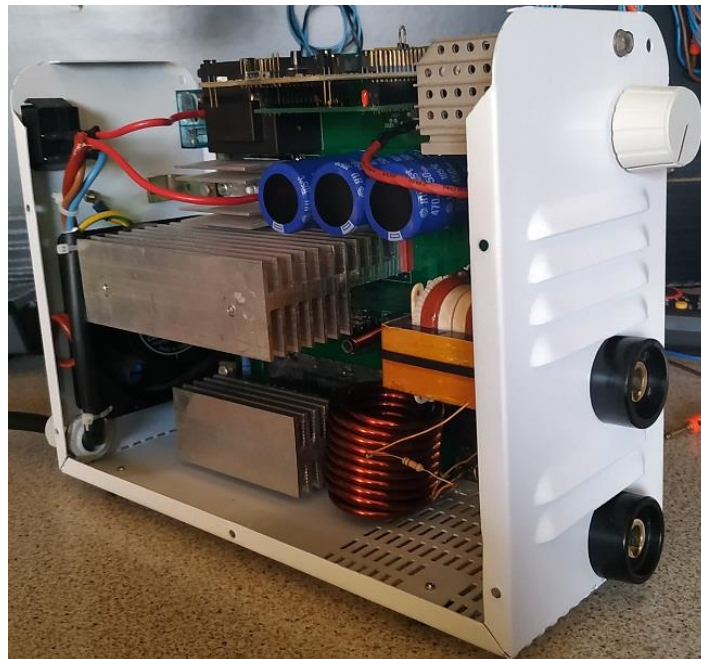


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
«ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΟΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ»



Του φοιτητή  
Φαρμάκη Ιωάννη  
Αρ. Μητρώου: ele515155

Επιβλέπων  
Δρ. Κιοσκερίδης Ιορδάνης  
Καθηγητής

Ιούνιος 2022

Σχεδίαση και υλοποίηση ηλεκτρονικής ηλεκτροσυγκόλλησης

Κωδικός Π.Ε. : 21271

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Φαρμάκης Ιωάννης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Δρ. Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. : 18-4-2021

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. : 26-6-2022

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

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

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

*Στην Πάνια*

## Πρόλογος

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία επιλέχθηκε με βάση το ενδιαφέρον που τρέφω για τα ηλεκτρονικά ισχύος και τα ενσωματωμένα συστήματα. Ήταν επίσης ένα κίνητρο για να εντρυφήσω στους διακοπτικούς μετατροπείς ισχύος και στον τρόπο ελέγχου τους. Όσο καιρό εργαζόμουν για την περάτωση της εργασίας, δοκίμασα διάφορα εξαρτήματα και αρκετές μεθόδους ελέγχου για την επίτευξη του επιθυμητού ρεύματος εξόδου του συστήματος. Κατασκεύασα και πειραματίστηκα με μετασχηματιστές ισχύος και αυτό είχε ως αποτέλεσμα την απόκτηση μιας βαθύτερης κατανόησης γύρω από αυτούς.

## Περίληψη

Η εξέλιξη των ημιαγωγών πυριτίου, εκτός των άλλων, ωφέλησε και τον τομέα των συγκολλήσεων ηλεκτρικού τόξου. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 παρουσιάστηκε η πρώτη μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης μετάλλων τεχνολογίας inverter. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι μέθοδοι ηλεκτροσυγκόλλησης καθώς και ενδεικτικά κυκλώματα με τα οποία υλοποιούνται οι συγκεκριμένες μηχανές.

Στα παρακάτω κεφάλαια αναλύεται η μεθοδολογία σχεδιασμού μιας ηλεκτρονικής μηχανής ηλεκτροσυγκόλλησης με χρήση inverter όπως και οι διάφορες μετρήσεις που έγιναν με παλμογράφο.

Η συγκόλληση εκτελείται με την μέθοδο αναλώσιμου επενδυμένου ηλεκτροδίου (MMA-Manual Metal Arc), με μέγιστο ρεύμα συγκόλλησης τα 140A(περιορισμένο μέσω του firmware). Όλες οι λειτουργίες της μηχανής ελέγχονται με έναν μικροελεγκτή.

Για την κατασκευή της χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν εξολοκλήρου ανακυκλωμένα υλικά από διάφορες χαλασμένες συσκευές.

Η μηχανή παρέχει εξαιρετικά σταθερό ρεύμα συγκόλλησης και άμεση έναυση του ηλεκτρικού τόξου χωρίς να κολλάει το ηλεκτρόδιο στο δοκίμιο βάσης. Έχει συγκολληθεί με επιτυχία ηλεκτρόδιο διαμέτρου μέχρι 3,2mm.

# Design and implementation of inverter welding machine

Farmakis Ioannis

## **Abstract**

The evolution of silicon semiconductors, among others, has also benefited the arc welding sector. The first inverter technology metal welding machine was introduced in the late 1970s. In this paper, presented the welding methods as well as indicative circuits with which the specific machines are implemented.

The following chapters analyze the design methodology of an electronic welding machine using an inverter as well as the various measurements made with an oscilloscope.

The welding procedure is performed with the method of consumable-coated electrode (MMA-Manual Metal Arc), with a maximum welding current of 140A (limited by firmware).

A microcontroller controls all machine functions.

Almost entirely recycled materials from various damaged devices were used for its construction.

The machine provides extremely constant welding current and direct ignition of the arc without the electrode sticking to the base specimen. Electrode up to 3.2mm in diameter has been successfully welded.

## **Ευχαριστίες**

Θέλω να ευχαριστήσω το διδακτικό προσωπικό του τμήματος που στάθηκαν δίπλα μου ως συνοδοιπόροι στον δρόμο για τον υπέροχο κόσμο της ηλεκτρονικής.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract .....	vi
Ευχαριστίες .....	vii
Περιεχόμενα .....	viii
Κατάλογος Σχημάτων .....	x
Κεφάλαιο 1ο: Τεχνολογία ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου .....	1
1.1 Εισαγωγή - Ιστορική αναδρομή .....	1
1.2 Η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου .....	1
1.3 Προστασία της συγκόλλησης από την οξείδωση .....	2
1.3.1 Με την παρουσία ειδικής πάστας .....	2
1.3.2 Με την παρουσία προστατευτικού αερίου .....	3
1.4 Μέθοδοι συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου .....	4
1.4.1 MMA – Συγκόλληση με επενδυμένα ηλεκτρόδια.....	4
1.4.2 MIG/MAG – Συγκόλληση με συμπαγές σύρμα.....	5
1.4.3 FCAW – Συγκόλληση με σωληνωτό σύρμα που περιέχει πάστα .....	7
1.4.4 TIG – Συγκόλληση με μη αναλώσιμο ηλεκτρόδιο .....	8
1.4.5 SAW – Συγκόλληση βυθισμένου τόξου.....	9
1.4.6 PAW – Συγκόλληση πλάσματος .....	11
1.5 Ηλεκτροσυγκόλληση MMA.....	12
1.5.1 Αναλώσιμα ηλεκτρόδια MMA.....	13
1.5.2 Πολικότητα ρεύματος συγκόλλησης.....	14
Κεφάλαιο 2ο: Τοπολογίες μηχανών ηλεκτροσυγκόλλησης .....	15
2.1 Εισαγωγή.....	15
2.2 Μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης χαλκού.....	15
2.3 Μετατροπέας τοπολογίας Half Bridge .....	16
2.4 Μετατροπέας τοπολογίας Full Bridge.....	16
2.5 Μετατροπέας Dual Inverter.....	17
2.6 Μετατροπέας τοπολογίας Double Ended Forward Converter.....	18
2.6.1 Επιλογή τοπολογίας.....	18
2.6.2 Περιγραφή λειτουργίας μετατροπέα Double Ended Forward Converter .....	18
Κεφάλαιο 3ο: Μεθοδολογία σχεδιασμού .....	21

3.1	Εισαγωγή.....	21
3.2	Μέθοδος ελέγχου Peak Current Mode .....	21
3.2.1	Περιγραφή λειτουργίας .....	21
3.2.2	Η χρήση της ράμπας ως μέθοδο περιορισμού ρεύματος.....	21
3.3	Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε .....	23
3.4	Τα υποσυστήματα της μηχανής.....	24
3.4.1	Ανόρθωση και εξομάλυνση.....	24
3.4.2	Κυκλώματα οδήγησης πυλών των IGBT's .....	25
3.4.3	Οδήγηση μετασχηματιστή Ισχύος.....	26
3.4.4	Κύκλωμα αισθητήρα ρεύματος .....	27
3.4.5	Κύκλωμα ανόρθωσης ρεύματος εξόδου.....	29
3.4.6	Firmware .....	30
3.5	Σχηματικό διάγραμμα.....	32
Κεφάλαιο 4ο:	Μετρήσεις και υλοποίηση .....	33
4.1	Μετρήσεις.....	33
4.2	Υλοποίηση.....	36
4.2.1	Τυπωμένο κύκλωμα .....	37
4.2.2	Τελική κατασκευή.....	38
Κεφάλαιο 5ο:	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....	43
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		44

## Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1.1: Ηλεκτροσυγκόλληση ηλεκτρικού τόξου.....	2
Εικόνα 1.2: Συγκόλληση με αναλώσιμο ηλεκτρόδιο .....	3
Εικόνα 1.3: Συγκόλληση με χρήση προστατευτικού αερίου.....	3
Εικόνα 1.4: MMA Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης inverter 160 Amperes .....	4
Εικόνα 1.5: MMA Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης μετασχηματιστή 220 Amperes .....	4
Εικόνα 1.6: Τσιμπίδα ηλεκτροσυγκόλλησης MMA.....	5
Εικόνα 1.7: Τσιμπίδα ηλεκτροσυγκόλλησης MIG/MAG .....	6
Εικόνα 1.8: Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης MIG/MAG.....	6
Εικόνα 1.9: Καρούλι αναλώσιμου σύρματος και μηχανισμός τροφοδότησης εσωτερικά της μηχανής MIG/MAG.....	7
Εικόνα 1.10: Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης TIG .....	8
Εικόνα 1.11: Τσιμπίδα ηλεκτροσυγκόλλησης TIG.....	8
Εικόνα 1.12: Εκτέλεση ηλεκτροσυγκόλλησης TIG .....	9
Εικόνα 1.13: Σχηματική παράσταση ηλεκτροσυγκόλλησης SAW .....	10
Εικόνα 1.14: Διαδικασία ηλεκτροσυγκόλλησης SAW .....	10
Εικόνα 1.15: Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης SAW .....	11
Εικόνα 1.16: Σχηματική παράσταση ηλεκτροσυγκόλλησης PAW .....	12
Εικόνα 1.17: Ηλεκτροσυγκόλληση MMA σε αγωγό φυσικού αερίου στη Σιβηρία .....	13
Εικόνα 1.18: Διάφοροι τύποι ηλεκτροδίων MMA.....	13
Εικόνα 1.19: Εναπόθεση υλικού πλήρωσης ανάλογα με την πολικότητα .....	14
Εικόνα 2.1: Τυπικό διάγραμμα μηχανής βυθιζόμενου πυρήνα.....	15
Εικόνα 2.2: Τυπικό διάγραμμα μετατροπέα Half Bridge.....	16
Εικόνα 2.3: Τυπικό διάγραμμα μετατροπέα Full Bridge.....	16
Εικόνα 2.4: Τυπικό διάγραμμα μετατροπέα Dual Inverter .....	17
Εικόνα 2.5: Λειτουργία ac balance σε dual inverter .....	17
Εικόνα 2.6: Κατάσταση αγωγής forward converter .....	19
Εικόνα 2.7: Κατάσταση αποκοπής forward converter .....	19
Εικόνα 2.8: Κατάσταση πλήρους απομαγνητισμού forward converter.....	19
Εικόνα 2.9: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων μετατροπέα Double Ended Forward Converter ...	20
Εικόνα 3.1: Κυματομορφές Peak Current Mode.....	22
Εικόνα 3.2: Επίπτωση υποαρμονικής παραμόρφωσης.....	22
Εικόνα 3.3: Block διάγραμμα συστήματος .....	24
Εικόνα 3.4: Κύκλωμα ανόρθωσης και εξομάλυνσης .....	25
Εικόνα 3.5: Μετασχηματιστές οδήγησης πυλών.....	25
Εικόνα 3.6: Κύκλωμα οδήγησης πυλών IGBT's.....	26
Εικόνα 3.7: Κύκλωμα οδήγησης μετασχηματιστή Ισχύος .....	27
Εικόνα 3.8: Τρόπος σύνδεσης μετασχηματιστή ρεύματος.....	28
Εικόνα 3.9: Ο μετασχηματιστής ρεύματος που χρησιμοποιείται .....	28
Εικόνα 3.10: Κύκλωμα εξασθένησης και φιλτραρίσματος.....	29
Εικόνα 3.11: Κύκλωμα ανόρθωσης και εξομάλυνσης .....	30
Εικόνα 3.12: Block διάγραμμα λειτουργίας Firmware .....	31
Εικόνα 3.13: Σχηματικό διάγραμμα .....	32
Εικόνα 4.1: Διάταξη μέτρησης ασθενών σημάτων επάνω στον μικροελεγκτή.....	33
Εικόνα 4.2: Μέτρηση Iη.....	34

Εικόνα 4.3: Μέτρηση 2η .....	35
Εικόνα 4.4: Μέτρηση 3η .....	35
Εικόνα 4.5: Μέτρηση 4η .....	36
Εικόνα 4.6: Άνω πλευρά τυπωμένου κυκλώματος.....	37
Εικόνα 4.7: Κάτω πλευρά τυπωμένου κυκλώματος.....	38
Εικόνα 4.8: 1η φωτογραφία κατασκευής .....	39
Εικόνα 4.9: 2η φωτογραφία κατασκευής .....	40
Εικόνα 4.10: 3η φωτογραφία κατασκευής .....	41
Εικόνα 4.11: 4η φωτογραφία κατασκευής .....	42



## Κεφάλαιο 1ο: Τεχνολογία ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου

### 1.1 Εισαγωγή - Ιστορική αναδρομή

Η τεχνολογία συγκολλήσεων μετάλλων, έχει τις ρίζες της κάποιες χιλιάδες χρόνια πριν. Τότε οι συγκολλήσεις πραγματοποιούνταν με την μέθοδο της θερμής κατεργασίας και σφυρηλάτησης ή με την μέθοδο της χύτευσης τηγμένου μετάλλου ανάμεσα σε δυο ανεξάρτητες επιφάνειες με αποτέλεσμα την ένωση τους. Το 1820 πρωτοχρησιμοποιήθηκε η συγκόλληση με υδρογόνο και αργότερα, με την ανακάλυψη της ασετιλίνης ξεκίνησε η μαζική χρήση της γνωστής μέχρι τις μέρες μας οξυγονοκόλλησης. Οι αυξημένες ανάγκες της βιομηχανίας για την γρήγορη και αξιόπιστη ένωση των μετάλλων οδήγησε στην ανάπτυξη των πρώτων μηχανών ηλεκτροσυγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου, κάπου στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Οι πρώτοι τύποι μηχανών τόξου, που σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ως σήμερα, είναι οι μηχανές με μετασχηματιστή απευθείας συνδεδεμένο στο δίκτυο και οι γνωστές ως περιστροφικές, η λειτουργία των οποίων βασίζεται σε ένα Η/Ζ. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 εμφανίστηκαν οι πρώτες μηχανές τεχνολογίας inverter οι οποίες επικρατούν σήμερα. Αυτού του είδους οι μηχανές, έχουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές, των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε έναν ή και περισσότερους μετασχηματιστές συνδεδεμένους απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο με συχνότητα 50 ή 60 Hz.

Το πρώτο πλεονέκτημα που θα παρατηρήσει κανείς, είναι το πολύ χαμηλό βάρος(για την ίδια μέγιστη ισχύ εξόδου και στις δυο) και αυτό οφείλεται στον πολύ μικρότερο μετασχηματιστή που χρειάζεται η inverter, λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας της.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι το μεγάλης σταθερότητας ηλεκτρικό τόξο που διατηρείται κατά την διαδικασία της συγκόλλησης, αλλά και η ευκολία με την οποία γίνεται η έναυσή του.

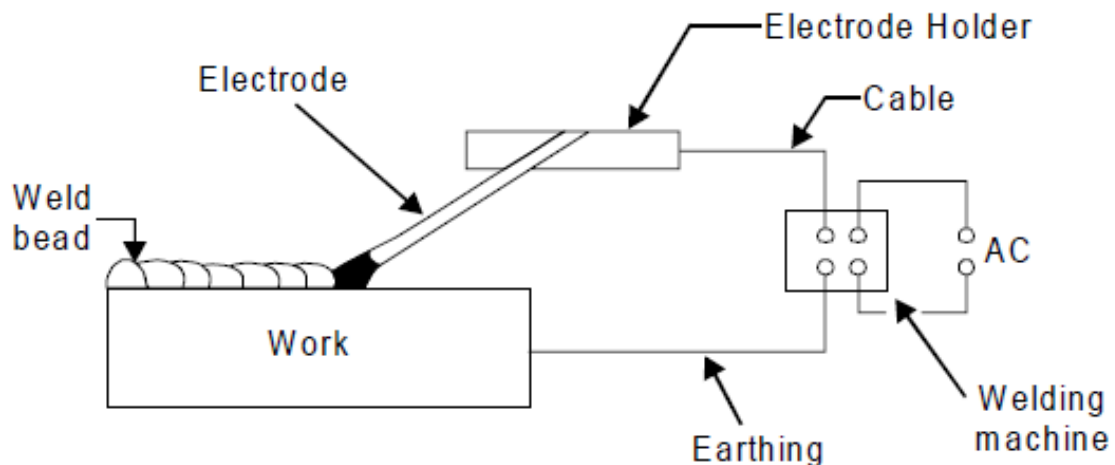
Πλεονεκτήματα συναντώνται και στις διάφορες μεθόδους ελέγχου που επιτρέπουν μεγάλη ακρίβεια στο ρεύμα ή στην τάση εξόδου και σε μερικές περιπτώσεις επιτρέπεται και η επιλογή του τύπου της κυματομορφής εξόδου(ημιτονική, τετραγωνική, τριγωνική ή και συνδυασμός τους).

### 1.2 Η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου

Για την συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου απαιτείται θερμοκρασία μεγαλύτερη των 3000C. Σε αυτήν τη θερμοκρασία, οι προς συγκόλληση επιφάνειες φτάνουν στο σημείο τήξης τους. Έπειτα, ανάλογα με την μέθοδο συγκόλλησης, είτε προστίθεται υλικό ανάμεσα στις δύο επιφάνειες, είτε αναμιγνύονται οι τηγμένες επιφάνειες μεταξύ τους. Για να γίνει η έναυση του ηλεκτρικού τόξου, απαιτείται ιονισμός της ατμόσφαιρας γύρω από την επιφάνεια προς συγκόλληση. Στην κατάσταση αυτή, η οποία ονομάζεται πλάσμα, η ατμόσφαιρα γίνεται αγωγίμη κι έτσι επιτρέπει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.

