Σύγχρονες Τεχνικές Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών Επαγωγής

Ιάκωβος Στ. Μανωλάς
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.
Υποψήφιος Διδάκτωρ Μηχανικός Ε.Μ.Π.
Ηλεκτρονική Διεύθυνση: imanolas@central.ntua.gr

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής συγκεντρώνουν σήμερα στο παγκόσμιο γίγνεσθαι ιδιαίτερα σημαντικό ενδιαφέρον. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στις πολυποίκιλες πρακτικές εφαρμογές τους αλλά και στα πολυεπίπεδα πλεονεκτήματα που συνεπάγεται η χρήση τους. Η ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή επαγωγής λόγω της απλότητάς της, του μειωμένου βάρους και όγκου, της μεγάλης αξιοπιστίας και απόδοσης, και των μειωμένων αναγκών συντήρησης αποτελεί σήμερα την πρώτη επιλογή στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Επιπλέον, με την έλευση των σύγχρονων διατάξεων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, με τους οποίους δόθηκε η δυνατότητα τροφοδότησης της μηχανής με τάσεις μεταβλητού πλάτους και συχνότητας, κατέστη δυνατός ο ακριβής έλεγχος της συμπεριφοράς της. Η δυνατότητα αυτή αξιοποιήθηκε ιδιαίτερα με την ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων ελέγχου για τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής, οι οποίοι εξασφαλίζουν τον βέλτιστο δυνατό έλεγχο της μαγνητικής ροής, της αναπτυσσόμενης ροπής και κατά συνέπεια της ταχύτητας περιστροφής της ηλεκτρικής μηχανής.

I. Γενικά

Κατά τις σύγχρονες επιταγές, κάθε σύστημα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών προδιαγραφών χρησιμοποιεί ανάλογα συστήματα ελέγχου, τα οποία έχουν ως στόχο τον ακριβή και αυτοματοποιημένο έλεγχο της μηχανής, τη βέλτιστη απόκριση του συστήματος, τη λειτουργία με υψηλό βαθμό απόδοσης και τη βέλτιστη συνεργασία και αλληλεπίδραση με τα υπόλοιπα υπερκείμενα και υποκείμενα συστήματα.

Το παρόν άρθρο αποτελεί μια επιτομή των συμπερασμά των που προέκυψαν από τη συγκριτική μελέτη επί των κυριοτέρων τεχνικών ελέγχου που εφαρμόζονται σήμερα, για τον έλεγχο ασύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων επαγωγής που οδηγούνται με τη βοήθεια αντιστροφέων πηγής τάσης. Οι τεχνικές αυτές, κατά χρονολογική σειρά παρουσίασης, είναι οι εξής:

- Ο μονόμετρος (βαθμωτός) έλεγχος (Scalar Control)
- Ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου (Vector Control with Field Orientation)
- Η τεχνική του άμεσου ελέγχου ροής και ροπής (Direct Flux and Torque Control – DTC).

Η σύγκριση των παραπάνω τεχνικών ελέγχου πραγματοποιείται σε θεωρητικό επίπεδο, σε επίπεδο αποτελεσμάτων προσομοίωσης των εν λόγω τεχνικών με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή αλλά και σε επίπεδο αποτελεσμάτων από την πειραματική εφαρμογή των τεχνικών αυτών ελέγχου σε πραγματικό χρόνο στην πρότυπη διάταξη αντιστροφέα και ηλεκτρικού κινητήρα επαγωγής του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών & Ηλεκτρονικών Ισχύος του Ε.Μ.Π.

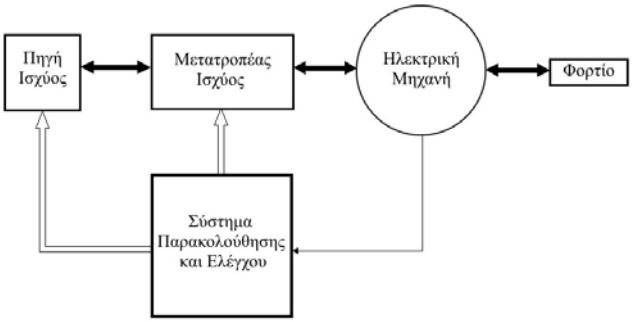
II. Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης

Στην γενική τους μορφή τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης συνιστούν ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά

συστήματα που αποτελούνται από τις παρακάτω κύριες βαθμίδες:

- Πηγή Ισχύος
- Μετατροπέας Ισχύος
- Ηλεκτρική Μηχανή
- Φορτίο
- Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου

Η διασύνδεση των παραπάνω αναφερόμενων βαθμίδων εικονίζεται διαγραμματικά στο σχήμα 1.



