξέλιξη των μικροελεγκτών. Ο ελεγκτής που αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο αποτελείται από αναλογικά ολοκληρωμένα κυκλώματα ή/και από ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος (DSP). Οι επαναστατικές πρόοδοι, που έχουν γίνει στη μικροηλεκτρονική, έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη τέτοιων ελεγκτών. Επιπλέον, αυτές οι πρόοδοι στην τεχνολογία κατασκευής ημιαγωγών έκαναν δυνατή τη σημαντική αύξηση των τάσεων και των ρευμάτων, που μπορούν να χειριστούν οι ημιαγωγοί ισχύος, και την αύξηση των ταχυτήτων μετάβασης. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος έφερε την επανάσταση στις εφαρμογές της ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς επιτρέπουν τη χρήση των ΑΠΕ στην καθημερινή ζωή. Επίσης, σημαντικός είναι ο ρόλος τους στα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς. Γενικά οι



εφαρμογές των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος καθημερινά αυξάνονται και βρίσκουν πεδίο στα παρακάτω:

- Οικιακές (ψύξη, θέρμανση, κλιματισμός, φωτισμός, Η/Υ)
- Βιομηχανικές (αντλίες, συμπιεστές, ανελκυστήρες, εργαλειομηχανές, UPS, επαγωγική θέρμανση, συγκολλήσεις)
- Μεταφορές (ηλεκτροκίνητα οχήματα)
- Κοινωφελή συστήματα (ΑΠΕ, Μεταφορά υψηλής DC τάσης, διόρθωση συντελεστή ισχύος)
- Τηλεπικοινωνίες (Φορτιστές συσσωρευτών, τροφοδοτικά)

Η ταξινόμηση των ηλεκτρονικών επεξεργαστών και μετατροπέων ισχύος γίνεται με βάση την τάση ή το ρεύμα εισόδου – εξόδου. Επομένως, ταξινομούνται ως εξής:

- AC/DC
- DC/AC
- DC/DC
- AC/AC

Στην παρούσα εργασία αναφέρονται μόνο οι δύο πρώτοι τρόποι μετατροπής ισχύος. Στόχος, είναι η εισαγωγή του αναγνώστη στους μετατροπείς ισχύος οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο για την υλοποίηση του συστήματος οδήγησης τριφασικού εναλλασσόμενου επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

## **2. Μετατροπέας Ισχύος AC/DC**

### **2.1 Εισαγωγή στους Μετατροπείς Ισχύος AC/DC**

Οι μετατροπείς ισχύος AC/DC έχουν ως στόχο την μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης ή ρεύματος εισόδου σε συνεχή. Στα Ελληνικά οι μετατροπείς αυτοί καλούνται ανορθωτές. Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες ανορθωτών, όμως η παρούσα εργασία αναφέρεται μόνο σε μονοφασικούς και τριφασικούς ανορθωτές που ως ημιαγωγία διακοπτικά στοιχεία χρησιμοποιούν μόνο διόδους ή/και μόνο θυρίστορ. Γίνεται αναφορά μόνο σε αυτά τα δύο είδη ανορθωτών γιατί αυτά χρησιμοποιήθηκαν

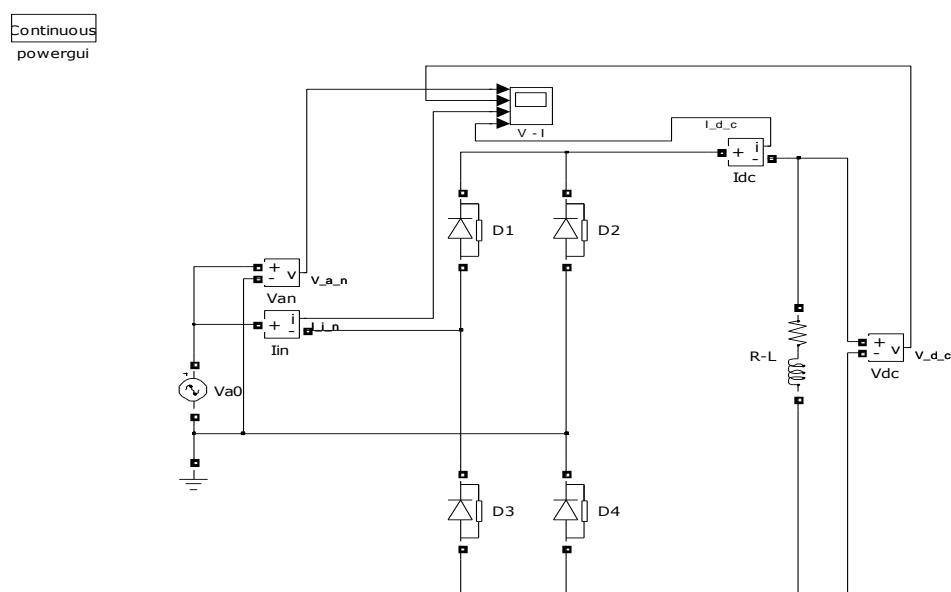


για τη δημιουργία των DC τάσεων που απαιτούνται για να υλοποιηθεί η κατασκευή καθώς είναι απλές και αξιόπιστες τοπολογίες.

Οι ανορθωτές που χρησιμοποιούν μόνο διόδους ονομάζονται **μη ελεγχόμενοι ανορθωτές** ενώ οι ανορθωτές που χρησιμοποιούν μόνο θυρίστορ ονομάζονται **πλήρως ελεγχόμενοι ανορθωτές**.

### 2.1.1 Μονοφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση

Μια τοπολογία ανορθωτικής διάταξης είναι η διάταξη η οποία αποτελείται από τέσσερις διόδους όπως αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 2.1. Ενδεικτικά η μονοφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα προσομοιώθηκε στο MATLAB SIMULINK για ωμικό – επαγωγικό φορτίο (R-L). Αναφερόμαστε σ' αυτή τη διάταξη πρώτον για τη θεωρητική ανάλυση της ανορθωτικής διαδικασίας και δεύτερον γιατί χρησιμοποιείται στην παραγωγή DC τάσης των βοηθητικών κυκλωμάτων.



**Σχήμα 2.1** Μονοφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση

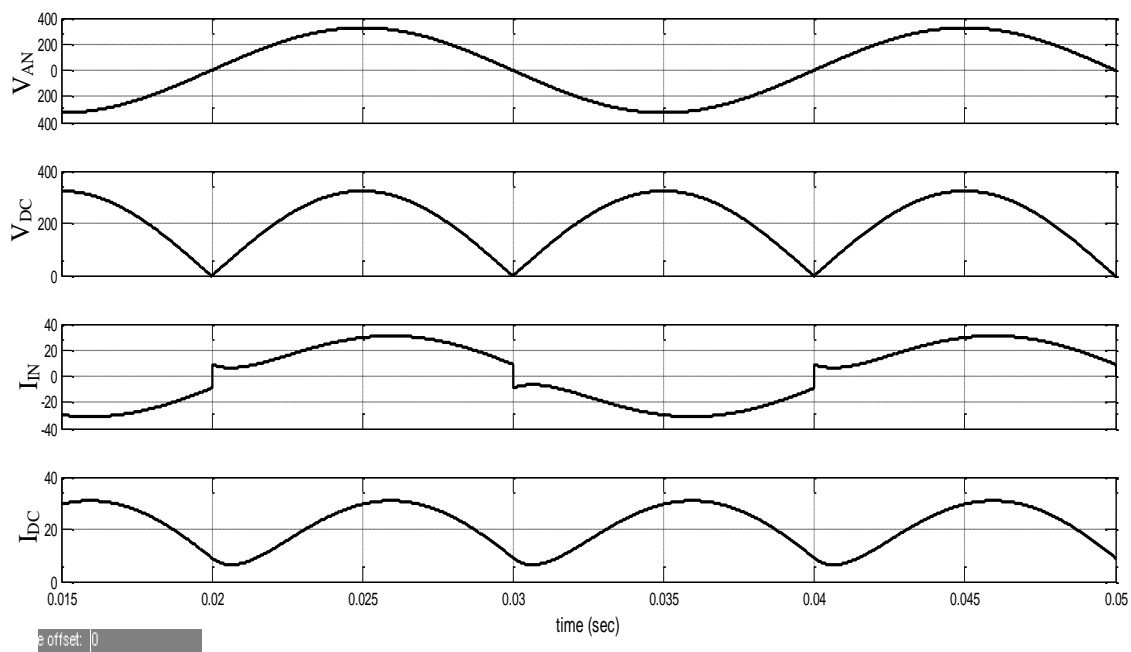
Στο κύκλωμα υπάρχουν δυο ζευγάρια διόδων τα οποία λειτουργούν για το μισό της περιόδου. Στην πρώτη ημιπερίοδο είναι οι διόδοι  $D_1$  και  $D_4$  που λειτουργούν μαζί και στη δεύτερη ημιπερίοδο οι διόδοι  $D_2$  και  $D_3$  που αυτές οι δυο λειτουργούν μαζί. Κατά τη λειτουργία του κυκλώματος, όταν οι διόδοι  $D_1$  και  $D_2$  βρεθούν σε κοινό δυναμικό, το ρεύμα ρέει συνεχώς μέσα από μια δίοδο από την πρώτη ομάδα και μέσα από μια δίοδο της δεύτερης ομάδας. Όταν η  $V_a$  είναι θετική τότε η δίοδος  $D_1$  θα άγει και το  $I_{dc}$  και η  $V_a$  θα εμφανίζεται ως τάση ανάστροφης πόλωσης επάνω στα άκρα της



D<sub>2</sub>. Όταν η V<sub>a</sub> γίνει αρνητική τότε το ρεύμα μεταβαίνει σχεδόν ακαριαία στη δίοδο D<sub>3</sub> και η D<sub>4</sub> εμφανίζει στα άκρα της ανάστροφη πόλωση.

Το ίδιο θα συμβεί και στην περίπτωση που η δεύτερη ομάδα D<sub>4</sub> και D<sub>3</sub> βρεθούν σε κοινό δυναμικό. Όταν η V<sub>a</sub> είναι θετική τότε η δίοδος D<sub>2</sub> θα άγει το I<sub>dc</sub> και η V<sub>a</sub> θα εμφανίζεται ως τάση ανάστροφης πόλωσης επάνω στα άκρα της D<sub>3</sub>. Όταν τώρα η V<sub>a</sub> γίνει αρνητική τότε το ρεύμα μεταβαίνει σχεδόν ακαριαία στη δίοδο D<sub>3</sub> και η D<sub>4</sub> εμφανίζει στα άκρα της ανάστροφη πόλωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μονοφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης (σχήμα 2.1.) παρουσιάζονται στις κυματομορφές του σχήματος 2.2 και στην ανάλυση ρεύματος του σχήματος 2.3 που έγιναν στο MATLAB SIMULINK για ωμικό – επαγωγικό φορτίο ( $\omega L \gg R$ ), για συνεχή αγωγή.



**Σχήμα 2.2** Κυματομορφές τάσεων - ρευμάτων μονοφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης

Οι σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της μονοφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης παρουσιάζονται παρακάτω 2.1 έως 2.4. [3]

Η μέση τιμή της τάσεως εξόδου της ανόρθωσης δίνεται από τη σχέση (2.1)

$$V_{DC} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} V_{in} \quad (2.1)$$



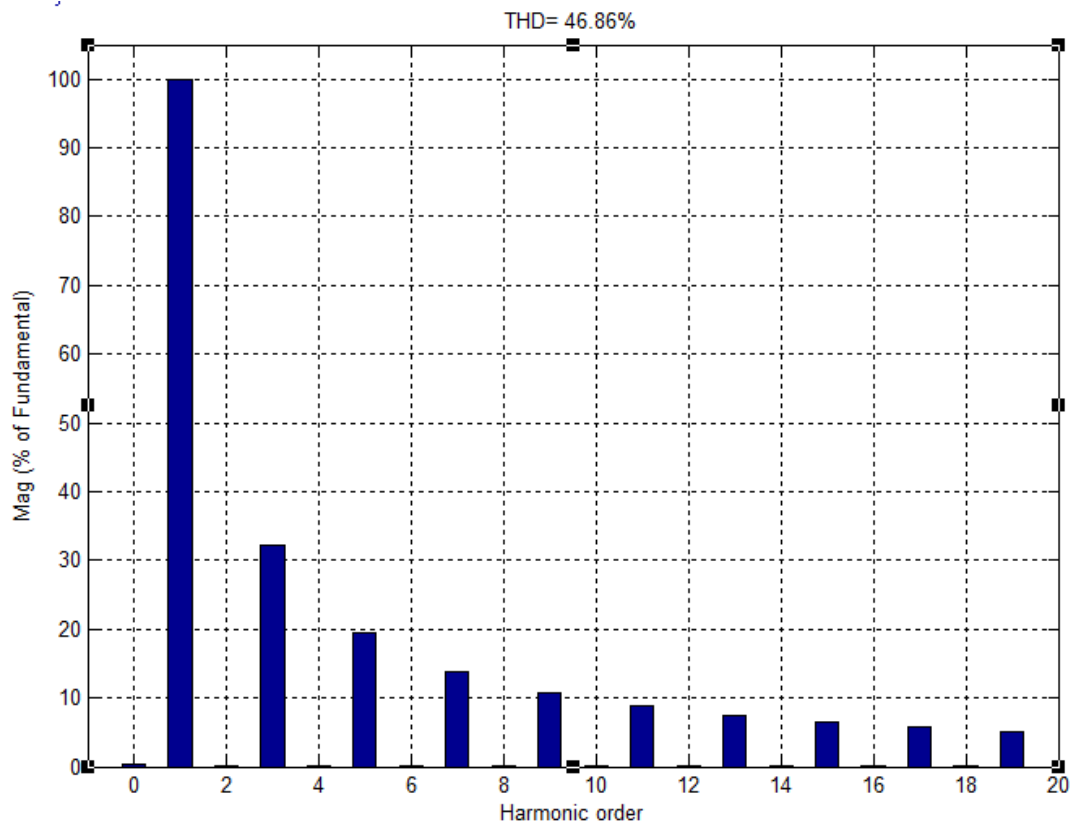
Για συνεχή αγωγή ρεύματος εξόδου  $I_{dc}$ , η ενεργός τιμή του ρεύματος εισόδου είναι:

$$I_{in} = I_{dc} \quad (2.2)$$

Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος εξόδου έχει ενεργό τιμή :

$$I_{in,1} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_{dc} \quad (2.3)$$

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η αρμονική ανάλυση Fourier καθώς και ο συντελεστής συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD%) του ρεύματος εισόδου.



Σχήμα 2.3 Αρμονική ανάλυση ρεύματος εισόδου μονοφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης

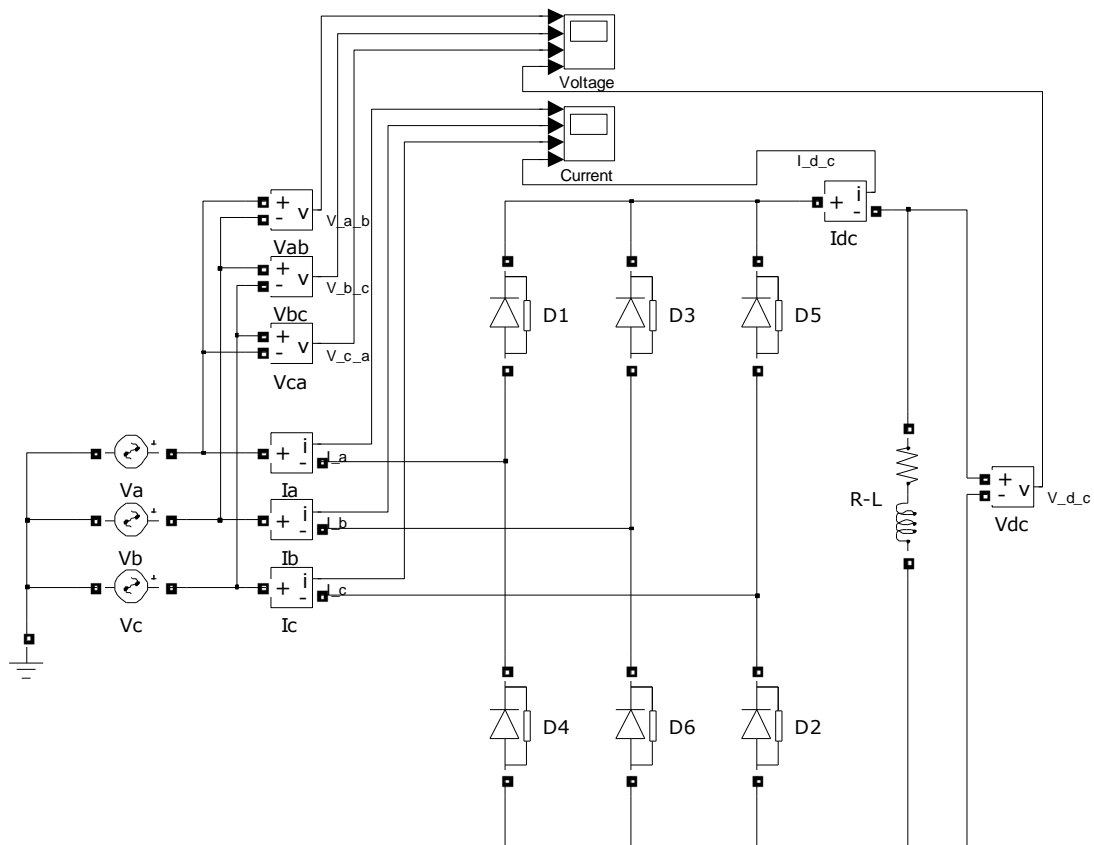
### 2.1.2 Τριφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση

Σε εφαρμογές στις οποίες είναι απαραίτητη η δυνατότητα διαχείρισης μεγάλης ισχύος και η εμφάνιση όσο το δυνατόν μικρότερης κυμάτωσης στην έξοδο, χρησιμοποιούνται τριφασικές ανορθωτικές διατάξεις αντί των μονοφασικών ανορθωτικών διατάξεων. Σαν είσοδο υπάρχουν τρεις πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίες τροφοδοτούν το κύκλωμα και έχουμε τον σχηματισμό δυο ομάδων που αποτελούνται από τρεις διόδους η κάθε ομάδα. Κατά την λειτουργία το ρεύμα  $I_{dc}$

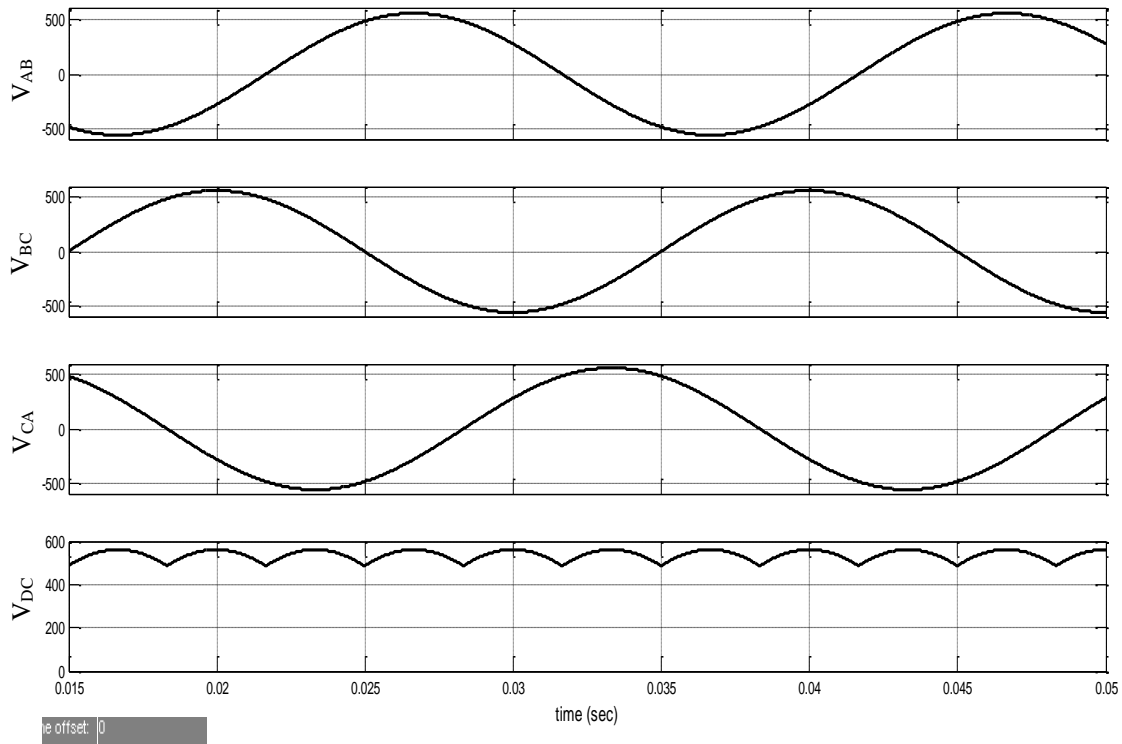


ρέει μέσω μιας διόδου της πρώτης ομάδας και μέσω μιας διόδου της δεύτερης ομάδας. Στην «άνω» ομάδα θα άγει η διόδος που έχει την άνοδο της στο υψηλότερο δυναμικό ενώ οι άλλες δυο πολώνονται ανάστροφα. Στην «κάτω» ομάδα θα άγει η διόδος που έχει την κάθοδο της στο χαμηλότερο δυναμικό, ενώ οι άλλες δυο πολώνονται ανάστροφα.

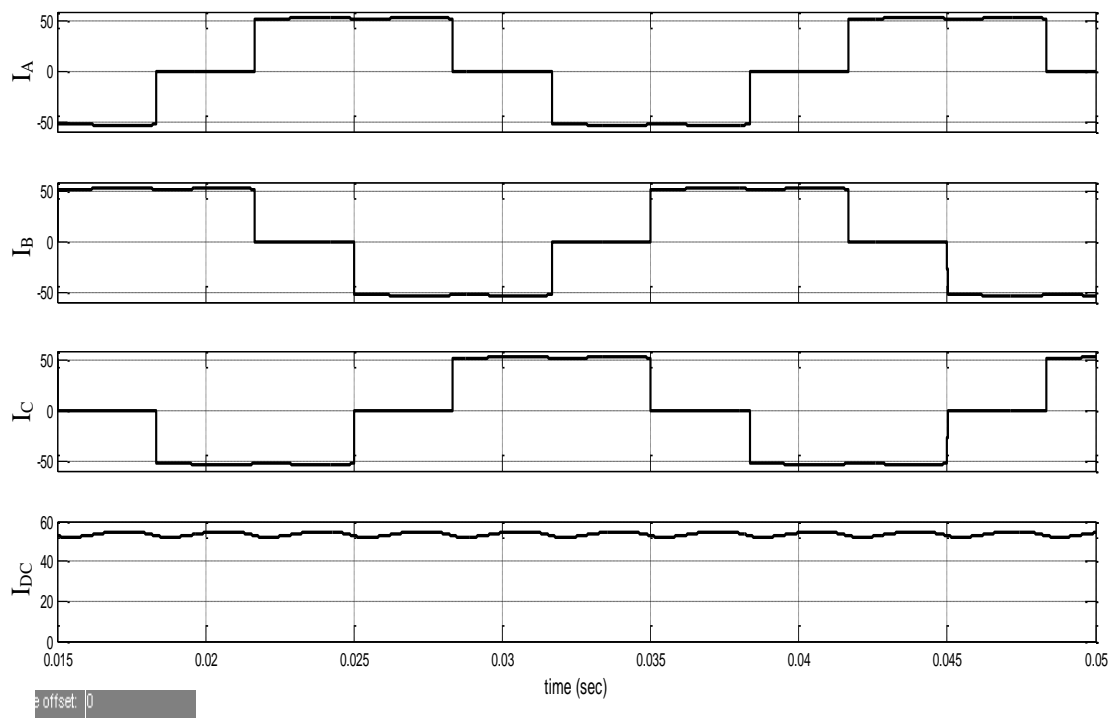
Ενδεικτικά η τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα που απεικονίζεται στο σχήμα 2.4, προσομοιώθηκε στο MATLAB SIMULINK για ωμικό – επαγωγικό φορτίο (R-L). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δηλαδή οι κυματομορφές ρευμάτων-τάσεων και η ανάλυση Fourier απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα (από 2.5 έως 2.7).



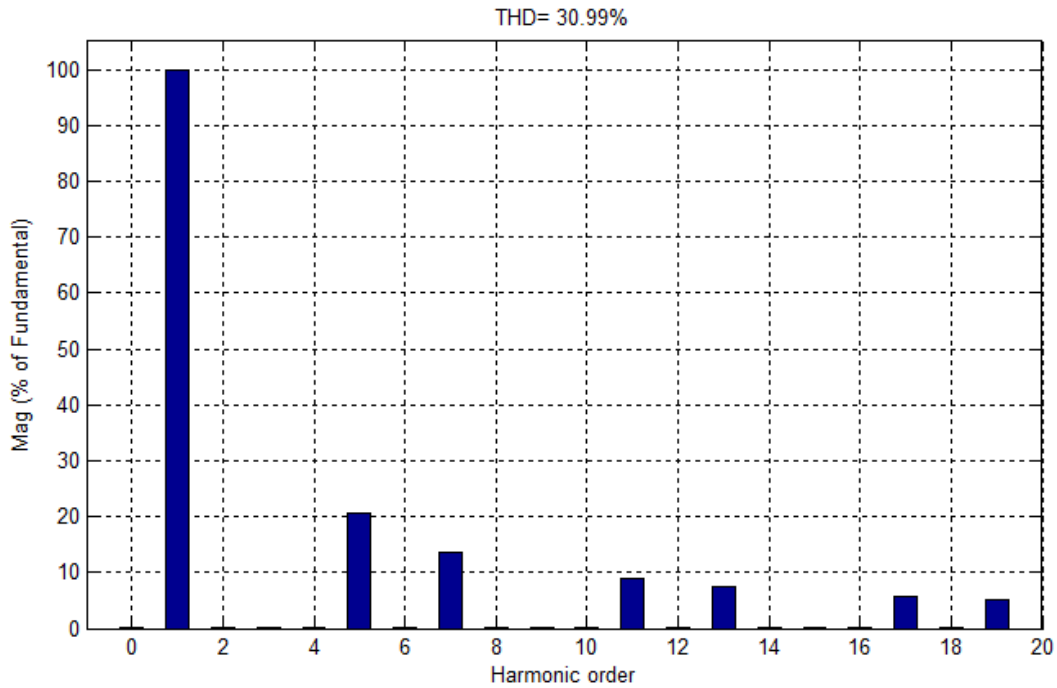
Σχήμα 2.4 Τριφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση



Σχήμα 2.5 Κυματομορφές τάσεων τριφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης



Σχήμα 2.6 Κυματομορφές ρευμάτων τριφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης



**Σχήμα 2.7** Αρμονική ανάλυση ρεύματος εισόδου τριφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης

Οι σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της τριφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης παρουσιάζονται παρακάτω 2.5 έως 2.8. [3]

Η μέση τιμή της τάσεως εξόδου της ανόρθωσης δίνεται από τη σχέση (2.5)

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_{ab} \quad (2.5)$$

Για συνεχή αγωγή ρεύματος εξόδου  $I_{dc}$ , η ενεργός τιμή του ρεύματος εισόδου είναι:

$$I_{in} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dc} \quad (2.6)$$

Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος εξόδου έχει ενεργό τιμή :

$$I_{in,1} = \frac{1}{\pi} \sqrt{6} I_{dc} \quad (2.7)$$

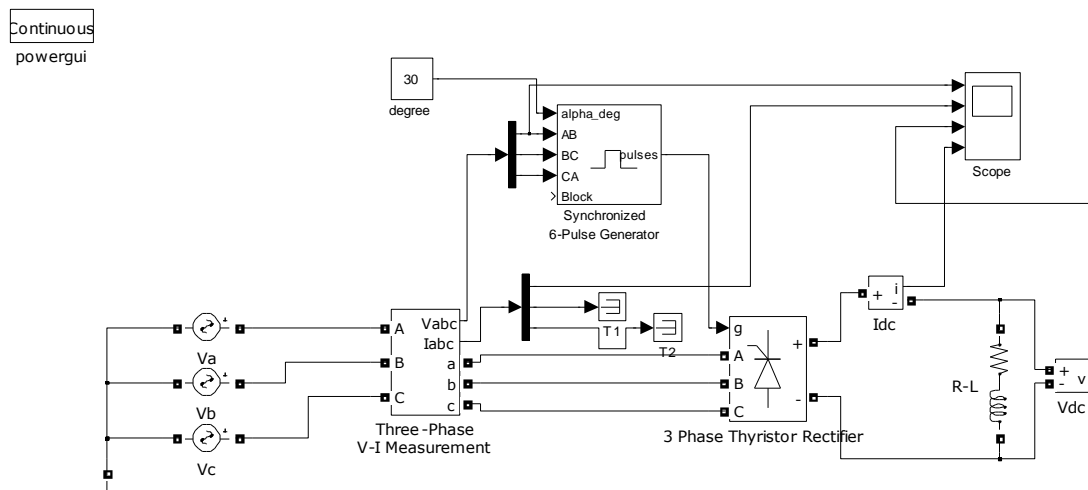




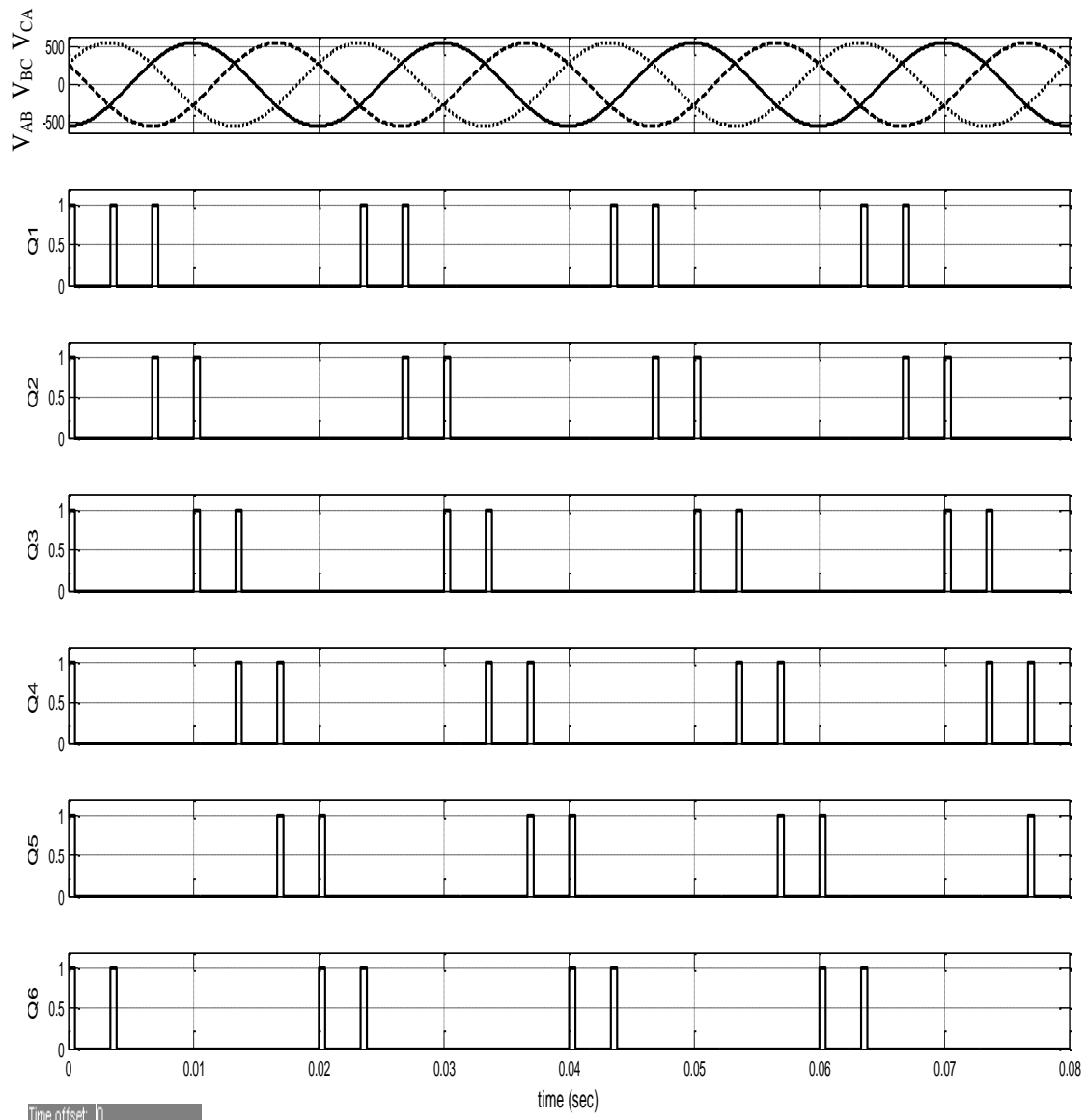
### 2.1.3 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανόρθωση

Η τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανόρθωση δε διαφέρει στη τοπολογία από την αντίστοιχη μη ελεγχόμενη. Ειδοποιός διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι, τώρα μπορεί να ελεγχθεί η μέση τιμή της τάσεως εξόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με την γωνία έναυσης των θυρίστορ. Πρέπει να σημειωθεί ότι για γωνία έναυσης έως  $90^\circ$  η μέση τιμή της τάσεως εξόδου είναι θετική και από εκεί και ύστερα αρνητική, με δεδομένη συνεχή αγωγή.

