



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Σερβοκινητήρες: Αρχές λειτουργίας, κατασκευαστικοί
τύποι, διανυσματικός έλεγχος κι εφαρμογές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΑΚΟ ERBIN

Επιβλέπων : ΜΑΡΙΑ Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Σερβοκινητήρες: Αρχές λειτουργίας, κατασκευαστικοί τύποι, διανυσματικός έλεγχος κι εφαρμογές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΑΚΟ ΕΡΒΙΝ

Επιβλέπων : ΜΑΡΙΑ Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την xx^η Ιουλίου 2011.

(Υπογραφή)

.....
ΜΑΡΙΑ Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Π. ΤΣΑΡΑΜΠΡΑΡΗΣ
ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

(Υπογραφή)

.....

ΜΑΚΟ ΕΡΒΙΝ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2011 – All rights reserved

Περίληψη

Ο έλεγχος της ηλεκτρικής κίνησης είναι αναγκαίος στη σύγχρονη εποχή για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, αύξησης της παραγωγής με ταυτόχρονη μείωση του κόστους της, και γενικά βελτίωσης της ποιότητας ζωής του ανθρώπου. Στην εξέλιξη των συστημάτων ελέγχου της ηλεκτρικής κίνησης και κυρίως στην ευρεία εξάπλωσή τους σε όλες τις φάσεις της παραγωγής, μεταποίησης και διανομής βιομηχανικών προϊόντων βοήθησε σημαντικά η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος κι ακόμη περισσότερο η εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας.

Η απαίτηση για υψηλής ποιότητας έλεγχο ροπής, ταχύτητας και θέσης της ηλεκτρικής κίνησης οδήγησε στην ανάπτυξη σερβοκινητήριων συστημάτων που επιτυγχάνουν ελεγχόμενη δυναμική απόκριση κι ικανοποιητική σταθερότητα στην απόρριψη διαταραχών. Ο έλεγχος αυτός απαιτεί σωστή σχεδίαση και πλήρη γνώση της δράσης κι αλληλεπίδρασης όλων των συνιστωσών του ώστε να επιτυγχάνεται το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Τα παραπάνω αντιστοιχούν σε πολύ καλή γνώση των τεχνικών ελέγχου κι ακόμη περισσότερο μιας σφαιρικότερης αντίληψης γύρο από την αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών και του τρόπου παραγωγής της ροπής.

Αντικείμενο αυτού του συγγράμματος είναι η ανάλυση των κατασκευαστικών τύπων των κινητήρων που ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται σε σερβοκινητήρια συστήματα, καθώς κι η μελέτη της τεχνικής του διανυσματικού ελέγχου, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται ο ακριβής, αξιόπιστος κι αποτελεσματικός έλεγχός τους.

Λέξεις Κλειδιά: <<Κινητήρας, Σερβοκινητήρας, Ροπή, Διανυσματικός Έλεγχος, Διάνυσμα Χώρου, Διάνυσμα Χρόνου, Έλεγχος Προσανατολισμένου Πεδίου, Μονάδα Οδήγησης>>

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The control of electric motion is necessary in modern times for saving energy, increasing production while reducing costs and generally improves the quality of life. In the evolution of control systems of electric motion and especially the wide spread in all phases of production, processing and distribution of industrial products led to the rapid development of power electronics and further development of digital technology.

The need for high quality torque control, speed and position of the electric motion led to the development of servomotors systems that achieve controlled dynamic response and good stability in order to reject disturbances. This kind of control requires proper of the action and interaction of all components to achieve the desired result. This corresponds to very good knowledge of control techniques and even more comprehensive understanding of the operation of electrical machines and torque production methods.

The purpose of this diploma thesis is to analyze the several construction types of engines that are mostly used in servomotor systems and to study the technique of vector control, which leads to their precise, reliable and effective control.

Keywords: <<Motor, Servo Motor, Torque, Vector Control, Space Vector, Time Phazor (Vector), Field Oriented Control, Control Unit>>

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή – Βασικές Αρχές Ηλεκτροκινητήρων	- 1 -
1.1	Γενικά χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρων - Κατηγορίες.....	- 1 -
1.2	Βασικά κριτήρια επιλογής των ηλεκτρικών κινητήρων σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας	- 6 -
1.2.1	<i>Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα διέγερσης και σύστημα συλλέκτη-ψυκτρών-</i>	<i>6 -</i>
1.2.2	<i>Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (PM dc-commutator motors)-</i>	<i>7 -</i>
1.2.3	<i>Επαγωγικοί (ασύγχρονοι) κινητήρες.....</i>	<i>- 7 -</i>
1.2.4	<i>Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.....</i>	<i>- 9 -</i>
1.2.5	<i>Κινητήρες μαγνητικής αντίστασης</i>	<i>- 10 -</i>
1.3	Συστήματα οδήγησης ηλεκτροκινητήρων	- 11 -
1.3.1	<i>Συστήματα οδήγησης κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....</i>	<i>- 11 -</i>
1.3.2	<i>Συστήματα οδήγησης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.....</i>	<i>- 14 -</i>
1.4	Δείκτες λειτουργίας και απόδοσης στρεφόμενων ηλεκτροκινητήριων συστημάτων ..	- 21 -
1.4.1	<i>Δείκτες της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας.....</i>	<i>- 21 -</i>
1.4.2	<i>Δείκτες απόκρισης/λειτουργίας του κινητήριου συστήματος</i>	<i>- 24 -</i>
1.4.3	<i>Δείκτες κόστους του κινητήριου συστήματος</i>	<i>- 26 -</i>
1.5	Σερβοκινητήρες.....	- 26 -
2	Μηχανές μόνιμου μαγνήτη και μαγνητικής αντίστασης	- 29 -
2.1	Γενικά.....	- 29 -
2.2	Συγκριτική ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών μόνιμου μαγνήτη.....	- 30 -
2.3	ΣΜ μόνιμου μαγνήτη.....	- 31 -
2.3.1	<i>Είδη ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τις θέσεις δρομέα και στάτη</i>	<i>- 32 -</i>
2.3.2	<i>Είδη ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με το σχεδιασμό της περιέλιξης του στάτη -</i>	<i>37 -</i>
2.3.3	<i>Είδη ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τη διαύθυνση του μαγνητικού πεδίου. -</i>	<i>41 -</i>

2.3.4	Άλλοι τύποι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με διεύθυνση κίνησης και την κατασκευή του πυρήνα του στάτη.....	- 46 -
2.3.5	Είδη ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τη θέση των μαγνητών στο δρομέα....	- 51 -
2.4	Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (commutator DC-PM machines).....	- 59 -
2.5	Ηλεκτρικές μηχανές μαγνητικής αντίστασης	- 61 -
2.5.1	ΣΜ μαγνητικής αντίστασης (SynRM)	- 61 -
2.5.2	Μηχανές μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης (SRM).....	- 65 -
2.6	Τεχνικές ελέγχου ΣΜ μόνιμου μαγνήτη	- 68 -
2.6.1	Τετραγωνικού παλμού ή τραπεζοειδής ΣΜ μόνιμου μαγνήτη (squarewave PM ή trapezoidal PM ή γενικά brushless dc machine).....	- 68 -
2.6.2	Ημιτονοειδής ΣΜ μόνιμου μαγνήτη (sinewave PM ή brushless ac machine) -	69 -
3	Διανυσματικός έλεγχος ηλεκτρικών μηχανών	- 70 -
3.1	Γενικά.....	- 70 -
3.2	Ορισμός του διανύσματος χώρου	- 71 -
3.3	Εφαρμογή της θεωρίας των διανυσμάτων χώρου σε μονοφασική συγκεντρωμένη περιέλιξη στάτη.....	- 75 -
3.4	Εφαρμογή της θεωρίας των διανυσμάτων χώρου σε μονοφασική κατανεμημένη περιέλιξη στάτη.....	- 83 -
3.5	Εφαρμογή της θεωρίας των διανυσμάτων χώρου σε συμμετρική τριφασική κατανεμημένη περιέλιξη στάτη	- 86 -
3.6	Διάνυσμα χώρου σε συμμετρική τριφασική ηλεκτρική μηχανή με κατανεμημένη περιέλιξη στάτη και δρομέα.....	- 89 -
3.7	Ορισμός των διανυσμάτων χώρου σε γενικό (αυθαίρετο) σύστημα αξόνων αναφοράς -	92 -
3.8	Στιγμιαία ισχύς του τριφασικού συστήματος.....	- 96 -
3.9	Μηχανισμός παραγωγής της ροπής στις στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές.....	- 97 -
3.10	Διάφορες εκφράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.....	- 99 -
3.11	Αρχή λειτουργίας του διανυσματικού ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών	- 102 -
3.11.1	Έλεγχος μηχανών συνεχούς ρεύματος	- 102 -
3.11.2	Έλεγχος μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος.....	- 102 -
3.11.3	Έλεγχος μηχανών μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης	- 110 -

4	Εφαρμογές των σερβοκινητήρων & συμπεράσματα.....	- 111 -
4.1	Εφαρμογές σερβοκινητήρων.....	- 111 -
4.2	Συμπεράσματα	- 115 -
5	Βιβλιογραφία.....	- 117 -

1

Εισαγωγή – Βασικές Αρχές Ηλεκτροκινητήρων

1.1 Γενικά χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρων - Κατηγορίες

Ο έλεγχος της ηλεκτρικής κίνησης γίνεται καθημερινά περισσότερο αναγκαίος σε πολλές εφαρμογές και για συνεχώς μεγαλύτερο εύρος ισχύος. Οι λόγοι που κατά κύριο λόγο επιβάλλουν τη χρήση κινητήριων συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας είναι :

- 1) εξοικονόμηση ενέργειας (π.χ. έλεγχος της παροχής μιας αντλίας μέσω ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα),
- 2) απαίτηση της εφαρμογής για έλεγχο ταχύτητας και θέσης (π.χ. σε εφαρμογές όπως ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ηλεκτρονικές συσκευές γραφείου, ρομπότ, μηχανές κατεργασίας υλικών) και
- 3) βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της διάταξης (π.χ. ελεγχόμενη επιτάχυνση κι επιβράδυνση με συχνές εκκινήσεις και πεδήσεις της μηχανής)

Η τεχνολογική ανάπτυξη και βελτίωση των ηλεκτρονικών ισχύος καθώς κι η χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας είχαν ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους των ηλεκτρονικών μονάδων οδήγησης (drives) και την αύξηση της αξιοπιστίας τους. Οι νέες μονάδες οδήγησης κινητήρων είναι πλέον οικονομικά προσιτές και προσφέρουν πολλαπλές δυνατότητες, ώστε να είναι πρακτικά δυνατή η αντιμετώπιση οποιουδήποτε σύνθετου προβλήματος ελέγχου.

Ο έλεγχος της ηλεκτρικής κίνησης είναι έλεγχος ροπής, ταχύτητας και θέσης. Σημαντικό ρόλο σε ένα ηλεκτροκινητήριο σύστημα παίζουν:

- 1) η επιλογή του συστήματος ελέγχου (ανοικτού ή κλειστού βρόχου), της τεχνικής ελέγχου (ψηφιακή ή αναλογική τεχνική) και της μεθόδου διαμόρφωσης των παλμών ελέγχου των ηλεκτρονικών διακοπών του αντιστροφέα
- 2) τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής μηχανής (πυκνότητα ισχύος, λόγος ροπής προς το ρεύμα φορτίου, ροπή αδράνειας, ταλαντώσεις στην παραγόμενη ροπή και μέγιστο εύρος ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής) και τέλος
- 3) το συνολικό οικονομικό κόστος του συστήματος (κόστος αγοράς και κόστος λειτουργίας)

Η επιλογή του συστήματος και της ελέγχου γίνεται ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής, τις απαιτήσεις σε ποιότητα κι αξιοπιστία ελέγχου και σε σχέση με το συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές όπου ο χρόνος κι η ακρίβεια απόκρισης του συστήματος δεν παίζουν σημαντικό ρόλο και δεν απαιτείται έλεγχος θέσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου το οποίο είναι απλό στην κατασκευή, εύκολο στην εγκατάσταση και οικονομικό. Αντίθετα, σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακρίβεια και γρήγορη απόκριση στα σήματα εντολής ταχύτητας και θέσης του δρομέα (δηλαδή απαιτούνται γρήγορες κι ελεγχόμενες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις) επιλέγεται σερβοκινητήριο σύστημα (servo system) με έλεγχο κλειστού βρόχου. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται η εγκατάσταση αισθητήρα ταχύτητας και θέσης στο δρομέα. Αυτή η τεχνική ελέγχου είναι περισσότερο πολύπλοκη κι απαιτεί ρύθμιση των παραμέτρων της ώστε να προσαρμοστεί στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας της εφαρμογής. Επίσης, το κόστος ενός σερβοκινητήριου συστήματος είναι υψηλότερο σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο κινητήριο σύστημα ανοικτού βρόχου.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του κινητήριου συστήματος. Συνεπώς, η απάντηση στην ερώτηση ποιό είναι το καλύτερο σύστημα οδήγησης σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να προκύπτει από το συνδυασμό της τεχνικής ελέγχου και του είδους του κινητήρα. Γι' αυτόν το λόγο θα πρέπει να εξεταστούν τα διάφορα είδη ηλεκτροκινητήρων, να μελετηθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και να επισημανθούν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- 1) Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών για τη τροφοδοσία του δρομέα. Το συνεχές ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη και του δρομέα παράγεται από την

ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου ή δίνεται από μπαταρίες. Επίσης, στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet dc-communicator motors) στους οποίους το τύλιγμα της διέγερσης του στάτη έχει αντικατασταθεί από μόνιμο μαγνήτη καθώς και οι κινητήρες universal (κινητήρες συνεχούς ρεύματος σε συνδεσμολογία διέγερσης σειράς), οι οποίοι λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση.

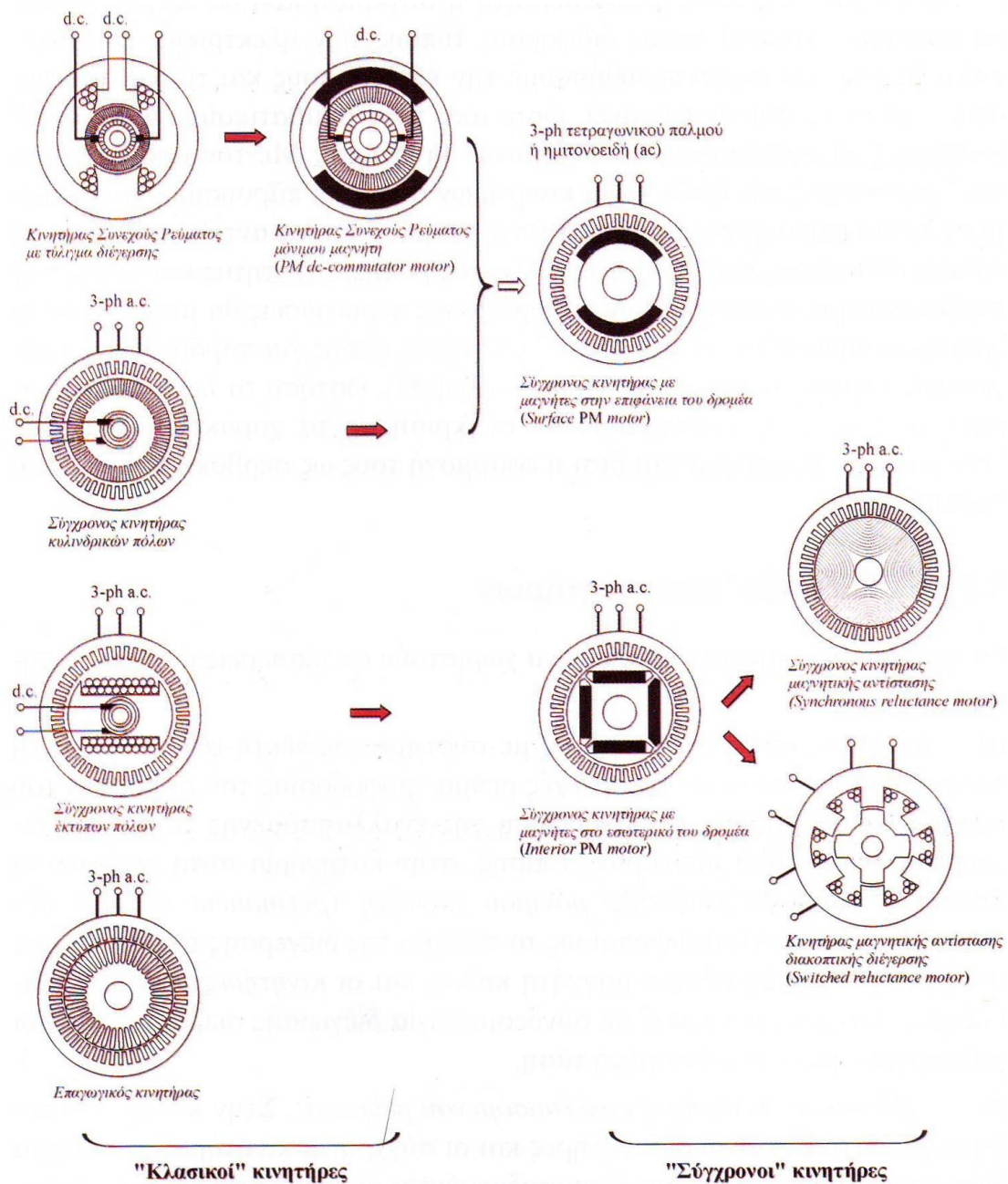
2) “Κλασικοί” κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι επαγωγικοί κινητήρες κι οι σύγχρονοι κινητήρες με εναλλασσόμενη ημιτονοειδή τάση του στάτη και παράγουν στο διάκενο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

3) “Σύγχρονοι” κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet synchronous motors) κι οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης (reluctance motors). Κοινό χαρακτηριστικό των κινητήρων αυτών είναι ότι δεν έχουν ολισθαίνουσες επιφάνειες (ψήκτρες-συλλέκτη ή ψήκτρες-δακτυλίους ολίσθησης) για την αγωγή σύνδεση του στρεφόμενου δρομέα με το ακίνητο σημείο της τάσης τροφοδοσίας τους.

4) Ειδικού τύπου κινητήρες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ειδικού τύπου κινητήρες οι οποίοι δεν μπορούν να ενταχθούν στις προηγούμενες τρεις κατηγορίες κινητήρων. Αυτοί είναι οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors), οι κινητήρες υστέρησης (hysteresis motors) κλπ.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η εξέλιξη της κατασκευής των κινητήρων ώστε από τους “κλασικούς” κινητήρες των κατηγοριών 1 και 2 να προκύψουν οι “σύγχρονοι” brushless κινητήρες.

Στην πρώτη στήλη βρίσκονται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι επαγωγικοί κινητήρες (βραχυκυκλωμένου και δακτυλιοφόρου δρομέα) κι οι σύγχρονοι κινητήρες με τύλιγμα διέγερσης στο δρομέα (κυλινδρικοί κι έκτυπων πόλων). Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι οι μόνιμοι brushless “κλασικοί” κινητήρες. Άλλωστε, το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος κατασκευής τους είναι οι σημαντικότεροι λόγοι για τους οποίους οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού έχουν κυριαρχήσει στις περισσότερες εφαρμογές βιομηχανικής ηλεκτρικής κίνησης με μη-ελεγχόμενη ταχύτητα περιστροφής. Οι επαγωγικοί κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα έχουν ψήκτρες και δακτυλίους ολίσθησης και δεν μπορούν με κατασκευαστικές αλλαγές να μετατραπούν σε brushless, γιατί τότε χάνεται ένα συγκριτικό λειτουργικό πλεονέκτημά τους ως προς τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού που είναι η δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικής αντίστασης στο κύκλωμα του δρομέα για τη ρύθμιση της ροπής και του ρεύματος κίνησης.



Σχήμα 1.1 Εξέλιξη των "κλασικών" κινητήρων σε brushless κινητήρες

Στη δεύτερη στήλη βρίσκονται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη οι οποίοι προέρχονται ως εξέλιξη από τους συμβατικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όταν αντικατασταθεί το τύλιγμα της διέγερσης του στάτη από μόνιμο μαγνήτη.

Στην τρίτη στήλη βρίσκονται οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PM) για τους οποίους έχουμε 2 βασικούς σχεδιαστικούς τύπους:

- 1) Σύγχρονοι κινητήρες με μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα (SPM, surface PM motors). Αυτοί προέρχονται από τη εξέλιξη των κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη αντιμεταθέτοντας τις θέσεις των μαγνητών και της περιέλιξης (γι'

αυτό είναι γνωστοί ως brushless dc motors). Δηλαδή, οι μαγνήτες βρίσκονται στο δρομέα ενώ τα τυλίγματα της περιέλιξης στο στάτη. Ωστόσο, αν δούμε τις αλλαγές μόνο από τον τρόπο παραγωγής της διέγερσης, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι προέρχονται απ' ευθείας από τους σύγχρονους κινητήρες κυλινδρικών πόλων όπου το τυλίγμα διέγερσης του δρομέα έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες.

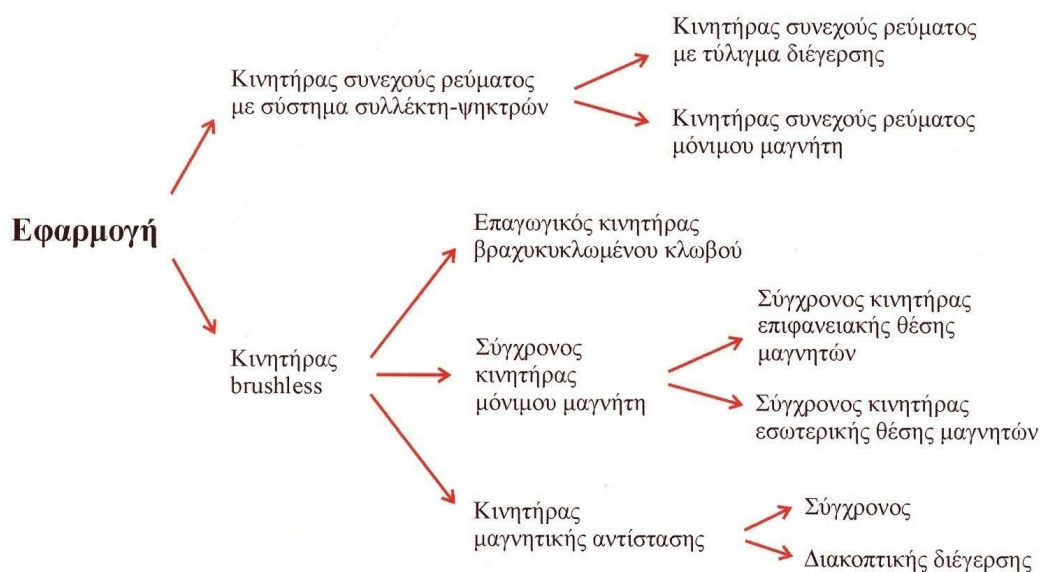
- 2) Σύγχρονοι κινητήρες με μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα (IPM, interior PM motors). Αυτοί προέρχονται απ' ευθείας από τους συμβατικούς σύγχρονους κινητήρες έκτυπων πόλων όπου το τυλίγμα διέγερσης του δρομέα έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες.

Στην τέταρτη στήλη βρίσκονται οι δύο τύποι κινητήρων μαγνητικής αντίστασης: οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης (SRM, switched reluctance motors). Οι κινητήρες αυτοί είναι brushless, όπως και της προηγούμενης στήλης και προέρχονται από τους σύγχρονους κινητήρες εσωτερικής θέσης μαγνητών όταν αφαιρεθούν οι μαγνήτες από το δρομέα. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην έλξη που ασκεί ο στάτης στο δρομέα λόγω της διαφορετικής μαγνητικής αντίστασης που παρουσιάζουν οι πυρήνες μεταξύ τους. Οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης έχουν έκτυπους πόλους μόνο στο δρομέα, ενώ στο στάτη έχουν τριφασική περιέλιξη και τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση. Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης έχουν έκτυπους πόλους και στο στάτη και στο δρομέα. Στις μηχανές αυτές, η τροφοδοσία του στάτη είναι παλμοί τάσης συγκεκριμένης συχνότητας ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής ενώ η διάρκεια των παλμών εξαρτάται από τη ροπή φόρτισης του κινητήρα.

Στην παραπάνω παρουσίαση των κινητήρων δεν αναφέρθηκαν οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors) καθώς και διάφοροι ειδικοί τύποι "κλασικών" και "σύγχρονων" κινητήρων όπως, όπως οι επαγωγικοί και οι σύγχρονοι κινητήρες γραμμικής κίνησης (linear motors), οι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors), οι κινητήρες υστέρησης (hysteresis motors) κλπ. Οι βηματικοί κινητήρες είναι brushless κινητήρες κι ο σχεδιασμός τους προκύπτει από το συνδυασμό των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και κινητήρων μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης. Οι κινητήρες γραμμικής κίνησης δίνουν ευθύγραμμη κίνηση στο δρομέα, ενώ στους κινητήρες αξονικής ροής, τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι το μικρό αξονικό μήκος κι η μεγάλη ροπή αδράνειας. Τέλος, οι κινητήρες υστέρησης είναι συνήθως μικρής ισχύος μηχανές με τυλίγμα μόνο στο στάτη κι η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εκμετάλλευση του φαινομένου της υστέρησης στο πυρήνα του δρομέα.

1.2 Βασικά κριτήρια επιλογής των ηλεκτρικών κινητήρων σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι δυνατότητες που υπάρχουν σε επιλογές κινητήρων για τη χρησιμοποίησή τους σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας. Είναι φανερό ότι η πρώτη επιλογή αφορά το ερώτημα αν θα χρησιμοποιηθεί κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες-συλλέκτη ή brushless και στη συνέχεια αν ο κινητήρας θα είναι επαγωγικός ή σύγχρονος με τύλιγμα διέγερσης, μαγνητικής αντίστασης ή με μόνιμους μαγνήτες καθώς επίσης ποιά θα πρέπει να είναι η θέση των μαγνητών στον πυρήνα της μηχανής.



Σχήμα 1.2 Επιλογές ηλεκτροκινητήρων για ένα στρεφόμενο κινητήριο σύστημα μεταβλητής ταχύτητας.

1.2.1 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα διέγερσης και σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών

Οι παραδοσιακοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν, και θα χρησιμοποιούνται ακόμη, σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας. Η ταχύτητα περιστροφής τους είναι εύκολο να ελεγχθεί μεταβάλλοντας τις τάσεις τροφοδοσίας στο στάτη και το δρομέα με απλές κι οικονομικές μονάδες οδήγησης (ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες και choppers) σε αντίθεση με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου απαιτείται έλεγχος της συχνότητας της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης και συνεπώς περισσότερο πολύπλοκες κι ακριβότερες διατάξεις οδήγησης. Σε εφαρμογές όπου αρκεί η λειτουργία του κινητήρα στα δύο τεταρτημόρια, το χαμηλό κόστος της διάταξης οδήγησης κάνει τη χρήση των κινητήρων

συνεχούς ρεύματος αρκετά ανταγωνιστική. Αντίθετα, σε εφαρμογές όπου απαιτείται πέδηση του κινητήρα με ανάκτηση ισχύος, το συνολικό κόστος της διάταξης οδήγησης είναι υψηλό κι ο έλεγχος πολύπλοκος καθώς απαιτούνται είτε δύο αντιπαράλληλες ανορθωτικές γέφυρες, είτε ένας ad-ac αντιστροφέας ισχύος.

Ωστόσο, το σημαντικότερο μειονέκτημα των “κλασικών” κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες και τους “σύγχρονους” brushless σερβοκινητήρες είναι το σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών γιατί αυξάνει το κόστος και τη συχνότητα συντήρησης, περιορίζει τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής κι αυξάνει το συνολικό όγκο της μηχανής. Τα παραπάνω μαζί με τα μειονεκτήματα της μεγαλύτερης αδράνειας και του μικρότερου βαθμού απόδοσης είναι οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους δεν προτιμούνται οι μηχανές συνεχούς ρεύματος σε σερβοκινητήρια συστήματα.

1.2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (PM dc-commutator motors)

Στους κινητήρες αυτούς, το τύλιγμα διέγερσης στο στάτη έχει αντικατασταθεί από μόνιμο μαγνήτη. Με τον τρόπο αυτό δεν μπορούμε να μεταβάλλουμε τη διέγερση με αποτέλεσμα ο έλεγχος της ταχύτητάς τους να γίνεται μόνο από το τύλιγμα του δρομέα μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας τους. Οι κινητήρες αυτοί είναι συνήθως μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται σε μικροεργαλεία, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οικιακές συσκευές, διεγέρτριες σύγχρονων γεννητριών κλπ.

Κύρια χαρακτηριστικά των κινητήρων αυτών είναι ότι δεν έχουν ωμικές απώλειες στο στάτη και τα προβλήματα της μετάβασης είναι μειωμένα λόγω της μικρής τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του μαγνήτη. Επίσης, οι κινητήρες αυτοί έχουν μικρότερο όγκο στάτη λόγω του μικρότερου χώρου που καταλαμβάνει ο μαγνήτης σε σχέση με τα τυλίγματα χαλκού των κλασικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

1.2.3 Επαγωγικοί (ασύγχρονοι) κινητήρες

Οι επαγωγικοί κινητήρες παρουσιάζονται σε δύο κατασκευαστικούς τρόπους: βραχυκυκλωμένου κλωβού και δακτυλιοφόρου δρομέα. Οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι brushless, ενώ οι κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα έχουν ολισθαίνουσες επιφάνειες στο δρομέα (δακτυλίους ολίσθησης και ψήκτρες).

Ο έλεγχος της ταχύτητας και των δυο τύπων επαγωγικών κινητήρων γίνεται μεταβάλλοντας τη συχνότητα αναλογικά με την τάση τροφοδοσίας του στάτη (βαθμωτός έλεγχος V/f) μέσω

ενός αντιστροφέα (inverter). Στις περιπτώσει όπου δεν απαιτείται ακριβής έλεγχος της θέσης και της ταχύτητας, χρησιμοποιείται σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου, ο οποίος είναι απλός και δεν απαιτεί μέτρηση της ταχύτητας. Έτσι, στο σύστημα που περιλαμβάνει τον μετατροπέα ισχύος (power converter) και το κύκλωμα ελέγχου, είναι σχετικά χαμηλού κόστους κι εύκολο στην εγκατάστασή του. Ωστόσο δεν επιτυγχάνεται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα, γιατί η ταχύτητα μεταβάλλεται με το φορτίο (ολίσθηση) και το κινητήριο δεν έχει γρήγορη απόκριση σε μεταβολές της ταχύτητας εντολής (δεν μπορεί να αναπτύξει μεγάλη και κυρίως ελεγχόμενη επιτάχυνση κι επιβράδυνση). Η ακρίβεια στον έλεγχο της ταχύτητας μπορεί να βελτιωθεί αν χρησιμοποιηθεί σύστημα κλειστού βρόχου όπου έχουμε ανάδραση του σήματος της ταχύτητας, ωστόσο παραμένει το μειονέκτημα των σχετικά χαμηλών επιταχύνσεων κι επιβραδύνσεων του δρομέα.

Στις περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια στον έλεγχο και την απόκριση στα σήματα εντολής, χρειάζεται μετατροπέας ισχύος με σύστημα κλειστού βρόχου διανυσματικού ελέγχου (vector control ή έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου, field-oriented control). Για τη λειτουργία του διανυσματικού ελέγχου πρέπει σε κάθε στιγμή να είναι γνωστή η θέση του δρομέα και συνεπώς απαιτείται η εγκατάσταση στο δρομέα ειδικού αισθητήριου θέσης. Η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου στους επαγωγικούς κινητήρες είναι αρκετά πολύπλοκη κι εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακρίβεια του ελέγχου να επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές των παραμέτρων που προκαλούνται κυρίως λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας και του μαγνητικού κορεσμού.

Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού έχουν χαμηλό κατασκευαστικό κόστος, ωστόσο, παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες σε σχέση με τους brushless κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, γιατί έχουν ωμικές απώλειες στο δρομέα λόγω του ρεύματος φορτίου κι επίσης λειτουργούν πάντοτε με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Το σύστημα ελέγχου για τη λειτουργία τους ως σερβοκινητήρες είναι πολύπλοκο κι επιπλέον δεν μπορούν να επιτύχουν τη δυναμική απόκριση των brushless σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη, γιατί έχουν μεγαλύτερη αδράνεια. Έτσι, οι επαγωγικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε απευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο καθώς και σε κινητήρια συστήματα βαθμωτού ελέγχου της ταχύτητας V/f ανοιχτού ή κλειστού βρόχου. Ως σερβοκινητήρες σε κινητήρια συστήματα διανυσματικού ελέγχου χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν σημαντικές απαιτήσεις από την εφαρμογή ως προς τη δυναμική συμπεριφορά κι απαιτείται χαμηλό κόστος εγκατάστασης.

1.2.4 Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν τριφασικό τύλιγμα στο στάτη και μόνιμο μαγνήτη στο δρομέα. Έτσι, όπως και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη, δεν μπορούμε να ελέγξουμε (τουλάχιστον άμεσα) το πεδίο διέγερσης. Σημαντικό πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι δεν έχουν ωμικές απώλειες στο δρομέα και συνεπώς παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερο λόγο ροπής προς όγκο μηχανής (μεγάλη πυκνότητα ροπής) σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες. Ωστόσο, οι μαγνήτες βρίσκονται στο εσωτερικό της μηχανής (στο δρομέα) και μάλιστα σε σημείο που είναι δύσκολη η απαγωγή θερμότητας. Επειδή οι ιδιότητες των μαγνητών επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία (μεταβολή της καμπύλης απομαγνήτισης), επιβάλλεται η θερμοκρασία λειτουργίας των μηχανών αυτών να είναι χαμηλή.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χωρίζονται σε ημιτονοειδείς και τετραγωνικού παλμού, ανάλογα με την τεχνική έλεγχου και τη μορφή της μαγνητεγερτικής δύναμης των τυλιγμάτων τους. Οι ημιτονοειδείς κινητήρες ονομάζονται σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (brushless PM ac synchronous motors ή sinewave PM brushless motors), τα ρεύματα τροφοδοσίας του στάτη είναι τριφασικά ημιτονοειδή κι η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή τους στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Αντίθετα, οι σύγχρονοι κινητήρες τετραγωνικού παλμού (square-wave PM brushless motors) τροφοδοτούνται με τριφασικά ρεύματα τετραγωνικής μορφής στο στάτη, κι επειδή προσεγγίζουν την αρχή λειτουργίας των κλασικών μηχανών συνεχούς ρεύματος, είναι γνωστοί ως brushless dc κινητήρες.

Στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη οι μαγνήτες μπορεί να είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα (surface type) ή στο εσωτερικό του πυρήνα του δρομέα (interior type). Ως κινητήρες τετραγωνικού παλμού χρησιμοποιούνται οι σύγχρονες μηχανές με μαγνήτες τοποθετημένους στην επιφάνεια του δρομέα. Ως ημιτονοειδείς κινητήρες μπορεί να είναι και δύο οι τύποι σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη και μάλιστα ανάλογα με τη θέση των μαγνητών στο δρομέα, η λειτουργία τους προσεγγίζει τη λειτουργία ενός συμβατικού σύγχρονου κινητήρα με τύλιγμα διέγερσης είτε κυλινδρικών είτε έκτυπων πόλων. Οι σύγχρονοι κινητήρες επιφανειακής θέσης μαγνητών προσεγγίζουν τη λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων κυλινδρικών πόλων, ενώ οι σύγχρονοι κινητήρες εσωτερικής θέσης μαγνητών στο δρομέα προσεγγίζουν τη λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων έκτυπων πόλων.

Τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης, η μεγάλη πυκνότητα ροπής ανά όγκο μηχανής, η μικρή αδράνεια κι η σχετικά ικανοποιητική τιμή του συντελεστή ισχύος. Η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου στους κινητήρες αυτούς είναι ευκολότερη σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες κι επιπλέον δεν

εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου της μηχανής. Ένα κινητήριο σύστημα διανυσματικού ελέγχου με σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχει πολύ καλή δυναμική απόκριση σε μεταβολές των σημάτων εντολής ταχύτητας και θέσης γιατί αναπτύσσει πολύ γρήγορες και κυρίως ελεγχόμενες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις. Ωστόσο, οι κινητήρες αυτοί έχουν υψηλό κόστος αγοράς (κυρίως λόγω του μαγνήτη) και δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες γιατί επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά των μαγνητών.

1.2.5 Κινητήρες μαγνητικής αντίστασης

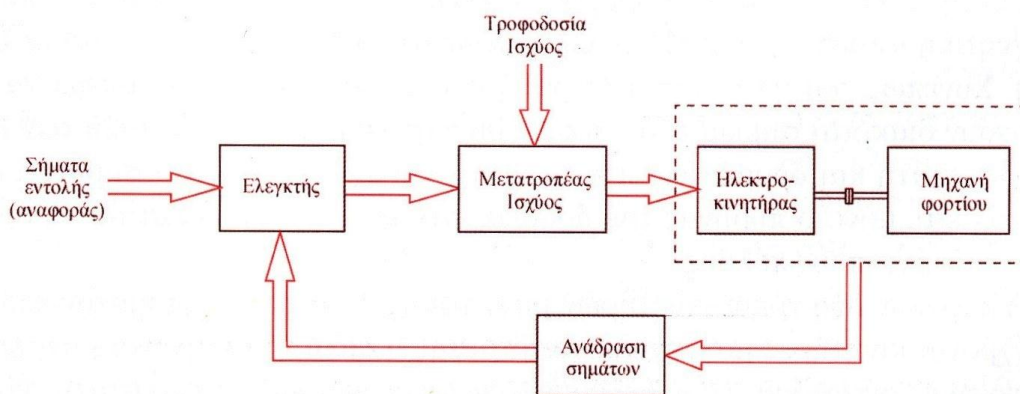
Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης δεν έχουν τυλίγματα και γενικά αγώγιμα μέρη στο δρομέα. Χαρακτηρίζονται ως ηλεκτρικές μηχανές απλής (μόνιμης) διέγερσης κι η κατασκευή τους είναι απλή κι οικονομική. Στους κινητήρες αυτούς η ροπή αναπτύσσεται λόγω της έλξης που ασκεί το πεδίο διέγερσης του στάτη προς το σιδηρομαγνητικό πυρήνα του δρομέα, δηλαδή της έλξης που ασκείται στο δρομέα να κινηθεί προς εκείνη τη θέση όπου η μαγνητική αντίσταση μεταξύ των πυρήνων του στάτη και δρομέα γίνεται ελάχιστη. Συνεπώς, για να αναπτυχθεί ροπή στις μηχανές αυτές θα πρέπει να υπάρχουν διακριτά σημεία στα οποία η μαγνητική μεταξύ των πυρήνων του στάτη και του δρομέα να είναι μέγιστη κι ελάχιστη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει είτε μόνο ο πυρήνας του δρομέα, είτε και του στάτη και του δρομέα να έχουν έκτυπους πόλους.

Υπάρχουν δύο είδη κινητήρων μαγνητικής αντίστασης: οι ημιτονοειδείς σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης ή απλά οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης (synchronous reluctance motors) όπου ο στάτης είναι κυλινδρικού τύπου, ενώ έκτυπους πόλους έχει μόνο ο δρομέας, κι οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης (switched reluctance motors), όπου έκτυπους πόλους έχει κι ο στάτης κι ο δρομέας. Κοινό χαρακτηριστικό και των δυο αυτών τύπων κινητήρων μαγνητικής αντίστασης είναι το γεγονός ότι στο δρομέα δεν υπάρχουν μαγνήτες ούτε τυλίγματα χαλκού και συνεπώς ο δρομέας δεν έχει ρεύμα. Επίσης, οι κινητήρες αυτοί έχουν απλή και στιβαρή κατασκευή, χαμηλό κατασκευαστικό κόστος και μικρή αδράνεια. Ειδικότερα, οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης έχουν την πιο απλή κατασκευή σε σύγκριση με τους αντίστοιχους ημιτονοειδείς κινητήρες μαγνητικής αντίστασης, καλύτερη δυναμική συμπεριφορά και μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες ταχύτητες περιστροφής (έως 20.000 στροφές ανά λεπτό).

Τα μειονεκτήματα των κινητήρων μαγνητικής αντίστασης είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος κι ο μικρός λόγος ροπής προς όγκο μηχανής. Ακόμη, μειονεκτήματα των κινητήρων μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης είναι οι σχετικά μεγάλες ταλαντώσεις ροπής που προκαλούν διακυμάνσεις στη ταχύτητα κι ο έντονος και υψηλής συχνότητας ακουστικός θόρυβος.

1.3 Συστήματα οδήγησης ηλεκτροκινητήρων

Στο Σχήμα 1.3 δίνεται το γενικό λειτουργικό διάγραμμα των ηλεκτροκινητήριων συστημάτων κλειστού βρόχου.



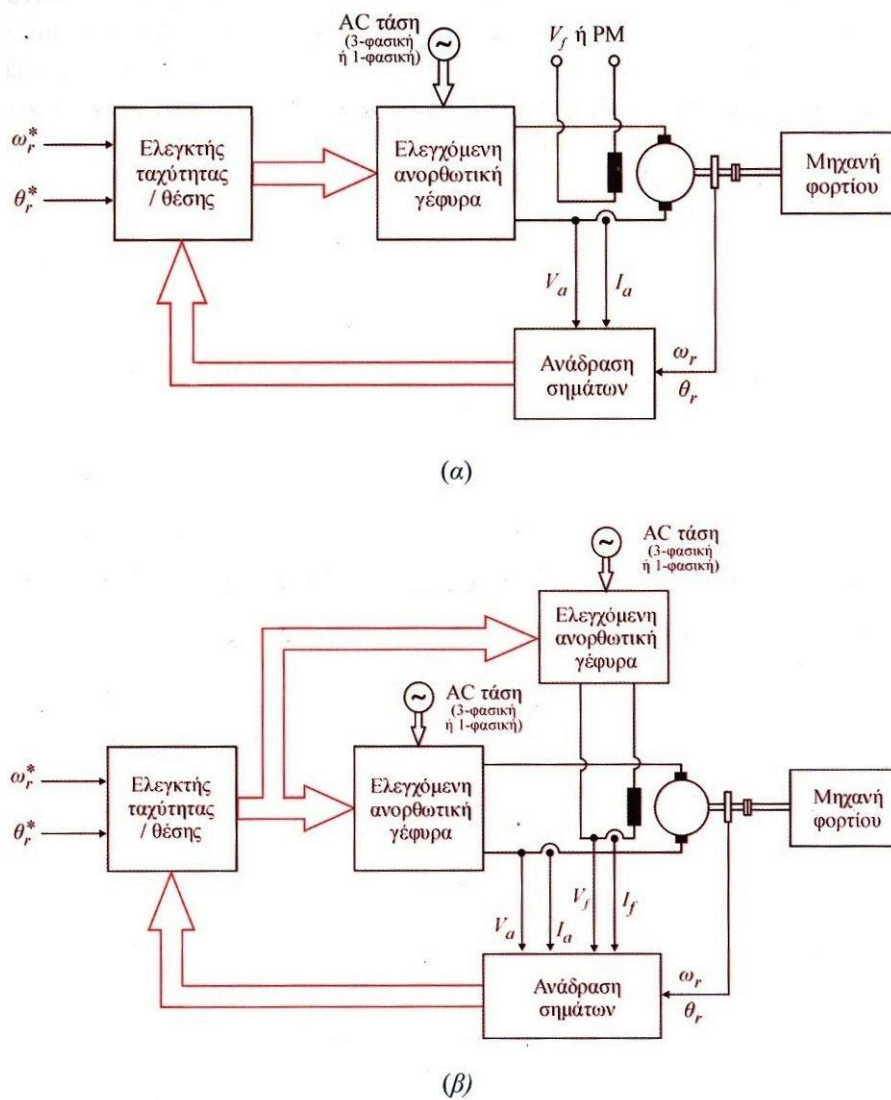
Σχήμα 1.3 Γενικό λειτουργικό διάγραμμα ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος

Ο ελεγκτής συγκρίνει τα σήματα εντολής (command signals) ή σήματα αναφοράς (reference signals) με τα σήματα ανάδρασης (feedback signals) και παράγει κατάλληλα σήματα για την οδήγηση του μετατροπέα ισχύος (power converter) και τον έλεγχο του ηλεκτροκινητήρα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επιλογή του συστήματος οδήγησης και της τεχνικής ελέγχου εξαρτάται από το είδος του κινητήρα και κυρίως τις απαιτήσεις της εφαρμογής σε εύρος ταχύτητας λειτουργίας κι ακριβείας απόκρισης του κινητήρα στα σήματα εντολής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα συστήματα οδήγησης κινητήρων συνεχούς κι εναλλασσόμενου ρεύματος.

1.3.1 Συστήματα οδήγησης κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος. Η μηχανή λειτουργεί με έλεγχο κλειστού βρόχου ταχύτητας ή και θέσης. Η ταχύτητα του κινητήρα ελέγχεται μέσω της τάσης τροφοδοσίας του δρομέα.

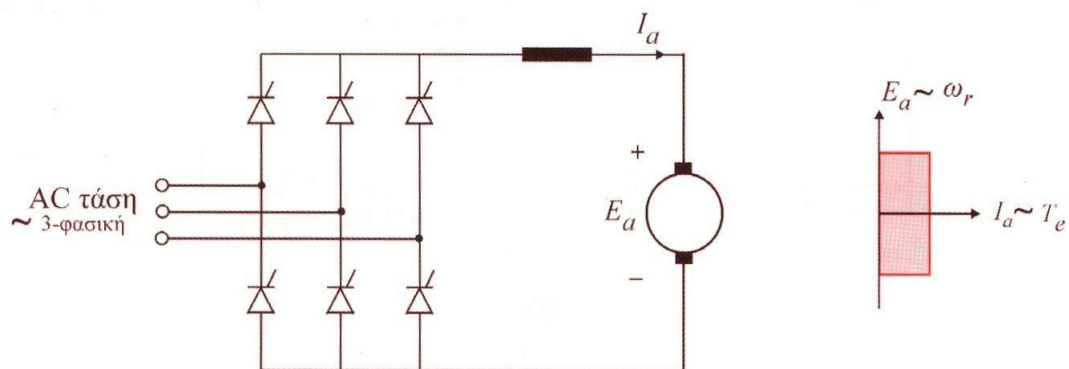


Σχήμα 1.4 Λειτουργικό διάγραμμα κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος: (α) σταθερής διέγερσης και (β) ελεγχόμενης διέγερσης

Στο Σχήμα 1.4.α ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή διέγερση (μη-ελεγχόμενη τάση διέγερσης ή σταθερή διέγερση από μόνιμους μαγνήτες) και η περιοχή ελέγχου ταχύτητας είναι $0 < \omega_r < \omega_b$ (όπου ω_b η ταχύτητα βάσης). Στο Σχήμα 1.4.β η τάση διέγερσης ελέγχεται μέσω ελεγχόμενης ανορθωτικής γέφυρας και επιτυγχάνεται έλεγχος σε όλη τη περιοχή ταχυτήτων (δηλαδή επιπρόσθετα έχουμε έλεγχο ταχύτητας μέσω της τάσης διέγερσης και συνεπώς λειτουργία σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας βάσης, $\omega_r > \omega_b$).

Και τα δυο συστήματα περιλαμβάνουν τον ελεγκτή ταχύτητας (ή και θέσης) ο οποίος δέχεται τα σήματα εντολής (ταχύτητας ω_r^* και θέσης θ_r^* του δρομέα αντίστοιχα) τα οποία συγκρίνει με τα αντίστοιχα σήματα ανάδρασης από το μετρητή ταχύτητας/θέσης και υπολογίζει τις γωνίες έναυσης των θυρίστορ στις ανορθωτικές γέφυρες. Στα συστήματα οδήγησης

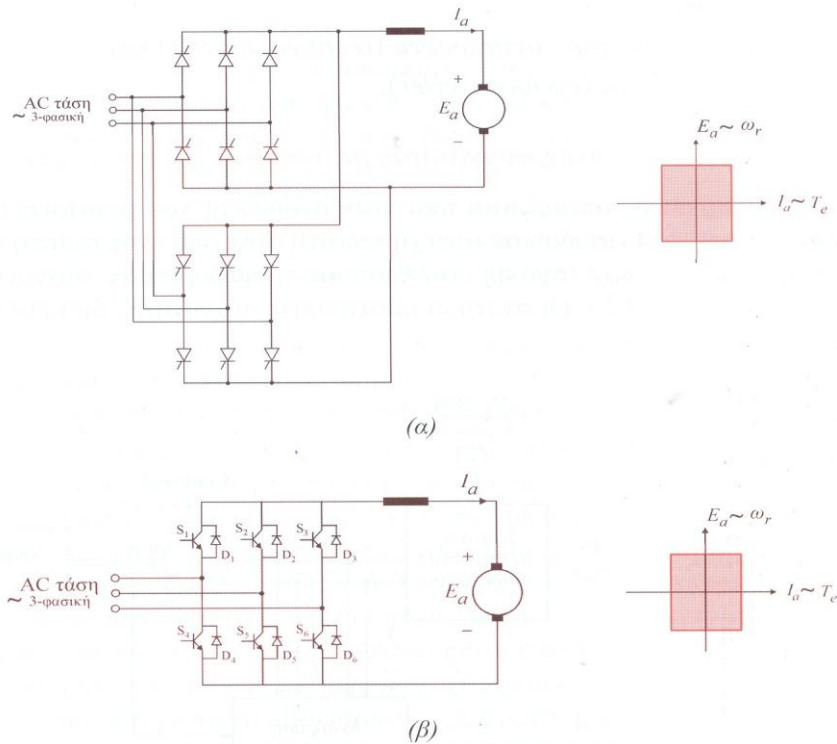
κινητήρων συνεχούς ρεύματος ο μετατροπέας ισχύος είναι η ανορθωτική γέφυρα (rectifier), η οποία μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή.