Σχ.1. Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα τυπικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης

Οι παραπάνω βαθμίδες μπορούν να διαιρεθούν σε δύο επιμέρους υποσύνολα:

- Το Κύκλωμα Ισχύος, που περιλαμβάνει τις βαθμίδες της Πηγής Ισχύος, του Μετατροπέα Ισχύος, της Ηλεκτρικής Μηχανής και του Φορτίου.
- Το Κύκλωμα Ελέγχου, που περιλαμβάνει τη βαθμίδα του Συστήματος Παρακολούθησης και Ελέγχου.

Στο σχήμα 1 παρατηρούμε ότι οι βαθμίδες του κυκλώματος ισχύος διασυνδέονται με αμφίδρομα μαύρα βέλη. Αυτός ο συμβολισμός αντιπροσωπεύει αφ' ενός ότι μέσω του κυκλώματος ισχύος έχουμε ροή μεγάλης ποσότητας ισχύος (συγκριτικά με αυτή στο κύκλωμα ελέγχου) και αφ' ετέρου ότι η ροή της ισχύος αυτής είναι δυνατόν να είναι αμφίδρομη. Είναι δηλαδή δυνατόν:

- Είτε ηλεκτρική ενέργεια να μετατρέπεται και να μεταφέρεται προς την ηλεκτρική μηχανή, η οποία τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρικός κινητήρας, και να αποδίδεται ως μηχανική στο φορτίο
- Είτε περίσσεια μηχανικής ενέργειας που διαθέτει το φορτίο να μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρική γεννήτρια, και να επιστρέφει μέσω του μετατροπέα προς την πηγή ηλεκτρικής ισχύος.

Το κύκλωμα ελέγχου από την άλλη, περιλαμβάνει όλο εκείνο το υλικό και το λογισμικό που είναι απαραίτητο για την παρακολούθηση και τις δράσεις ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Το κύκλωμα ελέγχου λαμβάνει μετρήσεις (αναδράσεις) από κατάλληλα αισθητήρια (λ.χ. για τα ρεύματα ή τις τάσεις των φάσεων, την ταχύτητα του δρομέα, την μαγνητική ροή εντός της μηχανής κ.α.), παρατηρεί, συγκρίνει και εκτιμά χαρακτηριστικά και κρίσιμα μεγέθη του συστήματος και μέσω ενός αλγόριθμου ελέγχου τροποποιεί, μέσω κατάλληλης παλμοδότησης των ηλεκτρονικών ισχύος, το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης εισόδου της ηλεκτρικής μηχανής, ώστε το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης να έχει την επιθυμητή απόκριση.

Η κάθε μια από τις παραπάνω βαθμίδες απαιτείται να λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή απόδοση και την καλύτερη δυνατή συνεργασία με τις υπόλοιπες βαθμίδες, έτσι ώστε το συνολικό σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα. Η σύγχρονη τάση μάλιστα για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών απαιτήσεων προστάζει το συνολικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση του συστήματος μετατροπέα–μηχανής–συστήματος ελέγχου, έτσι ώστε η αλληλεπίδρασή τους κατά τη λειτουργία να δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

III. Σύγχρονες Τεχνικές Ελέγχου

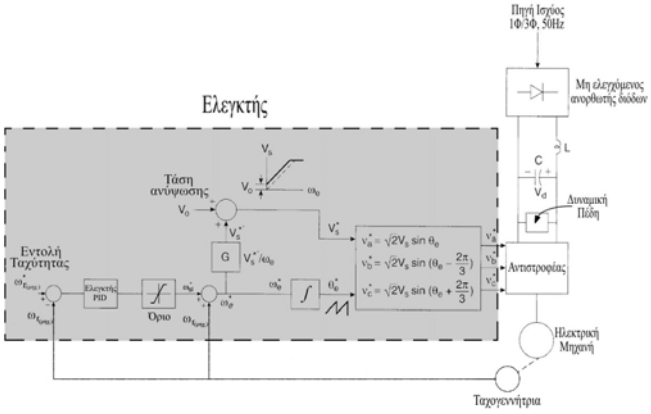
Με δεδομένο το κύκλωμα ισχύος, το ζητούμενο είναι η ανάπτυξη και χρησιμοποίηση ενός καταλλήλου αλγορίθμου ελέγχου για το εν λόγω σύστημα ηλεκτρικής κίνησης. Θα πρέπει δηλαδή να επιλεγεί μια διαδικασία αυτομάτου ελέγχου του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, η οποία θα επιτυγχάνει τις απαιτούμενες προδιαγραφές ακρίβειας και επίδοσης στο μηχανικό φορτίο, που είναι συνήθως και το σημείο στο οποίο επιζητούμε να δούμε το αποτέλεσμα του ελέγχου.