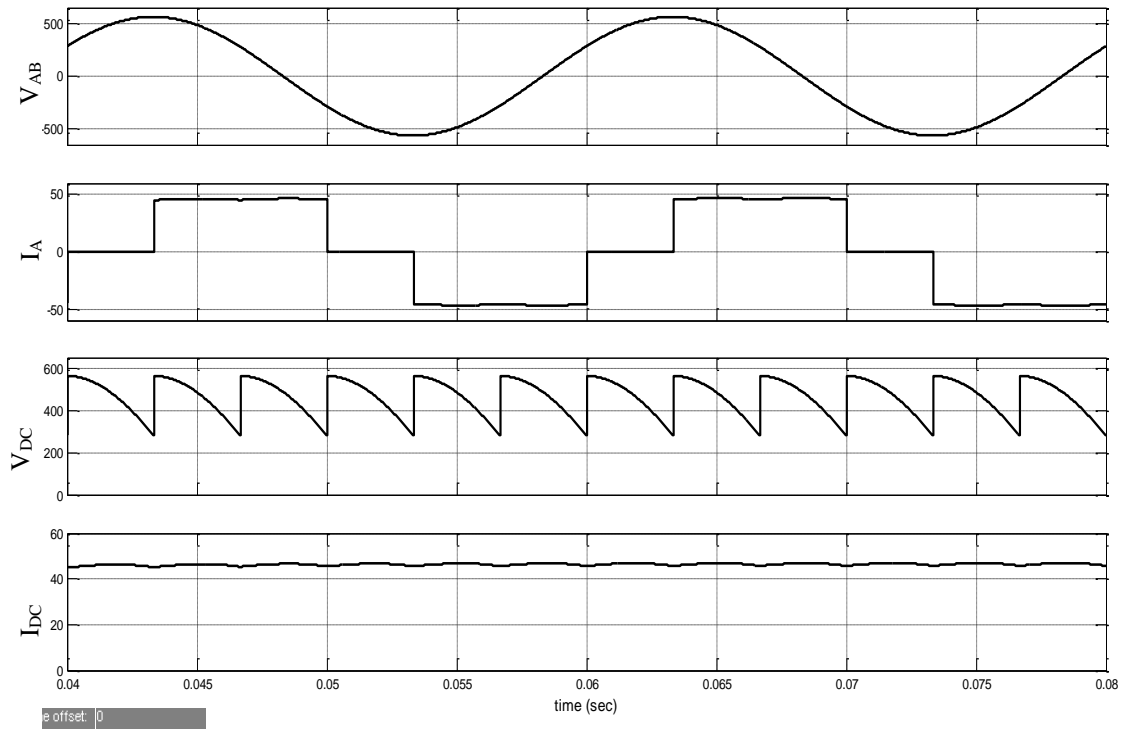
Ενδεικτικά η τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα που απεικονίζεται στο σχήμα 2.8 προσομοιώθηκε στο MATLAB SIMULINK για ωμικό – επαγωγικό φορτίο (R-L). Οι κυματομορφές ρευμάτων-τάσεων και οι παλμοί έναυσης, που είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, απεικονίζονται στα σχήματα (από 2.9 έως 2.12).



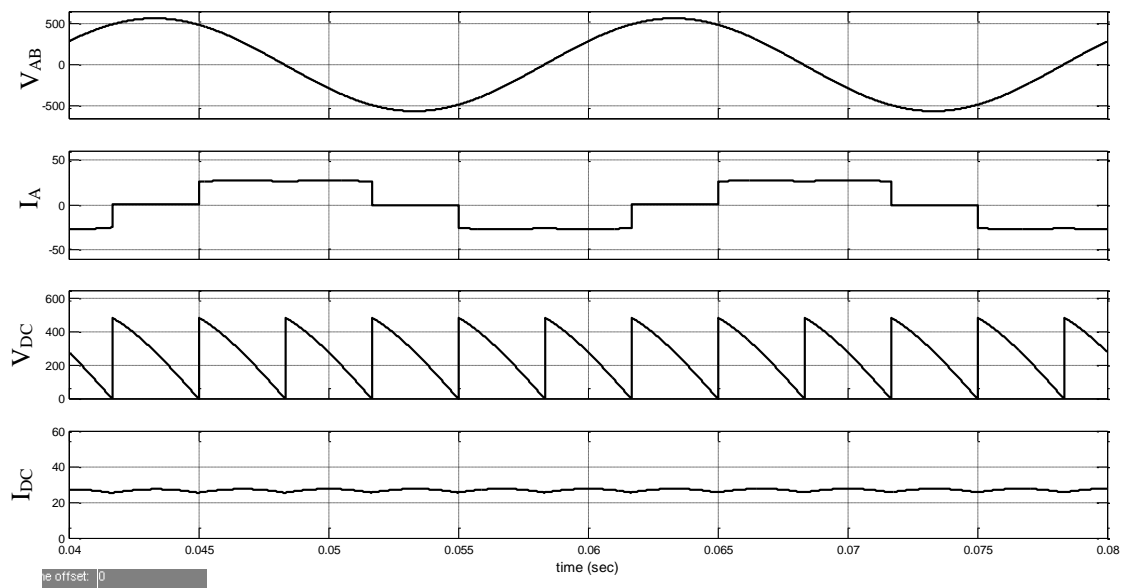
Σχήμα 2.8 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανόρθωση



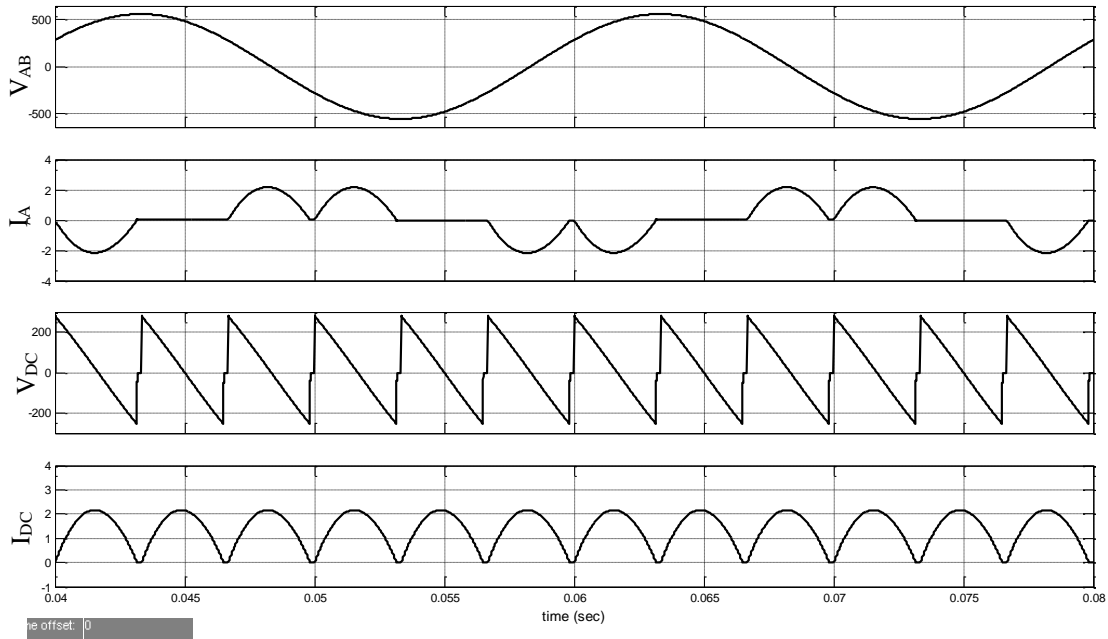
**Σχήμα 2.9** Κυματομορφές παλμών έναυσης τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης ανόρθωσης για γωνία έναυσης  $30^\circ$



Σχήμα 2.10 Κυματομορφές τάσεων - ρευμάτων τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης ανόρθωσης για γωνία έναυσης  $30^\circ$



Σχήμα 2.11 Κυματομορφές τάσεων - ρευμάτων τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης ανόρθωσης για γωνία έναυσης  $60^\circ$



**Σχήμα 2.12** Κυματομορφές τάσεων - ρευμάτων τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης ανόρθωσης για γωνία έναυσης  $90^\circ$

Οι σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης ανόρθωσης παρουσιάζονται παρακάτω 2.9 έως 2.12 [3]

Η μέση τιμή της τάσεως εξόδου της ανόρθωσης δίνεται από τη σχέση (2.9)

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_{ab} \cos \alpha \quad (2.9)$$

Για συνεχή αγωγή ρεύματος εξόδου  $I_{dc}$ , η ενεργός τιμή του ρεύματος εισόδου είναι:

$$I_{in} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dc} \quad (2.10)$$

Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος εξόδου έχει ενεργό τιμή :

$$I_{in,1} = \frac{1}{\pi} \sqrt{6} I_{dc} \quad (2.11)$$



## 2.2 Μετατροπείας Ισχύος DC/AC

### 2.2.1 Εισαγωγή στον μετατροπέα ισχύος DC/AC

Το πρόβλημα της δημιουργίας μίας πηγής εναλλασσόμενης τάσης με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος προέκυψε πριν από πολλές δεκαετίες. Λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η μετατροπή μίας συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη, μονοφασική ή τριφασική, με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, των λεγόμενων αντιστροφών (inverters). Η παραγόμενη αυτή εναλλασσόμενη τάση μπορεί να έχει οποιοδήποτε πλάτος και οποιαδήποτε συχνότητα με την χρήση κατάλληλων διακοπών και κυκλωμάτων ελέγχου. Οι σύγχρονοι αντιστροφείς δεν έχουν κινούμενα μέρη και χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών όπως οι εξής:

- Συστήματα αδιάκοπης παροχής ισχύος (UPS).
- Συστήματα ελέγχου στροφών ή ροπής ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Συστήματα επαγωγικής θέρμανσης (π.χ. επαγωγικών εστιών).
- Συστήματα μετατροπής και ελέγχου της τάσης εξόδου αιολικών γεννητριών.
- Συστήματα μετατροπής και ελέγχου της τάσης εξόδου φωτοβολταϊκών γεννητριών.
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι αντιστροφείς μπορούν να καταταχθούν σε δύο κυρίως κατηγορίες:

- i. Στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας (με δύο ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία) ή σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (με τέσσερα ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία) η οποία αναλύεται παρακάτω.
- ii. Στους τριφασικούς αντιστροφείς (με έξι ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία)



Επίσης κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες μπορεί να υποδιαιρεθεί στις εξής δύο κατηγορίες:

- i. Στους αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης (Αντιστροφείς Τάσης - Voltage Source Inverters) και οι οποίοι αναλύονται στο παρόν κεφάλαιο.
- ii. Στους αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος (Αντιστροφείς Ρεύματος - Current Source Inverters).[1]

Η συνεχής τάση που τροφοδοτεί έναν αντιστροφέα μπορεί να προέρχεται από ένα συσσωρευτή, μία DC πηγή, ή μία ανορθωτική διάταξη. Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές παρέχεται από ένα ανορθωτικό σύστημα, που αποτελείται είτε από διόδους είτε από θυρίστορ. Η ανορθωμένη τάση σταθεροποιείται με τη βοήθεια ηλεκτρολυτικών πυκνωτών μεγάλης χωρητικότητας, οι οποίοι συνδέονται στους ακροδέκτες εισόδου του αντιστροφέα. Ως ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία των οποίων ελέγχεται μόνο η έναυση (π.χ. θυρίστορ) ή στοιχεία των οποίων ελέγχεται τόσο η έναυση όσο και η σβέση (π.χ. διάφορα τρανζίστορ όπως BJT, MD, MOSFET, IGBT, GTO θυρίστορ ή MCT). Η συχνότητα στην έξοδο του αντιστροφέα καθορίζεται από το ρυθμό έναυσης και σβέσης των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων και επομένως παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης αυτής μέσω του κυκλώματος παλμοδότησης. Η διακοπτική λειτουργία του αντιστροφέα όμως έχει, συνήθως, ως αποτέλεσμα μη ημιτονοειδείς κυματομορφές τάσης και ρεύματος στην έξοδό του. Το φιλτράρισμα των ανώτερων αρμονικών στην έξοδο του αντιστροφέα δεν είναι εύκολο, ειδικά στην περίπτωση κατά την οποία η συχνότητα των ανωτέρων αρμονικών μεταβάλλεται και βρίσκεται κοντά στη συχνότητα της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βάρους, του όγκου, του κόστους του αντιστροφέα και πλήθος άλλων προβλημάτων (υποαρμονικές κ.α.).

Για τους παραπάνω αντιστροφείς υπάρχουν πολλοί τρόποι ελέγχου. Στην παρούσα εργασία ωστόσο παρουσιάζεται μόνο η τεχνική ελέγχου ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation - **SPWM**).



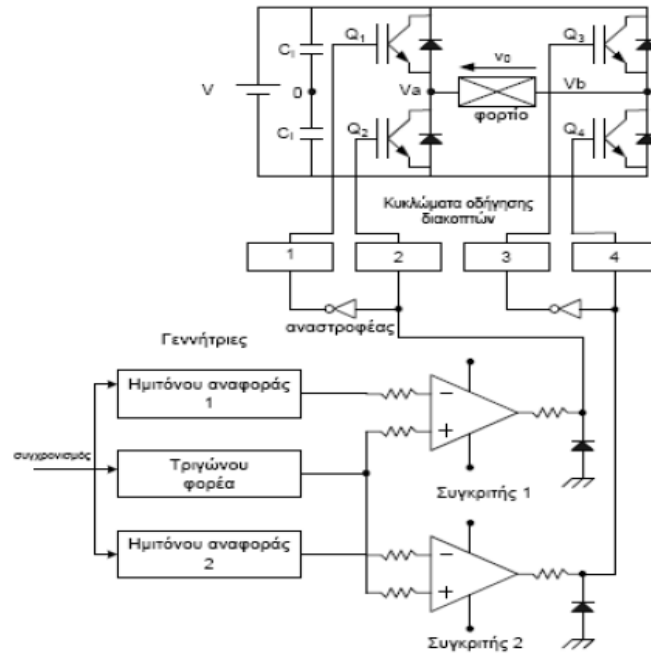
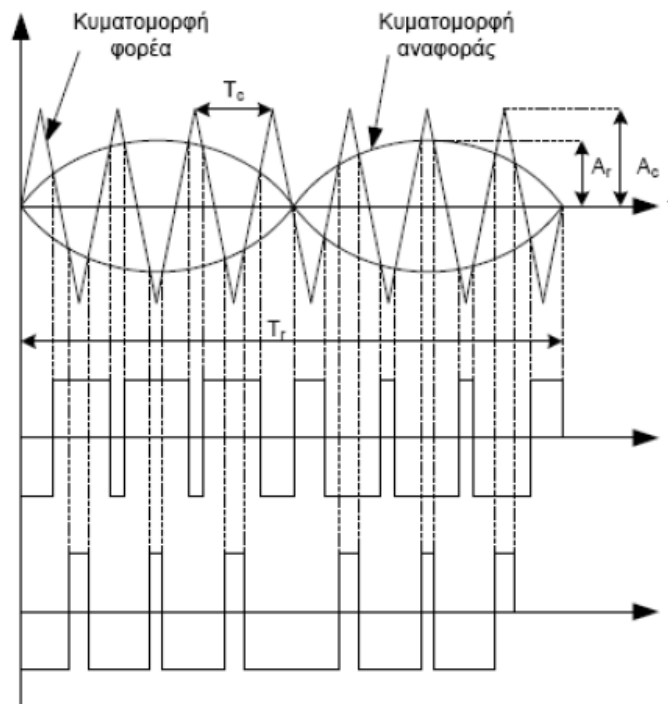
### 2.2.2 Αντιστροφείς με μισή και πλήρη γέφυρα (μονοφασικοί)

Στον αντιστροφέα μισής γέφυρας το σημείο σύνδεσης των δύο πηγών (γη) βρίσκεται στο μισό δυναμικό, έτσι το σημείο αυτό παραμένει ουσιαστικά σταθερό. Όταν ο πάνω διακόπτης είναι κλειστός, άγει είτε ο πάνω διακόπτης είτε η πάνω δίοδος, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος εξόδου και το ρεύμα εξόδου μοιράζεται εξίσου μεταξύ των δύο πηγών στην είσοδο του αντιστροφέα. Παρομοίως, ισχύει όταν ο κάτω διακόπτης είναι κλειστός. [1]

Ο αντιστροφέας πλήρης γέφυρας αποτελείται από δύο αντιστροφείς μισής γέφυρας και προτιμάται από τον προηγούμενο αντιστροφέα σε διατάξεις υψηλότερης ισχύος. Η λογική λειτουργίας αυτού του αντιστροφέα είναι ίδια με τον προηγούμενο, μόνο που τώρα οι διακόπτες άγουν ανά ζευγάρια, δηλαδή ο πάνω αριστερά με τον κάτω δεξιά κ.ο.κ..

Πριν προχωρήσουμε παρακάτω, θα γίνει αναφορά στην τεχνική ελέγχου SPWM.

Σε ένα μονοφασικό αντιστροφέα οι παλμοί έναυσης παράγονται από δύο συγκριτές σήματος (π.χ. τελεστικοί ενισχυτές). Στην αρνητική είσοδο των συγκριτών εφαρμόζουμε ένα σήμα ημιτόνου με την επιθυμητή συχνότητα εξόδου του αντιστροφέα και με διαφορά φάσης  $180^\circ$  αντίστοιχα. Στην θετική είσοδο των δύο συγκριτών εφαρμόζουμε ένα κοινό σήμα τριγωνικού φορέα και συχνότητα αρκετά μεγάλη (όσο επιτρέπουν οι ημιαγωγοί) ώστε να έχουμε αρκετά καλή δειγματοληψία του ημιτόνου αναφοράς. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε τους παλμούς έναυσης όπως το παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 2.13 Δημιουργία παλμών SPWM<sup>[8]</sup>

Σχήμα 2.14 Παλμοί SPWM [1]

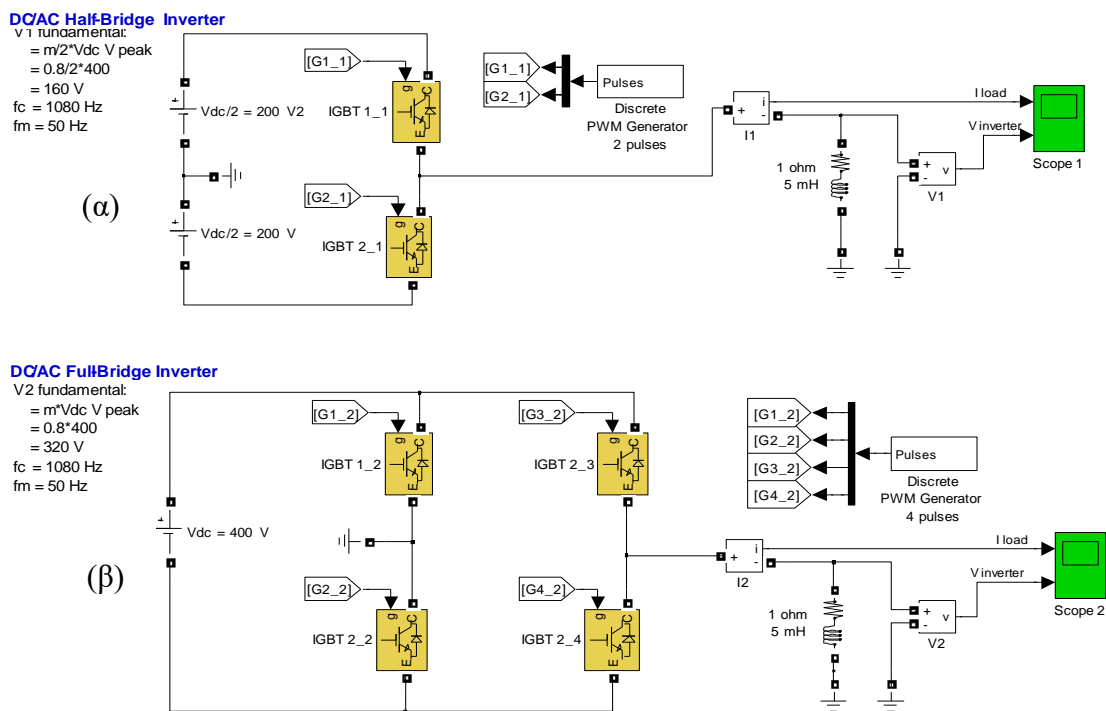
Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι δύο αντιστροφείς που αναφέρθηκαν καθώς και οι κυματομορφές τους για ωμικό-επαγωγικό φορτίο με την τεχνική ελέγχου SPWM. Ενδεικτικά ο μονοφασικός αντιστροφείας τύπου ημιγέφυρας και μονοφασικής πλήρους γέφυρας που απεικονίζονται στο σχήμα 2.15 (α) και (β) προσομοιώθηκε στο

<sup>[8]</sup> Στέφανος Ν. Μανιάς, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Εκδόσεις Συμεών, Κεφάλαιο 6, σελ. 249 σχήμα 6.15 (α)

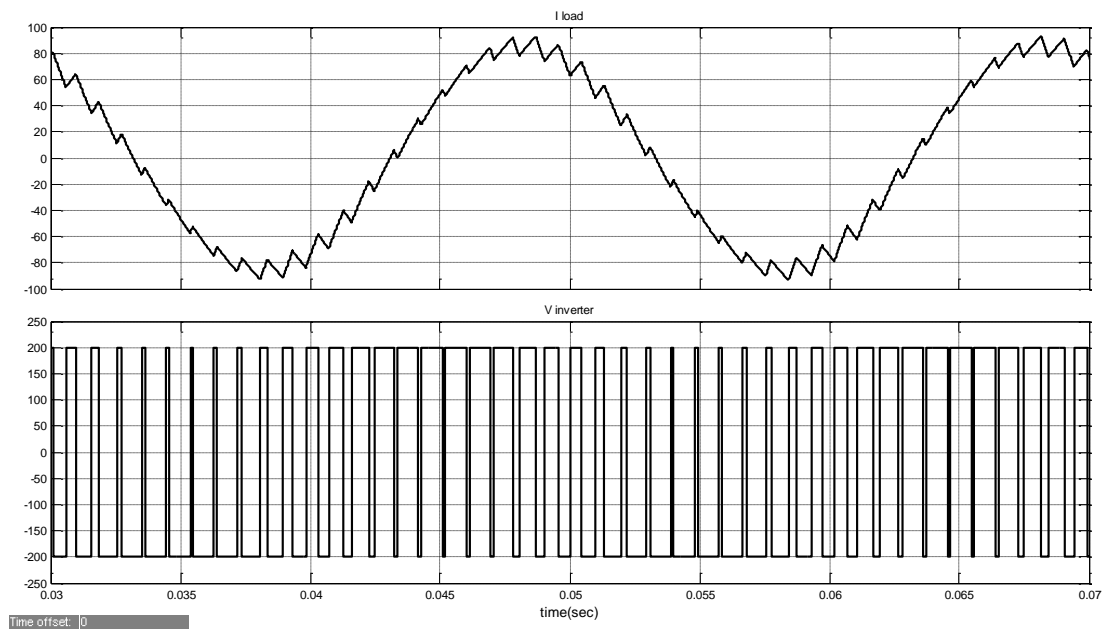




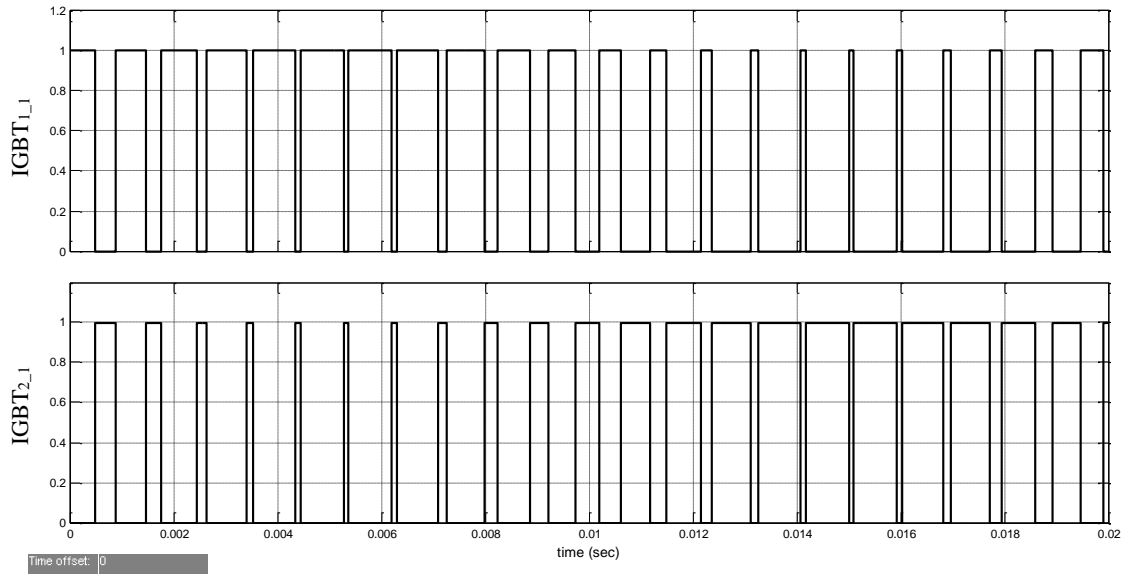
MATLAB SIMULINK για ωμικό - επαγωγικό φορτίο R-L. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στα σχήματα από 2.16 έως 2.23



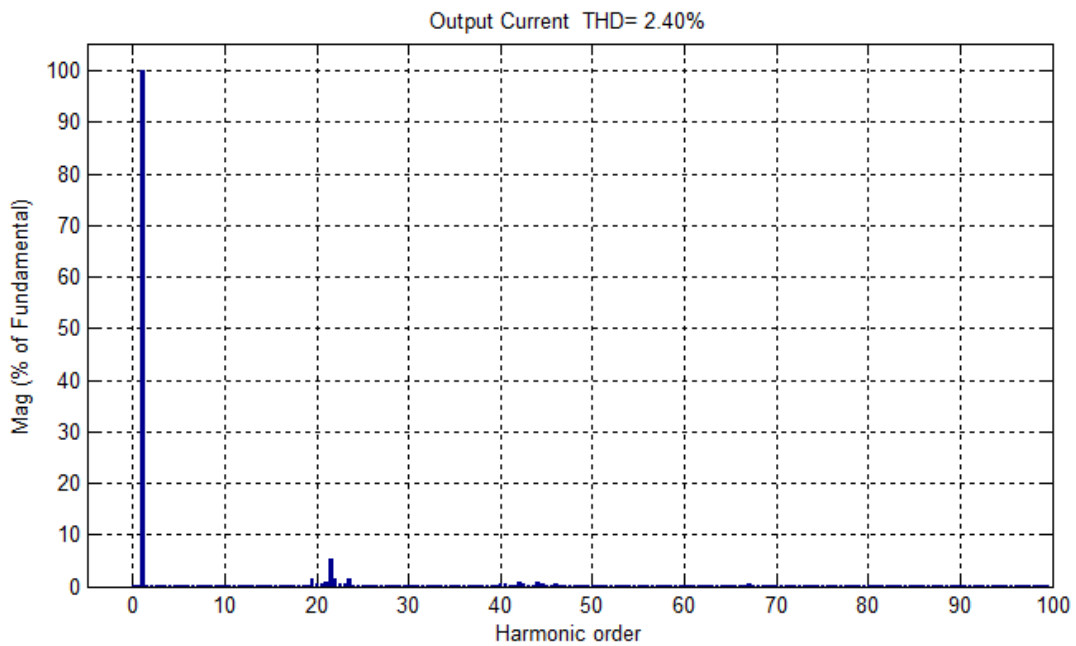
Σχήμα 2.15 (α) Αντιστροφείας Ημιγέφυρας και (β) Πλήρους Γέφυρας



