

**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του
σε γεννήτρια**

Χρήστος Α. Τσομπάνης

Εισηγητής: Σταμάτης Αλατσαθανός, Καθηγητής

**ΑΘΗΝΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017**

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε
γεννήτρια**

**Χρήστος Α. Τσομπάνης
Α.Μ. 42713**

Εισηγητής:

Σταμάτης Αλατσαθιανός, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή:

Έλληνας Ι. ,	Καθηγητής
Βελώνη Α. ,	Καθηγήτρια
Μαστροκώστας Π. ,	Καθηγητής

Ημερομηνία εξέτασης:

10 Φεβρουαρίου 2017

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος.....Τσομπάνης...Χρήστος....., τουΑντωνίου....., με αριθμό μητρώου42713..... φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ Συστημάτων Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφαση της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού δμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, καθώς και όλους μου τους κοντινούς ανθρώπους, που ήταν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα και μου παρείχαν αμέριστη υποστήριξη και εμπιστοσύνη καθόλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου, και συνέβαλλαν αποφασιστικά στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου, Δρ. Σταμάτη Αλατσαθιανό, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιεί την μελέτη, το σχεδιασμό και την κατασκευή κυκλώματος οδήγησης κινητήρα τύπου Brushless DC. Αποτελεί μια αναφορά, στους κινητήρες, με ειδικότερη έμφαση τον τρόπο λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC κινητήρες), και η δυνατότητα μετατροπής τους σε γεννήτρια. Πρόκειται για ένα είδος σύγχρονων κινητήρων με παραγόμενη έξοδο ηλεκτρικό σήμα τύπου AC, εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο είναι ικανό να βοηθήσει στην οδήγηση του κινητήρα.

Η οδήγηση του κινητήρα τύπου Brushless DC γίνεται ηλεκτρονικά με την χρήση ενός μικροελεγκτή. Σκοπός λοιπόν της εργασίας είναι η κατασκευή του παραπάνω κυκλώματος και ο πειραματισμός πάνω σε αυτό.

Στην αρχή πραγματοποιείται μια γενική εισαγωγή στους κινητήρες και στα είδη τους. Επίσης αναφέρεται η χρήση τους και ο τρόπος οδήγησης τους.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην αρχή λειτουργίας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC κινητήρες) καθώς και στον τρόπο οδήγησης του με ένα συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου, όπως και η παραγωγή των ημιτονοειδών και τραπεζοειδών παλμών τους. Παρατίθενται επίσης τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους σε σχέση με άλλους τύπους κινητήρες.

Στο επόμενο βήμα γίνεται μια θεωρητική ανάλυση του κυκλώματος καθώς και των υπολοίπων στοιχείων και κυκλωμάτων που είναι αναγκαία για την λειτουργία του. Επιπροσθέτως, αναλύεται η μέθοδος παλμοδότησης των στοιχείων, που πραγματοποιείται μέσω της Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM), και κατόπιν περιγράφεται αναλυτικά η κατασκευή και η υλοποίηση του παραπάνω κυκλώματος.

Στη πορεία αναφέρονται τα κατασκευαστικά στοιχεία και τμήματα του BLDC κινητήρα για την επίτευξη της επιθυμητής θέσης και ταχύτητας.

Τέλος γίνεται η επαλήθευση της λειτουργίας με την κατασκευή ενός συστήματος οδήγησης και ελέγχου του κινητήρα μέσω ενός μικροελεγκτή.

Επιστημονική Περιοχή

Οδήγηση Κινητήρων, Προγραμματισμός Μικροελεγκτών, Κατασκευή Πλακέτας

Λέξεις κλειδιά

Bldc κινητήρας, μικροελεγκτής, σύστημα οδήγησης, σύστημα ελέγχου, παλμοί PWM.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Abstract

The aim of this graduate thesis is to investigate, design and construct a DC brushless motor circuit. It is a reference to engines, with particular emphasis on how the DC brushless motors (BLDC motors) work, and the potential of converting them to a generator. This is a kind of modern engines with an output produced power AC-type signal, an alternating current, which is able to assist in driving a motor.

The driving of the BLDC motor is done electronically with the use of a microcontroller. So the aim is to build the above circuit and experiment on it.

Initially there is a general introduction to motors, their types and their uses. Also there is a reference to their driving system.

In the next step we have a theoretical analysis of the circuit and all the other components we need to use. Additionally, the pulsing method of data, which is achieved through the Pulse Width Modulation (PWM), is analysed and then the construction and implementation of the above circuit is described in detail.

Furthermore, we present the components and parts of the BLDC motor we used to achieve the desired position and velocity.

Finally there is the verification of the operation with the manufacturing of a drive and control system with the use of a microcontroller.

Keywords

Bldc motor, microcontroller, drive system, control system, pulse width modulation (PWM).

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19-20
1.1 Περιγραφή του αντικείμενου της πτυχιακής εργασίας.....	19
1.2 Αντικείμενο πτυχιακής.....	19
1.3 Δομή πτυχιακής.....	20
1.4 Οργάνωση κειμένου.....	20
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	21-22
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	21-22
3. ΣΕΡΒΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	23-25
3.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Σερβοκινητήρων.....	23-24
3.2 Τρόπος Οδήγησης Σερβοκινητήρων.....	25
4. ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	27-32
4.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Συνεχών Κινητήρων.....	27
4.2 Τρόπος Οδήγησης Συνεχών Κινητήρων.....	28-32
4.2.1 Κινητήρας Ανεξάρτητης Διέγερσης.....	39
4.2.2 Κινητήρας Παράλληλης διέγερσης.....	30
4.2.3 Κινητήρας Διέγερσης Σειράς.....	31
4.2.4 Κινητήρας Σύνθετης Διέγερσης.....	32
5. ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ BLDC.....	33-74
5.1 Ιστορική Αναδρομή.....	34
5.2 Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά και Αρχή Λειτουργίας.....	35-38
5.2.1 Στάτης.....	35-37
5.2.2 Δρομέας.....	38
5.3 Αρχή Λειτουργίας των brushless DC Κινητήρων.....	39
5.4 Κατάσταση Μεταβάσεων.....	41-44
5.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Βηματικών BLDC.....	45-48

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

5.6	Τρόπος Οδήγησης Βηματικών Κινητήρων BLDC.....	49-50
5.6.1	Οδήγηση του Κινητήρα με Χρήση half bridge.....	51-52
5.6.2	Οδήγηση του Κινητήρα μέσω Αισθητηρίου Hall.....	53-56
5.6.3	Οδήγηση του Κινητήρα μέσω της Μεθόδου BEMF.....	57-58
5.6.4	Τεχνικές Ανίχνευσης της Τάσης εξ επαγωγής.....	59-62
5.7	Εφαρμογές των Κινητήρων BLDC.....	63-64
5.7.1	Εφαρμογές με Σταθερό Φορτίο.....	63
5.7.2	Εφαρμογές με Μεταβαλλόμενο Φορτίο.....	63
5.7.3	Εφαρμογές Ανίχνευσης Θέσεις.....	64
5.8	Κριτήρια Επιλογής Κινητήρα στο Σύστημα.....	65
5.9	Μαγνητική Επαγωγή και Μαγνητικό Κύκλωμα Σύγχρονου Κινητήρα..... Μόνιμου Μαγνήτη.....	65-68
5.10	Περιγραφή του Φαινομένου Μετάβασης (Commutation).....	69-70

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ.....71-80

6.1	Εισαγωγή.....	71
6.2	Λειτουργία Τριφασικών Αντιστροφών.....	71-78
6.2.1	Αντιστροφείας Πηγής Τάσης.....	72-74
6.2.2	Αντιστροφείας Πηγής Ρεύματος.....	75-76
6.2.3	Σύγκριση Αντιστροφείας Πηγής Ρεύματος με Αντιστροφή Πηγής Τάσης.....	77
6.2.4	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των Τριφασικών Αντιστροφών.....	77-78
6.3	Επιλογή των Διακοπτικών Στοιχείων του Αντιστροφεία.....	79-80

7. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....81-100

7.1.	Συνοπτική Περιγραφή.....	81-84
7.2.	Οδήγηση της Πύλης των Ημιαγωγικών Στοιχείων Ισχύος.....	85-88
7.3.	Κατασκευή Τριφασικού Αντιστροφεία.....	89-90
7.4.	Πυκνωτές στην Είσοδο του Αντιστροφεία.....	91-92
7.5.	Παραστατική Απεικόνιση της Εφαρμογής.....	93-100

8. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....101

8.1.	Συμπεράσματα και Προοπτικές.....	101-102
------	----------------------------------	---------

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....103-114

Παράρτημα Α – Κώδικας.....103-108

Παράρτημα Β - Τεχνικά χαρακτηριστικά εξαρτημάτων.....109-114

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....119-120

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα. 5.1	BLDC μηχανές διαφόρων τύπων. Η μηχανή (α) αποτελείται από δύο τυλίγματα, δηλαδή κάθε φάση αποτελείται από δύο υποτυλίγματα και κατά επέκταση τέσσερις μαγνητικούς πόλους, δηλαδή ο δρομέας καλύπτεται από δύο ζεύγη μαγνητικών πόλων, αντίθετης πολικότητας. Με τον ίδιο τρόπο η (β) έχει τρεις ομάδες τυλιγμάτων και κατά επέκταση οχτώ μαγνητικούς πόλους, ενώ η (γ) έχει τέσσερις ομάδες τυλιγμάτων και οχτώ μαγνητικούς πόλους.....	35
Σχήμα. 5.2	Στάτης μηχανής brushless , από όπου φαίνονται οι εγκοπές στην εσωτερική περιφέρεια του στάτη, οι πυρήνες και τα τυλίγματα.....	36
Σχήμα. 5.3	Τραπεζοειδής και ημιτονοειδής τάση εξ' απαγωγής.....	37
Σχήμα. 5.4	Κατάσταση μεταβάσεων.....	43
Σχήμα. 5.5	Μετάβαση τροφοδοσίας.....	44
Σχήμα. 5.6	Διπολική brushless DC μηχανή και μαγνητικές ροές.....	66
Σχήμα. 5.7	Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα.....	67
Σχήμα. 5.8	Φάσεις ροπής κινητήρα.....	69
Σχήμα. 6.1	Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα.....	73
Σχήμα. 6.2	Κυματομορφές τριφασικού αντιστροφέα με πηγή τάσης με τετραγωνική κυματομορφή όπου και φαίνονται: α) οι παλμοί έναυσης και σβέσης των διακοπών, β) πολικές τάσεις εξόδου, γ) τάσεις ανάμεσα στον κόμβο(η) του φορτίου και έξοδος του αντιστροφέα, και δ) πολική τάση εξόδου φάσης Α καθώς και ρεύμα της φάσης Α.....	74
Σχήμα. 6.3	Τριφασικός αντιστροφέας πηγής ρεύματος με θυρίστορ.....	75
Σχήμα. 6.4	Κυματομορφές τριφασικού αντιστροφέα με πηγή ρεύματος με θυρίστορ. : α) παλμοί έναυσης και σβέσης των διακοπών, β) ρεύμα εξόδου των τριών φάσεων και γ) τάση ανάμεσα στον κόμβο (η) του φορτίου και εξόδου του αντιστροφέα.....	76
Σχήμα. 6.5	Δομή και συμβολισμοί Mosfet τρανζίστορ ισχύος τύπου pnp (αριστερά) και npn (δεξιά).....	79

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Σχήμα. 7.1 Κύκλωμα παλμοδότησης τριφασικού αντιστροφέα: α)μικροελεγκτής PIC16f877, β)μεταβλητή αντίσταση, γ)κρυσταλλικός ταλαντωτής, δ)κύκλωμα επανεκκίνησης, ε) πυκνωτή φιλτραρίσματος.....82

Σχήμα. 7.2 Κύκλωμα παλμοδότησης τριών φάσεων του τριφασικού αντιστροφέα.....83

Σχήμα. 7.3 Καμπύλη πύλης-πηγής(Vgs) και φορτίου πύλης(Qs) για το Mosfet α)IRLI3705 β)IRF5305.....86

Σχήμα. 7.4 Εσωτερική δομή και χαρακτηριστικά Driver TC4469.....87

Σχήμα. 7.5 Τριφασικός αντιστροφέας - Κύκλωμα παλμοδότησης των MOSFET από τους οδηγούς.....89

Σχήμα. 7.6 Κύκλωμα σύνδεσης του μικροελεγκτή για την παραγωγή των παλμών.....93

Σχήμα. 7.7 Κύκλωμα για την παλμοδότηση των MOSFET και την ενίσχυση των παλμών.....94

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1 : Αγωγιμότητα τρανζίστορ ανά διαστήματα.....	52
--	----

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 4.1 : Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης.....	29
Εικόνα 4.2: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης.....	30
Εικόνα 4.3: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα διέγερσης σειράς.....	31
Εικόνα 4.4: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα σύνθετης διέγερσης.....	32
Εικόνα 5.1: Δομικό διάγραμμα ελέγχου χωρίς αισθητήριο.....	42
Εικόνα 5.2: Συνάρτηση της ροπής σε σχέση με την γωνία του δρομέα στους ημιτονοειδείς BLDC.....	49
Εικόνα 5.3: Κύκλωμα οδήγησης κινητήρα με half bridge.....	51
Εικόνα 5.4: Μετάβαση κινητήρα με αισθητήριο Hall.....	54
Εικόνα 5.5: Μετάβαση κινητήρα με αισθητήριο Hall.....	54
Εικόνα 5.6: Μετάβαση κινητήρα με αισθητήριο Hall.....	55
Εικόνα 5.7α: Κύκλωμα ελέγχου κινητήρα με μονάδα ελέγχου.....	60
Εικόνα 5.7β: Κύκλωμα ελέγχου κινητήρα με μονάδα ελέγχου.....	60
Εικόνα 5.7γ: Κύκλωμα ελέγχου κινητήρα με μονάδα ελέγχου.....	61
Εικόνα 5.7δ: Κύκλωμα ελέγχου κινητήρα με μονάδα ελέγχου.....	61
Εικόνα 7.1: Κύκλωμα σύνδεσης του μικροελεγκτή για την παραγωγή των παλμών.....	95
Εικόνα7.2: Κύκλωμα για την οδήγηση των διακοπτικών στοιχείων(MOSFET)....	96
Εικόνα 7.3: Κύκλωμα των διακοπτικών στοιχείων (MOSFET).....	97
Εικόνα 7.4: Low πλευρά.....	98
Εικόνα 7.5: High πλευρά.....	99

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του αντικειμένου της πτυχιακής εργασίας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας ή αλλιώς ηλεκτροκινητήρας είναι ένας κινητήρας που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Οι κινητήρες αυτοί χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, σε αυτούς του συνεχούς ρεύματος (DC) και εκείνους του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Η μέση ταχύτητα με την οποία περιστρέφονται είναι ανάλογη της συχνότητας της ήδη εναλλασσόμενης τάσης που εφαρμόζεται. Στους ηλεκτρικούς κινητήρες είναι πιθανό να συνυπάρχουν τα φαινόμενα του κινητήρα και της γεννήτριας.

Καθώς ο κινητήρας αυξάνει τις στροφές λειτουργίας του, δημιουργείται στον αγωγό μία ηλεκτρεγερτική δύναμη η οποία αντιτίθεται στην ηλεκτρεγερτική δύναμη που τροφοδοτεί τον αγωγό. Δηλαδή, ο κινητήρας λειτουργεί και σαν γεννήτρια που τροφοδοτεί αντίθετα τον αγωγό, μειώνοντας το ρεύμα που τον διαρρέει.

Ο κινητήρας περιστρέφεται με την χρήση παλμών (pulse width generation, pwm), οι οποίοι στέλνονται από την πόρτα ενός μικροελεγκτή με αποτέλεσμα τον γρηγορότερο έλεγχο της κίνησης του.

1.2 Αντικείμενο πτυχιακής

Αντικείμενο της πτυχιακής αυτής είναι η διερεύνηση της λειτουργίας και οδήγησης των Brushless(χωρίς ψήκτρες) DC κινητήρων, από θεωρητική σκοπιά αλλά και η πειραματική επαλήθευση της λειτουργίας τους.

Ένας ειδικός κινητήρας όπως είναι ο Brushless (χωρίς ψήκτρες), λειτουργεί μέσα σε ένα σύστημα ελέγχου το οποίο αποτελείται από διάφορες άλλες ξεχωριστές ηλεκτρικές μονάδες. Θα πραγματοποιηθεί μια προσπάθεια ελέγχου και οδήγησης ενός τέτοιου είδους κινητήρα με την βοήθεια ενός μικροελεγκτή.

1.3 Δομή πτυχιακής

Για να επιτευχθεί ο σκοπός της πτυχιακής, δηλαδή να μπορέσουμε να ελέγξουμε και να κινήσουμε έναν ηλεκτρικό κινητήρα χωρίς ψήκτρες, θα πρέπει να γίνουν κάποιες εργασίες κατασκευής όπως το κύκλωμα οδήγησης αλλά και η κατάλληλη συνδεσμολογία των απαιτούμενων υλικών. Παρόλα αυτά πριν την κατασκευή θα πρέπει να προηγηθεί η κατάλληλη θεωρητική αναφορά στους κινητήρες καθώς και στους ηλεκτρικούς κινητήρες τύπου brushless (χωρίς ψήκτρες), αλλά και στον τρόπο λειτουργίας τους.

1.4 Οργάνωση κειμένου

Η πτυχιακή εργασία έχει την ακόλουθη δομή:

Στο κεφάλαιο δύο αναφέρονται γενικές έννοιες που σχετίζονται με την εμφάνιση και την εξέλιξη των κινητήρων από την αρχή της παρουσίας τους μέχρι σήμερα. Στο κεφάλαιο τρία και τέσσερα αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων ειδών κινητήρων, όπως οι σερβοκινητήρες και οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός, καθώς και ο τρόπος οδήγησης τους από ένα κύκλωμα ελέγχου. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται θεωρητικά στοιχεία που εξηγούν τους κινητήρες τύπου brushless DC motor (BLDC), τα θετικά και τα αρνητικά τους αλλά και τον τρόπο οδήγησης τους. Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση του τριφασικού αντιστροφέα. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευή που πρόκειται να υλοποιηθεί. Στο όγδοο κεφάλαιο εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα. Στο τέλος παρατίθενται η βιβλιογραφία και οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν.

2. Βασικές Έννοιες

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η γέννηση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης ήρθε με την σχεδόν ταυτόχρονη θεμελίωση των αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού από τους Michael Faraday και Joseph Henry (εργάζονταν ανεξάρτητα) το 1831. Στη συνέχεια το 1888 κατασκευάζονται βάσει των αρχών αυτών οι πρώτοι ηλεκτρικοί κινητήρες, με τους Thomas Edison και Nikola Tesla, να έχουν μια επιστημονική διαμάχη υποστηρίζοντας τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος και τον κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος αντίστοιχα. Τελικά επικράτησε ο κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος. Παρόλα αυτά και τα δύο είδη κινητήρων εξελίχθηκαν και βελτιώθηκαν, βρίσκοντας πάμπολλες εφαρμογές, κυρίως μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο.

Η μεγάλη επανάσταση, όμως, στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης ήρθε όταν δημιουργήθηκε η δυνατότητα για τον ακριβή έλεγχο των ηλεκτρικών αυτών κινητήρων, ώστε να επιτυγχάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα και μάλιστα αυτόματα. Αρχικά επιχειρήθηκε ο έλεγχος με απλά μηχανικά ή ηλεκτρικά συστήματα (όπως π.χ. οι λυχνίες κενού) τα οποία δεν είχαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ όσον αφορά την απόδοσή τους ήταν εξαιρετικά χαμηλή. Η εφεύρεση εκείνη η οποία άλλαξε εντελώς το τοπίο γνώσεων δίνοντας πρωτόγνωρες μέχρι τότε δυνατότητες ελέγχου ήταν το τρανζίστορ, που παρουσιάστηκε από τους William Shockley, John Bardeen και Walter Brattain στις 22/01/1947. Η εξέλιξη του τρανζίστορ και η εμφάνιση τα αμέσως επόμενα χρόνια με τους διαδόχους του όπως το θυρίστορ (Thyristor) (1957), το MOSFET (1969) και οι αμέσως επόμενες εξελίξεις τους για εφαρμογές ισχύος έδωσαν τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων ηλεκτρικών ισχύων με εξαιρετικά μεγάλες συχνότητες διακοπής, δημιουργώντας ένα νέο και ραγδαία εξελισσόμενο αντικείμενο στην επιστήμη του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών που γρήγορα συγκέντρωσε τεράστιο ενδιαφέρον. Το πεδίο αυτό δεν είναι άλλο από τα Ηλεκτρονικά Ισχύος (Power Electronics).

Με την παρουσίαση των ηλεκτρονικών ισχύος δόθηκε η ευκαιρία στους μηχανικούς να καταφέρουν να κατασκευάσουν προηγμένα κυκλώματα και συστήματα ελέγχου και να αναπτύξουν τους απαραίτητους αλγορίθμους σε διάφορες γλώσσες για αυτά τα κυκλώματα. Ιδιαίτερα με τους μετατροπείς ισχύος δόθηκε η δυνατότητα στην τροφοδοσία των κινητήρων να παρέχεται με μεταβλητού μεγέθους τάση, πλάτος και συχνότητα, πράγμα το οποίο επέτρεψε τον πλήρη έλεγχό τους με έναν ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο. Σημαντικό ρόλο

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

βεβαίως διαδραμάτισε και η εισαγωγή εξελισσόμενων τεχνικών ελέγχου, οι οποίες, επέτρεπαν και επιτρέπουν μέχρι και σήμερα τον έλεγχο με ηλεκτρονικό τρόπο π.χ. με κάποιον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ή κάποιο άλλο ψηφιακό κύκλωμα.

Ως ηλεκτρική μηχανή ορίζεται κάθε συσκευή που πραγματοποιεί ηλεκτρομηχανική μετατροπή, δηλαδή μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και κατά επέκταση σε κινητική και αντίστροφα. Η ηλεκτρική μηχανή είναι το βασικότερο κομμάτι ενός συστήματος ελέγχου και κίνησης. Ο έλεγχος που εφαρμόζεται σε αυτούς και οι οποιεσδήποτε μετατροπές πραγματοποιούνται έχουν ένα και μοναδικό σκοπό: την επίτευξη της κατάλληλης λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής, ώστε να λάβουμε το ζητούμενο αποτέλεσμα στο φορτίο.

Ανάλογα με το είδος του φορτίου, την πηγή ισχύος, την ύπαρξη ή μη μετατροπέα και διάφορα κριτήρια που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή επιλέγουμε και το κατάλληλο είδος του κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης. Οι κινητήρες που απαντώνται στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης διακρίνονται ανάλογα με την τροφοδοσία τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) και τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Η κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περικλείει όμως πολλές υποκατηγορίες με σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά και στη λειτουργία τους.

3. ΣΕΡΒΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Σερβοκινητήρες καλούνται οι κινητήρες, οι οποίοι αποτελούνται από ένα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος, συνδυασμένο με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που ελέγχει την τελική θέση του άξονα κίνησης και από ένα μειωτήρα.

3.1 Πλεονεκτήματα Και Μειονεκτήματα Σερβοκινητήρων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποια από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σερβοκινητήρων.

Τα πλεονεκτήματα των σερβοκινητήρων είναι τα παρακάτω:

- ✓ Ο σερβοκινητήρας έχει την ικανότητα να παρέχει μεγαλύτερη επιτάχυνση ή αλλιώς ροπή, τη στιγμή ακριβώς της εκκίνησης και έχει πολύ μικρή ροπή αδράνειας. Αυτό σημαίνει ότι στους σερβοκινητήρες ο λόγος της ροπής εκκίνησης προς την ροπή αδράνειας είναι πολύ μεγάλος, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει με τους κοινούς κινητήρες.
- ✓ Έχει τη δυνατότητα της περιστροφής σε αρκετά υψηλές ταχύτητες.
- ✓ Υπάρχει η ικανότητα για την παραγωγή μεγάλων τιμών της ροπής του.
- ✓ Η μεγάλη αυτή μηχανική ροπή τον καθιστά ικανό να μπορεί να οδηγήσει αρκετά βαριά φορτία.
- ✓ Έχει μικρή καθυστέρηση κάτι το οποίο συνεπάγεται γρήγορο χρόνο αντίδρασης.
- ✓ Μπορεί να ελεγχθεί εύκολα από τους σύγχρονους ελεγκτές ρομποτικών και βιομηχανικών εφαρμογών.
- ✓ Υψηλή αποδοτικότητα, κάτι το οποίο σε μικρά φορτία μπορεί να φτάσει και το 90%.
- ✓ Παράγουν ελάχιστο θόρυβο σε σχέση με άλλους κινητήρες.
- ✓ Δεν υπάρχει περίπτωση εμφάνισης προβλήματος λόγο κραδασμών.
- ✓ Εξασφαλίζεται καλύτερος έλεγχος της λειτουργίας του εξαιτίας της αρνητικής ανατροφοδότησης.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Τα μειονεκτήματα των σερβοκινητήρων είναι τα ακόλουθα:

- ✖ Η εκκίνηση του απαιτεί υψηλή ένταση ρεύματος
- ✖ Υψηλή κατανάλωση
- ✖ Το κόστος του συστήματος σερβοκίνησης είναι υψηλό, διότι περιλαμβάνει το κόστος του σερβοκινητήρα, της διάταξη της τροφοδοσίας του καθώς και την διάταξη του ελέγχου.
- ✖ Σε περίπτωση μηχανικής υπερφόρτωσης υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ύπαρξης δυσλειτουργίας του συστήματος.
- ✖ Ο έλεγχος τους παρουσιάζει πολυπλοκότητα σε σχέση με άλλους κινητήρες.
- ✖ Λόγο της ανάγκης για ύπαρξη ανατροφοδότησης δεν μπορεί να λειτουργήσουν σε συστήματα ανοιχτού βρόγχου. Το σύστημα του κλειστού βρόγχου μπορεί να αποτελέσει μειονέκτημα για τον κινητήρα, στην περίπτωση όπου ένα φυσικό εμπόδιο εμποδίζει την πορεία της κίνησης

3.2 Τρόπος Οδήγησης Σερβοκινητήρων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι τρόποι οδήγησης των σερβοκινητήρων.