Γιατί όμως έχουν αναπτυχθεί τόσες διαφορετικές τεχνικές ελέγχου για τις ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής και εξακολουθεί να υπάρχει τόσο έντονο ενδιαφέρον για τη βελτίωσή τους; Ο λόγος είναι ότι ο ακριβής έλεγχος των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής είναι μια πολύπλοκη και απαιτητική διεργασία. Αυτό οφείλεται στον φυσικό τρόπο λειτουργίας της μηχανής και στα σύνθετα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που συνδέονται με αυτόν. Το προκύπτον μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το εν λόγω φυσικό

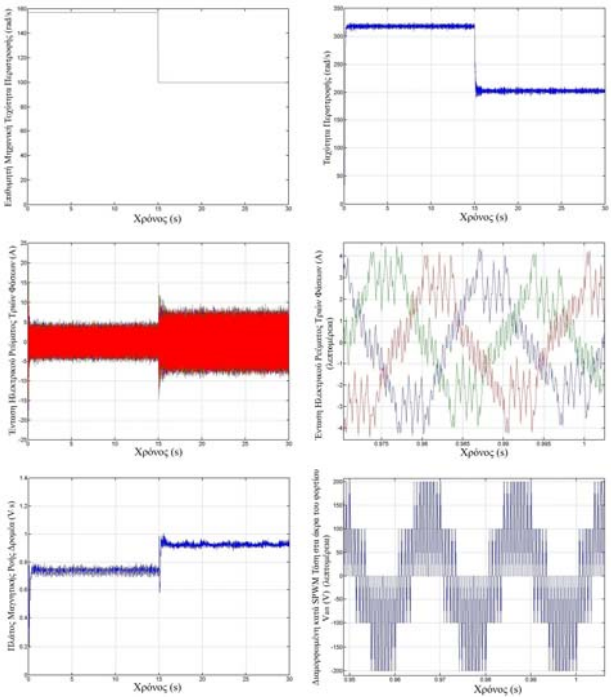
σύστημα προκύπτει μη γραμμικό (συζευγμένες εξισώσεις) και χρονικά μεταβλητό. Αυτό σημαίνει ότι κάθε μεταβολή που επιφέρει ο έλεγχος στις τάσεις τροφοδοσίας της μηχανής επιδρά τόσο στην αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή όσο και στην εγκατεστημένη μαγνητική ροή της μηχανής. Επομένως για να είναι επιτυχής ο έλεγχος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια κατάλληλη τεχνική, η οποία θα μπορεί να επιτύχει τον ανεξάρτητο έλεγχο της μαγνητικής ροής και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής (ή ισοδύναμα της μηχανικής ταχύτητας περιστροφής) της ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής. Προς αυτόν τον στόχο κινούνται όλες οι τεχνικές ελέγχου που έχουν παρουσιαστεί μέχρι σήμερα.

IIIα.Μονόμετρος ή Βαθμωτός Έλεγχος

Η πρώτη χρονολογικά προσέγγιση που επιχειρήθηκε ήταν ο μονόμετρος ή βαθμωτός έλεγχος (Scalar Control). Η πλέον καθιερωμένη τεχνική που εμπίπτει σε αυτή την κατηγορία είναι ο έλεγχος με προδιαγεγραμμένο λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας (V/f). Έτσι, το μέτρο της τάσης τροφοδοσίας της μηχανής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μαγνητικής ροής εντός της μηχανής και η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας ή ισοδύναμα η ολίσθηση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροπής της μηχανής και συνεπώς της ταχύτητάς της. Αυτό όμως δεν είναι απόλυτα ορθό και ακριβές, αφού τόσο η ροπή όσο και η μαγνητική ροή είναι αμφότερες συναρτήσεις τόσο της συχνότητας όσο και του πλάτους της τάσης τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα αυξάνοντας τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας μεταβάλλουμε τη σύγχρονη ταχύτητα για τη μηχανή, δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής του κύματος μαγνητικής ροής εντός της. Αυτό θεωρητικώς θα είχε ως αποτέλεσμα μια ανάλογη μεταβολή στην ταχύτητα του δρομέα της μηχανής. Στην πραγματικότητα όμως, η μεταβολή αυτή δεν είναι η θεωρητικά αναμενόμενη, καθώς η μεταβολή της συχνότητας μεταβάλλει και τις επαγωγικές αντιδράσεις του στάτη και συνεπακόλουθα τα ρεύματα στάτη, μεταβάλλοντας τελικά και το πλάτος του κύματος της μαγνητικής ροής της μηχανής. Το αποτέλεσμα είναι ο έλεγχος να μην έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, ενώ ορισμένες φορές το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια. Λόγω του παραπάνω φαινομένου, που πηγάζει από τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής, η απόκριση του συστήματος στις εντολές μεταβολής της ταχύτητας δεν είναι βέλτιστη και συνοδεύεται από ταλαντωτική συμπεριφορά με υπερύψωση κατά τη μεταβατική κατάσταση, μέχρις ότου η μαγνητική ροή και η ταχύτητα να ισορροπήσουν στις τιμές που επιβάλλει το νέο σημείο λειτουργίας. Επομένως η ταχύτητα και η ποιότητα της απόκρισης δεν είναι γενικά ικανοποιητικές για εφαρμογές που απαιτούν υψηλής επίδοσης έλεγχο ακριβείας. Στην εν λόγω τεχνική ελέγχου είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η τεχνική Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (SPWM) για τον έλεγχο του αντιστροφέα.



