

Η σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών

Η πρόσφατη χρησιμοποίηση υλικών μονίμων μαγνητών με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε ανταγωνιστικές τιμές, η συνεχής εξέλιξη και μείωση του κόστους των ισχυρών επεξεργαστών ψηφιακού σήματος (Digital Signal Processors, DSPs) και των μικροελεγκτών (microcontrollers) σε συνδυασμό με την αξιοσημείωτη πρόοδο στους ημιαγωγούς διακόπτες

και στις σύγχρονες τεχνολογίες ελέγχου, έχουν καταστήσει ανταγωνιστική την τεχνολογία των μηχανών μονίμων μαγνητών στις απαιτήσεις της αγοράς παγκοσμίως.

Η «πρώιμη» έκδοση μιας σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών είναι η συμβατική σύγχρονη μηχανή με τυλιγμένο δρομέα, στον οποίο είναι τοποθετημένο το τύλιγμα διέγερσης που τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα, έτσι ώστε να παράγει την κατάλληλη ροή δρομέα. Η σύγχρονη μηχανή είναι μία μηχανή σταθερής ταχύτητας που στρέφεται συνεχώς με τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα και το πλάτος της τάσης τροφοδοσίας αλλά και από τον αριθμό των πόλων της μηχανής. Η μηχανή μονίμων μαγνητών ανήκει στην κατηγορία των σύγχρονων μηχανών, εφόσον το ηλεκτρικό κύκλωμα διέγερσης του δρομέα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες, που παράγουν σταθερή μαγνητική ροή.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης μονίμων μαγνητών αντί της χρήσης κυκλώματος διέγερσης, όπως χρησιμοποιείται στις συμβατικές σύγχρονες μηχανές, δίνονται παρακάτω :

- ☒ Εξάλειψη δακτυλίων (slip rings) και πρόσθετης εξωτερικής DC τροφοδοσίας.
- ☒ Μηδενικές απώλειες χαλκού στο δρομέα λόγω του τυλίγματος διέγερσης σε μία σύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα.
- ☒ Υψηλότερη απόδοση λόγω μικρότερων απωλειών.
- ☒ Ευκολότερη ψύξη της μηχανής λόγω απουσίας κυκλώματος που εκπέμπει θερμότητα στο δρομέα. Οι απώλειες χαλκού και σιδήρου στο στάτη είναι αυτές που προκαλούν τις θερμικές απώλειες και μπορούν να εποπτευθούν κατάλληλα.
- ☒ Μείωση του μεγέθους της μηχανής λόγω υψηλής απόδοσης.
- ☒ Διαφορετικά μεγέθη και διαφορετική χωροταξία των μονίμων μαγνητών στο δρομέα οδηγεί σε μεγάλη ποικιλομορφία χαρακτηριστικών.

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών έχουν διαδοθεί ιδιαίτερα μετά την έλευση ενώσεων στοιχείων που περιέχουν σπάνιες γαίες, όπως το κοβάλτιο – σαμάριο (SmCo) και το νεοδύμιο-βόριο-σίδηρος (NdFeB), τα οποία ξεπερνούν τα συμβατικά σιδηρομαγνητικά υλικά των DC μηχανών και των μηχανών επαγωγής και γίνονται όλο και περισσότερο ελκυστικά στις βιομηχανικές εφαρμογές.



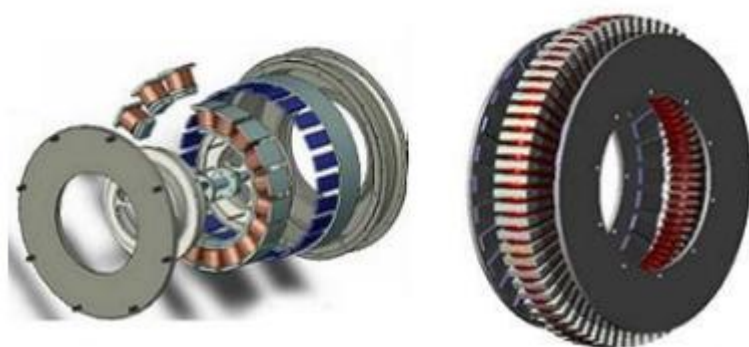
Τα θετικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθιστούν πολλές φορές τις μηχανές μονίμων μαγνητών την πρώτη επιλογή σε διάφορες κατηγορίες εφαρμογών των συστημάτων οδήγησης (drives), όπως στα συστήματα οδήγησης σερβομηχανισμών με κινητήρες χαμηλής ή μέτριας ισχύος, στις ρομποτικές εφαρμογές, στα συστήματα ελέγχου κίνησης, αλλά και στα βιομηχανικά συστήματα οδήγησης ισχύος κλασματικού ίππου. Επίσης, έχουν κατασκευαστεί και μηχανές μονίμων μαγνητών για την πρόωση πλοίων ισχύος ως και 1MW.



Συγκριτικά με τις μηχανές επαγωγής, οι μηχανές μονίμων μαγνητών εμφανίζουν κάποια πλεονεκτήματα, όπως η υψηλότερη απόδοση στη μεταβατική κατάσταση και η συνεχής λειτουργία στη σύγχρονη ταχύτητα. Επίσης δεν έχουν απώλειες λόγω ολίσθησης όπως συμβαίνει με τις μηχανές επαγωγής, όπου το πεδίο του δρομέα πρέπει να στρέφεται με ελαφρώς μικρότερη ταχύτητα από το πεδίο του στάτη, καθώς το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής απαιτεί σχετική κίνηση μεταξύ των δύο πεδίων. Η ολίσθηση είναι αυτή που ορίζει τη μηχανή ως ασύγχρονη, κάτι το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η ταχύτητα του δρομέα δεν είναι πλέον ακριβώς ανάλογη της συχνότητας τροφοδοσίας. Σε μία μηχανή επαγωγής, το ρεύμα του στάτη έχει συνιστώσα ροπής και συνιστώσα μαγνήτισης του πυρήνα. Αντίθετα σε μια μηχανή μονίμων μαγνητών, δεν υπάρχει ανάγκη ρεύματος μαγνήτισης από το στάτη για σταθερή ροή διακένου. Το ρεύμα του στάτη χρειάζεται μόνο για την παραγωγή ροπής, εφόσον οι μόνιμοι μαγνήτες παράγουν σταθερή ροή στο δρομέα. Για την ίδια ισχύ εξόδου, η μηχανή μονίμων μαγνητών θα λειτουργεί με υψηλότερο συντελεστή ισχύος και θα είναι πιο αποδοτική από μία μηχανή επαγωγής. Τελικά, εφόσον η μαγνήτιση παρέχεται από το κύκλωμα του δρομέα μέσω μονίμων μαγνητών αντί να προέρχεται από το στάτη, η μηχανή μπορεί να κατασκευαστεί με μεγαλύτερο διάκενο χωρίς να μειωθεί η επίδοσή της. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μηχανή μονίμων μαγνητών έχει μεγαλύτερη απόδοση, μεγαλύτερο λόγο ροπής ανά ampere, καλύτερο συντελεστή και πυκνότητα ισχύος συγκρινόμενη με μία μηχανή επαγωγής. Όσο μικρότερη η μηχανή, τόσο πιο προτιμότερο είναι να χρησιμοποιηθεί μηχανή μονίμων μαγνητών. Όσο αυξάνει το μέγεθος της μηχανής, αυξάνει παράλληλα και το κόστος των μαγνητών, καθιστώντας τις μηχανές αυτές οικονομικά μη αποδοτικές. Δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο σημείο, όπου οι μηχανές μονίμων μαγνητών υπερσχύουν των μηχανών επαγωγής κάτω από αυτό, αλλά το εύρος 1-10kW είναι μια καλή εκτίμηση.

Συμπερασματικά, συγκριτικά με τη μηχανή επαγωγής και με τη συμβατική σύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα, οι μηχανές μονίμων μαγνητών υπερσχύουν στο γεγονός ότι

δεν υπάρχει τύλιγμα πεδίου και επομένως απώλειες χαλκού στο τύλιγμα αυτό. Επίσης ηλεκτρικό κύκλωμα υπάρχει μόνο στο στάτη, όπου η θερμότητα μπορεί να απομακρυνθεί πιο εύκολα. Συγκριτικά με τη συμβατική μηχανή τυλιγμένου δρομέα, η εξάλειψη του τυλιγματος πεδίου, της DC τροφοδοσίας και των δακτυλίων συντελεί στην απλούστερη κατασκευή της μηχανής. Σε μία μηχανή μονίμων μαγνητών δεν υπάρχει έλεγχος του πεδίου διέγερσης. Ο έλεγχος περιορίζεται σε έλεγχο της διέγερσης του στάτη μόνο. Είναι επίσης δυνατή η λειτουργία εξασθένησης πεδίου (field weakening), όπου εφαρμόζεται αρνητικό ρεύμα ευθέως άξονα στο στάτη που αντιτίθεται στη ροή των μαγνητών του δρομέα. Τέλος, η απουσία ηλεκτρικού κυκλώματος στο δρομέα οδηγεί σε μικρότερο συνολικό μέγεθος της μηχανής μονίμων μαγνητών, έτσι ώστε για την ίδια ένταση πεδίου διέγερσης να απαιτείται μικρότερη διάμετρος από μία αντίστοιχη τυλιγμένου δρομέα, κάτι που επιτρέπει μειωμένο μέγεθος και βάρος.



Μηχανές μονίμων μαγνητών ακτινικής (αριστερά) και αξονικής (δεξιά) ροής

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της μηχανής σε μηχανές αξονικής (axial) και ακτινικής (radial) ροής. Οι μηχανές αξονικής ροής χρησιμοποιούνται λιγότερο και το κοινό χαρακτηριστικό τους είναι το δισκοειδές τους σχήμα (Σχήμα 3.4). Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στη σχετική βιβλιογραφία. Οι συνήθεις μηχανές ακτινικής ροής, στην κατηγορία των οποίων ανήκει και η μηχανή του κινητηρίου συστήματος που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, μπορούν να διακριθούν σε :

- ☒ Επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (Sinusoidal Surface Magnet Machine, SPM)
- ☒ Εμφυτευμένων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (Sinusoidal Interior Magnet Machine, IPM)
- ☒ Επιφανειακών μαγνητών τραπεζοειδούς ροής (Trapezoidal Surface Magnet Machine)

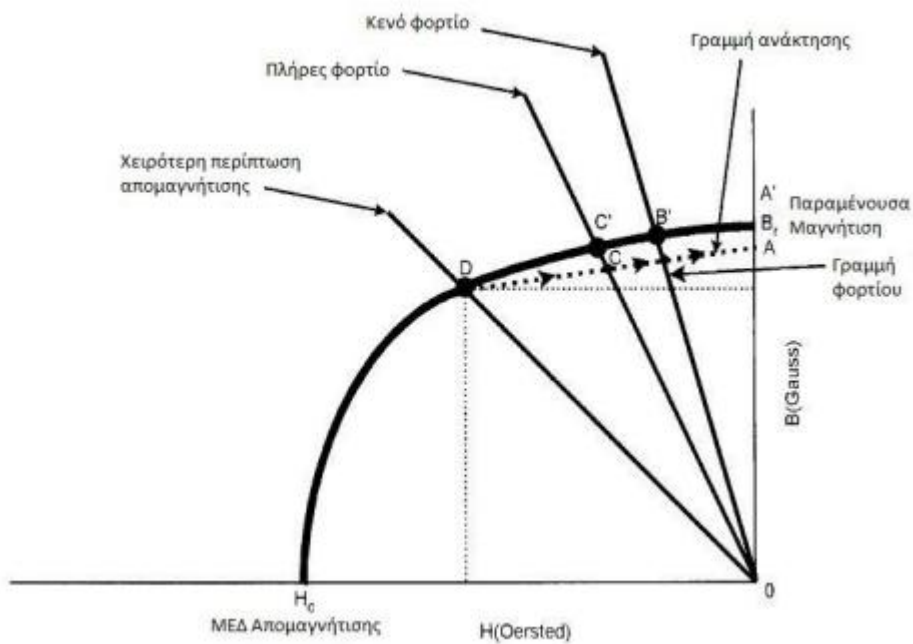
Οι κατηγορίες αυτές, καθώς και τα υλικά κατασκευής τους, παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες.

