

Σχεδίαση Συστήματος Ελέγχου BLDC Κινητήρα

Σωτηρίου Μαρία Ιωάννα

Στόχος της εργασίας είναι η σχεδίαση ενός συστήματος ελέγχου του κινητήρα [t-motor U8](#), με χρήση του συστήματος επεξεργαστή-αντιστροφή [DRV8301 – 69M](#).

Κινητήρας	1
Σύστημα Οδήγησης	2
Τραπεζοειδής Έλεγχος (Trapezoidal Control)	3
Sensored Trapezoidal Control 120O	4
Sensorless Trapezoidal Control 120O	5
Sensored Trapezoidal Control 150O	5
Ημιτονοειδής Έλεγχος (Sinusoidal Control)	6
Field Oriented Control (FOC)	6
Βιβλιογραφία	8

Κινητήρας

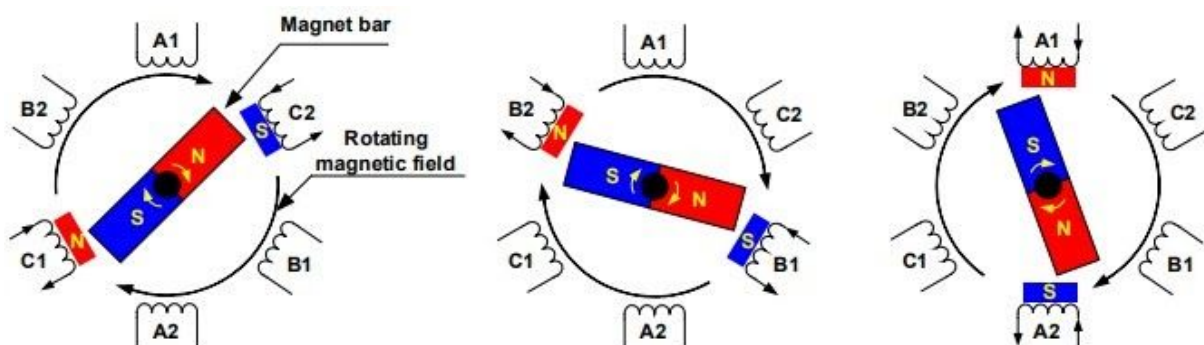
Ο κινητήρας που έχει επιλεγεί ανήκει στην κατηγορία των BLDC motors. Η εταιρεία κατασκευής T-MOTORS τον κατατάσει στην κατηγορία "U-EFFICIENCY-TYPE", όπου ανήκουν κινητήρες κατάλληλοι για εφαρμογές όπου χρειάζεται υψηλή απόδοση σε συνδυασμό με αρκετά μεγάλη ροπή.

Οι κινητήρες BLDC είναι κινητήρες μονίμων μαγνητών, δηλαδή το πεδίο του δρομέα δημιουργείται από μαγνήτες τοποθετημένους αντικριστά σε ζεύγη, ή δίπολα. Ο συγκεκριμένος κινητήρας έχει στο δρομέα 42 πόλους, ή 21 δίπολα.

Ο στάτης του κινητήρα αποτελείται από 36 τυλίγματα. Η αρχή λειτουργίας αυτού του είδους κινητήρων είναι απλή: αντικριστά τυλίγματα διεγείρονται διαδοχικά δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο του δρομέα τείνει να ευθυγραμμιστεί με αυτό του στάτη, και έτσι ο δρομέας κινείται. Πριν αυτός φτάσει στη θέση ευθυγράμμισης, διεγείρεται το επόμενο τύλιγμα κοκ, ώστε να έχουμε συνεχή κίνηση του δρομέα.

