



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

με θέμα

**ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΣΤΗΡΙΓΜΕΝΟΣ ΣΤΟΝ
ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ TMS320F28027 ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΜΟΤΕΡ
PMSM**

από τον **ΧΑΤΖΗΔΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟ**

Εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή Δρ. **ΧΑΤΖΑΚΗ
ΙΩΑΝΝΗ**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η χρήση κινητήρων χωρίς ψύχτρες παρουσιάζει αύξηση, με κύριες εφαρμογές τα συστήματα παροχής αέρα και τα ηλεκτρικά οχήματα, αυξάνοντας την απόδοση και το χρόνο λειτουργίας χωρίς συντήρηση. Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για την υλοποίηση ενός τριφασικού αντιστροφέα ημιτονοειδούς τάσης κατάλληλου για την οδήγηση παρόμοιων κινητήρων. Η μεθοδολογία επαληθεύτηκε με υλοποίηση βασισμένη σε ένα μικροελεγκτή TMS320F28027 της Texas Instruments και χρησιμοποιήθηκε για την ελεγχόμενη περιστροφή ενός τέτοιου κινητήρα χωρίς φορτίο.

ABSTRACT

The application of the brushless motors has increased over the last years, with dominant fields on blowers and electric vehicles, where they offer increased efficiency and lifetime without service. In this thesis a methodology is described regarding the implementation of a three phase inverter with sinusoidal output voltage appropriate with driving this kind of motors. This methodology was verified with implementation based on a Texas Instruments “TMS320F28027” microcontroller and used for the controlled rotation of a motor of this type under no load conditions.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών στο Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Τ.Ε.Ι Χανίων. Για την εκπόνηση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν καθ'όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Πρώτα απ'όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Γιάννη Χατζάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Αρχικά με ενέπνευσε για την επιλογή του θέματος και στη συνέχεια με βοήθησε και με στήριξε ιδιαίτερα σε όλες τις τεχνικές δυσκολίες που συνάντησα μέχρι το τέλος της εργασίας. Η καθοδήγησή του ήταν καταλυτική και απολύτως απαραίτητη για την τελική επίτευξη του στόχου της εργασίας.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και φίλο μου Λεωνίδα Τζαγκαράκη, για την πολύτιμη βοήθεια στη σχεδίαση και στην κατασκευή των τμημάτων της εργασίας. Η βοήθειά του ήταν πολύ σημαντική και ουσιαστική καθ'όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον φίλο μου Δημήτρη Τζωρτζάκη, ο οποίος μου δώρισε το μοτέρ της δοκιμής και για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου έδωσε σχετικά με αυτό.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε ιδιαίτερα στην προσπάθεια αυτή, καθώς επίσης και όλους τους φίλους και αγαπημένους μου ανθρώπους για την υπομονή τους και την υποστήριξη που μου έδωσαν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ABSTRACT.....	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Σύγχρονοι κινητήρες χωρίς ψύκτρες BLDC και AC PMSM.....	9
1.1 Βασική Ορολογία	9
1.2 Βασικές αρχές και είδη κινητήρων χωρίς ψύκτρες	10
1.3 Ηλεκτρικό ισοδύναμο, A-HEΔ και Σταθερά του μοτέρ.....	13
1.4 A-HEΔ των BLDC και PMSM μοτέρ και οδήγηση αυτών	15
1.5 Παραγωγή ροπής στα μοτέρ BLDC και PMSM και σύγκριση αυτών	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Ο μικροελεγκτής piccolo TMS320F28027	23
2.1 Γενική περιγραφή	23
2.2 Timer και παραγωγή PWM	26
2.2.1 Υπομονάδα Time-Base (TB)	27
2.2.2 Υπομονάδα Counter-Compare (CC)	29
2.2.3 Υπομονάδα Action-Qualifier (AQ)	29
2.3 Τεχνική παραγωγής SPWM με χρήση PWM.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Υλοποίηση κώδικα για τον TMS320F28027	34
3.1 Ανάπτυξη κώδικα για τριφασικό αντιστροφέα	34
3.1.1 Κυρίως πρόγραμμα.....	36
3.1.2 Ρουτίνα εξυπηρέτησης Interrupt.....	37
3.1.3 Ρουτίνα αρχικοποίησης των EPWM	38

3.1.4 Ρουτίνα σύγκρισης και ανίχνευσης ημιπεριόδου	39
3.2 Βελτιστοποίηση κωδικα	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Πειραματικό μέρος - Κατασκευές	41
4.1 Ο κινητήρας AXI5345/18.....	41
4.2 Κατασκευές των τριφασικών αντιστροφών.....	44
4.2.1 Ο αντιστροφέας με τον IR2184	45
4.2.2 Ο αντιστροφέας με τον DRV8301.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Μετρήσεις αντιστροφών	54
5.1 Καμπύλη τάσης-συχνότητας	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπερασματα – μελλοντική εργασία.....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ :	59

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ACIM : Alternative current induction motor

AQ: Action Qualifier

BACK EMF: Back Electromagnetic Force

BLDC: BrushLess Direct Current

CC: Counter Compare

EMF: Electromagnetic Force

ePWM: enhanced Pulse Width Modulator

FOC : Field Oriented Control

HRPWM: High Resolution Pulse Width Modulation

K_t : torque motor constant

PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor

SPWM: Sinusoidal Pulse Width Modulation

TBCTR: Time Base Counter

A-HEΔ: Αντι- Ηλεκτρεργετική Δύναμη

HEΔ: Ηλεκτρεργετική Δύναμη

λ_r : Μαγνητική ροή

τ : Ροπή

Εισαγωγή.

Στη σύγχρονη εποχή η εξοικονόμηση ενέργειας σε όλους σχεδόν τους τομείς της τεχνολογίας και των υποδομών έχει σημαντικό ρόλο, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους της ενέργειας. Οι βιομηχανίες αποσκοπούν στη συνεχή μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος και οι ηλεκτρικές συσκευές ευρείας παραγωγής κατασκευάζονται με προδιαγραφές για ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση στην αναμονή και υψηλό βαθμό απόδοσης. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες προσπαθούν να ξεπεράσουν τα προβλήματα του χαμηλού βαθμού απόδοσης των μηχανών εσωτερικής καύσης, όταν αυτές λειτουργούν σε χαμηλές στροφές και μακριά από το σημείο της μέγιστης ροπής και απόδοσής τους, ενσωματώνοντας στα οχήματα που παράγουν, μαζί με τους κλασικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης και ηλεκτρικές μηχανές που λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες (υβριδικά αυτοκίνητα). Στα ηλεκτρικά οχήματα οι ανάγκες για υψηλό βαθμό απόδοσης, χαμηλό βάρος και μεγάλα διαστήματα συντήρησης είναι ιδιαίτερα σημαντική, εφόσον επιδρά τόσο στην αυτονομία όσο και στην κατανάλωση.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν μελετηθεί ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες και η εξέλιξή τους έχει οδηγήσει σε κατασκευές με πολύ υψηλή απόδοση και ειδική ισχύ. Η εξέλιξη αυτή έχει γίνει δυνατή κυρίως λόγω της εκτεταμένης χρήσης κινητήρων όπως είναι οι ‘Συγχρονοί Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών’ (Permanent Magnet Synchronous Motor, **PMSM**) οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε μεγέθη από 50mW μέχρι την ισχύ των 30KW. Πέραν της ισχύος αυτής η κατασκευή τους αρχίζει να γίνεται οικονομικά ασύμφορη. Σε εφαρμογές με μεγαλύτερες απαιτήσεις ισχύος συνήθως χρησιμοποιούνται οι ‘Επαγωγικοί Κινητήρες Εναλλασσομένου Ρεύματος’ (Alternative Current Induction Motor, **ACIM**).

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την υλοποίηση τριφασικού αντιστροφέα κατάλληλου για την οδήγηση κινητήρων PMSM στηριγμένου σε μικροελεγκτή. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας έγινε υλοποίηση βασισμένη στο μικροελεγκτή **TMS320F28027** της σειράς C2000 της Texas Instruments. Αυτή η σειρά επεξεργαστών περιλαμβάνει πολλά χρήσιμα χαρακτηριστικά για την υλοποίηση και τον έλεγχο διακοπτικών

μετατροπέων και παρέχει την δυνατότητα υλοποίησης αντιστροφών με ελάχιστα εξαρτήματα σε σύγκριση τόσο σε σχέση με την κλασική αναλογική προσέγγιση, όσο και με τις περισσότερες ανταγωνιστικές σειρές επεξεργαστών.

Εδικότερα:

Στο **1^ο κεφάλαιο** περιγράφεται η βασική ορολογία σχετικά με τους κινητήρες χωρίς ψήχτρες. Επίσης αναφέρεται η παραγωγή **A-HEΔ** και ροπής στις δύο κύριες κατηγορίες μοτέρ **BLDC** και **PMSM**. Τέλος αναλύονται οι διαφορές των κινητήρων BLDC και PMSM και οι τρόποι οδήγησής τους και τα συγκριτικά πλεονεκτήματά τους.

Στο **2^ο κεφάλαιο** αναλύονται τα βασικά μέρη του μικροελεγκτή **TMS320F28027**, η βασική του δομή, η παραγωγή **PWM** από τους μετρητές που ενσωματώνει και η τεχνική παραγωγής **SPWM** που εφαρμόζεται.

Το **3^ο κεφάλαιο** αναφέρεται στην υλοποίηση του κώδικα σε διάγραμμα μπλόκ. Η βασική ρουτίνα, ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής και η ρουτίνα ανίχνευσης ημιπεριόδου.

Στο **4^ο κεφάλαιο** γίνεται η υλοποίηση των κατασκευών. Αρχικά γίνεται αναφορά στο μοτέρ των δοκιμών και στη συνέχεια στη σχεδίαση και κατασκευή των αντιστροφών με τους δύο διαφορετικούς mosfet driver που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο **5^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι μετρήσεις των αντιστροφών καθώς επίσης και οι αντίστοιχες κυματομορφές.

Τέλος το **6^ο κεφάλαιο** αναφέρεται στα συμπεράσματα των πειραμάτων και επίσης στα μελλοντικά σχέδια και προτάσεις βελτίωσης του τριφασικού αντιστροφέα για έλεγχο ηλεκτροκινητήρων αυτού του είδους.

Κεφάλαιο

1. Σύγχρονοι κινητήρες χωρίς ψύκτρες BLDC και AC PMSM.

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται κάποιες βασικές αρχές της λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων χωρίς ψύκτρες, οι οποίες θα φανούν χρήσιμες για την περαιτέρω κατανόηση της εργασίας αυτής. Αναλύονται επίσης οι βασικότεροι μαθηματικοί τύποι σχετικά με την παραγωγή ροπής.

1.1 Βασική Ορολογία.

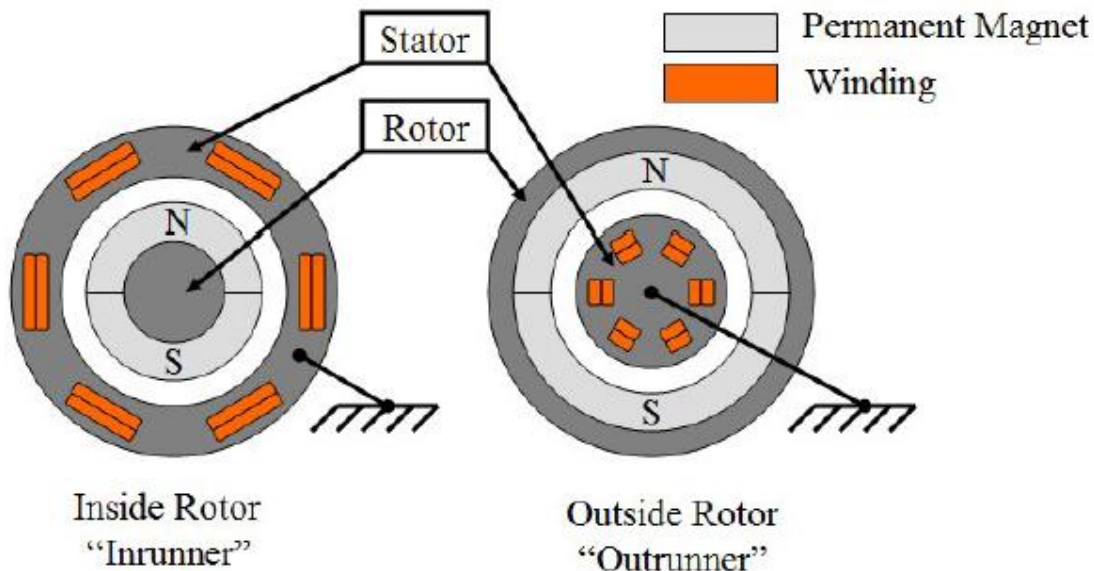
Η παρούσα εργασία εστιάζει περισσότερο στους «σύγχρονους κινητήρες μόνιμων μαγνητών» (PMSM) μιας και ο αντιστροφείας που κατασκευάστηκε προορίζεται για οδήγηση αυτών των κινητήρων. Στους κινητήρες αυτούς, ο ρότορας φέρει τους μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι, δημιουργούν το μόνιμο μαγνητικό πεδίο με το οποίο αλληλεπιδρά με τα «σύγχρονα» ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα του στάτη. Ο όρος «σύγχρονος» σημαίνει ότι η ηλεκτρική συχνότητα του ρεύματος του στάτη είναι ανάλογη της μηχανικής συχνότητας περιστροφής του ρότορα. Δεν υπάρχει δηλαδή η γνωστή ολίσθιση περιστροφής που εμφανίζεται στους επαγωγικούς ή αλλιώς, κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Στην κατηγορία αυτή, των κινητήρων χωρίς ψήκτρες υπάγονται δύο κυρίως είδη μοτέρ, τα PMSM (αναφέρθηκαν ήδη παραπάνω) και τα BLDC (BrushLess Direct Current). Υπάρχουν σαφώς και άλλα είδη, όπως τα βηματικά, τα οποία όμως δεν αναλύονται εδώ. Η βασική διαφορά των δύο παραπάνω τύπων εκτός από κάποιες κατασκευαστικές διαφορές στα τυλίγματα που αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαιο, είναι ότι τα μεν PMSM οδηγούνται από αντιστροφείς που παράγουν ημιτονοειδή τάση, ενώ τα δε BLDC οδηγούνται με μεταγωγή έξι βημάτων τετραγωνικής κυματομορφής. Η μεταγωγή στα τυλίγματα των BLDC έχει ακριβώς την ίδια λογική διαδοχή με αυτήν ενός DC μοτέρ με ψύκτρες και γιαυτό το λόγο έχουν ονομαστεί έτσι. [2]

1.2 Βασικές αρχές και είδη κινητήρων χωρίς ψήχτρες.

Ένας κινητήρας χωρίς ψύκτρες αποτελείται από το σταθερό μέρος, που ονομάζεται **στάτης** και το περιστρεφόμενο μέρος, που ονομάζεται **ρότορας ή δρομέας**. Η απόσταση ανάμεσα στο στάτη και στο ρότορα ονομάζεται διάκενο και είναι πολύ βασική παράμετρος για την τελική απόδοση του μοτέρ. Ο στάτης φέρει τα τυλίγματα και ο ρότορας τους μόνιμους μαγνήτες. Οι κινητήρες χωρίς ψήχτρες μπορεί να έχουν τον ρότορα έσω (**inrunner**) ή έξω (**outrunner**), δηλαδή στη δεύτερη περίπτωση περιστρέφεται το εξωτερικό του κέλυφος.

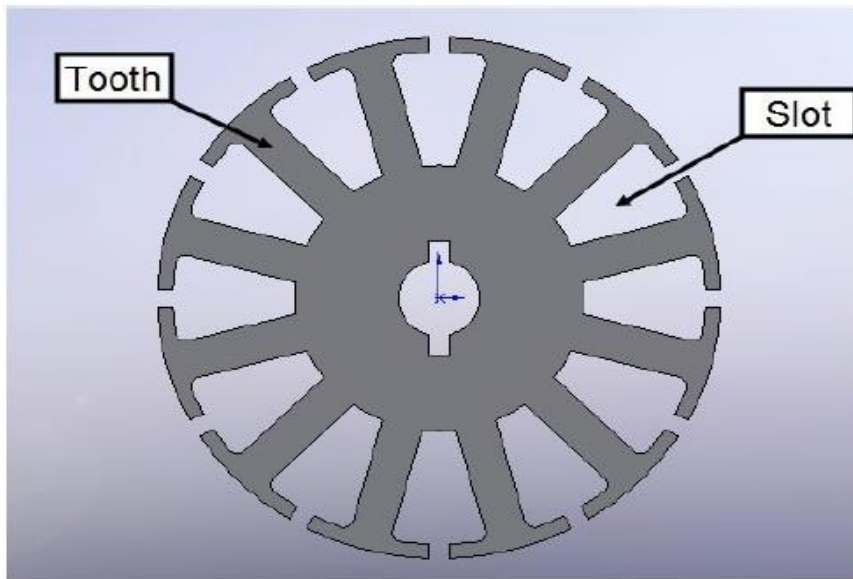
Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα.1** [1] σε κάθε περίπτωση τα τυλίγματα βρίσκονται στον στάτη γεγονός που επιτρέπει την απευθείας σύνδεση αυτών δίχως τη χρήση ψύκτρων.



Σχήμα 1: Αριστερά ο ρότορας είναι έσω και δεξιά έξω. Σε κάθε περίπτωση τα τυλίγματα είναι σταθερά.

Στους περισσότερους κινητήρες χωρίς ψήχτρες, τα τυλίγματα τοποθετούνται στον ελασματοειδούς δομής σιδηροπυρήνα και συγκεκριμένα μέσα στις **αυλακώσεις** που σχηματίζουν οι συνεχόμενες **οδοντώσεις** του στάτη. Ο ρόλος του σιδηροπυρήνα είναι να αυξήσει την μαγνητική ροή μέσα στα τυλίγματα. Οι τριφασκοί κινητήρες έχουν ζυγό αριθμό οδοντώσεων στο στάτη που διαιρείται με το τρία.

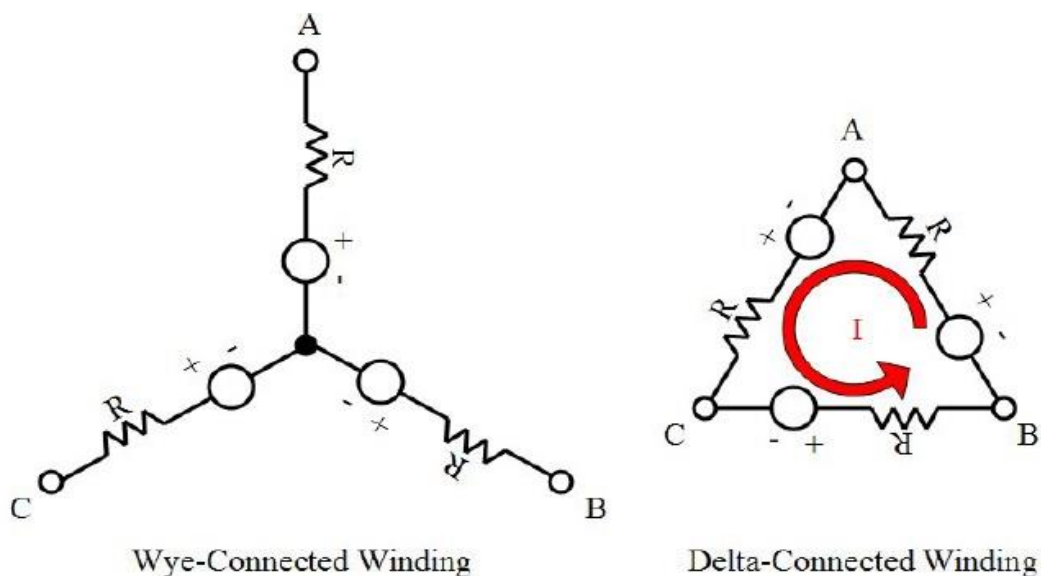
Στο παρακάτω **Σχήμα.2** [1] απεικονίζεται ένας στάτης με 12 αυλακώσεις, για κινητήρα εξωτερικού ρότορα.



Σχήμα.2: Στάτης 12 αυλακώσεων, για μοτέρ με εξωτερικό ρότορα.

Μία ομάδα τυλιγμάτων που διανέμονται σε συγκεκριμένη αρίθμηση αυλακώσεων αποτελούν μια φάση. Όταν τυλιχτούν και οι τρεις φάσεις τότε συνδέονται εσωτερικά του στάτη σε συνδεσμολογία **αστέρα** ή σε **τρίγωνο** και εξέρχονται πάντα τρία άκρα. Υπάρχουν και ειδικές περιπτώσεις όπου βγαίνουν από το στάτη και τα έξι άκρα και συνδέονται εξωτερικά προκειμένου να εξυπηρετηθούν συγκεκριμένες τεχνικές οδήγησης και εκκίνησης.