Σχ.2. Λειτουργικό διάγραμμα της τεχνικής του μονόμετρου ελέγχου με προδιαγεγραμμένο λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας με χρήση τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.



Σχ.3. Πειραματικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του μονόμετρου ελέγχου με προδιαγεγραμμένο λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας.

Η τεχνική αυτή προσφέρει μειωμένη αρμονική παραμόρφωση στα ρεύματα της μηχανής, αφού οι αρμονικές συνιστώσες περιορίζονται σε συχνότητες

πέριξ της συχνότητας της τριγωνικής κυματομορφής φορέα και άνω (για τριφασικό αντιστροφέα). Οι αρμονικές αυτές συνιστώσες, οι οποίες βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες, δεν απαιτούν στις συνήθεις εφαρμογές την χρήση φίλτρων για την καταστολή τους, αφού τις περισσότερες φορές φιλτράρονται σε ικανοποιητικό βαθμό από την επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων του στάτη.

Συμπερασματικά, η περιγραφείσα τεχνική ελέγχου είναι ιδιαίτερα απλή και παρουσιάζει ελάχιστη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών που δεν απαιτούν μεγάλη ακρίβεια και ιδιαίτερα καλή μεταβατική συμπεριφορά, όπως ανεμιστήρες, αντλίες κλπ.

III.b. Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό Πεδίου

Ο διανυσματικός έλεγχος, όπως φανερώνει και η ονομασία του, έχει ως κεντρική ιδέα τον έλεγχο του διανύσματος των ελεγχόμενων μεταβλητών. Συνεπώς, πέρα από το μέτρο τους ελέγχει και τη γωνία τους (φάση), ώστε να προσδιορίσει επακριβώς το διάνυσμά τους.

Ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου, και συγκεκριμένα με το πεδίο του δρομέα που εξετάζεται εδώ, αποτελεί την λύση στο εγγενές πρόβλημα που εμφανίζει ο έλεγχος των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής, το οποίο δεν είναι άλλο από την συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής. Για να επιλύσουμε το πρόβλημα αυτό θα πρέπει αρχικά να μετασχηματίσουμε αλγεβρικά τις εξισώσεις του μοντέλου της μηχανής σε ένα πλαίσιο αναφοράς δύο καθέτων αξόνων (dq), το οποίο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Όπως θα είναι ευνόητο, ο έλεγχος θα πρέπει να διενεργηθεί στο ίδιο πλαίσιο αναφοράς. Ο αλγόριθμος ελέγχου θα πρέπει να εξασφαλίζει πάντοτε ότι το πλαίσιο αναφοράς διατηρεί τον επιθυμητό προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα.