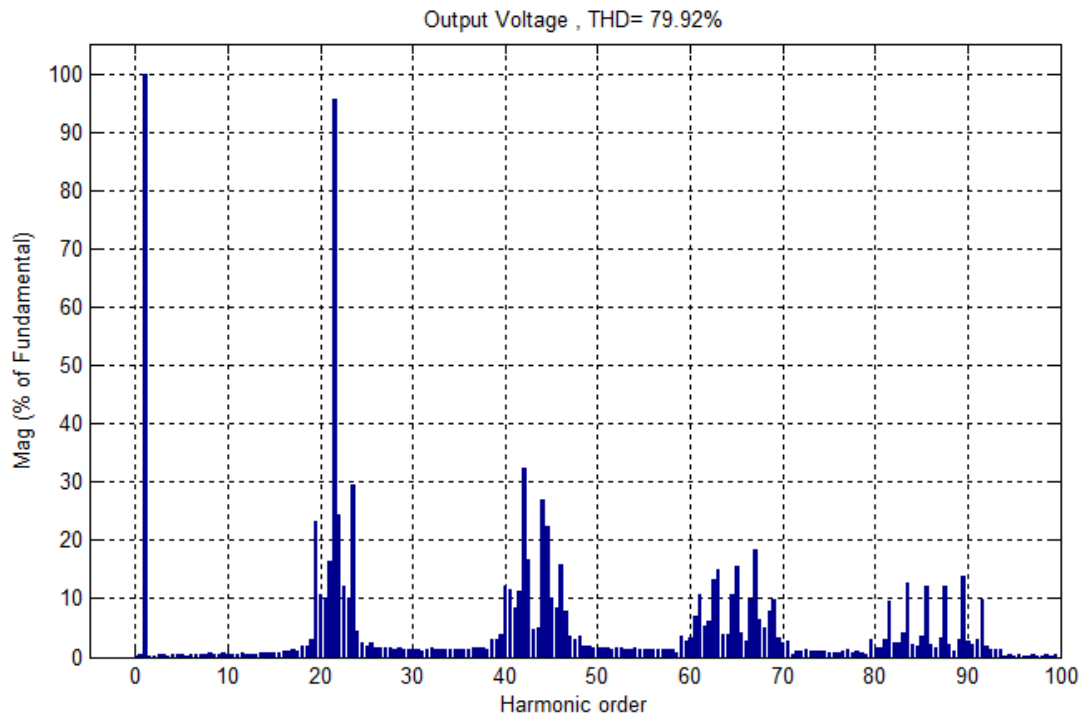
Σχήμα 2.16 Κυματομορφές τάσης – ρεύματος εξόδου του αντιστροφεία ημιγέφυρας



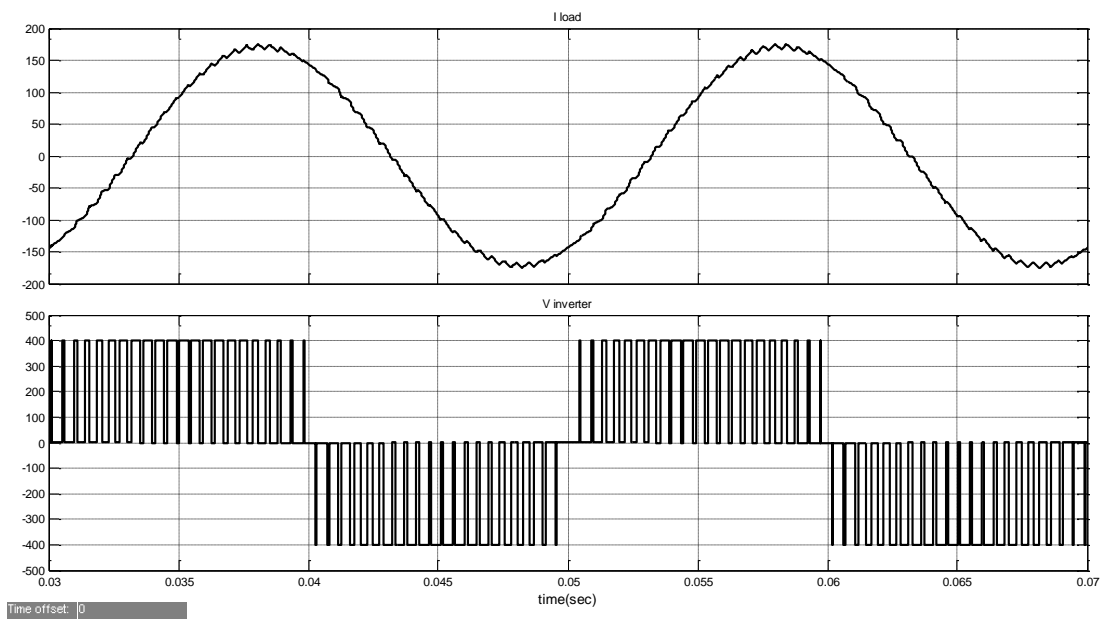
Σχήμα 2.17 Παλμοί έναυσης του αντιστροφέα ημιγέφυρας



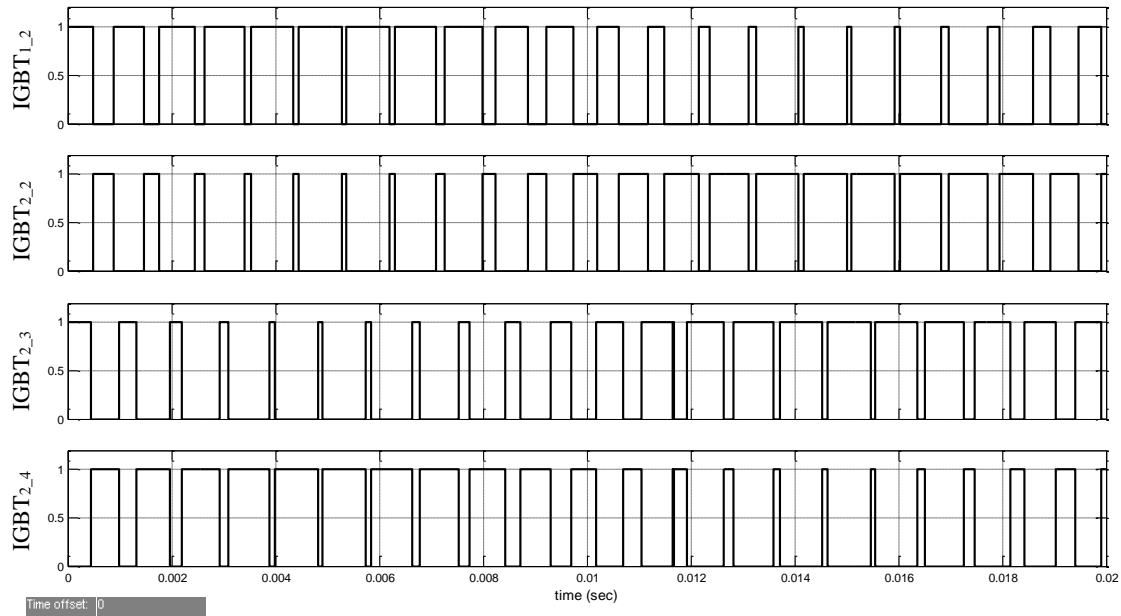
Σχήμα 2.18 Αρμονική ανάλυση ρεύματος εξόδου αντιστροφέα ημιγέφυρας



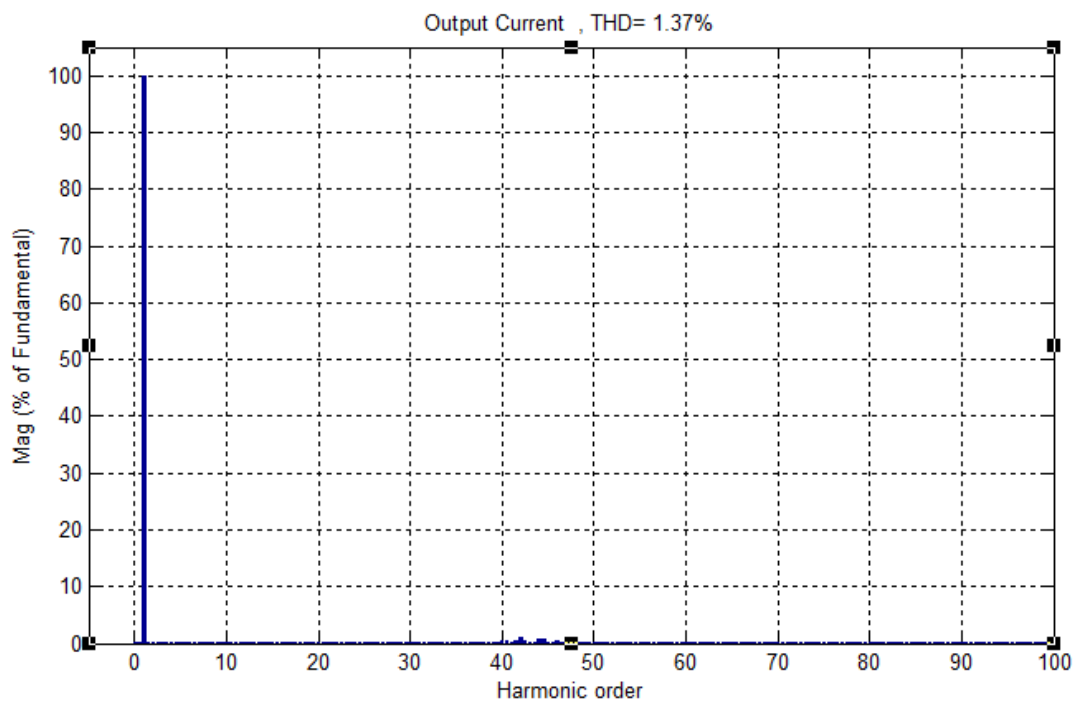
Σχήμα 2.19 Αρμονική ανάλυση τάσεως εξόδου αντιστροφέα ημιγέφυρας



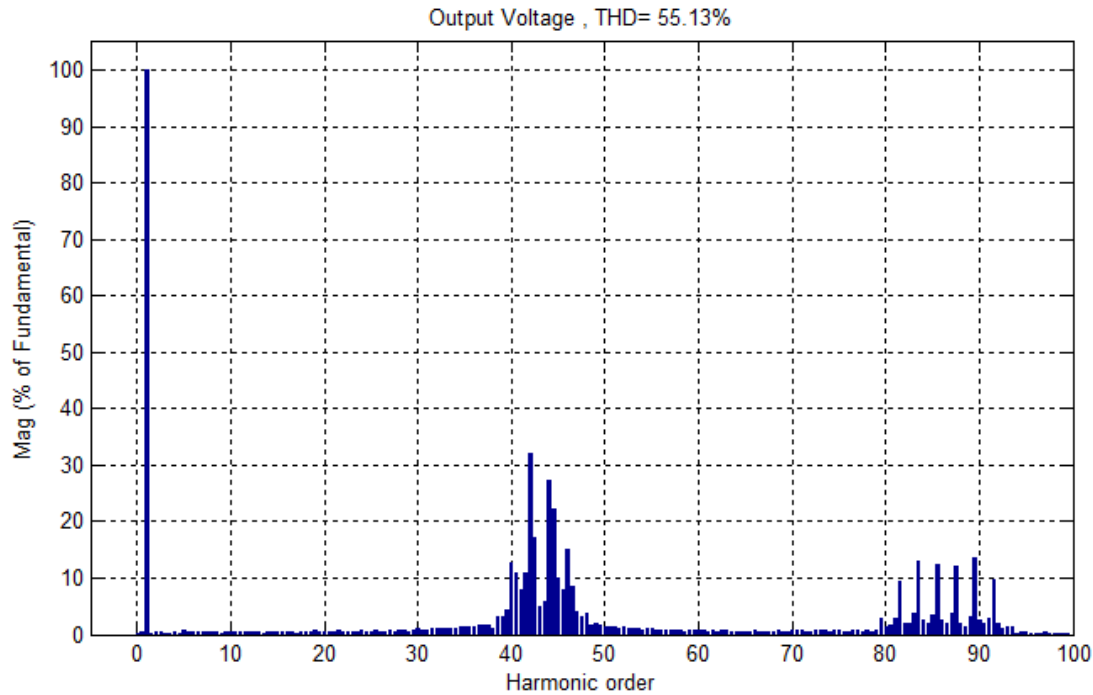
Σχήμα 2.20 Κυματομορφές τάσης – ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας



Σχήμα 2.21 Παλμοί έναυσης του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας



Σχήμα 2.22 Αρμονική ανάλυση ρεύματος εξόδου αντιστροφέα πλήρους γέφυρας



**Σχήμα 2.23** Αρμονική ανάλυση τάσεως εξόδου αντιστροφέα πλήρους γέφυρας

Οι σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του μονοφασικού αντιστροφέα παρουσιάζονται παρακάτω 2.13 έως 2.6. [3]

Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του μονοφασικού αντιστροφέα δίνεται από την σχέση (2.13).

$$\hat{V}_{0,1} = M_a V_{DC,in} \quad (2.13)$$

$$\text{Όπου } M_a = \frac{A_R}{A_C} \quad (2.14)$$

Όπου  $A_C$  και  $A_R$  είναι το πλάτος του σήματος του τριγωνικού φορέα και του ημιτόνου αναφοράς αντίστοιχα.

Η επικρατούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα είναι:

$$\hat{d}_{0,1} = 2F_{nc} - 1 \quad (2.15)$$

$$\text{Όπου } F_{nc} = \frac{F_c}{F_r} \quad (2.16)$$

Συμπερασματικά, για την πλήρη γέφυρα από τα σχήματα 2.22 και 2.23 και για την ημιγέφυρα από τα σχήματα 2.18 και 2.19, προκύπτει ότι: α) οι αρμονικές της πλήρους γέφυρας είναι μικρότερες από αυτές της ημιγέφυρας και β) το πλάτος της

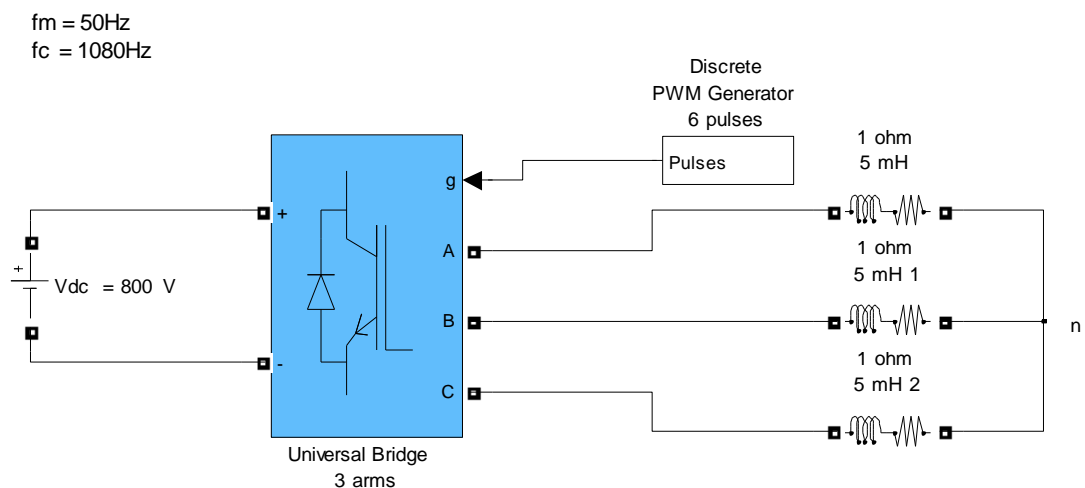


πλήρους γέφυρας είναι μεγαλύτερο από αυτό της ημιγέφυρας, με δεδομένη ίδια DC τιμή εισόδου. Η επιλογή βασίζεται σε τεχνοοικονομικά κριτήρια.

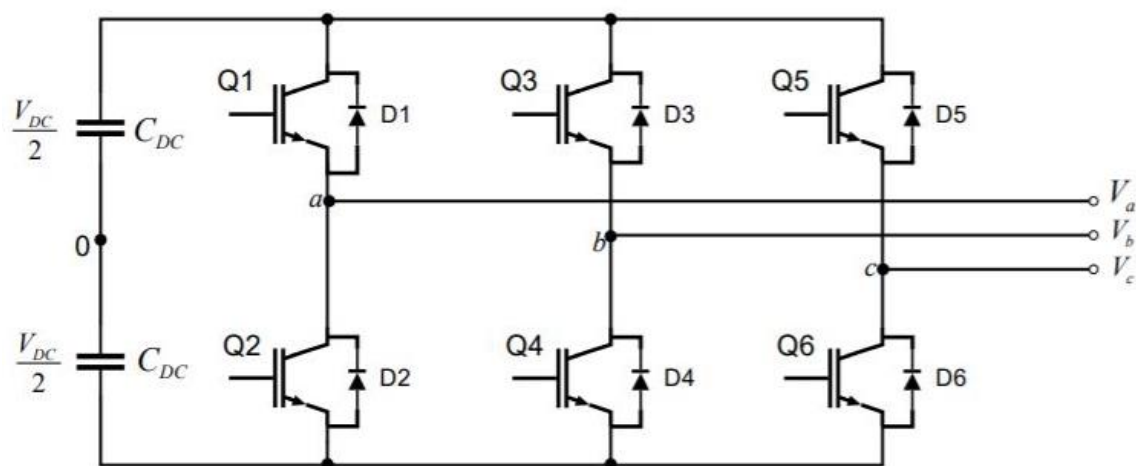
### 2.2.3 Τριφασικός αντιστροφέας

Ο τριφασικός αντιστροφέας αποτελείται από μία εξαπαλική γέφυρα. Στο παρακάτω σχήμα 2.24 για λόγους σχεδιαστικής ευκολίας απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα αυτού, ενώ στο σχήμα 2.25 απεικονίζεται η λεπτομερής σχεδίαση αυτού. Ο τριφασικός αντιστροφέας προσομοιώθηκε στο MATLAB SIMULINK. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στα σχήματα από 2.25 έως 2.31

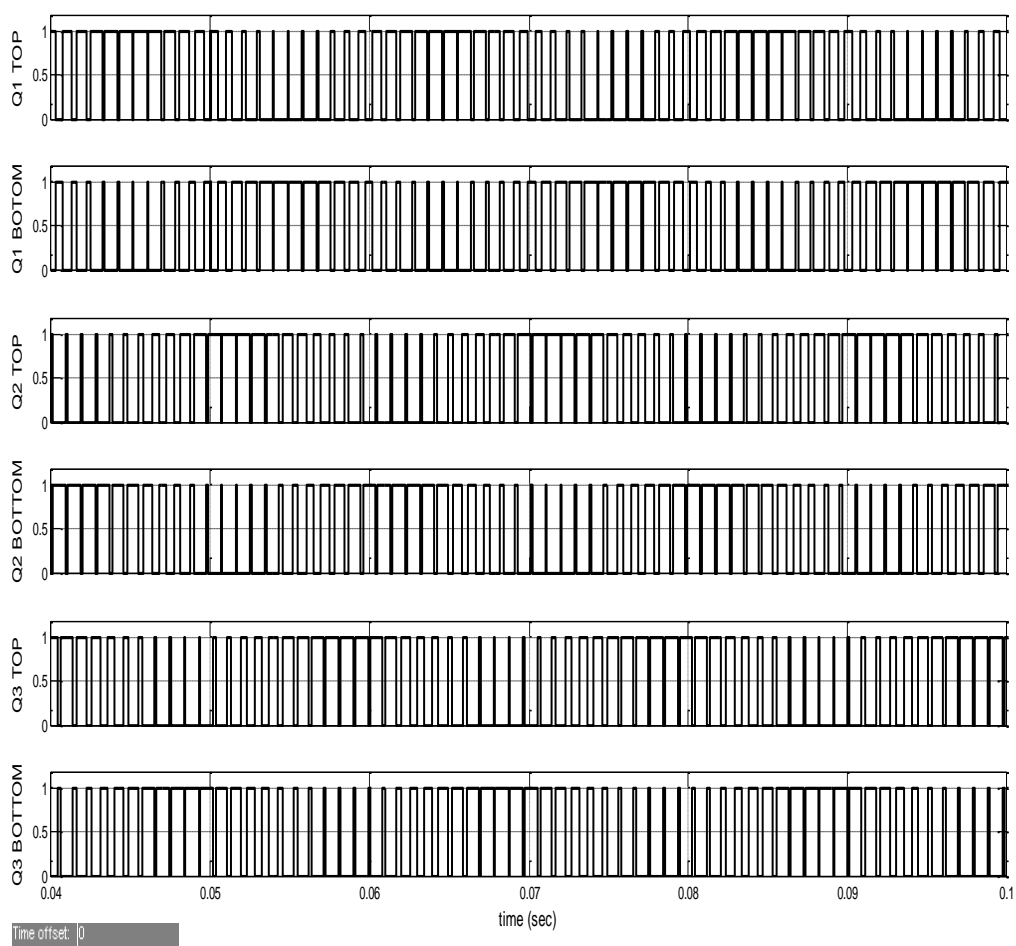
Η τεχνική ελέγχου SPWM είναι παρόμοια με του μονοφασικού αντιστροφέα με τη μόνη διαφορά ότι τα ημίτονα αναφοράς είναι τρία και διαφέρουν μεταξύ τους κατά  $120^\circ$ . Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυματομορφές του τριφασικού αντιστροφέα.



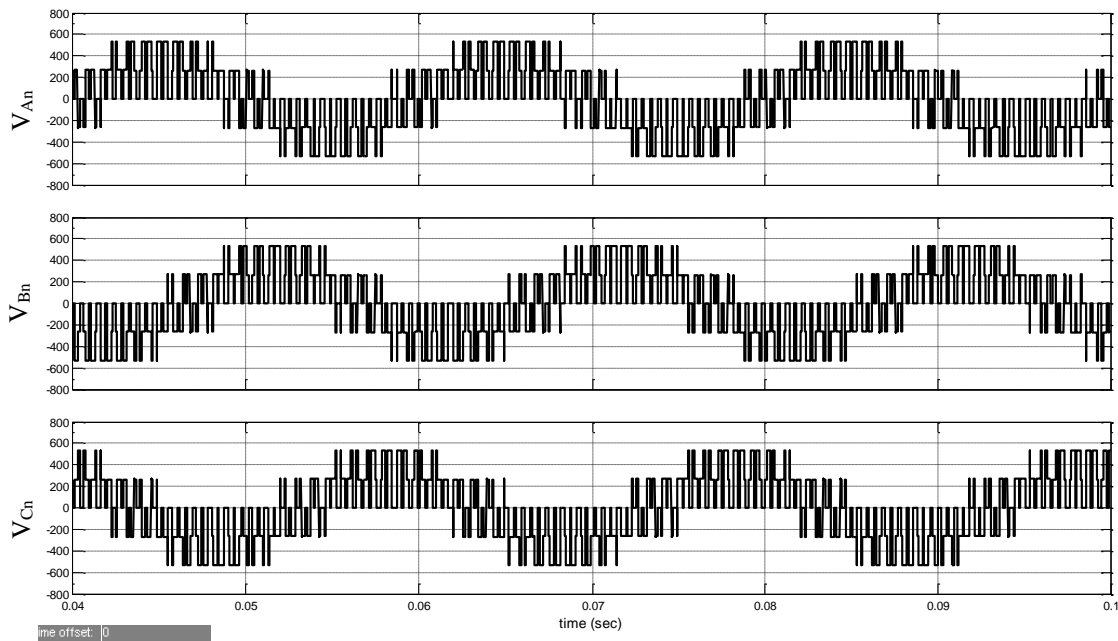
Σχήμα 2.24 Μπλοκ τριφασικού αντιστροφέα



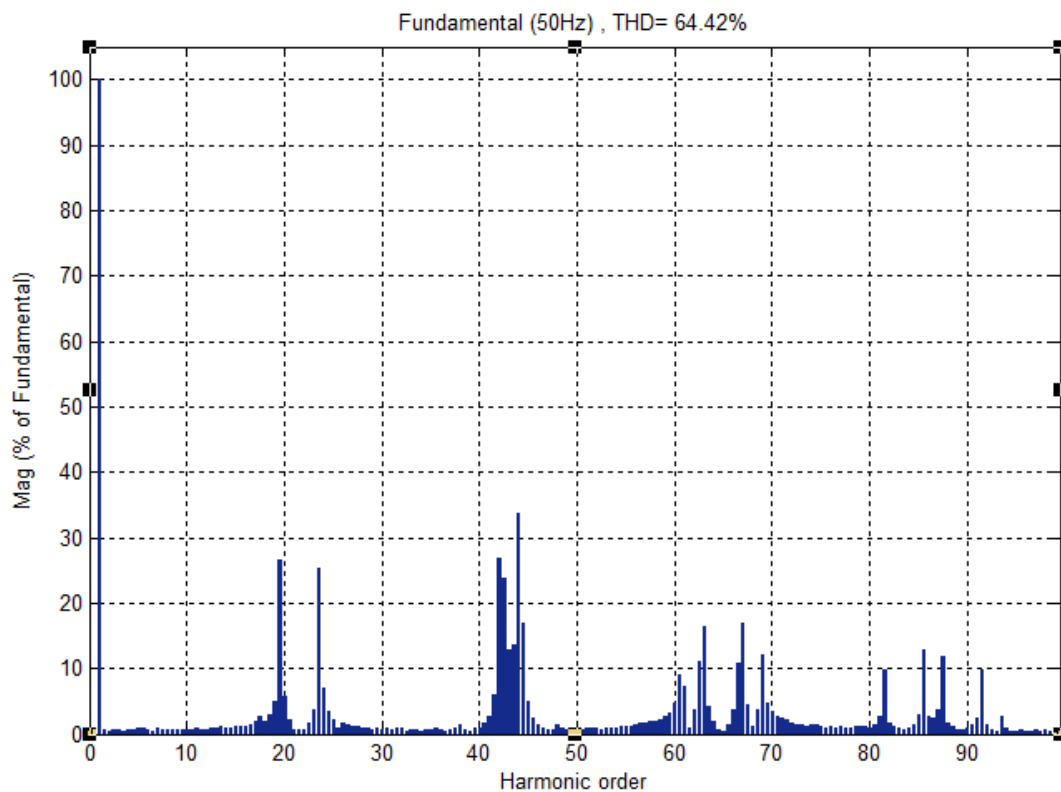
Σχήμα 2.25 Λεπτομερής σχεδίαση του τριφασικού αντιστροφέα



Σχήμα 2.26 Παλμοί έναυσης του τριφασικού αντιστροφέα

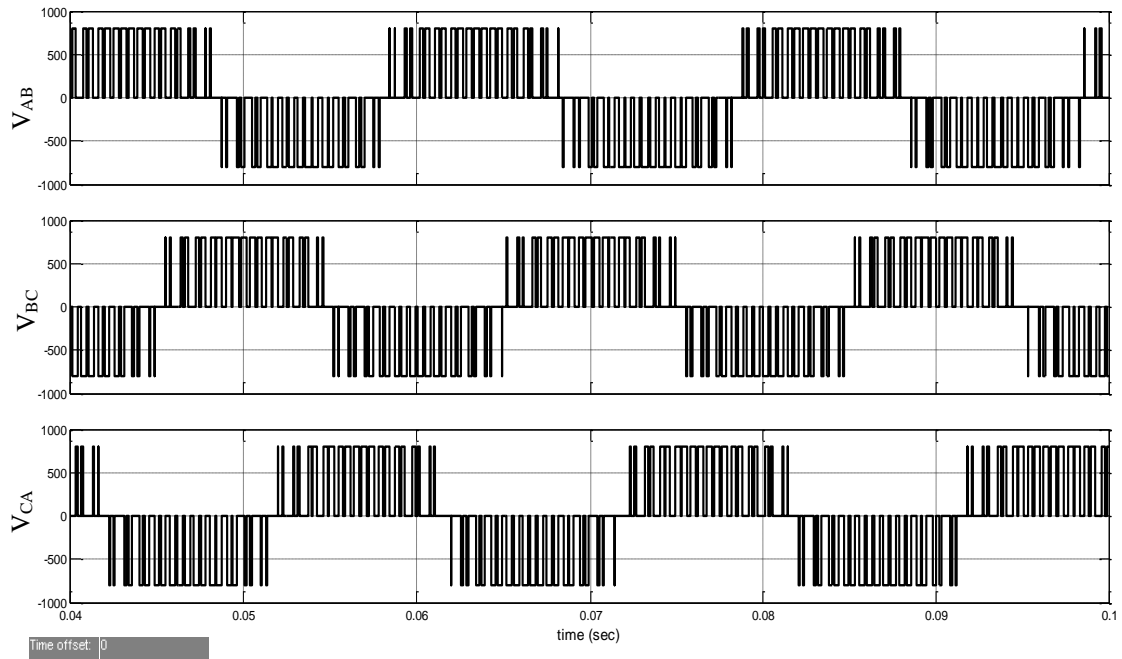


Σχήμα 2.27 Φασική τάση εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα

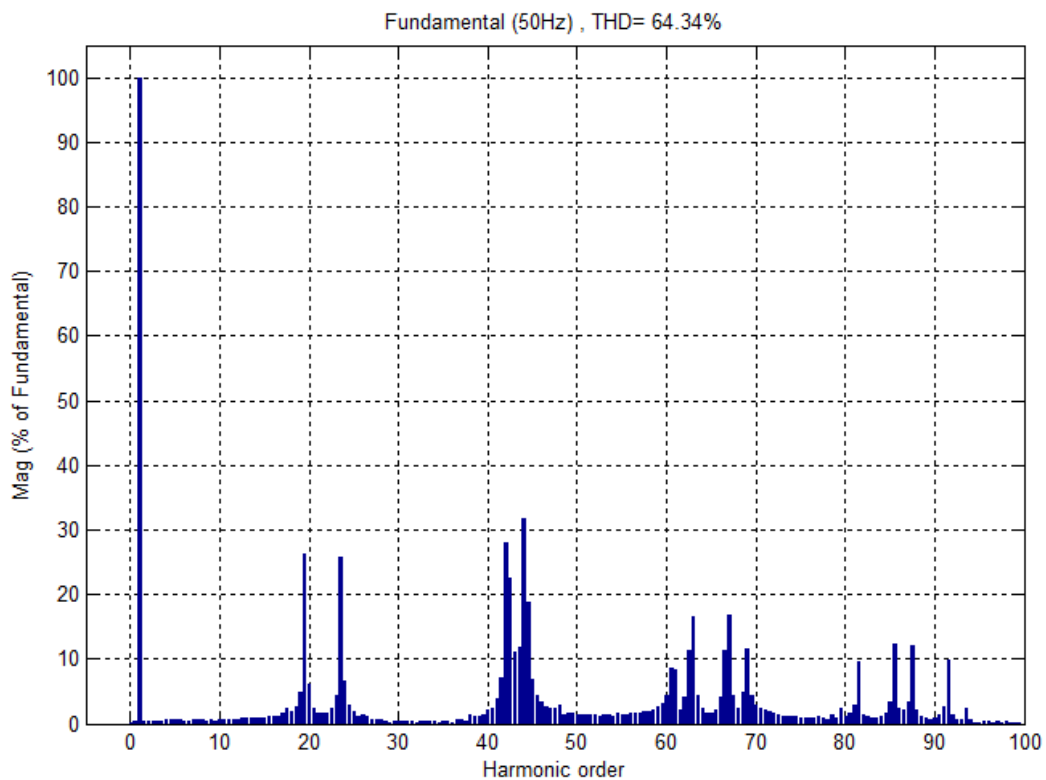


Σχήμα 2.28 Αρμονική ανάλυση φασικής τάσης εξόδου τριφασικού αντιστροφέα

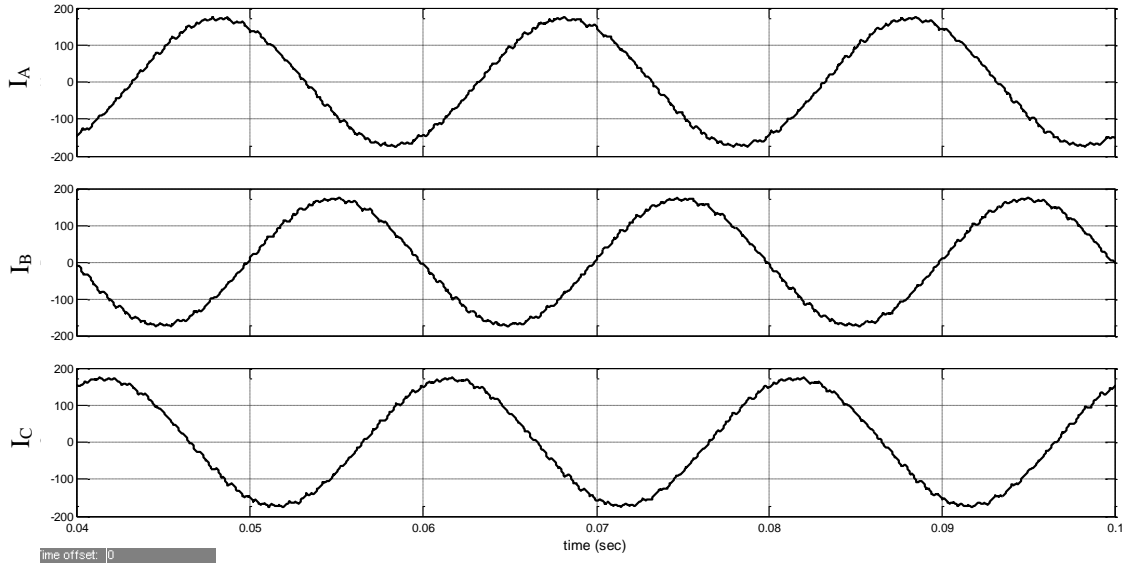




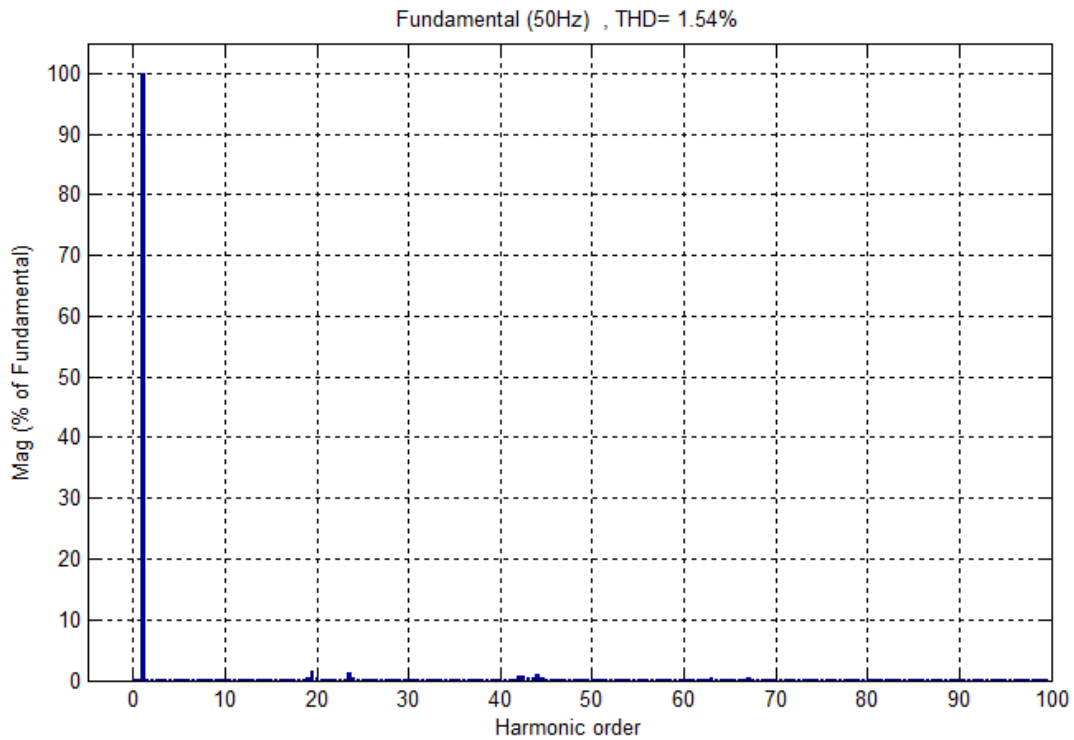
Σχήμα 2.29 Πολική τάση εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα



Σχήμα 2.30 Αρμονική ανάλυση πολικής τάσης εξόδου τριφασικού αντιστροφέα



Σχήμα 2.31 Ρεύματα εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα για ωμικό – επαγωγικό φορτίο



Σχήμα 2.32 Αρμονική ανάλυση ρευμάτων εξόδου τριφασικού αντιστροφέα για ωμικό – επαγωγικό φορτίο



Οι σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα παρουσιάζονται παρακάτω 2.17 έως 2.18. [3]

Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα δίνεται από την σχέση (2.17).

$$\hat{V}_{AB,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} M_a V_{DC,in} \quad (2.17)$$

Η επικρατούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα είναι:

$$\hat{d}_{0,1} = F_{nc} - 2 \quad (2.18)$$

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ο συντελεστής διαμόρφωσης  $M_a$  δεν πρέπει να ξεπερνά το 1. Σε περίπτωση που ξεπερνά το 1 τότε έχουμε υπερδιαμόρφωση και η τάση εξόδου του αντιστροφέα (μονοφασικού ή τριφασικού) δεν θα είναι γραμμική σε σχέση με τον συντελεστή διαμόρφωσης  $M_a$ . Ταυτόχρονα η επικρατούσα αρμονική συνιστώσα δεν θα είναι αυτή που αναφέρθηκε.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ

#### Εισαγωγή

Ο μικροελεγκτής είναι ένας τύπος επεξεργαστή, ουσιαστικά μια παραλλαγή μικροεπεξεργαστή, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα, λόγω των πολλών ενσωματωμένων υποσυστημάτων τα οποία διαθέτει (αναλογικές είσοδοι – έξοδοι, ψηφιακές είσοδοι – έξοδοι, PWM σήματα και πολλά από αυτά με ξεχωριστά ρολόγια χρονισμού). Αυτά τα υποσυστήματα τον καθιστούν επικρατέστερο του μικροεπεξεργαστή καθώς μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα χωρίς τη χρήση επιπλέον συστημάτων. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε όλα τα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems) ελέγχου χαμηλού και μεσαίου κόστους, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε αυτοματισμούς, ηλεκτρονικά καταναλωτικά προϊόντα (από ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές έως παιχνίδια), ηλεκτρικές συσκευές και κάθε είδους αυτοκινούμενα τροχοφόρα οχήματα. Με τη μείωση του μεγέθους, του κόστους, και της κατανάλωσης ισχύος έναντι ενός μικροεπεξεργαστή, οι μικροελεγκτές καθιστούν τον (ηλεκτρονικό) έλεγχο στις περισσότερες διαδικασίες, πιο οικονομικό.

Στους σύγχρονους μικροεπεξεργαστές για μη ενσωματωμένα συστήματα (π.χ. τους μικροεπεξεργαστές των προσωπικών υπολογιστών), έμφαση δίνεται στην υπολογιστική ισχύ. Η ευελιξία ανάπτυξης διαφορετικών εφαρμογών είναι μεγάλη, διότι η λειτουργικότητα του τελικού συστήματος καθορίζεται από τα εξωτερικά περιφερειακά, τα οποία διασυνδέονται με την κεντρική μονάδα (μικροεπεξεργαστή), η οποία δεν είναι εξειδικευμένη. Αντίθετα, στους μικροεπεξεργαστές για ενσωματωμένα συστήματα (μικροελεγκτές), οι οποίοι έχουν μικρότερες ή/και μηδαμινές δυνατότητες συνεργασίας με εξωτερικά περιφερειακά, αυτού του είδους, η ευελιξία είναι περιορισμένη, όπως και η υπολογιστική ισχύς τους. Οι μικροελεγκτές δίνουν έμφαση στο μικρό αριθμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που απαιτείται για τη λειτουργία μιας συσκευής, το χαμηλό κόστος και την εξειδίκευση. Αναλυτικά, τα πλεονεκτήματα των μικροελεγκτών είναι:

- Η αυτονομία, μέσω της ενσωμάτωσης σύνθετων περιφερειακών υποσυστημάτων όπως μνήμες και θύρες επικοινωνίας. Για το λόγο αυτό, πολλοί μικροελεγκτές δεν χρειάζονται κανένα άλλο ολοκληρωμένο κύκλωμα για να λειτουργήσουν.



- Η ενσωμάτωση περιφερειακών συνεπάγεται ευκολότερη υλοποίηση εφαρμογών λόγω των απλούστερων διασυνδέσεων. Επιπλέον, οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος, μεγιστοποιώντας τη φορητότητα και ελαχιστοποιώντας το κόστος της συσκευής στην οποία ενσωματώνεται ο μικροελεγκτής.
- Το χαμηλό κόστος.
- Η μεγαλύτερη αξιοπιστία, και πάλι λόγω των λιγότερων διασυνδέσεων.
- Οι μειωμένες εκπομπές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και η μειωμένη ευαισθησία σε αντίστοιχες παρεμβολές από άλλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Το πλεονέκτημα αυτό προκύπτει από το μικρότερο αριθμό και μήκος εξωτερικών διασυνδέσεων καθώς και από τις χαμηλότερες ταχύτητες λειτουργίας.
- Οι περισσότεροι διαθέσιμοι ακροδέκτες για ψηφιακές εισόδους-εξόδους (για δεδομένο μέγεθος ολοκληρωμένου κυκλώματος), λόγω της μη δέσμευσής τους για τη σύνδεση εξωτερικών περιφερειακών.
- Το μικρό μέγεθος συνολικού υπολογιστικού συστήματος.<sup>[9]</sup>

Πρέπει να σημειωθεί ότι με τη διαρκή εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής αναπτύχθηκαν νέοι επεξεργαστές, οι DSP (Digital Signal Processor). Οι γνωστοί οίκοι κατασκευής μικροελεγκτών έχουν πλέον προχωρήσει στην ενσωμάτωση αυτών των επεξεργαστών στους μικροελεγκτές DSC (Digital Signal Controllers), ανοίγοντας νέους ορίζοντες στους βιομηχανικούς αυτοματισμούς και ελέγχους.

Η ψηφιακή επεξεργασία (DSP) ασχολείται με την αναπαράσταση σημάτων διακριτού χρόνου ως ακολουθιών αριθμών ή συμβόλων, καθώς και με την επεξεργασία των σημάτων αυτών. Η ψηφιακή και η αναλογική επεξεργασία σήματος συναποτελούν το διεπιστημονικό γνωστικό πεδίο των εφαρμοσμένων μαθηματικών, το οποίο είναι ευρέως γνωστό και ως επεξεργασία σήματος. Κάποιες εφαρμογές της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος είναι η επεξεργασία ήχου, η αναγνώριση φωνής, η επεξεργασία σημάτων από σόναρ, και συστοιχίες αισθητήρων, η εκτίμηση φάσματος, η στατιστική επεξεργασία σήματος, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, η επεξεργασία σήματος στις

---

<sup>[9]</sup> Ορισμός Μικροελεγκτή, από Wikipedia. Διαθέσιμο στο: [el.wikipedia.org/wiki/Μικροελεγκτής](http://el.wikipedia.org/wiki/Μικροελεγκτής)



τηλεπικοινωνίες, ο έλεγχος συστημάτων, η επεξεργασία βιοϊατρικών σημάτων και η επεξεργασία σεισμικών δεδομένων.

Ο σκοπός της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος είναι συνήθως η μέτρηση, το φιλτράρισμα ή η συμπίεση συνεχόμενων αναλογικών φυσικών σημάτων. Το πρώτο βήμα συνήθως είναι η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό, μέσω δειγματοληψίας και κβάντισης σήματος με τη βοήθεια ενός μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), ο οποίος μετασχηματίζει το αναλογικό σήμα σε μια ακολουθία από αριθμούς. Ωστόσο, το ζητούμενο σήμα εξόδου τυχάνει συχνά να είναι επίσης αναλογικό παρόλο που η επεξεργασία έχει ψηφιακό χαρακτήρα, επομένως χρειάζεται και ένας μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC). Αν και αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με την αναλογική επεξεργασία και έχει διακριτό πεδίο τιμών, η χρήση υπολογιστικής ισχύος στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αναλογική επεξεργασία σήματος σε πολλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα ο εντοπισμός και η διόρθωση λαθών στις επικοινωνίες και η συμπίεση δεδομένων.

Οι αλγόριθμοι ΨΕΣ εκτελούνται από παλιά σε υπολογιστές, σε εξειδικευμένους επεξεργαστές που ονομάζονται ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος σε υλικό που κατασκευάζεται ειδικά για αυτόν τον σκοπό, όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα εφαρμογών (Application-Specific Integrated Circuits, ASIC).

Στις μέρες μας, χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνολογίες για την ψηφιακή επεξεργασία σήματος όπως για παράδειγμα οι ισχυροί μικροεπεξεργαστές γενικής χρήσης, οι συστοιχίες επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA), οι ψηφιακοί ελεγκτές σήματος (κυρίως σε εφαρμογές στη βιομηχανία, όπως ο έλεγχος κινητήρων) και οι επεξεργαστές ροής (stream processors).<sup>[10]</sup>

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε ένας μικροελεγκτής με ενσωματωμένη μονάδα επεξεργασίας σήματος καθώς μας παρέχει μονάδες αναλογικών εισόδων και εξόδων PWM. Γίνεται αναφορά για τον DSC της εταιρίας Microchip, τον DSPIC30F4011.

---

<sup>[10]</sup> Ορισμός Ψηφιακής επεξεργασίας σήματος από Wikipedia. Διαθέσιμο στο: [el.wikipedia.org/wiki/Ψηφιακή\\_επεξεργασία\\_σήματος](http://el.wikipedia.org/wiki/Ψηφιακή_επεξεργασία_σήματος)



### **3.1 Χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή DSPIC30F4011 [11]**

#### **High Performance Modified RISC CPU:**

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture with flexible addressing modes
- 84 base instructions
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 48 Kbytes on-chip Flash program space (16K Instruction words)
- 2 Kbytes of on-chip data RAM
- 1 Kbytes of non-volatile data EEPROM
- Up to 30 MIPS operation:
- DC to 40 MHz external clock input
- MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 30 interrupt sources
- 3 external interrupt sources
- 8 user selectable priority levels for each interrupt source
- processor trap sources
- 16 x 16-bit working register array

#### **DSP Engine Features:**

- Dual data fetch
- Accumulator write back for DSP operations
- Modulo and Bit-Reversed Addressing modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single cycle hardware fractional/integer multiplier
- All DSP instructions single cycle
- $\pm$  16-bit single cycle shift

#### **Peripheral Features:**

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 Ma
- Timer module with programmable prescaler:
- Five 16-bit timers/counters; optionally pair 16-bit timers into 32bit timer modules



- 16-bit Capture input functions
- 16-bit Compare/PWM output functions
- 3-wire SPI™ modules (supports 4 Frame modes)
- I2C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- 2 UART modules with FIFO Buffers
- 1 CAN modules, 2.0B compliant

**Motor Control PWM Module Features:**

- 6 PWM output channels
- Complementary or Independent Output Modes
- Edge and Center Aligned modes
- duty cycle generators
- Dedicated time base
- Programmable output polarity
- Dead-time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for A/D conversions

**Quadrature Encoder Interface Module Features:**

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

**Analog Features:**

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (A/D) with 4 S/H Inputs:
- 500 Ksps conversion rate
- 9 input channels
- Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Detection and Reset Generation



**Special Microcontroller Features:**

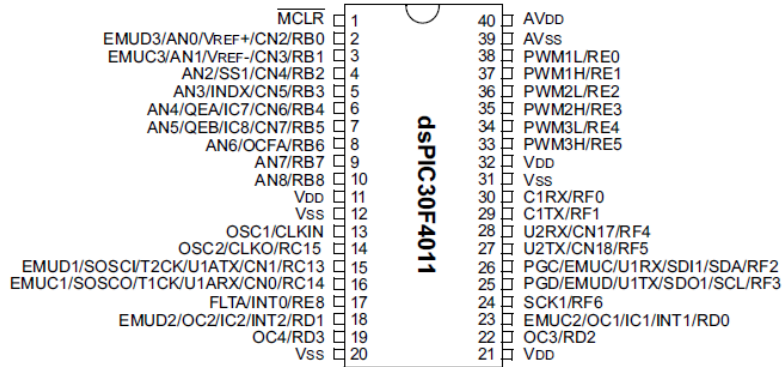
- Enhanced Flash program memory: 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory: 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe clock monitor operation detects clock failure and switches to on-chip low power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes
- Sleep, Idle and Alternate Clock modes

**CMOS Technology:**

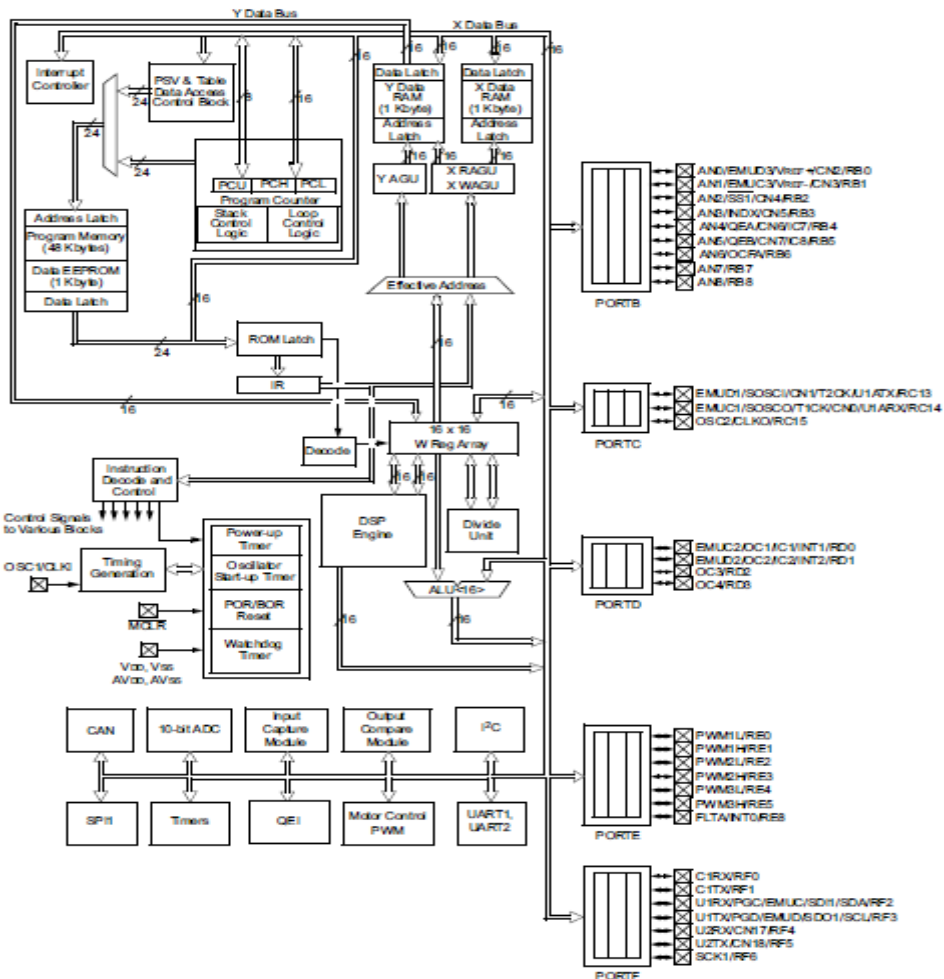
- Low power, high speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption



### 3.2 Το μπλοκ διάγραμμα του μικροελεγκτή DSPIC30F4011



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ακροδεκτών του μικροελεγκτή DSPIC30F4011<sup>[11]</sup>



Σχήμα 3.2 Μπλοκ διάγραμμα του μικροελεγκτή DSPIC30F4011<sup>[12]</sup>

<sup>[11]</sup> Microchip dsPIC30F4011/4012 Data Sheet σελ. 5 Microchip Technology Inc. 2010

<sup>[12]</sup> Microchip dsPIC30F4011/4012 Data Sheet σελ. 10 Microchip Technology Inc. 2010



### 3.2.1 Περιγραφή των ακροδεκτών του μικροελεγκτή DSPIC30F4011

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται περιγραφή των ακροδεκτών του μικροελεγκτή DSPIC30F4011<sup>[13]</sup>.

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN8	I	Analog	Analog input channels. AN0 and AN1 are also used for device programming data and clock inputs, respectively.
AVDD	P	P	Positive supply for analog module.
AVSS	P	P	Ground reference for analog module.
CLKI CLKO	I O	ST/CMOS —	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLK0 in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN7 CN17-CN18	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
C1RX C1TX	I O	ST —	CAN1 bus receive pin. CAN1 bus transmit pin.
EMUD EMUC EMUD1 EMUC1 EMUD2 EMUC2 EMUD3 EMUC3	I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O	ST ST ST ST ST ST ST ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin. ICD Primary Communication Channel clock input/output pin. ICD Secondary Communication Channel data input/output pin. ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1, IC2, IC7, IC8	I	ST	Capture inputs 1, 2, 7 and 8.
INDX QEA QEB	I I I	ST ST ST	Quadrature Encoder Index Pulse input. Quadrature Encoder Phase A input in QEI mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode. Quadrature Encoder Phase A input in QEI mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
INT0 INT1 INT2	I I I	ST ST ST	External interrupt 0. External interrupt 1. External interrupt 2.
FLTA PWM1L PWM1H PWM2L PWM2H PWM3L PWM3H	I O O O O O O	ST — — — — — —	PWM Fault A input. PWM 1 Low output. PWM 1 High output. PWM 2 Low output. PWM 2 High output. PWM 3 Low output. PWM 3 High output.
MCLR	VP	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active low Reset to the device.
OCFA OC1-OC4	I O	ST —	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4). Compare outputs 1 through 4.

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

Σχήμα 3.3 Περιγραφή των ακροδεκτών του μικροελεγκτή DSPIC30F4011<sup>[14]</sup>

<sup>[13]</sup> Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην ιστοσελίδα της Microchip και να κατεβάσει ελεύθερα το datasheet του μικροελεγκτή. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70135G.pdf>

<sup>[14]</sup> Microchip dsPIC30F4011/4012 Data Sheet σελ. 12 Microchip Technology Inc. 2010



Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
OSC1 OSC2	I I/O	ST/CMOS —	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLK0 in RC and EC modes.
PGD PGC	I/O I	ST ST	In-Circuit Serial Programming data input/output pin. In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RB0-RB8	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
8RC13-RC15	8I/O	8ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RD0-RD3	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE5, RE8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF0-RF6	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1 SDI1 SDO1 SS1	I/O I O I	ST ST — ST	Synchronous serial clock input/output for SPI™ 1. SPI 1 Data In. SPI 1 Data Out. SPI 1 Slave Synchronization.
SCL SDA	I/O I/O	ST ST	Synchronous serial clock input/output for I <sup>2</sup> C. Synchronous serial data input/output for I <sup>2</sup> C.
SOSCO SOSCI	O I	— ST/CMOS	32 kHz low power oscillator crystal output. 32 kHz low power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
T1CK T2CK	I I	ST ST	Timer1 external clock input. Timer2 external clock input.
U1RX U1TX U1ARX U1ATX U2RX U2TX	I O I O I O	ST — ST — ST —	UART1 Receive. UART1 Transmit. UART1 Alternate Receive. UART1 Alternate Transmit. UART2 Receive. UART2 Transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog Voltage Reference (High) input.
VREF-	I	Analog	Analog Voltage Reference (Low) input.

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

Σχήμα 3.4 (Συνέχεια) Περιγραφή των ακροδεκτών του μικροελεγκτή DSPIC30F4011<sup>[15]</sup>

### 3.2.2 Συνοπτική περιγραφή των μονάδων του μικροελεγκτή που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του μετατροπέα.

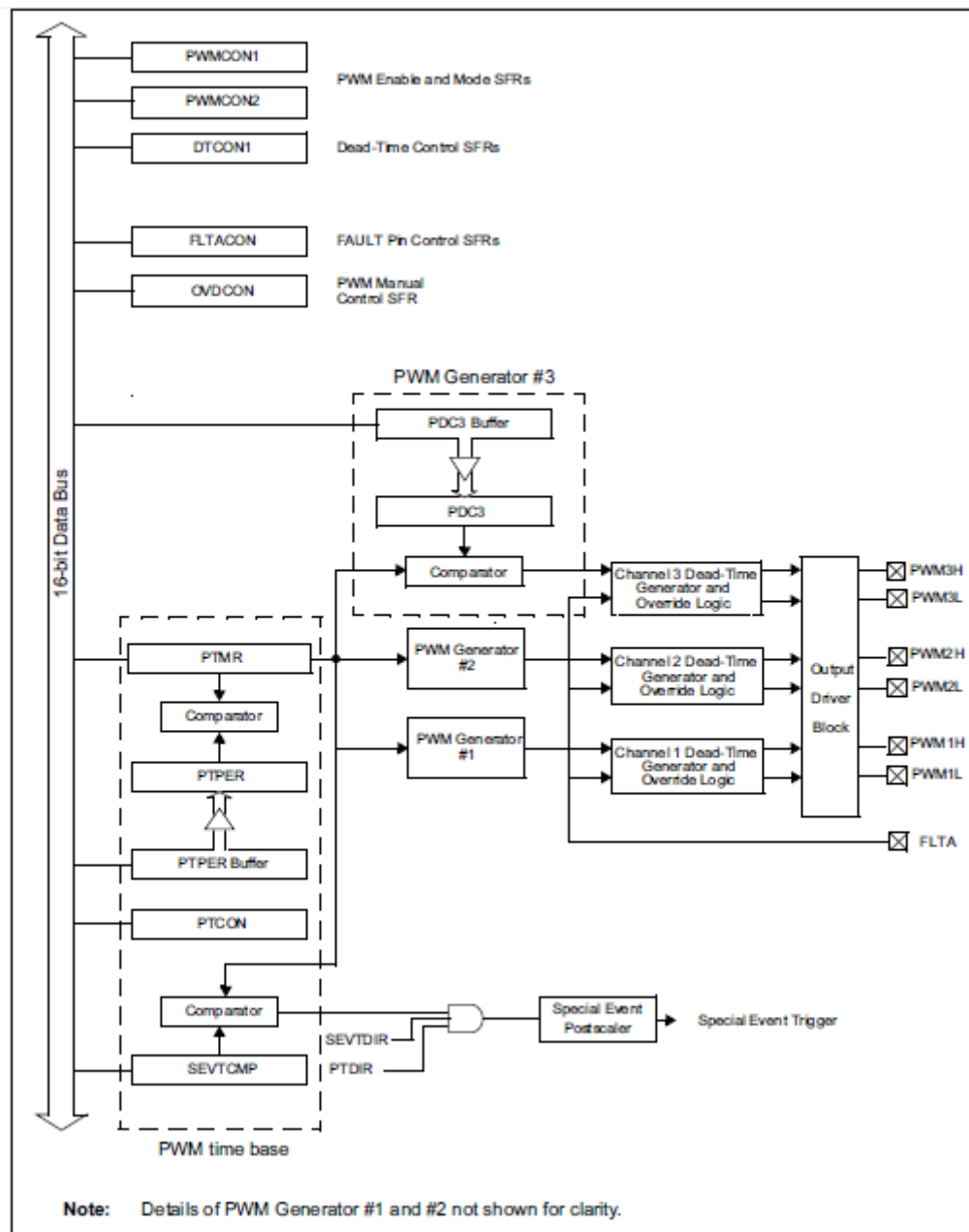
#### ➤ Motor Control PWM Module

Αυτή η μονάδα μας παρέχει 3 ζευγάρια συμπληρωματικών εξόδων PWM που μεταξύ των συμπληρωματικών εξόδων ο σχεδιαστής μπορεί να προγραμματίσει νεκρό χρόνο ενεργοποίησής τους. Η διακριτότητα της μονάδας είναι 16-bit και μπορεί να ανανεώνει την τιμή των καταχωρητών της ανάλογα με το είδος της εσωτερικής ή εξωτερικής διακοπής, η οποία προγραμματίζεται από τον χρήστη. Η μονάδα αυτή είναι

<sup>[15]</sup> Microchip dsPIC30F4011/4012 Data Sheet σελ. 13 Microchip Technology Inc. 2010



κατάλληλα σχεδιασμένη για εφαρμογές σε μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Παρακάτω παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα της μονάδας Motor Control PWM.



Σχήμα 3.5 Μπλοκ διάγραμμα της Μονάδας Παραγωγής Παλμών<sup>[16]</sup>

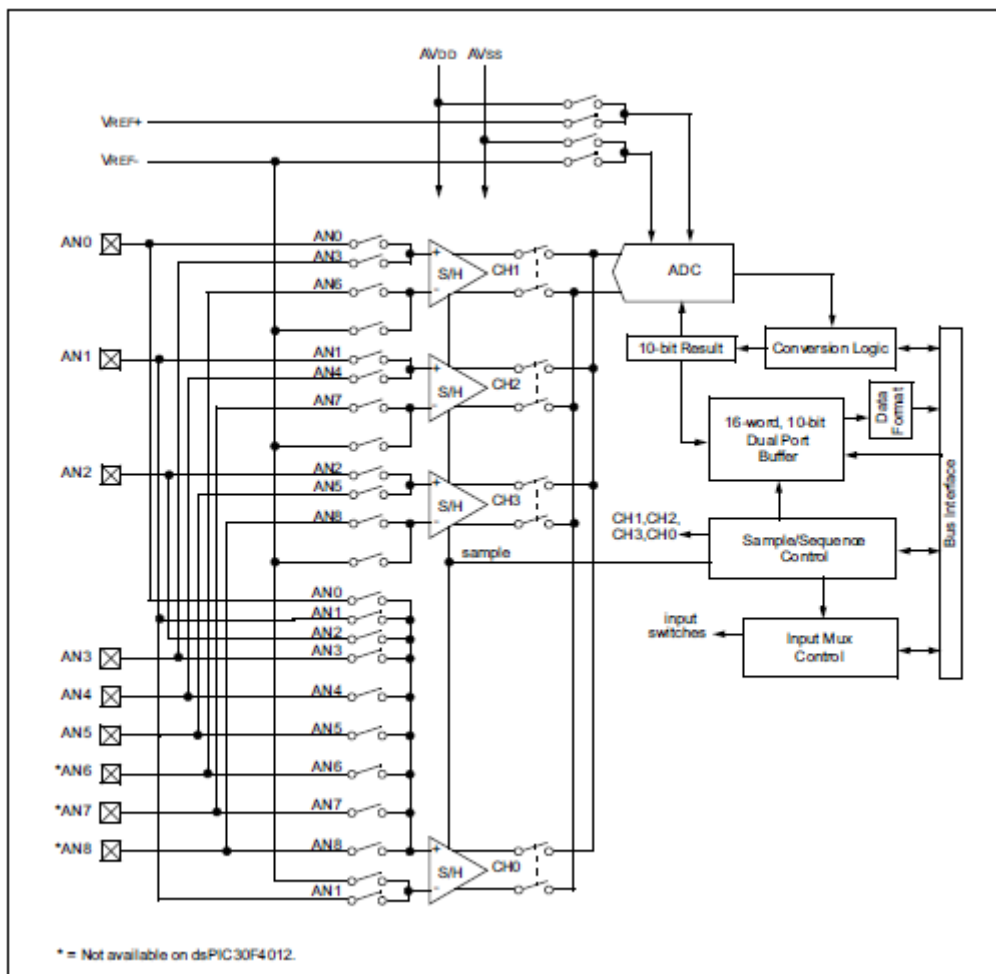
### ➤ 10-bit High Speed Analog to Digital Converter

Η αναλογική σε ψηφιακή μονάδα του μικροελεγκτή έχει διακριτότητα 10-bit, και δειγματοληψία σήματος έως 500 Ksps. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιαστή

<sup>[16]</sup> Microchip dsPIC30F4011/4012 Data Sheet σελ. 98 Microchip Technology Inc. 2010



μπορεί να πάρει ταυτόχρονη δειγματοληψία από τέσσερα σήματα. Παρακάτω παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα της μονάδας A/D.