Υπάρχουν δυο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτροσυγκολλήσεις για να επιτευχθεί αυτή η κατάσταση. Η πρώτη που είναι και η λιγότερο σύνθετη, είναι η σύντομη επαφή του ηλεκτροδίου συγκόλλησης με το μέταλλο βάσης. Η τάση κατά την στιγμή της επαφής κυμαίνεται μεταξύ 50-90V, όμως το στιγμιαίο ρεύμα είναι της τάξης των 100άδων Α. Έτσι, αναπτύσσεται εξαιρετικά μεγάλη θερμοκρασία και επιτυγχάνεται η αναγωγή της ατμόσφαιρας σε πλάσμα. Για την δεύτερη μέθοδο, απαιτείται μια διάταξη που παράγει υψηλής και υψηλή τάση κι έτσι επιτυγχάνεται ο ιονισμός της περιρρέουσας ατμόσφαιρας. Στην συγκεκριμένη εργασία, η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι πρώτη.

Και στις δυο παραπάνω μεθόδους, μετά την έναυση, το τόξο διατηρείται κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, αρκεί η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου και επιφάνειας να μην ξεπερνάει τα 0,5cm.



Εικόνα 1.1: Ηλεκτροσυγκόλληση ηλεκτρικού τόξου

### 1.3 Προστασία της συγκόλλησης από την οξείδωση

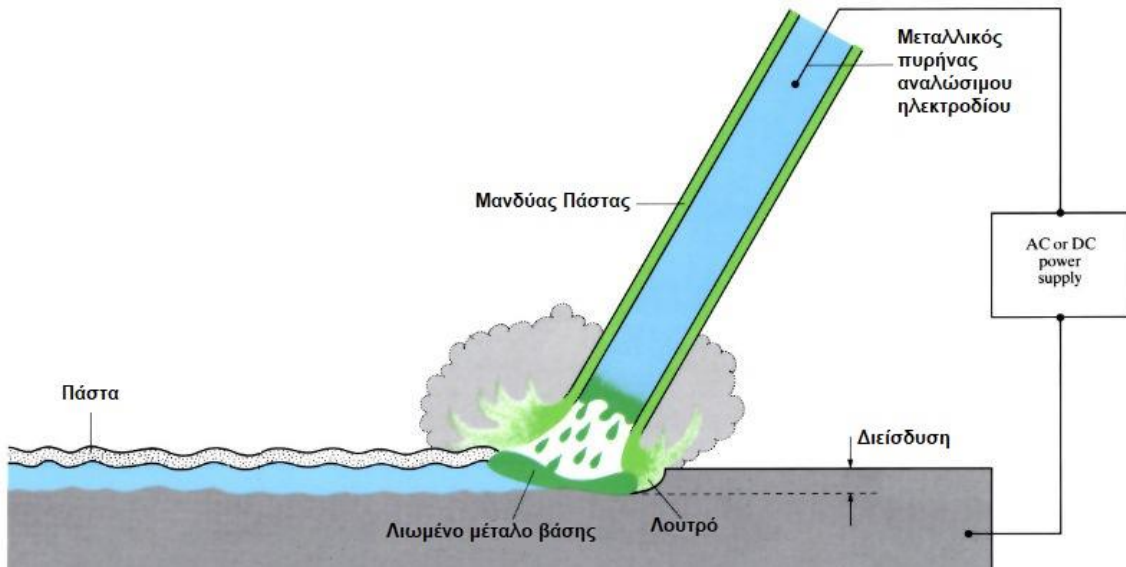
Το λιωμένο μέταλλο στο λουτρό συγκόλλησης αντιδρά με τον ατμοσφαιρικό αέρα και δημιουργούνται χημικές ενώσεις του οξυγόνου (οξειδία) και του αζώτου (νιτρίδια). Το πλέον όμως, επικίνδυνο είναι η εισροή υδρογόνου στο μέταλλο που προέρχεται από τη διάσπαση του νερού που υπάρχει σε μορφή υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Οι χημικές ενώσεις και η παρουσία του υδρογόνου μειώνουν πολύ την ποιότητα του μετάλλου στην ένωση. Για να αποφευχθούν τα παραπάνω, απαιτείται μία κατάλληλη προστασία γύρω από το λουτρό συγκόλλησης η οποία επιτυγχάνεται με έναν από τους παρακάτω δύο τρόπους:

#### 1.3.1 Με την παρουσία ειδικής πάστα

Η πάστα αποτελείται από υλικά που λιώνουν, καίγονται ή εξατμίζονται γύρω από το λουτρό συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα (1.2). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία προστατευτική κρούστα πάνω από τη συγκόλληση και μία αδρανής ατμόσφαιρα γύρω από το τόξο. Έτσι εμποδίζεται η επαφή του λουτρού συγκόλλησης με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους η πάστα έρχεται σε επαφή με το λουτρό συγκόλλησης:

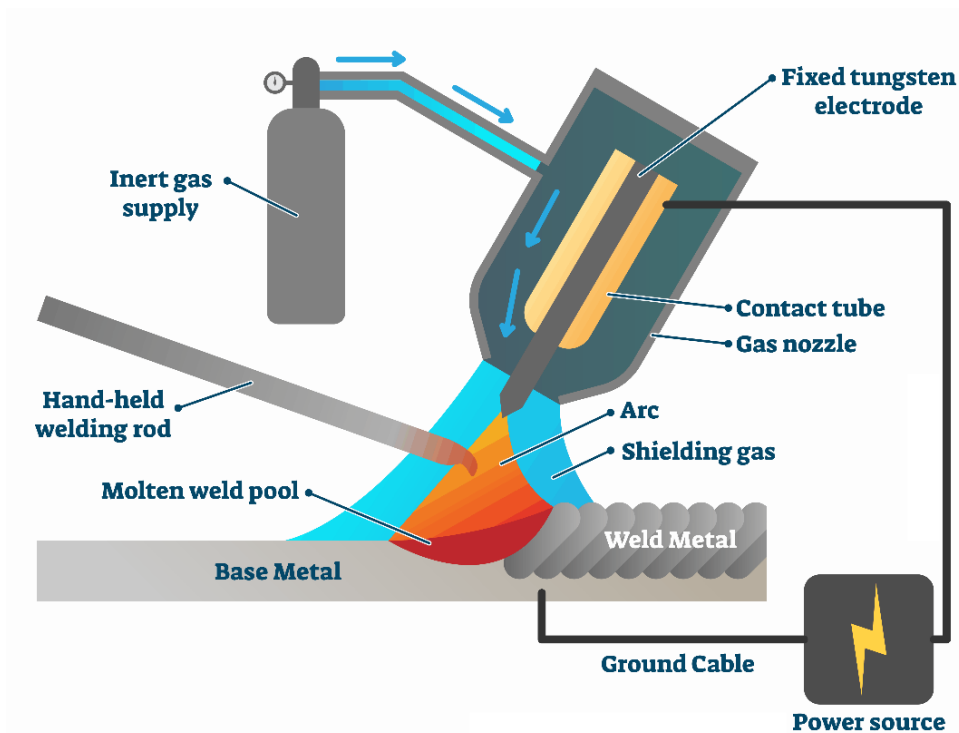
- Με την επένδυση των ηλεκτροδίων με πάστα
- Μέσω σωληνωτών ηλεκτροδίων που έχουν εσωτερικά την πάστα
- Ρίχνοντας την πάστα χύμα στο λουτρό συγκόλλησης



Εικόνα 1.2: Συγκόλληση με αναλώσιμο ηλεκτρόδιο

### 1.3.2 Με την παρουσία προστατευτικού αερίου

Μέσω ειδικών στομιών της τσιμπιδας διοχετεύεται προστατευτικό αέριο το οποίο δημιουργεί την κατάλληλη ατμόσφαιρα γύρω από το λουτρό συγκόλλησης. Η μέθοδος αυτή φαίνεται στο σχήμα (1.3). Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ανοικτό χώρο, επειδή το προστατευτικό αέριο παρασύρεται από τον αέρα.



Εικόνα 1.3: Συγκόλληση με χρήση προστατευτικού αερίου

## 1.4 Μέθοδοι συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου

### 1.4.1 MMA – Συγκόλληση με επενδυμένα ηλεκτρόδια

Το βασικό χαρακτηριστικό της MMA(manual metal arc) είναι η χρήση των αναλώσιμων επενδυμένων ηλεκτροδίων. Η επένδυση αποτελείται από ειδική πάστα. Στην ηλεκτροσυγκόλληση MMA, η εκκίνηση του τόξου γίνεται χτυπώντας στιγμιαία το ηλεκτρόδιο στο μέταλλο βάσης. Έπειτα, **η ένταση του ρεύματος(και όχι η τάση) που διαρρέει το τόξο, πρέπει να είναι σταθερή.** Στις εικόνες 1.4 και 1.5 φαίνονται 2 MMA μηχανές του εμπορίου και στην εικόνα 1.6 η τσιμπίδα τους.

Στην συγκεκριμένη εργασία, η μηχανή χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη τεχνολογία, και θα ακολουθήσει λεπτομερής ανάλυση σε επόμενη ενότητα.



Εικόνα 1.4: MMA Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης inverter 160 Amperes



Εικόνα 1.5: MMA Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης μετασχηματιστή 220 Amperes



*Εικόνα 1.6: Τσιμπίδα ηλεκτροσυγκόλλησης MMA*

#### **1.4.2 MIG/MAG – Συγκόλληση με συμπαγές σύρμα**

Οι MIG/MAG (metal inert gas/metal active gas) ανήκουν στις ηλεκτροσυγκολλήσεις που χρησιμοποιούν προστατευτικό αέριο. Χρησιμοποιούν πάντα υλικό πλήρωσης ανάμεσα στις προς συγκόλληση επιφάνειες. Το υλικό πλήρωσης (σύρμα) είναι τυλιγμένο σε καρούλι (κουλούρα) το οποίο ξετυλίγεται με ειδικό μηχανισμό και με συγκεκριμένη ταχύτητα (m/min) ανάλογα με την εφαρμογή. Το σύρμα μαζί με το αέριο οδεύουν προς την ειδική τσιμπίδα (εικόνα 1.7). Στην συγκεκριμένη τεχνολογία, η έναυση του τόξου πραγματοποιείται με σύντομη επαφή του σύρματος στο μέταλλο βάσης όπως και στην MMA. Σε αντίθεση όμως με την MMA, **στις MIG/MAG απαιτείται σταθερή τάση του τόξου κατά την συγκόλληση.** Η τάση αυτή κυμαίνεται συνήθως 16-25V. Η αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ MIG και MAG βρίσκεται στο αέριο που χρησιμοποιούν. Οι MIG χρησιμοποιούν κάποιο αδρανές αέριο (συνήθως αργό ή ήλιο) ή μίγματα αδρανών αερίων. Οι MAG χρησιμοποιούν μίγματα που περιέχουν δραστικά αέρια.



*Εικόνα 1.7: Τσιμπίδα ηλεκτροσυγκόλλησης MIG/MAG*



*Εικόνα 1.8: Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης MIG/MAG*



*Εικόνα 1.9: Καρούλι αναλώσιμου σύρματος και μηχανισμός τροφοδότησης εσωτερικά της μηχανής MIG/MAG*

Τα πλεονεκτήματα της MIG/MAG είναι:

- Η ευκολία στην χρήση της και οι ελάχιστες γνώσεις που απαιτεί η λειτουργία της, καθιστά προσιτή την συγκόλληση ακόμη και σε παντελώς ανειδίκευτους χρήστες.
- Υψηλός ρυθμός παραγωγικότητας.
- Ανώτερο αισθητικά αποτέλεσμα σε σχέση με την MMA, ειδικά για άτομα με χαμηλή εξειδίκευση.

Τα μειονεκτήματα της MIG/MAG είναι:

- Σημαντικά υψηλότερο κόστος εξοπλισμού.
- Υψηλό κόστος αναλώσιμου σύρματος(κόστος/μέτρο συγκόλλησης)
- Σχεδόν αδύνατη η χρήση της σε εξωτερικούς χώρους λόγω των ρευμάτων αέρα που παρασύρουν το προστατευτικό αέριο. Μπορεί να επιτευχθεί μόνο με ειδικά κινούμενα κουβούκλια.

### **1.4.3 FCAW – Συγκόλληση με σωληνωτό σύρμα που περιέχει πάστα**

Η λειτουργία της FCAW(flux cored arc welding) είναι κατά πολύ παρόμοια με αυτήν της MIG. Η κύρια διαφορά είναι ότι το σύρμα της FCAW περιέχει εσωτερικά ειδική πάστα, η οποία επιτρέπει την συγκόλληση χωρίς την χρήση αερίου. Ο εξοπλισμός είναι ο ίδιος.

Τα πλεονεκτήματα της FCAW είναι:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκόλληση σε μεγάλα πάχη ελασμάτων όταν το αέριο αδυνατεί να προστατεύσει την συγκόλληση σε μεγάλα πάχη.
- Πολύ καλή συμπεριφορά σε υπαίθριους χώρους

Τα μειονεκτήματα της FCAW είναι:

- Δεν προτείνεται για λεπτομερείς συγκολλήσεις σε λεπτά ελάσματα.
- Χαμηλής αισθητικής αποτελέσματα.
- Πολύ υψηλό κόστος αναλώσιμου σύρματος.

#### 1.4.4 TIG – Συγκόλληση με μη αναλώσιμο ηλεκτρόδιο

Στην TIG(tungsten inert gas) χρησιμοποιείται **μη αναλώσιμο** ηλεκτρόδιο κάτω από ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου. Η προσθήκη υλικού γίνεται με μορφή γυμνών ράβδων. Αποτελεί όμως, την ιδανική λύση, όταν επιδιώκεται υψηλή ποιότητα συγκόλλησης και όχι ταχύτητα εκτέλεσης. Για να εκτελεστεί συγκόλληση TIG, πρέπει η μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης να εξασφαλίζει ότι το τόξο ηλεκτροσυγκόλλησης θα διαρρέεται από **σταθερή ένταση** ρεύματος, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τη MMA. Η μορφή των μηχανών για TIG είναι όπως στο σχήμα (1.10). Η τσιμπίδα είναι όπως στο σχήμα (1.11) και ο τρόπος εκτέλεσης της συγκόλλησης είναι όπως στο σχήμα (1.12).



Εικόνα 1.10: Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης TIG



Εικόνα 1.11: Τσιμπίδα ηλεκτροσυγκόλλησης TIG



*Εικόνα 1.12: Εκτέλεση ηλεκτροσυγκόλλησης TIG*

Η ηλεκτροσυγκόλληση TIG επιτυγχάνεται ακόμη και χωρίς προσθήκη υλικού. Τα πλεονεκτήματα της TIG είναι τα εξής:

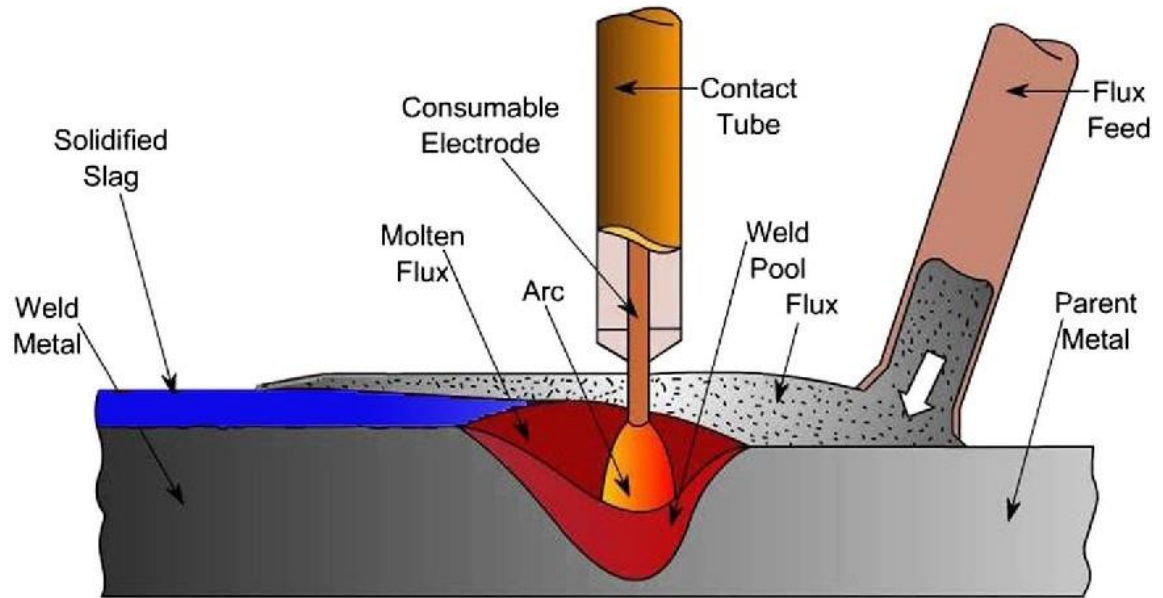
- Πολύ υψηλής ποιότητας αποτέλεσμα ραφής.
- Άψογο αισθητικό αποτέλεσμα.
- Μεγάλο εύρος σε πάχη συγκόλλησης.

Τα μειονεκτήματα της TIG:

- Απαιτεί πολύ υψηλή εξειδίκευση.
- Χαμηλός βαθμός παραγωγικότητας.

#### **1.4.5 SAW – Συγκόλληση βυθισμένου τόξου**

Η ηλεκτροσυγκόλληση SAW(submerged arc welding) είναι μια διαδικασία συγκόλλησης σχετική με την MIG. Όπως στην MIG, έτσι και στην SAW, χρησιμοποιείται αναλώσιμο καρούλι σύρματος, με την διαφορά να εντοπίζεται στον τρόπο προστασίας της συγκόλλησης. Στην SAW δεν χρησιμοποιείται κάποιο αέριο, αλλά χύμα σκόνη(πάστα) η οποία εναποτίθεται κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η SAW αποτελεί αυτοματοποιημένη διαδικασία συγκόλλησης και ο εξοπλισμός της δεν χαρακτηρίζεται από φορητότητα. Χρησιμοποιείται ευρέως σε συγκολλήσεις σωληνώσεων υψηλής πίεσης. Το τόξο της SAW δημιουργείται μέσα στην μάζα της πάστας και δεν είναι ορατό κατά την διάρκεια της συγκόλλησης.



Εικόνα 1.13: Σχηματική παράσταση ηλεκτροσυγκόλλησης SAW



Εικόνα 1.14: Διαδικασία ηλεκτροσυγκόλλησης SAW



Εικόνα 1.15: Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης SAW

Τα πλεονεκτήματα της SAW:

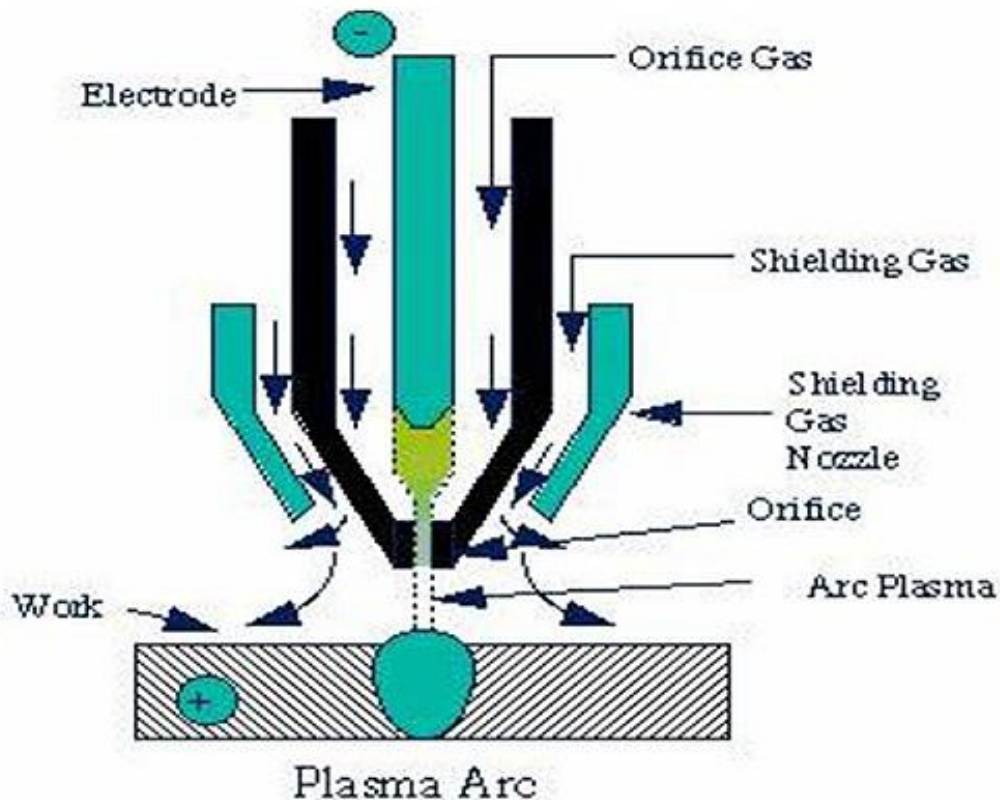
- Εξαιρετικής ποιότητας ραφές συγκόλλησης.
- Δυνατότητα συγκόλλησης σε πολύ μεγάλα πάχη.
- Ο χειριστής δεν εκτίθεται στην ακτινοβολία του τόξου.