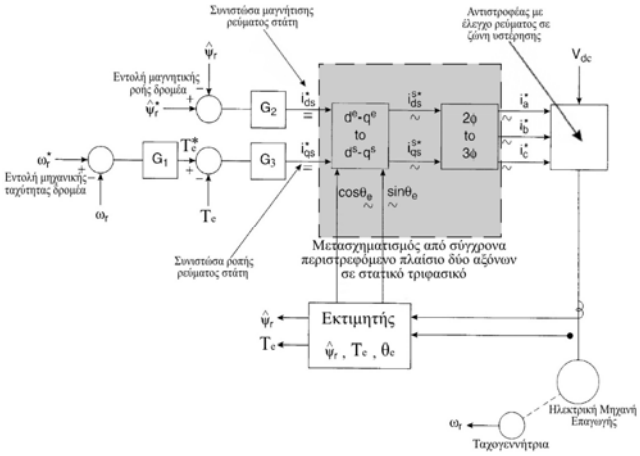
Όταν επιτευχθεί σωστός προσανατολισμός του ευθέως άξονα του περιστρεφόμενου με τη σύγχρονη ταχύτητα πλαισίου αναφοράς δύο αξόνων με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα, το οποίο επίσης περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, έχουμε πλήρη αποσύζευξη των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής. Η αποσύζευξη αυτή απορρέει από τις εξισώσεις του μοντέλου για τις συνθήκες του προσανατολισμού και παραμένει πλήρης για όσο χρόνο διατηρείται ο προσανατολισμός αυτός. Για το λόγο αυτό η διαρκής διατήρηση του σωστού προσανατολισμού από τον αλγόριθμο ελέγχου είναι μείζονος σημασίας και βασική προϋπόθεση για την επιτυχία του εφαρμοζόμενου ελέγχου.

Εφόσον με τη διατήρηση του προσανατολισμού αυτού οι εξισώσεις του μοντέλου της μηχανής αποζευγνύονται, η μαγνητική ροή της μηχανής και η ροπή της (άρα και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της) είναι ανεξάρτητες μεταβλητές. Το γεγονός αυτό είναι μια σημαντικότατη παρατήρηση, η οποία αποτελεί και τη βάση του διανυσματικού ελέγχου, αφού πλέον είμαστε σε θέση να ελέγχουμε ανεξάρτητα και κατά το δοκούν τόσο τη μαγνητική ροή όσο και την ταχύτητα του δρομέα, χωρίς η μεταβολή του ενός μεγέθους να επιδρά στην τιμή του άλλου. Αυτή η ιδιότητα αποτελεί το κυριότερο πλεονέκτημα του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου, αφού επιτρέπει τον έλεγχο μιας μηχανής επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα σαν να ήταν μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Με το ρεύμα ευθέως άξονα ελέγχεται το πλάτος της μαγνητικής ροής του δρομέα (πεδίο) της μηχανής, ενώ με το ρεύμα εγκάρσιου άξονα ελέγχεται η αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή και συνεπώς η ταχύτητα του δρομέα της μηχανής.

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που χρησιμοποιούν την εν λόγω τεχνική ελέγχου χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους απόδοση και την μεγάλη ακρίβεια στη ρύθμιση της ταχύτητας και της μαγνητικής ροής τόσο σε στατές όσο και σε δυναμικές συνθήκες, και στα τέσσερα τεταρτημόρια του πεδίου ταχύτητας–ροπής, ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες. Η απόκριση, απουσία σύζευξης, είναι ιδιαίτερα ταχεία και χωρίς ιδιαίτερη ταλαντωτική συμπεριφορά, γεγονός που χαρακτηρίζει την επίδοση και την ακρίβεια συστημάτων που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική ελέγχου ως ιδιαίτερα καλή.

Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι η τεχνική αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων της μηχανής και ιδιαιτέρως στην μεταβολή της τιμής της αντίστασης του δρομέα. Η μεταβολή αυτή μπορεί να οφείλεται είτε σε θέρμανση, λόγω των θερμικών απωλειών εντός της μηχανής (θερμότητα Joule, μαγνητικές απώλειες πυρήνα, θερμικές απώλειες λόγω δινορρευμάτων), είτε στο επιδερμικό φαινόμενο, το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα των κυκλοφορούντων ρευμάτων δρομέα. Η μεταβολή των παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα ο προσανατολισμός με το πεδίο του δρομέα να μην είναι πάντοτε ορθός και ακριβής, γεγονός που υποβαθμίζει την ποιότητα του ελέγχου και επιδεινώνει την επίδοσή του.

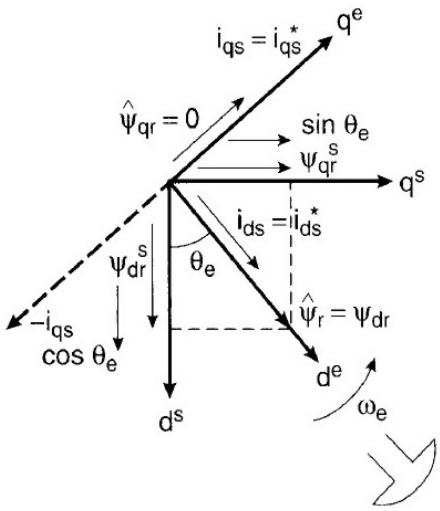
Δύο είναι τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής: η ιδιαίτερα μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα που απαιτείται για τον σωστό προσανατολισμό του πλαισίου αναφοράς και η ανάγκη για έλεγχο του ρεύματος του αντιστροφέα.