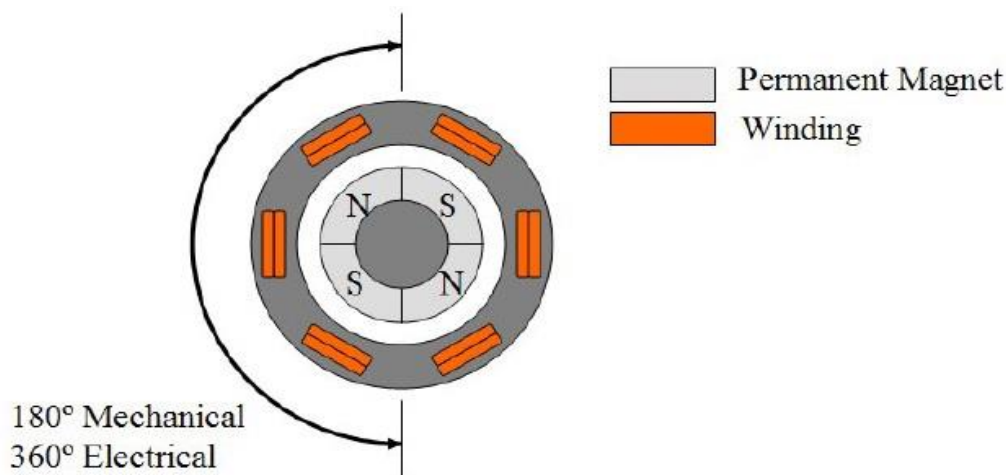
Στο **Σχήμα.3** [1] απεικονίζονται οι δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες.



Σχήμα.3: Συνδεσμολογίες αστέρα (Wye) και τρίγωνο (Delta) σε τριφασικούς κινητήρες.

Κάθε ένας κύκλος αγωγού που σχηματίζεται, ονομάζεται σπείρα και κάθε μοτέρ χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των σπειρών που αποτελείται η κάθε φάση του. Κάθε μαγνήτης πάνω στο ρότορα αποτελεί έναν **πόλο** και συναντώνται παντα σε ζεύγη. Ο αριθμός των ζεύγων μπορεί να ξεκινά απο ένα, μέχρι και τριάντα σε μεγαλύτερης ισχύος κινητήρες. Ο αριθμός των πόλων δεν είναι ίδιος με τις οδοντώσεις αλλά υπάρχουν συγκεκριμένοι συνδυασμοί αυτών που δουλεύουν σωστά και αποδοτικά [3].

Η περίπτωση του διπολικού κινητήρα (ένα ζεύγος πόλων) είναι ή μοναδική στην οποία συμπίπτει η ηλεκτρική συχνότητα οδήγησης του μοτέρ με τη μηχανική συχνότητα περιστροφής του ρότορα. Στο παρακάτω **Σχήμα.4** [1] απεικονίζεται ένα τετραπολικό μοτέρ όπου οι 360° ηλεκτρικές μοίρες αντιστοιχούν σε μονο180° περιστροφής του ρότορα.



Σχήμα.4: Αναπαράσταση τετραπολικού μοτέρ και γωνιών περιστροφής.

Η σχέση που συνδέει την ηλεκτρική με τη μηχανική συχνότητα είναι:

$$f = p \cdot n / 60$$

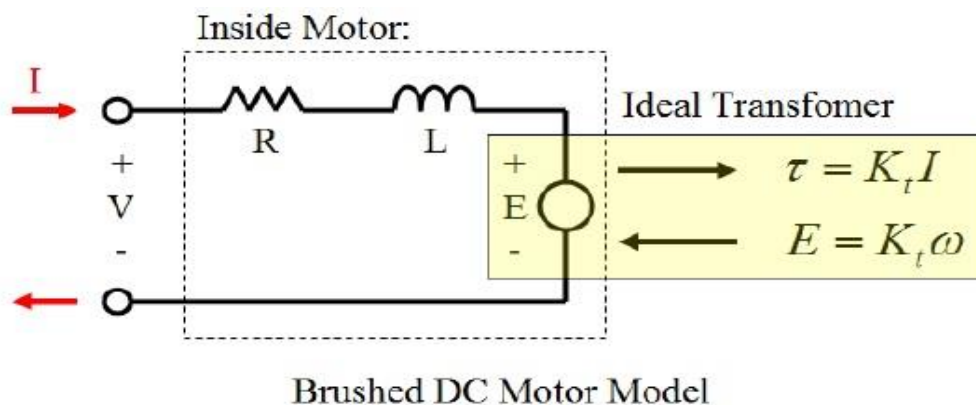
Όπου f είναι η ηλεκτρική κυκλική συχνότητα οδήγησης, p είναι το ζεύγος των πόλων του ρότορα και n είναι η συχνότητα περιστροφής του ρότορα.

1.3 Ηλεκτρικό ισοδύναμο, A-HEΔ και Σταθερά του μοτέρ.

Μια καλή προσέγγιση μοντελοποίησης για τα μοτέρ PMSM είναι μια πηγή τάσης εξαρτώμενη από την ταχύτητα περιστροφής, σε σειρά με ένα επαγωγικό και ένα ωμικό φορτίο.

Η πηγή τάσης εξαρτώμενη από την ταχύτητα περιστροφής ονομάζεται αντι-ηλεκτρεργετική δύναμη (Back EMF) και αποτελεί το φυσικό αποτέλεσμα των τυλιγμάτων του στάτη κινούμενα διαμέσου μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου (του ρότορα). Στην περίπτωση ενός μοτέρ DC με ψύκτρες, η A-HEΔ είναι μια σταθερά **Τάσης** ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής. Η σταθερά αυτή τάσης ονομάζεται σταθερά του μοτέρ (motor constant) και συμβολίζεται ως K_t .

Στο παρακάτω **σχήμα.5** [1] περιγράφεται το ηλεκτρομηχανικό μοντέλο ενός μοτέρ συνεχούς ρεύματος με ψύκτρες το οποίο αποτελείται από έναν ιδανικό μετασχηματιστή σε σειρά με μια αντίσταση και ένα πηνίο.



Σχήμα.5: Ηλεκτρομηχανικό ισοδύναμο για μοτέρ συνεχούς ρεύματος με ψύκτρες.

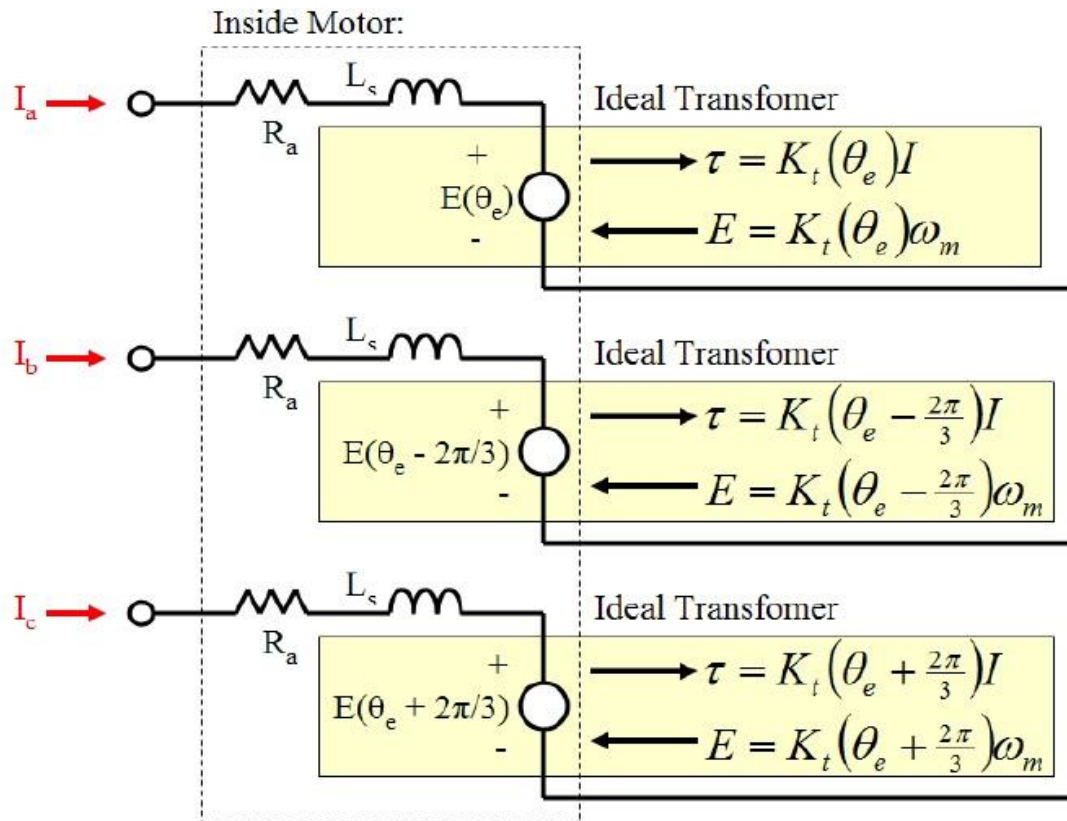
Η σταθερά του μοτέρ, K_t λαμβάνει μέρος και στη σχέση ροπής ($\tau = K_t \cdot I$) και στη σχέση αντι-ηλεκτρεργετικής δύναμης ($E = K_t \cdot \omega$). Η αναλογία αυτών των δύο σχέσεων είναι συνέπεια της διατήρησης της ισχύος σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή.

Στους κινητήρες με ψύκτρες τα σημεία μεταγωγής των ρευματοφόρων τυλιγμάτων καθορίζονται από τις σταθερές θέσεις των ψυκτρών.

Στους τριφασικούς κινητήρες χωρίς ψύκτρες η μεταγωγή καθορίζεται από τα κυκλώματα οδήγησης και προκειμένου να αναγάγουμε το προηγούμενο ισοδύναμο σε τριφασικό δεν έχουμε παρά να βάλουμε την

σταθερά K_t να μεταβάλλεται περιοδικά με την ηλεκτρική γωνία κάθε φάσης.

Στο παρακάτω **Σχήμα.6** [1] προβάλλεται το τροποποιημένο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο του κινητήρα με ψύκτρες σε τριφασικό μοτέρ χωρίς ψύκτρες.



Σχήμα.6: Ηλεκτρομηχανικό μοντέλο τριφασικού κινητήρα χωρίς ψύκτρες.

Στο παραπάνω μοντέλο το γινόμενο $K_t^*(\Theta_e)$ αποτελεί την περιοδική συνάρτηση μεταβολής της ηλεκτρικής γωνίας. Το ω_m είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα. Ίσως αυτή η ανάλυση φαίνεται πολύπλοκη αλλά προσεγγίζει πολύ καλά τη λειτουργία και τις απαιτήσεις οδήγησης των τριφασικών κινητήρων χωρίς ψήκτρες. Ένας τρόπος να βρεθεί το ακριβές σχήμα του $K_t^*(\Theta_e)$ είναι να περιστρέψουμε το μοτέρ χωρίς φορτίο και να παρατηρηθεί στον παλμογράφο η κυματομορφή της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

Η A-HEΔ ανά μηχανική ταχύτητα περιστροφής είναι το γινόμενο $K_t^*(\Theta_e)$, αλλά είναι και το ίδιο γινόμενο που καθορίζει τη ροπή ανα μονάδα ρεύματος [1].

Σκοπός των κυκλωμάτων οδήγησης των PMSM κινητήρων είναι να οδηγήσουν σε κάθε φάση ένταση ρεύματος ικανή να παράγει τη μέγιστη ροπή σε συγκεκριμένη γωνία. Ως εκ τούτου απαιτείται η γνώση της γωνιακής θέσης του ρότορα κάθε στιγμή ώστε να γίνονται σωστά οι μεταγωγές.

1.4 A-HEΔ των BLDC και PMSM μοτέρ και οδήγηση αυτών.

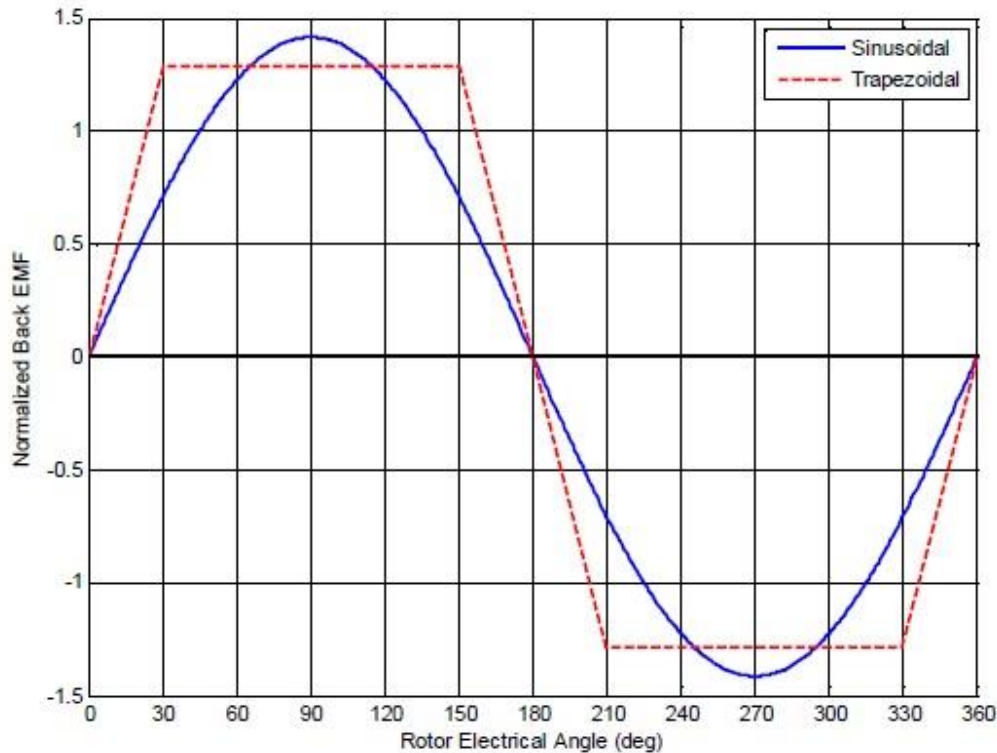
Οι κινητήρες χωρίς καρβονάκια χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με την A-HEΔ που παράγουν: σε τραπεζοειδή και σε ημιτονικά. Στην πραγματικότητα τα περισσότερα μοτέρ παράγουν κυματομορφές που προσεγγίζουν περισσότερο με τη μια ή την άλλη κυματορφή και κατατάσσονται με αυτό τον τρόπο. Το πλάτος της τάσης (A-HEΔ) που παράγεται από κάθε μοτέρ είναι ανάλογο της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής αλλά η μορφή της κυματομορφής παραμένει σταθερή. Η παρακάτω σχέση περιγράφει την παραγωγή A-HEΔ.

$$\lambda_r = \lambda_r^*(\theta)$$

$$E = d\lambda_r/dt$$

Η μαγνητική ροή διαμέσου του ρότορα ονομάζεται λ_r και είναι συνάρτηση της γωνιακής θέσης. Η A-HEΔ E , εκφράζεται ως το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής από τον ρότορα πάνω στα τυλίγματα. Επομένως το πλάτος της A-HEΔ είναι συνάρτηση της γωνιακής ταχύτητας και το σχήμα είναι συνάρτηση της γωνιακής θέσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα είναι η γεωμετρία των μαγνητών, η μορφή του μαγνητικού πεδίου, η γεωμετρία του πυρήνα του στάτη και η διανομή των τυλιγμάτων.

Στο παρακάτω **Σχήμα.7** [1] απεικονίζονται οι δύο κυματομορφές που αποτελούν τις δύο κύριες κατηγορίες, στην ιδανική τους μορφή. Για χάρη σύγκρισης και τα δύο πλάτη είναι κανονικοποιημένα σε RMS τιμή ίση με τη μονάδα.



Σχήμα.7: Αντιπαραβολή τραπεζοειδούς και ημιτονικής κυματορφής αντι-ηλεκτρεργετικής δύναμης.

Φυσικά χαρακτηριστικά κινητήρων με τραπεζοειδή αντι-ηλεκτρεργετική δύναμη:

- ❖ Συμπηκνωμένα τυλίγματα.
- ❖ Μαγνήτες και οδοντώσεις παράλληλες.
- ❖ Διακριτούς μαγνητικούς πόλους με ομοιόμορφη μαγνήτιση.

Οι παραπάνω συνθήκες εξασφαλίζουν αποτομες μεταβολές στη μαγνητική ροή οι οποίες προκαλούν τραπεζοειδούς μορφής αντι-ηλεκτρεργετική δύναμη.

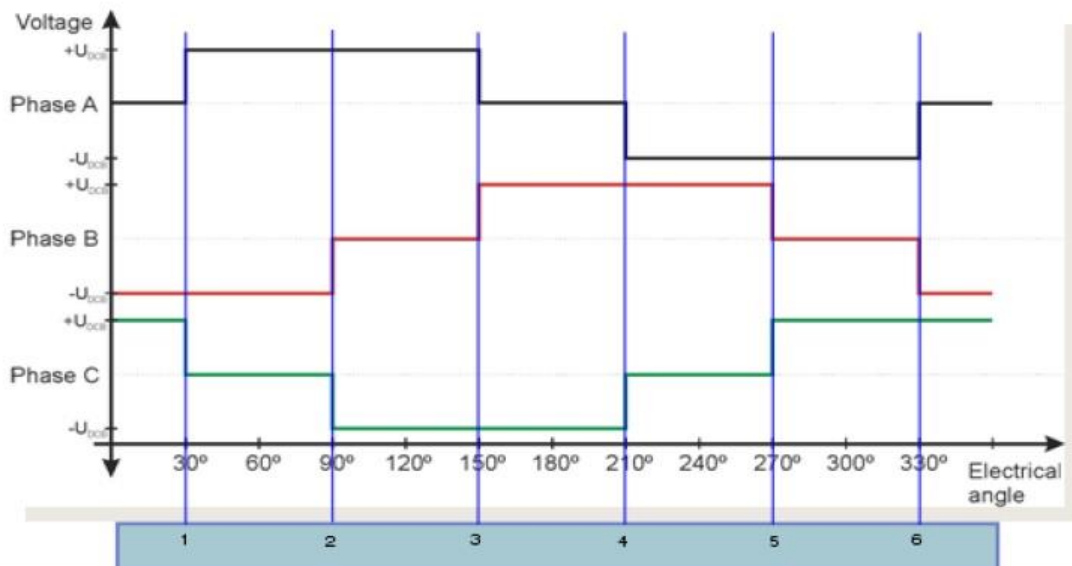
Φυσικά χαρακτηριστικά κινητήρων με ημιτονική αντι-ηλεκτρεργετική δύναμη:

- ❖ Τυλίγματα με υπερκάλυψη ή με ημιτονική διανομή.
- ❖ Μαγνήτες και οδοντώσεις λοξές.
- ❖ Ημιτονική μαγνήτιση.

Τα μοτέρ αυτά έχουν συνήθως μεγαλύτερο κατασκευαστικό κόστος παρόλο που δεν είναι απαραίτητα όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά για παραγωγή A-HEΔ που να πλησιάζει αρκετά την ημιτονική μορφή.

Συνήθως τα μοτέρ με τραπεζοειδή A-HEΔ οδηγούνται με μεταγωγές έξι βημάτων τετραγωνικής κυματομορφής και ονομάζονται BLDC. Τα μοτέρ με A-HEΔ ημιτονικής μορφής και τριφασικής ημιτονικής μεταγωγής ονομάζονται PMSM ή και PMAC. Παρόλαυτά και τα δύο είδη μοτέρ μπορούν να οδηγηθούν και με τους δύο τρόπους μεταγωγής αλλά παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ως προς την αποδιδόμενη ισχύ, τον βαθμό απόδοσης και την κυμάτωση ροπής.

Στο **Σχήμα.8** [6] απεικονίζεται BLDC μεταγωγή έξι βημάτων με αναφορά θέσης ρότορα από αισθητήρες HALL .



Σχήμα.8: BLDC μεταγωγή έξι βημάτων στις τρεις φάσεις με αναφορά θέσης ρότορα από αισθητήρες HALL.

Η μεταγωγή έξι βημάτων είναι ο απλούστερος τρόπος οδήγησης των BLDC μοτέρ. Στην εφαρμογή αυτή, κάθε χρονική στιγμή το ρεύμα εισέρχεται από τη μία φάση, εξέρχεται από μια άλλη και η τρίτη φάση είναι ανενεργή. Τα έξι βήματα μεταγωγής συμπληρώνουν ένα ηλεκτρικό κύκλο, επομένως κάθε μετάβαση διαρκεί 60° ηλεκτρικές μοίρες.

Χρησιμοποιώντας τρεις αισθητήρες HALL πάνω στο στάτη οι οποίοι 'βλέπουν' τους μαγνήτες του ρότορα συμπληρώνεται ένας πίνακας θέσης-οδήγησης σύμφωνα με τον οποίο οδηγούνται οι αντίστοιχες φάσεις.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα.8 σε κάθε φάση το ρεύμα οδήγησης είναι τετραγωνικής μορφής. Έχει διάρκεια στην κορυφή για 120° και για 60° είναι μηδέν.

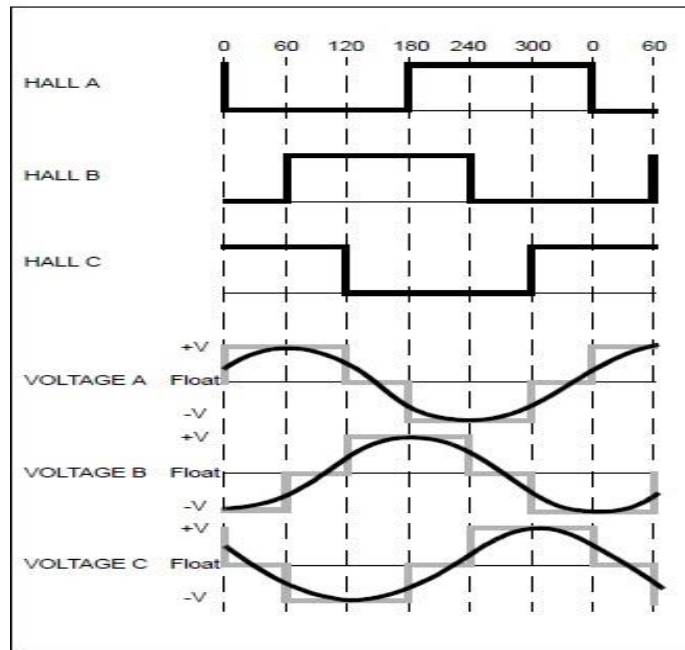
Ο Πίνακας.1 [6]δείχνει τις έξι καταστάσεις των μεταγωγών των φάσεων σε σχέση με τις αναφορές από τους αισθητήρες HALL.