Τα μειονεκτήματα της SAW:

- Υψηλό κόστος εξοπλισμού.
- Χρονοβόρα προετοιμασία του εξοπλισμού.

#### 1.4.6 PAW – Συγκόλληση πλάσματος

Η ηλεκτροσυγκόλληση PAW(plasma arc welding) παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με την TIG. Το ηλεκτρόδιο δεν είναι αναλώσιμο όπως και στην TIG. Η κύρια διαφορά της PAW συναντάται στην συγκέντρωση της δέσμης πλάσματος σε πολύ μικρή έκταση(<1mm). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την συγκέντρωση πολύ υψηλής θερμοκρασίας στην επιφάνεια συγκόλλησης. Το αέριο διοχετεύεται προς δυο κατευθύνσεις και σε διαφορετική πίεση για την κάθε κατεύθυνση όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.16. Το αέριο που οδεύει στην έξοδο του ηλεκτροδίου χρησιμεύει για να περιορίσει την ακτίνα της στήλης πλάσματος. Το αέριο που οδεύει εξωτερικά χρησιμοποιείται για την προστασία της συγκόλλησης. Τα αέρια αυτά μπορεί να είναι και διαφορετικά αναλόγως της εφαρμογής.



Εικόνα 1.16: Σχηματική παράσταση ηλεκτροσυγκόλλησης PAW

Τα πλεονεκτήματα της PAW είναι:

- Η υψηλή θερμοκρασία του πλάσματος (30000-35000°C) με αποτέλεσμα την ταχύτερη εναπόθεση υλικού πλήρωσης και την αποτελεσματικότερη διείσδυση στο οξείδιο του αλουμινίου.
- Καλύτερη ορατότητα λόγω της στενής δέσμης του τόξου.

Τα μειονεκτήματα της PAW είναι:

- Πολύ ακριβός εξοπλισμός.
- Απαιτεί υψηλή εξειδίκευση.

## 1.5 Ηλεκτροσυγκόλληση MMA

Η MMA είναι το επικρατέστερο είδος συγκόλλησης. Χρησιμοποιείται από επαγγελματίες και ερασιτέχνες με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σχεδόν για οποιαδήποτε εφαρμογή. Το χαμηλό κόστος της, την καθιστά προσιτή σε οποιονδήποτε θέλει να πειραματιστεί με την ηλεκτροσυγκόλληση. Η χρήση της MMA σε αρκετές περιπτώσεις κρίνεται ως μονόδρομος. Οι περιπτώσεις αυτές, στο συντριπτικό ποσοστό τους αποτελούν εργασίες σε εξωτερικούς χώρους, μιας και η χρήση ηλεκτροσυγκολλήσεων με αέριο είναι αδύνατη για τους λόγους που αναφέρονται σε προηγούμενη ενότητα.

Η εξοικείωση με την MMA θεωρείται σχετικά δύσκολη, προπάντων σε σχέση με την MIG, όμως σε καμία περίπτωση δεν συγκρίνεται με την απαιτούμενη κατάρτιση της TIG. Όμως ένας έμπειρος χρήστης ή επαγγελματίας, μπορεί να επιτύχει άριστα αποτελέσματα ακόμα και στις πιο απαιτητικές εργασίες ηλεκτροσυγκόλλησης.



Εικόνα 1.17: Ηλεκτροσυγκόλληση MMA σε αγωγό φυσικού αερίου στη Σιβηρία

### 1.5.1 Αναλώσιμα ηλεκτρόδια MMA

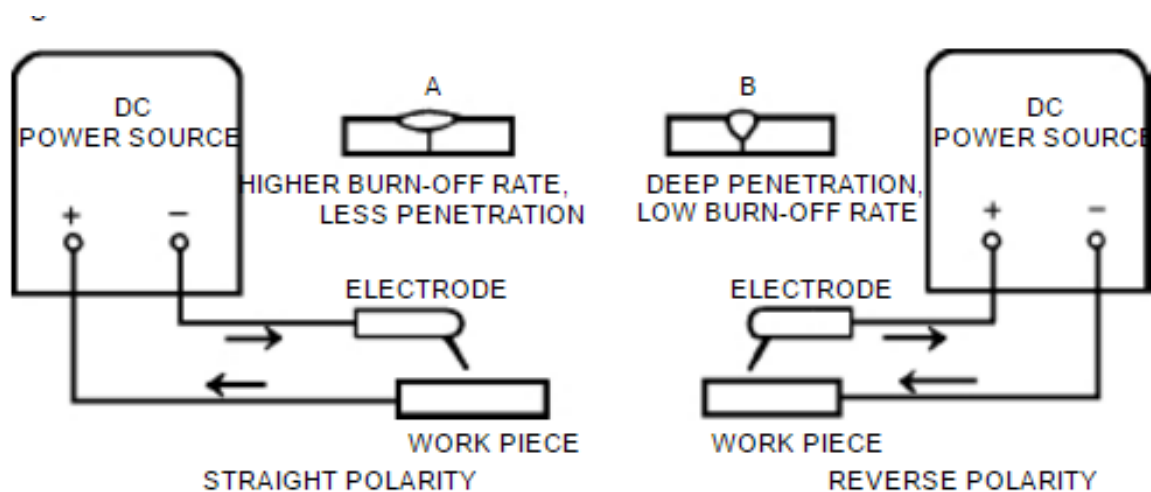
Ένα από τα πλεονεκτήματα της MMA είναι η πληθώρα ηλεκτροδίων για κάθε είδους μέταλλο. Επίσης, αξιοσημείωτη είναι και η ευκολία με την οποία αλλάζει το ηλεκτρόδιο για κάθε διαφορετικό μέταλλο χωρίς να χρειάζεται αλλαγή εξοπλισμού ή αερίου. Στο εμπόριο υπάρχουν ηλεκτρόδια για συγκόλληση κάθε είδους μετάλλου, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι το αποτέλεσμα θα είναι πάντα καλό. Για παράδειγμα, η συγκόλληση αλουμινίου με MMA θα πρέπει να αποτελεί λύση έκτακτης ανάγκης και μόνο και το ίδιο ισχύει και για άλλα μέταλλα.



Εικόνα 1.18: Διάφοροι τύποι ηλεκτροδίων MMA

### 1.5.2 Πολικότητα ρεύματος συγκόλλησης

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μηχανές MMA παρέχουν συνεχές ρεύμα συγκόλλησης με εξαίρεση τις περισσότερες που ανήκουν στην παλαιότερη τεχνολογία(χαλκού) οι οποίες παρείχαν εναλλασσόμενο ρεύμα συγκόλλησης(απευθείας από το δευτερεύον του μετασχηματιστή). Οι σύγχρονες inverter MMA μηχανές παρέχουν μόνο συνεχές ρεύμα. Όλες οι inverter δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει την πολικότητα κατά την συγκόλληση. Αν στην έξοδο +(άνοδο) συνδέσουμε το ηλεκτρόδιο τότε συγκολλούμε με DCEP(direct current electrode positive). Αυτήν την πολικότητα την χρησιμοποιούμε σπανίως και ειδικά όταν απαιτείται μεγάλη διείσδυση στο μέταλλο βάσης. Στην αντίθετη περίπτωση DCEN(direct current electrode negative) η οποία είναι και η επικρατέστερη συνδέουμε το ηλεκτρόδιο στο -(κάθοδο) της μηχανής. Για να καταστεί σαφές, το σημείο που είναι συνδεδεμένο με την άνοδο, αναπτύσσει θερμοκρασία περίπου 3500°C και το σημείο που συνδέεται με την κάθοδο περίπου 2500°C. Αναλόγως με την εφαρμογή ο χρήστης πρέπει να επιλέξει και την κατάλληλη πολικότητα.



Εικόνα 1.19: Εναπόθεση υλικού πλήρωσης ανάλογα με την πολικότητα

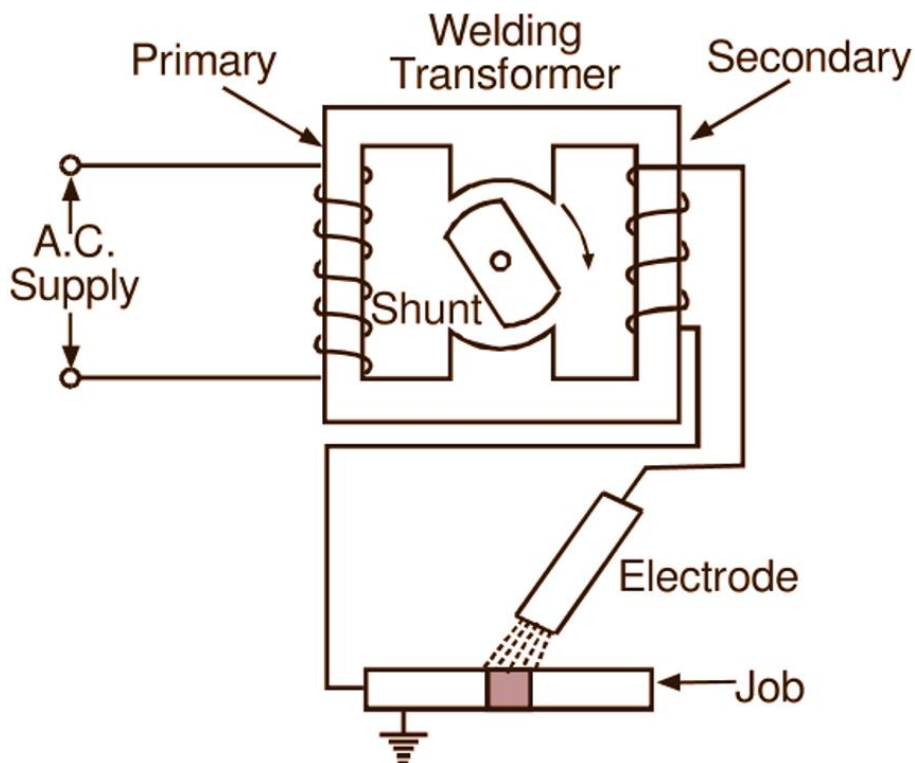
## Κεφάλαιο 2ο: Τοπολογίες μηχανών ηλεκτροσυγκόλλησης

### 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναπτυχθούν περιληπτικά οι κυριότερες τοπολογίες αντιστροφών που συντελούν στην κατασκευή των μηχανών ηλεκτροσυγκόλλησης που υπάρχουν σήμερα σε μαζική παραγωγή. Θα γίνει μια σύντομη αναφορά και στις μηχανές παλαιότερης τεχνολογίας που η λειτουργία τους βασίζεται σε μετασχηματιστή απευθείας συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τέλος, θα γίνει εκτενής παρουσίαση της τοπολογίας **Double Ended Forward Converter**, η οποία χρησιμοποιείται και στην συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία.

### 2.2 Μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης χαλκού

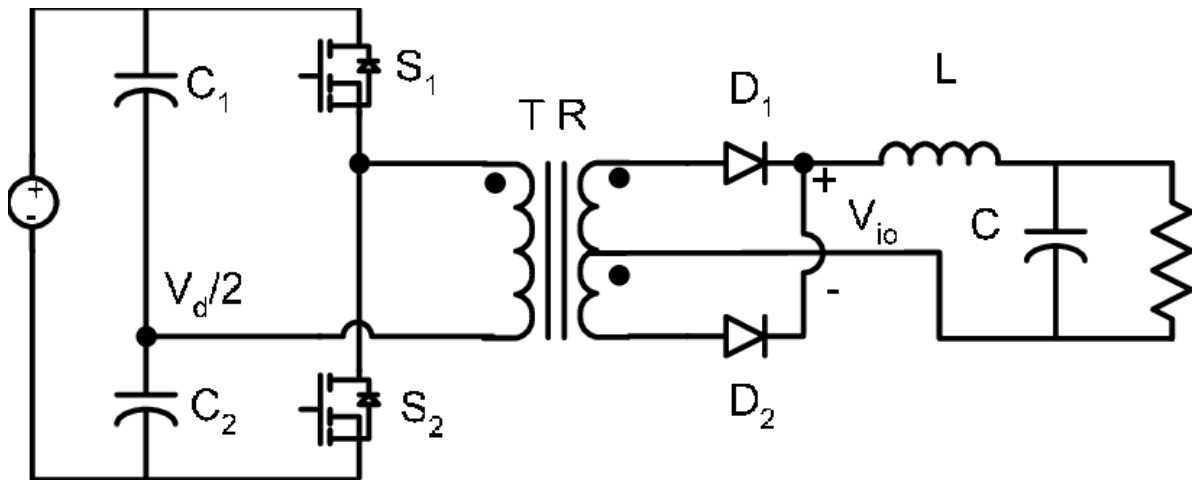
Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούν ογκώδεις μετασχηματιστές συνδεδεμένους απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το βάρος τους σε σχέση με την ισχύ εξόδου είναι εξαιρετικά μεγάλο (σε σύγκριση με τις inverter). Στις φθηνότερες μηχανές, ο μετασχηματιστής διαθέτει μεταβλητό βυθιζόμενο πυρήνα (magnetic shunt), δίνοντας έτσι την δυνατότητα ρύθμισης του επιθυμητού ρεύματος εξόδου. Οι μηχανές αυτές, παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον βαθμό απόδοσης. Οι πιο ακριβές απ' αυτές χρησιμοποιούν ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (SCR) στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, βελτιώνοντας έτσι την λειτουργία ρύθμισης του ρεύματος εξόδου, χωρίς να πρέπει να μεσολαβήσει αλλαγή των μαγνητικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή. Κάποιες μηχανές διαθέτουν στην έξοδο ανορθωτές, ώστε το ρεύμα συγκόλλησης να είναι συνεχές.



Εικόνα 2.1: Τυπικό διάγραμμα μηχανής βυθιζόμενου πυρήνα

### 2.3 Μετατροπέας τοπολογίας Half Bridge

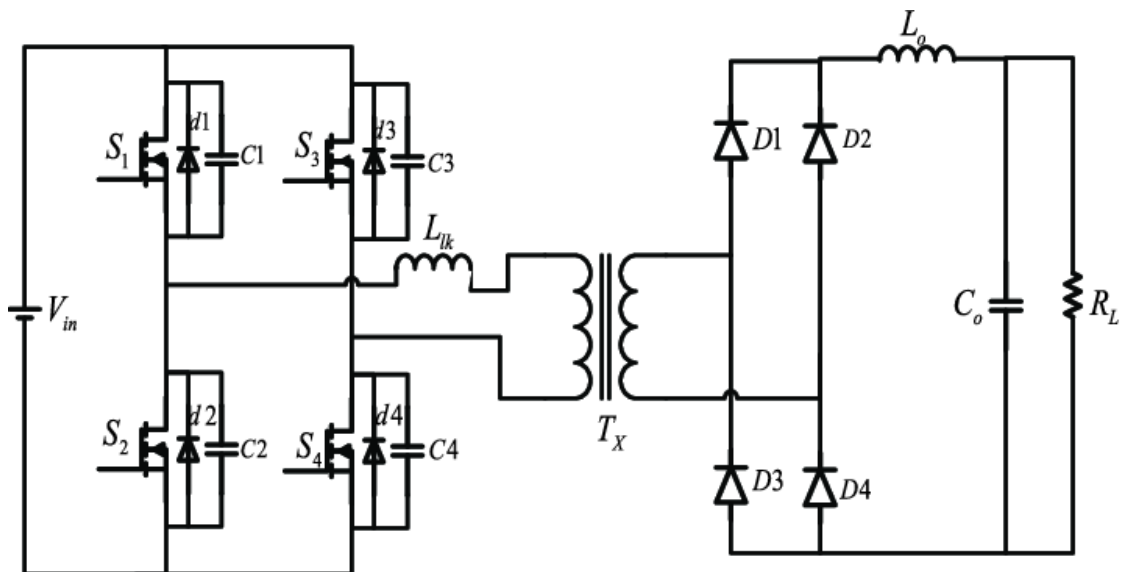
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του μετατροπέα Half Bridge έναντι του μετατροπέα Double Ended Forward Converter (ενότητα 2.6), είναι η διπλάσια συχνότητα από αυτήν της διακοπτικής περιόδου, που προκύπτει στην έξοδο του λόγω της διπλής ανόρθωσης. Αυτό επιτρέπει την χρήση μικρότερης επαγωγής και πυκνωτή εξόδου.



Εικόνα 2.2: Τυπικό διάγραμμα μετατροπέα Half Bridge

### 2.4 Μετατροπέας τοπολογίας Full Bridge

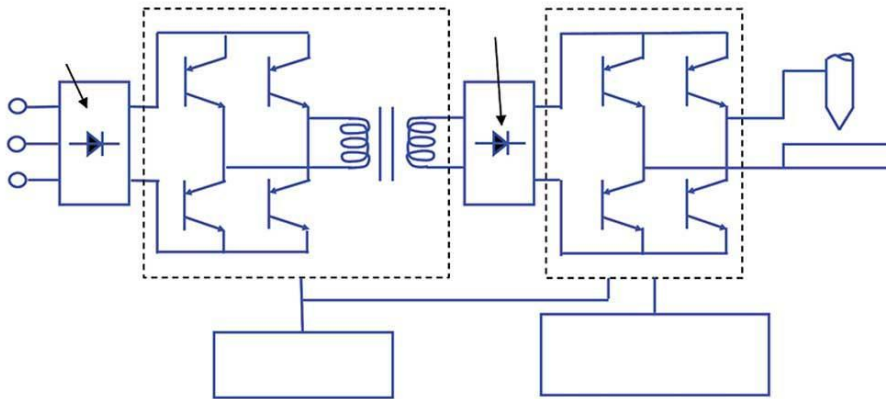
Το πλεονέκτημα του μετατροπέα Full Bridge είναι πως για δεδομένη ισχύ εξόδου, η ενεργός τιμή του ρεύματος στο πρωτεύον, είναι η μισή σε σχέση με την τοπολογία Half Bridge. Αυτό συνεπάγεται πως με τους ίδιες ικανότητας αγωγής ρεύματος διακόπτες, μπορεί να αποδώσει διπλάσια ισχύ σε σχέση με τον μετατροπέα Half Bridge.



