



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΛΕΞΗΣ ΜΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΦΩΤΙΟΣ

**Επιβλέπων :** Μ. Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την \_\_\_ / 01 / 2017

.....

Μ. Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Ν. ΘΕΟΔΩΡΟΥ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Π. ΤΣΑΡΑΜΠΑΡΗΣ

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΦΩΤΙΟΣ

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

Copyright © Τσινόπουλος Φώτιος, Ιανουάριος 2017  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου σε όσους βοήθησαν για την εκπόνησή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου και επιβλέπουσα κα Μ.Π. Ιωαννίδου για την πολύτιμη βοήθειά της, την επίβλεψή της και τις γνώσεις που αποκόμισα κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Τις πιο θερμές μου ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στην οικογένειά μου για τη βοήθεια και τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη της κατασκευαστικής και λειτουργικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής έλξης που χρησιμοποιεί σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.

Σκοπός της εργασίας είναι, καταρχήν, η ανάλυση και η κατανόηση της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος και κατ'επέκταση η σύγκρισή του με τη συμβατική μορφή έλξης που είναι ο επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Αρχικά, γίνεται μια αναδρομή στην ιστορική εξέλιξη του σιδηροδρόμου. Παρουσιάζονται και αναλύονται, συνοπτικά, όλες οι μορφές σιδηροδρομικής έλξης και οι αρχές λειτουργίας τους. Παρουσιάζεται, επίσης, η γενική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, όλα δηλαδή τα επιμέρους τμήματα που θα αναλυθούν στην πορεία της εργασίας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, πάνω στις οποίες βασίζεται η λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων. Αναλύονται, επιπρόσθετα, τα μαγνητικά υλικά και οι ιδιότητές τους, καθώς αποτελούν το κυριότερο συστατικό των κινητήρων μόνιμων μαγνητών που εξετάζουμε παρακάτω.

Ακολούθως, γίνεται σύγκριση των δύο ειδών ηλεκτρικής έλξης. Τέλος, μελετάμε τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς της τάσης τροφοδοσίας, καθώς και οι τεχνικές ελέγχου και οδήγησης των PMSM.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Ηλεκτρική Έλξη, Σιδηρόδρομος, Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη, Μαγνητικά Υλικά, Τρένο

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the study of the construction and operating behavior of a traction system that uses permanent magnet synchronous motor (PMSM).

The aim of the work is, in principle, the analysis and understanding of the functioning of such a system and hence the comparison with the conventional form of railway traction, which is the squirrel cage induction motor.

Initially, there is a review of the historical development of the railway. All forms of traction and their principles are presented and analysed. Is also presented the general structure of an electric drive system, ie all the individual parts to be analyzed in the course of work.

Then the basic principles of electromagnetism, on which the operation of electric motors is based, are presented. In addition, magnetic materials and their properties are analysed, as they are the main component of permanent magnet motors examined below.

Then there is a comparison between the two traction forms. Finally, we study the electronic converters and the control and driving techniques of the PMSM.

## **KEYWORDS**

Electric Traction, Railway, Permanent Magnet Synchronous Motor, Magnetic Materials, Train



# Κατάλογος περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΛΞΗΣ.....</b>	<b>14</b>
1.1 Η εξέλιξη των σιδηροδρόμων.....	14
1.2 Ατμοκίνητη έλξη.....	15
1.2.1 Αρχές λειτουργίας.....	16
1.2.1.1 Θάλαμος καύσης.....	16
1.2.1.2 Λέβητας.....	16
1.2.1.3 Σύστημα μετάδοσης κίνησης.....	17
1.3 Ντηζελοκίνητη έλξη.....	18
1.3.1 Αρχές λειτουργίας.....	18
1.3.1.1 Ο κύκλος diesel.....	18
1.3.1.2 Λειτουργία σε 4 χρόνους.....	19
1.3.1.3 Λειτουργία σε 2 χρόνους.....	19
1.3.1.4 Μετάδοση ισχύος.....	20
1.4 Ηλεκτροκίνητη έλξη.....	20
1.4.1 Συστήματα ηλεκτρικής κίνησης.....	22
1.4.1.1 Πηγή Ηλεκτρικής Ισχύος.....	23
1.4.1.1.1 Διαφοροποιήσεις στα συστήματα ηλεκτρικής έλξης - Εναλλασσόμενο και συνεχές ρεύμα.....	24
1.4.1.1.1.1 Σύστημα μονοφασικού εναλλασσομένου ρεύματος χαμηλής συχνότητας (AC 16 kV - 11kV / 11,7 Hz – 25 Hz).....	24
1.4.1.1.1.2 Σύστημα μονοφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας (AC 25 kV / 50 Hz).....	24
1.4.1.1.1.3 Σύστημα συνεχούς ρεύματος (600 V - 3 kV).....	25
1.4.1.1.2 Τρόποι τροφοδοσίας.....	25
1.4.1.1.2.1 Τρίτη ράγα.....	26
1.4.1.1.2.2 Εναέρια τροφοδοσία.....	26
1.4.1.1.2.2.1 Ο πόλος τρόλλεϋ.....	27
1.4.1.1.2.2.2 Ο παντογράφος.....	27
1.4.1.2 Μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος.....	28
1.4.1.3 Φορτίο.....	28
1.4.1.4 Σύστημα παρατηρητή και ελέγχου.....	29
1.4.1.5 Ηλεκτρική μηχανή.....	29
1.4.1.5.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος.....	29
1.4.1.5.2 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψύκτρες.....	29
1.4.1.5.3 Κινητήρες επαγωγής.....	30
1.4.1.5.4 Σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης.....	30
1.4.1.5.5 Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη.....	30



1.4.2 Αρχές λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής έλξης.....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....</b>	<b>32</b>
2.1 Εισαγωγή.....	32
2.2 Θεμελιώδεις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού.....	32
2.2.1 Το μαγνητικό πεδίο.....	32
2.2.2 Μαγνητική ροή.....	34
2.2.3 Μαγνήτιση.....	34
2.2.4 Μαγνητικό κυκλωμα.....	34
2.2.5 Το ηλεκτρονιακό spin και η μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου.....	35
2.3 Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	36
2.3.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες των μαγνητικών υλικών.....	37
2.3.2 Βρόχος μαγνητικής υστέρησης.....	38
2.3.3 Μαλακά και σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά.....	40
2.4 Μόνιμοι μαγνήτες.....	40
2.4.1 Απομαγνητίζουσα επίδραση.....	41
2.4.2 Είδη μόνιμων μαγνητών.....	42
2.4.2.1 Κεραμικοί μαγνήτες.....	43
2.4.2.2 Μαγνήτες Alnico.....	43
2.4.2.3 Μαγνήτες σπάνιων γαιών.....	43
2.4.2.3.1 Μαγνήτες Σαμαρίου-Κοβαλτίου.....	44
2.4.2.3.2 Μαγνήτες Νεοδυμίου.....	44
2.5 Μαγνητικές απώλειες.....	45
2.5.1 Απώλειες υστέρησης.....	45
2.5.2 Απώλειες δινορρευμάτων.....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ.....</b>	<b>47</b>
3.1 Εισαγωγή.....	47
3.2 Αρχή λειτουργίας Σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.....	47
3.3 Κατηγοριοποίηση σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών.....	48
3.3.1 Με βάση την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής του πεδίου.....	48
3.3.2 Με βάση τη μορφή της επαγόμενης τάσης στα τυλίγματα του στάτη.....	49
3.4 Ο στάτης.....	51
3.4.1 Στάτης με αυλακώσεις.....	51
3.4.2 Στάτης με αυλακώσεις και συγκολλημένα πέλματα.....	52
3.4.3 Στάτης χωρίς αυλακώσεις.....	53
3.5 Ο δρομέας.....	53
3.5.1 Μηχανές επιφανειακών μαγνητών.....	54

3.5.1.1 Επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (Sinusoidal Surface Permanent Magnet Machine).....	54
3.5.1.2 Επιφανειακών μαγνητών τραπεζοειδούς ροής (Trapezoidal Surface Magnet Machine).....	55
3.5.2 Μηχανές με εσωτερικούς μαγνήτες.....	56
3.5.3 Μόνιμοι μαγνήτες σε σχηματισμό V.....	57
3.5.4 Μηχανές με πολυστρωματικούς μαγνήτες.....	57
3.6 Φαινόμενο Hall.....	58
3.7 Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής.....	59
3.7.1 Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής.....	60
3.7.1.1 Μετασχηματισμός Park.....	64
3.7.1.2 Δυναμικό μοντέλο d-q σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών.....	67
3.8 Πλεονεκτήματα σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.....	68

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ... 70

4.1 Εισαγωγή.....	70
4.2 Μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος.....	70
4.3 Διακοπτικοί ημιαγωγοί ισχύος.....	71
4.3.1 Τανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor, BJT).....	71
4.3.2 MOSFET Ισχύος.....	72
4.3.3 Διπολικό τρανζίστορ με απομονωμένη βάση(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT).....	73
4.3.4 Θυρίστορ με αποκοπή από την πύλη (Gate Turn – Off Thyristor, GTO Thyristor).....	73
4.3.5 Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT.....	74
4.4 Αντιστροφέας.....	75
4.4.1 Τοπολογία.....	75
4.4.2 Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών.....	79
4.4.2.1 Διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation, PWM).....	80
4.4.2.2 Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM).....	81
4.4.3 Διαμόρφωση Διανύσματος Χώρου (Space Vector Modulation, SVM).....	85
4.5 Ανορθωτής.....	86
4.5.1 Λειτουργία ανόρθωσης ως αντιστροφέας.....	88
4.6 Τεχνικές πέδησης του κινητήρα.....	91
4.6.1 Δυναμική πέδηση.....	91
4.6.2 Πέδηση με αναστροφή της τάσης τροφοδοσίας.....	92
4.6.3 Αναγεννητική πέδηση.....	92

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ....95**

5.1 Εισαγωγή.....	95
5.2 Γενική δομή συστήματος ελέγχου ταχύτητας.....	95
5.3 Βαθμωτός έλεγχος V/f ανοικτού βρόχου (Open loop V/f scalar control).....	96
5.4 Διανυσματικός έλεγχος ή έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου (Field Oriented Control, FOC).....	98
5.5 Άμεσος έλεγχος ροπής (Direct Torque Control, DTC).....	101
5.6 Ο ελεγκτής τύπου PID.....	102

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....104**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....104**



## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο σιδηρόδρομος αποτελεί το οικονομικότερο μέσο χερσαίων μεταφορών και είναι επιτακτική η ανάγκη για την ανάπτυξη και εξέλιξή του. Σε αυτό τον τρόπο μεταφοράς, οχήματα με τροχούς φέροντες όνυχες κινούνται πάνω σε δύο παράλληλες σιδηροτροχιές.

Το τρένο εμφανίστηκε στις αρχές του 18ου αιώνα με τη χρησιμοποίηση της ατμομηχανής ως κύριας μηχανής έλξης. Στο πρώτο μισό του 20ού αιώνα οι εξελίξεις στη σιδηροδρομική τεχνολογία και η πρακτική λειτουργίας ήταν περιορισμένες. Η τεχνολογική και βιομηχανική ραγδαία ανάπτυξη οδήγησαν στην εδραίωση των σιδηροδρομικών δικτύων ανά τον κόσμο. Η εμφάνιση, αργότερα, ανταγωνιστών του, όπως το αυτοκίνητο, περιόρισε τη δράση του, αλλά οδήγησε και στην τελειοποίησή του.

Με τη βελτίωση των μηχανών έλξης (οι ατμομηχανές αντικαταστάθηκαν από Ντηζελοκινητήρες) επιτεύχθηκε αύξηση της ταχύτητας της αμαξοστοιχίας, αλλά και αύξηση του όγκου των εμπορευμάτων που μεταφέρει. Η Ντηζελο – ηλεκτρική έλξη άρχισε να εδραιώνεται και να καθίσταται πιο αξιόπιστη, αν και τα χαρακτηριστικά των επιδόσεων της ηλεκτροκίνησης ήταν ανώτερα. Όμως, μόνο οι βασικοί σιδηροδρομικοί άξονες μπορούσαν να αξιοποιήσουν τις οικονομίες της ηλεκτροκίνησης, κυρίως λόγω του μεγάλου επενδυτικού έργου που απαιτούνταν για την ηλεκτροδότηση του δικτύου.

Η ανάπτυξη όμως των ηλεκτρονικών ισχύος και η εισαγωγή νέων τεχνολογιών κατάφερε να μειώσει το κόστος της ηλεκτροκίνησης και να την καταστήσει κυρίαρχη δύναμη στις σιδηροδρομικές μεταφορές. Οι ηλεκτράμαξες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια που δέχονται από το δίκτυο σε μηχανική που αποδίδουν στον άξονα. Η τροφοδοσία μπορεί να προέρχεται από ένα δίκτυο συνεχούς τάσης 3 kV ή ένα μονοφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο 25 kV. Η υψηλή τάση οδηγεί σε λιγότερες απώλειες κατά τη μεταφορά. Η συλλογή του ρεύματος γίνεται με τον παντογράφο, εάν πρόκειται για εναέριες γραμμές μεταφοράς ή με μία επαφή που ονομάζεται “παπούτσι” εάν πρόκειται για τρίτη σιδηροδρομική ράγα, που όμως μπορεί να τροφοδοτήσει το σύστημα μόνο με συνεχές ρεύμα.

Η τάση τροφοδοσίας υποβιβάζεται από ένα Μ/Σ και οδηγείται σε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος για τη μετατροπή της στην κατάλληλη μορφή για τον εκάστοτε κινητήρα (AC – DC). Το σύστημα ελέγχεται μέσω των διατάξεων ελέγχου. Οι διατάξεις ελέγχου λαμβάνουν στην είσοδό τους την πραγματική και την επιθυμητή τιμή και, μέσω ενός αλγορίθμου, δίνουν στην έξοδό τους την κατάλληλη τιμή για τη σωστή λειτουργία των συστημάτων που ελέγχουν.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΛΞΗΣ

### 1.1 Η εξέλιξη των σιδηροδρόμων

Η αρχή των σιδηροδρόμων χρονολογείται τον 16ο αιώνα σε Ευρωπαϊκά ορυχεία. Εκ των πρώτων ήταν αυτό του Leberthal στην Αλσατία, περί το 1550. Τα πρώιμα σιδηροδρομικά οχήματα έλκονταν από ανθρώπους ή άλογα. Ωστόσο, ο σύγχρονος σιδηρόδρομος προέκυψε μετά την εμφάνιση του ατμού ως μορφή προώθησης το 1804 στην Ουαλία.

Οι σιδηρόδρομοι αναπτύχθηκαν γρήγορα στη διάρκεια του 19ου αιώνα και κατέστησαν παγκοσμίως μείζων δύναμη της οικονομικής και κοινωνικής ζωής των εθνών. Αρχικά, όλες οι κινητήριες μονάδες κινούνταν με χρήση ατμού. Η κινητήρια μονάδα ονομαζόταν **ατμάμαξα** (steam locomotive) και βρισκόταν σε παγκόσμια χρήση μέχρι περίπου τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.

Έκτοτε, από το 1960 περίπου, τα ανεπτυγμένα σιδηροδρομικά δίκτυα παγκοσμίως, υπό την πίεση του έντονου ανταγωνισμού των αυτοκινητοδρόμων και των αεροπορικών μεταφορών, προχώρησαν γρήγορα σε νέα τεχνολογική εποχή. Η ντηζελοκίνηση είχε υποκαταστήσει σχεδόν εντελώς την ατμοκίνηση στις μη ηλεκτροκινούμενες γραμμές, στα περισσότερα δίκτυα παγκοσμίως. Η ατμοκίνητη έλξη είχε καταργηθεί στη Βόρεια Αμερική και εξαφανιστεί από τα εθνικά δίκτυα της Δυτικής Ευρώπης όταν οι Βρετανικοί Σιδηρόδρομοι την εγκατέλειψαν τελευταίοι το 1968. Από το 1990 η ατμοκίνηση εφαρμοζόταν σε αξιόλογη, αν και συνεχώς μειούμενη, κλίμακα μόνο στην Κίνα, σε τμήματα της Αφρικής και στην Ινδία. Η ντηζελο-ηλεκτρική έλξη είχε πλέον καταστεί πολύ πιο αξιόπιστη και οικονομική. Βέβαια, τα χαρακτηριστικά των επιδόσεων της ηλεκτροκίνητης έλξης ήταν ανώτερα, όμως μέχρι τα μέσα του 20ου αιώνα, μόνο οι βασικοί σιδηροδρομικοί άξονες μεγάλου μεταφορικού έργου μπορούσαν να αξιοποιήσουν τις οικονομίες της ηλεκτροκίνησης, κυρίως λόγω των μεγάλων επενδυτικών δαπανών που απαιτούνταν για την κατασκευή και εγκατάσταση συστημάτων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο σιδηροδρομικό δίκτυο.

Η **ντηζελο-ηλεκτράμαξα** φέρει πολλά από τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροκίνησης και χρησιμοποιώντας δική της γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν απαιτεί το κόστος της κατασκευής υποσταθμών διανομής. Όμως, παρουσιάζει δύο σημαντικά μειονεκτήματα : η απόδοσή της περιορίζεται από την αντίστοιχη του ντηζελοκίνητηρα και η πραγματοποίησή της εξαρτάται από το εισαγόμενο πετρέλαιο ως καύσιμο. Δεδομένου ότι η μεγάλη ιπποδύναμη είναι απαραίτητη για σιδηροδρόμους υψηλών ταχυτήτων η ντηζελοηλεκτράμαξα υστερεί στις ταχείες επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές. Σε συνδυασμό με την πρώτη κρίση του πετρελαίου στη Μέση Ανατολή τη δεκαετία του '70 (1973) και την αύξηση της τιμής του πετρελαίου οδήγησαν σε εντατικές προσπάθειες για την ηλεκτροκίνηση των συρμών.

Στο δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, νέες τεχνολογίες κατάφεραν να μειώσουν το κόστος της ηλεκτροκίνησης και την απόδοση της ηλεκτρικής έλξης. Ιδιαίτερη επίδραση είχε η

πρωτοποριακή γαλλική τεχνολογία ηλεκτροκίνησης με απευθείας τροφοδοσία εναλλασσομένου ρεύματος υψηλής τάσης σε βιομηχανική συχνότητα. Η νέα αυτή τεχνολογία απετέλεσε την αφετηρία μεγάλων προγραμμάτων ηλεκτροκίνησης στην Κίνα, την Ιαπωνία, τη Νότια Κορέα, μερικές ανατολικοευρωπαϊκές χώρες, τη Σοβιετική Ένωση και την Ινδία. Αντιθέτως, τα σιδηροδρομικά δίκτυα που είχαν ήδη ηλεκτροκινηθεί πριν την εισαγωγή της νέας τεχνολογίας, είτε διατήρησαν τα υφιστάμενα συστήματα ηλεκτροκίνησης, είτε με την τελειοποίηση των ηλεκτραμαξών υιοθέτησαν τη νέα τεχνολογία υψηλής τάσης για την ηλεκτροκίνηση των γραμμών. Έτσι, μετά το 1990, ελάχιστοι δυτικοευρωπαϊκοί άξονες λειτουργούσαν ακόμα με ντηζελοκίνητη έλξη.

## **1.2 Ατμοκίνητη έλξη**

Η ατμάμαξα (steam locomotive) αποτελεί τον πρώτο τρόπο έλξης σιδηροδρομικών συρμών. Αποτελεί αυτάρκη μονάδα, η οποία φέρει φορτίο νερού για την παραγωγή ατμού καθώς και κάρβουνο ή ξυλεία για τη θέρμανση του βραστήρα.

Οι πρώτες προσπάθειες για χρήση της ατμοκινούμενης μονάδας ως μέσο προώθησης σιδηροδρομικών συρμών ξεκίνησε από τις ΗΠΑ. Στα τέλη του 18ου αιώνα κατασκευάστηκε μια μικρή ατμομηχανή ως μοντέλο επίδειξης στην κυβέρνηση του Τζωρτζ Ουάσινγκτον, η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε ποτέ.

Η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια χρήσης ατμομηχανής για σιδηροδρομική έλξη έγινε στη Μεγάλη Βρετανία στις αρχές του 19ου αιώνα. Συγκεκριμένα το 1804 ο Τρέβιθικ κίνησε τον πρώτο σιδηρόδρομο στη σιδηροτροχιά των ορυχείων του Μέρθαϊρ, στη νότια Ουαλία.

Το 1825 εμφανίζεται η ατμάμαξα "Locomotion" του George Stephenson. Ήταν η πρώτη ατμάμαξα που προσαρμόστηκε σε σιδηρόδρομο μεταφοράς επιβατών. Ο Stephenson βελτίωσε την κατασκευή του και το 1829 παρουσίασε το διάδοχο της "Locomotion" που επονόμασε "Rocket". Η ατμάμαξα αυτή κέρδισε το διαγωνισμό έλξης σιδηροδρομικών συρμών που ήταν γνωστός ως "Rainhill Trials" επιτυγχάνοντας μέσο όρο ταχύτητας 19 km/h, ανώτατη ταχύτητα 48 km/h, όλα αυτά ρυμουλκώντας συρμό βάρους 13 τόνων.

Ο πολυσωλήνιος βραστήρας και το σύστημα απαγωγής του ατμού, τα βασικά χαρακτηριστικά που κατέστησαν πετυχημένη την ατμομηχανή Rocket των George και Robert Stephenson το 1829, συνέχισαν να χρησιμοποιούνται στην ατμάμαξα (steam locomotive) μέχρι το τέλος της σταδιοδρομίας της. Η Rocket είχε μόνο δύο κινητήριους τροχούς. Σύντομα ο αριθμός των κινητηρίων τροχών άρχισε να αυξάνει. Τέσσερις αποτελούσαν συνήθη εφαρμογή, ενώ μερικές ατμάμαξες κατασκευάστηκαν με δεκατέσσερις κινητήριους τροχούς.

Σε ορισμένες χώρες, ιδιαίτερα στις ΗΠΑ, για να καλυφθούν οι ανάγκες μεταφοράς μεγάλων φορτίων εμπορευματικών μεταφορών που απαιτούσαν μεγαλύτερη ελκτική ισχύ, υιοθετήθηκε η χρήση δύο ξεχωριστών ατμαμαξών με κοινό καυστήρα. Η μπροστινή μηχανή ήταν συνδεδεμένη αρθρωτά με την οπίσθια ώστε το σύστημα να έχει τη δυνατότητα να εγγράφεται στις καμπυλότητες της γραμμής. Η αρθρωτή (articulated), όπως ονομάζεται αποτέλεσε ελβετική επινόηση και η κατασκευή της πραγματοποιήθηκε το 1888. Η μεγαλύτερη αρθρωτή ατμάμαξα ονομάζεται Big Boy και ζύγιζε

περισσότερους από 600 τόνους. Ανέπτυξε ισχύ μεγαλύτερη των 6000 hp σε ταχύτητα 110 km/h.

Η ατμοκίνηση είχε αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η τεχνική απλότητα και η ανθεκτικότητα στην κακομεταχείριση. Όμως η χαμηλή αποδοτικότητα οδήγησε στην εξ'ολοκλήρου αντικατάστασή της από τη ντιζελοκίνηση.

### **1.2.1 Αρχές λειτουργίας**

Η ατμομηχανή αποτελεί μηχανή εξωτερικής καύσης, δηλαδή η καύση για την παραγωγή έργου δεν λαμβάνει μέρος στον χώρο παραγωγής έργου, αλλά έξω από αυτόν. Επιπρόσθετα το μέσο παραγωγής έργου είναι το νερό.

Η βασική αρχή λειτουργίας της ατμομηχανής στηρίζεται στη θέρμανση του νερού που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ατμού. Ο υπό πίεση ατμός οδηγείται σε ένα θάλαμο και ωθεί το έμβολο προς μια κατεύθυνση. Η κίνηση μεταδίδεται στους τροχούς και το έμβολο επανέρχεται στην αρχική του θέση. Πιο αναλυτικά η λειτουργία της ατμομηχανής παρουσιάζεται παρακάτω.

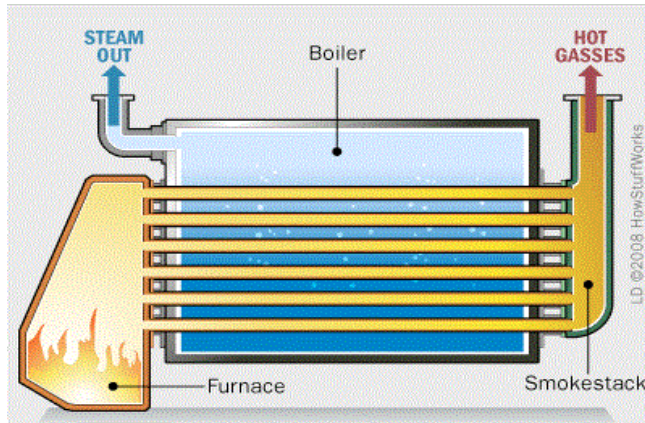
#### **1.2.1.1 Θάλαμος καύσης**

Ο θάλαμος καύσης είναι ο χώρος που καίγεται το καύσιμο (κάρβουνο, ξυλεία, πετρέλαιο) για τη θέρμανση του νερού και την παραγωγή ατμού. Στην πραγματικότητα πρόκειται για δύο θαλάμους, όπου ο ένας περικλείει τον άλλο. Στον εσωτερικό θάλαμο γίνεται η καύση. Μεταξύ των δύο θαλάμων υπάρχει νερό ώστε να γίνεται η μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας. Το υλικό κατασκευής των θαλάμων μπορεί να είναι χαλκός, σίδηρος ή χάλυβας. Στην οπίσθια όψη του θαλάμου υπάρχει μία θυρίδα μέσω της οποίας γίνεται η τροφοδοσία της καύσιμης ύλης.

#### **1.2.1.2 Λέβητας**

Ο λέβητας είναι το τμήμα της μηχανής όπου παράγεται ο ατμός. Το νερό θερμαίνεται και παράγεται ατμός ο οποίος συσσωρεύεται στο χώρο μεταξύ της οροφής και της στάθμης του νερού που ονομάζεται ατμοδόμος. Καθώς παράγεται περισσότερος ατμός η πίεσή του αυξάνει συνεχώς, μέχρις ότου φτάσει στο μέγιστο επιτρεπτό όριο. Αυτό καθορίζεται από τον κατασκευαστή και κυμαίνεται από 55 έως 300 psi. Βέβαια, για να πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία απαιτείται σημαντικό χρονικό διάστημα (περίπου μια ώρα), ώστε να μπορέσει η ατμομηχανή να εκκινήσει. Στον ατμοδόμο υπάρχουν δύο βαλβίδες. Η μία ανοίγει αυτόματα όταν η πίεση υπερβεί το ανώτατο όριο, επιτρέποντας έτσι την εκτόνωση του ατμού στο περιβάλλον και αποφεύγοντας την έκρηξη του λέβητα. Η δεύτερη είναι ρυθμιστική βαλβίδα ελεγχόμενη από το μηχανοδηγό, η οποία ρυθμίζει την ποσότητα του ατμού που θα οδηγηθεί στο σύστημα μετάδοσης κίνησης.

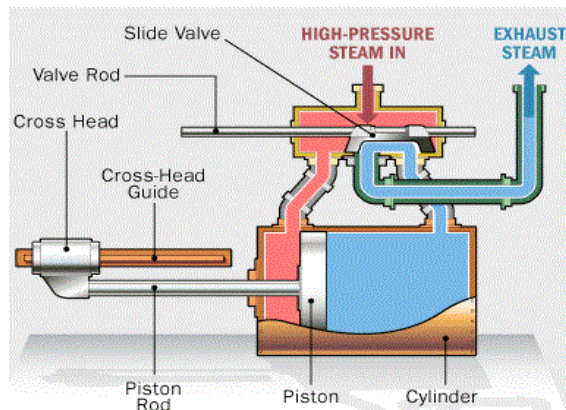




Σχήμα 1.1 Λειτουργία λέβητα

### 1.2.1.3 Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Ο ατμός περνώντας από τη βαλβίδα οδηγείται στον ατμοθάλαμο. Στον ατμοθάλαμο υπάρχει, υπό τύπο βαλβίδας, ένας ολισθαίνων σωλήνας, ο οποίος συνδέει τον ατμοθάλαμο είτε με τον κύλινδρο είτε με το σωλήνα διαφυγής του "χρησιμοποιημένου" ατμού. Από τον ατμοθάλαμο ο ατμός περνά στον κύλινδρο και, εκτονούμενος, ωθεί το έμβολο προς την αντίθετη φορά της πλευράς εισόδου του. Παράλληλα, με τη βοήθεια ενός συστήματος ράβδων, ο ολισθαίνων σωλήνας μετακινείται ανοίγοντας, μετά την εκτόνωση του ατμού, το σωλήνα απ' όπου αυτός απομακρύνεται, ενώ από την αντίθετη πλευρά εισέρχεται εκ νέου θερμός ατμός, που ωθεί ξανά το έμβολο προς την αντίθετη φορά. Με τον τρόπο αυτό είναι εκμεταλλεύσιμες και οι δύο πλευρές του εμβόλου. Το έμβολο είναι συνδεδεμένο με μεταλλική ράβδο, η άκρη της οποίας στερεώνεται στον τροχό της ατμάμαξας. Περισσότεροι άξονες είναι δυνατό να συνδέουν τον κύριο κινητήριο τροχό με τους γειτονικούς του.



Σχήμα 2.1 Σύστημα μετάδοσης κίνησης

## **1.3 Ντηζελοκίνητη έλξη**

Τα πειράματα με ντηζελοκίνητες είχαν ήδη ξεκινήσει από το 1892 και την εφεύρεσή τους από τον Γερμανό μηχανικό **Rudolf Diesel** και η πρώτη πετυχημένη ντηζελάμαξα (diesel-engine locomotive) χρησιμοποιήθηκε το 1925.

Τα πρώτα πραγματικά εντυπωσιακά αποτελέσματα της υιοθέτησης της ντηζελοκίνησης φάνηκαν στη Γερμανία. Το 1933 η Fliegende Hamburger, μια δίδυμη (δύο οχημάτων) ντηζελοκίνητη αυτοκινητάμαξα, με δύο ντηζελοκίνητες, έκαστος ισχύος 400 ίππων, τέθηκε σε κυκλοφορία στη διαδρομή Βερολίνο- Αμβούργο, με μέση εμπορική ταχύτητα 120 χλμ/ώρα. Μέχρι το 1939, οι περισσότερες από τις μεγάλες Γερμανικές πόλεις διασυνδέθηκαν με τρένα αυτού του τύπου, που κυκλοφορούσαν με μέση ταχύτητα 130 χλμ/ώρα μεταξύ στάσεων.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940, η πλειψηφία των αμερικανικών σιδηροδρόμων αποφάσισε τη μετάβαση από τον ατμό στη ντηζελοκίνηση (Dieselization). Στο τελευταίο τέταρτο του 20ου αιώνα, η σημαντική αύξηση ισχύος προς βάρος στους ντηζελοκίνητες και η εξέλιξη της Ηλεκτρονικής είχαν ως αποτέλεσμα μεγάλες βελτιώσεις στην αποδοτικότητα των ντηζελαμαξών. Βέβαια, εκτός από τη Βόρεια Αμερική, στις υπόλοιπες χώρες η κατασκευή ντηζελοκινήτων για επιβατικά τρένα περιορίστηκε σημαντικά από τη διάδοση των ηλεκτροκινήτων.

### **1.3.1 Αρχές λειτουργίας**

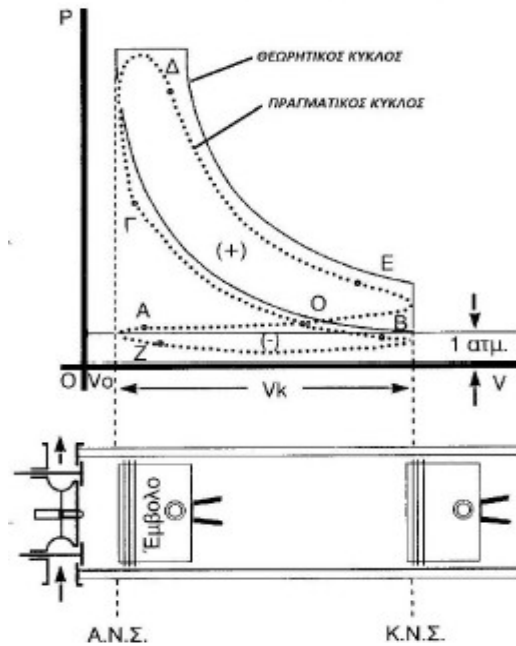
Σε αντίθεση με την ατμομηχανή, ο κινητήρας Diesel αποτελεί μηχανή εσωτερικής καύσης καθώς χρησιμοποιεί τον αέρα ως εργαζόμενο μέσο και κατά κάποιο τρόπο το ίδιο το καύσιμο, δηλαδή καυσαέρια.

Η αρχή λειτουργίας του κινητήρα είναι η εξής : Ο αέρας οδηγείται στον κύλινδρο, όπου συμπιέζεται ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του. Στη συνέχεια εκχύεται μικρή ποσότητα πετρελαίου εντός του κυλίνδρου και αναφλέγεται. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιείται σε δύο ή σε τέσσερις χρόνους.

#### **1.3.1.1 Ο κύκλος diesel**

Οι εμβολιφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το πετρέλαιο υλοποιούνται στο θερμικό κύκλο Diesel.

- 1-2 : Ισεντροπική συμπίεση
- 2-3 : Ισόθλιπτη προσθήκη θερμότητας
- 3-4 : Ισεντροπική εκτόνωση
- 4-1 : Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας



Σχήμα 1.3 Ο κύκλος Diesel

### 1.3.1.2 Λειτουργία σε 4 χρόνους

1. Αναρρόφηση αέρα : Ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής και το έμβολο κατευθύνεται προς το κατώτατο σημείο. Λόγω υποπίεσης εισέρχεται ατμοσφαιρικός αέρας στο θάλαμο.
2. Συμπύεση αέρα : Το έμβολο κατευθύνεται προς το ανώτερο σημείο. Ο ατμοσφαιρικός αέρας συμπιέζεται και θερμαίνεται. Ο όγκος του σε αυτό το στάδιο μπορεί να φτάσει και το 1/25 του αρχικού. Οι βαλβίδες είναι κλειστές.
3. Ανάφλεξη – Καύση – Εκτόνωση : Το σύστημα ψεκασμού διοχετεύει το πετρέλαιο με τη μορφή σταγονιδίων στο χώρο καύσης. Λόγω της υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας του αέρα, το μίγμα αναφλέγεται. Το έμβολο ωθείται προς τα κάτω. Στο χρόνο αυτό παράγεται ωφέλιμο έργο το οποίο αποδίδεται στο στρόφαλο και από κει μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων στο σύστημα κίνησης.
4. Εξαγωγή καυσαερίου : Το έμβολο βρίσκεται στο κατώτερο σημείο και ο θάλαμος περιέχει τα προϊόντα της καύσης. Ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής και το έμβολο κινείται προς τα πάνω, ωθώντας τα καυσαέρια εκτός του θαλάμου.

### 1.3.1.3 Λειτουργία σε 2 χρόνους

Ο δίχρονος κινητήρας δεν έχει βαλβίδες, αλλά αντίστοιχα ανοίγματα στα τοιχώματα του κυλίνδρου, που ανοιγοκλείνουν με το πέρασμα του εμβόλου. Ο πλήρης κύκλος του κινητήρα πραγματοποιείται μέσα σε μία ανερχόμενη και μία κατερχόμενη διαδρομή του εμβόλου. Τα τέσσερα προηγούμενα στάδια συμπυκνώνονται ως εξής:

1. Στάδιο ανόδου : Καθώς το έμβολο ανεβαίνει το μίγμα συμπυκνώνεται και ταυτοχρονα ελευθερώντας τις οπές στο θάλαμο ανάλογα με την εκάστοτε θέση του επιτρέπει την πραγματοποίηση μέρους του σταδίου εισαγωγής και μέρους του σταδίου εξαγωγής.

2. Στάδιο καθόδου : Λόγω της υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας στο θάλαμο, πραγματοποιείται ανάφλεξη και το έμβολο ωθείται προς τα κάτω. Περνώντας από τις ίδιες θέσεις επιτρέπει την εξαγωγή καυσαερίων και την εισαγωγή αέρα.

#### **1.3.1.4 Μετάδοση ισχύος**

Η μετάδοση της παραγόμενης ισχύος στους τροχούς γίνεται :

- Υδραυλικά : Σε ένα στροφέα, που βρίσκεται μέσα σε θάλαμο πλήρη πετρελαίου, είναι τοποθετημένα πτερύγια. Το υπό πίεση πετρέλαιο ωθεί τα πτερύγια μεταδίδοντας την ισχύ της μηχανής στο στροφέα.

- Μηχανικά : Κατά το στάδιο της εκτόνωσης το εμβολό ωθείται μεταδίδοντας την κίνηση στον άξονα. Χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρής ισχύος νητζελάμαξες.

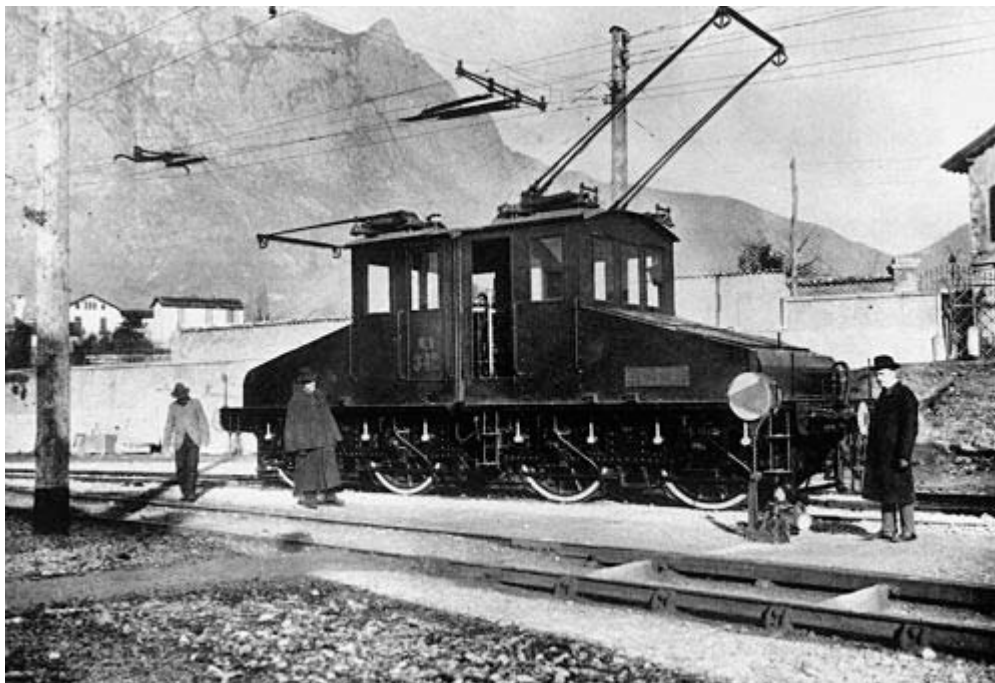
- Ηλεκτρικά (νητζελο-ηλεκτρική κινητήρια μονάδα) : Είναι η συνηθέστερη μέθοδος μετάδοσης ισχύος. Η ενέργεια από τον νητζελοκινητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο τροφοδοτεί ηλεκτροκινητήρες. Υπεύθυνη για τη μετατροπή της αποδιδόμενης από τον κινητήρα μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι η γεννήτρια, που συνδέεται στην έξοδο του κινητήρα.