Hall Sensor A	Hall Sensor B	Hall Sensor C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0	0	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$	NC
1	0	1	NC	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$
0	0	1	$+V_{DCB}$	NC	$-V_{DCB}$
0	1	1	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$	NC
0	1	0	NC	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$
1	1	0	$-V_{DCB}$	NC	$+V_{DCB}$

Πίνακας.1: Οι έξι μεταγωγές των φάσεων σε σχέση με τις αναφορές από τους αισθητήρες HALL.

Στην περίπτωση της ημιτονικής μεταγωγής τα πράγματα είναι πίο πολύπλοκα. Οι τρεις φάσεις οδηγούνται με ημιτονικά ρεύματα που παρουσιάζουν 120° διαφορά φάσης μεταξύ τους. Στην πράξη παράγεται ημιτονική τάση με ηψίσυχη διαμόρφωση εύρους παλμού (SPWM) και στη συνέχεια με κατάλληλες τεχνικές ελέγχου [FOC, Field Oriented Control] εξασφαλίζεται ότι τα τυλίγματα κάθε φάσης οδηγούνται με ημιτονικής μορφής ρεύματα.

Στο Σχήμα.9 [7] απεικονίζεται ημιτονική μεταγωγή τριών φάσεων σε μοτέρ PMSM, με αναφορά θέσης ρότορα απο αισθητήρες HALL.



Σχήμα.9: Ημιτονική μεταγωγή τριών φάσεων με αναφορά θέσης ρότορα από αισθητήρες HALL.

Η οδήγηση κινητήρων PMSM με ημιτονικό ρεύμα και αναφορά θέσης από αισθητήρες HALL είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται μεν, αλλά παρουσιάζει διάφορα προβλήματα αξιοπιστίας και σταθερότητας ιδιαίτερα σε μοτέρ μεγάλων ρυθμών περιστροφής. Τεχνικές ελέγχου όπως η FOC δίνουν πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς τη χρήση αισθητήρων HALL, αλλά απαιτούν πιά ισχυρούς μικροελεγκτές διότι τρέχουν αρκετά πολύπλοκους αλγορίθμους.

1.5 Παραγωγή ροπής στα μοτέρ BLDC και PMSM και σύγκριση αυτών.

Το κεφάλαιο αναφέρεται στην παραγωγή ροπής σε:

- ❖ Κινητήρες PMSM με ημιτονικά ρεύματα οδήγησης (ιδανικά).
- ❖ Κινητήρες BLDC με ιδανική οδήγηση τραπεζοειδούς διαμορφωσης έξι μεταγωγών.

Η πρώτη περίπτωση θεωρείται ένα τριφασικό μοτέρ AC, ενώ η δεύτερη ένα DC μοτέρ χωρίς ψύκτρες. Μετά την ανάλυση των δύο αυτών ιδανικών περιπτώσεων, θα ληφθεί υπόψη η πραγματική επίδραση της αυτεπαγωγής του κάθε κινητήρα στη παραγωγή ροπής.

Η ροπή που παράγεται και στις δύο περιπτώσεις είναι ανάλογη της ηλεκτρικής ισχύος που μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ μέσω της Α-ΗΕΔ του κινητήρα. Η μετατροπή ισχύος σε μια φάση σε δεδομένη χρονική στιγμή, είναι γινόμενο του ρεύματος που τη διαρρέει επί την Α-ΗΕΔ του μοτέρ εκείνη τη στιγμή. Ο μέσος όρος της ισχύος που μετατρέπεται σε κάθε φάση είναι ο μέσος όρος του παραπάνω γινομένου μέσα σε ένα ηλεκτρικό κύκλο και εξαρτάται πρώτον από τη μορφή της Α-ΗΕΔ και δεύτερον από το ρεύμα. Η συνολική μέση ισχύς και στις τρεις φάσεις σε ένα ηλεκτρικό κύκλο, είναι ητριπλάσια της παραπάνω.

Η στιγμιαία ισχύς διαιρεμένη με την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα (rpm) μας κάνει την παραγόμενη στιγμιαία ροπή. Επομένως έχουμε:

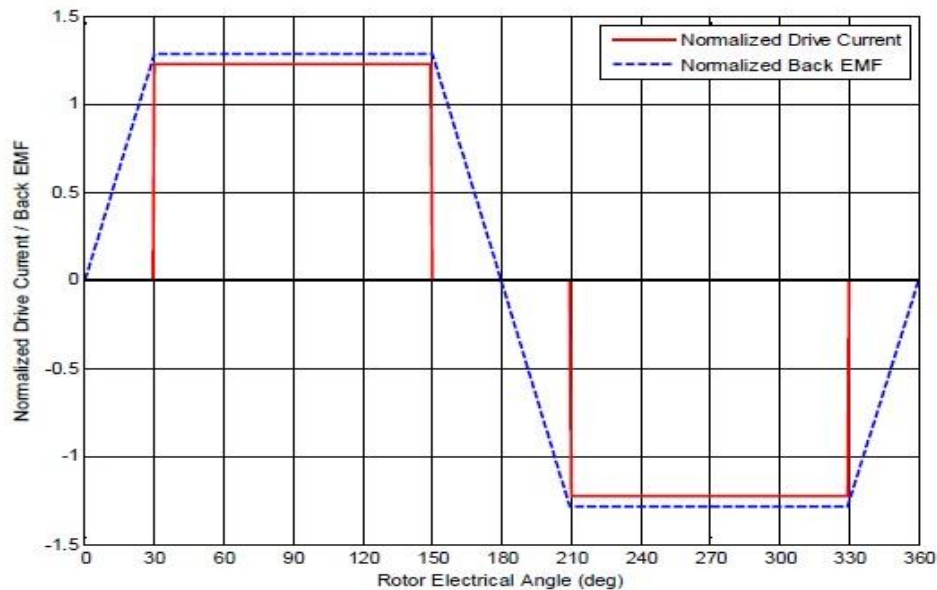
$$P(t) = 3I(t) * E(t) = \tau(t) * \omega_m$$
$$P_{avg} = 3 \frac{1}{T} \int_0^T I(t) * E(t) * dt = \tau_{avg} * \omega_m$$

Αν υποθέσουμε ότι η Α-ΗΕΔ και τα ρευματα στις φάσεις είναι τέλειαις ημιτονικής μορφής, τότε ο μέσος όρος της ισχύος που παράγεται στις τρεις φάσεις είναι τρεις φορές η RMS τιμή της τάσης. Αν θεωρήσουμε το πλάτος της τάσης κανονικοποιημένο στο $1V_{rms}$ τότε η μέση ισχύς είναι ίση με 3.

Επειδή όπως αποδεικνύεται, το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων κάθε χρονική στιγμή είναι μηδέν, η στιγμιαία ισχύς είναι ίδια σε όλες τις γωνίες του ηλεκτρικού κύκλου. Αυτό συνεπάγεται ότι και η παραγωγή ροπής είναι σταθερή, δηλαδή δεν παρουσιάζεται καθόλου κυμάτωση ροπής.

Η δεύτερη περίπτωση της τραπεζοειδούς διαμόρφωσης με μεταγωγές έξι βημάτων φαίνεται πιο απλή και είναι εύκολα αντιληπτό ότι σε όλες τις γωνίες που η Α-ΗΕΔ δεν είναι σταθερή το ρεύμα που διαρρέει τη φάση είναι μηδέν.

Στο **Σχήμα.10** [1] φαίνεται η η τραπεζοειδής A-HEΔ και οι μεταγωγές ρεύματος έξι βημάτων σε κανονικοποιημένη τιμή RMS μονάδα.



Σχήμα.10: Ιδανική τραπεζοειδής A-HEΔ με μεταγωγές ρεύματος έξι βημάτων σε κανονικοποιημένη τιμή RMS μονάδα.

Με τη χρήση των κυματομορφών αυτών η κανονικοποιημένη μέση ισχύς στις τρεις φάσεις υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{avg} = 3 \frac{1}{T} \int_0^T I(t) * E(t) * dt = 3 \left(\frac{2}{3}\right) \left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) \left(\frac{9}{7}\right) \approx 3.15$$

Τιμή η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή της ημιτονικής οδήγησης. Επίσης αν υποθέσουμε ότι οι μεταβάσεις είναι ιδανικές και ακαριαίες τότε και η μετατροπή ισχύος θεωρητικά παραμένει και αυτή σταθερή. Η δεύτερη αυτή περίπτωση φαίνεται να πλεονεκτεί και ποσοτικά μιας και παράγει και 5% περισσότερη ροπή, δεν έχει κυμάτωση ροπής και ο κινητήρας θα μπορεί να έχει μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής σε δεδομένη DC τάση μιάς και έχει επίπεδο μέγιστο πλάτος.

Το παραπάνω θα ήταν πραγματικό σενάριο αν οι κινητήρες παρουσίαζαν μηδενική αυτεπαγωγή μιας και στην παραπάνω ανάλυση σκόπιμα δεν ελήφθη καθόλου υπόψη η παράμετρος αυτή. Τα μειονεκτήματα της τραπεζοειδούς διαμόρφωσης γίνονται εμφανή μόλις συμπεριληφθεί στην ανάλυση η παράμετρος της αυτεπαγωγής.

Κατά τη διάρκεια των μεταγωγών έξι βημάτων οι μεταβολές στα ρεύματα των τυλιγμάτων δεν γίνονται ακαριαία αλλά απαιτείται ένας χρόνος ανόδου και καθόδου. Σε αυτές τις μεταβάσεις η επιδράση της αυτεπαγωγής επηρεάζει σημαντικά την ομαλή λειτουργία του κινητήρα επάγοντας ρεύματα στα τυλίγματα μέσω της γέφυρας του ελεγκτή, ακόμα και στις 'off' καταστάσεις των φάσεων. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η παραγωγή ροπής δεν είναι σταθερή και επιπλέον σπατάλη ενέργειας σε θερμότητα στους ημιαγωγούς.

Στην περίπτωση της ημιτονικής μεταγωγής η διαχείριση της αυτεπαγωγής του μοτέρ γίνεται πιο βαθμιαία και ομαλά. Το καθαρό ημίτονο που διαρρέει μια σύνθετη αντίσταση παραμένει πάντα ημίτονο ακόμα και αν υποστεί διαφορά φάσης ή εξασθένηση. Αυτό σημαίνει ότι τα τριφασικά ρεύματα που διαρρέουν το μοτέρ διατηρούν ισοροπημένη λειτουργία με σταθερή ροπή. Η παραγωγή ροπής μπορεί να είναι μειωμένη επειδή τα ρεύματα έπονται της A-HEΔ (η τεχνική FOC τείνει να μειώσει την υστέρηση αυτή), αλλά δεν έχει κυμάτωση.

Συνοψίζοντας θα λέγαμε ότι η κατηγορία BLDC παράγει περίπου 5% υψηλότερη ροπή από τα PMSM καθώς επίσης και περισσότερες μέγιστες στροφές στην ίδια τάση, αλλά στις χαμηλές στροφές παρουσιάζει μεγάλη κυμάτωση ροπής και στις υψηλές στροφές έχει σχετικά χαμηλότερο συντελεστή απόδοσης. Αντίθετα η κατηγορία PMSM με ημιτονική οδήγηση παρουσιάζει ομαλή λειτουργία, υψηλό συντελεστή απόδοσης σε όλο το εύρος των στροφών αρκεί να εφαρμόζεται κατάλληλο σύστημα ελέγχου θέσης του ρότορα και μεταγωγών.

Κεφάλαιο

2. Ο DSP piccolo TMS320F28027.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρουσίαση του piccolo TMS320F28027 της Texas Instruments και θα αναλυθούν τα πιο βασικά τμήματα του μικροελεγκτή αυτού. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στα τμήματα που έχουν κύριο ρόλο στην παραγωγή PWM με τελικό στόχο την παραγωγή SPWM για την οδήγηση κινητήρων χωρίς ψύκτρες. Η επιλογή του μικροελεγκτή έγινε με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής και λόγω του γεγονότος ότι η Texas Instruments τον παράγει για εφαρμογές σαν αυτή της οδήγησης ηλεκτρικών κινητήρων.

2.1 Γενική περιγραφή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του TMS320F28027 (60MHz) της εφαρμογής μας, παρατίθενται παρακάτω σύμφωνα με το φύλο δεδομένων του κατασκευαστή[10].

TMS320F2802x, TMS320F2802xx (Piccolo) MCUs

ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:

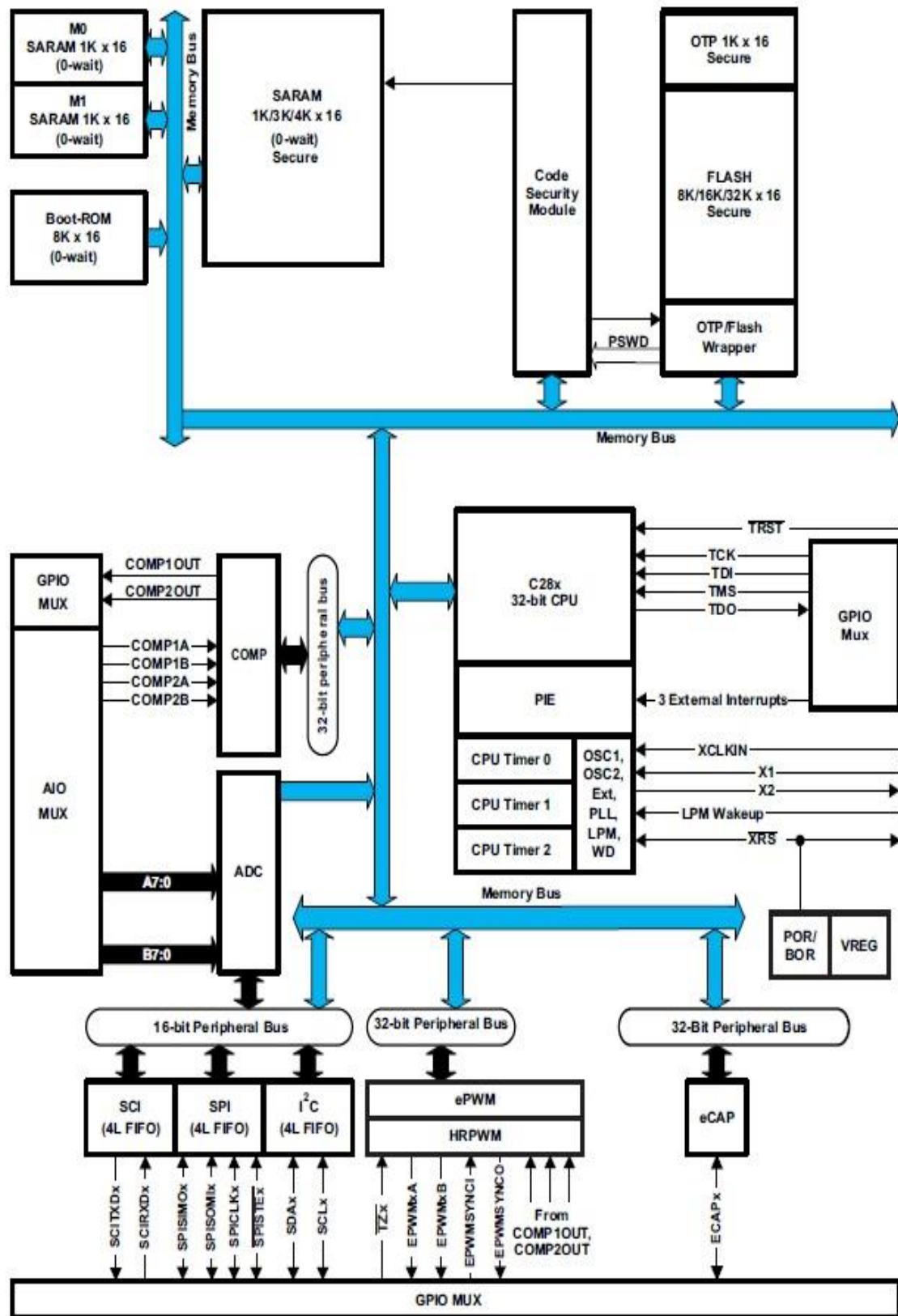
- Υψηλής Απόδοσης 32-Bit CPU (TMS320C28x™).
- Peripheral Interrupt Expansion (PIE).
 - 60 MHz (16.67-ns διάρκεια κύκλου).
 - On-Chip Μνήμη.
 - Αρχιτεκτονική Harvard Bus.
 - Τροφοδοσία 3.3-V
 - Μονάδα SPI.
 - Ενσωματωμένος διάυλος (I2C).
 - Περιφερειακά αυξημένου ελέγχου.
 - Χαμηλής Ισχύος

- Υψηλής ανάλυσης μονάδα PWM (HRPWM).
- Αναλογικός σε ψηφιακό μετατροπέα (ADC).
- Δύο εσωτερικοί ταλαντωτές.
- Αισθητήρας θερμοκρασίας ενσωματωμένος.
- Debug σε πραγματικό χρόνο μέσω Hardware.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- Λευκά Είδη.
- Τροφοδοτικά Ισχύος (Switch Mode Power Supplies).
- Μετατροπείς DC-DC πολλαπλών εξόδων .
- Αντιστροφείς ηλιακών πάνελ.
- Τροφοδοτικά LED.
- Διόρθωση συντελεστή ισχύος.
- Ηλεκτρικά ποδήλατα (eBikes).
- Ηλεκτρικά οχήματα.

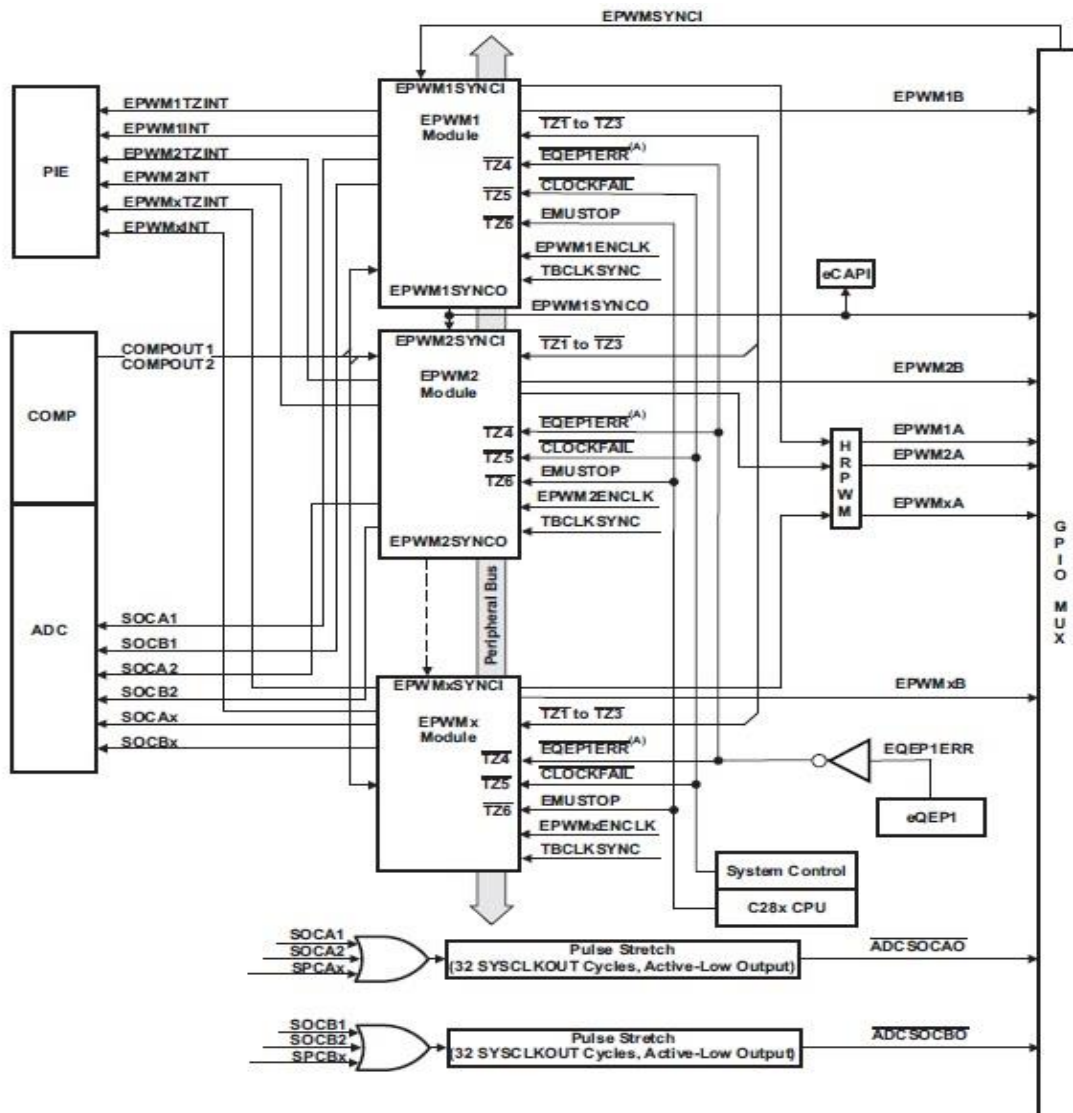
TMS320F28027 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ [9]



Σχήμα.11: Μπλόκ διάγραμμα εσωτερικής διάταξης και λειτουργίας του TMS320F28027.