Ένας σερβοκινητήρας γυρίζει όταν σε αυτόν εφαρμοστεί μια κατάλληλη ηλεκτρική τάση αλλά και ένα σήμα ελέγχου που θα καθορίσει την θέση περιστροφής του τελικού άξονα. Συγκεκριμένα, ένας σερβοκινητήρας ελέγχεται με τη βοήθεια τριών καλωδίων. Το 1^ο είναι το κόκκινο, το 2^ο είναι το μαύρο και το 3^ο είναι το λευκό ή το πορτοκαλί—τα χρώματα των καλωδίων μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την εταιρία παραγωγής του σερβοκινητήρα—. Εφαρμόζοντας την κατάλληλη τάση για την τροφοδοσία του στα δύο πρώτα καλώδια και παλμό οδήγησης στο τρίτο καλώδιο, ο κινητήρας μπορεί να στραφεί αλλάζοντας την διάρκεια του παλμού που ήδη εφαρμόζεται στο λευκό καλώδιο εισόδου. Ο κύκλος εργασίας του παλμού καθορίζει εξολοκλήρου τη θέση στρέψης του σερβοκινητήρα. Στην περίπτωση που σταματήσουμε την τροφοδοσία με παλμούς στον κινητήρα για περισσότερα από 50ms τότε ο κινητήρας θα ξεκινήσει να αδρανοποιείται και καθώς δεν θα του ασκείται καμία απολύτως δύναμη, λόγω των τριβών που υπάρχουν στον κινητήρα, θα σταθεροποιηθεί στην θέση του.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

4. ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος, καλούνται οι κινητήρες οι οποίοι τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης.

4.1 Πλεονεκτήματα Και Μειονεκτήματα Συνεχών Κινητήρων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποια από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Τα πλεονεκτήματα των συνεχών κινητήρων είναι τα παρακάτω:

- ✓ Ευκολία ελέγχου της ταχύτητας του μέσω ενός μετατροπέα chopper.
- ✓ Υψηλή ροπή από μηδενική ταχύτητα.
- ✓ Υψηλός συντελεστής απόδοσης.

Τα μειονεκτήματα των συνεχών κινητήρων είναι τα ακόλουθα:

- ✗ Είναι ογκώδης στο μέγεθος τους.
- ✗ Δεν έχουν μεγάλη αντοχή σε περίπτωση υπερφόρτωσης.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

4.2 Τρόπος Οδήγησης Συνεχών Κινητήρων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι τρόποι οδήγησης των συνεχών κινητήρων.

Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες κινητήρων συνεχούς ρεύματος, και ο κάθε ένας από αυτούς οδηγείται με διαφορετικό τρόπο.

Οι κατηγορίες των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι οι εξής:

- A) Ανεξάρτητης διέγερσης
- B) Παράλληλης διέγερσης
- Γ) Διέγερσης σειράς
- Δ) Σύνθετης διέγερσης

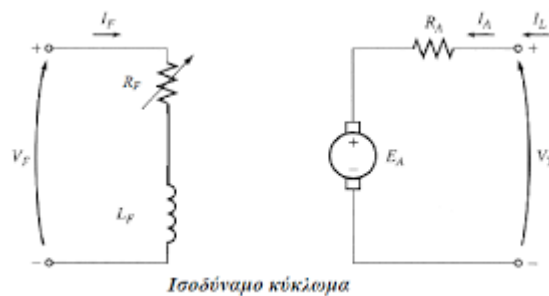
Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

4.2.1 Κινητήρας Ανεξάρτητης Διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης και οι εξισώσεις από το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:

$$I_F = V_F / R_F, \quad V_T = E_A + I_A R_A \text{ και } I_L = I_A.$$

Η αντι-ΗΕΔ E_A που αναπτύσσεται στο τύλιγμα του οπλισμού είναι πάντα μικρότερη από την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου V_T .



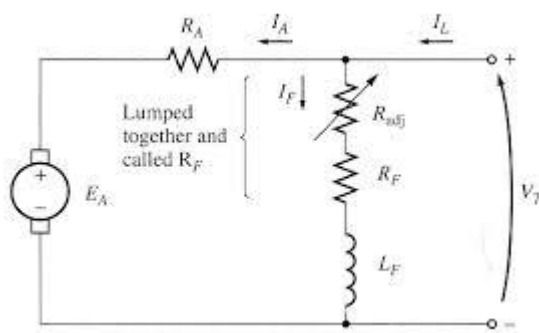
Εικόνα 4.1 : Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης

4.2.2 Κινητήρας Παράλληλης Διέγερσης

Τώρα το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από το κύκλωμα οπλισμού του κινητήρα, με τις αντίστοιχες εξισώσεις

$$I_F = V_F / R_F, \quad V_T = E_A + I_A R_A \quad \text{και} \quad I_L = I_A + I_F.$$

Άρα αν θεωρήσουμε σταθερή την τάση τροφοδοσίας V_T του κινητήρα, η ανάλυση που ακολουθεί θα είναι παρόμοια με την ανάλυση ενός κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης.

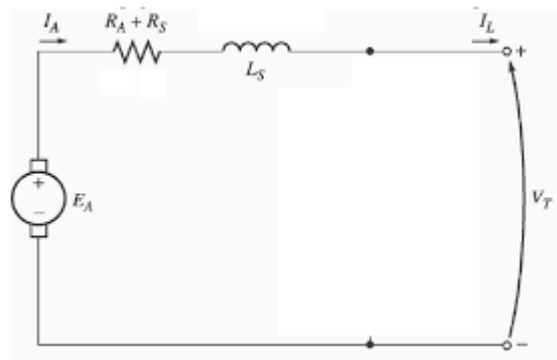


Εικόνα 4.2: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης

4.2.3 Κινητήρας Διέγερσης Σειράς

Τα τυλίγματα διέγερσης αυτών των κινητήρων διαθέτουν σχετικά λίγες σπείρες και είναι συνδεδεμένα σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού. Συνεπώς τα ρεύματα οπλισμού, διέγερσης και εισόδου έχουν την ίδια τιμή. Συγκεκριμένα, από το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύουν τα ακόλουθα:

$$I_s = I_A = I_L \text{ και } V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$



Εικόνα 4.3: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα διέγερσης σειράς

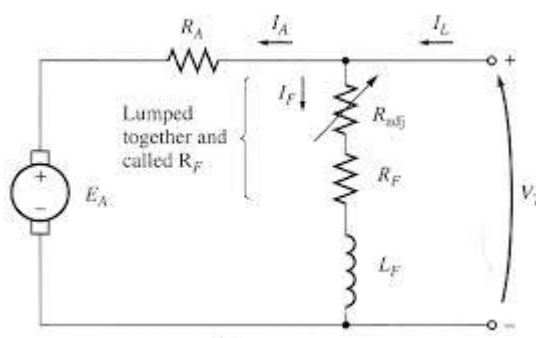
4.2.4 Κινητήρας Σύνθετης Διέγερσης

Οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης χρησιμοποιούν ένα τύλιγμα σειράς και ένα παράλληλο τύλιγμα. Έτσι έχουμε από το νόμο τάσεων :

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$

Ενώ στο εσωτερικό του κινητήρα τα ρεύματα ικανοποιούν τις σχέσεις :

$$I_A = I_L - I_F \text{ και } I_F = V_T / R_F$$



Εικόνα 4.4: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα σύνθετης διέγερσης

5. ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ BLDC

Οι **Brushless DC κινητήρες (BLDC motors)** είναι ηλεκτρικοί κινητήρες οι οποίοι οδηγούνται από συνεχές (DC) ρεύμα. Δεν έχουν μηχανικούς μεταγωγούς ρεύματος ούτε καρβουνάκια. Η σχέση που υπάρχει μεταξύ ρεύματος-ροπής και συχνότητας-ταχύτητας είναι γραμμικές. Τους κινητήρες BLDC μπορεί κάποιος να τους περιγράψει ως βηματικούς κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες με την διαφορά ότι υπάρχουν πιθανόν περισσότεροι πόλοι στον ρότορα από ότι στον στάτη.

Είναι μια περίπτωση κινητήρων όμοιων με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος αντιστρέφοντας ωστόσο το πεδίο στο δρομέα και το τύμπανο ή τα τυλίγματα στο στάτη. Ο όρος Brushless φανερώνει ότι ο κινητήρας αυτός δεν έχει ψήκτες και έτσι η μετάβαση του ρεύματος γίνεται ηλεκτρονικά. Η οδήγηση μέσω των ημιαγωγών παίζει τώρα σημαντικό ρόλο, αφού αποτελεί ουσιαστικά τον ρόλο του συλλέκτη και των ψηκτρών. Για την κίνηση του κινητήρα χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα με αισθητήρες, οι οποίοι αναγνωρίζουν την θέση που έχει ο δρομέας κάθε στιγμή, και ρυθμίζει αναλόγως την παροχή του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη με σκοπό να παραχθεί ένα αντίστοιχο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η συγκεκριμένη μηχανή χαρακτηρίζεται και ως «σύγχρονη» κάτι το οποίο σημαίνει ότι ο δρομέας περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα, σύγχρονα με το μαγνητικό πεδίο του διακένου.

5.1 Ιστορική Αναδρομή

Προτού εμφανιστούν οι Brushless DC motor υπήρχαν οι brush DC motor, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για να αντικαταστήσουν τους πολύ λιγότερο αποτελεσματικούς, από άποψη απόδοσης, κινητήρες επαγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι brush DC motor εφευρέθηκαν το 1856 από τον διάσημο γερμανό εφευρέτη και βιομήχανο Ernst Werner von Siemens. Ωστόσο, οι Brushless DC Motor εμφανίστηκαν για πρώτη φορά το 1962, όταν οι TG Wilson και PH Trickey αποκάλυψαν ότι δεν χρειαζόταν φυσικός συλλέκτης για την λειτουργία των Brushless DC Motor, κάτι αρκετά επαναστατικό για την τότε εποχή εμφάνισης τους. Ωστόσο, όλα άλλαξαν τη δεκαετία του 1980, όταν έγιναν οι μόνιμοι μαγνήτες διαθέσιμοι άμεσα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι κινητήρες Brushless DC , δηλαδή χωρίς ψήκτρες DC, να καταφέρνουν να παράγουν τόση ενέργεια ή και ακόμα περισσότερη από όση παρήγαγαν οι παλιοί κινητήρες brush DC. Στο τέλος της δεκαετίας του 1980, ο Robert E. Lordo της εταιρείας POWERTEC Industrial Corporation, αποκάλυψε τους πρώτους μεγάλους brushless DC κινητήρες, οι οποίοι είχαν τουλάχιστον δέκα φορές μεγαλύτερη ισχύ από ότι οι προηγούμενοι brushless AC κινητήρες.

5.2 Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά και Αρχή Λειτουργίας

Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη συνήθως είναι είτε μονοφασικές, είτε μπορεί να αποτελούνται από δύο φάσεις είτε και τρεις. Ωστόσο η πιο διαδεδομένη όσον αφορά την χρήση είναι η τριφασική.



Σχήμα. 5.1 BLDC μηχανές διαφόρων τύπων. Η μηχανή (α) αποτελείται από δύο τυλίγματα, δηλαδή κάθε φάση αποτελείται από δύο υποτυλίγματα και κατά επέκταση τέσσερις μαγνητικούς πόλους, δηλαδή ο δρομέας καλύπτεται από δύο ζεύγη μαγνητικών πόλων, αντίθετης πολικότητας. Με τον ίδιο τρόπο η (β) έχει τρεις ομάδες τυλιγμάτων και κατά επέκταση οχτώ μαγνητικούς πόλους, ενώ η (γ) έχει τέσσερις ομάδες τυλιγμάτων και οχτώ μαγνητικούς πόλους.

5.2.1 Στάτης

Ο στάτης μιας μηχανής τύπου Brushless αποτελείται από ελάσματα ατσάλινου υλικού με αποτελούμενο πάχος της τάξης του 0.3-0.5 χιλ. Τα τυλίγματα που δημιουργούνται τοποθετούνται στις εγκοπές του, οι οποίες εκκινούνται κατά μήκος της εσωτερικής περιφέρειας του στάτη (Σχήμα 5.2). Εξαιτίας της προσπάθειας των εγκοπών για διάσπαση της ομοιομορφίας που δημιουργείται είναι απαραίτητη η τοποθέτηση τους ομοιόμορφα γύρω από το στάτη. Σχεδόν στις περισσότερες BLDC μηχανές παρατηρούνται τρία τυλίγματα στο στάτη, τα οποία συνδέονται σε σχηματισμό αστέρα. Το κάθε ένα από αυτά αποτελείται εξίσου από μικρότερες περιπλέξεις, οι οποίες καταλήγουν όλες μαζί στο τύλιγμα. Κατά την λειτουργία της μηχανής είναι σύνηθες η εμφάνιση θορύβων. Αυτός είναι και ο λόγος της κατασκευής καλουπιού γύρω από το στάτη, με σκοπό την αποτροπή αυτών των δονήσεων και κατά επέκταση την μείωση των θορύβων.

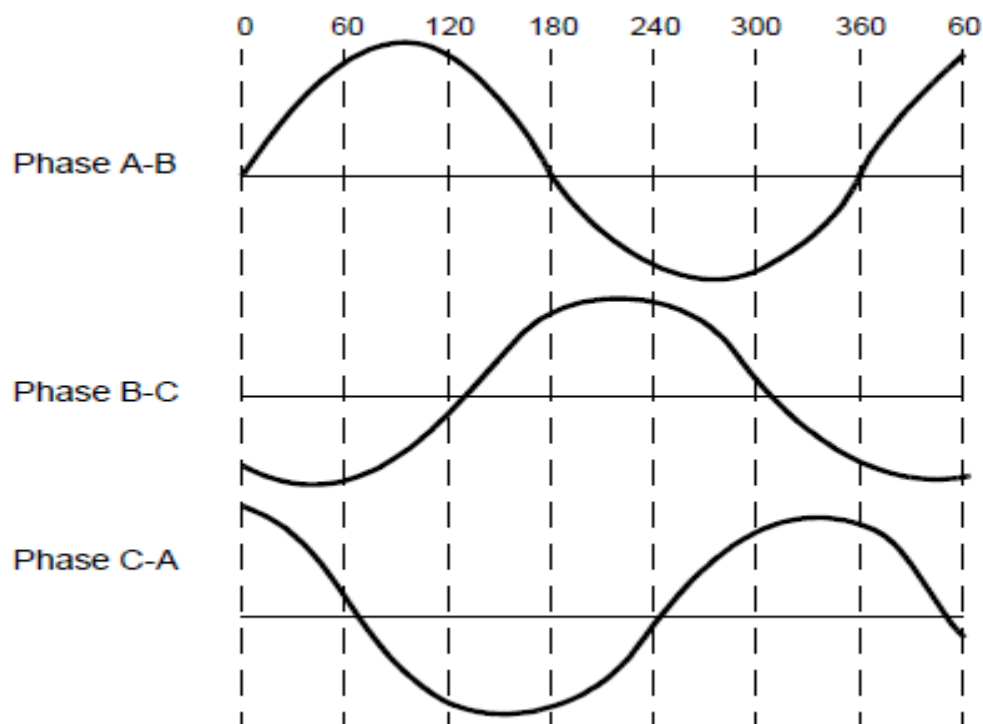
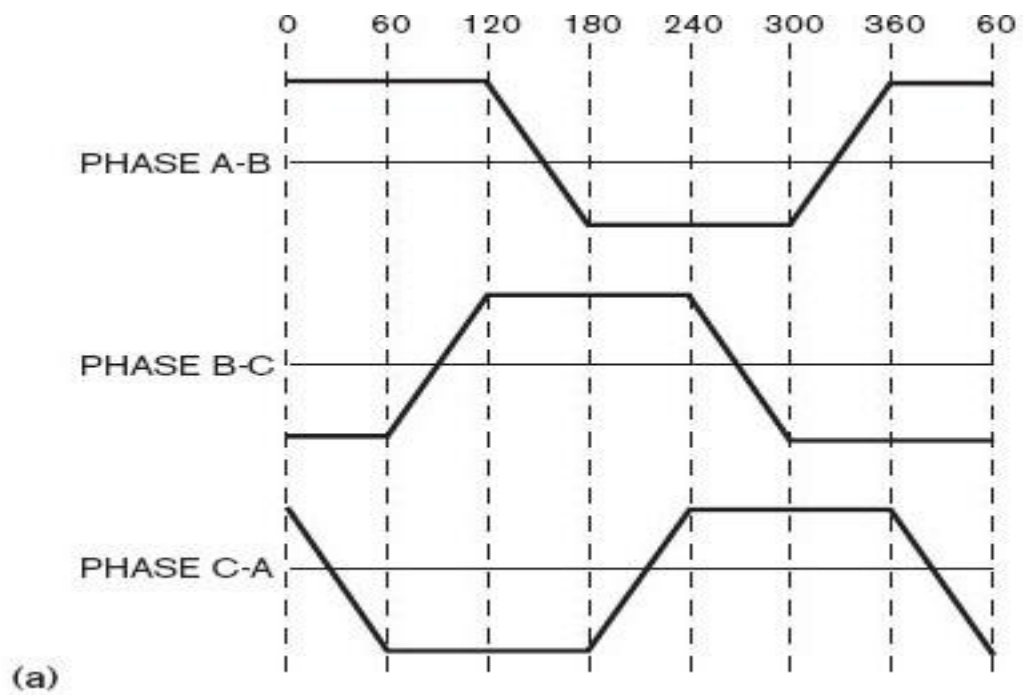
Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Σχήμα. 5.2 Στάτης μηχανής brushless , από όπου φαίνονται οι εγκοπές στην εσωτερική περιφέρεια του στάτη, οι πυρήνες και τα τυλίγματα.

Οι περιελίξεις και κατά συνέπεια τα τυλίγματα τα ίδια, μπορούν να συνδεθούν με διάφορους τρόπους, το οποίο μας οδηγεί στην ύπαρξη δυο διαφορετικών μεταξύ τους τύπων μηχανών brushless. Ο πρώτος τύπος έχει τυλίγματα κατανομημένα με τραπεζοειδές μορφή στην περιφέρεια του στάτη, αντιθέτως ο άλλος με ημιτονοειδής αντίστοιχα. Έτσι οδηγούμαστε και στην ύπαρξη ανάλογης τάσης αντίστοιχης του τύπου της μηχανής εκ της οποίας παράγεται. Όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ροπή, η ημιτονοειδής μηχανή έχει σταθερότερη ροπή, αν και το μειονέκτημα της είναι το υψηλό επιπλέον κόστος το οποίο οφείλεται στην περίπλοκη διασύνδεση των περιελίξεων.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Σχήμα. 5.3 Τραπεζοειδής και ημιτονοειδής τάση εξ' απαγωγής

5.2.2 Δρομέας

Ο δρομέας αποτελείται από συμπαγής κατασκευή ατσάλινου υλικού. Στην επιφάνεια του είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες αντίθετης πολικότητας. Οι μαγνήτες μπορεί να βρίσκονται τοποθετημένοι στην περιφέρεια του δρομέα με κάποια κενά ανάμεσα τους, ή να έχουν σφηνωθεί κάτω από την επιφάνεια του δρομέα είτε οριζόντια είτε κάθετα. Συνολικά μπορεί να υπάρχουν από δύο μέχρι και οχτώ ζευγάρια μαγνητών οι οποίοι παρουσιάζουν αντίθετη μαγνητική πολικότητα, με σκοπό την δημιουργία ενός δυνατού μαγνητικού πεδίου.

Το μαγνητικό πεδίο επηρεάζεται από τη φύση του υλικού των μαγνητών ώστε να δημιουργηθεί αναλόγως ένα δυνατότερο ή μη μαγνητικό πεδίο. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των μαγνητών είναι είτε φερρίτης, είτε κράματα σπανίων γαιών. Ο μεν φερρίτης αποτελεί το παραδοσιακό και επιπλέον το πιο φθινό υλικό. Ως αποτέλεσμα αυτού οι μαγνήτες από φερρίτη είναι φθηνότεροι. Το μειονέκτημα τους βρίσκεται στη χαμηλή πυκνότητα ροής που εμφανίζουν για συγκεκριμένο όγκο. Αντίθετα τα δε κράματα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ροής ανά όγκο. Έτσι είναι δυνατή η μείωση του όγκου του δρομέα κρατώντας σταθερή την τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Συγκριτικά θεωρούμε τους μαγνήτες από κράματα πιο αποδοτικούς όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ροπή σε σχέση με τους μαγνήτες από φερρίτη, λόγω της βελτίωσης της αναλογίας του μεγέθους προς το βάρος του δρομέα.

Ένα βασικό πρόβλημα με το οποίο ερχόμαστε αντιμέτωποι με τη χρήση των μαγνητών είναι οι υψηλές ταχύτητες, συμπεριλαμβανομένης της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης, εξαιτίας των οποίων, εκείνη τη χρονική στιγμή, δημιουργούνται ακτινωτές δυνάμεις οι οποίες χρίζουν ανάγκη αντιμετώπισης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την γερή συγκράτηση και πιθανότατα την συγκόλληση των μαγνητών σε επιφάνειες, χωρίς ωστόσο να παραλείπεται η μελέτη και ο παράλληλος υπολογισμός της μηχανικής και θερμικής διαστολής της συγκολλητικής ουσίας και του μαγνήτη.

5.3 Αρχή Λειτουργίας των brushless DC Κινητήρων

Η λειτουργία των BLDC κινητήρων δίνεται ως εξής. Βασική προϋπόθεση για την λειτουργία τους είναι η ύπαρξη των τριών τυλιγμάτων, δηλαδή τριών καλωδίων. Το πρώτο αποτελεί την είσοδο του ρεύματος (θετική ισχύς), το δεύτερο την έξοδο του (αρνητική ισχύς) και το τρίτο βρίσκεται χωρίς ρεύμα. Η παραγόμενη ροπή του κινητήρα είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των μαγνητικών πεδίων που παράγονται μεταξύ του στάτη και του δρομέα κατά την διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα.

Για την υλοποίηση του ελέγχου απαιτείται η γνώση της θέσης του δρομέα σε συγκεκριμένες θέσεις. Η παραγωγή του κάθε σήματος πραγματοποιείται κάθε 60° ηλεκτρικές μοίρες. Άρα ένας πλήρης ηλεκτρικός κύκλος μηχανής απαιτεί την ύπαρξη έξι επαναλαμβανόμενων σημάτων. Ωστόσο ένας ηλεκτρικός κύκλος και ένας μηχανικός κύκλος του δρομέα δεν είναι ταυτόσημοι, διότι η συμπλήρωση ενός μηχανικού κύκλου απαιτεί την ύπαρξη ηλεκτρικών κύκλων οι οποίοι εξαρτώνται από τα ζεύγη των πόλων του δρομέα. Για κάθε ένα ζεύγος πόλων πραγματοποιείται ένας ηλεκτρικός κύκλος.

Επίσης, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των τριών φασικών επαγόμενων ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων για τον υπολογισμό των χρονικών στιγμών μετάβασης του ρεύματος και κατά συνέπεια την κατάργηση της ανάγκης για κάποιο αισθητήριο υπολογισμού θέσης του δρομέα.