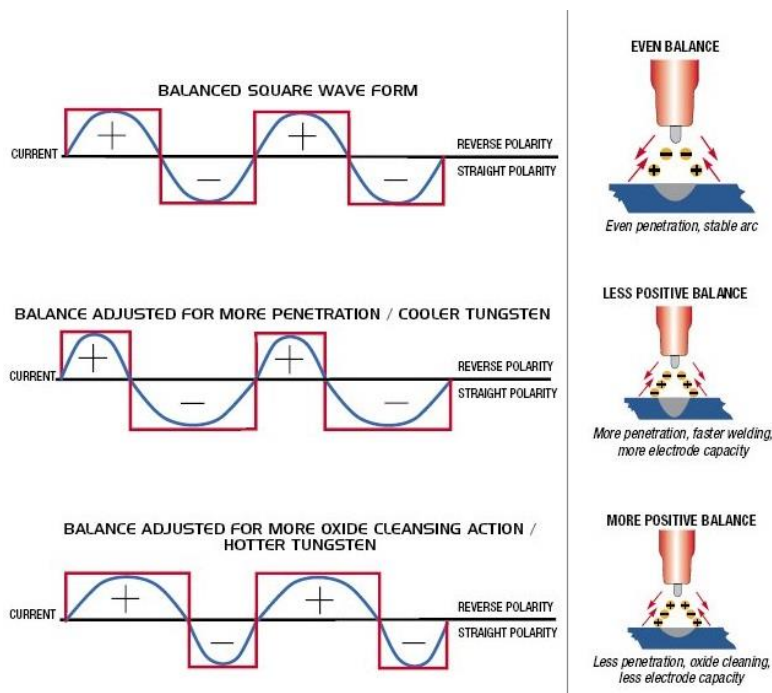
Εικόνα 2.3: Τυπικό διάγραμμα μετατροπέα Full Bridge

## 2.5 Μετατροπέας Dual Inverter

Ο μετατροπέας Dual Inverter είναι πιθανόν ότι πιο σύγχρονο υπάρχει σε μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου. Μπορεί να επιτύχει οποιαδήποτε κυματομορφή εξόδου εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος. Μηχανές που χρησιμοποιούν αυτήν την τοπολογία, συνήθως έχουν προεγκτεστημένες ρυθμίσεις(presets) για συγκόλληση οποιουδήποτε μετάλλου, αλλά παρέχουν και πολλές επιλογές παραμετροποίησης για τους πιο απαιτητικούς χρήστες. Χρησιμοποιείται η τοπολογία πλήρους γέφυρας για την οδήγηση του πρωτεύοντος και μετά το δευτερεύον, γίνεται πλήρης ανόρθωση και πιθανόν κάποιου είδους εξομάλυνση. Η δεύτερη βαθμίδα αντιστροφεί είναι επίσης πλήρους γέφυρας, όμως σε αυτήν την περίπτωση οδηγεί απευθείας το φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να ανοίγει ή να κλείνει οποιονδήποτε από τους διακόπτες, κάτι που θα ήταν αδύνατον αν υπήρχε οδήγηση σε μετασχηματιστή λόγω του κορεσμού. Η τοπολογία αυτή επιτρέπει την συγκόλληση με ac balance. Το ac balance είναι ο όρος που χρησιμοποιείται στις ηλεκτροσυγκολλήσεις για το dc offset που προστίθεται σε μια ac κυματομορφή(εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.4: Τυπικό διάγραμμα μετατροπέα Dual Inverter



Εικόνα 2.5: Λειτουργία ac balance σε dual inverter

## 2.6 Μετατροπέας τοπολογίας Double Ended Forward Converter

### 2.6.1 Επιλογή τοπολογίας

Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία, επιλέχτηκε η συγκεκριμένη τοπολογία. Η επιλογή έγινε με γνώμονα τη σχετική ευκολία με την οποία μπορεί να υλοποιηθεί αυτή η τοπολογία από έναν σχεδιαστή με μικρή εμπειρία. Επίσης υπήρχε διαθεσιμότητα από μηχανές που χρησιμοποιούσαν αυτήν την τοπολογία, κι έτσι υπήρχε ένα μέσο σύγκρισης και καθοδήγησης για το αν βαίνουν όλα καλά. Στις τοπολογίες γέφυρας απαιτείται dead time στην οδήγηση των διακοπών, κάτι που σημαίνει ότι το παραμικρό λάθος είναι καταστροφικό για τους διακόπτες και αυξάνει σημαντικά το κόστος κι έτσι αποκλείστηκε η επιλογή τους. Σημειωτέο δε, είναι ότι το συντριπτικό ποσοστό των μηχανών μέχρι τα 200A, χρησιμοποιούν την τοπολογία Double Ended Forward Converter .

### 2.6.2 Περιγραφή λειτουργίας μετατροπέα Double Ended Forward Converter

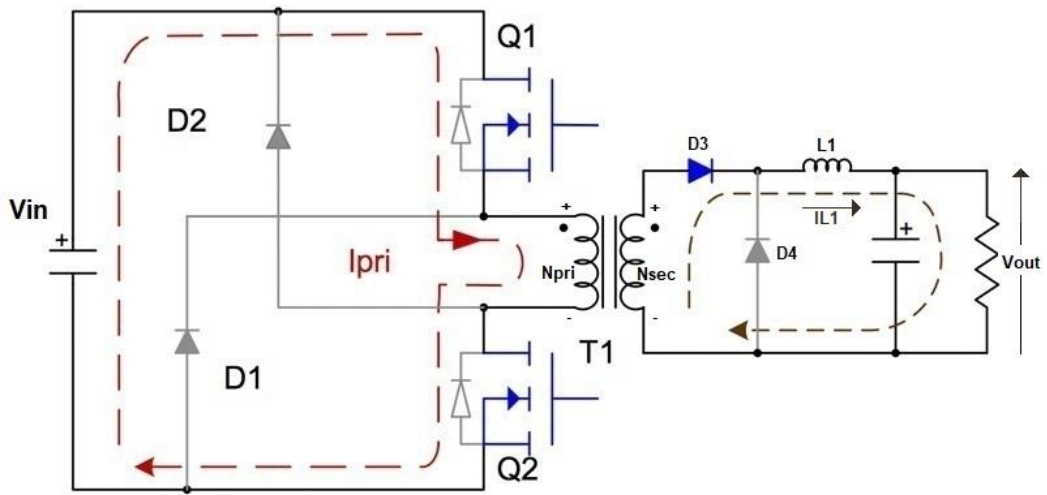
Οι δυο διακόπτες(Q1, Q2) οδηγούνται ταυτόχρονα στην αγωγή και στην αποκοπή. Κατά το διάστημα αγωγής των διακοπών(εικόνα 2.6), το πρωτεύον τύλιγμα διαρρέεται από ρεύμα(Ipri) και μαγνητίζεται. Στο δευτερεύον τύλιγμα δημιουργείται τάση εξ επαγωγής με την σημειωμένη στο σχήμα 2.6 πολικότητα. Η δίοδος D3 άγει και μεταφέρεται ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα.

Κατά την αποκοπή των διακοπών, το ρεύμα στο πρωτεύον τείνει να μειωθεί και η πολικότητα στο πρωτεύον και δευτερεύον αντιστρέφονται. Η αντιστροφή της τάσης στο πρωτεύον, οδηγεί τις διόδους D1, D2 σε αγωγή, με αποτέλεσμα, η αποθηκευμένη ενέργεια στον πυρήνα και στις αυτεπαγωγές σκέδασης του μετασχηματιστή, να επιστρέψει πίσω στην πηγή(εικόνα 2.7). Κατά το διάστημα αγωγής των D1, D2 επιτυγχάνεται απομαγνητισμός του μετασχηματιστή. Ο χρόνος που διαρκεί ο απομαγνητισμός είναι ίδιος με τον χρόνο που άγουν οι διακόπτες Q1, Q2 και γι' αυτό, το duty cycle δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50%.

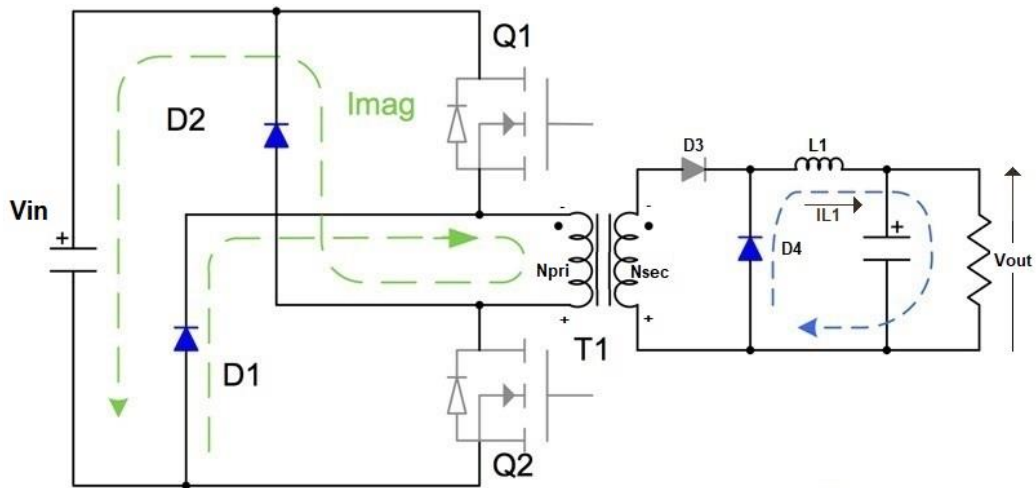
Όταν ο πυρήνας απομαγνητιστεί πλήρως, το πρωτεύον δεν διαρρέεται από ρεύμα και οι διόδοι D1, D2 έρχονται σε αποκοπή. Σε αυτήν την κατάσταση η τάση στα άκρα κάθε διακόπτη είναι  $V_{cin}/2$ . Στην κατάσταση αποκοπής, το ρεύμα IL1 ρέει μέσω της διόδου ελεύθερης ροής D4 (εικόνα 2.8).

Ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου ορίζεται από την σχέση:

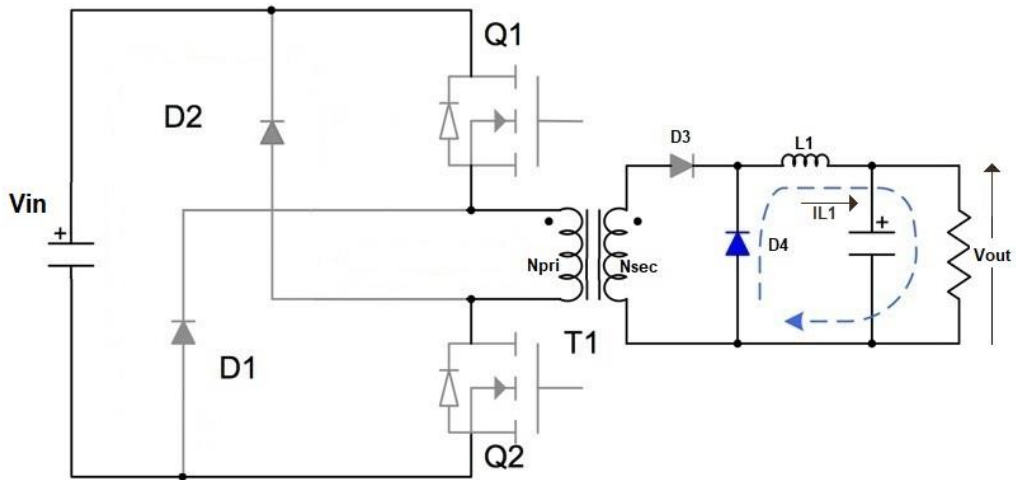
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} \times D_{on}$$



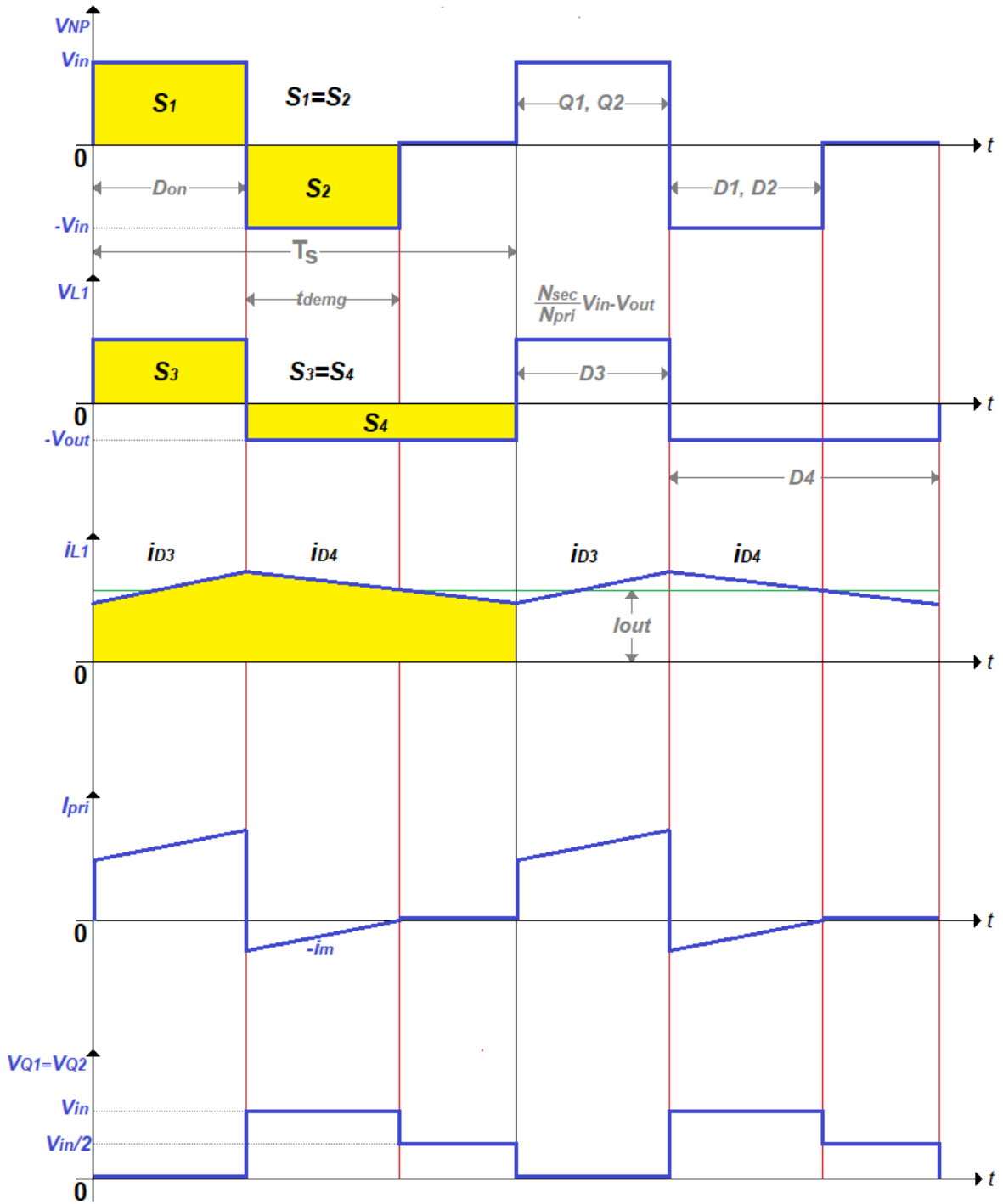
Εικόνα 2.6: Κατάσταση αγωγής



Εικόνα 2.7: Κατάσταση αποκοπής



Εικόνα 2.8: Κατάσταση πλήρους απομαγνητισμού



Εικόνα 2.9: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων μετατροπέα Double Ended Forward Converter

## Κεφάλαιο 3ο: Μεθοδολογία σχεδιασμού

### 3.1 Εισαγωγή

Κατά την ανάπτυξη της συγκεκριμένης μηχανής συναντήθηκαν αρκετές δυσκολίες και εμπόδια. Δύο από τα σημαντικότερα εμπόδια ήταν ο έλεγχος και οι μετρήσεις. Ο έλεγχος ρεύματος της τάξης των 100Α αποτελεί πρόκληση. Το παραμικρό λάθος στον σχεδιασμό και ακόμη και η ελάχιστη επιπλέον παραμονή των διακοπών σε αγωγή μπορεί να είναι καταστροφική για τους τελευταίους και κατ'επέκταση για τα γειτονικά τους υποσυστήματα. Κάτι τέτοιο θα ανέβαζε σημαντικά το κόστος της ανάπτυξης. Για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, η κατασκευή χωρίστηκε σε υποκυκλώματα, τα οποία καθιστούσαν τις μετρήσεις πιο ασφαλείς. Πρόβλημα αποτέλεσε και η έλλειψη της αγοράς σε ημιαγωγούς αλλά και σε πυρήνες φερρίτη.

Τα όργανα που αποδείχθηκαν απαραίτητα είναι τα εξής(σε παρένθεση αυτό που χρησιμοποιήθηκε):

\*Ψηφιακό πολύμετρο με δυνατότητα μέτρησης DC υψίσυχνης τάσης(UNI-T UT61E)

\*Ψηφιακός παλμογράφος(RIGOL DS1054Z)

\*Διαφορικό probe παλμογράφου(Ιδιοκατασκευή από ΕΛΕΚΤΟΡ τεύχος 142)

\*Αμπεροτσιμπίδα DC(UNI-T UT213C)

\*Variac transformer 3KVA

\*Μετασχηματιστές απομόνωσης με εξόδους 42, 100, 230 VAC & >10A.