2.2 Timer και παραγωγή PWM.

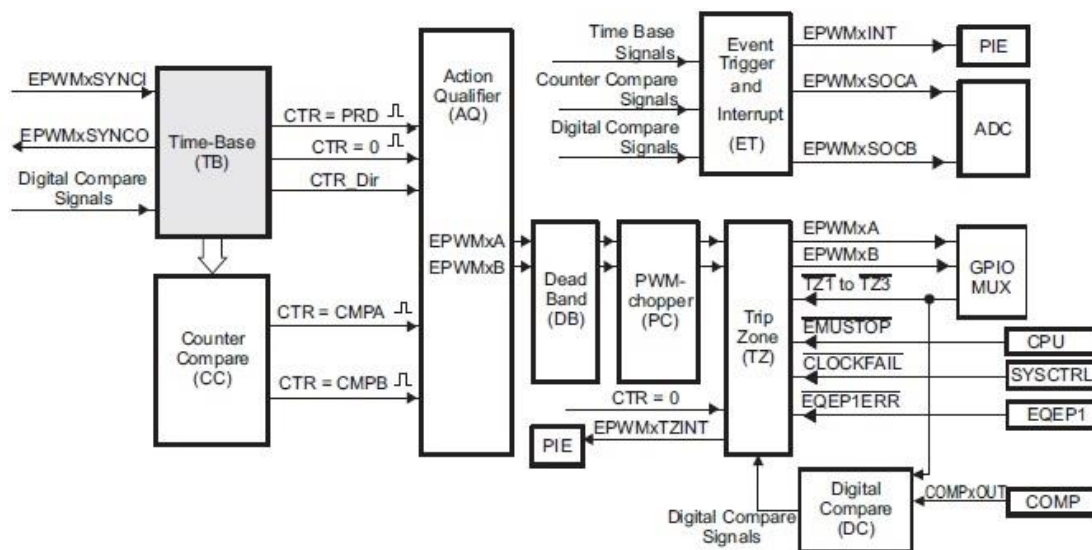
Η περιφερειακή μονάδα ePWM (enhanced pulse width modulator) έχει τη δυνατότητα να παράγει σύνθετες κυματομορφές διαμόρφωσης εύρους παλμού με ελάχιστη παρέμβαση της CPU. Η μονάδα ePWM περιλαμβάνει τέσσερις ανεξάρτητες υπο-μονάδες που μπορούν να δουλέψουν και συγχρονισμένα. Κάθε μια από αυτές με τη σειρά τους έχουν δύο εξόδους PWM (EPWM1A-EPWM1B... EPWM4A-EPWM4B). Δηλαδή συνολικά υπάρχουν οκτώ εξοδοί PWM (EPWMxA, EPWMxB) οι οποίες καταλήγουν στα GPIO pins. Οι τέσσερις από τις οκτώ μπορούν να δουλέψουν και σαν HRPWM (high resolution) αλλά δεν εξετάζεται στην παρούσα εφαρμογή. Στο **Σχήμα.12** παρουσιάζεται η εσωτερική διάταξη της μονάδας του ePWM [8].



Σχήμα.12: ePWM module.

2.2.1 Υπομονάδα Time-Base (TB).

Η μονάδα του ePWM περιλαμβάνει διάφορες υπο-μονάδες [8]. Η πιο σημαντική όμως είναι αυτή του **Time Base (TB)** διότι αυτή καθορίζει όλους τους χρονισμούς που απαιτούνται για την παραγωγή των PWM. Κάθε ePWM έχει τον δικό της TB για να λειτουργεί χρονικά ανεξάρτητη αλλά υπάρχει και ενσωματωμένη λογική μονάδα συγχρονισμού η οποία μπορεί να συγχρονίσει και τις τέσσερις ePWM να λειτουργούν σαν μια. Το **Σχήμα.13** δείχνει τη θέση του TB μέσα στη μονάδα του ePWM.



Σχήμα.13: Διάγραμμα μπλοκ του Time-Base μέσα στην ePWM.

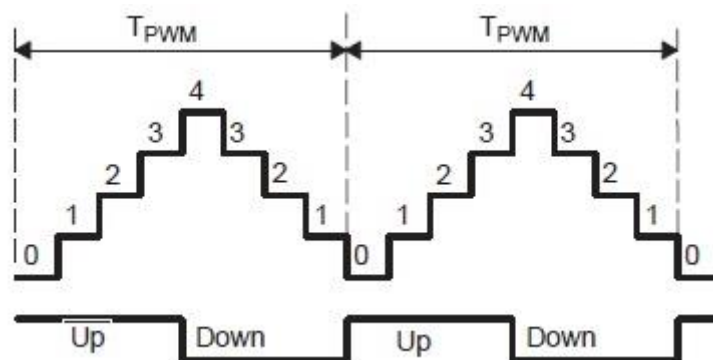
Οι κυριότερες λειτουργίες της υπο-μονάδας του Time-Base είναι οι εξής:

- ❖ Καθορίζει τη συχνότητα που έχει ο time-base counter (TBCTR) της ePWM ή την περίοδο ελέγχου ενός γεγονότος.
- ❖ Διαχειρίζεται τον συγχρονισμό μεταξύ των ePWM μονάδων.
- ❖ Διατηρεί μια συσχέτιση φάσης μεταξύ των ePWM μονάδων.
- ❖ Καθορίζει τον τρόπο μέτρησης του TBCTR (count-up, count-down, count-up-and-down).
- ❖ Παράγει τα γεγονότα CTR=PRD και CTR=Zero.
- ❖ Ρυθμίζει το ρολόι του time-base clock.

Η συχνότητα του παραγόμενου PWM καθορίζεται από τον καταχωρητή time-base period (TBPRD) και από το mode λειτουργίας του time-base counter:

- ❖ **Up-Down-Count Mode:** Σε αυτό το mode ο (TBCTR) ξεκινά από το μηδέν και αυξάνει μέχρι την προκαθορισμένη τιμή του (TBPRD). Μόλις φτάσει σε αυτή την τιμή ο (TBCTR) ελαττώνεται μέχρι την τιμή μηδέν όπου και ξεκινά από την αρχή.
- ❖ **Up-Count Mode:** Σε αυτό το mode ο (TBCTR) ξεκινά από το μηδέν και αυξάνει μέχρι την προκαθορισμένη τιμή του (TBPRD). Μόλις φτάσει σε αυτή την τιμή ο (TBCTR) επανέρχεται στο μηδέν όπου και ξεκινά από την αρχή.
- ❖ **Down-Count Mode:** Σε αυτό το mode ο (TBCTR) ξεκινά από την προκαθορισμένη τιμή του (TBPRD) και ελαττώνεται μέχρι την τιμή μηδέν. Μόλις φτάσει στο μηδέν ο (TBCTR) επανέρχεται στην τιμή (TBPRD) όπου και ξεκινά από την αρχή.

Στην εφαρμογή της εργασίας αυτής ο counter λειτουργεί σε Up-Down-Count Mode. Στο **Σχήμα.14** η μέγιστη τιμή είναι το τέσσερα (TBPRD=4). Από το μηδέν μέχρι το τέσσερα η έξοδος είναι λογικό '1' και από το τέσσερα μέχρι το μηδέν είναι '0' [8].



Σχήμα.14: Παραγωγή PWM σε Up-Down-Count Mode.

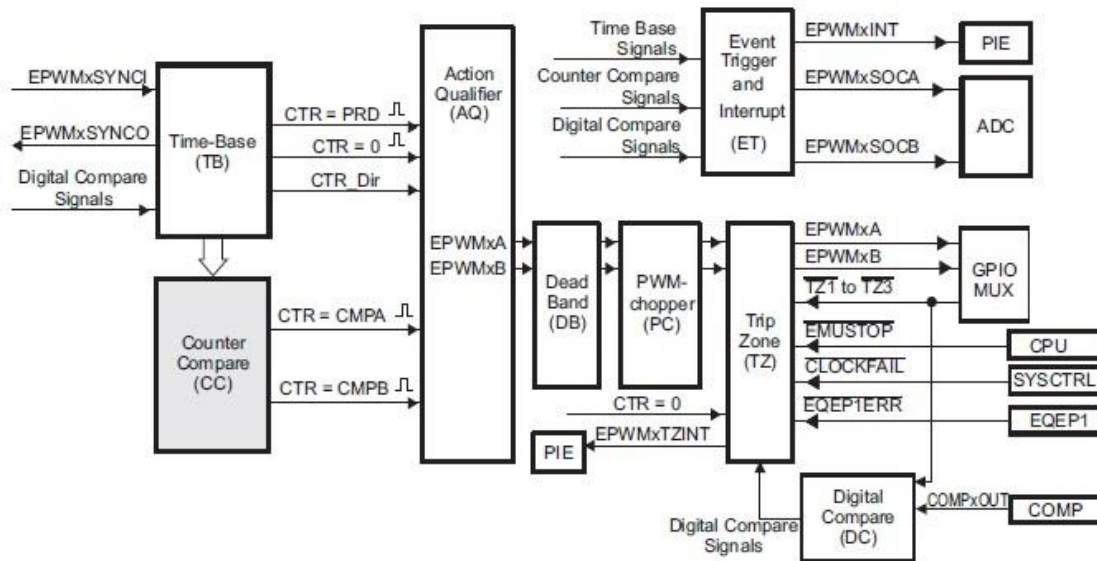
Η περίοδος και η συχνότητα του PWM δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{PWM} = 2 \times TBPRD + T_{TBCLK}$$

$$F_{PWM} = 1 / T_{PWM}$$

2.2.2 Υπομονάδα Counter-Compare (CC).

Η υπομονάδα counter-compare παίρνει σαν είσοδο την τρέχουσα τιμή του TBCTR και τη συγκρίνει συνεχώς με τις τιμές των καταχωρητών counter-compare A (CMPA) και counter compare B (CMPB). Όταν η τιμή του TBCTR γίνει ίση με μια από αυτές τιμές, τότε ο CC παράγει ένα προκαθορισμένο γεγονός. Στο **Σχήμα.15** φαίνεται η θέση του CC μέσα στην ePWM [8].



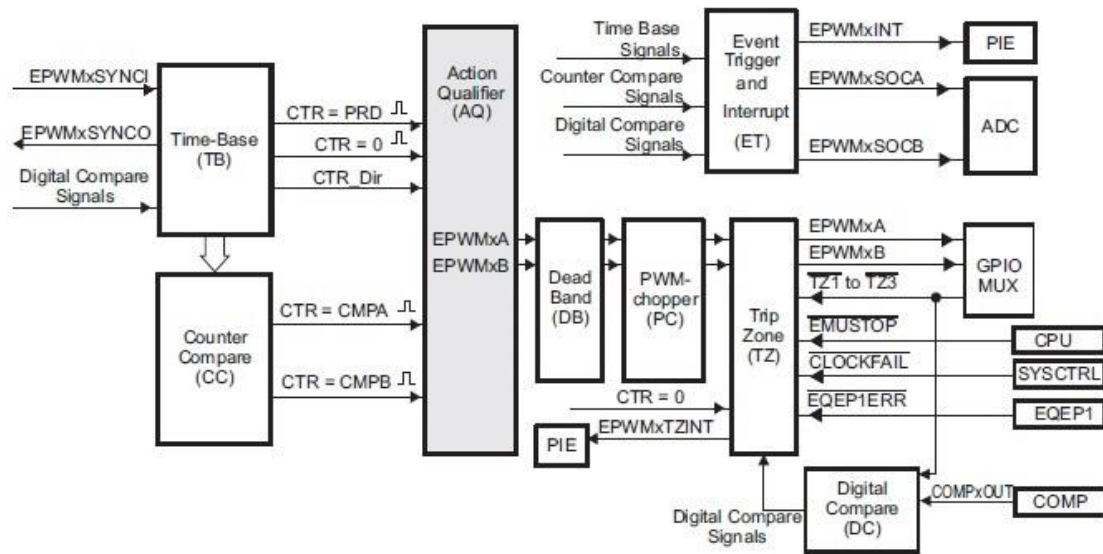
Σχήμα.15: Υπομονάδα του counter-compare (CC).

Ο counter-compare μπορεί να παράγει δύο ξεχωριστά γεγονότα που αντιστοιχούν στον CMPA και στον CMPB, τα οποία και τροφοδοτεί στη συνέχεια στην υπομονάδα του action-qualifier (AQ) ο οποίος τα μετατρέπει σε προκαθορισμένες λειτουργίες.

2.2.3 Υπομονάδα Action-Qualifier (AQ).

Η υπομονάδα του action-qualifier (AQ) παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην κατασκευή και παραγωγή των κυματομορφών PWM. Ο AQ αποφασίζει ποιά γεγονότα και με ποια σειρά θα μετατραπούν σε λειτουργίες οι οποίες τελικά παράγουν τις επιθυμητές PWM στις εξόδους.

Στο παρακάτω **Σχήμα.16** απεικονίζεται η θέση του AQ μέσα στην μονάδα του ePWM [8].



Σχήμα.16: Υπομονάδα του action-qualifier (AQ).

Ο AQ παράγει τις λειτουργίες (set, clear, toggle) ανάλογα με τα εξής γεγονότα του TBCTR:

- ❖ **TBCTR=PRD:** equal to the period.
- ❖ **TBCTR=Zero:** equal to zero.
- ❖ **TBCTR=CMPA:** equal to the CMPA register.
- ❖ **TBCTR=CMPB:** equal to the CMPB register.

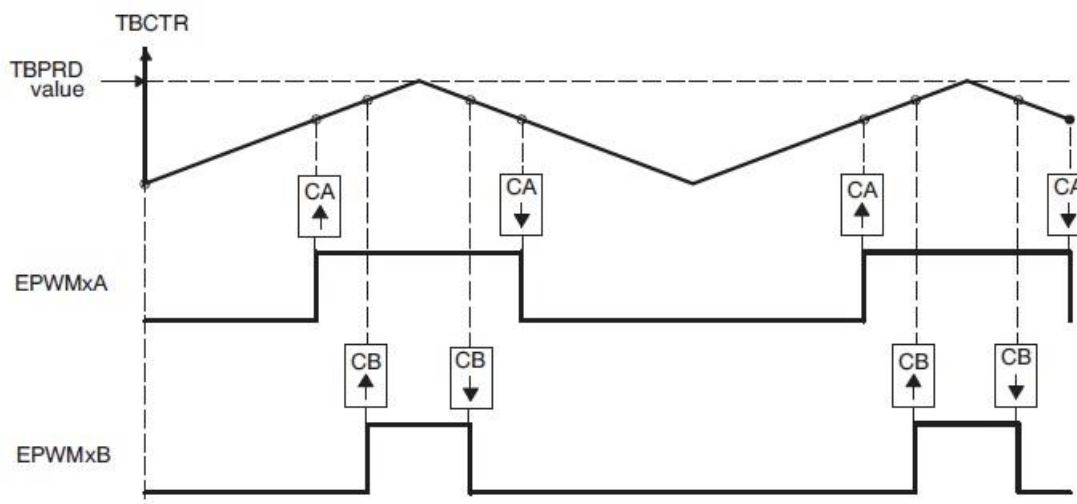
Επίσης καθορίζει την προτεραιότητα στα γεγονότα και παρέχει ανεξάρτητο έλεγχο κατά τη διάρκεια ανόδου και καθόδου του TBCTR.

Οι διαθέσιμες λειτουργίες στις εξόδους της EPWMxA, EPWMxB είναι οι εξής:

- ❖ **Set High:** Set output EPWMxA, EPWMxB to a high level.
- ❖ **Clear Low:** Set output EPWMxA, EPWMxB to a low level.
- ❖ **Toggle:** Change output current state.
- ❖ **Do Nothing:** Keep outputs EPWMxA, EPWMxB at the same level (ενεργο-ποιεί μόνο τα interrupt και τον ADC).

Οι λειτουργίες σε κάθε έξοδο μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα. Δηλαδή κάθε ένα ή όλα, από τα γεγονότα μπορούν να παράγουν λειτουργίες σε μια συγκεκριμένη έξοδο. Για παράδειγμα και ο CTR=CMPA και ο CTR=CMPB μπορούν να οδηγούν την EPWMxA.

Στο **Σχήμα.17** απεικονίζονται δύο ξεχωριστές συμμετρικές PWM η EPWMxA και η EPWMxB σε mode Up-Down-Count, με το ίδιο CMPA και CMPB κατά την άνοδο και κάθοδο αντίστοιχα, του TBCTR και προκαθορισμένη τιμή περιόδου TBPRD [8].



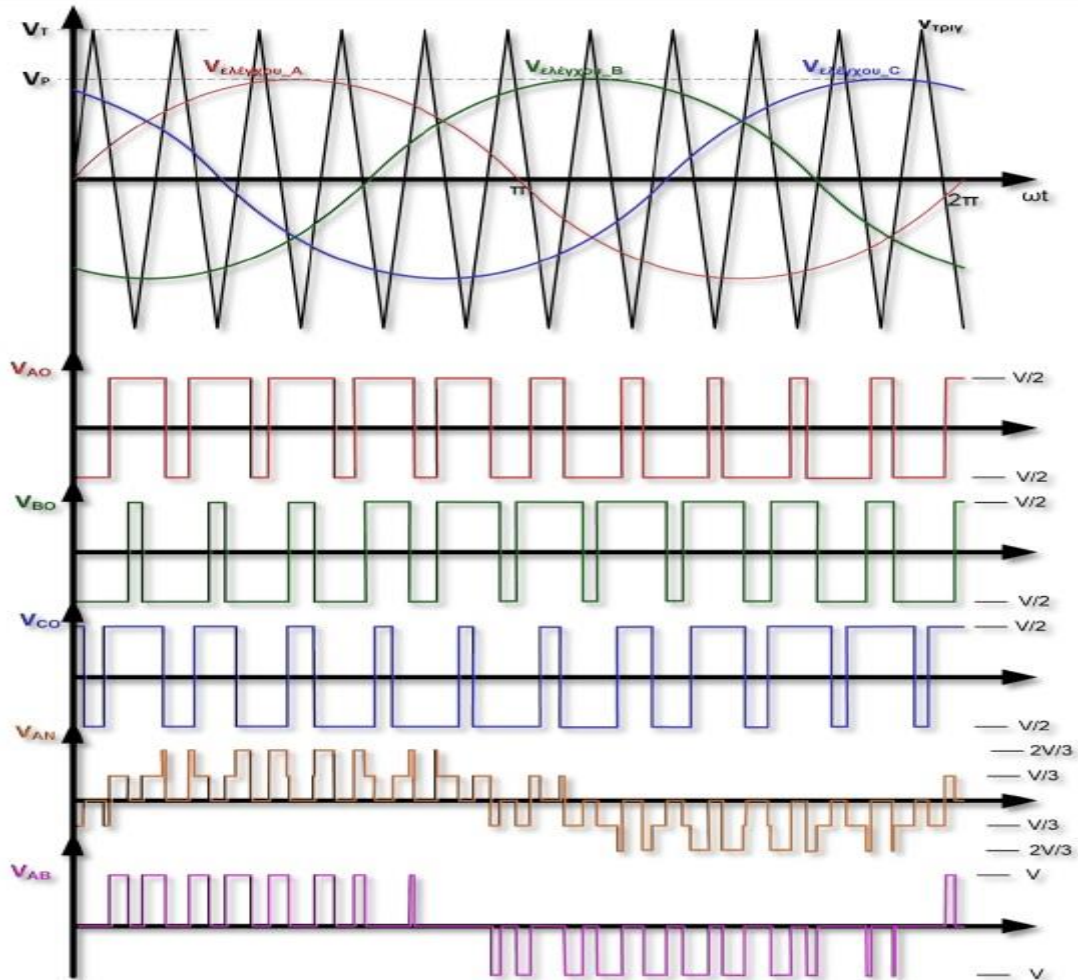
Σχήμα.17: Παραγωγή δύο ανεξάρτητων PWM συμμετρικών, διπλού άκρου, σε Up-Down-Count mode.

Θέτοντας δηλαδή την επιθυμητή τιμή στον TBPRD καθορίζεται η βασική συχνότητα και με την κατάλληλη τιμή στο CMPA καθορίζεται ο κύκλος εργασίας (duty cycle) του PWM.

2.3 Τεχνική παραγωγής SPWM με χρήση PWM.

Η τεχνική της Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) εξασφαλίζει παραγωγή ημιτονοειδούς με ελεγχόμενο πλάτος και πολύ χαμηλή Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion, THD). Η SPWM δημιουργείται με μια τριγωνική κυματομορφή αναφοράς η οποία στην περίπτωση του TMS320F28027 είναι ο TBCTR και με ένα κύκλωμα συγκριτή για τα αναλογικά κυκλώματα, ενώ εδώ πραγματοποιείται με τα CMPA και CMPB.

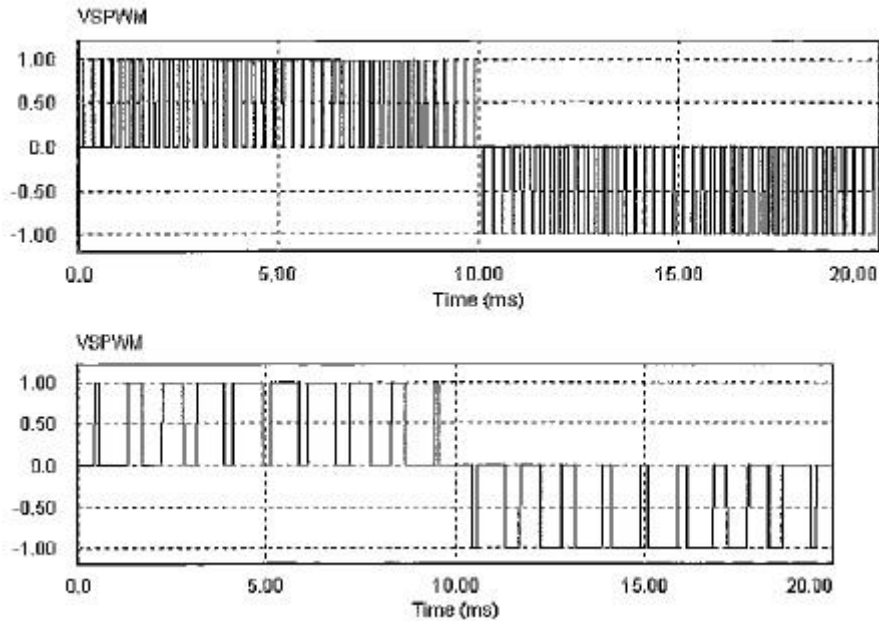
Στο **Σχήμα.18** εμφανίζεται η SPWM καθώς και η κυματομορφή αναφοράς [5].