Υλικά μονίμων μαγνητών

Οι ιδιότητες ενός μόνιμου μαγνήτη και η επιλογή των κατάλληλων υλικών είναι πολύ σημαντικά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού μιας μηχανής μονίμων μαγνητών.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται το τμήμα απομαγνήτισης της καμπύλης μαγνήτισης $B(H)$, στο οποίο είναι συνήθως σχεδιασμένος να λειτουργεί ο μόνιμος μαγνήτης. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής B_r που αντιστοιχεί στο σημείο A' θα είναι διαθέσιμη αρχικά αν ο

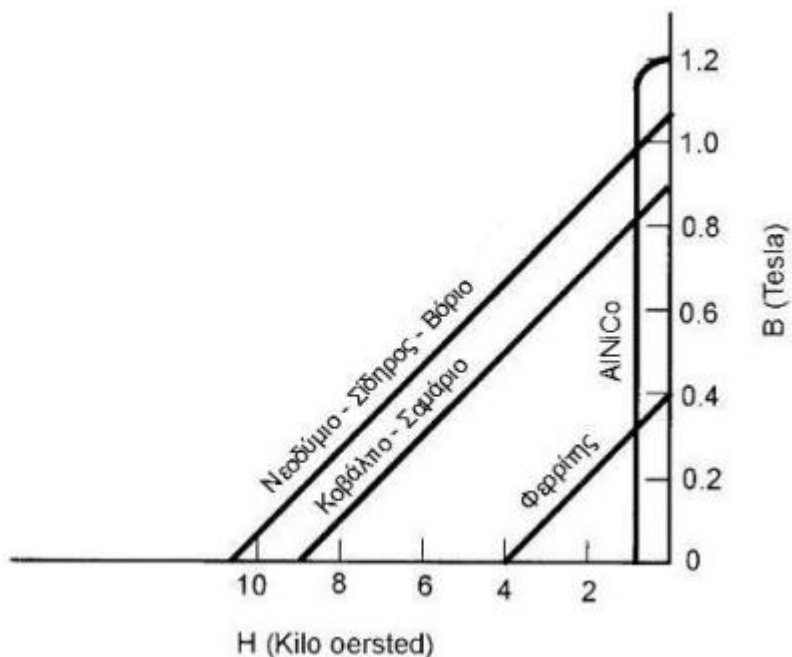
μαγνήτης βραχυκυκλωθεί με μία μεταλλική πλάκα, έτσι ώστε να μην υπάρχει διάκενο μεταξύ βόρειου και νότιου πόλου. Όταν ο μαγνήτης τοποθετείται στη μηχανή, το διάκενο αέρος έχει κάποια απομαγνητίζουσα επίδραση έτσι ώστε το σημείο Β' να αντιστοιχεί στη γραμμή κενού φορτίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Η κορυφή της γραμμής κενού φορτίου (ως προς τον άξονα της έντασης του μαγνητικού πεδίου H) θα είναι χαμηλότερη με μεγαλύτερο διάκενο. Όταν τα τυλίγματα του στάτη διαρρέονται από ρεύμα, η αντίδραση τυμπάνου του μαγνητικού άξονα (de) μπορεί να δημιουργήσει εκ νέου φαινόμενο απομαγνήτισης, το οποίο θα μειώσει ακόμη περισσότερο την πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο.



Σημεία λειτουργίας μηχανής μόνιμων μαγνητών πάνω στη καμπύλη B(H)

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται επίσης μία γραμμή φορτίου που αντιστοιχεί στη χειρότερη περίπτωση απομαγνήτισης που μπορεί να προκληθεί κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, ενός μεταβατικού φαινομένου ή σε περίπτωση σφάλματος. Όταν το σημείο λειτουργίας φτάσει στο D και αρθεί το φαινόμενο που προκαλεί την απομαγνήτιση, ο μαγνήτης θα επανέλθει κατά μήκος της γραμμής ανάκτησης (recoil line), η οποία έχει σχεδόν την ίδια κορυφή με την αρχική καμπύλη B(H) κοντά στο $H = 0$. Σε μία επόμενη λειτουργία, το σταθερό σημείο λειτουργίας θα καθορισθεί από την τομή της γραμμής φόρτιου και της γραμμής ανάκτησης. Έτσι, ο μαγνήτης απομαγνητίζεται μόνιμα στην λειτουργία εν κενώ κατά την κάθετη απόσταση μεταξύ των σημείων A και A'. Το φαινόμενο αυτό αναδεικνύει τη σπουδαιότητα που έχει το σημείο της χειρότερης περίπτωσης απομαγνήτισης στην επίδοση της μηχανής και την αναγκαιότητα αποφυγής λειτουργίας της μηχανής κοντά σε αυτό το σημείο. Εναλλακτικά, αν το υλικό του μόνιμου μαγνήτη επιλεγθεί ώστε η καμπύλη απομαγνήτισης να είναι ευθεία γραμμή, η γραμμή ανάκτησης θα συμπίπτει με τη γραμμή απομαγνήτισης άσχετα με το αν η μηχανή έχει περάσει από το σημείο της χειρότερης περίπτωσης απομαγνήτισης (δηλαδή ο μόνιμος απομαγνητισμός θα είναι αμελητέος). Το Σχήμα 3.6 δείχνει τα χαρακτηριστικά αρκετών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μόνιμοι μαγνήτες. Το κράμα AlNiCo έχει υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, θερμική ευστάθεια και υψηλή τιμή μαγνητικής επαγωγής. Η χαμηλή τιμή ΜΕΔ απομαγνήτισης όμως

σε συνδυασμό με την σχεδόν τετραγωνική μορφή της $B(H)$ χαρακτηριστικής, η οποία προκαλεί πολύ μεγάλη μόνιμη απομαγνήτιση, καθιστούν ακατάλληλο το υλικό αυτό για την κατασκευή μηχανών μόνιμων μαγνητών.



Σχήμα 3.6– Χαρακτηριστικά μόνιμων μαγνητών

Οι φερρίτες στροντίου ($SrFe$) και βαρίου ($BaFe$) χρησιμοποιούνται ευρέως ως μόνιμοι μαγνήτες. Ο φερρίτης έχει τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους και της άφθονης διάθεσής του ως πρώτη ύλη. Είναι επίσης εύκολοι στην παραγωγή και ο τρόπος επεξεργασίας τους επιτρέπει τη λειτουργία τους σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία ($400^{\circ}C$). Ο μαγνήτης έχει πρακτικά γραμμική καμπύλη απομαγνήτισης, αλλά η παραμένουσα μαγνήτιση (B_r) είναι μικρή. Έτσι η μηχανή γίνεται βαρύτερη και πιο ογκώδης.

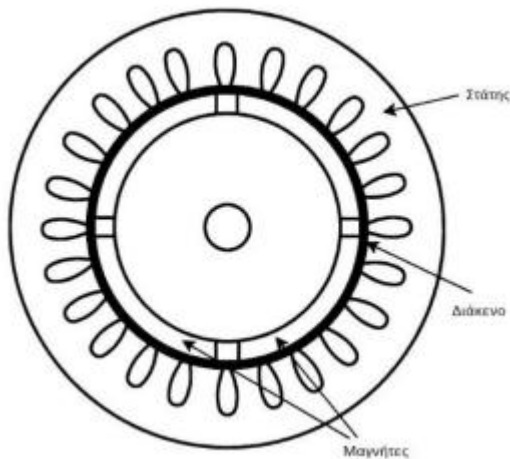
Ο μαγνήτης κοβαλτίου – σαμαρίου ($CoSm$) είναι φτιαγμένος από σίδηρο, νικέλιο, κοβάλτιο και από τη σπάνια γαία σαμάριο. Έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής παραμένουσας μαγνήτισης, της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που εκφράζεται από το γινόμενο (BH_{max}) και των γραμμικών χαρακτηριστικών απομαγνήτισης. Η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να φτάσει και τους $300^{\circ}C$, ενώ η θερμοκρασιακή ευστάθεια (% αλλαγής μαγνητική επαγωγή B ανά $^{\circ}C$) είναι πολύ καλή (-0.03%). Όμως το υλικό αυτό είναι αρκετά ακριβό λόγω της ανεπαρκούς διάθεσης του σαμαρίου.

Ο μαγνήτης νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου ($NdFeB$) έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, υψηλότερη μαγνητίζουσα αντίδραση και πολύ καλή ΜΕΔ απομαγνήτισης (H_c). Τα μειονεκτήματα είναι η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας ($150^{\circ}C$) και η ευαισθησία στη οξείδωση αν δεν προστατεύεται από ειδική επίστρωση. Επίσης, η θερμοκρασιακή ευστάθεια (-0.13%) είναι κατώτερη από εκείνη ενός μαγνήτη $CoSm$. Το υλικό αυτό είναι ακριβότερο συγκριτικά με το φερρίτη, αλλά εξαιτίας της μεγάλης ενεργειακής του πυκνότητας, μειώνει το βάρος της μηχανής. Η εφαρμογή των μαγνητών $NdFeB$ στις μηχανές μόνιμων μαγνητών αυξάνεται συνεχώς.

Μηχανή επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής

Σε αυτή τη μηχανή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, ο στάτης αποτελείται από ένα τριφασικό ημιτονοειδές τύλιγμα, το οποίο παράγει ροή διακένου στρεφόμενη με τη σύγχρονη ταχύτητα. Οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται κολλημένοι στην επιφάνεια του δρομέα

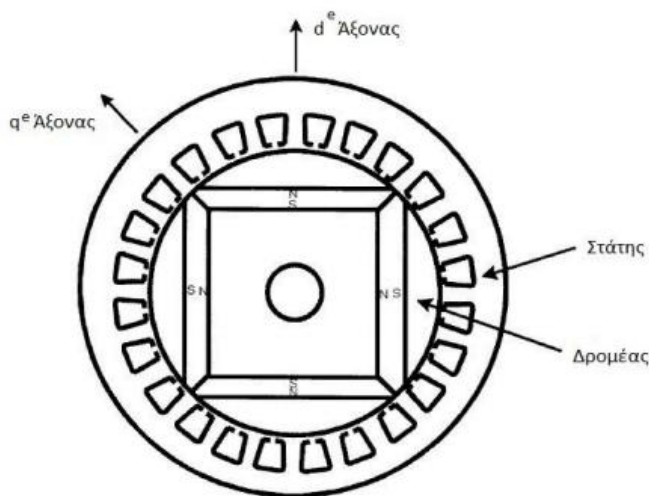
χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα. Ο δρομέας έχει σιδερένιο πυρήνα, ο οποίος μπορεί να είναι συμπαγής ή φτιαγμένος από διάτρητα ελάσματα για ευκολία στην κατασκευή. Στην περίπτωση λειτουργίας μεταβλητών στροφών, οι μηχανές αυτές μπορεί να έχουν τύλιγμα κλωβού ή τύλιγμα απόσβεσης, κάτι που βέβαια προκαλεί πρόσθετες απώλειες λόγω αρμονικών. Εάν η μηχανή στρέφεται από εξωτερική πηγή, τα τυλίγματα του στάτη παράγουν συμμετρικές τριφασικές ημιτονοειδείς τάσεις. Καθώς η σχετική επιτρεπτότητα ενός μόνιμου μαγνήτη είναι πολύ κοντά στη μονάδα ($\mu_r > 1$) και οι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα, το ενεργό εύρος διακένου της μηχανής είναι μεγάλο και η μηχανή δεν εμφανίζει εκτυπότητα ($L_{dm} = L_{qm}$). Αυτό συντελεί στον περιορισμό του φαινομένου της αντίδρασης τυμπάνου εξαιτίας της χαμηλής μαγνητίζουσας αντίδρασης.