Η επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων, γίνεται ανάλογα με την τάση της μηχανής και των ρευμάτων που απαιτούνται. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν transistor τύπου MOSFET, IGBT ή απλά διπολικά transistor. Για τον ευκολότερο έλεγχο και αλλαγή της ταχύτητας της μηχανής, είναι εφικτή η δυνατότητα χρήσης διαμορφωμένου εύρους παλμών (PWM) με συχνότητα πολύ μεγαλύτερη της συχνότητας της μηχανής.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

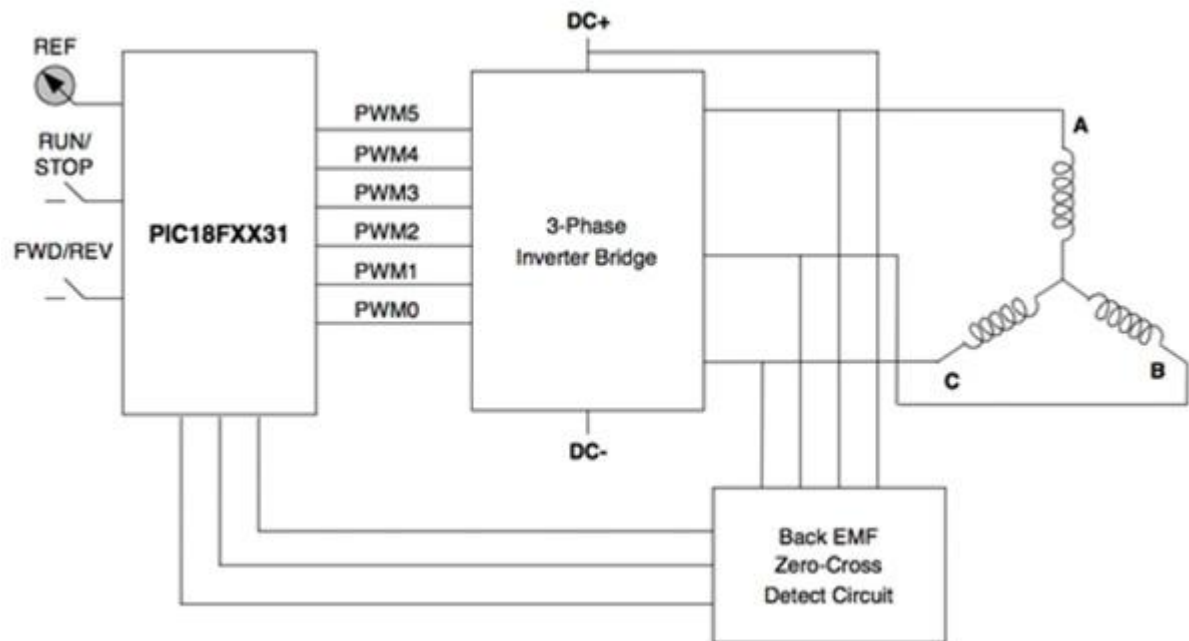
5.4 Κατάσταση Μεταβάσεων

Το σχήμα 5.4 δείχνει ένα παράδειγμα παραγωγής σημάτων ενός συστήματος αισθητηρίων Hall σε σχέση με την Ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) και τα φασικά σήματα. Το σχήμα 5.5 δείχνει την ακολουθία μεταβάσεων που ακολουθείται με βάση τα σήματα του αισθητηρίου Hall. Κάθε αριθμός μετάβασης του σχήματος 5.4 ισοδυναμεί με τον αντίστοιχο του στο σχήμα 5.5.

Περίπου κάθε 60° περιστροφής, ένα αισθητήριο Hall αλλάζει την κατάσταση του. Με αυτό τον τρόπο χρειάζονται 6 βήματα για την ολοκλήρωση ενός πλήρους ηλεκτρικού κύκλου. Ταυτόχρονα, κάθε 60° αλλάζει η αγώγιμη κατάσταση, και η φάση που άγει δίνει την θέση της σε μία φάση που δεν άγει. Ο αριθμός ενός ηλεκτρικού κύκλου μπορεί να μην ανταποκρίνεται σε έναν μηχανικό. Κατά την διάρκεια ενός πλήρους ηλεκτρικού κύκλου, τροφοδοτείται ένα ζεύγος πόλων του δρομέα. Κατά συνέπεια, ο αριθμός παραγωγής των ηλεκτρικών κύκλων μέσα σε μια περιστροφή του δρομέα είναι ίσος με τα ζεύγη των πόλων του δρομέα. Στην εικόνα 5.1 παρατίθεται το δομικό διάγραμμα μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κίνησης του BLDC κινητήρα.

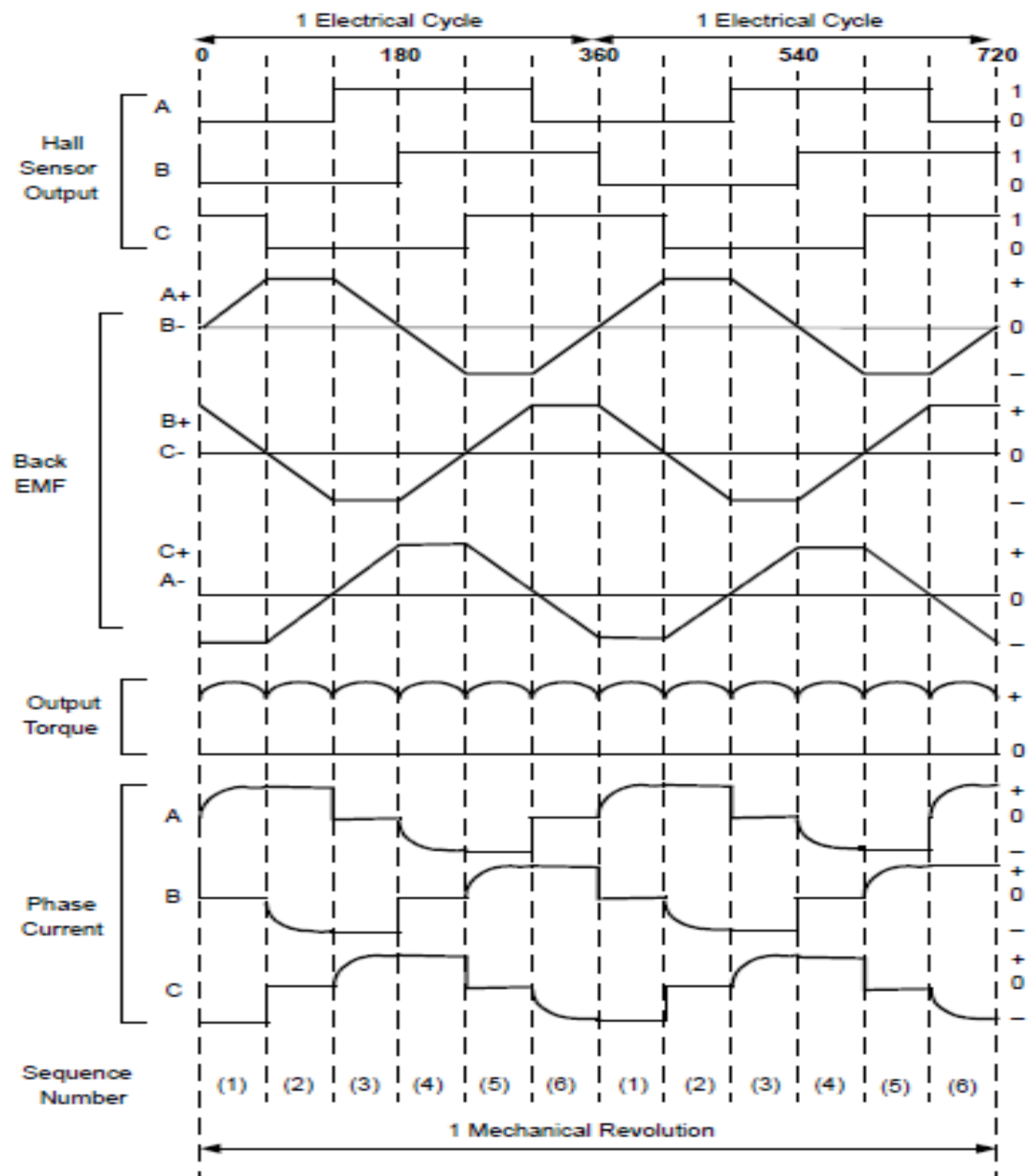
Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε ότι αφορά τις μεταβάσεις είναι οι πολύ υψηλές ταχύτητες. Επειδή η ΗΕΔ είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής, σε πολύ χαμηλές ταχύτητες πιθανότατα να υπάρχει δυσκολία στον εντοπισμό της μηδενικής ταχύτητας ακριβώς την στιγμή που θα αποκτηθεί, εξαιτίας του πολύ μικρού πλάτους που διαμορφώνεται. Έτσι, ο κινητήρας θα πρέπει να εκκινήσει από την ακινησία με ανοιχτό βρόγχο, με αποτέλεσμα κατά την διάρκεια παραγωγής της κατάλληλης ΗΕΔ να μπορεί να αναγνωριστεί η στιγμή που αυτή διέρχεται από το μηδέν, και ο έλεγχος να μπορεί να πραγματοποιηθεί και χωρίς την χρήση αισθητηρίων. Υπολογίζεται μια σταθερά, η σταθερά της ΗΕΔ, η οποία βοηθάει στον εντοπισμό της ελάχιστης ταχύτητας που απαιτείται για την σωστή ανάγνωση της χρονικής στιγμής που μηδενίζεται η ΗΕΔ. Με αυτόν ακριβώς τον τρόπο, μπορεί ανά πάσα στιγμή να αποφευχθεί η χρήση ενός αισθητηρίου Hall. Αυτό το γεγονός μπορεί να απλοποιήσει την ολική κατασκευή και να μειώσει το κόστος κατασκευής. Πρόκειται για ένα σημαντικό πλεονέκτημα για χρήση σε περιβάλλον, στο οποίο είναι δύσκολος ο συνεχής καθαρισμός του αισθητηρίου, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει στην έλλειψη σωστού ελέγχου του κινητήρα.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



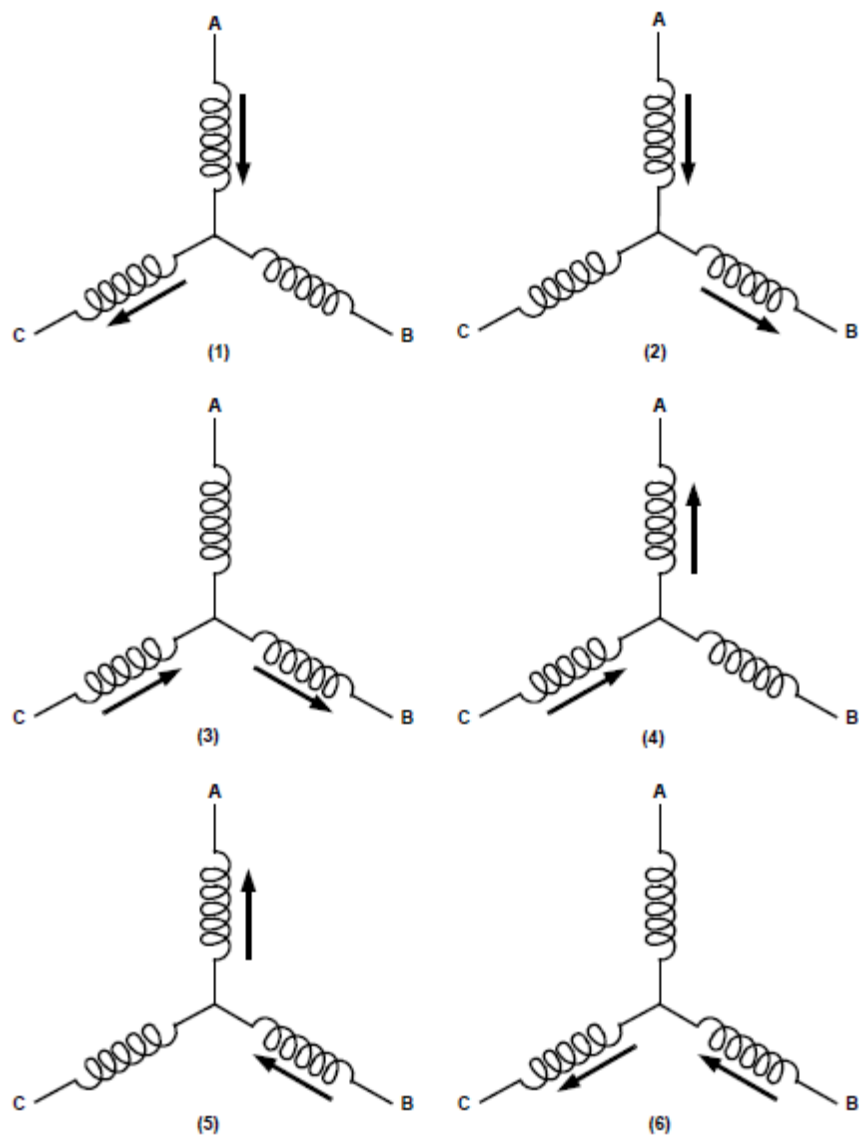
Εικόνα 5.1: Δομικό διάγραμμα ελέγχου χωρίς αισθητήριο

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Σχήμα. 5.4 Κατάσταση μεταβάσεων

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Σχήμα. 5.5 Μετάβαση τροφοδοσίας

5.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Βηματικών BLDC

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποια από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των βηματικών κινητήρων BLDC.

Τα πλεονεκτήματα του βηματικών κινητήρων BLDC είναι τα παρακάτω:

- ✓ Ο βηματικός κινητήρας χωρίς ψήκτρες, όταν βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας, ασκεί μαγνητική δύναμη στο ρότορα, που δεν του επιτρέπει να περιστραφεί ελεύθερα (εφόσον τα πηνία τροφοδοτούνται με ρεύμα). Έτσι, σε αντίθεση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, δεν χρειάζονται φρένα για να μένουν ακίνητοι.
- ✓ Οι μετακινήσεις είναι ακριβείς καθώς οι βηματικοί κινητήρες BLDC έχουν ακρίβεια 35% σε κάθε βήμα. Δηλαδή μεγάλη ακρίβεια θέσης χωρίς συσσωρευτική απόκλιση.
- ✓ Έχουν εξαιρετική απόκριση στην εκκίνηση τους. Επίσης, δεν απαιτείται μηχανικό φρένο για την επιβράδυνση τους.
- ✓ Είναι πολύ αξιόπιστοι καθώς για τη λειτουργία τους δεν απαιτούνται κινούμενες ηλεκτρικές επαφές, όπως στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Επομένως, η ζωή του κινητήρα εξαρτάται μόνο από τη ζωή του εδράνου κύλισης.
- ✓ Η απόκριση του κινητήρα σε εισερχόμενους ψηφιακούς παλμούς δίνει την δυνατότητα ελέγχου Ανοικτού Βρόχου (Open Loop Operation) με μεγάλη ακρίβεια, κάνοντας τον κινητήρα ευκολότερα και φθηνότερα ελέγξιμο. Για τον έλεγχο ανοιχτού βρόχου δεν χρειάζεται να υπάρχει ανάδραση πληροφορίας στο σύστημα ελέγχου για τη θέση του συστήματος, κάτι που είναι απαραίτητο στον έλεγχο κλειστού βρόχου. Αυτό σημαίνει ότι αποφεύγονται έξοδα για ακριβούς αισθητήρες θέσης και συσκευές ανάδρασης. Η θέση του συστήματος μπορεί εύκολα να υπολογιστεί σε κάθε στιγμή αν κρατούνται ως δεδομένα οι εισερχόμενοι παλμοί στον κινητήρα. Έτσι ξεκινώντας από μία θέση μπορεί, μετρώντας τον αριθμό και τις εναλλαγές των παλμών, να υπολογιστεί η θέση του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

- ✓ Ο βηματικός κινητήρας χωρίς ψήκτρες μπορεί να επιτύχει πολύ χαμηλές ταχύτητες περιστροφής.
- ✓ Ο βηματικός κινητήρας BLDC μπορεί να επιτύχει μεγάλο εύρος ταχυτήτων περιστροφής.
- ✓ Στις μικρές ταχύτητες περιστροφής και κατά την εκκίνησή του παράγει μεγάλες τιμές ροπής.
- ✓ Είναι εύκολη η διασύνδεση και ο έλεγχός τους από μικροελεγκτή, σε αντίθεση με τους κινητήρες DC.
- ✓ Οι BLDC κινητήρες είναι συχνά πιο αποδοτικοί στην μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική δύναμη, γιατί απουσιάζουν οι ηλεκτρικές απώλειες που εμφανίζονται από τις βούρτσες.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Τα μειονεκτήματα των βηματικών κινητήρων BLDC είναι τα ακόλουθα:

- ✖ Η λειτουργία του κινητήρα μπορεί να είναι ιδιαίτερα θορυβώδης ειδικά εάν αυτός δεν ελέγχεται σωστά.
- ✖ Δεν είναι εύκολη η λειτουργία τους σε υψηλές ταχύτητες.
- ✖ Είναι σχετικά αδύναμοι για το μέγεθός τους. Η ύπαρξη του φαινομένου του μαγνητικού κορεσμού και η ανάγκη ψύξης είναι η αιτία για την οποία έχουν χαμηλό λόγο ισχύος προς βάρος μηχανής.
- ✖ Κατά τη μετακίνηση φορτίων μεγάλης μάζας μπορεί να μη σταματήσει ακαριαία ο κινητήρας, λόγω της αυξημένης αδράνειας.

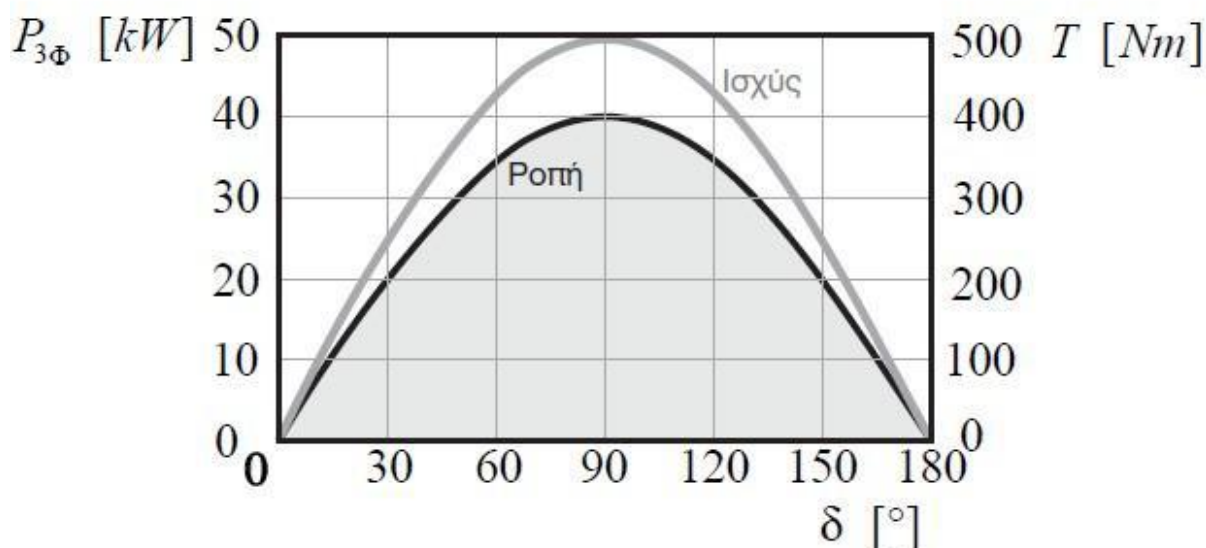
Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

5.6 Τρόποι Οδήγησης Βηματικών Κινητήρων BLDC

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι τρόποι οδήγησης των βηματικών κινητήρων BLDC .

Η ρύθμιση των στροφών γίνεται με οδήγηση από τρανζίστορ ισχύος και λογικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του τμήματος ισχύος (τρανζίστορ). Υπάρχουν 2 βασικά είδη οδηγήσεων που αντιστοιχούν στα αντίστοιχα 2 είδη κινητήρων brushless, τους τραπεζοειδείς κινητήρες (trapezoidal engines) και τους κινητήρες ημιτόνου (sine motors). Η διαφορά αυτών των δυο είναι η μορφή της ροπής της ατράκτου σε συνάρτηση με την γωνία που δημιουργείται στον δρομέα και το πεδίο του στάτη.

Συγκεκριμένα, στους κινητήρες ημιτόνου η ροπή που παράγεται έχει μορφή ημιτονοειδής, περίπου όμοια με τη μορφή της ροπής που μας αποδίδει ένας σύγχρονος κινητήρας όταν του έχουμε μεταβάλλει τη γωνία ροπής.



Εικόνα 5.2 : Συνάρτηση της ροπής σε σχέση με την γωνία του δρομέα στους ημιτονοειδείς BLDC

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιώντας πολύπλοκη οδήγηση μπορούμε να κρατήσουμε τη γωνία ροπής στις 90° με αποτέλεσμα να παραχθεί ελάχιστη κυμάτωση στην συνολική ροπή της ατράκτου.

Αντίθετα, οι τραπεζοειδείς κινητήρες παράγουν ροπή, η οποία μοιάζει με ημιτονοειδής συνάρτηση της γωνίας του δρομέα με τη διαφορά ότι κοντά στο μέγιστο πλάτος της ροπής η συνάρτηση αυτή είναι ψαλιδισμένη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σταθερή ροπή χωρίς μεγάλους κυματισμούς.

Επειδή οι BLDC κινητήρες συμπεριφέρονται όμοια με τους βηματικούς κινητήρες, μπορούμε εύκολα να τους ελέγξουμε με έναν μικροελεγκτή και 3 τρανζίστορ τύπου MOSFET.

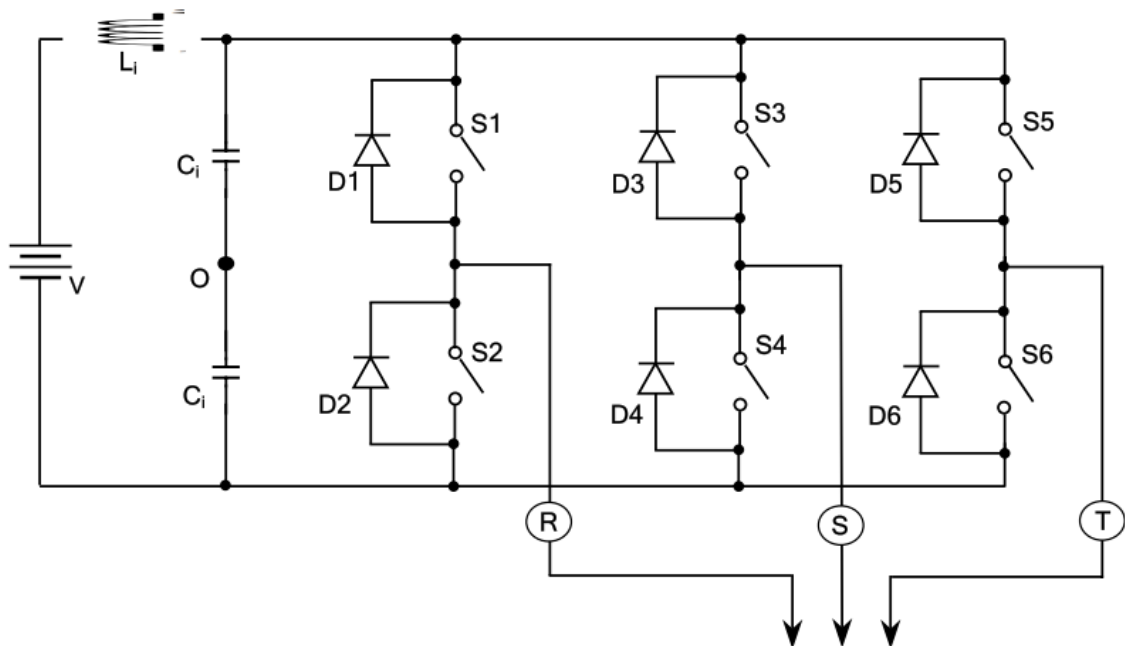
Αυτό πραγματοποιείται αλλάζοντας διαδοχικά τους παλμούς από τον ακροδέκτη Α του κινητήρα έως τον ακροδέκτη Γ. Έτσι επιτυγχάνεται η διαδοχική ενεργοποίηση των τυλιγμάτων του κινητήρα και κατ' επέκταση η ομαλή περιστροφή του ρότορα. Ο έλεγχος της ταχύτητα περιστροφής του ρότορα γίνεται γνωρίζοντας τον χρόνο ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς παλμούς ενεργοποίησης.

Ένας ακόμα πολύ σημαντικός τρόπος οδήγησης και ελέγχου της θέσης του βηματικού κινητήρα BLDC υλοποιείται με την βοήθεια ενός μικροελεγκτή. Οι μικροελεγκτές εντάσσονται στην κατηγορία των μικροεπεξεργαστών. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ελέγχου λόγω του χαμηλού τους κόστους καθώς και των ελάχιστων εξωτερικών εξαρτημάτων που χρειάζονται για την λειτουργία τους.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

5.6.1 Οδήγηση του Κινητήρα με Χρήση half bridge

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε ένα τριφασικό Inverter (αντιστροφέα) ο οποίος έχει υλοποιηθεί με MOSFETs.