### **1.4 Ηλεκτροκίνητη έλξη**

Προσπάθειες για την προώθηση σιδηροδρομικών οχημάτων με χρήση συσσωρευτών ξεκίνησαν από το 1835. Στη συνέχεια ο Robert Davidson κατασκεύασε μία μηχανή που ονόμασε Galvani και το 1841 δοκιμάστηκε στη γραμμή Εδιμβούργου – Γλασκώβης. Η χρήση της όμως δεν γενικεύτηκε καθώς ήταν περιορισμένη η διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας από μπαταρίες εκείνη την εποχή.

Η πρώτη πετυχημένη εφαρμογή της ηλεκτροκίνητης έλξης ήταν το 1879, όταν μία ηλεκτράμαξα κινήθηκε κατά τη διάρκεια μιας έκθεσης στο Βερολίνο. Διέθετε κινητήρα ισχύος 2,2 kW και πέτυχε μέγιστη ταχύτητα 13 km/h.

Το 1894 ο Ούγγρος **Kalman Kando** ανέπτυξε για πρώτη φορά κινητήρες και γεννήτριες υψηλών τάσεων με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα. Στη συνέχεια, άρχισαν να γίνονται προσπάθειες ώστε τα ηλεκτρικά συστήματα των τρένων να χρησιμοποιούν, μέσω απλών υποσταθμών μετασχηματιστών, την τυποποιημένη συχνότητα του δικτύου.



*Σχήμα 1.4 Η ηλεκτράμαξα του Kalman Kando*

Μεγάλο μέρος της ανάπτυξης της ηλεκτροκίνησης οφείλεται στην αυξανόμενη χρήση των συράγγων, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές. Ο καπνός από τις ατμομηχανές ήταν επιβλαβής και γινόταν όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη απαγόρευσης της χρήσης τους. Μία σύγκρουση στη σύραγγα Park Avenue το 1902 οδήγησε τη νομοθεσία της Πολιτείας της Νέας Υόρκης να απαγορεύσει τη χρήση τρένων που παράγουν καπνό μετά το Ιούλιο του 1908. Ο ηλεκτρισμός έγινε γρήγορα η κύρια επιλογή τροφοδοσίας για τους υπόγειους σιδηροδρόμους.

Πριν τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο, ένας αριθμός ηλεκτροκίνητων γραμμών λειτουργούσε τόσο στην Ευρώπη, όσο και στις ΗΠΑ. Μεγάλα προγράμματα ηλεκτροκίνησης ξεκίνησαν μετά τον πόλεμο αυτόν σε χώρες όπως η Σουηδία, η Ελβετία, η Νορβηγία, η Γερμανία και η Αυστρία. Περί το τέλος της δεκαετίας του 1920 σχεδόν κάθε Ευρωπαϊκή χώρα είχε τουλάχιστον ένα μικρό ποσοστό ηλεκτροκίνητου σιδηροδρομικού δικτύου.

Σε ό,τι αφορά τα συστήματα ηλεκτροδότησης, πραγματοποιήθηκαν ποικίλες δοκιμές. Τις πρώτες δεκαετίες της ηλεκτροκίνησης με εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης, οι διαθέσιμοι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος δεν ήταν κατάλληλοι για λειτουργία με το εναλλασσόμενο ρεύμα της εμπορικής ή βιομηχανικής συχνότητας (50 hertz στην Ευρώπη, 60 hertz στις ΗΠΑ και τμήματα της Ιαπωνίας). Οι κινητήρες αυτοί έπρεπε να χρησιμοποιούν ρεύμα χαμηλότερης συχνότητας (16 2/3 hertz στην Ευρώπη, 25 hertz στις ΗΠΑ). Αυτό με τη σειρά του απαιτούσε είτε ειδικά σιδηροδρομικά συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας ικανά να παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα στην απαιτούμενη συχνότητα, ή εξοπλισμό μετατροπής της συχνότητας, από την διαθέσιμη βιομηχανική στην απαιτούμενη σιδηροδρομική συχνότητα. Σε κάθε περίπτωση, συστήματα ηλεκτροκίνησης τροφοδοτούμενα με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 16 2/3 hertz κατέστησαν τα κυρίαρχα σε μερικά Ευρωπαϊκά δίκτυα όπως στην Αυστρία, τη Γερμανία

και τη Σουηδία, σε δίκτυα δηλαδή που ηλεκτροκινήθηκαν πριν τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.

Το 1945 ο Louis Armand, πρώην Πρόεδρος των Γαλλικών Σιδηροδρόμων, συνέχισε την περαιτέρω ανάπτυξη αυτού του συστήματος και έκανε τις απαραίτητες μετατροπές της γραμμής μεταξύ Aix-Les-Bains και La Roche-sur-Foron για τους πρώτους πρακτικούς πειραματισμούς. Οι πειραματισμοί αυτοί απέβησαν τόσο επιτυχείς, ώστε το σύστημα ηλεκτροκίνησης **25.000 Volt** και **50 ή 60 Hertz** να καταστεί πρότυπο για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης σε βασικούς σιδηροδρομικούς άξονες.

### **1.4.1 Συστήματα ηλεκτρικής κίνησης**

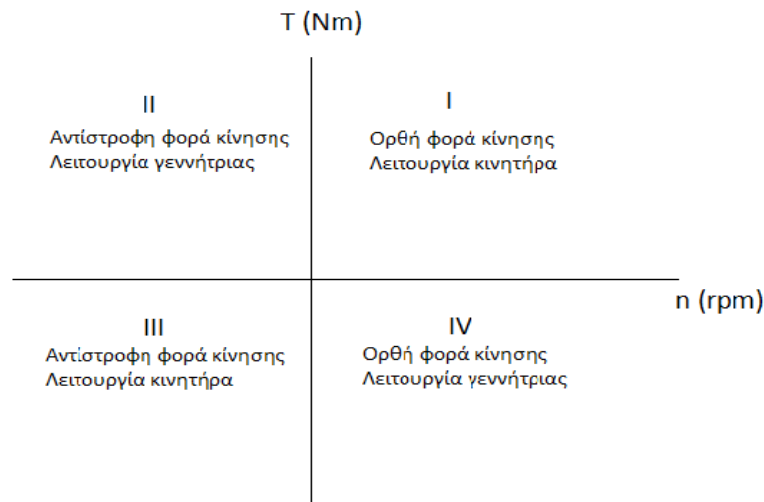
Στη γενική τους μορφή τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης συνιστούν ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά συστήματα που αποτελούνται από τις παρακάτω κύριες βαθμίδες :

- Πηγή ισχύος
- Μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος
- Φορτίο
- Σύστημα ελέγχου παρατηρητή και μετρητική μονάδα
- Ηλεκτρική μηχανή

Οι παραπάνω βαθμίδες μπορούν να διαιρεθούν σε δύο επιμέρους υποσύνολα :

1. Το **Κύκλωμα Ισχύος**, που περιλαμβάνει τις βαθμίδες της Πηγής Ισχύος, του Μετατροπέα Ισχύος, της Ηλεκτρικής Μηχανής και του Φορτίου.

Μέσω του Κυκλώματος Ισχύος, έχουμε ροή μεγάλης ποσότητας ενέργειας (συγκριτικά με τη ροή στο Κύκλωμα Ελέγχου), η οποία είναι δυνατόν να είναι αμφίδρομη. Είναι, δηλαδή, δυνατό να μεταφέρεται ενέργεια από την πηγή προς την ηλεκτρική μηχανή, η οποία σε αυτή τη φάση λειτουργεί ως κινητήρας, αποδίδοντας μηχανική ισχύ στο φορτίο, είτε η περίσσεια μηχανικής ενέργειας από το φορτίο να επιστρέφει, αφού πρώτα μετατραπεί σε ηλεκτρική από την ηλεκτρική μηχανή, η οποία σε αυτή τη φάση λειτουργεί ως γεννήτρια, στην πηγή, μέσω ενός μετατροπέα. Αυτή η δυνατότητα μεταφράζεται ως λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων στο πεδίο ροπής – ταχύτητας του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 1.5). Συγκεκριμένα, όταν η ροπή και η ταχύτητα έχουν το ίδιο πρόσημο, τότε η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας (1<sup>ο</sup> – 3<sup>ο</sup> τεταρτημόριο), ενώ όταν είναι ετερόσημες η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια (2<sup>ο</sup> – 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο).



Σχήμα 1.5 Λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων ηλεκτρικής μηχανής

2. Το **Κύκλωμα Ελέγχου**, που περιλαμβάνει τη βαθμίδα του Συστήματος Ελέγχου και Μετρητικής Μονάδας.

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

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα επιμέρους υποσυστήματα ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης.

#### **1.4.1.1 Πηγή Ηλεκτρικής Ισχύος**

Η πηγή ηλεκτρικής ισχύος παρέχει ηλεκτρική ισχύ υπό συνεχή ή εναλλασσόμενη τάση. Ως πηγή ηλεκτρικής ισχύος τις περισσότερες φορές έχουμε την τριφασική συμμετρική παροχή εναλλασσόμενης τάσης από το δίκτυο, η οποία παράγεται από σύγχρονες γεννήτριες στους μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακή και αιολική, αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό. Από την άλλη, ενδέχεται να παρέχεται συνεχής τάση, η οποία να προέρχεται από ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου. Ανάλογα με το είδος της ηλεκτρικής μηχανής που διαθέτουμε θα πρέπει να επιλέξουμε τον κατάλληλο μετατροπέα, ώστε να καταστήσει την προσφερόμενη τάση συμβατή με το είδος του κινητήρα.

Ο ηλεκτρικός σιδηρόδρομος απαιτεί τροφοδοσία στην οποία οι αμαξοστοιχίες να έχουν πρόσβαση ανά πάσα στιγμή. Η μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται κατά μήκος της διαδρομής, είτε μέσω εναερίων καλωδίων, είτε στο επίπεδο του εδάφους

μέσω μίας επιπλέον σιδηροδρομικής δοκού που βρίσκεται κοντά στις ράγες. Το ρεύμα συλλέγεται από τον παντογράφο και μεταφέρεται στον μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής είναι αναγκαίος για την μετασχηματισμό της τάσης σε μικρότερα επίπεδα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους κινητήρες έλξης.

#### **1.4.1.1.1 Διαφοροποιήσεις στα συστήματα ηλεκτρικής έλξης - Εναλλασσόμενο και συνεχές ρεύμα**

Αρχικά τα σιδηροδρομικά συστήματα χρησιμοποιούσαν συνεχές ρεύμα, καθώς το εναλλασσόμενο ρεύμα δεν είχε μελετηθεί αρκετά και δεν ήταν διαθέσιμα μονωτικά υλικά για γραμμές υψηλής τάσης. Τα κινητήρια συστήματα συνεχούς ρεύματος λειτουργούν σε χαμηλή τάση (600 – 3000 V). Τα ρεύματα που εμπλέκονται είναι αρκετά υψηλά, ώστε να μεταδίδουν επαρκή ισχύ. Ως εκ τούτου, απαιτείται τεράστιος εξοπλισμός (χοντρά καλώδια) και μικρές αποστάσεις μεταξύ των υποσταθμών, καθώς τα υψηλά ρεύματα οδηγούν σε μεγάλες απώλειες του συστήματος μεταφοράς.

Καθώς αναπτύχθηκαν οι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, έγιναν το κυρίαρχο είδος ιδιαίτερα σε μεγάλες διαδρομές. Σε ένα τέτοιο σύστημα η τάση μπορεί να υποβιβαστεί στο εσωτερικό της ηλεκτράμαξας. Αυτό επιτρέπει υψηλότερες τάσεις κατά τη μεταφορά, συνεπώς μικρότερα ρεύματα και απώλειες (οι απώλειες ισχύος κατά τη μεταφορά είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος).

##### **1.4.1.1.1.1 Σύστημα μονοφασικού εναλλασσομένου ρεύματος χαμηλής συχνότητας (AC 16 kV - 11kV / 11,7 Hz – 25 Hz)**

Το σύστημα εναλλασσομένου ρεύματος χαμηλής συχνότητας αντιπροσωπεύει περίπου το 18% των συστημάτων έλξης παγκοσμίως. Αναπτύχθηκε στη Γερμανία το 1912 -13, με σκοπό τη διευκόλυνση της αναστροφής του ρεύματος τυμπάνου και της χρήσης μετασχηματιστή. Είχε χαρακτηριστικά εναλλασσόμενη μονοφασική τάση τροφοδοσίας 15 kV / 16,7 Hz. Αργότερα, το σύστημα υιοθετήθηκε και από άλλες χώρες. Απαιτείται, βέβαια, μετατροπή της συχνότητας από την συχνότητα του εκάστοτε εθνικού δικτύου μεταφοράς. Το σύστημα αυτό είναι ιδιαίτερα σε σιδηροδρομικές γραμμές υψηλών ταχυτήτων.

##### **1.4.1.1.1.2 Σύστημα μονοφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας (AC 25 kV / 50 Hz)**

Αποτελεί σήμερα το 33 % περίπου του συνόλου των συστημάτων έλξης παγκόσμια, καθώς και εξελίσσεται με ραγδαίο ρυθμό. Η ανάπτυξη του οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος. Αναπτύχθηκε από τη δεκαετία του 1950 και μετά και παρουσιάζει ορισμένα ουσιώδη πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι το γεγονός ότι, λόγω της υψηλής τάσης, δεν απαιτείται η συχνή κατασκευή υποσταθμών υποβιβασμού της τάσης του εθνικού δικτύου. Τέλος, σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερες διατομές αγωγών (χάλκινοι 145 mm<sup>2</sup>).



#### **1.4.1.1.1.3 Σύστημα συνεχούς ρεύματος (600 V - 3 kV)**

Αποτελεί περίπου το 50 % του συνόλου των συστημάτων έλξης παγκοσμίως. Όπως αναφέραμε προηγούμενα τα πρώτα συστήματα τροφοδοτούνταν με συνεχές ρεύμα, λόγω κυρίως της ευκολίας κατασκευής. Οι τιμές των τάσεων που χρησιμοποιούνται είναι DC 600 V, DC 750 V, DC 1,5 kV, DC 3 kV. Το βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι, λόγω της χαμηλής τάσης απαιτούνται υψηλά ρεύματα για την απόδοση της κατάλληλης ισχύος, γεγονός που απαιτεί με τη σειρά του μεγάλο πάχος καλωδίων, καθώς και μικρές αποστάσεις μεταξύ των υποσταθμών.

#### **1.4.1.1.2 Τρόποι τροφοδοσίας**

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο η τροφοδοσία του κινητήρα θα πρέπει να είναι συνεχής. Αναφέρθηκε, επίσης, ότι η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να γίνεται κατά μήκος της διαδρομής.

##### **1.4.1.1.2.1 Τρίτη ράγα**

Η τρίτη σιδηροδρομική ράγα είναι μία μέθοδος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας έλξης. Πρόκειται για μία συνεχή, άκαμπτη και αγωγίμη δοκό, η οποία τοποθετείται στις περισσότερες περιπτώσεις προς την άκρη των στρωτήρων, έξω από τις κύριες σιδηροτροχιές, ενώ σε μερικές περιπτώσεις μεταξύ αυτών. Είναι κατασκευασμένη από χάλυβα υψηλής αγωγιμότητας και τοποθετείται πάνω σε κεραμικούς μονωτήρες, ή μονωμένα στηρίγματα, τα οποία έχουν μία τυπική απόσταση μεταξύ τους περίπου στα 3m.

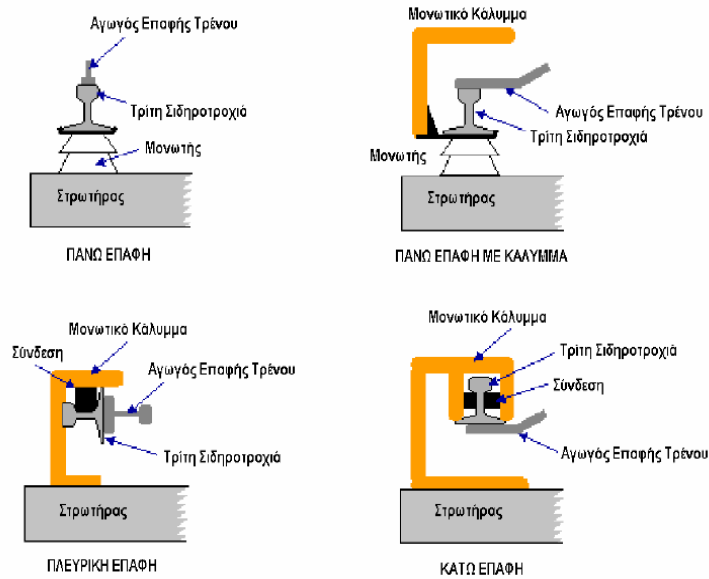
Το σύστημα τροφοδοσίας με τρίτη ράγα είναι ένα σύστημα τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος. Σε ό,τι αφορά το κόστος, είναι φτηνό στην εγκατάσταση σε σχέση με τα εναέρια συστήματα, καθώς δεν απαιτούνται κατασκευές για τη στήριξη του καλωδίου επαφής.

Τα συστήματα τροφοδοσίας στο επίπεδο του εδάφους χρησιμοποιούνται επίσης και για αισθητικούς λόγους. Βέβαια, ενέχουν πάντα τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας και τα συστήματα υψηλών τάσεων (πάνω από 1500 V) δεν είναι εφικτά. Για αυτό χρησιμοποιούνται υψηλά ρεύματα που έχουν ως αποτέλεσμα τη σημαντική απώλεια ισχύος στο σύστημα.

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιήθηκε μία νέα τεχνολογία γνωστή ως APS, σε τραμ στη Μπορντώ. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί μία τρίτη ράγα ανάμεσα στις σιδηροδρομικές γραμμές. Η τρίτη αυτή ράγα χωρίζεται σε τμήματα ανά 8 μέτρα, τα οποία είναι μονωμένα ηλεκτρικά μεταξύ τους, με ουδέτερα τμήματα μήκους 3 μέτρων. Ο κάθε συλλέκτης είναι εφοδιασμένος με μία κεραία, η οποία στέλνει σήμα και ενεργοποιείται το τμήμα το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Η τρίτη ράγα δεν διαρρέεται συνεχώς από ρεύμα και έτσι αποφεύγεται ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.

Για τη συλλογή του ρεύματος τα τρένα διαθέτουν μια μεταλλική επαφή που ονομάζεται “παπούτσι”, η οποία γλιστρά επάνω στην αγωγίμη δοκό. Σε μερικά από τα πρώτα σιδηροδρομικά συστήματα το “παπούτσι” εφάπτονταν επάνω στην τρίτη ράγα. Αργότερα όμως, η επαφή γινόταν στο πλάι ή από κάτω, γεγονός που επέτρεπε την

κάλυψη της ράγας με σκοπό την προστασία των εργαζομένων από ατύχημα, αλλά και την προστασία του σιδηροδρομικού αγωγού από το χιόνι ή τα πεσμένα φύλλα που επικάθονταν πάνω στη ράγα και εμπόδιζαν την επαφή με το “παπούτσι”.



Σχήμα 1.6 Αγωγός επαφής και διάφοροι τρόποι σύνδεσης με την τρίτη σιδηροδρομική ράγα.

#### 1.4.1.1.2.2 Εναέρια τροφοδοσία

Οι εναέρια γραμμές τροφοδοσίας αποτελούν μέθοδο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στον ηλεκτρικό σιδηρόδρομο. Ένα ή περισσότερα καλώδια βρίσκονται πάνω από τις σιδηροδρομικές γραμμές κατά μήκος της διαδρομής, ώστε να καλύπτουν τις ηλεκτρολογικές ανάγκες του τρένου και να βρίσκονται σε συνεχή σύνδεση με τους υποσταθμούς τροφοδοσίας.

Τα κύρια συστατικά του εναέριου συστήματος τροφοδοσίας είναι οι στύλοι στήριξης, οι οποίοι κατασκευάζονται από σκυρόδεμα ή από μέταλλο, οι αγκυρώσεις και τα άκαμπτα πλαίσια. Η γραμμή επαφής υπολογίζεται και εξαρτάται από παραμέτρους, όπως είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, το ονομαστικό ρεύμα, τα χαρακτηριστικά της σιδηροδρομικής γραμμής και η τοποθέτηση των σημείων τροφοδοσίας.

Ο αγωγός επαφής κατασκευάζεται από σκληρό ηλεκτρολυτικό χαλκό, έχει υψηλή μηχανική αντοχή σε φθορά και διάβρωση και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για να εξασφαλιστεί καλή συμμετοχή του φέροντα αγωγού στην αγωγιμότητα, τοποθετούνται εγκάρσιες συνδέσεις με ευλίγιστο χάλκινο καλώδιο μεταξύ αγωγού επαφής και φέροντα αγωγού, συνήθως κάθε 300m.

Οι εναέριοι αγωγοί ονομάζονται αλυσοειδείς, εξαιτίας της καμπύλης που σχηματίζεται από το υποστηρικτικό καλώδιο και έχουν μία σύνθετη γεωμετρία. Ο αγωγός επαφής στηρίζεται οριζοντίως, είναι τεντωμένος και τραβιέται από τα πλάγια ώστε να ακολουθεί τις γραμμές. Το μήκος του αγωγού είναι συνήθως μεταξύ 1000 και 1500 μέτρων και είναι ανάλογο με το εύρος των θερμοκρασιών στην περιοχή. Ο αγωγός τοποθετείται στο

κέντρο της σιδηροδρομικής γραμμής προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι θα έρθει σε επαφή με το συλλέκτη.

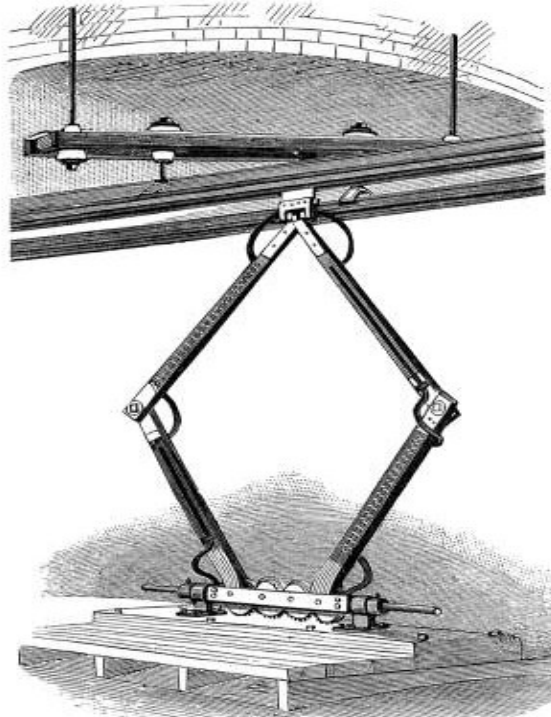
Το κυριότερο πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί στα εναέρια συστήματα ηλεκτροδότησης είναι να δημιουργηθεί κύμα από την επαφή του πρώτου συλλέκτη ρεύματος με τις γραμμές με αποτέλεσμα να μη γίνει η επαφή στους υπόλοιπους συλλέκτες που ακολουθούν στο συρμό.

#### **1.4.1.1.2.2.1 Ο πόλος τρόλλεϋ**

Πρόκειται για ένα φορείο από ξύλο ή μέταλλο, που χρησιμοποιείται για τη συλλογή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα εναέριο καλώδιο για τον εξοπλισμό ελέγχου και προώθησης ενός τραμ. Βέβαια, στα περισσότερα σιδηροδρομικά οχήματα που χρησιμοποιούν εναέρια τροφοδοσία ο πόλος τρόλλεϋ έχει δώσει τη θέση του στους παντογράφους.

#### **1.4.1.1.2.2.2 Ο παντογράφος**

Είναι, επίσης μία συσκευή συλλογής ηλεκτρικής ενέργειας από εναέρια καλώδια. Ο πιο κοινός παντογράφος είναι ο τύπου Z, ο οποίος έχει εξελιχθεί ώστε να παράσχει μία πιο συμπαγή και ενιαία σχεδίαση βραχίονα για υψηλές ταχύτητες. Δεδομένου ότι ο παντογράφος είναι συνήθως η μόνη επαφή τροφοδοσίας στην αμαξοστοιχία, πρέπει συνεχώς να συντηρεί μια καλή επαφή υπό οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα, τόσο πιο δύσκολη είναι η διατήρηση της καλής επαφής. Η επαφή του παντογράφου διατηρείται από ελατήρια ή την πίεση του αέρα. Η πίεση του αέρα είναι προτιμότερη συνήθως στις υψηλές ταχύτητες. Ο παντογράφος είναι τοποθετημένος πάνω σε ένα κυλινδρικό πιστόνι το οποίο με την πίεση του αέρα φροντίζει να είναι συνεχής η επαφή με το καλώδιο τροφοδοσίας. Αρχικά, οι παντογράφοι ήταν ακριβώς αυτό, μια συσκευή σε σχήμα διαμαντιού με την κεφαλή επαφής στο άνω μέρος παρέχοντας δυο φάσεις επαφών. Πιο σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν ένα παντογράφο με μονό βραχίονα.



*Σχήμα 1.7 Από τους πρώτους παντογράφους που χρησιμοποιήθηκαν*

#### **1.4.1,2 Μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος**

Είναι η διάταξη που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην πηγή ισχύος και στην ηλεκτρική μηχανή. Σκοπός του είναι είτε απλά να καταστήσει δυνατή τη λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής είτε επιπλέον να ελέγξει τη λειτουργία αυτή. Για το λόγο αυτό υπάρχουν ελεγχόμενοι και μη ελεγχόμενοι μετατροπέες ισχύος. Όπως αναφέραμε παραπάνω, ο τύπος του μετατροπέα ισχύος που απαιτείται για κάθε εφαρμογή εξαρτάται από το είδος της πηγής ισχύος και το είδος της μηχανής.

#### **1.4.1.3 Φορτίο**

Φορτίο σε ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης είναι το μηχανικό, κατά κύριο λόγο, σύστημα που είναι συνδεδεμένο στον άξονα της ηλεκτρικής μηχανής. Μεταξύ φοτίου και μηχανής γίνεται η ανταλλαγή μηχανικής ενέργειας, όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω, ανάλογα με τα τεταρτημόρια λειτουργίας. Στα ηλεκτροκίνητα τρένα, επίσης, υπάρχουν και βοηθητικά φορτία τα οποία είναι υπεύθυνα για τη θέρμανση, τον κλιματισμό της αμαξοστοιχίας και την ψύξη των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων, όπως των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, των ηλεκτρικών μηχανών κ.λ.π.

#### **1.4.1.4 Σύστημα παρατηρητή και ελέγχου**

Σκοπός του συστήματος Παρατηρητή και Ελέγχου είναι η παρακολούθηση της λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης και πραγματοποίηση εκείνων των διαδικασιών ελέγχου που θα δώσουν στην έξοδο την επιθυμητή απόκριση. Το σύστημα δέχεται ως είσοδο την παρούσα και την επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής και, βάσει συγκεκριμένου αλγορίθμου, δίνει τις κατάλληλες εντολές στον μετατροπέα ισχύος (εντολές παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων για τον ορισμό της έναυσης ή της σβέσης τους), ώστε η μηχανή να μεταβεί στην επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας. Τα δεδομένα που τίθενται προς έλεγχο μπορεί να προέρχονται από αισθητήρες και μετρητικές διατάξεις.

#### **1.4.1.5 Ηλεκτρική μηχανή**

Πρόκειται για κάθε συσκευή ικανή να πραγματοποιήσει ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας. Συνδέεται με το φορτίο της μέσω του άξονά της και ανάλογα τη φάση της λειτουργίας της μπορεί είτε να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια που δέχεται από το δίκτυο σε μηχανική, την οποία αποδίδει στο φορτίο, είτε αντίστροφα. Στη συνέχεια της παραγράφου παρατίθενται μερικά είδη κινητήρων έλξης.

##### **1.4.1.5.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος**

Πρόκειται για έναν τύπο κινητήρα που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στο παρελθόν. Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα, πάνω στον οποίο στηρίζονται οι μαγνητικοί πόλοι. Οι μαγνητικοί πόλοι προεξέχουν από το κυλινδρικό ζύγωμα και ονομάζονται έκτυποι πόλοι (salient poles). Το τύλιγμα της διέγερσης, που φέρουν οι πόλοι του στάτη, τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και παράγει ένα σταθερό και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο. Το τύλιγμα του σπλισμού τοποθετείται σε αυλακώσεις, στον κυλινδρικό δρομέα. Η τεχνολογική ωριμότητά τους και ο απλός έλεγχός τους υπερισχύουν σε κάποιες εφαρμογές, έναντι της απαίτησης για συντήρηση και αντικατάσταση ψυκτών. Ωστόσο, η αξιοπιστία των κινητήρων και η ανάγκη για εξάλειψη της απαίτησης για συντήρηση είναι πρωτεύουσας σημασίας. Τεχνολογικές εξελίξεις έχουν θέσει τους κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψήκτρες στο προσκήνιο, επειδή έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο κόστος.

##### **1.4.1.5.2 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες**

Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη πυκνότητα ισχύος, ενώ δύνανται να παρέχουν υψηλές τιμές ροπής, λόγω της ορθογώνιας μορφής της μαγνητικής ροής και του ρεύματος. Ένα μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτείται ακριβής γνώση της θέσης του δρομέα από μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών.

#### **1.4.1.5.3 Κινητήρες επαγωγής**

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όλων των κατηγοριών, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας. Σύμφωνα μ' αυτή, ο δρομέας του κινητήρα στρέφεται από τη ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία του αναπτύσσουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη μπορούσε να στραφεί, τότε η αναπτυσσόμενη ροπή θα ανάγκαζε το δρομέα να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επομένως, η λειτουργία όλων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής από το τύλιγμα του στάτη ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου. Το μικρό κόστος κατασκευής, η καλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και ο εύκολος έλεγχος είναι κάποιοι από τους λόγους για τους οποίους επιλέγεται ο συγκεκριμένος τύπος σε πολλές περιπτώσεις ηλεκτρικής έλξης.

#### **1.4.1.5.4 Σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης**

Δεν διαθέτουν ούτε τύλιγμα διέγερσης, ούτε μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, αλλά εκμεταλλεύονται αποκλειστικά τη ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους. Ωστόσο, φέρουν σημαντικά μειονεκτήματα. Τέτοια είναι η μη γραμμικότητα του μαγνητικού κυκλώματος, η υψηλή κυμάτωση ροπής σε χαμηλές στροφές και ο ακουστικός θόρυβος. Βέβαια, οι τεχνολογικές εξελίξεις στον έλεγχο και το σχεδιασμό έχουν εξαλείψει σε μεγάλο βαθμό κάποια από αυτά τα μειονεκτήματα με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η αξιοποίησή τους σε σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες.

#### **1.4.1.5.5 Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη**

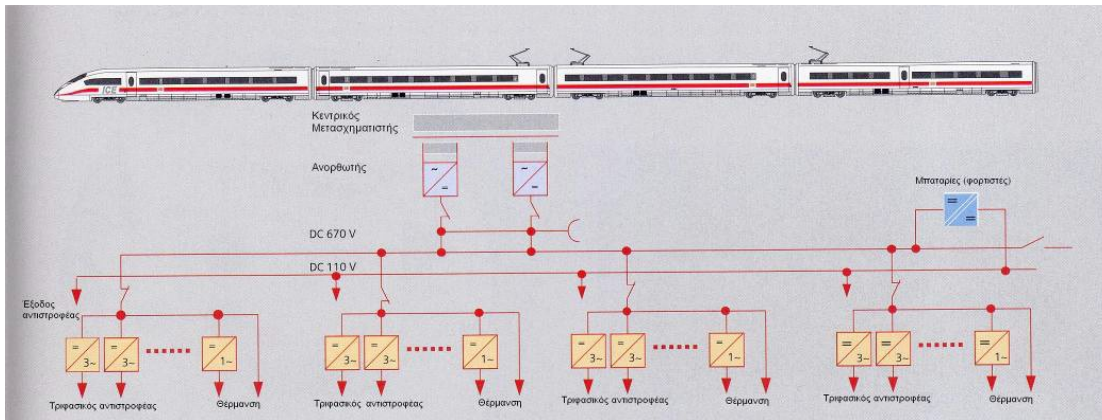
Είναι σχετικά νέος και αναπτυσσόμενος τύπος κινητήρα. Η απουσία χαλκού από το δρομέα (καθώς έχει αντικατασταθεί η διέγερση με μόνιμους μαγνήτες), αλλά και η απουσία ψυκτρών τον καθιστά ελαφρύτερο, αποδοτικότερο και πιο αξιόπιστο σε σχέση με τους άλλους κινητήρες. Παρουσιάζει, βέβαια, με σειρά του ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το σχετικά υψηλό κόστος των μόνιμων μαγνητών, η δυσκολία συναρμολόγησης του δρομέα (θα πρέπει να κολληθούν οι μόνιμοι μαγνήτες ένας προς ένα), αλλά και η απομαγνήτιση των μόνιμων μαγνητών σε υψηλές θερμοκρασίες.

### **1.4.2 Αρχές λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής έλξης**

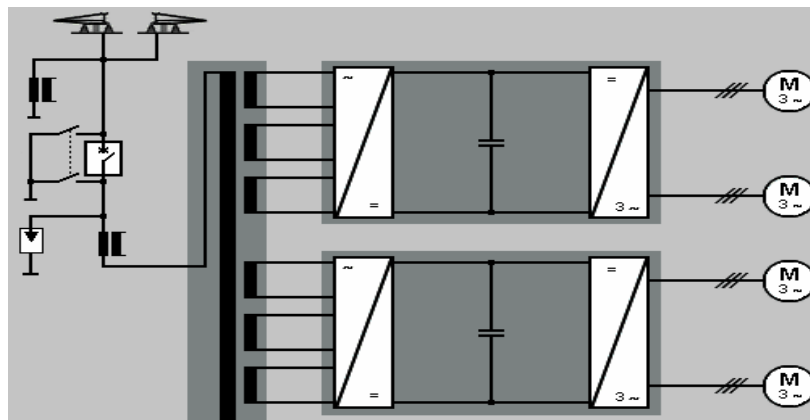
Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική έλξη είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όταν η απαιτούμενη ισχύς δεν είναι μεγάλη και κινητήρες εναλλασσομένου σε αντίθετη περίπτωση (συνήθως τριφασικοί ασύγχρονοι βραχυκυκλωμένου δρομέα). Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη που πραγματεύεται η παρούσα εργασία βρίσκονται σε εφαρμογή τα τελευταία χρόνια.

Σε ένα δίκτυο μονοφασικού εναλλασσομένου ρεύματος (AC 25 kV / 50 Hz), όπως

αυτό στην Ελλάδα, η ενέργεια συλλέγεται με τις μεθόδους που αναφέραμε και οδηγείται στον μετασχηματιστή. Εκεί υποβιβάζεται η τάση και εφαρμόζεται στην είσοδο ανορθωτικών διατάξεων. Πρόκειται για AC / DC μονοφασικούς μετατροπείς τεσσάρων τεταρτημορίων, που δέχονται στην είσοδό τους την εναλλασσόμενη μονοφασική τάση από το μετασχηματιστή και δίνουν συνεχή στην έξοδό τους. Η ανορθωμένη τάση, μετά την εξομάλυνσή της, οδηγείται στον αντιστροφέα και μετατρέπεται σε τριφασική εναλλασσόμενη με μεταβλητό πλάτος και συχνότητα. Επίσης, από ένα δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή τροφοδοτείται μέσω φίλτρων ένας μονοφασικός ανορθωτής. Η τάση εξόδου του αντιστρέφεται με έναν τριφασικό αντιστροφέα και στη συνέχεια τροφοδοτεί βοηθητικά φορτία. Τέλος, από την ανορθωμένη τάση μέσω ενός DC – DC μετατροπέα τροφοδοτούνται μπαταρίες, συνήθως με 24 V. Με αυτή την τάση τροφοδοτούνται τα κυκλώματα οδήγησης και ελέγχου. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ένα παράδειγμα.



Σχήμα 1.8 Ηλεκτρικό δίκτυο κίνησης ηλεκτροκίνητου τρένου



Σχήμα 1.9 Μετατροπέας έλξης ηλεκτράμαζας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

#### 2.1 Εισαγωγή

Τα μαγνητικά υλικά αποτελούν υλικά μεγάλου βιομηχανικού ενδιαφέροντος και βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στους διάφορους τύπους μαγνητικών υλικών, στις ιδιότητές τους, καθώς και στους θεμελιώδεις φυσικούς νόμους που διέπουν τη συμπεριφορά τους. Επίσης, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα υλικά κατασκευής μόνιμων μαγνητών, στην εφαρμογή τους για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών και στα χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας τους.

#### 2.2 Θεμελιώδεις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού

##### 2.2.1 Το μαγνητικό πεδίο

Η δράση των μαγνητικών πεδίων είναι ο βασικός μηχανισμός μετατροπής ενέργειας στους κινητήρες, στις γεννήτριες και στους μετασχηματιστές. Οι αρχές με τις οποίες δρουν τα μαγνητικά πεδία συνοψίζονται στα εξής:

- Ένας ρευματοφόρος αγωγός παράγει γύρω του μαγνητικό πεδίο
- Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές διέρχονται μέσα από κάποιο πηνίο επάγει τάση στα άκρα του πηνίου.
- Σε ένα ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο ασκείται δύναμη εξ' επαγωγής.
- Στα άκρα ενός αγωγού που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο επάγεται κάποια τάση.