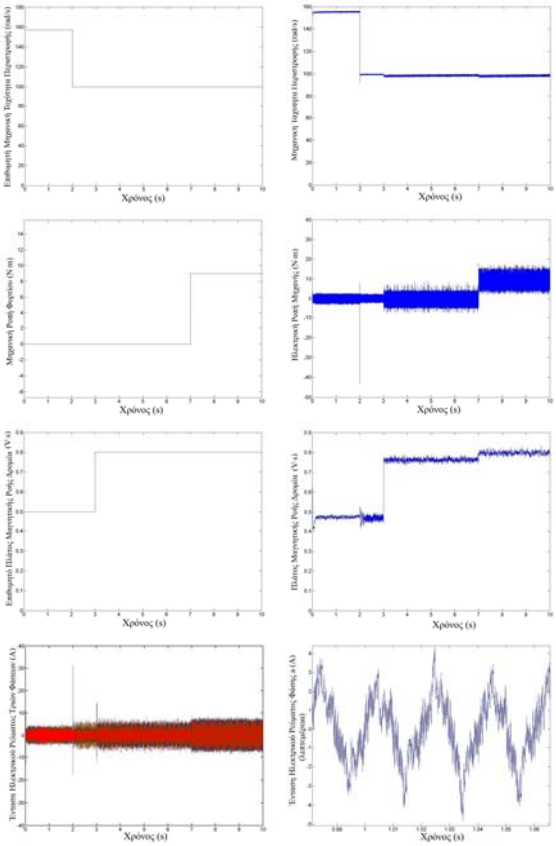
Σχ.4. Λειτουργικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου, ο οποίος περιλαμβάνει έλεγχο της μαγνητικής ροής του δρομέα της μηχανής σε κλειστό βρόχο.

Η μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα συνεπάγεται μεγάλο υπολογιστικό φόρτο, όταν ο έλεγχος διενεργείται με μεγάλη συχνότητα, και στην περίπτωση αυτή συνήθως απαιτείται η χρήση ιδιαίτερα γρήγορων και υψηλού κόστους υπολογιστικών μονάδων. Ο έλεγχος ρεύματος που απαιτείται μπορεί να επιτευχθεί είτε με τον έλεγχο του στιγμιαίου ρεύματος σε ζώνη υστέρησης είτε με πρόβλεψη των επιθυμητών τάσεων από τα επιθυμητά ρεύματα μέσω του μοντέλου της μηχανής και εφαρμογή της τεχνικής SPWM με κυματομορφές διαμόρφωσης ή αναφοράς τις τάσεις αυτές. Η πρώτη μέθοδος με τον έλεγχο με ζώνη υστέρησης δεν δίνει βέλτιστα αποτελέσματα καθώς η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή, ενώ το αρμονικό περιεχόμενο είναι σημαντικό, οδηγώντας στην ανάπτυξη παρασιτικών ροπών. Η δεύτερη τεχνική με την πρόβλεψη των επιθυμητών τάσεων δίνει σταθερή διακοπτική συχνότητα, ενώ η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος είναι σαφώς μικρότερη.

Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η δυνατότητα που παρέχει για εξοικονόμηση ενέργειας. Η εξοικονόμηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο προγραμματισμό της εντολής του επιθυμητού πλάτους της μαγνητικής ροής του δρομέα της μηχανής ανάλογα με την ταχύτητα ή το φορτίο της. Ο προγραμματισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνητικής ροής σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής, σε περιπτώσεις που η μηχανή δεν απαιτείται να αναπτύξει την μέγιστή της ροπή. Το όφελος από την ενέργεια αυτή είναι ότι μειώνονται σημαντικά οι μαγνητικές απώλειες λόγω υστέρησης, με αποτέλεσμα η μηχανή να εμφανίζει μικρότερη κατανάλωση με το ίδιο μηχανικό αποτέλεσμα. Επομένως η λειτουργία της γίνεται αποδοτικότερη.



Σχ.5. Διανυσματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα.



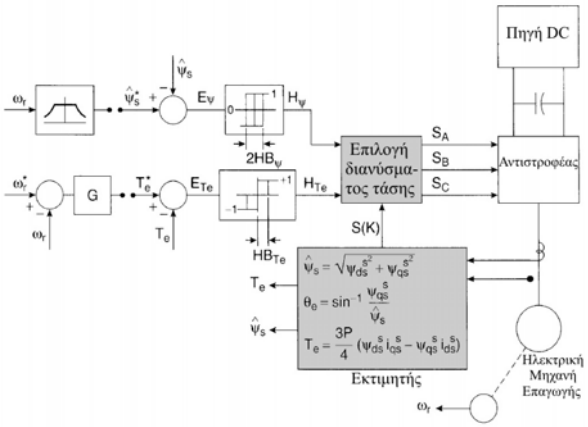
Σχ.6. Αποτελέσματα από την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα.