Εικόνα 5.3 : Κύκλωμα οδήγησης κινητήρα με half bridge

Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από αντιστροφείς ημι-γέφυρες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα και έχουν ίδια κυματομορφή εξόδου σε σχέση με τον ουδέτερο. Τα τρανζίστορ ενεργοποιούνται κατά αυτών των τρόπων:

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Διάστημα	Τρανζίστορ που άγουν	$V_{an}(V_{dc})$	$V_{bn}(V_{dc})$	$V_{cn}(V_{dc})$	Voltage Vector	Είσοδος	Έξοδος
1	D1,D4,D6	1/3	-1/3	-2/3	V1(100)	R	S,T
2	D1,D3,D6	1/3	1/3	-1/3	V2(110)	R,S	T
3	D3,D2,D6	-1/3	2/3	-1/3	V3(010)	S	T,R
4	D2,D3,D5	-2/3	1/3	1/3	V4(011)	S,T	R
5	D2,D4,D5	-1/3	-1/3	2/3	V5(001)	T	R,S
6	D1,D4,D5	1/3	-2/3	1/3	V6(101)	T,R	S

Πίνακας 5.1 : Αγωγιμότητα τρανζίστορ ανά διαστήματα

- Διάστημα 1 Είσοδος κλάδος R Έξοδος κλάδος S και T
- Διάστημα 2 Είσοδος κλάδος R και S Έξοδος κλάδος T
- Διάστημα 3 Είσοδος κλάδος S Έξοδος κλάδος R και T
- Διάστημα 4 Είσοδος κλάδος S και T Έξοδος κλάδος R
- Διάστημα 5 Είσοδος κλάδος T Έξοδος κλάδος R και S
- Διάστημα 6 Είσοδος κλάδος R και T Έξοδος κλάδος S

Αυτή η διάταξη βοηθάει στην επίτευξη μιας πιο ομαλής περιστροφής του κινητήρα. Για να μπορέσει να επιτευχθεί ο σωστός χρονισμός θα πρέπει να γνωρίζουμε σε ποια θέση θα βρίσκεται ο ρότορας σε κάθε χρονική στιγμή καθ' όλη τη διάρκεια της περιστροφής του κινητήρα.

5.6.2 Οδήγηση του Κινητήρα μέσω Αισθητηρίου Hall

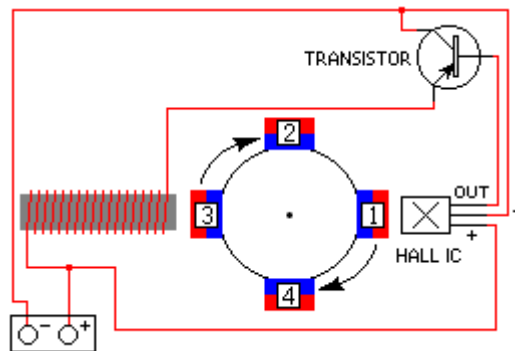
Ένας κινητήρας BLDC μπορεί να οδηγηθεί και να είναι γνωστή η θέση του μέσω ενός αισθητηρίου θέσης τοποθετημένο στον ρότορα. Το συγκεκριμένο αισθητήριο βοηθάει στο να πραγματοποιηθεί ένας σωστός έλεγχος όσον αφορά την μετατροπή της φάσης ή του ρεύματος που παρέχεται στον κινητήρα. Για τους BLDC κινητήρες, σε αντίθεση με άλλων ειδών κινητήρες, δεν είναι αναγκαία η χρήση ενός αισθητηρίου με υψηλή ανάλυση, όπως για παράδειγμα ένας κωδικοποιημένος άξονας ή ένας αναλυτής, αλλά ένα απλό αισθητήριο χαμηλού κόστους, θα μπορούσε να παρέχει τις κατάλληλες πληροφορίες για την θέση του ρότορα. Αυτό διότι, απαιτείται για τον έλεγχο του κινητήρα μόνο η γνώση των έξι φάσεων σταδιακής μετατροπής ανά ηλεκτρικό κύκλο.

Οι περισσότεροι κινητήρες BLDC, κάνουν την χρήση όχι μόνο ενός αλλά τριών αισθητηρίων Hall στο εσωτερικό του ρότορα. Έτσι κάθε φορά που περνάει ο στάτορας κοντά στους αισθητήρες Hall, δίνουν ένα υψηλό ή χαμηλό σήμα το οποίο υποδεικνύει ποιός από τους δύο, Νότιος ή Βόρειος πόλος, περνάει κοντά στους αισθητήρες. Ο συνδυασμός αυτών των τριών αισθητηρίων, προσδιορίζει την κατάλληλη και ακριβής αλληλουχία των σημάτων για την περιστροφή του. Η ενσωμάτωση του αισθητηρίου στο σταθερό μέρος του κινητήρα και η σωστή ευθυγράμμιση του με τους μαγνήτες είναι το σημαντικότερο κομμάτι στην διαδικασία της σύνθεσης του κινητήρα, καθώς μια λανθασμένη ευθυγράμμιση, μπορεί να οδηγήσει στην παροχή λάθος πληροφοριών το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί σφάλματα στον καθορισμό της θέσης του ρότορα.

Οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου κλείνουν κύκλωμα όταν βρεθούν υπό την επήρεια ενός μαγνητικού πεδίου. Αυτήν την ιδιότητα εκμεταλλευόμαστε με τον αντίστοιχο τρόπο:

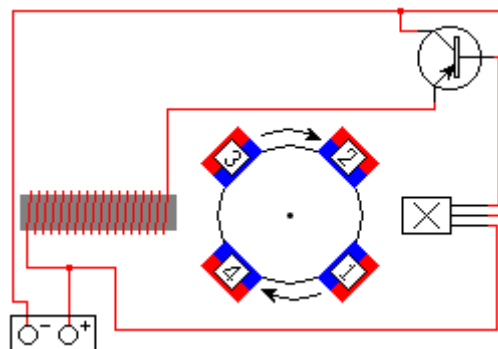
Α) Όταν ο μαγνήτης 1 προσεγγίζει τον αισθητήρα (HALL IC), αυτός κλείνει κύκλωμα. Έτσι πολώνεται το τρανζίστορ επιτρέποντας ένα μεγαλύτερο ρεύμα να περάσει από τον συλλέκτη του τρανζίστορ μέσω του αγωγού του ηλεκτρομαγνήτη. Έτσι ο Ηλεκτρομαγνήτης απωθεί τον μαγνήτη 3. (Εικόνα 5.4)

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Εικόνα 5.4

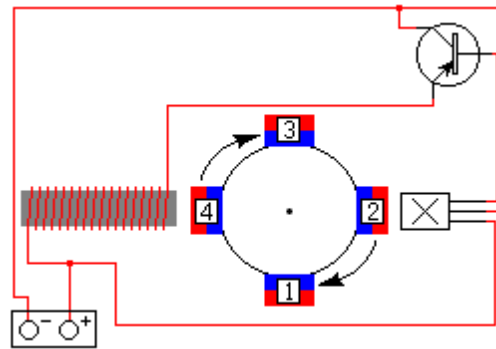
Β) Όταν ο ρότορας περιστραφεί, ο μαγνήτης 1 σταματά την επίδρασή του στον αισθητήρα. Έτσι το τρανζίστορ σταματά να πολώνεται και το ρεύμα σταματά να περνά από τον ηλεκτρομαγνήτη. Ως αποτέλεσμα, ο ηλεκτρομαγνήτης σταματά να απωθεί τον μαγνήτη 3 και περιμένει τον 4. (Εικόνα 5.5)



Εικόνα 5.5

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Γ) Όταν ο μαγνήτης 2 περάσει μπροστά από τον αισθητήρα, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. (Εικόνα 5.6)



Εικόνα 5.6

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ξέρουμε ανά πάσα στιγμή με πόσες στροφές ανά λεπτό κινείται ο κινητήρας.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

5.6.3 Οδήγηση του Κινητήρα μέσω της Μεθόδου BEMF

Η οδήγηση ενός κινητήρα BLDC μέσω ενός αισθητηρίου πολλές φορές είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους των αισθητηρίων και του πολύπλοκου ελέγχου τους. Για αυτό το λόγο, ο έλεγχος της θέσης και κατά συνέπεια της περιστροφικής κίνησης του κινητήρα, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της μεθόδου Back EMF.

Πρόκειται για έναν τρόπο εύρεσης της τροφοδοτούμενης τάσης των δυο εκ των τριών τυλιγμάτων του κινητήρα, που αντιστοιχούν σε εξήντα (60°) ηλεκτρικές μοίρες, κατά τις οποίες μία φάση της μηχανής είναι ανενεργή και σε αυτήν εμφανίζεται η τάση εξ επαγωγής. Ως ανενεργή καλείται η φάση του κινητήρα, στην οποία τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρατηρείται έλλειψη τροφοδοτούμενης τάσης από τον αντιστροφέα. Συγκεκριμένα, κάθε φορά που περιστρέφεται ο κινητήρας, τα δυο τυλίγματα του τροφοδοτούνται με την θετική DC+ και την αρνητική DC- τάση αφήνοντας το τρίτο τύλιγμα ανοιχτό, χωρίς τροφοδοσία. Έτσι, συγκρίνοντας κάθε φορά ποιο τύλιγμα είναι συνδεδεμένο σε μια εικονική γείωση, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση του δρομέα και στη συνέχεια να καταλάβουμε ποιο τύλιγμα θα πρέπει να ενεργοποιηθεί στη συνέχεια, με σκοπό να του δοθεί η αντίστοιχη τροφοδοσία. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται συνολικά και από τα τρία τυλίγματα διαφορετική τάση λόγω της αντίστοιχης Back EMF του καθενός. Στο διάστημα όπου μια φάση είναι ανενεργή, η τάση εξ' επαγωγής διέρχεται από την μηδενική στάθμη, ανεξαρτήτως του αριθμού των στροφών του δρομέα. Οπότε η ανίχνευση της μηδενικής τάσης αρκεί για τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης του δρομέα.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

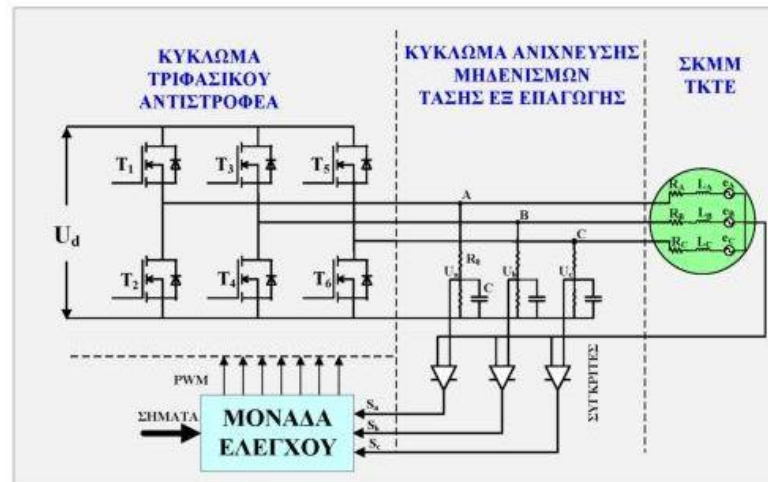
5.6.4 Τεχνικές Ανίχνευσης της Τάσης εξ επαγωγής

Η οδήγηση του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη αποφεύγοντας την χρήση αισθητήριου, επιτυγχάνεται αξιοποιώντας την τάση εξ επαγωγής όπως αυτή εμφανίζεται στα άκρα των τυλιγμάτων κάθε φάσης του κινητήρα. Το σήμα που έχει δοθεί μπορεί να ληφθεί κάνοντας μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του εκάστοτε ακροδέκτη μιας φάσης του κινητήρα και του :

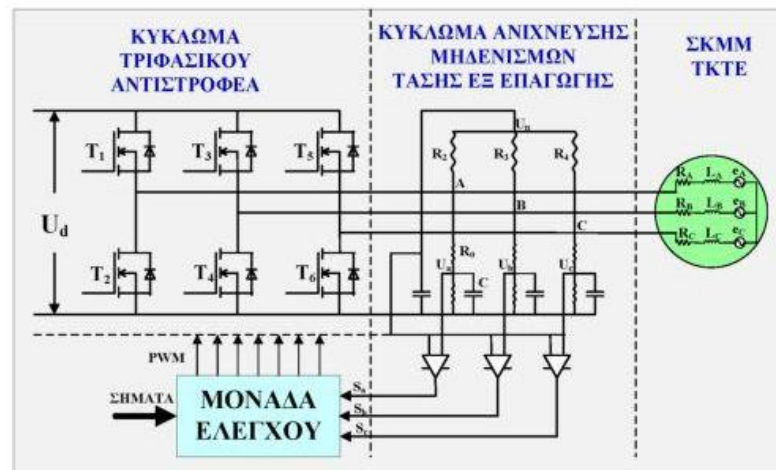
- Κοινού σημείου των τυλιγμάτων του κινητήρα, όταν υπάρχει φυσικά εύκολη πρόσβαση σε αυτό (Εικ. 5.7α)
- Του ουδέτερου σημείου ενός κατασκευασμένου αστέρα (Εικ. 5.7β)
- Αρνητικού δυναμικού του κλάδου συνεχούς τάσεως του αντιστροφέα (Εικ. 5.7γ)
- Ήμισυ της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας του αντιστροφέα (Εικ. 5.7δ)

Ανεξαρτήτως της διαφοράς δυναμικού που παρουσιάζεται, το σήμα, περιλαμβάνει πέραν της τάσης εξ επαγωγής και κρουστικού τύπου μεταβολές, που υπερτίθενται σε αυτή λόγω της εφαρμογής τεχνικών διαμόρφωσης στην τάση της τροφοδοσίας. Η εμφάνιση τους οφείλεται στις απότομες μεταβολές του ρεύματος των άλλων δύο φάσεων (ενεργές φάσεις, δηλ. χωρίς ρεύμα), στη μαγνητική σχέση του τριφασικού τυλίγματος καθώς και στην αγωγή των διόδων ελεύθερης διέλευσης του αντιστροφέα. Η υπέρθεση αυτών των μεταβολών, αλλοιώνει την τάση εξ' επαγωγής, εμφανίζοντας επιπλέον εσφαλμένα σημεία μηδενισμού στο σημείο μέτρησης. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση ενός ιδιαίτερα θορυβώδους σήματος, γεγονός που απαιτεί την επεξεργασία του σήματος μέσω κατάλληλων φίλτρων, ώστε να εντοπιστούν τα πραγματικά σημεία μηδενισμού της τάσης εξ' επαγωγής. Ωστόσο, η χρήση φίλτρων εισάγει μια καθυστέρηση φάσης, γεγονός που αλλοιώνει την πληροφωρία της θέσης του δρομέα και οδηγεί σε εσφαλμένο προσδιορισμό του σημείου μηδενισμού. Για αυτό το λόγο απαιτείται αλγόριθμος κατάλληλης παραγωγής σήματος αναφοράς, το οποίο είναι κατάλληλα χρονικά μετατοπισμένο, ώστε να ταυτιστεί χρονικά η διακοπτική περιοχή του αντιστροφέα με την περιοχή σταθερών τιμών της τάσεως εξ' επαγωγής.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



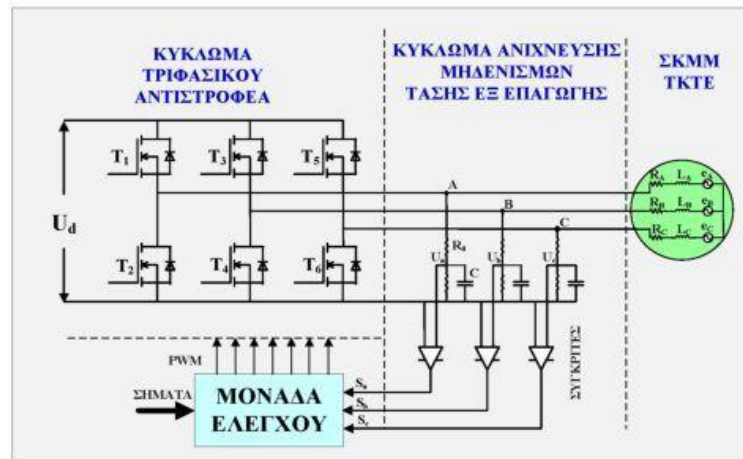
(α)



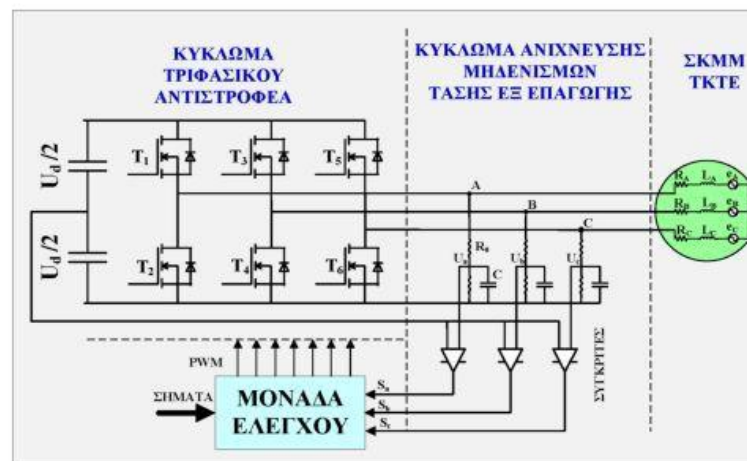
(β)

Εικόνα 5.7

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



(γ)



(δ)

Εικόνα 5.7

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Οι τεχνικές που παρουσιάζονται στις παραπάνω εικόνες και βασίζονται στην ανίχνευση του σημείου μηδενισμού της τάσης εξ' επαγωγής παρουσιάζουν περιορισμούς κατά της εφαρμογή τους:

- α) Η ανίχνευση της τάσης εξ επαγωγής σε πολύ χαμηλές στροφές (κάτω από το 10% του ονομαστικού αριθμού στροφών) δεν μπορεί να γίνει αξιόπιστα, λόγω του μικρού πλάτους αυτής. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια του σήματος της τάσης εξ' επαγωγής είναι συγκρίσιμη με αυτή των κρουστικών τάσεων που υπερτίθενται και έτσι προκύπτει ένα ιδιαίτερα θορυβώδες σήμα για το οποίο είναι σχεδόν αδύνατη η ανίχνευση του σημείου μηδενισμού της τάσης εξ' επαγωγής.
- β) Σε τεχνικές όπου χρησιμοποιείται αλγόριθμος διόρθωσης φάσης, απαιτείται αυξημένη υπολογιστική ισχύ, λόγω της μη γραμμικής μεταβολής αυτής σε συνάρτηση με τη συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα. Έτσι, τίθενται περιορισμοί στη δυναμική απόκριση του κινητήριου συστήματος λόγω αυξημένου υπολογιστικού χρόνου. Σε περίπτωση όπου χρησιμοποιείται κύκλωμα χαμηλής ισχύος για την διόρθωση φάσης, μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος, αλλά οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό αυξάνονται.
- γ) Σε αυτές τις τεχνικές υποθέτουμε ότι κατά τη μετάβαση το ρεύμα μηδενίζεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και συνεπώς εμφανίζεται αυτούσια η τάση εξ επαγωγής στην ανενεργή φάση της μηχανής. Αυτή η υπόθεση δεν αληθεύει για ταχύτητες ίσες ή μεγαλύτερες της ταχύτητας βάσης. Ως ταχύτητα βάσης, θεωρείται η ταχύτητα κατά την οποία η τάση εξ' επαγωγής γίνεται ίση με την τάση τροφοδοσίας. Σε υψηλές ταχύτητες η αγωγιμότητα των τυλιγμάτων αυξάνεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο χρόνος για τον μηδενισμό του ρεύματος της φάσης που παύει να τροφοδοτείται.
- δ) Στις τεχνικές όπου μετρώνται οι τάσεις στις φάσεις της μηχανής για την ανίχνευση της μηδενικής τάσης προϋποθέτουν: i) συνδεσμολογία αστέρα στα τυλίγματα του στάτη, και ii) πρόσβαση στο σημείο του αστέρα.
- ε) Η εμφανιζόμενη τάση στην ανενεργή φάση της μηχανής, προέρχεται από το πεδίο του μόνιμου μαγνήτη του δρομέα και το πεδίο του στάτη. Η πρώτη θέση περιέχει πληροφορίες για τη θέση του δρομέα, ενώ η δεύτερη αλλοιώνει την κρίσιμη πληροφορία.

5.7 Εφαρμογές των Κινητήρων BLDC

Οι μηχανές τύπου brushless (χωρίς ψήκτρες) , έχουν μεγάλη απήχηση και εφαρμογές σε σχεδόν κάθε τμήμα της αγοράς. Κάποιοι από τους τομείς που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι αυτοκινητοβιομηχανίες, σε διάφορες οικιακές συσκευές, κινητήρες ελικοπτέρων, βιομηχανικό έλεγχο κλπ.

Ωστόσο θα μπορούσαμε να κατηγοριοποιήσουμε τις εφαρμογές των κινητήρων BLDC σε τρεις γενικές και κύριες κατηγορίες:

- Σταθερού φορτίου
- Μεταβαλλόμενου φορτίου
- Εφαρμογές ανίχνευσης θέσης

5.7.1 Εφαρμογές με Σταθερό Φορτίο

Αυτή η συγκεκριμένη κατηγορία παρουσιάζεται στις εφαρμογές, στις οποίες είναι σημαντικότερη η ύπαρξη μεταβαλλόμενης τιμής από την σταθεροποίηση της σε συγκεκριμένη τιμή. Κατ' επέκταση , οι τιμές της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης δεν είναι δυναμικά μεταβαλλόμενες. Αυτού του είδους οι εφαρμογές εξαιτίας της λειτουργίας τους σε ανοιχτό βρόγχο, έχουν χαμηλό κόστος ελέγχου.

5.7.2 Εφαρμογές με Μεταβαλλόμενο Φορτίο

Αυτή είναι η κατηγορία των εφαρμογών , στις οποίες το φορτίο κυμαίνεται σε ένα εύρος ταχυτήτων. Συνήθως αυτές οι εφαρμογές , χρειάζονται έναν έλεγχο ταχύτητας υψηλής ακρίβειας και καλής δυναμικής απόκρισης. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να κάνουν χρήση συσκευών ανάδρασης της ταχύτητας και να λειτουργούν σε κλειστό βρόγχο. Ο έλεγχος τους γίνεται με προηγμένους αλγόριθμους, οι οποίοι κάνουν τον έλεγχο πολυπλοκότερο και επιπρόσθετα αυξάνουν το κόστος του συστήματος ελέγχου. Μερικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι οι οικιακές εφαρμογές (πλυντήρια, στεγνωτήρια), η αυτοκινητοβιομηχανία (έλεγχος αντλιών καυσίμων, έλεγχος κινητήρων), η ηλεκτρονική πηδαλιούχηση. Στην αεροδυναμική υπάρχουν άπειρες εφαρμογές, όπως συσκευές φυγοκέντρισης, αντλίες, έλεγχος ρομποτικών χεριών, έλεγχος γυροσκοπίου και πολλά ακόμα.

5.7.3 Εφαρμογές Ανίχνευσης Θέσης

Οι περισσότερες από τις βιομηχανικές εφαρμογές και τις εφαρμογές αυτοματισμού υπάγονται σε αυτή την κατηγορία. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές παρουσιάζουν ένα είδος μεταφοράς ενέργειας. Σε αυτές τις εφαρμογές σημαντικό ρόλο παίζουν οι δυναμικές αποκρίσεις της ροπής καθώς και της ταχύτητας. Επίσης σε αυτές τις εφαρμογές μπορούν να παρουσιαστούν εναλλαγές στην φορά περιστροφής. Έτσι θεωρώντας έναν τυπικό κύκλο μηχανής και λειτουργίας, παρατηρούμε την φάση της επιτάχυνσης, τη φάση της επιβράδυνσης, τη φάση της σταθερής ταχύτητας και τέλος την ανίχνευση της θέσης.

5.8 Κριτήρια Επιλογής Κινητήρα στο Σύστημα

Ο κινητήρας που θα πρέπει να επιλεγεί για την χρήση μας, θα πρέπει να επιλεγεί σύμφωνα με κάποια κριτήρια, τα οποία θα εξαρτηθούν από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα εξής :

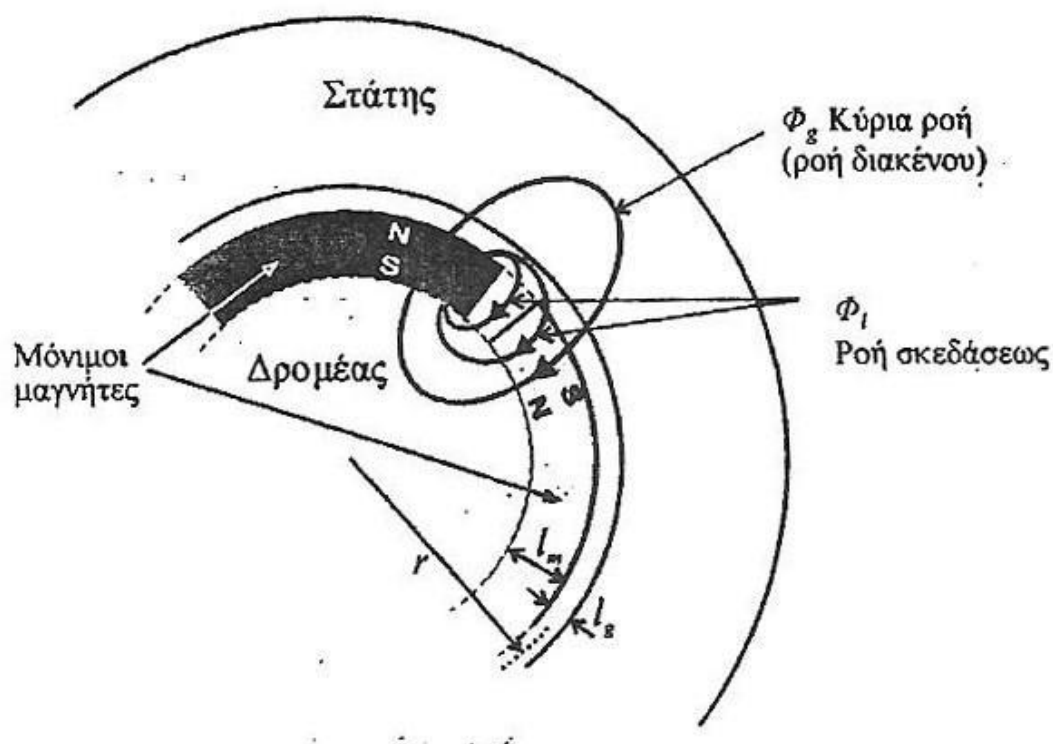
- Η μέγιστη ροπή του κινητήρα που απαιτείται από την εφαρμογή.
- Η ενεργός τιμή της ροπής.
- Η ταχύτητα λειτουργίας.