Στην εικόνα 1 φαίνεται αυτή η διαδικασία για έξι τριφασικά τυλίγματα, με δρομέα 2 πόλων. Τα C, B και A διεγείρονται διαδοχικά. Τα τυλίγματα ίδιας φάσης είναι τυλιγμένα με αντίθετη φορά, και έτσι δημιουργείται κατά τη διέγερση τους μαγνητικό πεδίο. Δηλαδή για θετική φορά ρεύματος στη φάση A έχουμε N (North) pole στο τύλιγμα A1 και S (South) pole στο τύλιγμα A2, και αντίστροφα για την αντίθετη φορά ρεύματος (δηλαδή για αρνητική πολικότητα). Αρχικά λοιπόν εφαρμόζεται θετική τάση στη φάση C, και έπειτα, πριν το πεδίο των μαγνητών ευθυγραμμιστεί με αυτό των τυλιγμάτων C, αρνητική στη φάση B, και έπειτα θετική στην A, για κάθε μία από τις τρεις εικόνες. Στη συνέχεια θα εφαρμοζόταν αρνητική στη C, θετική στη B και αρνητική στην A διαδοχικά, για μια πλήρη περιστροφή του δρομέα.

Στην περίπτωση αυτή κάθε φορά διεγείρεται μία φάση, ενώ οι άλλες δύο είναι ανενεργές. Για να αποφευχθεί αυτό, μπορούμε το ίδιο αποτέλεσμα να έχουμε αν διεγείρουμε δύο φάσεις κάθε φορά. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα υπήρχε δηλαδή αρχικά ρεύμα στις C και B', έπειτα στις B' και A, στη συνέχεια στην A και C' και λοιπά, όπου με X' συμβολίζουμε το ρεύμα αρνητικής πολικότητας της φάσης X. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ηλεκτρεγερτική δύναμη, δηλαδή την "έλξη" των μονίμων μαγνητών, και για ίδια τιμή ρεύματος προκύπτει πιο γρήγορη απόκριση, και άρα μεγαλύτερη ταχύτητα του κινητήρα.

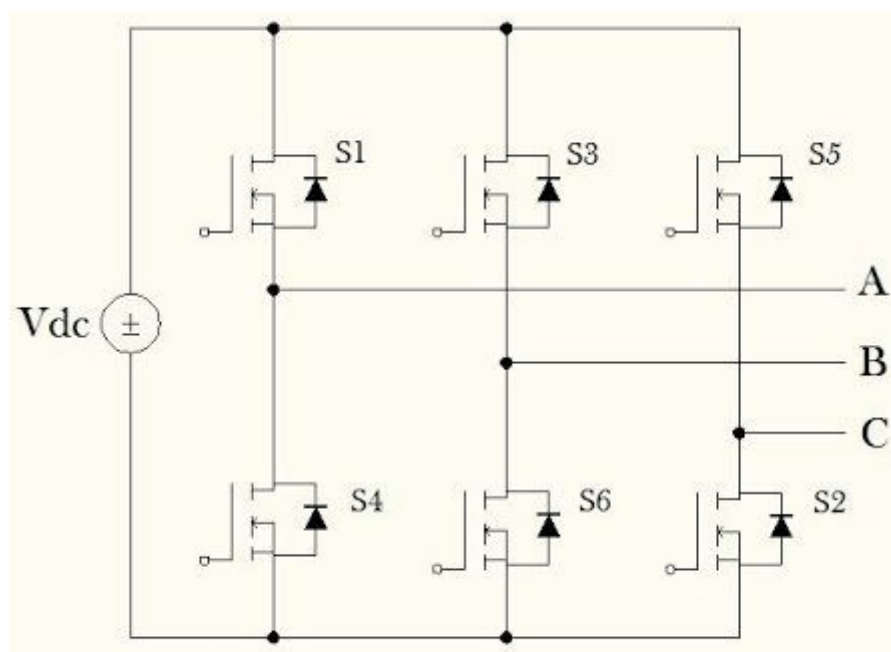


Εικόνα 1

Στο παραπάνω παράδειγμα, μια πλήρης περιστροφή του δρομέα ταυτίζεται με διαδοχική διέγερση όλων των τυλιγμάτων. Αυτό δεν ισχύει πάντα. Η διαδοχική διέγερση όλων των τυλιγμάτων οδηγεί σε στροφή ίση με τη γωνιακή απόσταση δύο διπόλων. Για παράδειγμα, στον υπό μελέτη κινητήρα υπάρχουν 21 δίπολα και 36 τυλίγματα. Αν τα τυλίγματα διεγερθούν διαδοχικά από μία φορά, ο δρομέας θα διαγράψει γωνία $360^\circ/21 = 17.14^\circ$.