Σχήμα 3.7 – Εγκάρσια τομή μηχανής επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής

Μηχανή εσωτερικών ή εμφυτευμένων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής

Σε αντίθεση με μία μηχανή επιφανειακών μαγνητών, μία σύγχρονη μηχανή εσωτερικών ή εμφυτευμένων μαγνητών έχει τοποθετημένους τους μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα. Παρ’ ότι υπάρχουν διάφορες γεωμετρίες πιθανές γεωμετρίες, ένας τυπικός τρόπος τοποθέτησης των μαγνητών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8 :



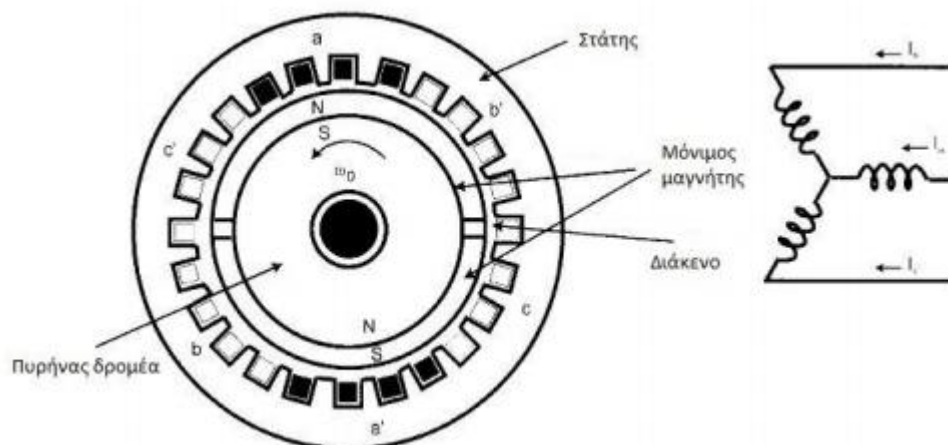
Σχήμα 3.8 – Εγκάρσια τομή μηχανής εσωτερικών/εμφυτευμένων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής

Ο στάτης έχει το συνηθισμένο τριφασικό ημιτονοειδές τύλιγμα. Η διαφορά στη γεωμετρία δίνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά σε μια μηχανή εσωτερικών μαγνητών :

- ☒ Η μηχανή είναι πιο συμπαγής, επιτρέποντας πολύ υψηλότερη ταχύτητα λειτουργίας.
- ☒ Το ενεργό μήκος διακένου στον άξονα d_e είναι μεγαλύτερο από τον άξονα d_e , επομένως η μηχανή εμφανίζει εκτυπότητα και συγκεκριμένα ισχύει $L_{dm} < L_{qm}$ (σε αντίθεση με μία τυπική σύγχρονη μηχανή τυλιγμένου πεδίου).
- ☒ Επικρατεί το φαινόμενο αντίδρασης τυμπάνου, καθώς το ενεργό εύρος διακένου είναι μικρό.

Μηχανή επιφανειακών μαγνητών τραπεζοειδούς ροής

Μία σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών τραπεζοειδούς ροής είναι μία μηχανή που δεν εμφανίζει εκτυπότητα, με επιφανειακούς μαγνήτες, όπως μία μηχανή ημιτονοειδούς ροής, με τη διαφορά ότι το τριφασικό τύλιγμα του στάτη (συνήθως συνδεδεμένο κατά αστέρα) έχει συγκεντρωμένα τυλίγματα πλήρους βήματος αντί για ημιτονοειδή κατανομή των τυλιγμάτων στο διάκενο της μηχανής. Η προσέγγιση της ημιτονοειδούς κατανομής στις μηχανές ημιτονοειδούς ροής επιτυγχάνεται με τη χρήση κλασματικού βήματος στα τυλίγματα του στάτη [6]. Το Σχήμα 3.9 δείχνει την εγκάρσια τομή μιας μηχανής τραπεζοειδούς ροής με τις τρεις φάσεις του στάτη να φαίνονται στα δεξιά. Η διπολική μηχανή του Σχήματος 3.9 έχει κατάλληλο διάκενο για τη μείωση της κυμάτωσης της ροής, ενώ ο στάτης αποτελείται από 4 αγωγούς ανά πόλο και φάση.

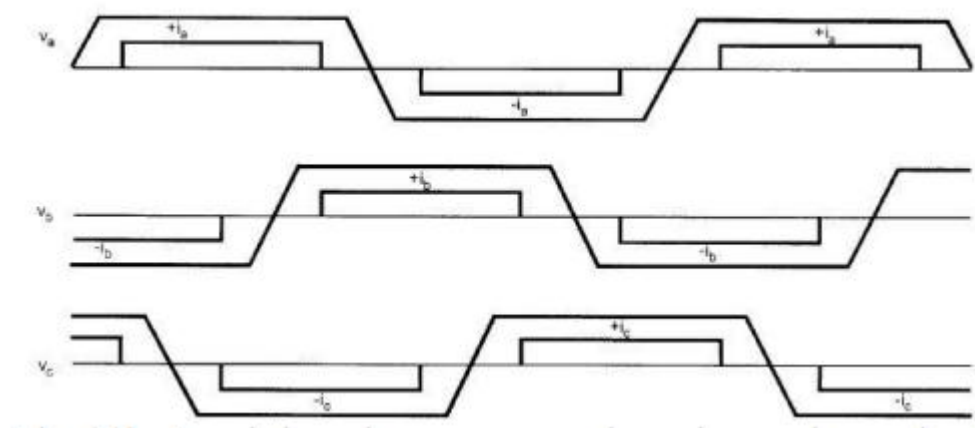


Σχήμα 3.9 – Εγκάρσια τομή μηχανής επιφανειακών μαγνητών τραπεζοειδούς ροής

Καθώς η μηχανή περιστρέφεται, η ροή που διαρρέει ένα φασικό τύλιγμα μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο, εκτός από τη στιγμή που το κενό ανάμεσα από τους μαγνήτες περνάς από τον άξονα της φάσης. Εάν η μηχανή κινείται από εξωτερική πηγή, δηλαδή λειτουργεί ως γεννήτρια, οι φασικές τάσεις του στάτη θα έχουν συμμετρική τραπεζοειδή κυματομορφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η χρήση ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα στους ακροδέκτες της μηχανής, έτσι ώστε να δημιουργεί ρεύμα έξι καταστάσεων (six step) στο κέντρο κάθε μισής περιόδου για την ανάπτυξη ροπής. Καθώς η χρήση του μετατροπέα είναι επιτακτική, συνήθως η μηχανή ονομάζεται και σαν ηλεκτρονικός κινητήρας. Με τη βοήθεια λοιπόν ενός αντιστροφέα και ενός αισθητήρα θέσης (absolute position sensor) που τοποθετείται στον άξονα της μηχανής, τόσο οι τραπεζοειδείς μηχανές μονίμων μαγνητών όσο και οι ημιτονοειδείς, μπορούν να ελεγχθούν ώστε να λειτουργού ως «μηχανές DC χωρίς ψήκτρες» (Brushless DC Motors, BLDC). Οι

μηχανές τραπεζοειδούς ροής βέβαια μοιάζουν περισσότερο στην επίδοσή τους με DC μηχανές από ότι οι ημιτονοειδούς ροής.

Οι μηχανές τραπεζοειδούς ροής είναι απλές, κοστίζουν λίγο και έχουν κάπως μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από ότι μια ημιτονοειδής μηχανή. Η μηχανή αυτή χρησιμοποιείται από συστήματα οδήγησης (drives) χαμηλής ισχύος (έως λίγα kW) που χρησιμοποιούνται σε σερβομηχανισμούς αλλά και σε συσκευές οικιακής χρήσης, όπου οι μεταγωγείς μιας DC μηχανής είναι αθέμιτοι, όπως και οι ψήκτρες.



Σχήμα 3.10 – Φασική τάση στάτη και κυματομορφές ρευμάτων σε μία μηχανή μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς ροής

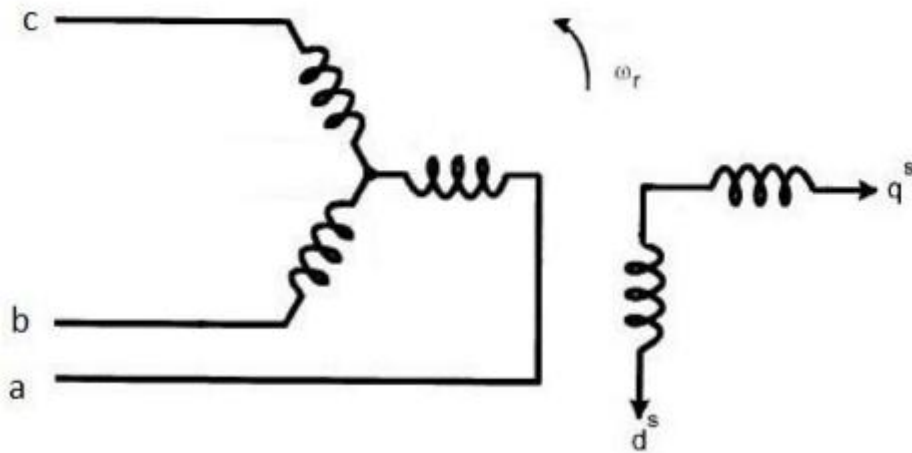
Δυναμικό μοντέλο d - q σύγχρονης μηχανής ημιτονοειδούς ροής

Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής ισχύει μόνο στη μόνιμη κατάσταση. Σε ένα σύστημα οδήγησης ρυθμιζόμενης ταχύτητας, η μηχανή συνήθως αποτελεί ένα στοιχείο μέσα σε ένα βρόχο ανάδρασης και έτσι πρέπει να ληφθεί σημαντικά υπόψη η μεταβατική συμπεριφορά της. Εξάλλου, ο έλεγχος υψηλής επίδοσης του συστήματος οδήγησης, όπως ο διανυσματικός έλεγχος ή έλεγχος προσανατολισμού πεδίου (vector/field oriented control), βασίζεται στο δυναμικό μοντέλο dq της μηχανής.

Λόγω της κίνησης του δρομέα, οι αυτεπαγωγές των φάσεων του στάτη και οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ τους μεταβάλλονται συναρτήσει της γωνίας θ_r του δρομέα. Το μοντέλο της μηχανής μπορεί συνεπώς να περιγραφεί από διαφορικές εξισώσεις με χρονομεταβλητούς συντελεστές, κάτι το οποίο εισάγει μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας στο μοντέλο[4]. Ας σημειωθεί ότι μία τριφασική μηχανή μπορεί να αναπαρασταθεί ως μία ισοδύναμη διφασική μηχανή (Σχήμα 3.11), όπου οι άξονες $d_s - q_s$ αντιπροσωπεύουν τον ευθύ και εγκάρσιο άξονα του στάτη αντίστοιχα. Και πάλι όμως παραμένει το πρόβλημα των χρονομεταβλητών παραμέτρων, παρότι απλουστεύεται κάπως το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων με την εξάλειψη μιας μεταβλητής ($abc \rightarrow dsqs$).