5.9 Μαγνητική Επαγωγή και Μαγνητικό Κύκλωμα Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 5.6 η ροή διακένου Φ_g περνά το διάκενο και περιπλέκεται με τα τυλίγματα του στάτη, ενώ η ροή σκεδάσεως Φ_i δεν εμπλέκεται με τα τυλίγματα του στάτη και οι δυναμικές γραμμές κλείνουν μέσα από το διάκενο και τον πυρήνα του δρομέα. Η ροή διακένου Φ είναι το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ροής διέγερσης και ισχύει

$$\Phi_m = \Phi_g + \Phi_i \quad (5.8.1)$$

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Σχήμα. 5.6 Διπολική brushless DC μηχανή και μαγνητικές ροές

Το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα για τον έναν πόλο της μηχανής παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 5.7.

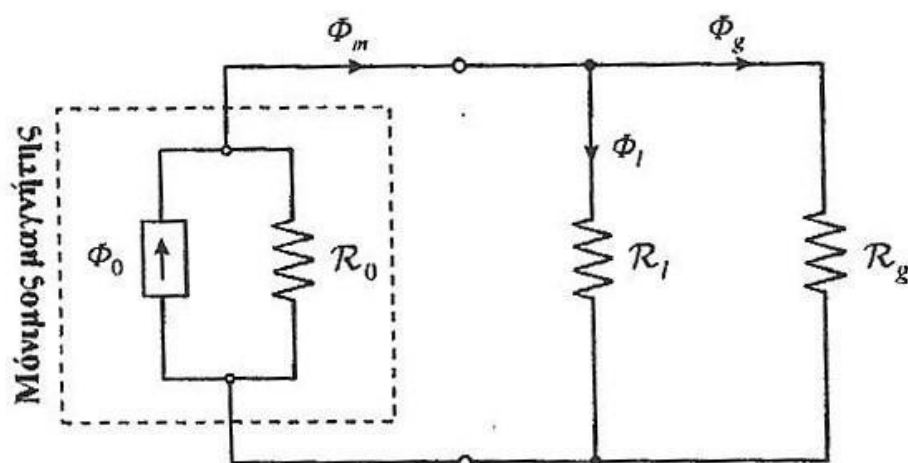
Θεωρούμε ότι η μαγνητική διαπερατότητα των πυρήνων του στάτη, καθώς και η αντίστοιχη του δρομέα, είναι πολύ μεγάλη και συνεπώς η μαγνητική αντίσταση που παρουσιάζουν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Η μαγνητική αντίσταση του διακένου, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_g = (1/\mu_0) * (l'_g / A_g) \quad (5.8.2)$$

Όπου $A_g = r l$ το μέσο εμβαδό της επιφάνειας του διακένου ενός πολικού βήματος, l το αξονικό μήκος των πυρήνων, $l'_g = k_c l_g$ το ισοδύναμο μήκος του διακένου και k_c ο συντελεστής Carter ο οποίος λαμβάνει υπόψη του την αντίσταση διακένου.

Από την ανάλυση του σχήματος έχουμε ότι

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Σχήμα. 5.7 Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα

$$\Phi_g = \Phi_0 * (1 / (1 + (P_0 + P_1) * R_g)) \quad (5.8.3)$$

Όπου Φ_0 η ροή του παραμένοντα μαγνητισμού,

$$P_0 = \mu_0 \mu_{rec} * (A_m / L_m) \quad (5.8.4)$$

Η μαγνητική αγωγιμότητα του μαγνήτη, $P_1 = 1/R_1$ η αγωγιμότητα σκεδάσεως και A_m η επιφάνεια του μαγνήτη ενός πολικού βήματος.

Ο παράγοντας συγκέντρωσης ροής ισούται με

$$C_\phi = A_m / A_g \quad (5.8.5)$$

Και από τις εξισώσεις (5.8.2) και (5.8.5) προκύπτει

$$B_g = B_0 * (C_\phi / (1 + (P_0 + P_1) R_g)) \quad (5.8.6)$$

Επίσης, αν αγνοήσουμε τη σκέδαση και χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (5.8.2), η εξίσωση της μαγνητικής επαγωγής γίνεται

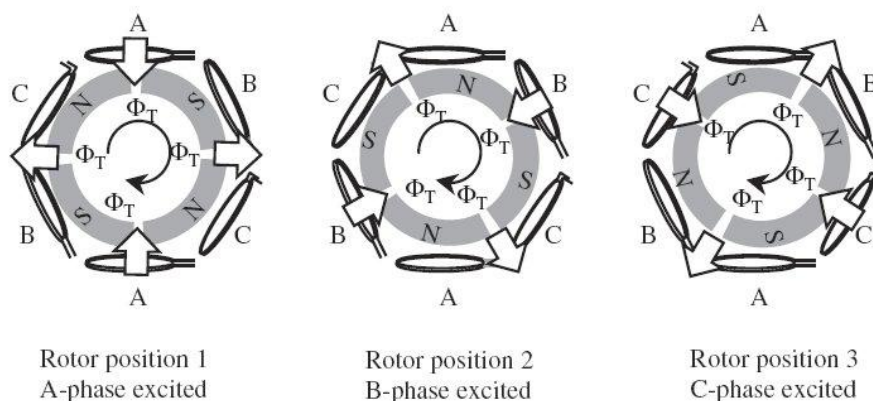
$$B_g = B_0 * (C_\phi / (1 + \mu_{rec} * C_\phi * (l'_g / l_m))) \quad (5.8.7)$$

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

5.10 Περιγραφή του Φαινομένου Μετάβασης (Commutation)

Σχεδόν σε όλα τα ηλεκτρικά κυκλώματα, λέγοντας μετάβαση ρεύματος, εννοούμε το φαινόμενο κατά το οποίο κάποιο ρεύμα εγκαταλείπει κάποιον κλάδο και μεταβαίνει σε κάποιον άλλον, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει ταυτόχρονη ροή ρεύματος και στους δύο κλάδους, στο χρονικό διάστημα που διαρκεί το φαινόμενο της μετάβασης. Θεωρώντας μια μηχανή τύπου brushless, την οποία διαχέονται ρεύματα τύπου κυματομορφών τετραγωνικής μορφής, καθώς και ότι η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο δρομέα στο διάκενο είναι ορθογώνια, και οι περιελίξεις συνδεδεμένες σε σειρά, εξετάζουμε την σειρά των μεταβάσεων. Στο εσωτερικό του, διακρίνουμε τρία δακτυλίδια, τα οποία παριστάνουν τα τρία καλώδια του κινητήρα. Στο εσωτερικό του σχήματος φαίνονται οι δύο μαγνητικοί πόλοι του δρομέα, ενώ στο εξωτερικό οι τρεις φάσεις του στάτη. Στο μεσαίο κομμάτι του σχήματος, φαίνεται πως κατανέμεται η μαγνητεγερτική δύναμη (M.E.Δ) που προκαλείται από τα ρεύματα του στάτη σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Διακρίνουμε δυο περιπτώσεις. Στην πρώτη, έχουμε τόξο μαγνήτη 180° και ρεύμα λόγω τετραγωνικού παλμού και εύρους 120° (Σχ. 5.8α). Στην δεύτερη περίπτωση έχουμε τόξο μαγνήτη 120° και ρεύμα τετραγωνικής κυματομορφής και εύρος 180° (Σχ. 5.8β).

Στην πρώτη περίπτωση, όταν κάθε στιγμή άγουν δύο φάσεις, η μαγνητεγερτική δύναμη, αποτελείται από δύο τμήματα των 120° που χωρίζονται σε δυο ίσα τμήματα των 60° μηδενικής μαγνητεγερτικής δύναμης. Τη συγκεκριμένη στιγμή, η πρώτη φάση άγει θετικό ρεύμα και η τρίτη φάση άγει αρνητικό ρεύμα.



Σχήμα. 5.8. Φάσεις ροπής κινητήρα

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Αρχικά, βλέπουμε ότι οι φάσεις B και C συνεισφέρουν θετική ροπή. Μόνο τα $2/3$ του μαγνήτη και τα $2/3$ του αγωγού του στάτη συμμετέχουν, προσφέροντας επικάλυψη 120° . Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται με τη φορά του ρολογιού, η επικάλυψη παραμένει ίδια, οπότε και η ροπή μένει σταθερή. Τότε ο μαγνήτης εγκαταλείπει την φάση B και η ροπή που παρέχει μειώνεται γραμμικά. Το μπροστινό κομμάτι του μαγνήτη, καλύπτει όμως την ίδια στιγμή την φάση A με ροή, έτσι ώστε αν το ρεύμα μεταβεί από τη φάση C στην A ακριβώς στις 60° η ροπή θα μείνει ανεπηρέαστη και σταθερή για ακόμα 60° . Ο δρομέας τότε θα έχει κινηθεί 120° . Στη συνέχεια το θετικό ρεύμα μεταβαίνει από την φάση B στη C συνεχίζοντας την πορεία του, με αποτέλεσμα η ροπή να παραμένει σταθερή σε όλη την διάρκεια. Ουσιαστικά η ροπή δεν παραμένει ποτέ σταθερή, διότι κάθε 60° που υπάρχει και η μετάβαση, υπάρχει μια στιγμιαία βύθιση στην τιμή. Αυτή η μεταβολή της τιμής εξαρτάται από την αυτεπαγωγή κάθε φάσης και από την τάση. Έτσι συμπεραίνουμε, ότι καθ' όλη την διάρκεια της μεταβολής των φάσεων του κινητήρα, η ροπή που παράγεται οφείλεται μονάχα στα $2/3$ των τυλιγμάτων του στάτη, στις οποίες βρίσκονται και οι ενεργές φάσεις, ενώ κατά την διάρκεια της μετάβασης της ροπής παράγουν και οι δύο φάσεις που εμπλέκονται σε αυτήν. Αυτό προσδίδει ένα σοβαρό μειονέκτημα, το ότι κάθε στιγμή εκμεταλλευόμαστε μόνο τα $2/3$ του μαγνήτη και του στάτη.

6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

6.1 Εισαγωγή

Μετά την κατανόηση των βασικών αρχών της λειτουργίας των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες, καλό θα ήταν να αναφερθούμε και στον τρόπο οδήγησης του από τον τριφασικό αντιστροφέα. Ουσιαστικά αυτό που επιδιώκουμε είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση.

6.2 Λειτουργία Τριφασικών Αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς, θεωρούνται ηλεκτρικές διατάξεις οι οποίοι μετατρέπουν την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση.

Χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο των ταχυτήτων των ac κινητήρων, όπως είναι οι σύγχρονοι κινητήρες.

Οι αντιστροφείς, ανάλογα με την πηγή τροφοδοσίας τους, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω 2 κατηγορίες:

- Αντιστροφείς με πηγή τάσεις
- Αντιστροφείς με πηγή ρεύματος

Υπάρχει βέβαια και μια ακόμα κατηγοριοποίηση που μπορεί να πραγματοποιηθεί, ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων τους. Έτσι δημιουργούνται και οι εξής ακόμα κατηγορίες:

- Μονοφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας ή ημιγέφυρας
- Πολυφασικοί όπου συναντάμε κυρίως τους τριφασικούς αντιστροφείς

6.2.1 Αντιστροφέας Πηγής Τάσης

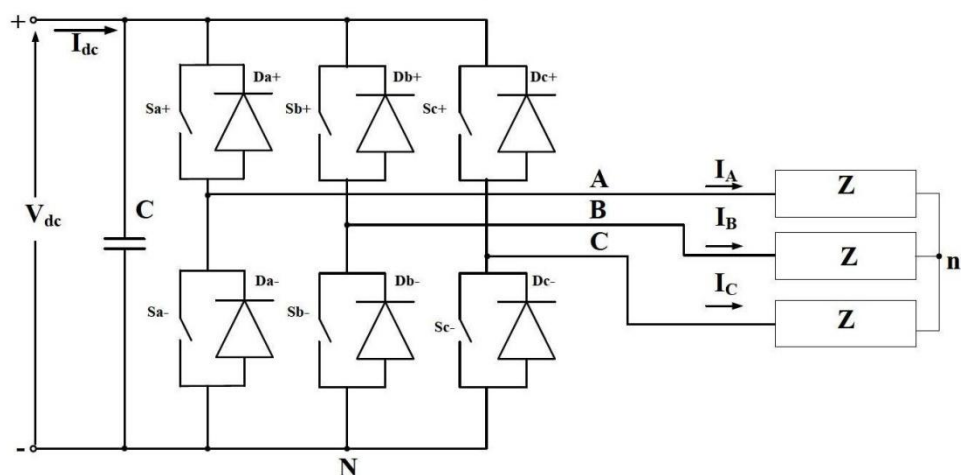
Για να μπορέσουμε να αποκτήσουμε μια πηγή με εναλλασσόμενη τάση, η οποία να έχει μεταβλητό πλάτος και συχνότητα, θα πρέπει αρχικά να μετατρέψουμε την συνεχής τάση σε εναλλασσόμενη τάση. Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια των αντιστροφέων.

Οι συνήθεις αντιστροφέις, που συναντώνται σε εφαρμογές, τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης.

Οι αντιστροφέις αυτοί, έχουν μεγάλη απήχηση σε εφαρμογές των οποίων τα συστήματα τροφοδοτούνται από μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, και στις οποίες θέλουμε να παράγουμε μια ημιτονοειδής εναλλασσόμενη τάση εξόδου. Ωστόσο, σημαντικό σε κάτι τέτοιο είναι να μπορούμε να ελέγχουμε το πλάτος και την συχνότητα της τροφοδοσίας του κινητήρα. Έτσι, και οι τριφασικοί αντιστροφέις χωρίζονται σε δυο κατηγορίες.

- Αντιστροφέις με τετραγωνική κυματομορφή, στην οποία το πλάτος της εξόδου ελέγχεται μέσω του πλάτους μιας συνεχούς τάσης εισόδου, ενώ ο αντιστροφέας ελέγχει μόνο τη συχνότητα της τάσης εξόδου.
- Αντιστροφέις με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) , στους οποίους η συνεχούς τάση εισόδου του αντιστροφέα, παραμένει σε ένα σταθερό πλάτος, αλλά μεταβάλλεται το πλάτος και η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, η οποία ελέγχεται από την διαμόρφωση του εύρους παλμών, που διαμορφώνουν αντίστοιχα την αγωγιμότητα των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

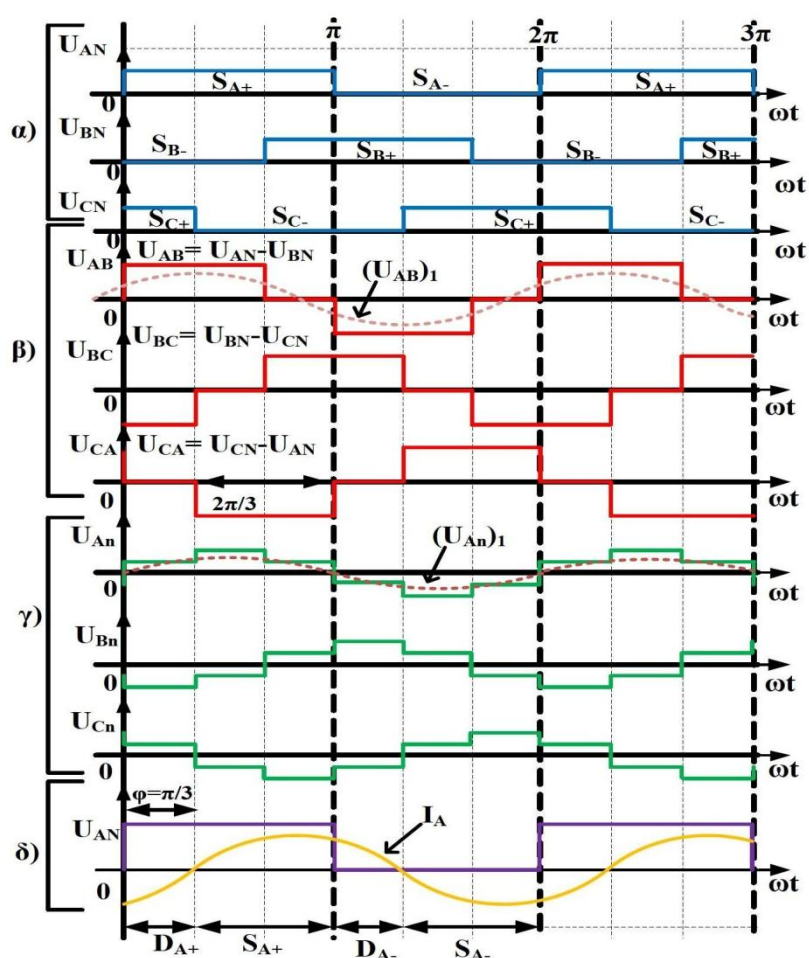


Σχήμα. 6.1 Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα

Στο παραπάνω σχήμα (σχ. 6.1) , φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο αναπαράγεται ο τριφασικός αντιστροφέας. Όπως βλέπουμε, αποτελείται από τρία ξεχωριστά σκέλη που αναπαράγουν τις 3 αντίστοιχες φάσεις λειτουργίας του κινητήρα. Η κάθε μια φάση αποτελείται από 2 διακοπτικά στοιχεία. Στο σχήμα, φαίνονται αντίστοιχα σαν S+, S- . Η έξοδος που βγάζουν εξαρτάται μονάχα από την κατάσταση που βρίσκεται το κάθε ένα διακοπτικό στοιχείο. Ανά δυο στοιχεία, συνδέονται με το ένα καλώδιο του κινητήρα. Έτσι, για να μπορέσουν τα διακοπτικά στοιχεία να λειτουργήσουν σωστά, θα πρέπει ο ένας διακόπτης να είναι σε κατάσταση On και ο άλλος διακόπτης να βρίσκεται σε κατάσταση Off, και αντίστροφα. Σε αντίθετη περίπτωση, αν και οι δύο διακόπτες είναι On τότε προκαλείται βραχυκύκλωμα στην πηγή συνεχούς τάσης. Οι διόδοι που είναι τοποθετημένοι στα διακοπτικά στοιχεία, εξασφαλίζουν, ότι η παραγόμενη ενέργεια θα παραμείνει αποθηκευμένη ακόμα και σε κατάσταση αποκοπής.

Όταν άγει ο διακόπτης S_{a+}, που συνδέεται με την θετική τάση τροφοδοσίας V_{dc}, στην έξοδο, συνδέεται ο θετικός πόλος, ενώ όταν άγει ο διακόπτης S_{a-}, στην έξοδο συνδέεται ο αρνητικός πόλος της πηγής. Έτσι παράγοντας κατάλληλους παλμούς, μπορούμε να ελέγχουμε και να λαμβάνουμε στην έξοδο του αντιστροφέα τις κυματομορφές της τάσεις που φαίνονται στο σχήμα 6.2.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



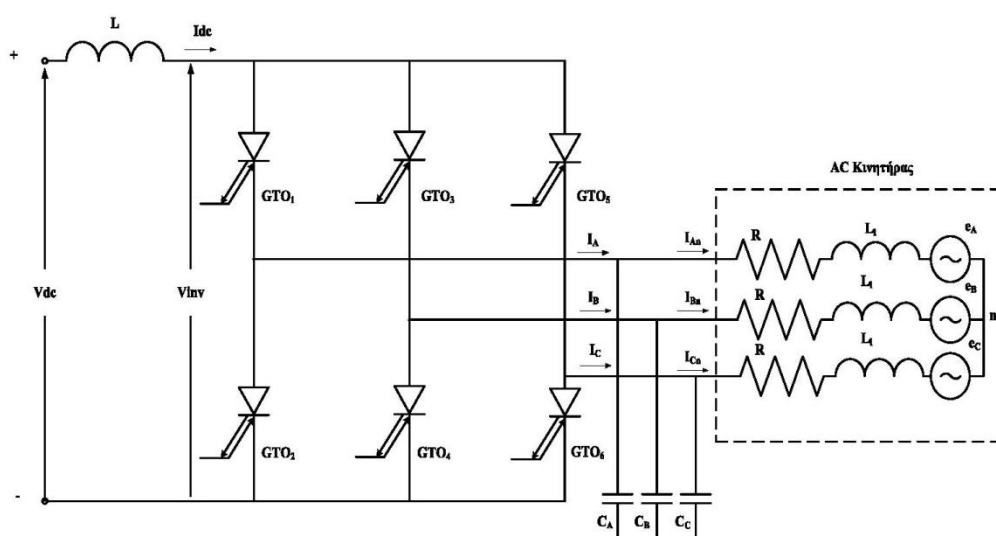
Σχήμα. 6.2 Κυματομορφές τριφασικού αντιστροφέα με πηγή τάσης με τετραγωνική κυματομορφή όπου και φαίνονται: α) οι παλμοί έναυσης και σβέσης των διακοπών, β) πολικές τάσεις εξόδου, γ) τάσεις ανάμεσα στον κόμβο(η) του φορτίου και έξοδος του αντιστροφέα, και δ) πολική τάση εξόδου φάσης A καθώς και ρεύμα της φάσης A.

Ένα μεγάλο μειονέκτημα του τριφασικού αντιστροφέα είναι η υπερθέρμανση των τυλιγμάτων, εξαιτίας της μορφής της τάσης εξόδου καθώς και οι κυματώσεις της ροπής του κινητήρα που οδηγεί ο αντιστροφέας.

6.2.2 Αντιστροφέας Πηγής Ρεύματος

Η δεύτερη κατηγορία των αντιστροφέων που χωρίζονται ανάλογα με την πηγή τροφοδοσίας τους, είναι οι αντιστροφέες με πηγή ρεύματος. Συγκριτικά με τους αντιστροφέες πηγής τάσης, η εναλλασσόμενη έξοδος των αντιστροφέων πηγής ρεύματος παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της πηγής ρεύματος. Η συχνότητα των ρευμάτων της εξόδου εξαρτάται από την ταχύτητα μετάβασης των διακοπτικών στοιχείων, ενώ το πλάτος καθορίζεται από το μέγεθος του συνεχούς ρεύματος εισόδου. Έτσι, η τεχνική PWM χρησιμοποιείται για βελτίωση της κυματομορφής των ρευμάτων εξόδου στις χαμηλές συχνότητες. Άρα, η τάση εξόδου στους αντιστροφέες πηγής ρεύματος, εξαρτάται από την απόκριση του φορτίου στο αντίστοιχο ρεύμα.