Σχήμα.18: Ορισμός της SPWM με την κυματομορφή αναφοράς.

Για να παραχθεί τελικά η SPWM θα πρέπει οι τιμές των CMPA και CMPB να μεταβάλλονται ημιτονικά το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μιας PWM με ημιτονικά μεταβαλλόμενο εύρος παλμού. Όταν η έξοδος αυτή οδηγηθεί μέσα από ένα βαθυπερατό φίλτρο εμφανίζεται η ημιτονική κυματομορφή. Όσον αφορά στους τριφασικούς κινητήρες, η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων του στάτη παίζει το ρόλο του φίλτρου, οπότε δεν χρειάζεται επιπλέον φίλτρο.

Στο παρακάτω **Σχήμα.19** απεικονίζεται η SPWM κυματομορφή της τάσης όπως θα πρέπει να εμφανίζεται στον παλμογράφο, με τη χαρακτηριστική μεταβολή του εύρους του παλμού κατά τη διάρκεια μιας περιόδου [4].



Σχήμα.19: Η SPWM κυματομορφή της τάσης κατά τη διάρκεια μιας περιόδου.

Κεφάλαιο

3. Υλοποίηση κώδικα για τον TMS320F28027.

Πρίν την κατασκευή του τριφασικού αντιστροφέα αναπτύχθηκε ο κώδικας για τον TMS320F28027 [10] για την παραγωγή των SPWM κυματομορφών. Ο κώδικας αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού **‘Code Composer Studio 5.5.0’** της Texas Instruments το οποίο δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης κώδικα σε γλώσσα **‘C+’** και σε **Assembly**. Για την παρούσα εφαρμογή ο κώδικας γράφτηκε σε **‘C+’**.

3.1 Ανάπτυξη κώδικα για τριφασικό αντιστροφέα.

Για την ανάπτυξη του κώδικα του τριφασικού αντιστροφέα χρησιμοποιήθηκαν εκτός της κύριας ρουτίνας τρεις ακόμα υπορουτίνες, οι οποίες όλες μαζί συνθέτουν τις τελικές SPWM εξόδου προς την τριφασική γέφυρα.

Αρχικά ορίζονται οι καλούμενες βιβλιοθήκες που απαιτούνται για την άντληση όλων των πληροφοριών ρύθμισης των υπομονάδων του piccolo καθώς επίσης και των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στις παρακάτω υπορουτίνες. Δηλώνονται οι TIMER της κάθε EPWM και αρχικοποιούνται στην τιμή 3000 η οποία βάσει της σχέσης που αναφέρεται στο κεφάλαιο 2.2.1 μας δίνει βασική συχνότητα της PWM στα 10KHz. Μετά δηλώνεται και ορίζεται ο ημιτονικός πίνακας που αποτελείται από 3069 στοιχεία με τιμές πλάτους από 0 έως 255. Ο πίνακας είναι για την μισή περίοδο και αυτό γίνεται για να εξοικονομηθεί μνήμη στον piccolo μιας και διαφορετικά θα απαιτούνταν 6138 στοιχεία. Από τον πίνακα αυτό παίρνουν δείγματα τα CPMA και CMPB σε κάθε EPWM. Δηλαδή, καθώς αυξάνει ο δείκτης στον πίνακα παίρνουν τα CPMA και CMPB διαδοχικά τις ημιτονικά μεταβαλλόμενες τιμές και βγάζουν στην έξοδο PWM κυματομορφή με ημιτονικά μεταβαλλόμενο εύρος παλμού.

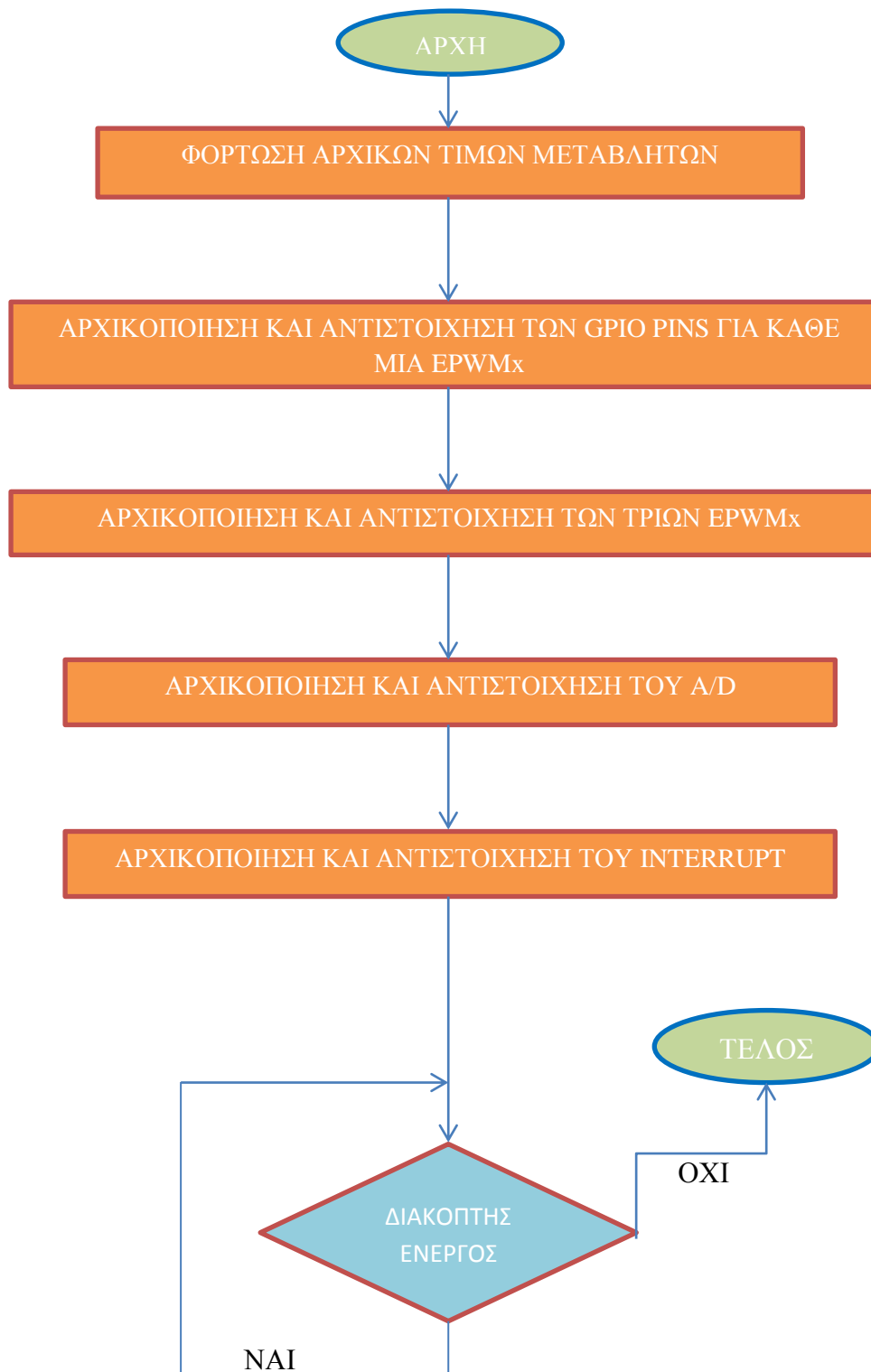
Στη συνέχεια μέσα στο κυρίως προγραμμα αρχικοποιούνται τα GPIO των EPWM, το INTERRUPT και ο ADC με τα αντίστοιχα κανάλια του.
[11]

Μέσα στη ρουτίνα εξυπηρέτησης του INTERRUPT, διαβάζεται αρχικά η τιμή της τάσης της πηγής απο τον ADC και αν αυτή είναι μικρότερη από τα 20V, μηδενίζει τις εξόδους και σταματάει εκει για λόγους ασφαλείας. Αν είναι μεγαλύτερη διαβάζεται απο τον ADC η θέση του ρυθμιστή στροφών (γκάζι) και στη συνέχεια βάσει της σχέσης συχνότητας-πλάτους υπολογίζεται ο συντελεστής συχνότητας πλάτους. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται παρακάτω για τον τελικό υπολογισμό του πλάτους στην έξοδο. Στο σημείο αυτό ορίζεται και η διαφορά φάσης 120° των τριών δειγμάτων των τριών φάσεων βάζοντας τον κάθε δείκτη να απέχει στον πίνακα κατά 2046 στοιχεία. Μετά γίνεται κλήση των υπορουτινών των EPWM που φτιάχνουν το τελικό πλάτος και συχνότητα και τέλος αυξάνεται ο δείκτης του πίνακα τόσο, όσο ορίζει ο συντελεστής συχνότητας.

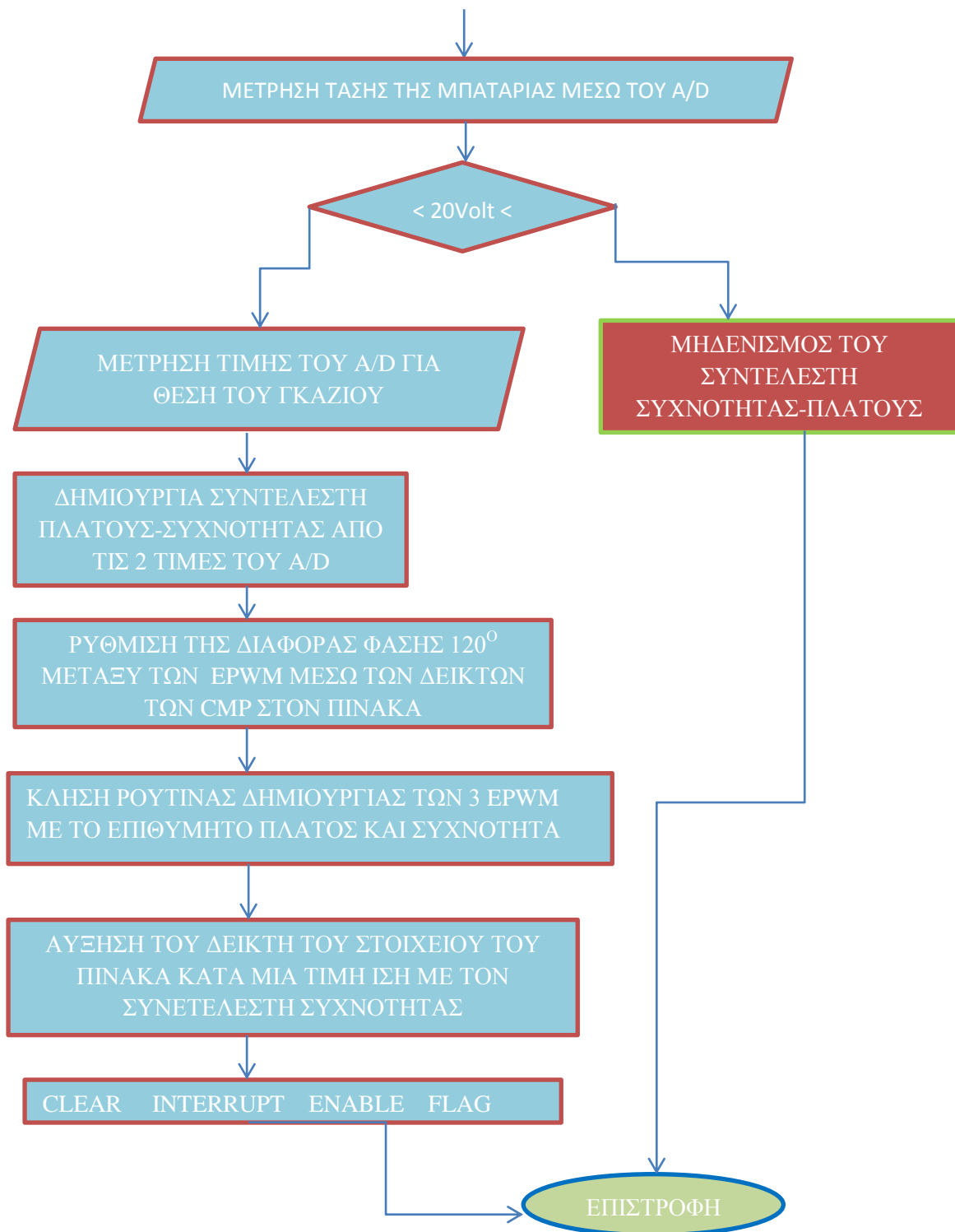
Οι PWM με τη σειρά τους, ρυθμίζονται μέσα στη δική τους υπορουτίνα η οποία ξεκινά με την αρχικοποίηση του TBCTR. Ορίζεται στη συνέχεια το UPDOWN COUNT MODE που θέλουμε να λειτουργεί ο counter και οι στάθμες **low** και **high** κατά την **άνοδο** και **κάθοδο** του counter αντίστοιχα. Ορίζονται επίσης οι λειτουργίες του INTERRUPT για να ενεργοποιείται σε κάθε μηδενισμό του counter και να ‘συνδεθεί’ με την EPWM1.

Στο τελευταίο μέρος του κώδικα γίνονται οι πιο ουσιαστικές πράξεις για την παραγωγή της SPWM. Αρχικά ορίζεται το μέσο της μέγιστης τιμής του counter που είναι το ‘1500’, να αποτελεί τον κοινό κόμβο του μηδενικού πλάτους και για τις τρεις φάσεις. Επομένως η ημιτονική κυματομορφή θα παίρνει τιμές από ‘0’ μέχρι ‘1500’ και προσθέτοντας την στον κόμβο του μηδενός, θα παίρνει τη μέγιστη θετική τάση (το ‘3000’ του counter), ενώ αφαιρώντας την απο το ‘1500’ θα παίρνει τη μέγιστη αρνητική τάση (το ‘0’ του counter). Οι τιμές του πίνακα κυμαίνονται από ‘0’ εως ‘255’ επομένως πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή πλάτους-συχνότητας με την τρέχουσα τιμή του πίνακα, παίρνουμε το επιθυμητό πλάτος στην έξοδο (από ‘0’ μέχρι ‘1500’). Τέλος γίνεται έλεγχος θέσης για θετική ή αρνητική ημιπερίοδο και γίνεται πρόσθεση ή αφαίρεση της τιμής του τελικού πλάτους αντίστοιχα, προκειμένου να δημιουργηθεί η επιθυμητή SPWM στην έξοδο.

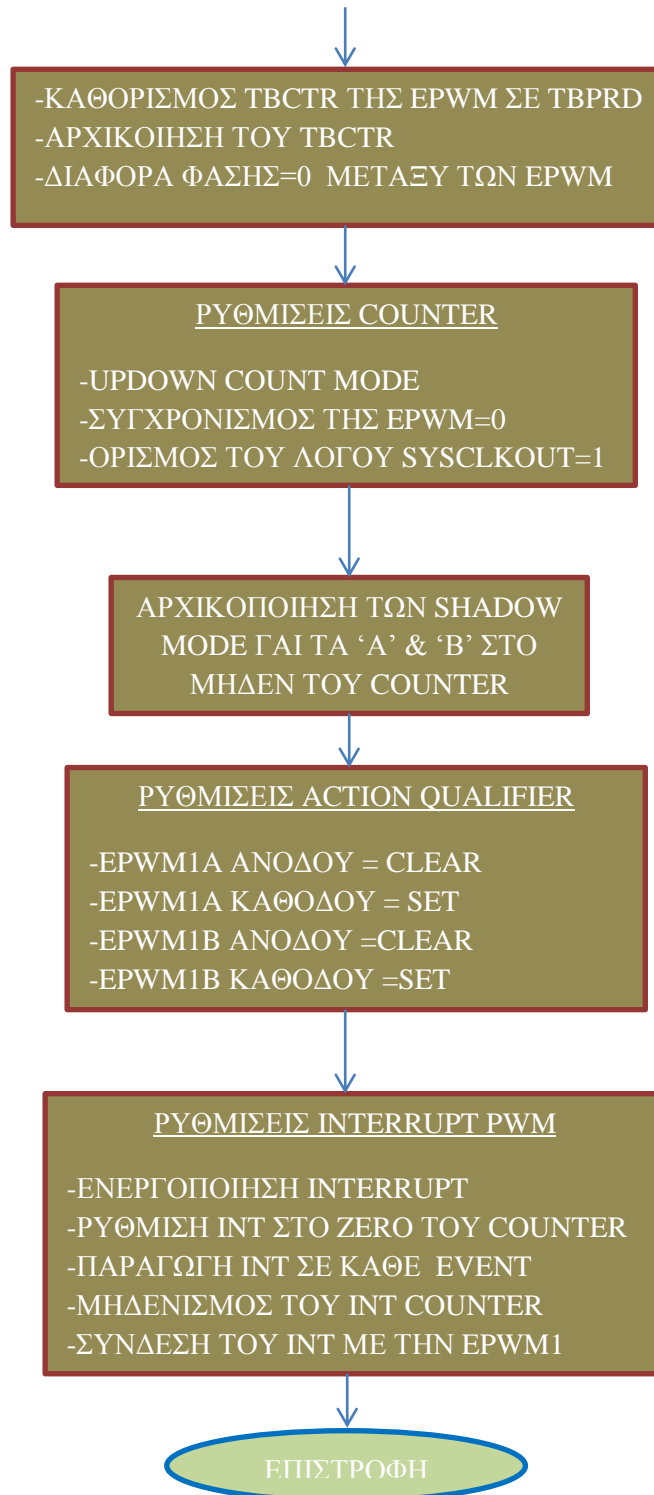
3.1.1 Κυρίως πρόγραμμα.



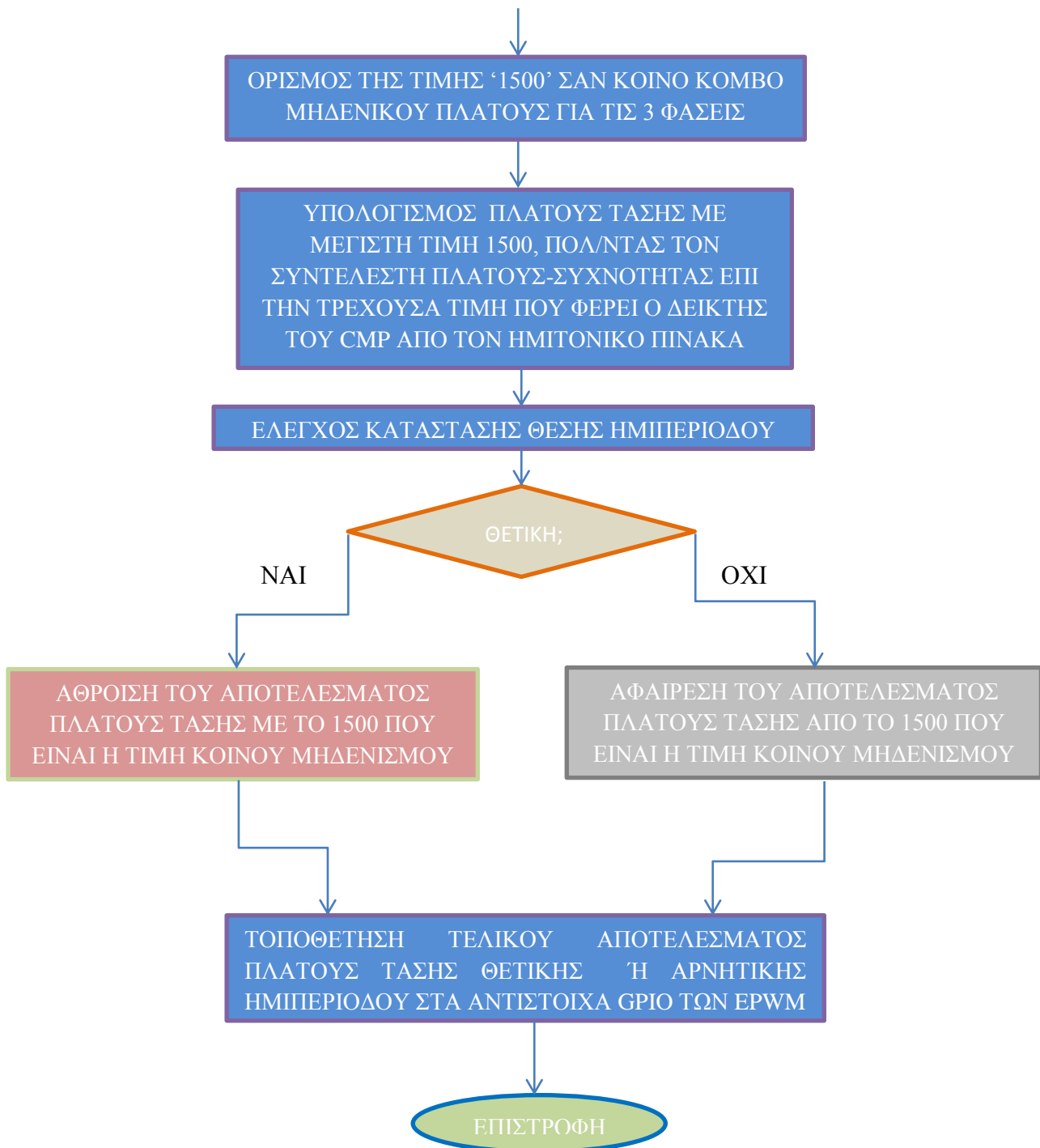
3.1.2 Ρουτίνα εξυπηρέτησης Interrupt.