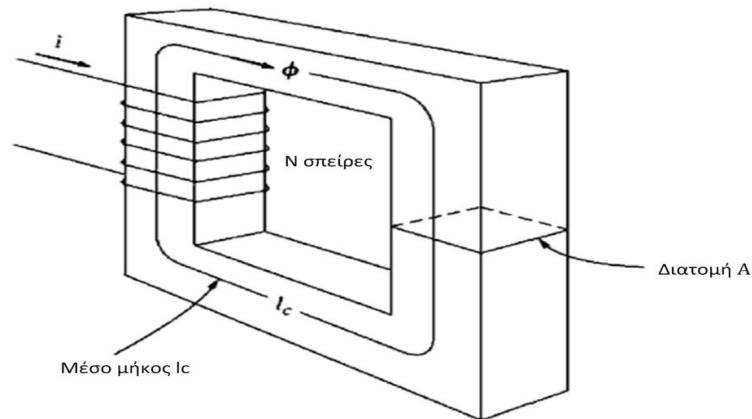
Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω από ένα ρευματοφόρο αγωγό διέπεται από το νόμο του Ampere :

$$\int H * dl = I$$

όπου  $H$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το ρεύμα  $I$ .

Θεωρούμε μια απλή διάταξη που αποτελείται από ένα αγωγό  $N$  σπειρών, που τροφοδοτείται με ρεύμα, τυλιγμένο σε ένα ορθογώνιο πυρήνα μέσου μήκους  $l_c$ .





Σχήμα 2.1 Διάταξη ορθογωνίου πυρήνα που τροφοδοτείται από αγωγό  $N$  σπειρών

Η διαδρομή ολοκλήρωσης στο νόμο του Ampere είναι το μέσο μήκος του πυρήνα, αφού το μαγνητικό πεδίο που παράγεται περιορίζεται ουσιαστικά μέσα στον πυρήνα στην περίπτωση των σιδηρομαγνητικών υλικών. Αντίστοιχα, το ρεύμα  $I$ , που εμπλέκεται με τη διαδρομή ολοκλήρωσης, είναι ίσο με  $Ni$  (το τύλιγμα συναντάει  $N$  φορές τη διαδρομή ολοκλήρωσης). Επομένως ο νόμος του Ampere γίνεται:

$$H * l_c = N * i$$

Έτσι, στο εσωτερικό του πυρήνα το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, που οφείλεται στη διέλευση του ρεύματος, έχει τιμή :

$$H = \frac{N * i}{l_c}$$

Η σχέση που υπάρχει μεταξύ της έντασης του πεδίου  $H$  και της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό του υλικού δίνεται από τον τύπο :

$$B = \mu * H$$

όπου  $B$  η μαγνητική επαγωγή και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του εκάστοτε υλικού.

Εκφράζει τη σχετική ευκολία που παρουσιάζει η ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου στο εκάστοτε υλικό. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι μονόμετρο μέγεθος. Ισχύει η σχέση :

$$\mu = \mu_0 * \mu_r$$

όπου  $\mu_0 = 0,4\pi 10^{-8}$  H/cm η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ενώ  $\mu_r$  η σχετική διαπερατότητα του μέσου.

### **2.2.2 Μαγνητική ροή**

Η μαγνητική ροή διαμέσου μιας επιφάνειας είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα της κάθετης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου, που διέρχεται από την επιφάνεια αυτή. Ορίζουμε, επιπλέον, τη μαγνητική ροή σε μία συγκεκριμένη περιοχή, από τη σχέση :

$$\varphi = \int_A B \cdot dA$$

όπου  $dA$  το διαφορικό μιας στοιχειώδους περιοχής της διατομής του πυρήνα. Αν το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής είναι κάθετο στο επίπεδο της διατομής  $A$  του πυρήνα και το μέτρο της είναι σταθερό προκύπτει:

$$\varphi = B \cdot A$$

Τελικά, η συνολική μαγνητική ροή που προκαλεί το ρεύμα  $i$  στον πυρήνα είναι :

$$\varphi = \frac{\mu \cdot N \cdot i \cdot A}{l_c}$$

Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το Weber (Wb). Στην σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών, μείζονος σημασίας είναι ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής και μάλιστα στην επιφάνεια ενός πολικού βήματος.

### **2.2.3 Μαγνήτιση**

Η μαγνητική κατάσταση των υλικών περιγράφεται από το διάνυσμα της μαγνήτισης,  $M$  [A/m]. Το μέτρο του διανύσματος της μαγνήτισης ισούται με την μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού.

$$J = \mu_0 \cdot M$$

όπου  $J$  η μαγνητική πόλωση του υλικού.

Η μαγνητική επαγωγή  $B$  είναι ίση με το άθροισμα του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$  και της μαγνητικής ροπής που επάγεται στο υλικό  $M$ .

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M$$

### **2.2.4 Μαγνητικό κύκλωμα**

Παρατηρώντας τη τελευταία σχέση φαίνεται ότι το ρεύμα του πηνίου στη μια πλευρά του πυρήνα παράγει στο εσωτερικό του μετάλλου κάποια μαγνητική ροή. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε μια αναλογία με τη πηγή τάσης που προκαλεί ροή ρεύματος σ' ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.

Αν θεωρήσουμε λοιπόν ότι η μαγνητική ροή  $\varphi$  είναι ανάλογη του ρεύματος στα

ηλεκτρικά κυκλώματα, τότε μπορούμε να πούμε ότι το αντίστοιχο με την τάση μέγεθος που την προκαλεί ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) (magnetomotive force, mmf). Η μαγνητεγερτική δύναμη στο μαγνητικό κύκλωμα ισούται με:

$$F = N * i * (A * t)$$

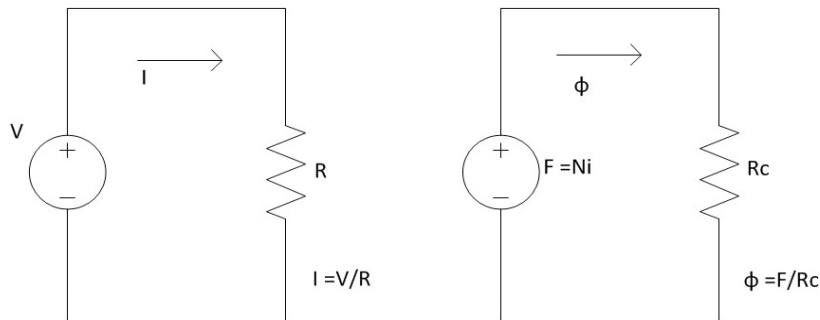
Κατά αντιστοιχία με το ηλεκτρικό κύκλωμα, αποδίδουμε στη μαγνητεγερτική δύναμη του μαγνητικού κυκλώματος μια φορά αναφοράς. Το θετικό άκρο της ΜΕΔ είναι το άκρο από το οποίο εξέρχεται η μαγνητική ροή. Η πολικότητα της ΜΕΔ ενός πηνίου μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια του κανόνα του δεξιού χεριού.

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα, ο νόμος του Ohm συνδέει την τάση με το ρεύμα. Όσον αφορά στα μαγνητικά κυκλώματα η σχέση μεταξύ μαγνητεγερτικής δύναμης και μαγνητικής ροής είναι:

$$F = \phi * R_c$$

όπου  $R_c$  η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος, η οποία προκύπτει ίση με :

$$R_c = \frac{l_c}{\mu * A}$$



Σχήμα 2.2 Αντιστοιχία ηλεκτρικού και μαγνητικού κυκλώματος

### 2.2.5 Το ηλεκτρονιακό spin και η μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου

Το ηλεκτρόνιο έχει μία στροφορμή που δεν έχει καμία σχέση με την τροχιακή του κίνηση. Συμπεριφέρεται σαν να περιστρέφεται συνεχώς γύρω από ένα δικό του άξονα. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται σπιν ή ιδιοστροφορμή. Όποτε μετράται το μέγεθος της στροφορμής του σπιν, βρίσκεται ίσο με  $h/4\pi$ , όπου  $h$  η σταθερά του Πλανκ.

Το ηλεκτρονιακό σπιν είναι ένα κβαντικό φαινόμενο. Η αναφορά του στην παρουσία εργασία έγκειται στο γεγονός ότι με αυτή την ενδογενή στροφορμή σχετίζεται μια μαγνητική ροπή, που κι αυτή έχει σταθερό μέτρο. Το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής

έχει φορά αντιπαράλληλη της στροφορμής. Για το ηλεκτρονικό σπιν χρειάζεται να γνωρίζουμε : α) Παράγει ένα μαγνητικό πεδίο που σε μεγάλη απόσταση είναι το ίδιο με εκείνο ενός διπόλου. β) Μέσα σε εξωτερικό πεδίο δέχεται ροπή ίση με εκείνη που θα δεχόταν ένας βρόχος ρεύματος ισοδύναμης διπολικής ροπής. γ) Μέσα στο χώρο που καταλαμβάνεται από το ηλεκτρόνιο έχουμε  $\text{div}B = 0$  παντού.

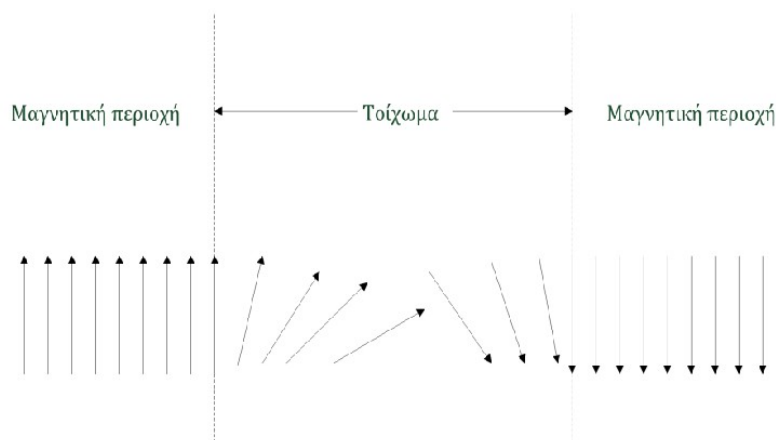
Μια και το μέτρο της μαγνητικής ροπής του σπιν είναι πάντα το ίδιο, το μόνο πράγμα που μπορεί να επηρεάσει ένα εξωτερικό πεδίο είναι η διεύθυνσή του. Αν οι μαγνητικές ροπές του σπιν των ηλεκτρονίων μέσα σε ένα υλικό είναι ελεύθερες να προσανατολιστούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, περιμένουμε ότι θα προτιμήσουν τον προσανατολισμό του εφαρμοζόμενου πεδίου  $B$ , δηλαδή εκείνον με τη χαμηλότερη δυνατή ενέργεια.

Η θερμική διέγερση τείνει πάντα να δημιουργήσει μια τυχαία κατανομή των διευθύνσεων των αξόνων των σπιν. Ο βαθμός ευθυγράμμισης που τελικά επικρατεί αποτελεί ένα συμβιβασμό ανάμεσα στην προτίμηση για την κατεύθυνση της χαμηλότερης ενέργειας και στην αποπροσανατολιστική δράση της θερμικής κίνησης.

### **2.3 Σιδηρομαγνητικά υλικά**

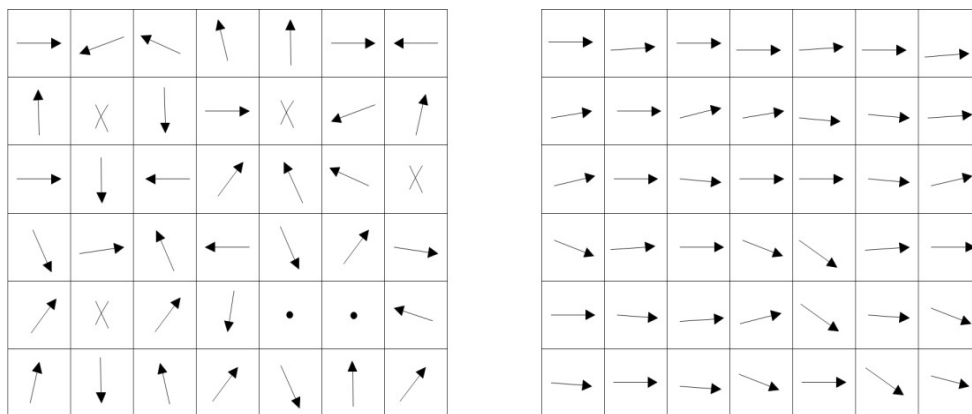
Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται κατά βάση στην κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, τόσο του πυρήνα του στάτη όσο και του δρομέα, καθώς και των μετασχηματιστών. Σε τέτοια υλικά όπως σίδηρος, κοβάλτιο, νικέλιο και κράματά τους, η μαγνητική τους διαπερατότητα μπορεί να είναι εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές μεγαλύτερη του κενού ( $\mu_r \gg 1$ ).

Για την ερμηνεία του φαινομένου του σιδηρομαγνητισμού, ο Pierre Weiss διατύπωσε το 1907 την υπόθεση για την ύπαρξη ισχυρού μοριακού πεδίου στα σιδηρομαγνητικά υλικά, το οποίο αποτελεί την αιτία για τον ολικό παραλληλισμό των ατομικών μαγνητικών ροπών. Επειδή το σιδηρομαγνητικό υλικό μακροσκοπικά φαίνεται αμαγνήτιστο, ο Weiss διατύπωσε τη δεύτερη υπόθεση ότι μια μακροσκοπική περιοχή του υλικού αποτελείται από μικροσκοπικές περιοχές, καθεμία από τις οποίες είναι αυθόρμητα μαγνητισμένη και συμπεριφέρεται σαν μαγνητικό δίπολο. Αυτό συμβαίνει επειδή τα γειτονικά άτομα αλληλεπιδρούν, ώστε η μαγνητική ροπή που θα είχε το καθένα ξεχωριστά να μειώνεται, αλλά ταυτόχρονα να παραλληλίζονται όλες προς μια κατεύθυνση. Αυτός, ο αυθόρμητος, χωρίς την παρουσία εξωτερικού πεδίου, παραλληλισμός των μαγνητικών ροπών, δεν οφείλεται απλά στη μαγνητική τους αλληλεπίδραση, αλλά σε συνδυασμό μαγνητικής και ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης. Όλες, δηλαδή, οι ατομικές μαγνητικές ροπές σε κάθε περιοχή είναι παράλληλες μεταξύ τους, αλλά οι διευθύνσεις τους διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Οι περιοχές διαχωρίζονται από τις γειτονικές τους μέσω των λεγόμενων τειχωμάτων Bloch, τα οποία είναι μεταβατικές περιοχές στα σύνορα μεταξύ των μαγνητικών περιοχών. Λόγω των τυχαίων αυτών προσανατολισμών των μαγνητικών ροπών στις διάφορες περιοχές, το υλικό μακροσκοπικά φαίνεται αμαγνήτιστο.



Σχήμα 2.3 Τοίχωμα Bloch μεταξύ δύο μαγνητικών περιοχών

Όμως, υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου οι μαγνητικές περιοχές τείνουν να ευθυγραμμιστούν με αυτό, αποκτώντας ενιαία μαγνητική ροπή, με αποτέλεσμα το υλικό να αποκτήσει μαγνήτιση  $M$ . Είναι γνωστό πως μαγνητικές περιοχές που είναι ήδη μαγνητισμένες τείνουν να διατηρήσουν τον προσανατολισμό τους ακόμα και όταν αφαιρεθεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τα σπιν δεν μπορούν εύκολα να εκτραπούν μαζικά από μια διεύθυνση σε μία ισοδύναμη, κάθετη στην πρώτη. Για να το κάνουν, θα πρέπει στην πορεία τους να περάσουν από λιγότερο ευνοϊκές διεθύνσεις. Ακριβώς αυτό το εμπόδιο είναι που καθιστά δυνατή την ύπαρξη μόνιμων μαγνητών.

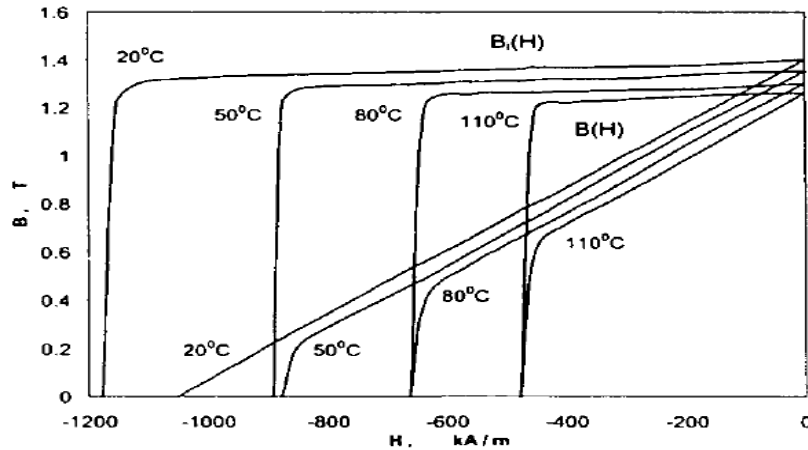


Σχήμα 2.4 Μαγνητικοί τομείς ενός σιδηρομαγνητικού υλικού πριν και μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

### 2.3.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες των μαγνητικών υλικών

Η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα μαγνητικό υλικό συνεπάγεται την αύξηση της θερμικής κίνησης των ατόμων. Η θερμική αυτή κίνηση είναι αντίθετη στην

ευθυγράμμιση των μαγνητικών περιοχών και τείνει αποπροσανατολίσει τα μαγνητικά δίπολα σε τυχαίες κατευθύνσεις. Αυτό το φαινόμενο επηρεάζει αρνητικά τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού, καθώς μειώνει τη τιμή της μαγνητικής επαγωγής κορεσμού  $B_s$ .

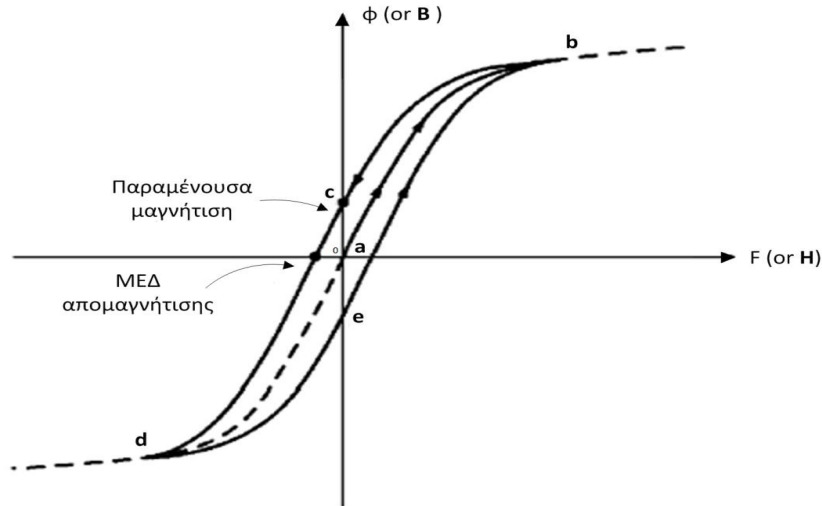


Σχήμα 2.5 Βρόχοι υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χάνουν την αυθόρμητη μαγνήτισή τους, όταν η θερμοκρασία τους ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή  $T_c$ , χαρακτηριστική για το καθένα, η οποία ονομάζεται σιδηρομαγνητική θερμοκρασία Curie. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες της  $T_c$ , ο αυθόρμητος παραλληλισμός των μαγνητικών ροπών στις διάφορες μαγνητικές περιοχές του σιδηρομαγνητικού υλικού καταστρέφεται, δημιουργείται αταξία και γι' αυτό το λόγο το υλικό συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό. Η μεταβολή αυτή είναι αντιστρέψιμη, καθώς αν η θερμοκρασία επιστρέψει σε χαμηλότερες της  $T_c$  τιμές, ξαναεμφανίζονται περιοχές με αυθόρμητο παραλληλισμό των μαγνητικών ροπών τους και το υλικό ξαναγίνεται σιδηρομαγνητικό.

### 2.3.2 Βρόχος μαγνητικής υστέρησης

Θεωρούμε ένα κομμάτι σιδηρομαγνητικού υλικού, το οποίο όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, εμφανίζεται μακροσκοπικά αμαγνήτιστο, λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των μαγνητικών ροπών στις διάφορες περιοχές του. Επιβάλλοντας σε αυτό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης  $H$ , το οποίο ενδεχομένως να προκύπτει από ένα πηνίο διαρρεόμενο από ρεύμα έντασης  $I$ , τυλιγμένο γύρω του, παρακολουθούμε τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής στο υλικό. Προκύπτει η καμπύλη ή βρόχος υστέρησης, ως η χαρακτηριστική καμπύλης μαγνητικής επαγωγής  $B$  σε συνάρτηση με τη μαγνητική ένταση  $H$ .



Σχήμα 2.6 Βρόχος μαγνητικής υστέρησης

Για μικρές τιμές του  $H$  εκείνες οι περιοχές του υλικού που έχουν μαγνητικές ροπές προσανατολισμένες σε κατευθύνσεις παραπλήσιες με αυτήν του εξωτερικού πεδίου, αυξάνονται σε βάρος των υπόλοιπων περιοχών. Αρχίζει να αυξάνεται η τιμή του  $B$  και να διαγράφεται το τμήμα  $oa$ .

Για μεγάλες τιμές του  $H$  οι μαγνητικές ροπές των διαφόρων περιοχών στρέφονται για να προσανατολιστούν προς την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Όταν ο προσανατολισμός γίνει πλήρης, όλο το κομμάτι του σιδηρομαγνητικού υλικού καταλήγει σε μία ενιαία μαγνητική περιοχή. Φθάνει τότε στην κατάσταση του μαγνητικού κόρου (σημείο  $b$ ,  $H = H_k$ ,  $B = B_k$ ) και συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό (η μεταβολή από το σημείο  $b$  και έπειτα είναι αντιστρεπτή). Η διαδρομή που έχουμε διανύσει μέχρι στιγμής ονομάζεται αρχική καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Όσο το  $H$  λαμβάνει μικρότερες τιμές από το  $H_k$ , δεν ακολουθείται η αρχική καμπύλη μαγνήτισης, αλλά το τμήμα  $bc$ . Για  $H = 0$ , η μαγνητική επαγωγή δεν μηδενίζεται, αλλά έχει θετική τιμή που ονομάζεται παραμένουσα μαγνητική επαγωγή. Αυτό οφείλεται στο ότι πολλές από τις μαγνητικές περιοχές εξακολουθούν να έχουν τις μαγνητικές τους ροπές προσανατολισμένες στην κατεύθυνση του αρχικού εξωτερικού πεδίου. Δηλαδή το υλικό παραμένει αυθόρμητα μαγνητισμένο.

Για το μηδενισμό της μαγνητικής επαγωγής πρέπει να αντιστρέψουμε τη φορά του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου (δηλαδή της έντασης  $H$ ). Το τμήμα από το σημείο  $c$  μέχρι το μηδενισμό του  $B$  ονομάζεται καμπύλη απομαγνήτισης. Η τιμή που λαμβάνει η ένταση του πεδίου  $H$  στο σημείο μηδενισμού της επαγωγής ονομάζεται απομαγνητίζουσα ή συνεχούσα δύναμη (coercive force  $H_c$ ). Από εκεί και πέρα ακολουθείται περίπου συμμετρική πορεία και σχηματίζεται ο βρόχος μαγνητικής υστέρησης.

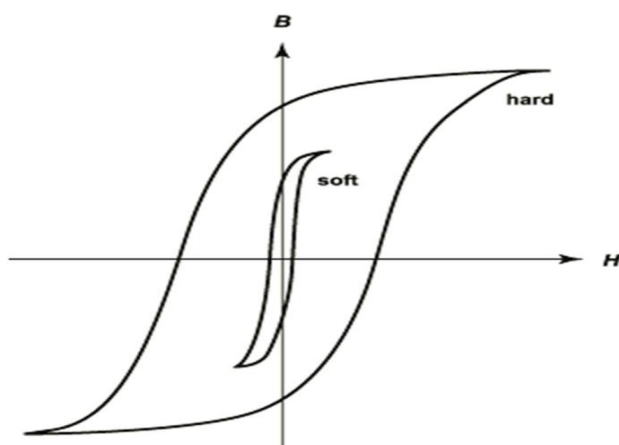
### 2.3.3 Μαλακά και σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά

Ανάλογα με την ευκολία με την οποία μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται τα σιδηρομαγνητικά υλικά διακρίνονται σε “μαλακά” και σε “σκληρά”.

Τα “μαλακά” υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα, εμφανίζουν πολύ μεγάλες τιμές μαγνητικής επαγωγής  $B$  για μικρές τιμές έντασης  $H$ , μικρές τιμές απμαγνητίζουσας δύναμης  $H_c$  και συνεπώς στενό μέγιστο βρόχο υστέρησης με μικρό εμβαδό. Τα υλικά αυτά πρέπει να είναι καθαρά, με ελάχιστες προσμίξεις, έτσι ώστε τα σύνορα μεταξύ των μαγνητικών περιοχών τους να μετακινούνται εύκολα. Τέτοια υλικά είναι : ο μαλακός σίδηρος, κράματα σιδήρου πυριτίου, κράματα σιδήρου νικελίου, όπως mumetal, malloy, supermalloy, κ.α.

Τα “σκληρά” υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα, εμφανίζουν μεγάλες τιμές του  $B$  μόνο για μεγάλες τιμές του  $H$ , έχουν πολύ μεγάλο  $H_c$  και συνεπώς πλατύ βρόχο μαγνητικής υστέρησης με μεγάλο εμβαδό. Η μετακίνηση των συνόρων μεταξύ των μαγνητικών περιοχών τους γίνεται δύσκολα. Τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών. “Σκληρά” υλικά είναι τα κράματα Alnico (II, V), που είναι τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα σε μόνιμους μαγνήτες, διάφοροι χάλυβες, το κράμα Remalloy, κράμα λευκόχρυσου κοβαλτίου, κ.α.

Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2.7) παρουσιάζονται ποιοτικά οι βρόχοι υστέρησης “σκληρών” και “μαλακών” σιδηρομαγνητικών υλικών.



Σχήμα 2.7 Βρόχοι υστέρησης σκληρών και μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών

### 2.4 Μόνιμοι μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά και τείνουν, όπως έχουμε προαναφέρει, να διατηρούν τη μαγνήτισή τους ακόμα και με την απουσία μαγνητικού πεδίου. Τα χαρακτηριστικά των μόνιμων μαγνητών προκύπτουν από τη μελέτη της καμπύλης απομαγνήτισής τους, που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο του βρόχου



υστέρησης. Είναι επιθυμητό οι μόνιμοι μαγνήτες να έχουν μεγάλες τιμές παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής  $B_r$ , καθώς και απομαγνητίζουσας δύναμης  $-H_c$ , για να μην απομαγνητίζονται εύκολα.

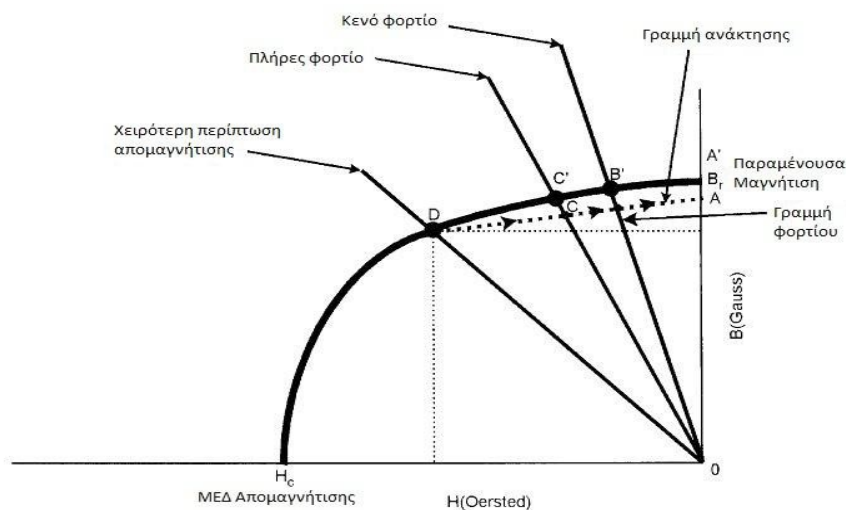
Ένα, επίσης, σημαντικό μέγεθος στους μόνιμους μαγνήτες είναι η μέγιστη τιμή του γινομένου  $BH$ , η οποία συνιστά συνήθως το απλούστερο κριτήριο για την αξιολόγηση της ποιότητας ενός μόνιμου μαγνήτη. Υποδηλώνει τη μέγιστη ενεργειακή πυκνότητα που είναι αποθηκευμένη στο μαγνήτη και ονομάζεται γινόμενο ενέργειας.

Ένα μειονέκτημα που συνδέεται με τη χρήση μονίμων μαγνητών είναι η σταθερή τιμή μαγνήτισής τους, με συνέπεια αδυναμία μεταβολής της διέγερσης. Επιπροσθέτως, υπάρχει κίνδυνος απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών λόγω επιβολής ισχυρού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αντίθετης πολικότητας, πολύ υψηλής θερμοκρασίας ή έπειτα από έντονη μηχανική καταπόνηση.

### **2.4.1 Απομαγνητίζουσα επίδραση**

Οι ιδιότητες ενός μόνιμου μαγνήτη και η επιλογή των κατάλληλων υλικών είναι πολύ σημαντικά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά το σχεδιασμό μιας μηχανής μόνιμων μαγνητών.

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται το τμήμα απομαγνήτισης της καμπύλης  $B(H)$  στο οποίο είναι συνήθως σχεδιασμένος να λειτουργεί ο μόνιμος μαγνήτης. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής  $B_r$  που αντιστοιχεί στο σημείο  $A'$  θα είναι διαθέσιμη αρχικά αν ο μαγνήτης βραχυκυκλωθεί με μία μεταλλική πλάκα, ώστε να μην υπάρχει διάκενο μεταξύ βορείου και νοτίου πόλου. Όταν ο μαγνήτης τοποθετείται στη μηχανή, το διάκενο αέρος έχει κάποια απομαγνητίζουσα επίδραση, έτσι ώστε το σημείο  $B'$  να αντιστοιχεί στη γραμμή κενού φορτίου. Η κορυφή της γραμμής κενού φορτίου (ως προς τον άξονα της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$ ) θα είναι χαμηλότερη με μεγαλύτερο διάκενο. Όταν τα τυλίγματα του στάτη διαρρέονται από ρεύμα, η αντίδραση τυμπάνου του μαγνητικού άξονα ( $d^*$ ) μπορεί να δημιουργήσει εκ νέου φαινόμενο απομαγνήτισης, το οποίο θα μειώσει ακόμη περισσότερο την πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο.



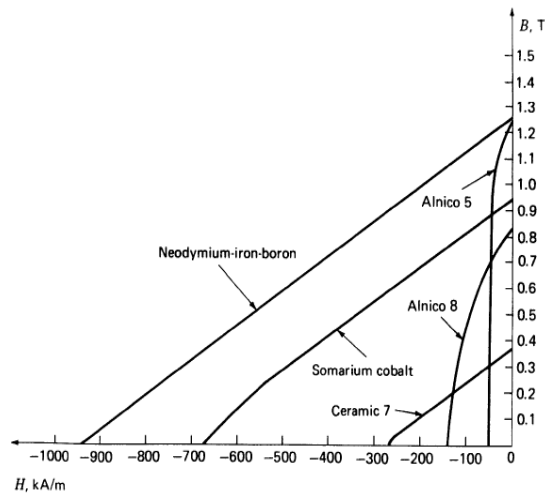
Σχήμα 2.8 Καμπύλη απομαγνήτισης ενός μόνιμου μαγνήτη

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται, επίσης, μία γραμμή φορτίου που αντιστοιχεί στη χειρότερη περίπτωση απομαγνήτισης που μπορεί να προκληθεί κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, ενός μεταβατικού φαινομένου ή σε περίπτωση σφάλματος. Όταν το σημείο λειτουργίας φτάσει στο D και αρθεί το φαινόμενο που προκαλεί την απομαγνήτιση, ο μαγνήτης θα επανέλθει κατά μήκος της γραμμής ανάκτησης (recoil line), η οποία έχει σχεδόν την ίδια κορυφή με την αρχική καμπύλη  $B(H)$  κοντά στο  $H = 0$ . Σε μία επόμενη λειτουργία, το σταθερό σημείο λειτουργίας θα καθοριστεί από την τομή της γραμμής φορτίου και της γραμμής ανάκτησης. Έτσι, ο μαγνήτης απομαγνητίζεται μόνιμα στη λειτουργία εν κενώ κατά την κάθετη απόσταση μεταξύ των σημείων A και A'. Το φαινόμενο αυτό αναδεικνύει τη σπουδαιότητα που έχει το σημείο της χειρότερης περίπτωσης απομαγνήτισης στην επίδοση της μηχανής και την αναγκαιότητα αποφυγής λειτουργίας της μηχανής κοντά σε αυτό το σημείο. Εναλλακτικά, αν το υλικό του μόνιμου μαγνήτη επιλεγεί ώστε η καμπύλη απομαγνήτισης να είναι ευθεία γραμμή, η γραμμή ανάκτησης θα συμπίπτει με τη γραμμή απομαγνήτισης, άσχετα με το αν η μηχανή έχει περάσει από το σημείο της χειρότερης περίπτωσης απομαγνήτισης (δηλαδή ο μόνιμος απομαγνητισμός θα είναι αμελητέος).

#### **2.4.2 Είδη μόνιμων μαγνητών**

Υπάρχουν τρία είδη μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται κατά βάση στην κατασκευή μόνιμων μαγνητών :

- Κεραμικοί μαγνήτες
- Μαγνήτες Alnico
- Μαγνήτες σπάνιων γαιών



Σχήμα 2.9 Καμπύλες απομαγνήτισης 5 μόνιμων μαγνητών

#### **2.4.2.1 Κεραμικοί μαγνήτες**

Οι κεραμικοί μαγνήτες ή αλλιώς φερρίτες είναι κεραμικές ενώσεις αποτελούμενες από οξείδια του σιδήρου ( $Fe_2O_3$ ), συνδυασμένα με ένα ή περισσότερα στοιχεία (συχνά βάριο και στρόντιο). Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των μαγνητών είναι το πολύ χαμηλό κόστος και οι χαμηλές απώλειες δινορρευσμάτων, λόγω της υψηλής μαγνητικής αντίστασης που παρουσιάζουν. Οι φερρίτες προτιμώνται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος που κυμαίνονται από λίγα kW μέχρι 7,5 kW.

#### **2.4.2.2 Μαγνήτες Alnico**

Οι μαγνήτες Alnico αποτελούν μία οικογένεια κραμάτων σιδήρου με προσμίξεις αλουμινίου (Al), νικελίου (Ni) και κοβαλτίου (Co), ως εκ τούτου προκύπτει και το όνομά τους. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των μαγνητών είναι η υψηλή πυκνότητα παραμένουσας μαγνητικής ροής και ο πολύ χαμηλός θερμοκρασιακός συντελεστής. Αυτά τα πλεονεκτήματα επιτρέπουν υψηλές πυκνότητες μαγνητικής ροής σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Ωστόσο, οι μαγνήτες αυτοί παρουσιάζουν πολύ μικρή αντοχή σε εξωτερικά πεδία απομαγνήτισης με την χαρακτηριστική τους B-H να είναι εξαιρετικά μη γραμμική.

Οι μαγνήτες Alnico παρουσιάζουν χαμηλότερη αντοχή σε εξωτερικά πεδία απομαγνήτισης από τους φερρίτες. Έχουν αντικατασταθεί σε πολλές εφαρμογές από κεραμικούς μαγνήτες και μαγνήτες σπάνιων γαιών, όμως χρησιμοποιούνται ακόμα στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών με μεγάλα διάκενα, με ισχύ που μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 200 kW.

#### **2.4.2.3 Μαγνήτες σπάνιων γαιών**

Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών αποτελούνται από κράματα μετάλλων με στοιχεία της ομάδας των λανθανίδων. Τα δυο συνηθέστερα στοιχεία που χρησιμοποιούνται, είναι το

σαμάριο (Sm) και το νεοδύμιο (Nd), με το τελευταίο να προσφέρει τα καλύτερα μαγνητικά χαρακτηριστικά. Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής, υψηλή αντοχή σε πεδία απομαγνήτισης, καθώς και υψηλό ενεργειακό γινόμενο  $(BH)_{max}$ . Η καμπύλη απομαγνήτισης είναι σχεδόν γραμμική, όμως στους μαγνήτες νεοδυμίου αυτή η γραμμικότητα αλλοιώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Το κόστος το μαγνητών αυτών είναι αρκετά υψηλό, όντας απαγορευτικό για την χρήση τους σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος. Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών προτιμούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή πυκνότητα ισχύος ανά όγκο, βελτιωμένη δυναμική απόδοση και υψηλός βαθμός απόδοσης.

#### **2.4.2.3.1 Μαγνήτες Σαμαρίου-Κοβαλτίου**

Το Σαμάριο-Κοβάλτιο είναι ένας τύπος υλικού μαγνητών σπάνιας γης, ιδιαίτερα ανθεκτικό στην οξείδωση και στην απομαγνήτιση σε σύγκριση με τους μαγνήτες Alnico και φερρίτη. Εισήχθη στην αγορά στη δεκαετία του '70, και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Οι μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου χωρίζονται σε δύο κύριες ομάδες: Sm1Co5 και Sm2Co17 (συνήθως αναφέρονται ως 1-5 και 2-17). Η ενέργεια για την ομάδα 1-5 κυμαίνεται από 15 έως 22 MGOe, ενώ για την 2-17 κυμαίνεται από 22 έως και 32 MGOe. Αυτοί οι μαγνήτες είναι οι ανθεκτικότεροι στη θερμοκρασία ανάμεσα σε όλους τους τύπους μαγνητών σπάνιας γης και μπορούν να αντέξουν σε θερμοκρασίες μέχρι 300°C. Οι μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου είναι εύθραυστοι και επιρρεπείς σε ραγίσματα και μπορούν να σπάσουν όταν εκτίθενται σε μεγάλη θερμική μεταβολή. Λόγω του υψηλού κόστους του σαμαρίου, μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου χρησιμοποιούνται για τις εφαρμογές, όπου η εφαρμογή απαιτεί υψηλή θερμοκρασία ή/και αντοχή στη διάβρωση.