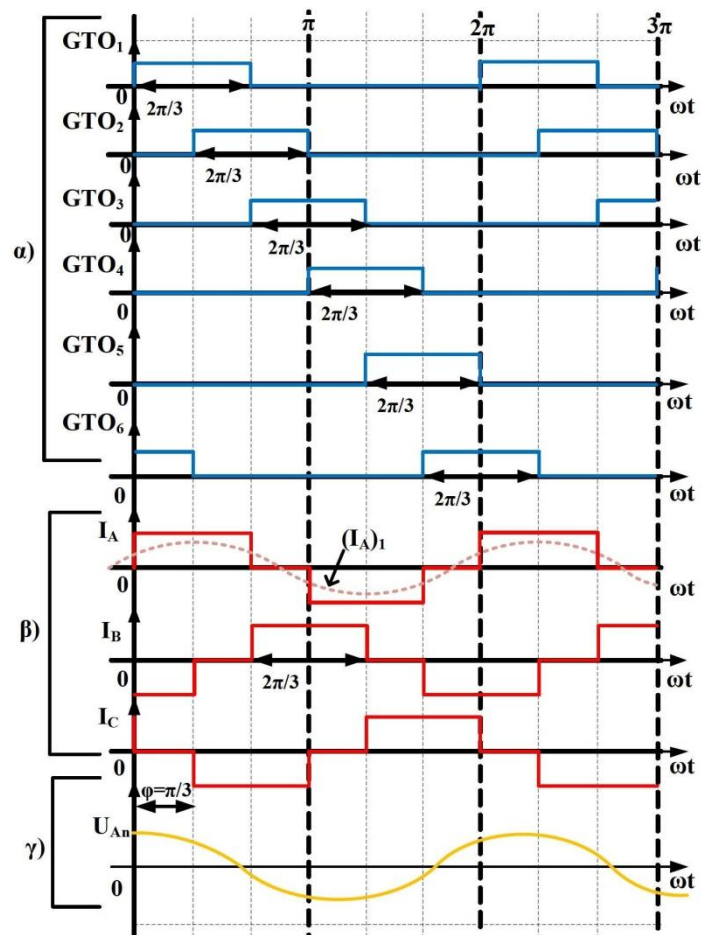
Η δημιουργία της πηγής συνεχούς ρεύματος, υλοποιείται μέσω μιας ρυθμιζόμενης πηγής συνεχούς τάσης V , σε σειρά με ένα πηνίο υψηλής αυτεπαγωγής L . Το πηνίο βοηθάει στην εξομάλυνση του ρεύματος της πηγής. Για την υλοποίηση μιας πηγής ρεύματος χρησιμοποιείται είτε ένας ανορθωτής με θυρίστορ, είτε ένας ανορθωτής με διόδους και ένα μετατροπέα συνεχούς ρεύματος. Η διάταξη του τριφασικού αντιστροφέα με χρήση θυρίστορ φαίνεται ως εξής στο σχ. 6.3



Σχήμα. 6.3 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής ρεύματος με θυρίστορ

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Οι κυματομορφές του κυκλώματος του τριφασικού αντιστροφέα ρεύματος φαίνονται στο σχήμα 6.4



Σχήμα. 6.4 Κυματομορφές τριφασικού αντιστροφέα με πηγή ρεύματος με θυρίστωρ. : α) παλμοί έναυσης και σβέσης των διακοπών, β) ρεύμα εξόδου των τριών φάσεων και γ) τάση ανάμεσα στον κόμβο (n) του φορτίου και εξόδου του αντιστροφέα

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

6.2.3 Σύγκριση Αντιστροφέα Πηγής Ρεύματος με Αντιστροφέα Πηγής Τάσης

Ύστερα από σύγκριση των κυματομορφών του αντιστροφέα πηγής ρεύματος με του αντιστροφέα πηγής τάσης, παρατηρούμε τα εξής:

- Η κυματομορφή της τάσης εισόδου, είναι η ίδια με την κυματομορφή του ρεύματος εισόδου του αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος.
- Η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου, είναι ίδια με τις κυματομορφές τάσης εξόδου του αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης, με την προϋπόθεση ότι έχουν ίδιους παλμούς έναυσης.
- Οι κυματομορφές των τάσεων εξόδου, είναι ίδιες με τις κυματομορφές των ρευμάτων εξόδου του αντιστροφέα.

6.2.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Τριφασικών Αντιστροφέων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποια από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τριφασικών αντιστροφέων.

Τα πλεονεκτήματα του τριφασικών αντιστροφέων είναι τα παρακάτω:

- ✓ Επειδή το ρεύμα εισόδου είναι πάντοτε σταθερό, αν γίνει κάποιο λάθος στους παλμούς έναυσης των διακοπτικών στοιχείων, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή μόνο των διακοπτικών στοιχείων.
- ✓ Επειδή ο αντιστροφέας παρουσιάζει αρνητική τάση εισόδου, το ρεύμα εισόδου είναι πάντοτε θετικό και δεν χρειάζεται διόδους για την ελεύθερη διέλευση.
- ✓ Ο αντιστροφέας δεν παρουσιάζει αιχμές ρεύματος, επειδή το ρεύμα εισόδου παραμένει σταθερό.
- ✓ Το βοηθητικό κύκλωμα μετάβασης αποτελείται μόνο από πυκνωτές

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Τα μειονεκτήματα των τριφασικών αντιστροφών είναι τα παρακάτω:

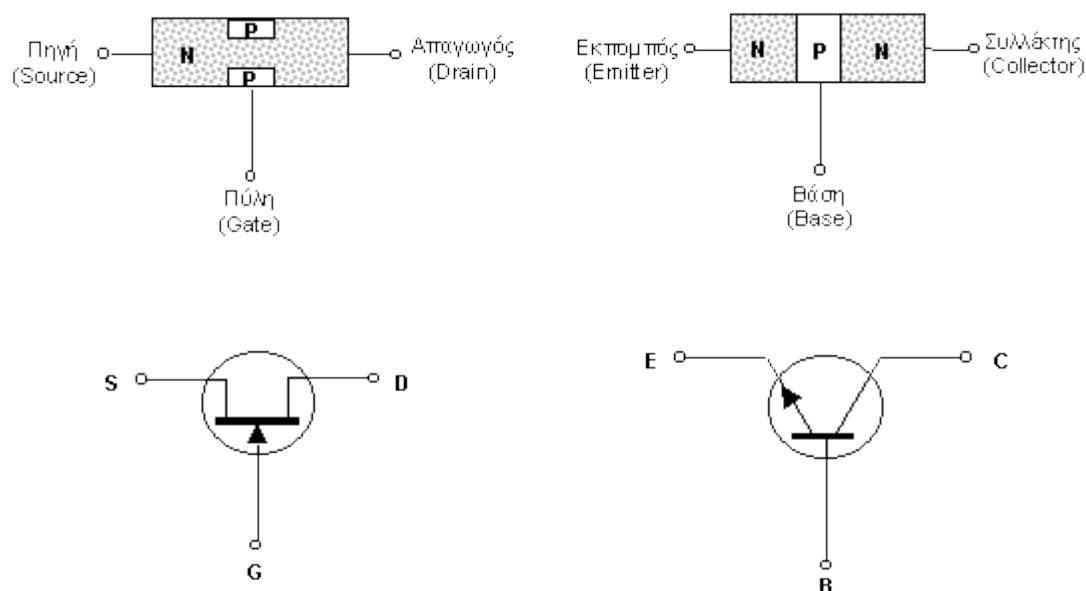
- ✖ Το βασικό μειονέκτημα είναι η δημιουργία πηγής συνεχούς ρεύματος
- ✖ Για τριφασικούς αντιστροφείς το φορτίο πρέπει να είναι συμμετρικό. Αν το φορτίο δεν είναι συμμετρικό, η τάση εισόδου του αντιστροφέα παρουσιάζει ανώτερες αρμονικές, πράγμα το οποίο οδηγεί στην αύξηση του μεγέθους της αυτεπαγωγής του φίλτρου εισόδου.
- ✖ Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος μπορούν να οδηγήσουν μόνο ένα κινητήρα. Η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας τους είναι περιορισμένη, εξαιτίας της απαίτησης για αργή μετάβαση των ρευμάτων, ώστε να μειωθεί το πλάτος των αιχμών τάσης και η τάση αντοχής των διακοπών.

6.3 Επιλογή των Διακοπτικών Στοιχείων του Αντιστροφέα

Ο τριφασικός αντιστροφέας αποτελείται από έξι διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία τα οποία ελέγχονται από την τάση. Η επιλογή των στοιχείων εκείνων καθορίζεται από τα εξής:

- Την ισχύ του μετατροπέα, δηλαδή το ρεύμα και την τάση που διαπερνά το ημιαγωγικό στοιχείο.
- Την τάση και την αντίσταση αγωγής του στοιχείου, που καθορίζουν την απαραίτητη ψύξη που χρειάζεται.
- Το κόστος του στοιχείου και την διαθεσιμότητα του.
- Τους χρόνους μετάβασης, που καθορίζουν την συχνότητα στην οποία λειτουργούν.
- Την ευκολία κατασκευής του κυκλώματος παλμοδότησης.

Για την εφαρμογή που θέλουμε να υλοποιήσουμε, επιλέξαμε τα ημιαγωγικά υλικά τύπου MOSFET. Πρόκειται για ένα ημιαγωγικό υλικό, το οποίο αποτελείται από τρεις ακροδέκτες. Οι ακροδέκτες αυτοί διακρίνονται στην απαγωγό (Drain), την πηγή (Source) και την πύλη (Gate). Ανάλογα με τον τρόπο που βρίσκονται τα 3 στοιχεία στους ακροδέκτες, κατατάσσονται σε τύπου rhr και τύπου nrh. Στο παρακάτω σχήμα Σχ.6.5 φαίνονται η εσωτερική δομή του και οι συμβολισμοί τους.



Σχήμα. 6.5 Δομή και συμβολισμοί Mosfet τρανζίστορ ισχύος τύπου rhr (αριστερά) και nrh (δεξιά)

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Στα Mosfet, η ροή του ρεύματος, οφείλεται στη ροή των φορέων πλειονότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι χρόνοι καθυστέρησης και σβέσης να είναι πάρα πολύ χαμηλοί, και να μην εξαρτώνται από την θερμοκρασία.

Τα Mosfet, έχουν εσωτερικά μια δίοδο, η οποία υπάρχει μεταξύ πηγής και υποδοχής, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα συγκράτησης ανάστροφων τάσεων. Η δίοδος αυτή θεωρείται αναγκαία και επωφελής για είδη διατάξεων όπως οι αντιστροφείς, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η απαραίτητη αντιπαράλληλη δίοδος.

Εξαιτίας της υψηλής συχνότητας λειτουργίας τους, είναι στοιχεία κατάλληλα για εφαρμογές που σχετίζονται με τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM). Εφαρμογές οι οποίες σχετίζονται με αυτά είναι:

- Έλεγχος κινητήρων τύπου brushless
- Ηλεκτρικές διατάξεις αυτοκινήτων
- Διακοπτικά τροφοδοτικά
- Διάφορες φορητές συσκευές
- Συσκευές επαγωγής θέρμανσης

Τα κυριότερα μεγέθη των MOSFET ισχύος είναι:

- Η μέγιστη τιμή της τάσης V_{dss} που αντέχει το στοιχείο
- Η μέγιστη τιμή του ρεύματος I_d
- Η αντίσταση αγωγής $R_{ds(on)}$
- Οι χρόνοι απόσβεσης και έναυσης του στοιχείου

7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

7.1 Συνοπτική Περιγραφή

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, θα προσπαθήσουμε να οδηγήσουμε έναν brushless dc κινητήρα, με τη βοήθεια ενός μικροελεγκτή. Συγκεκριμένα, ο κινητήρας, συνδέεται σε 6 Mosfet, τα οποία, χρησιμοποιούνται για την σύνδεση ανά δύο σε κάθε ένα από τα καλώδια του κινητήρα. Τα Mosfet, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους, αποτελούν την κάθε μια φάση του κινητήρα. Έτσι, συνολικά προκύπτουν 3 φάσεις. Αντίστοιχα τα Mosfet, συνδέονται με έναν ενισχυτή παλμών, μέσω των οδηγών TC4469. Τέλος, οι παλμοί παράγονται από έναν μικροελεγκτή ο οποίος παράγει τους κατάλληλους παλμούς για την συνεχής κίνηση του κινητήρα.

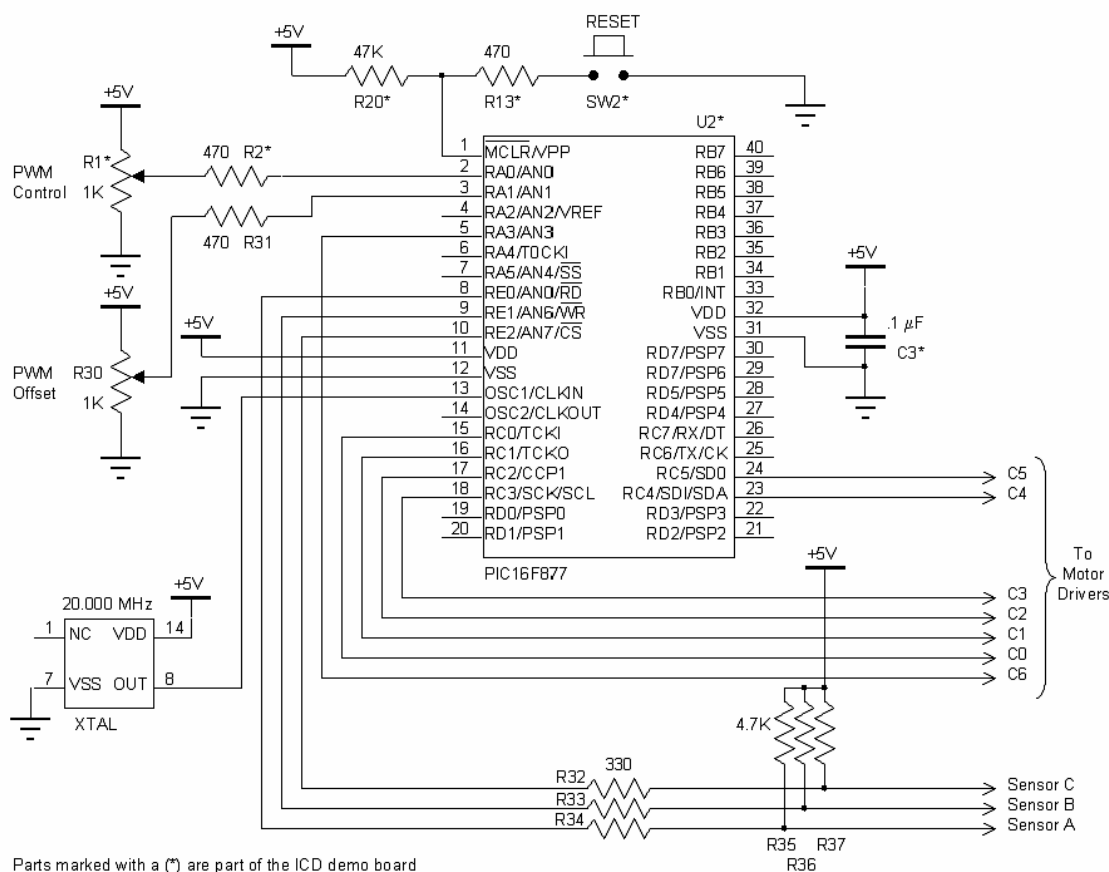
Θα αρχίσουμε την παρουσίαση μας, με τις βασικές πληροφορίες που απαρτίζουν το κύκλωμα παλμοδότησης.

Όπως είναι φυσικό ο βασικός πυρήνας του κυκλώματος είναι ο μικροελεγκτής PIC16F877. Σε αυτών, τοποθετήσαμε τα αντίστοιχα υλικά και στοιχεία όπως:

- Στις δύο αναλογικές εισόδους, τοποθετήσαμε δύο ποτενσιόμετρα (μεταβλητές αντιστάσεις) τιμής $1K\Omega$ και σε σειρά συνδέσαμε αντίσταση 470Ω . Τα δύο ποτενσιόμετρα, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της PWM και την περιστροφή του κινητήρα, και η αντίσταση για την προστασία των ακροδεκτών του μικροελεγκτή.
- Ένας κρυσταλλικός ταλαντωτής, της τάξης των 20MHz ο οποίος παρέχει στον μικροελεγκτή των κατάλληλο χρονισμό που χρειάζεται για την λειτουργία του.
- Μία αντίσταση $47K\Omega$ η οποία βρίσκεται συνδεδεμένη με την τάση τροφοδοσίας των 5V, και μια των 470Ω η οποία συνδέεται με ένα μπουτόν και τέλος την γείωση. Οι δύο αντιστάσεις, συνδέονται μεταξύ τους, με τον ακροδέκτη 1 του μικροελεγκτή MCLR/VPP. Αυτός, ο διακόπτης χρησιμεύει στο να κάνουμε επαναφορά στον μικροελεγκτή.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

- Τέλος στην τροφοδοσία του μικροελεγκτή χρησιμοποιείται έναν πυκνωτής $0.1\mu\text{F}$ στα 50V κεραμικός, που βοηθάει στο φιλτράρισμα της τάσης τροφοδοσίας.



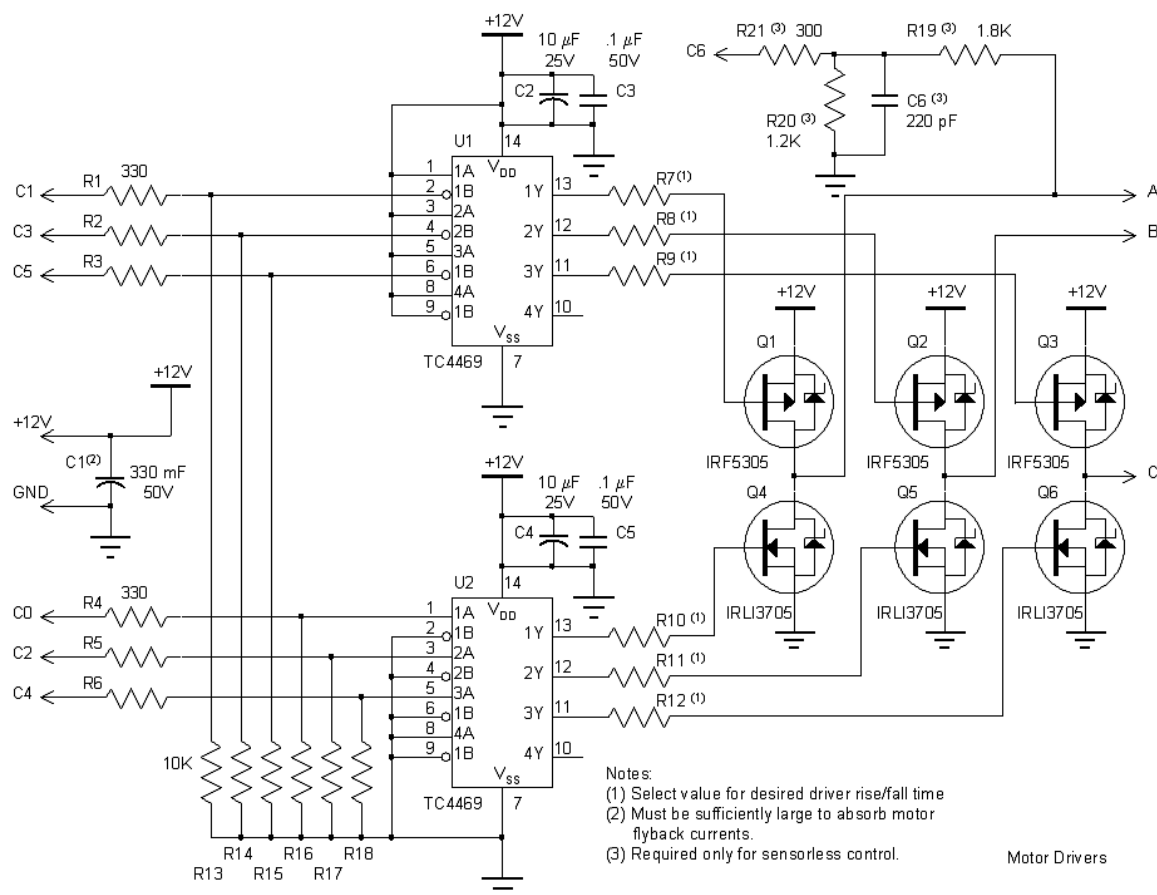
Σχήμα. 7.1 Κύκλωμα παλμοδότησης τριφασικού αντιστροφέα: α) μικροελεγκτής PIC16f877, β) μεταβλητή αντίσταση, γ) κρυσταλλικός ταλαντωτής, δ) κύκλωμα επανεκκίνησης, ε) πυκνωτή φίλτραρίσματος

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τα στοιχεία που χρησιμοποιούμε για την ενίσχυση των παλμών. Σε αυτήν την κατηγορία, συγκαταλέγονται:

- Οι ενισχυτές παλμών, όπου περιλαμβάνουν τους οδηγούς TC4469, και τα Mosfet που περιλαμβάνουν τις φάσεις του κινητήρα.
- Οι οδηγί TC4469, πρόκειται ουσιαστικά για μια πύλη, όπου αποτελείται από 2 εισόδους και μετά από τον κατάλληλο έλεγχο των παλμών εισόδου, παράγονται οι αντίστοιχοι παλμοί εξόδου.
- Τα Mosfet, συνδέονται με την τροφοδοσία που θέλουμε να δώσουμε στον κινητήρα, στην δική μας περίπτωση, ο κινητήρας τροφοδοτείται με 12V, και στη γείωση.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

- Τέλος, στην έξοδο των Mosfet, τοποθετούνται τα τρία τυλίγματα του κινητήρα.



Σχήμα. 7.2 Κύκλωμα παλμοδότησης τριών φάσεων του τριφασικού αντιστροφέα

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

7.2 Οδήγηση της Πύλης των Ημιαγωγικών Στοιχείων Ισχύος

Η οδήγηση της πύλης των MOSFET που είναι τοποθετημένα σε διάταξη τριφασικού αντιστροφέα γίνεται με τη χρήση των οδηγών TC4469 της microchip.

Οι οδηγοί, θα πρέπει να παρέχουν αρκετή ισχύ για να μπορεί να εξασφαλιστεί, ότι το στοιχείο θα μπορέσει να άγει. Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των MOSFET οδηγών TC4469 υπολογίζουμε ότι το ρεύμα το οποίο θα πρέπει να περνάει στιγμιαία είναι :

$$I_{\text{peakIRF5305}} = \frac{Q_{GT}}{t} = \frac{40nC}{129ns} = 0,31A$$

Όπου

- $Q_{GT}=40 \text{ nC}$ στα 10V είναι το συνολικό φορτίο της πύλης του MOSFET
- $t= t_r + t_f = 66+63=129ns$ είναι ο συνολικός χρόνος ανύψωσης και καθόδου

$$I_{\text{peakIRLI3705}} = \frac{Q_{GT}}{t} = \frac{120nC}{218ns} = 0,55A$$

Όπου

- $Q_{GT}=120 \text{ nC}$ στα 10V είναι το συνολικό φορτίο της πύλης του MOSFET
- $t= t_r + t_f = 140+78=218ns$ είναι ο συνολικός χρόνος ανύψωσης και καθόδου

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

IRLI3705

International
IR Rectifier

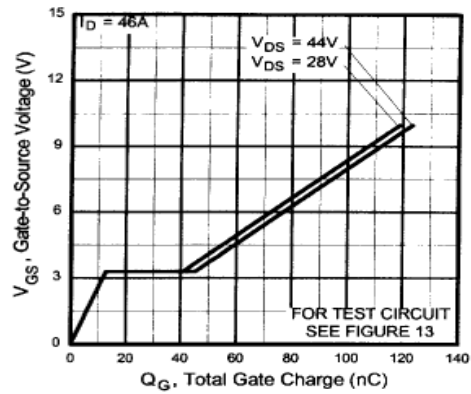


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

IRF5305

International
IR Rectifier

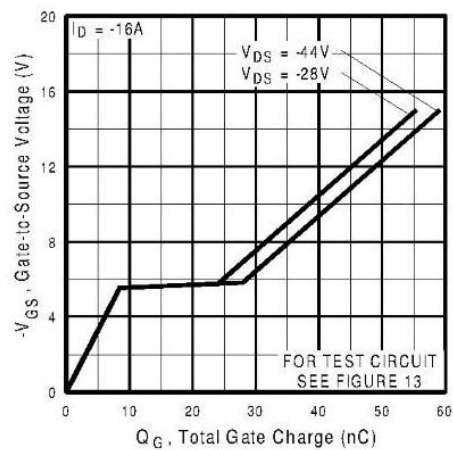
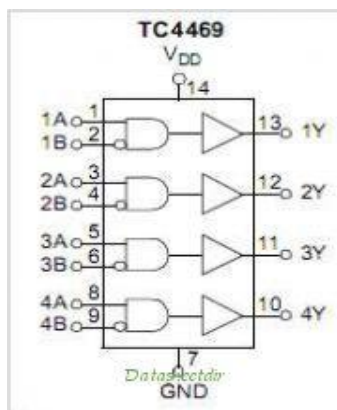


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

Σχήμα.7.3. Καμπύλη πύλης-πηγής(V_{gs}) και φορτίου πύλης(Q_s) για το Mosfet α)IRLI3705 β)IRF5305

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Τα TC4469 δέχονται τροφοδοσία των 10V, που προέρχεται από το τροφοδοτικό στους ακροδέκτες Vdd και Vss. Έτσι υπάρχει και η δυνατότητα να ενισχύονται τα σήματα που απαιτούνται για την οδήγηση των MOSFET.



Σχήμα. 7.4 Εσωτερική δομή και χαρακτηριστικά Driver TC4469

Χαρακτηριστικά

- High Peak Output Current: 1,2A
- Wide Operation Range:
4,5V to 18V
- Symmetrical Rise/Fall Times: 25nsec
- Short, Equal Delay Time: 75nsec
- Latch-proof. Will Withstand 500mA Inductive Kickback
- 3 Input Logic Choices:

AND/NAND/AND+ Inv
- ESD Protection on All Pins: 2kV

Τα σήματα ελέγχου τάσης 5V που προέρχονται από το κύκλωμα παλμοδότησης, εισέρχονται στους ακροδέκτες 1B, 2B, 3B και 1A, 2A, 3A και εξέρχονται από τους ακροδέκτες 1Y, 2Y και 3Y αντίστοιχα για τους παλμούς HI και LO. Υπάρχει επίσης στο εσωτερικό της μια πύλη τύπου NOT, σε κάθε μια έξοδο από τους ακροδέκτες, η οποία χρησιμοποιείται για την αναστροφή του παλμού από τα MOSFET τύπου p. Αυτό, το πραγματοποιούμε, διότι στην αντίθετη περίπτωση, θα γινόταν βραχυκύκλωση της πηγής τροφοδοσίας των MOSFET.