### 3.2 Μέθοδος ελέγχου Peak Current Mode

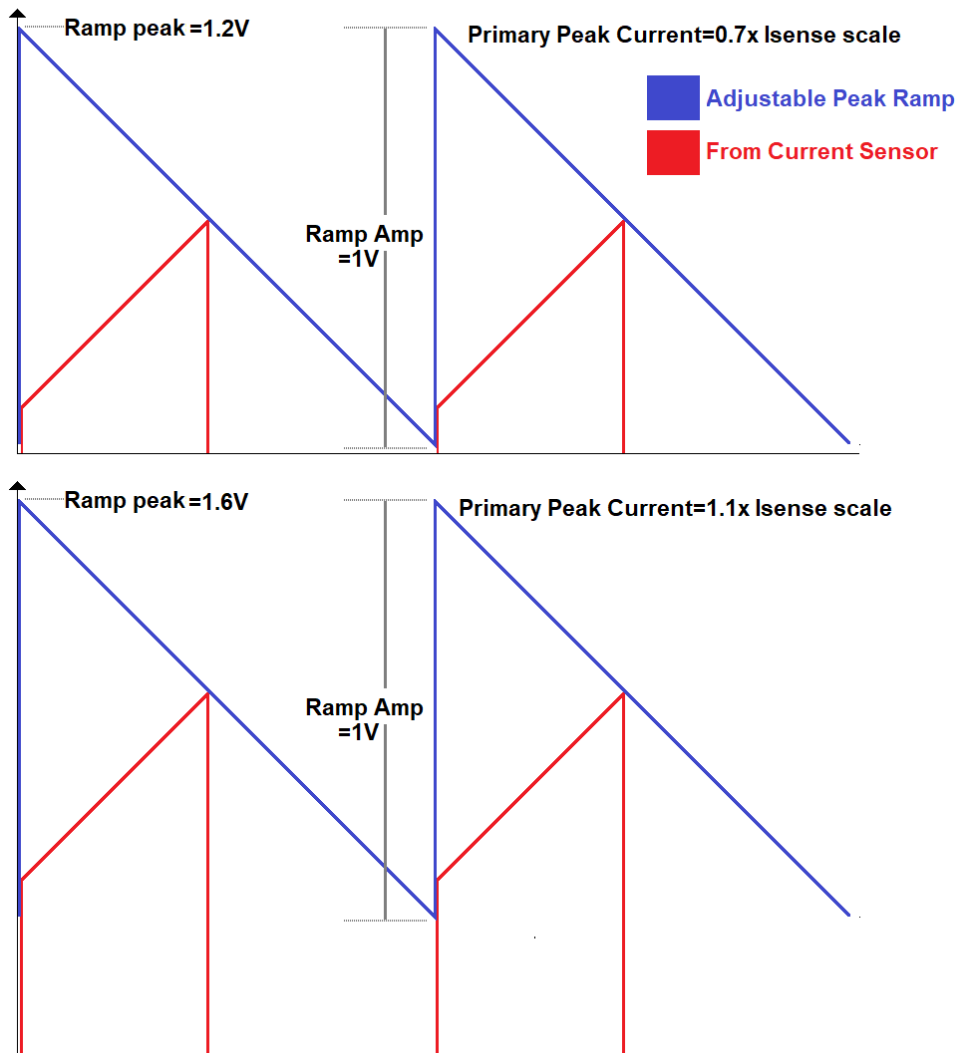
#### 3.2.1 Περιγραφή λειτουργίας

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για τον περιορισμό του ρεύματος είναι η μέθοδος Peak Current Mode. Σε αυτήν τη μέθοδο, παρακολουθείται το ρεύμα του πρωτεύοντος και μόλις το ρεύμα αγγίξει το σημείο στο οποίο έχουμε ορίσει ως περιορισμό, ο παλμός του duty cycle σβήνει και οι διακόπτες έρχονται σε αποκοπή. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε κάθε περίοδο, μέσω προγραμματιζόμενου αναλογικού συγκριτή που περιλαμβάνεται εσωτερικά του μικροελεγκτή. Αυτό συνεπάγεται ότι το ρεύμα δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να υπερβεί το όριο που έχει τεθεί, κάτι που είναι εξαιρετικά σημαντικό σε αυτήν την εφαρμογή. Με ένα ποτενσιόμετρο, ρυθμίζεται η τάση της κορυφής της ράμπας η οποία οδηγείται ως αναφορά στον συγκριτή. **Πρέπει να σημειωθεί πως δεν υπάρχει κάποιος αλγόριθμος αυτομάτου ελέγχου ρεύματος. Δηλαδή δεν ρυθμίζουμε το επιθυμητό ρεύμα εξόδου αλλά το μέγιστο.** Παρ' όλα αυτά, για δεδομένη ρύθμιση κορυφής της ράμπας, το ρεύμα συγκόλλησης είναι εξαιρετικά σταθερό. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη φύση του φορτίου, το οποίο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές στην πολύ μικρή του αντίσταση κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Στην εικόνα 3.1 απεικονίζεται η διαδικασία σύγκρισης.

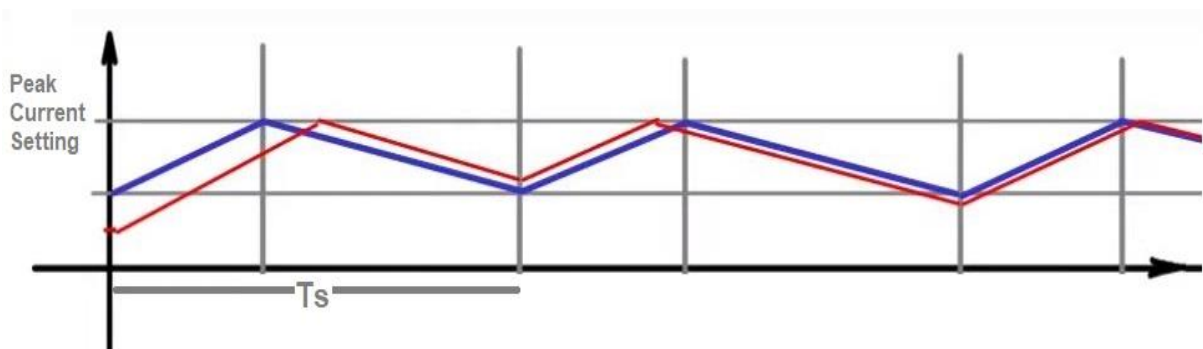
#### 3.2.2 Η χρήση της ράμπας ως μέθοδο περιορισμού ρεύματος

Η εικόνα 3.2 δείχνει την κυματομορφή του ρεύματος, αν αντί για ράμπα χρησιμοποιηθεί μια τάση αναφοράς. Παρατηρείται πως υπάρχει παραμόρφωση στην κυματομορφή. Αυτό ονομάζεται **υποαρμονική παραμόρφωση** και προκαλεί απώλεια στον έλεγχο του ρεύματος. Είναι πολύ σημαντικό επίσης, να εξαλείφεται αυτό το φαινόμενο όταν σχεδιάζονται συστήματα βασισμένα στην θεωρία αυτομάτου ελέγχου. **Βασική προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία του συστήματος είναι η κλίση της ράμπας να είναι η ίδια με την κλίση που προκαλεί η επαγωγή του συστήματος.**

$$\text{Primary Peak Current} = \text{Ramp peak} - \frac{\text{Ramp amp}}{2} \times \text{Isense scale}$$



Εικόνα 3.1: Κυματομορφές Peak Current Mode. Όσο υψηλότερα τίθεται το η κορυφή της ράμπας, τόσο μεγαλύτερο το ρεύμα πρωτεύοντος και κατ' επέκταση το ρεύμα εξόδου



Εικόνα 3.2: Με μπλε η επιθυμητή κυματομορφή, με κόκκινο οι επιπτώσεις της υποαρμονικής παραμόρφωσης

### 3.3 Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε

Ο μικροελεγκτής ανήκει στην οικογένεια STM32 και είναι το μοντέλο G474RE. Ο συγκεκριμένος επιλέχθηκε λόγω της πληθώρας αναλογικών μονάδων που διαθέτει. Κάποια από τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Arm Cortex M4 CPU
- Χρονισμός επεξεργαστή 170MHz(max)
- 213 DMIPS
- CORDIC για hardware (χωρίς την χρήση της CPU) υπολογισμό τριγωνομετρικών συναρτήσεων
- FMAC για hardware επεξεργασία αριθμών κινητής υποδιαστολής μέσω φίλτρων
- 512 kbytes μνήμης Flash
- 96 kbytes μνήμης SRAM
- 16-κάναλος DMA controller
- Πληθώρα ADC's και DAC's
- Τελεστικοί ενισχυτές

Τα δύο κυριότερα χαρακτηριστικά που οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή είναι η ύπαρξη αναλογικών συγκριτών και ο High Resolution Timer.

Στους συγκριτές που περιλαμβάνει ο μικροελεγκτής προσφέρονται δυνατότητες όπως:

- Δρομολόγηση(routing) σημάτων στις εισόδους του συγκριτή. Δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα να οδηγήσουμε στις εισόδους του σήματα που εισάγουμε από άλλα κυκλώματα εκτός του μικροελεγκτή(μέσω των pins) ή σήματα που δημιουργούμε μέσω του προγράμματος εντός του μικροελεγκτή με την χρήση του DAC.
- Μπορούμε να οδηγήσουμε την έξοδο του συγκριτή ώστε να δίνει interrupt σε κάποιον timer ή ακόμα και στις εισόδους τελεστικών ενισχυτών(εντός του μικροελεγκτή) των οποίων οι έξοδοι μπορούν να δρομολογηθούν σε κάποιο από τα pins. Φυσικά δύναται και η δυνατότητα για συνδυασμό των παραπάνω.

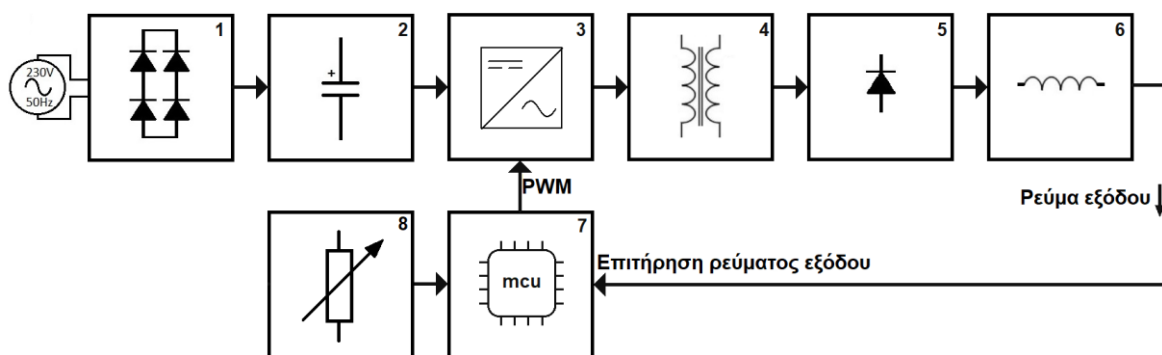
Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιείται ένας συγκριτής στον οποίο τις εισόδους εισάγεται ράμπα που έχει δημιουργηθεί από τον DAC και η έξοδος του κυκλώματος αισθητήρα ρεύματος. Η έξοδος του συγκριτή αποτελεί interrupt για τον HRTIM. Η ράμπα του DAC περνάει συγχρόνως και σε τελεστικό ενισχυτή συνδεσμολογίας voltage follower και ο τελευταίος δρομολογεί την έξοδό του σε pin του μικροελεγκτή ώστε να γίνει σχετική μέτρηση για τις εικόνες που υπάρχουν στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Ο HRTIM προσφέρει το πλεονέκτημα της υψηλής ακρίβειας PWM. Ο συγκεκριμένος timer μπορεί να λειτουργήσει σε συχνότητα μέχρι και 5.44GHz. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται χρονισμός στα 2.72GHz που συνεπάγεται περίοδο 367ps. Η συχνότητα λειτουργίας της μηχανής είναι στα 41.52kHz. Αυτό σημαίνει ότι ο παλμός του PWM μπορεί να χωριστεί σε 65510 τιμές(από DC=0% μέχρι DC 100%). Αυτό επιτρέπει στο εύρος του παλμού να αυξομειώνεται με εξαιρετικά μικρά βήματα με ότι συνεπάγεται αυτό για ένα σύστημα που λειτουργεί με PWM.

Δυστυχώς λόγω της πρωτοφανούς έλλειψης σε ημιαγωγούς που υφίσταται αυτήν την εποχή, δεν κατέστη δυνατή η προμήθεια του συγκεκριμένου μικροελεγκτή ως αυτούσιο ολοκληρωμένο κύκλωμα και γι' αυτό χρησιμοποιείται αναπτυξιακή πλακέτα όπως φαίνεται στις εικόνες του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου. Παρ' όλα αυτά μεριμνήθηκε ώστε η αναπτυξιακή πλακέτα να στηρίζεται σε μια κάθετη μικρή πλακέτα-βάση που προσαρτάται επάνω στην κύρια πλακέτα ώστε όταν το ολοκληρωμένο θα είναι διαθέσιμο, να πρέπει να επανασχεδιαστεί μόνο η πλακέτα-βάση.

### 3.4 Τα υποσυστήματα της μηχανής

Στην εικόνα 3.3 φαίνεται το block διάγραμμα του συστήματος. Στις υποενότητες της ενότητας 3.4 θα παρουσιαστούν τα υποκυκλώματα που συντελούν ώστε να υλοποιηθεί το σύστημα της εικόνας 3.3. Στο 1<sup>ο</sup> block απεικονίζεται η γέφυρα ανόρθωσης που συνδέεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο και οδηγεί την ανορθωμένη πλέον τάση του δικτύου προς εξομάλυνση σε συστοιχία πυκνωτών όπως απεικονίζει το 2<sup>ο</sup> block. Στο 3<sup>ο</sup> block συναντάται η βαθμίδα του αντιστροφέα ο οποίος με συχνότητα 41kHz οδηγεί τα IGBT's τα οποία μετατρέπουν την εξομαλυμένη DC τάση σε παλμική DC και με την σειρά τους οδηγούν το πρωτεύον του μετασχηματιστή του 4<sup>ου</sup> block. Το 5<sup>ο</sup> block απεικονίζει την ανόρθωση που πραγματοποιείται στην εναλλασσόμενη πλέον τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και το 6<sup>ο</sup> block την εξομάλυνση μέσω της επαγωγής αμέσως πριν την έξοδο του συστήματος. Το 7<sup>ο</sup> block αντιπροσωπεύει την ανάδραση του συστήματος, όπου το ρεύμα εξόδου επιτηρείται και αναλόγως διαμορφώνει τους παλμούς οδήγησης του αντιστροφέα. Στην πραγματικότητα το ρεύμα που μετρείται είναι του πρωτεύοντος το οποίο είναι φυσικά ανάλογο με το ρεύμα εξόδου, όμως για μεγαλύτερη σαφήνεια το block διάγραμμα σχεδιάστηκε με αυτόν τον τρόπο. Το 8<sup>ο</sup> block απεικονίζει την ρύθμιση του επιθυμητού μέγιστου ρεύματος εξόδου, η οποία γίνεται μέσω ποτενσιόμετρου που συνδέεται απευθείας στον μικροελεγκτή.

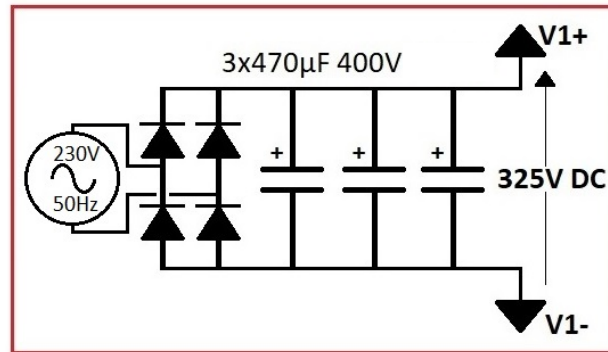


Εικόνα 3.3: Block διάγραμμα συστήματος

#### 3.4.1 Ανόρθωση και εξομάλυνση

Το κύκλωμα της εικόνας 3.4 ανορθώνει απευθείας την τάση δικτύου 230V-50Hz και έπειτα επιτυγχάνει την εξομάλυνση της ανορθωμένης τάσης η οποία έχει συχνότητα 100Hz μέσω τριών ηλεκτρολυτικών πυκνωτών. Κατά την συγκόλληση παρατηρείται αρκετά μεγάλη κυμάτωση(ripple), κάτι όμως που δεν έχει καμία επίπτωση στην ποιότητα της συγκόλλησης ή στην αίσθηση κατά την χρήση. Η τάση 'V1+ V1-' προκύπτει από την σχέση:

$$230 \times \sqrt{2} = 325,27V$$



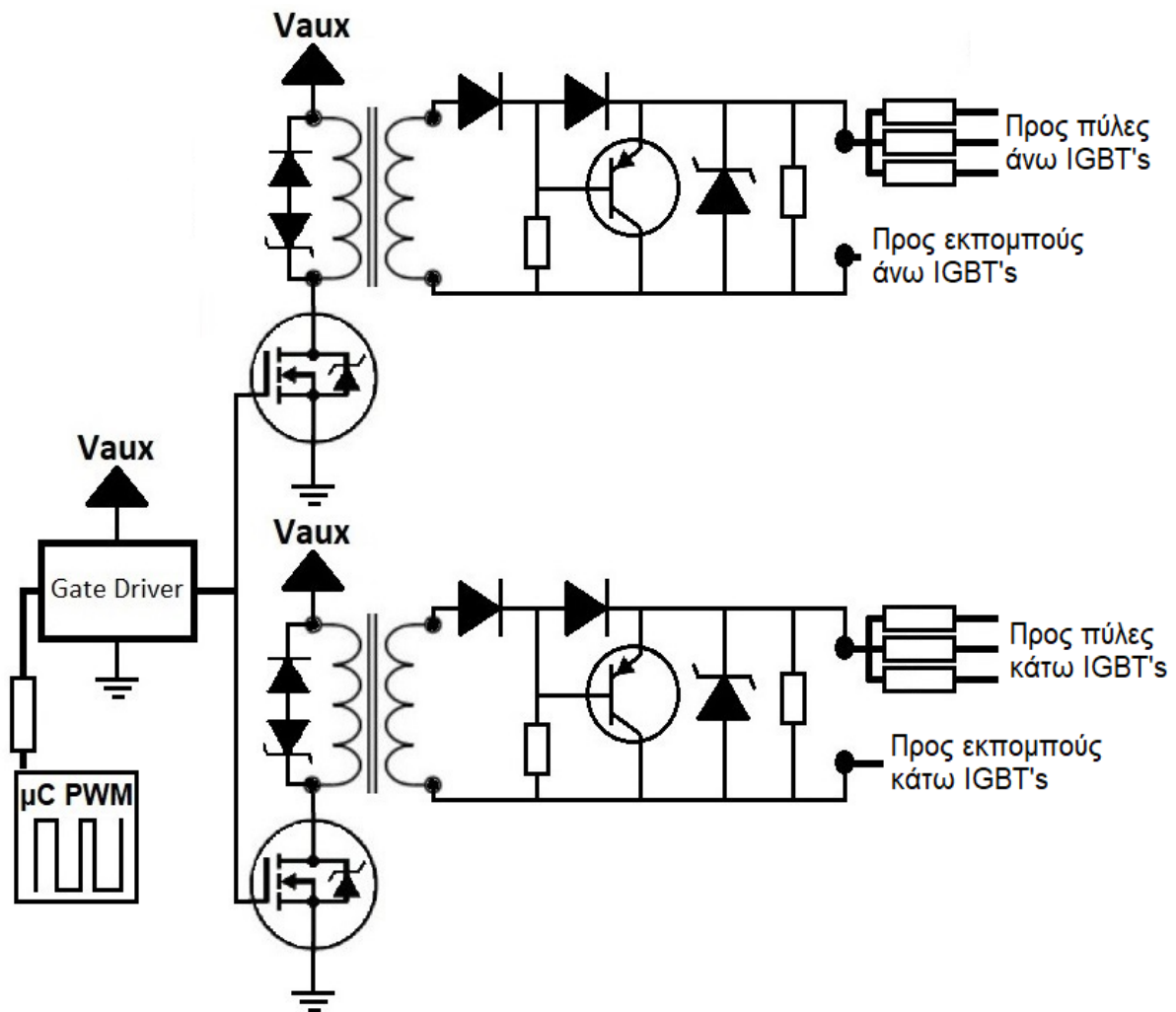
Εικόνα 3.4: Κύκλωμα ανόρθωσης και εξομάλυνσης

### 3.4.2 Κυκλώματα οδήγησης πυλών των IGBT's

Τα κυκλώματα οδήγησης των πυλών (εικόνα 3.6), πραγματοποιούνται με μετασχηματιστές (1:1) όπως της εικόνας 3.5. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα gate driver, λαμβάνει παλμό έναυσης από τον μικροελεγκτή και με την σειρά του τον ενισχύει σε πλάτος και ένταση οδηγώντας έτσι τις πύλες των δύο N channel mosfet's συγχρόνως. Κατά την αγωγή των mosfet's, ρεύμα διαρρέει τα πρωτεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών μέσω της πηγής **15V(Vaux)**. Τάση ίδιας πολικότητας δημιουργείται στα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών η οποία οδηγεί παράλληλα τις πύλες των IGBT's μέσω αντιστάσεων. Η διάδος zener(18V), προστατεύει τις πύλες από τυχόν υπερτάσεις. Κατά την αποκοπή, τα pnp transistors πολώνονται ορθά και μέσω αυτών πραγματοποιείται η εκφόρτιση των πυλών στα IGBT's. Οι δίοδοι παράλληλα στα πρωτεύοντα τυλίγματα προστατεύουν τα mosfet's από τυχόν υπερτάσεις που δημιουργούνται από τις επαγωγές των τυλιγμάτων, οι οποίες πιθανόν να ξεπερνούσαν την ονομαστική τους Vds breakdown. Η zener(18V) πολώνεται όταν η τάση ξεπερνά τα  $18V+0.7V$  (τα  $0.7V$  της εν σειρά διόδου) κι έτσι επιτρέπεται ελεύθερη ροή μέσω των πρωτευόντων τυλιγμάτων. Η επιλογή αυτού του κυκλώματος παρέχει πλήρη γαλβανική απομόνωση, κάτι που κρίνεται απαραίτητο για την οδήγηση διακοπών που βρίσκονται σε διαφορετικό δυναμικό. Επίσης παρέχει προστασία στα κυκλώματα που βρίσκονται στην μεριά του πρωτεύοντος.