3.1.3 Ρουτίνα αρχικοποίησης των ΕΡWΜ.



3.1.3 Ρουτίνα σύγκρισης και ανίχνευσης ημιπεριόδου.



3.2 Βελτιστοποίηση κώδικα.

Το παραπάνω πρόγραμμα επιδέχεται βελτιώσεις σε διάφορα σημεία προκειμένου να είναι πιο αποτελεσματικός στις διάφορες λειτουργίες. Αρχικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πίνακας ολόκληρης περιόδου ο οποίος απαιτεί μεν περισσότερη μνήμη, χρειάζεται όμως λιγότερες πράξεις διότι πραγματοποιεί λιγότερους ελέγχους. Έτσι απομένει περισσότερη επεξεργαστική ισχύς για ελέγχους που θα χρειαστούν για μελλοντικό έλεγχο του κινητήρα.

Ακόμα ένα βήμα βελτίωσης είναι η σχέση συχνότητας πλάτους που χρησιμοποιήθηκε, η οποία είναι γραμμική. Μπορούν να εφαρμοστούν σχέσεις εκθετικές ή ακόμα και συνδυασμός αυτών προκειμένου να οδηγηθεί ο κινητήρας διαφορετικά.

Κεφάλαιο

4. Πειραματικό μέρος - Κατασκευές.

Για την υλοποίηση του αντιστροφέα σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τρεις διαφορετικοί αντιστροφείς με σκοπό την πραγματοποίηση μετρήσεων και δοκιμών σε PMSM κινητήρα. Σε όλους χρησιμοποιήθηκε το μικρό αναπτυξιακό **LaunchPad XL, της σειράς C2000, της TEXAS INSTRUMENTS**. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι δυο από αυτούς μιας και ο ένας δεν είχε την αναμενόμενη αξιοπιστία. Ο πρώτος αντιστροφέας κατασκευάστηκε με ‘through hole’ εξαρτήματα διότι η σχεδίαση της πλακέτας είναι πιο απλή και είναι πιο διαχειρίσιμα σε περιπτώσεις αστοχίας. Ο δεύτερος κατασκευάστηκε με SMD εξαρτήματα με στόχο τη μείωση του μεγέθους. Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές των αντιστροφέων, είναι ο AXI5345/18 και επιλέχθηκε επειδή έχει ημιτονική A-HEΔ.

4.1 Ο κινητήρας AXI5345/18.

Το μοτέρ της δοκιμής είναι το AXI5345/18 της Model Motors το οποίο χρησιμοποιείται σε αερομοντέλα μεγέθους μέχρι και 15kg. Το συγκεκριμένο μοτέρ ανακατασκευάστηκε πλήρως λόγω πτώσης του μοντέλου στην προηγούμενη χρήση. Η ονομαστική του ισχύς είναι περίπου 3,1KW, λειτουργεί σε τάση 50V και με μέγιστο ρεύμα 63A σε συνεχή λειτουργία.

Στην παρακάτω **Εικόνα.1** φαίνεται το μοτέρ κατά την ανακατασκευή, μετά τη χημική βαφή του χιτονίου του ρότορα. Φαίνονται επίσης οι συγκολήσεις στη βάση έδρασης του στάτη.



Εικόνα.1: Το μοτέρ κατά τη διαδικασία επισκευής.

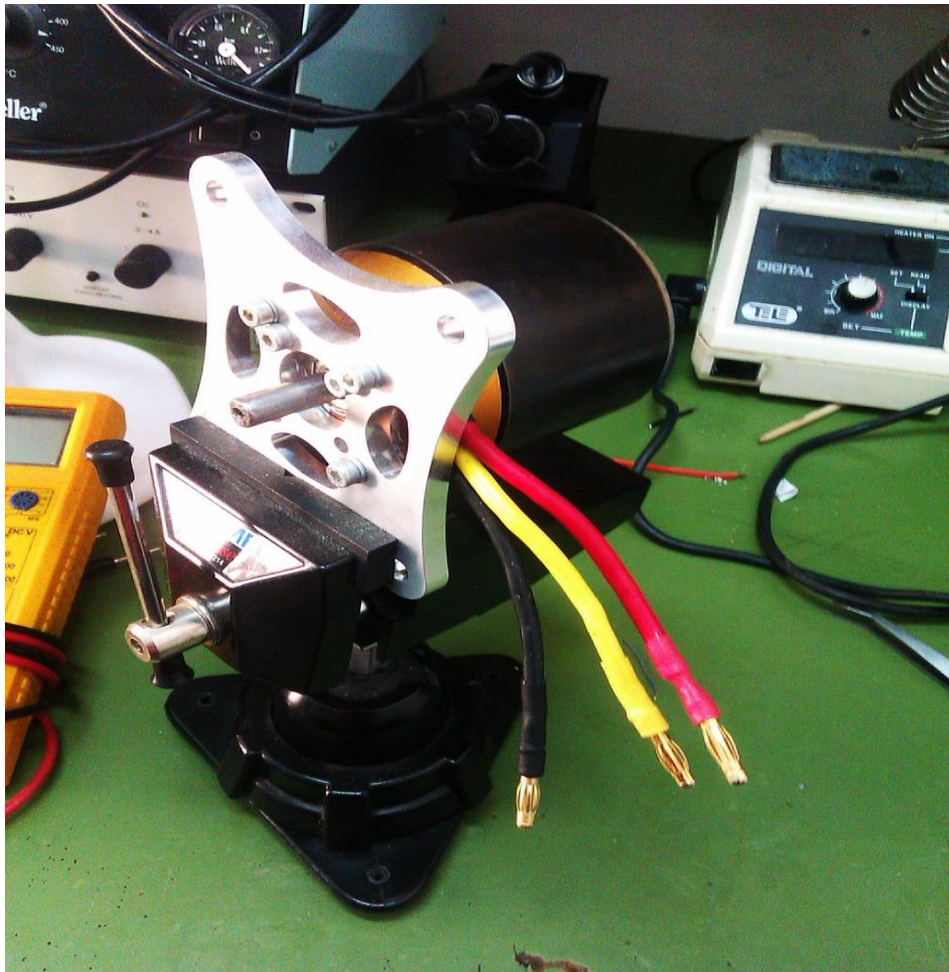
Κατασκευαστικά είναι ένα μοτέρ ‘outrunner’ συνδυασμού 12 οδοντώσεων και 14 πόλων με μαγνήτες νεοδυμίου. Παράγει Α-ΗΕΔ ημιτονικής κυματομορφής οπότε σύμφωνα με τη θεωρία ανήκει στην κατηγορία των PMSM, παρ’όλο που οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται στον μοντελισμό λειτουργούν σε BLDC mode. Στην **Εικόνα.2** φαίνεται ο ρότορας μετά την προσαρμογή του χιτωνίου και κατά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης των μόνιμων μαγνητών με την εποξική κόλλα.



Εικόνα.2: Ο ρότορας κατά την τοποθέτηση μόνιμων μαγνητών με εποξική κόλλα.

Για τη οδήγηση του συγκεκριμένου μοτέρ και την πλήρη εκμετάλευση των δυνατοτήτων του, απαιτείται αντιστροφέας ο οποίος να μπορεί να διαχειρίζεται ρεύματα τουλάχιστον 60Α και τάσης λειτουργίας 50V. Βάσει αυτών των χαρακτηριστικών σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν οι δύο τύποι αντιστροφέων που αναλύονται στα παρακάτω κεφάλαια.

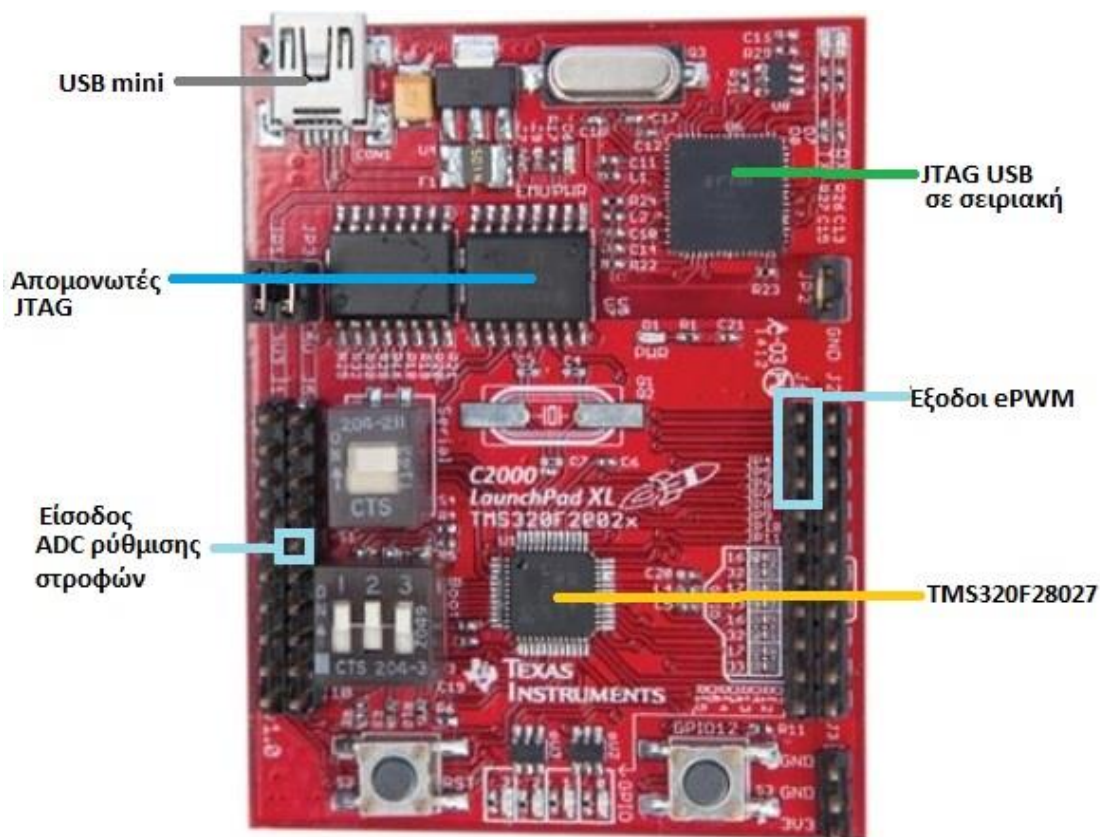
Στην **Εικόνα.3** φαίνεται το μοτέρ μετά την ολοκλήρωση της επισκευής.



Εικόνα.3: Ολοκλήρωση επισκευής του μοτέρ.

4.2 Κατασκευές των τριφασικών αντιστροφέων.

Όπως προαναφέρθηκε και στις δύο περιπτώσεις αντιστροφέων χρησιμοποιήθηκε στο ψηφιακό τμήμα το **LaunchPad XL**, της **TEXAS INSTRUMENTS** που προγραμματίστηκε με τον κώδικα του κεφαλαίου.3 και το οποίο τροφοδοτεί τα κυκλώματα ισχύος με την κατάλληλη SPWM. Λόγω του μαζεμένης σχεδίασης και της διάταξης των pins η κατασκευή αυτού του αναπτυξιακού βολεύει για την οδήγηση κατασκευών μεγάλης ισχύος και μικρού μεγέθους. Στην **Εικόνα.4** φαίνεται το LaunchPad XL με τα GPIO pins δεξιά και αριστερά για τις απαιτούμενες εισόδους και εξόδους.

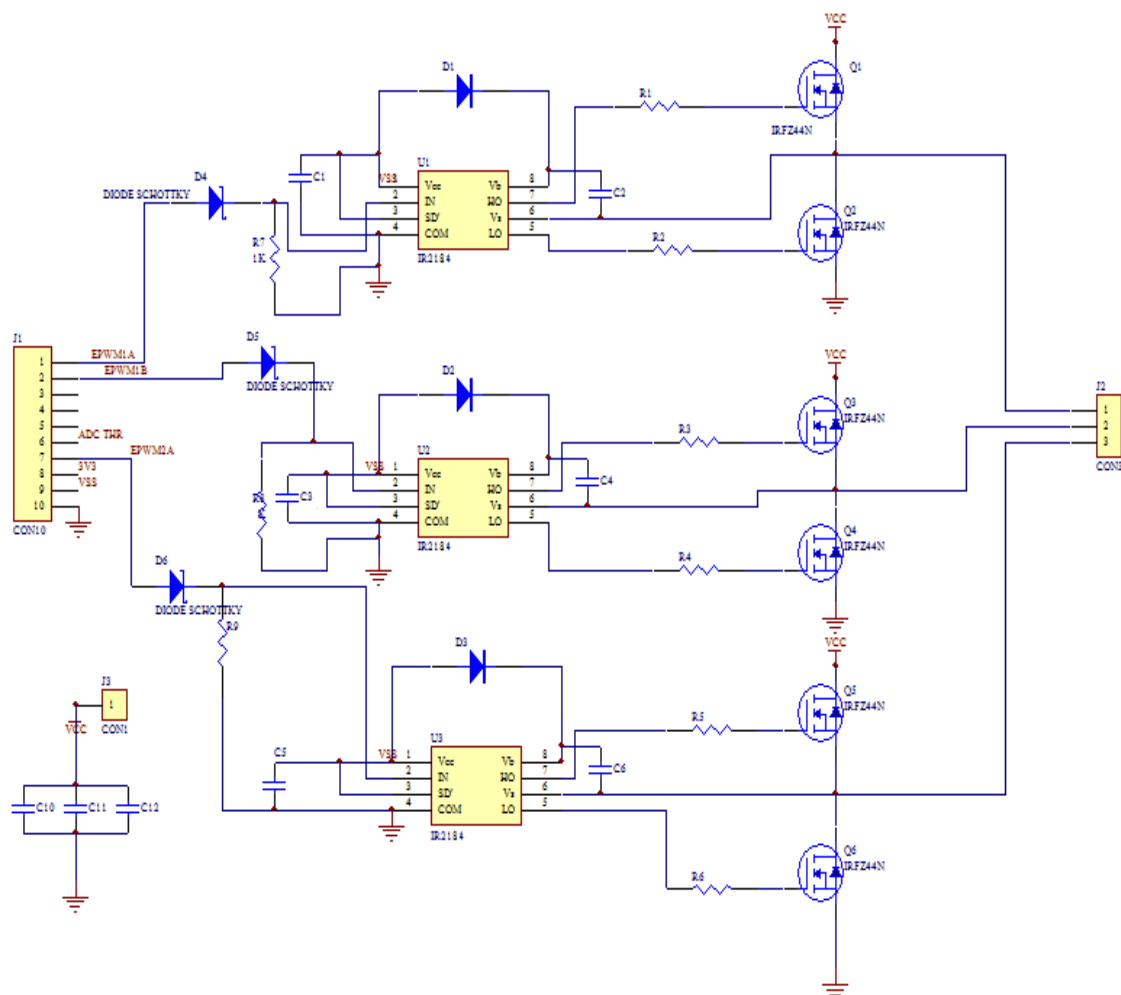


Εικόνα.4: Το LaunchPad XL με τον TMS320F28027.

Το συγκεκριμένο αναπτυξιακό έχει ενσωματωμένο JTAG emulator, τον XDS100V.2 οπότε και συνδέεται απευθείας μέσω usb με τον Code Composer Studio με τον οποίο επιτυγχάνεται πλήρη πρόσβαση στις λειτουργίες TMS320F28027. Η τροφοδοσία του μπορεί να γίνει μέσω του usb αλλά και ανεξάρτητα για αυτόνομη λειτουργία.

4.2.1 Ο αντιστροφέας με τον IR2184.

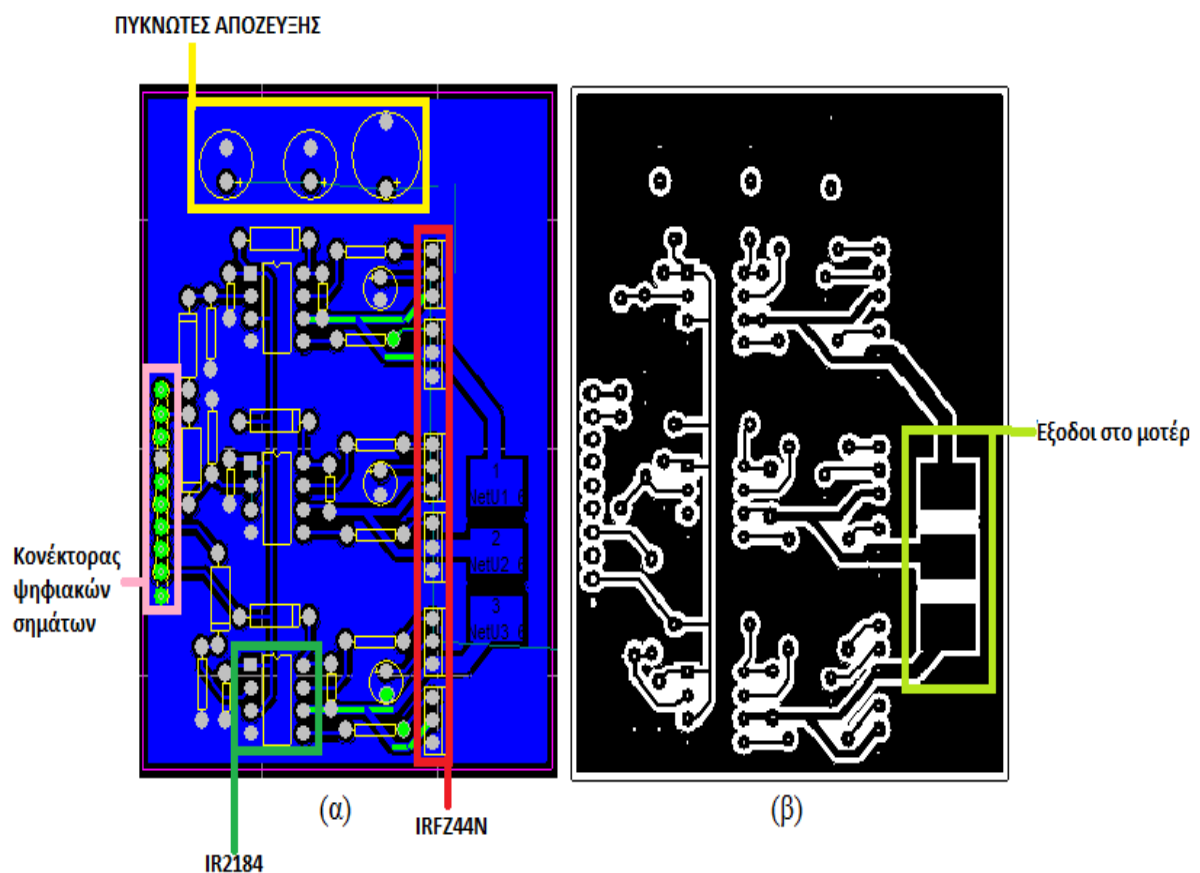
Ο πρώτος αντιστροφέας επιλέχθηκε με τη λογική να είναι μια απλή κατασκευή με εξαρτήματα χαμηλού κόστους και που να αντικαθίστανται εύκολα. Για το λόγο αυτό σαν mosfet driver επιλέχθηκαν τα **IR2184** σε θήκη DIP-8 της International Rectifier τα οποία είναι δοκιμασμένα για την αξιόπιστη λειτουργία τους. Τα mosfet ισχύος για την τριφασική γέφυρα επιλέχθηκαν τα **IRFZ44N** σε κέλυφος TO220, τα οποία έχουν $I_D=49A$ και $V_{DS}=55V$ [12]. Τα χαρακτηριστικά των mosfet αυτών δεν είναι τα βέλτιστα αλλά καλύπτουν άνετα τις ανάγκες της πρώτης δοκιμής. Η σχεδίαση της πλακέτας έγινε στο πρόγραμμα σχεδίασης **PROTEL 99 SECOND EDITION** και το σχηματικό της τριφασικής γέφυρας απεικονίζεται παρακάτω **Σχήμα.20**.



Σχήμα.20: Σχηματικό τριφασικής γέφυρας του αντιστροφέα με τον driver IR2184 και το mosfet IRFZ44N.

Τα IR2184 είναι πολύ απλά στη συνδεσμολογία τους και δεν έχουν ρυθμιζόμενο νεκρό χρόνο καθυστέρησης αγωγής (dead-time) μεταξύ των τρανζίστορ της ίδιας ημιγέφυρας, αλλά προκαθορίζεται εσωτερικά.

Στην **Εικόνα.5** απεικονίζεται το PCB στη τελική του μορφή. Ο σχεδιασμός έγινε σε δύο όψεις όπως απαιτείται ως επί το πλείστον σε αυτού του είδους τις κατασκευές.