Σύστημα Οδήγησης

Για την τροφοδοσία ενός τριφασικού BLDC κινητήρα χρειάζεται ένας τριφασικός αντιστροφέας (γέφυρα 6 MOSFET). Η κάθε φάση του κινητήρα ελέγχεται από συγκεκριμένη γραμμή (ζεύγος τρανζίστορ) του αντιστροφέα. Για παράδειγμα στην εικόνα, η φάση A ελέγχεται από τα τρανζίστορ S1 και S4. Προφανώς αυτά δεν γίνεται να άγουν ταυτόχρονα, καθώς θα υπάρξει βραχυκύκλωμα των δύο άκρων της τροφοδοσία DC. Στην περίπτωση που άγει το S1, η φάση A θα έχει ρεύμα $+V_{dc}$, ενώ αν άγει το S4 θα έχει ρεύμα $-V_{dc}$. Δηλαδή για την κίνηση στην εικόνα 1 θα ήγαγαν διαδοχικά τα MOSFET S5 & S6, S6 & S1, S1 & S2, S2 & S3, S3 & S4, S4 & S5.



Εικόνα 2

Για την οδήγηση του αντιστροφέα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μικροελεγκτής, ο οποίος με δεδομένη τη θέση του δρομέα, κάνει τη βέλτιστη επιλογή τυλιγμάτων που θα διεγερθούν. Στη συνέχεια παράγει 6 σήματα παλμών PWM, ένα για κάθε transistor. Στο HIGH του παλμού το transistor άγει, ενώ στο LOW όχι. Στόχος λοιπόν ενός προγράμματος ελέγχου είναι η παραγωγή των παλμών αυτών, ώστε να έχουμε ομαλή λειτουργία του κινητήρα.

Για να συμβεί αυτό, είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς κάθε στιγμή με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια τη θέση του δρομέα, ώστε να μπορεί να αποφασίσει ποια τυλίγματα

στο στάτη να διεγείρει. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφοροι αισθητήρες όπως αισθητήρες Hall ή encoders, ή προσεγγιστικές τεχνικές μέσω μέτρησης τάσεων ή ρευμάτων.

Στη συνέχεια θα αναλυθούν κάποιες βασικές τεχνικές ελέγχου ενός BLDC κινητήρα. Οι μέθοδοι διαφέρουν ως προς την πολυπλοκότητα, το κόστος, τη χρήση υλικού και την υπολογιστική ισχύ που απαιτούν.

Τραπεζοειδής Έλεγχος (Trapezoidal Control)