Ο R.H. Park στη δεκαετία του 1920, πρότεινε μια νέα θεωρία ανάλυσης των ηλεκτρικών μηχανών για να λύσει το πρόβλημα. Διατύπωσε ένα μετασχηματισμό ο οποίος στην ουσία αντικαθιστούσε τις μεταβλητές (τάσεις, ρεύματα και πεπλεγμένες ροές) που σχετίζονται με τα τυλίγματα του στάτη μιας σύγχρονης μηχανής, με μεταβλητές που σχετίζονται με φανταστικά τυλίγματα που στρέφονται με το δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα. Ουσιαστικά μετασχημάτισε τις μεταβλητές του στάτη σε ένα στρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα πλαίσιο αναφοράς που βρίσκεται σταθερά πάνω στο δρομέα. Με έναν τέτοιο

μετασχηματισμό (που ονομάζεται μετασχηματισμός Park), έδειξε ότι μπορούν να εξαλειφθούν όλες οι χρονομεταβλητές αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές που προκύπτουν



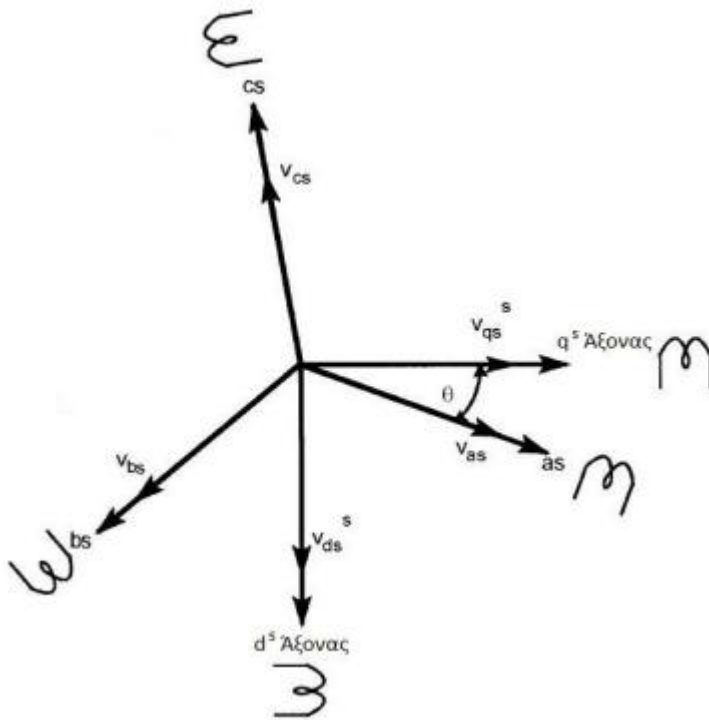
Σχήμα 3.11 – Τριφασικός στάτης και ισοδύναμη διφασική μηχανή

Αργότερα, στη δεκαετία του 1930, ο H.C. Stanley έδειξε ότι οι χρονομεταβλητές αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές στις εξισώσεις τάσεως μιας μηχανής επαγωγής, λόγω ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, μπορούν να εξαλειφθούν μετασχηματίζοντας τις μεταβλητές του δρομέα σε μεταβλητές που σχετίζονται με ένα στατό πλαίσιο αναφοράς που βρίσκεται σταθερά τοποθετημένο στο στάτη. Αργότερα ο G.Kron πρότεινε ένα μετασχηματισμό τόσο για τις μεταβλητές του στάτη, όσο και για αυτές του δρομέα, σε ένα σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς που κινείται μαζί με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο D.S. Bereton πρότεινε ένα μετασχηματισμό των μεταβλητών του στάτη σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς που βρίσκεται επάνω στο δρομέα. Τέλος, οι Krause και Thomas απέδειξαν ότι οι χρονομεταβλητές αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές μπορούν να εξαλειφθούν μετατρέποντας τις μεταβλητές του στάτη και του δρομέα σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς που μπορεί να περιστρέφεται με οποιαδήποτε ταχύτητα (αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς).

Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί το δυναμικό μοντέλο της σύγχρονης μηχανής ημιτονοειδούς ροής σε δύο στάδια : αρχικά μετατρέπονται οι μεταβλητές της μηχανής στο στατό πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων $d^s - q^s$ και στη συνέχεια στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς $d^e - q^e$. Στο πλαίσιο $d^e - q^e$ καταστρώνονται οι βασικές εξισώσεις της μηχανής, ώστε να προκύψει το τελικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στη προσομοίωση του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, αλλά και στον έλεγχο της μηχανής.

Μετασχηματισμός στο στατό πλαίσιο αναφοράς (μετασχηματισμός Clarke)

Θεωρούμε μία συμμετρική τριφασική σύγχρονη μηχανή ημιτονοειδούς ροής και τους σταθερούς άξονες $a^s - b^s - c^s$ που απέχουν γωνία $2\pi/3$ μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12 :



5

Σχήμα 3.12 – Μετασχηματισμός από το στατό πλαίσιο as – bs – cs στο πλαίσιο ds – qs

Στόχος είναι ο μετασχηματισμός των τριφασικών μεταβλητών του στατού πλαισίου αναφοράς (as – bs – cs) σε διφασικές μεταβλητές του στατού πλαισίου αναφοράς (ds – qs) και αντιστρόφως. Υποθέτουμε ότι οι άξονες ds – qs είναι μετατοπισμένοι κατά γωνία θ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Οι τάσεις v_{ds} και v_{qs} μπορούν να αναλυθούν σε συνιστώσες as – bs – cs και μπορούν να αναπαρασταθούν σε μορφή μήτρας ως εξής :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{os}^s \end{bmatrix}$$

Η αντίστροφη σχέση είναι η ακόλουθη:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{os}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}$$

Ας σημειωθεί ότι ο όρος v_{os} , που προστίθεται στην τελευταία γραμμή, είναι ο όρος μηδενικής ακολουθίας και μπορεί να παραληφθεί αφού αναφερόμαστε σε συμμετρικό τριφασικό σύστημα. Στις παραπάνω εξισώσεις έχει επιλεγεί η τάση ως μεταβλητή. Με αντίστοιχο τρόπο μπορούν να μετασχηματιστούν τα ρεύματα και οι πεπλεγμένες ροές του στάτη.

Είναι βολικό να τεθεί $\theta = 0$, έτσι ώστε ο άξονας qs να ευθυγραμμίζεται με τον άξονα as. Αγνοώντας τη συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας, οι σχέσεις μετασχηματισμού απλοποιούνται ως εξής :

$$v_{as} = v_{qs}^s$$

$$v_{bs} = -\frac{1}{2}v_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s$$

$$v_{cs} = -\frac{1}{2}v_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s$$

Και αντίστροφα :

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs} = v_{as}$$

$$v_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}v_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}}v_{cs} = v_{as}$$

Στο σημείο αυτό ολοκληρώθηκε το πρώτο στάδιο της μοντελοποίησης. Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφεται το δεύτερο στάδιο, από το οποίο θα προκύψει και η τελική μορφή του δυναμικού μοντέλου του κινητήρα.

Μετασχηματισμός στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (μετασχηματισμός Park)

Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται οι άξονες $de - qe$, οι οποίοι στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα ω_e ως προς τους άξονες $ds - qs$. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ τους αποτελεί την ηλεκτρική γωνία $\theta_e = \omega_e t$. Τα διφασικά τυλίγματα των αξόνων $ds - qs$ μετατρέπονται στα υποθετικά τυλίγματα που βρίσκονται πάνω στους άξονες $de - qe$. Οι τάσεις στους άξονες $ds - qs$ μπορούν να μετατραπούν (ή αλλιώς να αναλυθούν) στο πλαίσιο $de - qe$ ως εξής :

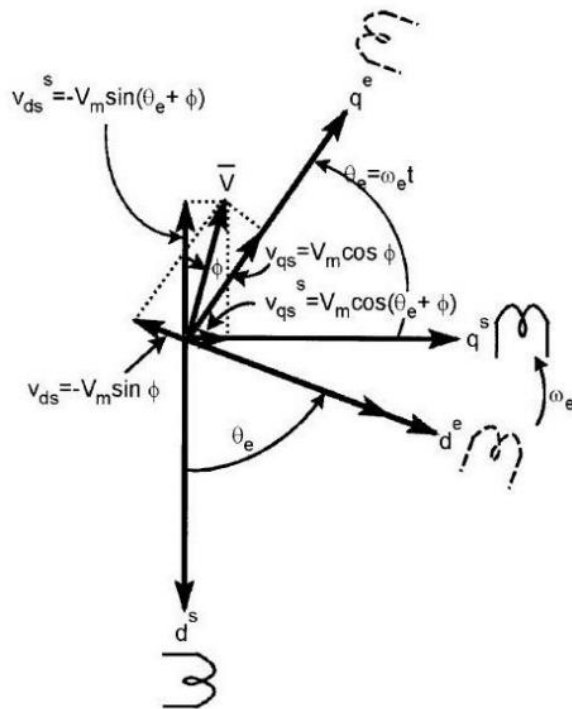
$$v_{qs} = v_{qs}^s \cos\theta_e - v_{ds}^s \sin\theta_e$$

$$v_{ds} = v_{qs}^s \sin\theta_e + v_{ds}^s \cos\theta_e$$

Για λόγους ευκρίνειας, ο εκθέτης e παραλείπεται από τα μεγέθη που ανήκουν στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Για τον αντίστροφο μετασχηματισμό, αναλύοντας τις συνιστώσες του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς στο στατό πλαίσιο αναφοράς, προκύπτουν οι σχέσεις :

$$v_{qs}^s = v_{qs} \cos\theta_e + v_{ds} \sin\theta_e$$

$$v_{ds}^s = -v_{qs} \sin\theta_e + v_{ds} \cos\theta_e$$



Σχήμα 3.13 – Μετασχηματισμός από το στατό πλαίσιο $ds - qs$ σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο $de - qe$ [1]

Ακολούθως, εξετάζεται η περίπτωση όπου ο στάτης διεγείρεται με τριφασικές συμμετρικές ημιτονοειδείς τάσεις έτσι ώστε :

$$v_{as} = V_m \cos(\omega_e t + \varphi)$$

$$v_{bs} = V_m \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right)$$

$$v_{cs} = V_m \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.12)-(3.14) στις σχέσεις (3.6)-(3.7) προκύπτει :

$$v_{qs}^s = V_m \cos(\omega_e t + \varphi)$$

$$v_{ds}^s = -V_m \sin(\omega_e t + \varphi)$$

Αντικαθιστώντας αυτή τη φορά τις σχέσεις (2.15)-(2.16) στις σχέσεις (2.8)-(2.9) προκύπτει τελικά:

$$v_{qs} = V_m \cos \varphi$$

$$v_{ds} = -V_m \sin \varphi$$

Οι σχέσεις (3.15)-(3.16) δείχνουν ότι οι συνιστώσες v_{ds} και v_{qs} αποτελούν διφασικές τάσεις με τις ίδιες μέγιστες τιμές. Είναι εμφανές ότι η συνιστώσα v_{ds} προπορεύεται κατά $\pi/2$ της δεύτερης συνιστώσας. Επίσης, οι σχέσεις (3.17)-(3.18) επιβεβαιώνουν ότι οι μεταβλητές που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς συναρτήσει του χρόνου σε ένα στατό πλαίσιο αναφοράς, εμφανίζονται ως DC ποσότητες σε ένα σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα, που θα φανεί πολύ χρήσιμο στη συνέχεια. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι μεταβλητές του στάτη δεν είναι απαραίτητο να είναι συμμετρικές ημιτονοειδείς κυματομορφές. Στην πραγματικότητα, μπορεί να είναι οποιοσδήποτε συναρτήσεις που μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου.

Για την ολοκλήρωση του δυναμικού μοντέλου, είναι απαραίτητη η μετατροπή των εξισώσεων του κυκλώματος του στάτη στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς d - q . Έχοντας μετατρέψει τις μεταβλητές του στάτη στο στατό πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων d - q , μπορούν να γραφούν οι ακόλουθες εξισώσεις τάσεων :

$$v_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + \frac{d}{dt} \psi_{qs}^s$$

$$v_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + \frac{d}{dt} \psi_{ds}^s$$

Το πεδίο των μαγνητών του δρομέα παράγει σταθερή ροή διέγερσης, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγεται από ένα ισοδύναμο ρεύμα I_f' :

$$\psi_f = L_m I_f'$$

Μετατρέποντας τις εξισώσεις τάσεων στο πλαίσιο d - q , προκύπτει

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \psi'_{ds} + \omega_e \hat{\psi}_f + \frac{d}{dt} \psi_{qs}$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e \psi_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{ds}$$