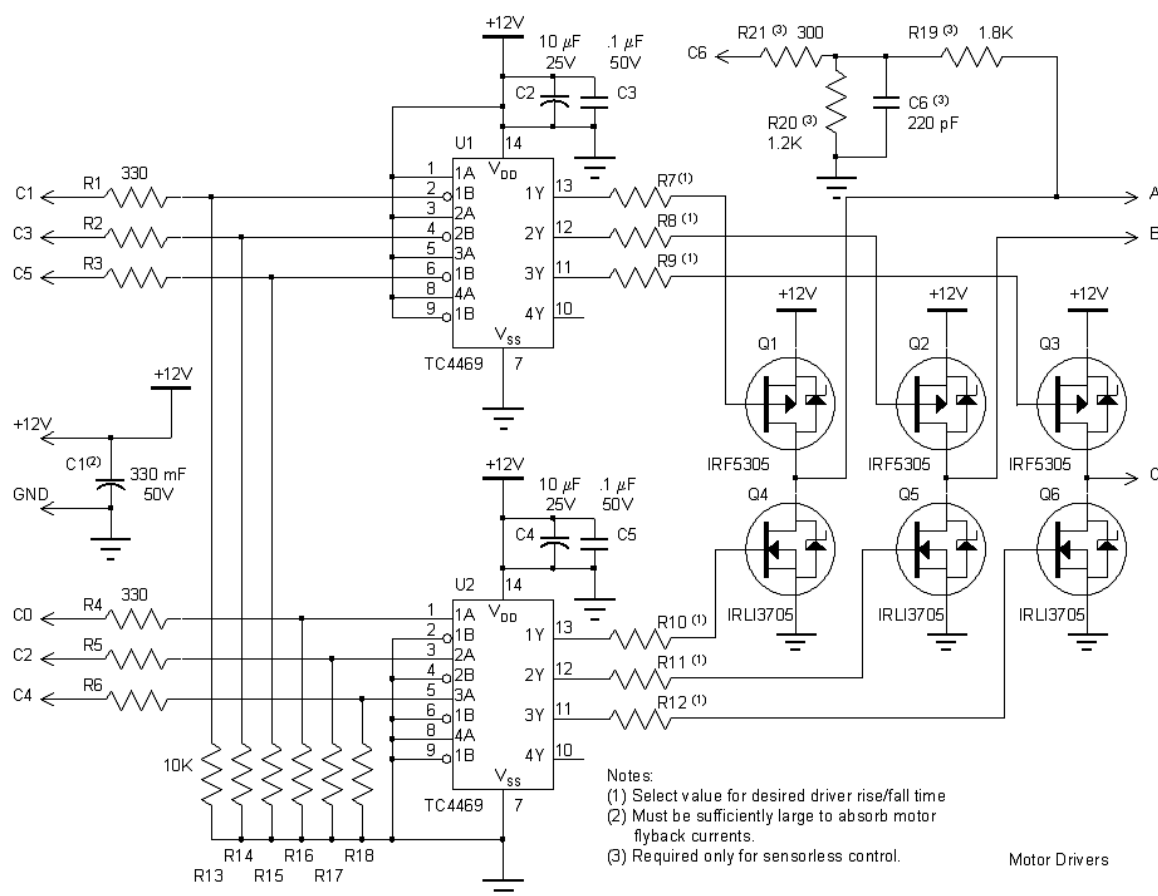
Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Στην είσοδο των ακροδεκτών, έχουμε τοποθετήσει μια αντίσταση $10K\Omega$ και 330Ω για να εξασφαλίζεται ο ταυτόχρονος συγχρονισμός και των δύο MOSFET. Στις εξόδους τους έχουμε τοποθετήσει αντιστάσεις των 10Ω .

Επίσης, έχουμε τοποθετήσει πυκνωτές στην τροφοδοσία των οδηγών TC4469 που έχουν τιμή $10\mu F$ στα $25V$ (ηλεκτρολυτικούς) και $0,1\mu F$ στα $50V$ (κεραμικούς) σε κάθε έναν από τους οδηγούς.

7.3 Κατασκευή Τριφασικού Αντιστροφέα

Ο τριφασικός αντιστροφέας, αποτελείται από έξι ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία όπως φαίνεται και στο σχ.7.5



Σχήμα. 7.5 Τριφασικός αντιστροφέας - Κύκλωμα παλμοδότησης των MOSFET από τους οδηγούς

Για την κατασκευή του τριφασικού αντιστροφέα, χρειαζόμαστε κάποια συγκεκριμένα υλικά, συγκεκριμένα, 6 Mosfet και 2 drivers.

Για την σωστή επιλογή των Mosfet, λαμβάνουμε υπόψη μας, τα εξής:

- Η ονομαστική επιλογή της τάσης του στοιχείου, θα πρέπει να είναι δυο φορές τουλάχιστον μεγαλύτερη από την τάση που εφαρμόζεται για την λειτουργία του κυκλώματος.
- Η τιμή του ρεύματος, θα πρέπει να είναι 1,5 φορές μεγαλύτερη από το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Στην περίπτωση μας, θέλουμε ο κινητήρας μας, να οδηγείται υπό την επήρεια της τάσης των 12V, άρα, τα στοιχεία θα πρέπει να αντέχουν τάση μέχρι:

$$V_{\text{mosfet}} = 2 * 12 = 24V$$

Επίσης το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα είναι 2A ,άρα τα στοιχεία μας θα πρέπει να αντέχουν σε ρεύμα:

$$I_{\text{mosfet}} = 1,5 * 2 = 3A$$

Έτσι, οδηγούμαστε στο να επιλέξουμε τα στοιχεία IRF5305 και IRLI3705 τα οποία έχουν ονομαστικά χαρακτηριστικά $V_{\text{DSS}}=55V$ $I_{\text{D}}=22A$ 100°C $V_{\text{DSS}}=55V$ $I_{\text{D}}=37A$ 100°C . Τα στοιχεία αυτά παρέχονται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων MOSFET.

7.4 Πυκνωτές στην Είσοδο του Αντιστροφέα

Για την καλύτερη λειτουργία του αντιστροφέα, έχουμε τοποθετήσει στην είσοδο του, έναν πυκνωτή, ο οποίος λειτουργεί ως ένα φίλτρο εισόδου. Χρησιμοποιήθηκαν, ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές. Και συγκεκριμένα οι IRF5305 και IRLI3705.

Οι πυκνωτές αυτοί τροφοδοτούνται με τάση 12V, όσοι θέλουμε και για να τροφοδοτήσουμε τον κινητήρα μας.

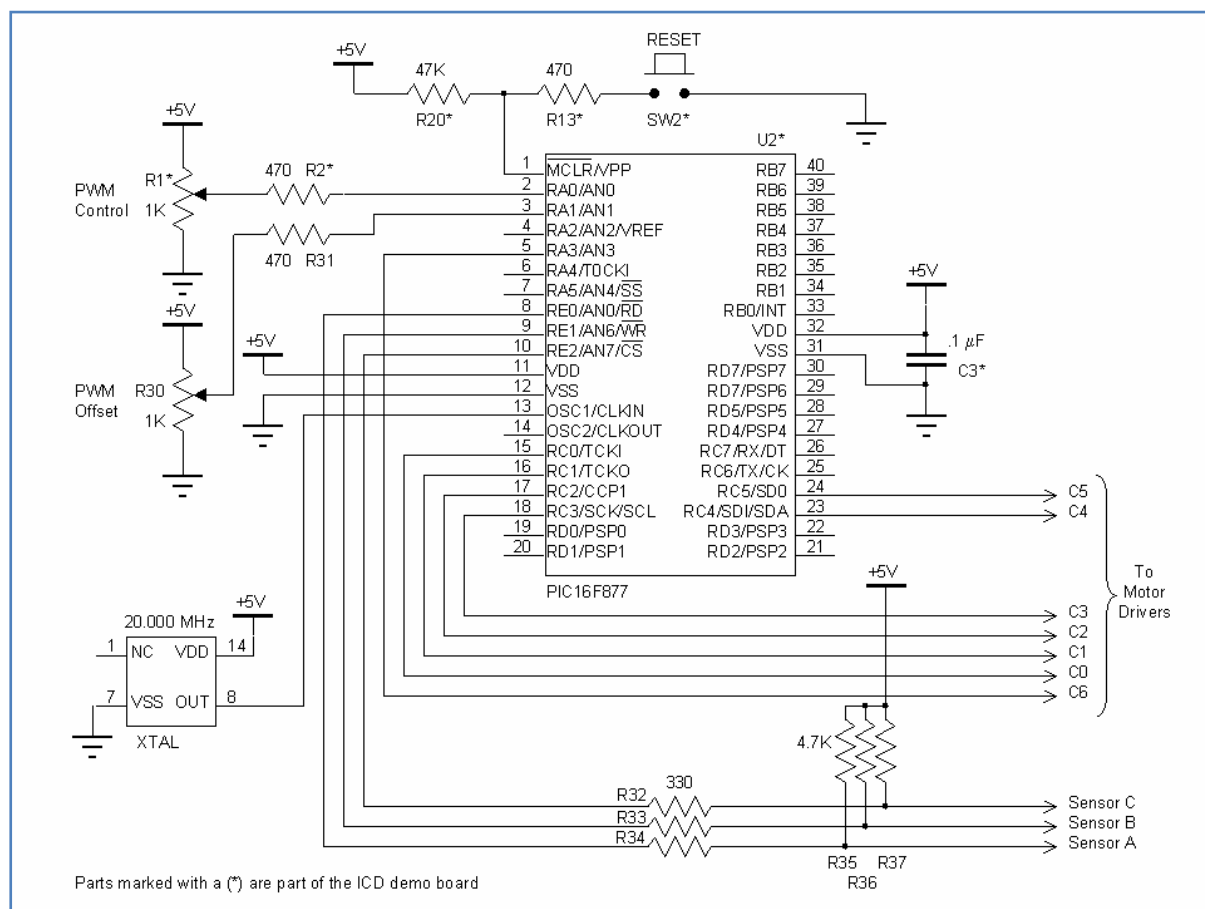
Ωστόσο, παρατηρήσαμε, ότι λόγο της μεγάλης αύξησης της θερμοκρασίας του όλου συστήματος, έτσι και οι πυκνωτές θερμαίνονταν, με αποτέλεσμα να γίνεται πιο επίπονη η λειτουργία τους. Για αυτό το λόγο, τοποθετήθηκαν κατάλληλες ψήκτρες, και ειδική πάστα για την μεταφορά της θερμότητας από τους πυκνωτές στις ψήκτρες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμότητας που παρέμενε πάνω στους πυκνωτές και κατά επέκταση την καλύτερη λειτουργία τους.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

7.5 Παραστατική Απεικόνιση της Εφαρμογής

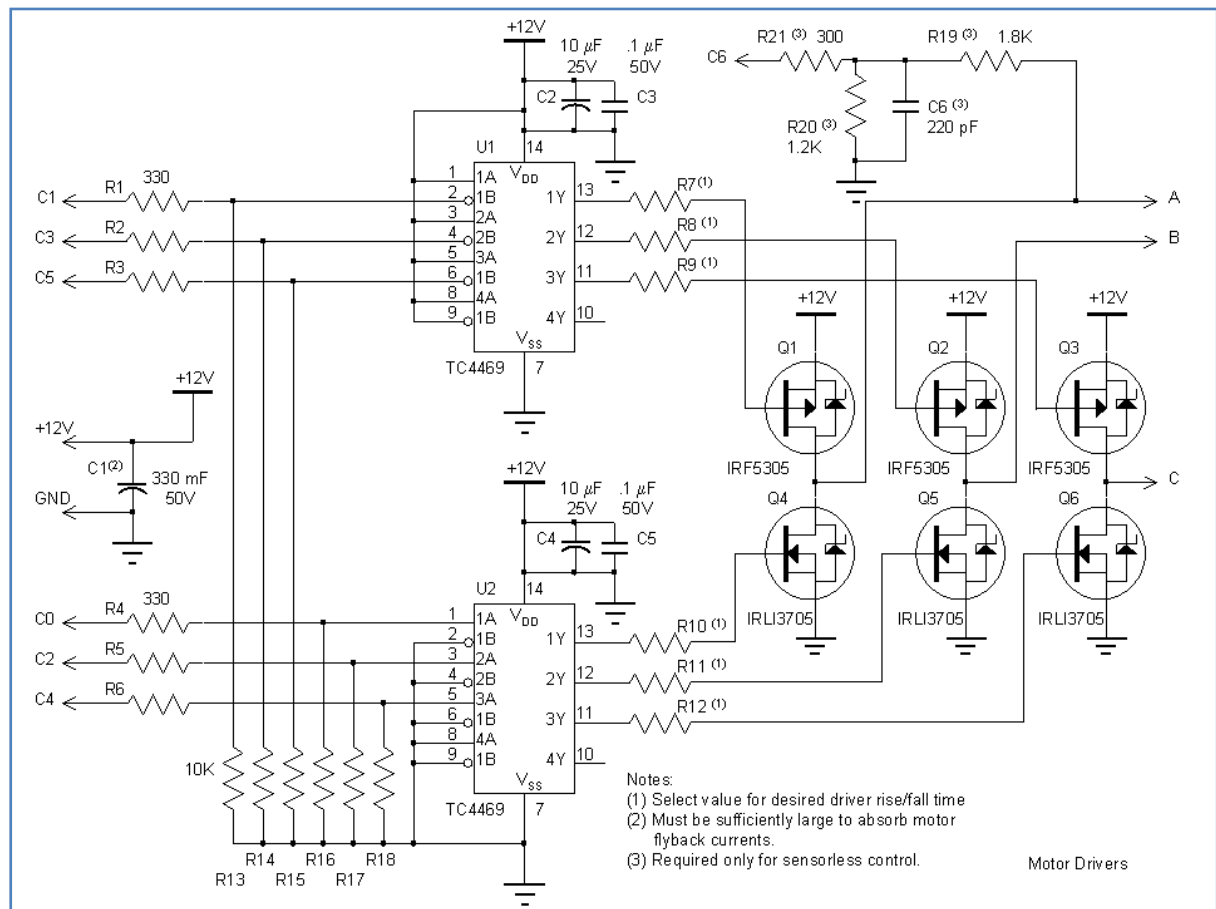
Το σύνολο της κατασκευής που υλοποιήσαμε σε τεχνική μορφή παρουσιάζεται από την εταιρεία Microchip και συγκεκριμένα για τον μικροελεγκτή PIC16F877 στο αντίστοιχο φύλλο AN857 για τους κινητήρες brushless και χωρίς την χρήση του αισθητηρίου.

Έτσι η εργασία φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα. 7.6 Κύκλωμα σύνδεσης του μικροελεγκτή για την παραγωγή των παλμών

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Σχήμα. 7.7 Κύκλωμα για την παλμοδότηση των MOSFET και την ενίσχυση των παλμών

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

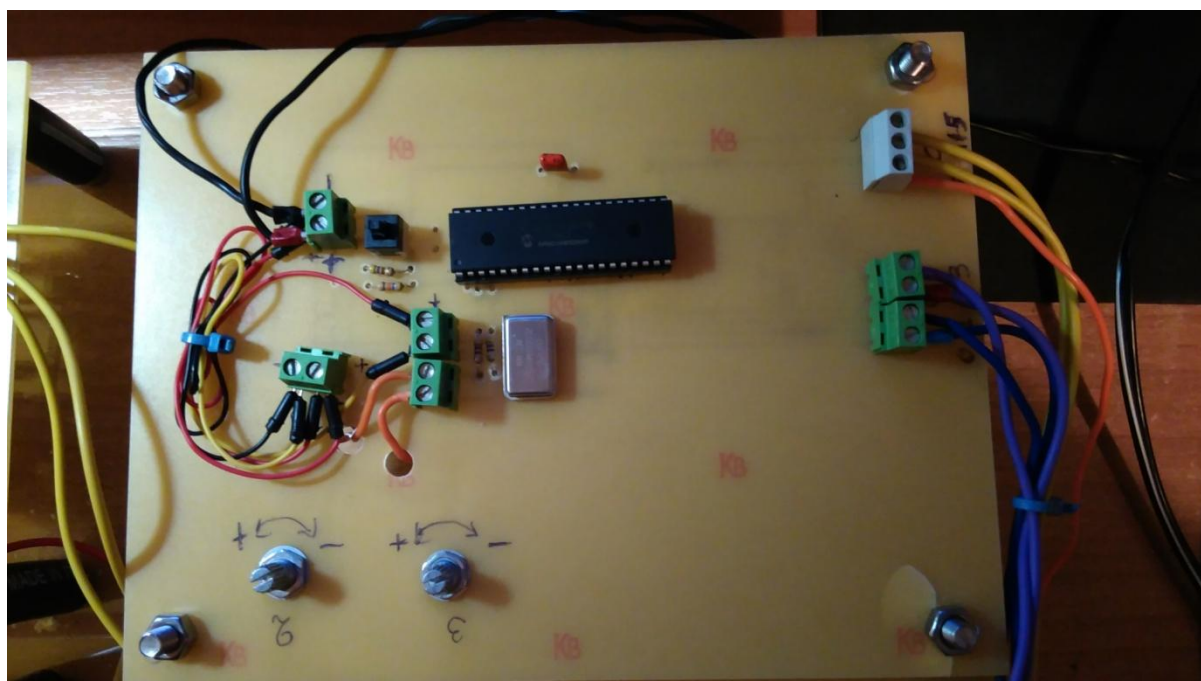
Στην δική μας εφαρμογή ωστόσο, δεν έχουμε κάνει χρήση του αισθητηρίου Hall για την εύρεση της αρχικής θέσης του κινητήρα και κατά επέκταση της κατάλληλης παροχής παλμών από τον μικροελεγκτή για την κίνηση του.

Στην δική μας εφαρμογή, και συγκεκριμένα στην εικόνα 7.1 φαίνεται η κατασκευή για την παραγωγή των παλμών από το μικροελεγκτή.

Στην συνέχεια εικόνα 7.2 παρουσιάζονται τα ολοκληρωμένα τα οποία βοηθάνε στην οδήγηση των διακοπτικών στοιχείων MOSFET.

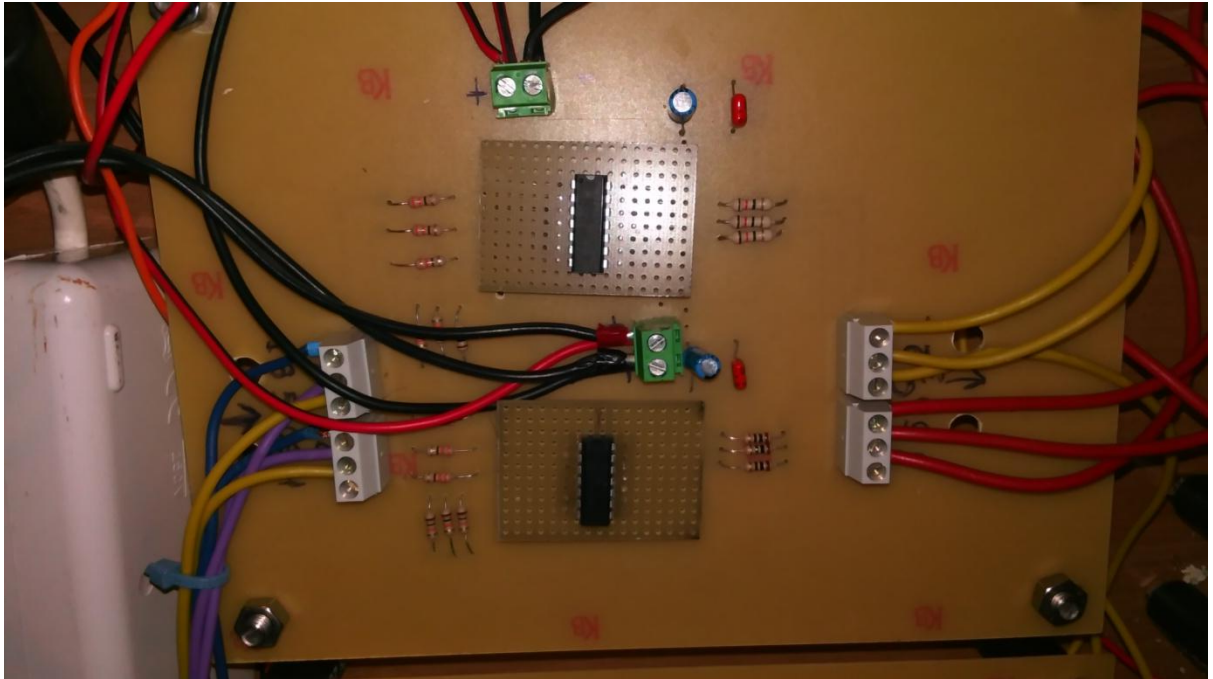
Στην εικόνα 7.3 φαίνεται το κύκλωμα των διακοπτικών στοιχείων Mosfet, όπως αυτά απεικονίζονται και ενώνονται μεταξύ τους με σκοπό να αποτελέσουν ανά δύο τα τυλίγματα του κινητήρα.

Τέλος, στις εικόνες 7.4 και 7.5 αντίστοιχα, φαίνονται η High και η Low πλευρά των διακοπτικών στοιχείων του κινητήρα.