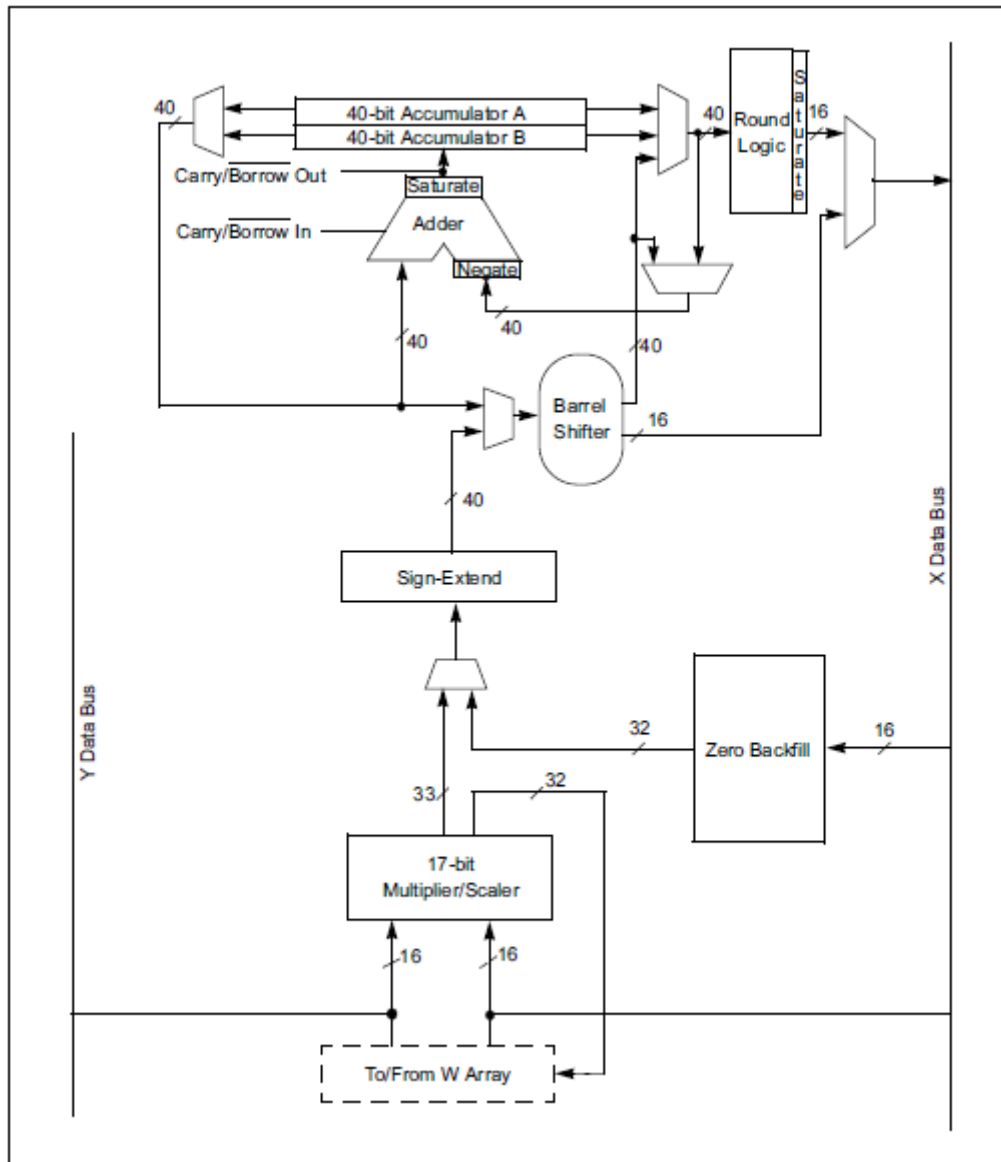


Σχήμα 3.6 Μπλοκ διάγραμμα της Μονάδας A/D<sup>[17]</sup>

### ➤ DSP Engine

Για την υλοποίηση του μετατροπέα θα πρέπει να γίνει επεξεργασία εξωτερικών δεδομένων που θα δίνονται από τον χρήστη και στη συνέχεια θα παράγονται κατάλληλοι παλμοί για τον έλεγχο του μετατροπέα. Όλοι οι μαθηματικοί υπολογισμοί που απαιτούνται πραγματοποιούνται από τη μονάδα DSP Engine που είναι ενσωματωμένη στον μικροελεγκτή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μπλοκ διάγραμμα της μονάδας DSP Engine.

<sup>[17]</sup> Microchip dsPIC30F4011/4012 Data Sheet σελ.140 Microchip Technology Inc. 2010



Σχήμα 3.7 Μπλοκ διάγραμμα της Μονάδας DSP

### 3.2.3 Λειτουργικό Προγραμματισμού του Μικροελεγκτή

Το λογισμικό προγραμματισμού του μικροελεγκτή παρέχεται δωρεάν από την εταιρία Microchip με τον αντίστοιχο μεταγλωττιστή ASSEMBLY. Σε περίπτωση που ο σχεδιαστής επιθυμεί να προγραμματίσει την συσκευή σε γλώσσα προγραμματισμού C τότε θα χρειαστεί να αγοράσει τον αντίστοιχο μεταγλωττιστή από την εταιρία.

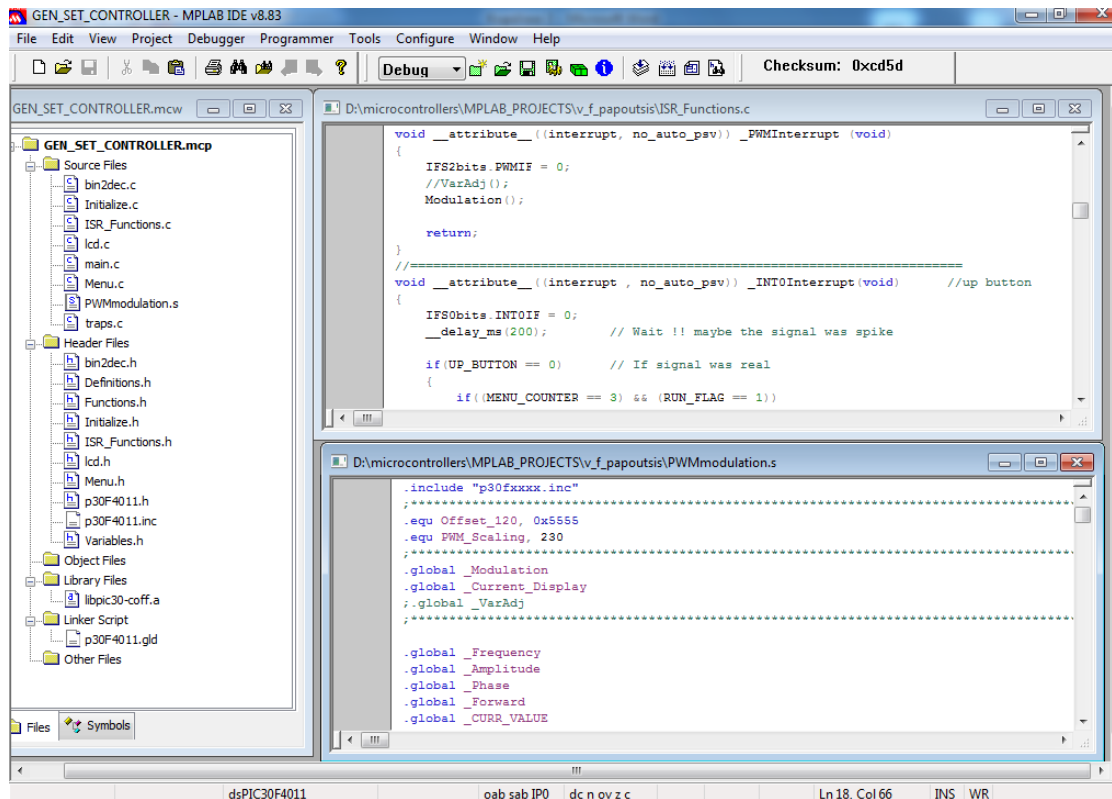
Το λογισμικό προγραμματισμού συνήθως καλείται ως Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης (IDE). Η εταιρία Microchip παρέχει το MPLAB σε διάφορες ανανεωμένες εκδόσεις.





Σ' αυτό το αναπτυξιακό περιβάλλον ο χρήστης γράφει τον κώδικα, τον μεταγλωττίζει, τον προσομοιώνει και τέλος τον φορτώνει στον μικροελεγκτή μέσω μιας συσκευής, η οποία ονομάζεται προγραμματιστής. Τον προγραμματιστή μπορεί κάποιος είτε να τον κατασκευάσει μόνος του (σύμφωνα με τις οδηγίες της Microchip) είτε να τον αγοράσει.

Παρακάτω παρουσιάζεται η όψη του αναπτυξιακού προγράμματος MPLAB IDE v8.83 .

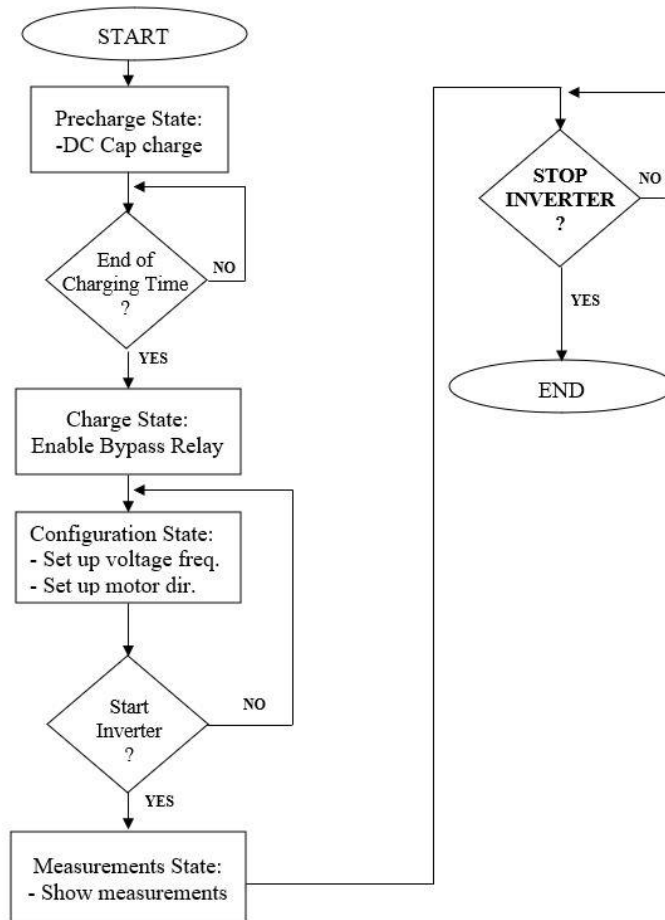


Σχήμα 3.8 Η όψη του αναπτυξιακού προγράμματος MPLAB IDE v8.83





Παρακάτω παρουσιάζεται το flowchart του αλγορίθμου εκτέλεσης του προγράμματος.



Σχήμα 3.9 Flowchart του αλγορίθμου εκτέλεσης του προγράμματος

Το πρόγραμμα του μικροεπεξεργαστή βρίσκεται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ AC/DC/AC**

### **Εισαγωγή**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή μετατροπέα AC/DC/AC για την οδήγηση τριφασικού επαγωγικού κινητήρα με την μέθοδο σταθερού λόγου V/f (Τάσης/Συχνότητας). Για την αποδοτικότερη χρήση των μαγνητικών χαρακτηριστικών του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος, στα συστήματα ελέγχου των στροφών των ασύγχρονων κινητήρων, η μεταβολή της συχνότητας συνοδεύεται από ανάλογη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας, έτσι ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να διατηρείται στη μέγιστη δυνατή τιμή. Είναι γνωστό, ότι στις συνθήκες λειτουργίας η πτώση τάσης του τυλίγματος τυμπάνου είναι αρκετά μικρότερη της επαγόμενης Α.Η.Ε.Δ., που με αρκετά καλή προσέγγιση να ισχύει ότι:

$$I(R_1 + jX_1) < \bar{E}_1 \rightarrow V_1 \approx \bar{E}_1 = 4.44K_1f_1N_1\Phi_\delta$$

Έτσι, είναι προφανής η αναλογία της ροής διακένου από το λόγο V/f .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση της συχνότητας κάτω από 10Hz μειώνει σημαντικά την ροπή ανατροπής του κινητήρα, και αυτό οφείλεται στη μείωση της ροής διακένου, λόγω επίδρασης της ωμικής αντίστασης του τυλίγματος τυμπάνου. Συνολικά, η μείωση της συχνότητας επιφέρει μείωση της εμπέδησης στην είσοδο της μηχανής με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος και έτσι την υπερφόρτιση της. Τέλος, η αύξηση της συχνότητας πέρα από τα όρια του κατασκευαστή του κινητήρα θα πρέπει να συνοδεύεται με διατήρηση σταθερού φορτίου.

Έτσι, καλούμαστε να σχεδιάσουμε έναν μετατροπέα στον οποίο να μπορούμε να μεταβάλουμε την ενεργό τιμή και τη συχνότητα της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα. Ένας τρόπος που μπορεί να γίνει το παραπάνω είναι μέσω τριφασικού αντιστροφέα με τεχνική ελέγχου SPWM. Για την είσοδο του αντιστροφέα θα χρειαστούμε μια πηγή συνεχούς ρεύματος, η οποία θα προκύψει από την ανόρθωση της τάσης του AC δικτύου.

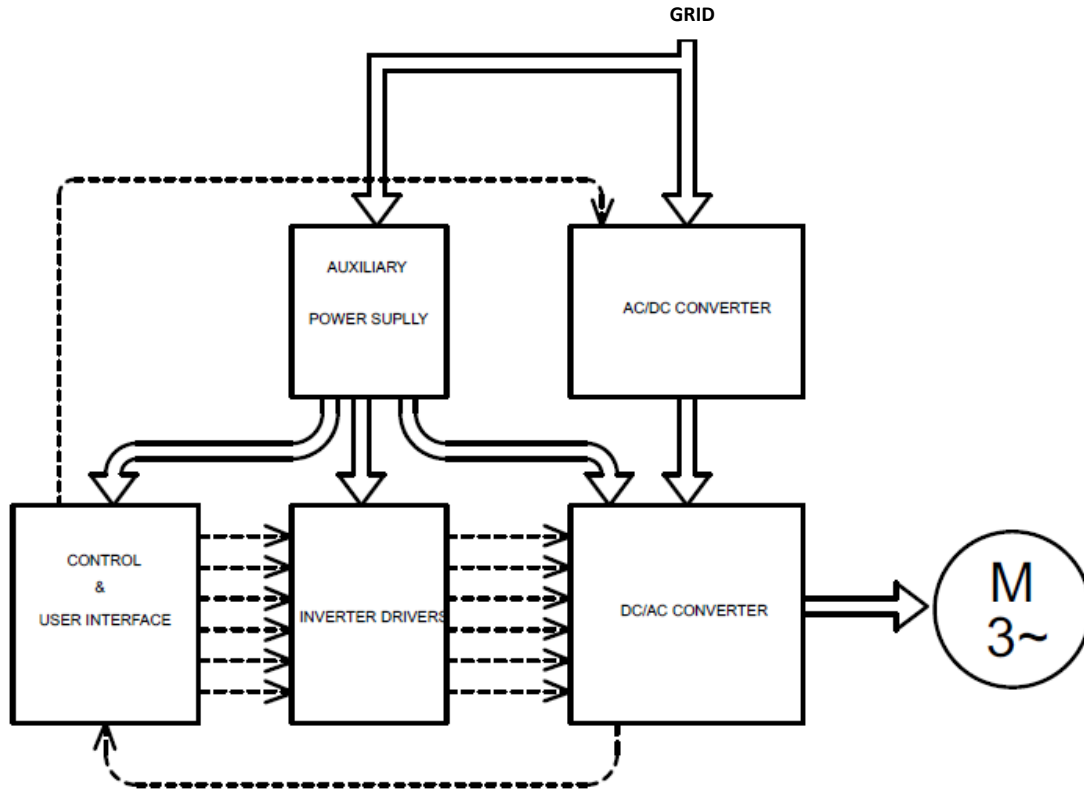
Ο παραπάνω μετατροπέας αποτελείται από:

- Μετατροπέα AC/DC
- Μετατροπέα DC/AC
- Μονάδα ελέγχου και διεπαφής του χρήστη



- Βοηθητικά κυκλώματα τροφοδοσίας τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

Το μπλοκ διάγραμμα του μετατροπέα AC/DC/AC που απεικονίζεται στο σχήμα 4.1, σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα EAGLE.



**Σχήμα 4.1** Δομικό διάγραμμα του μετατροπέα AC/DC/AC

### 4.1 Μετατροπέας AC/DC

Για την ανόρθωση της τριφασικής εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου χρησιμοποιείται μια τριφασική ανόρθωση με διόδους. Η τριφασική ανορθωτική γέφυρα που επιλέχθηκε είναι η 36MT120 της εταιρίας IR. Τα χαρακτηριστικά της στους 60° C είναι 35A/1200V. Η μέγιστη ανάστροφη τάση που εφαρμόζεται στις διόδους είναι  $V_R = 2\sqrt{2}V_{LL} = 2\sqrt{2} \times 400 = 1130V$ .<sup>[18]</sup> Η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα ορίζεται 3kW. Επομένως αμελώντας τις απώλειες του αντιστροφέα το μέσο ρεύμα που θα διαρρέει την γέφυρα είναι:

$$I_{DC} = \frac{P_{out}}{V_{DC}} = \frac{3000W}{400\sqrt{2}V} = 5.3A$$

<sup>[18]</sup> International Rectifier, Three Phase Bridge, MT Series, Power Modules, Σελίδες 1-3. Διαθέσιμο στο: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/92063/IRF/36MT120.html>



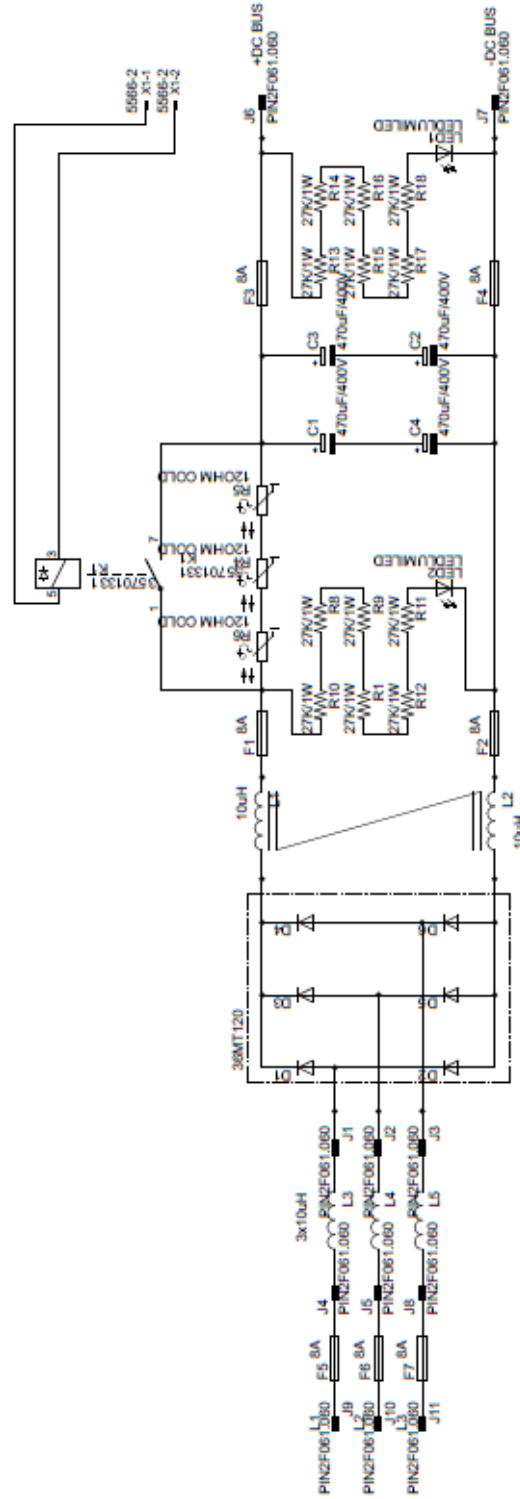
Η είσοδος της ανορθωτικής διάταξης (36MT120) συνδέεται με τις τριφασικές τάσεις του δικτύου μέσω τριών πηνίων για την ομαλή μετάβαση των διόδων σε αγωγή. Όπως γνωρίζουμε όταν γίνεται η μετάβαση αγωγής των διόδων υπάρχει για ένα απειροελάχιστο χρόνο βραχυκύκλωμα στην πηγή εισόδου της ανόρθωσης. Για την αποφυγή του στιγμιαίου αυτού βραχυκυκλώματος, η είσοδος της ανόρθωσης συνδέεται με τις τάσεις του δικτύου μέσω πηνίων (σχήμα 4.2).

Λόγω της φύσης του αντιστροφέα, το ρεύμα στην έξοδο της ανόρθωσης γίνεται διακοπτόμενο. Για το λόγο αυτό συνδέουμε δυο πηνία, τα τυλίγματα των οποίων βρίσκονται στο ίδιο πυρήνα (φερρίτης), ώστε να επιτευχθεί εξομάλυνση και συνεχής αγωγή του ρεύματος στην έξοδο της ανόρθωσης. Ταυτόχρονα για να μην έχουμε διακυμάνσεις στην συνεχή τάση, συνδέουμε παράλληλα ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές ( $C_1+C_4 // C_3+C_2$ ) οι τιμές των οποίων καταγράφονται επάνω στο σχήμα 4.2. Όπως είναι γνωστό, η έξοδος της τριφασικής ανόρθωσης απαιτεί ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές, μειωμένης χωρητικότητας.

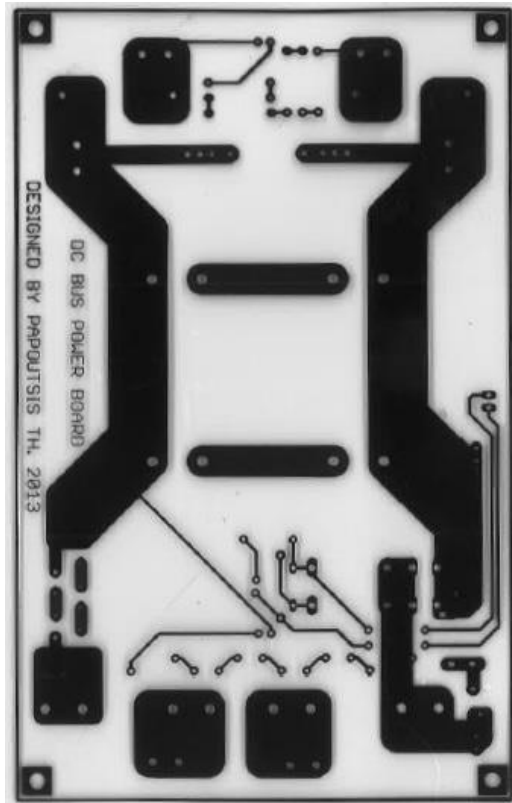
Κατά την αρχική φόρτιση οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές απορροφούν τεράστιο ρεύμα. Για τον περιορισμό του ρεύματος φόρτισης των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών συνδέουμε σε σειρά Θερμίστορ (NTC), τα οποία μετά από ένα χρονικό περιθώριο (που έχουμε ορίσει πειραματικά) τα βγάζουμε εκτός, μέσω μια επαφής ενός ρελέ K1. Όταν τα Θερμίστορ είναι εκτός μέσω της επαφής του ρελέ, ανάβει μια φωτοδίοδος (κόκκινου χρώματος) για να υποδείξει ότι οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές είναι φορτισμένοι. Η εντολή για τον σπλισμό του ρελέ, δίνεται από τον μικροελεγκτή.

Επιπλέον, στην έξοδο της ανόρθωσης πριν καθώς και μετά από τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές, υπάρχουν δύο φωτοδιόδοι (πράσινου χρώματος) σε σειρά με αντιστάσεις, ώστε να υποδεικνύουν την ύπαρξη DC τάσης στο κύκλωμα. Ο λόγος ύπαρξης των αντιστάσεων σε σειρά, είναι για τη δημιουργία κατάλληλης DC τάσης μέσω του υποβιβασμού της, ώστε να ανάψουν οι φωτοδιόδοι.

Το σχέδιο του μετατροπέα AC/DC με τις τιμές των στοιχείων απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 4.2, το οποίο σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα EAGLE. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται το PCB της ανορθωτικής γέφυρας, ενώ στο σχήμα 4.4 φαίνεται ολοκληρωμένη η ανορθωτική γέφυρα.



Σχήμα 4.2 Σχέδιο του μετατροπέα AC/DC



**Σχήμα 4.3** PCB Πλακέτα του μετατροπέα AC/DC



**Σχήμα 4.4** Φωτογραφία του μετατροπέα AC/DC



## **4.2 Μετατροπέας DC/AC**

Ο μετατροπέας DC/AC (αντιστροφέας) αποτελείται από 6 ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία IGBT σε διάταξη γέφυρας. Το IGBT συνδυάζει το πλεονέκτημα του τρανζίστορ να διαχειρίζεται μεγάλα ρεύματα και το πλεονέκτημα του MOSFET να λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες. Επίσης έχει το πλεονέκτημα του MOSFET να ελέγχεται η πύλη του με παλμούς τάσης και να χρειάζεται μικρό ρεύμα για την έναυσή του. Το τελευταίο, μας διευκολύνει στην σχεδίαση και κατασκευή των κυκλωμάτων οδήγησης καθώς δεν απαιτούν ιδιαίτερα υψηλό κόστος, ενώ παράλληλα δεν απορροφούν μεγάλη ισχύ.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι τα IGBT στην παρούσα εργασία έχουν ενσωματωμένη αντιπαράλληλη δίοδο, για την ελεύθερη διέλευση των ρευμάτων, που είναι συνέπεια του επαγωγικού φορτίου (ασύγχρονος κινητήρας) και είναι της εταιρίας Fairchild και ο τύπος είναι FGA25N120ANTD [13] (25A/1200V @ 100° C).

Ο έλεγχος του αντιστροφέα γίνεται με τεχνική SPWM και η διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα ορίστηκε στα 16kHz. Η διακοπτική συχνότητα ορίστηκε στα 16kHz για την αποφυγή των ακουστικών συχνοτήτων, την αποφυγή της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI) καθώς και την αποφυγή υπερβολικά αυξημένων διακοπτικών απωλειών που θα εμφανίζονταν σε υψηλότερες συχνότητες. Φυσικά αυτό είναι εφικτό και από το συγκεκριμένο τύπο IGBT.

Για την έναυση των IGBT απαιτείται ειδικό κύκλωμα οδήγησης (ενίσχυσης) των παλμών που παράγονται από την μονάδα ελέγχου. Για το κύκλωμα οδήγησης χρησιμοποιούμε τα ειδικού σκοπού ολοκληρωμένα της εταιρίας AVAGO, τα HCPL3120 [14]. Φυσικά στην αγορά υπάρχουν πολλά είδη ολοκληρωμένων για τον συγκεκριμένο σκοπό. Το HCPL3120 μας παρέχει γαλβανική απομόνωση μέσω οπτοαποζεύκτη καθώς μας παρέχει και ηλεκτρομαγνητική θωράκιση.