#### **2.4.2.3.2 Μαγνήτες Νεοδυμίου**

Οι μαγνήτες νεοδυμίου είναι ένας ακόμα τύπος μαγνητών σπάνιας Γής. Αυτό το υλικό έχει τις παρόμοιες ιδιότητες με το Σαμάριο-Κοβάλτιο, όμως οξειδώνεται ευκολότερα και γενικά δεν έχει την ίδια αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι μαγνήτες NdFeB έχουν επίσης το υψηλότερο ενεργειακό προϊόν που πλησιάζει τα 50MGOe. Το υψηλό κόστος των μαγνητών νεοδυμίου τους καθιστούσε μέχρι πριν από λίγα χρόνια, επιλογή για ειδικές εφαρμογές μόνο. Σήμερα το κόστος των μαγνητών νεοδυμίου έχει ελαττωθεί σημαντικά σε σύγκριση με την προηγούμενη δεκαετία, καθιστώντας τον ως βασική επιλογή στην κατασκευή μηχανών μόνιμου μαγνήτη. Ωστόσο το κόστος αυτό αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά την εδραίωση ή μη, αυτών των μηχανών, ως την επικρατούσα τεχνολογία στα κινητήρια συστήματα. Οι μαγνήτες NdFeB είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι στη διάβρωση. Οι επεξεργασίες επιφάνειας έχουν αναπτυχθεί επιτρέποντάς τους να χρησιμοποιηθούν στις περισσότερες εφαρμογές. Συνήθη υλικά επικάλυψης των μαγνητών είναι ο χρυσός, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος και κασσίτερος και η επιστροφή εποξικής ρητίνης .

## 2.5 Μαγνητικές απώλειες

Κάθε μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής μέσα στην ύλη προκαλεί στο εσωτερικό της κατανάλωση ενέργειας.

στην περίπτωση που επιβληθεί χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, τότε μετά την αρχική μαγνήτιση, η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται κυκλικά στο υλικό, αφού η Μαγνητεγερτική Δύναμη (ΜΕΔ) που το διεγείρει μεταβάλλεται με την ίδια συχνότητα. Το αποτέλεσμα είναι, για την ίδια επιβαλλόμενη ΜΕΔ στο υλικό να εμφανίζονται δύο πιθανές μαγνητικές επαγωγές, ανάλογα με την πρότερη ιστορία μαγνήτισης.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση και έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση απωλειών ενέργειας υπό μορφή θερμότητας στο υλικό, οι οποίες είναι ανάλογες προς το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης. Επίσης, παράλληλα με την υστέρηση, παρουσιάζεται και ένα ακόμα φαινόμενο στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν διεγείρονται με εναλλασσόμενη ΜΕΔ. Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, εναλλασσόμενη ροή προκαλεί τάσεις εξ επαγωγής στη μάζα του υλικού, και αφού τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι καλοί αγωγοί του ρεύματος, επάγονται αντίστοιχα δινορρέυματα, διανεμημένα σε όλη τη μάζα του υλικού. Τα ρεύματα αυτά προκαλούν απώλειες Joule (της μορφής  $i^2$ ), και το άθροισμά τους με τις απώλειες από υστέρηση αποτελούν τις δύο βασικές συνιστώσες των απωλειών πυρήνα και όπως θα αποδειχθεί παρακάτω προκύπτουν από τη σχέση:

$$W_i = k_h f (B_{max})^n + k_e f (B_{max})^2$$

### 2.5.1 Απώλειες υστέρησης

Η ύπαρξη των απωλειών υστέρησης οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από το μέσο στο οποίο αναπτύσσεται μαγνητικό πεδίο. Εάν το μέσο είναι οτιδήποτε άλλο εκτός του κενού, μέρος μόνο της ενέργειας που λαμβάνεται από το ηλεκτρικό κύκλωμα διέγερσης αποθηκεύεται σε αυτό. Το μέρος αυτό είναι ανακτήσιμο από το μέσο όταν η ΜΕΔ διέγερσης αφαιρεθεί. Το υπόλοιπο της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα ως αποτέλεσμα έργου που εκτελείται στο υλικό του μέσου κατά τη διάρκεια της απόκρισής του στην μαγνήτιση.

Οι απώλειες αυτές προκύπτουν ως έργο των δυνάμεων τροχοπέδης που δρουν στα τοιχώματα Bloch και εμφανίζονται υπό την μορφή θερμικής ενέργειας. Το μέγεθος των απωλειών είναι ανάλογο του εμβαδού που περικλείεται στον βρόχο υστέρησης του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, στα σκληρά μαγνητικά υλικά, όπου ο βρόχος είναι μεγάλος, οι απώλειες είναι μεγάλες, ενώ στα μαλακά τείνουν να είναι σημαντικά μικρότερες.

Καθώς έχουμε ήδη περιγράψει το μηχανισμό δημιουργίας του βρόχου υστέρησης, το εμβαδόν του βρόχου είναι οι απώλειες ισχύος, γνωστές ως απώλειες υστέρησης και υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{hyst} = \int H * dB$$

Η ενέργεια αυτή χάνεται ως θερμότητα στο υλικό σε κάθε κύκλο. Η παρουσία της υστέρησης εξασκεί σημαντική επιρροή στην απόδοση, στην ανύψωση θερμοκρασίας και

συνεπώς στις απαιτήσεις ψύξης και απαγωγής της θερμότητας των ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων που αποτελούνται από σιδηρομαγνητικά υλικά. Για μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή μετασχηματιστών και ηλεκτρικών μηχανών ορίζουμε προσεγγιστικά τις απώλειες υστέρησης:

$$P_{hyst} = k_h f (B_{max})^n$$

όπου  $K_h$  μια σταθερά που εξαρτάται από το σιδηρομαγνητικό υλικό,  $f$  η συχνότητα του πεδίου διέγερσης,  $B_{max}$  η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής και  $n$  μια σταθερά που λαμβάνει τιμές μεταξύ 1.5 και 2.5.

### **2.5.2 Απώλειες δινορρευμάτων**

Στην περίπτωση, που θα εφαρμοστεί ένα μεταβαλλόμενο χρονικά μαγνητικό πεδίο σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, εμφανίζονται τάσεις εξ επαγωγής σε κυκλικές διαδρομές εγκάρσια στο πεδίο αυτό. Αυτές οι επαγόμενες τάσεις, προκαλούν ρεύματα σε κλειστούς κυκλικούς βρόχους μέσα στο υλικό, που ονομάζονται δινορεύματα. Τα ρεύματα αυτά προκαλούν απώλειες ισχύος, γνωστές ως απώλειες δινορρευμάτων.

Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται άμεσα από την ένταση του πεδίου, την αντίσταση ανά μονάδα μήκους του υλικού, αλλά και από το μήκος των αγωγίων δρόμων που ακολουθούν τα ρεύματα για μια δεδομένη διατομή. Είναι εμφανές ότι, τα ρεύματα αυτά είναι ανεπιθύμητα και συχνά λαμβάνονται μέτρα για την μείωσή τους, καθώς προκαλούν απώλειες ισχύος αλλά και θερμική καταπόνηση των υλικών.

Επιπλέον τα δινορρεύματα επιδρούν και στο βρόχο υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού. Ανάλογα με το πλάτος των ρευμάτων αυτών το εμβαδό της καμπύλης και κατά συνέπεια απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για την απομαγνήτιση του υλικού.

Σε περίπτωση ημιτονοειδούς διέγερσης ο μέσος όρος απωλειών δινορρευμάτων δίνεται από τον τύπο :

$$P_d = k_e f (B_{max})^2$$

Στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών χρησιμοποιούνται δύο τρόποι για την ελαχιστοποίηση των δινορρευμάτων, η αύξηση της αντίστασης του χάλυβα σε εναλλασσόμενα ρεύματα, μέσω της πρόσμιξής του με σιλικόνη (σιλικονούχος χάλυβας) και η διακοπή των αγωγίων βρόχων με την χρήση ελασματοποιημένου χάλυβα συγκολλημένου με ενδιάμεσες στρώσεις μονωτικής ρητίνης. Οι απώλειες ενέργειας λόγω δινορρευμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε υψηλές συχνότητες λόγω του επιδερμικού φαινομένου, καθώς είναι ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας  $f$  του μαγνητικού πεδίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ

#### **3.1 Εισαγωγή**

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν τεράστιο μερίδιο στην παγκόσμια αγορά, με περισσότερους από 5 δισεκατομμύρια να κατασκευάζονται κάθε χρόνο. Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για συμπαγείς και αξιόπιστους κινητήρες και λόγω της εξέλιξης νέων τεχνολογιών ημιαγωγικών στοιχείων και μόνιμων μαγνητών υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους, οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη αποτελούν μια δημοφιλή λύση για πληθώρα εφαρμογών.

Θα ήταν σκόπιμο λοιπόν να αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κινητήρων αυτής της κατηγορίας έναντι των σύγχρονων κινητήρων που χρησιμοποιούν τυλίγματα διέγερσης και να επισημάνουμε τα κριτήρια με βάση τα οποία ταξινομούνται οι κινητήρες αυτοί. Σε κινητήρες μόνιμων μαγνητών, όπως προαναφέραμε, τοποθετούνται στον δρομέα μόνιμοι μαγνήτες που δημιουργούν το πεδίο διέγερσης του δρομέα. Οι μόνιμοι μαγνήτες αποθηκεύουν στο εσωτερικό τους μαγνητική ενέργεια η οποία συμβάλλει με την δημιουργία του πεδίου διέγερσης στην ανάπτυξη ροπής για την περιστροφή του δρομέα.

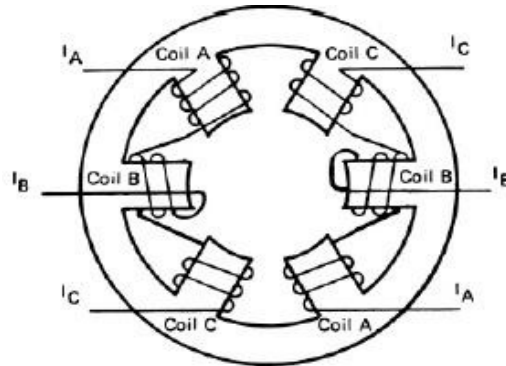
Η αντικατάσταση των τυλιγμάτων διέγερσης με μόνιμους μαγνήτες έχει σαν αποτέλεσμα τη εξάλειψη των απωλειών χαλκού των τυλιγμάτων διέγερσης και επιπλέον δεν υπάρχει η ανάγκη παροχής συνεχούς ρεύματος μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου του δρομέα. Η εξάλειψη των απωλειών διέγερσης συνεπάγεται και μια σημαντική αύξηση της απόδοσης του κινητήρα. Επίσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ροπή και ισχύ εξόδου καθώς και μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη των κινητήρων που χρησιμοποιούν τυλίγματα διέγερσης. Η απουσία τυλιγμάτων διέγερσης και πηγής συνεχούς ρεύματος για την τροφοδότηση των τυλιγμάτων του δρομέα απλοποιεί την κατασκευή και τη συντήρηση του κινητήρα. Ένα μειονέκτημα από τη χρήση μόνιμων μαγνητών προκύπτει από το γεγονός ότι η τιμή της μαγνήτισης τους είναι σταθερή και επομένως δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της διέγερσης. Επίσης αν οι θερμοκρασίες ή οι μηχανικές καταπονήσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του κινητήρα είναι υψηλές υπάρχει ο κίνδυνος απομαγνήτισης των μαγνητών.

#### **3.2 Αρχή λειτουργίας Σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη**

Ο στάτης της σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη είναι, όπως αναφέρθηκε, παρόμοιος με αυτόν της επαγωγικής μηχανής. Η διαφοροποίηση έγκειται στο ρότορα, στον οποίο είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες. Έτσι, οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη δεν διαθέτουν τύλιγμα διέγερσης, ενώ όταν συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα με ηλεκτρονικά ισχύος, δεν χρειάζονται ούτε τύλιγμα απόσβεσης.

Προϋπόθεση για να δημιουργηθεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με σταθερό εύρος και σταθερό αριθμό στροφών είναι η ύπαρξη τριών συμμετρικών τυλιγμάτων με διαφορά 120 μοιρών στο χώρο και τροφοδοτούμενων από τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων

με διαφορά 120 ηλεκτρικών μοιρών μεταξύ των φάσεων.



Σχήμα 3.1 Στάτης σύγχρονου κινητήρα με διαφορά 120 μοιρών μεταξύ των φάσεων

Η λειτουργία της σύγχρονης μηχανής βασίζεται στην αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται στο στάτη, με τη διαδικασία που έχει αναφερθεί προηγούμενα, και στο μαγνητικό πεδίο του δρομέα. Το πλεονέκτημα στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη είναι ότι δεν χρειάζεται παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δρομέα για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Αυτός είναι ο ρόλος των μόνιμων μαγνητών.

Ο δρομέας στρέφεται με την ίδια ταχύτητα με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ταχύτητα ονομάζεται σύγχρονη και δίνεται από τον τύπο :

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

όπου  $n_s$  η σύγχρονη ταχύτητα [rpm],  $f$  η συχνότητα του δικτύου [Hz] και  $p$  το ζεύγος των πόλων.

Η φαινόμενη ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου  $D^2$  της μηχανής, του μήκους  $l$ , και του αριθμού των στροφών  $n$ , όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση.

$$P_\phi = c D^2 l n$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι για δεδομένη ισχύ και για χαμηλές στροφές, η διάμετρος θα είναι μεγάλη και το μήκος σχετικά μικρό, ώστε να αυξηθεί η απόδοση. Για να επιτευχθούν οι χαμηλές ταχύτητες απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχουν πολλά ζεύγη πόλων.

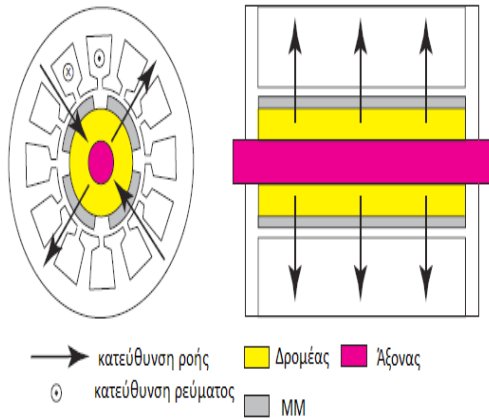
### **3.3 Κατηγοριοποίηση σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών**

#### **3.3.1 Με βάση την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής του πεδίου**

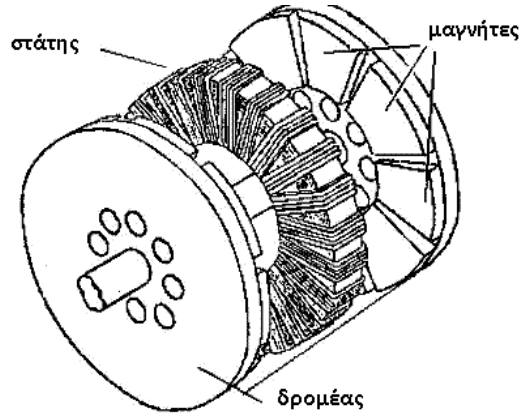
Οι μηχανές μόνιμων μαγνητών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της μηχανής σε μηχανές αξονικής (axial) και ακτινικής ροής (radial) ροής. Στη μηχανή ακτινικής ροής, η μαγνητική ροή



που παράγουν οι μόνιμοι μαγνήτες διέρχεται από το διάκενο ακτινικά στα τυλίγματα του στάτη για να κλείσει το μαγνητικό της κύκλωμα. Αντίθετα στη μηχανή αξονικής ροής, η μαγνητική ροή διέρχεται παράλληλα στον άξονα του δρομέα. Το κοινό χαρακτηριστικό των μηχανών αξονικής ροής είναι το δισκοειδές τους σχήμα που επιτρέπει την κατασκευή κινητήρων μεγάλου αριθμού πόλων για εφαρμογές υψηλής ισχύος και χαμηλών στροφών.



Σχήμα 3.2 Μηχανή μόνιμου μαγνήτη ακτινικής ροής

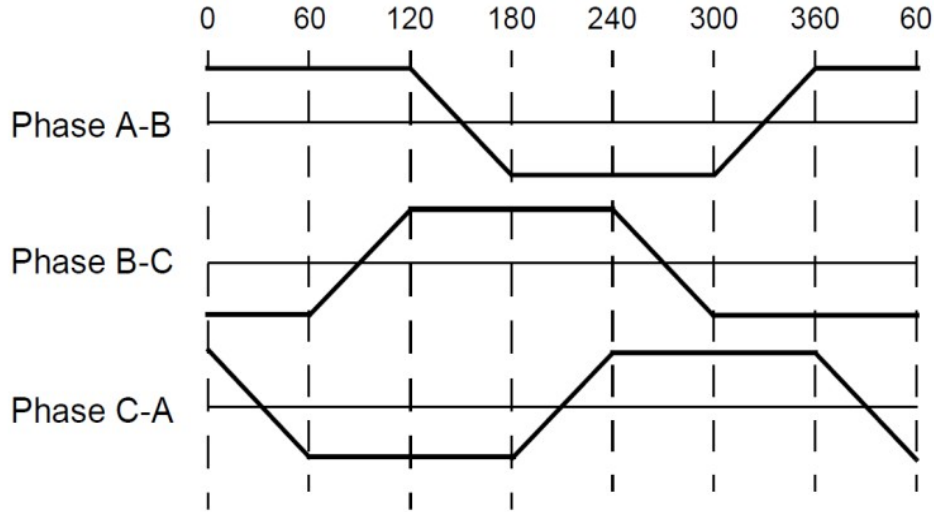


Σχήμα 3.3 Μηχανή μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής

### 3.3.2 Με βάση τη μορφή της επαγόμενης τάσης στα τυλίγματα του στάτη

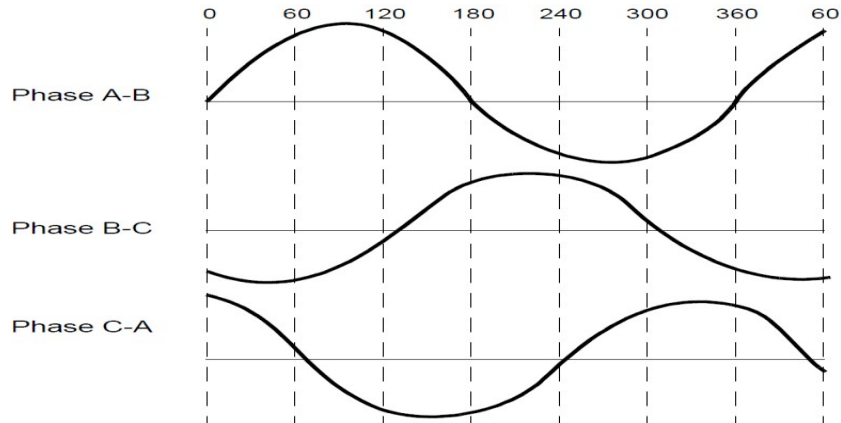
Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη, ανάλογα με την τεχνική έλεγχο και τη μορφή της επαγόμενης τάσης στα τυλίγματα του στάτη, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) Στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη τραπεζοειδούς μορφής ή τετραγωνικού παλμού (trapezoidal or square wave permanent magnet machines) και β) στις ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (sinusoidal permanent magnet synchronous machines).

Στις μηχανές της πρώτης κατηγορίας, η τροφοδοσία γίνεται με τετραγωνικούς παλμούς ρεύματος διάρκειας 120 ηλεκτρικών μοιρών, συγχρονισμένους με την τάση εξ επαγωγής, έτσι ώστε το σταθερό τμήμα της τάσης να συμπίπτει με τα διαστήματα, όπου το φασικό ρεύμα διατηρεί σταθερή τιμή. Στις μηχανές αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται αισθητήρες Hall, καθώς είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του δρομέα μόνο στα σημεία μετάβασης, δηλαδή κάθε 60 ηλεκτρικές μοίρες. Η οδήγηση αυτού του τύπου κινητήρων γίνεται με χρήση τριφασικού αντιστροφέα.



Σχήμα 3.4 Τραπεζοειδής μορφή επαγόμενης τάσης στα τυλίγματα του στάτη

Οι μηχανές της δεύτερης κατηγορίας (Σχήμα 3.5) προέκυψαν από την προσπάθεια κατασκευής μιας σύγχρονης μηχανής χωρίς το τύλιγμα διεγέρσεως. Αυτό έγινε δυνατό αντικαθιστώντας το τύλιγμα με μόνιμους μαγνήτες ημιτονοειδούς κατανομής μαγνητικού πεδίου. Οι μηχανές αυτές τροφοδοτούνται με τριφασική ημιτονοειδή τάση και λειτουργούν υπό την αρχή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Σε λειτουργία σταθερών στροφών δεν απαιτείται γνώση της ακριβούς θέσης του, καθώς η μηχανή περιστρέφεται με τον σύγχρονο αριθμό στροφών. Όταν όμως έχουμε μεταβολή της συχνότητας περιστροφής, απαιτείται ακριβής εποπτεία της θέσης του δρομέα, ώστε οι τάσεις τροφοδοσίας που θα παραχθούν να συγχρονίζονται με την τάση εξ επαγωγής και κατ' επέκταση με την περιστροφή του δρομέα. Η οδήγηση αυτού του τύπου κινητήρων γίνεται συνήθως με τριφασικό αντιστροφέα.



Σχήμα 3.5 Ημιτονοειδής μορφή τάσεων στο στάτη

### **3.4 Ο στάτης**

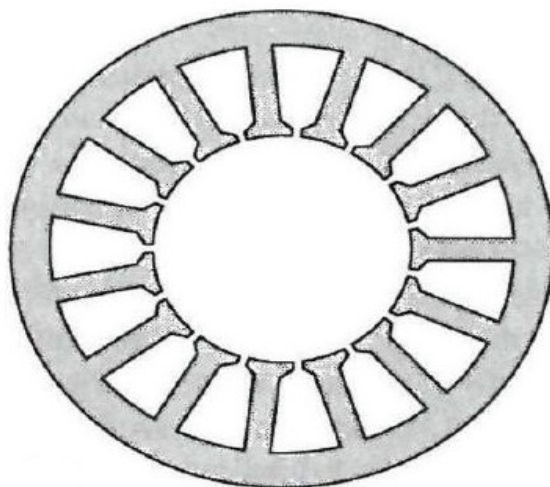
Ο στάτης ενός σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, είναι κατασκευασμένος από στοιβαγμένα ελάσματα σιλικονούχου χάλυβα (silicon steel) πάχους 0,3-0,5 mm. Μεταξύ από κάθε στρώση ελασμάτων παρεμβάλλεται ειδική μονωτική ρητίνη. Σκοπός της ρητίνης, είναι η αύξηση της αντίστασης αγωγής μεταξύ των στρώσεων του χάλυβα και συνεπώς, ελαχιστοποίηση των δινορευμάτων. Τα τυλίγματα του στάτη τοποθετούνται σε αξονικές τομές στην εσωτερική περιφέρεια, με κάθε ένα από αυτά να κατασκευάζεται με την διασύνδεση μεγάλου αριθμού ελιγμάτων χαλκού. Συνήθως, ο στάτης μοιάζει με εκείνον του κινητήρα επαγωγής, όμως τα τυλίγματά του είναι διανεμημένα με διαφορετικό τρόπο.



*Σχήμα 3.6 Στάτης σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη*

#### **3.4.1 Στάτης με αυλακώσεις**

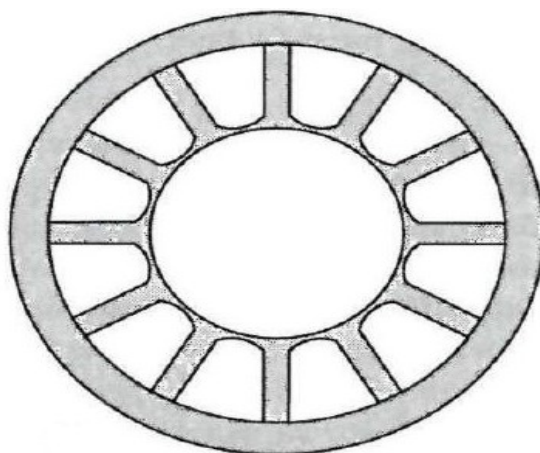
Ο στάτης με αυλακώσεις έχει κατασκευαστικά μικρό μαγνητικό διάκενο, με αποτέλεσμα ο συντελεστής διαπερατότητας και η πυκνότητα μαγνητικής ροής του διακένου να είναι αυξημένοι. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη παραγόμενη ροπή και αυξημένη απόδοση. Επίσης, η μεγάλη επιφάνεια επαφής μεταξύ των τυλιγμάτων και του στάτη προσφέρει καλή απαγωγή θερμότητας από τα τυλίγματα προς το περιβάλλον. Βασικά μειονεκτήματα αυτής της μορφολογίας είναι η ανάπτυξη ταλαντώσεων στην παραγόμενη ροπή λόγω της μη ομοιογενούς κατανομής της μαγνητικής διαπερατότητας του διακένου (ροπή αντιδράσεως) και το αυξημένο κόστος, που υπεισέρχεται από τη δυσκολία εισαγωγής των τυλιγμάτων στις αυλακώσεις.



Σχήμα 3.7 Στάτης με αυλακώσεις

### **3.4.2 Στάτης με αυλακώσεις και συγκολλημένα πέλματα**

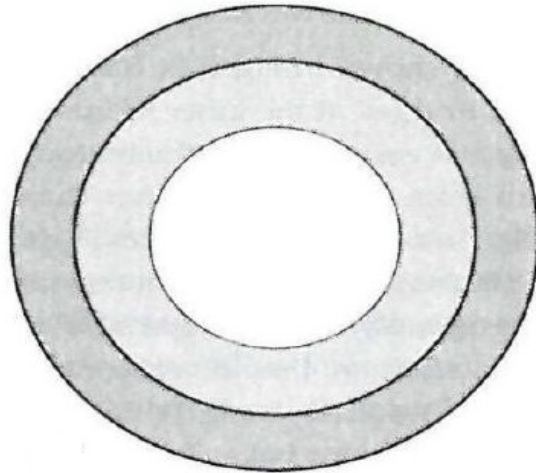
Προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της ροπής αντιδράσεως αναπτύχθηκε η μορφολογία στάτη με αυλακώσεις του Σχήματος 3.8. Αυτή η δομή, έχει αυλακώσεις χωρίς ανοίγματα, με τα πέλματα των δοντιών του στάτη να ενώνονται σχηματίζοντας μια λεία επιφάνεια. Αυτή η ομοιογένεια του διακένου εξασφαλίζει πολύ μικρές αλλαγές στην μαγνητική αντίσταση διακένου που συναντάει ο μαγνήτης ενώ περιστρέφεται, μειώνοντας την ροπή αντιδράσεως. Οι ενώσεις των αυλακώσεων υστερούν από πλευράς μαγνητικής απόδοσης, καθώς αυξάνουν τη ροή σκεδάσεως και στερούν ένα τμήμα της μαγνητικής ροής των μαγνητών από τα τυλίγματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα παραγωγή χαμηλότερης τάσης εξ επαγωγής και κατ' επέκταση μειωμένη απόδοση.



Σχήμα 3.8 Στάτης με αυλακώσεις και συγκολλημένα πέλματα

### **3.4.3 Στάτης χωρίς αυλακώσεις**

Στον στάτη χωρίς αυλακώσεις (Σχήμα 3.9), τα τυλίγματα παίρνουν την μορφή δακτυλιδιού και τοποθετούνται στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη. Αυτή η μορφολογία εμφανίζει μηδενική ροπή αντιδράσεως, καθώς η επιφάνεια του στάτη είναι λεία με τη μαγνητική αντίσταση που συναντούν οι μαγνήτες να μην μεταβάλλεται κατά την περιστροφή του δρομέα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτής της μορφολογίας, είναι η ύπαρξη αυξημένου χώρου για την εισαγωγή τυλίγματος. Ωστόσο, η μειωμένη δυνατότητα απαγωγής θερμότητας από τα τυλίγματα προς το στάτη, μειώνει τις επιτρεπόμενες τιμές ρευμάτων λειτουργίας. Το μαγνητικό διάκενο αποτελείται από το διάκενο αέρα μαζί με το πάχος των τυλιγμάτων. Αυτή η αύξηση στις διαστάσεις του διακένου προκαλεί μείωση στον συντελεστή διαπερατότητας και στην πυκνότητα μαγνητικής ροής του διακένου. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης ροπής και κατ' επέκταση μειωμένη απόδοση.



Σχήμα 3.9 Στάτης χωρίς αυλακώσεις

### **3.5 Ο δρομέας**

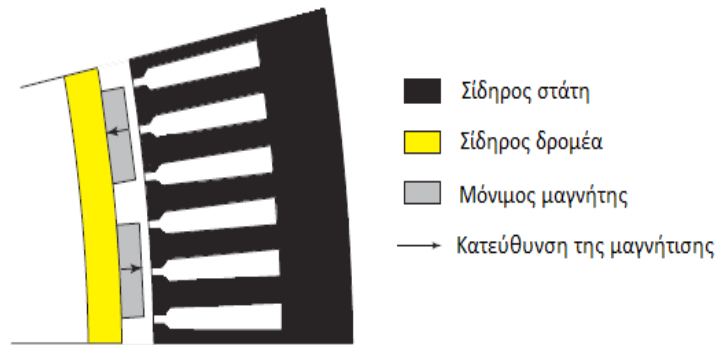
Ο δρομέας είναι συνήθως κατασκευασμένος από ελασματοποιημένο σιλικονούχο χάλυβα κυλινδρικής μορφής. Πάνω στο δρομέα τοποθετούνται οι μόνιμοι μαγνήτες σχηματίζοντας ζεύγη αντίθετης πολικότητας. Με βάση την απαιτούμενη πυκνότητα μαγνητικού πεδίου γίνεται επιλογή του κατάλληλου μαγνητικού υλικού για την κατασκευή τους. Στο παρελθόν το πιο συνηθισμένο υλικό για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών ήταν οι κεραμικοί μαγνήτες (φερρίτες). Όμως, με την πρόοδο της τεχνολογίας άρχισαν να χρησιμοποιούνται νέες τεχνολογίες μαγνητών υψηλής ενέργειας, όπως κράματα σπάνιων γαιών (NdSmCo και NdFeB). Ο δρομέας μπορεί να τοποθετηθεί εσωτερικά ή εξωτερικά του στάτη της μηχανής. Γενικά όμως, κατασκευαστικά προτιμώνται οι μηχανές με εσωτερικό δρομέα, καθώς με αυτό τον τρόπο τα τυλίγματα του στάτη βρίσκονται πιο κοντά στο εξωτερικό μέρος της μηχανής αποβάλλοντας

ευκολότερα τη θερμότητα στο περιβάλλον.

Με βάση την τοποθεσία των μαγνητών οι μηχανές διακρίνονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες που παρατίθενται παρακάτω.

### **3.5.1 Μηχανές επιφανειακών μαγνητών**

Σε αυτό το είδος μηχανών, οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, όπως υποδεικνύει το Σχήμα 3.10. Αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη γεωμετρία.



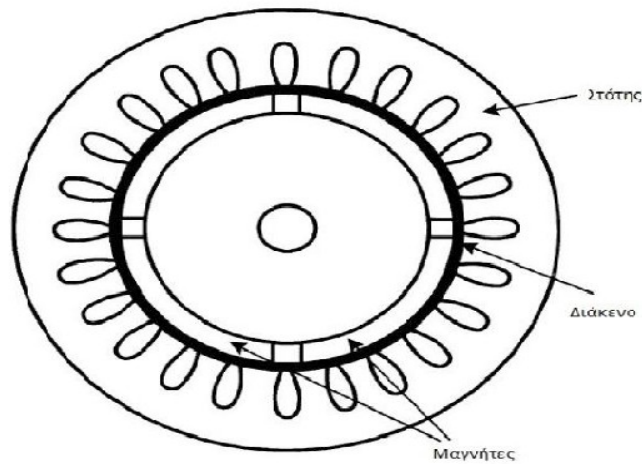
Σχήμα 3.10 Τομή μηχανής με επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των μηχανών επιφανειακών μαγνητών (Surface-Mounted PM) είναι η απλότητα στην κατασκευή τους που οδηγεί σε μείωση του κατασκευαστικού κόστους σε σύγκριση με άλλες μηχανές μόνιμων μαγνητών. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι η έκθεση των μαγνητών σε πεδία απομαγνήτισης. Επιπλέον, οι μαγνήτες υφίστανται φυγόκεντρες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να τους αποκολλήσουν από την επιφάνεια του δρομέα. Αυτές οι δυνάμεις γίνονται μεγαλύτερες όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής.

#### **3.5.1.1 Επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (Sinusoidal Surface Permanent Magnet Machine)**

Αποτελείται από ένα τριφασικό ημιτονοειδές τύλιγμα, το οποίο παράγει ροή διακένου στρεφόμενη με τη σύγχρονη ταχύτητα. Οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται κολλημένοι στην επιφάνεια του δρομέα χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα. Ο δρομέας έχει σιδερένιο πυρήνα, ο οποίος μπορεί να είναι συμπαγής ή φτιαγμένος από διάτρητα ελάσματα για ευκολία στην κατασκευή. Στην περίπτωση λειτουργίας μεταβλητών στροφών, οι μηχανές αυτές μπορεί να έχουν τύλιγμα κλωβού ή τύλιγμα απόσβεσης, κάτι που βέβαια προκαλεί πρόσθετες απώλειες λόγω αρμονικών. Εάν η μηχανή στρέφεται από εξωτερική πηγή, τα τυλίγματα του στάτη παράγουν συμμετρικές τριφασικές ημιτονοειδείς τάσεις. Καθώς η σχετική επιτρεπτότητα ενός μόνιμου μαγνήτη είναι πολύ κοντά στη μονάδα ( $\mu_r > 1$ ) και οι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα, το ενεργό εύρος διακένου της μηχανής είναι μεγάλο και η μηχανή δεν εμφανίζει εκτυπότητα. Αυτό συντελεί στον

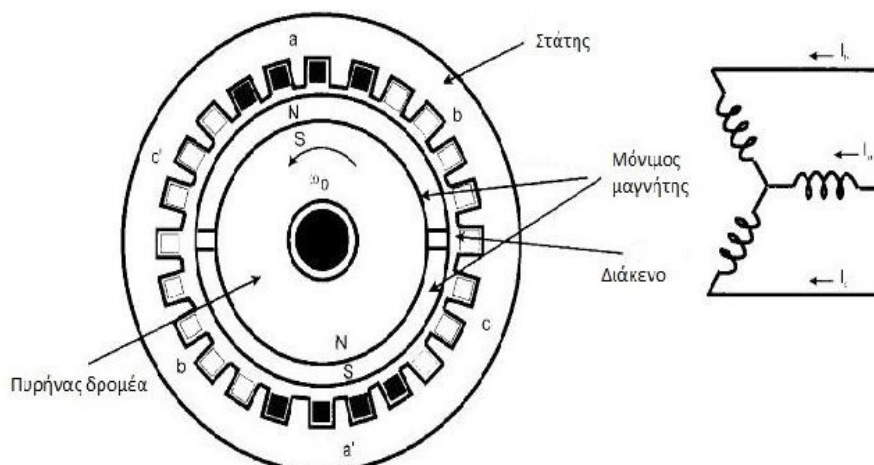
περιορισμό του φαινομένου της αντίδρασης τυμπάνου εξαιτίας της χαμηλής μαγνητιζουσας αντίδρασης.



Σχήμα 3.11 Μηχανή επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής

### **3.5.1.2 Επιφανειακών μαγνητών τραπεζοειδούς ροής (Trapezoidal Surface Magnet Machine)**

Μία σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών τραπεζοειδούς ροής είναι μία μηχανή που δεν εμφανίζει εκτυπότητα, με επιφανειακούς μαγνήτες, όπως μία μηχανή ημιτονοειδούς ροής, με τη διαφορά ότι το τριφασικό τύλιγμα του στάτη (συνήθως συνδεδεμένο κατά αστέρα) έχει συγκεντρωμένα τυλίγματα πλήρους βήματος αντί για ημιτονοειδή κατανομή των τυλιγμάτων στο διάκενο της μηχανής. Η προσέγγιση της ημιτονοειδούς κατανομής στις μηχανές ημιτονοειδούς ροής επιτυγχάνεται με τη χρήση κλασματικού βήματος στα τυλίγματα του στάτη. Το Σχήμα 3.12 δείχνει την εγκάρσια τομή μιας μηχανής τραπεζοειδούς ροής με τις τρεις φάσεις του στάτη να φαίνονται στα δεξιά. Η διπολική μηχανή της εικόνας έχει κατάλληλο διάκενο για τη μείωση της κυμάτωσης της ροής, ενώ ο στάτης αποτελείται από 4 αγωγούς ανά πόλο και φάση.



Σχήμα 3.12 Εγκάρσια τομή μηχανής τραπεζοειδούς ροής

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

### 3.5.2 Μηχανές με εσωτερικούς μαγνήτες

Οι μαγνήτες είναι θαμμένοι στο εσωτερικό του δρομέα. Ένα πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα συγκέντρωσης της ροής που παράγεται από τους μαγνήτες στο δρομέα, επιτυγχάνοντας μεγάλη πυκνότητα ροής ανοιχτού κυκλώματος στο διάκενο. Κατά συνέπεια, οι φορτίσεις του ρεύματος είναι μικρότερες για την μηχανή με εσωτερικούς μαγνήτες, πράγμα που οδηγεί σε μικρότερες αύλακες. Σαν αποτέλεσμα για το ίδιο μήκος μηχανής, η μηχανή εσωτερικού μαγνήτη μπορεί να έχει την ίδια επίδοση με μικρότερη διάμετρο σε σύγκριση με τη μηχανή επιφανειακού μαγνήτη.

Επίσης, οι μηχανές με εσωτερικούς μαγνήτες είναι έκτυπες, με αποτέλεσμα επιπρόσθετα με την ροπή που παράγεται από την αλληλεπίδραση των πεδίων στάτη και δρομέα παράγεται ροπή λόγω εκτυπότητας. Οι μηχανές αυτές μπορούν επιπλέον να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων με την ίδια σταθερή ισχύ. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, διότι προσφέρουν τη δυνατότητα εξασθένισης του πεδίου του δρομέα, ενώ



ταυτόχρονα οι μαγνήτες είναι προστατευμένοι από απομαγνήτιση και μηχανικές δυνάμεις.