όπου:

$$\hat{\psi}_f = L_{dm} I_f'$$

$$\psi'_{ds} = i_{ds} (L_{ls} + L_{dm}) = i_{ds} L_{ds}$$

$$\psi_{ds} = \hat{\psi}_f + \psi'_{ds}$$

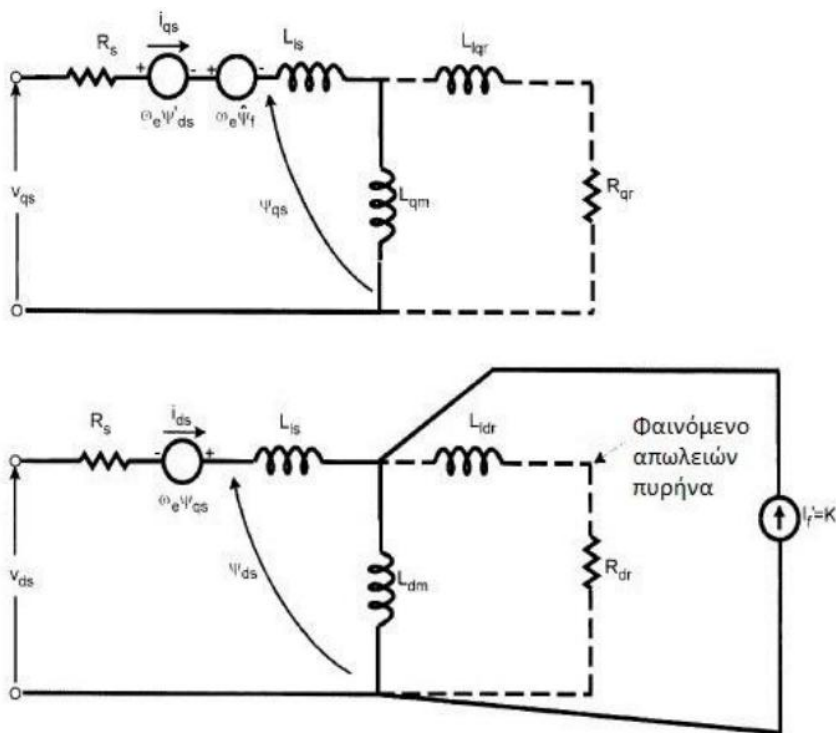
$$\psi_{qs} = i_{ds} (L_{ls} + L_{qm}) = i_{qs} L_{qs}$$

Ενώ η εξίσωση ροπής είναι

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

Οι νέοι όροι που εμφανίζονται στις εξισώσεις (3.22)-(3.23) συγκριτικά με τις εξισώσεις (3.19)-(3.20) μπορούν να ερμηνευτούν ως «ΗΕΔ λόγω ταχύτητας» (speed emf) εξαιτίας των στρεφόμενων αξόνων. Όταν τεθεί $\omega_e = 0$, τότε οι εξισώσεις επιστρέφουν στην αρχική τους μορφή με αναφορά το στατό άξονα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι οι πεπλεγμένες ροές στους άξονες de και qe επάγουν ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις στους άξονες qe και de αντίστοιχα, οι οποίες προπορεύονται κατά $\pi/2$.

Τα ισοδύναμα κυκλώματα ευθέως και εγκάρσιου άξονα, που προκύπτουν από τις σχέσεις (3.22)-(3.27), παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.14. Οι πεπερασμένες απώλειες πυρήνα, οι οποίες έχουν παραληφθεί στις σχέσεις αυτές, αναπαρίστανται με διακεκομμένες γραμμές, ενώ το πεδίο διέγερσης του δρομέα δρα προφανώς μόνο στον άξονα de.



Σχήμα 3.14 – Ισοδύναμα κυκλώματα σύγχρονα στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς μιας σύγχρονης μηχανής ημιτονοειδούς ροής

Στη συνέχεια, αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.24)-(3.27) στις εξισώσεις (3.22)-(3.23), προκύπτει το ηλεκτρικό μοντέλο της μηχανής, το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί σε μητρική μορφή ως εξής :

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_{qs} & \omega_e L_{ds} & \omega_e L_{dm} \\ -\omega_e L_{qs} & R_s + sL_{ds} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ I_f' \end{bmatrix}$$

$$T_e = T_L + \frac{2}{P} J \frac{d\omega_e}{dt} + \frac{2}{P} F \omega_e$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

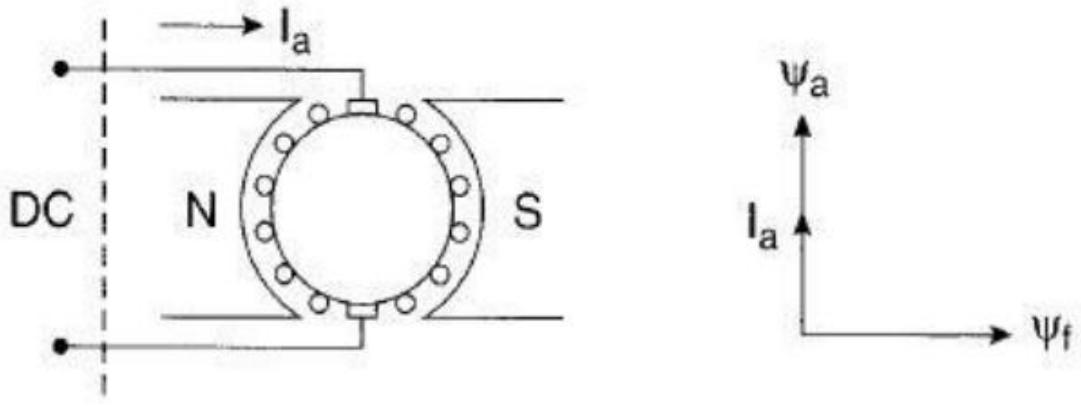
Τις εξισώσεις τάσεων συμπληρώνουν η εξίσωση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (3.30) και η εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής (3.28). Το σύμβολο s αντιστοιχεί στον τελεστή Laplace, ενώ με T_L , J , F συμβολίζονται η ροπή φορτίου, η ροπή αδράνειας της μηχανής και ο συντελεστής τριβών αντίστοιχα. Το μοντέλο αυτό αποτελεί μη γραμμικό σύστημα τρίτης τάξης με μεταβλητές κατάστασης τις :

$$\frac{di_{qs}}{dt}, \frac{di_{ds}}{dt}, \frac{d\omega_e}{dt}$$

Μοντέλο αυτοελέγχου (Self control model)

Πριν την επεξήγηση της μεθοδολογίας του διανυσματικού ελέγχου, κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στη λειτουργία αυτοελέγχου, κατά την οποία διαβάζεται η θέση του δρομέα κατά την περιστροφή του με τη βοήθεια αισθητήρων. Μία αυτοελεγχόμενη σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών είναι ανάλογη μιας DC μηχανής. Το Σχήμα 4.5 δείχνει μία DC μηχανή μονίμων μαγνητών και το Σχήμα 4.6 δείχνει μία μηχανή επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής με αυτοέλεγχο. Το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται από έναν αντιστροφέα ο οποίος παράγει στην έξοδό του τριφασική τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας, όπως στο Σχήμα 4.2. Στην περίπτωση αυτή όμως, αντί να ελέγχεται ανεξάρτητα η συχνότητα του αντιστροφέα, η συχνότητα και η φάση της κυματομορφής εξόδου ελέγχονται από έναν αισθητήρα θέσης που βρίσκεται τοποθετημένος στον άξονα της μηχανής και της δίνει χαρακτηριστικά αυτοελέγχου. Η ακολουθία των παλμών, όπως παράγονται από τον αισθητήρα θέσης, μπορεί να καθυστερήσει χρονικά χρησιμοποιώντας κάποια εξωτερική εντολή αν αυτό χρειαστεί.

Για να εξηγηθεί η αναλογία με μία DC μηχανή, θεωρείται η μηχανή του Σχήματος 4.5, όπου η ροή διεγέρσεως ψ_f προέρχεται από το κύκλωμα του στάτη. Ο δρομέας (τύμπανο) τροφοδοτείται από ένα εξωτερικό κύκλωμα με DC ισχύ μέσω ψηκτρών και μεταγωγέων (brushes and commutators). Οι τομείς των μεταγωγέων βρίσκονται πάνω στο δρομέα και η συνδεσμολογία τους αλλάζει ανάλογα με τη θέση του δρομέα [6]. Ουσιαστικά, οι μεταγωγείς και οι ψήκτρες μετατρέπουν την DC τροφοδοσία σε AC, η οποία εφαρμόζεται στο τύλιγμα τυμπάνου. Με άλλα λόγια μπορούν να θεωρηθούν ως αντιστροφείς που βρίσκονται πάνω στο δρομέα και που η λειτουργία τους εξαρτάται από τη μηχανική του θέση. Παρόλα αυτά, η ροή διέγερσης ψ_f και η ροή της αντίδρασης τυμπάνου ψ_a παραμένουν σταθερές στο χώρο και κάθετες μεταξύ τους, όπως φαίνεται στα δεξιά του Σχήματος 4.5.



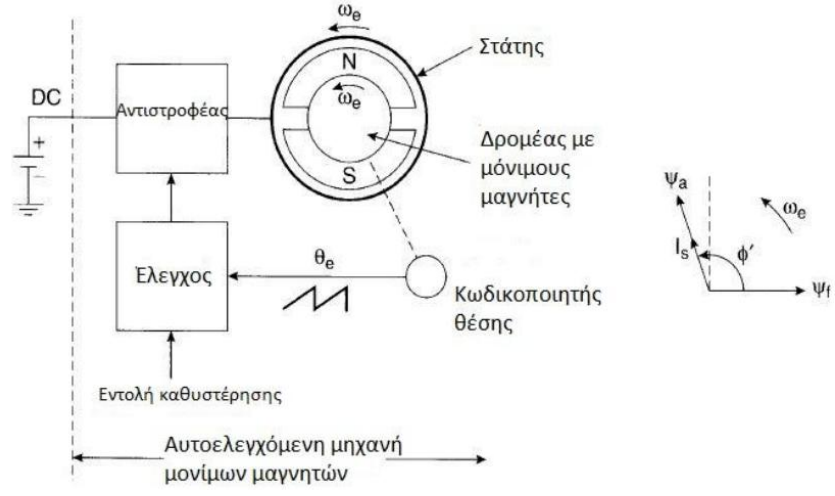
Σχήμα 4.5 – DC μηχανή μονίμων μαγνητών

Μία αυτοελεγχόμενη σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη μιας DC μηχανής με τις εξής διαφορές:

DC μηχανή μονίμων μαγνητών	Αυτοελεγχόμενη σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών
Το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στο στάτη, το τύλιγμα τυμπάνου περιστρέφεται μαζί με το δρομέα	Το τύλιγμα διέγερσης περιστρέφεται μαζί με το δρομέα και το τύλιγμα τυμπάνου είναι ακίνητο
Οι ψήκτρες λειτουργούν ως αντιστροφείς ανάλογα με τη μηχανική θέση του δρομέα	Χρήση ηλεκτρονικού μετατροπέα που ελέγχεται από έναν κωδικοποιητή θέσης (absolute position encoder)
Σταθερά διανύσματα ροής στο χώρο	Οι ροές και το διανυσματικό διάγραμμα στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα

Σχήμα 4.6 – Συγκριτικός Πίνακας DC μηχανής μονίμων μαγνητών με αυτοελεγχόμενη σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών

Ο αισθητήρας θέσης, ο οποίος βρίσκεται πάνω στο δρομέα, δίνει κάθε χρονική στιγμή τη θέση της ροής διεγέρσεως ψ_f . Εάν ο αντιστροφέας είναι ελεγχόμενος από ρεύμα, τότε η θέση του διανύσματος του ρεύματος του στάτη I_s , μπορεί να ελεγχθεί σε σχέση με την ψ_f ανάλογα με τη γωνία $\phi' = \delta + \pi/2$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7



Σχήμα 4.7 – Αυτοελεγχόμενη μηχανή μονίμων μαγνητών

Η αναλογία με μία DC μηχανή δίνει στην αυτοελεγχόμενη σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών διάφορες ονομασίες, όπως κινητήρας ηλεκτρονικής μεταγωγής (Electronically commutated motor, ECM), DC μηχανή χωρίς ψήκτρες (Brushless DC motor, BLDC) ή μηχανή χωρίς μεταγωγείς και ψήκτρες. Παρόλα αυτά, το όνομα της DC μηχανής χωρίς ψήκτρες (BLDC) στο εμπόριο αφορά μόνο στο σύστημα οδήγησης μηχανής μονίμων μαγνητών τραπεζοειδούς ροής.

Συμπερασματικά, η αυτοελεγχόμενη σύγχρονη μηχανή έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που συνοψίζονται ως εξής:

☒ Ένας ηλεκτρονικός μεταγωγέας αντικαθιστά τους μηχανικούς μεταγωγείς και τις ψήκτρες, εξαλείφοντας τα μειονεκτήματα μιας DC μηχανής, όπως τα προβλήματα συντήρησης και αξιοπιστίας, οι σπινθηρισμοί, οι περιορισμοί στην ταχύτητα και στη ισχύ λειτουργίας, η δυσκολία λειτουργίας σε περιβάλλον με εύφλεκτα υλικά και το πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (Electromagnetic Interference, EMI).

☒ Λόγω του αυτοελέγχου, η μηχανή δεν εμφανίζει πρόβλημα ευστάθειας ή φαινόμενα ολίσθησης πόλων όπως μία συμβατική σύγχρονη μηχανή.

☒ Η μεταβατική απόκριση μπορεί να είναι παραπλήσια με μία DC μηχανή.

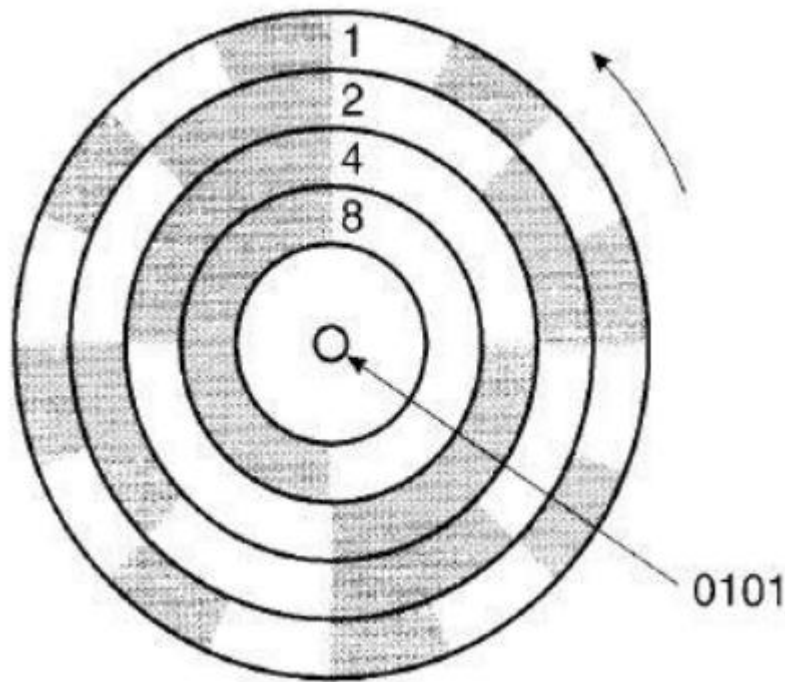
☒ Η γωνία φάσης μεταξύ του διανύσματος του ρεύματος I_s και του διανύσματος της ροής ψ_f μπορεί να ελεγχθεί κατάλληλα καθυστερώντας τους παλμούς του αισθητήρα θέσης. Το διάνυσμα της ροής αντίδρασης τυμπάνου ψ_a δεν είναι πλέον σταθερό σε γωνία $\pi/2$ όπως σε μια DC μηχανή.

☒ Με τη χρήση μαγνητών υψηλής ενέργειας, μπορεί να μειωθεί η ροπή αδράνειας του δρομέα, χαρακτηριστικό το οποίο είναι ιδιαίτερα θεμιτό σε συστήματα οδήγησης σερβομηχανισμών γρήγορης απόκρισης.

Εξαιτίας αυτών των επιθυμητών χαρακτηριστικών, τα συστήματα οδήγησης μηχανών μονίμων μαγνητών χρησιμοποιούν σχεδόν αποκλειστικά τη λειτουργία του αυτοελέγχου. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση αισθητήρων, τα χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται στην ενότητα που ακολουθεί.

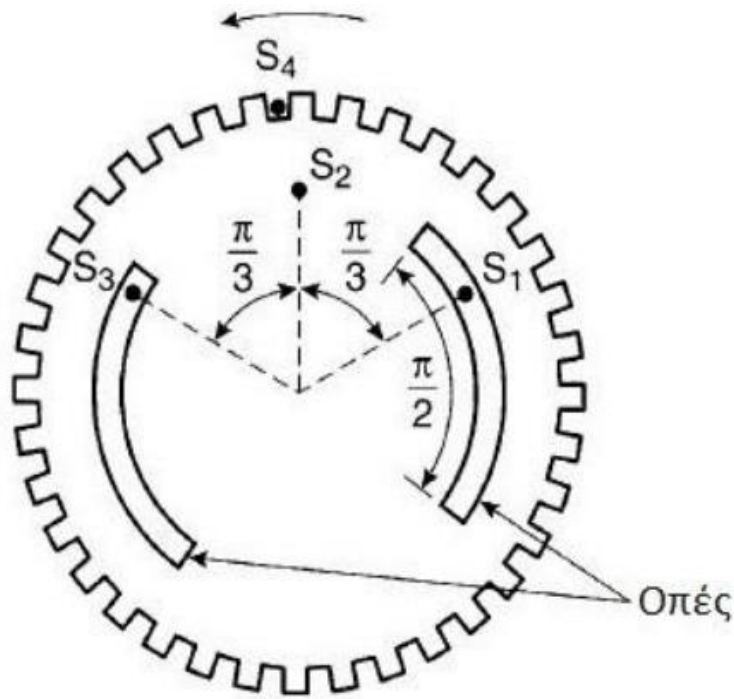
Κωδικοποιητής θέσης (Absolute Position Encoder)

Οι μαγνητικοί πόλοι του δρομέα σε μια μηχανή μονίμων μαγνητών έχουν συγκεκριμένη θέση σε αντίθεση με τη θέση των πόλων ολίσθησης σε μια μηχανή επαγωγής. Έτσι, η ύπαρξη ενός κωδικοποιητή της απόλυτης θέσης των πόλων είναι υποχρεωτική. Στις μηχανές μονίμων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής απαιτείται η συνεχής εποπτεία της θέσης του δρομέα με υψηλή ακρίβεια. Η απαίτηση αυτή είναι αρκετά πιο αυστηρή από την περίπτωση μιας μηχανής τραπεζοειδούς ροής, όπου απαιτείται η πληροφορία της θέσης του δρομέα σε διακριτά σημεία. Οι κωδικοποιητές θέσης μπορούν γενικά να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες, όμως οι πιο δημοφιλείς είναι οι οπτικοί, οι οποίοι θα αναλυθούν σε αυτή την ενότητα και θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης σε επόμενο κεφάλαιο.

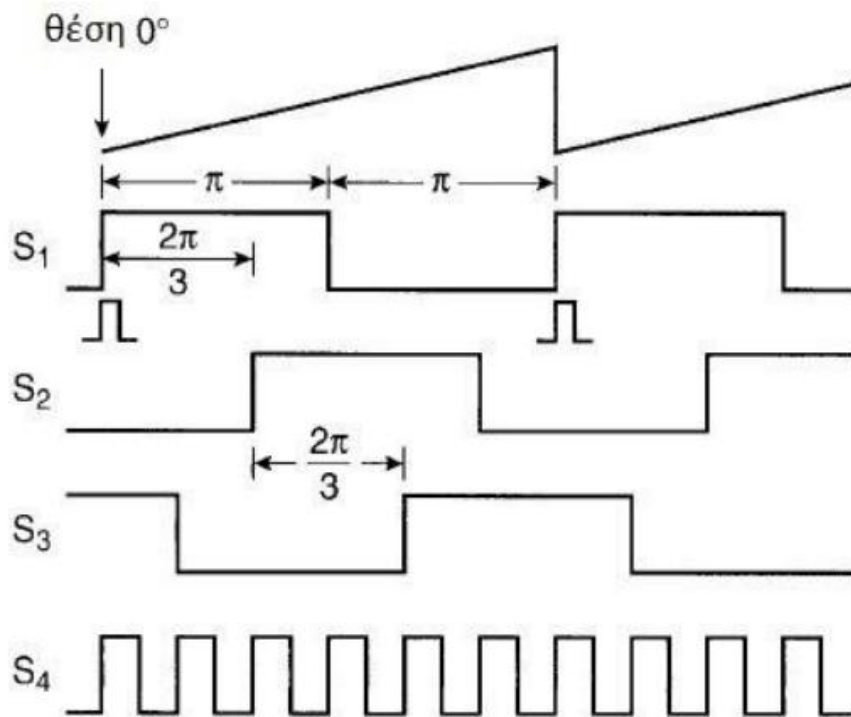


Σχήμα 4.8 – Δυαδικά κωδικοποιημένος δίσκος

Ένας κατάλληλα κωδικοποιημένος δίσκος, ο οποίος επιτρέπει ή διακόπτει τη μετάδοση μιας δέσμης φωτός, μπορεί να παρέχει άμεσα ψηφιακές πληροφορίες σχετικά με τη θέση του δρομέα. Η δέσμη φωτός μπορεί να παράγεται από μία δίοδο εκπομπής φωτός (Light emitting diode, LED) και να ανιχνεύεται από ένα φωτο-τρανζίστορ. Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται ένας δυαδικά κωδικοποιημένος δίσκος που αποτελείται από έναν αριθμό από ομόκεντρους δακτυλίους με δυαδική αρίθμηση, σε κάθε έναν από τους οποίους αντιστοιχεί μία δέσμη φωτός. Η σκιασμένη περιοχή επιτρέπει τη διάδοση του φωτός και ισοδυναμεί με ψηφιακή μέτρηση μιας μονάδας. Ο απλός δίσκος τεσσάρων δακτυλίων δίνει ψηφιακή έξοδο ίση με 0101, η οποία αντιστοιχεί στον αριθμό 5 στη συγκεκριμένη θέση που υποδεικνύεται στο Σχήμα 4.8. Ο δίσκος μηδενίζεται όταν η αρίθμηση φτάσει στον αριθμό 24 16. Συνεπώς επιτυγχάνεται ανάλυση $360^\circ / 16 = 22.5^\circ$ μηχανικής γωνίας ή 45° ηλεκτρικής γωνίας για μία τετραπολική μηχανή. Ένας συνηθισμένος δίσκος με 14 δακτυλίους δίνει ανάλυση θέσης 14bit, που αντιστοιχεί σε ανάλυση 0.04° ηλεκτρικής γωνίας περίπου για μία τετραπολική μηχανή. Στον φυσικό δυαδικό κώδικα, η κατάσταση πολλών bit αλλάζει ταυτόχρονα και αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα. Για αυτό το λόγο έχει κατασκευαστεί δίσκος με κωδικοποίηση Grey, έτσι ώστε να συμβαίνει μόνο μία αλλαγή bit σε κάθε μετάβαση.



Σχήμα 4.9 – Δίσκος με οπές για τετραπολική μηχανή

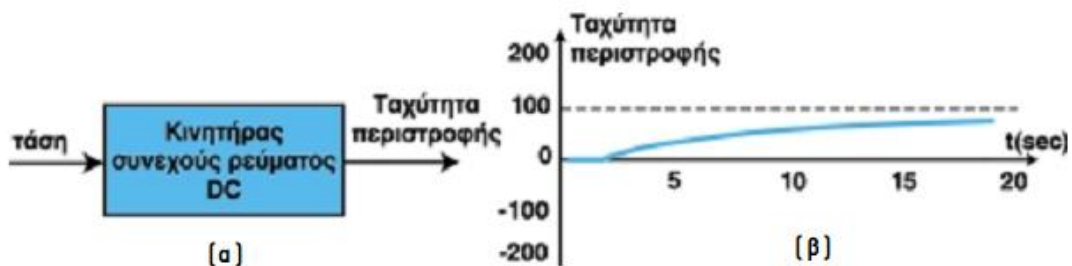


Σχήμα 4.10 – Κυματομορφές κωδικοποιητή

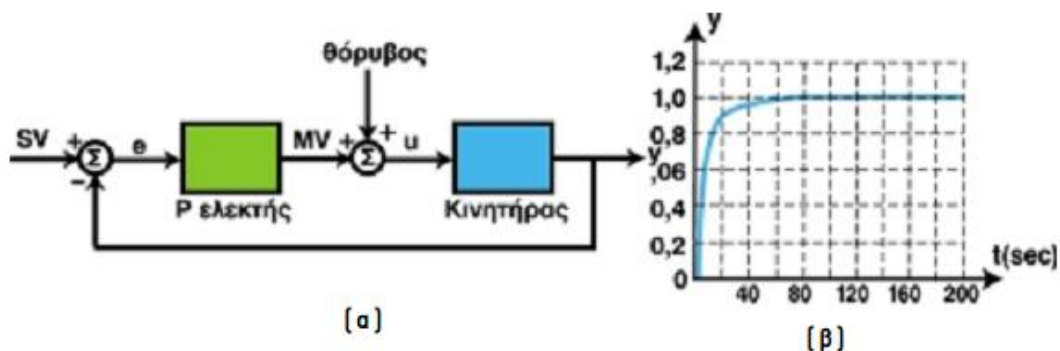
Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται ένας άλλος τύπος οπτικού κωδικοποιητή που έχει τη μορφή δίσκου με οπές στην περιφέρειά του. Το Σχήμα 4.10 δείχνει τις κυματομορφές που παράγει ο κωδικοποιητής αυτός. Ο δίσκος έχει σχεδιαστεί ειδικά για μια τετραπολική μηχανή και εκτός από τις οπές στην περιφέρειά του, υπάρχουν δύο οπές μηχανικής γωνίας $\pi/2$ στην εσωτερική διάμετρο. Επίσης, χρησιμοποιούνται τέσσερις οπτικοί αισθητήρες ($S_1 - S_4$) σε

σταθερά σημεία, από τους οποίους ο S4 τοποθετείται στην εξωτερική περίμετρο και οι υπόλοιποι τοποθετούνται στην εσωτερική με διαφορά μηχανικής γωνίας $\pi/3$ μεταξύ τους. Ο όρος αισθητήρας αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο LED και σε ένα στοιχείο φωτο-τρανζίστορ, τα οποία βρίσκονται σε απέναντι θέσεις μεταξύ τους, ώστε το ένα στοιχείο να εκπέμπει και το άλλο να δέχεται τη δέσμη του φωτός αντίστοιχα. Όταν ο αισθητήρας βρίσκεται μέσα στην οπή τότε παράγεται λογικό 1. Οι αισθητήρες S1 ως S3 παράγουν τετραγωνικές κυματομορφές με διαφορά φάσης $2\pi/3$ (ηλεκτρική γωνία) και ο αισθητήρας S4 παράγει μια ακολουθία παλμών υψηλής συχνότητας.

Για τον προσδιορισμό της απόλυτης θέσης του δρομέα σε μια τετραπολική μηχανή, θεωρούνται αρχικά οι αισθητήρες S1 και S4 μόνο, όπου ο πρώτος είναι ευθυγραμμισμένος με το σημείο μηδέν της θέσης του δρομέα. Οι θετικοί παλμοί που παράγονται από τον αισθητήρα S1 μπορούν να μηδενίσουν ή να πυροδοτήσουν έναν μετρητή που μετράει προς τα επάνω (UP-counter) και μετρά τους παλμούς που παράγονται από τον αισθητήρα S4. Η έξοδος του μετρητή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10, έχει περίοδο 2π ηλεκτρικής γωνίας και δίνει την απόλυτη γωνιακή θέση του δρομέα. Αν ο αριθμός των οπών στην περίμετρο του δίσκου είναι 720, τότε η ανάλυση της ηλεκτρικής γωνίας ισοδυναμεί με 1σ .



Σύστημα ανοικτού βρόγχου.



Σύστημα κλειστού βρόγχου.

Στους DC κινητήρες μονίμου διεγέρσεως υπάρχει μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ ροπής M (Nm) και ταχύτητας περιστροφής N (rpm), αντιστρόφως ανάλογη υπό συγκεκριμένη τάση. Η μέγιστη ροπή εμφανίζεται σε μηδενικό αριθμό στροφών (0 rpm) ενώ η ελάχιστη (stall torque) στον μέγιστο αριθμό στροφών (max rpm).



Σχήμα 1.2 : Σχέση ροπής και ταχύτητας περιστροφής ενός DC κινητήρα

Εάν μετρήσουμε τη μέγιστη ροπή (stall torque) M_s και τον μέγιστο δυνατό αριθμό στροφών λειτουργίας (max rpm) N_{max} υπό δεδομένη τάση V μπορούμε να υπολογίσουμε τη σταθερά επαγωγικής τάσης K_e και τη σταθερά ροπής K_t του κινητήρα:

$$K_e = V/N_{max}$$

$$K_t = M_s/V$$

Όσον αφορά τον έλεγχο στροφών, γνωρίζουμε ότι η μηχανική ροπή του τυμπάνου είναι ανάλογη του ρεύματος I_a που διαρρέει τα τυλίγματα του καθώς και της πυκνότητας μαγνητικής ροής Φ . Δεδομένης από τον κατασκευαστή της σταθεράς K του κινητήρα ισχύει ότι:

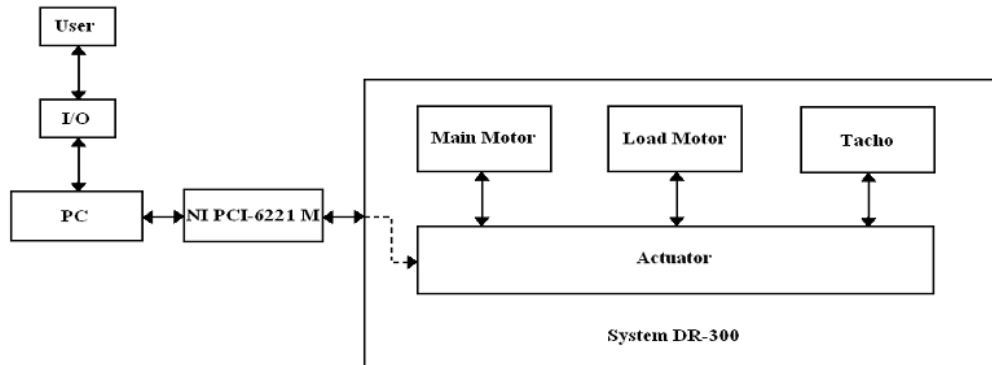
$$M = K\Phi I_a$$

Δεδομένου ότι το ρεύμα τυμπάνου είναι πρακτικά ανάλογο της τάσης του κινητήρα είναι προφανές ότι επαληθεύεται ο ισχυρισμός γραμμικής μεταβολής του αριθμού στροφών κατά την μεταβολή της τάσης εισόδου του κινητήρα. Θα επεκταθούμε αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο όπου αναλύεται το φυσικό και μαθηματικό μοντέλο του DC ηλεκτροκινητήρα και πιο συγκεκριμένα αυτού που θα χρησιμοποιήσουμε πειραματικά για μελέτη. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι σταθερές του κινητήρα και τα ηλεκτρομαγνητικά του χαρακτηριστικά δεν χρειάζεται να υπολογιστούν στη συνέχεια κι αυτό γιατί το σύστημα θα αναγνωριστεί σαν συνάρτηση μεταφοράς συνολικά με προχωρημένους αλγορίθμους. Κοινώς, θα επικεντρωθούμε περισσότερο σε θεωρία ελέγχου, επομένως περαιτέρω παράθεση θεωρίας ηλεκτρικών μηχανών δεν κρίνεται απαραίτητη.

Εξαγωγή κατάλληλου μοντέλου συστήματος

Για την λήψη πραγματικών μετρήσεων από το σύστημα μας είναι απαραίτητη η αποστολή κατάλληλων σημάτων εισόδου σε αυτό. Εφόσον συνδεθεί κατάλληλα με τον Actuator της

διάταξης μέσω της διαδικασίας που περιγράφουμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 1.4, απαιτείται ο κατάλληλος προγραμματισμός από το πακέτο Labview 8.5 ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή διεργασία από και προς το σύστημα των ηλεκτροκινητήρων σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα ροής:

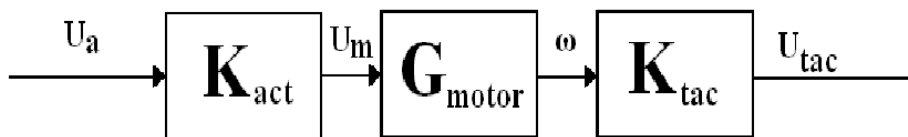


Σχήμα 3.6: Διάγραμμα διασύνδεσης χρήστη – συστήματος

Το ζητούμενο πρόγραμμα αφορά τον έλεγχο ανοικτού βρόχου του συστήματος (open loop) που περιγράφεται πρακτικά από την εξίσωση 2.24, δηλαδή του απλοποιημένου συστήματος υπό την παραδοχή αμελητέων τριβών συγκρινόμενων με τις ροπές των κινητήρων και μηδενικού μηχανικού φορτίου στον κύριο ηλεκτροκινητήρα, συνδυασμένης με τα κατάλληλα κέρδη που εισάγει η ενίσχυση του actuator (θεωρούμε ότι πρακτικά είναι γραμμική) και της ταχογεννήτριας όσον αφορά την μετατροπή μεγεθών. Η εξίσωση 2.24 παίρνει την εξής γενική μορφή θεωρώντας a, b άγνωστες σταθερές :

$$G_{Motor}(s) = \frac{1}{1+as+bs^2} \quad (3.10)$$

Τα παραπάνω συνοψίζονται στο εξής διάγραμμα:



Σχήμα 3.6: Δομικό διάγραμμα ανοικτού βρόχου ελέγχου κύριου ηλεκτροκινητήρα. Συνεπώς η συνολική εξίσωση μεταφοράς του ανοικτού βρόχου είναι

$$G_{open}(s) = \frac{K_{act}K_{mot}K_{tac}}{1+as+bs^2} = \frac{K_G}{1+as+bs^2} = \frac{K_G}{(s+p_1)(s+p_2)}$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί την παραμετρική μορφή της εξίσωσης του συστήματος που καλούμαστε να αναγνωρίσουμε. Στη συνέχεια θα υλοποιήσουμε το πρόγραμμα σε περιβάλλον Labview που μας επιτρέπει να αναλύσουμε τη συμπεριφορά της επομένως στις

εξισώσεις θα πρέπει να συμπεριλάβουμε την επίδραση του AD μετατροπέα της διάταξης δειγματοληψίας καθώς και την ύπαρξη του ZOH (zero order hold) μετατροπέα διακριτού σήματος εξόδου σε συνεχές αναλογικό, που βρίσκονται στην κάρτα NI PCI-6221 M. Στη συγκεκριμένη φάση της μεθόδου αναγνώρισης, προέχει η εξαγωγή αριθμητικών μετρήσεων και η αποθήκευσή τους σε κατάλληλη μορφή για περαιτέρω επεξεργασία μέσω Matlab.

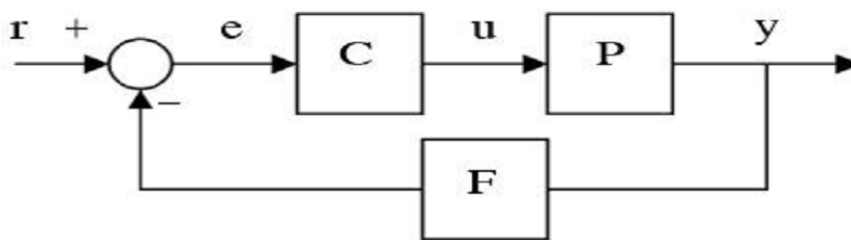
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τον έλεγχο του συστήματος. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η αυτόματη μεταβολή της εξόδου στην εκάστοτε τιμή αναφοράς που θέτουμε στο σύστημα (reference value tracking). Για το σκοπό θα χρησιμοποιήσουμε την κλασική θεωρία ελέγχου που συμπεριλαμβάνει έναν ελεγκτή πριν το σύστημά και λειτουργία τους ως σύνολο σε κλειστό βρόχο (feedback). Η διάταξη αυτή σε σχέση με την απλή παρουσία ελεγκτή σε λειτουργία ανοικτού βρόχου παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- ☑ Απορρίπτει πιθανές διαταραχές όπως η στατική τριβή στην περίπτωσή μας.
- ☑ Εγγυάται καλή απόδοση ακόμα και με την ύπαρξη αβεβαιοτήτων στο μοντέλο, όπως στην περίπτωσή μας οι μικρές διαφορές της απόκρισης του μοντέλου από το πραγματικό σύστημα λόγω σφαλμάτων και διαφόρων προσεγγίσεων.
- ☑ Δύναται να σταθεροποιήσει ακόμα και ασταθείς διεργασίες.
- ☑ Προσφέρει μειωμένη ευαισθησία σε μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.
- ☑ Προσφέρει πολύ καλύτερη απόδοση σε λειτουργία tracking όπως στην περίπτωσή μας.