Εικόνα 3.5: Μετασχηματιστές οδήγησης πυλών



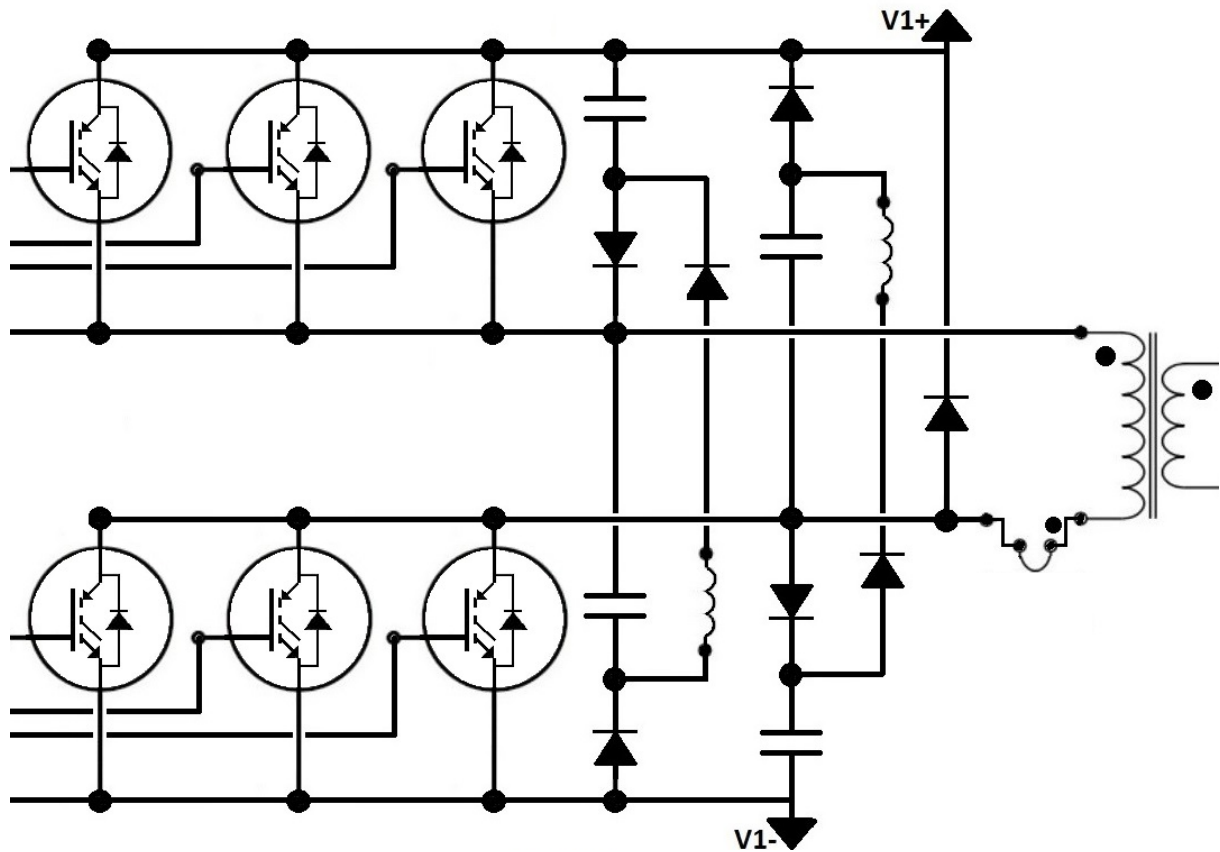
Εικόνα 3.6: Κύκλωμα οδήγησης πολλών IGBT's

### 3.4.3 Οδήγηση μετασχηματιστή Ισχύος

Στην εικόνα 3.7 απεικονίζεται η διάταξη του αντιστροφέα double ended forward. Χρησιμοποιούνται 6 IGBT's των 15A (σε  $T_j=100^\circ\text{C}$ ) με μέγιστη  $V_{ce}$  1200V. Η επιλογή των συγκεκριμένων ήταν λύση έκτακτης ανάγκης, μιας και υπάρχει μεγάλη έλλειψη στην αγορά των ημιαγωγών. Παρ' όλα αυτά ανταπεξήλθαν αξιοπρεπώς στις απαιτούμενες ανάγκες. Παρατηρούμε πως υπάρχουν 2 σειρές με 3 παράλληλα IGBT's η κάθε μία. Αυτό επιλέχθηκε για να αυξηθεί η ικανότητα αγωγής μεγαλύτερων ρευμάτων. Η λειτουργία του μετατροπέα περιγράφεται λεπτομερώς στην ενότητα 2.6.2.

Δεξιά των IGBT's φαίνεται το κύκλωμα snubber. Αυτό το κύκλωμα απορροφά τις αιχμές τάσης (inductive spikes) που προκαλούνται από την επαγωγή του πρωτεύοντος κατά την μετάβαση των διακοπών από την αγωγή στην αποκοπή. Το snubber κρίνεται απαραίτητο και παρόλο που χρησιμοποιούνται IGBT's των 1200V, οι αιχμές είναι πιθανόν να ξεπεράσουν αυτήν την τάση και σίγουρα το κύκλωμα snubber αποτελεί μια επιπλέον δικλείδα προστασίας. Επίσης, όπως φαίνεται τα υλικά που χρησιμοποιούνται δεν καταναλώνουν ενέργεια (non dissipative snubber) που σημαίνει ότι δεν μειώνει τον βαθμό απόδοσης.

Οι συχνότητα λειτουργίας του αντιστροφέα είναι τα 41kHz. Ο μετασχηματιστής διαθέτει λόγο σπειρών 12:4 και δεν είναι γνωστά τα επιπλέον χαρακτηριστικά του μιας και έχει παρθεί από παλιά μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης που υπήρχε διαθέσιμη.



Εικόνα 3.7: Κύκλωμα οδήγησης μετασχηματιστή Ισχύος

### 3.4.4 Κύκλωμα αισθητήρα ρεύματος

Το κύκλωμα αυτό, αρχικά χρησιμοποιεί έναν μετασχηματιστή του οποίου το πρωτεύον αποτελείται από ένα τύλιγμα το οποίο ουσιαστικά είναι η μία άκρη του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή ισχύος(εικόνα 3.8 και 3.9).

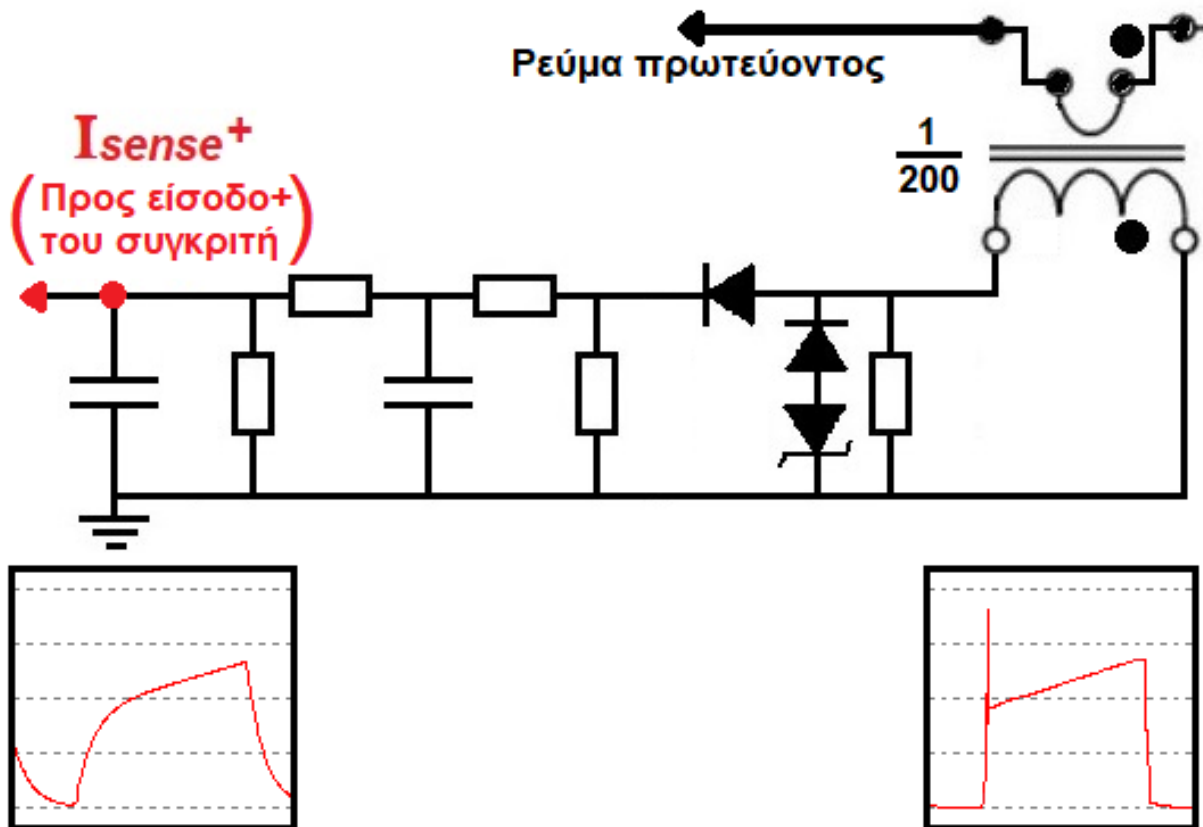


*Εικόνα 3.8: Τρόπος σύνδεσης μετασχηματιστή ρεύματος*



*Εικόνα 3.9: Ο μετασχηματιστής ρεύματος που χρησιμοποιείται*

Ο μετασχηματιστής διαθέτει εσωτερικά τύλιγμα 200 σπειρών. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα θα είναι 200 φορές μικρότερο από αυτό του πρωτεύοντος. Το κύκλωμα της εικόνας 3.10, το οποίο χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη μηχανή, παρέχει εξασθένηση και φιλτράρισμα ώστε να μην περνάνε τυχόν αιχμές στις εισόδους του μικροελεγκτή. Το κύκλωμα έχει ρυθμιστεί να δίνει στην έξοδο του 25mV/A. Δηλαδή αν το πρωτεύον διαρρέεται από 10A θα έχουμε στην έξοδο 250mV. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.10 γίνεται ανόρθωση ώστε να βλέπουμε στην έξοδο μόνο το ρεύμα κατά την διάρκεια αγωγής των διακοπών και όχι το ρεύμα απομαγνητισμού του μετασχηματιστή.

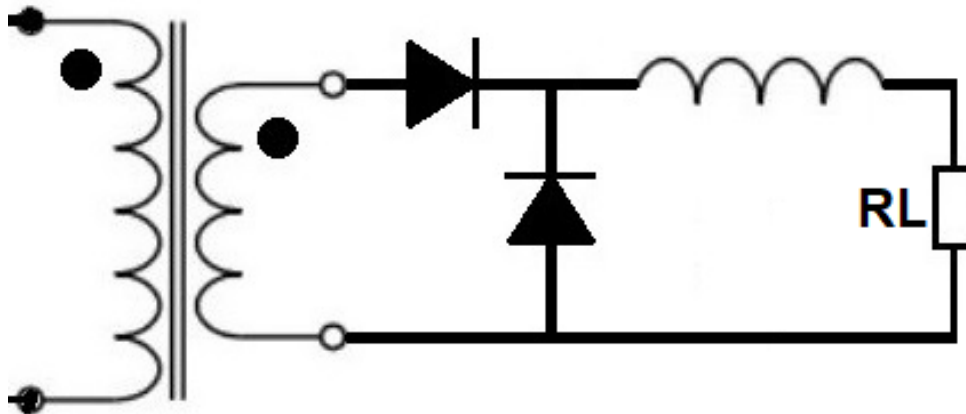


Εικόνα 3.10: Κύκλωμα εξασθένησης και φιλτραρίσματος

### 3.4.5 Κύκλωμα ανόρθωσης ρεύματος εξόδου

Μετά το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή ισχύος συναντάται η τοπολογία του σχήματος 3.11. Θυμίζει μετατροπέα Buck Converter και ουσιαστικά η λειτουργία του είναι παρόμοια. Η λειτουργία του κυκλώματος περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 2.6.2. Η διαφορά με το τυπικό κύκλωμα της ενότητας 2.6.2 είναι η έλλειψη πυκνωτή εξομάλυνσης. Για ρεύμα της τάξης των 100A θα απαιτούνταν δυσθεώρητου μεγέθους πυκνωτής. Το πηνίο επιτυγχάνει μια ικανοποιητική εξομάλυνση και ουσιαστικά χρησιμοποιείται για να διατηρήσει το τόξο συγκόλλησης κατά την διάρκεια της αποκοπής των διακοπών. Πολλές μηχανές του εμπορίου παρόμοιας έντασης, παραλείπουν την χρήση πηνίου εξομάλυνσης.

Οι δίοδοι στο σύνολό τους είναι 4. Δύο παράλληλα για κάθε μια του σχήματος 3.11 και υπάρχουν παράλληλα με αυτές κυκλώματα RC snubber. Το πλήρες σχηματικό παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 3.11: Κύκλωμα ανόρθωσης και εξομάλυνσης

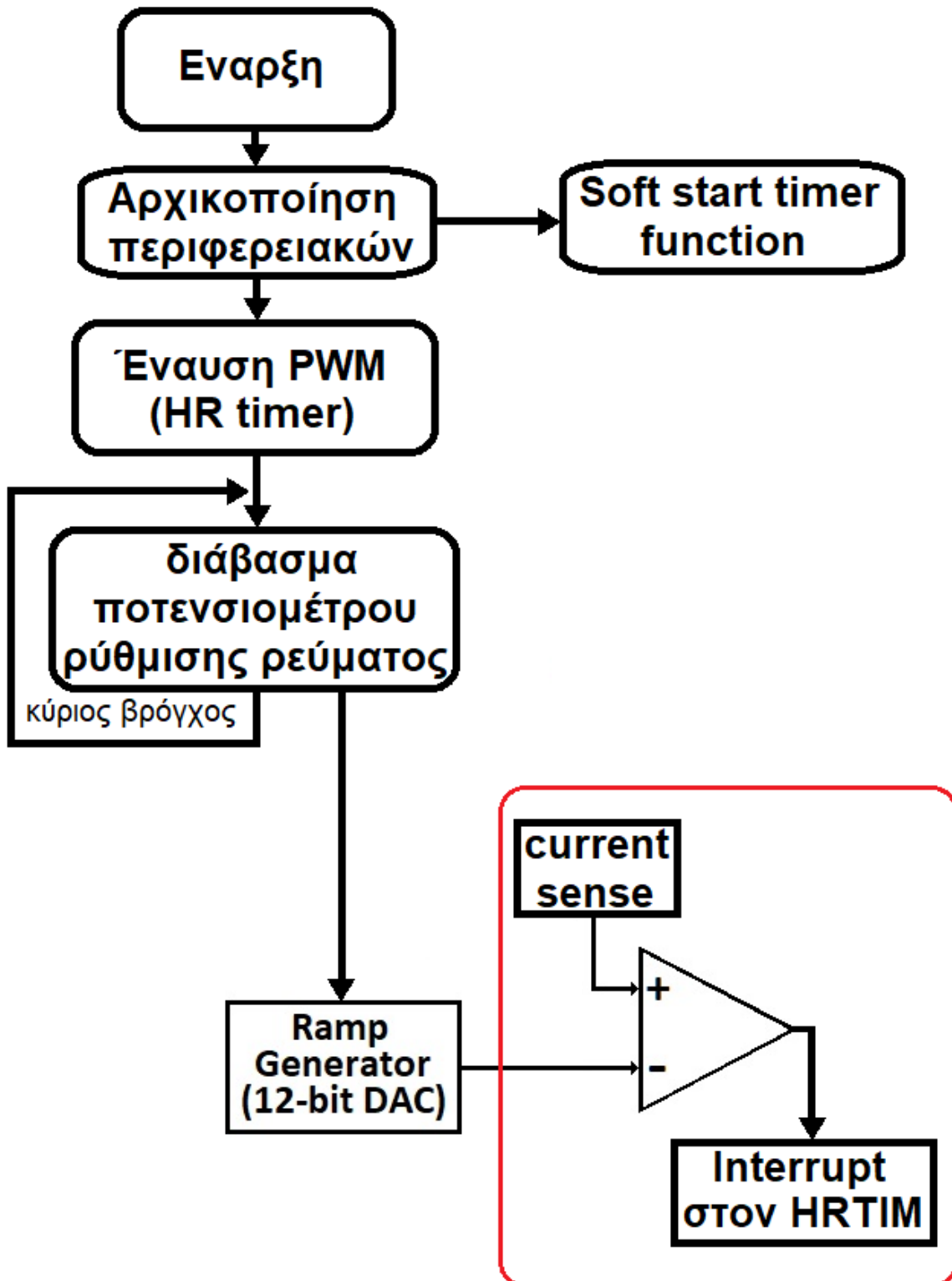
### 3.4.6 Firmware

Στην εικόνα 3.12 φαίνεται η απλοποιημένη διαδικασία της λειτουργίας του μικροελεγκτή. Μετά την αρχικοποίηση των υποσυστημάτων του μικροελεγκτή, πραγματοποιείται η λειτουργία soft start. Στην πραγματικότητα παύει το soft start και η γέφυρα ανόρθωσης συνδέεται απευθείας με το δίκτυο. Μόλις ενεργοποιηθεί η μηχανή, οι πυκνωτές φορτίζουν μέσω αντίστασης  $2,2\Omega$  και σε δύο δευτερόλεπτα ο μικροελεγκτής μανδαλώνει το ρελέ απευθείας στο δίκτυο. Το ρελέ βρίσκεται πριν την γέφυρα ανόρθωσης (στο AC δηλαδή) εκμεταλλευόμενο έτσι το zero crossing του εναλλασσόμενου και κατ' επέκταση την αποφυγή εκτεταμένης διάρκειας ηλεκτρικού τόξου στις επαφές του.