### **3.5.3 Μόνιμοι μαγνήτες σε σχηματισμό V**

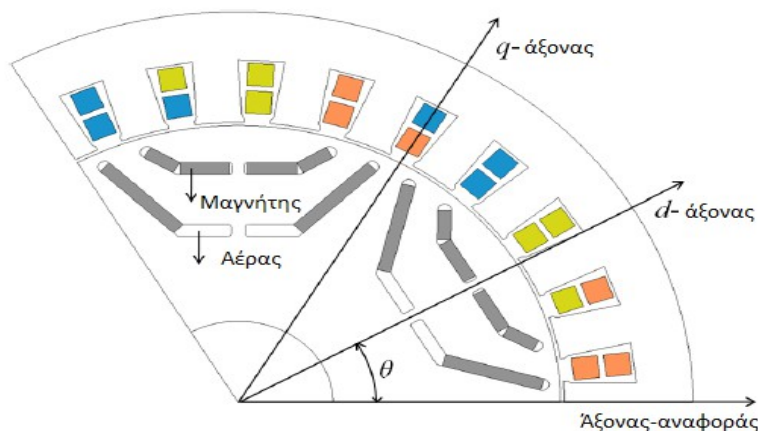
Σε αυτή την τοπολογία, τοποθετούνται δύο μόνιμοι μαγνήτες ανά πόλο με συγκεκριμένη γωνία, σχηματίζοντας ένα «V». Μεταξύ των άκρων των μαγνητών και του διακένου μεσολαβούν δύο γέφυρες σιδήρου. Αυτό αποτελεί και το μεγαλύτερο μειονέκτημα των δρομέων με MM σχήματος-V. Το ελάχιστο πάχος της γέφυρας καθορίζεται από μηχανικούς περιορισμούς συγκράτησης των μαγνητών, με αποτέλεσμα αν αυτό είναι σχετικά μεγάλο, ένα μέρος της ροής των μαγνητών να σκεδάζεται μέσω των γεφυρών, χωρίς να διέρχεται από το διάκενο συμβάλλοντας στην παραγωγή ροπής. Επίσης, οι δρομείς με μαγνήτες σχήματος-V δεν είναι εύκολο να τοποθετηθούν σε εφαρμογές με μεγάλο αριθμό πόλων. Όταν ο αριθμός των πόλων είναι μεγάλος, ο διαθέσιμος χώρος για την τοποθέτηση των μαγνητών είναι μικρός με αποτέλεσμα να καθίσταται απαραίτητη η μείωση της γωνίας μεταξύ των μαγνητών. Ο σίδηρος μεταξύ των MM κορένεται ευκολότερα αν η γωνία είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 3.13 Τομή μηχανής μόνιμων μαγνητών σε σχηματισμό V

### **3.5.4 Μηχανές με πολυστρωματικούς μαγνήτες**

Σε αυτή τη γεωμετρία τοποθετούνται πολλά κομμάτια μαγνήτη στο εσωτερικό του δρομέα, σε διαφορετικά επίπεδα από την επιφάνεια του, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14 Μηχανή με πολυστρωματικούς μαγνήτες

Υπάρχουν πολύ τρόποι τοποθέτησης των μαγνητών στο εσωτερικό του δρομέα, για το λόγο αυτό η κατηγορία αυτή δεν περιλαμβάνει μόνο μια σχεδίαση αλλά ένα σύνολο εναλλακτικών γεωμετριών.

Τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της κατηγορίας μηχανών είναι η μεγάλη πολυπλοκότητα στην κατασκευή και ο περιορισμός της χρήσης της σε εφαρμογές με λίγους πόλους, διότι στην περίπτωση που ο αριθμός των πόλων είναι μεγάλος, ο διαθέσιμος χώρος για την τοποθέτηση των μαγνητών μειώνεται σημαντικά. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της σχεδίασης, είναι η μεγάλη ροπή εκτυπότητας του διαθέτει και η μεγάλη δυνατότητα εξασθένισης πεδίου, με αποτέλεσμα οι γεωμετρίες αυτές να είναι ελκυστικές σε εφαρμογές πολλαπλών ταχυτήτων λειτουργίας και μικρού αριθμού πόλων.

### **3.6 Φαινόμενο Hall**

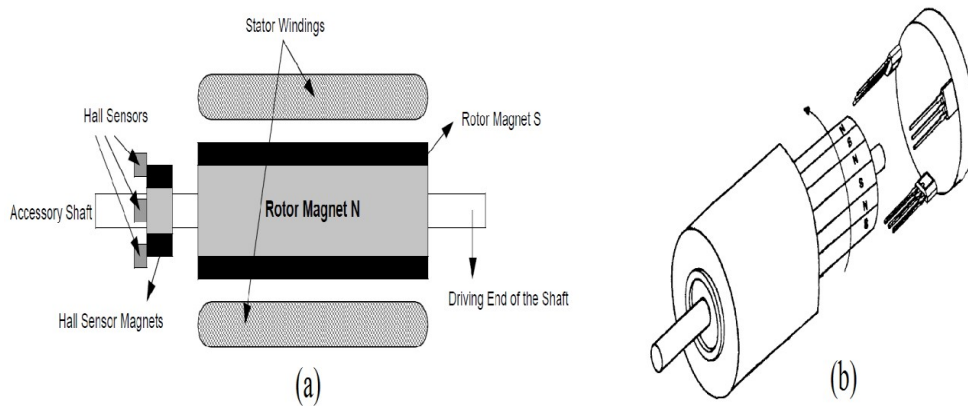
Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε η επαγωγή  $B$  ασκεί εγκάρσια δύναμη στον φορέας ρεύματος και τους ωθεί στη μια πλευρά του αγωγού. Το παρακάτω φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Hall.

Ο αισθητήρας Hall είναι ένας αισθητήρας μαγνητικού πεδίου. Όταν εφαρμόζεται σε αυτόν μαγνητικό πεδίο έντασης  $B$  και τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα, αναπτύσσει τάση στους ακροδέκτες του.

Αντίθετα από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες, η μετάβαση σε έναν κινητήρα BLDC ελέγχεται ηλεκτρονικά. Για να περιστραφεί ο δρομέας του κινητήρα, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να τροφοδοτηθούν με μια συγκεκριμένη ακολουθία, καθώς με αυτό τον τρόπο αποφασίζεται ποιο τυλίγμα θα τροφοδοτηθεί, ώστε να δημιουργηθεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ακριβή θέση του δρομέα ανά πάσα στιγμή. Αυτό γίνεται δυνατό με την τοποθέτηση τριών αισθητήρων Hall. Οι αισθητήρες συνήθως τοποθετούνται στο στάτη της μηχανής σε διαστήματα των  $60^\circ$  ή  $120^\circ$ . Όταν ένας μαγνητικός πόλος περάσει δίπλα από τον αισθητήρα Hall δημιουργεί ένα υψηλό ή χαμηλό σήμα, ανάλογα με την πολικότητα του. Με την ανάγνωση και αποκωδικοποίηση

του συνδυασμού των τριών σημάτων των αισθητήρων Hall, καθίσταται δυνατή η επιλογή της κατάλληλης ακολουθίας για την ηλεκτρονική μετάβαση.

Σε σπάνιες περιπτώσεις, οι αισθητήρες Hall τοποθετούνται στο σταθερό τμήμα της μηχανής, ενώ τοποθετούνται επιπρόσθετοι μαγνήτες μικρότερης κλίμακας στον δρομέα. Οι μαγνήτες αυτοί τοποθετούνται με σκοπό να έχουν ίδια πολικότητα με τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα, έτσι ώστε, όταν αυτός περιστρέφεται, οι αισθητήρες hall να δίνουν το κατάλληλο αποτέλεσμα.

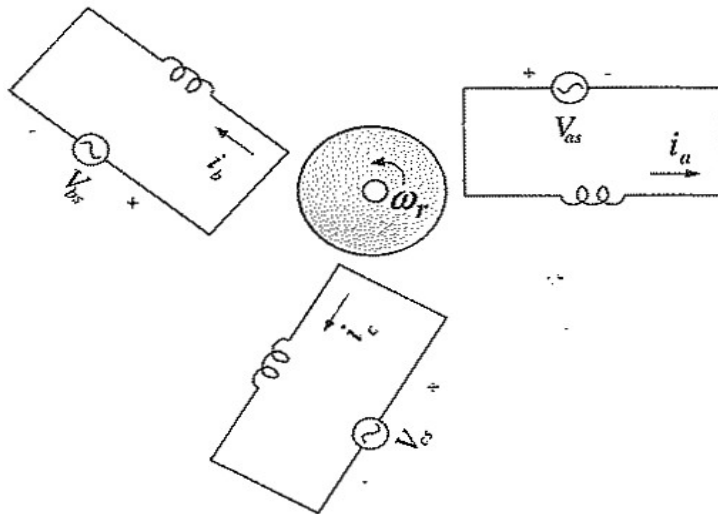


Σχήμα 3.15 Αισθητήρες Hall α) στο ακίνητο μέρος του άξονα του δρομέα β) στον στάτη

### 3.7 Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής

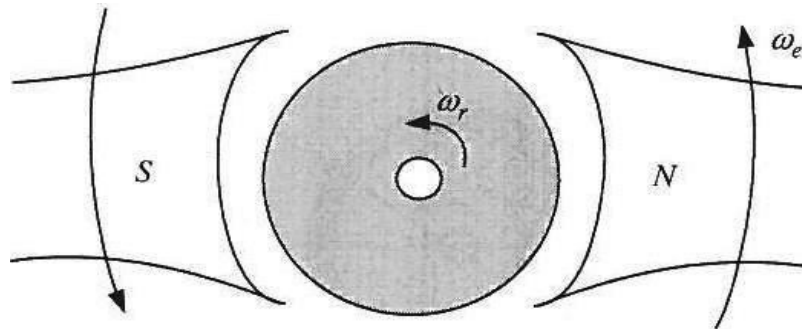
Η αρχή λειτουργίας όλων των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος βασίζεται σε μία περιστρεφόμενη Μαγνητεγερτική Δύναμη (ΜΕΔ ή MMF), η οποία παράγεται από τα ρεύματα στα τυλίγματα του στάτη και αλληλεπιδρά με την παραγόμενη ΜΕΔ από το τύλιγμα του δρομέα ή τους μόνιμους μαγνήτες. Η ΜΕΔ που παράγεται στα τυλίγματα του στάτη, στον οποίο εφαρμόζεται συμμετρική τριφασική πηγή τάσης (τα ρεύματα των τριών φάσεων έχουν διαφορά φάσης 120° μεταξύ τους), δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$F = \frac{3}{2} N I [\cos \omega_e t + j \sin \omega_e t]$$



Σχήμα 3.16 Περιστρεφόμενη ΜΕΔ από τριφασικό τύλιγμα

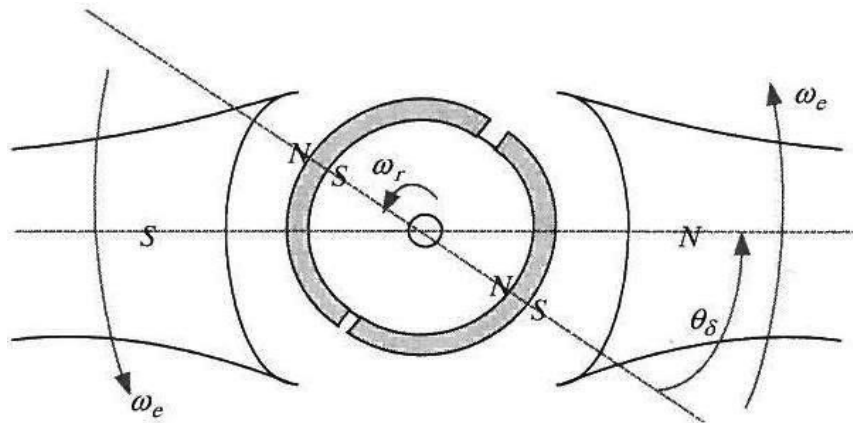
Η ΜΕΔ που προκύπτει από τρία περιστρεφόμενα τυλίγματα είναι ισοδύναμη με τη ΜΕΔ που προκύπτει από δύο τυλίγματα με διαφορά φάσης  $90^\circ$  και αριθμό περιελίξεων 1,5N. Η ΜΕΔ αυτή, με τη σειρά της, είναι ισοδύναμη με τη ΜΕΔ που προκύπτει από ένα περιστρεφόμενο τύλιγμα με αριθμό περιελίξεων επίσης 1,5N και διαρέεται από συνεχές ρεύμα, η οποία μπορεί να εξισωθεί με τη ΜΕΔ από ένα περιστρεφόμενο μόνιμο μαγνήτη



Σχήμα 3.17 ΜΕΔ από περιστρεφόμενο μόνιμο μαγνήτη

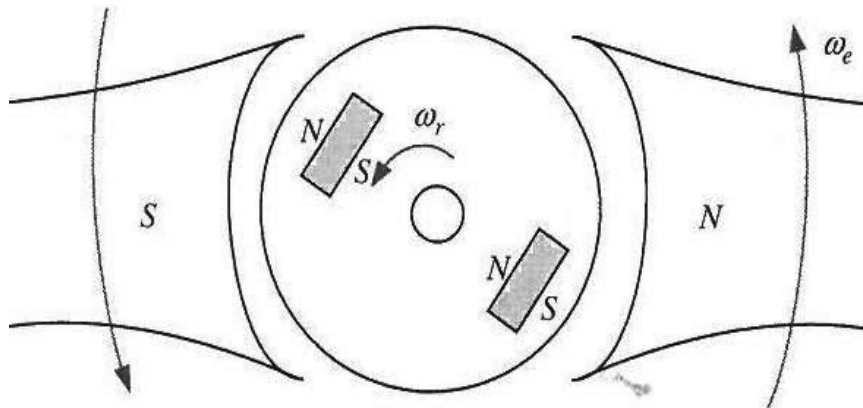
Αν ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από φερρομαγνητικό υλικό, τότε η μαγνητική αντίσταση θα είναι διαφορετική όσο αλλάζει η γωνία της ΜΕΔ,  $\theta_e$ . Αν δεν υπάρχουν άλλες εξωτερικές δυνάμεις στο ρότορα, τότε η γωνία του  $\theta_r$  και η γωνία της περιστρεφόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης είναι ίδιες ( $\theta_s = \theta_e - \theta_r = 0$ ).

Αν στην επιφάνεια του ρότορα της μηχανής τοποθετηθούν μόνιμοι μαγνήτες (Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine, SMPMSM), τότε ο ρότορας θα στρέφεται από την αλληλεπίδραση της περιστρεφόμενης MMF και της ροής των μόνιμων μαγνητών. Τώρα, σε αντίθεση με την προηγούμενη μηχανή, η μέγιστη ροπή εμφανίζεται όταν η διαφορά των γωνιών  $\theta_d$  είναι  $90^\circ$ .



Σχήμα 3.18 Αρχή λειτουργίας SMPMSM

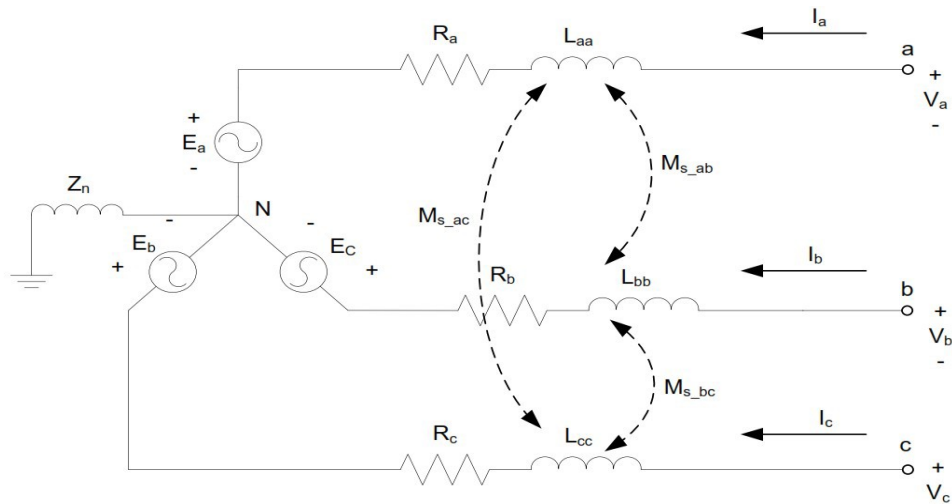
Αν οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετηθούν εντός του δρομέα, η μηχανή ονομάζεται Interior-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine (IMPMSM). Σε αυτή τη μηχανή η προϋπόθεση για μέγιστη ροπή είναι η διαφορά γωνιών  $\theta_\delta$  να είναι μεταξύ  $90^\circ$  και  $135^\circ$ .



Σχήμα 3.19 Αρχή λειτουργίας IMPMSM

### 3.7.1 Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής

Για την ανάλυση και τον έλεγχο της σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών στην βιβλιογραφία συναντώνται δύο κυρίως μοντέλα. Το μοντέλο ανάλυσης σε φασικές συνιστώσες  $a, b, c$  που επιλέγεται κυρίως για μελέτη αρμονικών συνιστωσών, και το δυναμικό μοντέλο  $d-q$  που επιτρέπει την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς της μηχανής και πάνω στο οποίο βασίζεται η υλοποίηση υψηλών επιδόσεων στρατηγικών ελέγχου για ΣΜΜΜ.



Σχήμα 3.20 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών σύμφωνα με το μοντέλο ανάλυσης σε φασικές συνιστώσες

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής από το οποίο έπειτα θα εξαχθεί με κατάλληλους μετασχηματισμούς το δυναμικό μοντέλο d-q.

Οι εξισώσεις τάσεων του μοντέλου σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών έχουν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d\psi_i}{dt}$$

όπου

$R_j$  η ωμική αντίσταση της φάσης  $j$ ,

$i_i$  το ρεύμα της φάσης  $i$  και

$\psi_i$  η πεπλεγμένη ροή της φάσης  $i$ .

Οι εξισώσεις των πεπλεγμένων ροών γράφονται :

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_e) & M_{ab}(\theta_e) & M_{ac}(\theta_e) \\ M_{ab}(\theta_e) & L_{bb}(\theta_e) & M_{bc}(\theta_e) \\ M_{ac}(\theta_e) & M_{bc}(\theta_e) & L_{cc}(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{ma}(\theta_e) \\ \psi_{mb}(\theta_e) \\ \psi_{mc}(\theta_e) \end{bmatrix}$$

όπου

$L_{i,j}$  η αυτεπαγωγή του τυλίγματος της φάσης  $i$ ,

$M_{i,j}$  η αμοιβαία επαγωγή των τυλιγμάτων των φάσεων  $i,j$

$\psi_{m,i}$  η ροή λόγω των μόνιμων μαγνητών στη φάση  $i$ .

Εξαιτίας των φαινομένων κορεσμού και της μηχανικής κατασκευής της σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών οι αυτεπαγωγές και οι αμοιβαίες επαγωγές αποτελούν συνάρτηση της ηλεκτρικής γωνίας του δρομέα . Η ηλεκτρική γωνία του δρομέα είναι

στην πραγματικότητα η διεύθυνση της ροής του δρομέα (Βόρειος Πόλος των μαγνητών του δρομέα). Στην μηδενική γωνία, η διεύθυνση της ροής ταυτίζεται με αυτήν της φάσης a. Η σχέση μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής γωνίας του κινητήρα δίνεται από την σχέση:

$$\theta_e = p \theta_{mech}$$

όπου p ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Στην γενική τους περίπτωση οι επαγωγές της ΣΜΜΜ αποτελούνται από μια σταθερή συνιστώσα και ένα άθροισμα περιττών αρμονικών που σχετίζονται με την αλλαγή της γωνίας  $\theta_e$ .

Στην βιβλιογραφία όμως του ελέγχου κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Τα τυλίγματα του στάτη θεωρούνται ημιτονοειδώς καταναμημένα.
- Με βάση την προηγούμενη παραδοχή, τα τυλίγματα του στάτη θεωρείται ότι παράγουν ημιτονοειδή ΜΕΔ.
- Στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες, η ακτινική κατανομή της πυκνότητας ροής που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες είναι ημιτονοειδής και η πεπλεγμένη ροή στο στάτη περιέχει μόνο τη θεμελιώδη συνιστώσα.
- Η επίδραση του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.

Έχοντας λάβει υπόψιν τις παραπάνω παραδοχές συνεπάγεται ότι οι επαγωγές είναι συναρτήσεις της γωνίας  $\theta_e$ , δεδομένου ότι, όπως έχει αναφερθεί, οι μεταβολές των επαγωγών περιέχουν μόνο μία ημιτονοειδή συνιστώσα και η επαγωγή κάθε φάσης ελαχιστοποιείται όταν η ροή ευθυγραμμίζεται με τη φάση. Εάν θεωρηθεί επίσης ημιτονοειδής κατανομή της εκτυπότητας οι αμοιβαίες επαγωγές και οι αυτεπαγωγές γράφονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_e) \\ L_{bb}(\theta_e) \\ L_{cc}(\theta_e) \end{bmatrix} = L_0 + L_2 \begin{bmatrix} \cos(2\theta_e) \\ \cos(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_{ab}(\theta_e) \\ M_{bc}(\theta_e) \\ M_{ac}(\theta_e) \end{bmatrix} = M_0 + M_2 \begin{bmatrix} \cos(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta_e) \end{bmatrix}$$

Όπου  $L_0$  και  $M_0$  οι μέσες συνιστώσες των αυτεπαγωγών και επαγωγών αντίστοιχα,  $L_2$  και  $M_2$  τα πλάτη των ημιτονοειδών συνιστωσών. Για την περίπτωση ΣΜΜΜ  $L_2 < 0$  και  $M_2 < 0$ .

Τέλος, η ροή που οφείλεται στους μόνιμους μαγνήτες είναι συνάρτηση της γωνίας  $\theta_e$  του δρομέα και γράφεται ως εξής :

$$\begin{bmatrix} \psi_{ma}(\theta_e) \\ \psi_{mb}(\theta_e) \\ \psi_{mc}(\theta_e) \end{bmatrix} = \psi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Υπό κενό φορτίο ( $i=0$ ), οι εξισώσεις των επαγόμενων Ηλεκτρεγερτικών Δυνάμεων διεγέρσεως προσδιορίζονται ως εξής :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ma} \\ \psi_{mb} \\ \psi_{mc} \end{bmatrix} = \psi_m \frac{d\theta}{dt} \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = -\psi_m \omega_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Όπου  $\omega_m$  η μηχανική σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.

Με βάση λοιπόν τις προαναφερθείσες σχέσεις διαμορφώνονται οι τελικές εξισώσεις τάσεων :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από τον τύπο :

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m}$$

### **3.7.1.1 Μετασχηματισμός Park**

Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο είναι προφανές ότι αποκτά μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας όταν αναφέρεται σε ένα κινούμενο σύστημα που οι αυτεπαγωγές των φάσεων του στάτη καθώς και οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ τους μεταβάλλονται συναρτήσει της γωνίας  $\theta_e$  του δρομέα. Συνεπώς



για την ανάλυση ενός συστήματος οδήγησης ρυθμιζόμενης ταχύτητας θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που να μην περιλαμβάνει τις χρονομεταβλητές επαγωγές που προκύπτουν λόγω της ύπαρξης ηλεκτρικού κυκλώματος σε σχετική κίνηση και λόγω ηλεκτρικών κυκλωμάτων με μεταβλητές μαγνητικές αντιδράσεις.

Στη θεωρία και ανάλυση των συστημάτων εναλλασσομένου ρεύματος αποτελεί συχνή προσέγγιση η παρουσίαση των τριφασικών μεγεθών με μιγαδικούς φασιθέτες (complex phasors). Οποιοδήποτε τριφασικό μέγεθος μπορεί να παρασταθεί σε ένα μιγαδικό φασιθέτη – συνιστώσα μέσω του μετασχηματισμού Park.

Ο μετασχηματισμός Park είναι μια τεχνική που χρησιμοποιούμε για να απλοποιήσουμε σημαντικά τις παραπάνω εξισώσεις και να τις καταστήσουμε, τις περισσότερες φορές, γραμμικές με σταθερούς συντελεστές. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, όλες οι a-b-c ποσότητες του στάτη (ρεύματα, τάσεις, ροές) μετασχηματίζονται σε ένα νέο σύνολο αντίστοιχων ποσοτήτων, που ονομάζονται συνιστώσες. Οι συνιστώσες είναι δύο άξονες : ο ευθύς άξονας (άξονας d) και ο εγκάρσιος άξονας (άξονας q). Στο σύστημα αυτό των κάθετων αξόνων, ο εγκάρσιος άξονας q προηγείται από τον ευθύ άξονα d κατά 90° και περιστρέφεται με γωνιακή συχνότητα  $\omega_s$ .

Η σχέση που μετασχηματίζει τις εξισώσεις από το σύστημα a-b-c στο σύστημα d-q είναι η εξής :

$$[X_{dq0}] = [T(\theta)][X_{abc}]$$

όπου

$$[T(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

και

$$[X_{dq0}] = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} [X_{abc}] = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

με X οποιοδήποτε μέγεθος I, V, λ.

Δηλαδή

$$[V_{dq0}] = [T(\theta)][V_{abc}],$$

$$[I_{dq0}] = [T(\theta)][I_{abc}],$$

$$[\lambda_{dq0}] = [T(\theta)][\lambda_{abc}]$$

Όπως εύκολα διαπιστώνεται η μήτρα  $[T(\theta)]$  είναι αντιστρέψιμη, καθώς ο πίνακας χαρακτηρίζεται από την αρχή της ορθογωνικότητας. Άρα μπορούμε να ανακτήσουμε τις a-b-c ποσότητες από τις d-q ποσότητες κάνοντας χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Park :

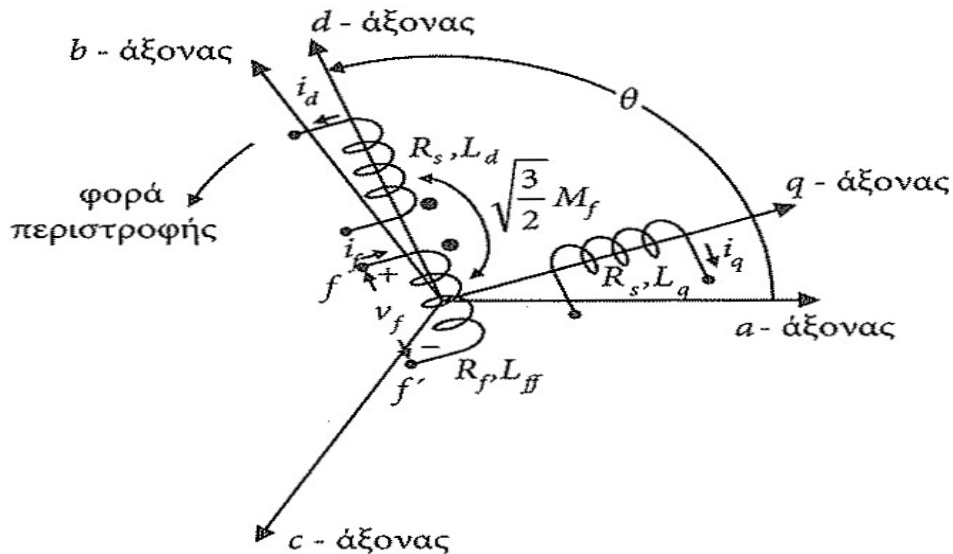
$$[X_{abc}] = [T^{-1}(\theta)][X_{dq0}]$$

με

$$[T^{-1}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

Στις παραπάνω σχέσεις η γωνία  $\theta$  υποδηλώνει τη γωνία μεταξύ του πραγματικού άξονα του μιγαδικού επιπέδου και της διεύθυνσης της φάσης a. αυτή η γωνία του επιπέδου μπορεί να επιλεγεί ελεύθερα. Ο συντελεστής  $2/3$  αναφέρεται στη χρήση του απλού μετασχηματισμού συντεταγμένων όπου το μήκος του διανύματος χώρου  $x_a + jx_b$  είναι ίσο με τη μέγιστη τιμή του τριφασικού μεγέθους  $x$ . Τέλος, η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας  $x_0$  αποκτά μη μηδενικές τιμές σε αγείωτους κινητήρες συνδεσμολογίας αστέρα μόνο σε περιπτώσεις σφαλμάτων (π.χ. ασυμμετρίας των φάσεων). Συνεπώς στη συνέχεια του κεφαλαίου θα θεωρηθεί μηδενικό.

Από φυσική άποψη, τα ρεύματα ευθέως  $I_d$  και εγκάρσιου άξονα  $I_q$  μπορούν να θεωρηθούν ως ρεύματα δύο εικονικών τυλιγμάτων, με αυτεπαγωγές  $L_d$  και  $L_q$  αντίστοιχα, τα οποία είναι πάνω στο δρομέα και περιστρέφονται μαζί με αυτόν, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.21).



Σχήμα 3.21 Μετασχηματισμός Park

### 3.7.1.2 Δυναμικό μοντέλο d-q σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών

Για τον έλεγχο των ΣΜΜΜ οι τυπικές επιλογές για την γωνία  $\theta$  του πλαισίου αναφοράς είναι οι  $0^\circ$  και η ηλεκτρική γωνία  $\theta_e$  του δρομέα. Αν η γωνία  $\theta$  είναι μηδενική ο μετασχηματισμός μεταφέρει τα μεγέθη στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη, όπου ο πραγματικός άξονας είναι ευθυγραμμισμένος με την φάση  $a$ . Επειδή η γωνία διατηρείται μηδέν, το πλαίσιο αναφοράς ονομάζεται στατό πλαίσιο αναφοράς (stationary reference frame) και ο μετασχηματισμός συναντάται στην βιβλιογραφία ως μετασχηματισμός Clarke (Clarke Transformation). Αν η γωνία του πλαισίου αναφοράς είναι η  $\theta_e$ , ο πραγματικός άξονας του μιγαδικού επιπέδου του πλαισίου περιστρέφεται μαζί με τον δρομέα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε μεταφορά των μεγεθών στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (rotor reference frame).

Στην βιβλιογραφία έχει επικρατήσει ο μετασχηματισμός Park να θεωρείται ο μετασχηματισμός στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, ενώ μετασχηματισμός Clarke να αναφέρεται στην μεταφορά των μεγεθών στο στατό πλαίσιο αναφοράς.

Με χρήση του μετασχηματισμού Park το μαθηματικό μοντέλο των Σύγχρονων Μηχανών Μόνιμου Μαγνήτη απλοποιείται σημαντικά. Έτσι, στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς οι εξισώσεις των τάσεων γίνονται :

$$u_d = R i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q$$

$$u_q = R i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d$$

Ομοίως για τις ροές :

$$\psi_d = \psi_m + L_d i_d$$

$$\psi_q = L_q i_q$$

Όπου

$$L_d = L_0 - M_0 + \frac{L_2}{2} + M_2 \text{ και } L_q = L_0 - M_0 - \frac{L_2}{2} - M_2$$

Με αντικατάσταση των στις η εξίσωση των τάσεων μπορεί να γραφεί :

$$u_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q$$

$$u_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (\psi_m + L_d i_d)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ανηγμένη στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς γράφεται ως εξής :

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$

Στην γενική περίπτωση η ροπή φορτίου, η τριβή και η αδράνεια της ΣΜΜΜ μπορεί να αποτελούν συναρτήσεις του χρόνου, της θέσης του δρομέα, ή της γωνιακής ταχύτητας. Στην παρούσα εργασία όμως η αδράνεια  $J$  και οι συντελεστές τριβής θεωρούνται σταθερά κατά την διάρκεια όλων των δοκιμών. Συνεπώς η εξίσωση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_{mech}}{dt} + F \omega_{mech}$$

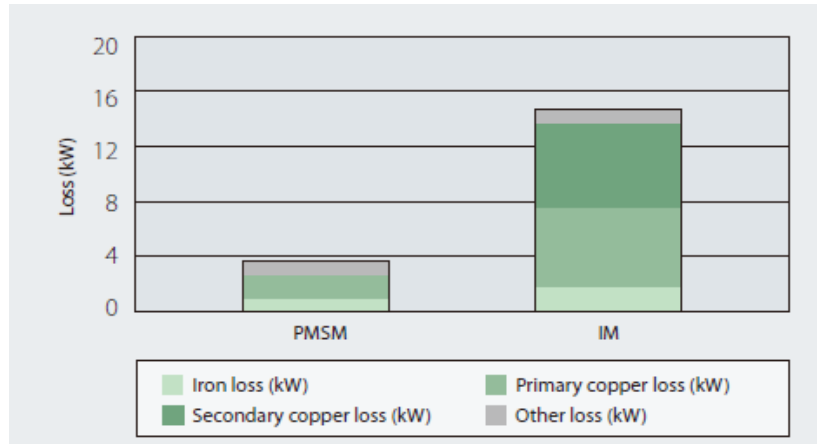
Όπου  $T_L$  η ροπή φορτίου,  $J$  η αδράνεια της μηχανής,  $F$  ο συντελεστής τριβής.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το παραπάνω μοντέλο ανάλυσης ισχύει τόσο για μηχανές εσωτερικών μαγνητών όσο και για μηχανές με επιφανειακούς μαγνήτες, αρκεί βέβαια να ανήκουν στην κατηγορία των μηχανών ημιτονοειδούς ροής. Η διαφορά μεταξύ των δύο προαναφερθέντων μηχανών έγκειται στην εκτυπότητα της πρώτης μηχανής, όπου  $L_d < L_q$  συγκριτικά με τη δεύτερη, όπου λόγω ομοιόμορφου διακένου ισχύει  $L_d = L_q$ .

### **3.8 Πλεονεκτήματα σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη**

Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται κατά κόρον στα συστήματα ηλεκτρικής έλξης είναι ο κινητήρας επαγωγής (Induction Motor, IM), ο οποίος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον προηγούμενα ευρέως χρησιμοποιούμενο κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Οπότε στην παρούσα φάση της σύγκρισης, ο κινητήρας επαγωγής αποτελεί τη συμβατική μέθοδο ηλεκτρικής έλξης. Σε σχέση, λοιπόν, με αυτόν ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PMSM) παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Το βασικότερο πλεονέκτημα αποτελεί η υψηλότερη αποδοτικότητα του PMSM. Τούτο προκύπτει από το γεγονός ότι ο PMSM δεν απαιτεί ρεύμα διέγερσης. Έτσι, η απόδοση του PMSM ανέρχεται σε ποσοστά 95 – 97 %, ενώ του IM σε 90 – 92% σε εφαρμογές ηλεκτρικής έλξης. Επιπρόσθετα, το σύστημα οδήγησης του PMSM εμφανίζει εξοικονόμηση ενέργειας 11 – 15 %. Παρατηρώντας το σχήμα, βλέπουμε ότι οι δαπάνες ενέργειας του PMSM ανέρχονται κάτω από τα μισά των δαπανών του IM, σύμφωνα με στοιχεία της Toshiba.



Σχήμα 3.22 Αώλειες κινητήρα PMSM και IM σύμφωνα με στοιχεία της Toshiba

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του PMSM είναι ο χαμηλός θόρυβος. Η υψηλή απόδοση επιτρέπει μία εντελώς κλειστή δομή, η οποία οδηγεί σε μείωση της συντήρησης και χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. Η διαφορά της έντασης του θορύβου ανέρχεται σε περίπου 10 dB χαμηλότερα στον PMSM από τον IM.

Τέλος, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και το μέγεθος της μηχανής. Γενικά, ισχύει ότι όσο λιγότερο αποδοτική είναι μια μηχανή τόσο μεγαλύτερη είναι σε μέγεθος, ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στο μέγεθος της παραγόμενης θερμότητας. Ο PMSM είναι έχει μεγαλύτερη απόδοση, συνεπώς και μικρότερο μέγεθος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ

#### 4.1 Εισαγωγή

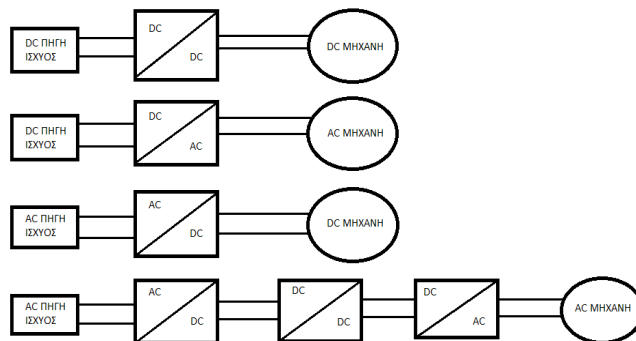
Έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο ότι η ανάπτυξη των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και γενικά του συστήματος εναλλασσομένου ρεύματος οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διατάξεις, που χρησιμοποιούν ηλεκτρικά ισχύος και οι μεθοδολογίες για την οδήγηση των μηχανών μόνιμων μαγνητών. Αρχικά παρουσιάζονται οι διατάξεις, μετατροπής της τάσης του δικτύου, ώστε αυτή να έρθει σε κατάλληλη μορφή για να τροφοδοτήσει τον κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.

#### 4.2 Μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος

Είναι η διάταξη που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην πηγή ισχύος και στην ηλεκτρική μηχανή. Σκοπός του είναι είτε απλά να καταστήσει δυνατή τη λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής είτε επιπλέον να ελέγξει τη λειτουργία αυτή. Για το λόγο αυτό υπάρχουν ελεγχόμενοι και μη ελεγχόμενοι μετατροπέες ισχύος. Όπως αναφέραμε παραπάνω, ο τύπος του μετατροπέα ισχύος που απαιτείται για κάθε εφαρμογή εξαρτάται από το είδος της πηγής ισχύος και το είδος της μηχανής.

Οι συνηθέστερες τοπολογίες και συνδυασμοί μετατροπέων με πηγές ισχύος και μηχανές φαίνονται παρακάτω :

- DC / DC μετατροπέας (chopper, DC converter)
- AC / DC μετατροπέας, ανορθωτής (rectifier)
- DC / AC μετατροπέας, αντιστροφέας (inverter)

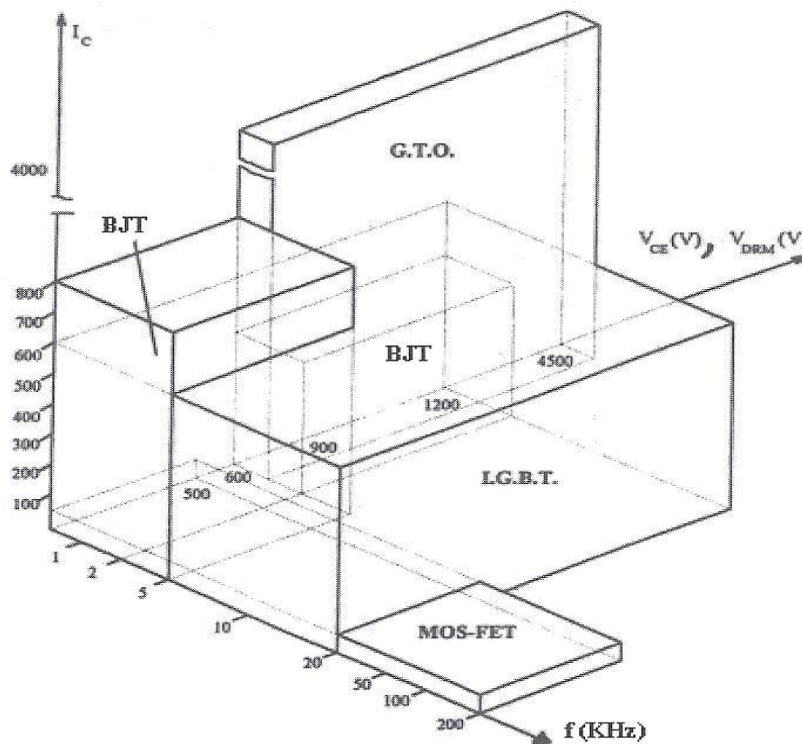


Σχήμα 4.1 Συνδυασμοί μετατροπέων για την επίτευξη της κατάλληλης μορφής τάσης ανάλογα με το είδος της τάσης τροφοδοσίας

Ανάλογα με την παραγόμενη τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος και το ρεύμα που απορροφά το φορτίο, ο μετατροπέας έχει τη δυνατότητα είτε να μεταφέρει ισχύ από την πηγή εισόδου στην ηλεκτρική μηχανή, είτε από την ηλεκτρική μηχανή στην πηγή.

### 4.3 Διακοπτικοί ημιαγωγοί ισχύος

Η λειτουργία των μετατροπέων ισχύος βασίζεται σε ημιαγωγικά στοιχεία – διακόπτες, των οποίων η αγωγή και σβέση ελέγχεται από κατάλληλους παλμούς. Στις σύγχρονες εφαρμογές, ως διακόπτες επιλέγονται κυρίως τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου – οξειδίου (Metal – Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET), διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT), και για εφαρμογές πολύ υψηλής ισχύος, θυρίστορ τύπου IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor). Η επιλογή του κατάλληλου τύπου ημιαγωγού ισχύος είναι καθοριστικής σημασίας για τον μετατροπέα, καθώς τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλές διακοπτικές απώλειες λόγω των υψηλών συχνοτήτων λειτουργίας τους (τάξεως πολλών kHz). Το Σχήμα 4.2 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των ημιαγωγών στοιχείων συναρτήσει της διακοπτικής συχνότητας, του ονομαστικού ρεύματος και της ονομαστικής τάσης λειτουργίας.

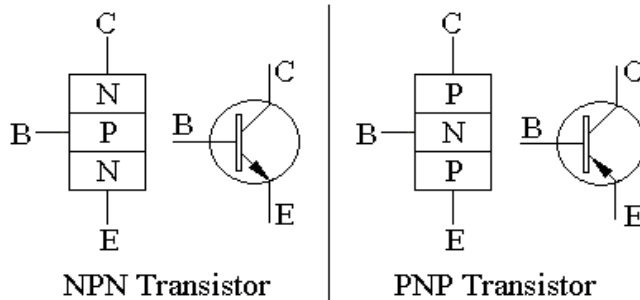


Σχήμα 4.2 Κατηγοριοποίηση των ημιαγωγών ανάλογα με τη διακοπτική συχνότητα, το ονομαστικό ρεύμα και την ονομαστική τάση

#### 4.3.1 Τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor, BJT)

Ονομάζεται και διπολικό τρανζίστορ και ήταν ο πρώτος ημιαγωγός που χρησιμοποιήθηκε σαν στοιχείο ενίσχυσης. Το όνομά του οφείλεται στο ότι το ρεύμα του δημιουργείται από δύο είδη φορέων φορτίου με διαφορετικές πολικότητες, τα ηλεκτρόνια

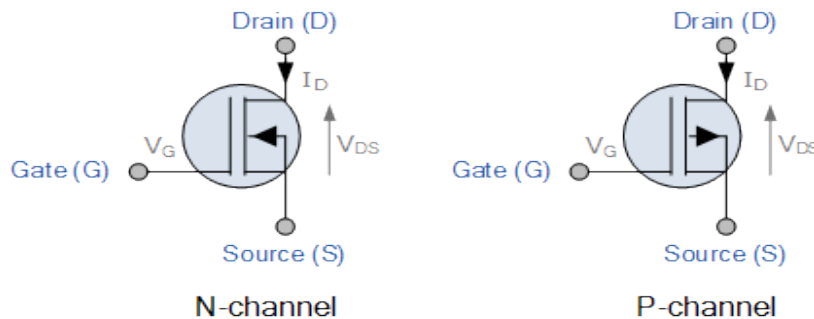
και τις οπές. Έχει τρεις ακροδέκτες που ονομάζονται εκπομπός (Emitter, E), βάση (Base, B), συλλέκτης (Collector, C). Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει τους δύο τύπους τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται σήμερα, του npn που κατασκευάζεται από πυρίτιο και του pnp που κατασκευάζεται από γερμάνιο.



Σχήμα 4.3 Οι δύο τύποι τρανζίστορ

### 4.3.2 MOSFET Ισχύος

Το MOSFET, όπως και το BJT, είναι ημιαγωγός τριών ακροδεκτών, στο οποίο η πύλη (Gate) ελέγχει τη ροή ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου που είναι η πηγή (Source) και η υποδοχή (Drain). Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το σύμβολο ενός MOSFET με διάλυλο τύπου n και p.



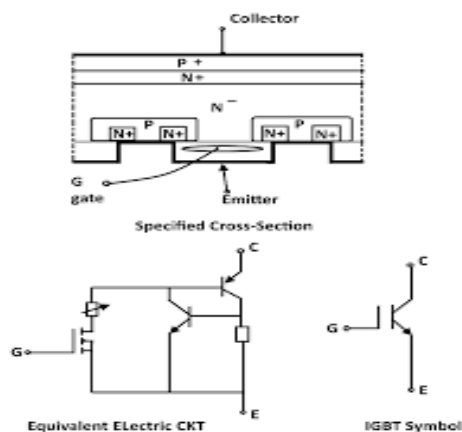
Σχήμα 4.4 Συμβολισμοί MOSFET ανάλογα με τον τύπο

Στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται MOSFET, τα MOSFET λειτουργούν σαν διακόπτες για τον έλεγχο της ισχύος του φορτίου, όπως γίνεται και με τα τρανζίστορ ισχύος. Οι διακοπτικοί χρόνοι εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τις εσωτερικές παρασιτικές χωρητικότητες. Οι χωρητικότητες αυτές μπορούν να δημιουργήσουν χρόνους καθυστέρησης κατά τις μεταβατικές καταστάσεις του ημιαγωγού και, κατά συνέπεια, να μειώνονται οι διακοπτικές τους δυνατότητες. Για να έχει το MOSFET τη δυνατότητα γρήγορης φότισης και εκφόρτισης αυτών των παρασιτικών χωρητικότητων κατά την έναυση και τη σβέση του θα πρέπει το κύκλωμα οδήγησής του να συμπεριφέρεται σαν μία πηγή παλμών με χαμηλή εσωτερική σύνθετη αντίσταση.



### 4.3.3 Διπολικό τρανζίστορ με απομονωμένη βάση (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)

Το IGBT προέκυψε ουσιαστικά από την προσπάθεια βελτίωσης των χαρακτηριστικών του MOSFET ισχύος και του τρανζίστορ ισχύος. Έτσι μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες διακοπτικές συχνότητες από το τρανζίστορ και ταυτόχρονα μπορεί να επεξεργαστεί υψηλότερες τάσεις και ρεύματα από ένα MOSFET. Οι μετατροπείς ισχύος με IGBT καλύπτουν ένα εύρος ισχύος που μπορεί να ξεπερνά το 1 MW, με κατάλληλο παραλληλισμό των διακοπών, και αποτελούν, ίσως, την πιο δημοφιλή λύση σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης σήμερα. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το σύμβολο, η τομή και το ισοδύναμο κύκλωμα του ημιαγωγικού διακόπτη IGBT.

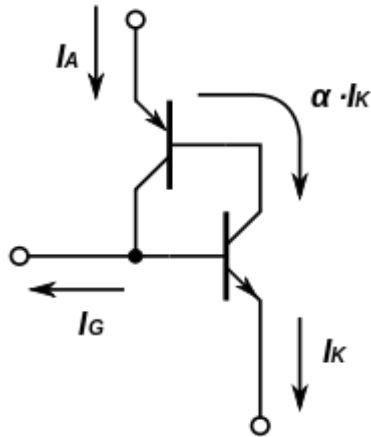


Σχήμα 4.5 Σύμβολο, τομή και ισοδύναμο κύκλωμα IGBT

Το κύκλωμα οδήγησης ενός IGBT χρησιμοποιεί δύο τρανζίστορ, ένα pnp για την έναυσή του και ένα npn για την αποκοπή του. Η λειτουργία του είναι αρκετά απλή. Όταν δίνεται θετικός παλμός στην είσοδό του, τότε το τρανζίστορ npn άγει και εφαρμόζει τάση στην πύλη του IGBT. Η τάση αυτή είναι της τάξεως των 13 με 15 Volts. Όταν δοθεί μηδενική ή αρνητική τάση στην είσοδο του κυκλώματος οδήγησης του IGBT, τότε το τρανζίστορ pnp άγει και γειώνει την πύλη του IGBT, με αποτέλεσμα αυτό να μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής.

### 4.3.4 Θυρίστορ με αποκοπή από την πύλη (Gate Turn – Off Thyristor, GTO Thyristor)

Είναι ένα είδος θυρίστορ, του οποίου η σβέση και η αποκοπή επιτυγχάνεται μέσω της πύλης του (Gate). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το απλό θυρίστορ, του οποίου η αποκοπή δεν επιτυγχάνεται μέσω της πύλης του, αλλά μέσω του μηδενισμού του ρεύματός του ή της ανάστροφης πόλωσής του. Το πεδίο χρήσης του GTO είναι οι εφαρμογές ισχύος μεταξύ 3 και 10 MW. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.6) παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας του GTO θυρίστορ.

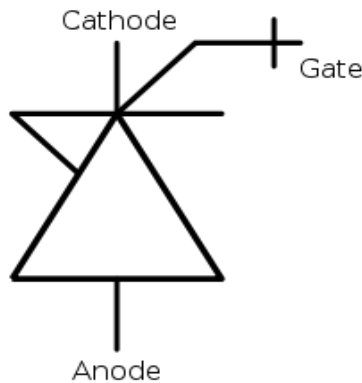


Σχήμα 4.6 Ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας GTO

Το GTO είναι σε θέση να διατηρεί πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του κατά την αγωγή του, γεγονός που επιτρέπει τη διέλευση υψηλών τιμών ρεύματος, ενώ ένας μικρής διάρκειας παλμός αρκεί για να το φέρει σε κατάσταση αγωγής. Παρουσιάζει, όμως, μεγάλους χρόνους μετάβασης που επιφέρουν υψηλές διακοπτικές απώλειες, γεγονός που περιορίζει τη μέγιστη διακοπτική του συχνότητα σε μερικές εκατοντάδες Hz.

#### **4.3.5 Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT**

Είναι ένας ημιαγωγικός διακόπτης όμοιος με ένα GTO. Έχει ενσωματωμένο το κύκλωμα οδήγησής του και μεταβαίνει σε αγωγή ή αποκοπή μέσω του ελέγχου της πύλης του. Χρησιμοποιείται για εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Η ενσωμάτωση του κυκλώματος οδήγησής του μειώνει την αντίσταση και την αυτεπαγωγή της σύνδεσής του. Είναι πιο γρήγορος διακόπτης από το GTO, έχει λιγότερες απώλειες κατά τη μετάβαση σε αγωγή ή αποκοπή και λιγότερες απαιτήσεις στο κύκλωμα οδήγησης. Παρακάτω παρουσιάζεται το σύμβολο ενός ημιαγωγικού διακόπτη τύπου IGCT.



Σχήμα 4.7 Σύμβολο IGCT

## **4.4 Αντιστροφέας**

Ο αντιστροφέας πηγής τάσης, όπως υποδηλώνει και το όνομά του, δέχεται στην είσοδό του συνεχή τάση (DC voltage), την οποία μετατρέπει σε εναλλασσόμενη μεταβλητού πλάτους και συχνότητας. Ιδανικά, απαιτεί στην είσοδό του μια ισχυρή πηγή τάσεως ή ισοδύναμα μια πηγή τάσεως με μηδενική αντίσταση στο ισοδύναμό κατά Thevenin κύκλωμα της, ικανή να παρέχει όποιο ρεύμα ζητηθεί διατηρώντας σταθερό το επίπεδο τάσεως. Η συνεχής αυτή τάση, που τροφοδοτεί τον αντιστροφέα, μπορεί να προέρχεται είτε από το δίκτυο, σε περίπτωση συστήματος τροφοδοσίας με τρίτη ράγα, είτε από ένα ανορθωτικό σύστημα με διόδους και θυρίστορ, που θα περιγράψουμε παρακάτω, στην περίπτωση των εναέριων γραμμών τροφοδοσίας εναλλασσομένου ρεύματος.

Στους μετατροπείς πηγής τάσεως, τα διακοπτικά στοιχεία παραμένουν πάντα ορθά πολωμένα (forward-biased) λόγω της DC τάσεως τροφοδοσίας γι' αυτό και μπορεί να είναι είτε GTOs (Gate Turn Off thyristors), είτε BJTs (Bipolar Junction Transistors), IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), είτε IGCTs (Integrated Gate Commutated Thyristors), είτε όπως στη δική μας εφαρμογή power MOSFETs (power Metal-oxide semiconductor field effect transistors). Τα διακοπτικά στοιχεία συνοδεύονται πάντα από μια δίοδο ελεύθερης διέλευσης (στα διακοπτικά που έχουν επιλεγεί για την εφαρμογή αυτή, η δίοδος ελεύθερης διέλευσης είναι ενσωματωμένη στο ημιαγωγό στοιχείο ) που συνδέεται αντιπαράλληλα με αυτά και επιτρέπει την αντίστροφη ροή ρεύματος (τη ροή ρεύματος και ισχύος από τον κινητήρα προς την πηγή ισχύος).

Επίσης, στην επιλογή του μετατροπέα λαμβάνεται υπόψη η απαίτηση για αμφίδρομη μεταφορά ισχύος μεταξύ της πηγής ισχύος και της μηχανής, καθώς σε περίπτωση επιβράδυνσης του κινητήρα, η συσσωρευμένη κινητική ενέργεια λόγω της αδράνειας του δρομέα, διοχετεύεται από την πλευρά της μηχανής προς την πηγή ισχύος. Στην περίπτωση αυτή η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια πραγματοποιώντας αναγεννητική πέδηση και ο αντιστροφέας λειτουργεί σαν ανορθωτής.

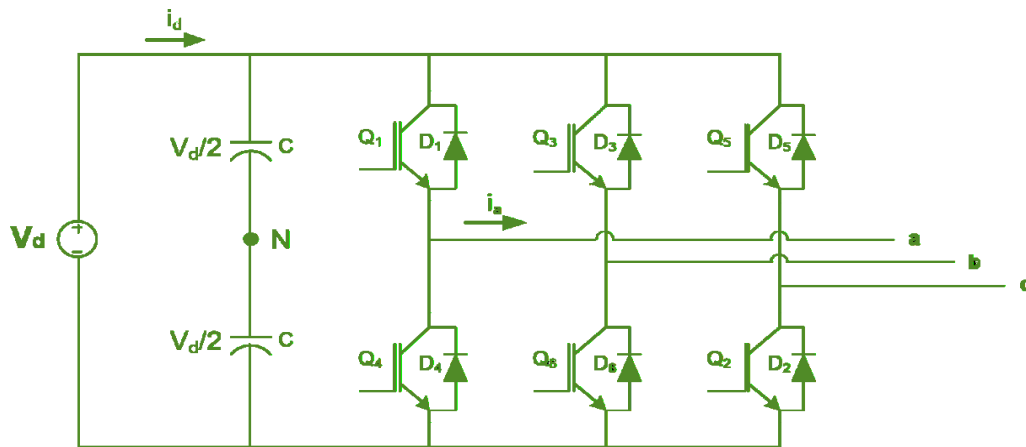
### **4.4.1 Τοπολογία**

Η πλέον τυπική και απλούστερη τοπολογία τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσεως στα συστήματα κίνησης μεταβλητής ταχύτητας είναι αυτή της εικόνας 1.10. Πρόκειται για αντιστροφέα πηγής τάσης δύο επιπέδων που παράγει έξι επίπεδα τάσεως στους ακροδέκτες του φορτίου.

Το κύκλωμα αποτελείται από τρεις ημιγέφυρες (μία για κάθε φάση) και κάθε ημιγέφυρα αποτελείται από 2 ημιαγωγούς, στα άκρα των οποίων έχουν συνδεθεί αντιπαράλληλες δίοδοι (δίοδοι ελεύθερης διέλευσης), για να επιτρέπεται η αντίστροφη ροή ισχύος. Ως αναφορά των τάσεων εξόδου του αντιστροφέα λαμβάνεται η μεσαία λήψη της DC τάσεως εισόδου, η οποία μπορεί να δημιουργηθεί με τη βοήθεια χωρητικού καταμεριστή (δύο ίδιοι πυκνωτές σε σειρά) που συνδέεται παράλληλα στη DC τάση ( Οι πυκνωτές αυτοί δεν έχουν κάποια πρακτική αξία, χρησιμοποιούνται καθαρά και μόνο για μετρητικούς και πειραματικούς σκοπούς).

Το αποτέλεσμα της τάσης εξόδου εξαρτάται από την σειρά και τον τρόπο με τον οποίο ανοιγοκλείνουν οι διακόπτες. Ο έλεγχος των διακοπών γίνεται με κατάλληλους παλμούς τάσης στην είσοδο τους, παραγόμενους από τον αλγόριθμο ελέγχου, και οι οποίοι

καθορίζουν την διάρκεια αγωγής κάθε διακόπτη. Υπάρχουν  $2^3 = 8$  συνδυασμοί στη λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων. Ωστόσο, οι διακόπτες που βρίσκονται σε κοινό κλάδο της γέφυρας δεν επιτρέπεται να κλείσουν ταυτόχρονα καθώς τότε θα έχει βραχυκυκλωθεί η DC τροφοδοσία. Η λειτουργία των αλγορίθμων ελέγχου βασίζεται στο ότι κάθε στιγμή επιλέγεται ο καταλληλότερος από τους 8 παραπάνω συνδυασμούς που θα επιτρέψει στη τάση του αντιστροφέα να προσεγγίσει βέλτιστα την αναφορά (επιθυμητή τάση).

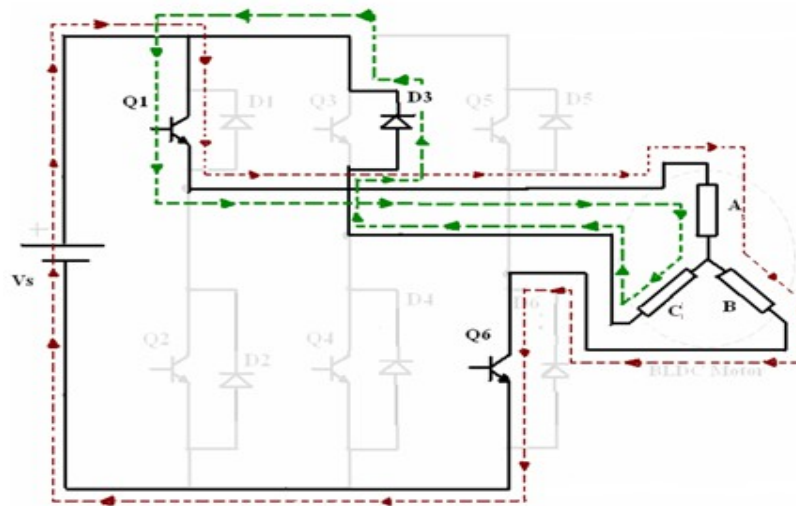


Σχήμα 4.8 Κυκλωματική διάταξη αντιστροφέα

Πρέπει να τονισθεί ότι η τάση εξόδου κάθε ημιγέφυρας του αντιστροφέα εξαρτάται μόνο από την τάση τροφοδοσίας  $V_d$  και την κατάσταση των ημιαγωγών διακοπών. Αυτό σημαίνει ότι είναι ανεξάρτητη του ρεύματος φορτίου, καθώς πάντοτε θα άγει ένας από τους δύο διακόπτες της ημιγέφυρας. Έτσι το ρεύμα εξόδου μπορεί να έχει οποιαδήποτε κατεύθυνση, ανεξάρτητα από την πολικότητα της τάσης εξόδου. Η υπόθεση ότι άγει πάντοτε ένας από τους δύο διακόπτες συνιστά εξιδανίκευση των ημιαγωγών, καθώς στην πράξη χρησιμοποιείται ένα κενό διάστημα (blanking time ή dead time), όπου κανείς από τους δύο δεν άγει, για λόγους προστασίας. Το διάστημα αυτό μπορεί να ρυθμίζεται είτε από τον κώδικα του μικροεπεξεργαστή, είτε από κάποια αναλογική είσοδο των drivers των MOSFETS με χρήση καραμεριστών τάσης.

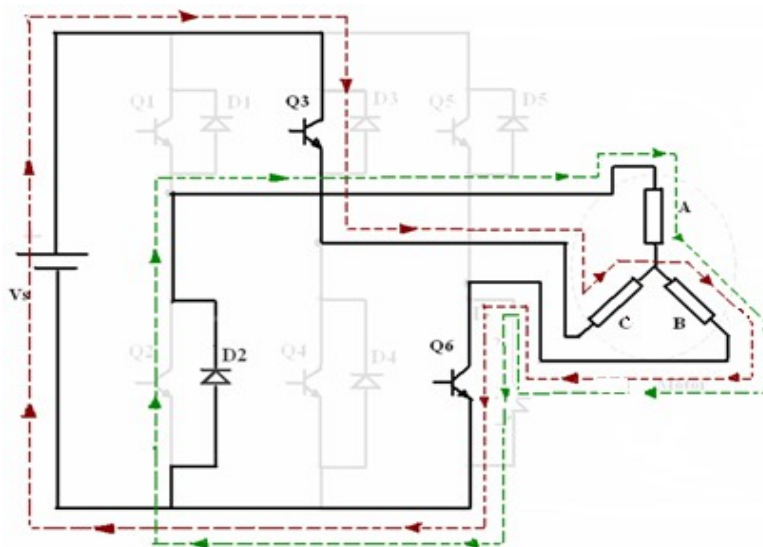
Όταν εφαρμόζεται θετικός παλμός ελέγχου στην είσοδο ενός ημιαγωγικού στοιχείου, αυτό άγει επιτρέποντας την ροή ρεύματος κατά την μία φορά, ενώ η αντιπαράλληλη διάοδος επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Η παρουσία των αντιπαράλληλων διόδων είναι απαραίτητη όταν το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης, καθώς προσφέρουν έναν δρόμο επιστροφής του ρεύματος, άρα και της ενέργειας, από το φορτίο στην συνεχή τάση τροφοδοσίας. Για να γίνει καλύτερα κατανοητό αυτό, ας υποθεθεί αρχικά ότι βρίσκονται σε αγωγή τα στοιχεία  $Q_1, Q_4$  και το ρεύμα ρέει από την φάση A προς την φάση C. Όταν γίνει μεταγωγή των φάσεων αγωγής, ο διακόπτης  $Q_4$  θα έρθει σε αποκοπή, ενώ οι  $Q_1, Q_6$  σε αγωγή, με το ρεύμα τώρα να ρέει από την φάση A προς την φάση B. Όμως, λόγω της καθυστέρησης που εισάγει το επαγωγικό φορτίο η φάση C που τώρα είναι σε αποκοπή, θα συνεχίσει να άγει εμφανίζοντας ρεύμα που ρέει μέσω της διόδου  $D_3$  μέχρι να αποφορτιστεί το πηνίο. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται

στο Σχήμα 4.9, όπου το με κόκκινο αναπαρίσταται το ρεύμα τροφοδοσίας των φάσεων και με πράσινο το ρεύμα αποφόρτισης της αποκομμένης φάσης.



Σχήμα 4.9 Λειτουργία αντιστροφέα κατά την αγωγή των Q1, Q6

Ομοίως στο Σχήμα 4.10 φαίνονται τα ρεύματα κατά την μετάβαση από την αγωγή των φάσεων A και B (Q1,Q6 άγουν) στην αγωγή των φάσεων C και B (Q3,Q6 άγουν).



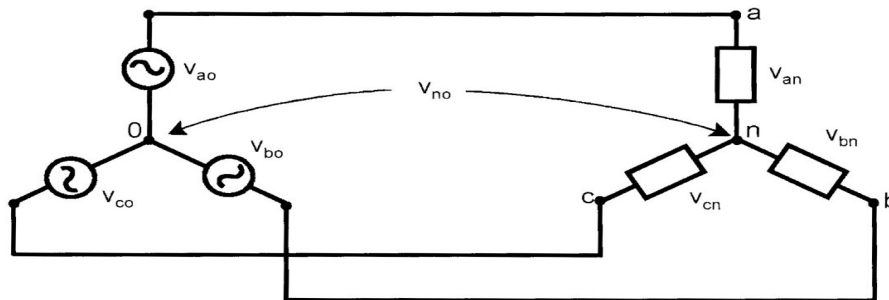
Σχήμα 4.10 Λειτουργία αντιστροφέα κατά την αγωγή Q3, Q6

Η διαδικασία συνεχίζεται και οι καταστάσεις λειτουργίας του αντιστροφέα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Η κάθε κατάσταση λαμβάνει την κωδικοποίησή της ανάλογα με την αγωγή ή μη των διαφόρων διακοπτικών στοιχείων.

A/A	Διακόπτες σε κατάσταση αγωγής						Πλάτη τάσεων στα άκρα του φοτίου κάθε φάσης		
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	1	2Vd/3	-Vd/3	-Vd/3
2	1	1	1	0	0	0	Vd/3	Vd/3	-2Vd/3
3	0	1	1	1	0	0	-Vd/3	2Vd/3	-Vd/3
4	0	0	1	1	1	0	-2Vd/3	Vd/3	Vd/3
5	0	0	0	1	1	1	-Vd/3	-Vd/3	2Vd/3
6	1	0	0	0	1	1	Vd/3	-2Vd/3	Vd/3
7	1	0	1	0	1	0	0	0	0

Πίνακας 4.1 Καταστάσεις λειτουργίας του αντιστροφέα

Ένα ακόμα ζήτημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η σύνδεση του αντιστροφέα με τον κινητήρα (τριφασικό φορτίο). Στις εφαρμογές συστημάτων κίνησης ο ουδέτερος κόμβος της ηλεκτρικής μηχανής είναι απομονωμένος. Στην περίπτωση αυτή μεταξύ των σημείων n και 0, όπως φαίνονται στην εικόνα 4.11, εμφανίζονται περιττές αρμονικές πολλαπλάσιες του 3 (3η,9η,15η κτλ), οι οποίες αποτελούν τις συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας της τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.11 Σύνδεση τριφασικού κινητήρα με τριφασικό φορτίο

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων του Kirchoff στους βρόχους 0 – a – n, 0 – b – n, 0 – c – n λαμβάνουμε τις εξής σχέσεις :

$$\begin{aligned}
 V_{a0} &= V_{an} + V_{n0} \\
 V_{b0} &= V_{bn} + V_{n0} \\
 V_{c0} &= V_{cn} + V_{n0}
 \end{aligned}$$

και επειδή οι φασικές τάσεις του φορτίου είναι συμμετρικές, δηλαδή

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

προσθέτοντας κατά μέλη τις σχέσεις προκύπτει :

$$3V_{n0} = V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}$$

Τέλος, αντικαθιστώντας προκύπτει :

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0} \\ V_{bn} &= \frac{2}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0} - \frac{1}{3} V_{a0} \\ V_{cn} &= \frac{2}{3} V_{c0} - \frac{1}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} \end{aligned}$$

#### **4.4.2 Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών**

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένας από τους σημαντικότερους λόγους της επικράτησης της ηλεκτροκίνησης είναι η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος. Σκοπός είναι πάντα η βελτίωση του βαθμού απόδοσης και, γενικά, η μεγιστοποίηση του κέρδους. Ορθώς, λοιπόν, έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη βάση στη διαμόρφωση των κυματομορφών εξόδου των μετατροπέων, καθώς σχετίζεται άμεσα με τους προαναφερθέντες στόχους.

Οι τάσεις εξόδου τριφασικών αντιστροφέων είναι τετραγωνικές κυματομορφές που, όπως αποδεικνύουν οι αναλύσεις τους σε σειρές Fourier, περιέχουν ανώτερες αρμονικές συνιστώσες, των οποίων οι συχνότητες βρίσκονται πλησίον της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας. Οι ανώτερες αυτές αρμονικές, που ονομάζονται και ανεπιθύμητες, πρέπει να εξαιρεθούν, ώστε να μπορεί ο αντιστροφέας να συνδεθεί στο δίκτυο, και η τάση εξόδου να παρουσιάζει ένα συντελεστή Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion, THD) μικρότερο του 5%. Η μέτρηση της ποιότητας της τάσης εξόδου γίνεται στην έξοδο του αντιστροφέα εφαρμόζοντας το διεθνές πρότυπο ορίων αρμονικών τάσης IEEE 519 του 1992 που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΡΟΤΥΠΟ ΟΡΙΩΝ ΤΑΣΗΣ IEEE – 519 ΤΟΥ 1992			
Harmonic Voltage Distortion in % at PCC (Point of Common Coupling)			
Rms τάση ζυγού στο PCC	VPCC < 69 kV	69 kV < VPCC < 161 kV	VPCC > 161 kV
Individual Harmonic Voltage Distortion (%)	3.0	1.5	1.0
Total Harmonic Distortion (THD%)	5.0	2.5	1.5

Πίνακας 4.2 Διεθνές πρότυπο ορίων αρμονικών τάσης IEEE 519 του 1992

Για να επιτευχθούν αυτές οι προϋποθέσεις θα πρέπει ο αντιστροφέας στην έξοδό του να παράγει μια τάση καλής ποιότητας και ταυτόχρονα να χρησιμοποιηθεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο μεταξύ φορτίου και αντιστροφέα. Το μέγεθος, το βάρος και το κόστος του φίλτρου εξαρτώνται από το πλάτος και τη συχνότητα της πρώτης ανώτερης αρμονικής (κυριάρχουσα ανώτερη αρμονική) σε σχέση με το πλάτος και τη συχνότητα της θεμελιώδους αρμονικής. Όσο περισσότερο απέχει η πρώτη αρμονική από τη θεμελιώδη, τόσο μικρότερο γίνεται το φίλτρο. Για τον έλεγχο και την ποιότητα της τάσης εξόδου χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, από τις οποίες ορισμένες θα αναλυθούν σε αυτό το τμήμα της εργασίας.

#### **4.4.2.1 Διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation, PWM)**

Ο έλεγχος της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να επιτευχθεί με την μεταβολή του εύρους των παλμών οδήγησης των διακοπών, μεταβάλλοντας δηλαδή τα χρονικά διαστήματα αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων του αντιστροφέα. Η τεχνική αυτή, με την οποία επιτυγχάνεται ο έλεγχος του πλάτους της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου ονομάζεται Διαμόρφωση του Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation- PWM).

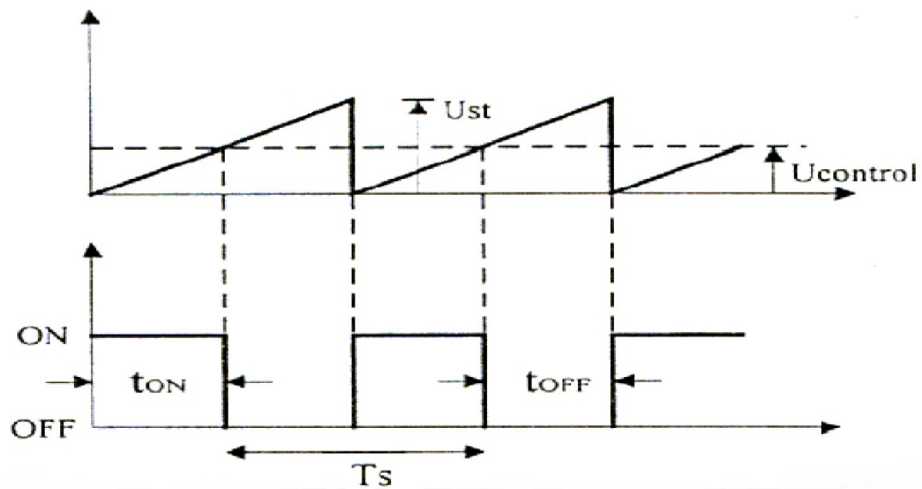
Για την παραγωγή των παλμών συγκρίνεται ένα σήμα ελέγχου  $u_{control}$  με μια περιοδική κυματομορφή διακοπτικής συχνότητας  $f_s$  (συνήθως πριονωτή ή τριγωνική), που ονομάζεται φορέας. Το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης είναι μια παλμοσειρά συχνότητας  $f_s$ . Όταν η δεδομένη παλμοσειρά εφαρμόζεται στον διακόπτη, ο συνολικός χρόνος αγωγής του μειώνεται, με άμεση συνέπεια την μείωση της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου και κατ' επέκταση του ρεύματος που παρέχεται στον κινητήρα. Ο λόγος του συνεχόμενου χρόνου αγωγής  $t_{on}$  του διακόπτη προς την διακοπτική περίοδο  $T_s$  ονομάζεται λόγος κατάτμησης  $D$  (Duty Cycle).

Όπου :

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \text{ και } T_s = \frac{1}{f_s} = t_{on} + t_{off}$$

Στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνεται η διαδικασία σύγκρισης των δύο σημάτων και η παλμοσειρά οδήγησης που προκύπτει.

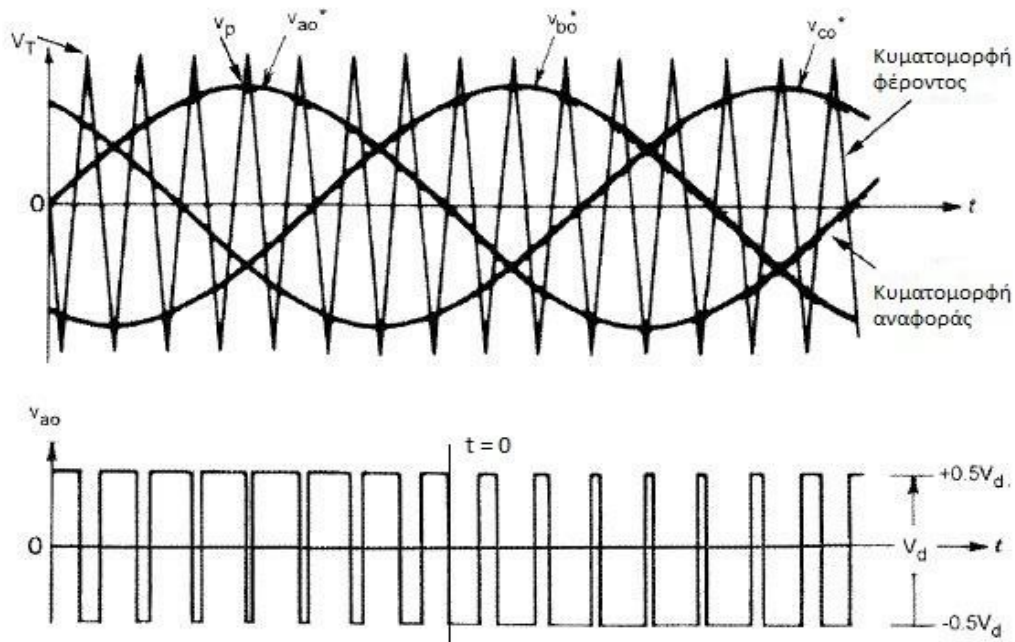




Σχήμα 4.12 Διαδικασία σύγκρισης παλμοσειρών στην PWM

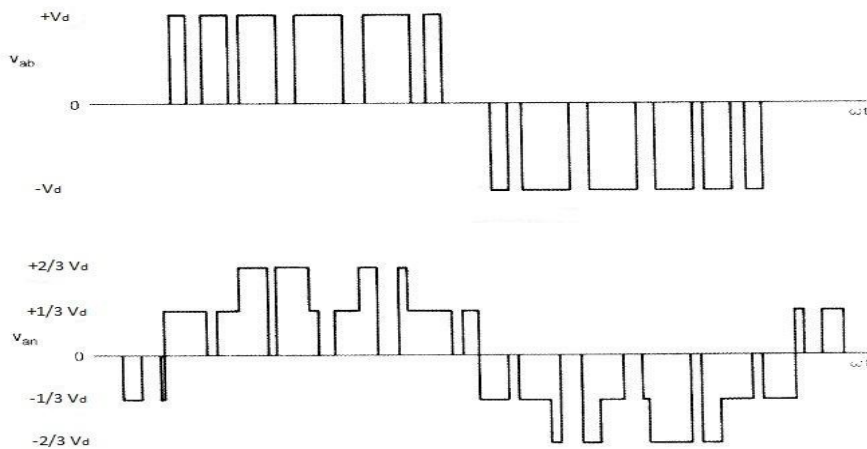
#### **4.4.2.2 Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)**

Στην έξοδο του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης είναι θεμιτή, όπως έχει αναφερθεί, η παραγωγή εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς τάσης με μεταβλητό πλάτος και συχνότητα, κρατώντας σταθερή την DC τάση τροφοδοσίας  $V_d$ . Η **αρχή λειτουργίας** της SPWM βασίζεται στην σύγκριση συμμετρικού υψίσυχνου τριγωνικού φέροντος συχνότητας  $f_c$  με τρεις κυματομορφές διαμόρφωσης (κυματομορφές αναφοράς) συχνότητας  $f$ . Το τριγωνικό φέρον επιλέγεται κατάλληλα όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια ενώ οι κυματομορφές αναφοράς που διαφέρουν κατά γωνία  $2\pi/3$  συνιστούν την επιθυμητή κάθε φορά τροφοδοσία του φορτίου. Η μεταγωγή των διακοπτικών στοιχείων καθορίζεται από τα σημεία τομής της τριγωνικής κυματομορφής και των κυματομορφών αναφοράς.



Σχήμα 4.13 Σύγκριση κυματομορφής αναφοράς και φέροντος για την παραγωγή παλμών έναυσης διακοπτικών στοιχείων κατά τη διαδικασία της της SPWM

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι παραγόμενες κυματομορφές της τάσης φορτίου στην έξοδο του αντιστροφέα.