III.c. Άμεσος Έλεγχος Ροής και Ροπής

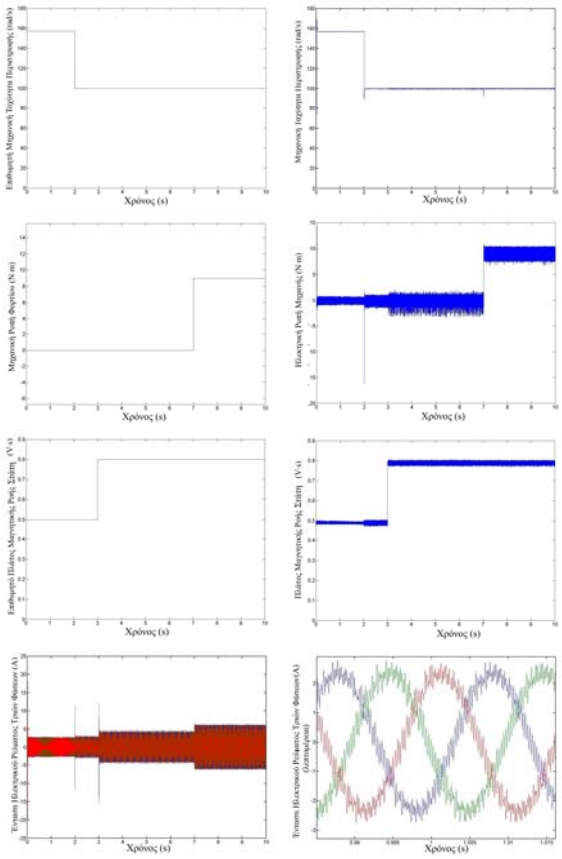
Ο άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (Direct Torque and Flux Control–DTFC ή συνηθέστερα DTC), ο οποίος εναλλακτικά καλείται και άμεσος αυτοέλεγχος (Direct Self–Control - DSC), αποτελεί μια ιδιαίτερα προηγμένη τεχνική μονόμετρου (βαθμωτού) ελέγχου. Η τεχνική αυτή προτάθηκε για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και αποτέλεσε τη χαραυγή μιας νέας γενιάς τεχνικών ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων μέσω αντιστροφέων πηγής τάσης.

Το τεράστιο ενδιαφέρον που έχει πυροδοτήσει αυτή η τεχνική ελέγχου οφείλεται στο ότι επιτυγχάνει παρόμοια επίδοση ελέγχου με τον διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό πεδίου, χωρίς όμως να συνεπάγεται ανάλογη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Συγκεκριμένα η τεχνική αυτή, όπως και κάθε μονόμετρος έλεγχος, δεν λαμβάνει υπόψη της τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής και όπως είναι αναμενόμενο αυτό οδηγεί σε μη βέλτιστη απόκριση. Η μείωση όμως της πολυπλοκότητας και η επακόλουθη μείωση του απαιτούμενου χρόνου υπολογισμού επιτρέπει τη διενέργεια πολύ γρήγορων κύκλων ελέγχου. Επομένως μπορεί η απόκριση του κάθε κύκλου να μην είναι η βέλτιστη, όμως η ταχύτητα με την οποία αυτή διορθώνεται από τον κύκλο ελέγχου που ακολουθεί επιτρέπει τον ταχύτατο και με αρκετά μεγάλη ακρίβεια έλεγχο της ηλεκτρικής ροπής (άρα και της ταχύτητας) αλλά και της μαγνητικής ροής της μηχανής. Η απόκριση ροπής στην τεχνική του άμεσου ελέγχου ροής και ροπής θεωρείται ότι είναι εφάμιλλη εκείνης ενός συστήματος που χρησιμοποιεί την τεχνική του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου.

