



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**“ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΥΨΗΛΗΣ
ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ”**

**“BUILD OF A HIGH-PERFORMANCE ELECTRONIC
DEVICE FOR THREE-PHASE PERMANENT MAGNET
MOTOR CONTROL”**

**Επιβλέπων Καθηγητής:
Σπουδαστής:**

Βυλλιώτης Ηρακλής
Γουναρίδης Νίκος

ΑΜ: 35092

Ιούλιος 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Ευχαριστίες</u>	i
<u>Περιεγόμενα</u>	ii
<u>Λίστα σχημάτων</u>	iv
<u>Λίστα πινάκων</u>	vi
<u>Summary</u>	vii
<u>Πρόλογος</u>	1
<u>1^ο Κεφάλαιο “Περιγραφή της έρευνας”</u>	4
1.1 <u>Εισαγωγή</u>	4
1.2 <u>Σημασία της έρευνας</u>	5
1.3 <u>Στόχος της έρευνας</u>	5
1.4 <u>Περιορισμοί της έρευνας</u>	6
1.5 <u>Δομή της εργασίας</u>	6
<u>2^ο κεφάλαιο “Κινητήρες μονίμων μαγνητών”</u>	7
2.1 <u>Ιστορική αναδρομή</u>	7
2.2 <u>Αρχή λειτουργίας</u>	8
2.3 <u>Ταξινόμηση κινητήρων μονίμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες</u>	8
2.3.1 <u>Ταξινόμηση με το πλήθος των Φάσεων</u>	9
2.3.2 <u>Τοποθέτηση μόνιμων μαγνητών</u>	9
2.4 <u>Είδη κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες</u>	10
2.4.1 <u>BLDC κινητήρες</u>	10
2.4.2 <u>Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη τύπου «PMSM»</u>	11
2.4.3 <u>Βηματικός κινητήρας και κινητήρας τύπου «SR»</u>	11
2.5 <u>Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κινητήρων μονίμων μαγνητών</u>	12
2.5.1 <u>Πλεονεκτήματα κινητήρων μονίμων μαγνητών «BLDC-PMSM»</u>	13
2.5.2 <u>Μειονεκτήματα μηχανών μόνιμων μαγνητών</u>	13
2.5.3 <u>Σύγκριση διαφορετικών τύπων κινητήρων</u>	15
<u>3^ο Κεφάλαιο “Έλεγχος και οδήγηση κινητήρων μονίμων μαγνητών”</u>	18
3.1 <u>Κλιμακωτός έλεγχος-μεταγωγή έξι βημάτων</u>	19
3.2 <u>Ημιτονοειδής εναλλαγή</u>	20
3.3 <u>Διανυσματικός έλεγχος</u>	21
3.3.1 <u>Έλεγχος διανύσματος πεδίου FOC</u>	21
3.3.2 <u>Σύστημα άμεσου ελέγχου ροπής DTC</u>	24
3.3.3 <u>Σύγκριση FOC και DTC</u>	26
3.4 <u>Εκτίμηση θέσης δρομέα</u>	30
3.3.1 <u>Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου</u>	30
3.3.2 <u>back-EMF zero crossing- ανίχνευση μηδενικής διέλευσης θέσης</u>	31
3.3.3 <u>Διευρυμένο φίλτρο Kalman</u>	33
3.3.4 <u>Παρατηρητής ολίσθησης</u>	34
3.3.5 <u>TI FAST</u>	34
3.5 <u>Έλεγχος ισχύος</u>	35
3.5.1 <u>Διεπαφή σειριακής επικοινωνίας οδηγού «ICS»</u>	35
3.5.2 <u>Low-Side Drives «οδηγοί χαμηλής πλευράς δυναμικού»</u>	37
3.5.3 <u>Οδηγοί υψηλής πλευράς δυναμικού</u>	37
3.6 <u>Συμπεράσματα και επιλογή μεθόδου ελέγχου</u>	38
<u>4^ο Κεφάλαιο “Θεωρία λειτουργίας τύπου FOC ”</u>	40
4.1 <u>Θεωρία λειτουργίας τύπου FOC</u>	40
4.2 <u>Διανυσματική διαμόρφωση εύρους παλμού «SVPWM»</u>	43