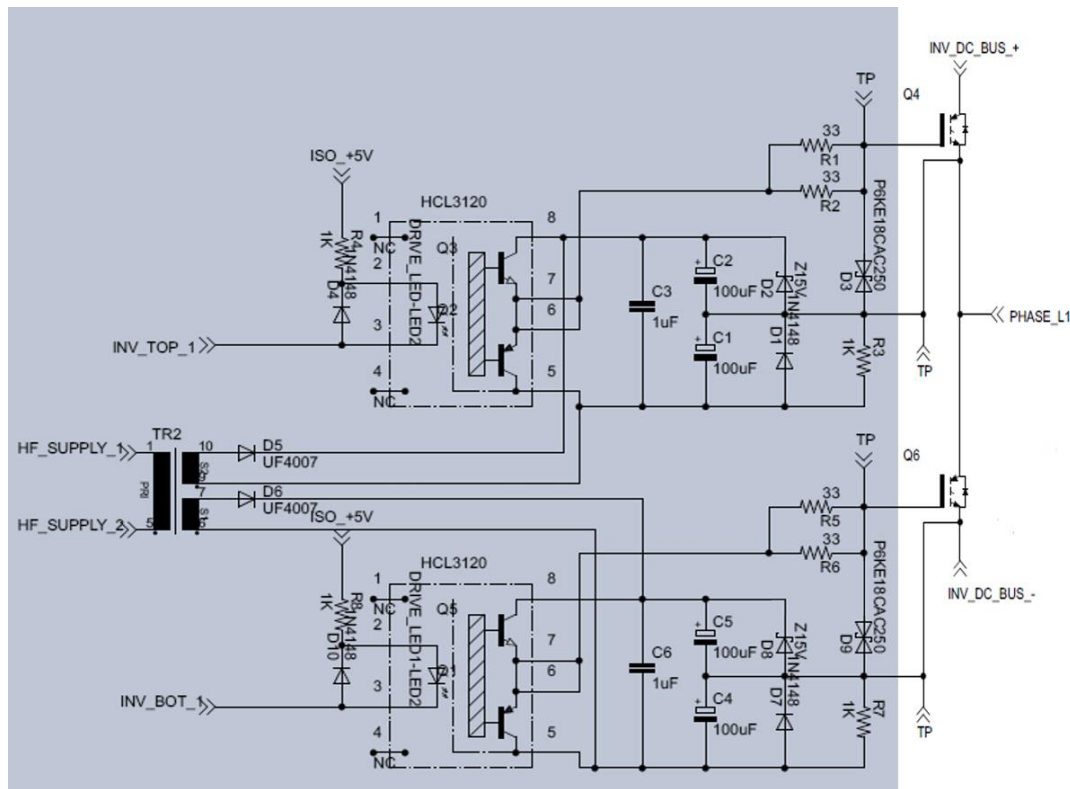
Για την οδήγηση των IGBT χρειάζονται 6 γαλβανικά απομονωμένες DC τάσεις. Για να επιτευχθεί η γαλβανική απομόνωση, χρησιμοποιήθηκαν 3 Μ/Σ (TR1, TR2, TR3) οι οποίοι έχουν από ένα πρωτεύον τυλίγμα (είσοδος Μ/Σ) και δύο δευτερεύοντα τυλίγματα (έξοδος Μ/Σ). Οι Μ/Σ δέχονται στην είσοδό τους μια εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση 15V υψηλής συχνότητας και στην έξοδό τους παράγεται μια τετραγωνική τάση 20V pick to pick. Η τάση αυτή ανορθώνεται μέσω





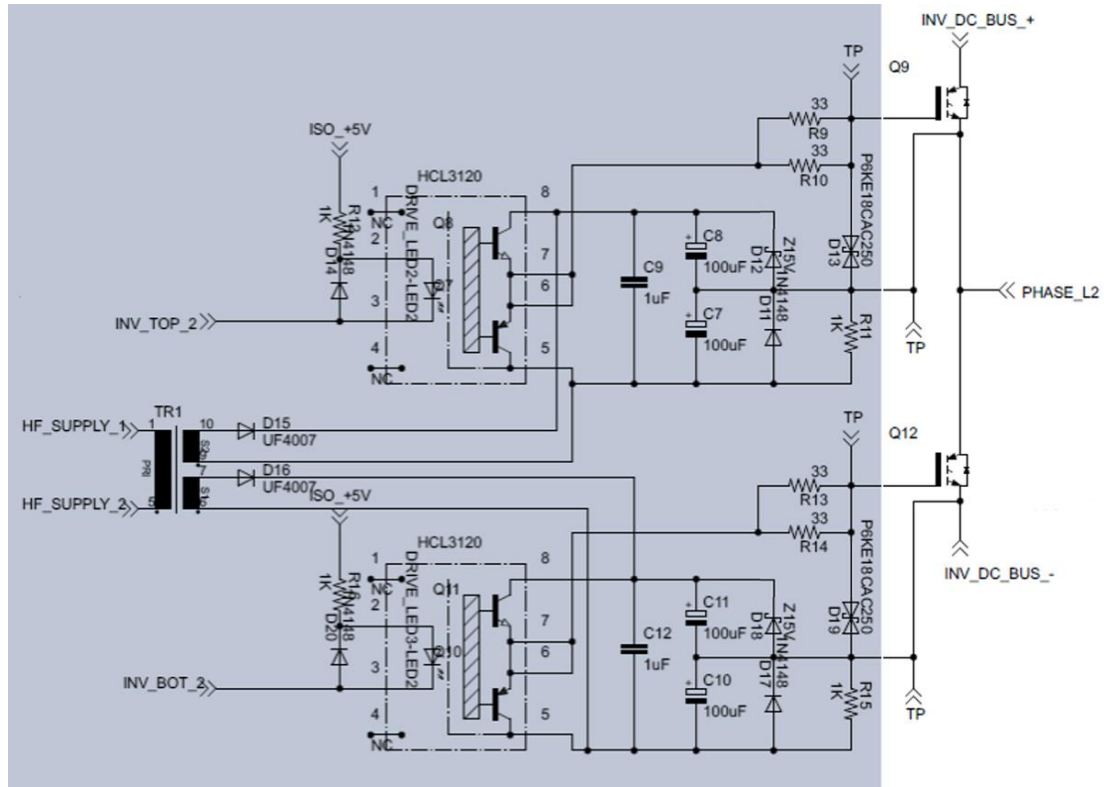
των διόδων (D5, D6, D15, D16, D25, D26) οι οποίες βρίσκονται σε σειρά με τα δευτερεύοντα τυλίγματα και εξομαλύνεται μέσω των πυκνωτών. Έχοντας πλέον 20V DC τάση, οι δίοδοι Zener (D2, D8, D12, D18, D22, D28) διαιρούν τα 20V DC τάσης σε +15V για την αγωγή των IGBT και -5V για την σβέση των IGBT αντίστοιχα. Ο λόγος που επιλέχθηκε η τάση των -5V έναντι αυτής του 0V είναι διότι έτσι είναι πιο ασφαλής η διατήρηση σβέσης των IGBT, και επιπλέον αποφεύγετε οποιαδήποτε ύπαρξη τάσης στο σημείο αναφοράς της πύλης που μπορεί να προκύψει από επαγωγικές τάσεις, λόγω παρασίτων και να βρεθούν σε αγωγή 2 IGBT του ίδιου κλάδου. Επίσης, σε κάποιες περιπτώσεις, η σβέση επιτυγχάνεται ταχύτερα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σχέδια του αντιστροφέα όπου σε γκρίζο φόντο απεικονίζονται τα κυκλώματα οδήγησης. Η σχεδίαση των παρακάτω σχημάτων που απεικονίζουν τα σχέδια του αντιστροφέα και των κυκλωμάτων, και πιο συγκεκριμένα από το σχήμα 4.5 έως και το σχήμα 4.8, πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα EAGLE.

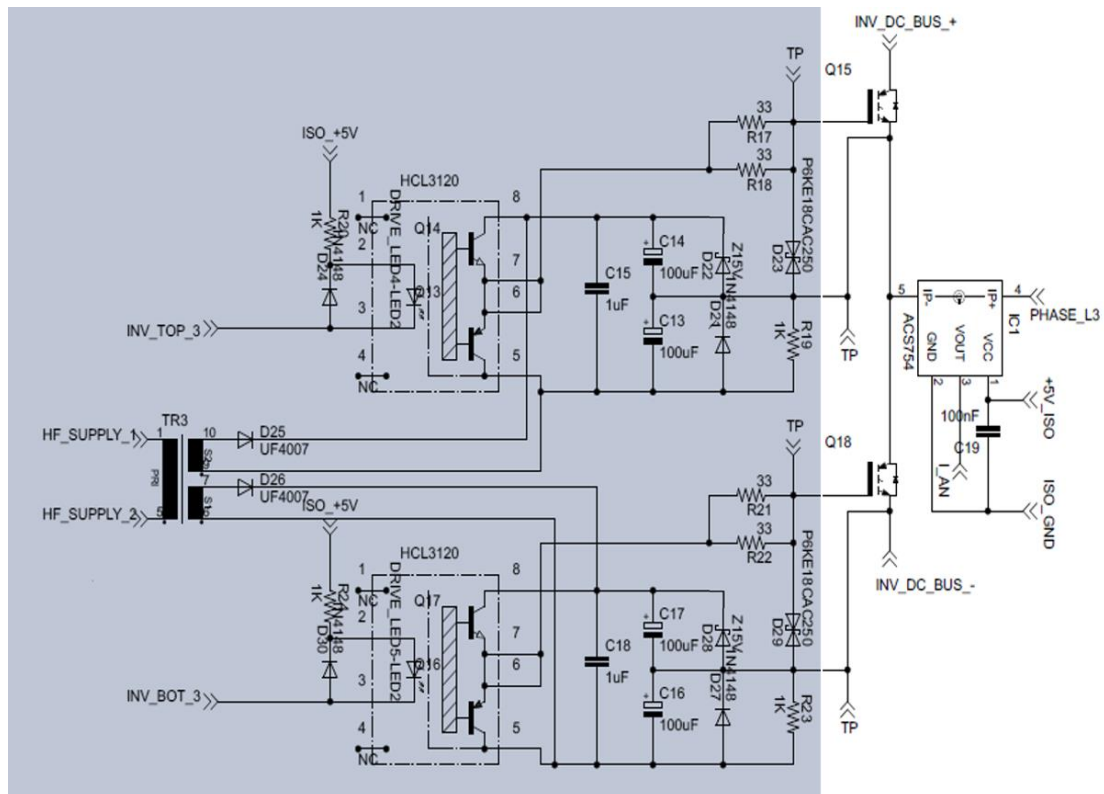


Σχήμα 4.5 Σχέδιο του πρώτου κλάδου του μετατροπέα DC/AC





Σχήμα 4.6 Σχέδιο του δεύτερου κλάδου του μετατροπέα DC/AC

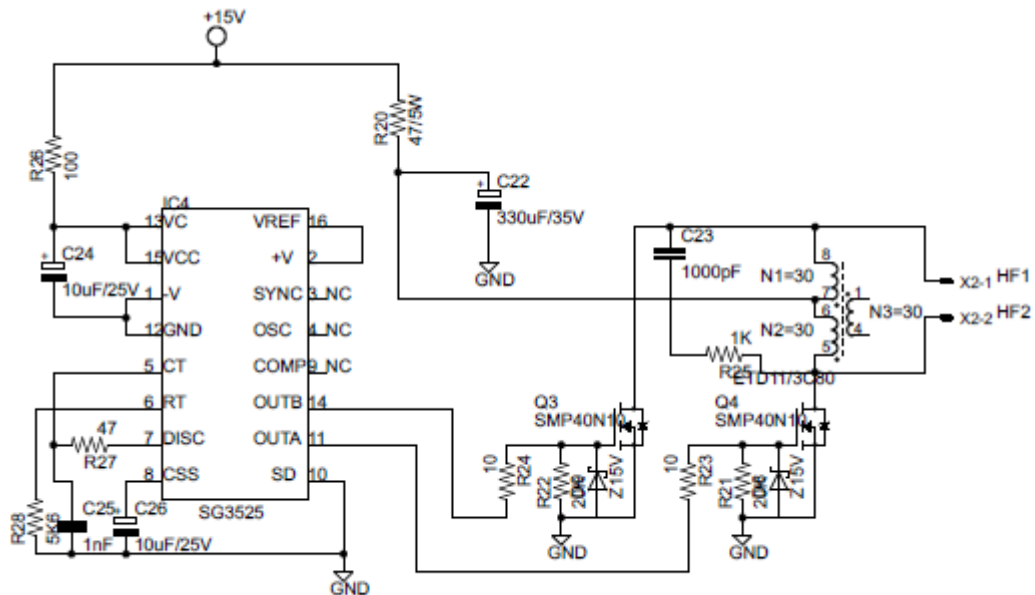


Σχήμα 4.7 Σχέδιο του τρίτου κλάδου του μετατροπέα DC/AC



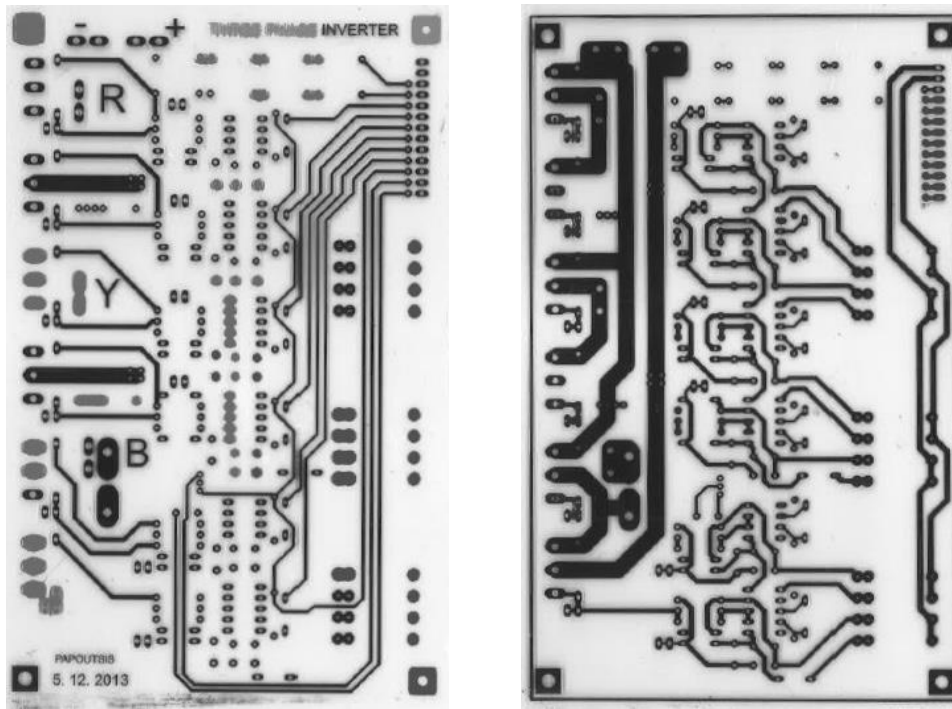
Στην έξοδο του τρίτου κλάδου του μετατροπέα (στο παραπάνω σχήμα 4.7), έχει τοποθετηθεί ένα μετρητικό ρεύματος ACS754<sup>[19]</sup> για την ένδειξη του ρεύματος που απεικονίζεται στην οθόνη LCD της μονάδας και διεπαφής του χρήστη. Τοποθετήθηκε μόνο ένα μετρητικό, διότι ως φορτίο τροφοδοτείται ένας κινητήρας που θεωρείται ως τριφασικό συμμετρικό φορτίο.

Για να επιτευχθεί η παραγωγή τάσης των κυκλωμάτων οδήγησης των IGBT, σχεδιάστηκε ένα τροφοδοτικό τετραγωνικών παλμών εναλλασσόμενης τάσης υψηλής συχνότητας για τη τροφοδοσία των βοηθητικών κυκλωμάτων οδήγησης των IGBT, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 4.8. Το τροφοδοτικό αυτό, λαμβάνει μια DC τάση 15V που προέρχεται από το κύκλωμα βοηθητικών τροφοδοσιών (σχήμα 4.13) και στην έξοδό του παράγει μια τετραγωνική εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας 15V μέσω των 2 MOSFET. Για να επιτευχθεί η μείωση όγκου, βάρους και κόστους θα πρέπει το τροφοδοτικό αυτό να λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα. Για αυτό, επιλέχθηκαν οι Μ/Σ (TR1, TR2, TR3) ο πυρήνας των οποίων αποτελείται από φερρίτη, ο οποίος με τη σειρά του μπορεί να δουλέψει σε υψηλές συχνότητες. Το τροφοδοτικό, βρίσκεται στην πλακέτα PCB των βοηθητικών τροφοδοσιών, απλώς για τη διευκόλυνση του αναγνώστη παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο.

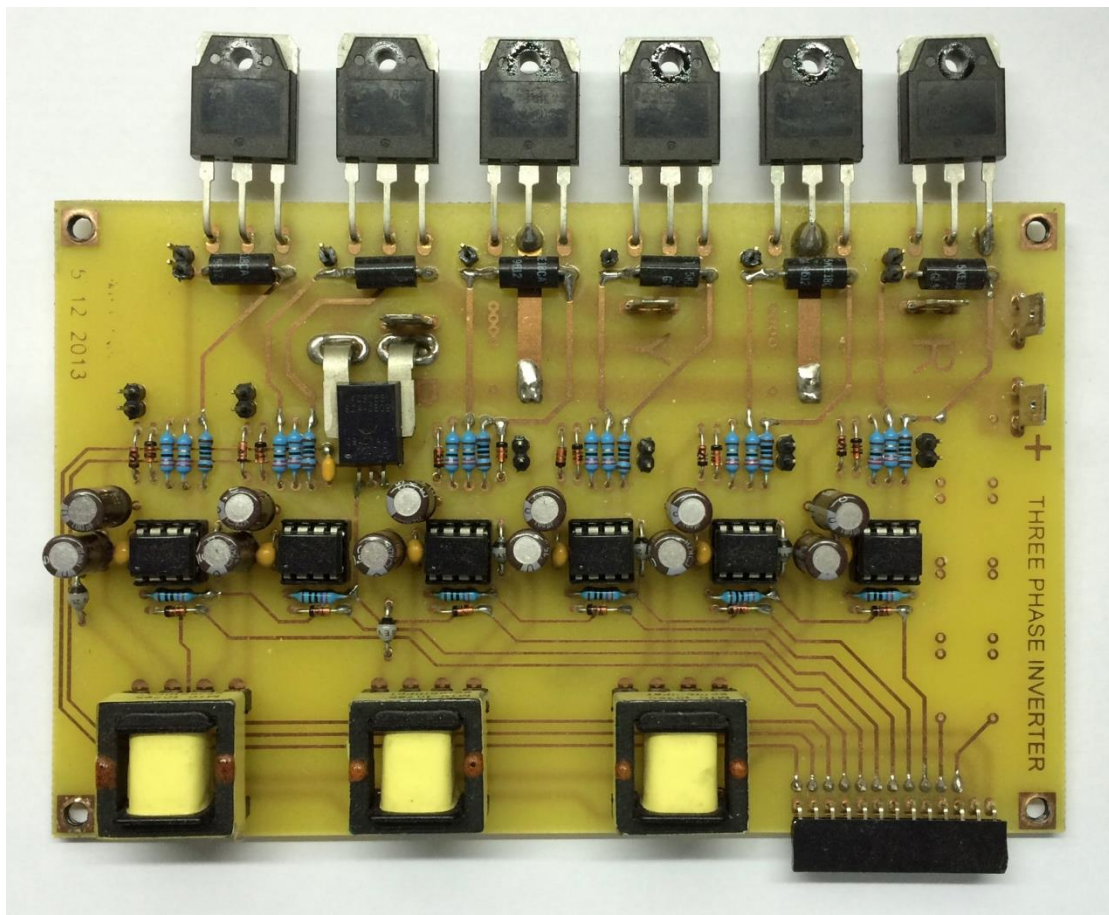


**Σχήμα 4.8** Σχέδιο παραγωγής τάσεων των κυκλωμάτων οδήγησης του μετατροπέα DC/AC

<sup>[19]</sup> Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο datasheet που είναι διαθέσιμο στο : <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/936281/ALLEGRO/ACS754/293/1/ACS754.html>



Σχήμα 4.9 PCB Πλακέτα του μετατροπέα DC/AC δύο όψεων



Σχήμα 4.10 Φωτογραφία του μετατροπέα DC/AC



### **4.3 Βοηθητικά κυκλώματα τροφοδοσίας**

Στην κατασκευή των τροφοδοτικών, πολύ σημαντικό ζήτημα αποτελεί η μείωση του όγκου, του χώρου, του βάρους και κυρίως του κόστους. Ένας τρόπος για να μειωθούν όλα τα παραπάνω είναι η κατασκευή τροφοδοτικών διακοπτικού τύπου (Switched Mode Power Supply). Ανάλογα με την ισχύ του φορτίου οι κύριες κατηγορίες των τροφοδοτικών κατανέμονται ως εξής: για 1-15W τοπολογία Forward, για 15-50W τοπολογία Fly-Back και για 50-1000W τοπολογία Push Pull, ενώ υπάρχουν και άλλα. Για το τροφοδοτικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ιδανικότερη τοπολογία ήταν η Fly-Back, καθώς πληροί στο μέγιστο όλα τα παραπάνω κριτήρια.

Για την λειτουργία του συστήματος απαιτούνται πρόσθετες βοηθητικές τροφοδοσίες 5V, 12V,  $\pm 15V$ . Για αυτές τις τροφοδοσίες σχεδιάστηκε ένα τροφοδοτικό Switched Mode Power Supply (SMPS) τοπολογίας Fly-Back.

Είναι γνωστό, ότι στην αγορά υπάρχουν έτοιμα ολοκληρωμένα κυκλώματα που παρέχουν όλο το πακέτο ελέγχου του τροφοδοτικού, προσθέτοντας λίγα μόνο εξαρτήματα. Για την κατασκευή του SMPS επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο UC3844N [16]. Το UC3844N μας παρέχει μια έξοδο PWM με λόγο κατάτμησης 50%.

Για την παραγωγή των παραπάνω βοηθητικών τάσεων σχεδιάστηκε ένας μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας ο οποίος έχει ένα πρωτεύον τύλιγμα και τρία δευτερεύοντα (5V, 12V,  $\pm 15V$ ).

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή είναι ETD44 με φερρίτη 3C80. Η επιλογή του πυρήνα (ο πυρήνας υπήρχε από άλλη κατασκευή) γίνεται με βάση την ισχύ και τη συχνότητα που πρόκειται να λειτουργήσει το τροφοδοτικό. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατασκευή του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας, στο σχήμα 4.11, η σχεδίαση του οποίου πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα EAGLE.







IGBT's driver supply:

$$V_{S1} = V_{O1} + V_{D1} = 15V + 1V = 16V$$

$$P_{S1} = V_{S1} \times I_{O1} = 16V \times 2A = 32W$$

Control unit supply:

$$V_{S2} = V_{O2} + V_{D2} = 7V + 1V = 8V$$

$$P_{S2} = V_{S2} \times I_{O2} = 8V \times 1A = 8W$$

SMPS unit supply:

$$V_{S3} = V_{O3} + V_{D3} = 15V + 1V = 16V$$

$$P_{S3} = V_{S3} \times I_{O3} = 16V \times 0.2A = 3.2W$$

Συνολική ισχύς εξόδου του μετασχηματιστή:  $P_{S,out} = 43.2W$

Βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή σε τοπολογία fly-back εκτιμάται στο 75%.

$$P_{P,in} = \frac{43.2W}{0.75} = 57.6W$$

Επιλέγουμε διακοπτική συχνότητα του SMPS  $f_{SW} = 80kHz$ . Επιλέγουμε αυτή τη συχνότητα, διότι γνωρίζουμε ότι κατά τη περιέλιξη των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή θα υπάρξει ανθρώπινο σφάλμα στην ομοιομορφία, με αποτέλεσμα να έχουμε αυξημένη αυτεπαγωγή διαρροής. Δηλαδή, αν επιλέγαμε υψηλότερη συχνότητα θα υπήρχε κίνδυνος να «βάζαμε» το Μ/Σ σε κορεσμό.

Ο πυκνωτής στην είσοδο του μετασχηματιστή για την εξομάλυνση της συνεχούς τάσης είναι  $C_{DC} = 100\mu F/400V$

Μέγιστος βαθμός χρήσης του fly-back μετατροπέα ορίζεται  $D_{MAX} = 45\%$

Συντελεστής κυμάτωσης τάσης εξόδου  $K_{RF} = 0.5$

Λόγος φόρτισης του πυκνωτή εισόδου είναι  $D_{CH} = 0.2$

Θεωρούμε εναλλασσόμενη τάση δικτύου  $230V \pm 10\%$ .

$$V_{DC,MIN} = \sqrt{2V_{AC,MIN}^2 - \frac{P_{P,in}(1 - D_{CH})}{C_{DC}f_{AC}}} = 277V$$



Από τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζεται η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος τυλίγματος:

$$L_P = \frac{(V_{DC,MIN} D_{MAX})^2}{2P_{P,in} f_{SW} K_{RF}} = 3.45mH$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή καθώς το ίδιο ρεύμα διαρρέει και το MOSFET.

$$\Delta I_{in} = \frac{V_{DC,MIN} D_{MAX}}{L_P f_{SW}} = 0.462A$$

Μέση τιμή του ρεύματος στο MOSFET

$$I_{EDC} = \frac{P_{P,in}}{V_{DC,MIN} D_{MAX}} = 0.462A$$

Μέγιστη τιμή του ρεύματος στο MOSFET

$$I_{DS,peak} = I_{EDC} + \frac{\Delta I_{in}}{2} = 0.693A$$

Από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πυρήνα του μετασχηματιστή έχουμε:

$$B_{SAT} = 0.3Tesla, A_e = 173mm^2$$

Υπολογισμός ελιγμάτων στο πρωτεύον τύλιγμα του Μ/Σ:

$$N_P = \frac{1.3L_P I_{DS,peak}}{\frac{B_{SAT}}{2} A_e} \times 10^6 = 112 \text{ ελίγματα}$$

Υπολογισμός των τυλιγμάτων στο δευτερεύον του Μ/Σ:

$$V_{RO} = \frac{D_{MAX}}{1 - D_{MAX}} \times V_{DC,MIN} = 227V$$

Όπου η τάση  $V_{RO}$  είναι η ανακλώμενη τάση από το δευτερεύον τύλιγμα του Μ/Σ:

$$N_{S1} = N_{S3} = \frac{V_{S1}}{V_{RO}} \times N_P = 8 \text{ ελίγματα}$$

$$N_{S2} = \frac{V_{S2}}{V_{RO}} \times N_P = 4 \text{ ελίγματα}$$

Η αντίδραση διαρροής εκτιμάται 2% της αντίδρασης του πρωτεύοντος τυλίγματος του Μ/Σ:

$$L_{LEAK} = 69\mu H$$

Η τάση  $V_{SN}$  στο snubber κύκλωμα του Μ/Σ εκτιμάται 2 φορές η ανακλώμενη τάση του δευτερεύοντος:

$$V_{SN} = 454V$$



Η ισχύς που απορροφά το snubber κύκλωμα είναι:

$$P_{SN} = \frac{1}{2} f_{SW} L_{LEAK} I_{DS,peak}^2 \frac{V_{SN}}{V_{SN} - V_{RO}} = 4.38W$$

$$R_{SN} = \frac{V_{SN}^2}{P_{SN}} \approx 47k\Omega$$

$$C_{SN} = \frac{V_{SN}}{0.1 f_{SW} R_{SN}} = 1.23nF$$

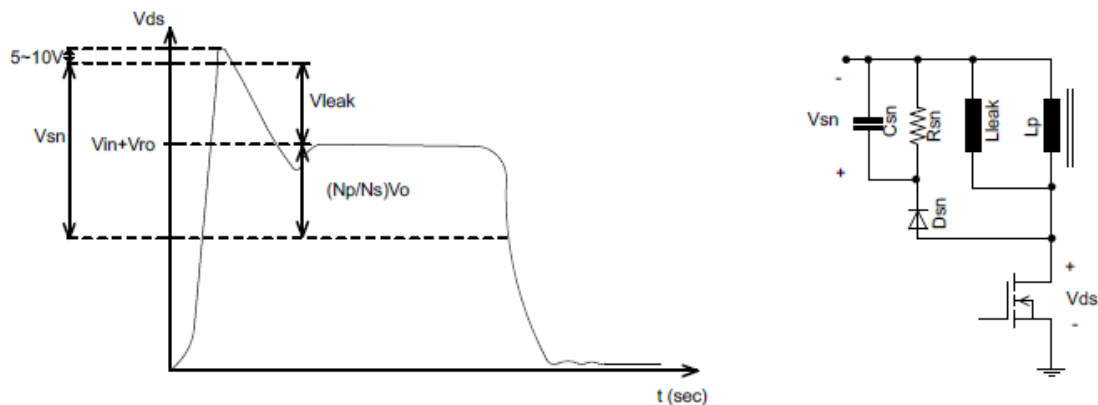
$$V_{SN,MAX} = \frac{V_{RO} + \sqrt{V_{RO}^2 + 2 f_{SW} R_{SN} L_{LEAK} I_{DS,peak}^2}}{2} = 437V$$

Μέγιστη τάση στο MOSFET είναι:

$$V_{DS,MAX} = V_{DC,MAX} + V_{SN,MAX} = 795V$$

Μέγιστο ρεύμα που διαρρέει το MOSFET είναι:

$$I_{DS,over} = 1.3 I_{DS,peak} = 0.852A$$



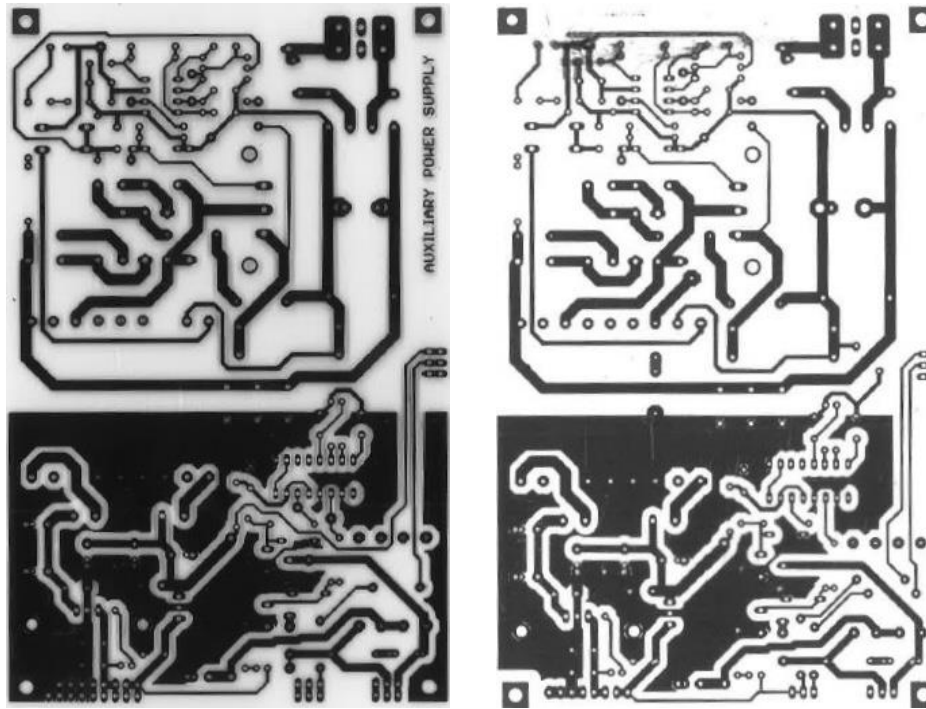
**Σχήμα 4.12** Τάση που εφαρμόζεται στο MOSFET εξαιτίας της αντίδρασης διαρροής<sup>[20]</sup>

Από τους παραπάνω υπολογισμούς έγιναν οι επιλογές των εξαρτημάτων για τον Μ/Σ, το MOSFET καθώς και το κύκλωμα snubber. Το υπόλοιπο κύκλωμα ελέγχου και παλμοδότησης του MOSFET προκύπτει από το datasheet του κατασκευαστή του ολοκληρωμένου UC3844N. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του SMPS τροφοδοτικού για τις ανάγκες της εργασίας.