Σχήμα 4.14 Παραγόμενες μέσω της SPWM τάσεις εξόδου

Το εύρος των παλμών μεταβάλλεται ημιτονοειδώς, ώστε η θεμελιώδης συνιστώσα της κυματομορφής να έχει συχνότητα  $f$  και πλάτος ανάλογο του πλάτους της κυματομορφής αναφοράς. Ορίζοντας ως  $V_p$  το πλάτος των κυματομορφών αναφοράς, και  $V_T$  το πλάτος του τριγωνικού φέροντος (σταθερό) ο λόγος διαμόρφωσης πλάτους, ή **συντελεστής διαμόρφωσης** ορίζεται ως:

$$m_a = \frac{V_p}{V_T}$$

Ο λόγος διαμόρφωσης συχνότητας ή κανονικοποιημένη συχνότητα φορέα ορίζεται ως εξής :

$$m_f = \frac{f_c}{f_1}$$

Όπου  $f_c$  η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής ή αλλιώς συχνότητα φέροντος (carrier frequency) και  $f_1$  η συχνότητα των κυματομορφών αναφοράς ή αλλιώς συχνότητα διαμόρφωσης (modulating frequency).

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, τα σημεία τομής των κυματομορφών αναφοράς με την κυματομορφή φέροντος καθορίζουν την αγωγή των διακοπτικών στοιχείων. Για παράδειγμα λαμβάνουμε την πρώτη ημιγέφυρα του σχήματος. Με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν θα ισχύουν τα εξής για τα στοιχεία Q1, Q4 και για τη φασική τάση εξόδου  $V_{a0}$  του αντιστροφέα :

$$\begin{aligned} V_{a0} > V_T, \text{ \acute{a}\gamma\epsilon\iota \text{ o } Q1, } V_{a0} &= \frac{1}{2} V_d \\ V_{a0} < V_T, \text{ \acute{a}\gamma\epsilon\iota \text{ o } Q4, } V_{a0} &= -\frac{1}{2} V_d \end{aligned}$$

Αφού οι δύο διακόπτες δεν άγουν ταυτόχρονα (ταυτόχρονη αγωγή θα προκαλούσε βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της πηγής τάσης), η τάση εξόδου  $v_{a0}$  κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών ( $1/2 V_d$  και  $-1/2 V_d$ ). Είναι φανερό ότι οι διακόπτες αυτοί λειτουργούν συμπληρωματικά. Στην πράξη, μεσολαβεί ένα «νεκρό διάστημα» (**dead time**) ασφαλείας κατά τη μεταγωγή των δύο ημιαγωγών, στο οποίο δεν άγει κανείς από τους δύο.

Η ανάλυση Fourier του σήματος εξόδου υποδεικνύει, όπως έχουμε αναφέρει προηγούμενα, την παρουσία αρμονικών ανώτερης τάξης, που βρίσκονται σε περιοχές συχνοτήτων κοντά στη διακοπτική και τα πολλαπλάσιά της. Η παρουσία τους στην κυματομορφή εξόδου είναι αναπόφευκτη λόγω της μη γραμμικότητας των διακοπτικών στοιχείων, ωστόσο η λειτουργία με διαμόρφωση SPWM δίνει ένα μεγάλο πλεονέκτημα : οι αρμονικές βρίσκονται σε συχνότητες ίσες και πολλαπλάσιες αυτής του τριγωνικού φέροντος και ως εκ τούτου μπορούν να ελεγχθούν, ενώ οι αρμονικές χαμηλής τάξεως απουσιάζουν. Οι αρμονικές της φασικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες (sidebands), κεντραρισμένες γύρω από τη διακοπτική συχνότητα και τις πολλαπλάσιές της, δηλαδή γύρω από τις συχνότητες  $mf$ ,  $2mf$ ,  $3mf$ , κτλ.

Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας  $mf$ , επιλέγεται έτσι ώστε να είναι περιττός αριθμός πολλαπλάσιος του 3. Επιλέγοντας περιττό  $mf$  οδηγούμαστε σε περιττή συμμετρία  $f(-t) = -f(t)$  και συμμετρία ημίσεως κύματος  $f(t) = f(t + 1/2 T)$ , οπότε από τις ζυγές αρμονικές συνιστώσες. Ο αριθμός που επιλέγεται είναι επίσης ακέραιος έτσι ώστε να μην υπάρχουν υποαρμονικές.

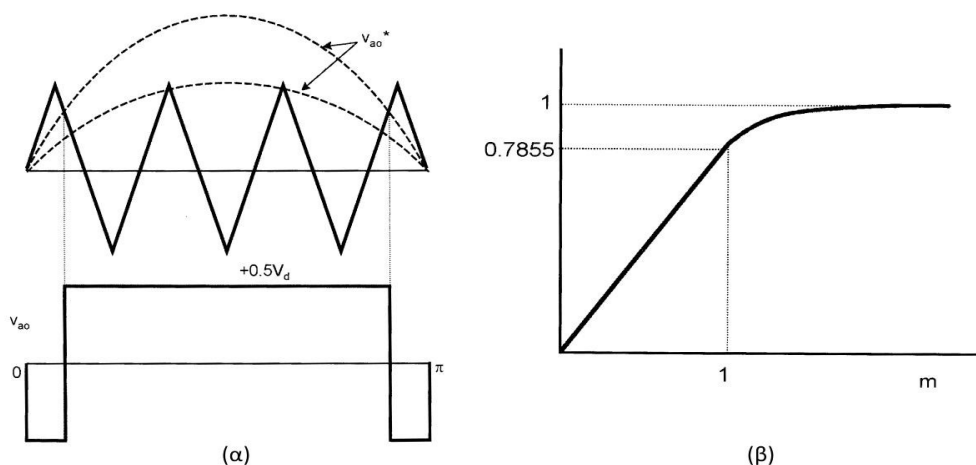
Στα σύγχρονα συστήματα οδήγησης επικρατεί η τάση συνεχούς αύξησης της διακοπτικής συχνότητας των ημιαγωγικών στοιχείων εξαιτίας της σχετικής ευκολίας στο φιλτράρισμα αρμονικών τάσης σε υψηλότερες συχνότητες. Ωστόσο η διαρκής αύξηση της διακοπτικής συχνότητας εμφανίζει και αρνητικά φαινόμενα στα συστήματα κίνησης

μεταβλητής ταχύτητας, κυρίως όσον αφορά στις απώλειές τους. Έτσι, στις περισσότερες εφαρμογές, η διακοπτική συχνότητα επιλέγεται να είναι είτε μικρότερη των 6 kHz, είτε μεγαλύτερη των 20 kHz ώστε να είναι πάνω από την περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων. Εάν η βέλτιστη διακοπτική συχνότητα (βασισμένη στη συνολική απόδοση του συστήματος) βρίσκεται μεταξύ της περιοχής των 6-20 kHz, τότε τα μειονεκτήματα της αύξησής της στα 20 kHz συνήθως υπερκαλύπτονται από το πλεονέκτημα της ύπαρξης θορύβου σε μη ακουστικές συχνότητες για διακοπτική συχνότητα ίση ή μεγαλύτερη των 20 kHz. Έτσι, σε εφαρμογές οδήγησης κινητήρων, όπου για παράδειγμα η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα απαιτείται να βρίσκεται στα 200Hz, ο λόγος διαμόρφωσης συχνότητας mf ισούται με 9 ή λιγότερο για διακοπτικές συχνότητες μικρότερες των 2 kHz. Από την άλλη πλευρά, μπορεί να είναι και μεγαλύτερος του 100 για διακοπτικές συχνότητες μεγαλύτερες των 20 kHz. Η σχέση μεταξύ του σήματος της τριγωνικής κυματομορφής και των κυματομορφών αναφοράς καθορίζεται από το μέγεθος του λόγου mf. Σαν γενικός κανόνας, ως όριο που χαρακτηρίζει μικρή ή μεγάλη την τιμή του λόγου αυτού θεωρείται το 21. Σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής διαμόρφωσης  $m_a$  θεωρείται μικρότερος της μονάδας. Συνεπώς, για τη μείωση των συνολικών απωλειών του συστήματος, πρέπει γίνει συμβιβασμός μεταξύ της διακοπτικής συχνότητας και των αρμονικών που προκαλούν απώλειες στον κινητήρα.

Σε μία ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με το συντελεστή  $m_a$  (δεδομένου ότι  $m_a \leq 1$ ). Έτσι η περιοχή του συντελεστή αυτού από 0 έως 1 ονομάζεται γραμμική περιοχή. Το πλάτος της θεμελιώδους ή βασικής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι :

$$V_{ab,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_i m_a$$

Στην περίπτωση που ο συντελεστής  $m_a$  υπερβεί τη μονάδα, το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς υπερβαίνει το πλάτος της κυματομορφής φέροντος και ο αντιστροφέας λειτουργεί στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης. Τα σημεία που οι δύο κυματομορφές τέμνονται ώστε να δημιουργούν παλμούς γίνονται λιγότερα όσο αυξάνεται το  $m_a$ . Εν μέρη έχουμε λειτουργία SPWM καθώς στο κεντρικά τμήματα των τάσεων αναφοράς παράγονται αντίστοιχες κυματομορφές που έχουν τη μορφή τετραγωνικού παλμού, χωρίς βέβαια τα αρνητικά τμήματα αφού το πλάτος του ημιτόνου είναι μεγαλύτερο από το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής. Ο αντιστροφέας εμφανίζει τότε έντονη μη γραμμική λειτουργία με τις αρμονικές χαμηλής τάξεως να εμφανίζονται. Στο όριο, με τον συντελεστή διαμόρφωσης να αυξάνει ακόμα περισσότερο, οδηγούμαστε σε λειτουργία τετραγωνικού παλμού, με δύο μεταγωγές των διακοπτικών στοιχείων ανά περίοδο (καθώς η κυματομορφή αναφοράς περνάει από τα θετικά στα αρνητικά και αντίστροφα) και μέγιστη τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας του τετραγωνικού παλμού εξόδου ίση με  $4V_d/2\pi$ . Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.15) περιγράφεται η λειτουργία στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης.



Σχήμα 4.15 Υπερδιαμόρφωση

Στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης αυξάνονται οι αρμονικές των πλευρικών ζωνών, όπως είναι λογικό, όμως οι κυρίαρχες αρμονικές έχουν μικρότερο πλάτος από τη γραμμική λειτουργία. Έτσι, οι απώλειες ισχύος στο φορτίο, λόγω αυτών των πλευρικών αρμονικών μπορεί να μην είναι τόσο μεγάλες όσο θα υπέθετε κανείς, λόγω των επιπρόσθετων συνιστωσών στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης.

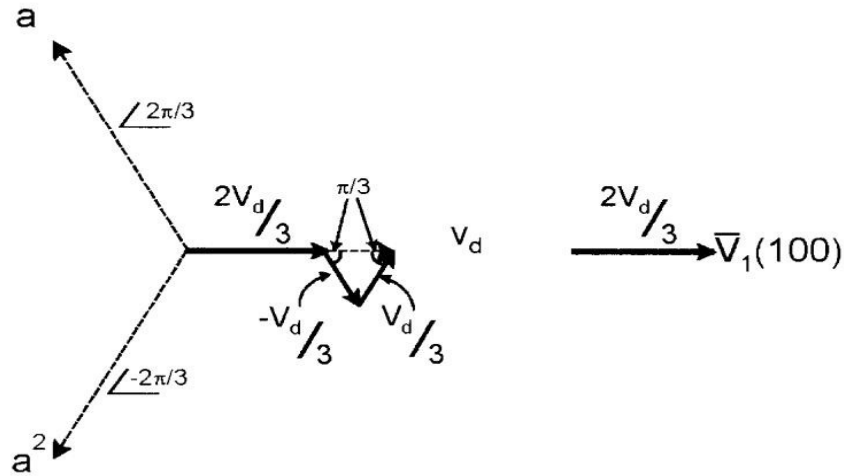
Τέλος, η πλέον συνήθης πρακτικότερα συστήματα κίνησης είναι η εξής : όταν ο κινητήρας λειτουργεί στην περιοχή σταθερής ροπής με ταχύτητα ίση ή μικρότερη της ονομαστικής, ο αντιστροφέας λειτουργεί στη γραμμική περιοχή της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών με σταθερή συχνότητα φέροντος. Όταν ο κινητήρας περάσει στην περιοχή σταθερής ισχύος, ο αντιστροφέας λειτουργεί στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης (quasi SPWM) επιτυγχάνοντας τη μέγιστη δυνατή τιμή για την τάση εξόδου, ενώ η συχνότητα του φέροντος γίνεται ίση με τη συχνότητα της θεμελιώδους συνιστώσας.

#### **4.4.3 Διαμόρφωση Διανύσματος Χώρου (Space Vector Modulation, SVM)**

Η τεχνική διαμόρφωσης διανύσματος χώρου ή SVM, όπως θα αναφέρεται στο παρόν κεφάλαιο, είναι μια εναλλακτική τεχνική για τον καθορισμό των διακοπτικών σημάτων στις πύλες των ημιαγωγικών στοιχείων του μετατροπέα. Σε αντίθεση με την SPWM, η SVM δεν βασίζεται στη σύγκριση των κυματομορφών φέροντος σήματος και σήματος αναφοράς, αλλά αναπαριστά όλες τις πιθανές φασικές τάσεις ως διανύσματα. Ίσως αποτελεί την πλεονεκτικότερη από τις τεχνικές διαμόρφωσης, ιδιαίτερα σε συστήματα ηλεκτρικής έλξης, καθώς η φιλοσοφία του διανύσματος κατάστασης του αντιστροφέα έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τη φιλοσοφία των διανυσμάτων κατάστασης της μηχανής στο d – q πλαίσιο αναφοράς, όπως αναπτύχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η λειτουργία της τεχνικής βασίζεται στην επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού καταστάσεων του αντιστροφέα και στην εναλλαγή τους με τρόπο που οδηγεί στη βέλτιστη προσέγγιση, όπως αυτό προκύπτει από το μετασχηματισμό Clarke της

συμμετρικής τριφασικής τροφοδότησης σε κάθετο πλαίσιο αναφοράς  $d - q$ . Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής του διανύσματος κατάστασης όταν ο αντιστροφέας λειτουργεί στην κατάσταση 1.



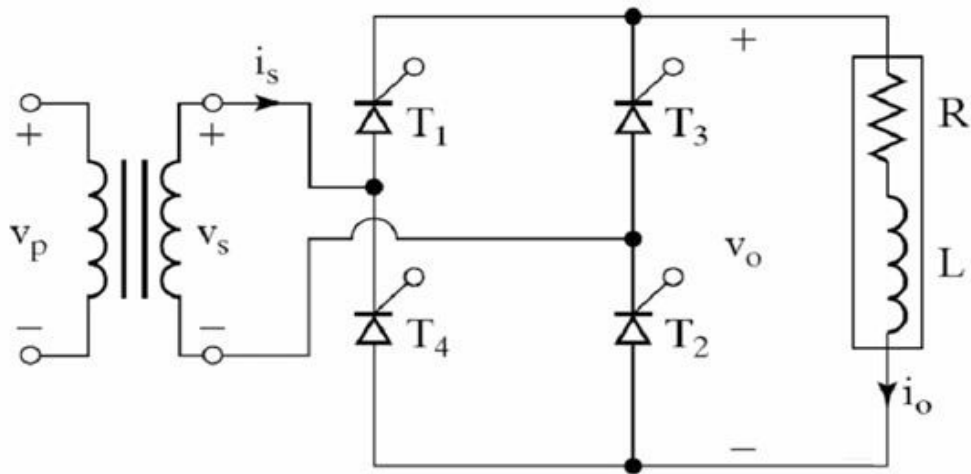
Σχήμα 4.16 Διαδικασία επιλογής διανύσματος κατάστασης

Σε προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε ένας πίνακας (Πίνακας 4.1) που περιείχε τις επιτρεπτές καταστάσεις λειτουργίας ενός αντιστροφέα και τις αντίστοιχες φασικές τάσεις εξόδου. Η κωδικοποίηση των καταστάσεων γίνεται ανάλογα με την αγωγή των διακοπών Q1, Q3, Q5, τοποθετώντας 1 σε περίπτωση αγωγής και 0 σε περίπτωση αποκοπής. Στις καταστάσεις «0» και «7» οι διακόπτες Q2, Q4, Q6 και Q1, Q3, Q5 αντίστοιχα άγουν ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να βραχυκυκλώνονται οι ακροδέκτες του κινητήρα. Αντίθετα στην κατάσταση «1» (και αντίστοιχα στις υπόλοιπες καταστάσεις αγωγής) άγουν οι Q1, Q2, Q6 και έτσι η φάση a συνδέεται στο θετικό πόλο ενώ οι b, c στον αρνητικό πόλο της πηγής συνεχούς ρεύματος. Συνεπώς οι φασικές τάσεις του αντιστροφέα ως προς το φανταστικό σημείο αναφοράς στη μεσαία λήψη της dc τροφοδοσίας (Σχήμα 4.11) είναι  $V_{an} = V_d/2$ ,  $V_{bn} = -V_d/2$  και  $V_{cn} = -V_d/2$  ενώ οι αντίστοιχες φασικές τάσεις του φορτίου ως προς τον απομονωμένο ουδέτερο κόμβο του αστερά (n) (Σχήμα 4.11) προκύπτουν  $V_{an} = 2V_d/3$ ,  $V_{bn} = -V_d/3$  και  $V_{cn} = -V_d/3$ .

## 4.5 Ανορθωτής

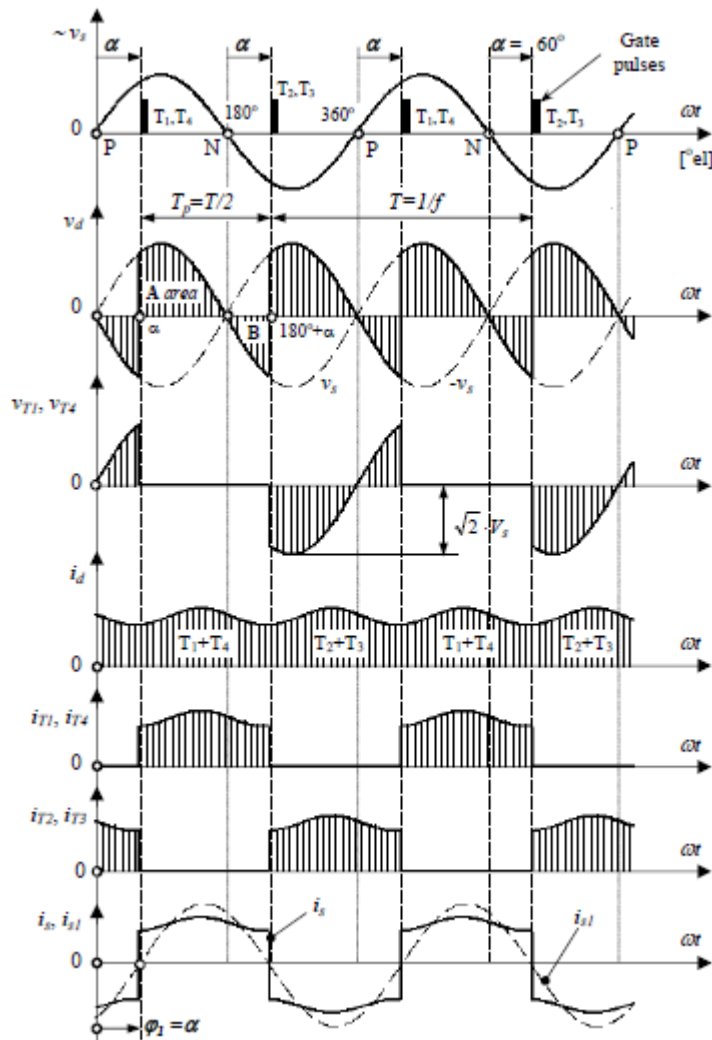
Ο ανορθωτής μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές διατάξεις με διόδους ή θυρίστορ. Πιο διαδεδομένη, βέβαια, είναι η χρήση των θυρίστορ, λόγω του ότι οι διόδοι είναι ημιαγωγοί, των οποίων η έναυση δεν μπορεί να ελεγχθεί, συνεπώς και η τάση εξόδου αυτού του είδους των ανορθωτικών διατάξεων δεν ελέγχεται, σε αντίθεση με τα θυρίστορ. Δηλαδή, όταν η τάση εισόδου παρουσιάσει κάποιες αυξομειώσεις, το ίδιο θα συμβεί και στη συνεχή τάση εξόδου. Για το λόγο αυτό οι ανορθώσεις με διόδους ονομάζονται μη ελεγχόμενες, ενώ αντίθετα εκείνες με θυρίστορ ελεγχόμενες. Τα θυρίστορ άγουν εφόσον πληρούνται δύο προϋποθέσεις : 1) είναι ορθά πολωμένα και 2) δίνεται παλμός έναυσης στον τρίτο ακροδέκτη. Η σημαντικότερη μονοφασική ελεγχόμενη ανόρθωση είναι η γέφυρα

τεσσάρων ημιαγωγών στοιχείων, της οποίας η συνδεσμολογία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.17 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη ανόρθωση συνδεσμολογίας γέφυρας

Η αρχή λειτουργίας του ανορθωτή είναι η εξής. Κατά τη διάρκεια της θετικής ημιπεριόδου τα θυρίστορ T1 και T4 είναι ορθά πολωμένα, καθώς η τάση ανόδου είναι μεγαλύτερη από την τάση καθόδου (στην άνοδό τους εφαρμόζεται η τάση της πηγής), σε αντίθεση με τα T2, T3 που είναι ανάστροφα. Όταν, λοιπόν, δοθεί παλμός έναυσης στα T1, T4, αυτά άγουν με αποτέλεσμα να συνδέουν την τάση τροφοδοσίας στα άκρα του φορτίου. Κατά τη φάση αυτή η τάση εισόδου, η οποία έχει θετικές τιμές, δημιουργεί ένα θετικό ρεύμα εισόδου και εξόδου. Όταν, κατά τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου, δοθεί παλμός έναυσης στα T2, T3, τότε όντας ορθά πολωμένα άγουν εφαρμόζοντας την τάση τροφοδοσίας στο φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση τροφοδοσίας είναι αρνητική. Κατά τη φάση αυτή, το ρεύμα εισόδου έχει αρνητική κατεύθυνση, όμως αν παρατηρήσει κανείς τη συνδεσμολογία θα διαπιστώσει ότι, ακολουθώντας εκείνη τη διαδρομή που περιλαμβάνει τα T2, T3, οι ακροδέκτες είναι ανάποδα συνδεδεμένοι στην έξοδο, άρα το ρεύμα εξόδου συνεχίζει να είναι θετικό. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.18) παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης εισόδου και εξόδου μιας μονοφασικής πλήρους ελεγχόμενης ανόρθωσης συνδεσμολογίας γέφυρας γωνίας έναυσης  $60^\circ$ .



Σχήμα 4.18 Κυματομορφές ρεύματος και τάσης εισόδου και εξόδου μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης ανόρθωσης συνδεσμολογίας γέφυρας και γωνίας έναυσης  $\alpha = 60$  μοίρες

#### 4.5.1 Λειτουργία ανόρθωσης ως αντιστροφείας

Όταν η ανορθωτική διάταξη μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια προς το φορτίο, τότε αυτή λειτουργεί ως ανόρθωση, μετατρέποντας την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, όπως αναφέραμε προηγούμενα. Ο κινητήρας όμως, όπως γνωρίζουμε, έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια από την πέδη του σε ηλεκτρική, η οποία μεταφέρεται πίσω στο δίκτυο. Σε αυτή τη φάση της λειτουργίας του κινητήρα, η ανορθωτική διάταξη πραγματοποιεί την αντίθετη διαδικασία. Λειτουργεί ως αντιστροφείας μετατρέποντας τη DC τάση που δέχεται σε εναλλασσόμενη. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι για να υπάρχει αντίστροφη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει η μέση τιμή της τάσης εξόδου της γεννήτριας να έχει αρνητική τιμή. Όμως, η φορά του



ρεύματος θα πρέπει και στις δύο περιπτώσεις να είναι θετική. Επομένως, για την ανόρθωση του σχήματος υπάρχουν δύο λειτουργίες :

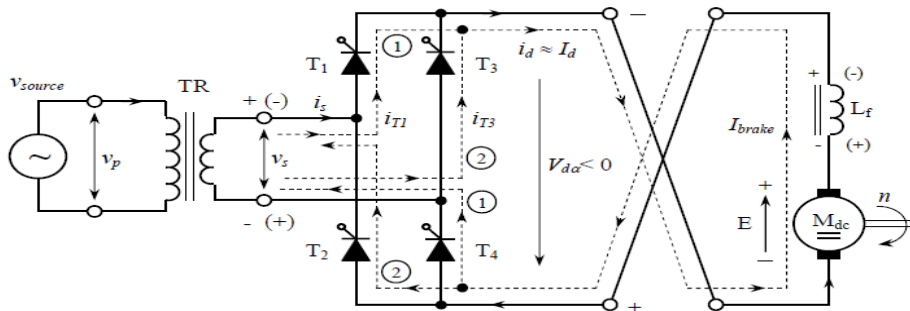
A) Λειτουργία ανόρθωσης  $0^\circ < \alpha < 90^\circ \rightarrow V_o > 0$

B) Λειτουργία αντιστροφή  $90^\circ < \alpha < 180^\circ \rightarrow V_o < 0$

Η γωνία έναυσης των πρέπει να είναι προσεκτικά επιλεγμένη για την αποφυγή των θυρίστωρ, λόγω της αύξησης της τιμής του ρεύματος  $I_d$  πάνω από τις επιτρεπτές τιμές. Η επιλογή της γωνίας στη λειτουργία του αντιστροφή γίνεται ως εξής :

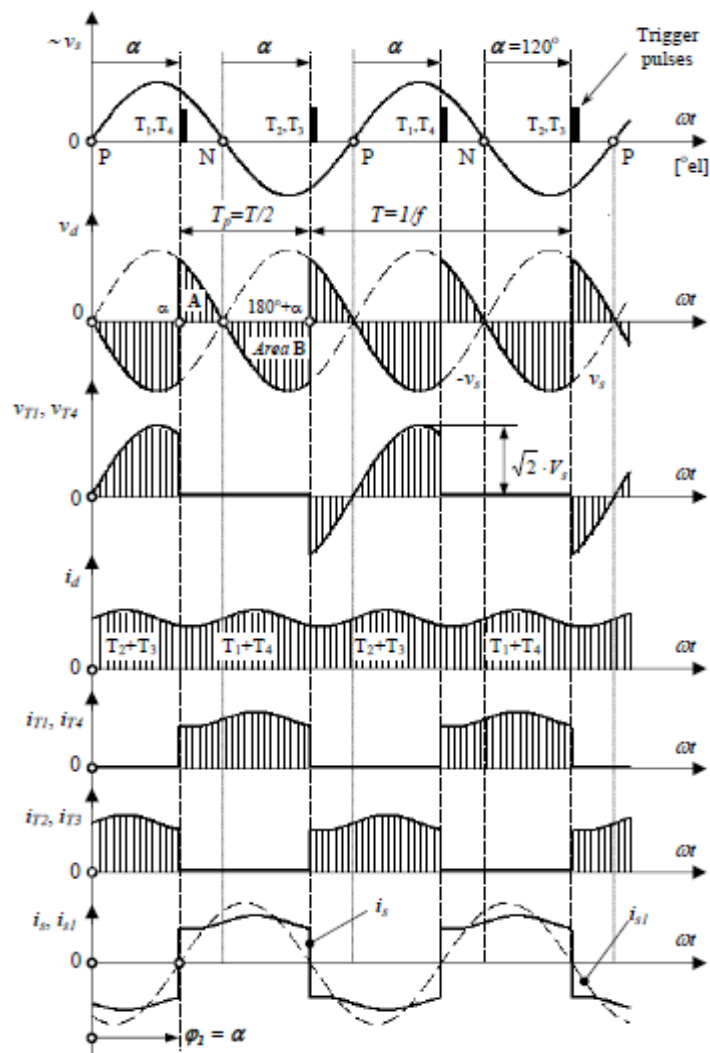
$$a_{inverter} = 180^\circ - a_{rectifier}$$

Εκτός από αυτή την προϋπόθεση ( $\alpha > 90^\circ$ ), είναι απαραίτητο το φορτίο να είναι συνδεδεμένο με τέτοιο τρόπο στην έξοδο του ανορθωτή ώστε η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος να διατηρείται σε θετική κατεύθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα.



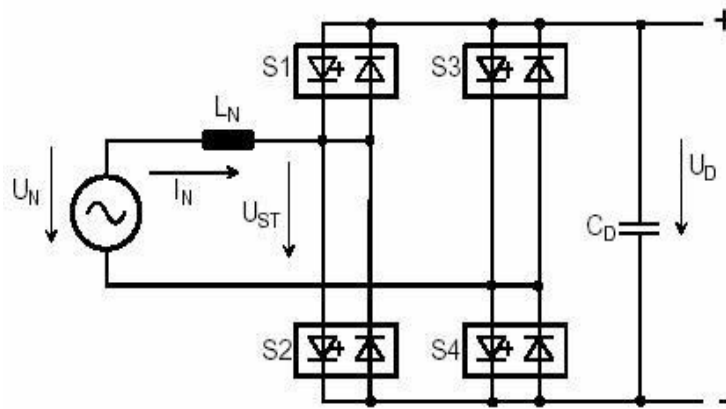
Σχήμα 4.19 Λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων κινητήρα

Στο Σχήμα 4.19 επιλέχθηκε ένας DC κινητήρας ως το φορτίο που τροφοδοτεί τον ανορθωτή. Θα μπορούσε να είναι η είσοδος ενός αντιστροφή τον οποίο τροφοδοτεί ένας AC κινητήρας. Οι κυματομορφές εξόδου του συστήματος (ως έξοδο εδώ εννοούμε την AC πλευρά του ανορθωτή), αλλά και εισόδου αντίστοιχα δίνονται στο παρακάτω σχήμα. Οι κυματομορφές αυτές αφορούν στην αντίστροφη λειτουργία του ανορθωτή του σχήματος καθώς έχει θεωρηθεί γωνία έναυσης  $120^\circ$ .



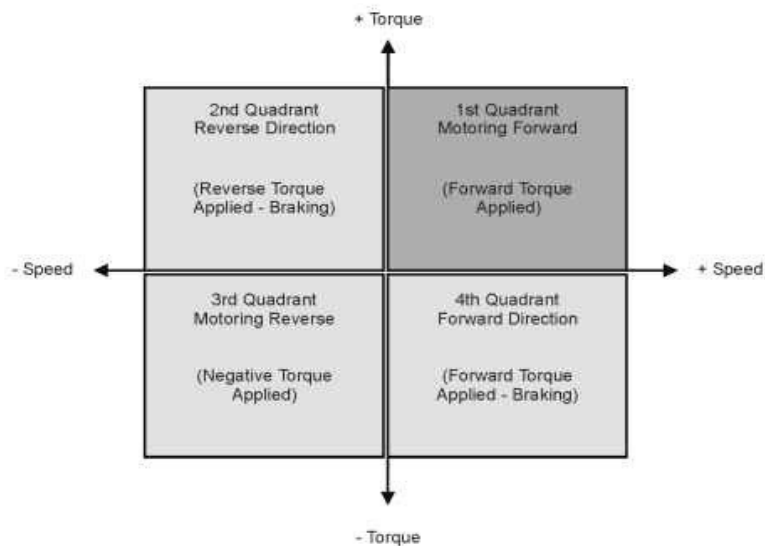
Σχήμα 4.20 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου και εξόδου κατά τη λειτουργία του ανορθωτή ως αντιστροφέας ( $\alpha = 120$  μοίρες)

Η δυνατότητα του ανορθωτή να λειτουργεί και ως αντιστροφέας ονομάζεται λειτουργία σε 2 τεταρτημόρια (1ο τεταρτημόριο ως ανορθωτής και στο 4ο ως αντιστροφέας). Για να μεταβεί ο ανορθωτής από τη μία φάση στην άλλη απαιτούνται μια σειρά από διαδικασίες. Αρχικά, αυξάνεται η γωνία έναυσης των θυρίστορ, ώστε να σταματήσει η ροή ρεύματος στον κινητήρα. Στη συνέχεια αποσυνδέεται ο κινητήρας και επανασυνδέεται αντίστροφα, όπως στο σχήμα, ώστε να έχουμε την επιθυμητή αντίστροφη πολικότητα. Αυτές οι διαδικασίες εισάγουν στο σύστημα μία σημαντική καθυστέρηση που επηρεάζει πολλές εφαρμογές. Στην πράξη για την αποφυγή αυτού του προβλήματος χρησιμοποιούνται ανορθωτές 4 τεταρτημορίων (4 Quadrants Rectifier). Στην ουσία πρόκειται για δύο μονοφασικούς ανορθωτές, όπως τους περιγράψαμε σε αντιπαράλληλη σύνδεση, όπως δείχνει το Σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.21 Ανορθωτής 4 Qs

Καθώς και στο Σχήμα 4.22 περιγράφεται η λειτουργία 4 τεταρτημορίων.



Σχήμα 4.22 Λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων

## 4.6 Τεχνικές πέδησης του κινητήρα

Υπάρχουν τρεις τεχνικές πέδησης του κινητήρα : α) η δυναμική πέδηση (dynamic brake), β) η πέδηση με αντιστροφή της τάσης τροφοδοσίας (plugging) και γ) η αναγεννητική πέδηση (regenerative braking).

### 4.6.1 Δυναμική πέδηση

Η πέδηση σε αυτή τη μορφή επιτυγχάνεται αποσυνδέοντας την τροφοδοσία και

βραχυκυκλώνοντας τα τυλίγματα του κινητήρα. Για την αποφυγή σφαλμάτων και φθορών λόγω των υψηλών ρευμάτων βραχυκύκλωσης που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία συνδέεται σε σειρά με τα τυλίγματα μια εξωτερική αντίσταση, με σκοπό τον περιορισμό αυτών των ρευμάτων, η οποία ονομάζεται αντίσταση δυναμικής πέδησης. Βέβαια, η απλότητα της μεθόδου αυτής συνοδεύεται και από ένα βασικό μειονέκτημα : η ενέργεια από την πέδηση του κινητήρα μετατρέπεται σε θερμότητα και σπαταλάται στην αντίσταση.

#### **4.6.2 Πέδηση με αναστροφή της τάσης τροφοδοσίας**

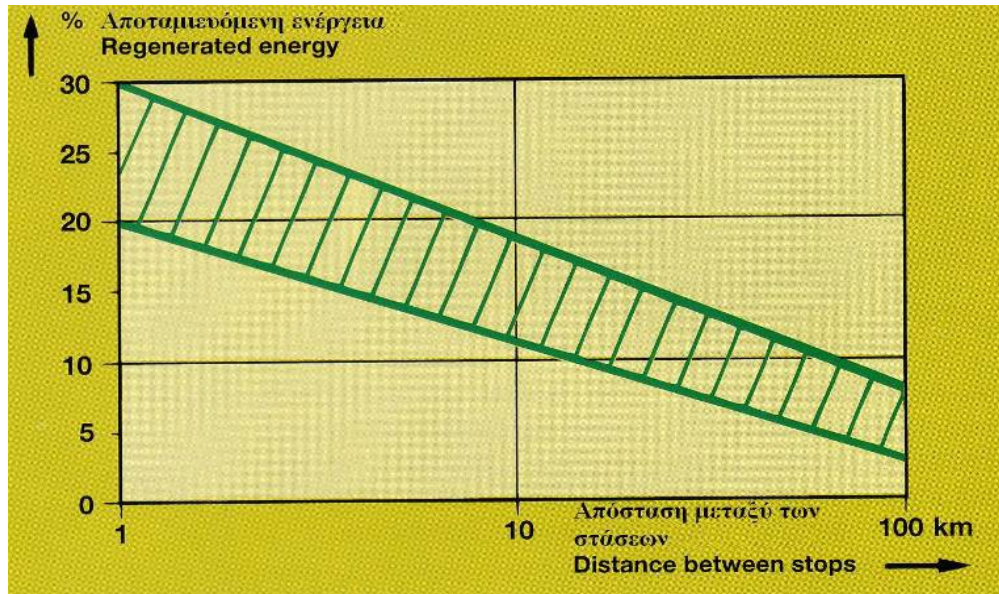
Σε αυτή τη μέθοδο η πέδηση επιτυγχάνεται αναστρέφοντας την τάση πηγής, ώστε η τροφοδοτούμενη τάση μαζί με την τάση εξ επαγωγής του κινητήρα να προκαλούν ανάστροφο ρεύμα στα τυλίγματα. Αυτό το ανάστροφο ρεύμα προκαλεί ανάπτυξη αρνητικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής, που με την σειρά της προκαλεί επιβράδυνση του κινητήρα. Αυτή η μέθοδος, αν και προσφέρει καλύτερη απόκριση πέδησης από τις άλλες μεθόδους, είναι και η πιο ενεργοβόρα.

#### **4.6.3 Αναγεννητική πέδηση**

Η αναγεννητική πέδηση είναι ο μηχανισμός, ο οποίος εκμεταλλευόμενος την επιβράδυνση ενός οχήματος ή ενός αντικειμένου μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε άλλη μορφή ενέργειας, όπου καταναλώνεται απευθείας ή αποθηκεύεται έως ότου χρειαστεί.