Έπειτα ενεργοποιείται ο High Resolution Timer ο οποίος δίνει τον παλμό PWM. Ο συγκεκριμένος είναι ρυθμισμένος στα 41kHz και ο μέγιστος κύκλος εργασίας (duty cycle) έχει περιοριστεί στο 0.5(50%). Αυτό σημαίνει ότι όταν η μηχανή δεν συγκολλεί (standby) το duty cycle είναι μόνιμα στο 50%. Να σημειωθεί ότι ο timer είναι τελείως ανεξάρτητος από το πρόγραμμα και δεν εκτελείται καμία λειτουργία από τον επεξεργαστή σχετική με τον timer. Έπειτα το πρόγραμμα εισέρχεται στον κύριο βρόγχο και το μόνο που κάνει είναι να διαβάζει την τιμή του ποτενσιόμετρου ρύθμισης μέγιστου ρεύματος. Η τιμή αυτή μεταφράζεται σε επιθυμητή κορυφή και καταλήγει στον DAC ο οποίος δημιουργεί **ράμπα σταθερού πλάτους και κλίσης(μοίρες)** και **μεταβλητής κορυφής** ανάλογα με την τιμή του ποτενσιόμετρου. Ο DAC ενεργοποιείται με interrupt κατά την έναυση του παλμού από τον HRTIM και οδηγεί (δρομολογεί) την ράμπα στην αρνητική είσοδο του συγκριτή.

**Η διαδικασία που περικυκλώνεται με κόκκινο χρώμα είναι τελείως ανεξάρτητη από την cpu και πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου από hardware περιφερειακά που περιλαμβάνει ο μικροελεγκτής.** Η κυματομορφή στην έξοδο του αισθητήρα ρεύματος οδηγείται στην θετική είσοδο του συγκριτή και όταν συναντήσει την ράμπα ελέγχου τότε η έξοδος του συγκριτή δημιουργεί παλμό ο οποίος είναι και interrupt προς τον HRTIM. Ο HRTIM με την σειρά του οδηγεί σε σβέση τον παλμό του PWM και ο παλμός παραμένει σβηστός ως το τέλος της περιόδου. Στην αρχή της επόμενης περιόδου, ο παλμός ενεργοποιείται και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε κάθε επόμενη περίοδο.

Στην ενότητα 3.2.2 περιγράφονται τα οφέλη της χρήσης της ράμπας για έλεγχο μέγιστου ρεύματος.



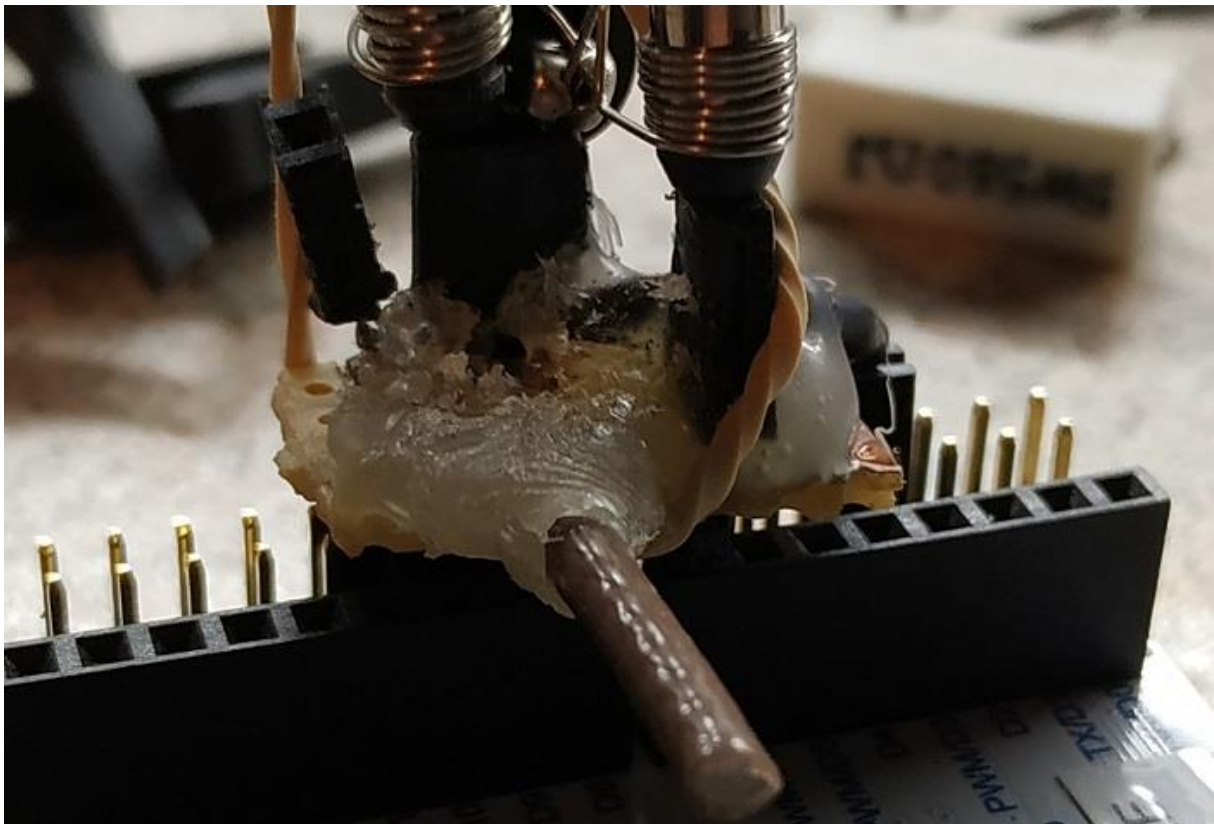
Εικόνα 3.12: Block διάγραμμα λειτουργίας Firmware



## Κεφάλαιο 4ο: Μετρήσεις και υλοποίηση

### 4.1 Μετρήσεις

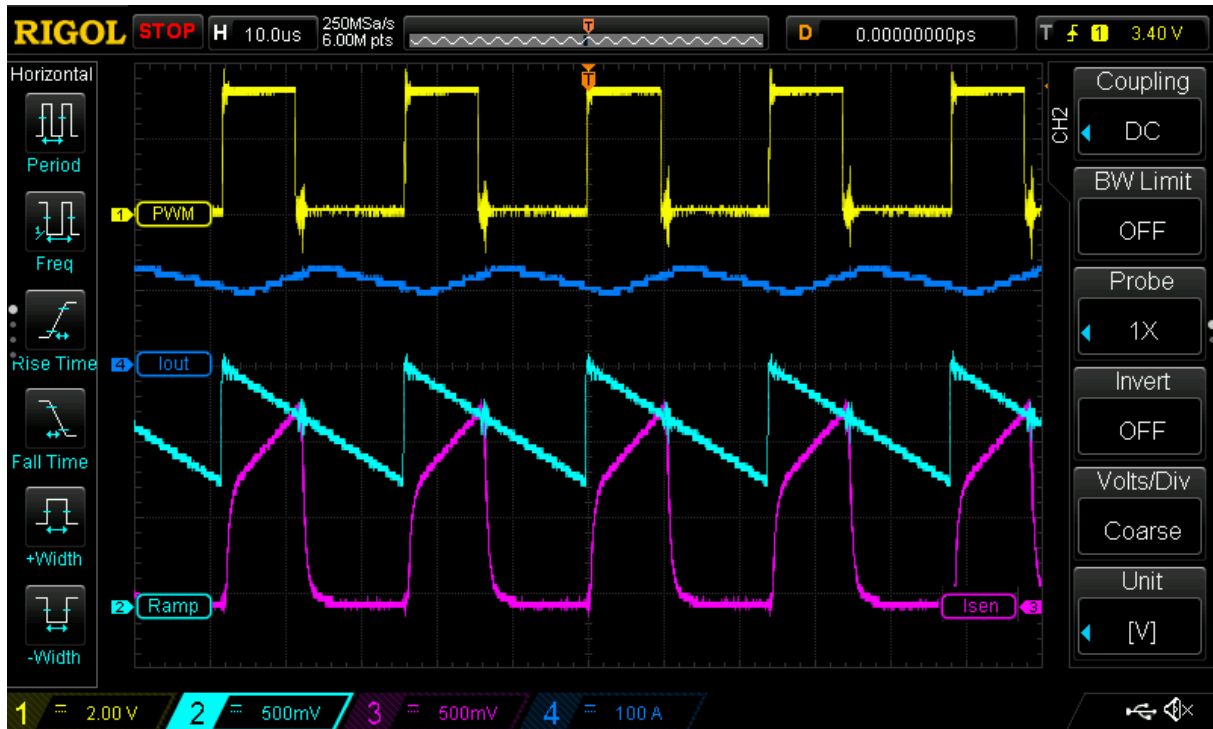
Για τις μετρήσεις που ακολουθούν, χρησιμοποιήθηκε ένας ψηφιακός παλμογράφος με δυνατότητα screenshot, τα common probes του παλμογράφου, ένα διαφορικό probe, και ένα probe ρεύματος(αμπεροτσιμπίδα παλμογράφου). Οι βρόχοι που δημιουργούνται από τα probes του παλμογράφου, αποτελούν υψηλό κίνδυνο για καταστροφή του κυκλώματος. Για τις μετρήσεις των ασθενών σημάτων από και προς τον μικροελεγκτή, στις εικόνες που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκε η πολύ απλή διάταξη της εικόνας 4.1. Στην διάταξη αυτή, τα probes καρφώνονται σε pins και τα grounds είναι ενωμένα με πολύ μικρού μήκους αγωγό(τα ελατήρια στην εικόνα) σε ground του μικροελεγκτή. Χωρίς αυτήν τη διάταξη είναι αδύνατον να λειτουργήσει σωστά η μηχανή κατά την διάρκεια της μέτρησης.



Εικόνα 4.1: Διάταξη μέτρησης ασθενών σημάτων επάνω στον μικροελεγκτή

Στην εικόνα 4.2 που ακολουθεί, βλέπουμε σε χρονικό συσχετισμό:

- Με κίτρινο τον παλμό PWM στο pin του μικροελεγκτή.
- Με πράσινο την ράμπα που δημιουργεί ο DAC και δρομολογεί στην είσοδο του συγκριτή αλλά και σε τελεστικό ενισχυτή voltage follower ώστε να καταστεί δυνατό να συνδεθεί probe.
- Με μωβ την έξοδο του κυκλώματος αισθητήρα ρεύματος όπως συνδέεται στον μικροελεγκτή.
- Με μπλε το ρεύμα συγκόλλησης που μετρήθηκε με probe ρεύματος

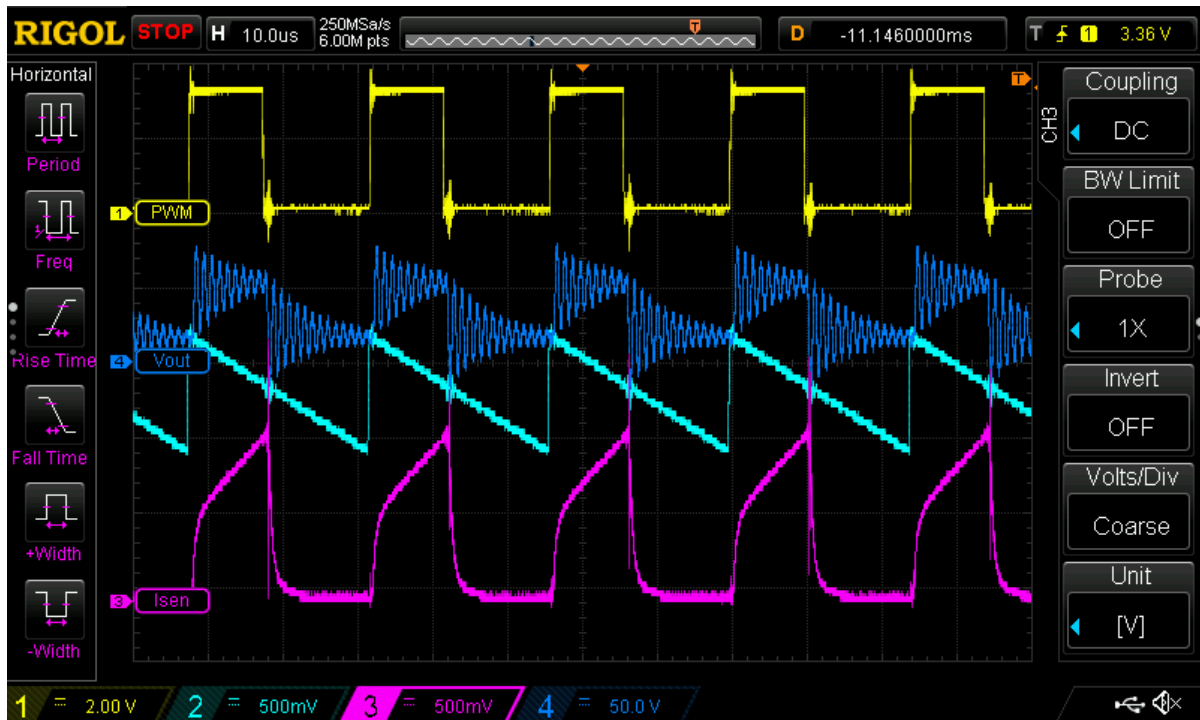


Εικόνα 4.2: Μέτρηση  $I_{\eta}$

Στην παραπάνω εικόνα γίνεται αντιληπτή η λειτουργία peak current control. Φαίνεται πως μόλις το ρεύμα αγγίξει την ράμπα ελέγχου, ο παλμός οδηγείται σε σβέση. Το ρεύμα συγκόλλησης κυμαίνεται γύρω από τα 100A. Επίσης αξιοσημείωτο, είναι ότι η εξομάλυνση που παρέχει στο ρεύμα το πηνίο εξόδου είναι σημαντική. Με αυτόν τον τρόπο, το τόξο διατηρείται σταθερό καθ' όλη την διάρκεια της συγκόλλησης.

Στην εικόνα 4.3 που ακολουθεί, βλέπουμε σε χρονικό συσχετισμό:

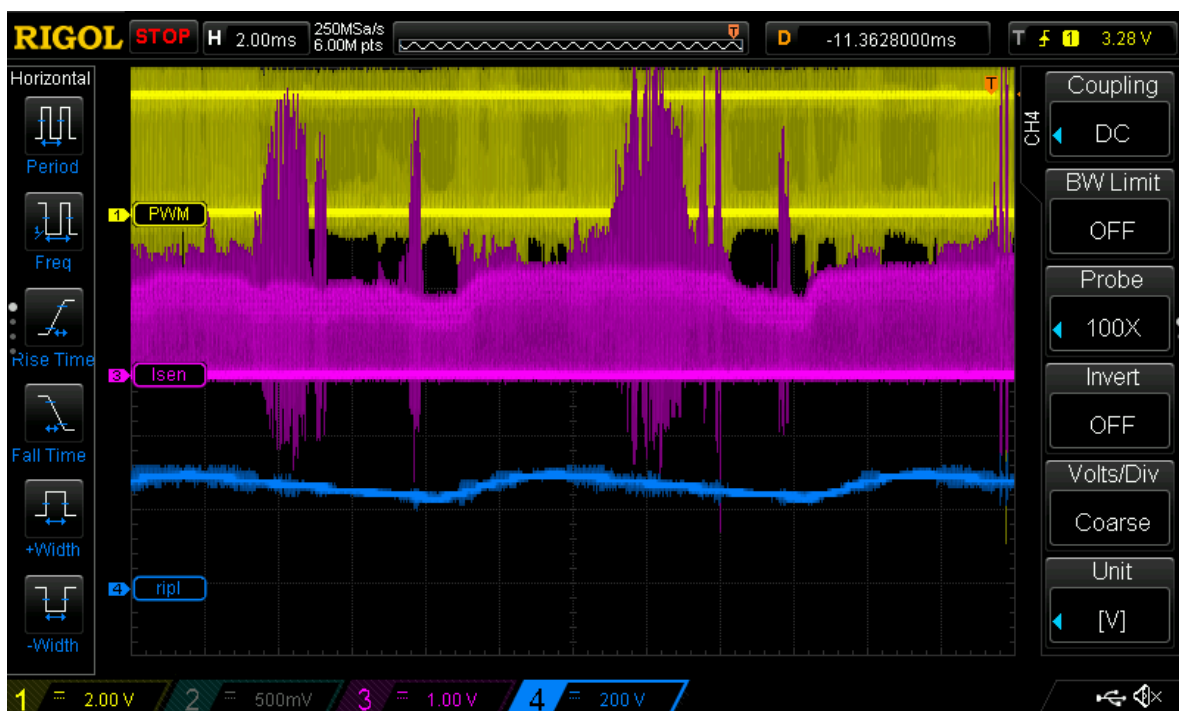
- Με κίτρινο τον παλμό PWM στο pin του μικροελεγκτή.
- Με πράσινο την ράμπα που δημιουργεί ο DAC και δρομολογεί στην είσοδο του συγκριτή αλλά και σε τελεστικό ενισχυτή voltage follower ώστε να καταστεί δυνατό να συνδεθεί probe.
- Με μωβ την έξοδο του κυκλώματος αισθητήρα ρεύματος όπως συνδέεται στον μικροελεγκτή.
- Με μπλε την τάση στις μπόρνες εξόδου της μηχανής μετρημένες με διαφορικό probe.



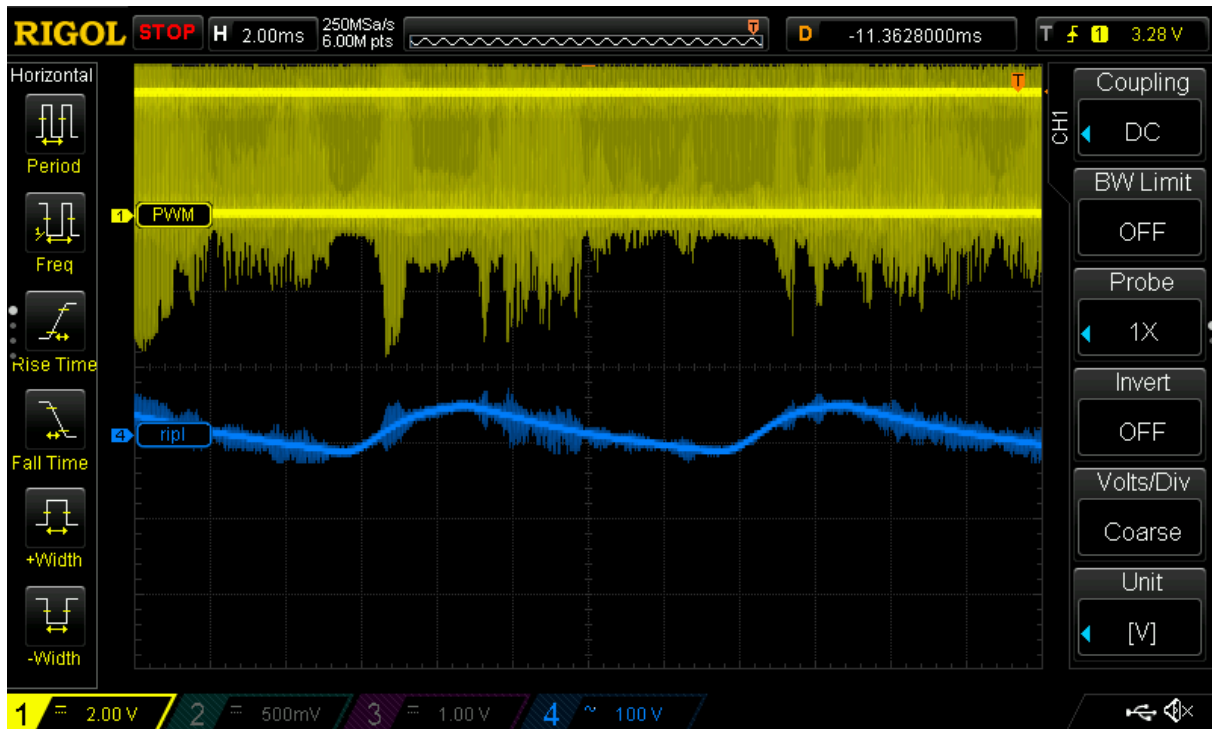
Εικόνα 4.3: Μέτρηση 2η

Στην παραπάνω εικόνα, με μπλε φαίνεται η τάση εξόδου και παρατηρείται ξεκάθαρα πως εισήχθη θόρυβος από την χρήση του διαφορικού probe και το ρεύμα του αισθητήρα σταματάει να αυξάνεται πριν συναντήσει την ράμπα.