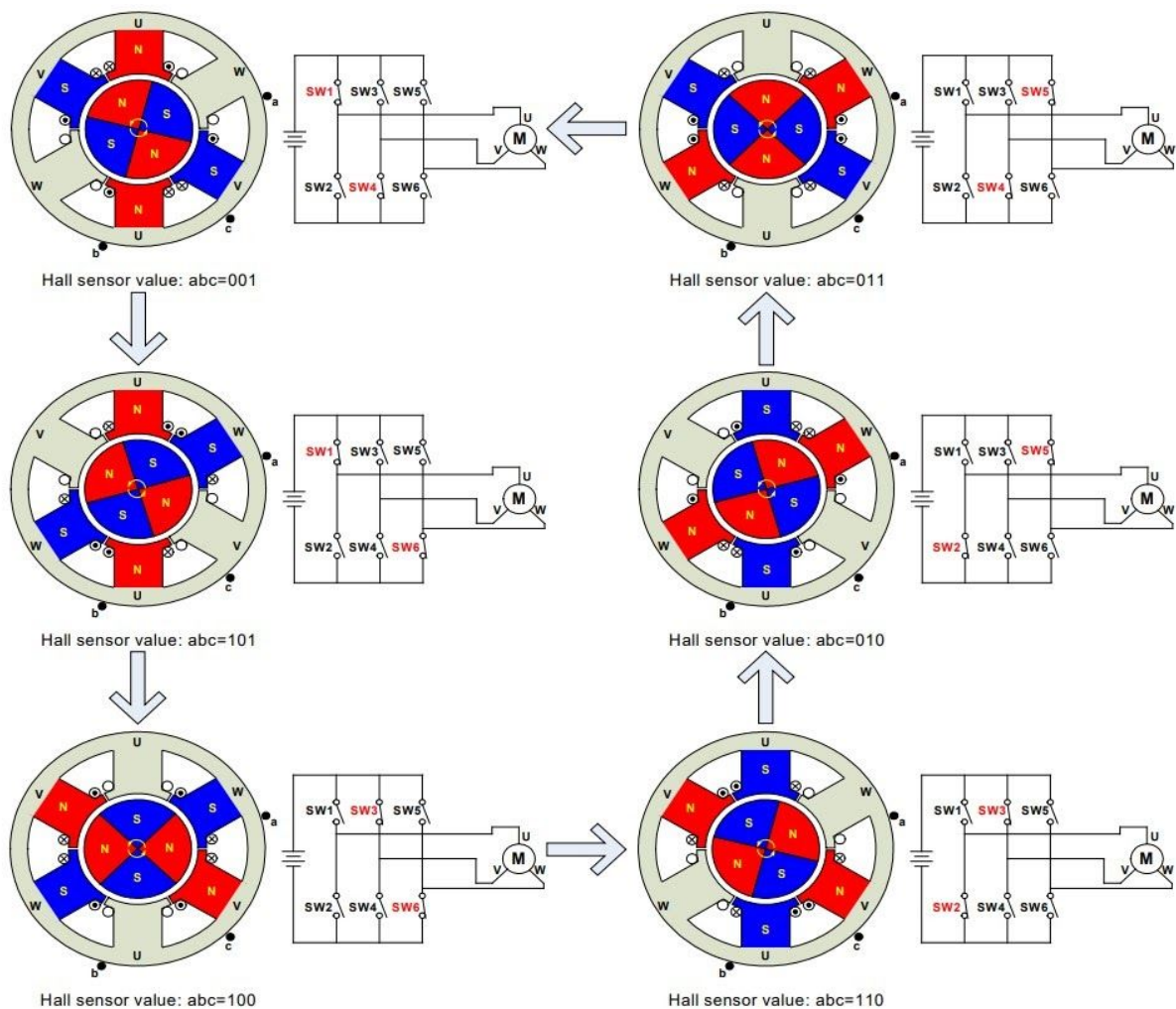
Ο τραπεζοειδής έλεγχος βασίζεται στην αρχή λειτουργίας που περιγράφηκε παραπάνω, δηλαδή τη διαδοχική διέγερση τυλιγμάτων σε έξι βήματα. Για μέγιστη ροπή και απόδοση χρησιμοποιείται στους BLDC, καθώς το επιβαλλόμενο τραπεζοειδές σήμα ρεύματος ταιριάζει με την αντίστροφη ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα. Μπορεί να γίνει είτε με χρήση αισθητήρων για τον προσδιορισμό θέσης (sensored) είτε χωρίς (sensorless).

Sensored Trapezoidal Control 120°

Στην τεχνική αυτή ελέγχου χρησιμοποιούνται αισθητήρες Hall. Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί και με χρήση encoder, αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση η παραπάνω ακρίβεια που παρέχει ο encoder είναι περιττή, αφού θέλουμε τη διαίρεση των 360 ηλεκτρικών μοιρών σε 6 διαστήματα, κάτι που επιτυγχάνεται και με τους απλούστερους Hall.

Οι ψηφιακοί αισθητήρες Hall βασίζονται τη λειτουργία τους στο φαινόμενο Hall ([2], σελίδα 4) και ανιχνεύουν αν ο αισθητήρας είναι πιο κοντά σε θετικό ή αρνητικό πόλο μαγνήτη, παράγοντας ένα δυαδικό σήμα σαν έξοδο. Οι περισσότεροι BLDC χρησιμοποιούν τρεις Hall αισθητήρες, τοποθετημένους σε απόσταση 60° ή 120°. Με δεδομένο ότι δεν γίνεται όλοι οι αισθητήρες να έχουν την ίδια ένδειξη (000 ή 111), οι υπόλοιπες έξι καταστάσεις αντιστοιχούν στους έξι πιθανούς τρόπους διέγερσης. Επομένως επιλέγουμε τον κατάλληλο ανάλογα με τη μέτρηση.