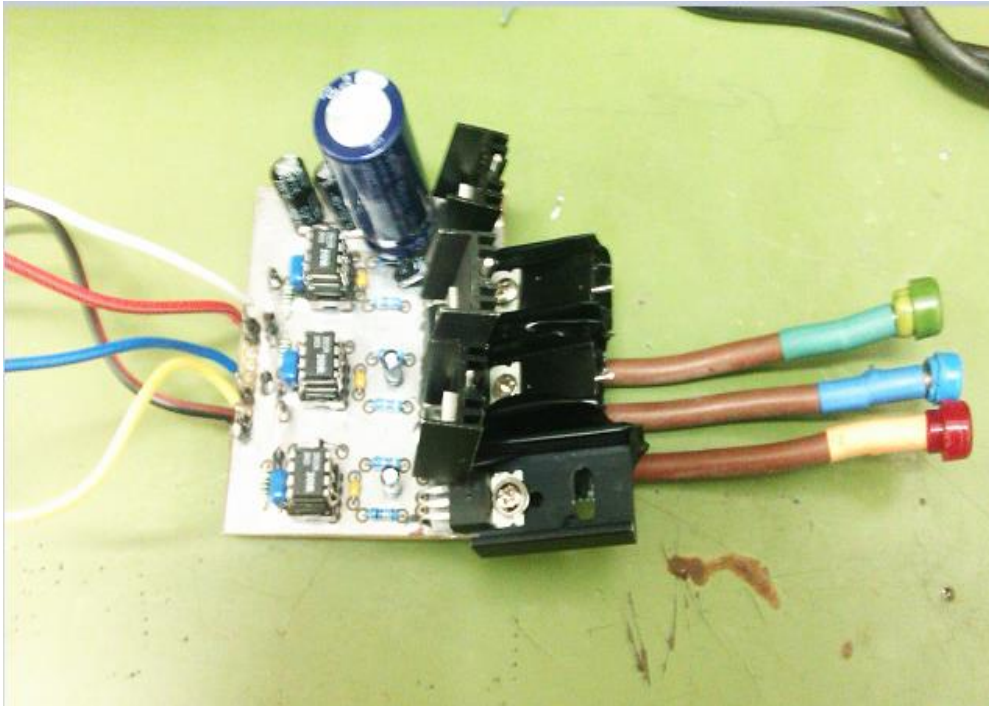


Εικόνα.5: Αριστερά το επάνω επίπεδο του τελικού PCB με τα εξαρτήματα και δεξιά το κάτω επίπεδο με τις εξόδους.

Στην **Εικόνα.5(α)** φαίνεται το επάνω επίπεδο της σχεδίασης του PCB της πλακέτας με τα εξαρτήματα. Διακρίνονται επάνω οι αποζευκτικοί πυκνωτές της τροφοδοσίας, οι τρεις driver IR2184 (ένας για κάθε ημιγέφυρα), τα έξι mosfet IRFZ44N και ο κονέκτορας των ψηφιακών σημάτων που έρχονται από το LAUNCHPAD.

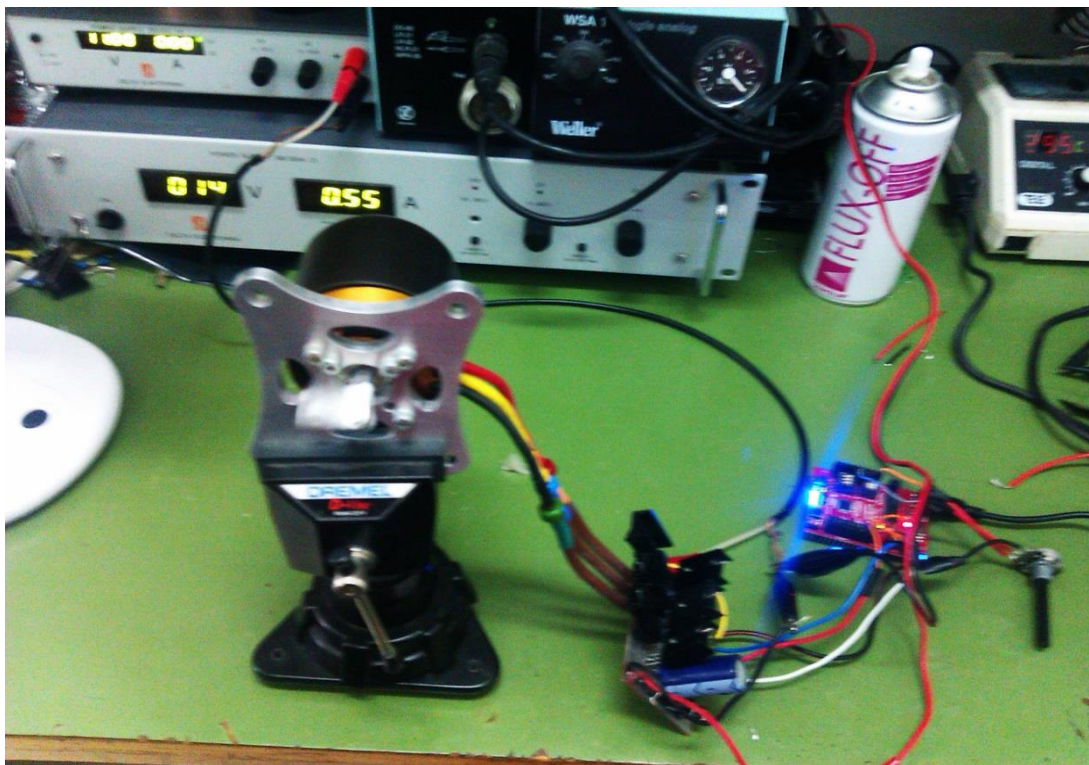
Στην **Εικόνα.5(β)** φαίνεται το κάτω μέρος της πλακέτας με τις συνδέσεις των αγωγών και τις εξόδους των τριών φάσεων προς το μοτέρ. Οι τρεις αγωγοί από τις ημιγέφυρες είναι λεπτοί για μεγάλα ρεύματα αλλά θα ενισχυθούν με επιπλέον αγωγούς κατά το γάνωμα της πλακέτας.

Στην παρακάτω **Εικόνα.6** απεικονίζεται ο αντιστροφέας στην τελική του μορφή μετά την εμφάνιση της πλακέτας, γάνωμα και τοποθέτηση των εξαρτημάτων.



Εικόνα.6 : Τελική κατασκευή αντιστροφέα.

Στην παρακάτω **Εικόνα.7** απεικονίζει μοτέρ κατά τη διάρκεια δοκιμών του αντιστροφέα και πιο συγκεκριμένα κατά την εκκίνηση του μοτέρ. Όπως φαίνεται στα όργανα η τάση τροφοδοσίας έχει πέσει στα 14V λόγω του περιορισμού ρεύματος που εφαρμόζεται για προστασία των κυκλωμάτων.



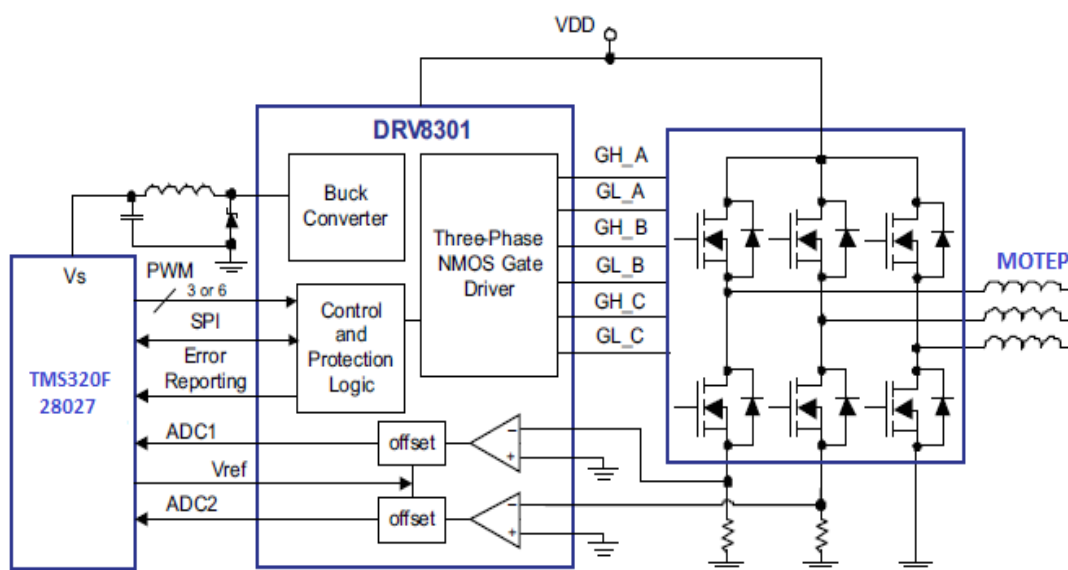
Εικόνα.7: Δοκιμή του αντιστροφέα σε χαμηλές στροφές περιστροφής του μοτέρ.

Σκόπιομα έχει τοποθετηθεί μια ταινία στο άξονα του μοτέρ προκειμένου να φαίνεται η περιστροφή του.

4.2.2 Ο αντιστροφέας με τον DRV8301.

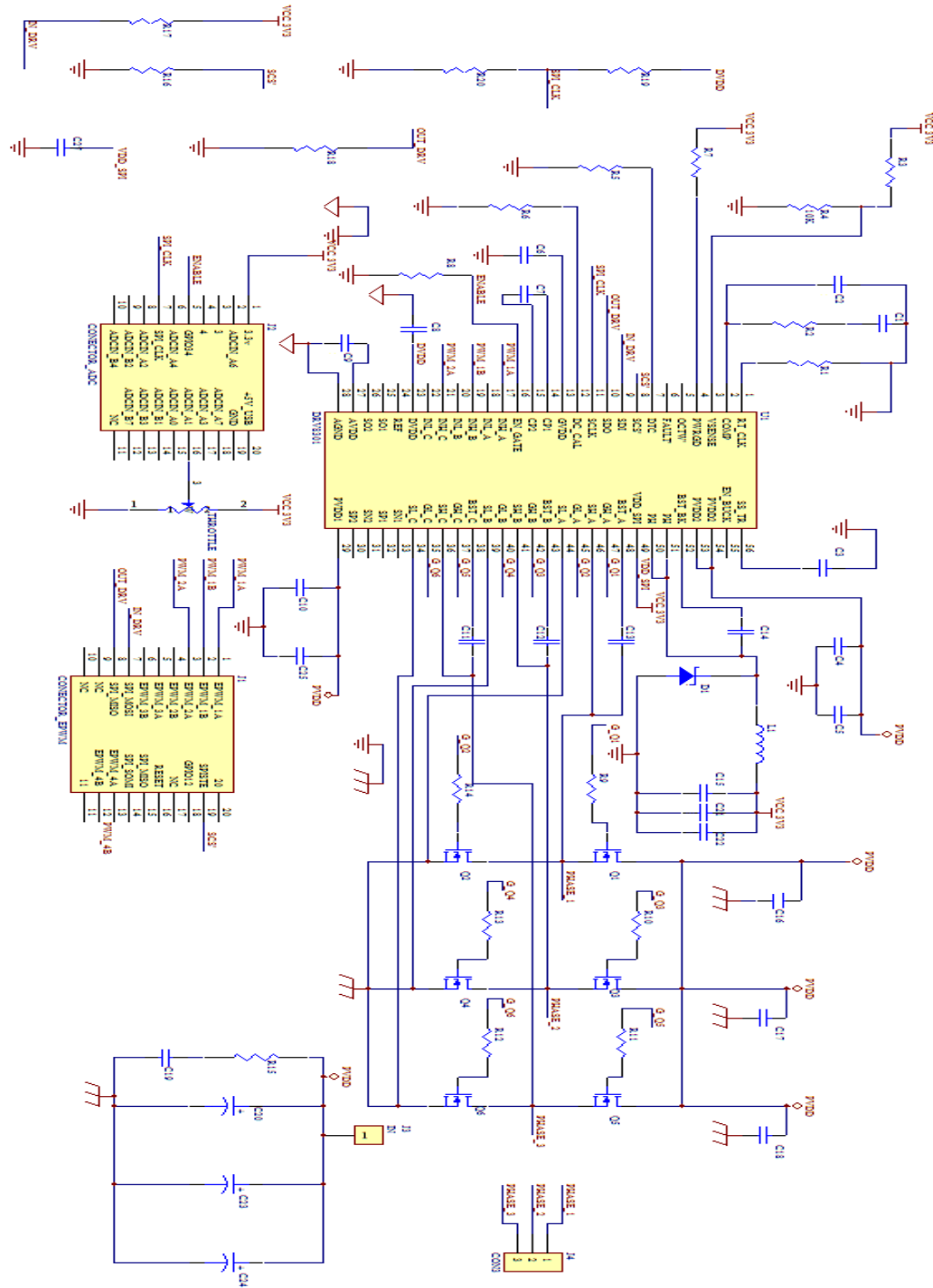
Ο DRV8301 είναι ένας εξελιγμένος τριφασικός driver για μοτέρ ο οποίος ενσωματώνει πολλές χρήσιμες υπομονάδες. Ενσωματώνει τρεις driver για ημιγέφυρες που οδηγούν δύο N-καναλιού mosfet ο κάθε ένας [13]. Μπορεί να τα τροφοδοτήσει μέχρι 1.7A ρεύμα και έχει εύρος τάσης εισόδου από 6 έως 60V. Έχει ρυθμιζόμενο νεκρό χρόνο για την οδήγηση των mosfet καθώς επίσης μπορεί και να λάβει έξι PWM για ανεξάρτητο έλεγχο των επάνω από τα κάτω mosfet της κάθε ημιγέφυρας. Μετράει την τάση source-drain του mosfet και παρέχει προγραμματιζόμενου κατωφλίου προστασία από υπερφόρτωση. Επίσης ενσωματώνει δύο ενισχυτές μέτρησης ρεύματος εξόδου πάνω σε αντίσταση, οι οποίοι είναι διπλής κατεύθυνσης και ρυθμιζόμενης στάθμης ενίσχυσης.

Το μεγάλο πλεονέκτημα το DRV8301 είναι ότι ενσωματώνει παλμικό μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck converter) με ρυθμιζόμενη τάση εξόδου στα 3.3 ή 5V και μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα 1.5A. Ο μετατροπέας αυτός είναι πολύ χρήσιμος διότι δεν χρειάζονται επιπλέον κυκλώματα τροφοδοσίας για τον μικροελεγκτή. Όλες οι ρυθμίσεις του driver καθώς επίσης και η επικοινωνία του με τον μικροελεγκτή γίνεται μέσω 'SPI' διεπαφής. Στο παρακάτω **Σχήμα.21** [13] απεικονίζεται ένα μπλόκ διάγραμμα ολοκληρωμένου αντιστροφέα με τον DRV8301, TMS320F28027 και την τριφασική γέφυρα. Φαίνεται η τροφοδοσία του μικροελεγκτή από την μονάδα τροφοδοσίας του driver.



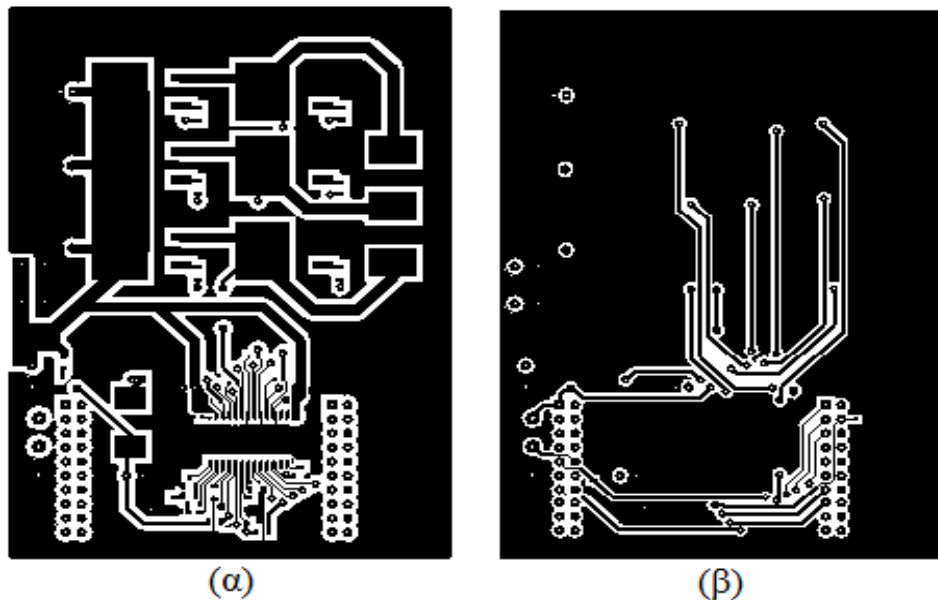
Σχήμα.21: Μπλόκ διάγραμμα τριφασικού αντιστροφέα με τον DRV8301.

Στο Σχήμα.22 φαίνεται το σχηματικό του DRV8301. Τα mosfet που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα SUM110N10 της VISHAY τα οποία με κατάλληλη ψύξη, αντέχουν ρεύματα 110Α στα 100V.



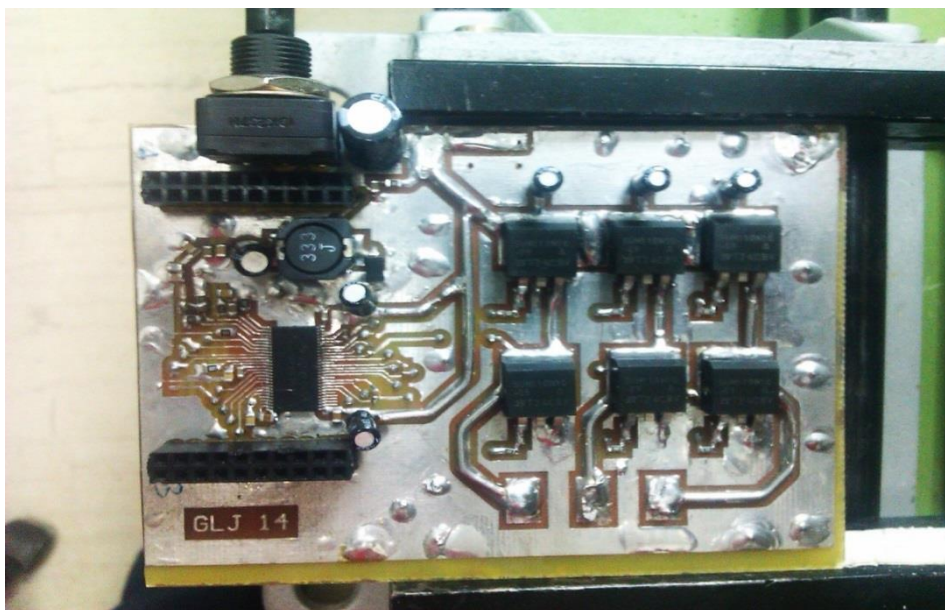
Σχήμα.22: Σχηματικό του τριφασικού αντιστροφέα με τον DRV8301.

Στην **Εικόνα.8** φαίνονται οι δύο όψεις του τυπωμένου κυκλώματος. Η δυσκολία της κατασκευής έγκειται στο γεγονός ότι ο DRV8301 έχει πολύ απαιτητικό ‘footprint’ (μόλις 10mil ανα pad) και απαιτεί πολύ ακρίβεια στην εμφάνιση και στην μετέπειτα τοποθέτηση του driver. Στην επάνω (α) όψη τοποθετούνται τα εξαρτήματα και στην κάτω (β) είναι μόνο συνδέσεις.



Εικόνα.8: Επάνω όψη τυπωμένου (α) και κάτω όψη (β).

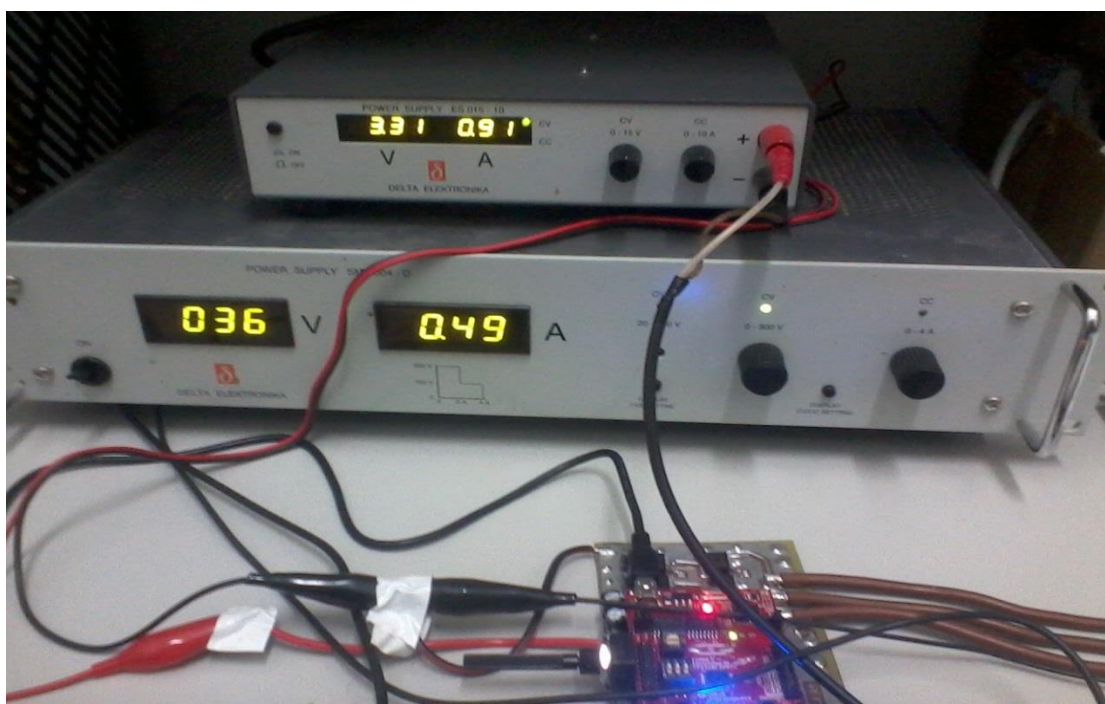
Στην παρακάτω **Εικόνα.9** φαίνεται ολοκληρωμένη η κατασκευή της γέφυρας.



Εικόνα.9: Η τριφασική γέφυρα με τον DRV8301 και τα SUM110N10.