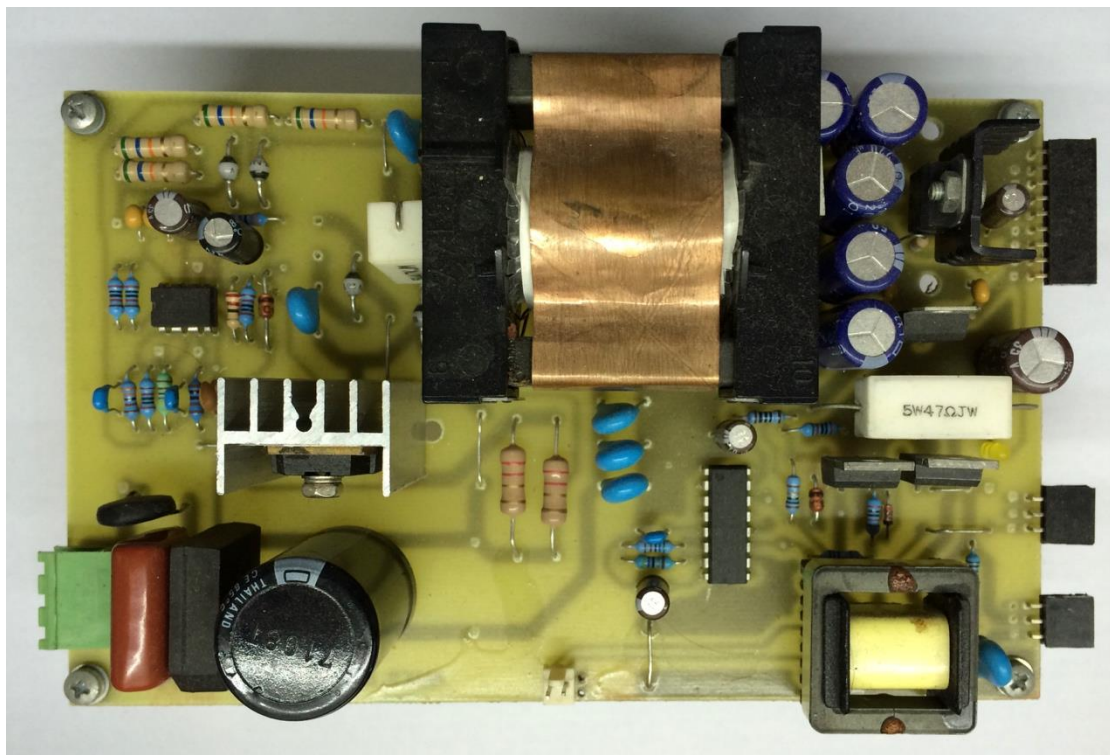
<sup>[20]</sup> Fairchild Semiconductor, Application note AN4137 από σελ. 8 σχήμα 10 και 11. Διαθέσιμο στο: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/844204/FAIRCHILD/AN4137/1958/4/AN4137.html>







Σχήμα 4.14 PCB Πλακέτα βοηθητικών κυκλωμάτων τροφοδοσίας δύο όψεων



Σχήμα 4.15 Φωτογραφία βοηθητικού τροφοδοτικού



Στην φωτογραφία της πλακέτας PCB των βοηθητικών τροφοδοσιών που απεικονίζεται, βρίσκεται και το κύκλωμα παραγωγής τάσεων των κυκλωμάτων οδήγησης του μετατροπέα DC/AC (σχήμα 4.8) που έχει αναλυθεί στο παραπάνω κεφάλαιο.

#### **4.4 Μονάδα ελέγχου και διεπαφής του χρήστη**

Η μονάδα ελέγχου αποτελείται από τον μικροελεγκτή (DSPIC30F4011), την LCD οθόνη 2x16 χαρακτήρων, ενδεικτικά LED, το μπουτόν χειρισμού και ολοκληρωμένο σειριακής επικοινωνίας με τοπικό H/Y.

Μέσα στο λογισμικό του μικροελεγκτή προγραμματίστηκε η διεπαφή του χρήστη από όπου μπορεί να πραγματοποιήσει τις εξής λειτουργίες.

- Επιλογή φοράς περιστροφής του κινητήρα
- Επιλογή του λόγου V/f
- Επιλογή εκκίνησης και παύσης του κινητήρα
- Επιλογή αύξησης και μείωσης των στροφών

Για την λειτουργία του συστήματος ο χρήστης καθοδηγείται από τα μηνύματα που εμφανίζονται στην οθόνη.

Κατά την εκκίνηση του συστήματος γίνεται προφόρτιση των πυκνωτών και στη συνέχεια η μονάδα ελέγχου δίνει εντολή στο ρελέ για να βραχυκυκλώσει τις αντιστάσεις προφόρτισης.

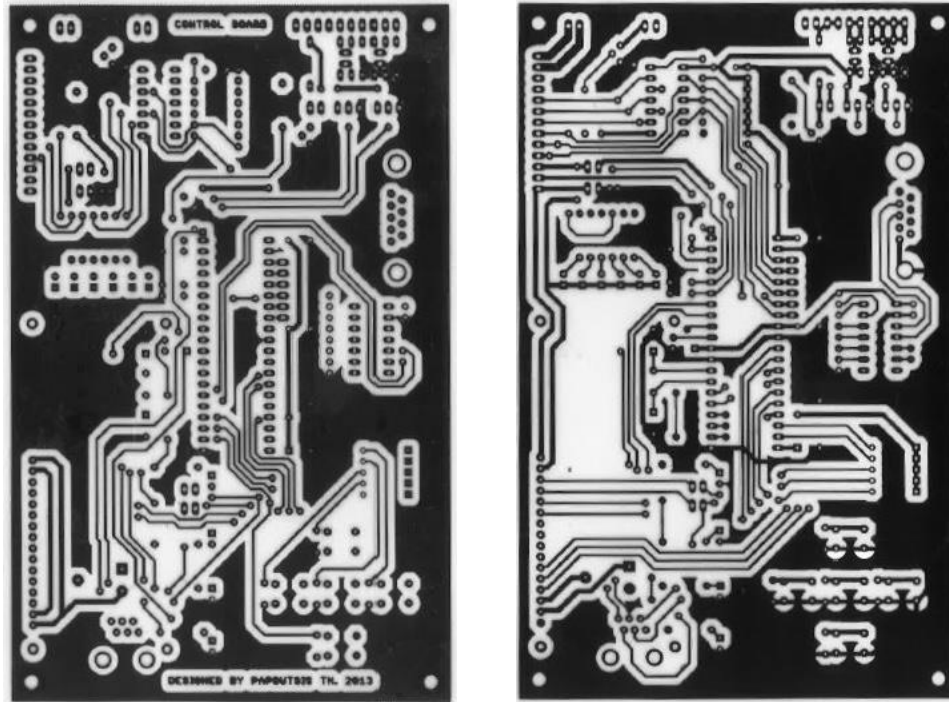
Όταν ο χρήστης ρυθμίσει τις παραμέτρους του και το σύστημα είναι έτοιμο για την εκκίνηση του κινητήρα, η μονάδα ελέγχου ενεργοποιεί τον ανεμιστήρα που είναι τοποθετημένος στην ψήκτρα του αντιστροφέα.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι γίνεται μέτρηση ρεύματος και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην LCD οθόνη του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα.

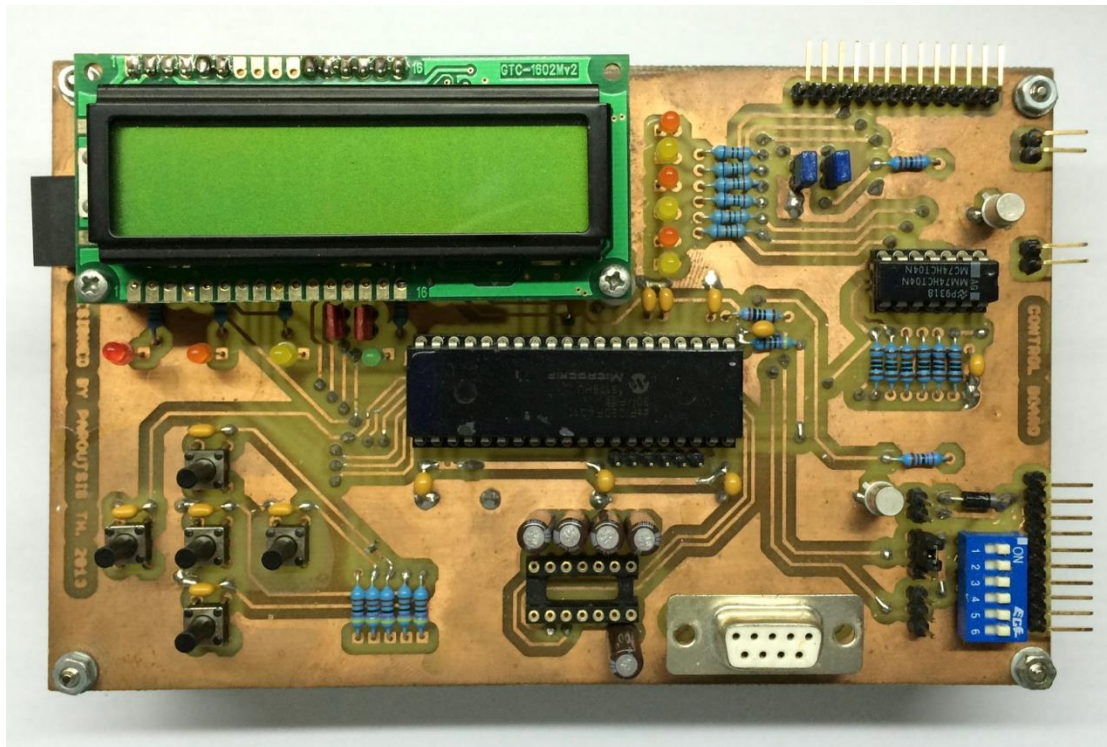
Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έγινε συνδυαστικά με γλώσσα προγραμματισμού ASSEMBLY και C, διότι κάποια σημεία στον κώδικα θα πρέπει να εκτελεστούν πολύ γρήγορα, όπως η παραγωγή παλμών SPWM και άλλα σχετικά πιο αργά όπως η διεπαφή του χρήστη.







Σχήμα 4.17 PCB Πλακέτα μονάδας ελέγχου και διεπαφής του χρήστη δύο όψεων

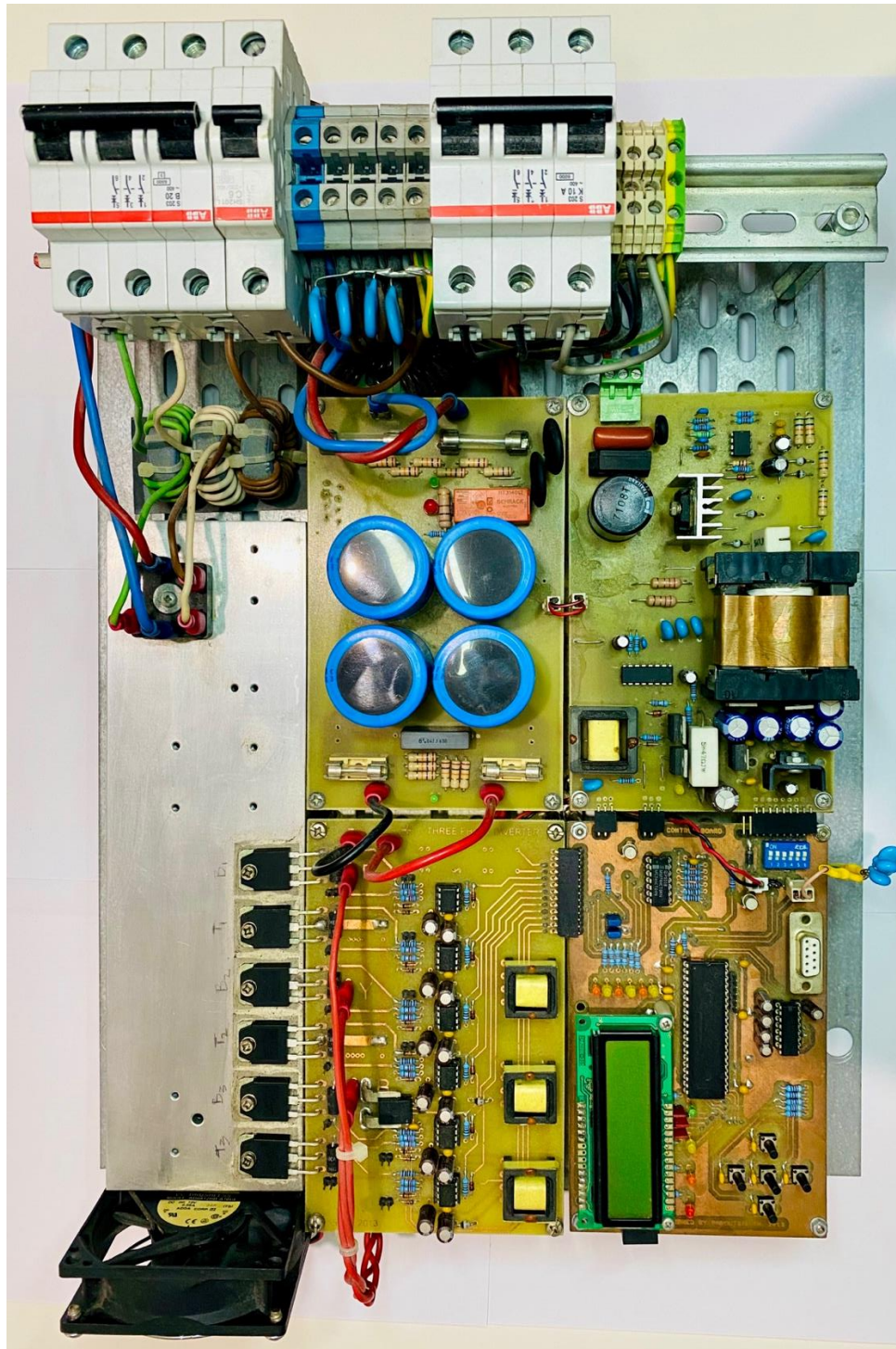


Σχήμα 4.18 Φωτογραφία της μονάδας ελέγχου και διεπαφής του χρήστη



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρακάτω φωτογραφία απεικονίζεται ο μετατροπέας AC/DC/AC που κατασκευάστηκε.

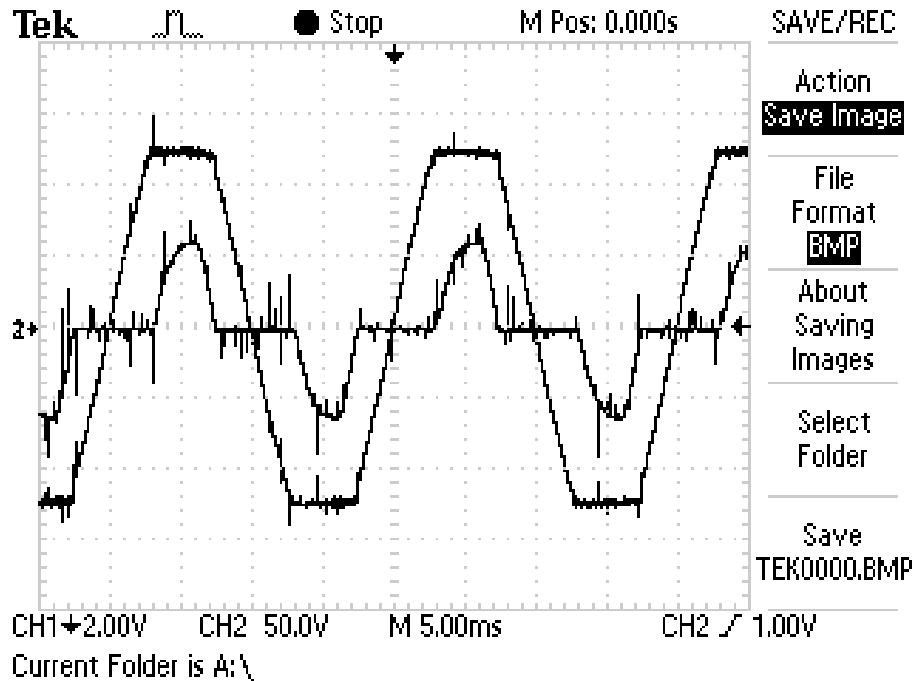


Σχήμα 5.1 Φωτογραφία του μετατροπέα AC/DC/AC που κατασκευάστηκε



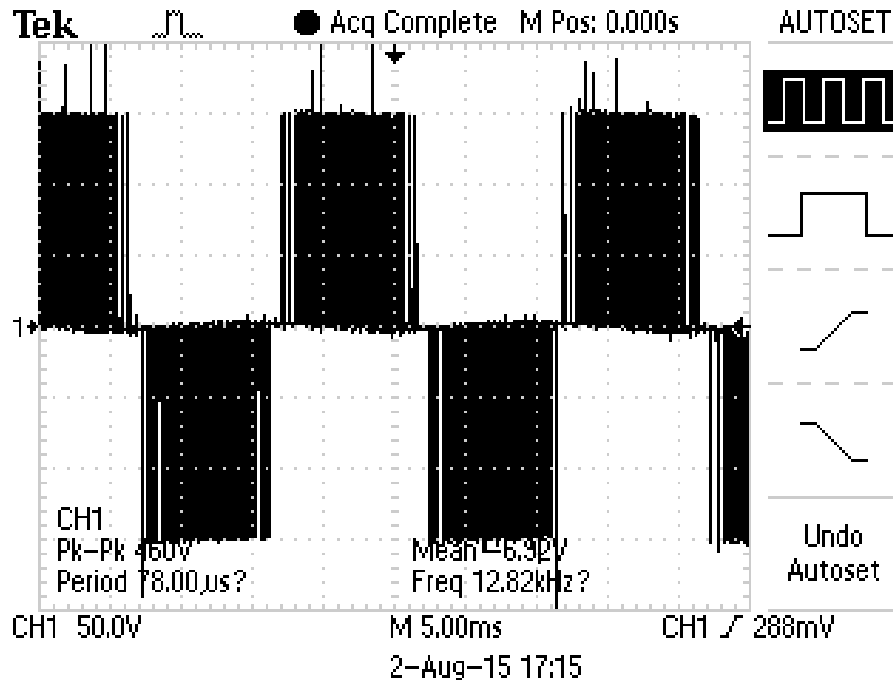


Στο σχήμα 5.2, απεικονίζονται οι κυματομορφές του ρεύματος εισόδου (CH1) και της φασικής τάσης εισόδου της ανορθωτικής διάταξης (CH2). Φαίνεται, πως στην μορφή του ρεύματος υπάρχουν κάποιες αρμονικές.

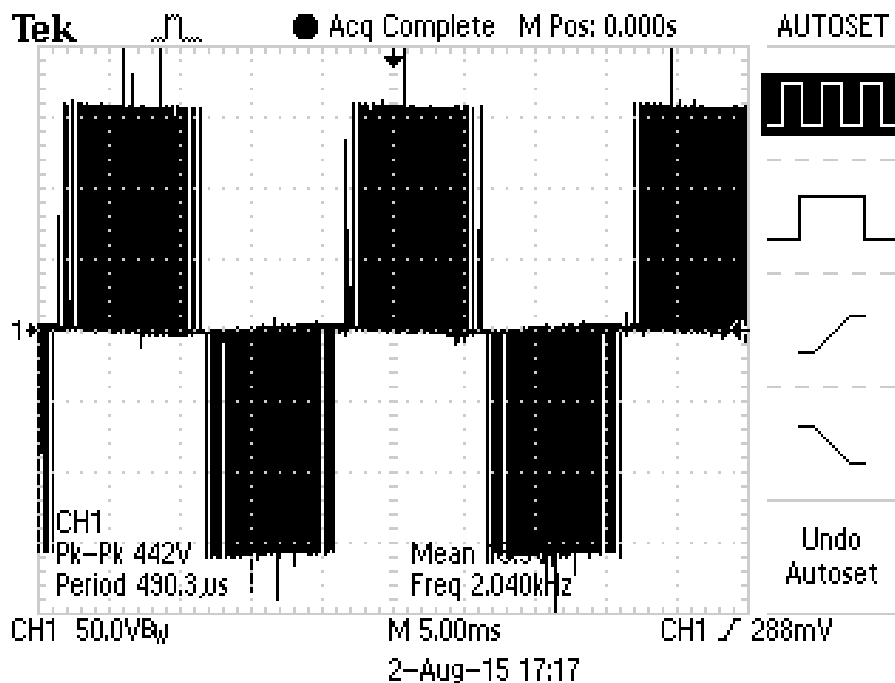


Σχήμα 5.2 Φασική τάση και ρεύμα εισόδου της ανορθωτικής διάταξης

Η μέγιστη θεμελιώδης συχνότητα εξόδου του αντιστροφέα είναι 60Hz. Παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικά κυματομορφές για διάφορες συχνότητες. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.3, απεικονίζεται η πολική τάση του αντιστροφέα για θεμελιώδη συχνότητα 51.5Hz, και στο σχήμα 5.4, η πολική τάση του αντιστροφέα για θεμελιώδη συχνότητα 45.8Hz. Στο σχήμα 5.5, παρουσιάζεται η πολική τάση στην έξοδο του αντιστροφέα (CH1) και το φασικό ρεύμα (CH2) για ενδεικτικό ωμικό-επαγωγικό φορτίο για θεμελιώδη συχνότητα 15Hz. Εδώ φαίνεται, πως η μορφή του ρεύματος είναι ημίτονο, ενώ η μορφή της τάσης είναι τετραγωνική. Σε όλα τα σχήματα εμφανίζονται παράσιτα τα οποία δεν υπάρχουν στο πραγματικό κύκλωμα. Αυτά οφείλονται στη λειτουργία του παλμογράφου.

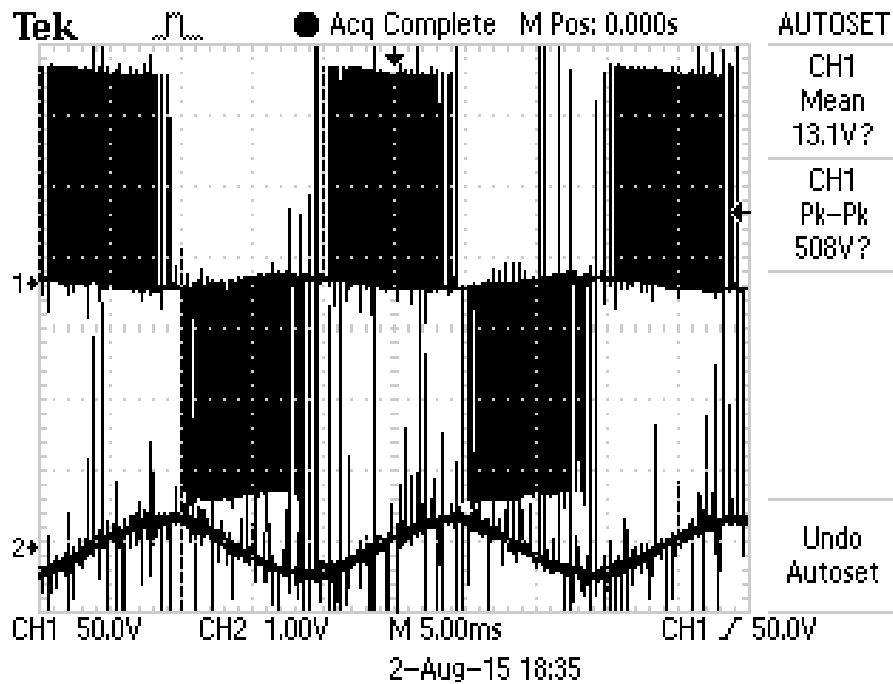


Σχήμα 5.3 Πολική τάση του αντιστροφέα στη θεμελιώδη συχνότητα 51.5Hz



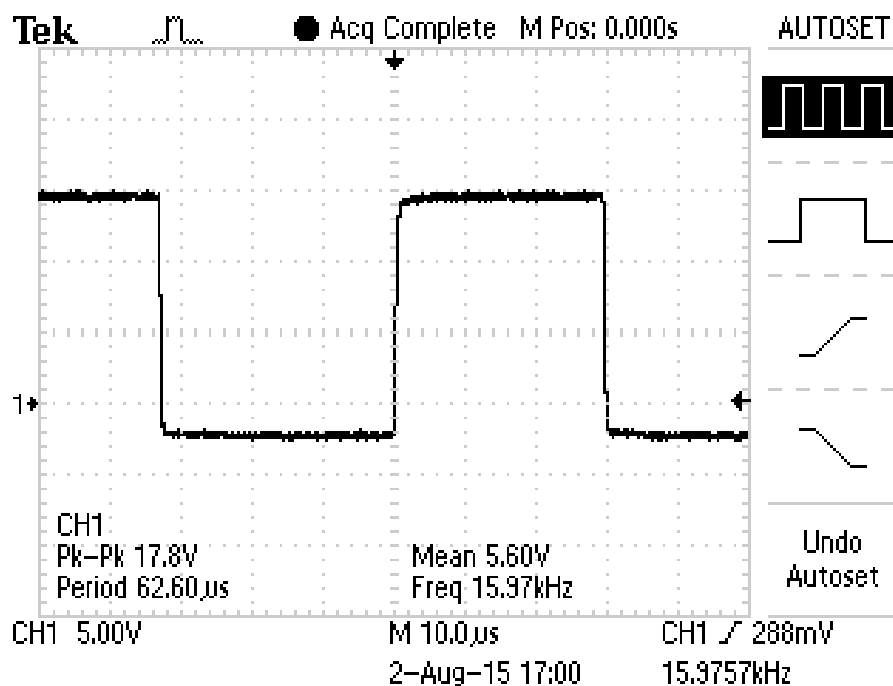
Σχήμα 5.4 Πολική τάση του αντιστροφέα στη θεμελιώδη συχνότητα 45.8Hz





Σχήμα 5.5 Πολική τάση και φασικό ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα με ωμικό-επαγωγικό φορτίο

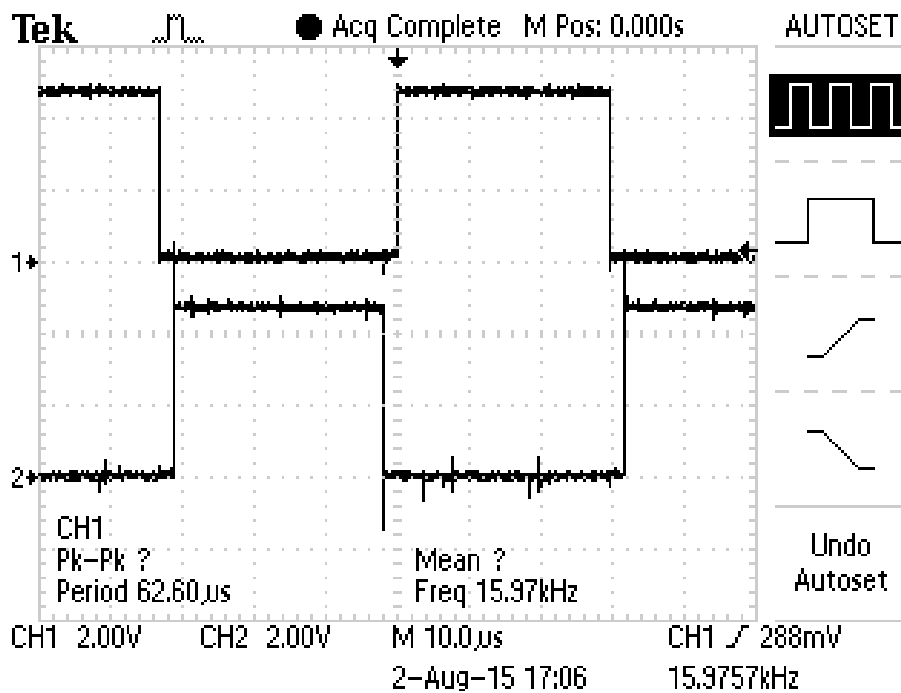
Στο σχήμα 5.6, απεικονίζεται ο παλμός τάσης που εφαρμόζεται στην πύλη ενός IGBT. Διαπιστώνεται ότι η έναυση του IGBT επιτυγχάνεται με 15V και η σβέση του με -2,5V, ενώ η διακοπτική συχνότητα είναι 16kHz.



Σχήμα 5.6 Παλμός τάσης που εφαρμόζεται στην πύλη του IGBT



Τέλος στο σχήμα 5.7, παρουσιάζονται οι 2 παλμοί που εφαρμόζονται στις πύλες των IGBT που ανήκουν στον ίδιο κλάδο του αντιστροφέα. Η διακοπτική συχνότητα είναι στα 16kHz και γίνεται αντιληπτό ότι ο νεκρός χρόνος (Dead Time) είναι 1μsec. Σύμφωνα με το datasheet του IGBT το delay time και το fall time είναι 30nsec στα 16,5Ω αντίσταση πύλης ( $R_G$ ) και 15V τάση πύλης. Κατ' αυτόν τον τρόπο δόθηκε ένα περιθώριο μεγαλύτερο του διπλάσιου σε περίπτωση σχεδιαστικού λάθους.



**Σχήμα 5.7** Δύο παλμοί που εφαρμόζονται στις πύλες του IGBT που ανήκουν στον ίδιο κλάδο του αντιστροφέα δίνοντας έμφαση στο Dead Time



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Στέφανος Ν. Μανιάς, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Εκδόσεις Συμμεών, 2014
- [2] Στέφανος Ν. Μανιάς, Συστήματα Οδήγησης Ηλεκτρικών Κινητήρων, Εκδόσεις Τζιόλα, 2002
- [3] Ned Mohan, Tore A. Undeland, William P. Robbins, Power Electronics, Converter, Applications and Design, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley and Sons, 2003.
- [4] Σπυρίδων Ν. Βασιλακόπουλος, Ηλεκτρικές Μηχανές, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1993
- [5] Arthur Eugene Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umans, Electric Machinery, 6η Έκδοση, McGraw-Hill Higher Education, 2003
- [6] Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές, 4η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα
- [7] Δρ Μάριος Χατζηπροκοπίου, Ηλεκτρονικά Ισχύος και Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά, 2004
- [8] Bimal K. Bose, Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends, 2η Έκδοση, AP, 2006
- [9] Γαντζούδης Σωτήρης, Λαγουδάκος Μιχαήλ, Μπινιάρης Αθανάσιος, Ηλεκτρικές Μηχανές, Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια, Τομέας Ηλεκτρολογίας, Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα
- [10] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [11] Microchip dsPIC30F4011/4012 Data Sheet. Microchip Technology Inc. 2010. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70135G.pdf>
- [12] International Rectifier, Three Phase Bridge, MT Series, Power Modules Data Sheet. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/92063/IRF/36MT120.html>
- [13] Fairchild Semiconductor FGA25N120ANTD Data Sheet. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/104921/FAIRCHILD/FGA25N120ANTD.html>
- [14] AVAGO Technologies, HCPL3120, Data Sheet. <https://docs.broadcom.com/doc/AV02-0161EN>
- [15] Fairchild Semiconductor, Application note AN4137 Data Sheet. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/844204/FAIRCHILD/AN4137/1958/4/AN4137.html>
- [16] UC3844N Data Sheet. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3844.pdf?ts=1612618924099>



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[17] Fairchild Semiconductor, Transformer Design Consideration for Offline Flyback Converter Using Fairchild Power Switch (FPSTM) AN4140 Data Sheet.

<https://datasheetspdf.com/datasheet/AN-4140.html>

[18] Fairchild Semiconductor, Application Note AN4147. Design Guidelines for RCD Snubber of Flyback.

<https://cdn.hackaday.io/files/1709627314438208/AN%204147.pdf>

[19] STMicroelectronics, Application Note AN4150, Power MOSFET technology gate current needs in a synchronous buck converter.