Η διαδικασία φαίνεται για τετραπολικό δρομέα στην παρακάτω εικόνα:



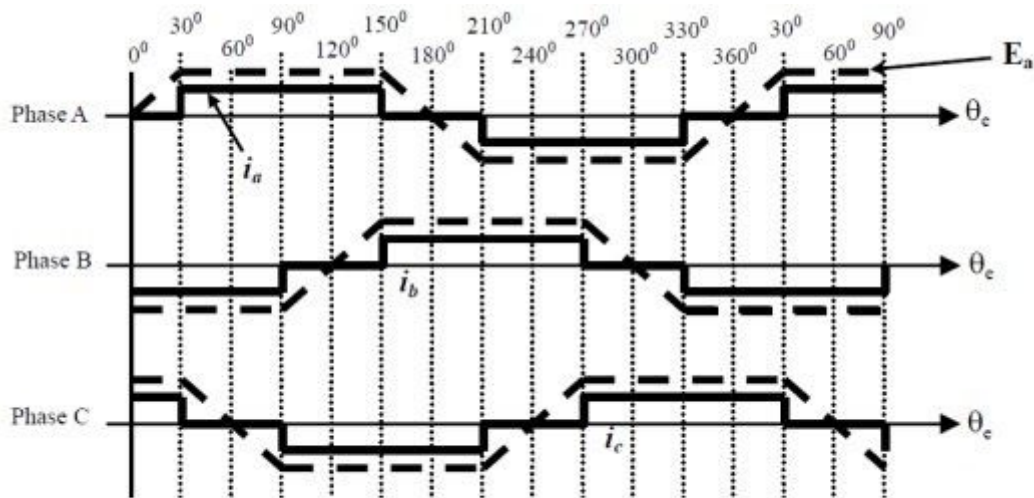
Εικόνα 3

[2] - Figure 13—Three-Phase BLDC Motor Commutation Sequence

Η υλοποίηση αυτή είναι αρκετά απλή και “φθηνή” σε υπολογισμούς και υλικό. Επίσης είναι αποδοτική σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων. Παρουσιάζει όμως και κάποια μειονεκτήματα: οι τετράγωνοι παλμοί είναι σχετικά επιρρεπείς σε θορυβο (σε σχέση με ένα καθαρό ημίτονο) και η χρήση αισθητήρων είναι συχνά κυκλωματικά μη βολική, καθώς χρειάζονται χώρο στον κινητήρα.

Sensorless Trapezoidal Control 120°

Για να αντισταθμιστεί το μειονέκτημα της χρήσης αισθητήρων, υπάρχει και μια τεχνική που βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας αλλά δεν μετράει άμεσα τη θέση του δρομέα. Αντίθετα, μετράει την τάση της αντίστροφης ηλεκτρεγερτικής δύναμης ([4] - σελίδα 8). Παρακολουθώντας την περίοδο αυτής της μέτρησης (εικόνα 4) μπορεί κανείς να δημιουργήσει μια αρκετά καλή εκτίμηση της θέσης του δρομέα.



Εικόνα 4
[4] - Fig. 9 Typical current and BEMF waveform sin BLDC motor drive

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι ηλεκτρεγερτική δύναμη παράγεται από κινούμενο κινητήρα, οπότε κατά την εκκίνηση πρέπει να βρεθεί άλλη τεχνική οδήγησης (πχ τυχαία εναλλαγή ανεγειρόμενων φάσεων). Επίσης σε χαμηλές στροφές, η τιμή του πλάτους πέφτει και άρα με τα πιθανά spikes είναι δύσκολο να διακρίνουμε πότε το σήμα έχει max τιμή, πότε min και πότε διέρχεται από το 0. Τέλος, είναι πιο ακριβή υπολογιστικά μέθοδος, καθώς πρέπει να αντισταθμιστεί η έλλειψη αισθητήρων.