Η φιλοσοφία του ελέγχου με την τεχνική αυτή βασίζεται στην βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αντιστροφέα και την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων ελέγχου που προσφέρει (βαθμοί ελευθερίας). Η παρούσα κατάσταση της ηλεκτρικής μηχανής εκτιμάται και ελέγχεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η μαγνητική της ροή. Ανάλογα με το πόσο οι τιμές αυτές αποκλίνουν από τις επιθυμητές αλλά και ανάλογα με τον κυκλικό τομέα στον οποίο βρίσκεται το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του στάτη επιλέγεται από έναν πίνακα διακοπτικών καταστάσεων εκείνη η διακοπτική κατάσταση, η οποία θα οδηγήσει το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης στην επιθυμητή απόκριση. Ο πίνακας διακοπτικών καταστάσεων είναι δεδομένος και έχει προκύψει από την ανάλυση της επίδρασης του κάθε επιτρεπτού διανύσματος κατάστασης του αντιστροφέα (ήτοι της προκύπτουσας τάσης από την εφαρμογή του) επί της ροπής και της μαγνητικής ροής της μηχανής. Ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου αντιστροφέα και το πλήθος των σταθμών κβάντισης των σφαλμάτων ροής και ροπής προκύπτει και το πλήθος των στοιχείων του πίνακα διακοπτικών καταστάσεων.



Σχ.7 Λειτουργικό διάγραμμα τυπικού ελεγκτή που χρησιμοποιεί την τεχνική άμεσου ελέγχου ροπής και ροής.



Σχ.8. Αποτελέσματα από την εφαρμογή του άμεσου ελέγχου ροπής και ροής.

Η λειτουργία ενός συστήματος που χρησιμοποιεί τον άμεσο έλεγχο ροπής και ροής είναι αυτορρυθμιζόμενη και μπορεί χωρίς πρόβλημα να επεκταθεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια και στην περιοχή εξασθένισης πεδίου. Ένα μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι ο έλεγχος εντός ζώνης υστέρησης προκαλεί διακύμανση της ροής και της ροπής, ενώ η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή. Παρόλα αυτά το γεγονός ότι η εν λόγω τεχνική δεν περιλαμβάνει έλεγχο με ανατροφοδότηση ρεύματος, δεν χρησιμοποιεί την κλασική τεχνική PWM και δεν απαιτεί τους πολύπλοκους μετασχηματισμούς μεταξύ πλαισίων αναφοράς, αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα της τεχνικής του άμεσου ελέγχου ροπής. Στο σημείο αυτό αξίζει επίσης να τονιστεί, ότι η εν λόγω τεχνική εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία ως προς την τιμή της ωμικής αντίστασης του στάτη, η οποία αφενός είναι άμεσα μετρήσιμη, και αφετέρου μπορεί να μεταβληθεί με τη σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων.

Και αυτή η τεχνική παρέχει δυνατότητα για εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω κατάλληλου προγραμματισμού της εντολής του επιθυμητού πλάτους της μαγνητικής ροής του δρομέα της μηχανής ανάλογα με την ταχύτητα ή το φορτίο της. Ο προγραμματισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνητικής ροής σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής, σε περιπτώσεις που η μηχανή δεν απαιτείται να αναπτύξει την μέγιστή της ροπή. Το όφελος από την ενέργεια αυτή είναι ότι μειώνονται σημαντικά οι μαγνητικές απώλειες λόγω υστέρησης, με αποτέλεσμα η μηχανή να εμφανίζει μικρότερη κατανάλωση με το ίδιο μηχανικό αποτέλεσμα. Επομένως η λειτουργία της γίνεται αποδοτικότερη για φορτία μικρότερα του ονομαστικού.

Η μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα καλή επίδοση της τεχνικής αυτής δίνει ένα ευρύ πεδίο πρακτικών εφαρμογών για συστήματα που απαιτούν ακριβή έλεγχο ταχύτητας, με ικανοποιητική μεταβατική συμπεριφορά. Η εξέλιξη αυτή έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος για την εν λόγω τεχνική.

IV. Εν κατακλείδι

Από τα ανωτέρω παρατηρούμε ότι η κάθε τεχνική ελέγχου παρουσιάζει εγγενή πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα, τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την επιλογή του συστήματος οδήγησης της ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής. Οι απαιτήσεις και οι προδιαγραφές του εκάστοτε συστήματος ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή και αυτές είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή της βέλτιστης ανά περίπτωση μεθόδου ελέγχου.

Τέλος, η συνεχής μελέτη και η αδιάκοπη εξέλιξη των συστημάτων και των αλγορίθμων (τεχνικών) ελέγχου για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής αναμένεται στο άμεσο μέλλον να οδηγήσουν σε συστήματα που θα έχουν καλύτερη επίδοση, συμπεριφορά και αξιοπιστία με χαμηλότερο κόστος. Το γεγονός αυτό πρόκειται να διευρύνει περαιτέρω τις ήδη σημαντικές πρακτικές εφαρμογές των αντίστοιχων συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης._