



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

**Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες:
Κατασκευή – αρχή λειτουργίας - έλεγχος**

**Brushless DC motor : Construction – working
principle – control**

Αντώνης Θωμόπουλος

A.M : 7487

Επιβλέπων καθηγητής: Χαραλαμπάκος Βασίλης

ΠΑΤΡΑ 2022

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή **Θωμόπουλος Αντώνης** που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει σκοπού να παρουσιάσει με σαφήνεια το τρόπο με τον οποίο λειτουργεί και ελέγχεται ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται το φαινόμενο του ηλεκτρομαγνητισμού, καθώς αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό κομμάτι για τη λειτουργία όλων των ηλεκτρικών μηχανών. Μέσα στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα μαγνητικά πεδία που εφαρμόζονται σε ρευματοφόρους αγωγούς καθώς και οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα όταν βρίσκεται μέσα σε ένα τέτοιο πεδίο, ορίζουμε τα μεγέθη μαγνητική ροή και μαγνητική επαγωγή, εξετάζουμε τις μαγνητικές ιδιότητες της ύλης και αναλύουμε αυτές που έχουν οι μόνιμοι μαγνήτες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και των βηματικών κινητήρων και αναλύουμε την αρχή λειτουργίας τους.

Στο τρίτο και στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφουμε τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, την αρχή λειτουργίας και των έλεγχο των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες.

Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο κάνουμε μια σύγκριση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC) με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και τους επαγωγικούς κινητήρες, αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που έχουν οι BLDC κινητήρες και τις εφαρμογές τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
-----------------------	---

Κεφάλαιο 1: Βασικές γνώσεις του μαγνητισμού

1.1. Εισαγωγή.....	6
1.2. Μαγνητικό πεδίο.....	6
1.2.1. Ορισμός του μαγνητικού πεδίου.....	6
1.2.2. Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.....	8
1.2.3. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου.....	9
1.3. Μαγνητική επαγωγή – Μαγνητική ροή.....	10
1.4. Μαγνητικές δυνάμεις.....	12
1.4.1. Δύναμη σε κινούμενο φορτίο.....	12
1.4.2. Δύναμη εξ επαγωγής ή δύναμη Laplace	14
1.4.3. Μαγνητική δύναμη ανάμεσα σε δύο παράλληλους ρευματοφόρους αγωγούς.....	15
1.5. Ο νόμος του Ampere.....	17
1.6. Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.....	18
1.6.1. Ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής.....	18
1.6.2. Νόμος του Faraday	19
1.7. Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης.....	20
1.8. Μαγνητική υστέρηση σιδηρομαγνητικών υλικών.....	22
1.9. Απώλειες δινορευμάτων.....	24
1.10. Μόνιμοι μαγνήτες.....	25

Κεφάλαιο 2: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος και βηματικοί κινητήρες

2.1. Εισαγωγή στις μηχανές συνεχούς ρεύματος.....	27
2.2. Κατασκευαστικά στοιχεία μηχανών συνεχούς ρεύματος	28
2.3. Αρχή λειτουργίας κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	32
2.4. Είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	33
2.4.1. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης και παράλληλης διέγερσης.....	33
2.4.2. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς.....	37
2.4.3. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης.....	40
2.5. Ροή ισχύος και απώλειες στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.....	43
2.6. Βηματικοί κινητήρες	45
2.6.1. Εισαγωγή στους βηματικούς κινητήρες.....	45
2.6.2. Δομή ενός βηματικού κινητήρα.....	45
2.6.3. Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα.....	47

Κεφάλαιο 3: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC)

3.1. Εισαγωγή στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες	49
3.2. Κατασκευαστικά μέρη BLDC.....	50

3.3. Αρχή λειτουργίας.....	55
3.4. Κατηγορίες κινητήρων BLDC	57
3.5. Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας κινητήρων BLDC.....	62

Κεφάλαιο 4 : Έλεγχος κινητήρα BLDC

4.1. Έλεγχος θέσης και ταχύτητας των κινητήρων BLDC με τη χρήση αισθητήρων.....	63
4.1.1. Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου (Hall sensors).....	63
4.1.2. Αισθητήρες ταχύτητας μεταβλητής απροθυμίας (VR).....	65
4.2. Συμβατική μέθοδος ελέγχου με τη χρήση αισθητήρων.....	66
4.3. Τεχνικές και πρόοδοι στον έλεγχο χωρίς αισθητήρες.....	69
4.3.1. Μέθοδος ανίχνευσης μηδενικής διέλευσης back-EMF (ανίχνευση τελικής τάσης).....	71
4.3.2. Τρίτη αρμονική ενσωματωμένη τάση.....	73
4.3.3. Μέθοδος ανίχνευσης αγωγιμότητας διόδων ελεύθερου τροχού (Ανίχνευση τερματικού ρεύματος).....	75
4.3.4. Μέθοδος ολοκλήρωσης της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (Back-EMF).....	76
4.4. Μέθοδοι βασισμένη στη PWM.....	77
4.4.1. Συμβατική τεχνική PWM 120 ⁰	77
4.4.2. Τεχνική εικονικής εξάλειψης ουδέτερου σημείου.....	78
4.4.3. Τεχνική για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας ή χαμηλής τάσης.....	81
4.4.4. Τεχνική για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας ή υψηλής τάσης.....	82
4.4.5. Τεχνική για εφαρμογές μικρής ισχύος.....	83
4.4.6. Τεχνική PWM ελεγχόμενου συνεχούς ρεύματος (έλεγχος ρεύματος υστέρησης).....	84