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/695125/STMICROELECTRONICS/AN4150.html>



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**  
**ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ**  
**HEADER FILES**

Παρακάτω θα βρείτε το πρόγραμμα του μικροεπεξεργαστή.

```
//bin2dec.h
void bin2dec(unsigned long int int_number);

//functions.h
extern void Modulation(void);
extern void Current_Display(void);

// Initialize.h
void INTx_Init(void);
void Init_IO_Ports(void);
void Init_ADC(void);
void Init_PWM(void);
void Init_System(void);

//ISR_Functions.h
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _PWMInterrupt (void);
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _INT0Interrupt(void);
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _INT1Interrupt(void);
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _INT2Interrupt(void);
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _ADCInterrupt (void);

//lcd.h
extern void lcd_write(unsigned char);
extern void lcd_clear(void);
extern void lcd_puts(const char * s);
extern void lcd_goto(unsigned char pos);
extern void lcd_init(void);
extern void lcd_putchar(char);
#define lcd_cursor(x) lcd_write(((x)&0x7F)|0x80)

//Menu.h
void Menu_Parameters(void);
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
void Setup_VF_Ratio(void);

void Motor_Direction_Select(void);

void Motor_Run_Select(void);

void Motor_Run_Display(void);

//Variables.h

extern int Frequency;

extern int Amplitude;

extern int Forward;

extern int Phase;

extern int CURR_VALUE;

int CURR_MAX;

extern int VF_Temp;

extern int Freq_Temp;

unsigned char MENU_COUNTER = 0;

unsigned char RUN_FLAG = 0;

unsigned char PROG_FLAG = 0;

int FREQ_ARRAY[] = {0,80,160,244,328,408,492,572,656,736,820,900,984};

int V_F_RATIO_ARRAY[] = {0, 64, 128, 192, 256, 320, 384, 448, 512, 576, 640, 704, 768,832,896,960,1023};

int FREQ_DISP[] = {0,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60};

int VF_DISP[] = {0,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80};

unsigned char FREQ_ARRAY_INDEX = 0;

unsigned char V_F_RATIO_ARRAY_INDEX = 0;

unsigned int Ia = 0;

char ascii_number[6];

//definitions.h

#define PWM_Scaling 230

#define MENU_MAX_COUNTER 3

#define MENU_MIN_COUNTER 0

#define FREQ_ARRAY_INDEX_MAX 10 //50Hz (0.244*205)

#define FREQ_ARRAY_INDEX_MIN 0

#define V_F_RATIO_ARRAY_INDEX_MAX 16

#define V_F_RATIO_ARRAY_INDEX_MIN 0
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
//*****  
  
#define UP_BUTTON          PORTEbits.RE8    //(INT0)  
  
#define DOWN_BUTTON       PORTDbits.RD0    //(INT1)  
  
#define RUN_STOP_BUTTON   PORTDbits.RD1    //(INT2)  
  
#define ENTER_BUTTON      PORTDbits.RD2  
  
#define ESC_BUTTON        PORTDbits.RD3  
  
#define STOP_LED          LATBbits.LATB7  
  
#define RUN_LED           LATBbits.LATB8  
  
#define FORWARD_LED      LATBbits.LATB6  
  
#define REVERSE_LED      LATBbits.LATB5  
  
#define CHARGE_RELAY     LATBbits.LATB2  
  
#define FAN                LATBbits.LATB  
  
..... PORTB .....
```

```
#define CURRENT_ANALOG    PORTBbits.RB0  
  
#define SPARE_ANALOG1     PORTBbits.RB3  
  
#define SPARE_ANALOG2     PORTBbits.RB4  
  
..... LCD .....
```

```
#define LCD_D4            PORTFbits.LATF0  
  
#define LCD_D5            PORTFbits.LATF1  
  
#define LCD_D6            PORTFbits.LATF2  
  
#define LCD_D7            PORTFbits.LATF3  
  
#define LCD_EN            PORTFbits.LATF4  
  
#define LCD_RW            PORTFbits.LATF5  
  
#define LCD_RS            PORTFbits.LATF6  
  
..... PWM .....
```

```
#define PWM_1H            PORTEbits.LATE0  
  
#define PWM_1L            PORTEbits.LATE1  
  
#define PWM_2H            PORTEbits.LATE2  
  
#define PWM_2L            PORTEbits.LATE3  
  
#define PWM_3H            PORTEbits.LATE4  
  
#define PWM_3L            PORTEbits.LATE5  
  
..... UART 1 ALT .....
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
#define SERIAL_RX          PORTCbits.RC14
#define SERIAL_TX          PORTCbits.LATC13
*/
#define XT_FREQ    7380000          //On-board Crystal frequency
#define PLLMODE    4                //On-chip PLL setting
#define FCY        7380000         //Instruction Cycle Frequency
```

## SOURCE FILES

```
#include "bin2dec.h"

extern char ascii_number[6];

void bin2dec(unsigned long int int_number)
{
    ascii_number[0] = 0;          //ten-thousands
    values          ascii_number[1] = 0;          //thousands          //reset
                    ascii_number[2] = 0;          //hundreds
                    ascii_number[3] = 0;          //tenth
                    ascii_number[4] = 0;          //ones
                    ascii_number[5] = '\0';
    while (int_number > 0x0)
    {
        if (int_number > 0x270F)
        {
            ascii_number[0]++;
            int_number -= 0x2710;
        }
        else if (int_number > 0x03E7 && int_number <= 0x270F)
        {
            if (ascii_number[1] < 9)
            {
                ascii_number[1]++;
            }
            else
            {
                ascii_number[0]++;
            }
        }
    }
}
```





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        ascii_number[1]=0;
    }
    int_number -= 0x3E8; }
else if(int_number > 0x63 && int_number <= 0x3E7)
{ if (ascii_number[2] < 9)
    { ascii_number[2]++; }
else
{ ascii_number[2] = 0;
  if (ascii_number[1] < 9)
    { ascii_number[1]++;
      }
    else
    { ascii_number[0]++;
      ascii_number[1]=0; } }
  int_number -=0x64; }
else if(int_number > 0x9 && int_number <= 0x63)
{ if (ascii_number[3]<9)
    { ascii_number[3]++; }
else
{ ascii_number[3] = 0;
  if (ascii_number[2] < 9)
    { ascii_number[2]++; }
    else
    { ascii_number[2] = 0;
      if (ascii_number[1] < 9)
        { ascii_number[1]++; }
        else
        { ascii_number[0]++;
          ascii_number[1]=0; }
      }
    }
  }
  int_number -= 0xA;
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
    }
    else if(int_number >= 0x1 && int_number <= 0x9)
    { if (ascii_number[4] < 9)
      { ascii_number[4]++;
      }
      else
      { ascii_number[4] = 0;
      if (ascii_number[3] < 9)
        { ascii_number[3]++; }
        else
        { ascii_number[3] = 0;
        if (ascii_number[2] < 9)
          { ascii_number[2]++; }
          else
          { ascii_number[2] = 0;
          if (ascii_number[1] < 9)
            {
              ascii_number[1]++; }
            else
            { ascii_number[0]++;
            ascii_number[1]=0; }
            }
          }
        }
      }
      int_number -= 1;
    }
}

ascii_number[0] += 0x30;          //Store all conversions in ASCII form
ascii_number[1] += 0x30;
ascii_number[2] += 0x30;
ascii_number[3] += 0x30;
ascii_number[4] += 0x30;
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
}  
  
// Initialize.c  
  
#include <p30fxxxx.h>  
  
#include "Definitions.h"  
  
#include "Variables.h"  
  
#include "lcd.h"  
  
#include "bin2dec.h"  
  
extern int Amplitude;  
  
extern int Frequency;  
  
extern int Phase;  
  
extern int CURR_VALUE;  
  
extern int CURR_MAX;  
  
extern int VF_Temp;  
  
extern int Freq_Temp;  
  
extern unsigned char RUN_FLAG;  
  
extern unsigned char PROG_FLAG;  
  
extern unsigned char MENU_COUNTER;  
  
extern int FREQ_ARRAY[];  
  
extern int V_F_RATIO_ARRAY[];  
  
extern int FREQ_DISP[];  
  
extern int VF_DISP[];  
  
unsigned char FREQ_ARRAY_INDEX;  
  
unsigned char V_F_RATIO_ARRAY_INDEX ;  
  
extern char ascii_number[];  
  
extern unsigned int Ia;  
  
void Init_IO_Ports(void)  
  
{  
  
    TRISE = 0x0100;  
  
    LATE = 0x0000;  
  
    TRISF = 0x0000;  
  
    TRISB = 0x0009;  
  
    TRISCbits.TRISC13 = 0;
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
TRISCbits.TRISC14 = 0;

TRISDbits.TRISD0 = 1;

TRISDbits.TRISD1 = 1;

TRISDbits.TRISD2 = 1;

TRISDbits.TRISD3 = 1;

TRISFbits.TRISF0 = 0;

TRISFbits.TRISF1 = 0;

TRISFbits.TRISF2 = 0;

TRISFbits.TRISF3 = 0;

TRISFbits.TRISF4 = 0;

TRISFbits.TRISF5 = 0;

TRISFbits.TRISF6 = 0;

}

void Init_ADC(void)/******

{

    ADCON2 = 0x0404;

    ADCON3 = 0x0003;

    ADCHS = 0x0000;

    ADPCFG = 0xFFF6;

    ADCSSL = 0x0009;

    ADCON1 = 0x8066;

    IFS0bits.ADIF = 0;

    IEC0bits.ADIE = 1;

}

void Init_PWM(void)

{

    PWMCON1 = 0x0077;

    DTCON1 = 0x000F;

    PTPER = PWM_Scaling;

    SEVTCMP = 0x0001;

    PWMCON2 = 0x0F00;

    PTCAN = 0x8002;

    IFS2bits.PWMIF = 0;
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        IEC2bits.PWMIE = 1;

        LATE = 0x0000;

    }

void INTx_Init(void)

{
    IPC0bits.INT0IP0 = 1;
    IPC0bits.INT0IP1 = 0;
    IPC0bits.INT0IP2 = 0;
    IPC4bits.INT1IP0 = 0;
    IPC4bits.INT1IP1 = 1;
    IPC4bits.INT1IP2 = 0;
    IPC5bits.INT2IP0 = 1;
    IPC5bits.INT2IP1 = 1;
    IPC5bits.INT2IP2 = 0;
    INTCON2 = 0x0007;
    IFS0bits.INT0IF = 0;
    IEC0bits.INT0IE = 1;
    IFS1bits.INT1IF = 0;
    IEC1bits.INT1IE = 1;
    IFS1bits.INT2IF = 0;
    IEC1bits.INT2IE = 1;
} void Init_System(void)

{
    Frequency = 0x0000;
    Amplitude = 0x0000;
    Phase = 0x0000;
    Forward = 0x0000;
    FREQ_ARRAY_INDEX = 0;
    V_F_RATIO_ARRAY_INDEX = 0;
    CURR_VALUE = 0;
    CURR_MAX = 0;
    VF_Temp = 0;
    Freq_Temp = 0;
    MENU_COUNTER = 0;
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
RUN_FLAG = 0;

PROG_FLAG = 0;

STOP_LED = 1;

RUN_LED = 0;

FORWARD_LED = 0;

REVERSE_LED = 1;

CHARGE_RELAY = 0;

} //ISR_Functions.c

#include "Definitions.h"

#include <p30fxxx.h>

#include <libpic30.h>

#include "lcd.h"

#include "bin2dec.h"

#include "Functions.h"

#include "ISR_Functions.h"

extern int Frequency;

extern int Amplitude;

extern int Phase;

extern int Forward;

extern int CURR_VALUE;

extern int CURR_MAX;

extern int VF_Temp;

extern int Freq_Temp;

extern unsigned char RUN_FLAG;

extern unsigned char PROG_FLAG;

extern unsigned char MENU_COUNTER;

extern int FREQ_ARRAY[];

extern int V_F_RATIO_ARRAY[];

extern int FREQ_DISP[];

extern int VF_DISP[];

extern unsigned char FREQ_ARRAY_INDEX;

extern unsigned char V_F_RATIO_ARRAY_INDEX;
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
extern char ascii_number[];

extern unsigned int Ia;

unsigned int curr_per_adc = 319;

//=====

void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _PWMInterrupt (void)

{

    IFS2bits.PWMIF = 0;

    Modulation();

    return;

}

//=====

void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _INT0Interrupt(void)           // up button

{

    IFS0bits.INT0IF = 0;

    __delay_ms(200);                // Wait !! maybe the signal was spike

    if(UP_BUTTON == 0)                // If signal was real

    {

        if((MENU_COUNTER == 3) && (RUN_FLAG == 1))

        {

            if(FREQ_ARRAY_INDEX >= FREQ_ARRAY_INDEX_MAX)

                FREQ_ARRAY_INDEX = FREQ_ARRAY_INDEX_MAX;

            else

                FREQ_ARRAY_INDEX++;

            Freq_Temp = FREQ_ARRAY[FREQ_ARRAY_INDEX];

            return;

        }

        if((MENU_COUNTER == 0) && (RUN_FLAG == 0))

        {

            if(V_F_RATIO_ARRAY_INDEX == V_F_RATIO_ARRAY_INDEX_MAX)

                V_F_RATIO_ARRAY_INDEX = V_F_RATIO_ARRAY_INDEX_MAX;

            else

                V_F_RATIO_ARRAY_INDEX++;

        }

    }

}
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
VF_Temp = V_F_RATIO_ARRAY[V_F_RATIO_ARRAY_INDEX];

return;

}

if((MENU_COUNTER == 1) && (RUN_FLAG == 0))

{

    if(Forward == 0x0000)

        Forward = 0x0001;

    else

        Forward = 0x0001;

    FORWARD_LED = 1;

    REVERSE_LED = 0;

    return;

}

}

else // If signal was spike

return;

}

//=====

void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _INT1Interrupt(void) // down button

{

    IFS1bits.INT1IF = 0;

    __delay_ms(200); // Wait !! maybe the signal was spike

    if(DOWN_BUTTON == 0) // If signal was real

    {

        if((MENU_COUNTER == 3) && (RUN_FLAG == 1))

        {

            if(FREQ_ARRAY_INDEX <= FREQ_ARRAY_INDEX_MIN)

                FREQ_ARRAY_INDEX = FREQ_ARRAY_INDEX_MIN;

            else

                FREQ_ARRAY_INDEX--;

            Freq_Temp = FREQ_ARRAY[FREQ_ARRAY_INDEX];

            return;

        }

    }

}
```





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
    }
    if((MENU_COUNTER == 0) && (RUN_FLAG == 0))
    {
        if(V_F_RATIO_ARRAY_INDEX == V_F_RATIO_ARRAY_INDEX_MIN)
            V_F_RATIO_ARRAY_INDEX = V_F_RATIO_ARRAY_INDEX_MIN;
        else
            V_F_RATIO_ARRAY_INDEX--;
        VF_Temp = V_F_RATIO_ARRAY[V_F_RATIO_ARRAY_INDEX];
        return;
    }
    if((MENU_COUNTER == 1) && (RUN_FLAG == 0))
    {
        if(Forward == 0x0001)
            Forward = 0x0000;
        else
            Forward = 0x0000;
        FORWARD_LED = 0;
        REVERSE_LED = 1;
        return;
    }
}
else // If signal was spike
    return;
}
//=====
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _INT2Interrupt(void) // run_stop button
{
    IFS1bits.INT2IF = 0;
    if((PROG_FLAG == 1) && (RUN_FLAG == 0) && (MENU_COUNTER == 2))
    {
        PROG_FLAG = 0;
        MENU_COUNTER = 3;
    }
}
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        RUN_LED = 1;

        STOP_LED = 0;

        RUN_FLAG = 1;

        FAN = 1;

        return;

    }

    if((PROG_FLAG == 0) && (RUN_FLAG == 1) && (MENU_COUNTER == 3))

    {

        PROG_FLAG = 1;

        MENU_COUNTER = 0;

        STOP_LED = 1;

        RUN_LED = 0;

        RUN_FLAG = 0;

        Frequency = 0;

        Amplitude = 0;

        Phase = 0;

        FREQ_ARRAY_INDEX = 0;

        CURR_MAX = 0;

        CURR_VALUE = 0;

        Freq_Temp = 0;

        FAN = 0;

        return;

    }

}

//=====

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

{

    IFS0bits.ADIF = 0;

    Current_Display();

    curr_per_adc--;

    if(curr_per_adc == 0)

    {
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
CURR_MAX = CURR_VALUE;

CURR_VALUE = 0;

curr_per_adc = 319;

    }

}

/*    lcd.c    */

#include "Definitions.h"

#include <p30Fxxx.h>

#include <libpic30.h>

#include "lcd.h"

#define LCD_RS LATFbits.LATF6    //RB4    DSPIC30F2010

#define LCD_RW LATFbits.LATF5    //RB3    DSPIC30F2010

#define LCD_EN LATFbits.LATF4    //RB2    DSPIC30F2010

#define LCD_DATA    LATF    //

#define LCD_STROBE()    ((LCD_EN = 1),(LCD_EN=0))

Void lcd_write(unsigned char c)

{

    __delay_us(40);

    LCD_DATA = ((( c >> 4 ) & 0x0F) | (LATF & 0xF0));

    LCD_STROBE();

    LCD_DATA = (( c & 0x0F) | (LATF & 0xF0));

    LCD_STROBE();

}

Void lcd_clear(void)

{

    LCD_RS = 0;

    lcd_write(0x1);

    __delay_ms(2);

}

Void lcd_puts(const char * s)

{

    LCD_RS = 1;    // write characters
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        while(*s)
            lcd_write(*s++);
    }
    Void lcd_putchar(char c)
    {
        LCD_RS = 1;    // write characters
        lcd_write(c);
    }
    Void lcd_goto(unsigned char pos)
    {
        LCD_RS = 0;
        lcd_write(0x80+pos);
    }
    Void lcd_init()
    {
        char init_value;
        init_value = ((LATF & 0xF0) | 0x3);
        LCD_RS = 0;
        LCD_EN = 0;
        LCD_RW = 0;
        __delay_ms(15);    // wait 15mSec after power applied,
        LCD_DATA    = init_value;
        LCD_STROBE();
        __delay_ms(5);
        LCD_STROBE();
        __delay_us(200);
        LCD_STROBE();
        __delay_us(200);
        LCD_DATA = ((LATF & 0xF0) | (0x02)); // Four bit mode
        LCD_STROBE();
        lcd_write(0x28); // Set interface length
        lcd_write(0xF); // Display On, Cursor On, Cursor Blink
    }
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        lcd_clear();          // Clear screen

        lcd_write(0x6); // Set entry Mode

    }

#include "Definitions.h"

#include <p30fxxx.h>

#include <libpic30.h>

#include "Initialize.h"

#include "Functions.h"

#include "lcd.h"

#include "bin2dec.h"

#include "Menu.h"

// #include "Variables.h"

//=====

_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL4);

_FWDT(WDT_OFF);

_FBORPOR(PBOR_OFF & BORV27 & PWRT_16 & MCLR_EN);

_FGS(CODE_PROT_OFF);

//=====

unsigned char i;

int main(void)

{

    Init_IO_Ports();

    Init_ADC();

    Init_PWM();

    INTx_Init();

    lcd_init();

    Init_System();

    lcd_clear();

    lcd_goto(0x00);
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
lcd_puts(" ATEI OF PATRAS ");  
  
for(i=0; i<16; i++)  
{  
  
    __delay_ms(200);  
  
    lcd_goto((0x40+i));  
  
    lcd_putch('.');  
  
    lcd_goto(0x50);  
  
}  
  
lcd_clear();  
  
lcd_goto(0x00);  
  
lcd_puts("School of Electr");  
  
lcd_goto(0x40);  
  
lcd_puts("ical Engineer ");  
  
__delay_ms(2000);  
  
lcd_clear();  
  
lcd_goto(0x00);  
  
lcd_puts("Project Designed");  
  
lcd_goto(0x40);  
  
lcd_puts("by PAPOUTSIS TH.");  
  
__delay_ms(2000);  
  
lcd_clear();  
  
lcd_goto(0x00);  
  
lcd_puts(" CLOSE INPUT CB ");  
  
lcd_goto(0x40);  
  
lcd_puts("AND PRESS ENTER!");  
  
while(ENTER_BUTTON == 1);  
  
lcd_clear();  
  
lcd_goto(0x00);  
  
lcd_puts("DC CAP CHARGING!");  
  
for(i=0; i<16; i++)  
{  
  
    __delay_ms(500);
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        lcd_goto((0x40+i));

        lcd_putchar('.');

        lcd_goto(0x50);

    }

    CHARGE_RELAY = 1;

    while(1)

        Menu_Parameters();

    return 0;

}

#include "Definitions.h"

#include <p30fxxx.h>

#include <libpic30.h>

#include <stdio.h>

#include <math.h>

#include <string.h>

#include <stdlib.h>

#include "Initialize.h"

#include "Functions.h"

#include "lcd.h"

#include "bin2dec.h"

#include "Menu.h"

extern int Frequency;

extern int Amplitude;

extern int Forward;

extern int Phase;

extern int CURR_VALUE;

extern int CURR_MAX;

extern int VF_Temp;

extern int Freq_Temp;

extern unsigned char RUN_FLAG;

extern unsigned char PROG_FLAG;

extern unsigned char MENU_COUNTER;
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
extern int FREQ_ARRAY[];

extern int V_F_RATIO_ARRAY[];

extern int FREQ_DISP[];

extern int VF_DISP[];

extern unsigned char FREQ_ARRAY_INDEX;

extern unsigned char V_F_RATIO_ARRAY_INDEX;

extern char ascii_number[];

extern unsigned int Ia;

unsigned int Vab = 0;

void Menu_Parameters(void)

{

    switch(MENU_COUNTER){

        case 0: Setup_VF_Ratio();

            break;

        case 1: Motor_Direction_Select();

            break;

        case 2: Motor_Run_Select();

            break;

        case 3: Motor_Run_Display();

            break;

        default: break;

    }

}

void Setup_VF_Ratio(void)

{

    lcd_clear();

    lcd_goto(0x00);

    lcd_puts("SETUP V/F RATIO");

    lcd_goto(0x40);

    lcd_puts(" < . > ");

    while(ENTER_BUTTON == 1)

    {
```





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        bin2dec(VF_DISP[V_F_RATIO_ARRAY_INDEX]);

        lcd_goto(0x46);

        lcd_putchar(ascii_number[3]);

        lcd_goto(0x48);

        lcd_putchar(ascii_number[4]);

        lcd_goto(0x50);

        __delay_ms(100);

    }

    if(ENTER_BUTTON == 0)

    {

        while(ENTER_BUTTON == 0);

        MENU_COUNTER = 1;

        return;

    }

}

void Motor_Direction_Select(void)

{

    lcd_clear();

    lcd_goto(0x00);

    lcd_puts("SELECT MOTOR DIR");

    while((ENTER_BUTTON == 1) && (ESC_BUTTON ==1))

    {

        if(Forward == 0)

        {

            lcd_goto(0x40);

            lcd_puts("<LEFT>  RIGHT ");

        }

        if(Forward == 1)

        {

            lcd_goto(0x40);

            lcd_puts(" LEFT <RIGHT>");

        }

    }

}
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        __delay_ms(100);
    }
    if(ENTER_BUTTON == 0)
    {
        while(ENTER_BUTTON == 0);

        MENU_COUNTER = 2;

        PROG_FLAG = 1;

        return;
    }
    if(ESC_BUTTON == 0)
    {
        while(ESC_BUTTON == 0);

        MENU_COUNTER = 0;

        PROG_FLAG = 1;

        return;
    }
    __delay_ms(50);
}

void Motor_Run_Select(void)
{
    lcd_clear();

    lcd_goto(0x00);

    lcd_puts("PRESS RUN BUTTON");

    lcd_goto(0x40);

    lcd_puts(" OR ESC BUTTON ");

    __delay_ms(100);

    while((ESC_BUTTON == 1) && (RUN_STOP_BUTTON == 1));

    if(ESC_BUTTON == 0)
    {
        while(ESC_BUTTON == 0);

        MENU_COUNTER = 1;

        PROG_FLAG = 1;
    }
}
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        return;
    }
}

void Motor_Run_Display(void)
{
    //Vab = (unsigned int)(VF_DISP[V_F_RATIO_ARRAY_INDEX] * FREQ_DISP[FREQ_ARRAY_INDEX]);
    int Modulation_Amplitude = 0;
    Modulation_Amplitude = (int)(Amplitude / 328);
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("Fsw:16kHz F: Hz");
    lcd_goto(0x40);
    //lcd_puts("Ia: . A Vab: V");
    lcd_puts("I:0.0A  Ma:0.00");//new
    bin2dec(FREQ_DISP[FREQ_ARRAY_INDEX]);
    lcd_goto(0x0C);
    lcd_putchar(ascii_number[3]);
    lcd_goto(0x0D);
    lcd_putchar(ascii_number[4]);
    CURR_MAX = (int)((CURR_MAX << 1)/3);
    bin2dec(CURR_MAX);
    lcd_goto(0x42);
    lcd_putchar(ascii_number[3]);
    lcd_goto(0x44);
    bin2dec(Modulation_Amplitude);
    lcd_goto(0x4E);
    lcd_putchar(ascii_number[3]);
    lcd_goto(0x4F);
    lcd_putchar(ascii_number[4]);
    lcd_goto(0x50);
    __delay_ms(500);
}
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
.include "p30fxxx.inc"
,
*****

.equ Offset_120, 0x5555

.equ PWM_Scaling, 230
,
*****

.global _Modulation

.global _Current_Display

;global _VarAdj
,
*****

.global _Frequency

.global _Amplitude

.global _Phase

.global _Forward

.global _CURR_VALUE

.global _VF_Temp

.global _Freq_Temp
,
*****

        .section .nbss, "b"
,
*****

_Frequency: .space 2

_Amplitude: .space 2

_Forward: .space 2

_Phase: .space 2

_CURR_VALUE: .space 2

_Freq_Temp:      .space 2

_VF_Temp:      .space 2
,
*****

        .section .sine_table, "x"
,
*****

SineTable:

;.....

.hword 0,3212,6393,9512,12539,15446,18204,20787,23170,25329
```



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

.hword 27245,28898,30273,31356,32137,32609,32767,32609,32137,31356,30273,28898

.hword 27245,25329,23170,20787,18204,15446,12539,9512,6393,3212

.hword 0,-3212,-6393,-9512,-12539,-15446,-18204,-20787,-23170,-25329

.hword -27245,-28898,-30273,-31356,-32137,-32609,-32767,-32609,-32137,-31356,-30273,-28898

.hword -27245,-25329,-23170,-20787,-18204,-15446,-12539,-9512,-6393,-3212

,\*\*\*\*\*

.text

,\*\*\*\*\*

\_Modulation:

:\_VarAdj:

;/.....

PUSH.D W0

PUSH.D W4

;/.....

MOV \_Freq\_Temp,W0

MOV \_VF\_Temp,W1

ASR W0,#2,W4

MOV W4,\_Frequency

SL W1,#5,W4

SL W0,#5,W5

;??

CP0 W5

BRA Z, FREQ\_ZERO

MOV #1762,W1

ADD W1,W5,W5

FREQ\_ZERO:

MPY W4\*W5, A

SAC A, W0

MOV #28000, W1

CP W1, W0

BRA GE, NoLimit



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
MOV W1, W0

NoLimit:

MOV W0, _Amplitude

;.....

POP.D W4

POP.D W0

;.....

; RETURN

;*****

;_Modulation:

;.....

PUSH.D W0

PUSH.D W2

PUSH.D W4

PUSH.D W6

PUSH.D W8

PUSH.D W10

PUSH.D W12

;.....

MOV #tblpage(SineTable), W0

MOV W0, TBLPAG

MOV #tbloffset(SineTable), W0

;.....

MOV _Phase, W1

MOV #Offset_120, W4

MOV _Amplitude, W6

MOV #PWM_Scaling, W7

MOV _Frequency, W8

;.....

ADD W8, W1, W1

ADD W1, W4, W2

ADD W2, W4, W3
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

.....

LSR	W1, #10, W9
SL	W9, #1, W9
LSR	W2, #10, W10
SL	W10, #1, W10
LSR	W3, #10, W11
SL	W11, #1, W11

.....

MOV	_Forward, W12	;forward or reverse status
-----	---------------	----------------------------

.....

LEG1:	ADD	W0, W9, W9	
	TBLRDL	[W9], W5	
	MPY	W5*W6, A	
	SAC	A, W5	
	MPY	W5*W7, A	
	SAC	A, W8	
	ADD	W7, W8, W8	
	BTSS	W12, #0	;Check for forward or reverse (0-> fw, 1-> rv)
	BRA	FOR1	
	BRA	REV1	

FOR1:	MOV	W8, PDC1
	BRA	LEG2

REV1:	MOV	W8, PDC2
-------	-----	----------

LEG2:	ADD	W0, W10, W10
	TBLRDL	[W10], W5
	MPY	W5*W6, A
	SAC	A, W5
	MPY	W5*W7, A
	SAC	A, W8
	ADD	W7, W8, W8



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
BTSS W12, #0 ;Check for forward or reverse (0-> fw, 1-> rv)
BRA FOR2
BRA REV2

FOR2: MOV W8, PDC2
      BRA LEG3

REV2: MOV W8, PDC1

LEG3: ADD W0, W11, W11
      TBLRDL [W11], W5
      MPY W5*W6, A
      SAC A, W5
      MPY W5*W7, A
      SAC A, W8
      ADD W7, W8, W8
      MOV W8, PDC3

;.....
      MOV W1, _Phase

;.....

      POP.D W12
      POP.D W10
      POP.D W8
      POP.D W6
      POP.D W4
      POP.D W2
      POP.D W0

;.....

      RETURN

_Current_Display:
      PUSH.D W0
      PUSH.D W2
```





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
MOV ADCBUF0,W0
MOV ADCBUF1,W1

ASR W1,#1,W2
;MOV #508,W1
SUB W0,W2,W1

MOV _CURR_VALUE,W3
CP W3,W1
BRA GE,NoGreater
MOV W1,_CURR_VALUE

NoGreater:

POP.D W2
POP.D W0

RETURN

,*****
.end

//traps
include <p30fxxx.h>
#include "lcd.h"
#include "bin2dec.h"

void __attribute__((__interrupt__)) _OscillatorFail(void);
void __attribute__((__interrupt__)) _AddressError(void);
void __attribute__((__interrupt__)) _StackError(void);
void __attribute__((__interrupt__)) _MathError(void);
void __attribute__((__interrupt__)) _OscillatorFail(void)
{
    INTCON1bits.OSCFAIL = 0; //Clear the trap flag

    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
}
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
        lcd_puts(" SYSTEM ERROR ");

        lcd_goto(0x40);

        lcd_puts("## OSCILLATOR ##");

    while(1);

}

void __attribute__((__interrupt__)) _AddressError(void)
{
    INTCON1bits.ADDRERR = 0;    //Clear the trap flag

        lcd_clear();

        lcd_goto(0x00);

        lcd_puts(" SYSTEM ERROR ");

        lcd_goto(0x40);

        lcd_puts("## ADDRESS ##");

        while (1);

}

void __attribute__((__interrupt__)) _StackError(void)
{
    INTCON1bits.STKERR = 0;    //Clear the trap flag

        lcd_clear();

        lcd_goto(0x00);

        lcd_puts(" SYSTEM ERROR ");

        lcd_goto(0x40);

        lcd_puts("## STACK ##");

    while (1);

}

void __attribute__((__interrupt__)) _MathError(void)
{
    INTCON1bits.MATHERR = 0;    //Clear the trap flag

        lcd_clear();

        lcd_goto(0x00);

        lcd_puts(" SYSTEM ERROR ");

        lcd_goto(0x40);
```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

```
lcd_puts("## MATH ##");  
  
while (1);  
  
}
```