Στις παρακάτω δυο εικόνες, με μπλέ φαίνεται η κυμάτωση της τάσης επάνω στους πυκνωτές εξομάλυνσης κατά την διάρκεια συγκόλλησης.



Εικόνα 4.4: Μέτρηση 3<sup>η</sup> – dc coupling κυμάτωσης



Εικόνα 4.5: Μέτρηση 4<sup>η</sup> – ac coupling κυμάτωσης

Στις εικόνες 4.4 και 4.5 παρατηρείται ότι υπάρχει κυμάτωση(ripple) της τάξης των 50V. Δεν παρατηρείται όμως αστάθεια του ρεύματος κατά την διάρκεια της συγκόλλησης.

#### Μετρήσεις με πολύμετρο και αμπεροτσιμπίδα:

Τάση αδράνειας(open loop) στην έξοδο: 60Vdc

Τάση στην έξοδο κατά την διάρκεια συγκόλλησης με I=100A: 22Vdc

Τάση στην έξοδο κατά την διάρκεια συγκόλλησης με I=140A: 25Vdc

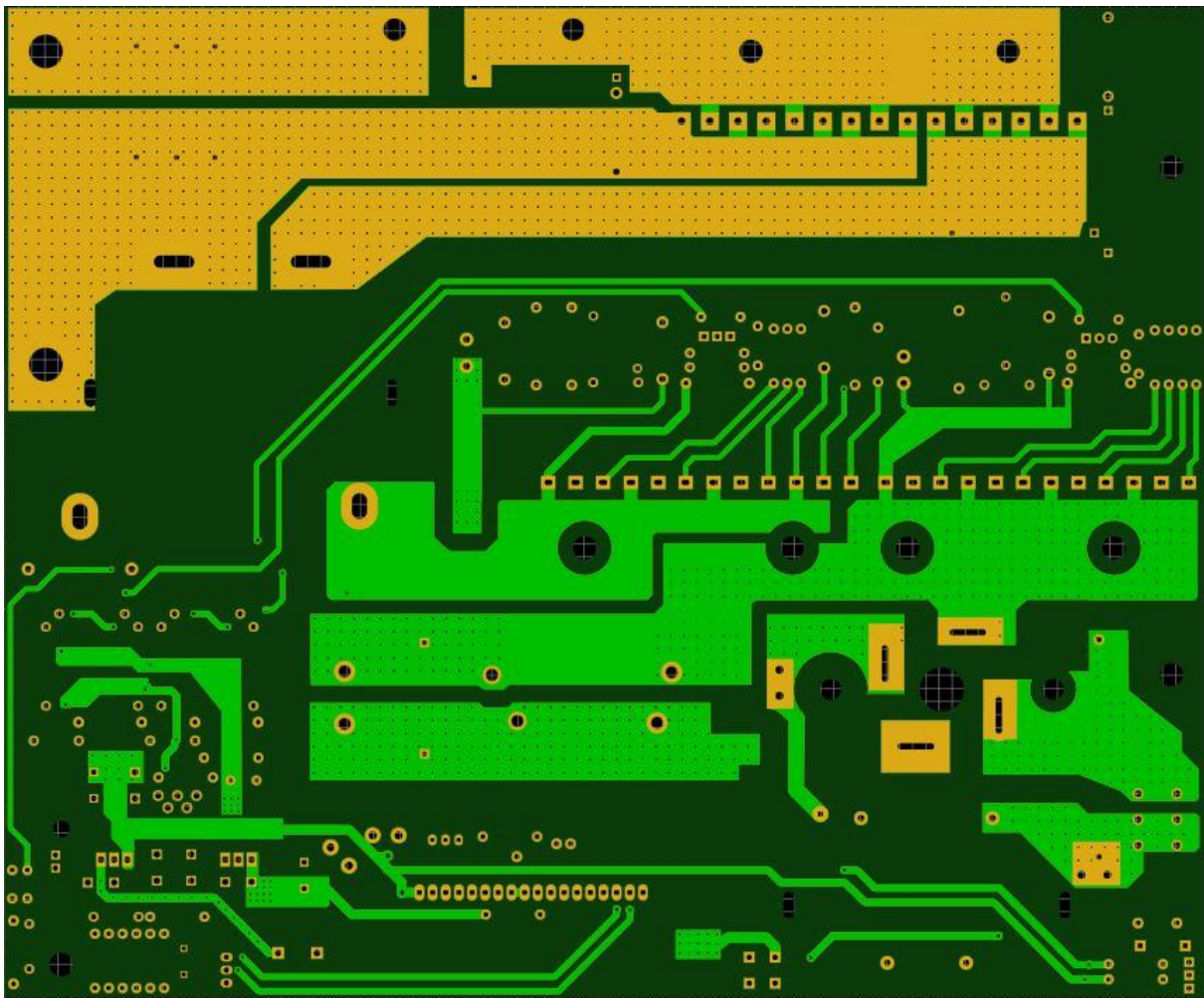
## 4.2 Υλοποίηση

Έπειτα από τα πειράματα και την ολοκλήρωση του σχεδιασμού όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 3, ακολούθησε ο σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος(PCB). Μετά την παραλαβή της πλακέτας από τον κατασκευαστή, συναρμολογήθηκαν και κολλήθηκαν με το χέρι όλα τα εξαρτήματα και η πλακέτα τοποθετήθηκε στον κλωβό της τελικής κατασκευής. Στις παρακάτω ενότητες ακολουθούν εικόνες από τα αποτελέσματα αυτών των εργασιών.

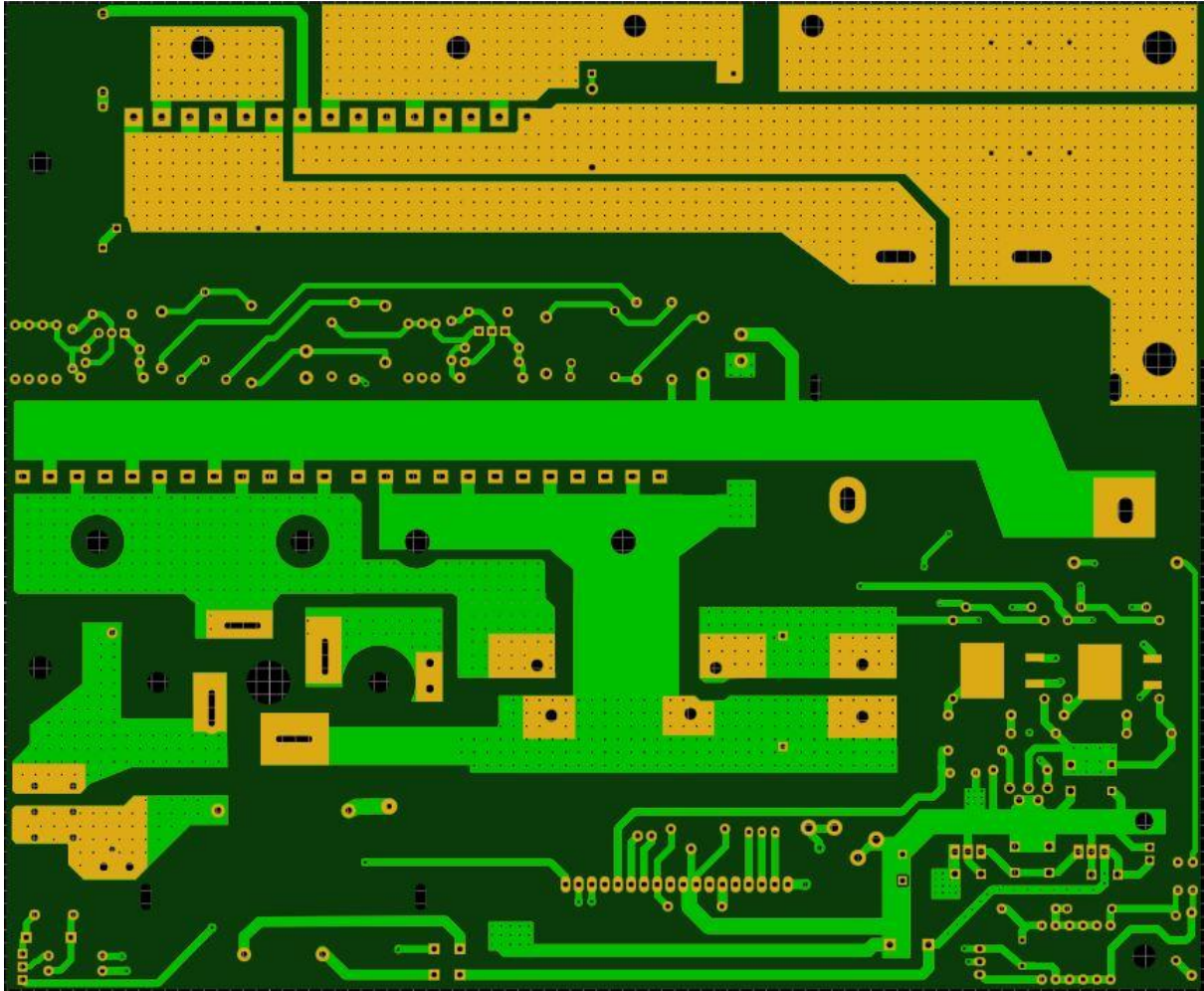
#### 4.2.1 Τυπωμένο κύκλωμα

Για τον σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκε το online δωρεάν λογισμικό EasyEDA. Η πλακέτα είναι 2 στρωμάτων(2 layers) με πάχος πλακέτας 1.6mm και πάχος χαλκού 1oz/ft<sup>2</sup>. Η αλήθεια είναι ότι το πάχος του χαλκού θα έπρεπε να ήταν μεγαλύτερο στο κομμάτι εξόδου της πλακέτας όμως το κόστος θα ανέβαινε σημαντικά. Η λύση δόθηκε με την χρήση όμοιων χαλκοδρόμων(στο κομμάτι της εξόδου μεγάλου ρεύματος) και στις δυο μεριές της πλακέτας οι οποίες συνδέονται με πληθώρα νια's καθ' όλη την έκτασή τους. Έπειτα καλύφθηκαν με ποσότητα κόλλησης(καλάι) σημαντικού πάχους.

Η ελάχιστη απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ των χαλκών δευτερευόντως και πρωτεύοντος είναι 8 χιλιοστά. Το σχέδιο στάλθηκε για εκτύπωση στην κίνα, στην εταιρία JLCPCB και το τελικό προϊόν είναι εξαιρετικής ποιότητας.



Εικόνα 4.6: Άνω πλευρά τυπωμένου κυκλώματος



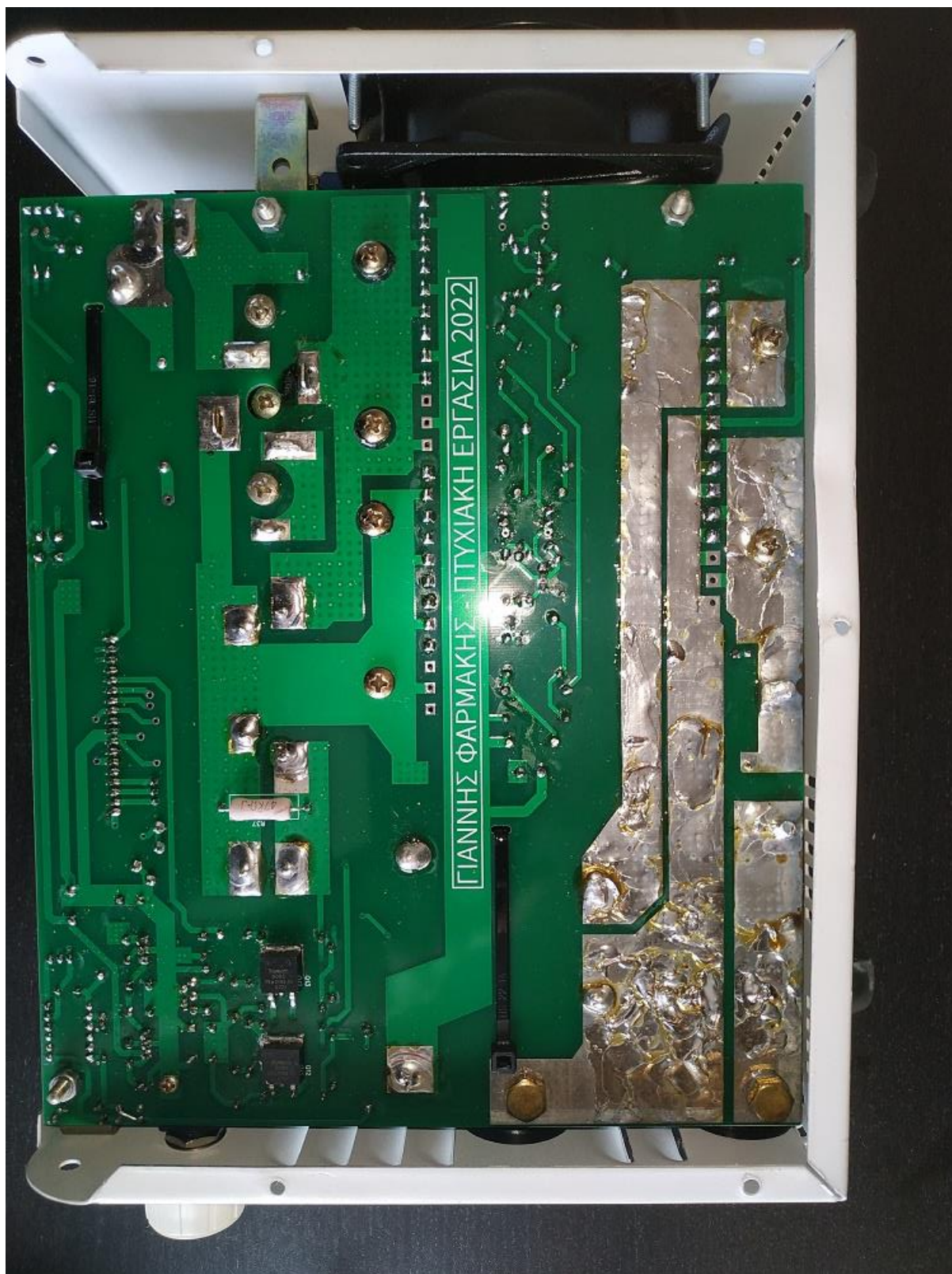
*Εικόνα 4.7: Κάτω πλευρά τυπωμένου κυκλώματος*

#### 4.2.2 Τελική κατασκευή

Η τελική κατασκευή περιλαμβάνει τον κλωβό, την συναρμολογημένη πλακέτα, έναν ανεμιστήρα, έναν διακόπτη on/off, καλώδιο 3x2.5 με πρίζα και τους ακροδέκτες στους οποίους εφαρμόζονται οι μπόρνες των καλωδίων συγκόλλησης. Ο κλωβός περισυλλέχθηκε από παλιά κατεστραμμένη μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης και χρησιμοποιήθηκε μετά από μερική σφυρηλάτηση και βάνιμο. Η πλακέτα έχει σχεδιαστεί με βάση τις διαστάσεις του κλωβού και τις ήδη έτοιμες τρύπες προσάρτησης που περιείχε ο κλωβός. Ο ανεμιστήρας τροφοδοτείται απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο και έτσι δεν απαιτείται η χρήση επιπλέον τροφοδοτικού. Η λειτουργία του ανεμιστήρα είναι μόνιμη όπως και στις περισσότερες μηχανές αυτού του μεγέθους. Το βάρος της συσκευής χωρίς το επάνω κάλυμμα, είναι λίγο περισσότερο από 3.5 κιλά.



Εικόνα 4.8: 1<sup>η</sup> φωτογραφία κατασκευής



Εικόνα 4.9: 2<sup>η</sup> φωτογραφία κατασκευής



*Εικόνα 4.10: 3<sup>η</sup> φωτογραφία κατασκευής*



Εικόνα 4.11: 4<sup>η</sup> φωτογραφία κατασκευής

## Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Στην εργασία αυτή, πραγματοποιήθηκε η μελέτη και κατασκευή ηλεκτροσυγκόλλησης inverter της οποίας ο έλεγχος ρεύματος όπως και οι περισσότερες λειτουργίες της πραγματοποιούνται με έναν μικροελεγκτή. Αυτό έχει μειώσει σημαντικά το κόστος αλλά και τον χώρο επάνω στο τυπωμένο κύκλωμα που θα απαιτούνταν αν αυτές οι λειτουργίες πραγματοποιούνταν από αναλογικά κυκλώματα. Η μηχανή έχει δοκιμαστεί από ειδικούς στην συγκόλληση και έχει αποσπάσει πολύ θετικές κριτικές. Παρ' όλα αυτά θα μπορούσαν να γίνουν κάποιες βελτιώσεις. Παρακάτω αναπτύσσονται μερικές προτάσεις βελτίωσης.

- Το φίλτρο EMI είναι απαραίτητο για να μην υπάρχουν παρεμβολές με άλλες συσκευές που τροφοδοτούνται σε κοντινή απόσταση από την μηχανή.
- Κύκλωμα προστασίας των διακοπών από υψηλή θερμοκρασία. Έχει σχεδόν τελειοποιηθεί αλλά λόγω περιορισμένου χρόνου δεν εφαρμόστηκε στην μηχανή.
- Οθόνη ένδειξης της ρυθμιζόμενης έντασης και της έντασης κατά την συγκόλληση σε πραγματικό χρόνο.
- Κύκλωμα HF start για συγκόλληση TIG.
- Νέο Firmware για τον έλεγχο του ρεύματος με ακρίβεια, πχ ελεγκτής PI.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Βιβλία**

- [1] Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης, *Ηλεκτρονικά ισχύος*. Θεσσαλονίκη: εκδ. Τζιόλα, 2016.
- [2] Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης, *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος*. Θεσσαλονίκη: εκδ. Τζιόλα, 2017.
- [3] Μιχάλης Ν Σπάσος, *Σύγχρονες εφαρμογές αναλογικών ηλεκτρονικών*. Θεσσαλονίκη: εκδ. Αϊβάζη, 2015.
- [4] Μιχάλης Ν Σπάσος, *Αναλογική επεξεργασία σημάτων αισθητηρίων*. Θεσσαλονίκη: εκδ. Αϊβάζη, 2018.
- [5] Α. Ασημακόπουλος – Κ. Διακουμάκος, *Συγκολλήσεις*. Αθήνα: Ο.Ε.Δ.Β, 2009.
- [6] Abraham I. Pressman, *Switching power supply design 2nd*. USA, McGraw Hill, 1998.
- [7] Christophe Basso, *Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies*. USA, Artech House, 2012.
- [8] Raymond A. Mack, *Demystifying Switching Power Supplies*. Oxford UK, 2005

### **Application Notes**

- [9] STMicroelectronics, Appl. Note AN1621.
- [10] Infineon, AN-CoolMOS-09.

### **Internet Site**

- [11] Research gate: <https://www.researchgate.net>