Sensored Trapezoidal Control 150°

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει το ημιτονοειδές σήμα, και για το λόγο αυτό αναφέρεται συχνά ως "ψευδοημιτονική". Είναι μια παραλλαγή των παραπάνω, μόνο που αντί για 120° ηλεκτρικές, το κάθε τύλιγμα διεγείρεται για 150°. Με αυτό τον τρόπο δεν έχουμε τόσο απότομες μεταβάσεις όσο στις δύο προηγούμενες, και άρα έχουμε λιγότερα spikes και θόρυβο. Συνήθως χρησιμοποιείται με sensorless control, αν και δυσκολεύει τη διαδικασία καθώς το παράθυρο zero-crossing μικραίνει, όσο μεγαλώνει η περίοδος αγωγής.

Ημιτονοειδής Έλεγχος (Sinusoidal Control)

Ο ημιτονοειδής έλεγχος επιβάλλει σε κάθε φάση ένα ημιτονοειδές σήμα, έτσι ώστε οι φάσεις να απέχουν 120° μεταξύ τους. Το σήμα είναι πιο "καθαρό" σε φασματικό περιεχόμενο, και έτσι έχουμε λιγότερο θόρυβο στις εναλλαγές. Το σήμα παράγεται με έξι rwm μεταβαλλόμενης συχνότητας σε κάθε περίοδο. Είναι ιδανικό για κινητήρες κατασκευασμένους να παράγουν ημιτονοειδή αντίθετη ηλεκτρεγερτική δύναμη, όπως οι Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM). Επίσης εφαρμόζεται όπου ενδιαφέρει ο έλεγχος ταχύτητας, λόγω των ομαλών μεταβολών και χαμηλού θορύβου που προαναφέρθηκαν.

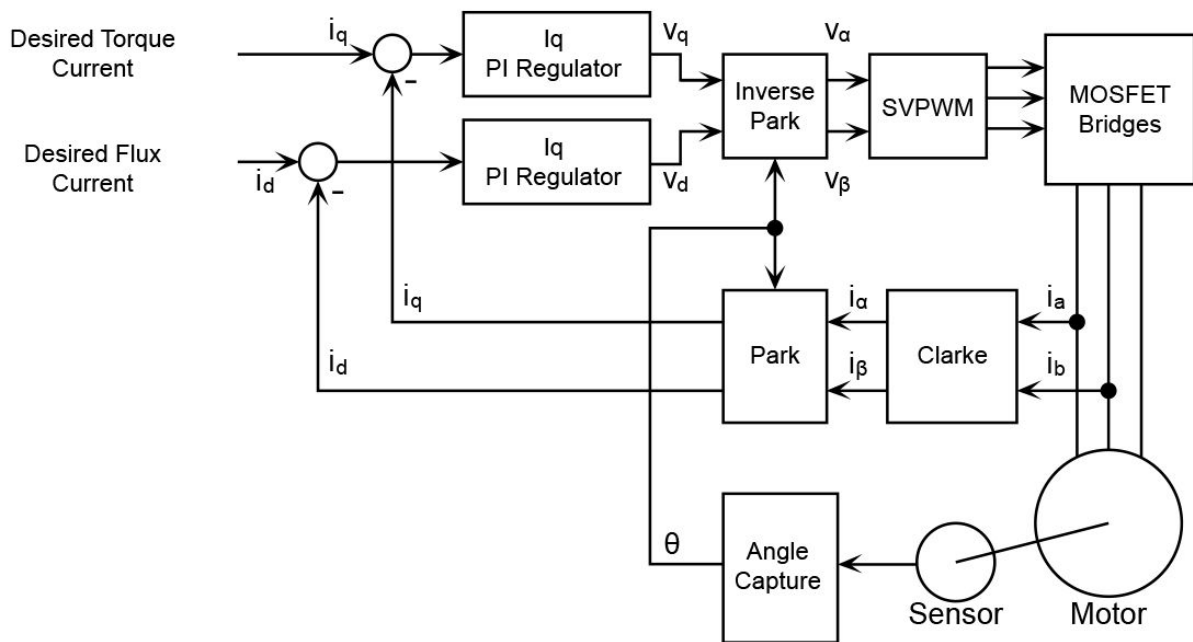
Και αυτή η τεχνική υλοποιείται με και χωρίς χρήση αισθητήρων, όμως η υλοποίηση χωρίς αισθητήρες είναι πιο απαιτητική, καθώς οι εναλλαγές που πρέπει να μετρηθούν στις τιμές σήματος απαιτούν πολύ μεγάλη ακρίβεια (δεν υπάρχει παράθυρο zero-crossing). Επίσης αυξάνονται οι απώλειες στα MOSFET (λόγω αυξημένου switching activity), και φυσικά αυξάνεται η υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Field Oriented Control (FOC)

Η τεχνική αυτή αποτελεί μια αναβαθμισμένη τεχνική του ημιτονοειδούς ελέγχου, με τη διαφορά ότι μεγιστοποιεί την παραγόμενη ροπή. Αυτό επιτυγχάνεται γνωρίζοντας την ακριβή θέση του δρομέα, και άρα τον προσανατολισμό του μαγνητικού του πεδίου, και διεγείροντας τα τυλίγματα στο στάτη έτσι ώστε να προκύπτει πεδίο συνεχώς κάθετο με αυτό του δρομέα. Με τον τρόπο αυτή μεγιστοποιείται η ροπή υπό συγκεκριμένο ρεύμα.

Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται μια σειρά πολύπλοκων υπολογισμών. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα της εικόνας 5:

- Μετρώνται δύο από τα τρία ρεύματα που παράγονται από τον αντιστροφέα (το τρίτο προκύπτει μονοσήμαντα καθώς $i_a + i_b + i_c = 0$). Μετασχηματίζονται κατά Clarke, και έτσι απεικονίζονται ως συνάρτηση δύο κάθετων διφασικών ρευμάτων i_α , i_β .
- Τα i_α , i_β μετασχηματίζονται κατά Park σε δύο κάθετα DC ρεύματα στραμμένα κατά γωνία τη γωνία θ του δρομέα.
- Τα δύο DC ρεύματα ελέγχονται σχετικά εύκολα από PI controllers ώστε να συγκλίνουν στις επιθυμητές τιμές, οι οποίες καθορίζονται από τις παραμέτρους του κινητήρα και την επιθυμητή ταχύτητα.
- Στη συνέχεια μέσω Inverse Park Transform ξανά μετασχηματίζονται σε κάθετα διφασικά ρεύματα i_α , i_β .
- Τα i_α , i_β εκφράζονται στο στάδιο SVPWM (Space Vector PWM) ως συναρτήσεις των διανυσμάτων που αντιστοιχούν στις 0, 60, 120, 180, 240 και 300 μοίρες, τα οποία αντιστοιχούν σε ρεύματα που προκύπτουν αν είναι δύο MOSFET διαφορετικών κλάδων του αντιστροφέα ανοιχτά). Στο στάδιο αυτό υπολογίζονται τα PWM με τα οποία τροφοδοτείται τελικά ο αντιστροφέας.



Εικόνα 5

Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής ανήκουν: υψηλή απόδοση, χαμηλός θόρυβος και γρήγορη απόκριση δυναμικά σε αλλαγές. Για να επιτευχθούν αυτά απαιτείται υψηλή υπολογιστική ισχύς, υψηλό κόστος και ακριβή γνώση των παραμέτρων του συστήματος. Λόγω των πολλών της πλεονεκτημάτων, η τεχνική αυτή κυριαρχεί σταδιακά στο πεδίο του ελέγχου κινητήρων.

Βιβλιογραφία

- [1] : [Jian Zhao/Yangwei Yu, "Brushless DC Motor Fundamentals Application Note", July 2011](#)
- [2] : [Microchip Technology, "Brushless DC \(BLDC\) motor fundamentals", Application note, AN885, 2003.](#)
- [3] : [Texas Instruments, "Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors", C2000 Systems and Applications Team](#)
- [4] : [Texas Instruments, "Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors", C2000 Systems and Applications Team](#)