Το δομικό διάγραμμα του συγκεκριμένου τύπου ελέγχου είναι το εξής:



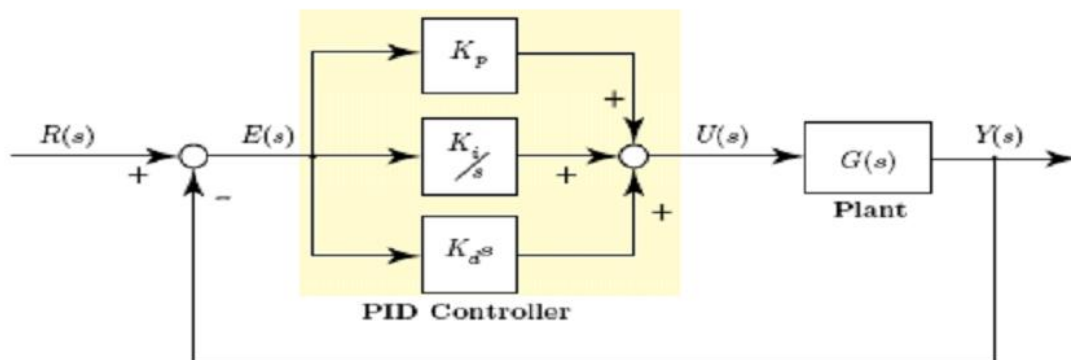
Σχήμα 4.1: Δομικό διάγραμμα ελέγχου συστήματος με μονάδα controller και ανάδραση

Στο παραπάνω διάγραμμα ως C συμβολίζουμε τον ελεγκτή, P είναι το υπό έλεγχο σύστημα ή διεργασία, r η επιθυμητή τιμή αναφοράς, $e = r - yF$ το σφάλμα που ανιχνεύει ο ελεγκτής μας, u η είσοδος που επιβάλλει διορθωτικά ο ελεγκτής στο σύστημα και y η πραγματική έξοδος του συστήματος.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα επιλέξουμε τον τύπο του ελεγκτή που θα χρησιμοποιήσουμε με βάση τον τύπο του συστήματος που μοντελοποιήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα ορίσουμε τα κέρδη μετατροπής μεγεθών στις διάφορες βαθμίδες ροής σήματος, θα υλοποιήσουμε τον ελεγκτή μέσω υπολογιστή και βάση μετρήσεων θα βελτιστοποιήσουμε την τιμή των παραμέτρων του ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή συμπεριφορά της εξόδου.

Επιλογή κατάλληλου ελεγκτή

Από όλες τις τεχνικές ελέγχου δυναμικών συστημάτων η πιο διαδεδομένη είναι η χρήση ελεγκτή της οικογένειας PID. Πάνω από 85% των ελεγκτών που χρησιμοποιούνται για κλασικό έλεγχο κλειστού βρόχου όπως περιγράψαμε στην εισαγωγή ανήκουν στην οικογένεια των PID controllers (Proportional – Integral – Differential controllers). Κάθε ένας από τους όρους P, I, D αποτελεί όρους ενός αλγόριθμου ελέγχου με συγκεκριμένο σκοπό ο καθένας. Σε ορισμένες περιπτώσεις κάποιοι όροι παραλείπονται αν δεν κρίνονται αναγκαίοι στο σχεδιασμό ελέγχου. Συνεπώς προκύπτουν ελεγκτές τύπου PI, PD, P και πιο σπάνια ID. Το δομικό διάγραμμα ενός συστήματος υπό την επίδραση PID ελεγκτή σε κλειστό βρόχο είναι το εξής:



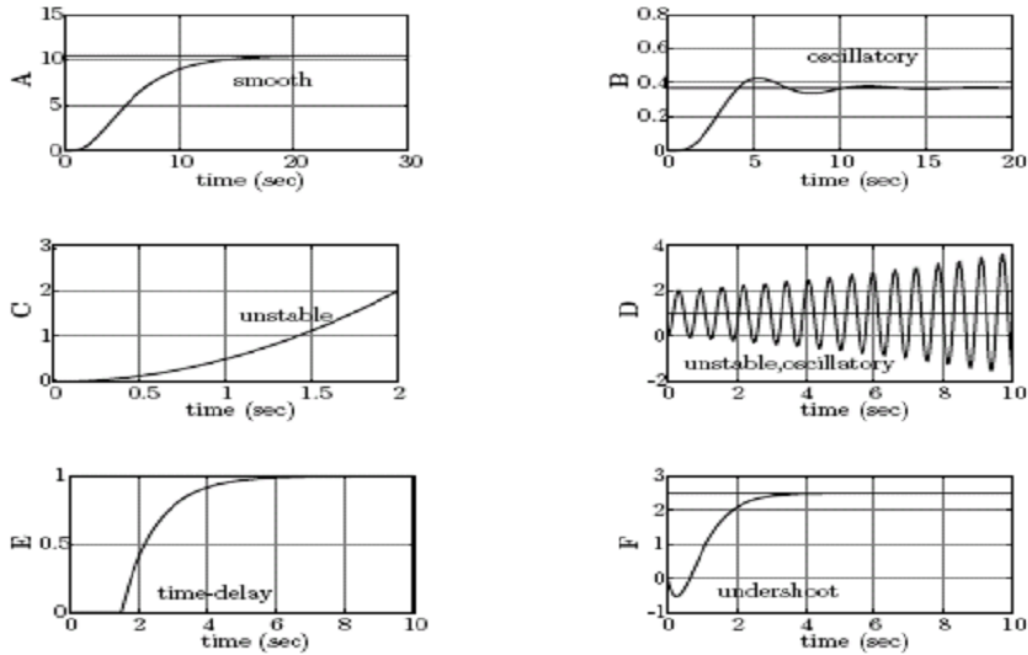
Σχήμα 4.2: Δομικό διάγραμμα ελέγχου συστήματος μέσω PID controller

Όπως βλέπουμε το σήμα ελέγχου προκύπτει διαμέσου του αθροίσματος των τριών όρων. Κάθε όρος αποτελεί συνάρτηση του σφάλματος $E(s) = R(s) - Y(s)$. Πιο συγκεκριμένα ο όρος K_p είναι ανάλογος του σφάλματος, ο όρος K_i/s είναι ολοκληρωτικός όρος και ο όρος $K_d s$ είναι διαφορικός όρος. Και οι τρεις όροι λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Ο PID ελεγκτής είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός αν τηρούνται κάποιες προϋποθέσεις που αφορούν τόσο τη φύση του υπό έλεγχο συστήματος όσο και τη φύση των διαταραχών που επιδρούν σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα ο PID ελεγκτής είναι ο καταλληλότερος προς επιλογή όταν:

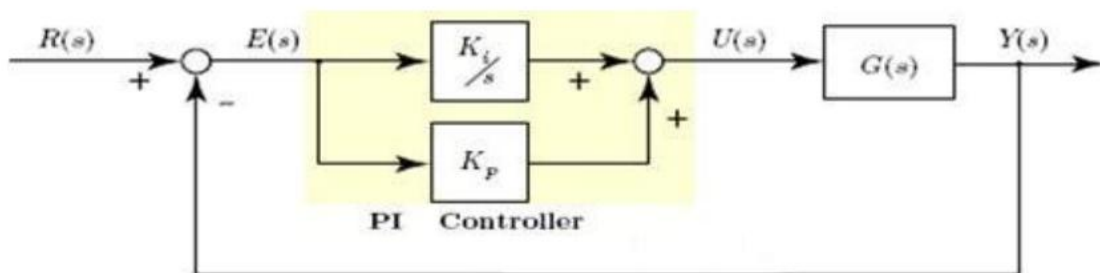
- ☒ Το υπό έλεγχο σύστημα είναι μικρής τάξης.
- ☒ Το σύστημα δεν παρουσιάζει μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις στην απόκριση.
- ☒ Το σύστημα δεν παρουσιάζει μικρή απόσβεση.
- ☒ Το σύστημα δεν έχει διαταραχές υπό τη μορφή αρμονικών συνιστωσών.
- ☒ Το σύστημα είναι μονής εισόδου και μονής εξόδου (SISO).

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι συνήθεις βηματικές αποκρίσεις



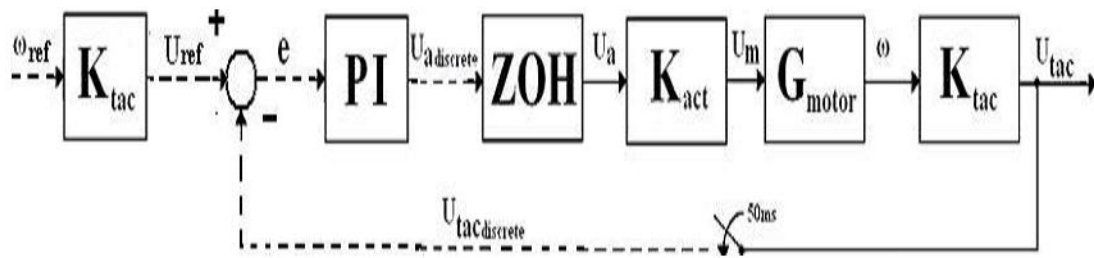
Σχήμα 4.3: Είδη βηματικών αποκρίσεων για διαφόρων τύπων συστήματα

Σύμφωνα με τη θεωρία οι περιπτώσεις A, B και E ελέγχονται επιτυχώς με χρήση PID σε κάθε περίπτωση. Οι περιπτώσεις C και D υπάρχει πιθανότητα να ελεγχθούν επιτυχώς μόνο εάν το σύστημα είναι πλήρως γνωστό. Η περίπτωση F είναι ελέγξιμη όμως ο PID στην περίπτωση αυτή επιτείνει την αρχική βύθιση. Όπως γίνεται αμέσως αντιληπτό, τόσο η απόκριση του πραγματικού μας συστήματος όσο και η μορφή και συμπεριφορά του μοντέλου που καταλήξαμε (εξίσωση 3.19) πληρούν στο έπακρο τις κύριες συνθήκες. Οι πληροφορίες που έχουμε για το σύστημα είναι παραπάνω από αρκετές. Γνωρίζουμε ότι προσεγγίζεται άψογα από πρωτοβάθμιο μοντέλο, κι ότι σε λειτουργία ανοικτού βρόχου είναι πάντα ευσταθές. Συνεπώς κατατάσσουμε το σύστημά μας στην κατηγορία A που είναι πλήρως ελέγξιμη από PID και για την οποία έχουν δημιουργηθεί συγκεκριμένες μέθοδοι ρύθμισης των όρων για βέλτιστη απόδοση. Ακόμη, το σύστημα ως προσεγγιστικά πρωτοβάθμιο ελέγχεται πλήρως από PI ελεγκτή, δηλαδή μας δίνεται η δυνατότητα να παραλείψουμε τον D όρο εντελώς, κάτι που προσφέρει απλότητα τόσο στην υλοποίηση όσο και στην ρύθμιση του ελεγκτή. Το διάγραμμα του συστήματος μας μέσα στον κλειστό βρόχο με την επιβολή του PI ελέγχου έχει την εξής μορφή:



Σχήμα 4.3: Δομικό διάγραμμα ελέγχου συστήματος μέσω PI controller

Το διάγραμμα αυτό δεν είναι πλήρες καθότι ο PI ελεγκτής θα υλοποιηθεί μέσω υπολογιστή, επομένως θα πρέπει να συμπεριλάβουμε τον μετατροπέα AD, την μονάδα ανακατασκευής σήματος ZOH καθώς και ένα κέρδος πριν τον αθροιστή ίσο με K_{tac} για να μετατρέψουμε το σήμα αναφοράς από γωνιακή ταχύτητα (rpm) σε τάση (V) ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμο με το σήμα εξόδου που είναι η τάση της ταχογεννήτριας (V). Το ολοκληρωμένο δομικό διάγραμμα που περιγράφει το σύστημα σε επικοινωνία με τον PI ελεγκτή που θα υλοποιηθεί μέσω υπολογιστή φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.3: Ολοκληρωμένο δομικό διάγραμμα ελέγχου συστήματος μέσω PI controller