Εικόνα.10: Οτρισφασικός αντιστροφέας με τον DRV8301 εν λειτουργία.



Εικόνα.11: Ο αντιστροφέας οδηγεί δοκιμαστικά μια γεννήτρια συνδεδεμένη ως μοτέρ.

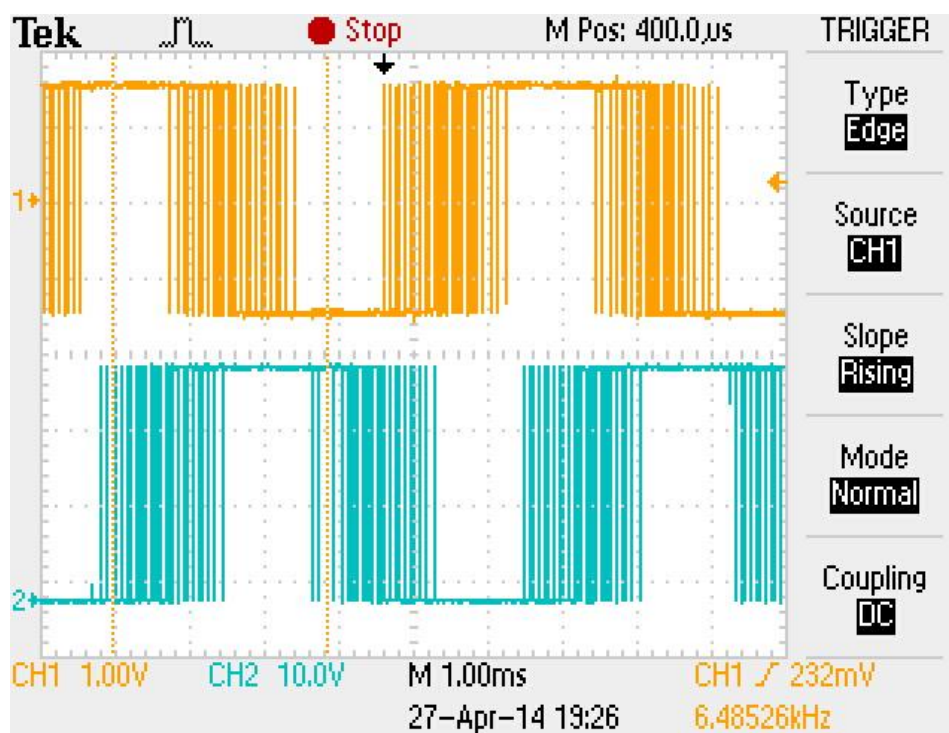
Στις εικόνες **10** και **11** φαίνεται ο τριφασικός αντιστροφέας με τον DRV8301 που οδηγεί μια τριφασική γεννήτρια συνδεδεμένη σαν μοτέρ, σε συνδεσμολογία ‘Δέλτα’.

Φαίνεται στην **Εικόνα.11** ότι από το μικρό τροφοδοτικό, τροφοδοτείται η διέγερση του ρότορα και από το μεγάλο κάτω, τροφοδοτείται ο αντιστροφέας. Η διάταξη αυτή είναι πολύ χρήσιμη στις δοκιμές μιας και δίνει τη δυνατότητα μεταβολής της έντασης του μαγνητικού πεδίου του ρότορα και μεταβολή του πλάτους τάσης στον στάτη, μέσω του αντιστροφέα. Μετά από αυτή την επιτυχημένη δοκιμή συνδέθηκε και το μοτέρ AXI5345 για τους πειραματισμούς.

Κεφάλαιο

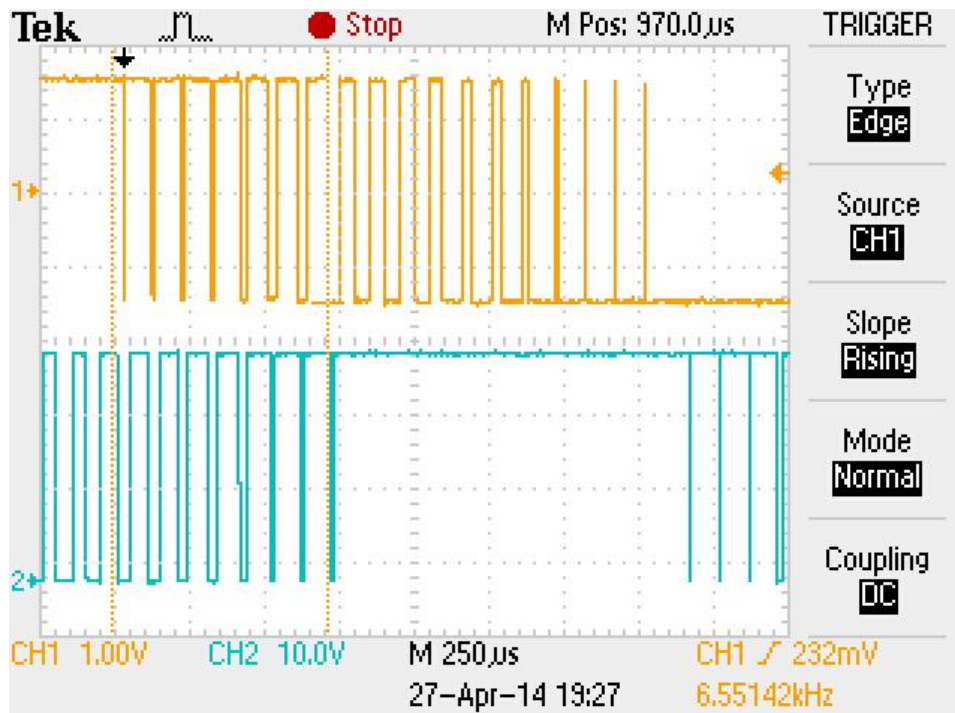
5. Μετρήσεις αντιστροφών.

Μετά την ολοκλήρωση των κατασκευών έγινε μια σειρά μετρήσεων πάνω στον αντιστροφέα για να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του. Αρχικά μετρήθηκαν οι έξοδοι των SPWM από τα GPIO του LAUNCHPAD. Στην παρακάτω **Εικόνα.12** φαίνονται οι SPWM1 και SPWM2 με τη μεταξύ τους διαφορά φάσης.



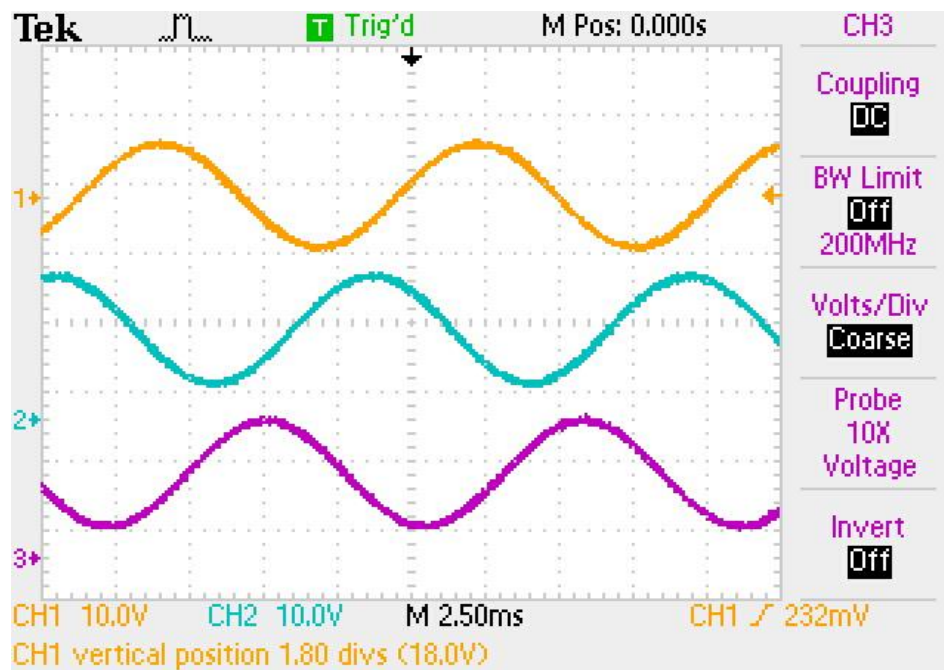
Εικόνα.12: Διαφορά φάσης μεταξύ SPWM1 και SPWM2.

Στην παρακάτω **Εικόνα.13** απεικονίζεται χαρακτηριστικά η ημιτονική αυξομειώση του πλάτους σε σχέση με το χρόνο που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.3, καθώς επίσης και η μεταξύ τους διαφορά φάσης.



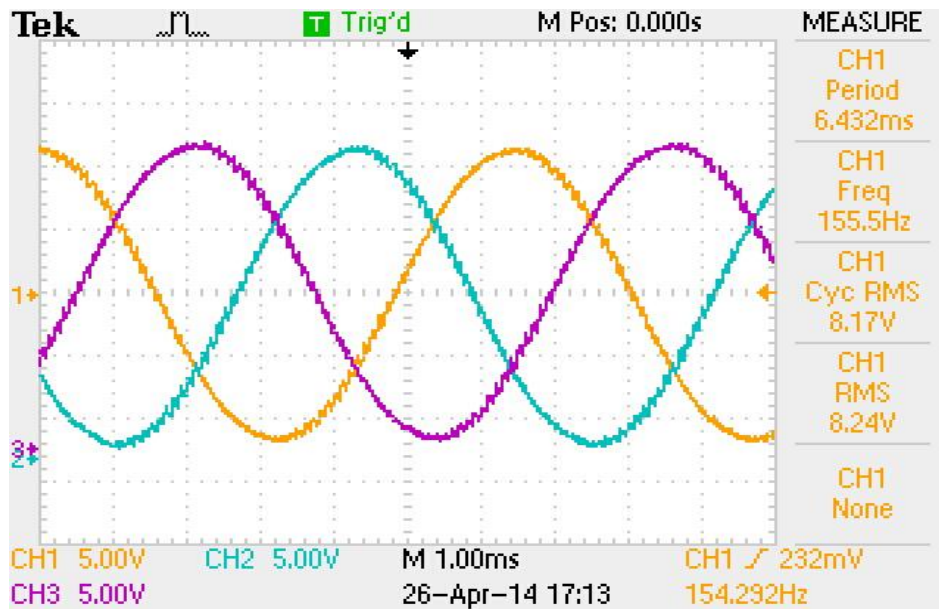
Εικόνα.13: Ημιτονικά αυξομειούμενο πλάτος των δύο SPWM.

Στη συνέχεια μετρήθηκε η έξοδος του αντιστροφέα προς το μοτέρ, χρησιμοποιώντας ένα τριπλό βαθυπερατό φίτρο R-C και οι κυματομορφές απεικονίζονται παρακάτω στην **Εικόνα.14**.



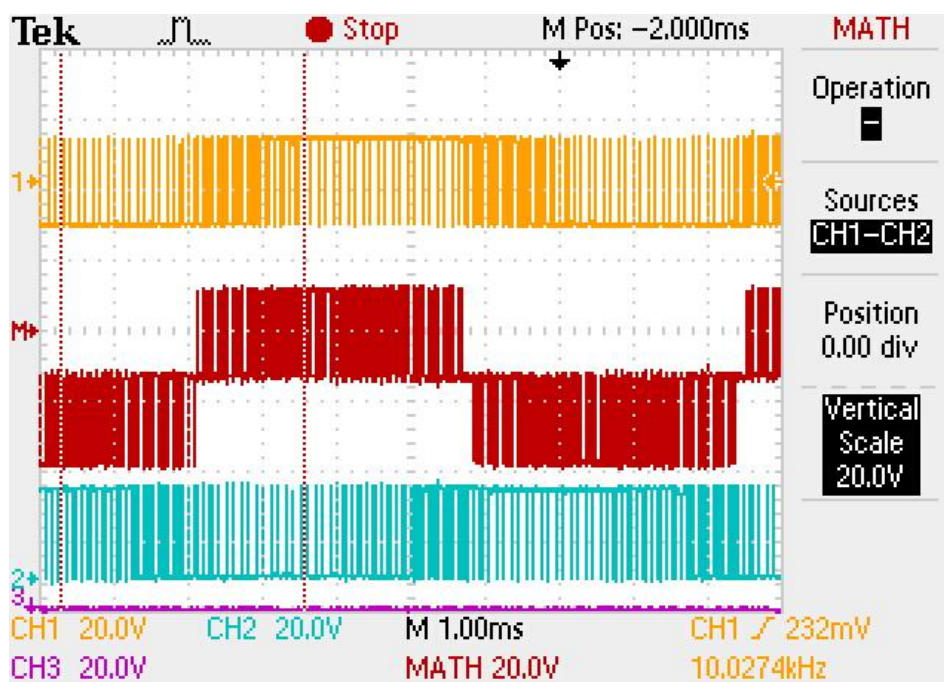
Εικόνα.14: Οι τρεις κυματομορφές εξόδου μετά το βαθυπερατό φίτρο.

Στην **Εικόνα.15** εμφανίζονται οι τρεις φάσεις στο ίδιο επίπεδο και διακρίνεται καθαρά η μεταξύ τους διαφορά φάσης των 120° .



Εικόνα.15: Η διαφορά φάσης των 120° μεταξύ των φάσεων.

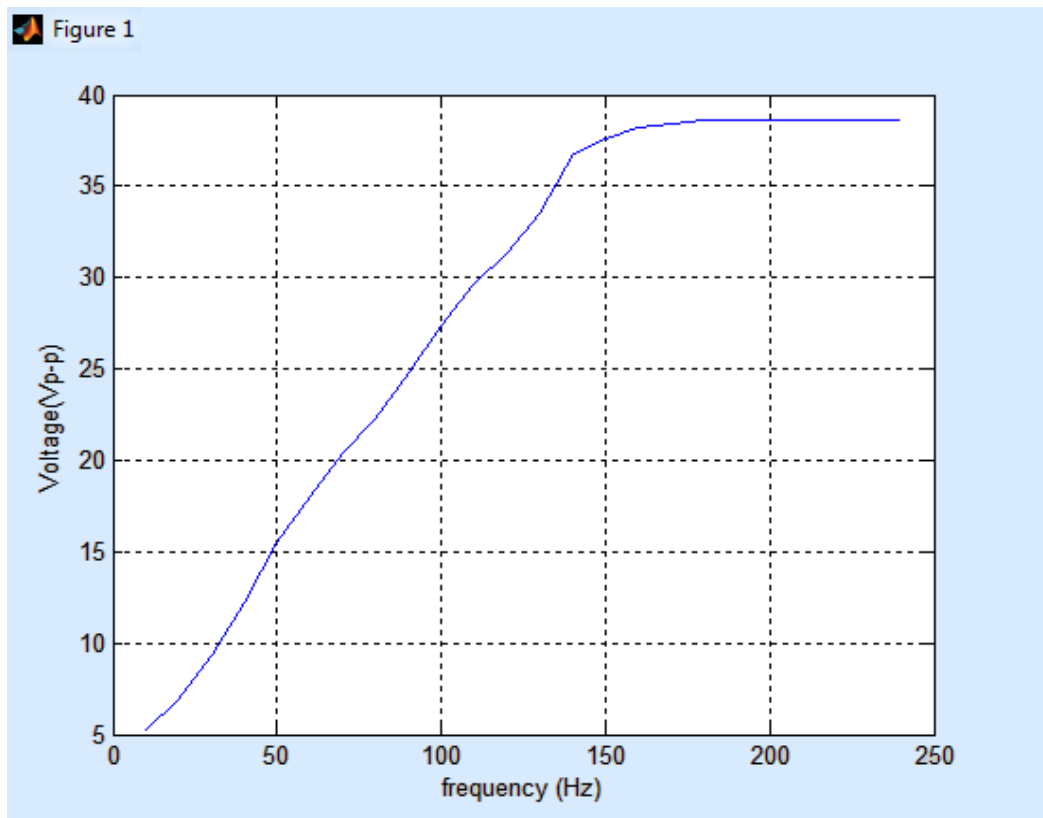
Στην παρακάτω **Εικόνα.16** εμφανίζεται η διαφορά των κυματομορφών 1-2 μεταξύ των δύο φάσεων του αντιστροφέα. Φαίνεται και η βασική συχνότητα των 10KHz.



Εικόνα.16: Διαφορά των καναλιών 1-2 μεταξύ των δύο φάσεων.

5.1 Καμπύλη τάσης-συχνότητας.

Τέλος έγινε μια σειρά δοκιμών για να προσδιοριστεί μια σχέση τάσης συχνότητας οι οποία θα μπορεί να εκκινεί το μοτέρ AXI5345 ικανοποιητικά και να έχει ομαλή λειτουργία. Για το συγκεκριμένο μοτέρ η καμπύλη αυτή απεικονίζεται στην **Εικόνα.17**.



Εικόνα.17: Καμπύλη σχέσης τάσης συχνότητας για το μοτέρ AXI5345.

Πρόκειται για την καμπύλη που κινεί ικανοποιητικά το μοτέρ χωρίς έλεγχο και δεν είναι ιδανική, ειδικά σε εφαρμογές μεταβαλλόμενου μηχανικού φορτίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν εφαρμοστεί ο κώδικας για έλεγχο των λειτουργιών των μοτέρ, η καμπύλη αυτή θα αλλάζει δυναμικά ανάλογα με τη μέθοδο ελέγχου που θα εφαρμόζεται.

Κεφάλαιο

6. Συμπεράσματα – μελλοντική εργασία.

Συνολικά αποδείχτηκε ότι και οι δύο αντιστροφείς είναι αξιόπιστοι αλλά ο στόχος ήταν να λειτουργήσει πλήρως ο DRV8301 που έχει καλύτερα χαρακτηριστικά, είναι πιο ευέλικτος και πολύ μικρός σε μέγεθος. Με όλες αυτές τις λειτουργίες ενσωματωμένες δίνεται η δυνατότητα να κατασκευαστούν πλακέτες μικρού μεγέθους και πολύ αποδοτικές.

Όσον αφορά στον piccolo επιβεβαιώθηκε η τεχνική της SPWM με τη θεωρία και η επιτυχημένη λειτουργία στα μοτέρ, με πολύ χαμηλή παραμόρφωση στην τάση εξόδου. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής είναι πολύ καλός στην παραγωγή PWM με πολύ μεγάλη ακρίβεια χρόνου.

Επόμενος στόχος είναι η εφαρμογή κώδικα όσον αφορά στον πλήρη έλεγχο του μοτέρ με διανυσματικό έλεγχο (vector control) ή ακόμα καλύτερα με έλεγχο οριοθέτησης πεδίου (field oriented control). Έτσι θα προσδιοριστεί ποιά μέθοδος είναι πιο αποδοτική και ποιά δίνει πιο σταθερά αποτελέσματα στην ομαλή λειτουργία των κινητήρων και υψηλότερη απόδοση. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι ενισχυτές τάσης (shunt amplifiers) του DRV8301 και άλλοι εξωτερικοί αισθητήρες τάσης και ρευμάτων εισόδου και εξόδων προκειμένου να εφαρμόζεται τεχνική ελέγχου, χωρίς τη χρήση αισθητήρων θέσης του ρότορα. Στο τμήμα της τριφασικής γέφυρας θα χρησιμοποιηθούν mosfet με καλύτερα ακόμα χαρακτηριστικά (όπως της R_{DS}), κυκλώματα απομόνωσης και προστασίας από υπερτάσεις και μεγάλων ρευμάτων. Επίσης στόχος είναι να κατασκευαστεί εξωτερικός programmer που να συνδέεται με τον piccolo, για να γίνεται παραμετροποίηση συγκεκριμένων μεταβλητών του εκάστοτε μοτέρ, χωρίς την χρήση H/Y.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. Colton. “Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control”. Massachusetts Institute of Technology. June 2010.
- [2] J. Mevey. “Sensorless Field Oriented Control Of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors”. B.S., Kansas State University. 2006.
- [3] D. Hanselman. “Brushless Permanent Magnet Motor Design, Second Edition”. Electrical and Computer Engineering University of Maine, Orono, USA.
- [4] Σ. Μανιάς. “Ηλεκτρονικά Ισχύος”. Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα, εκδόσεις Συμμεών.
- [5] Π. Παπαμανώλης. “Μελέτη και κατασκευή αντιστροφέα για τον έλεγχο κινητήρα μονίμων μαγνητών ηλεκτροκίνητου οχήματος με ενσωματωμένο σύστημα τηλεμετρίας” Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα.2013.
- [6] E. Viramontes. “BLDC Motor Control with Hall Effect Sensors Using the 9S08MP” .FREESCALE SEMICONDUCTOR, AN4058.
- [7] J.Zambada , “Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F DSC”. AN1017 MICROCHIP.
- [8] “TMS320x2802x, 2803x Piccolo Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module”. TEXAS INSTRUMENTS, SPRUGE9E, Revised March 2011.
- [9] “TMS320x2802x, 2803x Piccolo High Resolution Pulse Width Modulator (HRPWM) Module”. TEXAS INSTRUMENTS,SPRUGE8E, Revised October 2011.

[10] “Piccolo Microcontrollers”. TEXAS INSTRUMENTS SPRS523i(1), 2012.

[11] “TMS320x2802x, 2803x Piccolo Analog-to-Digital Converter (ADC) and Comparator”. TEXAS INSTRUMENTS, SPRUGE5F, Revised December 2011.

[12] “HALF-BRIDGE DRIVER”. IR2184 Datasheet, INTERNATIONAL RECTIFIER.

<http://www.irf.com/productinfo/datasheets/data/ir2184.pdf>.

[13] “Three Phase Pre-Driver with Dual Current Shunt Amplifiers and Buck Regulator”. TEXAS INSTRUMENTS, DRV8301, Revised August 2013. <http://www.ti.com/product/drv8301>.