4.3	Εκτίμηση θέσης δρομέα χωρίς αισθητήρες	45
5^ο	Κεφάλαιο “InstaSPIN™-FOC”	47
5.1	Επισκόπηση και λειτουργίες του InstaSPIN™-FOC	47
5.2	Εκτιμητής FAST	48
5.3	Βρόχοι Ελέγχου	51
5.3.1	Ελεγκτής ροπής	51
5.3.2	Ελεγκτής ταχύτητας	56
5.4	Ταυτοποίηση κινητήρα	61
6^ο	Κεφάλαιο “Πειραματική διάταξη”	63
6.1	Πλακέτα εκτίμησης «evaluation board» DRV8302	63
6.2	Πλακέτα εκτίμησης «evaluation board» DRV8305	65
6.3	Αρχική αξιολόγηση InstaSPIN™-FOC	66
6.4	Κατασκευή νέου ελεγκτή	66
6.4.1	Κινητήρας	66
6.4.2	Μικροελεγκτής	67
6.4.3	Οδηγός πύλης	67
6.4.4	Ανίχνευση ρεύματος	69
6.4.4.1	Αντίσταση τύπου <i>shunt</i>	69
6.4.4.2	Ενισχυτής ρεύματος αντίστασης <i>shunt</i>	70
6.4.5	Τάση ανάδρασης	72
6.4.5.1	Κύκλωμα ανατροφοδότησης τάσης	72
6.4.5.2	Πόλος φίλτρου	73
6.4.6	MOSFETS	74
6.4.7	Buck Converter	74
6.4.8	Διάταξη πλακέτας PCB	74
6.4.8.1	DRV8302	75
6.4.8.2	Κύκλωμα ελέγχου	76
6.4.8.3	Κύκλωμα ισχύος	77
6.4.9	InstaSPIN™-FOC διαμόρφωση από τον χρήστη-προγραμματισμός	78
6.4.10	Χρονισμός εκτέλεσης λογισμικού-προγραμματισμός	78
6.4.11	Παράμετροι του hardware	80
6.4.12	Παράμετροι για τον κινητήρα και ρυθμίσεις ID	81
7^ο	Κεφάλαιο “Αποτελέσματα του πειράματος”	83
7.1	Πειραματικές μετρήσεις	83
7.1.1	Μετρήσεις παλμογράφου σε τεχνική FOC	83
7.1.2	Μετρήσεις παλμογράφου σε τεχνική PWM	85
7.1.3	Τιμές μετρήσεων	86
7.1.4	Συμπεράσματα μετρήσεων και προτάσεις για μελλοντική εργασία	88
	Βιβλιογραφία	89
	Παράρτημα 1	93
	Παράρτημα 2	95

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια μελέτη και κατασκευή ελέγχου σύγχρονων μηχανών συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες μέσω προηγμένων τεχνικών. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος σταθερών μαγνητών που η έρευνα αυτή στοχεύει συναντώνται και σε πληθώρα εφαρμογών ερασιτεχνικής φύσεως, όπως πχ σε τηλεκατευθυνόμενα μοντέλα, αλλά όχι μόνον καθότι οι σύγχρονες μηχανές συνεχούς ρεύματος κερδίζουν ολοένα τομείς που εφαρμόζεται η προηγμένη τεχνολογία όπως η ρομποτική. Έτσι, αυτή η έρευνα έχει εφαρμογές οπουδήποτε χρησιμοποιούνται οι κινητήρες PMSM-BLDC.

Σκοπός της έρευνας είναι μέσω της χρήσης μιας προηγμένης τεχνικής ελέγχου σε μια δική μας προσαρμοσμένη κατασκευή «custom» ενός ελεγκτή κινητήρα επιζητείται να επιτευχθεί βελτιωμένη απόδοση στην οδήγηση κινητήρων χωρίς μαγνήτες. Ως βελτιωμένη απόδοση ορίζουμε ποιοτικά κριτήρια που στοχεύουν στον καλύτερο και αποδοτικότερο έλεγχο κινητήρων DC χωρίς ψήκτρες, που στην ουσία βελτιστοποιούν τις επιδόσεις τους. Τέτοια ποιοτικά κριτήρια είναι η βελτιωμένη απόκριση, η υψηλότερη αποτελεσματικότητα και ικανότητα για τη μεταγωγή κινητήρων σε χαμηλές στροφές και ο σταθερότερος έλεγχος κλειστού βρόχου.

Η παρούσα έρευνα συντάχθηκε με έμφαση στο να συγκρίνει τον έλεγχο πεδίου FOC και τον άμεσο έλεγχο ροπής DTC, οι οποίοι αποτελούν τις δύο πιο επιτυχημένες διαθέσιμες μεθοδολογίες στον προηγμένο έλεγχο κινητήρων μόνιμων μαγνητών. Η βασική μας πρόθεση ήταν να διερευνηθεί η πιθανή εφαρμογή τους σε μικρές μηχανές συνεχούς μόνιμων μαγνητών. Η έρευνά μας βασίστηκε στην διαθέσιμη βιβλιογραφία, στην εμπειρική αξιολόγηση και στην πειραματική απόδειξη. Έτσι ο έλεγχος «FOC» ήταν η τεχνική ελέγχου που επιλέχθηκε τελικά να εφαρμοστεί, ωστόσο παρατίθεται και η σύγκριση με την DTC μέσω της οποίας επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος. Για την έρευνα μας, εν τέλει, επιλέχθηκε μια εμπορική επιλογή ελέγχου πεδίου τύπου FOC από την Texas Instruments.

Με την τη χρήση μιας αναπτυξιακής πλακέτας DRV8302 της TI επιβεβαιώσαμε τα πλεονεκτήματα του συστήματος. Έτσι αναπτύχθηκε ένας πρωτότυπος ελεγκτής ώστε να ανταποκρίνεται καλύτερα στις επιθυμητές απαιτήσεις της έρευνας και των εφαρμογών. Αυτός ο ελεγκτής στη συνέχεια αξιολογήθηκε ως προς τις επιδόσεις του. Όπως αναφέρθηκε στην εργασία αυτή παρουσιάζεται και συγκρίνεται το InstaSPIN™-FOC της TI, καθώς και η τελική ανάπτυξη πρωτότυπου ελεγκτή και η αξιολόγηση του. Περιγράφεται η σχετική θεωρία και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του εν λόγω προσαρμοσμένου ελεγκτή κινητήρα. Περιλαμβάνονται επίσης όλα τα δεδομένα, οι περιγραφές των μεθόδων συλλογής δεδομένων και η ανάλυση δεδομένων.