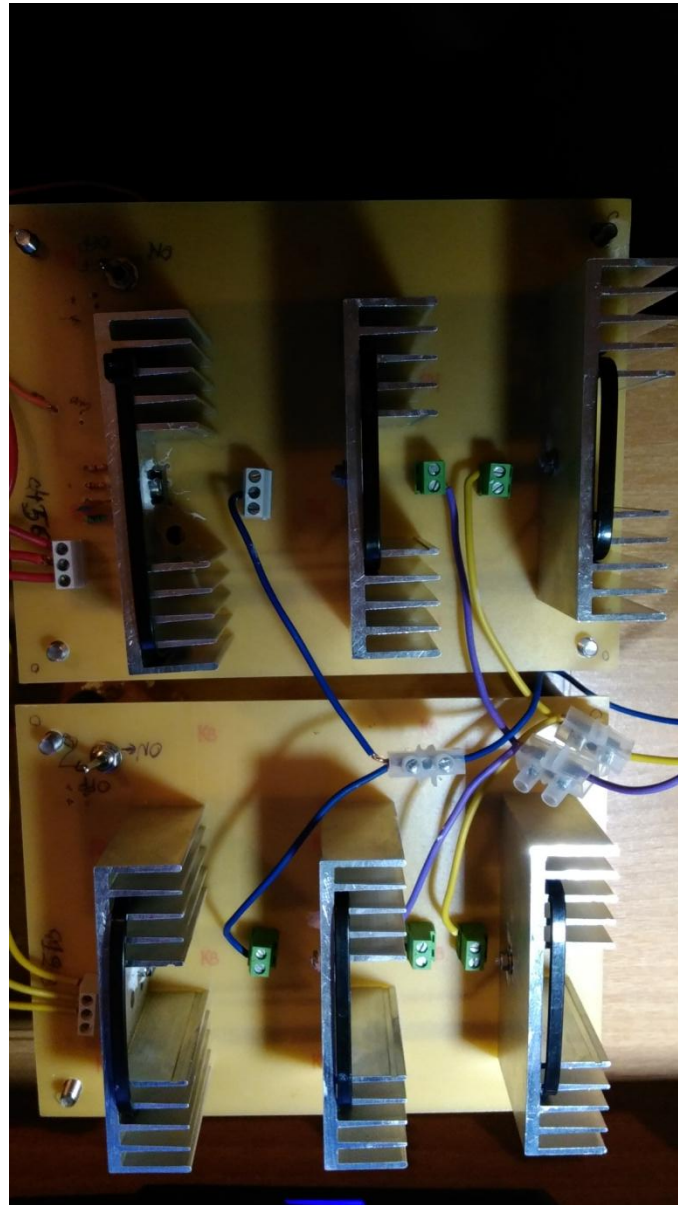
Εικόνα. 7.1 Κύκλωμα σύνδεσης του μικροελεγκτή για την παραγωγή των παλμών

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



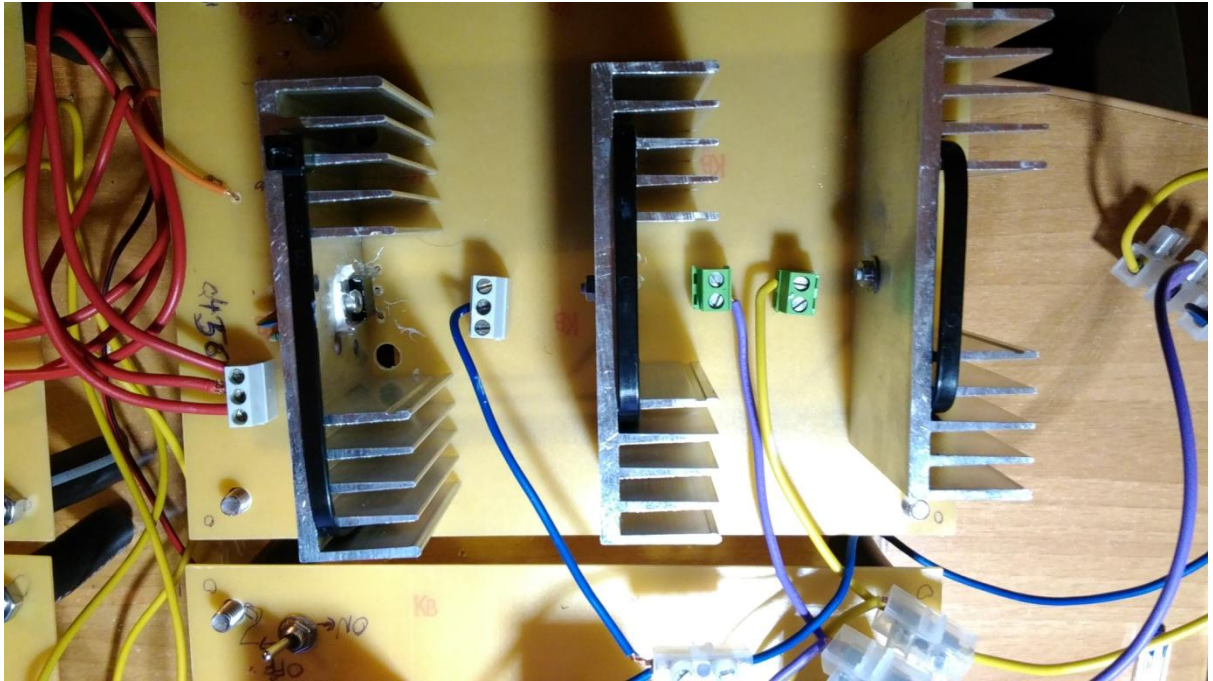
Εικόνα. 7.2 Κύκλωμα για την οδήγηση των διακοπτικών στοιχείων (MOSFET)

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



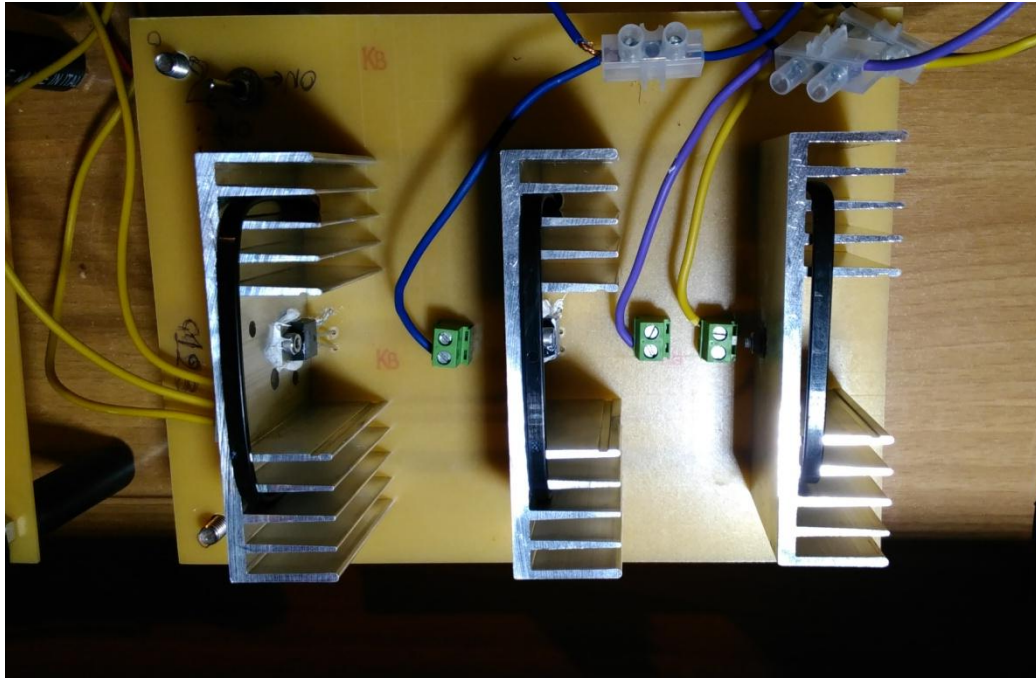
Εικόνα. 7.3 Κύκλωμα των διακοπτικών στοιχείων (MOSFET)

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Εικόνα. 7.4 Low πλευρά

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια



Εικόνα. 7.5 High πλευρά

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

8.1 Συμπεράσματα και Προοπτικές

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, ολοκληρώθηκε με την δημιουργία διαφόρων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και διαφόρων προγραμμάτων. Ο αντικειμενικός της στόχος της ήταν ο έλεγχος ενός brushless(χωρίς ψήκτρες) dc κινητήρα, μέσω ενός μικροελεγκτή. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την σωστή δημιουργία και σύνδεση των αντίστοιχων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και τη συνεργασία του αντίστοιχου λογισμικού που υλοποιήθηκε.

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

Στο παράρτημα αυτό, παρατίθεται ο κώδικας με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη εργασία.

```
#include<stdio.h>
```

```
#include <stdlib.h>
```

```
char i = 0, j=0;
```

```
bit oldstate;          //prohgoumenh katastash//
```

```
int value;
```

```
unsigned int pulse = 0;
```

```
signed char comm_state;
```

```
unsigned int comm_time;
```

```
unsigned int TMR2_IE;
```

```
bit comm_done,comm_dir;
```

```
unsigned int pwm_demand;
```

```
unsigned char bemf_filter;
```

```
void InitTimer0(){
```

```
    OPTION_REG    = 0x88;
```

```
    TMR0          = 56;
```

```
    INTCON        = 0xA0;
```

```
}
```

```
char read_adc(void)
```

```
{
```

```
    char value = 0;
```

```
    Χρήστος Α. Τσομπάνης
```

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

```
int GODONE = 1;

bit adc_value;

if(GODONE == 0)

{

value = 1;

adc_value = ADRESH * 256 + ADRESL;

}


return value;

}


void main() {

//dhlosh porton

PORTA = 255;

TRISA = 255;           // configure PORTA pins as input

PORTC = 0;             // set PORTC to 0

TRISC = 0;             // designate PORTC pins as output

TRISA.RA0=1; // configure RA0 as analog input

TRISA.RA1=1; // configure RA1 as analog input

TRISA=TRISA.RA0; // PORTA used for pwm input

PORTA=PORTA.RA0; // and high side commutation transistors

TRISA=TRISA.RA1; // PORTA used for PWM offset

PORTA=PORTA.RA1; // and high side commutation transistors

comm_dir=0; // spin direction control

pwm_demand=100; // configure CCP module for PWM=100;

PWM1_Init(5000);       // Initialize PWM1 module at 5KHz

PWM2_Init(5000);       // Initialize PWM2 module at 5KHz
```

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

```
PWM1_Init(20000);

ADCON1=7;

ADCON0=11000001;


ADC_INIT; // Make ready the ADC

ADC_INIT; // point at AN0 (RA0), right justified,

           //Clock / 16

pwm_demand=100; // configure CCP module for PWM CCP1CON=CCP1CON_INIT;

comm_state=1; // ready to start commutating at state 1

comm_dir=0; // spin direction control

PWM1_Start();

//arxi palmou

oldstate=0;

for(;;)

{

while(TRISA.RA0!=0 && oldstate==0 || TRISA.RA0!=0 && oldstate==3)    //potentiometer 1

A:

{

RC0==0;

RC1==1;

RC2==1;

RC3==0;

RC4==0;

RC5==0; //  A TYLIGMA SE LEITOYRGIA

RC0==0;

RC1==0;
```

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

```
RC2==1;

RC3==0;

RC4==0;

RC5==1; // B TYLIGMA SE LEITOYRGIA

value = ADC_Read(2); //Read from analog channel 2

delay_ms(10);

oldstate==1;

}

B:

{

ADC_READ(1);

RC0==1;

RC1==0;

RC2==0;

RC3==0;

RC4==0;

RC5==1; // B TYLIGMA SE LEITOYRGIA

RC0==1;

RC1==0;

RC2==0;

RC3==1;

RC4==0;

RC5==0; // C TYLIGMA SE LEITOURGIA

value = ADC_Read(0); //Read from analog channel 0

delay_ms(10);

oldstate==2;
```

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

```
}  
  
if(oldstate ==2)  
  
C:  
  
{  
  
ADC_READ(2);  
  
RC0==1;  
  
RC1==0;  
  
RC2==0;  
  
RC3==1;  
  
RC4==0;  
  
RC5==0; // C TYLIGMA SE LEITOURGIA  
  
RC0==0;  
  
RC1==1;  
  
RC2==1;  
  
RC3==0;  
  
RC4==0;  
  
RC5==0; // A TYLIGMA SE LEITOYRGIA  
  
value = ADC_Read(1); //Read from analog channel 1  
  
delay_ms(10);  
  
oldstate==3;  
  
}  
  
}  
  
} //end main
```

```
void InitPWM(void)
```

```
{
```

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

```
TRISC.RC1 = 0;           // Make CCP2 pin as output

TRISC.RC2 = 0;           // Make CCP1 pin as output

CCP1CON = 0x0C;         // Configure CCP1 module in PWM mode
CCP2CON = 0x0C;         // Configure CCP2 module in PWM mode


PR2 = 0xFF;             // Configure the Timer2 period
T2CON = 0x01;           // Set Prescaler to be 4 to make 4.88kHz freq PWM
PWM1_Set_Duty(0);       // Initialize the CCP1 PWM to 0 duty cycle
PWM2_Set_Duty(0);       // Initialize the CCP2 PWM to 0 duty cycle
T2CON |= 0x04;          // Enable the Timer2, hence enable the PWM.
}
```

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'

Στο παράστημα αυτό παρατίθεται τα τεχνικά φύλλα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Διακόπτης ισχύος IRLI3705

IRLI3705N

International
IR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.056	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$ ⑥
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.010	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 28A$ ④
		—	—	0.012		$V_{GS} = 5.0V, I_D = 28A$ ④
		—	—	0.018		$V_{GS} = 4.0V, I_D = 24A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	1.0	—	2.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	50	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 46A$ ⑥
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 16V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -16V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	98	nC	$I_D = 46A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	19		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	49		$V_{GS} = 5.0V$, See Fig. 6 and 13 ④⑥
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	140	—		$I_D = 46A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	37	—		$R_G = 1.8\Omega, V_{GS} = 5.0V$
t_f	Fall Time	—	78	—	nH	$R_D = 0.59\Omega$, See Fig. 10 ④⑥
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—		Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	3600	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	870	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	320	—		$f = 1.0MHz$, See Fig. 5⑥
C	Drain to Sink Capacitance	—	12	—		$f = 1.0MHz$

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	52	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①⑥	—	—	310		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 28A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	94	140	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 46A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	290	440	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④⑥

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
 ② $V_{DD} = 25V$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 320\mu H$
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 46A$. (See Figure 12)

- ③ $I_{SD} \leq 46A, di/dt \leq 250A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$

- ④ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.

- ⑤ $t=60s, f=60Hz$ ⑥ Uses IRL3705N data and test conditions

International
IR Rectifier

PD - 9.1369B

IRL3705N

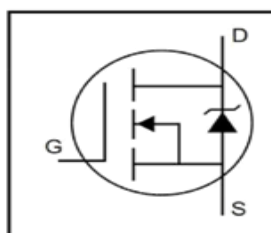
HEXFET® Power MOSFET

- Logic-Level Gate Drive
- Advanced Process Technology
- Isolated Package
- High Voltage Isolation = 2.5KVRMS ⑤
- Sink to Lead Creepage Dist. = 4.8mm
- Fully Avalanche Rated

Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

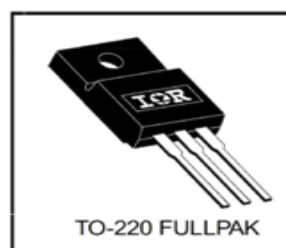
The TO-220 Fullpak eliminates the need for additional insulating hardware in commercial-industrial applications. The moulding compound used provides a high isolation capability and a low thermal resistance between the tab and external heatsink. This isolation is equivalent to using a 100 micron mica barrier with standard TO-220 product. The Fullpak is mounted to a heatsink using a single clip or by a single screw fixing.



$$V_{DSS} = 55V$$

$$R_{DS(on)} = 0.01\Omega$$

$$I_D = 52A$$



TO-220 FULLPAK

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	52	A
I_D @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	37	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①⑥	310	
P_D @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	58	W
	Linear Derating Factor	0.39	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 16	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②⑥	340	mJ
I_{AR}	Avalanche Current①⑥	46	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	5.8	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③⑥	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
T_{STG}	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1N·m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	2.6	°C/W
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	65	

8/25/97

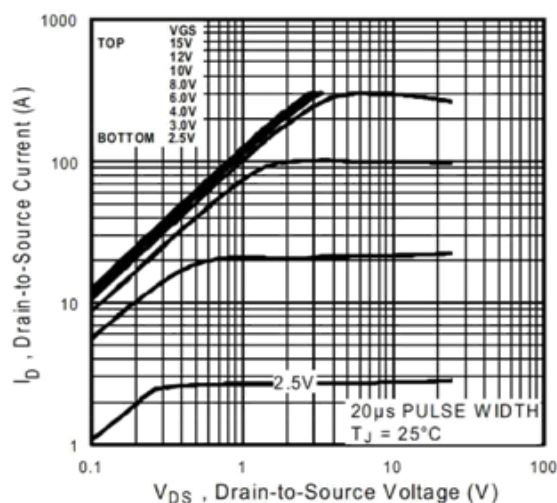


Fig 1. Typical Output Characteristics

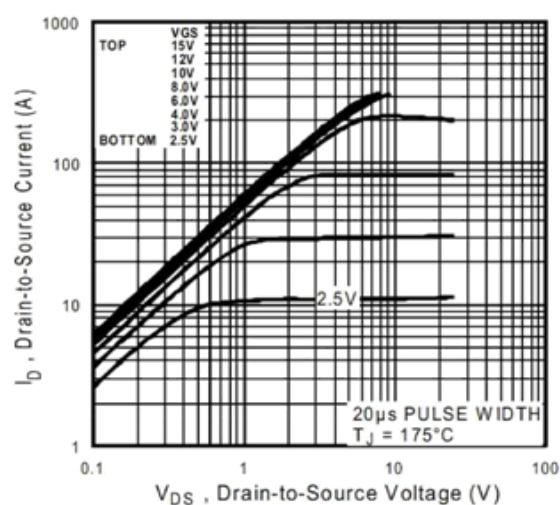


Fig 2. Typical Output Characteristics

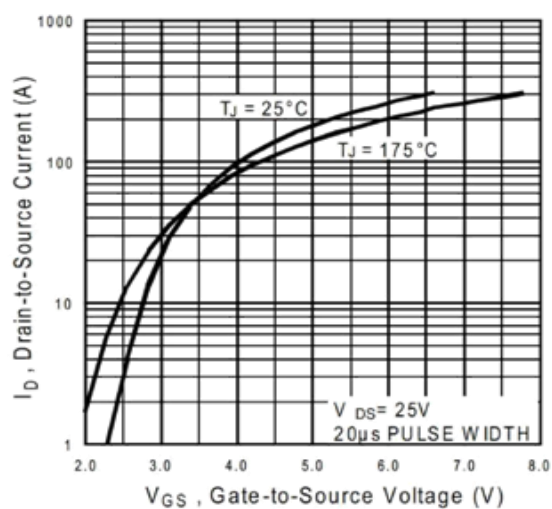


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

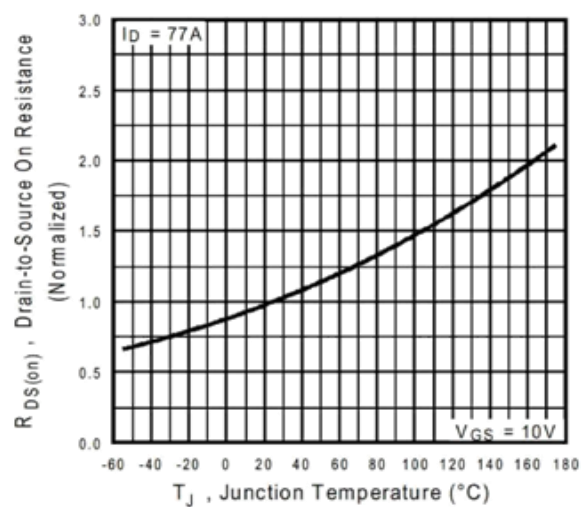
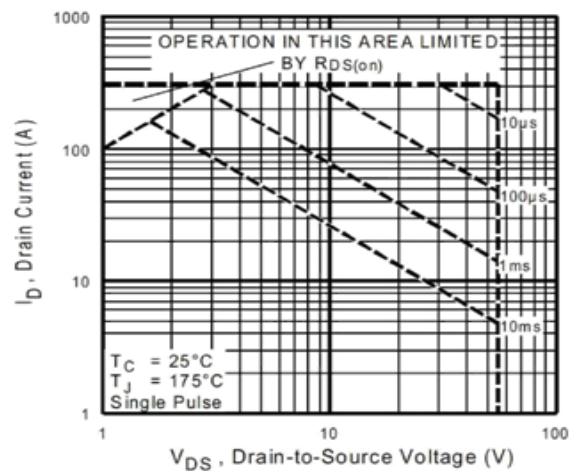
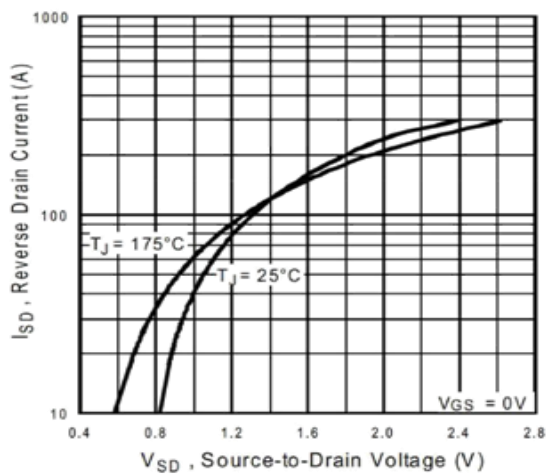
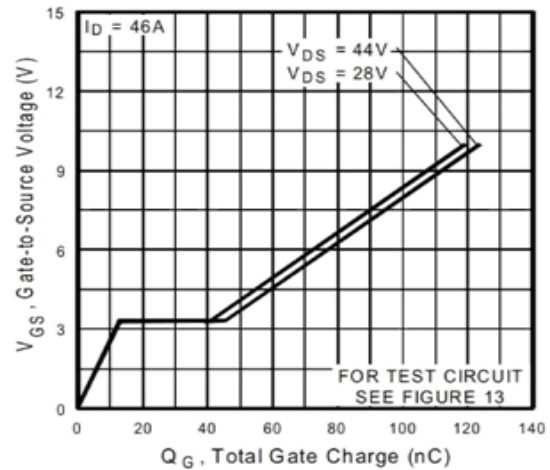
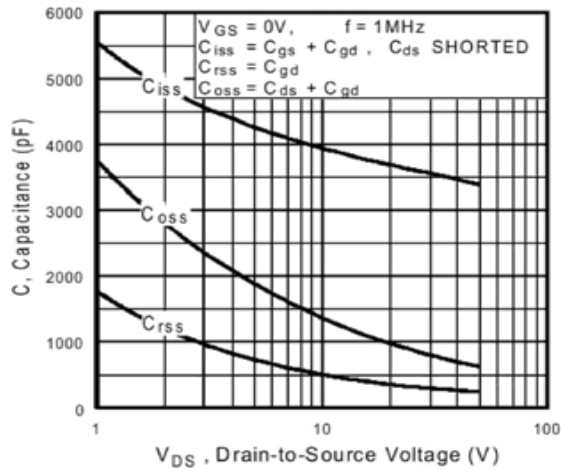


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRLI3705N

International
IOR Rectifier



Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

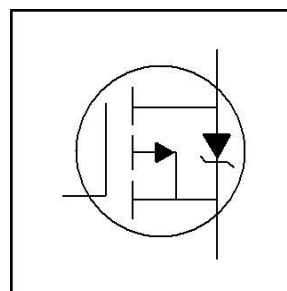
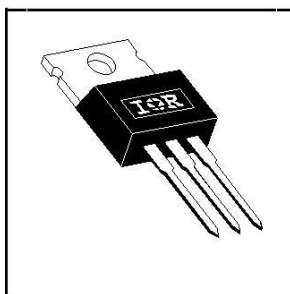
Διακόπτης ισχύος IRF5305

International
IR Rectifier

PD - 91385B

IRF5305

HEXFET[®] Power MOSFET



$V_{DS} = -55V$

Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10V$	-31	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10V$	-22	
I_{DM}	Pulsed Drain Current •	-110	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	110	W
	Linear Derating Factor	0.71	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy,	280	mJ
I_{AR}	Avalanche Current•	-16	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy•	11	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt f	-5.0	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.4	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

IRF5305

International
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	-55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = -250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	-0.034	—	V/°C	Reference to 25°C , $I_D = -1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.06	Ω	$V_{GS} = -10V, I_D = -16A$ „
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	-2.0	—	-4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = -250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	8.0	—	—	S	$V_{DS} = -25V, I_D = -16A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	-25	μA	$V_{DS} = -55V, V_{GS} = 0V$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = -16A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	13	nC	$V_{DS} = -44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	29	nC	$V_{GS} = -10V$, See Fig. 6 and 13 „
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	14	—	ns	$V_{DD} = -28V$
t_r	Rise Time	—	66	—	ns	$I_D = -16A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	39	—	ns	$R_G = 6.8\Omega$
t_f	Fall Time	—	63	—	ns	$R_D = 1.6\Omega$, See Fig. 10 „
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.)
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	from package and center of die contact
C_{iss}	Input Capacitance	—	1200	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	520	—	pF	$V_{DS} = -25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	250	—	pF	$f = 1.0MHz$, See Fig. 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	-31	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) •	—	—	-110	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	-1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = -16A, V_{GS} = 0V$ „
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	71	110	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = -16A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	170	250	nC	$di/dt = -100A/\mu s$ „

Notes:

- Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- $V_{DD} = -25V$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 2.1mH$, $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = -16A$. (See Figure 12)

f $I_{SD} \leq -16A$, $di/dt \leq -280A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
„ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία:

- [1] Δρ. Σταμάτης Αλατσαθανός << Μικροελεγκτές PIC >> Β.ΓΚΙΟΥΡΔΑΣ ΕΚΔΟΤΙΚΗ, Αθήνα 2007
- [2] Δρ. Σταμάτης Αλατσαθανός << Ρομποτική για Μηχανικούς >>
- [3] Δρ. Σταμάτης Αλατσαθανός << Εισαγωγή στη ΜΗΧΑΤΡΟΝΙΚΗ >> ΠΡΩΤΗ ΕΚΔΟΣΗ, Αθήνα 2010
- [4] Παναγιώτης Ηρ. Γιαννακόπουλος << Ηλεκτρονικά >> Αθήνα 2012

Άρθρα:

- [5] Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals-00885a (PDF της microchip με κωδικό AN885).
- [6] Sensorless BLDC Motor Control Using MC9S08AW60DRM086 (PDF της freescale με κωδικό DRM086).
- [7] Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control (PDF της microchip με κωδικό AN901)
- [8] Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 MCUs (PDF της microchip με κωδικό AN899).
- [9] Driving Power MOSFETs in High-Current, Switch Mode Regulators (PDF της microchip με κωδικό AN786).
- [10] Latch-Up Protection For Mosfet Drivers(PDF της microchip με κωδικό AN763).
- [11] Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 MCUs (PDF της microchip με κωδικό AN899).
- [12] Brushless DC Motor Control Made Easy App. Note (PDF της microchip με κωδικό AN857).
- [13] Compiled Tips 'N Tricks Guide (PDF της microchip με κωδικό 01146B).
- [14] Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control (PDF της microchip με κωδικό AN901).
- [15] Using the PIC18F2431 for Sensorless BLDC Motor Control (PDF της microchip με κωδικό AN970).
- [16] Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 MCUs (PDF της microchip με κωδικό AN899).
- [17] IRF5305 HEXFET® Power MOSFET (PDF της International Rectifier με κωδικό PD-91285B).

Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια

[18] IRLI3705N HEXFET® Power MOSFET (PDF της International Rectifier με κωδικό PD-91369B).

[19] Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 MCUs (PDF της microchip με κωδικό AN899).

Ιστοτόποι:

http://www.academia.edu/7101951/MICROCONTROLLER_BASED_CONTROL_OF_THREE_PHASE_BLDC_MOTOR

<https://www.nonstopsystems.com/radio/hellschreiber-the-feld-hell.htm>

<http://www.micro-examples.com/public/microex-navig/doc/097-pwm-calculator.html>

http://www.winpicprog.co.uk/pic_tutorial8.htm

<http://www.ewh.ieee.org/soc/es/May2001/02/Begin.htm>

<http://waihung.net/microchip-pic16-pic18-pwm-mode/>