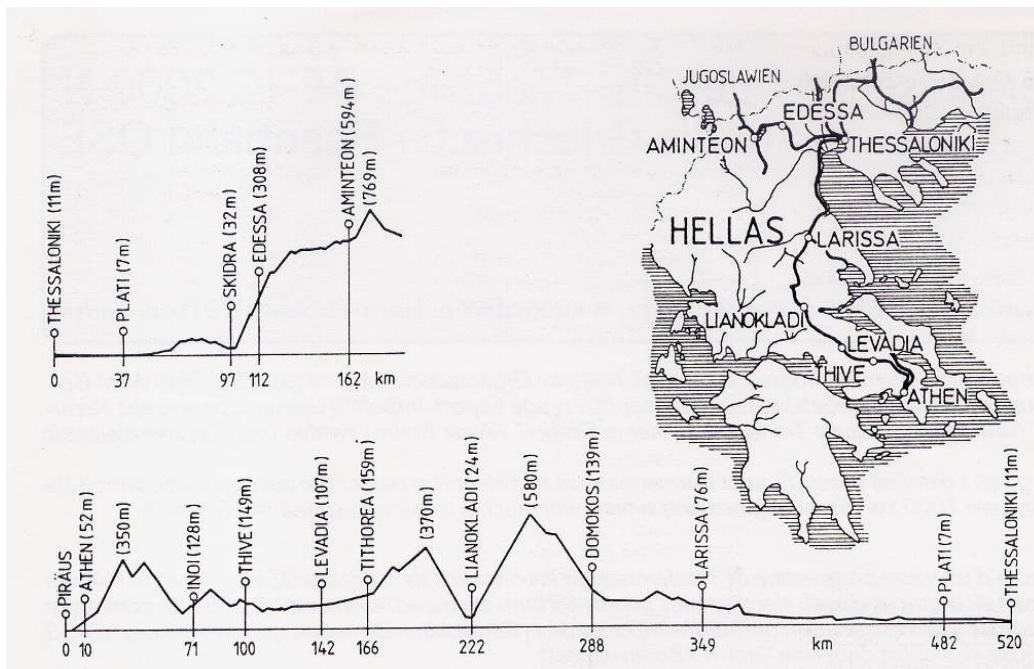
Είναι γνωστό ότι μία ηλεκτρική μηχανή έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως κινητήρας δεχόμενος ηλεκτρική ενέργεια στο στάτη και προσφέροντας κινητική στο δρομέα, είτε ως γεννήτρια δεχόμενος κινητική στο δρομέα και προσφέροντας ηλεκτρική στο στάτη. Η παραγόμενη αυτή ηλεκτρική ενέργεια δεν σπαταλάται σε αντιστάσεις, αλλά επιστρέφει στο δίκτυο. Για να επιτευχθεί αυτός ο τρόπος λειτουργίας πρέπει η μηχανή να λειτουργεί στο τέταρτο τεταρτημόριο. Η μηχανή ασκεί ροπή αντίθετη της κίνησης του δρομέα, στον οποίο ασκείται η περίσσεια κινητική ενέργεια. Έχουμε, δηλαδή, αρνητική ροπή στον άξονα.

Η μέθοδος αυτή είναι η βέλτιστη των τριών καθώς δεν υπάρχει απώλεια ενέργειας και επιτυγχάνεται ικανοποιητική απόκριση πέδησης. Όμως, η ανάγκη για εξωτερικά κυκλώματα διαχείρισης της επανακτώμενης ενέργειας την καθιστά πολύπλοκότερη στην υλοποίηση της και σημαντικά ακριβότερη. Κατά πόσο είναι συμφέρουσα αυτή η μέθοδος πέδησης εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους κατά μήκος μίας διαδρομής, αλλά και από τον αριθμό των στάσεων. Το παρακάτω σχήμα έρχεται να επιβεβαιώσει αυτό τον ισχυρισμό.



Σχήμα 4.23 Εξοικονόμηση ενέργειας από την αναγεννητική πέδη ανάλογα με τη συχνότητα των στάσεων

Βέβαια, σε κάθε περίπτωση, η αναγεννητική σαν μορφή πέδησης, δεν μπορεί να υπάρξει μόνη της. Αρχικά, θα πρέπει για λόγους ασφαλείας να υπάρχει και μία συμβατική πέδηση ασφαλείας σε περίπτωση αστοχίας. Επιπρόσθετα, στις χαμηλές ταχύτητες η αναγεννητική πέδη μειώνεται με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη μία άλλη μορφή ώστε να έλθει το όχημα σε πλήρη στάση. Σε περιπτώσεις ακόμα, έκτακτης ανάγκης που απαιτείται η όσο το δυνατό γρηγορότερη ακινητοποίηση του συρμού, θα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα δυναμικής πέδησης. Τέλος, το ποσό που επιστρέφει η αναγεννητική πέδηση εξαρτάται και από τη δυνατότητα του δικτύου να την απορροφήσει. Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 4.24) παρουσιάζεται το γεωγραφικό προφίλ της διαδρομής Αθήνα – Θεσσαλονίκη, στην οποία δεν υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας πέδησης, εκτός ενός μικρού ποσοστού στις αντιστάσεις θέρμανσης, λόγω της μη επάρκειας του δικτύου.



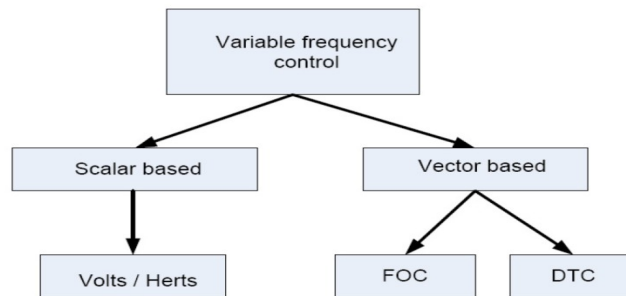
Σχήμα 4.24 Γεωγραφικό προφίλ διαδρομής Αθήνα - Θεσσαλονίκη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ

#### 5.1 Εισαγωγή

Σε ένα σύστημα οδήγησης μιας σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών, η ταχύτητα της μηχανής σχετίζεται άμεσα με τη συχνότητα τροφοδοσίας. Υπάρχουν δύο συνθήκες λειτουργίας του ελέγχου των συστημάτων οδήγησης των σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών : ο βαθμωτός έλεγχος (scalar control) και ο διανυσματικός έλεγχος (vector control), όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1 Διαχωρισμός μεθόδων ελέγχου των συστημάτων οδήγησης των PMSM

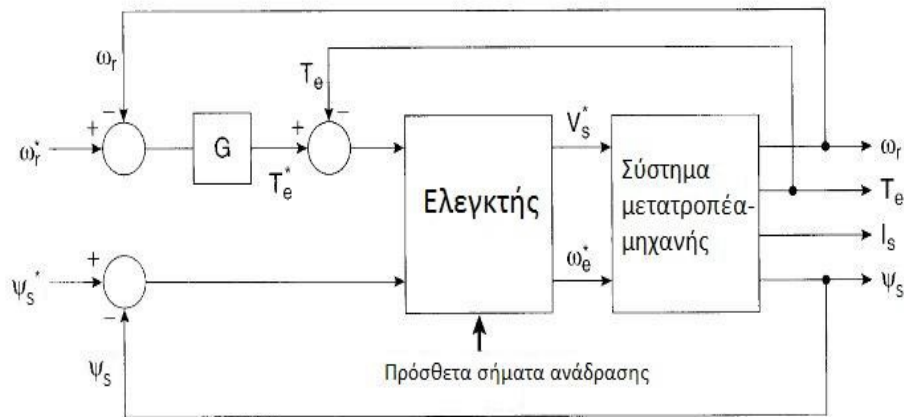
- **Βαθμωτός έλεγχος** : Αποτελεί την πιο απλή περίπτωση ελέγχου. Στόχος του είναι να ελέγξει την ταχύτητα του δρομέα διατηρώντας σταθερή τη ροή. Το βασικό μειονέκτημα αυτού του ελέγχου είναι ότι αγνοεί τη σύζευξη των εξισώσεων της μηχανής, κάνοντας προσεγγίσεις, οι οποίες τελικά υποβιβάζουν την απόκριση. Μια τεχνική έλεγχου αυτή της κατηγορίας είναι η μέθοδος διατήρησης του πηλίκου V/f σταθερού.
- **Διανυσματικός έλεγχος** : Ο διανυσματικός έλεγχος καλύπτει τις αδυναμίες του βαθμωτού ελέγχου. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται ο έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου (Field Oriented Control, FOC), ο άμεσος έλεγχος ροπής (Direct Torque Control, DTC) η γραμμικοποίηση μέσω ανατροφοδότησης (Feedback Linearization) και ο έλεγχος παθητικότητας (Passivity Based Control).

#### 5.2 Γενική δομή συστήματος ελέγχου ταχύτητας

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.2) παρουσιάζεται η γενική δομή ενός συστήματος ελέγχου ταχύτητας μιας μηχανής μόνιμων μαγνητών. Αποτελείται από το σύστημα μετατροπέα μηχανής, που έχει αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, τον ελεγκτή και μια ορισμένους βρόχους ανάδρασης με συγκεκριμένες μεταβλητές εισόδου και εξόδου. Το σύστημα δέχεται ως μεταβλητές εισόδου τη μηχανική ταχύτητα του δρομέα ( $\omega_r$ ) και τη μαγνητική ροή του στάτη ( $\psi_s$ ) και δίνει εξόδους τη

μηχανική ταχύτητα του δρομέα ( $\omega_r$ ), την ηλεκτρομαγνητική ροπή ( $T_e$ ), το ρεύμα του στάτη ( $I_s$ ) και η μαγνητική ροή του στάτη ( $\psi_s$ ).

Ο βρόχος ελέγχου της ταχύτητας παρουσιάζεται με την προσθήκη ενός εσωτερικού και προαιρετικού βρόχου ελέγχου ροπής. Η προσθήκη ενός εσωτερικού βρόχου ελέγχου με κατάλληλο κέρδος προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η γραμμικοποίηση του συστήματος, το βελτιωμένο εύρος ζώνης και την ικανότητα ελέγχου των σημάτων μέσα σε ασφαλή όρια. Οι εσωτερικού βρόχοι ελέγχου έχουν ταχύτερη απόκριση από τους εξωτερικούς.

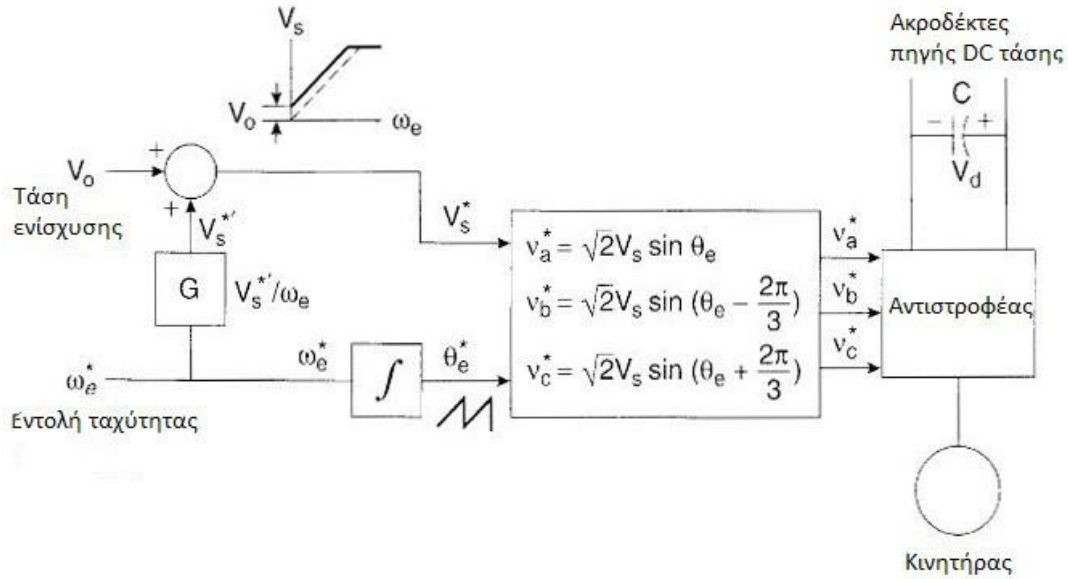


Σχήμα 5.2 Γενικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου

### **5.3 Βαθμωτός έλεγχος V/f ανοικτού βρόχου (Open loop V/f scalar control)**

Ο βαθμωτός έλεγχος αποτελεί, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, την πλέον απλουστευμένη προσέγγιση στον έλεγχο των μηχανών. Η ονομασία του οφείλεται στο γεγονός ότι στόχος του είναι η διατήρηση σταθερού λόγου τάσης προς συχνότητα. Με άλλα λόγια η ενεργός τιμή της βασικής αρμονικής της τάσης τροφοδοσίας της μηχανής μεταβάλλεται ανάλογα με τη συχνότητά της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διατηρείται σταθερή η τιμή της μαγνητικής ροής στο στάτη στη μόνιμη κατάσταση. Η μεθοδολογία ελέγχου παρουσιάζεται στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα.

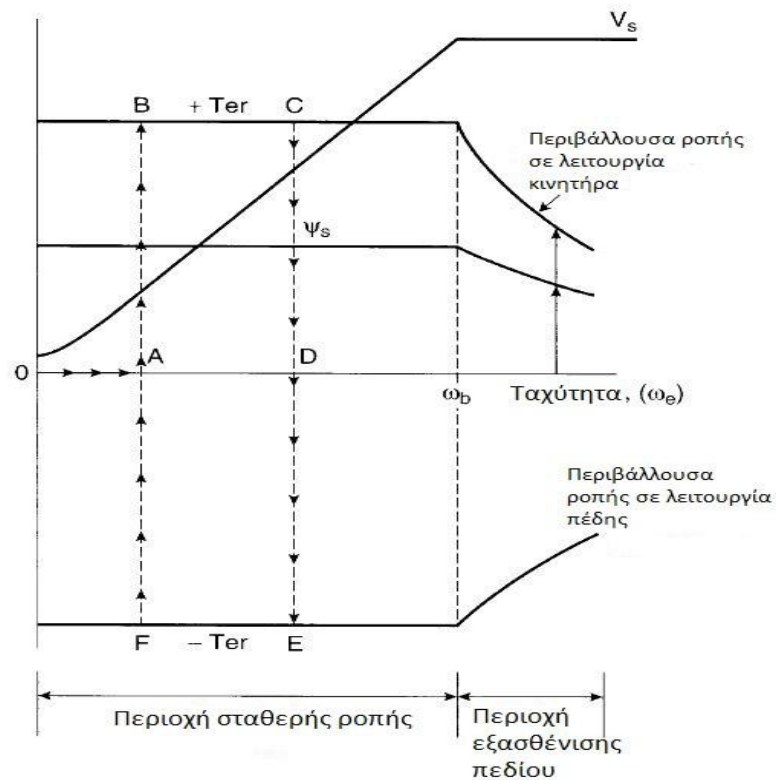




Σχήμα 5.3 Βαθμωτός έλεγχος V/f

Ο λόγος V/f υπολογίζεται από τις ονομαστικές τιμές τάσης και συχνότητας και πρέπει να παραμένει σταθερός, ώστε τα μαγνητικά χαρακτηριστικά της μηχανής να διατηρούνται σταθερά και να μην οδηγείται στον κόρο. Στις χαμηλές ταχύτητες, η τάση τροφοδοσίας μειώνεται και γίνεται συγκρίσιμη με την πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση του στάτη και για να αντισταθμιστεί αυτό το μειονέκτημα, η τάση πρέπει να είναι αυξημένη. Αντίστροφα, για συχνότητες τροφοδοσίας μεγαλύτερες της ονομαστικής, η συνθήκη V/f=σταθερό δεν μπορεί να ικανοποιηθεί, διότι δεν μπορεί να αυξηθεί η τάση στα τυλίγματα του κινητήρα, συνεπώς για λειτουργία πάνω από την ονομαστική λειτουργία η τάση διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή.

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι περιοχές λειτουργίας του συστήματος οδήγησης, τόσο για την περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, όσο και για την περίπτωση που αυτή λειτουργεί σε πέδη.



Σχήμα 5.4 Περιοχές λειτουργίας του συστήματος οδήγησης στον μονόμετρο έλεγχο

Τα πλεονεκτήματα είναι ότι έχει σχετικά χαμηλό κόστος και αποτελεί μια απλή λύση υλοποίησης. Από την άλλη πλευρά, στο μονόμετρο έλεγχο, όπως αλλιώς ονομάζεται, αγνοείται η σύζευξη των εξισώσεων της μηχανής, με αποτέλεσμα η απόκριση σε μεταβατικές καταστάσεις να μην είναι γρήγορη. Άλλο μειονέκτημα είναι πως η ροπή δεν ελέγχεται άμεσα και συνεπώς εξαρτάται από το εκάστοτε φορτίο που αναλαμβάνει ο κινητήρας. Γενικά, αυτή η στρατηγική έλεγχου δεν είναι σταθερή γιατί δεν εγγυάται το συγχρονισμό του δρομέα με τη συχνότητα του στάτη.

### 5.4 Διανυσματικός έλεγχος ή έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου (Field Oriented Control, FOC)

Όπως έχει αναφερθεί, ο διανυσματικός έλεγχος καλύπτει τις “αδυναμίες” του βαθμωτού ελέγχου. Αναμφισβήτητα, ο διανυσματικός έλεγχος και η αντίστοιχη επεξεργασία σημάτων ανάδρασης είναι πολύπλοκες διεργασίες που καθιστούν επιτακτική τη χρήση μικροϋπολογιστών και ισχυρών επεξεργαστών ψηφιακού σήματος. Όμως, τα οφέλη από τη χρήση του καθιστούν το διανυσματικό έλεγχο τον πρότυπο τρόπο ελέγχου που χρησιμοποιείται σε συστήματα οδήγησης AC κινητήρων.

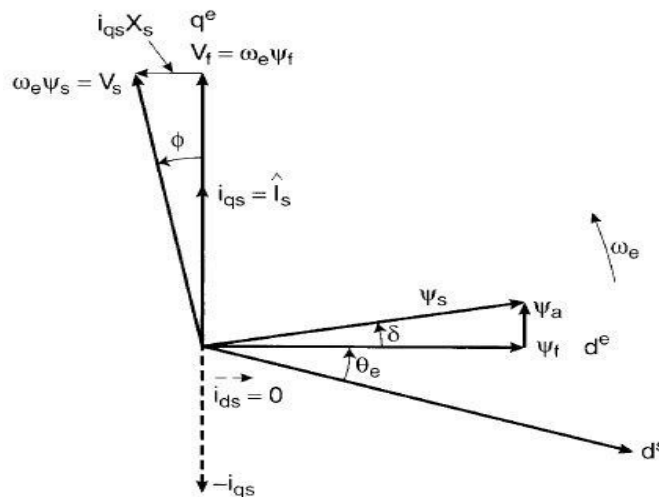
Η γενική αρχή του διανυσματικού ελέγχου βασίζεται στη μετατροπή των μεγεθών από

ένα στατικό σύστημα αναφοράς τριών αξόνων a – b – c σε ένα ορθοκανονικό σύστημα δύο αξόνων d – q, το οποίο στρέφεται με το σύγχρονο αριθμό στροφών και του οποίου ο ευθύς άξονας παραμένει διαρκώς ευθυγραμμισμένος με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα. Η μετατροπή αυτή γίνεται μέσω του μετασχηματισμού Park, που μελετήσαμε στο Κεφάλαιο 3. Με τον τρόπο αυτό, το ρεύμα διαχωρίζεται σε δύο συνεχείς συνιστώσες, κάθετες μεταξύ τους, με την πρώτη ( $i_{ds}$ ) να ευθύνεται για τον έλεγχο της μαγνητικής ροής της μηχανής και τη δεύτερη ( $i_{qs}$ ) για τον έλεγχο της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

Στους DC κινητήρες το πεδίο ελέγχεται χωριστά από το ρεύμα διέγερσης και η ροπή από το ρεύμα τυμπάνου. Τα δύο ρεύματα είναι ηλεκτρικά και μαγνητικά αποζευγμένα. Αντίθετα, στους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος το ρεύμα του στάτη δύναται να επηρεάσει τόσο το πεδίο, όσο και την αναπτυσσόμενη ροπή. Η απόζευξη γίνεται με τον τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω, δηλαδή με την ανάλυση του ρεύματος  $I_s$  σε δύο συνιστώσες. Έτσι, ο έλεγχος της μηχανής γίνεται ισοδύναμος με μιας ισοδύναμης DC ξένης διέγερσης. Το διάνυσμα του ρεύματος του στάτη, που είναι το γεωμετρικό άθροισμα των ρευμάτων των δύο αξόνων d-q στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα έχει μια διαφορά φάσης με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα, η οποία λέγεται γωνία ροπής (torque angle) και είναι σταθερή για μια δεδομένη ροπή. Παρακάτω παρουσιάζεται το διανυσματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου (Σχήμα 5.5), όπου έχει αμεληθεί η αντίσταση του στάτη  $R_s$ . Σε περίπτωση που η γωνία ροπής είναι  $90^\circ$  ή το ρεύμα  $i_{ds}$  είναι 0, η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται στον κινητήρα είναι :

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

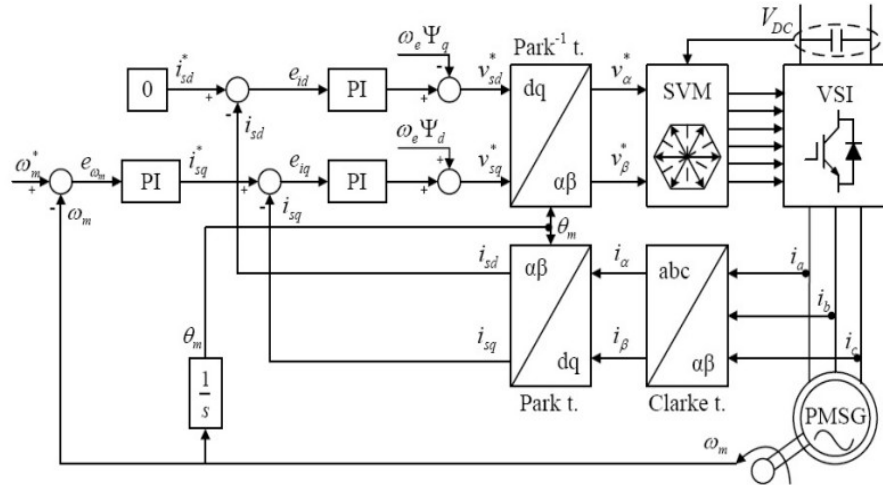
όπου  $\psi_f$  το μέτρο του διανύσματος χώρου της ροής των μαγνητών του δρομέα.



Σχήμα 5.5 Διανυσματικό διάγραμμα FOC

Το δομικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου πατουσιάζεται στο σχήμα (Σχήμα

5.6).



Σχήμα 5.6 Δομικό διάγραμμα διανυσματικού ελέγχου

Όπως φαίνεται στο σχήμα υπάρχουν τρεις ελεγκτές PI. Ο ένας είναι για το μηχανικό σύστημα (ταχύτητα) και οι άλλοι δύο για το ηλεκτρικό σύστημα (d, q ρεύματα). Όλοι οι ελεγκτές ρευμάτων και ταχύτητας έχουν λάβει υπόψη τα όρια της ροπής και της τάσης. Όταν οι τιμές τους πλησιάσουν τα όρια αυτά οι ελεγκτές φροντίζουν ώστε αυτά να μην ξεπεραστούν. Αυτό δημιουργεί ένα πρόβλημα, μια υπέρβαση των τιμών του ρεύματος από τον ολοκληρωτή. Ο ολοκληρωτής απορροφά το σφάλμα κατά τη διάρκεια της μέγιστης τάσης εξόδου και όταν το ρεύμα φθάνει τη μέγιστη τιμή καταστρέφεται. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιείται ένας βρόχος anti – windup. Η τιμή αναφοράς της ροπής ή της τάσης χρησιμοποιείται για την ενημέρωση του ολοκληρωτικού όρου του ελεγκτή. Όσο οι τιμές βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων, ο βρόχος επιστρέφει μηδενική τιμή στον ολοκληρωτή. Όταν, όμως, αυτά ξεπεραστούν, μια αναλογική τιμή της διαφοράς στέλνεται στον ολοκληρωτή, ώστε η απόκρισή του να είναι ταχύτερη.

Οι τεχνικές που βασίζονται στη μέθοδο του διανυσματικού ελέγχου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

- Άμεσος διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του δρομέα
- Έμμεσος διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο του δρομέα

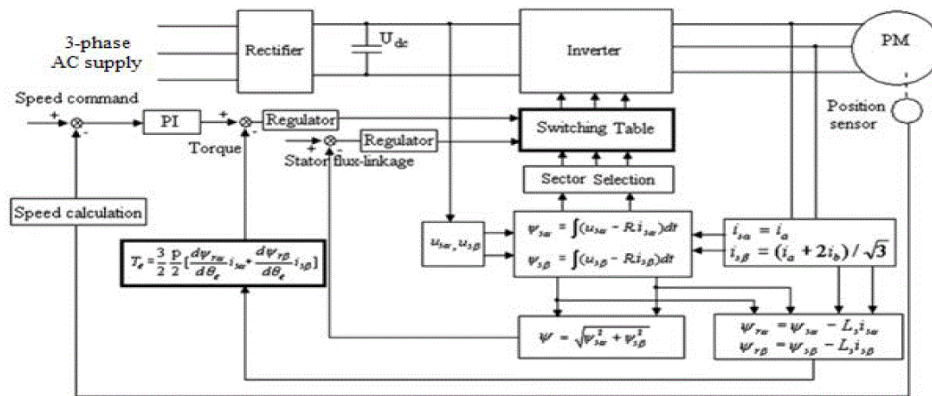
Η ουσιαστική διαφορά των δύο τεχνικών έγκειται στον τρόπο υπολογισμού της γωνίας του διανύσματος της ροής του δρομέα στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Στον άμεσο αυτό γίνεται απευθείας με χρήση ανατροφοδότησης, ενώ στον έμμεσο εκτιμάται βάσει της εντολής ταχύτητας, δηλαδή με έμπροσθεν ανατροφοδότηση εισόδου.

Για την υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου απαιτούνται τα δύο από τα τρία φασικά ρεύματα του κινητήρα (γιατί το άθροισμα σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα είναι 0), η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα και η ταχύτητα (μπορεί και η θέση) του δρομέα (απαιτείται στροφόμετρο). Στην περίπτωση του κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, η

ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί από τους αισθητήρες Hall. Μιλάμε πλέον για σύστημα κλειστού βρόχου, σε αντίθεση με το βαθμωτό έλεγχο που στην πιο απλή του περίπτωση πρόκειται για σύστημα ανοιχτού.

### 5.5 Άμεσος έλεγχος ροπής (Direct Torque Control, DTC)

Στον άμεσο έλεγχο ροπής, ελέγχουμε άμεσα τη ροπή και τη μαγνητική ροή του ηλεκτροκινητήρα. Το βασικό χαρακτηριστικό του είναι η ταχύτερη απόκριση σε οποιαδήποτε μεταβολή του φορτίου. Μπορεί να θεωρηθεί και ως μία απλοποιημένη έκδοση του ελέγχου FOC προσανατολισμένη στο πεδίο του στάτη και χωρίς βρόχους ελέγχου του ρεύματος. Η διαφορά με τις προηγούμενες τεχνικές ελέγχου έγκειται στο ότι η διακοπτική συχνότητα στον άμεσο έλεγχο ροπής δεν είναι προκαθορισμένη και η κατάσταση των διακοπτικών στοιχείων εξαρτάται από το εκάστοτε φορτίο του κινητήρα. Πρόκειται, βέβαια, για ένα σύστημα κλειστού βρόχου, όπου οι τιμές της μαγνητικής ροής και της ροπής υπολογίζονται και συγκρίνονται με τις τιμές αναφοράς τους και τα σφάλματα εισέρχονται σε δύο ελεγκτές υστέρησης. Το δομικό διάγραμμα του άμεσου ελέγχου ροπής ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.7 Μπλοκ διάγραμμα DTC

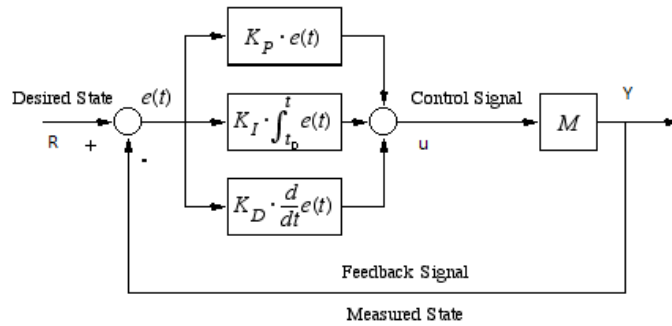
Στα μειονεκτήματα του DTC βρίσκονται οι υψηλές διακυμανσεις της ροπής, της ροής και του ρεύματος, η μεταβλητή διακοπτική συχνότητα και η απαίτηση για μικρό χρόνο δειγματοληψίας. Συγκρινόμενος με το διανυσματικό έλεγχο εμφανίζει πλεονεκτήματα αλλά και αδυναμίες. Στα πλεονεκτήματα βρίσκεται το γεγονός ότι στον DTC δεν απαιτείται μετατροπή των ρευμάτων μέσω του μετασχηματισμού Park, αφού για την υλοποίησή του απαιτούνται τα φασικά ρεύματα του κινητήρα (δύο από τα τρία καθώς στην τριφασική συμμετρία το άθροισμα και των τριών δίνει 0), και ως εκ τούτου δεν απαιτείται γνώση της θέσης του δρομέα. Επιπλέον, η τεχνική DTC είναι λιγότερο ευαίσθητη σε μεταβολές των παραμέτρων του κινητήρα. Στα αρνητικά έχουμε την όχι και τόσο καλή συμπεριφορά του στις χαμηλές ταχύτητες, αλλά και τον χειρότερο από τον FOC έλεγχο της ταχύτητας. Απάντηση σε αυτά τα προβλήματα δίνει η μέθοδος DTC – SVM, η οποία λειτουργεί με σταθερή διακοπτική συχνότητα. Η ιδιότητα αυτή βελτιώνει τις επιδόσεις του συστήματος οδήγησης μειώνοντας τις ταλαντώσεις ροπής και πεδίου

και προσφέροντας αξιόπιστη εκκίνηση και λειτουργία σε χαμηλές στροφές.

## 5.6 Ο ελεγκτής τύπου PID

Ένας ελεγκτής τύπου PID αποτελείται ουσιαστικά από τρία χαρακτηριστικά. Κατά την είσοδο, δηλαδή, ενός μεγέθους σε έναν ελεγκτή PID πραγματοποιούνται τρεις έλεγχοι : ο αναλογικός (Proportional), ο ολοκληρωτικός (Integrational) και ο διαφορικός (Differential). Σήμερα αποτελεί την πιο κοινή μορφή ανατροφοδότησης και ένα απαραίτητο συστατικό στα καταναμημένα συστήματα ελέγχου. Η εξέλιξη του συμβαδίζει με την εξέλιξη των μικροϋπολογιστικών συστημάτων, καθώς σε αυτά βασίζονται όλοι οι ελεγκτές PID.

Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή. Αρχικά υπολογίζεται το σφάλμα παρακολούθησης (e), δηλαδή η διαφορά, της επιθυμητής τιμής εισόδου (R) του προς έλεγχο μεγέθους ως προς την πραγματική τιμή εξόδου (Y). Αυτό στέλνεται στον ελεγκτή, οποίος υπολογίζει την παράγωγο και το ολοκλήρωμα αυτής της τιμής και δίνει μία τιμή στην έξοδό του (u). Το σήμα εξόδου στέλνεται στο εκάστοτε σύστημα που ελέγχουμε και λαμβάνουμε μία νέα έξοδο Y, η οποία ανατροφοδοτείται στον ελεγκτή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Το δομικό διάγραμμα του PID ελεγκτή παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8 Δομικό διάγραμμα PID ελεγκτή

Το σήμα εξόδου του ελεγκτή, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα προκύπτει από τη σχέση :

$$u = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς του :

$$U = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

Ο αναλογικός έλεγχος (P) βοηθά στη βελτίωση της συμπεριφοράς των συστημάτων στην μεταβατική αλλά και στη μόνιμη κατάσταση. Έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση

του χρόνου ανύψωσης και την μείωση, και μερικές φορές την εξάλειψη, του μόνιμου σφάλματος.

Ο ολοκληρωτικός έλεγχος (I) βοηθά στη βελτίωση της συμπεριφοράς στη μόνιμη κατάσταση εξαλείφοντας τυχόντα σφάλματα, προκαλώντας όμως μεγαλύτερη αστάθεια κατά τη μεταβατική κατάσταση, αυξάνοντας τον αριθμό των των ταλαντώσεων μέχρι το σύστημα να έρθει σε ισορροπία.

Σε αυτό δίνει λύση ο διαφορικός έλεγχος, ο οποίος έχει ως στόχο την αύξηση της ευστάθειας του συστήματος κατά τη μεταβατική κατάσταση, αλλά και κατά τη μόνιμη μειώνοντας την υπερύψωση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σιδηρόδρομος είναι ένα πολυδοκιμασμένο και αρκετά παλιό μέσο μεταφοράς, καθώς για περισσότερο από έναν αιώνα αποτέλεσε τον κυρίαρχο τρόπο χερσαίας μεταφοράς στο μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη, ιδίως στον τομέα των εμπορευμάτων. Παρ' όλα αυτά, δεν μπορεί να θεωρηθεί παρωχημένο, αφού εξελίσσεται και βελτιώνεται συνεχώς. Αποτελεί μία από τις οικονομικότερες μεθόδους μεταφοράς, με εξαίρεση τη θαλάσσια, και αυτό το γεγονός οδήγησε στην εστίαση των ερευνών για τη συνεχή βελτίωσή του.

Βέβαια, οι ανταγωνιστές του σιδηροδρόμου είναι σε θέση να καλύπτουν σε καλύτερο βαθμό κάποιες από τις ανάγκες στις μεταφορές. Η δυνατότητά τους αυτή, είναι πιθανό και λογικό να μεταβάλλει το ρόλο του σιδηροδρόμου σε περισσότερο εξειδικευμένης φύσης. Η λειτουργία του, κυρίως, θα εστιάζεται στη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων εμπορευμάτων (κυρίως χύδην φορτίων και εμπορευματοκιβωτίων), μεγάλου αριθμού επιβατών, καθώς και στις μεγάλης ταχύτητας επιβατικές υπηρεσίες.

Στην παρούσα εργασία, εστίασα με στη σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη, που τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να εισέρχεται στις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι ότι απουσιάζει το τύλιγμα διέγερσης, αφού το μόνιμο μαγνητικό πεδίο που δημιουργούσε, όταν τροφοδοτούνταν με συνεχές ρεύμα, αντικαταστάθηκε από το πεδίο που δημιουργούν οι μόνιμοι μαγνήτες. Όπως, είδαμε το γεγονός αυτό προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, όπως η μεγαλύτερη απόδοση (σχεδόν μισές απώλειες) συγκριτικά με τη συμβατική μέθοδο ηλεκτρικής έλξης, που είναι ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας επαγωγής (Induction Motor) και μικρότερο μέγεθος.

Σε ό,τι αφορά την ηλεκτροδότηση, η επικρατούσα μορφή είναι το σύστημα AC 25 kV / 50 Hz μονοφασικού ρεύματος, το οποίο υποβιβάζεται μέσω ενός Μ/Σ και οδηγείται στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, που αποτελούνται κυρίως από IGBTs και GTOs. Αρχικά το εναλλασσόμενο ρεύμα της τροφοδοσίας ανορθώνεται μέσω μίας διάταξης που ονομάζεται ανορθωτής 4 Qs, καθώς έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια, επιστρέφοντας ενέργεια στο δίκτυο, όταν η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια (αναγεννητική πέδη). Στη συνέχεια οδηγείται σε ένα τριφασικό αντιστροφέα και τροφοδοτεί τον κινητήρα. Επιπρόσθετα, είδαμε ότι για τον έλεγχο του κινητήρα σε αυτού του είδους τις εφαρμογές ενδείκνυται ο διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control).

Αναφορικά με την αναγεννητική πέδηση, επισημάναμε ότι αποτελεί μονόδρομο για τα συστήματα ηλεκτροκίνητων τρένων, καθώς προσφέρει ασφάλεια και οικονομία ενέργειας, ανάλογα, βέβαια, με τη μορφολογία του εδάφους και τη συχνότητα των στάσεων. Παρατηρώντας το γεωγραφικό προφίλ της χώρας μας και τη συχνότητα των στάσεων στις διάφορες διαδρομές, η αναβάθμιση του δικτύου ηλεκτροδότησης θεωρείται αναγκαία.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [el.wikipedia.org/wiki/Σιδηρόδρομος](http://el.wikipedia.org/wiki/Σιδηρόδρομος)
- [2] <http://iceal.wikidot.com/mek-vasi>
- [3] [www.railway-technical.com/tract-02.shtml](http://www.railway-technical.com/tract-02.shtml)
- [4] <http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/steam1.htm>
- [5] <http://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive/motor-types/pmsm>
- [6] [www.sumidacrossing.org/LayoutElectricity/ModelTrainPower/DCTrainMotors/](http://www.sumidacrossing.org/LayoutElectricity/ModelTrainPower/DCTrainMotors/)
- [7] [http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/roads/Roads-g\\_files/Edu-g\\_files/Edu-72-g\\_files/1-Intro.pdf](http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/roads/Roads-g_files/Edu-g_files/Edu-72-g_files/1-Intro.pdf)
- [9] <http://www.railsystem.net/third-rail/>
- [10] Sheilah Frey, “Railway Electrification Systems and Engineering”, Whitw Word Publications, Delhi, 2012
- [11] Adam Wawrzyniak, “Analysis of the tracion drive work with permanent magnet synchronous motor”, Technical University of Lodz, Lodz, 2009
- [12] Χ. Ρετινάς, Γ. Τσακιρόπουλος, “Ηλεκτρονικοί μετατροπέε ισχύος σε σιδηροδρομικές εφαρμογές”, Αθήνα, 2009
- [13] Π. Βαγδάτης, “Συστήματα ηλεκτρικής κίνησης στην ηλεκτρική έλξη και εφαρμογή τους στην Ελλάδα”, Δ.Π.Θ. , 2006
- [14] Στέφανος Ν. Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2000
- [15] Nicholas N. Rivera, “Permanent Magnet DC Traction Motor With Reconfigurable Winding Control”, Washington, 2007
- [16] Juliette Soulard, “System Analysis of Permanent Magnet Traction Drives”, KTH – Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012
- [17] Τσούρτης Γιώργος, “μελέτη κατασκευαστικής και λειτουργικής συμπεριφοράς του συστήματος ηλεκτροκίνητου σιδηροδρόμου – Ηλεκτροκίνηση των Ελληνικών τραινών – Δομή, Τροφοδοσία, Λειτουργία, Εξομοίωση μέσω Η/Υ”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014

[18] Βίκτωρας Αλκαλάης, “Ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και ανάλυση σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη οδηγούμενο από ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015

[19] Δημήτριος Γυπαράκης, “Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικού μετατροπέα με στόχο τον έλεγχο κινητήρα μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2012

[20] Αναστασία Σκολαρίκη, “Σχεδίαση και Ανάλυση Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών 16 kW για Εφαρμογή Ηλεκτροκίνησης & Συγκριτική Μελέτη Δύο Εναλλακτικών Γεωμετριών Δρομέα”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2014

[21] Μιχαήλ Μίχαλος, “Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα Τρένων”, Διπλωματική Εργασία, ΤΕΙ Καβάλας, 2010

[22] Ι. Ρουμελιώτης, Ι. Τσαλαμέγκας, “Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία”, Τόμος , Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα, 2014

[23] John J. Grainger, William D. Stevenson, “Power System Analysis”, International Editions, 1994