Σχήμα 1.5 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα (ac-dc μετατροπέας ισχύος) για οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με δυνατότητα στα δυο τεταρτημόρια

Στο Σχήμα 1.5 δίνεται το κύκλωμα του τριφασικού πλήρως ελεγχόμενου ανορθωτή με θυρίστορ. Μέσω της γωνίας έναυσης των θυρίστορ επιτυγχάνεται έλεγχος στα δυο τεταρτημόρια, δηλαδή έλεγχος και στη θετική και στην αρνητική ταχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι η συνεχής τάση εξόδου μπορεί να αλλάζει πολικότητα, ενώ το ρεύμα έχει πάντα σταθερή φορά, δηλαδή δεν επιτρέπεται πέδηση του κινητήρα με ανάκτηση ισχύος. Επίσης έχει μεγάλο νεκρό χρόνο με αποτέλεσμα να είναι αργή η απόκρισή του στον έλεγχο ταχύτητας. Για να έχουμε πλήρη έλεγχο της μηχανής συνεχούς ρεύματος, δηλαδή λειτουργία του κινητήρα με δυνατότητα επιστροφής ισχύος στην πηγή κατά την πέδηση, απαιτούνται δυο ανορθωτικές διατάξεις σε αντιπαράλληλες θέση (Σχήμα 1.6.α) ή ένας ac-dc μετατροπέας ισχύος (Σχήμα 1.6.β).

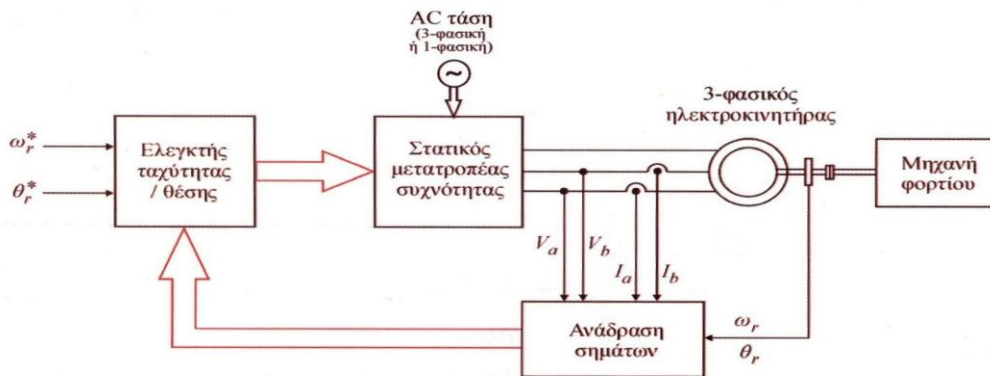
Μάλιστα, ο μετατροπέας ισχύος που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6.β έχει πιο γρήγορη απόκριση στον έλεγχο ταχύτητας κι η κυμάτωση στο ρεύμα είναι μικρότερη γιατί αποτελείται από υψηλής συχνότητας διακοπτικά στοιχεία. Το κύκλωμα του Σχήματος 1.6.β είναι γενικό και με το συμβολισμό των τρανζίστορ ισχύος δηλώνεται ο οποιοσδήποτε τύπος υψηλής συχνότητας ηλεκτρονικός διακόπτης.



Σχήμα 1.6 Ac-dc μετατροπέας ισχύος για οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με δυνατότητα λειτουργίας στα τέσσερα τεταρτημόρια: (α) αποτελείται από δύο τριφασικές πλήρως ελεγχόμενες αντιπαράλληλες ανορθωτικές γέφυρες και (β) μετατροπέας ισχύος

1.3.2 Συστήματα οδήγησης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος

Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με τριφασικό ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος (επαγωγικό, σύγχρονο ή κινητήρα μαγνητικής αντίστασης). Η μηχανή λειτουργεί με έλεγχο ταχύτητας (ή και θέσης) κλειστού βρόχου. Όπως και για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος, το σύστημα περιλαμβάνει τον ελεγκτή ταχύτητας (ή και θέσης), τη βαθμίδα των σημάτων ανάδρασης και το μετατροπέα ισχύος.



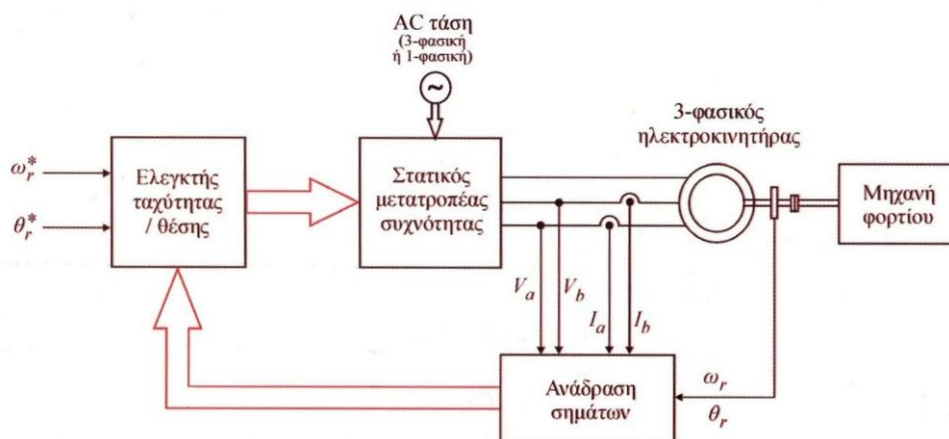
Σχήμα 1.7 Λειτουργικό διάγραμμα κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στα συστήματα οδήγησης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος ο μετατροπέας ισχύος ονομάζεται και στατικός μετατροπέας συχνότητας γιατί μετατρέπει την εναλλασσόμενη ισχύ εισόδου σε εναλλασσόμενη ισχύ διαφορετικής συχνότητας. Υπάρχουν δύο τεχνικές υλοποίησης του στατικού μετατροπέα συχνότητας:

- (1) σύστημα ανορθωτή-αντιστροφέα (rectifier-inverter)
- (2) κυκλομετατροπέας

1.3.2.1 Στατικός μετατροπέας συχνότητας με ανορθωτή-αντιστροφέα

Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από έναν ανορθωτή που μετατρέπει την εναλλασσόμενη ισχύ εισόδου σε συνεχή και στη συνέχεια ένας αντιστροφέας μετατρέπει την συνεχή ισχύ σε εναλλασσόμενη διαφορετικής συχνότητας από την αρχική (Σχήμα 1.8)



Σχήμα 1.8 Λειτουργικό διάγραμμα στατικού μετατροπέα συχνότητας με ανορθωτή-αντιστροφέα

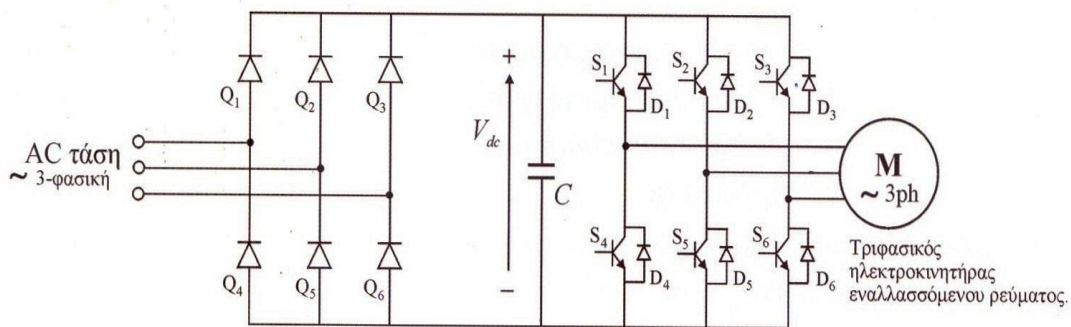
Οι στατικοί μετατροπέες συχνότητας διακρίνονται σε :

- (α) πηγής τάσης (voltage source)
- (β) πηγής ρεύματος (current source),

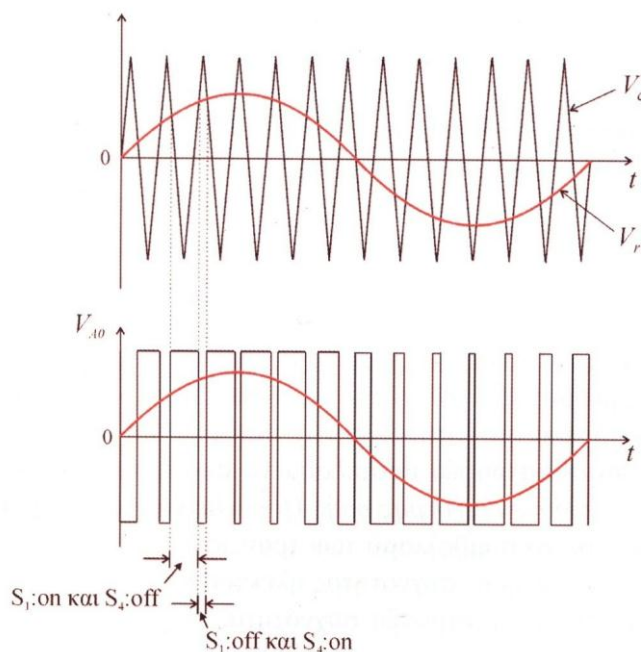
όταν η είσοδος στον αντιστροφέα είναι σταθερή συνεχής τάση ή ρεύμα αντίστοιχα. Επίσης, οι στατικοί μετατροπέες συχνότητας χαρακτηρίζονται από τον τρόπο μετάβασης των ελεγχόμενων ηλεκτρονικών διακοπών του αντιστροφέα σε:

- (α) αυτομετάβασης, όταν είναι άμεσα ελεγχόμενη η έναυση κι η σβέση των ηλεκτρονικών διακοπών χωρίς να απαιτείται εξωτερικό κύκλωμα
- (β) μετάβαση από το φορτίο, όταν η σβέση των ηλεκτρονικών διακοπών επιτυγχάνεται από την ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα
- (γ) εξαναγκασμένη μετάβαση, όταν απαιτούνται κυκλώματα από πυκνωτές μετάβασης για τη σβέση των ηλεκτρονικών διακοπών

Στους στατικούς μετατροπείς συχνότητας πηγής τάσης, η μονάδα αντιστροφής τροφοδοτείται με σταθερή συνεχή τάση, η οποία προέρχεται από την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης με μη-ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα ή απ' ευθείας από πηγές συνεχούς τάσης, όπως μπαταρία και γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται το κύκλωμα το κύκλωμα ισχύος του στατικού μετατροπέα συχνότητας πηγής τάσης με μη-ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα κι αντιστροφέα αποτελούμενο από τρανζίστορ ισχύος κι αντιπαράλληλες διόδους ελεύθερης ροής. Το κύκλωμα είναι γενικό και με το συμβολισμό των τρανζίστορ ισχύος δηλώνεται ο οποιοσδήποτε τύπος υψηλής συχνότητας ηλεκτρονικός διακόπτης.



Σχήμα 1.9 Κύκλωμα ισχύος στατικού μετατροπέα συχνότητας πηγής τάσης

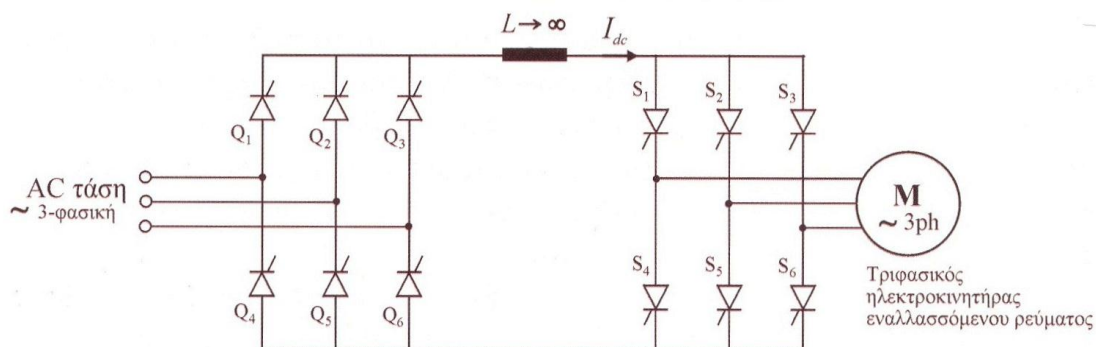


Σχήμα 1.10 Αρχή λειτουργίας του ημιτονοειδούς PWM διαμορφωτή

Ο πιο απλός τύπος μετατροπέα συχνότητας πηγής τάσης είναι τετραγωνικών παλμών. Ωστόσο, οι μετατροπείς αυτοί εμφανίζουν αρμονικές χαμηλής συχνότητας με αποτέλεσμα να

αυξάνονται σημαντικά οι απώλειες της μηχανής και να προκαλούνται ταλαντώσεις στη ροπή. Ο μετατροπέας συχνότητας πηγής τάσης που συνήθως χρησιμοποιείται είναι διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWD). Ο μετατροπέας αυτός αν κι εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες στα διακοπτικά στοιχεία λόγω της μεγαλύτερης διακοπτικής συχνότητας, αυξάνει σημαντικά την τάξη των αρμονικών της τάσης εξόδου του με αποτέλεσμα να μειώνεται η επίδραση τους στη λειτουργία της μηχανής. Ακόμη, απαιτεί πολύ γρήγορα διακοπτικά στοιχεία, γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται MOSFETs και IGBTs.

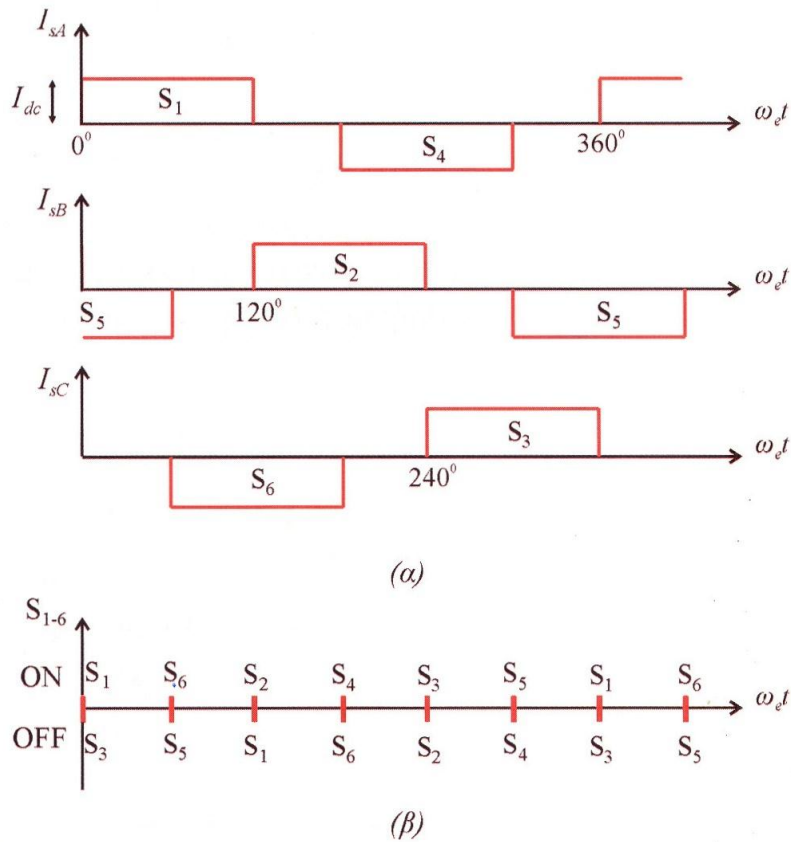
Η αρχή λειτουργίας του PWM διαμορφωτή στηρίζεται στη σύγκριση ενός τριγωνικού φέροντος σήματος υψηλής συχνότητας V_c (συνήθως μεταξύ 5 και 10 kHz) με ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς V_r συχνότητας ίση με τη συχνότητα τάσης με την οποία θέλουμε να οδηγήσουμε τον κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος (Σχήμα 1.10). Όταν η στιγμιαία τιμή του V_r είναι μεγαλύτερη της V_c , η έξοδος του συγκριτή είναι θετικός παλμός ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι αρνητικός παλμός. Μέσω του ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς ελέγχεται το πλάτος κι η συχνότητα του σήματος εξόδου του διαμορφωτή. Αυξομειώνοντας το πλάτος του σήματος V_r , ρυθμίζεται η διάρκεια των παλμών εξόδου του διαμορφωτή και έτσι ελέγχεται το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της τάξης εξόδου του αντιστροφέα, ενώ μεταβάλλοντας τη συχνότητα του V_r ρυθμίζεται η συχνότητα τη τάσης εξόδου του αντιστροφέα.



Σχήμα 1.11 Γενικό κύκλωμα ισχύος στατικού μετατροπέα συχνότητας πηγής ρεύματος

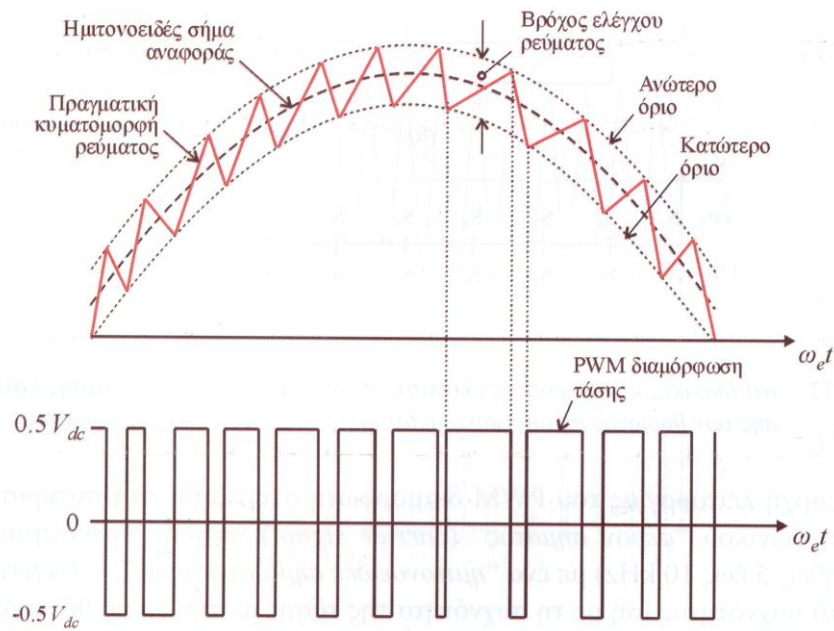
Η τοπολογία του κυκλώματος ισχύος των μετατροπέων συχνότητας πηγής ρεύματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.11. Μεταβλητή ελέγχου είναι η ένταση του ρεύματος, η οποία ελέγχεται μέσω της συνεχούς τάσης εισόδου του αντιστροφέα. Δηλαδή, ο αντιστροφέας τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα I_{dc} μεταβλητού πλάτους, το οποίο ρυθμίζεται από την πλήρως ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα, και στη συνέχεια ο έλεγχος των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα δημιουργεί το τριφασικό σύστημα ρευμάτων του Σχήματος 1.12.α. Επειδή τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα πρέπει να αντέχουν σε ανάστροφη τάση, χρησιμοποιούνται θυρίστορ. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος είναι συνήθως

εξαναγκασμένης μετάβασης και μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει δυνατότητα μετάβασης από το φορτίο, όπως για παράδειγμα κατά την οδήγηση σύγχρονων κινητήρων.



Σχήμα 1.12 (α) Ιδανικές κυματομορφές ρεύματος εξόδου (β) η σειρά έναυσης και σβέσης των θυρίστωρ σε τριφασικό μετατροπέα συχνότητας πηγής ρεύματος

Εκτός από τους δύο παραπάνω τύπους στατικών μετατροπέων συχνότητας, υπάρχει κι ο μετατροπέας ελέγχου σε βρόχο υστέρησης (hysteresis band current control inverter). Σ' αυτόν εφαρμόζεται PWM διαμόρφωση τάσης αλλά ελέγχεται κυματομορφή του ρεύματος, παρόλο που η τοπολογία του κυκλώματος ισχύος είναι ίδια με του αντιστροφέα πηγής τάσης (Σχήμα 1.9). Στο Σχήμα 1.13 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της τεχνικής διαμόρφωσης PWM με έλεγχο ρεύματος σε βρόχο υστέρησης στιγμιαίο ρεύμα ανάδρασης κάθε φάσης συγκρίνεται με το αντίστοιχο ημιτονοειδές σήμα αναφοράς, ώστε η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου να βρίσκεται πάντοτε στο εύρος υστέρησης που ορίζεται από το ανώτερο και κατώτερο όριο σφάλματος. Επειδή ελέγχεται η στιγμιαία τιμή του ρεύματος, η τεχνική PWM ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης χρησιμοποιείται σε συστήματα οδήγησης σερβοκινητήρων διανυσματικού ελέγχου.



Σχήμα 1.13 Αρχή λειτουργίας του PWM διαμορφωτή ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης

1.3.2.2 Κυκλομετατροπέας

Ο κυκλομετατροπέας μετατρέπει απ' ευθείας την εναλλασσόμενη ισχύ της αρχικής συχνότητας σε εναλλασσόμενη επιθυμητής συχνότητας χωρίς να απαιτείται η ενδιάμεση μετατροπή της σε dc (Σχήμα 1.14). Συγκρίνοντας τους κυκλομετατροπείς με τους αντίστοιχους μετατροπείς συχνότητας με ανορθωτή-αντιστροφέα προκύπτει ότι οι κυκλομετατροπείς πολύ περισσότερους ηλεκτρονικούς διακόπτες (συνήθως θυρίστρον) κι έχουν πολυπλοκότερο σύστημα ελέγχου. Λόγω του υψηλού τους κόστους, συνήθως προτιμούνται για τον έλεγχο ηλεκτροκινητήριων συστημάτων μεγάλης ισχύος.

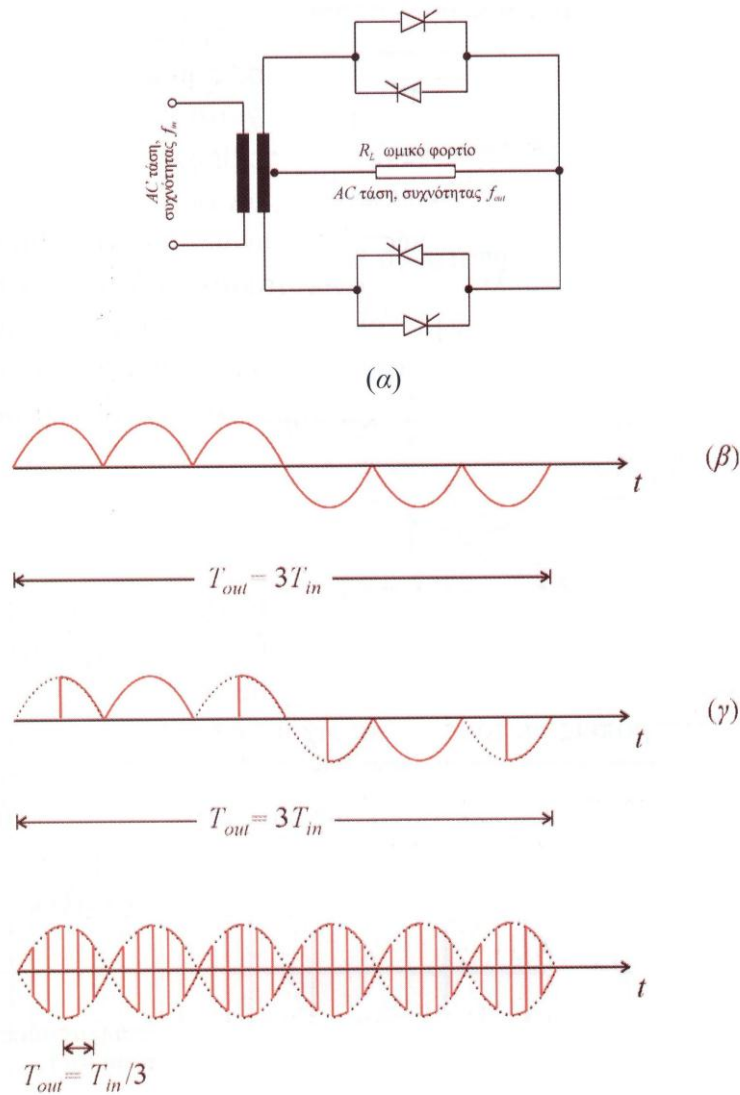


Σχήμα 1.14 Λειτουργικό διάγραμμα κυκλομετατροπέα

Αν η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι μικρότερη της συχνότητας της τάσης εισόδου, τότε έχουμε κυκλομετατροπέα μείωσης συχνότητας (step-down cycloconverter), ενώ αντίθετα αν αυξάνεται η συχνότητα της τάσης εξόδου έχουμε κυκλομετατροπέα ανύψωσης (step-up

cycloconverter). Η αρχή λειτουργίας των κυκλομετατροπέων βασίζεται στο συνδυασμό των γωνιών έναυσης των θυρίστορ στο διάστημα μιας ή περισσότερων διαδοχικών περιόδων της τάσης εισόδου, ώστε να επιτύχουμε η θεμελιώδης αρμονική της τάσης εξόδου να έχει την επιθυμητή τιμή πλάτους και συχνότητας.

Η υλοποίηση του συστήματος ελέγχου ενός κυκλομετατροπέα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και η εφαρμογή τους στον έλεγχο σερβοκινητήριων συστημάτων είναι πολύ περιορισμένη. Για να γίνει κατανοητή η αρχή λειτουργίας των κυκλομετατροπέων, θα χρησιμοποιηθεί το παράδειγμα ενός απλού κυκλομετατροπέα μονοφασικής εισόδου – μονοφασικής εξόδου του Σχήματος 1.15.α.



ω

Σχήμα 1.15 (α) Κύκλωμα ισχύος μονοφασικού κυκλομετατροπέα, (β)-(γ) διαγράμματα της τάσης εξόδου για κυκλομετατροπέα μείωσης συχνότητας, (δ) διάγραμμα της τάσης εξόδου για κυκλομετατροπέα ανύψωσης συχνότητας.

Στα Σχήματα 1.15.β-γ δίνονται τα διαγράμματα της τάσης εξόδου του κυκλομετατροπέα για μείωση συχνότητας. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου του Σχήματος 1.15.β προέκυψε από τον έλεγχο των γωνιών έναυσης των θυρίστορ κι η συχνότητα της θεμελιώδους της τάσης μειώνεται κι είναι $f_{out} = f_{in} / n$, όπου n είναι ο αριθμός των περιόδων της τάσης εισόδου που χρειάστηκαν για το σχηματισμό μιας περιόδου της τάσης εξόδου. Η κυματομορφή του Σχήματος 1.15.γ έχει την ίδια συχνότητα θεμελιώδους αρμονικής με αυτήν του Σχήματος 1.15.β, ωστόσο με κατάλληλο των γωνιών έναυσης των θυρίστορ μειώνεται το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης. Στο Σχήμα 1.15.δ έχουμε κυκλομετατροπέα ανύψωσης συχνότητας και γίνονται διαδοχικές εναύσεις και σβέσεις των θυρίστορ στο διάστημα μιας περιόδου της αρχικής συχνότητας f_{in} της τάσης εισόδου. Συνεπώς, η συχνότητα της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου αυξάνεται και στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι $f_{out} = 3 f_{in}$.

1.4 Δείκτες λειτουργίας και απόδοσης στρεφόμενων

ηλεκτροκινητήριων συστημάτων

Σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής, η επιλογή του κινητήρα και της μονάδας οδήγησης πρέπει να γίνονται με ιδιαίτερη προσοχή και πάντα σε σχέση με το είδος και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι “δείκτες λειτουργίας κι απόδοσης” βοηθούν στη συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών μηχανών. Οι δείκτες που καθορίζουν την επιλογή του κινητήρα είναι: υψηλός βαθμός απόδοσης, μεγάλη πυκνότητα ροπής, ικανοποιητικός συντελεστής ισχύος, ικανοποιητική δυναμική συμπεριφορά, μεγάλο εύρος ελέγχου ταχύτητας, απλή και στιβαρή κατασκευή, ικανοποιητική συνεργασία με τη μονάδα οδήγησης ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εφαρμογής και τέλος, χαμηλό συνολικό κόστος κατασκευής του κινητήρα λαμβάνοντας υπόψη και το συνολικό οικονομικό κόστος όλου του συστήματος (κινητήρας και μονάδα οδήγησης).

Οι δείκτες λειτουργίας κι απόδοσης ηλεκτροκινητήριων συστημάτων μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: δείκτες που σχετίζονται με την ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας, δείκτες που χαρακτηρίζουν την απόκριση του κινητήριου συστήματος και δείκτες που αφορούν το κόστος εγκατάστασης.

1.4.1 Δείκτες της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας

Οι ηλεκτρικές μηχανές μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική (κινητήρες) κι αντιστρόφως τη μηχανική σε ηλεκτρική (γεννήτριες). Κατά την ηλεκτρομηχανική μετατροπή

της ενέργειας, η μαγνητική ενέργεια και το μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης και σύζευξης, αντίστοιχα, των ηλεκτρικών κυκλωμάτων τους. Επίσης, κατά τη μετατροπή της ενέργειας, ένα τμήμα της χάνεται σε απώλειες (απώλειες Joule με μορφή θερμότητας) κι ένα άλλο τμήμα της παραμένει αποθηκευμένο στο μαγνητικό πεδίο με μορφή ενέργειας του πεδίου αυτού. Τα παραπάνω καθορίζουν τα όρια μέγιστης παραγόμενης ισχύος και ροπής.

1.4.1.1 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης ενός ηλεκτροκινητήρα στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, όταν δεν περιλαμβάνονται οι απώλειες ης μονάδας οδήγησης, ορίζεται ως

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{loss}} \quad (1.1)$$

ενώ όταν περιλαμβάνονται κι οι απώλειες της μονάδας οδήγησης, δηλαδή ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κινητήριου συστήματος είναι

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{loss} + P_{conv}} \quad (1.2)$$

όπου P_{out} είναι η ισχύς εξόδου (ωφέλιμη ισχύς), P_{loss} οι απώλειες στην ηλεκτρική μηχανή και P_{conv} οι απώλειες στη μονάδα οδήγησης.

Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου και την ταχύτητα περιστροφής του κινητήριου συστήματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο βαθμός απόδοσης για ονομαστική ροπή και ταχύτητα περιστροφής ίση με την ταχύτητα βάσης ($\omega_r = \omega_b$) καθώς επίσης για ταχύτητα περιστροφής ίση με τη μέγιστη ταχύτητα ($\omega_r = \omega_{max}$) που μπορεί να επιτευχθεί μέσω του συστήματος οδήγησης, όταν λειτουργεί ο κινητήρας στην περιοχή σταθερής ισχύος εξόδου.

Ταχύτητα βάσης ω_b είναι η ταχύτητα που αντιστοιχεί σε ονομαστική τάση τροφοδοσίας. Για ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας βάσης η μηχανή λειτουργεί με μειωμένο μαγνητικό πεδίο διέγερσης (εξασθένηση του πεδίου). Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας βάσης επιτυγχάνονται αυξάνοντας τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας, ενώ το πλάτος της τάσης είναι σταθερό και ίσο με την ονομαστική του τιμή (ουσιαστικά και στην περίπτωση αυτή έχουμε μείωση του μαγνητικού πεδίου του κινητήρα).

1.4.1.2 Λόγος απωλειών προς ροπή εξόδου [kW/Nm]

Ο δείκτης αυτός αναφέρεται μόνο στις απώλειες του κινητήρα και προσδιορίζει το ποσό των απωλειών που παράγονται ανά μονάδα ροπής. Ουσιαστικά χαρακτηρίζει, όπως κι ο βαθμός

απόδοσης, το ποσό της θερμότητας που αναπτύσσεται στην ηλεκτρική μηχανή λόγω των απωλειών και συνεπώς έμμεσα καθορίζουν τη θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μεταβολές του βαθμού απόδοσης και του δείκτη απωλειών προς ροπή εξόδου ως προς τη ταχύτητα περιστροφής. Στις χαμηλές ταχύτητες, οι μηχανικές απώλειες κι οι απώλειες σιδήρου είναι μικρές και συνεπώς οι παραπάνω δείκτες εξαρτώνται από τις ωμικές απώλειες στα τυλίγματα. Αντίθετα σε μεγαλύτερες ταχύτητες, οι μηχανικές απώλειες κι οι απώλειες σιδήρου αυξάνονται με αποτέλεσμα να επηρεάζουν σημαντικά τους παραπάνω δείκτες απωλειών.

1.4.1.3 Λόγος ροπής προς όγκο (ή ροπής προς βάρος) [Nm/m^3 ή Nm/Kg]

Ο δείκτης αυτός είναι γνωστός ως πυκνότητα ροπής (torque density) ή αλλιώς πυκνότητα ισχύος (power density) και συνδέει τη ροπή που μπορεί να παράγει η ηλεκτρική μηχανή με τις γεωμετρικές διαστάσεις και το βάρος της μηχανής. Συνεπώς, ο δείκτης αυτός αναφέρεται στα σχεδιαστικά και κατασκευαστικά στοιχεία και ποικίλει ανάλογα με τον τύπο της μηχανής.

Σημαντικό ρόλο παίζει ο δείκτης αυτός σε κινητήρια συστήματα όπου λόγω της φύσης της εφαρμογής απαιτείται η μηχανή να είναι μικρών διαστάσεων και μικρού βάρους, όπως για παράδειγμα το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ηλεκτροκίνητα εργαλεία χειρός, βιομηχανικά ρομπότ, κλπ.

1.4.1.4 Λόγος ενεργού προς φαινόμενη ισχύ [kW/kVA]

Ο δείκτης αυτός είναι ο συντελεστής ισχύος (power factor, PF) κι αναφέρεται αποκλειστικά σε εναλλασσόμενου τύπου ηλεκτρικές μηχανές

$$PF = \frac{P_{in}}{S_{in}} \quad (1.3)$$

όπου P_{in} είναι η ενεργός ισχύς εισόδου και S_{in} η φαινόμενη ισχύς εισόδου, η οποία είναι ανάλογη με το γινόμενο των ενεργών τιμών (rms) τροφοδοσίας της τάσης V_s και του ρεύματος I_s . Ο παραπάνω ορισμός του συντελεστή ισχύος ισχύει ανεξάρτητα αν οι κυματομορφές των τάσεων και ρευμάτων είναι ημιτονοειδείς ή παραμορφωμένες λόγω αρμονικών.

Για τριφασικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος με καθαρά ημιτονοειδή τάση και ρεύμα τροφοδοσίας, ο συντελεστής ισχύος είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των φασικών κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος κι ισχύει

$$PF = \frac{P_{in}}{3V_s I_s} = \cos \phi \quad (1.4)$$

Σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας, η τάση και το ρεύμα εξόδου της ηλεκτρονικής μονάδας οδήγησης με τα οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας είναι μη-ημιτονοειδή και περιέχουν πολλές ανώτερες αρμονικές. Επιπλέον, η μονάδα οδήγησης προκαλεί παραμόρφωση στο ρεύμα της πηγής τροφοδοσίας. Τα πλάτη κι οι συχνότητες των αρμονικών μπορούν να υπολογιστούν με ανάλυση Fourier των αντίστοιχων κυματομορφών.

1.4.2 Δείκτες απόκρισης/λειτουργίας του κινητήριου συστήματος

1.4.2.1 Λόγος μέγιστης στιγμιαίας ροπής προς ροπή αδράνειας [rad/sec²]

Ο λόγος της μέγιστης στιγμιαίας ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_{peak} προς τη ροπή αδράνειας J εκφράζει τη μέγιστη δυνατή επιτάχυνση/επιβράδυνση που μπορεί να αναπτύξει η μηχανή κατά τη φάση της εκκίνησης/πέδησης ή γενικά κατά τη διάρκεια μιας μεταβατικής κατάστασης μεταβολής της ταχύτητας

$$a_{max} = \frac{T_{peak}}{J} \quad (1.5)$$

Συνεπώς, μέσω του δείκτη αυτού, αξιολογείται η ικανότητα του συστήματος “κινητήρας-μονάδα οδήγησης” για γρήγορες επιταχύνσεις/επιβραδύνσεις. Ο χρόνος που απαιτείται για να αποκτήσει ο κινητήρας την ταχύτητα βάσης ω_b , όταν χωρίς φορτίο στον άξονα επιταχύνεται με σταθερή ροπή ίση με τη μέγιστη στιγμιαία ροπή T_{peak} (εκκίνηση σε λειτουργία κενού), είναι

$$t_{accel} = \frac{\omega_b/p}{a_{max}} = \frac{\omega_b}{p} \frac{J}{T_{peak}} \quad (1.6)$$

όπου p ο αριθμός των ζευγών των πόλων της μηχανής. Ο χρόνος t_{accel} είναι ο μικρότερος δυνατός χρόνος εκκίνησης.

Γενικά, η ικανότητα του κινητήριου συστήματος για γρήγορη απόκριση στις μεταβατικές καταστάσεις εξαρτάται συνδυαστικά από τον τύπο και τις παραμέτρους του κινητήρα, την τεχνική ελέγχου και τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών.

1.4.2.2 Χρόνος ανόδου μέχρι τη μέγιστη στιγμιαία ροπή

Ο χρόνος ανόδου t_{peak} είναι ο χρόνος που χρειάζεται μέχρι ο κινητήρας να αναπτύξει από ροπή μηδέν, τη μέγιστη στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή T_{peak} . Σε γρήγορα κινητήρια συστήματα ο χρόνος ανόδου είναι της τάξης των 1-5 msec.

Όπως και για το δείκτη μέγιστης στιγμιαίας ροπής προς ροπή αδράνειας, ο δείκτης αυτός εξαρτάται από τον τύπο και τις παραμέτρους του κινητήρα, την τεχνική ελέγχου και τη σωστή

ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών. Βελτιστοποίηση του δείκτη για μείωση του χρόνου ανόδου και κατά συνέπεια βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς έχουμε σε συστήματα διανυσματικού ελέγχου.

1.4.2.3 Λόγος παλμικών ροπών προς την ονομαστική ροπή

Οι παλμικές ροπές εξαρτώνται από τον τύπο και τις παραμέτρους του κινητήρα καθώς κι από την τεχνική ελέγχου. Ο δείκτης $\Delta T_{pulse}/T_{nom}$ αναφέρεται στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο γιατί οι παλμικές ροπές επηρεάζουν την ακρίβεια ελέγχου της ταχύτητας και θέσης, προκαλούν δονήσεις κι ενισχύουν τον θόρυβο της μηχανής. Συνεπώς, ο δείκτης $\Delta T_{pulse}/T_{nom}$ θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

1.4.2.4 Εύρος ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής και λόγος μέγιστης ταχύτητας της περιοχής σταθερής ισχύος προς την ταχύτητα βάσης (ω_{max}/ω_b)

Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα μέχρι την ταχύτητα βάσης ω_b επιτυγχάνεται για όλη την περιοχή ροπών από τη λειτουργία κενού μέχρι την ονομαστική ροπή (περιοχή σταθερής ροπής). Η ταχύτητα βάσης επιτυγχάνεται για ονομαστική τάση τροφοδοσίας ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες μειώνεται το μαγνητικό πεδίο κι ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί είτε με σταθερή ισχύ (περιοχή σταθερής ισχύος) είτε στα όρια της ροπής ανατροπής για πολύ υψηλές ταχύτητες (περιοχή υψηλών ταχυτήτων).

Σε πολλές εφαρμογές απαιτείται η λειτουργία της μηχανής με σταθερή ονομαστική ισχύ εξόδου για μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Στις περιπτώσεις αυτές ο λόγος της μέγιστης ταχύτητας σταθερής ισχύος προς την ταχύτητα βάσης εκφράζει αφενός με την ικανότητα του συστήματος να αναπτύσσει μεγάλες ταχύτητες, αφετέρου τη μηχανική αντοχή του κινητήρα στις μεγάλες ταχύτητες. Ο λόγος ω_{max}/ω_b κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2 έως 3 για σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και 3 έως 4 για επαγωγικούς κινητήρες. Η τιμή του λόγου αυτού εξαρτάται από τις παραμέτρους του κινητήρα, την τεχνική ελέγχου και φυσικά τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών.

1.4.2.5 Ακρίβεια ελέγχου της ροπής, ταχύτητας και θέσης

Βέλτιστος έλεγχος της ροπής, ταχύτητας και θέσης επιτυγχάνεται μέσω ενός συστήματος κλειστού βρόχου (χρησιμοποιώντας τα απαραίτητα σήματα ανάδρασης). Επίσης, θα πρέπει να προβλέπεται αντιστάθμιση των μεταβολών των παραμέτρων της μηχανής, όταν αυτές χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο του ελέγχου, για παράδειγμα μεταβολές λόγω θερμοκρασίας και μαγνητικού κορεσμού.

1.4.2.6 Όριο ανώτερης θερμοκρασίας λειτουργίας

Ο δείκτης της ανώτερης θερμοκρασίας λειτουργίας είναι από τα σημαντικότερα σχεδιαστικά στοιχεία της ηλεκτρικής μηχανής. Το ανώτερο επίπεδο θερμοκρασίας προκύπτει από την κλάση μόνωσης της μηχανής κι εξαρτάται από το βαθμό προστασίας και τον τρόπο ψύξης της.

Η θερμοκρασία λειτουργίας παίζει σημαντικό ρόλο στη διάρκεια ζωής των μονώσεων και γενικά της ηλεκτρικής μηχανής.

1.4.2.7 Επίπεδο θορύβου

Σε ένα ηλεκτροκινητήριο σύστημα μεταβλητής ταχύτητας, ακουστικός θόρυβος παράγεται από τον κινητήρα και τη μονάδα οδήγησης. Το ανώτερο αποδεκτό επίπεδο θορύβου εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής κι είναι μια παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο κατά την επιλογή του τύπου του κινητήρα και της τεχνικής ελέγχου.

1.4.3 Δείκτες κόστους του κινητήριου συστήματος

Το συνολικό κόστος ενός κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας είναι πολύ σημαντικό κριτήριο κι εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα και την τεχνική ελέγχου που επιλέγεται για την εκάστοτε εφαρμογή. Αποτελείται από:

- a) το κόστος αγοράς των συσκευών (κινητήρας, μονάδα οδήγησης, αισθητήρες, μετρικές διατάξεις, καταγραφικά όργανα κλπ.)
- b) το κόστος συντήρησης για όλη τη διάρκεια ζωής του κινητήριου συστήματος
- c) το κόστος λειτουργίας για όλη τη διάρκεια ζωής του κινητήριου συστήματος (εξαρτάται σημαντικά από το βαθμό απόδοσης της διάταξης)

1.5 Σερβοκινητήρες

Η λέξη “σέρβο” από τη λατινική λέξη “servus” που σημαίνει υπηρέτης. Ο σερβοκινητήρας μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένας κινητήρας που “υπηρετεί” ακολουθώντας πιστά τις εντολές που του επιβάλλονται μέσω του συστήματος ελέγχου. Εδώ οι εντολές είναι η ροπή, η ταχύτητα κι η θέση ή συνδυασμός τους.

Ιστορικά, ο όρος σερβοκινητήρας “Le-Servomoteur” πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τον Farcot το 1868 για να περιγράψει ένα σύστημα υδραυλικών αμοκίνητων μηχανών για την πλοήγηση πλοίων. Ο πρώτος ηλεκτροκίνητος σερβομηχανισμός κατασκευάστηκε το 1898

από τον άγγλο H. Calendar για τη χρησιμοποίησή του σε μηχανοκίνητη καταγραφικό όργανο και το 1908 ο E. Sperry χρησιμοποίησε σερβοκινητήρες σε γυροσκοπική πυξίδα πλοίου.

Οι σερβοκινητήρες είναι κινητήρες με βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως πυκνότητα ισχύος, ροπή αδράνειας, και βαθμό απόδοσης, και χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα υψηλών απαιτήσεων, όπου υπάρχει ανάγκη για μεγάλη ακρίβεια και γρήγορη ταχύτητα απόκρισης του συστήματος σε έλεγχο ροπής, ταχύτητας και θέσης. Με άλλα λόγια, ένα σερβοκινητήριο σύστημα προϋποθέτει το βέλτιστο συνδυασμό κινητήρα και τεχνικής ελέγχου.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη συγκεντρώνουν τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά που απαιτεί ένα σερβοκινητήριο σύστημα (μεγάλη πυκνότητα ισχύος, μικρή αδράνεια, σταθερή ροπή κι υψηλό βαθμό απόδοσης). Η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου (vector control) είναι η τεχνική που κυρίως χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των σερβοκινητήρων, γιατί επιτυγχάνει ανεξάρτητο έλεγχο της διέγερσης ως προς τον έλεγχο του ρεύματος φορτίου. Έτσι, έχουμε άμεσο έλεγχο της ροπής με πολύ γρήγορη απόκριση του κινητήρα σε μεταβατικά φαινόμενα (γρήγορες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις του κινητήρα) καθώς κι ακρίβεια σε έλεγχο ταχύτητας και θέσης.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης αντέχουν σε θερμικές καταπονήσεις, έχουν μικρή αδράνεια και μικρό κόστος κατασκευής. Ωστόσο, μειονεκτούν ως προς το βαθμό απόδοσης και την πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και συνεπώς έχουν περιορισμένη εφαρμογή ως σερβοκινητήρες. Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης έχουν απλή κατασκευή, μπορούν να αναπτύξουν πολύ μεγάλες ταχύτητες (έως και 20.000 rpm), έχουν απλό κι οικονομικό έλεγχο κι ανοχή σε σφάλματα φάσεων. Ωστόσο, παράγουν ταλαντώσεις ροπής κι έντονο ακουστικό θόρυβο με αποτέλεσμα η χρησιμοποίησή τους σε σερβοκινητήρια συστήματα να δικαιολογείται μόνο όταν τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν σε σύγκριση με τα μειονεκτήματα είναι σημαντικά για την εφαρμογή.

Οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν μικρό κόστος κατασκευής και σχετικά μικρή ροπή αδράνειας, αλλά κυρίως μειονεκτούν ως προς τη πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Επίσης, στους επαγωγικούς κινητήρες είναι περισσότερο πολύπλοκη η εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου κι η υλοποίησή του εξαρτάται από τις παραμέτρους της μηχανής. Οι επαγωγικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα μεταβλητής ταχύτητας βαθμωτού ελέγχου V/f, ενώ η χρήση τους ως σερβοκινητήρες είναι περιορισμένη.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος απαιτούν πιο απλό κι οικονομικό έλεγχο προσφέροντας ικανοποιητική δυναμική συμπεριφορά. Ωστόσο, έχουν μικρή πυκνότητα ισχύος, υψηλό κατασκευαστικό κόστος και κυρίως, υψηλό κόστος συντήρησης. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται ακόμη σε πολλά σερβοκινητήρια συστήματα, αλλά

αντικαθίστανται συνεχώς από τους σημαντικά πλεονεκτικότερους brushless σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

2

Μηχανές μόνιμου μαγνήτη και μαγνητικής αντίστασης

2.1 Γενικά

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και μαγνητικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται σε σερβοκινητήρια συστήματα και γενικά κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας έχουν ειδική κατασκευή, ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες και τις ειδικές απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η κατασκευή των μηχανών αυτών ποικίλει ανάλογα με τη θέση του δρομέα ως προς το στάτη, το σχεδιασμό των τυλιγμάτων, τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, τον τρόπο κίνησης του δρομέα, τη θέση των μαγνητών, τη κατασκευή και γενικά τη γεωμετρία των πυρήνων του στάτη και του δρομέα.

Στόχος της ενότητας αυτής είναι η ανάλυση των περισσότερο συνηθισμένων κατασκευαστικών τύπων μηχανών μόνιμου μαγνήτη και μαγνητικής αντίστασης. Οι μηχανές μαγνητικής αντίστασης είναι brushless ενώ οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη μπορεί να είναι brushless (σύγχρονες μηχανές) ή με σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών (μηχανές συνεχούς ρεύματος). Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη συγκεντρώνουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα για τη χρήση τους σε σερβοκινητήρια συστήματα και γι' αυτό το λόγο θα επικεντρωθούμε σε αυτήν την κατηγορία μηχανών. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές ωε επί το πλείστον μικρής ισχύος, ενώ οι

μηχανές μαγνητικής αντίστασης προτιμούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται χαμηλό κατασκευαστικό κόστος, υψηλές ταχύτητες, μηχανική αντοχή καθώς κι αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

2.2 Συγκριτική ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών μόνιμου μαγνήτη

Στις ηλεκτρικές μηχανές μόνιμου μαγνήτη, το πεδίο διέγερσης δημιουργείται από μαγνήτες που βρίσκονται είτε στο στάτη είτε στο δρομέα. Οι brushless σύγχρονες μηχανές (ΣΜ) μόνιμου μαγνήτη (PM synchronous machines) έχουν τους μαγνήτες στο δρομέα και την περιέλιξη στο στάτη. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (PM dc-commutator machines) έχουν τον αντίστροφο σχεδιασμό, δηλαδή οι μαγνήτες βρίσκονται στον στάτη κι η περιέλιξη στο δρομέα. Χαρακτηριστικό και των δύο τύπων μηχανών είναι ότι το ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς των τυλιγμάτων (του στάτη ή του δρομέα για τις ΣΜ και τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, αντίστοιχα) πρέπει να αλλάζει πολικότητα σε συγχρονισμό με το πεδίο του μαγνήτη, έτσι ώστε η παραγόμενη ροπή να έχει πάντα σταθερό πρόσημο. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μετάβαση (commutation). Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη, η αλλαγή της αλλαγής πολικότητας του ρεύματος του δρομέα γίνεται μέσω του συστήματος συλλέκτη-ψηκτρών. Στις ΣΜ μόνιμου μαγνήτη, η αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος του στάτη γίνεται μέσω της μονάδας οδήγησης κι ο συγχρονισμός του κυκλώματος ελέγχου με τη θέση του δρομέα επιτυγχάνεται μέσω ειδικού αισθητήρα ταχύτητας και θέσης που είναι τοποθετημένος στον άξονα του δρομέα.

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη έχουν πολλά από τα μειονεκτήματα των συμβατικών μηχανών συνεχούς ρεύματος (συχνή συντήρηση λόγω των ψηκτρών, προβλήματα μετάβασης κι υψηλό κόστος κατασκευής). Ωστόσο, λόγω της αντικατάστασης του ηλεκτρομαγνήτη διέγερσης από μόνιμους μαγνήτες, παρουσιάζουν καλύτερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος ως προς τις συμβατικές μηχανές συνεχούς ρεύματος. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούνται κυρίως σε διατάξεις μικρής ισχύος.

Οι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη δεν έχουν ψήκτρες κι επειδή η λειτουργία τους προσεγγίζει τις μηχανές συνεχούς ρεύματος είναι γενικά γνωστές ως “brushless dc”. Από την ονομασία των μηχανών αυτών είναι δυνατόν να δημιουργηθεί σύγχυση και να θεωρηθεί ότι είναι μηχανές συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, η ονομασία τους προήρθε επειδή μέσω το συστήματος οδήγησης επιτυγχάνεται η ίδια εξίσωση ροπής και χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας με αυτή των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Τα κινητήρια συστήματα με brushless ΣΜ διαχωρίζονται σε “brushless dc” και “brushless ac” ανάλογα με την τεχνική ελέγχου που εφαρμόζεται σε

κάθε μηχανή. Στην ουσία και τα δυο κινητήρια συστήματα χρησιμοποιούν τον ίδιο τύπο brushless ΣΜ μόνιμου μαγνήτη, ωστόσο το brushless dc κινητήριο σύστημα λειτουργεί σαν να είναι κινητήρας συνεχούς ρεύματος, ενώ το brushless ac κινητήριο σύστημα λειτουργεί σαν αν είναι κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη είναι οι ηλεκτρικές μηχανές που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται σε σερβοκινητήρια συστήματα, ειδικά όταν απαιτούνται μεγάλες τιμές βαθμού απόδοσης, πυκνότητας ισχύος, συντελεστή ισχύος και πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά. Η απουσία τυλιγμάτων στο δρομέα αυξάνει την πυκνότητα ισχύος και το βαθμό απόδοσης. Επίσης, η απουσία συλλέκτη και ψηκτρών μηδενίζει το κόστος συντήρησης και τα προβλήματα που αυτά προκαλούν. Ακόμη, μειώνεται το συνολικό μήκος της μηχανής, με αποτέλεσμα η αντοχή του δρομέα σε κοπτικές ροπές να είναι μεγαλύτερη επιτρέποντας μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής και παράλληλα αυξάνει το λόγο ενεργού μήκους προς διάμετρο μηχανής επιτυγχάνοντας μεγαλύτερο λόγο ροπής προς αδράνεια.

Τα μειονεκτήματα των ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ως προς τις μηχανές συνεχούς ρεύματος είναι:

- a) απαιτείται κατάλληλος αισθητήρας για την πληροφορία της θέσης του δρομέα, η οποία χρειάζεται για να υλοποιείται η διαδικασία της μετάβασης μέσω του συστήματος οδήγησης
- b) για τη λειτουργία των ΣΜ μόνιμου μαγνήτη απαιτείται ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα οδήγησης με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις το συνολικό κόστος του συστήματος να είναι υψηλότερο σε σύγκριση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος

συγκρίνοντας τις ΣΜ μόνιμου μαγνήτη με τις κλασικές επαγωγικές μηχανές προκύπτει ότι αν κι έχουν αρκετά υψηλό κόστος κατασκευής, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα κατά τη χρήση τους σε σερβοκινητήρια συστήματα (μεγάλες τιμές βαθμού απόδοσης, πυκνότητας ισχύος και συντελεστή ισχύος, καλύτερη δυναμική συμπεριφορά και κυρίως πιο απλό κι οικονομικό σύστημα ελέγχου). Συνήθως οι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές είναι μικρής έως μεσαίας ισχύος (η μέγιστη ισχύς τους είναι περίπου 80-100 kW). Αν και μπορούν να κατασκευαστούν ΣΜ μόνιμου μαγνήτη μεγάλης ισχύος (ακόμη και της τάξης του 1 MW), το κόστος των μαγνητών που θα χρειαστούν για τη κατασκευή των μηχανών αυτών είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα οι επαγωγικοί κινητήρες να είναι προτιμητέοι στις εφαρμογές αυτές.

2.3 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη

Υπάρχουν πολλοί κατασκευαστικοί τύποι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη. Ο κύριος λόγος οφείλεται στην προσπάθεια των κατασκευαστών μηχανών να πετύχουν βέλτιστη εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών του μαγνήτη σε συνδυασμό με το είδος της εφαρμογής και τις απαιτήσεις

της. Για παράδειγμα, αν μια εφαρμογή απαιτεί γρήγορες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις του φορτίου, τότε η μηχανή πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο λόγο ροπής προς αδράνεια. Αντίθετα, αν η εφαρμογή απαιτεί σταθερή ροπή για λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες, τότε η μηχανή πρέπει να έχει μεγάλη αδράνεια ώστε να παρουσιάζει ομαλή λειτουργία για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες σχεδιαστικές επιλογές κι οι διάφοροι κατασκευαστικοί τύποι μηχανών μόνιμου μαγνήτη.



Σχήμα 2.1 Οι βασικότεροι κατασκευαστικοί τύποι σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη.

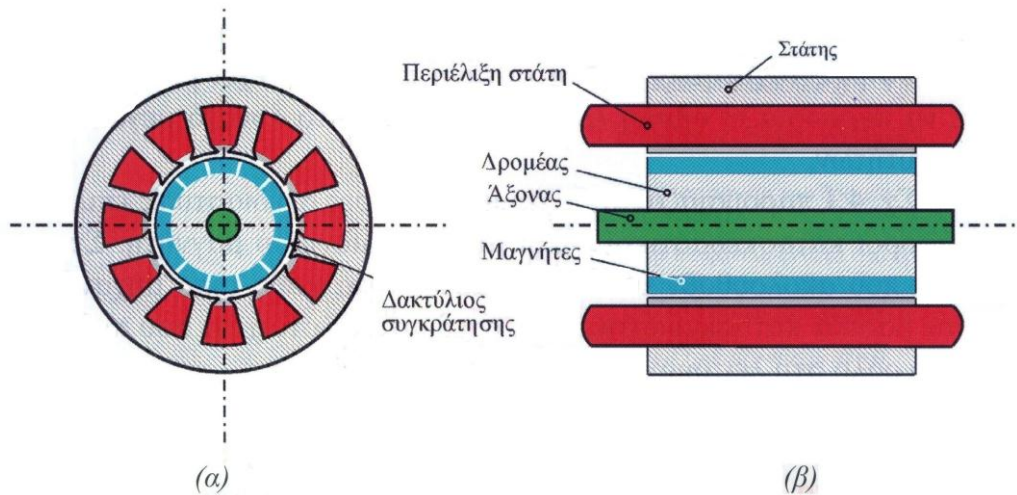
2.3.1 Είδη ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τις θέσεις δρομέα και στάτη

2.3.1.1 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εσωτερικού δρομέα (interior-rotor PMSM)

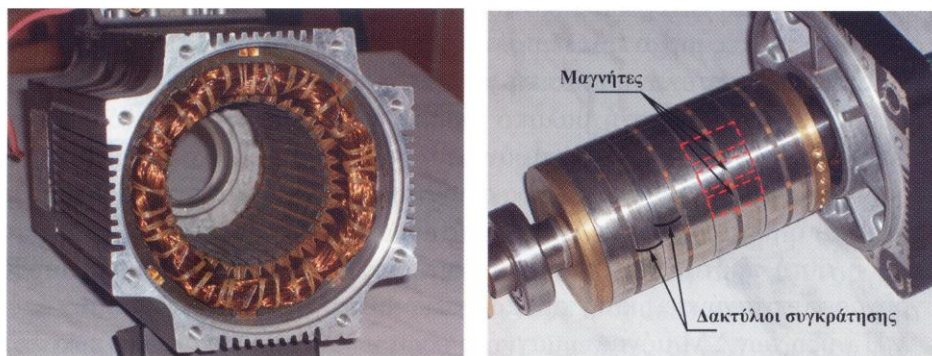
Ο δρομέας είναι στο εσωτερικό του ανοίγματος του στάτη, όπως στις κλασικές ηλεκτρικές μηχανές. Ο πυρήνας του στάτη κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα κι έχει τριφασική περιέλιξη. Ο πυρήνας του δρομέα κατασκευάζεται από συμπαγή μαλακό σίδηρο ή δυναμοελάσματα και στην εξωτερική επιφάνειά του ή στο εσωτερικό του πυρήνα του τοποθετούνται μαγνήτες. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της κατασκευής αυτής είναι ο μεγάλος λόγος ροπής προς αδράνεια. Γι' αυτόν τον λόγο η κατασκευή του προτιμάται σε

σερβοκινητήριες εφαρμογές όπου απαιτούνται γρήγορες επιταχύνσεις/επιβραδύνσεις του φορτίου.

Η ψύξη των ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εσωτερικού δρομέα γίνεται ευκολότερα αφού οι απώλειες κι αντίστοιχα οι θερμικές πηγές είναι κυρίως στο στάτη ο οποίος βρίσκεται πιο κοντά στο εξωτερικό περίβλημα κι έτσι είναι ευκολότερη η απαγωγή της θερμότητας. Ωστόσο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην τοποθέτηση των μαγνητών στο δρομέα, ώστε να αντέχουν στις φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη περιστροφή. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν διάφοροι σχεδιασμοί ως προς τη θέση των μαγνητών στο δρομέα (μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα ή στο εσωτερικό του, με διάφορους προσανατολισμούς του μαγνητικού τους άξονα), ανάλογα με τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής που θέλουμε να έχει η μηχανή και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που θέλουμε να πετύχουμε.



Σχήμα 2.2 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εσωτερικού δρομέα με μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα: (α) κάθετη τομή και (β) εγκάρσια τομή



Σχήμα 2.3 Τριφασική 8-πολική ΣΜ εσωτερικού δρομέα με μαγνήτες επιφανειακής θέσης: (α) στάτης και (β) δρομέας

Στο Σχήμα 2.2 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα μιας ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εσωτερικού δρομέα σε κάθετη κι εγκάρσια τομή. Η μηχανή που παρουσιάζεται έχει μαγνήτες κολλημένους στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα, οι οποίοι προστατεύονται από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της περιστροφής από λεπτούς ορειχάλκινους δακτυλίους συγκράτησης. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μια 8-πολική ΣΜ εσωτερικού δρομέα με επιφανειακής θέσης μαγνήτες στο δρομέα.

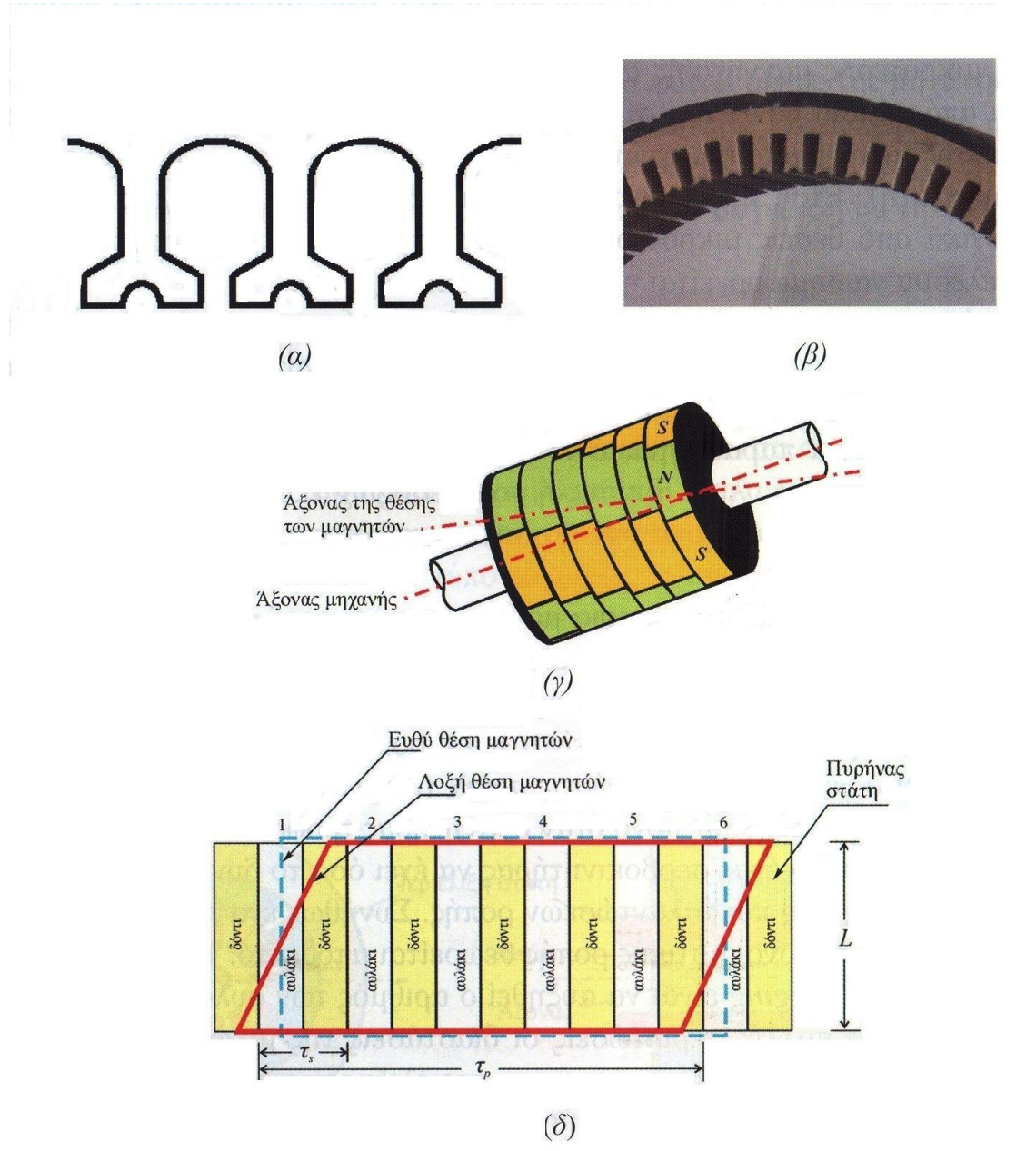
Κοινό χαρακτηριστικό όλων των ΣΜ μόνιμου μαγνήτη είναι η ροπή cogging. Είναι μια παλμική ροπή που οφείλεται στην έλξη του πυρήνα του στάτη (κι ειδικότερα των δοντιών του στάτη) από τους μαγνήτες του δρομέα. Η ροπή αυτή υπάρχει ακόμη κι αν τα τυλίγματα του στάτη δεν διαρρέονται από ρεύμα κι γίνεται εύκολα αντιληπτή, αν προσπαθήσουμε να στρέψουμε αργά με το χέρι μας το δρομέα μιας ΣΜ μόνιμου μαγνήτη. Θα παρατηρήσουμε ότι η κίνηση του δρομέα γίνεται με κάποια δυσκολία, γιατί με την κίνηση που κάνουμε προσπαθούμε να απομακρύνουμε το δρομέα από τη θέση μικρότερης μαγνητικής αντίστασης (όταν ο μαγνήτης βρίσκεται απέναντι από κάποιο δόντι του στάτη) προς μια θέση μέγιστης μαγνητικής αντίστασης (στην οποία ο μαγνήτης θα βρίσκεται απέναντι από κάποιο αυλάκι του στάτη). Έτσι, καθώς περιστρέφεται ο δρομέας, οι μαγνήτες περνούν διαδοχικά από θέσεις μικρότερης και μέγιστης μαγνητικής αντίστασης με αποτέλεσμα να δημιουργείται η παλμική ροπή cogging.

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ροπή αυτή υπάρχει μόνο όταν ο πυρήνας του στάτη είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό. Ανέθετα, σε ορισμένους σχεδιασμούς που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, δεν αναπτύσσεται ροπή cogging όταν ο πυρήνας τους κατασκευάζεται από μη-σιδηρομαγνητικό υλικό. Επίσης, η ροπή cogging εξαρτάται από τη διεύθυνση του μαγνητικού άξονα των μαγνητών καθώς και τη θέση των μαγνητών στο δρομέα.

Η ροπή cogging είναι παρόμοια με την παλμική ροπή που αναπτύσσεται λόγω της αλληλεπίδρασης των αρμονικών χώρου που προκαλεί η δομή των περιελίξεων καθώς και τις αρμονικές χρόνου που προκαλεί η μονάδα οδήγησης. Οι παλμικές αυτές ροπές είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως και χαρακτηρίζονται γενικά ως ταλαντώσεις ροπής (torque ripple). Ωστόσο, οι ταλαντώσεις αυτές υπάρχουν μόνο όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται με ρεύμα.

Είναι σημαντικό ένας σερβοκινητήρας να έχει όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές ροπής cogging και παλμικής ροπής. Συνήθως ένα ποσοστό μικρότερο του 1-2% της ονομαστικής ροπής θεωρείται αποδεκτό. Ένας τρόπος να μειωθεί η τιμή της ροπής cogging είναι να αυξηθεί ο αριθμός των αυλακώσεων του στάτη. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις οι διαστάσεις της μηχανής καθώς κι οι τεχνικές δυσκολίες στην κατασκευή της περιέλιξης περιορίζουν τον αριθμό των αυλακώσεων. Μια εικονική αύξηση τους επιτυγχάνεται

κατασκευάζοντας τα πέλματα των δοντιών με τη μορφή του Σχήματος 2.4.α. Αυτός ο σχεδιασμός δίνει περίπου το ίδιο αποτέλεσμα όπως ο διπλασιασμός των δοντιών του στάτη. Στο Σχήμα 2.4.β απεικονίζεται ο πυρήνας του στάτη μιας ΣΜ με διακλαδωμένα δόντια.



Σχήμα 2.4 Τεχνικές μείωσης της ροπής cogging σε ΣΜ μόνιμου μαγνήτη: (α) διακλαδωμένα δόντια στο στάτη, (β) λεπτομέρεια από τον πυρήνα στάτη με διακλαδωμένα δόντια, (γ) δρομέας ΣΜ επιφανειακής θέσης μαγνητών με λοξό άξονα της θέσης των μαγνητών, (δ) ενδεικτική γεωμετρία του στάτη και δρομέα με λοξό άξονα της θέσης των μαγνητών

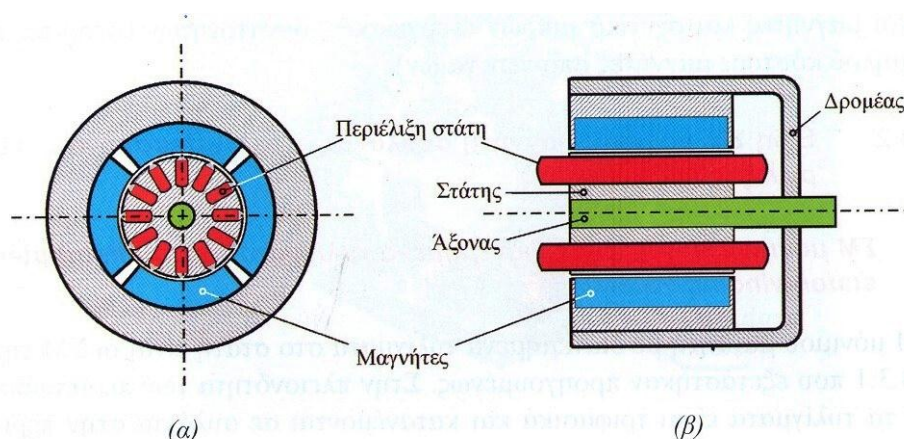
Σημαντική μείωση της ροπής cogging επιτυγχάνεται, αν οι μαγνήτες στον δρομέα τοποθετηθούν με κλίση ως προς τον άξονα της μηχανής (Σχήμα 2.4.γ). Όπως φαίνεται και

στο Σχήμα 2.4.δ, ο άξονας της θέσης των μαγνητών αποκλίνει από τον άξονα της μηχανής με βήμα ενός αυλακιού-δοντιού (μήκος τ_s). Η μείωση της ροπής cogging επιτυγχάνεται γιατί η έλξη που ασκούν οι μαγνήτες στα δόντια που βρίσκονται προς τη βάση της μηχανής σχεδόν εξουδετερώνεται από την έλξη που ασκούν στα δόντια που βρίσκονται στο επάνω μέρος της μηχανής.

Το μειονέκτημα της λοξής αυτής θέσης των μαγνητών είναι ότι μειώνεται η συνολική πεπλεγμένη ροή με τα τυλίγματα του στάτη, κι η τεχνική αυτή συνήθως προτιμάται γιατί είναι οικονομικότερη σε σύγκριση με την τεχνική των διακλαδωμένων δοντιών.

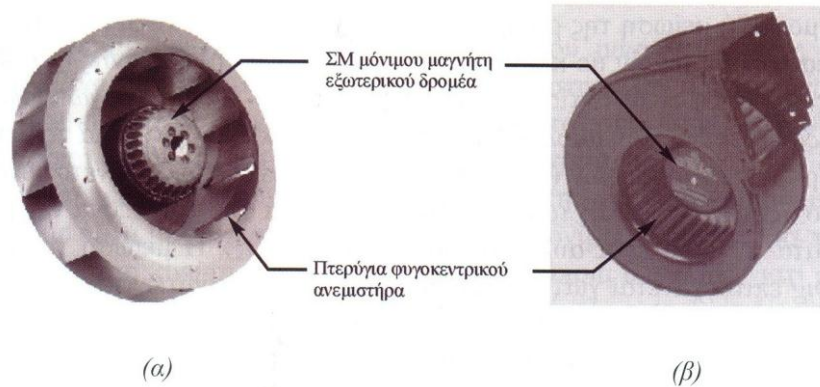
2.3.1.2 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εξωτερικού δρομέα (exterior-rotor PMSM)

Στις μηχανές αυτές, ο δρομέας βρίσκεται στο εξωτερικό τμήμα της μηχανής κι ο στάτης στο εσωτερικό. Οι μαγνήτες τοποθετούνται σε ειδικά ανοίγματα μέσα στον πυρήνα του δρομέα ή καλούνται στην εσωτερική επιφάνεια του δρομέα και συγκρατούνται από ορειχάλκινους δακτυλίους συγκράτησης. Όπως και στον προηγούμενο τύπο μηχανής, ο πυρήνας του στάτη κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα. Ο πυρήνας του δρομέα είναι συνήθως από συμπαγές σίδηρο και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις κατασκευάζονται από δυναμοελάσματα.



Σχήμα 2.5 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εξωτερικού δρομέα: (α) κάθετη τομή, (β) εγκάρσια τομή

Στο σχήμα 2.5 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα μιας ΣΜ εξωτερικού δρομέα σε κάθετη κι εγκάρσια τομή. Συνήθως για τη στήριξη του δρομέα απαιτείται ένα ρουλεμάν στο κέντρο του στάτη, ενώ αντίθετα, για την ΣΜ εσωτερικού δρομέα απαιτούνται δυο ρουλεμάν που βρίσκονται στα δυο πλευρικά καλύμματα.



Σχήμα 2.6 Φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες με ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εξωτερικού δρομέα: (α) ανεμιστήρας ηλεκτρικού φούρνου, (β) αεραγωγός κλιματισμού

Χαρακτηριστικό των ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εξωτερικού δρομέα είναι η μεγάλη ροπή αδράνειας. Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κυρίως σε φυγοκεντρικές εφαρμογές (ανεμιστήρες) π.χ. ανεμιστήρες οικιακών συσκευών (Σχήμα 2.6.α), κλιματιστικά κι αεραγωγούς κλιματιστικών (Σχήμα 2.6.β). Στις εφαρμογές αυτές, ο κινητήρας είναι στο κέντρο κι η στεφάνη με τα πτερύγια συνδέονται εξωτερικά με το δρομέα μέσω του πλευρικού καλύμματος του κινητήρα. Συνήθως στους κινητήρες αυτούς οικονομικοί μαγνήτες και σχετικά μικρών ενεργειακών δυνατοτήτων (φερριτες ή χαμηλού κόστους μαγνήτες σπάνιων γαιών).

2.3.2 Είδη ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με το σχεδιασμό της περιέλιξης του στάτη

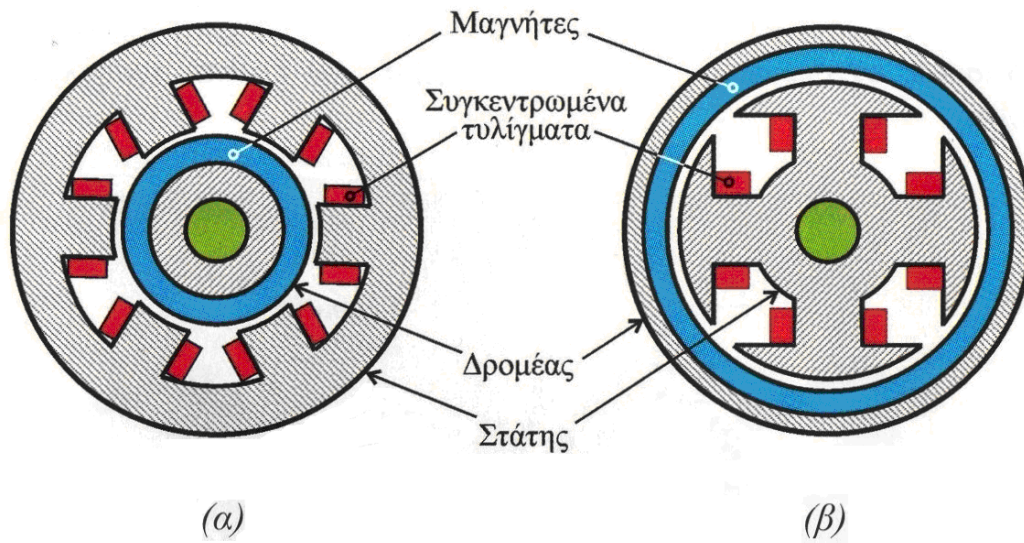
2.3.2.1 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη με διανεμημένα τυλίγματα στάτη (distributed stator winding PMSM)

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι ΣΜ που εξετάσαμε στην προηγούμενη ενότητα (2.3.1). στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα τυλίγματα είναι τριφασικά και κατανέμονται σε αυλάκια στην περιφέρεια του στάτη.

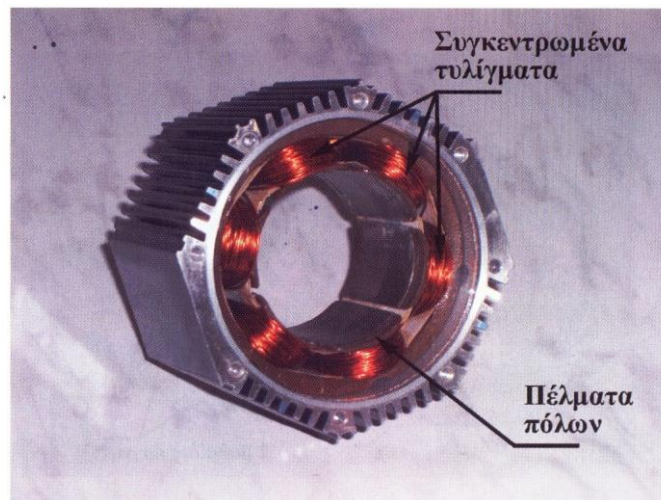
2.3.2.2 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη με συγκεντρωμένα τυλίγματα στάτη (concentrated stator winding PMSM)

Στις ΣΜ μόνιμου μαγνήτη με συγκεντρωμένα τυλίγματα, ο πυρήνας του στάτη έχει έκτυπους πόλους και το πηνίο της κάθε φάσης τυλίγεται γύρο από τους αντίστοιχους πόλους. Όπως και

στις μηχανές με διανεμημένα τυλίγματα, έχουμε μηχανές εσωτερικού δρομέα (Σχήμα 2.7.α) κι εξωτερικού δρομέα (Σχήμα 2.7.β)



Σχήμα 2.7 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη με συγκεντρωμένα τυλίγματα στάτη: (α) εσωτερικού δρομέα, (β) εξωτερικού δρομέα

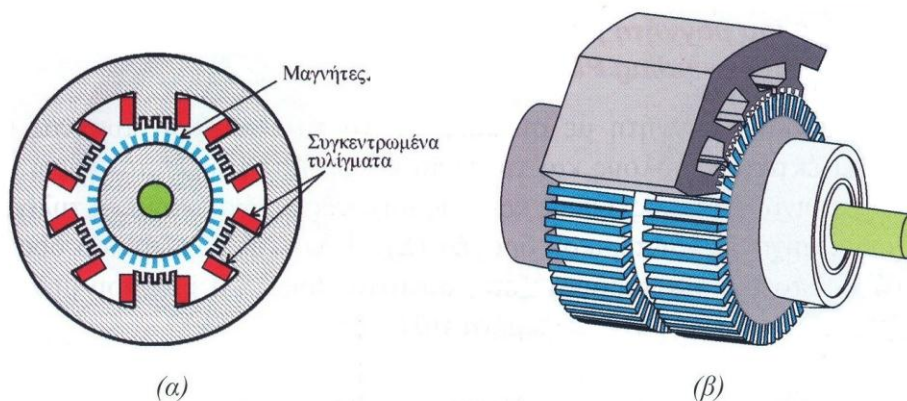


Σχήμα 2.8 Τριφασική ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εσωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα στο στάτη

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ο στάτης μιας ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εσωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα.

Η κυριότερη χρήση των ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εσωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα στάτη είναι ως βηματικοί κινητήρες (stepper motors). Οι μαγνήτες έχουν πολλά δόντια κι είναι τοποθετημένοι στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα (Σχήμα 2.9). Ομοίως,

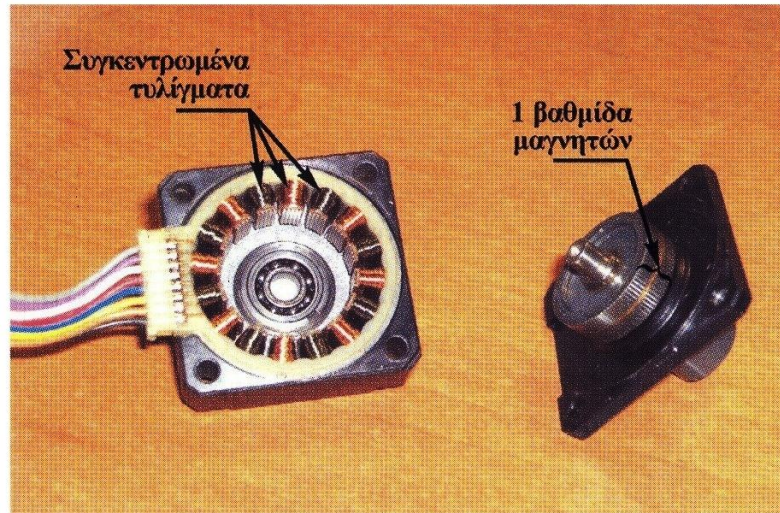
πολλά δόντια έχουν κι οι πόλοι του στάτη. Η κίνηση του δρομέα γίνεται σε βήματα ανάλογα με τη συχνότητα των παλμών της τάσης τροφοδοσίας του στάτη. Δηλαδή, οι ηλεκτρικοί παλμοί της τροφοδοσίας μετατρέπονται σε μηχανική κίνηση σταθερής γωνίας στροφής κι η ροπή παράγεται λόγω της μαγνητικής έλξης του δρομέα από τους ηλεκτρομαγνήτες του στάτη.



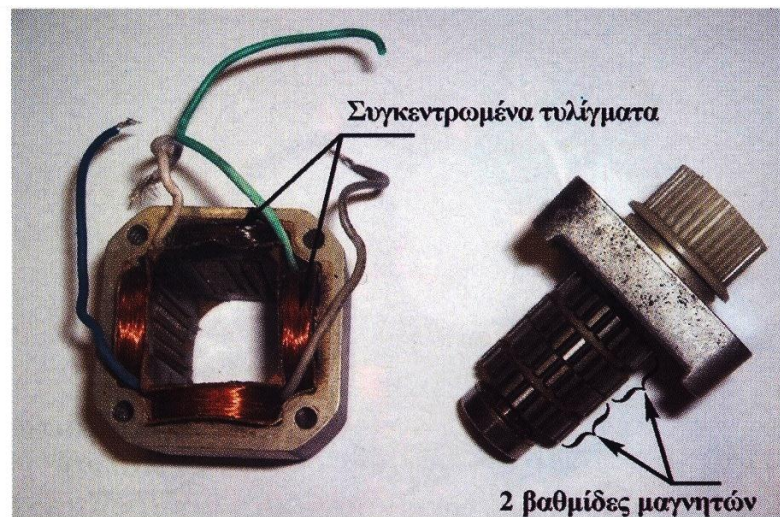
Σχήμα 2.9 Βασικός σχεδιασμός βηματικού κινητήρα: (α) κάθετη τομή, (β) εγκάρσια τομή

Οι βηματικοί κινητήρες λειτουργούν με έλεγχο ανοιχτού βρόχου και δεν χρειάζονται αισθητήρα ταχύτητας και θέσης. Χαρακτηριστικό των βηματικών κινητήρων είναι ο αριθμός των βημάτων κίνησης ανά περιστροφή. Συνήθως είναι πολλαπλών βαθμίδων μόνο στο δρομέα (Σχήμα 2.10) ή και στο στάτη και στο δρομέα. Οι πολλαπλές βαθμίδες αυξάνουν τον αριθμό των βημάτων κίνησης ανά περιστροφή του δρομέα, ωστόσο αυξάνουν και το αξονικό μήκος της μηχανής. Εκτός από τη μορφή βηματικού κινητήρα που μόλις περιγράψαμε, υπάρχει μεγάλη ποικιλία σχεδιαστικών τύπων βηματικών κινητήρων που διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους, τα οποία ανάλογα επηρεάζουν το κατασκευαστικό κόστος των μηχανών.

Οι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εξωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα συνήθως χρησιμοποιούνται ως ανεμιστήρες σε διατάξεις μικρής ισχύος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εφαρμογή τους ως ανεμιστήρες ψύξης ηλεκτρονικών συσκευών (Σχήμα 2.11.α) και σε σκληρούς δίσκους ηλεκτρονικών υπολογιστών (Σχήμα 2.11β). Το κάλυμμα του δρομέα φέρει τα πτερύγια του ανεμιστήρα κι ο μαγνήτης έχει τη μορφή λεπτής ταινίας σε σχήμα δακτυλίου και βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά του δρομέα.

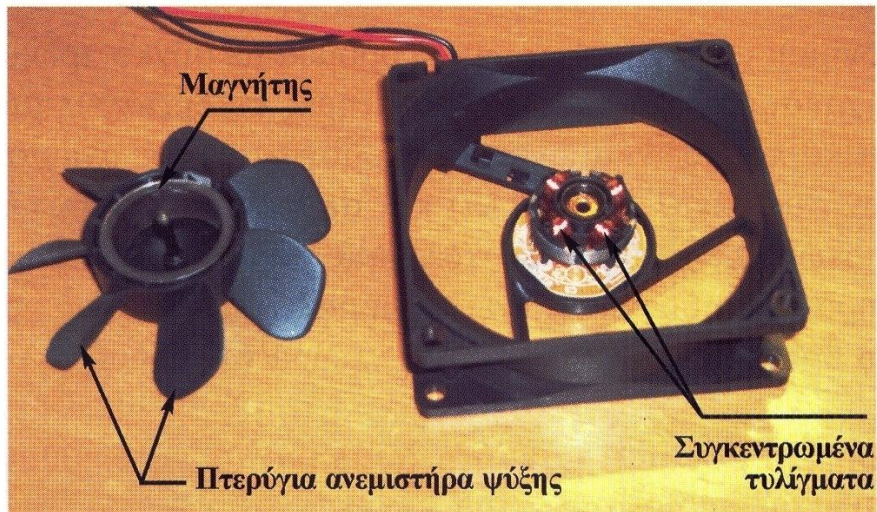


(α)

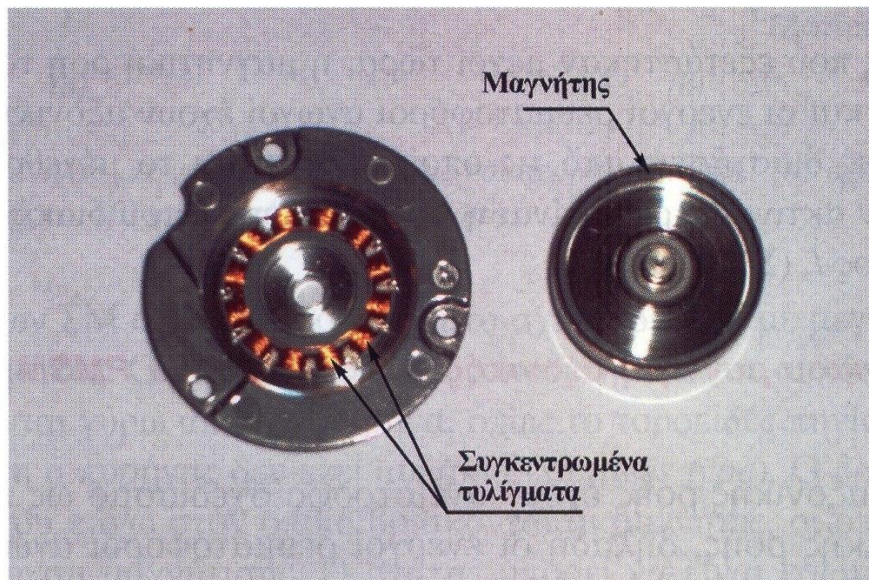


(β)

Σχήμα 2.10 Βηματικοί κινητήρες με στάτη μιας βαθμίδας και δρομέα: (α) μιας βαθμίδας, (β) δύο βαθμίδων



(α)



(β)

Σχήμα 2.11 Εφαρμογές ΣΜ μόνιμου μαγνήτη εξωτερικού δρομέα: (α) ανεμιστήρας για τη ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών, (β) σε σκληρούς δίσκους ηλεκτρονικών υπολογιστών

2.3.3 Είδη ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου

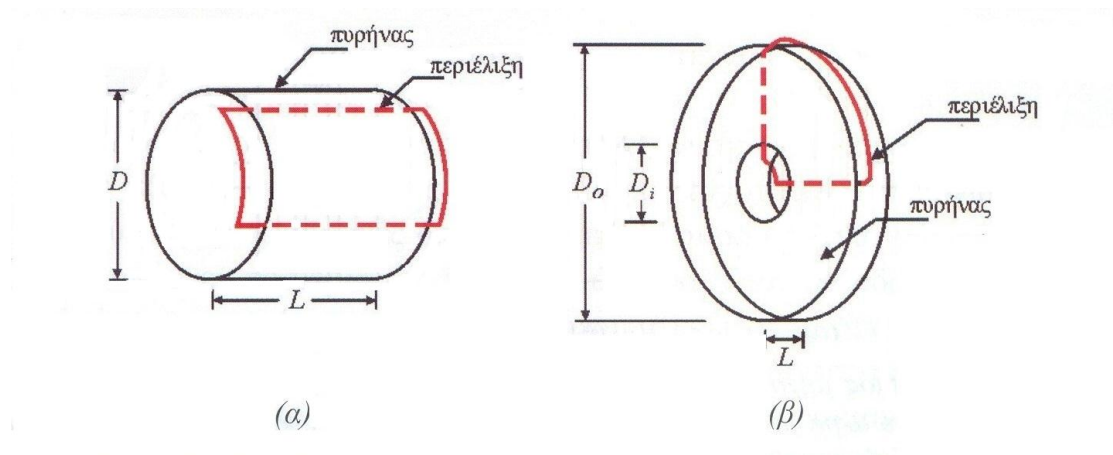
2.3.3.1 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ακτινικής ροής (radial flux PMSM)

Στις μηχανές που εξετάστηκαν μέχρι τώρα, η μαγνητική ροή του πεδίου είναι ακτινική κι οι ενεργοί ρευματοφόροι αγωγοί έχουν αξονική διεύθυνση. Οι κυριότερες διαστάσεις από τις

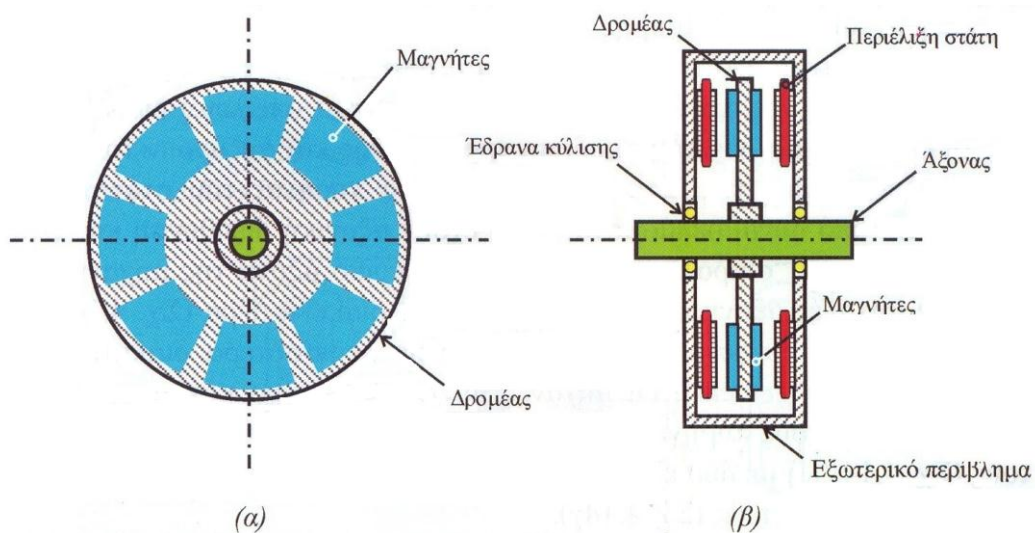
οποίες εξαρτάται το μέγεθος της ροπής των μηχανών ακτινικής ροής είναι η μέση διάμετρος του διακένου D και το αξονικό μήκος L (Σχήμα 2.12.α).

2.3.3.2 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής (axial flux PMSM ή disk type PMSM)

Οι μηχανές αξονικής έχουν αντίστροφο σχεδιασμό ως προς τις μηχανές ακτινικής ροής, δηλαδή οι ενεργοί ρευματοφόροι αγωγοί είναι ακτινικά τοποθετημένοι κι η διεύθυνσή της μαγνητικής ροής είναι αξονική (Σχήμα 2.12.β). Οι κυριότερες διαστάσεις από τις οποίες εξαρτάται το μέγεθος της ροπής των μηχανών αξονικής ροής είναι η εξωτερική κι η εσωτερική διάμετρος του δρομέα D_o και D_i αντίστοιχα.



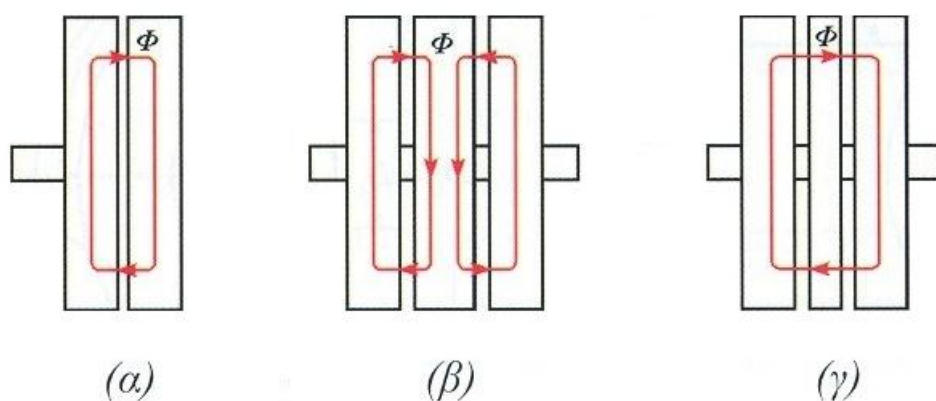
Σχήμα 2.12 Βασικός σχεδιασμός μηχανών: (α) ακτινικής, (β) αξονικής ροής



Σχήμα 2.13 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής εσωτερικού δρομέα: (α) σχεδιασμός το δρομέα, (β) η μηχανή σε κάθετη τομή

Ο στάτης των ΣΜ αξονικής ροής έχει το σχήμα δίσκου με μεγάλη διάμετρο και μικρό μήκος. Οι περιελίξεις είναι τοποθετημένες σε αυλάκια ή γύρο από τον πυρήνα, όπως το τοροειδές πηνίο (στην περίπτωση αυτή ο πυρήνας δεν έχει αυλάκια). Ο δρομέας έχει τη μορφή δίσκου πάνω στο οποίο βρίσκονται οι μαγνήτες, οι οποίοι έχουν αξονική διεύθυνση μαγνήτισης. Ο στάτης μπορεί να είναι εσωτερικά ανάμεσα σε δυο δίσκους δρομέα (εξωτερικού δρομέα) ή μπορεί ο δρομέας να βρίσκεται εσωτερικά ανάμεσα σε δυο δίσκους στάτη (εσωτερικού δρομέα). Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται μια ΣΜ μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής εσωτερικού δρομέα.

Συνήθως σε μηχανές μικρής ισχύος για να μειωθεί το κόστος της μηχανής, ο πυρήνας του στάτη κατασκευάζεται από συμπαγές σιδηρομαγνητικό υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσονται απώλειες δινορρευμάτων, οι οποίες μειώνουν την απόδοση της μηχανής κι αυξάνουν τη θερμοκρασία λειτουργίας της. Στις μηχανές όπου ο πυρήνας του στάτη κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα, αυτά έχουν αξονική διεύθυνση και τυλίγονται σε μορφή σπείρας γύρο από το κεντρικό άξονα της μηχανής. Υπάρχουν μηχανές αξονικής ροής με ένα ή δύο διακένα αέρα (Σχήμα 2.14) καθώς επίσης και πολυστρωματικές μηχανές με περισσότερα διακένα αέρα. Οι μηχανές με δύο διακένα κατασκευάζονται με δύο εξωτερικούς πυρήνες στάτη κι ένα δρομέα τοποθετημένο ανάμεσα τους (Σχήμα 2.14.β) ή με δύο εξωτερικούς πυρήνες δρομέα κι ένα στάτη τοποθετημένο ανάμεσά τους (Σχήμα 2.14.γ)

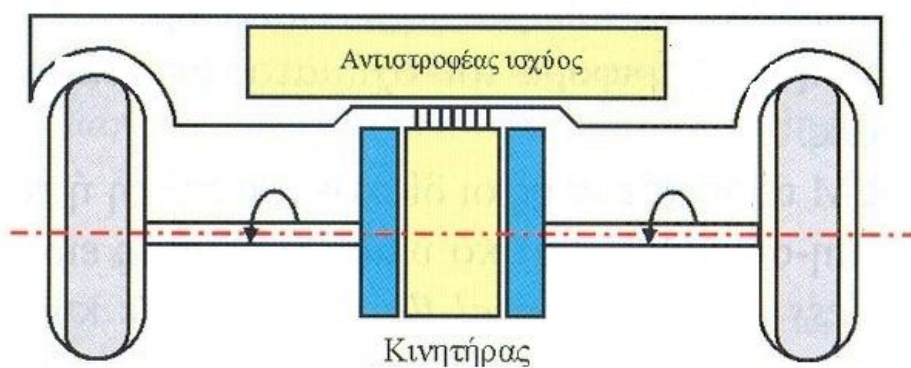


Σχήμα 2.14 Σχεδιασμός μηχανών αξονικής ροής: (α) απλού διακένου αέρα, (β) διπλού διακένου αέρα με δύο πυρήνες στάτη στο εξωτερικό κι ένα δρομέα ανάμεσα, (γ) διπλού διακένου αέρα με δύο πυρήνες δρομέα εξωτερικά κι ένα στάτη ανάμεσά τους

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ΣΜ αξονικής ροής είναι το μικρό αξονικό μήκος κι η ευκολία στην κατασκευή τους σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μηχανές ακτινικής ροής. Οι μαγνήτες έχουν επίπεδο σχήμα και δεν απαιτείται ειδική κατεργασία για να πάρουν την κυρτή

μορφή για να τοποθετηθούν στην επιφάνεια του δρομέα, όπως στις μηχανές ακτινικής ροής. Επίσης, το αξονικό μήκος του διακένου μπορεί να ρυθμίζεται κατά τη συναρμολόγηση της μηχανής ή ακόμη να αυξομειώνεται κατά τη λειτουργία της ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Μειονέκτημα των μηχανών αυτών είναι το σχετικά μεγάλο μήκος του διακένου (ειδικά στις πολυστρωματικές μηχανές) που έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη ροή σκεδάσεως και γενικά χαμηλή εκμετάλλευση του μαγνητικού κυκλώματος. Επίσης, παρουσιάζουν αξονική ροπή cogging, η οποία δεν μπορεί να μειωθεί με την κατασκευή λοξού δρομέα, όπως στις μηχανές ακτινικής ροής. Αυτό προκαλεί προβλήματα στην εκκίνηση, τα οποία δύσκολα μπορούν να αντιμετωπιστούν με κατασκευαστικές τεχνικές παρά μόνο μέσω ειδικών τεχνικών ελέγχου στο σύστημα οδήγησης.



(α)



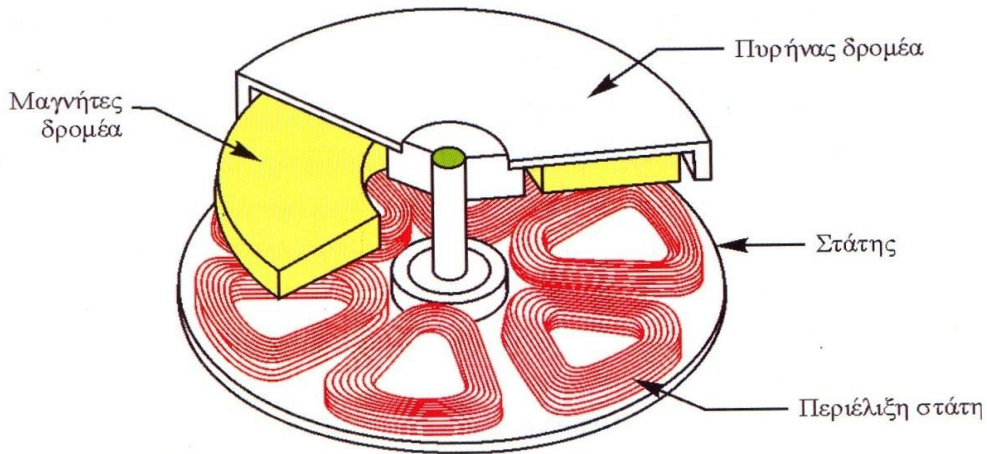
(β)

Σχήμα 2.15 (α) Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού αυτοκινήτου με ΣΜ αξονικής ροής διπλού διακένου, (β) κινητήρας τροχού (κινητήρας πλήμνης) με ΣΜ αξονικής ροής απλού διακένου

Συνήθως, οι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής είναι μηχανές με πολλούς πόλους και συνεπώς έχουν χαμηλή ταχύτητα λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μικρό αξονικό μήκος μηχανής και δεν υπάρχει περιορισμός για τη διάμετρο. Για παράδειγμα χρησιμοποιούνται στην κίνηση πλοίων, σε γεραμούς, ανελκυστήρες (ειδικά στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει χώρος για την κλασική μηχανή ακτινικής ροής και τους ιμάντες μετάδοσης της κίνησης όπως για παράδειγμα σε αναπαλαιώσεις κι ανακαινίσεις κτιρίων). Πολύ σημαντική εφαρμογή των μηχανών αυτών είναι στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο γιατί μπορούν να παρεμβάλλονται στον άξονα κίνησης ανάμεσα στους δύο τροχούς (Σχήμα 2.15.α). Έτσι η μετάδοση της κίνησης στους τροχούς γίνεται άμεσα χωρίς να απαιτείται κάποιο ενδιάμεσο μηχανικό σύστημα. Οι μηχανές αυτές είναι γνωστές ως κινητήρες τροχών ή κινητήρες πλήμνης (wheel motors). Στο Σχήμα 2.15.β απεικονίζεται ένας κινητήρας τροχού με ΣΜ αξονικής ροής απλού διακένου.

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από τις μηχανές αξονικής ροής μόνιμου μαγνήτη, υπάρχουν κι οι επαγωγικές μηχανές αξονικής ροής με σημαντικά πλεονεκτήματα κατά τη χρήση τους στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα λειτουργίας των δύο δρομέων με διαφορετική ταχύτητα (διαφορική λειτουργία, differential operation) βελτιώνοντας σημαντικά την οδική συμπεριφορά του οχήματος με πολύ καλύτερη σταθερότητα στις στροφές.

Σε ορισμένες ΣΜ αξονικής ροής οι δίσκοι το στάτη ή του δρομέα κατασκευάζονται από μη-σιδηρομαγνητικό υλικό (συνήθως ειδικό πλαστικό κι ονομάζονται coreless ή ironless axial flux PMSM) με κυριότερο στόχο τη μείωση του βάρους και της ροπής cogging. Οι μηχανές αυτές έχουν μηδενικές απώλειες σιδήρου, αλλά απαιτούνται ισχυρότεροι μαγνήτες για τη παραγωγή της αναγκαίας μαγνητικής ροής διέγερσης. Ο τύπος ΣΜ αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στάτη είναι αρκετά συνηθισμένος σε ηλεκτρονικές συσκευές, εξαρτήματα και περιφερειακά υπολογιστών, όπως είναι ο δισκοειδής brushless κινητήρας του Σχήματος 2.16. Τα τυλίγματα των φάσεων είναι κολλημένα στο δίσκο του στάτη κι οι μηχανές αυτές είναι συνήθως μικρής ισχύος.

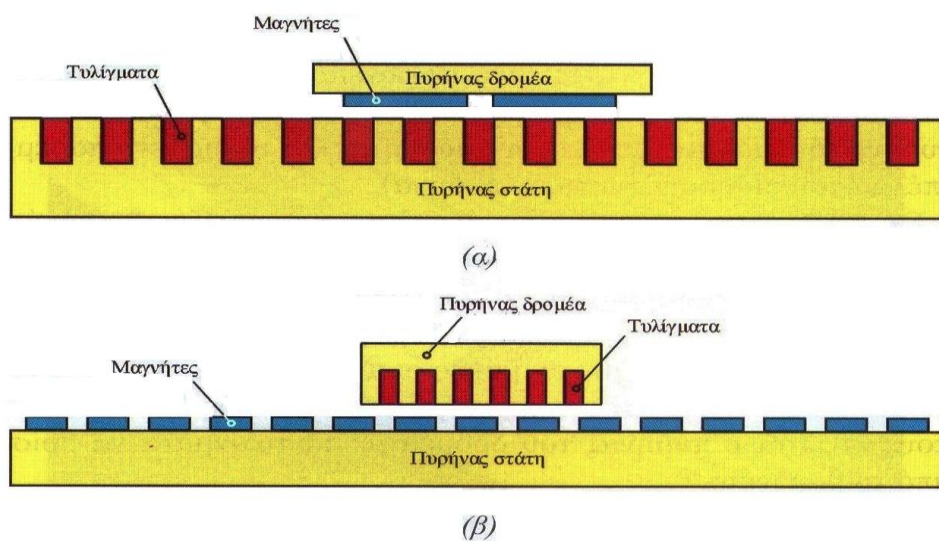


Σχήμα 2.16 Δισκοειδής brushless κινητήρας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στάτη

2.3.4 Άλλοι τύποι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με διεύθυνση κίνησης και την κατασκευή του πυρήνα του στάτη

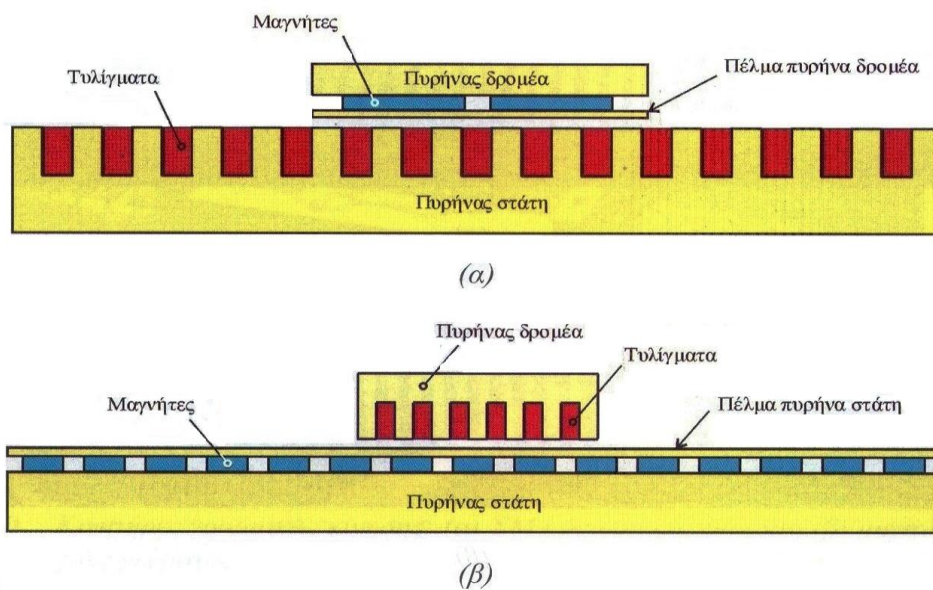
2.3.4.1 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη γραμμικής κίνησης (linear PMSM)

Στις μηχανές αυτές, η κίνηση του δρομέα γίνεται γραμμικά (ευθύγραμμο) πάνω σε ειδικές ράγες. Η περιέλιξη βρίσκεται στο στάτη ενώ οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο δρομέα (Σχήμα 2.17.α) ή ο αντίστροφος σχεδιασμός, δηλαδή οι μαγνήτες είναι στο στάτη κι ο δρομέας έχει τυλίγματα (Σχήμα 2.17.β).



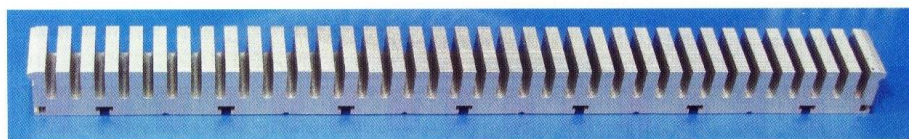
Σχήμα 2.17 ΣΜ γραμμικής κίνησης απλού διακένου με επιφανειακούς μαγνήτες στον πυρήνα: (α) οι μαγνήτες είναι στο δρομέα, (β) οι μαγνήτες είναι στο στάτη.

Υπάρχουν διάφοροι σχεδιασμοί γραμμικών μηχανών, όπως απλού διακένου (ένας στάτης κι ένας δρομέας), και διπλού διακένου (ο δρομέας κινείται ανάμεσα σε δύο πυρήνες στάτη). Επίσης, ο σχεδιασμός ποικίλει ανάλογα με το μήκος του δρομέα ως προς το μήκος του στάτη και τη θέση των μαγνητών στον πυρήνα (επιφανειακής ή εσωτερικής τοποθέτησης μαγνήτες). Στα Σχήματα 2.17.1 και 2.17.β οι μαγνήτες είναι επιφανειακά τοποθετημένοι στον πυρήνα, ενώ στα Σχήματα 2.18.α και 2.18.β οι μαγνήτες είναι εσωτερικά τοποθετημένοι στον πυρήνα (δηλαδή ανάμεσα στους μαγνήτες και το διάκενο παρεμβάλλεται το πέλμα του σιδηρομαγνητικού πυρήνα).



Σχήμα 2.18 ΣΜ γραμμικής κίνησης απλού διακένου με εσωτερικούς μαγνήτες στον πυρήνα:

(α) οι μαγνήτες είναι στο δρομέα, (β) οι μαγνήτες είναι στο στάτη



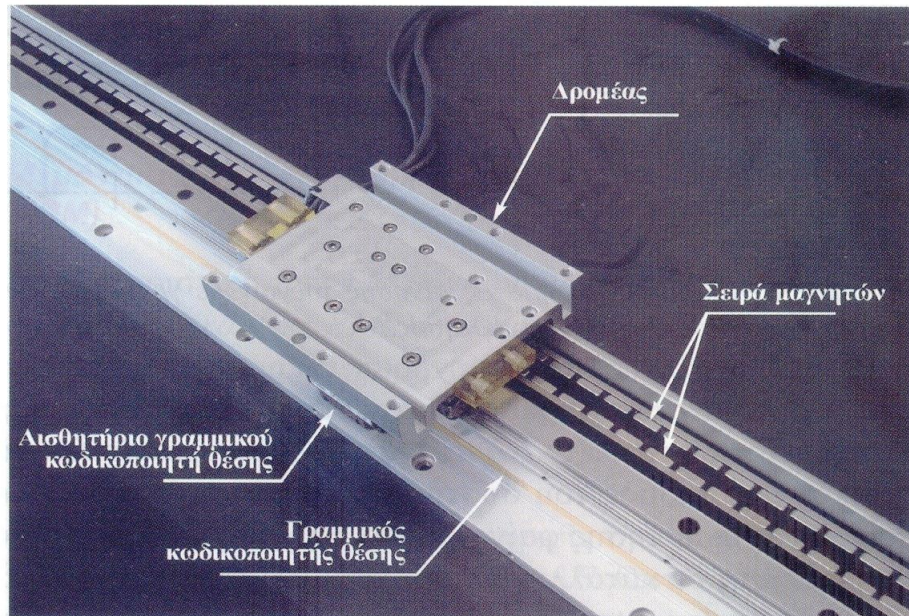
(α)



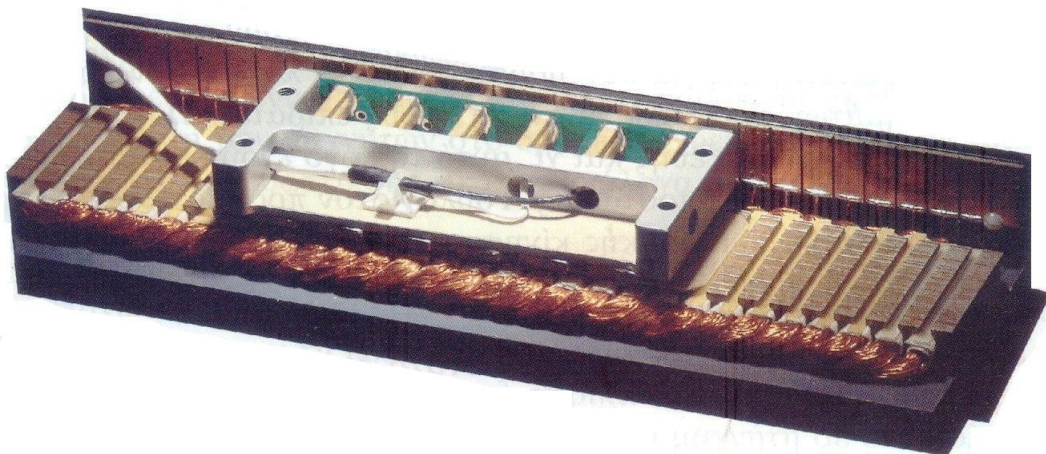
(β)

Σχήμα 2.19 Στάτης ΣΜ μόνιμου μαγνήτη γραμμικής κίνησης: (α) σιδηρομαγνητικός πυρήνας στάτη, (β) περιελίξεις στάτη

Στο Σχήμα 2.19 απεικονίζονται ο πυρήνας κι οι περιελίξεις του στάτη ενός σύγχρονου κινητήρα γραμμικής κίνησης όταν οι μαγνήτες είναι στο δρομέα (αντίστοιχος του σχεδιασμού του Σχήματος 2.17.α) και στο Σχήμα 2.20.α απεικονίζεται ένας σύγχρονος κινητήρας γραμμικής κίνησης αντίστοιχος του σχεδιασμού του Σχήματος 2.17.β. Ωστόσο, στη μηχανή αυτή οι μαγνήτες και τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα κάθετα. Επίσης, οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι σε δύο στρώσεις, κι ανάμεσά τους κινείται ο πυρήνας του δρομέα με τα τυλίγματα να βρίσκονται κάτω από το βαγονέτο.



(α)

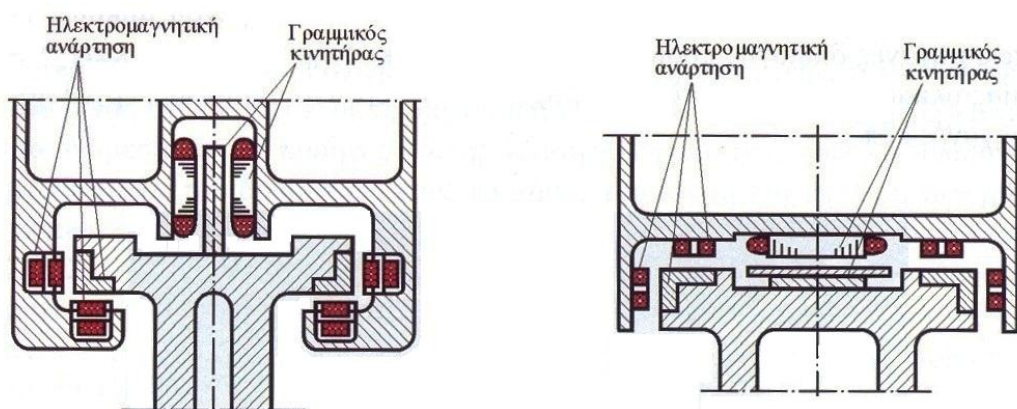


(β)

Σχήμα 2.20 Κινητήρες γραμμικής κίνησης: (α) ΣΜ μόνιμου μαγνήτη, (β) μηχανή συνεχούς ρεύματος

Κατ' αντιστοιχία με τις στρεφόμενες μηχανές υπάρχουν βηματική κινητήρες γραμμικής κίνησης, επαγωγικοί και μαγνητικής αντίστασης κινητήρες γραμμικής κίνησης, καθώς και κινητήρες συνεχούς ρεύματος γραμμικής κίνησης (Σχήμα 2.10.β). Γενικά οι μηχανές γραμμικής κίνησης χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις ευθύγραμμης κίνησης συνήθως περιορισμένου μήκους, όπως μηχανές διαλογής προϊόντων, ειδικοί ανελκυστήρες, μηχανές κατεργασίας υλικών, οχήματα μεταφοράς, σχεδιαστικά όργανα ακριβείας, εργαλειομηχανές κλπ.

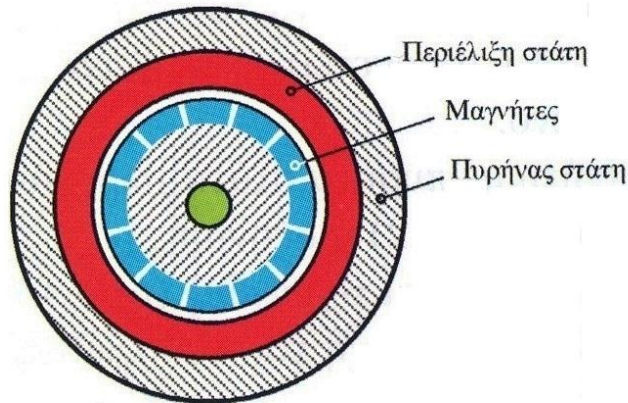
Σήμερα, υπάρχουν και τρένα με κινητήρες γραμμικής κίνησης και σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης (electromagnetic levitation system). Ο βασικός σχεδιασμός του συστήματος κίνησης τρένων με σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης φαίνεται στο Σχήμα 2.21. Ένα σύστημα μαγνητών-ηλεκτρομαγνητών κατάλληλα τοποθετημένο στη βάση των βαγονιών και στις ράγες του τρένου επιβάλλει κάθετη δύναμη κι ανυψώνει το βαγόνι, ώστε η κίνηση μέσω του γραμμικού κινητήρα να γίνεται χωρίς τριβές. Η λειτουργία του συστήματος ανάρτησης απαιτεί κατάλληλο σύστημα ελέγχου. Τα τρένα με ηλεκτρομαγνητικό σύστημα ανάρτησης μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες ταχύτητες, της τάξης των 500km/h, έχουν χαμηλό επίπεδο θορύβου, μικρές απαιτήσεις για συντήρηση και τέλος, λόγω όλων των παραπάνω πλεονεκτημάτων, προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση στους επιβάτες. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι έχουν μεγάλο κατασκευαστικό κόστος, γι αυτό κι η χρήση τους δεν έχει εξαπλωθεί ευρέως ακόμη.



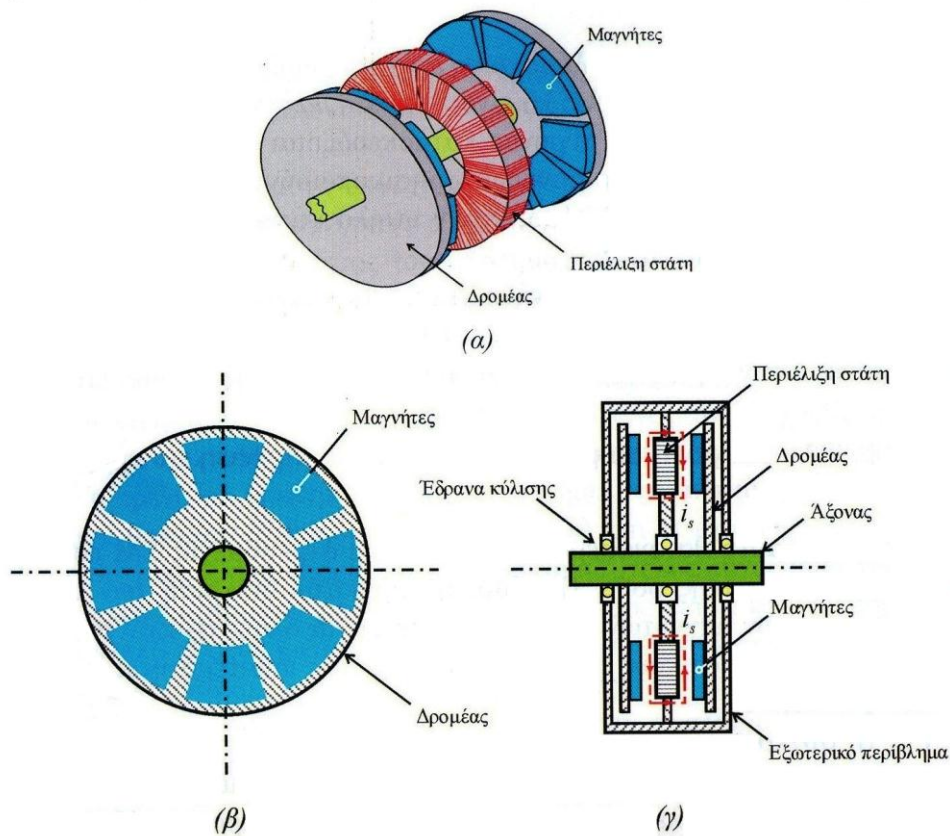
Σχήμα 2.21 Βασικός σχεδιασμός συστήματος κίνησης τρένων με γραμμικό κινητήρα κι ηλεκτρομαγνητικό σύστημα ανάρτησης

2.3.4.2 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη με πυρήνα στάτη χωρίς αυλάκια (slotless PMSM)

Η κατασκευή του δρομέα των μηχανών αυτών είναι ίδια όπως των συμβατικών ΣΜ μόνιμου μαγνήτη. Ο στάτης έχει το σχήμα δακτυλιδιού και κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα (Σχήμα 2.22).



Σχήμα 2.22 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ακτινικής ροής με πυρήνα στάτη χωρίς αυλάκια



Σχήμα 2.23 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής εξωτερικού δρομέα με πυρήνα στάτη χωρίς αυλάκια: (α) βασικός σχεδιασμός μηχανής, (β) η μηχανή σε κάθετη τομή, (γ) η μηχανή σε εγκάρσια τομή

Αντίστοιχη μορφή έχουν τα πηνία των φάσεων τα οποία τυλίγονται έξω από τη μηχανή και τοποθετούνται εφαρμοστά στο εσωτερικό του ανοίγματος του στάτη. Συνήθως, τα τυλίγματα κολλούνται πάνω στον πυρήνα του στάτη ή σταθεροποιούνται με δακτύλιο συγκράτησης που τοποθετείται στην εσωτερική περιφέρεια των τυλιγμάτων προς το διάκενο.

Οι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη με πυρήνα στάτη χωρίς αυλάκια μπορεί να είναι ακτινικής ροής (όπως του Σχήματος 2.22) ή αξονικής ροής (όπως του Σχήματος 2.23). Η μηχανή αξονικής ροής ονομάζεται τοροειδής (torus-slotless PMSM) πηνίου.

2.3.4.3 ΣΜ μόνιμου μαγνήτη χωρίς πυρήνα στάτη (coreless ή ironless PMSM)

Κύριο χαρακτηριστικό των ΣΜ μόνιμου μαγνήτη χωρίς σιδηρομαγνητικό πυρήνα είναι η μικρή ροπή cogging κι οι μηδενικές απώλειες σιδήρου. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από ειδικό πλαστικό υλικό κι οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με πολύ μεγάλες ταχύτητες. Βέβαια, έχουν υψηλό κόστος κατασκευής, γιατί απαιτούν ισχυρούς μαγνήτες.

Συνήθως οι μηχανές αυτής της κατηγορίας είναι αξονικής ροής, όπως η μηχανή του Σχήματος 2.16, ενώ θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι έχουν κατασκευαστεί και μηχανές ακτινικής ροής καθώς και γραμμικής κίνησης.

2.3.5 Είδη ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τη θέση των μαγνητών στο δρομέα

Στην ενότητα αυτή κυρίως σε στρεφόμενες ΣΜ εσωτερικού δρομέα ακτινικής ροής. Για τη συγκριτική παρουσίαση των διαφόρων σχεδιαστικών τύπων ΣΜ θα χρησιμοποιήσουμε ορισμένες βασικές σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία των μαγνητών, αλλά προσαρμοσμένες στις ανάγκες της μελέτης των ηλεκτρικών μηχανών. Αν θεωρήσουμε ότι η ροή σκεδάσεως είναι αμελητέα, η ροή του μαγνήτη σε ένα πολικό βήμα είναι ίση με τη ροή του διακένου

$$B_m A_m = B_g A_g \quad (2.1)$$

Ο λόγος της επιφάνειας του μαγνήτη A_m ενός πολικού βήματος προς την αντίστοιχη επιφάνεια του διακένου A_g ονομάζεται παράγοντας συγκέντρωσης της ροής (flux concentration factor)

$$C_\Phi = \frac{A_m}{A_g} \quad (2.2)$$

κι επηρεάζει τη μαγνητική επαγωγή του διακένου ($B_g = C_\Phi B_m$). Ο συντελεστής μαγνητικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη σχέση των διαστάσεων του μαγνήτη ως προς τις διαστάσεις του διακένου αέρα

$$PC = \frac{l_m A_g}{l_g A_m} \quad (2.3)$$

και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.2) έχουμε

$$PC = \frac{l_m A_g}{l_g A_m} = \frac{l_m}{l_g} \frac{1}{C_\Phi} \quad (2.4)$$

Επίσης, ο συντελεστής μαγνητικής αγωγιμότητας είναι ανάλογος της κλίσης της ευθείας φορτίου κι είναι ένα μέτρο της απομαγνήτισης του μαγνήτη. Η μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη που προσδιορίζει το σημείο λειτουργίας του, δίνεται από την εξίσωση

$$B_m = \frac{PC}{PC + \mu_{rec}} B_r \quad (2.5)$$

όπου B_r η μαγνητική επαγωγή του παραμένουτα μαγνητισμού στον μαγνήτη.

Από τις εξισώσεις (2.1)-(2.5) προκύπτει

$$B_g = \frac{\frac{l_m}{l_g}}{\left(\frac{l_m}{l_g}\right)\left(\frac{1}{C_\Phi}\right) + \mu_{rec}} B_r \quad (2.6)$$

Σε κινητήρες όπου, λόγω της θέσης του μαγνήτη, έχουμε χαμηλή τιμή παράγοντα συγκέντρωσης ροής C_Φ , πρέπει να αυξηθεί το μήκος του μαγνήτη l_m κατά τη διεύθυνση μαγνήτισης ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή μαγνητική επαγωγή διακένου B_g και να εξασφαλίζεται το απαραίτητο περιθώριο ασφαλείας ως προς την απομαγνήτιση που προκαλεί το πεδίο αντίδρασης του στάτη. Αν ληφθεί υπόψη κι η ροή σκεδάσεως, τότε η μαγνητική επαγωγή διακένου είναι λίγο μικρότερη από την τιμή που υπολογίζεται από την εξίσωση (2.6)

Η θέση του μαγνήτη στο δρομέα, η γεωμετρία του μαγνήτη κι η διεύθυνση του μαγνητικού άξονα επηρεάζουν σημαντικά τις τιμές των C_Φ και PC , οι οποίες ανάλογα επηρεάζουν την απομαγνήτιση του μαγνήτη, την τιμή της μαγνητικής επαγωγής διακένου και συνεπώς τη λειτουργική συμπεριφορά της ΣΜ.

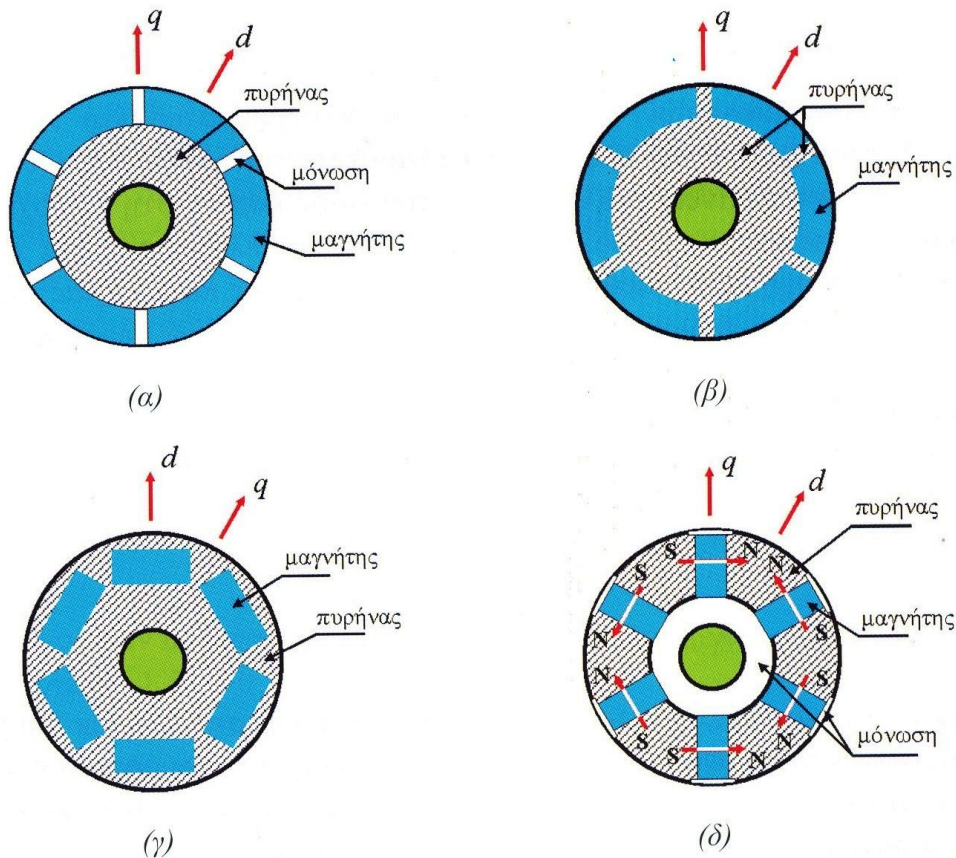
Λόγω των διαφορετικών μαγνητικών χαρακτηριστικών των υλικών ή του διαφορετικού μήκους διακένου σε ορισμένους από τους σχεδιασμούς ΣΜ που θα αναλύσουμε στη συνέχεια, η αυτεπαγωγή μαγνήτισης δεν έχει σταθερή τιμή σε όλη τη περιφέρεια του διακένου. Γι' αυτό το λόγο, θα γίνει διαχωρισμός σε δύο αυτεπαγωγές μαγνήτισης, L_{md} και L_{mq} κατά τη διεύθυνση των μαγνητικών αξόνων d και q αντίστοιχα. Ο λόγος των αυτεπαγωγών μαγνήτισης των δύο μαγνητικών αξόνων (saliency ratio) ορίζεται ως

$$\lambda_{qd} = \frac{L_{mq}}{L_{md}} \quad (2.7)$$

κι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που καθορίζει τη λειτουργική συμπεριφορά της ΣΜ μόνιμου μαγνήτη.

Όταν ο σχεδιασμός της μηχανής δίνει $\lambda_{qd}=1$ (δηλαδή ισχύει $L_{sq}=L_{sd}$, όπου $L_{sq}=L_{mq}+L_{si}$ και $L_{sd}=L_{md}+L_{si}$ με L_{si} την αυτεπαγωγή σκεδάσεως), τότε παράγεται μόνο ροή ευθυγράμμισης ενώ όταν $\lambda_{qd}>1$ (δηλαδή $L_{mq}>L_{md}$) τότε παράγονται ταυτόχρονα ροή ευθυγράμμισης κι ροή μαγνητικής έλξης. Στην περίπτωση όπου $\lambda_{qd}=1$, έχουμε λειτουργία παρόμοια με την κλασική ΣΜ με τύλιγμα διέγερσης κυλινδρικών πόλων ενώ όταν $\lambda_{qd}>1$, έχουμε λειτουργία παρόμοια με τη κλασική ΣΜ με τύλιγμα διέγερσης έκτυπων πόλων. Επίσης, η τιμή του λ_{qd} επηρεάζει σημαντικά τα όρια μέγιστης ταχύτητας περιστροφής της ΣΜ στην περιοχή σταθερής ισχύος. Σε μηχανές με μεγαλύτερη τιμή λ_{qd} έχουμε αύξηση των ορίων μέγιστης ταχύτητας.

2.3.5.1 ΣΜ με μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα



Σχήμα 2.24 Σχεδιασμοί δρομέα 6-πολικής ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τη γεωμετρία και τη θέση των μαγνητών : (α) επιφανειακής τοποθέτησης, (β) επιφανειακής-ένθετης τοποθέτησης, (γ) εσωτερικής τοποθέτησης με ακτινική διεύθυνση του άξονα μαγνήτισης, (δ) εσωτερικής τοποθέτησης με εφαπτομενική διεύθυνση του άξονα μαγνήτισης.

Στο σχήμα 2.24.α παρουσιάζεται η κατασκευή του δρομέα ΣΜ με μαγνήτες στην επιφάνεια του. Οι μαγνήτες είναι κολλημένοι στην εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα του δρομέα κι ανάμεσά τους υπάρχει διάκενο ή μονωτικό (μη-σιδηρομαγνητικό) υλικό. Ο δρομέας συνήθως περιβάλλεται από ειδικούς δακτυλίους οι οποίοι συγκρατούν τους μαγνήτες. Οι δακτύλιοι συγκράτησης είναι συνήθως κατασκευασμένοι από μη-μαγνητικό υλικό ώστε να περιορίζεται η ροή σκεδάσεως κι επίσης είναι χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (κυρίως από ορείχαλκο ή και ανοξείδωτο χάλυβα), ώστε να έχουν μικρές απώλειες δινορρευμάτων. Σε πολλές μηχανές, οι δακτύλιοι συγκράτησης κατασκευάζονται από συνθετικό καουτσούκ ή ειδικό πλαστικό πλέγμα.

Οι ΣΜ με μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα έχουν σχετικά απλή κι οικονομική κατασκευή. Η τιμή του παράγοντα συγκέντρωσης ροής C_{Φ} είναι μικρότερη της μονάδας με αποτέλεσμα η μαγνητική επαγωγή διακένου B_g να είναι αρκετά μικρότερη της B_r (εξίσωση 2.6) και της μαγνητικής επαγωγής του μαγνήτη B_m (εξίσωση 2.1). ωστόσο, η τιμή της μαγνητικής επαγωγής διακένου είναι ικανοποιητική σε σύγκριση με άλλους σχεδιασμούς δρομέα ΣΜ μόνιμου μαγνήτη.

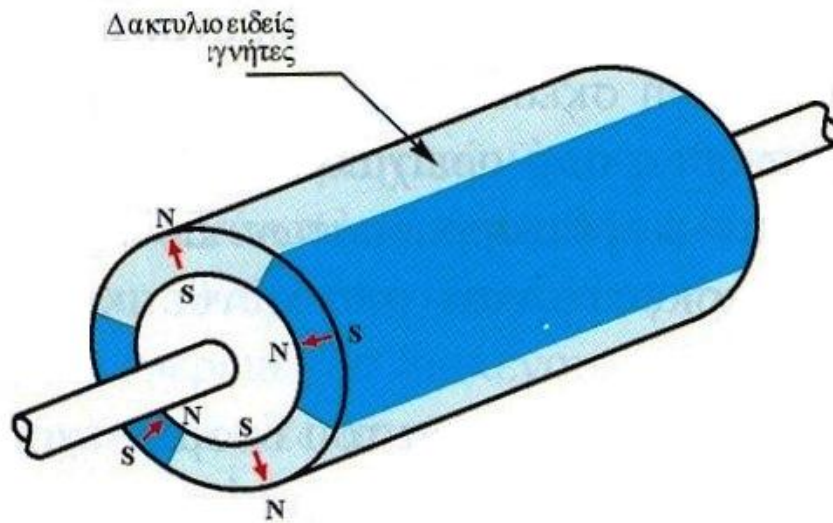
Οι μηχανές αυτές μειονεκτούν ως προς τη μηχανική προστασία των μαγνητών σε φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της περιστροφής του δρομέα. Επίσης, λόγω της επιφανειακής τοποθέτησης των μαγνητών στο δρομέα και συνεπώς της άμεσης επαφής τους με το διάκενο, οι μαγνήτες επηρεάζονται από τις αρμονικές της μαγνητεγερτικής δύναμης του στάτη με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται δινορρεύματα κι αντίστοιχα απώλειες στο εσωτερικό των μαγνητών. Το μέγεθος των δινορρευμάτων και των απωλειών εξαρτάται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα των μαγνητών. Οι ΣΜ με μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα λειτουργούν κυρίως στην περιοχή σταθερής ροπής. Αυτό συνήθως επιβάλλεται είτε για λόγους μηχανικής αντοχής είτε επειδή το εύρος της ταχύτητας λειτουργίας των μηχανών αυτών στην περιοχή σταθερής ισχύος είναι πολύ περιορισμένο.

Επειδή οι μαγνήτες όπως και το ενδιάμεσο υλικό, συμπεριφέρονται μαγνητικά όπως ο αέρας (η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας τους είναι περίπου ίση με του αέρα), η αυτεπαγωγή μαγνήτισης είναι σταθερή σε κάθε σημείο του διακένου και συνεπώς

$$L_{sd} = L_{sq} \quad (2.8)$$

Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος των αυτεπαγωγών μαγνήτισης των δύο μαγνητικών αξόνων είναι μονάδα, $\lambda_{qd}=1$. Έτσι, η λειτουργία των μηχανών αυτών είναι αντίστοιχη των κλασικών ΣΜ κυλινδρικών πόλων με τύλιγμα διέγερσης και συνεπώς παράγεται μόνο ροπή ευθυγράμμισης. Σε ΣΜ μικρής ισχύος, οι μαγνήτες έχουν δακτυλιοειδές σχήμα (ring magnets) κι είναι κατασκευασμένοι από ενιαίο υλικό χωρίς να παρεμβάλλεται διάκενο ή κάποιο άλλο υλικό στα σημεία όπου εναλλάσσονται οι προσανατολισμοί των μαγνητών. Στο Σχήμα 2.25

φαίνεται ο δρομέας ΣΜ με δακτυλιοειδείς μαγνήτες. Επίσης, δακτυλιοειδής είναι ο μαγνήτης των ΣΜ των Σχημάτων 2.11.α & 2.11.β.



Σχήμα 2.25 Δρομέας 4-πολικής ΣΜ με δακτυλιοειδείς μαγνήτες

2.3.5.2 ΣΜ με μαγνήτες στην επιφάνεια - ένθετα (surface-inset mount PMSM)

Στις μηχανές αυτές οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι σε κατάλληλα ανοίγματα στην περιφέρεια του δρομέα και κολλιούνται στον πυρήνα (Σχήμα 2.24.β). Δηλαδή, μεταξύ δύο διαδοχικών μαγνητών παρεμβάλλεται ένα τμήμα του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα. Ο σχεδιασμός αυτός εξασφαλίζει καλύτερη μηχανική προστασία των μαγνητών σε φυγοκεντρικές δυνάμεις. Παρ' όλα αυτά στις περισσότερες μηχανές αυτού του τύπου, υπάρχουν εμπρόσθια δακτύλιοι συγκράτησης για μεγαλύτερη ασφάλεια σε υψηλές ταχύτητες, όπως και στις ΣΜ με μαγνήτες τοποθετημένους στην επιφάνεια του δρομέα.

Επειδή η μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού τμήματος που υπάρχει ανάμεσα στους μαγνήτες είναι διαφορετική (πολύ μεγαλύτερη) των μαγνητών, η αυτεπαγωγή μαγνήτισης δεν έχει σταθερή τιμή σε όλο το μήκος του διακένου. Ο διαμήκης d-άξονας έχει τη διεύθυνση του μαγνητικού άξονα διέγερσης των μαγνητών. Ο εγκάρσιος q-άξονας σχηματίζει γεωμετρική γωνία $90^\circ/p$ (ή ηλεκτρική γωνία 90°) ως προς τον d-άξονα κι διέρχεται από μέσα από το δόντι που σχηματίζεται μεταξύ δύο διαδοχικών μαγνητών (Σχήμα 2.24.β). Επειδή η μαγνητική διαπερατότητα των μαγνητών είναι περίπου ίση με του αέρα, η αυτεπαγωγή μαγνήτισης στον q-άξονα είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης αυτεπαγωγής στον d-άξονα

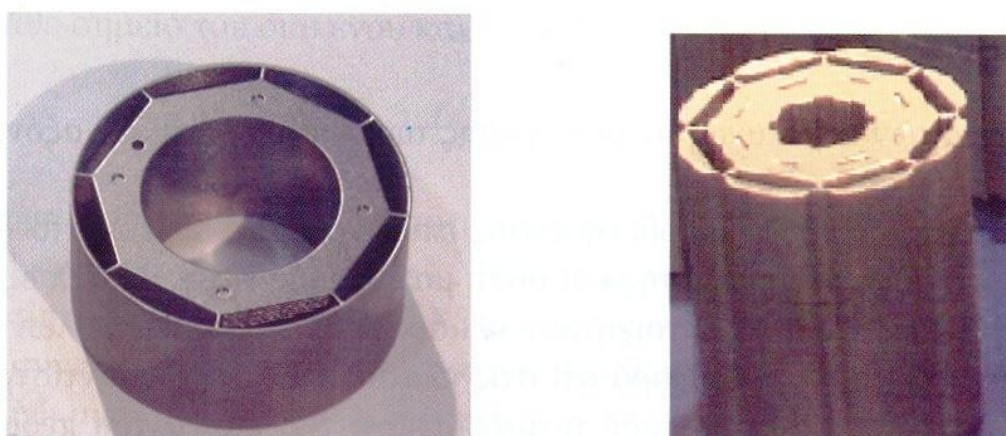
$$L_{sq} > L_{sd} \quad (2.9)$$

Οι ΣΜ με μαγνήτες τοποθετημένους επιφανειακά-ένθετα στο δρομέα παράγουν ροπή ευθυγράμμισης και ροπή μαγνητικής έλξης. Συνεπώς, η συμπεριφορά τους είναι αντίστοιχη των κλασικών ΣΜ έκτυπων πόλων με τύλιγμα διέγερσης, με τη διαφορά ότι στις κλασικές ΣΜ ισχύει αντίστροφα η ανισότητα 2.9, δηλαδή η αυτεπαγωγή του άξονα του πεδίου διέγερσης L_{sd} είναι μεγαλύτερη της L_{sq} κι επομένως ο λόγος τους λ_{qd} είναι μικρότερος της μονάδας.

Στην κατηγορία αυτή των ΣΜ, η μέγιστη ταχύτητα στην περιοχή σταθερής ισχύος είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις ΣΜ με μαγνήτες επιφανειακά τοποθετημένους στο δρομέα. Ωστόσο, επειδή και στους δύο κατασκευαστικούς τύπους ΣΜ, οι μαγνήτες είναι σε άμεση επαφή με το διάκενο, έχουν περίπου την ίδια τιμή μαγνητικής επαγωγής διακένου και τα ίδια προβλήματα όσον αφορά την επίδραση των αρμονικών στους μαγνήτες.

2.3.5.3 ΣΜ με μαγνήτες ακτινικής διεύθυνσης, στο εσωτερικό του δρομέα (*interior mount radially magnetized PMSM*)

Στο Σχήμα 2.24.γ παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του δρομέα ΣΜ με μαγνήτες στο εσωτερικό του πυρήνα και στο Σχήμα 4.26 απεικονίζονται πυρήνες δρομέα αυτού του σχεδιασμού. Ο μαγνητικός άξονας των μαγνητών έχει ακτινική διεύθυνση. Ο σχεδιασμός αυτός προσφέρει πολύ καλή μηχανική προστασία των μαγνητών (μηχανική αντοχή σε πολύ μεγάλες ταχύτητες περιστροφής) καθώς και μαγνητική προστασία από ισχυρά πεδία απομαγνήτισης. Επίσης, ο σχεδιασμός αυτός δίνει την δυνατότητα για σημαντική εξασθένηση του πεδίου χωρίς να επηρεάζονται ουσιαστικά οι μαγνήτες κι έτσι εξασφαλίζεται η λειτουργία σε μεγάλες ταχύτητες στην περιοχή σταθερής ισχύος με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 4.26 Πυρήνες δρομέα 8-πολικών ΣΜ όπου οι μαγνήτες τοποθετούνται εσωτερικά στον πυρήνα, με ακτινική διεύθυνση των μαγνητικών τους αξόνων

Σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η κατασκευή αυτών των μηχανών είναι δυσκολότερη και συνεπώς το κατασκευαστικό κόστος μεγαλύτερο σε σύγκριση με άλλους τύπους ΣΜ. Επίσης, η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο της μηχανής είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τους δύο προηγούμενους τύπους ΣΜ επειδή σε ένα πολικό βήμα η επιφάνεια του μαγνήτη είναι μικρότερη της επιφάνειας διακένου, δηλαδή έχουμε χαμηλότερη τιμή C_{ϕ} , εξίσωση (2.6).

2.3.5.4 ΣΜ με μαγνήτες εφαπτομενικής διεύθυνσης μαγνήτισης στο εσωτερικό του δρομέα (*interior mount circumferentially magnetized PMSM*)

Η ΣΜ του Σχήματος 2.24.δ έχει τους μαγνήτες στο εσωτερικό του πυρήνα του δρομέα κι ο μαγνητικός τους άξονας έχει εφαπτομενική διεύθυνση προς την περιφέρεια. Η τοποθέτηση των μαγνητών γίνεται με εναλλαγή της πολικότητας, ώστε οι δύο αντικριστοί πόλοι δύο διαδοχικών μαγνητών να είναι ίδιας πολικότητας. Ο σχεδιασμός αυτός προσφέρει τα πλεονεκτήματα της μηχανικής και μαγνητικής προστασίας των μαγνητών όπως στο Σχήμα 2.24.γ. Επίσης επιτυγχάνει μεγάλη τιμή του παράγοντα συγκέντρωσης ροής C_{ϕ} , αφού η συνολική επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο είναι το άθροισμα της επιφάνειας δύο διαδοχικών μαγνητών και συνεπώς είναι μεγαλύτερη της επιφάνειας διακένου του πολικού βήματος. Αυτό έχει ως σημαντικό πλεονέκτημα τη μεγάλη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο (δηλαδή μεγαλύτερη των ΣΜ των Σχημάτων 2.24.α & 2.24.β) με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ικανοποιητική λειτουργία της μηχανής ακόμη και με σχετικά χαμηλών ενεργειακών δυνατοτήτων μαγνήτες. Ωστόσο, μειονεκτεί ως προς το σχεδιασμό του Σχήματος 2.24.γ, γιατί είναι μικρότερη η τιμή του λ_{qd} κι αντίστοιχα μικρότερη είναι η τιμή της μαγνητικής έλξης. Επίσης, η ικανότητα της μηχανής για λειτουργία με εξασθένηση του πεδίου είναι περιορισμένη κι αντίστοιχα μικρότερη είναι η ταχύτητα που μπορεί να επιτευχτεί στην περιοχή σταθερής ισχύος. Στο Σχήμα 2.27 απεικονίζεται μια 6-πολική ΣΜ με μαγνήτες εφαπτομενικής διεύθυνσης στο εσωτερικό του δρομέα.

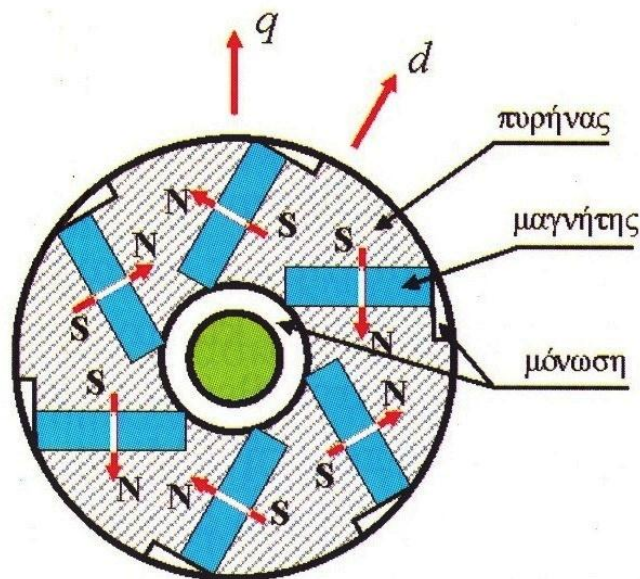
Ο άξονας αυτού του τύπου ΣΜ πρέπει να έχει πολύ χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα για να αποφεύγεται η διέλευση μαγνητική ροής από το κάτω τμήμα των μαγνητών, ώστε να εξασφαλίζεται ότι όλη η ροή διέγερσης θα περνά από το διάκενο και το στάτη. Για να επιτυγχάνεται η παραπάνω απαίτηση, τοποθετείται γύρω από το άξονα σε όλο το μήκος του πυρήνα ένας παχύς δακτύλιος από μη-σιδηρομαγνητικό υλικό.

Ένας ενδιάμεσος σχεδιασμός μεταξύ των ΣΜ των Σχημάτων 2.24.γ και 2.24.δ, επιτυγχάνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τη μαγνητική επαγωγή διακένου, το εύρος ταχυτήτων στην περιοχή σταθερής ισχύος και τη ροπή μαγνητικής έλξης δίνεται στο Σχήμα 2.28. Στη μηχανική αυτή οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι εσωτερικά στο δρομέα κι οι μαγνητικοί τους άξονες σχηματίζουν γωνία π/p ως προς τη θέση των μαγνητικών αξόνων της

μηχανής του Σχήματος 2.24.γ ή γωνία $\pi/2p$ ως προς τη θέση των μαγνητικών αξόνων της μηχανής του Σχήματος 2.24.δ.



Σχήμα 2.27 Τριφασική 6-πολική ΣΜ με μαγνήτες εφαπτομενικής διεύθυνσης μαγνήτισης στο εσωτερικό του δρομέα: (α) στάτης (β) δρομέας



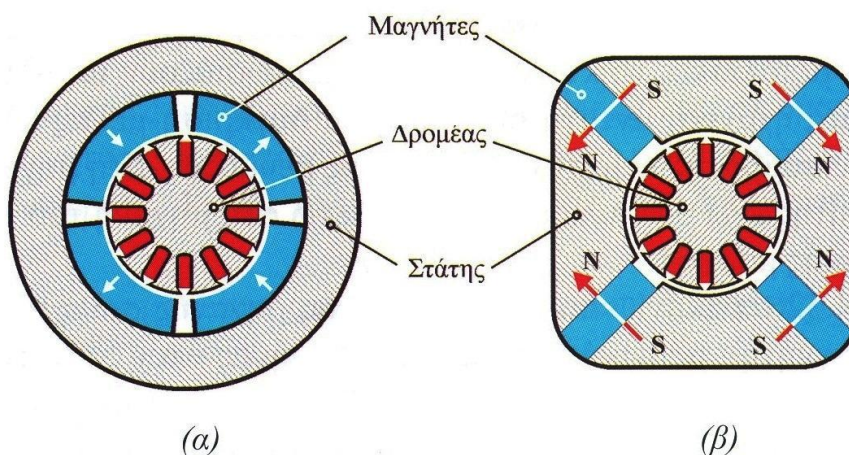
Σχήμα 2.28 Δρομέας ΣΜ με μαγνήτες κεκλιμένης διεύθυνσης μαγνήτισης, εσωτερικά τοποθετημένους στο δρομέα

Γενικά, λόγω της καλής μηχανικής προστασίας των μαγνητών που προσφέρουν οι ΣΜ με μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα, προτιμούνται σε κινητήρια συστήματα με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής. Ωστόσο, το υψηλό κατασκευαστικό κόστος είναι μία σημαντική αρνητική παράμετρος για τις μηχανές αυτές.

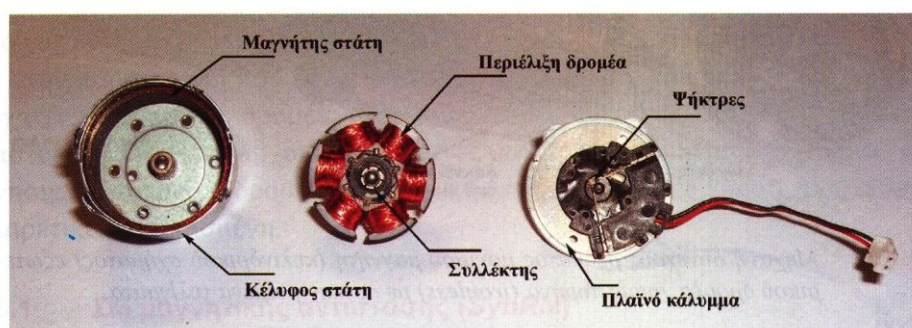
2.4 Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (commutator DC-PM machines)

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη παρατηρείται η ίδια διάκριση σε κατασκευαστικούς τύπους, όπως στις ΣΜ μόνιμου μαγνήτη. Εκείνο που διαφέρει στο σχεδιασμό τους είναι ότι στις μηχανές συνεχούς ρεύματος οι μαγνήτες είναι στο στάτη κι η τροφοδοσία των πηνίων του δρομέα γίνεται μέσω του συστήματος συλλέκτη-ψηκτρών ενώ οι ΣΜ είναι brushless κι οι μαγνήτες είναι στο δρομέα.

Στο Σχήμα 2.29 φαίνεται η διάκριση των μηχανών συνεχούς ρεύματος ανάλογα με τη θέση των μαγνητών και τη διεύθυνση του μαγνητικού τους άξονα.

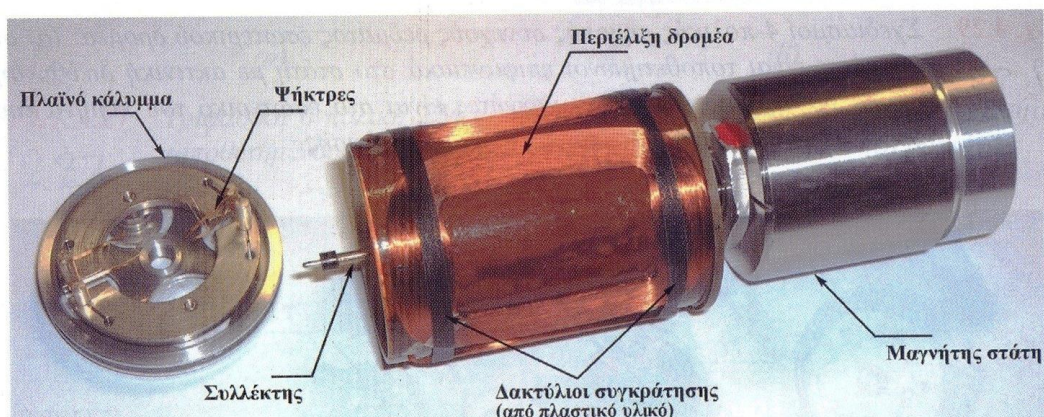


Σχήμα 4.29 Σχεδιασμό 4-πολικής μηχανής συνεχούς ρεύματος εσωτερικού δρομέα: (α) οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι επιφανειακά στο στάτη με ακτινική διεύθυνση άξονα μαγνήτισης (β) οι μαγνήτες είναι στο εσωτερικό του πυρήνα του στάτη με εφαπτομενική διεύθυνση άξονα μαγνήτισης.

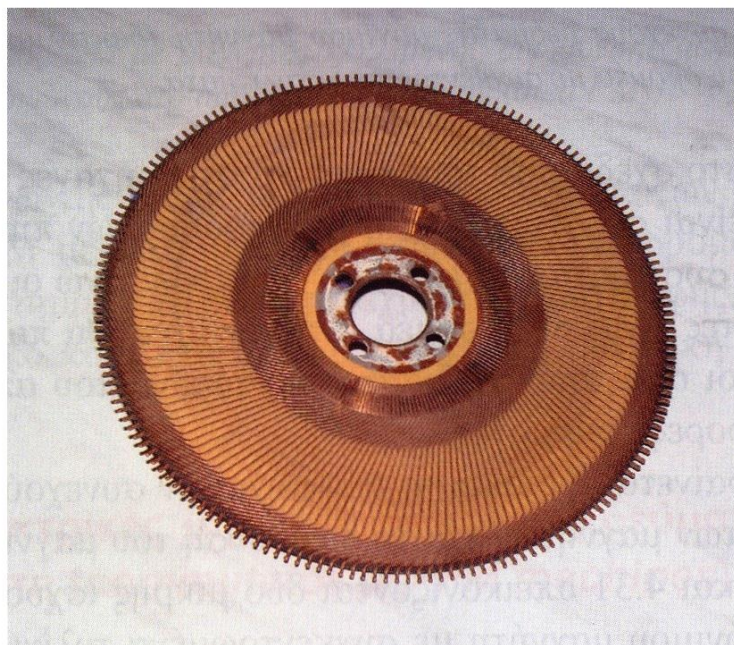


Σχήμα 2.30 Μηχανή συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (δακτυλοειδούς σχήματος) εσωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα

Στα σχήματα 2.30 & 2.31 απεικονίζονται δύο μικρής ισχύος μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη με συγκεντρωμένα τυλίγματα εσωτερικού κι εξωτερικού δρομέα, αντίστοιχα. Ειδικότερα, στη μηχανή του Σχήματος 2.31 ο δρομέας είναι ένας πλαστικός κύλινδρος χωρίς σιδηρομαγνητικό πυρήνα, πάνω στον οποίο είναι κολλημένα τα τυλίγματα. Κι οι δύο μηχανές έχουν μεταλλικές ψήκτρες οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη αγωγιμότητα και μηχανική αντοχή σε τριβές σε σύγκριση με τις ανθρακούχες ψήκτρες των συμβατικών μηχανών συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 2.31 Μηχανή συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (κυλινδρικού σχήματος) εξωτερικού δρομέα χωρίς πυρήνα με συγκεντρωμένα τυλίγματα



Σχήμα 2.32 Δρομέας μηχανής συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής με μη-σιδηρομαγνητικό πυρήνα.

Στο Σχήμα 2.32 απεικονίζεται ο δρομέας μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής. Ο πυρήνας του είναι από μη-σιδηρομαγνητικό υλικό κι έχει τη μορφή δίσκου.

2.5 Ηλεκτρικές μηχανές μαγνητικής αντίστασης

Οι ηλεκτρικές μηχανές μαγνητικής αντίστασης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις ΣΜ μαγνητικής αντίστασης και τις μηχανές μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης. Κοινά χαρακτηριστικά και των δύο κατηγοριών είναι:

- a) έχουν μία διέγερση στο στάτη (μηχανές απλής διέγερσης) και δεν έχουν μαγνήτες ή τυλίγματα στο δρομέα
- b) η παραγωγή της ροπής οφείλεται στη μαγνητική έλξη του πηνίου διέγερσης του στάτη προς τον σιδηρομαγνητικό πυρήνα του δρομέα.

Στις μηχανές μαγνητικής αντίστασης παρατηρείται η ίδια διάκριση σε κατασκευαστικούς τύπους, κατ' αντιστοιχία με τις προηγούμενες μηχανές. Μεγαλύτερη ποικιλία σχεδιασμών υπάρχει στις ΣΜ μαγνητικής αντίστασης, ως προς τους συνδυασμούς των φάσεων και των πόλων οι καθώς εξαρτώνται από τον αριθμό των δοντιών του στάτη και του δρομέα, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις τρεφόμενες μηχανές εσωτερικού δρομέα ακτινικής διεύθυνσης ροής. Αντίστοιχες σχεδιαστικές επιλογές υπάρχουν για μηχανές μαγνητικής αντίστασης γραμμικής κίνησης, εξωτερικού δρομέα ακτινικής ροής, ωστόσο η χρήση τους είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

2.5.1 ΣΜ μαγνητικής αντίστασης (SynRM)

Οι ΣΜ μαγνητικής αντίστασης έχουν κυλινδρικό στάτη και διανεμημένα τυλίγματα σε αυλάκια (όπως οι κλασικές επαγωγικές και σύγχρονες μηχανές). Η κατασκευή του δρομέα είναι τέτοια ώστε να παρουσιάζει διαφορετική αυτεπαγωγή L_{sd} & L_{sq} στους άξονες d και q αντίστοιχα. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ο δρομέας έχει έκτυπους πόλους και μεταβλητό διάκενο ή είναι κυλινδρικός με σταθερό μήκος διακένου αλλά ανισόροπη μαγνητική κατανομή.

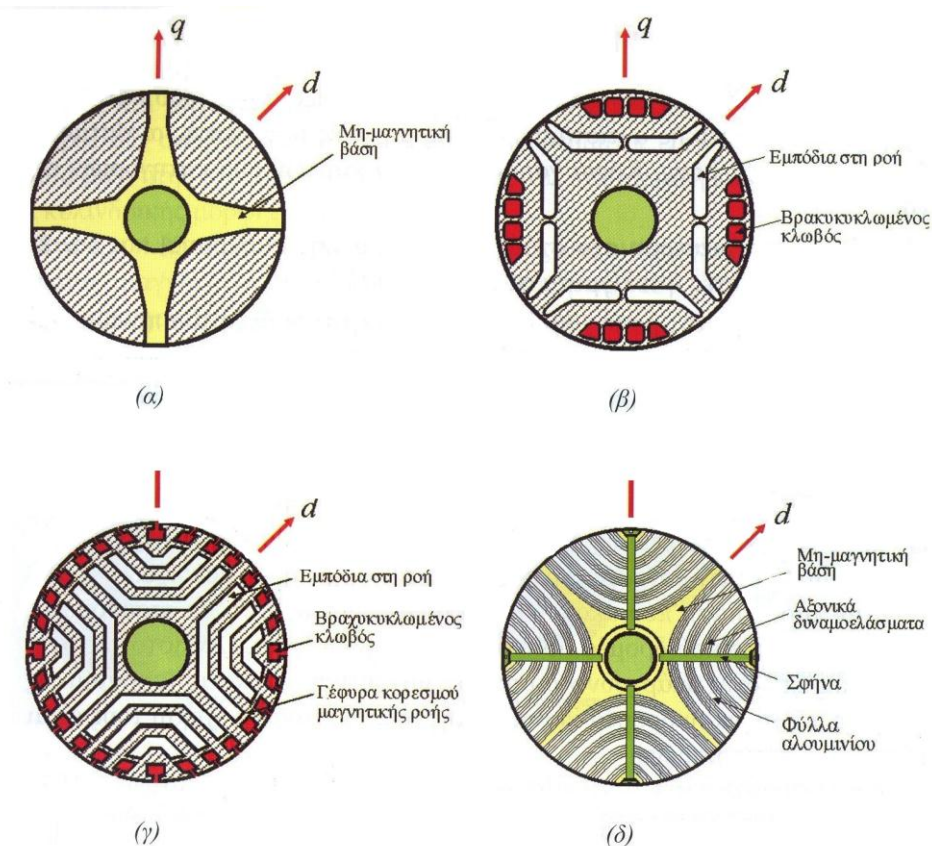
Η ροπή στις μηχανές μαγνητικής αντίστασης οφείλεται στη μαγνητική έλξη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη προς τους έκτυπους πόλους του δρομέα. Η ροπή είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των αυτεπαγωγών στους μαγνητικούς άξονες d και q. Η προσπάθεια βελτίωσης των κατασκευαστικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των μηχανών αυτών (αύξηση πυκνότητας ροπής, βαθμού απόδοσης και συντελεστή ισχύος) στοχεύει στην αύξηση του λόγου L_{md}/L_{mq} .

Στις μηχανές μαγνητικής αντίστασης δεν υπάρχουν μαγνήτες κατά τη διεύθυνση του μαγνητικού άξονα d κι έτσι δεν ισχύει $L_{md} > L_{mq}$ ή $L_{md}/L_{mq} > 1$. Δηλαδή, ισχύει η ίδια σχέση ανισότητας αυτεπαγωγών όπως στις κλασικές ΣΜ έκτυπων πόλων αλλά αντίστροφα απ' ότι ισχύει στις ΣΜ εσωτερικής θέσης μαγνητών στο δρομέα.

Οι βασικοί σχεδιασμοί των ΣΜ μαγνητικής αντίστασης είναι οι εξής:

2.5.1.1 ΣΜ μαγνητικής αντίστασης με κατατετμημένους πόλους δρομέα (SynRM with segmented poles)

Ο κάθε πόλος του δρομέα αποτελείται από ένα ή περισσότερα κόμματα από συμπαγή σίδηρο (segmented solid iron poles) που στερεώνονται σε ένα μη-μαγνητικό πλαίσιο στη βάση του δρομέα (Σχήμα 2.33.α). Το πλαίσιο αυτό είναι συνήθως από ειδικό πλαστικό και μέσα από αυτό περνά ο άξονας της μηχανής. Το μήκος του διακένου είναι σταθερό σε όλη την περιφέρεια του δρομέα.



Σχήμα 2.33 Σχεδιασμοί δρομέα 4-πολικής ΣΜ μαγνητικής αντίστασης: (α) κατατετμημένων πόλων, (β) με εμπόδια στη ροή (γ) με ανισότροπη κατανομή και συμβατικά δυναμοελάσματα (δ) με αξονικά δυναμοελάσματα

Ο λόγος των αυτεπαγωγών L_{md}/L_{mq} είναι σχετικά κι οι αρμονικές διακένου είναι ιδιαίτερα έντονες με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ταλαντώσεις ροπής και μεγάλες απώλειες σιδήρου στον πυρήνα. Η κατασκευή είναι απλή και οικονομική, ωστόσο έχει χαμηλή πυκνότητα ροπής, μικρή απόδοση ισχύος και χαμηλό συντελεστή ισχύος. Συνήθως είναι μηχανές μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται χαμηλό κατασκευαστικό κόστος. Σε αυτή τη κατηγορία μπορούμε να εντάξουμε και τις ΣΜ μαγνητικής αντίστασης με έκτυπου πόλους και συνεπώς μεταβλητό διάκενο (όπως οι κλασικές ΣΜ έκτυπων πόλων χωρίς τύλιγμα διέγερσης). Ο λόγος των αυτεπαγωγών μαγνήτισης L_{md}/L_{mq} των μηχανών αυτών είναι ακόμη μικρότερος κι η εφαρμογή τους είναι άκρως περιορισμένη.

2.5.1.2 ΣΜ μαγνητικής αντίστασης με εμπόδια στη ροή (*SynRM with flux barriers*)

Ο δρομέας είναι κυλινδρικής μορφής κι κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα. Προς τη διεύθυνση του q-άξονα υπάρχουν κατάλληλα ανοίγματα αέρα (εμπόδια στη ροή), τα οποία αυξάνουν τη μαγνητική πτώση τάσης κατά τη διεύθυνση αυτή κι εμποδίζουν την κυκλοφορία της μαγνητικής ροής (Σχήμα 2.33.β). Η κλίση των ανοιγμάτων αυτών είναι τέτοια, ώστε αφενός μεν να μειώνεται η ροή κατά τον q-άξονα κι αφετέρου να ενισχύεται η ροή κατά τον d-άξονα.

Οι τιμές του λόγου L_{md}/L_{mq} και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας είναι περίπου τα ίδια όπως στη ΣΜ μαγνητικής αντίστασης με κατατετημένους πόλους. Ωστόσο, η κατασκευή αυτή της μηχανής είναι περισσότερο στιβαρή κι έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα κι έτσι παρουσιάζει μικρές απώλειες σιδήρου κι ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Επίσης, κατά τη διεύθυνση του q-άξονα υπάρχουν κλειστά αυλάκια με μπάρες αλουμινίου που βραχυκυκλώνονται στα δύο άκρα της μηχανής με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Τα αυλάκια αυτά παίζουν διπλό ρόλο, είναι εμπόδια ροής στην κανονική λειτουργία κι επιτυγχάνουν αυτόνομη εκκίνηση της ΣΜ λειτουργώντας όπως ο βραχυκυκλωμένος κλωβός στην επαγωγική μηχανή. Έτσι, αφενός μεν ο κινητήρας έχει ικανοποιητική ροπή εκκίνησης, αφετέρου δε εξασφαλίζεται σταθερότητα ροπής κι αποσβένονται οι ταλαντώσεις (δηλαδή, ο βραχυκυκλωμένος κλωβός λειτουργεί ως κλωβός απόσβεσης).

2.5.1.3 ΣΜ μαγνητικής αντίστασης με ανισότροπη μαγνητική κατανομή στο δρομέα και συμβατικά δυναμοελάσματα (*SynMR with distributed anisotropy rotor and conventional laminators*)

Ο σχεδιασμός αυτός (Σχήμα 2.33.γ) είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο του Σχήματος 2.33.β, ωστόσο τα εμπόδια στη ροή κατά τον q-άξονα είναι πολύ περισσότερα κι ο βραχυκυκλωμένος κλωβός είναι ομοιόμορφα διατεταγμένος στην περιφέρεια του δρομέα. Επίσης, ανάμεσα στο άκρο κάθε εμποδίου ροής και το αυλάκι της μπάρας του κλωβού δημιουργείται μία μικρή γέφυρα από το σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα (γέφυρα κορεσμένης μαγνητικής ροής). Στους στενούς αυτούς δρόμους παρατηρείται έντονος κορεσμός, με αποτέλεσμα η αυτεπαγωγή μαγνήτισης L_{mq} να μειώνεται με την αύξηση της συνιστώσας I_{mq} του ρεύματος φορτίου της μηχανής έτσι, με την αύξηση του φορτίου, αυξάνει κι ο λόγος των αυτεπαγωγών L_{md}/L_{mq} άρα κι η ροπή της μηχανής αντίστοιχα. Με άλλα λόγια οι γέφυρες κορεσμού συντελούν στην μείωση της αυτεπαγωγής L_{mq} ώστε να αυξηθεί ο λόγος των αυτεπαγωγών και κατά συνέπεια η ονομαστική ροπή της μηχανής. Ο λόγος L_{md}/L_{mq} είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με τους προηγούμενους σχεδιασμούς μαγνητικής αντίστασης κι επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας ροπής, βαθμού απόδοσης και συντελεστή ισχύος. Οι αρμονικές διακένου είναι μικρότερες όπως κι οι ταλαντώσεις ροπής, οι απώλειες στο δρομέα κι ο ακουστικός θόρυβος. Ωστόσο, οι κατασκευή των δυναμοελασμάτων είναι δυσκολότερη και το κόστος συνολικά της μηχανής είναι μεγαλύτερο.

2.5.1.4 ΣΜ μαγνητικής αντίστασης με αξονικά δυναμοελάσματα (*ALA, SynRM with axially laminated anisotropic rotor*)

Στη μηχανή αυτή τα δυναμοελάσματα στο δρομέα είναι αξονικά τοποθετημένα προς τη διεύθυνση του d-άξονα (Σχήμα 2.33.δ). Συνήθως ανάμεσα στις στοιβάδες δυναμοελασμάτων τοποθετούνται φύλλα αλουμινίου που βραχυκυκλώνονται στα δύο άκρα του με δακτυλίους βραχυκύκλωσης και λειτουργούν όπως ο βραχυκυκλωμένος κλωβός για την αυτόνομη εκκίνηση της μηχανής και την απόσβεση των ταλαντώσεων ροπής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Τα δυναμοελάσματα με τα φύλλα του αλουμινίου ανάμεσά τους στερεώνονται με βίδες πάνω σε μη-μαγνητική βάση (συνήθως από αλουμίνιο ή ειδικό μονωτικό πλαστικό) που περιβάλλει τον άξονα της μηχανής.

Με το σχεδιασμό αυτό μπορούμε να πετύχουμε το μεγαλύτερο δυνατό λόγω αυτεπαγωγών L_{md}/L_{mq} με χαμηλές αρμονικές διακένου. Η κατασκευή των μηχανών αυτών είναι δυσκολότερη κι απαιτεί εξαιρετική προσοχή, γεγονός που δικαιολογεί το αυξημένο τους κόστος.

Σε ορισμένες ΣΜ μαγνητικής αντίστασης, για να μειωθεί περισσότερο το πεδίο στον q-άξονα, τοποθετούνται μόνιμοι μαγνήτες χαμηλής ενέργειας (συνήθως φερρίτες) σε κατάλληλα ανοίγματα του αέρα του πυρήνα του δρομέα. Η κατασκευή αυτή μεγαλώνει τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας στην περιοχή σταθερής ισχύος, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει κατά πολύ το κατασκευαστικό κόστος.

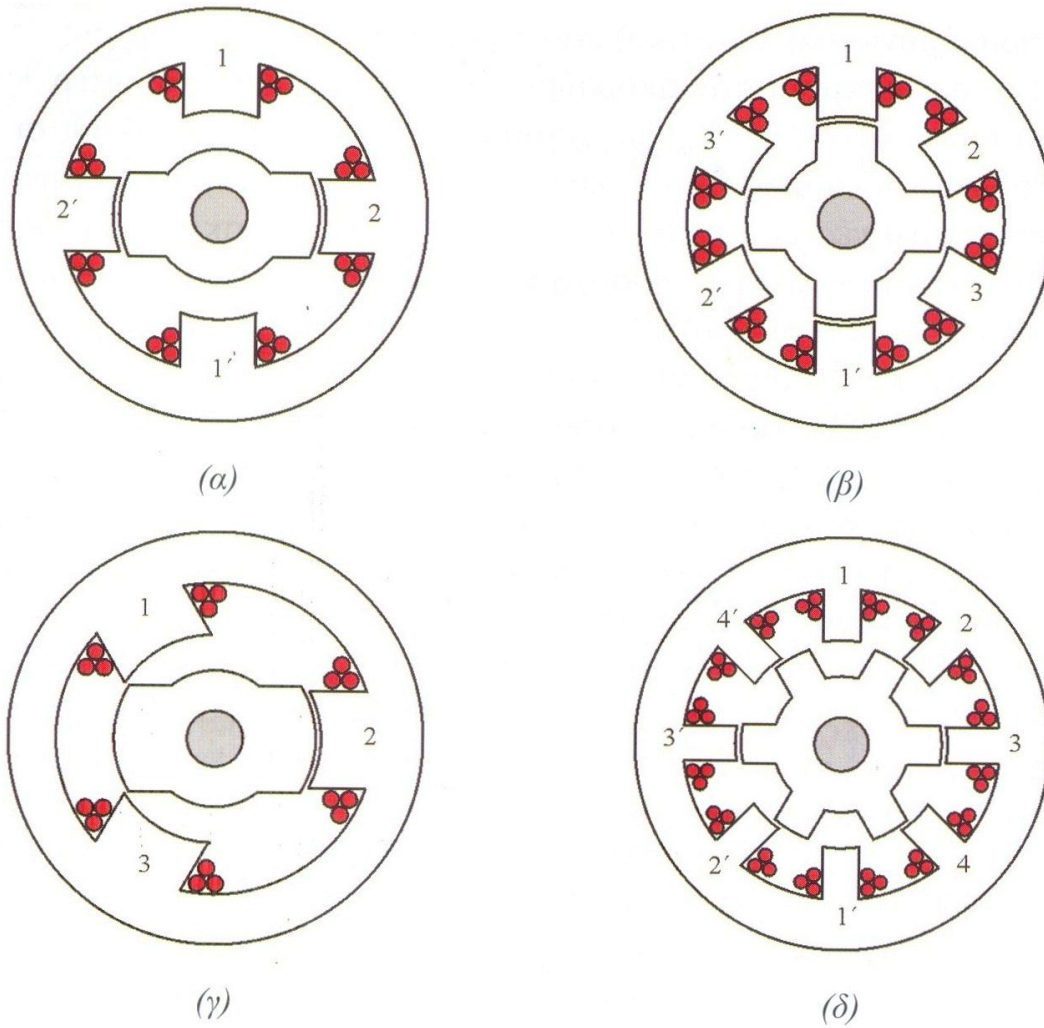
2.5.2 Μηχανές μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης (SRM)

Οι μηχανές αυτές έχουν έκτυπους πόλους στο στάτη και στο δρομέα. Οι πυρήνες τους κατασκευάζονται από δυναμοελάσματα κι ο στάτης έχει συγκεντρωμένα τυλίγματα γύρο από κάθε πόλο. Οι μηχανές αυτές χαρακτηρίζονται από τον αριθμό των φάσεων m του στάτη, τον αριθμό των δοντιών του στάτη N_s και τον αριθμό των δοντιών του δρομέα N_r . Έτσι, η μηχανή χαρακτηρίζεται ως m -φασική, N_s/N_r . Στο Σχήμα 2.34.β δίνονται διάφοροι σχεδιασμοί μηχανών μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης και στο Σχήμα 2.35 απεικονίζεται μία 4-φασική μηχανή 8/6.

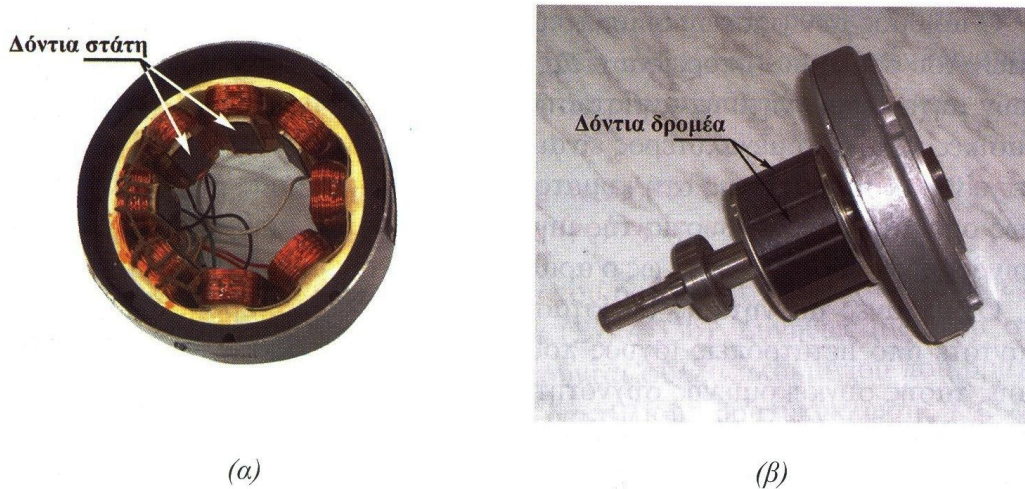
Ο αριθμός των φάσεων συμπίπτει ή είναι ανάλογος του αριθμού των δοντιών του στάτη και μπορεί να είναι μεγαλύτερος από τρία. Δηλαδή, υπάρχουν μηχανές μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης 4-φασικές, 5-φασικές κλπ. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των φάσεων, τόσο μικρότερες είναι οι ταλαντώσεις στην κυματομορφή της στιγμιαίας ροπής, άρα κι ομαλότερη η λειτουργία της μηχανής. Ακόμη, ο αριθμός των δοντιών του δρομέα χαρακτηρίζεται ως ο αριθμός πόλων της μηχανής.

Οι μηχανές μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης οδηγούνται πάντοτε από μετατροπείς ισχύος που τροφοδοτούν τη κάθε φάση με παλμούς τάσης συγκεκριμένης συχνότητας και χρονικής διάρκειας παλμού. Αναφέρθηκε νωρίτερα πως ο μεγάλος αριθμός φάσεων μικρότερες ταλαντώσεις ροπής, ωστόσο αυτό οδηγεί σε αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονικών διακοπών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν και συνεπώς στην αύξηση του κόστους την μονάδας οδήγησης.

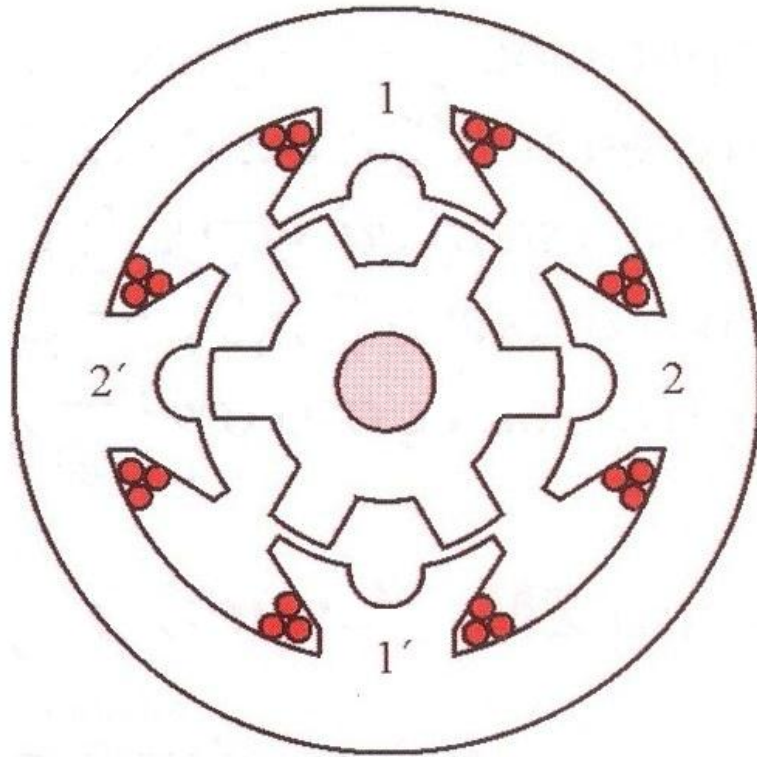
Παραλλαγές στους παραπάνω σχεδιασμούς μπορούν να προκύψουν αυξάνοντας τεχνητά τον αριθμό των δοντιών ανά πόλο στάτη. Θυμίζουμε ότι η τεχνική αυτή είναι παρόμοια με αυτή που εφαρμόζεται για τη μείωση της ροπής cogging στις ΣΜ μόνιμου μαγνήτη (Παράγραφος 2.3.1). Στο Σχήμα 4.36 έχουμε μία 2-φασική μηχανή 4/6 με διακλαδωμένα δόντια στάτη (bifurcated stator teeth). Η μηχανή αυτή έχει λειτουργικά τον ίδιο αριθμό δοντιών στάτη και δρομέα με την 4-φασική μηχανή του Σχήματος 2.34.δ. Το σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι στη μηχανή του Σχήματος 2.36 χρησιμοποιούνται λιγότεροι ηλεκτρονικοί διακόπτες στη μονάδα οδήγησης, ωστόσο η κατασκευή είναι δυσκολότερη με αποτέλεσμα το κόστος της μηχανής να είναι μεγαλύτερο.



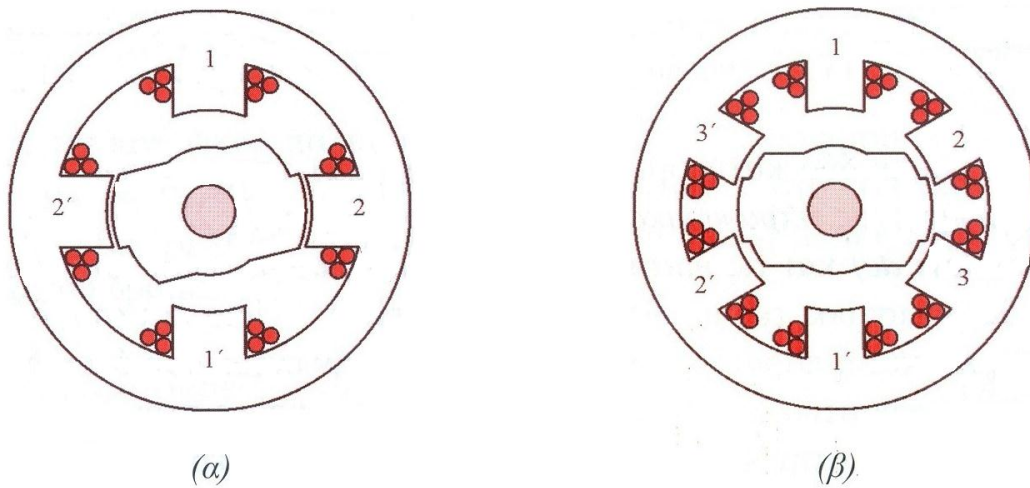
Σχήμα 2.34 Μηχανές μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης: (α) 2-φασική 4/2 (β) 3-φασική 6/4 (γ) 3-φασική 3/2 (δ) 4-φασική 8/6



Σχήμα 2.35 Μηχανή μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης 4-φασική, 8/6: (α) στάτης (β) δρομέας



Σχήμα 2.36 Μηχανή μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης 2-φασική 4/6 με διακλαδωμένα δόντια στάτη



Σχήμα 2.37 Μηχανές μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης με βηματικό διάκενο: (α) 2-φασική 4/2 με απλό βηματικό διάκενο (β) 3-φασική 6/2 με διπλό βηματικό διάκενο

Επειδή το κόστος της μονάδας οδήγησης εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ηλεκτρονικών διακοπών, είναι προφανές ότι θα είναι χαμηλό σε μηχανές με μικρό αριθμό φάσεων (για παράδειγμα, στην 1-φασική και 2-φασική). Ωστόσο, στις περιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται

σοβαρά προβλήματα ομαλής εκκίνησης. Αυτό αντιμετωπίζεται κατασκευάζοντας το δρομέα της μηχανής με βηματικό διάκενο (stepped gap), όπως στο σχεδιασμό του Σχήματος 4.37.α. Μάλιστα, το βηματικό βοηθά στη μείωση των ταλαντώσεων ροπής σε πολυφασικές μηχανές, όπως στο σχεδιασμό του Σχήματος 4.37.β.

2.6 Τεχνικές ελέγχου ΣΜ μόνιμου μαγνήτη

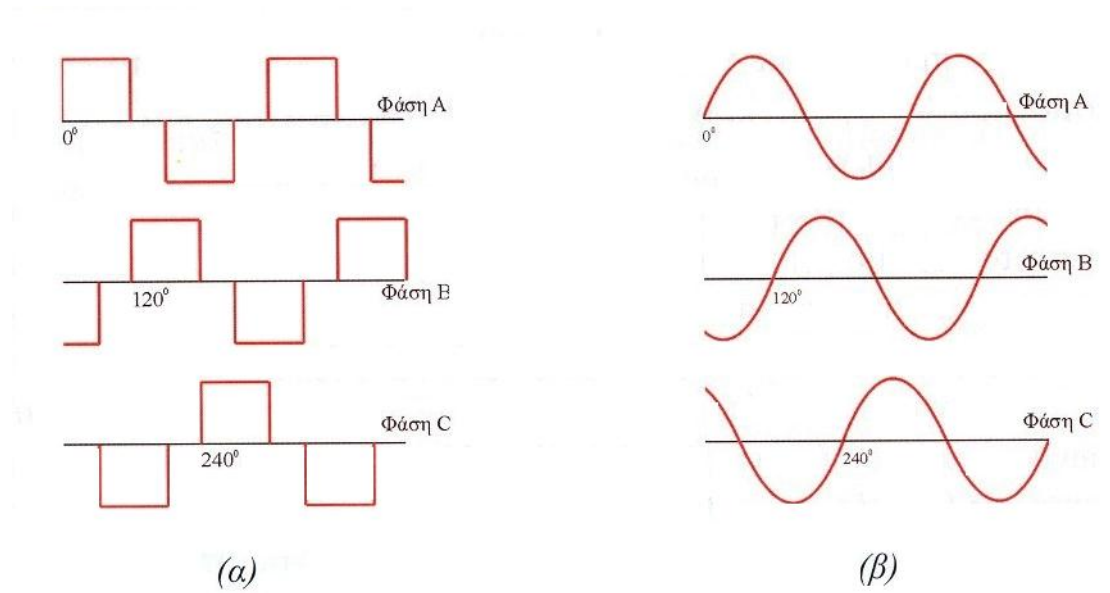
Οι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη που χρησιμοποιούνται σε σερβοκινητήρια συστήματα οδηγούνται από στατικούς μετατροπείς συχνότητας. Το είδος του μετατροπέα έχει άμεση σχέση με την κατασκευή της μηχανής κι επηρεάζει σημαντικά την λειτουργική της συμπεριφορά. Εάν θεωρήσουμε το σερβοκινητήριο σύστημα (κινητήρας και μονάδα οδήγησης) σαν ενιαίο σύστημα, μπορούμε να κάνουμε ένα διαχωρισμό των μηχανών ανάλογα με την τεχνική ελέγχου.

Διακρίνουμε δύο κατηγορίες ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με την τεχνική ελέγχου: τις τετραγωνικού παλμού ή τραπεζοειδείς ΣΜ μόνιμου μαγνήτη (brushless dc) και τις ημιτονοειδείς ΣΜ μόνιμου μαγνήτη (brushless ac). Το κύκλωμα ισχύος της μονάδας είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις. Αν κι η παραπάνω διάκριση αφήνει την εντύπωση ότι οι διαφορές είναι κατασκευαστικές, ωστόσο η διαφορά είναι κυρίως στην τεχνική ελέγχου και μάλιστα στην κυματομορφή του ρεύματος διέγερσης. Εντούτοις, σε κάθε τεχνική ελέγχου προτιμούνται κάποιες συγκεκριμένου τύπου μηχανές, γιατί συνεργάζονται καλύτερα με την τεχνική ελέγχου και προσφέρουν λειτουργικά πλεονεκτήματα.

2.6.1 Τετραγωνικού παλμού ή τραπεζοειδής ΣΜ μόνιμου μαγνήτη (squarewave PM ή trapezoidal PM ή γενικά brushless dc machine)

Τα ρεύματα διέγερσης στην τετραγωνικού παλμού ή τραπεζοειδή ΣΜ μόνιμου μαγνήτη είναι συμμετρικά, τριφασικά, τετραγωνικής μορφής όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.38.α κι η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (δηλαδή η τάση που επάγει ο μαγνήτης στο κύκλωμα του στάτη) είναι τραπεζοειδούς μορφής. Η πολικότητα του συνεχούς ρεύματος τροφοδοσίας κάθε φάσης αλλάζει σε συγχρονισμό με την κίνηση του μαγνήτη, ώστε η παραγόμενη ροπή να έχει σταθερό πρόσημο. Η τεχνική ελέγχου του συστήματος οδήγησης δίνει στη μηχανή την ίδια εξίσωση και χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας με αυτή των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Γι' αυτόν τον λόγο οι μηχανές αυτές είναι γνωστές ως «brushless dc».

Χαρακτηριστικό των μηχανών αυτών είναι η απαίτηση για σταθερή τιμή αυτεπαγωγής μαγνήτισης στο διάκενο (δηλαδή $L_{sd} = L_{sq}$) και γι' αυτό το λόγο προτιμούνται οι ΣΜ με μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα.



Σχήμα 2.38 Κυματομορφές ρευμάτων διέγερσης για : (α) τετραγωνικού παλμού ή τραπεζοειδής ΣΜ μόνιμου μαγνήτη (β) ημιτονοειδής ΣΜ μόνιμου μαγνήτη

2.6.2 Ημιτονοειδής ΣΜ μόνιμου μαγνήτη (*sinewave PM ή brushless ac machine*)

Τα ρεύματα διέγερσης στην ημιτονοειδή ΣΜ μόνιμου μαγνήτη είναι συμμετρικά, τριφασικά, ημιτονοειδούς μορφής (Σχήμα 2.38.β) όπως επίσης κι η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη. Το σημαντικό πλεονέκτημα των ημιτονοειδών ΣΜ έναντι των τετραγωνικού παλμού είναι οι σημαντικά χαμηλότερες αρμονικές διακένου και συνεπώς σημαντικά χαμηλότερες ταλαντώσεις ροπής.

Η ημιτονοειδής μηχανή έχει τη λειτουργική συμπεριφορά της κλασικής ΣΜ και γι' αυτό το λόγο είναι γνωστή ως «brushless ac μηχανή». Οι κατασκευαστικοί τύποι ΣΜ μόνιμου μαγνήτη με διαφορετικές τιμές αυτεπαγωγής στους d και q μαγνητικούς άξονες έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα στις ημιτονοειδής μηχανές, γιατί εκμεταλλεύονται την έκτυπη συμπεριφορά των πόλων του δρομέα. Αλλά συνήθως προτιμούνται οι ΣΜ με επιφανειακή θέση μαγνητών στο δρομέα γιατί είναι οικονομικότεροι.

3

Διανυσματικός έλεγχος ηλεκτρικών μηχανών

3.1 Γενικά

Η βασική αρχή του διανυσματικού ελέγχου των ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στο διαχωρισμό του ελέγχου της ροπής από τον έλεγχο του πεδίου διέγερσης. Με αυτόν τον τρόπο ο έλεγχος των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος προσεγγίζει τον έλεγχο των μηχανών συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης.

Για να γίνει κατανοητός ο διανυσματικός έλεγχος κι ο τρόπος σχεδιασμού και λειτουργίας των μονάδων οδήγησης, θα πρέπει να γνωρίζουμε το μηχανισμό παραγωγής της ροπής στις ηλεκτρικές μηχανές. Βασικό εργαλείο αποτελεί η θεωρία των διανυσμάτων χώρου (Space-Phasor Theory). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, όλα τα ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη της μηχανής αποδίδονται ως διανύσματα χώρου, και μάλιστα σε οποιοδήποτε σύστημα αξόνων αναφοράς. Επιπλέον, η θεωρία των διανυσμάτων χώρου βοηθά στην ανάλυση της λειτουργίας κάθε τύπου μηχανής θέτοντας τις βάσεις για την κατανόηση της γενικευμένης θεωρίας ηλεκτρικών μηχανών (generalized machine theory).

Στην ενότητα αυτή δίνεται ο ορισμός των διανυσμάτων χώρου κι αναλύεται η εφαρμογή της θεωρίας των διανυσμάτων χώρου σε μία γενικευμένη μονοφασική και τριφασική ηλεκτρική μηχανή με συγκεντρωμένη και κατανεμημένη περιέλιξη. Επίσης δίνονται οι πίνακες μετασχηματισμού των ηλεκτρικών και μαγνητικών μεγεθών σε ένα γενικό σύστημα αξόνων

αναφοράς, μελετάται ο μηχανισμός παραγωγής της ροπής και παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του διανυσματικού ελέγχου στις ηλεκτρικές μηχανές.

3.2 Ορισμός του διανύσματος χώρου

Είναι γνωστό ότι ένα ημιτονοειδές σήμα

$$x(t) = \hat{X}_p \cos(\omega t + \phi) \quad (3.1)$$

μπορεί να γραφεί ως το πραγματικό μέρος ενός εκθετικού σήματος

$$x(t) = \text{Re}\{\hat{X}_p e^{\pm j(\omega t + \phi)}\} \quad (3.2)$$

Όπου $e^{\pm j\omega t}$ ο τύπος του Euler

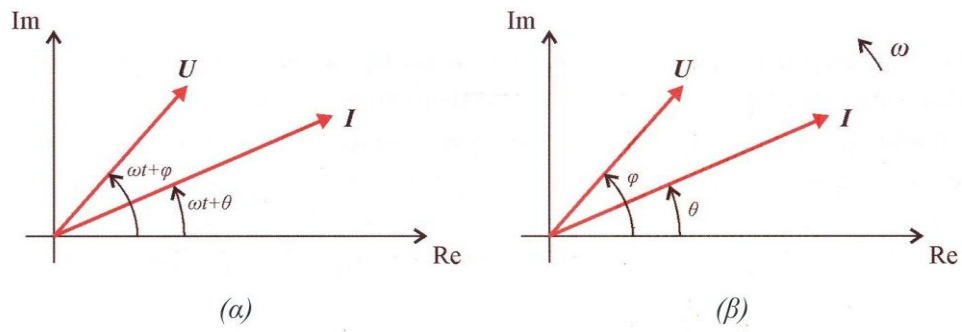
$$e^{\pm j\omega t} = \cos \omega t \pm j \sin \omega t \quad (3.3)$$

Το εκθετικό σήμα $\hat{X}_p e^{\pm j(\omega t + \phi)}$ είναι μία μιγαδική ποσότητα η οποία μπορεί να παρασταθεί ως διάνυσμα στο μιγαδικό επίπεδο

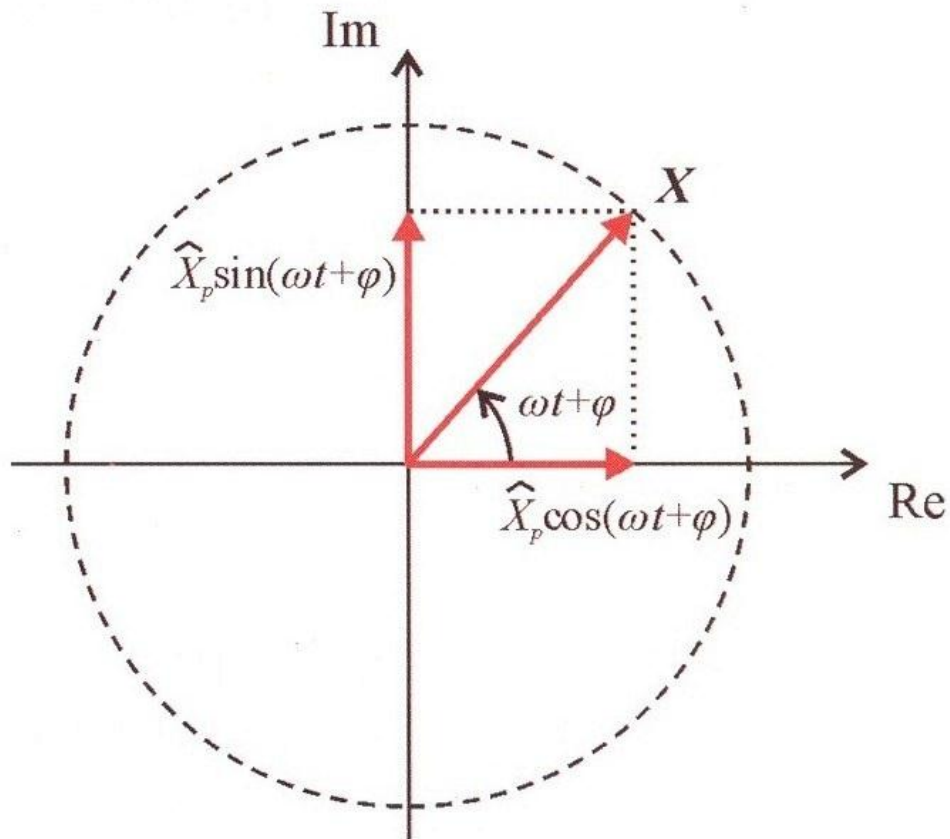
$$\mathbf{X} = \hat{X}_p e^{\pm j(\omega t + \phi)} \quad (3.4)$$

Με άλλα λόγια, το ημιτονοειδές σήμα $x(t)$ είναι η προβολή του διανύσματος \mathbf{X} στον πραγματικό άξονα του μιγαδικού επιπέδου. Το διάνυσμα αυτό θα έχει μέτρο $X_p = |\mathbf{X}|$ κι όρισμα $(\omega t + \phi)$, το οποίο είναι η γωνία του διανύσματος με τον πραγματικό άξονα. Επειδή η γωνία αυτή μεταβάλλεται με το χρόνο, το διάνυσμα στρέφεται με το χρόνο με γωνιακή ταχύτητα ω και γι' αυτό το λόγο ονομάζεται στρεφόμενο διάνυσμα χρόνου (time phazor ή time vector). Επίσης, επειδή το πλάτος του διανύσματος είναι σταθερό, το πέρας του διανύσματος διαγράφει ένα κύκλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Γι' αυτό το λόγο πολλές φορές ονομάζεται κυκλικό διάνυσμα χρόνου (time circular vector).

Όταν δύο ημιτονοειδή μεγέθη έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα ω , τα αντίστοιχα διανύσματα περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα ω κι η σχετική τους θέση παραμένει αμετάβλητη. Αν ένας παρατηρητής είναι ακίνητος, τότε τα βλέπει ως στρεφόμενα διανύσματα ενώ αν περιστρέφεται μαζί τους με γωνιακή ταχύτητα ω , τότε τα αντιλαμβάνεται ως ακίνητα διανύσματα. Ο πρώτος παρατηρητής είναι στο πεδίο του χρόνου, ενώ ο δεύτερος παρατηρητής είναι στο πεδίο της συχνότητας.



Σχήμα 3.1 Στρεφόμενο διάνυσμα στο πεδίο του χρόνου κι η σχέση του με το ημιτονοειδές σήμα



Σχήμα 3.2 Στρεφόμενα διανύσματα (α) στο πεδίο του χρόνου (β) στο πεδίο της συχνότητας

Για παράδειγμα, αν οι χρονικές συναρτήσεις της τάσης και του ρεύματος είναι αντίστοιχα

$$u(t) = \hat{U}_p \cos(\omega t + \phi) \quad (3.5)$$

και

$$i(t) = \hat{I}_p \cos(\omega t + \theta) \quad (3.6)$$

τα διανύσματα στο πεδίο του χρόνου όπως τα αντιλαμβάνεται ένας ακίνητος παρατηρητής είναι

$$\mathbf{U} = \hat{U}_p e^{j(\omega t + \phi)} \quad (3.7)$$

και

$$\mathbf{I} = \hat{I}_p e^{j(\omega t + \theta)} \quad (3.8)$$

ενώ τα διανύσματα στο πεδίο της συχνότητας, όπως τα αντιλαμβάνεται ο στρεφόμενος με ταχύτητα ω παρατηρητής είναι

$$\mathbf{U} = \hat{U}_p e^{j\phi} \quad (3.9)$$

και

$$\mathbf{I} = \hat{I}_p e^{j\theta} \quad (3.10)$$

Έτσι, ο παρατηρητής ο οποίος στρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα ω , βλέπει τα δύο διανύσματα ακίνητα και μετατοπισμένα το ένα ως προς το άλλο κατά γωνία $\phi - \theta$. Επίσης, ο ακίνητος παρατηρητής βλέπει ότι οι προβολές των διανυσμάτων στον πραγματικό άξονα είναι χρονικά μεταβαλλόμενες ποσότητες, ενώ ο στρεφόμενος παρατηρητής τις βλέπει ως χρονικά αμετάβλητες. Αυτό συμβαίνει γιατί μαζί με τον παρατηρητή στρέφεται με την ίδια ταχύτητα και το σύστημα αξόνων.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας απαλείφει τον χρόνο t από τα στρεφόμενα διανύσματα (Σχήμα 3.2). Στο πεδίο του χρόνου οι άξονες συντεταγμένων είναι σταθεροί κι η γωνία του διανύσματος μεταβάλλεται με ταχύτητα ω , ενώ στο πεδίο της συχνότητας οι άξονες στρέφονται με ταχύτητα ω κι η γωνία του διανύσματος παραμένει σταθερή ως προς τους άξονες αυτούς.

Στις στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος ένας σημαντικός αριθμός φυσικών μεγεθών (μαγνητική επαγωγή, μαγνητική ροή, μαγνητεγερτική δύναμη) είναι περιοδικά σήματα χώρου. Τα μεγέθη αυτά δεν είναι πάντοτε ημιτονοειδή, ωστόσο μπορούν να αναλυθούν σε μία σειρά ημιτονοειδών αρμονικών συνιστωσών. Όπως παριστάνουμε τα ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενα μεγέθη στο χρόνο με διανύσματα χρόνου, μπορούμε να παραστήσουμε τα ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενα μεγέθη στο χώρο με διανύσματα χώρου (space vectors).

Όπως και στα διανύσματα χρόνου, έτσι και τα διανύσματα χώρου έχουν μιγαδική μορφή κι απεικονίζονται στο μιγαδικό επίπεδο. Τα διανύσματα χώρου μπορεί να είναι στρεφόμενα ή στατικά, σε αντίθεση με τα διανύσματα χρόνου τα οποία είναι πάντοτε στρεφόμενα στο πεδίο του χρόνου, όταν απεικονίζουν ημιτονοειδή σήματα. Ωστόσο, η γωνία στροφής ενός διανύσματος χρόνου αντιστοιχεί στην χρονική γωνία φάσης, ενώ η γωνία στροφής ενός

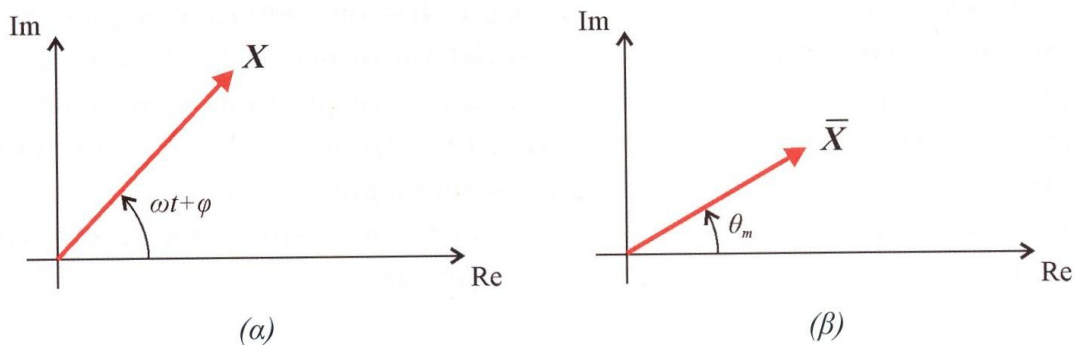
διανύσματος χώρου εξαρτάται από τη θέση στο χώρο του κυκλώματος που παράγει το αντίστοιχο διάνυσμα. Για παράδειγμα, όταν το διάνυσμα χρόνου στο πεδίο της συχνότητας του ημιτονοειδούς σήματος $x(t) = \hat{X}_p \cos(\omega t + \phi)$ είναι

$$\mathbf{X} = \hat{X}_p e^{j\phi} \quad (3.11)$$

και το αντίστοιχο διάνυσμα χώρου είναι

$$\mathbf{X} = x(t)e^{j\theta_m} = [\hat{X}_p \cos(\omega t + \phi)]e^{j\theta_m} \quad (3.12)$$

όπου θ_m η γωνία θέσης το διανύσματος χώρου ως προς τον οριζόντιο άξονα του συστήματος αξόνων αναφοράς (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση του ημιτονοειδούς σήματος $x(t) = X_p \cos(\omega t + \phi)$ με (α) διάνυσμα χρόνου (β) διάνυσμα χώρου για τη χρονική στιγμή t . Το διάνυσμα χρόνου είναι στρεφόμενο, ενώ το διάνυσμα χώρου στατικό.

Για να διακρίνονται οι δύο τύποι διανυσμάτων, θα συμβολίζονται τα διανύσματα χρόνου με έντονα κεφαλαία γράμματα (π.χ. \mathbf{X}) και τα διανύσματα χώρου με παύλα κι έντονα κεφαλαία γράμματα (π.χ. $\bar{\mathbf{X}}$).

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (3.11) και (3.12) συμπεραίνουμε ότι το διάνυσμα χρόνου είναι στρεφόμενο στο πεδίο του χρόνου με γωνιακή ταχύτητα ω , ενώ το διάνυσμα χώρου είναι στατικό με γωνία φάσης στο χώρο θ_m . Επίσης, το πλάτος του διανύσματος χρόνου είναι σταθερό \hat{X}_p , ενώ το πλάτος του διανύσματος χώρου είναι χρονικά μεταβαλλόμενο $\hat{X}_p \cos(\omega t + \phi)$.

Συνήθως, το σύστημα αξόνων αναφοράς των διανυσμάτων χώρου επιλέγεται σε τέτοια θέση ώστε να απλουστεύονται οι υπολογισμοί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα μπορούσε να επιλεγεί ένα σύστημα αξόνων όπου ο οριζόντιος άξονας (πραγματικός άξονας του μιγαδικού επιπέδου συντεταγμένων) να συμπίπτει με τη διεύθυνση του διανύσματος χώρου. Τότε η

γωνία φάσης του χώρου θα ήταν $\theta_m=0$, οπότε και το διάνυσμα χώρου του χρονικά μεταβαλλόμενου ημιτονοειδούς σήματος γίνεται

$$\bar{\mathbf{X}} = x(t)e^{j0} = \hat{X}_p[\cos(\omega t + \phi)]e^{j0} \quad (3.13)$$

Αν το διάνυσμα χώρου ήταν στρεφόμενο στο χώρο με γωνιακή ταχύτητα ω , τότε η εξίσωσή του θα είναι

$$\bar{\mathbf{X}} = \hat{X}_p e^{j(\omega t + \phi + \theta_m)} \quad (3.14)$$

Για κάθε χρονική στιγμή t , η θέση του διανύσματος $\bar{\mathbf{X}}$ στο χώρο σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα θα είναι $\theta_m = \omega t + \phi$.

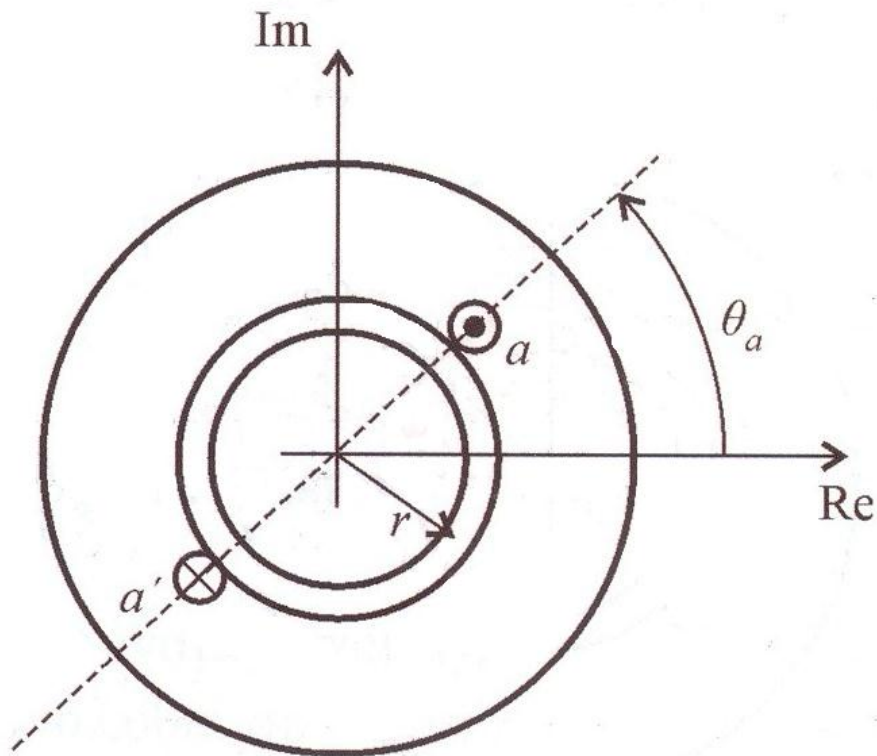
Παρατηρώντας τις εξισώσεις (3.4) και (3.14) συμπεραίνουμε ότι τόσο τα διανύσματα χρόνου, όσο και τα διανύσματα χώρου δίνονται από την ίδιας μορφής εξίσωση. Συνεπώς, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι το στρεφόμενο διάνυσμα χρόνου είναι στρεφόμενο διάνυσμα χώρου αρκεί να θεωρήσουμε ότι η διαφορά φάσης ϕ του διανύσματος χρόνου είναι η γωνία στροφής του διανύσματος χώρου. Αν η γωνία στροφής θ_m στην εξίσωση (3.14) είναι σταθερή, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το διάνυσμα χώρου γίνεται διάνυσμα χρόνου, ενώ αν δούμε το διάνυσμα χρόνου σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή ($\omega t = \text{σταθ}$), τότε το αντιλαμβανόμαστε ως ένα ακίνητο διάνυσμα χρόνου με ημιτονοειδή μεταβολή στο χώρο.

3.3 Εφαρμογή της θεωρίας των διανυσμάτων χώρου σε μονοφασική συγκεντρωμένη περιέλιξη στάτη.

Στις ηλεκτρικές μηχανές τα τυλίγματα της περιέλιξης διανέμονται σε αυλάκια στον πυρήνα του στάτη και του δρομέα, ώστε να μειώνονται οι αρμονικές χώρου του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα διεγείρονται από ηλεκτρικό ρεύμα και το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο στη μηχανή είναι το άθροισμα των πεδίων που παράγει χωριστά το κάθε τύλιγμα.

Για τη μελέτη των μαγνητικών πεδίων δεν είναι απαραίτητο να είναι γνωστός ο τρόπος περιέλιξης, αλλά μόνο η ρευματική κατανομή στα αυλάκια. Επίσης, αν θεωρήσουμε ότι οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα έχουν πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, ώστε να είναι σχεδόν αμελητέα η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό τους, τότε όλη η ένταση του πεδίου αναπτύσσεται στο διάκενο αέρα μεταξύ των δύο πυρήνων. Συνεπώς, η ένταση του πεδίου κι η αντίστοιχη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο είναι τα σημαντικότερα μαγνητικά μεγέθη στη μηχανή. Τα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα καθώς και το συνιστάμενο πεδίο μεταβάλλονται στο χρόνο και στο χώρο κι η μεταβολή αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας της μηχανής.

Για να υπολογιστεί το συνολικό μαγνητικό πεδίο σε μονοφασική συγκεντρωμένη περιέλιξη, αρκεί να προσδιοριστεί το πεδίο που παράγει χωριστά η κάθε συστάδα σπειρών που τυλίγεται σε κάθε ζεύγος αυλακιών (στάτη και δρομέα) και στη συνέχεια να αθροιστούν τα πεδία που παράγουν όλες οι συστάδες. Γι' αυτό το λόγο θα θεωρήσουμε μια απλοποιημένη ηλεκτρική μηχανή με ένα τύλιγμα διέγερσης πλήρους βήματος α - α' της φάσης sA (συγκεντρωμένη περιέλιξη) αρχικά μόνο στο στάτη. Επίσης, θεωρούμε ότι ο στάτης κι ο δρομέας είναι κυλινδρικού πυρήνα και το διάκενο αέρα θεωρείται ομοιόμορφο (σταθερό μήκος διακένου, δηλαδή αγνοείται στον υπολογισμό του πεδίου η επίδραση των αυλακιών). Η μηχανή είναι διπολική και το σύστημα αξόνων αναφοράς των διανυσμάτων χώρου επιλέγεται ώστε το αυλάκι α να είναι μετατοπισμένο κατά γωνία θ_a ως προς τον οριζόντιο άξονα αναφοράς (πραγματικό άξονα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4 Συγκεντρωμένη περιέλιξη πλήρους βήματος της φάσης sA σε απλοποιημένη διπολική ηλεκτρική μηχανή

Αν εφαρμόσουμε το νόμο του Ampere σε μια κλειστή διαδρομή (Σχήμα 3.5.α)

$$\int_S J \cdot ds = \int_C H \cdot dl \quad (3.15)$$

κι αφού δεχθήκαμε ότι η ένταση του πεδίου στο σίδηρο είναι αμελητέα, η μαγνητεγερτική δύναμη σε κάθε θέση θ είναι

$$f_s(\theta, t) = \begin{cases} -\frac{1}{2} N_\alpha i_\alpha(t), & \theta_\alpha < \theta < \theta_\alpha + \pi \\ \frac{1}{2} N_\alpha i_\alpha(t), & \theta_\alpha + \pi < \theta < \theta_\alpha + 2\pi \end{cases} \quad (3.16)$$

όπου N_α είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου και $i_\alpha(t)$ το ρεύμα διέγερσης.

Η μαγνητεγερτική δύναμη έχει τη μορφή τετραγωνικού παλμού (Σχήμα 3.5.β) και μπορεί να αναλυθεί σε σειρά Fourier με άπειρο αριθμό αρμονικών συνιστωσών.

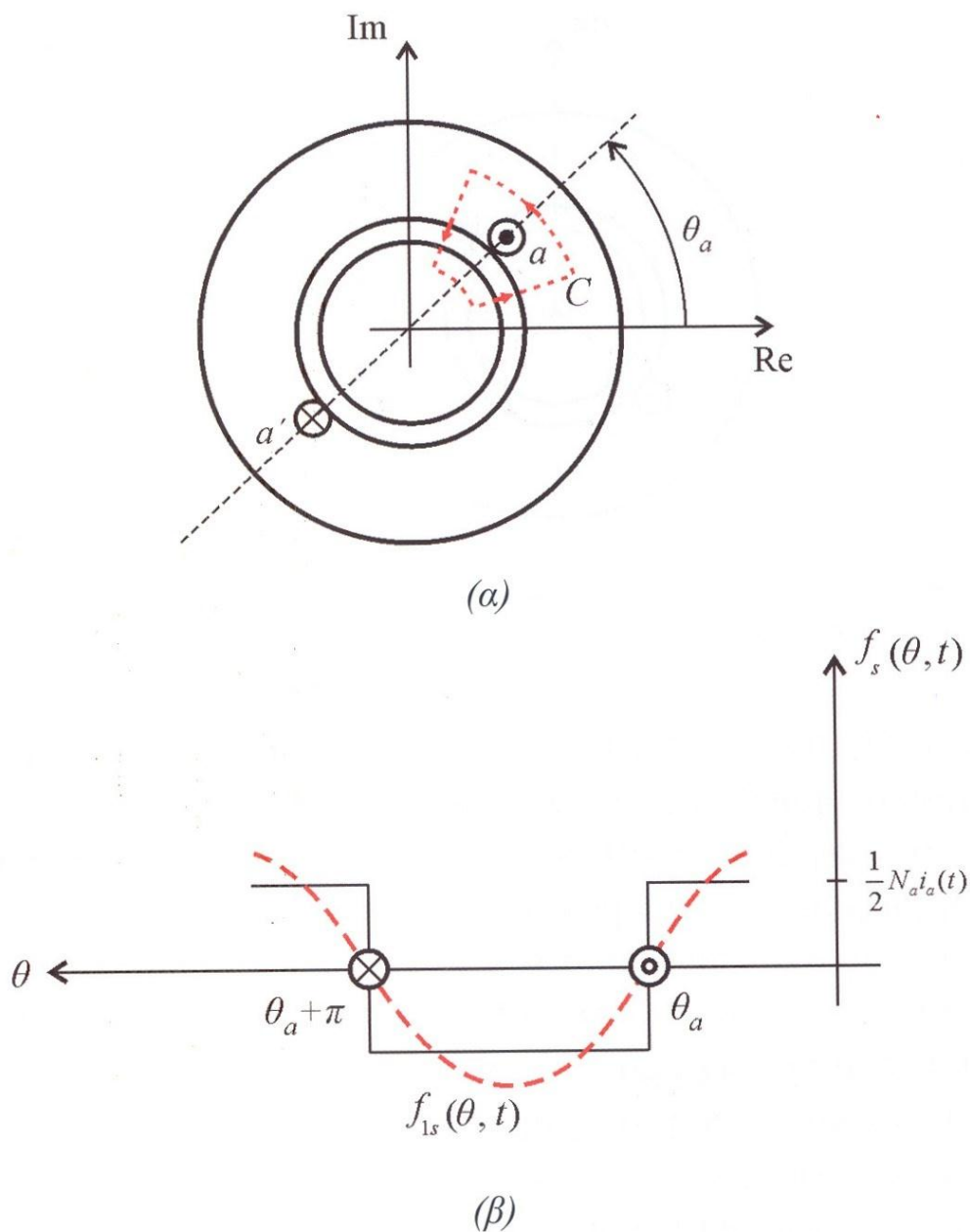
$$f_s(\theta, t) = \frac{2}{\pi} N_\alpha i_\alpha(t) \left[\sin(\theta_\alpha - \theta) + \frac{1}{3} \sin[3(\theta_\alpha - \theta)] + \frac{1}{5} \sin[5(\theta_\alpha - \theta)] + \dots \right] \quad (3.17)$$

Η κατανομή της μαγνητεγερτικής δύναμης έχει μόνο περιττής τάξης αρμονικές κι η θεμελιώδης αρμονική είναι

$$f_{1s}(\theta, t) = \frac{2}{\pi} N_\alpha i_\alpha(t) \sin(\theta_\alpha - \theta) = F_{1s} \sin(\theta_\alpha - \theta) \quad (3.18)$$

όπου

$$F_{1s} = \frac{2}{\pi} N_\alpha i_\alpha(t) \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.5 Συγκεντρωμένη περιέλιξη πλήρους βήματος της φάσης sA του στάτη (τύλιγμα α-α') σε απλοποιημένη διπολική ηλεκτρική μηχανή (α) κλειστή διαδρομή C για τον υπολογισμό της μαγνητεγερτικής δύναμης (β) κατανομή της μαγνητεγερτικής δύναμης κατά μήκος του διακένου της μηχανής.

Στη συνέχεια θα αγνοήσουμε τις ανώτερης τάξης αρμονικές χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης και θα θεωρήσουμε ότι το πεδίο στη μηχανή είναι ημιτονοειδές. Συνεπώς η Εξίσωση (3.18) μπορεί να γραφεί ως

$$f_{1s}(\theta, t) = F_{1s} \cos(\theta_a + \theta - \pi/2) \quad (3.20)$$

και σε εκθετική μορφή

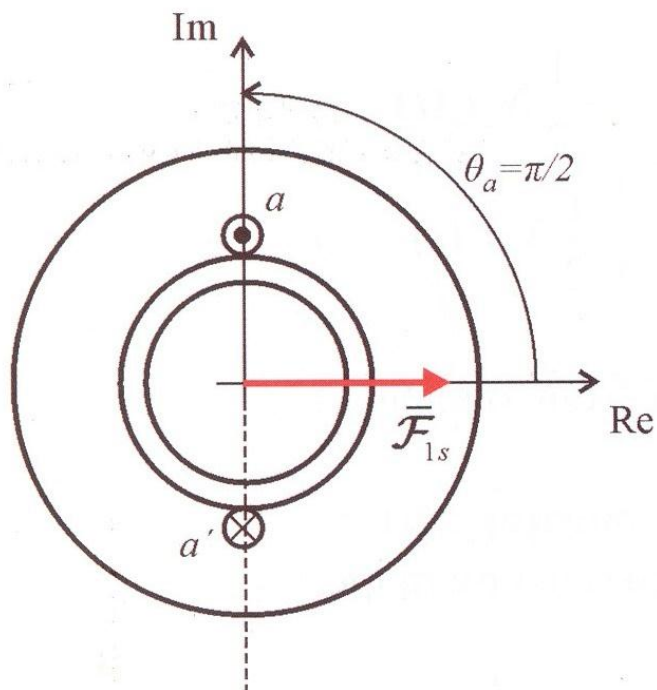
$$f_{1s}(\theta, t) = \text{Re}\{\mathbf{F}_{1s} e^{j\theta_a} e^{-j\pi/2} e^{j\theta}\} = \text{Re}\{\bar{\mathbf{F}}_{1s} e^{j\theta}\} \quad (3.21)$$

όπου

$$\bar{\mathbf{F}}_{1s} = -jF_{1s} e^{j\theta_a} = -j \frac{2}{\pi} N_a i_a(t) e^{j\theta_a} \quad (3.22)$$

είναι το διάνυσμα χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης του τυλίγματος $a-a'$, όταν λαμβάνουμε υπόψη μόνο τη θεμελιώδη αρμονική του.

Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι γενικά το διάνυσμα χώρου παριστάνει στο μιγαδικό επίπεδο μόνο τη χωρική κατανομή του ημιτονοειδούς σήματος και συνεπώς δεν είναι αυστηρά ένα φυσικό διάνυσμα. Εκείνο που κυρίως έχει σημασία είναι ότι το πλάτος ενός διανύσματος χώρου είναι το πλάτος της ημιτονοειδούς κατανομής του σήματος στο χώρο κι ότι η διεύθυνση του διανύσματος συμπίπτει με τη θέση της μέγιστης τιμής του σήματος. Έτσι, η τιμή του χωρικού σήματος σε οποιαδήποτε θέση θ είναι η προβολή του διανύσματος χώρου πολλαπλασιασμένου με το $e^{j\theta}$ στον πραγματικό άξονα του συστήματος αναφοράς, όπως στο παράδειγμα στην Εξίσωση (3.21).



Σχήμα 3.6 Στροφή του συστήματος αξόνων αναφοράς ώστε το διάνυσμα χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης να συμπίπτει με τη διεύθυνση του πραγματικού άξονα του συστήματος αναφοράς

Αν επιλέξουμε $\theta_a = \pi/2$ ώστε ο μαγνητικός άξονας πηνίου α-α' να συμπίπτει με τον πραγματικό άξονα του συστήματος αναφοράς (Σχήμα 3.6), η έκφραση του διανύσματος χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης της Εξίσωσης (3.22) γίνεται

$$\bar{\mathbf{F}}_{1s} = F_{1s} e^{j0} = \frac{2}{\pi} N_a i_a(t) e^{j0} \quad (3.23)$$

όπου e^{j0} το μοναδιαίο διάνυσμα κατά τη διεύθυνση του πραγματικού άξονα αναφοράς. Έτσι, το διάνυσμα χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης $\bar{\mathbf{F}}_{1s}$ είναι μία πραγματική ποσότητα κι η διεύθυνση του διανύσματος συμπίπτει με το μαγνητικό άξονα του πηνίου α-α'. Όμοια με τα παραπάνω είναι δυνατόν να ορισθεί διάνυσμα χώρου για το ρεύμα του πηνίου α-α', το οποίο επίσης είναι μια πραγματική ποσότητα

$$\bar{\mathbf{i}}_a = i_a(t) e^{j0} \quad (3.24)$$

και συνεπώς το διάνυσμα της μαγνητεγερτικής δύναμης είναι

$$\bar{\mathbf{F}}_{1s} = \frac{2}{\pi} N_a \bar{\mathbf{i}}_a \quad (3.25)$$

Η πυκνότητα ρεύματος του πηνίου α-α', μπορεί να προσδιοριστεί λαμβάνοντας υπόψη ότι η μαγνητεγερτική δύναμη είναι το ολοκλήρωμα της πυκνότητας ρεύματος. Συνεπώς από την Εξίσωση 3.17 προκύπτει

$$J_a(\theta, t) = \frac{2}{\pi} N_a i_a(t) [\cos(\theta_a - \theta) + \frac{1}{3} \cos[3(\theta_a - \theta)] + \frac{1}{5} \cos[5(\theta_a - \theta) + \dots]] \quad (3.26)$$

κι η θεμελιώδης αρμονική της πυκνότητας ρεύματος είναι

$$J_a(\theta, t) = \frac{2}{\pi} N_a i_a(t) \cos(\theta_a - \theta) \quad (3.27)$$

Η Εξίσωση 3.27 μπορεί να γραφτεί ως

$$J_{1a}(\theta, t) = \text{Re} \left[\frac{2}{\pi} N_a i_a(t) e^{-j\theta_a} e^{j\theta} \right] = \text{Re} [\bar{\mathbf{J}}_{1a} e^{j\theta}] \quad (3.28)$$

όπου

$$\bar{\mathbf{J}}_{1a} = \frac{2}{\pi} N_a i_a(t) e^{-j\theta_a} \quad (3.29)$$

το διάνυσμα χώρου της πυκνότητας ρεύματος του πηνίου α-α', όταν λαμβάνεται υπόψη μόνο η θεμελιώδης αρμονική. Όπως προηγουμένως, αν επιλέξουμε του άξονες συντεταγμένων ώστε $\theta_a = \pi/2$, η έκφραση του διανύσματος χώρου της πυκνότητας ρεύματος γίνεται

$$\bar{\mathbf{J}}_{1a} = \frac{2}{\pi} N_a i_a(t) e^{-j\pi/2} = F_{1s} e^{-j\pi/2} = -jF_{1s} = -j\bar{\mathbf{F}}_{1s} \quad (3.30)$$

Εφόσον, υποθέσαμε ημιτονοειδή κατανομή της μαγνητεγερτικής δύναμης κι αμελήσαμε τις ανώτερες αρμονικές χώρου θεωρώντας ότι υπάρχει μόνο η θεμελιώδης αρμονική, η μαγνητική επαγωγή διακένου είναι

$$B_{1s}(\theta, t) = \frac{\mu_0}{l_g} f_{1s}(\theta, t) = \frac{2\mu_0}{l_g \pi} N_a i_a(t) \sin(\theta_a - \theta) \quad (3.31)$$

και για $\theta_a = \pi/2$ γίνεται

$$B_{1s}(\theta, t) = \frac{2\mu_0}{l_g \pi} N_a i_a(t) \cos \theta \quad (3.32)$$

όπου l_g το μήκος του διακένου (θεωρείται ομοιόμορφο, εφόσον αγνοείται η επίδραση των αυλακιών) και μ_0 ο συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας του κενού ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am). Αφού η μαγνητική επαγωγή $B_{1s}(\theta, t)$ είναι ανάλογη της μαγνητεγερτικής δύναμης $f_{1s}(\theta, t)$, η ίδια αναλογία θα ισχύει και για τα διανύσματα χώρου, έτσι

$$\bar{B}_{1s} = \frac{\mu_0}{l_g} \bar{F}_{1s} = -j \frac{2\mu_0}{l_g \pi} N_a i_a(t) e^{j\theta_a} \quad (3.33)$$

και για $\theta_a = \pi/2$ έχουμε

$$\bar{B}_{1s} = \frac{2\mu_0}{l_g \pi} N_a i_a(t) e^{j0} = \frac{2\mu_0}{l_g \pi} N_a \bar{i}_a(t) \quad (3.34)$$

Η συνολική μαγνητική ροή ανά πόλο που παράγει το πηνίο α-α' είναι

$$\Phi_{1s}(t) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} l r B_{1s}(\theta, t) d\theta = 2l r B_{1s}(t) \quad (3.35)$$

όπου l το αξονικό μήκος του πυρήνα του στάτη, r η μέση ακτίνα του ανοίγματος του στάτη στο διάκενο αέρα (Σχήμα 3.4) και

$$B_{1s} = \frac{2\mu_0}{l_g \pi} N_a i_a(t) \quad (3.36)$$

το πλάτος του σήματος της μαγνητικής επαγωγής. Το διάνυσμα χώρου της μαγνητικής ροής διακένου είναι

$$\bar{\Phi}_{1s} = -j \frac{2\mu_0 l D}{l_g \pi} N_a i_a(t) e^{j\theta_a} \quad (3.37)$$

και για $\theta_a = \pi/2$ γίνεται

$$\bar{\Phi}_{1s} = \frac{2\mu_0 l D}{l_g \pi} N_a \bar{i}_a \quad (3.38)$$

όπου D η διάμετρος του ανοίγματος του στάτη στο μέσο του διακένου αέρα ($D=2r$).

Το διάνυσμα χώρου της πεπλεγμένης ροής είναι

$$\bar{\lambda}_{1s} = N_a \bar{\Phi}_{1s} = -j \frac{2\mu_0 l D}{l_g \pi} N_a^2 i_a(t) e^{j\theta_a} \quad (3.39)$$

και για $\theta_a = \pi/2$ γίνεται

$$\bar{\lambda}_{1s} = \frac{2\mu_0 l D}{l_g \pi} N_a^2 \bar{i}_a = L_a \bar{i}_a \quad (3.40)$$

όπου

$$L_a = \frac{2\mu_0 l D}{l_g \pi} N_a^2 \quad (3.41)$$

η αυτεπαγωγή του πηνίου α-α'. Εδώ πρέπει να διευκρινιστεί ότι η αυτεπαγωγή L_a της Εξίσωσης 3.41 αναφέρεται στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο η θεμελιώδης αρμονική της μαγνητεγερτικής δύναμης κι αγνοούνται οι αρμονικές χώρου. Ωστόσο, αν ληφθούν υπόψη όλες οι αρμονικές χώρου, τότε η μορφή της μαγνητεγερτικής δύναμης είναι τετραγωνικός παλμός και συνεπώς την ίδια μορφή θα έχει κι η μαγνητική επαγωγή

$$B_{1s}(\theta, t) = \frac{\mu_0}{l_g} f_s(\theta, t) \quad (3.42)$$

Έτσι, η συνολική πεπλεγμένη μαγνητική ροή διακένου ανά πόλο είναι

$$\lambda_s(t) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} N_a [l_r B_s(\theta, t)] d\theta = l_r \pi \frac{\mu_0}{2l_g} N_a^2 i_a(t) = l D \pi \frac{\mu_0}{4l_g} N_a^2 i_a(t) = L_a^* i_a(t) \quad (3.43)$$

όπου

$$L_a^* = l D \pi \frac{\mu_0}{4l_g} N_a^2 \quad (3.44)$$

η αυτεπαγωγή του πηνίου α-α', όταν λαμβάνονται υπόψη όλες οι αρμονικές χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης. Συγκρίνοντας τις Εξισώσεις (3.41) και (3.44) προκύπτει

$$L_a^* = \frac{\pi^2}{8} L_a = 1.233 L_a \quad (3.45)$$

Έτσι, συμπεραίνουμε ότι, αν αγνοηθούν οι ανώτερες αρμονικές χώρου η αυτεπαγωγή που προκύπτει είναι κατά $1/1.233=0.811$ φορές ή 81.1% μικρότερη από την αντίστοιχη αυτεπαγωγή που προκύπτει αν ληφθούν υπόψη οι αρμονικές χώρου.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι τα διανύσματα χώρου όλων των ηλεκτρικών και μαγνητικών μεγεθών που παράγει το πηνίο α-α' έχουν χρονικά μεταβαλλόμενα πλάτη. Αντίθετα, η γωνία των διανυσμάτων είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Συνεπώς τα διανύσματα χώρου που παράγει ένα μόνο πηνίο είναι σταθερά στο χώρο κι όχι στρεφόμενα.

3.4 Εφαρμογή της θεωρίας των διανυσμάτων χώρου σε

μονοφασική κατανεμημένη περιέλιξη στάτη

Οι αρμονικές χώρου του μαγνητικού πεδίου είναι σημαντικά μειωμένες όταν η περιέλιξη κάθε φάσης είναι κατανεμημένη σε αυλάκια κατά μήκος της περιφέρειας του διακένου. Ωστόσο, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται στην περίπτωση της κατανεμημένης περιέλιξης για δεδομένο ρεύμα διέγερσης κι αριθμό σπειρών είναι ασθενέστερο σε σύγκριση με το πεδίο που παράγεται, όταν η περιέλιξη είναι συγκεντρωμένη.

Στη διπολική ηλεκτρική μηχανή πλήρους βήματος του Σχήματος 3.7, N_{sA} είναι ο συνολικός αριθμός σπειρών ανά πόλο και φάση και $i_{sA}(t)$ το στιγμιαίο ρεύμα διέγερσης της φάσης sA. Ο αριθμός των αμπερο-ελιγμάτων είναι $N_{sA}i_{sA}(t)$. Το τύλιγμα κάθε φάσης είναι διανεμημένο σε αυλάκια τα οποία επεκτείνονται σε ένα τόξο γωνίας β_A . Από την Εξίσωση 3.19 προκύπτει ότι το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της μαγνητεγερτικής δύναμης της φάσης sA στην κατανεμημένη περιέλιξη είναι

$$F_{1s} = K_{dA} \frac{2}{\pi} N_{sA} i_{sA}(t) \quad (3.46)$$

όπου

$$K_{dA} = \frac{\sin \beta_A / 2}{\beta_A / 2} \quad (3.47)$$

ο συντελεστής κατανομής περιέλιξης (winding distribution factor). Ο συντελεστής αυτός είναι πάντοτε μικρότερος της μονάδας και μόνο στην οριακή περίπτωση της συγκεντρωμένης περιέλιξης ($\beta_A \rightarrow 0$) είναι $\lim_{\beta_A \rightarrow 0} K_{dA} = 1$.

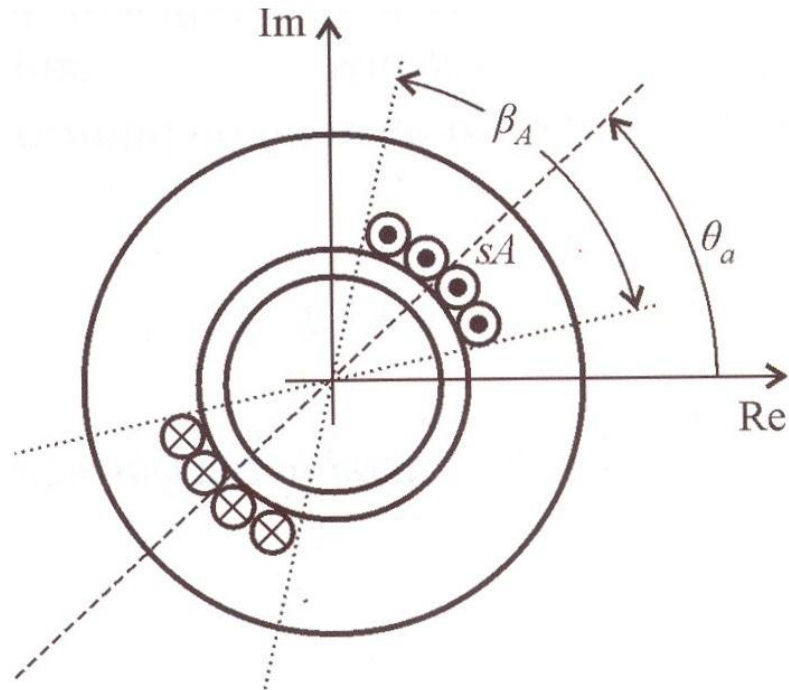
Αν η περιέλιξη είναι κλασματικού πολικού βήματος, τότε το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της μαγνητεγερτικής δύναμης πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή βράχυνσης (Pitch factor) K_{pA} και συνεπώς

$$F_{1s} = K_{dA} K_{pA} \frac{2}{\pi} N_{sA} i_{sA}(t) \quad (3.48)$$

όπου

$$K_{pA} = \sin(\rho_{Sp} / 2) \quad (3.49)$$

ο συντελεστής βράχυνσης και ρ_{Sp} το πολικό βήμα της βράχυνσης.



Σχήμα 3.7 Κατανεμημένη περιέλιξη πλήρους βήματος της φάσης sA σε απλοποιημένη διπολική ηλεκτρική μηχανή

Ο συνολικός συντελεστής που περιγράφει την επίδραση της κατανεμημένης περιέλιξης και του κλασματικού πολικού βήματος (συντελεστής περιέλιξης) είναι

$$K_{wA} = K_{dA} K_{pA} \quad (3.50)$$

και συνεπώς ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών της φάσης sA είναι

$$N_{sAeq} = K_{wA} K_{sA} \quad (3.51)$$

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω ορισμό του ισοδύναμου αριθμού σπειρών, η Εξίσωση (5.19) της θεμελιώδους αρμονικής της μαγνητεγερτικής δύναμης γράφεται

$$F_{1s} = \frac{2}{\pi} N_{sAeq} i_{sA}(t) \quad (3.52)$$

Το διάνυσμα χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης για την κατανεμημένη περιέλιξη προκύπτει από το άθροισμα των αντίστοιχων διανυσμάτων χώρου κάθε τυλίγματος χωριστά

$$\bar{\mathbf{F}}_{1s} = \bar{\mathbf{F}}_{1a} + \bar{\mathbf{F}}_{1b} + \dots + \bar{\mathbf{F}}_{1ns} \quad (3.53)$$

και τελικά

$$\bar{\mathbf{F}}_{1s} = -jF_{1s}e^{j\theta_a} = -j\frac{2}{\pi}N_{sAeq}i_{sA}(t)e^{j\theta_a} \quad (3.54)$$

Για $\theta_a=\pi/2$, όταν ο μαγνητικός άξονας του πηνίου α-α' συμπίπτει με τον πραγματικό άξονα του συστήματος αξόνων αναφοράς, έχουμε

$$\bar{\mathbf{F}}_{1s} = -jF_{1s}e^{j0} = \frac{2}{\pi}N_{sAeq}\bar{\mathbf{i}}_{sA} \quad (3.55)$$

Το διάνυσμα χώρου της πυκνότητας ρεύματος για την κατανεμημένη περιέλιξη είναι

$$\bar{\mathbf{J}}_{1s} = \bar{\mathbf{J}}_{1a} + \bar{\mathbf{J}}_{1b} + \dots + \bar{\mathbf{J}}_{1ns} = \frac{2}{\pi}N_{sAeq}i_{sA}(t)e^{j\theta_a} \quad (3.56)$$

και για $\theta_a=\pi/2$ γίνεται

$$\bar{\mathbf{J}}_{1s} = -j\frac{2}{\pi}N_{sAeq}\bar{\mathbf{i}}_{sA} \quad (3.57)$$

όπου $\bar{\mathbf{J}}_{1a}, \bar{\mathbf{J}}_{1b}, \dots, \bar{\mathbf{J}}_{1ns}$ τα διανύσματα χώρου της πυκνότητας ρεύματος κάθε τυλίγματος χωριστά και $\bar{\mathbf{i}}_{sA} = i_{sA}(t)e^{j0}$ το διάνυσμα χώρου του ρεύματος της φάσης sA του στάτη.

Επίσης, τα διανύσματα χώρου της μαγνητικής επαγωγής και της πεπλεγμένης ροής για $\theta_a=\pi/2$ είναι αντίστοιχα

$$\bar{\mathbf{B}}_{1s} = \bar{\mathbf{B}}_{1a} + \bar{\mathbf{B}}_{1b} + \dots + \bar{\mathbf{B}}_{1ns} = \frac{\mu_0}{l_g}\bar{\mathbf{F}}_{1s} = \frac{2\mu_0}{l_g\pi}N_{sAeq}\bar{\mathbf{i}}_{sA} \quad (3.58)$$

και

$$\bar{\lambda}_{1s} = \bar{\lambda}_{1a} + \bar{\lambda}_{1b} + \dots + \bar{\lambda}_{1ns} = \frac{\mu_0}{l_g}\bar{\mathbf{F}}_{1s} = \frac{2\mu_0 lD}{l_g\pi}N_{sAeq}^2\bar{\mathbf{i}}_{sA} = L_{sA}\bar{\mathbf{i}}_{sA} \quad (3.59)$$

όπου

$$L_{sA} = \frac{2\mu_0 lD}{l_g\pi}N_{sAeq}^2 = \frac{2\mu_0 lD}{l_g\pi}(N_{sA}K_{wA})^2 \quad (3.60)$$

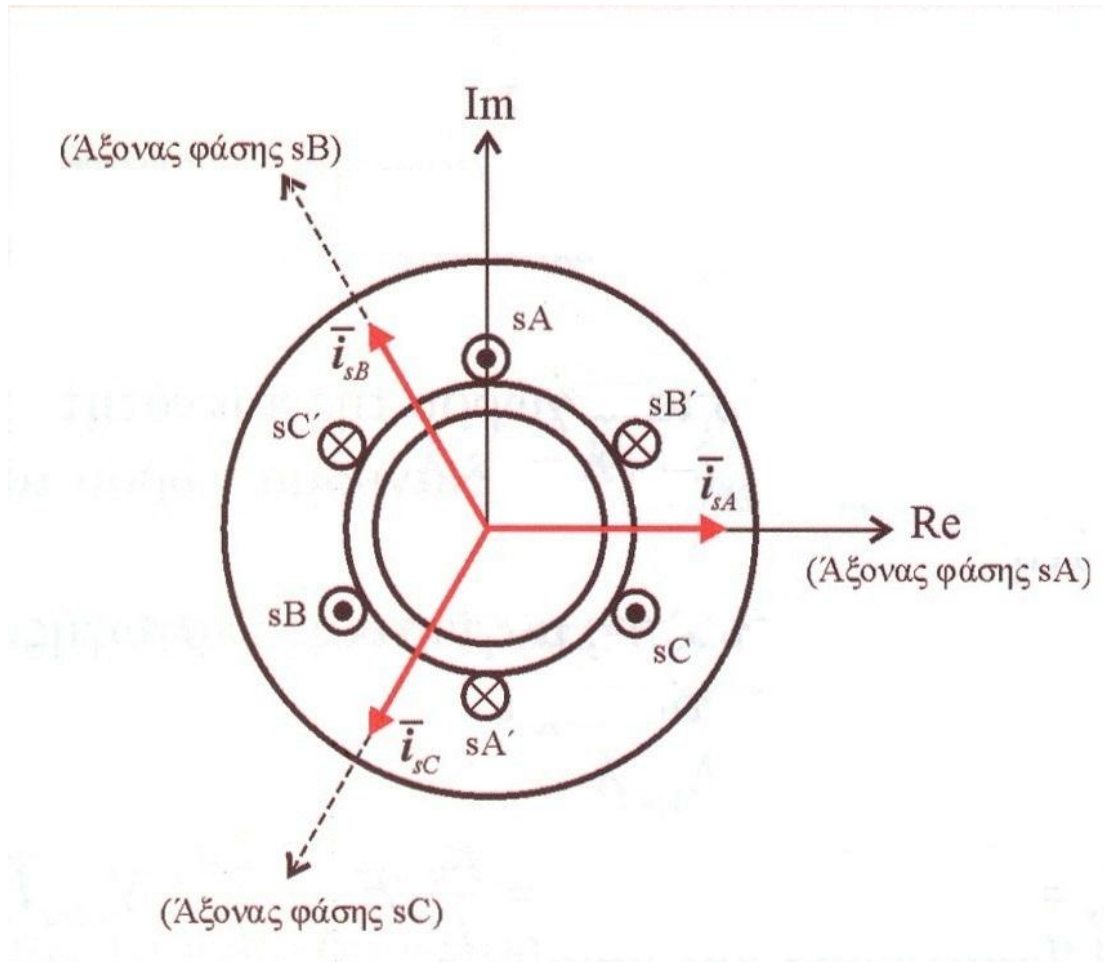
η αυτεπαγωγή της φάσης sA (θεωρώντας μόνο τη θεμελιώδη αρμονική του πεδίου).

Στην ανάλυση που προηγήθηκε, θεωρήθηκε διπολική μηχανή (2p=2). Αν ο αριθμός των πόλων είναι μεγαλύτερος, τότε η έκφραση του συντελεστή αυτεπαγωγής της φάσης sA γίνεται

$$L_{sA} = \frac{2\mu_0 lD}{l_g\pi}\left(\frac{N_{sAeq}}{p}\right)^2 = \frac{2\mu_0 lD}{l_g\pi}\left(\frac{N_{sA}K_{wA}}{l_g\pi}\right)^2 \quad (3.61)$$

όπου p ο αριθμός των πόλων.

3.5 Εφαρμογή της θεωρίας των διανυσμάτων χώρου σε συμμετρική τριφασική κατανομημένη περιέλιξη στάτη



Σχήμα 3.8 Απλοποιημένη διπολική τριφασική ηλεκτρική μηχανή πλήρους βήματος

Στην τριφασική μηχανή, τα τυλίγματα του κατανέμονται κατά μήκος της περιφέρειας του διακένου σε γωνιακή απόσταση $\left(\frac{2\pi}{3}\right)/p$ μεταξύ τους. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται μια απλοποιημένη διπολική ($2p=2$) τριφασική μηχανή πλήρους βήματος. Η περιέλιξη της μηχανής φαίνεται στο Σχήμα 3.8 ως συγκεντρωμένη, ωστόσο στην ανάλυση που ακολουθεί αντιμετωπίζεται ως κατανομημένη, μέσω των συντελεστών περιέλιξης. Θεωρούμε ότι τα τυλίγματα των τριών φάσεων είναι συμμετρικά κατανομημένα ($N_s=N_{sA}=N_{sB}=N_{sC}$ και $K_{ws}=K_{wA}=K_{wB}=K_{wC}$). Επίσης, θεωρούμε ότι ο μαγνητικός άξονας της φάσης sA συμπίπτει με τον πραγματικό άξονα του συστήματος αξόνων αναφοράς ($\theta_a=\pi/2$).

Οι στιγμιαίες τιμές των ρευμάτων των τριών φάσεων sA, sB, sC είναι αντίστοιχα

$$i_{sA} = \hat{I}_s \cos(\omega_e t + \phi_s) = \frac{\hat{I}_s}{2} \left[e^{j(\omega_e t + \phi_s)} + e^{-j(\omega_e t + \phi_s)} \right] \quad (3.62)$$

$$i_{sB} = \hat{I}_s \cos(\omega_e t + \phi_s - 2\pi/3) = \frac{\hat{I}_s}{2} \left[e^{j(\omega_e t + \phi_s - 2\pi/3)} + e^{-j(\omega_e t + \phi_s - 2\pi/3)} \right] \quad (3.63)$$

$$i_{sC} = \hat{I}_s \cos(\omega_e t + \phi_s - 4\pi/3) = \frac{\hat{I}_s}{2} \left[e^{j(\omega_e t + \phi_s - 4\pi/3)} + e^{-j(\omega_e t + \phi_s - 4\pi/3)} \right] \quad (3.64)$$

Τα διανύσματα χώρου των τριών ρευμάτων είναι

$$\bar{\mathbf{i}}_{sA} = i_{sA}(t)e^{j0} \quad (3.65)$$

$$\bar{\mathbf{i}}_{sB} = i_{sB}(t)e^{j2\pi/3} \quad (3.66)$$

$$\bar{\mathbf{i}}_{sC} = i_{sC}(t)e^{j4\pi/3} \quad (3.67)$$

Από το άθροισμα των διανυσμάτων χώρου των τριών φάσεων προκύπτει το διάνυσμα χώρου του τριφασικού συστήματος ρευμάτων

$$\bar{\mathbf{i}}_{sA} + \bar{\mathbf{i}}_{sB} + \bar{\mathbf{i}}_{sC} = \frac{3}{2} \bar{\mathbf{i}}_s^s \quad (3.68)$$

Ο υπερδείκτης s στο σύμβολο του διανύσματος χώρου δηλώνει ότι το σύστημα αξόνων αναφοράς είναι ακίνητο ως προς το στάτη (stationary reference frame), όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στη μέχρι τώρα ανάλυση. Γι' αυτό το λόγο μπορεί να ονομαστεί κι ως σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη (stator reference frame).

Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (3.65)-(3.67) στην Εξίσωση (3.68) προκύπτει

$$\bar{\mathbf{i}}_s^s = \frac{2}{3} \left[i_{sA}(t) + \bar{\alpha} i_{sB}(t) + \bar{\alpha}^2 i_{sC}(t) \right] \quad (3.69)$$

όπου 1, $\bar{\alpha}$ και $\bar{\alpha}^2$ είναι τα μοναδιαία διανύσματα χώρου κατά τη διεύθυνση των μαγνητικών αξόνων των φάσεων sA, sB, sC αντίστοιχα, δηλαδή $1=e^{j0}$, $\bar{\alpha} = e^{j2\pi/3}$ και $\bar{\alpha}^2 = e^{j4\pi/3}$. Ακόμη, αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (3.62)-(3.64) στην εξίσωση (3.59) προκύπτει

$$\bar{\mathbf{i}}_s^s = \hat{I}_s e^{j(\omega_e t + \phi_s)} \quad (3.70)$$

Από την Εξίσωση (3.70) συμπεραίνουμε ότι το διάνυσμα χώρου του ρεύματος του στάτη στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς είναι στρεφόμενο με γωνία ω_e ίση με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα. Επίσης, το πλάτος του στρεφόμενου διανύσματος χρόνου είναι ίσο με το πλάτος του στρεφόμενου διανύσματος χώρου και συνεπώς αναμένουμε οι ίδιες σχέσεις ροπής να ισχύουν και για τα διανύσματα χώρου και χρόνου.

Όπως το ρεύμα του στάτη, έτσι και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη της μηχανής μπορούν να αποδοθούν με στρεφόμενα διανύσματα χώρου. Αν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχουν ρεύματα στον δρομέα, όπως άλλωστε θεωρήθηκε στη μέχρι τώρα ανάλυση, η συνολική πεπλεγμένη ροή του τυλίγματος της φάσης sA του στάτη είναι

$$\lambda_{sA} = L_{sA}i_{sA}(t) + M_{AB}i_{sB}(t) + M_{AC}i_{sC}(t) \quad (3.71)$$

όπου L_{sA} η αυτεπαγωγή της φάσης sA και M_{AB} και M_{AC} είναι οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ του τυλίγματος της φάσης sA και των τυλιγμάτων των φάσεων sB και sC, αντίστοιχα. Λόγω συμμετρίας, όλες οι αυτεπαγωγές των φάσεων είναι ίδιες ($L_{sA} = L_{sB} = L_{sC} = L_{ss}$) Κι ομοίως όλες οι αμοιβαίες επαγωγές ($M_{AB} = M_{BA} = M_{BC} = M_{CB} = M_{CA} = M_{AC} = M_s$). Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ομοιοπολική συνιστώσα του ρεύματος του στάτη είναι μηδέν ($i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = 0$), οι πεπλεγμένες ροές των τριών φάσεων θα είναι

$$\lambda_{sA}(t) = (L_{sl} + L_{sm} - M_s)i_{sA}(t) \quad (3.72)$$

$$\lambda_{sB}(t) = (L_{sl} + L_{sm} - M_s)i_{sB}(t) \quad (3.73)$$

$$\lambda_{sC}(t) = (L_{sl} + L_{sm} - M_s)i_{sC}(t) \quad (3.74)$$

όπου L_{sl} και L_{sm} είναι οι αυτεπαγωγές σκεδάσεως και μαγνήτισης, αντίστοιχα ($L_{ss} = L_{sl} + L_{sm}$). Στο συμμετρικό τριφασικό σύστημα, η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη δοαφρετικών φάσεων είναι

$$M_s = L_{sm} \cos(2\pi/3) = -L_{sm}/2 \quad (3.75)$$

και χρησιμοποιώντας την παραπάνω έκφραση, οι Εξισώσεις (3.72)-(3.74) γράφονται

$$\lambda_{sA}(t) = (L_{sl} + 3/2L_{sm})i_{sA}(t) = L_s i_{sA}(t) \quad (3.76)$$

$$\lambda_{sB}(t) = (L_{sl} + 3/2L_{sm})i_{sB}(t) = L_s i_{sB}(t) \quad (3.77)$$

$$\lambda_{sC}(t) = (L_{sl} + 3/2L_{sm})i_{sC}(t) = L_s i_{sC}(t) \quad (3.78)$$

όπου

$$L_s = L_{sl} + L_{sm} - M_s \quad (3.79)$$

και συνεπώς

$$L_s = L_{sl} + 3/2L_{sm} = L_{sl} + L_m \quad (3.80)$$

Το L_s είναι η συνολική αυτεπαγωγή του τριφασικού τυλίγματος του στάτη και το L_m είναι η συνολική αυτεπαγωγή μαγνήτισης του τριφασικού τυλίγματος

$$L_m = \frac{3}{2}L_{sm} = \frac{3}{2} \left(\frac{N_{seq}}{p} \right)^2 \frac{2\mu_0 l D}{l_g \pi} \quad (3.81)$$

όπου $N_{seq} = K_{ws} N_s$ ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών κάθε φάσης του στάτη.

Το στρεφόμενο διάνυσμα χώρου της πεπλεγμένης ροής του στάτη στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς είναι

$$\bar{\lambda}_s^s = \frac{2}{3} [1\lambda_{sA}(t) + \bar{a}\lambda_{sB}(t) + \bar{a}^2\lambda_{sC}(t)] \quad (3.82)$$

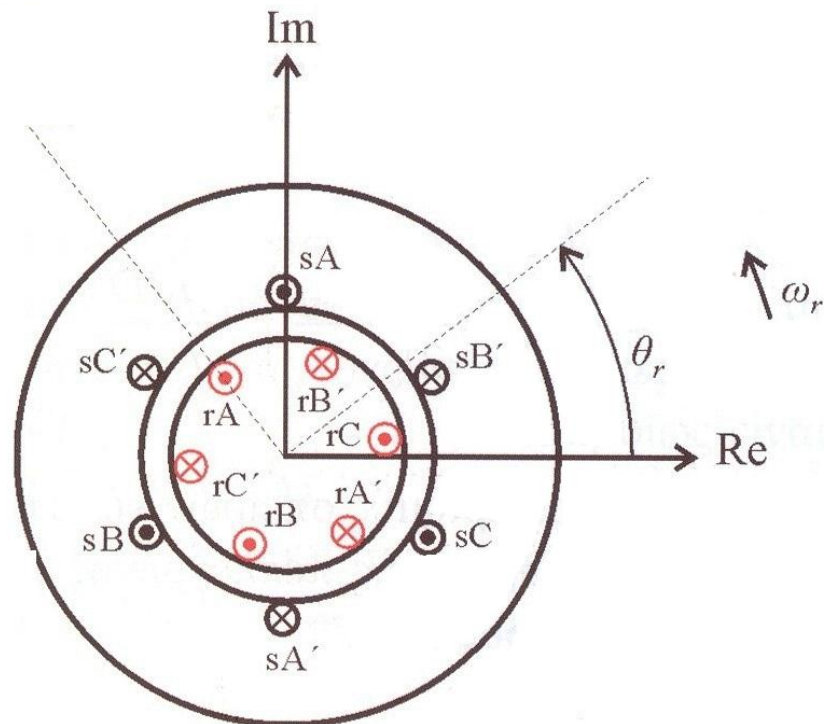
Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (3.76)-(3.78) στην (3.82) και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.69) προκύπτει

$$\bar{\lambda}_s^s = L_s \bar{\mathbf{i}}_s^s \quad (3.83)$$

Τέλος, το στρεφόμενο διάνυσμα χώρου της τάσης τροφοδοσίας του στάτη είναι

$$\bar{\mathbf{u}}_s^s = \frac{2}{3} [1u_{sA}(t) + \bar{a}u_{sB}(t) + \bar{a}^2u_{sC}(t)] \quad (3.84)$$

3.6 Διάνυσμα χώρου σε συμμετρική τριφασική ηλεκτρική μηχανή με κατανεμημένη περιέλιξη στάτη και δρομέα



Σχήμα 3.9 Απλοποιημένη ηλεκτρική μηχανή με τριφασικά τυλίγματα στο στάτη και στο δρομέα

Αντίστοιχα με την Εξίσωση (3.69) που ορίζει το διάνυσμα χώρου του ρεύματος του στάτη, το στρεφόμενο διάνυσμα χώρου του ρεύματος του δρομέα, είτε τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή είτε παράγεται εξ' επαγωγής σε συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, είναι

$$\bar{\mathbf{i}}_r^r = \frac{2}{3} \left[\mathbf{i}_{rA}(t) + \bar{\alpha} \mathbf{i}_{rB}(t) + \bar{a}^2 \mathbf{i}_{rC}(t) \right] \quad (3.85)$$

όπου $\mathbf{i}_{rA}(t)$, $\mathbf{i}_{rB}(t)$ και $\mathbf{i}_{rC}(t)$ οι στιγμιαίες τιμές τριών φάσεων των ρευμάτων του δρομέα rA, rB, rC αντίστοιχα (Σχήμα 3.9). Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι η Εξίσωση (3.85) δίνει το διάνυσμα χώρου του ρεύματος του δρομέα σε ένα σύστημα αξόνων αναφοράς ακίνητο ως προς το δρομέα και γι' αυτό χαρακτηρίζεται από τον υπερδείκτη r (σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα). Εφόσον ο δρομέας στρέφεται, θα στρέφεται και το αντίστοιχο σύστημα αξόνων αναφοράς ως προς το οποίο ορίστηκε το παραπάνω διάνυσμα χώρου. Έτσι, αν θέλουμε να εκφράσουμε το διάνυσμα χώρου του ρεύματος του δρομέα ως προς το ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη, θα πρέπει να μετασχηματίσουμε το μέγεθος αυτό από το ένα σύστημα στο άλλο λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία στροφής του δρομέα.

Το στρεφόμενο διάνυσμα χώρου της πεπλεγμένης ροής του δρομέα σε σύστημα αξόνων αναφοράς σταθερό με το δρομέα είναι

$$\bar{\lambda}_r^r = \frac{2}{3} \left[\mathbf{l}_{rA}(t) + \bar{\alpha} \mathbf{l}_{rB}(t) + \bar{a}^2 \mathbf{l}_{rC}(t) \right] \quad (3.86)$$

όπου

$$\bar{\lambda}_r^r = L_r \bar{\mathbf{i}}_r^r \quad (3.87)$$

όπου L_r η συνολική αυτεπαγωγή του τριφασικού τυλίγματος του δρομέα ($L_r = L_{lr} + 3/2 L_{rm}$, δηλαδή αντίστοιχοι ορισμοί για τις αυτεπαγωγές του δρομέα με αυτούς που παρουσιάστηκαν για τα τυλίγματα του στάτη στην ενότητα 3.4).

Όπως για τα τυλίγματα του στάτη, έτσι και στο δρομέα η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του δρομέα διαφορετικών φάσεων είναι

$$M_r = L_{rm} \cos(2\pi/3) = -L_{rm}/2 \quad (3.88)$$

Η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα είναι

$$M_{sr} = M_{rs} = \frac{N_{req} N_{seq}}{p^2} \frac{2\mu_0 l D}{l_g \pi} \quad (3.89)$$

όπου $N_{req} = K_{wr} N_r$ ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών για κάθε τύλιγμα του δρομέα. Από τις Εξισώσεις (3.81) και (3.89) προκύπτει

$$M_{sr} = M_{rs} = \frac{2}{3} \left(\frac{N_{req}}{N_{seq}} \right) L_m = \frac{2}{3} \frac{L_m}{a} \quad (3.90)$$

όπου $\alpha = N_{\text{seq}}/N_{\text{req}}$ ο λόγος μετασχηματισμού.

Αν θ_r είναι η γωνία δρομέα (γωνία στροφής του δρομέα ως προς το στάτη), η συνολική πεπλεγμένη ροή των τριών φάσεων του στάτη είναι

$$\lambda_{sA} = L_s i_{sA}(t) + M_{sr} [\cos \theta_r i_{rA}(t) + \cos(\theta_r + 2\pi/3) i_{rB}(t) + \cos(\theta_r + 4\pi/3) i_{rC}(t)] \quad (3.91)$$

$$\lambda_{sB} = L_s i_{sB}(t) + M_{sr} [\cos(\theta_r + 4\pi/3) i_{rA}(t) + \cos \theta_r i_{rB}(t) + \cos(\theta_r + 2\pi/3) i_{rC}(t)] \quad (3.92)$$

$$\lambda_{sC} = L_s i_{sC}(t) + M_{sr} [\cos(\theta_r + 2\pi/3) i_{rA}(t) + \cos(\theta_r + 4\pi/3) i_{rB}(t) + \cos \theta_r i_{rC}(t)] \quad (3.93)$$

Το διάνυσμα χώρου της πεπλεγμένης ροής του στάτη στο ακίνητο σύστημα αξόνων είναι

$$\bar{\lambda}_s^s = L_s \bar{\mathbf{i}}_s^s + \frac{3}{2} M_{sr} \bar{\mathbf{i}}_r^r e^{j\theta_r} \quad (3.94)$$

Επίσης, αν ανάγουμε το ρεύμα του δρομέα στο στάτη $i_r' = i_r / a$ και χρησιμοποιήσουμε την Εξίσωση (3.94) του διανύσματος χώρου της πεπλεγμένης ροής του στάτη γράφεται

$$\bar{\lambda}_s^s = L_s \bar{\mathbf{i}}_s^s + L_m \bar{\mathbf{i}}_r'^r e^{j\theta_r} \quad (3.95)$$

Παρατηρούμε στην παραπάνω εξίσωση ότι το διάνυσμα χώρου του ρεύματος του δρομέα $\bar{\mathbf{i}}_r'^r$ ορίζεται στο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα, ενώ αν πολλαπλασιαστεί με τον όρο $e^{j\theta_r}$ τότε ορίζεται στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη, δηλαδή

$$\bar{\mathbf{i}}_r'^s = \bar{\mathbf{i}}_r'^r e^{j\theta_r} \quad (3.96)$$

Συνεπώς, το διάνυσμα χώρου του δρομέα μετασχηματίζεται από το στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη πολλαπλασιάζοντας με τον όρο $e^{j\theta_r} = e^{j\omega_r t}$. Έτσι η Εξίσωση (3.95) γράφεται

$$\bar{\lambda}_s^s = L_s \bar{\mathbf{i}}_s^s + L_m \bar{\mathbf{i}}_r'^s \quad (3.97)$$

στην οποία όλοι οι όροι ορίζονται στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη.

Αντίστοιχα με την Εξίσωση (3.95), το διάνυσμα χώρου της πεπλεγμένης ροής του δρομέα εκφρασμένο στο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα είναι

$$\bar{\lambda}_r^r = L_r \bar{\mathbf{i}}_r'^r + L_m \bar{\mathbf{i}}_s^s e^{-j\theta_r} \quad (3.98)$$

και εκφράζοντας το διάνυσμα χώρου του ρεύματος του στάτη στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα ($\bar{\mathbf{i}}_s^r = \bar{\mathbf{i}}_s^s e^{-j\theta_r}$) προκύπτει

$$\bar{\lambda}_r'^r = L_r' \bar{\mathbf{i}}_r'^r + L_m \bar{\mathbf{i}}_s^r \quad (3.99)$$

Τα μεγέθη της ροής και του ρεύματος του δρομέα είναι ανηγμένα στο στάτη $\lambda_r' = \alpha \lambda_r$ και $i_r' = i_r / a$ αντίστοιχα καθώς και της αυτεπαγωγής του δρομέα $L_r' = a^2 L_{rl} + L_m = L_{rl}' + L_m$.

Το διάνυσμα χώρου του ρεύματος μαγνήτισης εκφρασμένο στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς είναι

$$\bar{\mathbf{i}}_m^s = \frac{2}{3} [i_{mA}(t) + \bar{a}i_{mB}(t) + \bar{a}^2 i_{mC}(t)] = \bar{\mathbf{i}}_s^s + \bar{\mathbf{i}}_r^r e^{j\theta_r} = \bar{\mathbf{i}}_s^s + \bar{\mathbf{i}}_r^s \quad (3.100)$$

όπου $i_{mA}(t)$, $i_{mB}(t)$, $i_{mC}(t)$ οι στιγμιαίες των ρευμάτων μαγνήτισης των τριών φάσεων. Το διάνυσμα χώρου της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής διακένου είναι

$$\bar{\lambda}_m^s = \frac{2}{3} [l_{mA}(t) + \bar{a}l_{mB}(t) + \bar{a}^2 l_{mC}(t)] = L_m(\bar{\mathbf{i}}_s^s + \bar{\mathbf{i}}_r^s) = L_m \bar{\mathbf{i}}_m^s \quad (3.101)$$

3.7 Ορισμός των διανυσμάτων χώρου σε γενικό (αυθαίρετο)

σύστημα αξόνων αναφοράς

Στην ανάλυση που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα διανύσματα χώρου του στάτη αναφέρονται στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς, ενώ τα διανύσματα χώρου του δρομέα αναφέρονται στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα. Ωστόσο, όλα τα διανύσματα χώρου μπορούν να μετασχηματιστούν από το ένα σύστημα αξόνων αναφοράς στο άλλο.

Όλα τα διανύσματα χώρου της τριφασικής ηλεκτρικής μηχανής είναι στρεφόμενα με ταχύτητα ω_e ως προς το ακίνητο σύστημα αναφοράς του στάτη ($\omega_e - \omega_r$) ως προς το στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα. Αν η ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα ($\omega_e = \omega_r$), τα διανύσματα χώρου είναι ακίνητα ως προς το στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα ή στρέφονται με ταχύτητα $\omega_e = \omega_r$ ως προς το ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη.

Όλα τα διανύσματα χώρου ορίζονται ως χρονικά μεταβαλλόμενες μιγαδικές ποσότητες. Έτσι, το διάνυσμα χώρου του ρεύματος του στάτη στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς είναι

$$\bar{\mathbf{i}}_s^s = i_{sa}^s(t) + j i_{sb}^s(t) \quad (3.102)$$

όπου $i_{sa}^s(t)$, $i_{sb}^s(t)$ οι αντίστοιχες στιγμιαίες τιμές του πραγματικού και φανταστικού μέρους της μιγαδικής ποσότητας που αντιπροσωπεύει το διάνυσμα χώρου. Από τις Εξισώσεις (3.69) και (3.102) προκύπτει

$$i_{sa}^s(t) = \frac{2}{3} i_{sA}(t) - \frac{1}{3} i_{sB}(t) - \frac{1}{3} i_{sC}(t) \quad (3.103)$$

$$i_{sb}^s(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [i_{sB}(t) - i_{sC}(t)] \quad (3.104)$$

Αντιστρόφως, οι στιγμιαίες τιμές των ρευμάτων των τριών φάσεων είναι

$$i_{sA}(t) = i_{sa}^s(t) + i_{s0}(t) \quad (3.105)$$

$$i_{sB}(t) = -\frac{1}{2}i_{sa}^s(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}^s(t) + i_{s0}(t) \quad (3.106)$$

$$i_{sC}(t) = -\frac{1}{2}i_{sa}^s(t) - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}^s(t) + i_{s0}(t) \quad (3.107)$$

όπου $i_{s0}(t)$ η ομοιοπολική συνιστώσα.

$$i_{s0} = \frac{1}{3}[i_{sA}(t) + i_{sB}(t) + i_{sC}(t)] \quad (3.108)$$

Παρατηρούμε ότι σε μία τριφασική ηλεκτρική μηχανή με συμμετρικά τυλίγματα στο χώρο, το τριφασικό σύστημα ρευμάτων στο χρόνο έχει μετασχηματιστεί σε ένα διφασικό σύστημα ρευμάτων στο χώρο, όπου $i_{sa}^s(t)$ και $i_{s\beta}^s(t)$ οι δύο φάσεις στο χώρο. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει γενικά για οποιοδήποτε τριφασικό ηλεκτρικό και μαγνητικό μέγεθος. Οι παραπάνω σχέσεις του μετασχηματισμού μπορούν αν γραφούν με μορφή πινάκων

$$\begin{bmatrix} i_{sa}^s \\ i_{s\beta}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\pi/3 & \cos 4\pi/3 \\ 0 & \sin 2\pi/3 & \sin 4\pi/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} \quad (3.109)$$

κι ο αντίστροφος

$$\begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos 2\pi/3 & \sin 2\pi/3 \\ \cos 4\pi/3 & \sin 4\pi/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa}^s \\ i_{s\beta}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{s0} \\ i_{s0} \\ i_{s0} \end{bmatrix} \quad (3.110)$$

Το διάνυσμα χώρου του ρεύματος του δρομέα στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα είναι

$$\bar{\mathbf{i}}_r^r = i_{ra}^r(t) + j i_{r\beta}^r(t) \quad (3.111)$$

Αναφερθήκαμε στην προηγούμενη ενότητα στο γεγονός ότι η έκφραση $\bar{\mathbf{i}}_r^s = \bar{\mathbf{i}}_r^r e^{j\theta_r}$ μετασχηματίζει το διάνυσμα χώρου $\bar{\mathbf{i}}_r^r$ από το στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα στο ακίνητο σύστημα αναφοράς του στάτη. Με άλλα λόγια, ο μετασχηματισμός από το στρεφόμενο σύστημα στο ακίνητο γίνεται πολλαπλασιάζοντας με τον πίνακα μετασχηματισμού ${}^r\mathbf{C}^s$, όπως φαίνεται στη συνέχεια

$$\begin{bmatrix} i_{ra}^s \\ i_{r\beta}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra}^r \\ i_{r\beta}^r \end{bmatrix} \quad (3.112)$$

ή

$$\mathbf{i}_{ra\beta}^{\prime s} = {}^r \mathbf{C}^s \mathbf{i}_{ra\beta}^{\prime r} \quad (3.113)$$

Όπου θ_r η γωνία στροφής του δρομέα

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0) \quad (3.114)$$

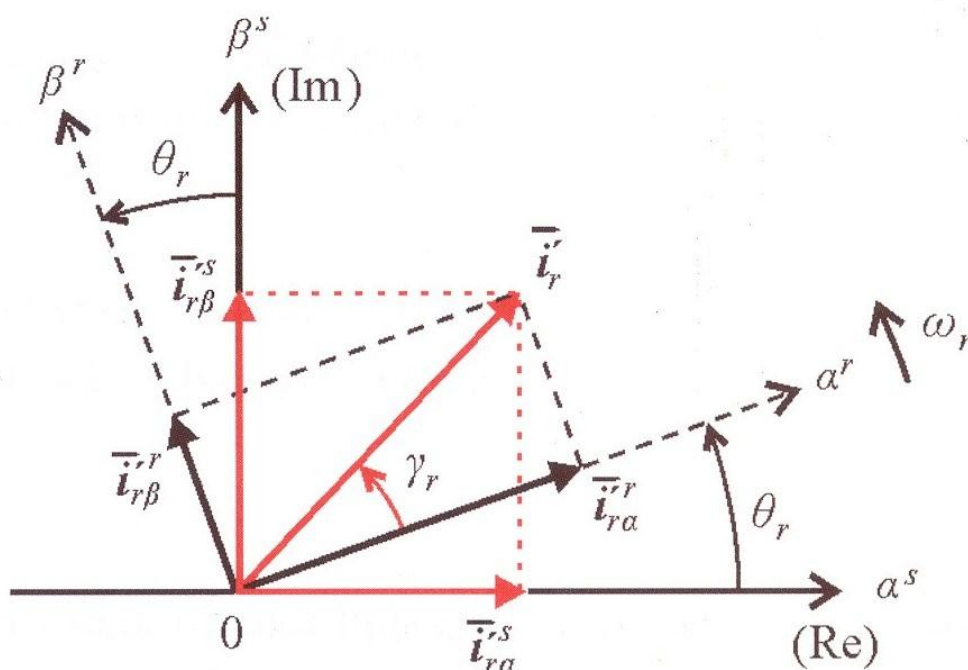
Ομοίως, ο αντίστροφος μετασχηματισμός γίνεται χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο πίνακα μετασχηματισμού ${}^s \mathbf{C}^r$ κι έχουμε

$$\begin{bmatrix} i_{ra}^{\prime r} \\ i_{r\beta}^{\prime r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra}^{\prime s} \\ i_{r\beta}^{\prime s} \end{bmatrix} \quad (3.115)$$

ή

$$\mathbf{i}_{ra\beta}^{\prime r} = {}^s \mathbf{C}^r \mathbf{i}_{ra\beta}^{\prime s} \quad (3.116)$$

Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται ο μετασχηματισμός του διανύσματος χώρου του ρεύματος του δρομέα από το ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη α^s - β^s στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα α^r - β^r κι αντιστρόφως. Το πλάτος του διανύσματος είναι το ίδιο ανεξάρτητα του συστήματος αξόνων αναφοράς.



Σχήμα 3.10 Διάνυσμα χώρου του δρομέα στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη και στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα

Γενικά, ο μετασχηματισμός ενός διανύσματος χώρου από ένα σύστημα αξόνων αναφοράς x στο σύστημα αξόνων αναφοράς y γίνεται μέσω του πίνακα μετασχηματισμού ${}^x C^y$

$${}^x C^y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y - \theta_x) & \sin(\theta_y - \theta_x) \\ -\sin(\theta_y - \theta_x) & \cos(\theta_y - \theta_x) \end{bmatrix} \quad (3.117)$$

κι έχουμε

$$\mathbf{f}_{a\beta}^y = {}^x C^y \mathbf{f}_{a\beta}^x \quad (3.118)$$

όπου θ_x και θ_y οι γωνίες στροφής των αξόνων αναφοράς. Για παράδειγμα, ο μετασχηματισμός από το στρεφόμενο σύστημα του δρομέα στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη γίνεται μέσω του πίνακα μετασχηματισμού ${}^r C^s$ θέτοντας $\theta_x = \theta_r$ και $\theta_s = 0^0$.

Η διαδικασία μετασχηματισμού ενός τριφασικού μεγέθους f από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χώρου σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς x είναι

$$\begin{bmatrix} f_{sa}^x \\ f_{sb}^x \\ f_{sc}^x \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \cos(\theta_x - 2\pi/3) & \cos(\theta_x - 4\pi/3) \\ -\sin \theta_x & -\sin(\theta_x - 2\pi/3) & -\sin(\theta_x - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sA} \\ f_{sB} \\ f_{sC} \end{bmatrix} \quad (3.119)$$

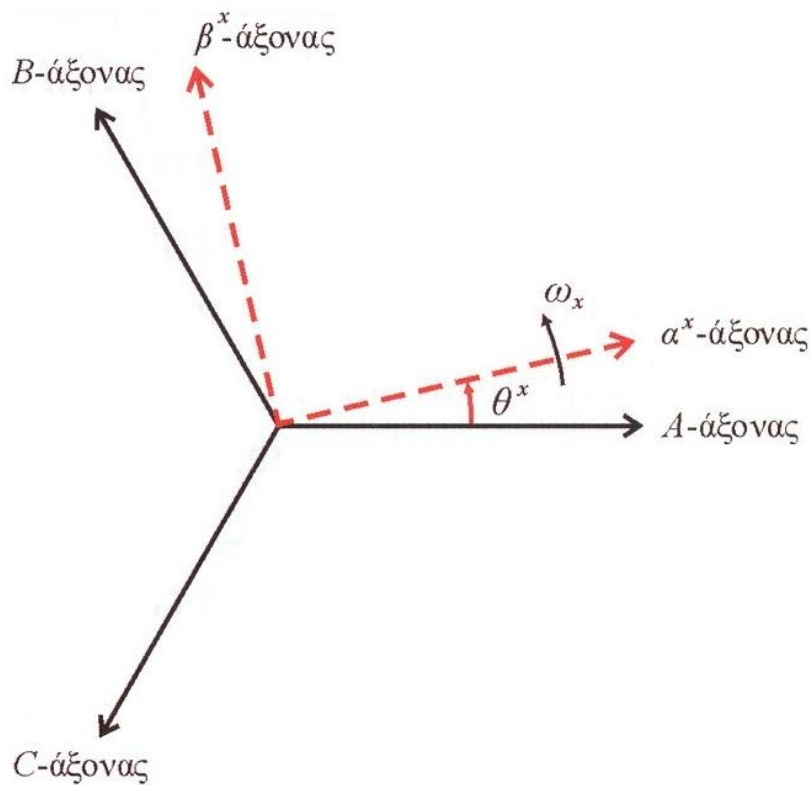
κι ο αντίστροφος μετασχηματισμός, δηλαδή από το πεδίο o του χώρου (ορισμένο στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς) στο πεδίο του χρόνου είναι

$$\begin{bmatrix} f_{sA} \\ f_{sB} \\ f_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ \cos(\theta_x - 2\pi/3) & -\sin(\theta_x - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_x - 4\pi/3) & -\sin(\theta_x - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sa}^x \\ f_{sb}^x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{s0} \\ f_{s0} \\ f_{s0} \end{bmatrix} \quad (3.120)$$

όπου

$$\theta_x = \int_0^t \omega_x(\xi) d\xi + \theta_x(0) \quad (3.121)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι το διάνυσμα χώρου κάθε τριφασικού ηλεκτρικού μεγέθους της ηλεκτρικής μηχανής μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα γενικό ή αυθαίρετο σύστημα αξόνων αναφοράς (general or arbitrary reference frame), Σχήμα 3.11. Η επιλογή του συστήματος αξόνων αναφοράς των διανυσμάτων χώρου εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής με στόχο να απλοποιούνται οι εξισώσεις του μοντέλου της, να διευκολύνεται η ανάλυση της λειτουργίας της και κυρίως να υλοποιείται η μέθοδος του διανυσματικού ελέγχου.



Σχήμα 3.11 Γραφική παράσταση του τριφασικού συστήματος αξόνων A-B-C στο πεδίο του χρόνου και του αυθαίρετου συστήματος αξόνων αναφοράς a^x - β^x στο πεδίο του χώρου

3.8 Στιγμιαία ισχύς του τριφασικού συστήματος

Η στιγμιαία ισχύς του τριφασικού συστήματος είναι το άθροισμα της στιγμιαίας ισχύος της κάθε φάσης

$$p(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t) \quad (3.122)$$

όπου $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$ και $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ οι στιγμιαίες τάσεις και ρεύματα των τριών φάσεων. Θεωρούμε τη γενική περίπτωση όπου το τριφασικό σύστημα είναι ασύμμετρο. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα μετασχηματισμού του ακίνητου συστήματος αξόνων αναφοράς (Εξίσωση (3.109)) ή γενικά του αυθαίρετου συστήματος αξόνων αναφοράς (Εξίσωση (3.119)) η στιγμιαία ισχύς προσδιορίζεται μέσω των διανυσμάτων χώρου της τάσης και του ρεύματος ως εξής

$$p(t) = \frac{3}{2}(u_a^x i_a^x + u_{\beta}^x i_{\beta}^x) + 3u_0(t)i_0(t) \quad (3.123)$$

ή

$$p(t) = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{\mathbf{u}}^x \bar{\mathbf{i}}^{x*}] + 3u_0(t)i_0(t) = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{\mathbf{u}}^{x*} \bar{\mathbf{i}}^x] + 3u_0(t)i_0(t) \quad (3.124)$$

όπου $\bar{\mathbf{u}}^{x*} = u_a^x - j\mu_\beta^x$ και $\bar{\mathbf{i}}^{x*} = i_a^x - j\mu_\beta^x$ οι συζυγείς μιγαδικές εκφράσεις των διανυσμάτων χώρου της τάσης και του ρεύματος, αντίστοιχα. Επίσης, $u_0(t)$ και $i_0(t)$ είναι οι ομοιοπολικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα. Σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η ισχύς του τριφασικού συστήματος είναι η ίδια ανεξάρτητα του συστήματος αξόνων αναφοράς για τον οποίο ορίστηκαν τα αντίστοιχα διανύσματα χώρου.

Η μιγαδική φαινόμενη ισχύς είναι

$$\bar{S} = \frac{3}{2} \bar{\mathbf{u}}^x \bar{\mathbf{i}}^{x*} \quad (3.125)$$

όπου το πραγματικό μέρος $P = \operatorname{Re}(\bar{S})$ είναι η ενεργός ισχύς και το φανταστικό μέρος $Q = \operatorname{Im}(\bar{S})$ είναι η άεργος ισχύς. Στην περίπτωση του συμμετρικού τριφασικού συστήματος, η ενεργός ισχύς είναι

$$P = \operatorname{Re}(\bar{S}) = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\sqrt{2}Ue^{j\phi_u} \sqrt{2}Ie^{j\phi_i}] = 3UI \cos \phi_1 \quad (3.126)$$

κι η άεργος ισχύς

$$Q = \operatorname{Im}(\bar{S}) = \frac{3}{2} \operatorname{Im}[\sqrt{2}Ue^{j\phi_u} \sqrt{2}Ie^{j\phi_i}] = 3UI \sin \phi_1 \quad (3.127)$$

όπου $\phi_1 = \phi_u - \phi_i$ η διαφορά φάσης της τάσης ως προς το ρεύμα.

3.9 Μηχανισμός παραγωγής της ροπής στις στρεφόμενες

ηλεκτρικές μηχανές

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται σε μία ηλεκτρική μηχανή είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ενέργειας

$$T_e = \frac{1}{\omega_{rm}} \frac{dW}{dt} = \frac{P_m}{\omega_{rm}} \quad (3.128)$$

Η μεταβολή της μηχανικής ενέργειας εξόδου W_m είναι

$$dW_m = dW_e - dW_{loss} - dW_f \quad (3.129)$$

όπου W_e η ηλεκτρική ισχύς εισόδου, W_{loss} η ενέργεια απωλειών και W_f η ενέργεια που αποθηκεύεται στο συνδετικό πεδίο.

Αν θεωρήσουμε τη γενική περίπτωση τις συμμετρικής τριφασικής μηχανής με διπλή τροφοδοσία (δηλαδή, τροφοδοσία κι από το στάτη κι από το δρομέα), σύμφωνα με την Εξίσωση (3.124) ο ρυθμός μεταβολής της ηλεκτρικής ενέργειας εισόδου είναι

$$\frac{dW_e}{dt} = \frac{3}{2} \text{Re}[\bar{\mathbf{u}}_s^s \bar{\mathbf{i}}_s^{s*} + \bar{\mathbf{u}}_r^{s'} \bar{\mathbf{i}}_r^{s'*}] \quad (3.130)$$

Οι απώλειες περιλαμβάνουν τις ωμικές απώλειες στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα, τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων στους σιδηρομαγνητικούς πυρήνες και τις μηχανικές απώλειες στα κινούμενα μέρη της μηχανής. Για να διευκολυνθούμε στην ανάλυση θεωρούμε μόνο τις ωμικές απώλειες κι έτσι ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας απωλειών είναι

$$\frac{dW_{loss}}{dt} = \frac{3}{2} \left(|\bar{\mathbf{i}}_s^s|^2 R_s + |\bar{\mathbf{i}}_r^{s'}|^2 R_r' \right) \quad (3.131)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο που αποτελεί το συνδετικό πεδίο μεταξύ του ηλεκτρικού και μηχανικού συστήματος είναι

$$\frac{dW_f}{dt} = \frac{3}{2} \text{Re} \left[\bar{\mathbf{i}}_s^{s*} \frac{d\bar{\lambda}_s^s}{dt} + \bar{\mathbf{i}}_r^{s'*} \frac{d\bar{\lambda}_r^{s'}}{dt} \right] \quad (3.132)$$

όπου $\bar{\lambda}_s^s$ και $\bar{\lambda}_r^{s'}$ τα διανύσματα χώρου της πεπλεγμένης ροής του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα. Οι παράγωγοι των παραπάνω μεγεθών είναι οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις του στάτη $\bar{\mathbf{e}}_s = d\bar{\lambda}_s^s / dt$ και του δρομέα $\bar{\mathbf{e}}_r^{s'} = d\bar{\lambda}_r^{s'} / dt$ ή $\bar{\mathbf{e}}_r^{r'} = d\bar{\lambda}_r^{r'} / dt$, αντίστοιχα.

Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (3.130)-(3.132) στην (3.129) έχουμε

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{3}{2} \left[\text{Re}(\bar{\mathbf{u}}_s^s \bar{\mathbf{i}}_s^{s*}) - |\bar{\mathbf{i}}_s^s|^2 R_s - \text{Re} \left(\bar{\mathbf{i}}_s^{s*} \frac{d\bar{\lambda}_s^s}{dt} \right) \right] + \frac{3}{2} \left[\text{Re}(\bar{\mathbf{u}}_r^{s'} \bar{\mathbf{i}}_r^{s'*}) - |\bar{\mathbf{i}}_r^{s'}|^2 R_r' - \text{Re} \left(\bar{\mathbf{i}}_r^{s'*} \frac{d\bar{\lambda}_r^{s'}}{dt} \right) \right] \quad (3.133)$$

Στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς, η τάση του στάτη είναι ίση με το άθροισμα της πτώσης τάσης στην ωμική αντίσταση και την παράγωγο της πεπλεγμένης ροής

$$\bar{\mathbf{u}}_s^s = \bar{\mathbf{i}}_s^s R_s + \frac{d\bar{\lambda}_s^s}{dt} \quad (3.134)$$

και συνεπώς το πρώτο μέρος της Εξίσωσης (3.133) είναι μηδέν. Έτσι, έχουμε

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{3}{2} \left[\text{Re}(\bar{\mathbf{u}}_r^{s'} \bar{\mathbf{i}}_r^{s'*}) - |\bar{\mathbf{i}}_r^{s'}|^2 R_r' - \text{Re} \left(\bar{\mathbf{i}}_r^{s'*} \frac{d\bar{\lambda}_r^{s'}}{dt} \right) \right] \quad (3.135)$$

Αντίστοιχη εξίσωση με την Εξίσωση (3.134) ισχύει και για το κύκλωμα του δρομέα στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα, επομένως

$$\bar{\mathbf{u}}_r^{\prime r} = \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime r} R'_r + \frac{d\bar{\lambda}_r^{\prime r}}{dt} \quad (3.136)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε και τα δύο μέλη της Εξίσωσης (3.136) με τον όρο $e^{j\theta_r}$ έχουμε

$$\bar{\mathbf{u}}_r^{\prime r} e^{j\theta_r} = \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime r} e^{j\theta_r} R'_r + \frac{d\bar{\lambda}_r^{\prime r}}{dt} e^{j\theta_r} \quad (3.137)$$

Τα μεγέθη της τάσης και του ρεύματος του δρομέα μετασχηματίζονται στο σύστημα αξόνων αναφοράς ($\bar{\mathbf{u}}_r^{\prime s} = \bar{\mathbf{u}}_r^{\prime r} e^{j\theta_r}$ και $\bar{\mathbf{i}}_r^{\prime s} = \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime r} e^{j\theta_r}$) και λαμβάνοντας υπόψη ότι

$$\frac{d\bar{\lambda}_r^{\prime s}}{dt} = \frac{d(\bar{\lambda}_r^{\prime r} e^{j\theta_r})}{dt} = \frac{d\bar{\lambda}_r^{\prime r}}{dt} e^{j\theta_r} + j\omega_r e^{j\theta_r} \bar{\lambda}_r^{\prime r} = \frac{d\bar{\lambda}_r^{\prime r}}{dt} e^{j\theta_r} + j\omega_r \bar{\lambda}_r^{\prime s} \quad (3.138)$$

η Εξίσωση (3.137) γράφεται

$$\bar{\mathbf{u}}_r^{\prime s} = \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime s} R'_r + \frac{d\bar{\lambda}_r^{\prime s}}{dt} - j\omega_r \bar{\lambda}_r^{\prime s} \quad (3.139)$$

Από τις Εξισώσεις (3.135) και (3.139) έχουμε

$$P_m = \frac{dW_m}{dt} = -\frac{3}{2} \omega_r \operatorname{Re}(j\bar{\lambda}_r^{\prime s} \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime s*}) = \frac{3}{2} \omega_r \operatorname{Im}(\bar{\lambda}_r^{\prime s} \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime s*}) \quad (3.140)$$

και τελικά προκύπτει ότι

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = -\frac{3}{2} \bar{\lambda}_r^{\prime s} \times \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime s*} \quad (3.141)$$

Επειδή $\bar{\lambda}_r^{\prime s} \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime s*} = \bar{\lambda}_r^{\prime r} e^{j\theta_r} (\bar{\mathbf{i}}_r^{\prime r} e^{j\theta_r})^* = \bar{\lambda}_r^{\prime r} \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime r*}$, η Εξίσωση (3.141) γράφεται

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = -\frac{3}{2} \bar{\lambda}_r^{\prime r} \times \bar{\mathbf{i}}_r^{\prime r*} \quad (3.142)$$

Σύμφωνα με τις Εξισώσεις (3.141) και (3.142), η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων χώρου της ροής του δρομέα και του ρεύματος του δρομέα. Επίσης, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εξίσωση της ροπής ισχύει γενικά για οποιοδήποτε σύστημα αξόνων αναφοράς. Έτσι, τα διανύσματα χώρου της εξίσωσης της ροπής μπορεί να είναι ορισμένα είτε στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς είτε στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα.

3.10 Διάφορες εκφράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροπής

Αν λύσουμε την Εξίσωση (3.99) ως προς $\bar{\mathbf{i}}_r^{\prime r}$ κι αντικαταστήσουμε στην Εξίσωση (3.142), η εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής γίνεται

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r'} \bar{\lambda}_r'^r \times \bar{\mathbf{i}}_s^s \quad (3.143)$$

Αν αντικαταστήσουμε την Εξίσωση (3.99) στην (3.143) έχουμε

$$T_e = -\frac{3}{2} (L_r' \bar{\mathbf{i}}_r^s + L_m \bar{\mathbf{i}}_s^s) \times \bar{\mathbf{i}}_r'^s = -\frac{3}{2} L_m \bar{\mathbf{i}}_s^s \times \bar{\mathbf{i}}_r'^s \quad (3.144)$$

Στη συνέχεια αν λύσουμε την Εξίσωση (3.97) ως προς $\bar{\mathbf{i}}_s^s$ και αντικαταστήσουμε στην Εξίσωση (3.144) προκύπτει μία Τρίτη σχέση για την ηλεκτρομαγνητική ροπή

$$T_e = \frac{3}{2} \bar{\lambda}_m^s \times \bar{\mathbf{i}}_s^s \quad (3.145)$$

Από τις Εξισώσεις (3.143),(3.145),(3.146) προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπάρχουν τρεις επιλογές ως προς το διάνυσμα χώρου της πεπλεγμένης ροής για την παραγωγή ροπής σε μία ηλεκτρική μηχανή. Σε κάθε μία από τις τρεις εκφράσεις της ροπής, τα διανύσματα της ροής και του ρεύματος αναφέρονται στο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη, το οποίο σύμφωνα με τα παραπάνω θα μπορούσε να είναι το αυθαίρετο σύστημα αξόνων αναφοράς x. Για παράδειγμα η Εξίσωση (3.143) γίνεται

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r'} \bar{\lambda}_r'^r \times \bar{\mathbf{i}}_s^r = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r'} (\bar{\lambda}_r'^r e^{j\theta_x}) \times (\bar{\mathbf{i}}_s^r e^{j\theta_x}) = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r'} \bar{\lambda}_r'^x \times \bar{\mathbf{i}}_s^x \quad (3.147)$$

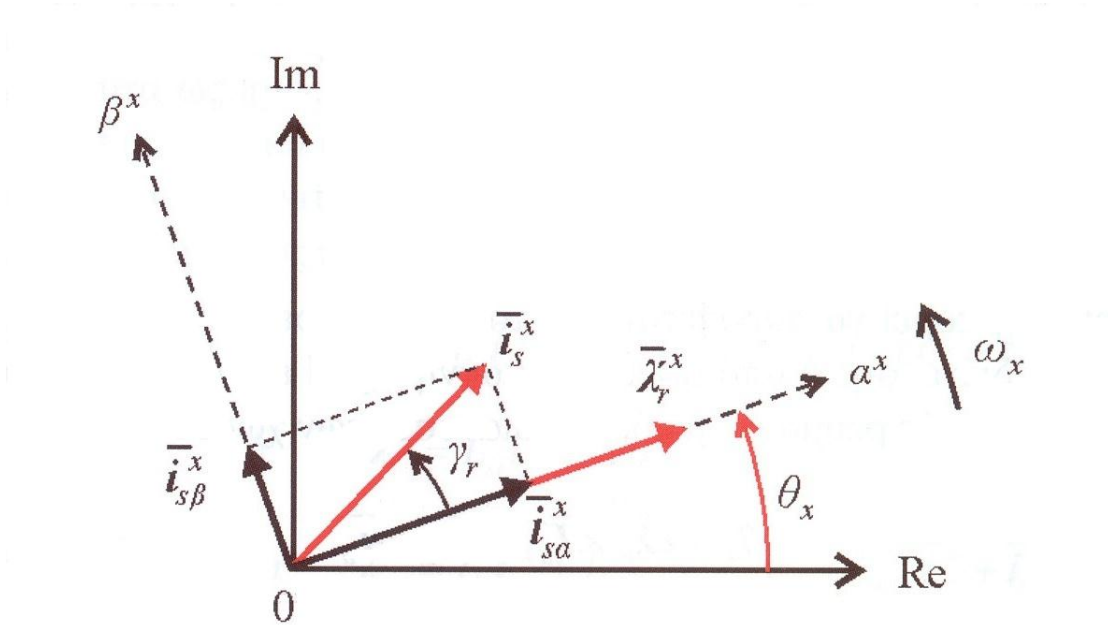
και για p αριθμό ζευγών πόλων, η εξίσωση της ροπής στο αυθαίρετο σύστημα αξόνων αναφοράς x γράφεται

$$T_e = p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r'} \bar{\lambda}_r'^x \times \bar{\mathbf{i}}_s^x = p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r'} |\bar{\lambda}_r'^x| |\bar{\mathbf{i}}_s^x| \sin \gamma_r \quad (3.148)$$

όπου γ_r η γωνία ανάμεσα στα διανύσματα χώρου της ροής του δρομέα και του ρεύματος του στάτη. Αν το αυθαίρετο σύστημα αξόνων αναφοράς επιλεγεί ώστε ο α^x -άξονας να συμπίπτει με τον άξονα διανύσματος της ροής του δρομέα (Σχήμα 3.12) η παραπάνω έκφραση της ροπής γίνεται

$$T_e = p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r'} |\bar{\lambda}_r'^x| i_{s\beta}^x \quad (3.149)$$

όπου $i_{s\beta}^x = |\bar{\mathbf{i}}_s^x| \sin \gamma_r$ η προβολή του διανύσματος χώρου του ρεύματος του στάτη στο β^x -άξονα, που είναι κάθετος στον άξονα του διανύσματος της ροής $\bar{\lambda}_r'^x$.



Σχήμα 3.12 Διάγραμμα των διανυσμάτων χώρου ηλεκτρικής μηχανής στο αυθαίρετο σύστημα αξόνων αναφοράς, όταν το διάνυσμα της ροής του δρομέα είναι προσανατολισμένο κατά τον οριζόντιο άξονα (α^x -άξονα)

Αντίστοιχες εκφράσεις για τη ροπή στο αυθαίρετο σύστημα αξόνων αναφοράς προκύπτουν από τις Εξισώσεις (3.145) και (3.146), δηλαδή

$$T_e = p \frac{3}{2} |\bar{\lambda}_s^x| i_{s\beta}^x \quad (3.150)$$

όπου $i_{s\beta}^x = |\bar{\mathbf{i}}_s^x| \sin \gamma_x$ η προβολή του διανύσματος χώρου του ρεύματος του στάτη στο β^x -άξονα, που είναι κάθετος στον άξονα του διανύσματος της ροής $\bar{\lambda}_s^x$ (α^x -άξονας) και

$$T_e = p \frac{3}{2} |\bar{\lambda}_m^x| i_{s\beta}^x \quad (3.151)$$

όπου $i_{s\beta}^x = |\bar{\mathbf{i}}_s^x| \sin \gamma_m$ η προβολή του διανύσματος χώρου του ρεύματος του στάτη στον β^x -άξονα που είναι κάθετος στο άξονα του διανύσματος της ροής $\bar{\lambda}_m^x$ (α^x -άξονας).

3.11 Αρχή λειτουργίας του διανυσματικού ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών

Οι τρεις εκφράσεις της ροπής που παρουσιάστηκαν παραπάνω θα μας οδηγήσουν στην αρχή της λειτουργίας του διανυσματικού ελέγχου των ηλεκτρικών μηχανών. Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος δεν εφαρμόζεται διανυσματικός έλεγχος με τη μορφή που θα παρουσιαστεί για της μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Ωστόσο, η αρχή λειτουργίας του διανυσματικού ελέγχου βασίζεται στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, και μάλιστα κύρια επιδίωξη είναι να προσεγγίσει την λειτουργία των μηχανών αυτών. Γι' αυτόν το λόγο είναι σημαντικό να δούμε τον τρόπο παραγωγής της ροπής στις μηχανές συνεχούς ρεύματος και να εξετάσουμε πως μπορεί αυτός να προσαρμοστεί για να εφαρμοστεί στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος.

3.11.1 Έλεγχος μηχανών συνεχούς ρεύματος

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης I_F (ρεύμα πεδίου, field or excitation current) ή της ροής διέγερσης (field or excitation flux) λ_F και του ρεύματος τυμπάνου I_a (ρεύμα ροπής, torque producing current)

$$T_e = c\lambda_F I_a = c_1 I_F I_a \quad (3.152)$$

Η ροή λ_F μπορεί να παράγεται από συνεχές ρεύμα I_F που διαρρέει το τύλιγμα της διέγερσης ή από μόνιμους μαγνήτες. Η έκφραση της ροπής των μηχανών συνεχούς ρεύματος με όρους διανυσμάτων χώρου είναι

$$T_e = c\bar{\lambda}_F \times \bar{I}_a = c_1 \bar{I}_F \times \bar{I}_a \quad (3.153)$$

Τα διανύσματα χώρου του ρεύματος πεδίου (ή της ροής διέγερσης) και του ρεύματος ροπής είναι ακίνητα και κάθετα μεταξύ τους. Ο έλεγχος της ροής γίνεται ελέγχοντας άμεσα το ρεύμα ροπής κι ανεξάρτητα από το ρεύμα πεδίου (ροή διέγερσης). Έτσι, ένας γρήγορος έλεγχος του ρεύματος ροπής για έλεγχο ταχύτητας και θέσης επιτυγχάνει αντίστοιχα γρήγορη απόκριση του συστήματος στις μεταβολές των σημάτων εντολής καθώς επίσης και γρήγορη απόσβεση των διαταραχών του φορτίου.

3.11.2 Έλεγχος μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος

Από την ανάλυση που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες γίνεται φανερό πως ο μηχανισμός παραγωγής της ροπής είναι ίδιος για όλους τους τύπους ηλεκτρικών μηχανών (συνεχούς κι εναλλασσόμενου ρεύματος). Κι αυτό γιατί η ροπή παράγεται από τη δράση του

πεδίου διέγερσης και του ρεύματος ροπής. Εκείνο που διαφέρει σε κάθε μηχανή είναι η τεχνική ελέγχου της ροπής κι ο τρόπος υλοποίησής της.

Για να πετύχουμε πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά θα πρέπει να ελέγχονται ανεξάρτητα το ρεύμα ροπής από το ρεύμα πεδίου. Με αυτόν τον τρόπο ο έλεγχος των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος γίνεται παρόμοιος με τον έλεγχο των μηχανών συνεχούς ρεύματος, ενώ ταυτόχρονα εκμεταλλευόμαστε τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η κατασκευή των μηχανών αυτών έναντι των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, ο έλεγχος αυτός είναι ιδιαίτερα δύσκολος γιατί απαιτεί την απεμπλοκή των ρευμάτων ροπής και πεδίου, από το συνολικό ρεύμα τροφοδοσίας. Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο διακένου των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος είναι στρεφόμενο και συνεπώς απαιτείται μετασχηματισμός των ηλεκτρικών μεγεθών σε ένα σύστημα αξόνων αναφοράς που θα τα κάνει τα αντίστοιχα διανύσματα χώρου ακίνητα. Έτσι, θα πρέπει αρχικά να επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα αξόνων αναφοράς ώστε τα διανύσματα χώρου της ροής και του ρεύματος του στάτη να είναι ακίνητα ως προς το σύστημα αυτό και συνεπώς οι αντίστοιχες ποσότητες να είναι χρονικά αμετάβλητες.

Υπάρχουν τρεις δυνατές επιλογές για το διάνυσμα χώρου της ροής κι αντίστοιχα του ρεύματος πεδίου:

(α) η ροή του στάτη

$$\bar{\lambda}_s^x = L_s \bar{\mathbf{i}}_s^x + L_m \bar{\mathbf{i}}_r^x = L_{sl} \bar{\mathbf{i}}_s^x + L_m (\bar{\mathbf{i}}_s^x + \bar{\mathbf{i}}_r^x)$$

ή

$$\bar{\lambda}_s^x = L_{sl} \bar{\mathbf{i}}_s^x + L_m \bar{\mathbf{i}}_m^x$$

(β) η ροή του δρομέα

$$\bar{\lambda}_r^x = L_r \bar{\mathbf{i}}_r^x + L_m \bar{\mathbf{i}}_s^x = L_{rl} \bar{\mathbf{i}}_r^x + L_m (\bar{\mathbf{i}}_s^x + \bar{\mathbf{i}}_r^x)$$

ή

$$\bar{\lambda}_r^x = L_{rl} \bar{\mathbf{i}}_r^x + L_m \bar{\mathbf{i}}_m^x$$

(γ) η συνολική ροή μαγνήτισης

$$\bar{\lambda}_m^x = L_m \bar{\mathbf{i}}_m^x$$

Οι τρεις Εξισώσεις της στιγμιαίας ηλεκτρομαγνητικής ροπής (3.149), (3.150), (3.151) καθορίζουν τρεις διαφορετικούς τρόπους ελέγχου της ροπής

(α) έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου στάτη / stator-flux oriented control

$$T_e = c_s \left| \bar{\lambda}_s^x \right| \left| \bar{\mathbf{i}}_s^x \right| \sin \gamma_s = c_s \left| \bar{\lambda}_s^x \right| i_{s\beta}^x \quad (3.154)$$

(β) έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου δρομέα / rotor-flux oriented control

$$T_e = c_r |\bar{\lambda}_r'^x| |\bar{\mathbf{i}}_s^x| \sin \gamma_r = c_s |\bar{\lambda}_r'^x| i_{s\beta}^x \quad (3.155)$$

(γ) έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου μαγνήτισης / magnetizing flux oriented control

$$T_e = c_e |\bar{\lambda}_m^x| |\bar{\mathbf{i}}_s^x| \sin \gamma_m = c_e |\bar{\lambda}_m^x| i_{s\beta}^x \quad (3.156)$$

Οι ποσότητες $|\bar{\lambda}_s^x|$, $|\bar{\lambda}_r'^x|$, $|\bar{\lambda}_m^x|$ είναι τα πλάτη των αντίστοιχων διανυσμάτων χώρου των μαγνητικών ροών, το ρεύμα $|\bar{\mathbf{i}}_s^x|$ είναι το πλάτος του διανύσματος χώρου του ρεύματος του στάτη κι οι γωνίες γ_s , γ_r και γ_m είναι οι γωνίες που σχηματίζουν τα διανύσματα χώρου των μαγνητικών ροών στάτη, δρομέα και μαγνήτισης με το διάνυσμα του ρεύματος του στάτη, αντίστοιχα. Σε κάθε μία από τις παραπάνω τεχνικές έλεγχου το διάνυσμα της ροής καθορίζει τον άξονα πάνω στον οποίο προβάλλεται το διάνυσμα του ρεύματος του στάτη. Με άλλα λόγια, το διάνυσμα ροής καθορίζει το σύστημα αξόνων αναφοράς. Το ρεύμα $i_{s\beta}^x$ είναι η εγκάρσια συνιστώσα (ρεύμα ροπής) του διανύσματος $\bar{\mathbf{i}}_s^x$ κι η συνιστώσα i_{sa}^x (ρεύμα πεδίου) είναι συμφασική με το διάνυσμα της ροής σε σύστημα συντεταγμένων προσανατολισμένο στον άξονα της ροής.

Επειδή το διάνυσμα της ροής καθορίζει τον προσανατολισμό του συστήματος αξόνων αναφοράς, ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός ως έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (field oriented control). Έτσι, θα πρέπει να είναι γνωστή σε κάθε στιγμή η διεύθυνση του διανύσματος χώρου της ροής που επιλέχθηκε ανάλογα με την τεχνική έλεγχου (με άλλα λόγια, η φάση του διανύσματος). Γι' αυτό το λόγο άλλωστε ο έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου ονομάζεται και διανυσματικός έλεγχος (vector control).

Ο διανυσματικός έλεγχος των ηλεκτρικών μηχανών επιτυγχάνεται ελέγχοντας τις δύο συνιστώσες του ρεύματος του στάτη, το ρεύμα πεδίου i_{sa}^x και το ρεύμα ροπής $i_{s\beta}^x$. Η συνιστώσα του ρεύματος πεδίου είναι συμφασική με το διάνυσμα της ροής που επιλέχθηκε για τον προσανατολισμό του συστήματος αξόνων αναφοράς και συνεπώς μέσω αυτής ελέγχεται η τιμή της ροής. Η συνιστώσα του ρεύματος ροπής είναι κάθετη στο διάνυσμα της ροής και μέσω αυτής (σε συνδυασμό με το ρεύμα πεδίου) ελέγχεται η τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής του κινητήρα. Με αυτόν τον τρόπο απεμπλέκεται ο έλεγχος της ροής από τον έλεγχο της ροπής κι έτσι ο έλεγχος των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος γίνεται ίδιος με τον έλεγχο των μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Στη μηχανή συνεχούς ρεύματος, το σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών διατηρεί σταθερές τις θέσεις των διανυσμάτων χώρου ροής-διέγερσης και του ρεύματος τυμπάνου. Συνεπώς έχουμε έλεγχο προσανατολισμένου πεδίου στάτη και τα διανύσματα χώρου είναι ορισμένα στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη. Από την Εξίσωση (3.154) και για μεγέθη

ορισμένα στο ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη προκύπτει η εξίσωση της ροπής των μηχανών συνεχούς ρεύματος

$$T_e = c_s \left| \bar{\lambda}_s^s \right| i_{s\beta}^s \quad (3.157)$$

Συγκρίνοντας την παραπάνω εξίσωση με την Εξίσωση (3.152), παρατηρούμε ότι η ροή $\left| \bar{\lambda}_s^s \right|$ αντιστοιχίζεται στη ροή διέγερσης λ_F , το ρεύμα ροπής $i_{s\beta}^s$ στο ρεύμα τυμπάνου i_a κι οι δύο σταθερές είναι ίσες $c_s=c$. Πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι οι μηχανές συνεχούς ρεύματος έχουν χωριστά τυλίγματα διέγερσης και τυμπάνου κι έτσι υπάρχει η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου των ρευμάτων πεδίου και ροής μέσω απλού βαθμωτού ελέγχου.

Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (επαγωγικές, σύγχρονες και μαγνητικής αντίστασης) θα μπορούσε να εφαρμοστεί οποιαδήποτε από τις τρεις παραπάνω τεχνικές προσανατολισμένου πεδίου. Ωστόσο, για λόγους πρακτικής υλοποίησης του συστήματος ελέγχου συνήθως επιλέγεται ο έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου δρομέα, γιατί είναι ευκολότερος ο προσδιορισμός της διεύθυνσης του διανύσματος ροής του δρομέα σε αντίθεση με τις διευθύνσεις των άλλων δύο ροών.

Σε συστήματα στα οποία εφαρμόζεται ο έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου του στάτη χρησιμοποιείται ως σύστημα αξόνων αναφοράς το ακίνητο σύστημα αξόνων αναφοράς του στάτη. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως άμεσος έλεγχος ροπής κι εφαρμόζεται κυρίως στους επαγωγικούς κινητήρες.

3.11.2.1 Έλεγχος επαγωγικών μηχανών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για το διανυσματικό έλεγχο των επαγωγικών κινητήρων χρησιμοποιείται η τεχνική του προσανατολισμένου πεδίου δρομέα. Το σύστημα αξόνων αναφοράς στρέφεται με την ηλεκτρική σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα ω_e η οποία είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής του διανύσματος χώρου της ροής του δρομέα ως προς το στάτη. Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται ως σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς (synchronously rotating reference frame) και τα διανύσματα χώρου των ηλεκτρικών μεγεθών του στάτη και του δρομέα ως προς το σύστημα αυτό είναι ακίνητα. Επίσης, μέσω της ταχύτητας του δρομέα μπορεί να παρακολουθείται η διαφορά ταχύτητας μεταξύ της σύγχρονης ηλεκτρικής ταχύτητας και της ηλεκτρικής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα ($\omega_e - \omega_r$).

Η εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής των επαγωγικών μηχανών στο σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς είναι

$$T_e = c_r \bar{\lambda}_r'^e \times \bar{\mathbf{i}}_s^e \quad (3.158)$$

Έχοντας υπόψη ότι $\bar{\lambda}'_r = \bar{\lambda}'_{ra} + \bar{\lambda}'_{rb}$ και $\bar{\mathbf{i}}_s = \bar{\mathbf{i}}_{sa} + \bar{\mathbf{i}}_{sb}$, η παραπάνω εξίσωση της ροπής γίνεται

$$T_e = c_r [\lambda'_{ra} i'_{sb} - \lambda'_{rb} i'_{sa}] \quad (3.159)$$

Εφόσον έχουμε έλεγχο προσανατολισμένου πεδίου δρομέα, η διεύθυνση του πεδίου του δρομέα είναι συμφασική με τον οριζόντιο άξονα του συστήματος αξόνων αναφοράς και συνεπώς συμφασική με το ρεύμα πεδίου $\bar{\mathbf{i}}_{sa}^e$. Με άλλα λόγια, έχουμε $\bar{\lambda}'_r = \bar{\lambda}'_{ra}$ και συνεπώς η εγκάρσια συνιστώσα της ροής είναι μηδέν $\bar{\lambda}'_{rb} = 0$. Έτσι η Εξίσωση (3.158) γίνεται

$$T_e = c_r |\bar{\lambda}'_r| i'_{sb} \quad (3.160)$$

ή

$$T_e = c_r \lambda'_{ra} i'_{sb} \quad (3.161)$$

το διάγραμμα των διανυσμάτων χώρου της ροής του δρομέα και του ρεύματος του στάτη της επαγωγικής μηχανής δίνεται στο Σχήμα 3.12 (ο υπερδείκτης x πρέπει να αντικατασταθεί από τον e που χαρακτηρίζει το σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς)

Υπάρχουν δύο τρόποι ελέγχου:

- a) ο άμεσος έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου δρομέα (direct rotor-flux oriented control ή flux-feedback control), όπου το διάνυσμα της ροής είτε μετρείται απ' ευθείας χρησιμοποιώντας κατάλληλους αισθητήρες (Hall-effect sensors, ειδικά τυλίγματα μέτρησης κλπ), είτε προσδιορίζεται μέσω των τάσεων και ρευμάτων του στάτη
- b) ο έμμεσος έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου δρομέα (indirect rotor-flux oriented control ή flux-feed forward control), όπου το διάνυσμα της ροής του δρομέα υπολογίζεται μέσω του ρεύματος του στάτη και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής

στις περισσότερες εφαρμογές προτιμάται ο έμμεσος έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου δρομέα, γιατί είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμος, έχει καλύτερη δυναμική συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες και κυρίως μπορεί να λειτουργεί και στη μηδενική ταχύτητα. Ωστόσο, επειδή η υλοποίησή του στηρίζεται στο μοντέλο της μηχανής, έχει ως αποτέλεσμα ο έλεγχος να αυτός να εξαρτάται από τις παραμέτρους του μοντέλου και κυρίως από τους παράγοντες που τις επηρεάζουν (μεταβολές τιμών των ωμικών αντιστάσεων λόγω μεταβολών θερμοκρασίας και μεταβολή της τιμής της αυτεπαγωγής λόγω μαγνητικού κορεσμού). Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να είναι γνωστό με πολύ καλή ακρίβεια το μοντέλο της μηχανής κι επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές των παραμέτρων του, ώστε να

επιτυγχάνεται σωστός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου. Σε αντίθετη περίπτωση, θα έχουμε σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος, όπως αύξηση του ρεύματος τροφοδοσίας, μείωση του βαθμού απόδοσης και ταλαντώσεις στη ταχύτητα και τη ροπή της μηχανής.

3.11.2.2 Έλεγχος σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη

Και στις μηχανές αυτές εφαρμόζεται ο έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου δρομέα, και μάλιστα για το επιπλέον λόγο ότι η διεύθυνση της ροής του δρομέα μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα επειδή παράγεται από τους μαγνήτες, δηλαδή ανεξάρτητα από τη διέγερση του στάτη. Το σύστημα αξόνων αναφοράς είναι το στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα το οποίο στρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ω_r . Έτσι, το διάνυσμα χώρου της ροής του δρομέα είναι ακίνητο ως προς το σύστημα αυτό κι επίσης μπορεί να παρακολουθείται η διαφορά ταχύτητας $\omega_e - \omega_r$ ως προς τα ηλεκτρικά μεγέθη του στάτη. Στη μόνιμη κατάσταση ισοροπίας, η ταχύτητα περιστροφής της ροής διέγερσης είναι ίση με τη ταχύτητα του δρομέα ($\omega_r = \omega_e$) και στην περίπτωση αυτή το σύστημα αξόνων αναφοράς ταυτίζεται με το σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς.

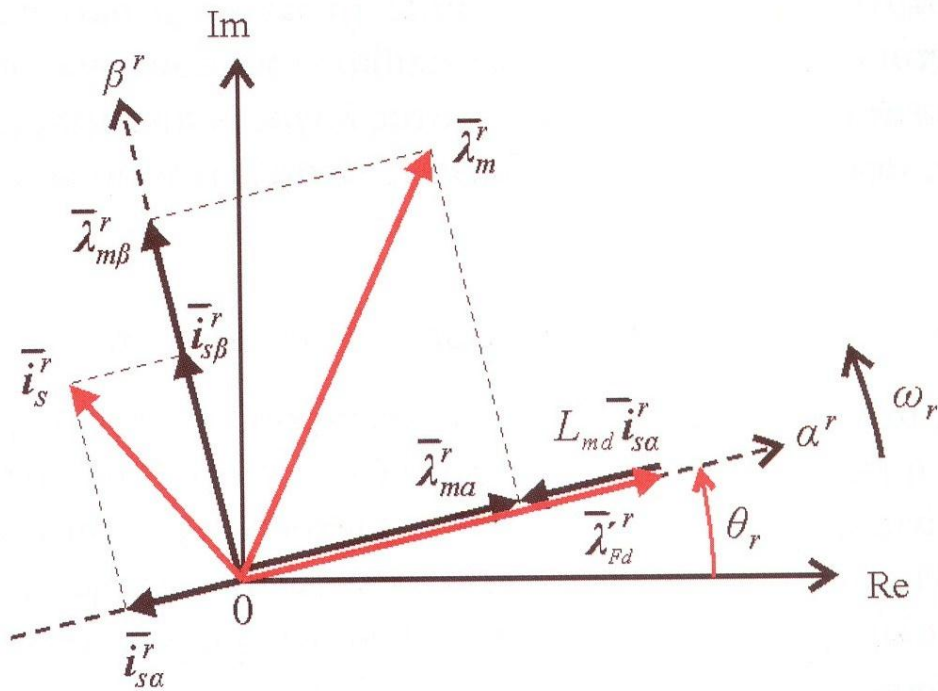
Η εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα είναι (με χρήση της Εξίσωσης (3.146) με $x=r$)

$$T_e = c_e \bar{\lambda}_m^r \times \bar{\mathbf{i}}_s^r \quad (3.162)$$

Έχοντας υπόψη ότι $\bar{\lambda}_m^r = \bar{\lambda}_{ma}^r + \bar{\lambda}_{mb}^r$ και $\bar{\mathbf{i}}_s^r = \bar{\mathbf{i}}_{s\alpha}^r + \bar{\mathbf{i}}_{s\beta}^r$, η παραπάνω εξίσωση της ροής γίνεται

$$T_e = c_r \left[\lambda_{ma}^r i_{s\beta}^r - \lambda_{mb}^r i_{s\alpha}^r \right] \quad (3.163)$$

Αν κι από την Εξίσωση (3.162) θα μπορούσε να συμπεράνει κανείς ότι έχουμε έλεγχο προσανατολισμένου πεδίου μαγνήτισης, ωστόσο ο έλεγχος είναι προσανατολισμένου πεδίου δρομέα γιατί ο οριζόντιος άξονας του συστήματος αξόνων αναφοράς είναι συμφασικός με τη διεύθυνση της ροής του δρομέα (ροής διέγερσης των μαγνητών $\bar{\lambda}_{Fd}$), Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 Διάγραμμα των διανυσμάτων χώρου για τον έλεγχο της σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα

Η διεύθυνση της ροής του δρομέα είναι συμφασική με το ρεύμα πεδίου \bar{i}_{sa}^r και το διάγραμμα των διανυσμάτων χώρου της συνολικής ροής μαγνήτισης και του ρεύματος του στάτη των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη δίνεται στο Σχήμα 3.13. Αν θεωρήσουμε τη γενική περίπτωση όπου οι αυτεπαγωγές στους δύο μαγνητικούς άξονες είναι διαφορετικές, οι συνιστώσες της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής διακένου στον οριζόντιο και στον εγκάρσιο άξονα, αντίστοιχα, είναι

$$\lambda_{ma}^r = \text{Re}(\bar{\lambda}_m^r) = \lambda_{Fd}^r + L_{md} i_{sa}^r \quad (3.164)$$

και

$$\lambda_{m\beta}^r = \text{Im}(\bar{\lambda}_m^r) = L_{mq} i_{s\beta}^r \quad (3.164)$$

όπου λ_{Fd}^r η ροή διέγερσης που παράγουν οι μαγνήτες ανηγμένοι στο κύκλωμα του στάτη και ορισμένη στο στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα. Στις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη, η ροή $L_{md} i_{sa}^r$ που παράγει το ρεύμα πεδίου i_{sa}^r συνήθως είναι αντίθετη προς τη ροή διέγερσης λ_{Fd}^r , δηλαδή απομαγνητίζει τους μαγνήτες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Στις περιπτώσεις αυτές, το ρεύμα πεδίου i_{sa}^r έχει αρνητική στην Εξίσωση (3.164).

αν αντικαταστήσουμε τις Εξισώσεις (3.164) και (3.165) στην (3.162), η εξίσωση της ροπής των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη γίνεται

$$T_e = c_e \left[\lambda_{Fd}^{r} i_{s\beta}^r + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sa}^r i_{s\beta}^r \right] \quad (3.166)$$

Όπου $L_{sd} = L_{s1} + L_{md}$ και $L_{sq} = L_{s1} + L_{mq}$. Στην παραπάνω εξίσωση, ο πρώτος όρος $c_e \lambda_{Fd}^{r} i_{s\beta}^r$ δίνει ροπή ευθυγράμμισης κι ο δεύτερος όρος $c_e (L_{sd} - L_{sq}) i_{sa}^r i_{s\beta}^r$ δίνει ροπή μαγνητικής έλξης.

Στις σύγχρονες μηχανές με μαγνήτες τοποθετημένους στο εσωτερικό του δρομέα έχουμε ταυτόχρονα ροπή ευθυγράμμισης και ροπή μαγνητικής έλξης. Επειδή $L_{sd} < L_{sq}$, απαιτείται αρνητικό ρεύμα πεδίου (i_{sa}^r , ρεύμα απομαγνήτισης) ώστε να προκύπτει θετική ροπή μαγνητικής έλξης.

Στις σύγχρονες μηχανές με μαγνήτες τοποθετημένους στην επιφάνεια του δρομέα ισχύει $L_{sd} = L_{sq}$ και συνεπώς η εξίσωση της ροπής (3.166) γίνεται

$$T_e = c_e \lambda_{Fd}^{r} i_{s\beta}^r \quad (3.167)$$

Στην περίπτωση αυτή η ροπή δεν εξαρτάται από τη συνιστώσα i_{sa}^r του ρεύματος του στάτη. Επιπλέον, επιλέγοντας μηδενικό ρεύμα πεδίου $i_{sa}^r = 0$ προστατεύονται οι μαγνήτες, αφού δεν επιβάλλεται εξωτερικό πεδίο απομαγνήτισης κι επίσης επιτυγχάνεται μέγιστος λόγος ροπής προς ρεύμα φορτίου $(T_e/i_s)_{\max}$, αφού το ρεύμα τροφοδοσίας αποτελείται από μόνο το ρεύμα ροπής $i_{s\beta}^r$.

3.11.2.3 Έλεγχος σύγχρονων μηχανών μαγνητικής αντίστασης

Στις μηχανές αυτές δεν υπάρχει τύλιγμα διέγερσης ή μαγνήτες στο δρομέα και συνεπώς η ροή διέγερσης είναι μηδέν ($\lambda_{Fd}^r = 0$). Οι αυτεπαγωγές στους δύο άξονες είναι διαφορετικές ($L_{sd} \neq L_{sq}$). Ωστόσο, σε αντίθεση με τις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη έκτυπου τύπου διέγερσης, η αυτεπαγωγή L_{sd} είναι μεγαλύτερη της L_{sq} και στις μηχανές αυτές εφαρμόζεται έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου δρομέα και το σύστημα αξόνων αναφοράς είναι το στρεφόμενο σύστημα αξόνων αναφοράς του δρομέα.

Από την Εξίσωση (3.166) και για $\lambda_{Fd}^r = 0$ προκύπτει η εξίσωση της ροπής για τις σύγχρονες μηχανές μαγνητικής αντίστασης

$$T_e = c_e (L_{sd} - L_{sq}) i_{sa}^r i_{s\beta}^r \quad (3.168)$$

Επειδή $L_{sd} > L_{sq}$, στις μηχανές αυτές το ρεύμα πεδίου είναι θετικό ($i_{sa}^r > 0$) ώστε να παράγεται θετική ροπή.

3.11.3 Έλεγχος μηχανών μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης

Οι μηχανές αντίστασης διακοπτικής διέγερσης έχουν διπλά έκτυπους πυρήνες, στο στάτη και στο δρομέα. Η τροφοδοσία των τυλιγμάτων του στάτη είναι παλμοί τάσης κι η ροπή που παράγει η μηχανή είναι ροπή μαγνητικής έλξης. Η φορά της ροπής εξαρτάται από τη σειρά διαδοχής διέγερσης των φάσεων του στάτη κι είναι ανεξάρτητη από το πρόσημο του ρεύματος τροφοδοσίας (αφού η τιμή της ροπής μαγνητικής έλξης είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος τροφοδοσίας $F_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx}$). Η χρονική διάρκεια των παλμών

διέγερσης κάθε φάσης καθορίζει το μέγεθος της ροπής κι η συχνότητα των παλμών καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η συνολική ροπή της μηχανής είναι το άθροισμα των ροπών κάθε φάσης.

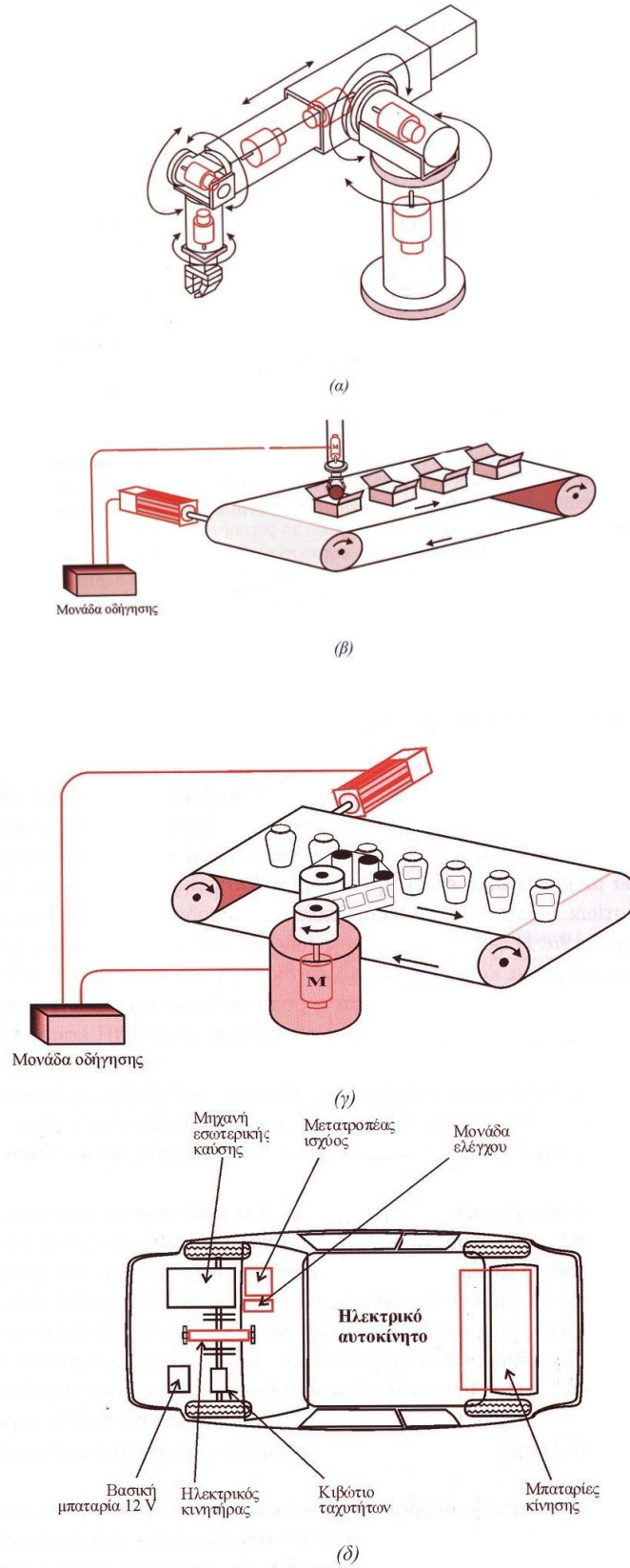
Στις μηχανές αυτές δεν εφαρμόζεται η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου, αλλά επιβάλλεται ελεγχόμενη παλμική τάση (είτε με έλεγχο τάσης είτε με έλεγχο ρεύματος) με αποτέλεσμα ο τρόπος υλοποίησης του ελέγχου να είναι σχετικά εύκολος. Επίσης, η τοπολογία των ηλεκτρονικών διακοπών του μετατροπέα ισχύος είναι διαφορετική σε σχέση με τις υπόλοιπες μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος και μάλιστα, επειδή προσφέρει αυτονομία λειτουργίας ανά φάση, η λειτουργία των μηχανών αυτών είναι λιγότερο ευαίσθητη σε σφάλματα του συστήματος οδήγησης.

4

Εφαρμογές των σερβοκινητήρων & συμπεράσματα

4.1 Εφαρμογές σερβοκινητήρων

Οι σερβοκινητήρες και γενικά τα σερβοκινητήρια συστήματα καλύπτουν ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών που εκτείνεται από οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές, συσκευές και περιφερειακά συστημάτων πληροφορικής, ιατρικά εργαλεία και μηχανήματα ειδικών εφαρμογών, παιχνίδια, συστήματα ρομποτικής έως μεταφορικά μέσα και κυρίως εφαρμογές στην αεροπορική-αεροδιαστημική κι αμυντική βιομηχανία. Τα σερβοκινητήρια συστήματα είναι η ενδεδειγμένη επιλογή σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων απόδοσης κι ελέγχου. Η ισχύς των σερβοκινητήριων συστημάτων είναι από ελάχιστα Watt (π.χ. ιατρικά εργαλεία, μετρητικά συστήματα, παιχνίδια) έως πολλά kWatt (π.χ. μεταφορές, αεροδιαστημική, αμυντική βιομηχανία). Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες εφαρμογές σερβοκινητήριων συστημάτων.



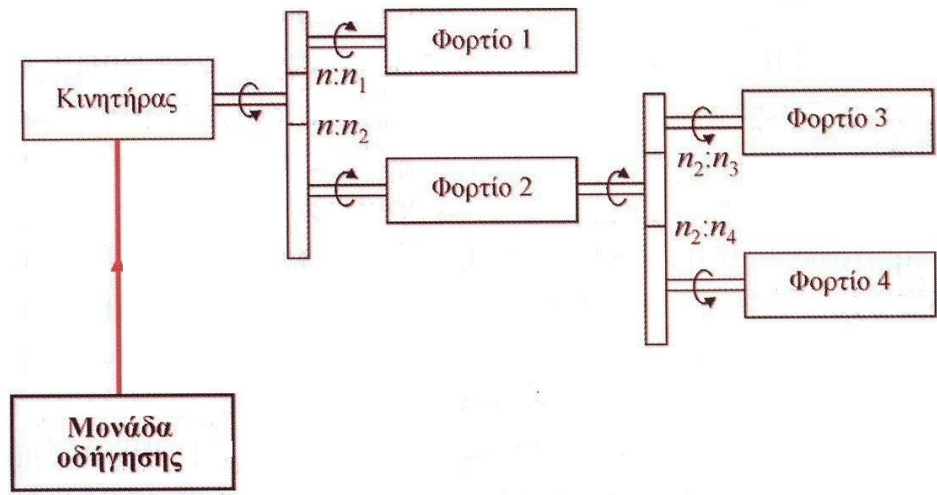
Σχήμα 4.1 Εφαρμογές σερβοκινητήρων: (α) βιομηχανικό ρομπότ, (β) σύστημα αυτόματης συσκευασίας, (γ) σύστημα αυτόματης επικόλλησης ετικετών, (δ) υβριδικό-ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

Από τα τέλη του 1970 άρχισε να παρουσιάζεται μία νέα τεχνολογία στην περιοχή των κινητήριων συστημάτων που ονομάζεται mechatronics (θα μπορούσαμε να το μεταφράσουμε ως μηχανοηλεκτρονική). Η μηχανοηλεκτρονική είναι σύνθεση της επιστήμης του μηχανολόγου μηχανικού με την ηλεκτρονική και τα συστήματα ελέγχου τα οποία είναι αντικείμενα του ηλεκτρολόγου μηχανικού. Αντικείμενο της μηχανοηλεκτρονικής είναι η παραγωγή βέλτιστων συστημάτων ελέγχου αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα συνδυαστικά από την μηχανολογική και την ηλεκτρονική του πλευρά.

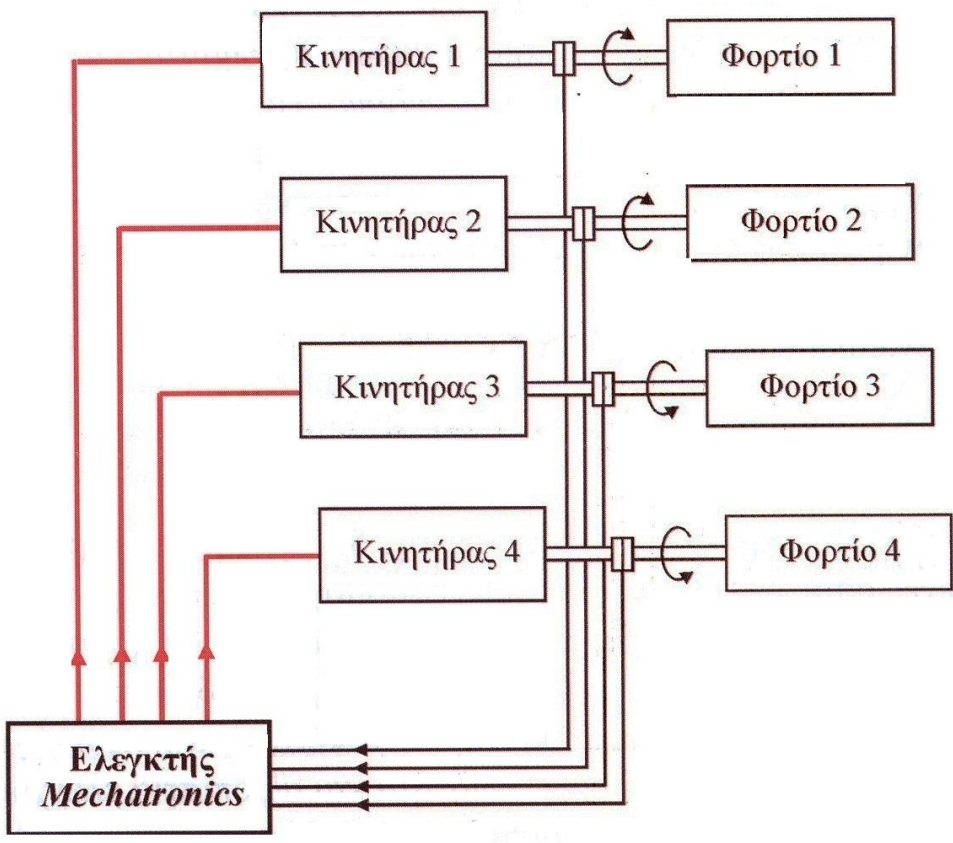
Ένα τυπικό παράδειγμα εφαρμογής της μηχανοηλεκτρονικής είναι ο συνδυαστικός έλεγχος πολλών κινητήριων συστημάτων. Η συμβατική λύση στο πρόβλημα είναι η μηχανολογική λύση, δηλαδή η χρησιμοποίηση ενός κινητήρα με κατάλληλο ελεγκτή κι η μετάδοση της κίνησης στους άξονες των φορτίων γίνεται με σύστημα πολλαπλών οδοντωτών δίσκων (Σχήμα 4.2.α). Η φορά περιστροφής των αξόνων των φορτίων ως προς τη φορά του κινητήρα καθορίζεται από τη διάταξη του συστήματος των οδοντωτών τροχών. Η εφαρμογή της συμβατικής μηχανολογικής λύσης είναι αποδεκτή για σταθερή σχέση ταχύτητας μεταξύ των αξόνων των φορτίων. Ωστόσο, δεν υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς μεταβολής της ταχύτητας κάθε άξονα χωριστά, ενώ η οποιαδήποτε μεταβολή της σχέσης ταχυτήτων γίνεται αλλάζοντας τους οδοντωτούς τροχούς.

Στη μηχανοηλεκτρονική λύση (Σχήμα 4.2.β), ο κάθε άξονας οδηγείται από ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο κινητήρα. Ένας επιπλέον ελεγκτής (mechatronics controller) αναλαμβάνει να συντονίζει τη λειτουργία του συστήματος παίρνοντας τα σήματα ανάδρασης (ταχύτητας και θέσης) από κάθε άξονα κι ελέγχοντας τις μονάδες οδήγησης του κάθε κινητήρα. Με άλλα λόγια, ο ελεγκτής αυτός μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο κιβώτιο ταχυτήτων. Έτσι, το συνολικό κινητήριο σύστημα είναι περισσότερο ευέλικτο σε αλλαγές, αξιόπιστο στη λειτουργία του και σε πολλές περιπτώσεις οικονομικότερο σε σύγκριση με το συμβατικό μηχανολογικό κινητήριο σύστημα. Η ευρεία χρήση των σερβοκινητήρων και κυρίως η εφαρμογή τους σε σύνθετα ηλεκτροκινητήρια συστήματα, που αποτελούνται από πολλούς σερβοκινητήρες με συνεργαζόμενη λειτουργία, οδήγησε στην ανάγκη καθορισμού βασικών αρχών που αφορούν την επικοινωνία των συστημάτων ελέγχου μεταξύ τους. Το 1986 η εταιρία Bosch GmGh πρωτοπαρουσίασε ένα σειριακό σύστημα επικοινωνίας που αναπτύχθηκε για κινητήρια συστήματα με εφαρμογή σε ηλεκτροκίνητα μεταφορικά μέσα. Το πρωτόκολλο αυτό ονομάστηκε CAN (Controller Area Network) και το 1993 έγινε διεθνές στάνταρτ ISO 11898. Αυτή τη στιγμή είναι ένα από τα πιο δημοφιλή πρωτόκολλα επικοινωνίας σε σερβοκινητήρια συστήματα κι ακολουθείται από τους περισσότερους κατασκευαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κι εξαρτημάτων για συστήματα οδήγησης σερβοκινητήρων. Οι εταιρίες αυτές ίδρυσαν το 1992 ένα μη-κερδοσκοπικό οργανισμό που

ονομάστηκε CiA (CAN in Automation) με σκοπό την παροχή τεχνικών πληροφοριών ώστε να βοηθήσουν στην προώθηση και διερεύνηση του πρωτοκόλλου CAN σε όσο το δυνατόν περισσότερες εφαρμογές σερβοκινητήριων συστημάτων.



(α)



(β)

Σχήμα 4.2 Σχεδιασμός ηλεκτροκινητήριου συστήματος: (α) συμβατικό μηχανολογικό σύστημα κίνησης, (β) μηχανοηλεκτρονικό σύστημα κίνησης (mechatronics system)

Το πρωτόκολλο CAN εξασφαλίζει γρήγορη κι αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των σταθμών (μονάδων ελέγχου σερβοκινητήρων). Ένα δίκτυο CAN λειτουργεί μέσω μηνυμάτων που στέλνονται προς όλους τους σταθμούς του δικτύου. Ανάλογα με την προτεραιότητα του μηνύματος ανταποκρίνεται στην εκτέλεση της εντολής ο αντίστοιχος σταθμός. Το δίκτυο CAN βασίζεται στην ανοικτή επικοινωνία μεταξύ των σταθμών κι έτσι μπορούν εύκολα να συνδέονται ή να αποσυνδέονται σταθμοί χωρίς να χρειάζονται αλλαγές ή ρυθμίσεις στις συσκευές και στα προγράμματα των μονάδων ελέγχου.

Παράλληλα με το πρωτόκολλο CAN έχουν αναπτυχθεί πρωτόκολλα ανώτερου επιπέδου για συγκεκριμένες εφαρμογές (CAN Application Layer – CAL). Τα πρωτόκολλα αυτά είναι τα CANopen και DeviceNet. Το CANopen είναι ειδικά σχεδιασμένο για εφαρμογές σε κινητήρια συστήματα εργαλειομηχανών, ηλεκτροκίνητων μεταφορικών μέσων, οικιακών αυτοματισμών κλπ., ενώ το DeviceNet είναι σχεδιασμένο για βιομηχανικές εφαρμογές.

4.2 Συμπεράσματα

Η εξοικονόμηση ενέργειας, η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς κι οι αυξανόμενες απαιτήσεις στις διάφορες εφαρμογές για έλεγχο ταχύτητας και θέσης είναι οι σημαντικότεροι λόγοι που επιβάλλουν τη χρήση κινητήριων συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας. Η επιλογή του είδους του κινητήρα και της τεχνικής ελέγχου γίνεται με κριτήρια το κόστος και τις ανάγκες της εφαρμογής σε ταχύτητα απόκρισης, ποιότητα κι αξιοπιστία ελέγχου.

Ένα σερβοκινητήριο σύστημα απαιτεί κινητήρες με βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά κι η τεχνική ελέγχου που εφαρμόζεται θα πρέπει να εξασφαλίζει λειτουργία σε μεγάλο εύρος ταχύτητας, άμεση απόκριση με γρήγορες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις, σταθερότητα ροπής κι ακρίβεια στον έλεγχο ταχύτητας και θέσης. Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη συγκεντρώνουν τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά που απαιτεί ένα σερβοκινητήριο σύστημα κι η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου επιτυγχάνει ικανοποιητικό έλεγχο ροπής με γρήγορη κι ελεγχόμενη απόκριση του κινητήρα σε μεταβατικά φαινόμενα. Η χρήση επαγωγικών κινητήρων σε σερβοκινητήρια συστήματα είναι περιορισμένη όπως κι η χρήση των κινητήρων μαγνητικής αντίστασης (σύγχρονων και διακοπτικής διέγερσης). Οι συμβατικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος καλύπτουν κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά που χρειάζεται ένα σερβοκινητήριο σύστημα, ωστόσο κυρίως λόγω των προβλημάτων που προκαλεί το σύστημα συλλέκτη-ψηκτρώναντικαθίστανται συνεχώς από τους brushless σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

Ο κύριος λόγος των πολλών κατασκευαστικών τύπων ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας οφείλεται στην

προσπάθεια των κατασκευαστών να πετύχουν το βέλτιστο σχεδιασμό που θα ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες κι απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Οι σχεδιάστηκες επιλογές στις ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ποικίλουν ανάλογα με τη θέση του δρομέα ως προς το στάτη, το σχεδιασμό των περιελίξεων, τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, τον τρόπο κίνησης του δρομέα, το σχεδιασμό του πυρήνα και τις θέσεις των μαγνητών στο δρομέα. Επίσης, διάκριση των ΣΜ μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τη τεχνική ελέγχου γίνεται σε τετραγωνικού παλμού η τραπεζοειδείς (brushless dc machines) κι ημιτονοειδείς μηχανές (brushless ac machines). Για τις μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη και τις μηχανές μαγνητικής αντίστασης έχουμε αντίστοιχη διάκριση σε κατασκευαστικού τύποι, όπως στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη.

Η θεωρία του διανυσματικού χώρου είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση του τρόπου παραγωγής της ροπής στις ηλεκτρικές μηχανές κι η ανάπτυξη ενός απλού μοντέλου ροπής πάνω στο οποίο βασίζεται η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου.

Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, όλα τα ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη μπορούν να παρασταθούν με διανύσματα χρόνου και χώρου. Κι οι δύο τρόποι διανυσμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση τριφασικών ηλεκτρικών μηχανών σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση καθώς επίσης και για λειτουργία με ασύμμετρη πηγή τροφοδοσίας.

Η θεωρία διανυσματικού χώρου περιγράφει το μηχανισμό παραγωγής της ροής και δίνει φυσική ερμηνεία στη δράση της ροής διέγερσης και του ρεύματος τροφοδοσίας για την ανάπτυξη ροπής. Το διανυσματικό μοντέλο ροπής στις τρεις περιπτώσεις συστημάτων αξόνων αναφοράς (ακίνητο ως προς το στάτη, στρεφόμενο με την ταχύτητα του δρομέα και στρεφόμενο με την ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου διακένου) είναι η βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η τεχνική σχεδιασμού κι υλοποίησης μονάδων οδήγησης διανυσματικού ελέγχου.

Τα σερβοκινητήρια συστήματα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για βελτίωση της ποιότητας των ελεγχόμενων κινητήριων συστημάτων οδήγησαν στη δημιουργία μίας νέας επιστήμης, της μηχανοηλεκτρονικής. Επίσης, η ανάγκη για συμβατότητα στην επικοινωνία μεταξύ σερβοκινητήριων συστημάτων οδήγησαν στην ανάπτυξη ειδικών στάνταρτ (CAN, CiA, CAL κλπ) μεταξύ των διαφόρων κατασκευαστών με στόχο τη δημιουργία δικτύων σερβοκινητήριων συστημάτων ώστε να ικανοποιούνται κι οι πλέον πολύπλοκες κι ειδικές απαιτήσεις ελεγχόμενης ηλεκτρικής κίνησης.

5

Βιβλιογραφία

- Μαρία Γ. Ιωαννίδου. Συστήματα Ειδικών Ηλεκτρικών Κινητήρων, 2008
- Stephen Chapman. Ηλεκτρικές Μηχανές, 2000
- Firoozian, Raziollah. Servo Motors and Industrial Control Theory, 2009
- N. Μάργαρης. Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων, 2000
- Δ. Ρήγας. Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά Κι Αυτοματισμοί, 2005
- R. Krishnan. Electric Motor Drives, Modeling, Analysis And Control, 2003
- B. K. Bose. Power Electronics and Variable Frequency Drives, Technology And Applications
- http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρικός_κινητήρας
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Servomechanism>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor
- <http://www.seattlerobotics.org/guide/servos.html>
- http://imarinakis.webs.com/electric_engines.htm
- <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/234>
- <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=83>
- <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=100>