Κεφάλαιο 5 : Συγκριτική ανάλυση BLDC με άλλους κινητήρες

5.1. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα BLDC.....	86
5.2. Σύγκριση κινητήρα BLDC με εναλλασσόμενους επαγωγικούς κινητήρες και με κινητήρες DC με ψήκτρες.....	87
5.3. Εφαρμογές κινητήρων BLDC.....	89

Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1^ο

Βασικές γνώσεις του μαγνητισμού

1.1. Εισαγωγή

Από την αρχαιότητα ο μαγνητισμός εμφανίστηκε από την ύπαρξη ενός ορυκτού, του λεγόμενου μαγνητίτη (Fe_3O_4), το οποίο είχε την ιδιότητα να έλκει μικρά κομμάτια σιδήρου. Η ιδιότητα που έχει το συγκεκριμένο ορυκτό ονομάστηκε μαγνητισμός. Αργότερα, με την ανακάλυψη του ηλεκτρικού ρεύματος, αποδείχθηκε από το πείραμα του *Ερστρετ* (*Oersted*) ότι το μαγνητικό πεδίο δεν εμφανίζεται μόνο γύρω από κάποιο μαγνήτη. Στο συγκεκριμένο πείραμα τοποθετήθηκε μια μαγνητική βελόνα παράλληλα με έναν ευθύγραμμο αγωγό τον όποιον όταν τον διαπερνούσε το ηλεκτρικό ρεύμα, η βελόνα εκτρέποταν από τη θέση ισορροπίας της, καθώς τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία δημιουργούσαν ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό. Στη συνέχεια άλλα πειράματα που έγιναν από τους *A.M. Ampere* και *D.F. Aragon* απέδειξαν ότι μια σπείρα τυλιγμένη σε έναν ρευματοφόρο αγωγό μπορεί να δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο. Έπειτα, η πειραματική εργασία που έκανε ο *Maxwell* θεμελίωσε τις αρχές της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας διατυπώνοντας 4 βασικές εξισώσεις:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.2)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

Η θεωρία των μαγνητικών πεδίων και αποτελεί ένα σημαντικό κεφάλαιο για την μελέτη, τη σχεδίαση και υλοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών καθώς η αλληλεπίδραση του αποτελεί μέσο για τη σύζευξη και μεταφορά ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικών και μηχανικών συστημάτων.

1.2. Μαγνητικό πεδίο

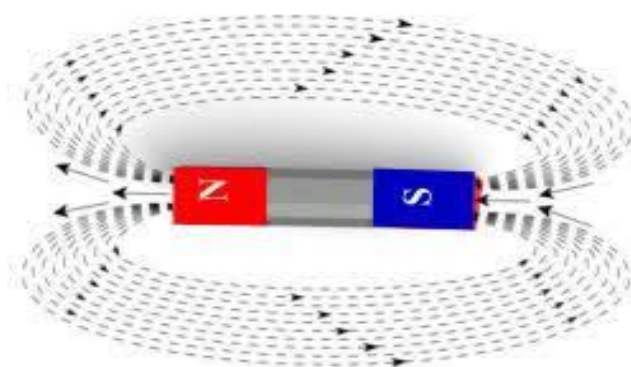
1.2.1. Ορισμός του μαγνητικού πεδίου

Όταν μιλάμε για ένα μαγνητικό πεδίο αναφερόμαστε σε ένα χώρο στον οποίο εμφανίζονται μαγνητικές δυνάμεις που οφείλονται από την ύπαρξη κινούμενων σωματιδίων. Αυτός ο χώρος μπορεί να προέρχεται είτε από έναν φυσικό μαγνήτη είτε

από έναν ρευματοφόρο αγωγό. Ως φυσικό μέγεθος έχει διπολική φύση καθώς αυτό συνεπάγεται από την ύπαρξη 2 μαγνητικών πόλων, τον βόρειο (N) και τον νότιο (S) πόλο, οι οποίοι είναι αντίθετοι μεταξύ τους. Ανάμεσα στους δύο πόλους ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις οι οποίες άλλοτε έλκουν και άλλοτε απομακρύνουν κάποιο σωματίδιο. Αυτό που παρατηρείτε είναι ότι δυο όμοιοι πόλοι ασκούν απωθητικές δυνάμεις ενώ όταν είναι ανόμοιοι αναπτύσσονται ελκτικές δυνάμεις.

Γενικότερα τα μαγνητικά πεδία εντοπίζονται εύκολα με τη βοήθεια μιας πυξίδας, καθώς η θέση ισορροπίας της μεταβάλλεται κάθε φορά που το μαγνητικό πεδίο αλλάζει. Παρατηρώντας τον προσανατολισμό που έχει η πυξίδα, μπορούμε να αναπαραστήσουμε ένα μαγνητικό πεδίο σχεδιάζοντας τις δυναμικές γραμμές γύρω από το χώρο που εμφανίζεται. Οι δυναμικές γραμμές δίνουν τη διεύθυνση των δυνάμεων που ασκεί το μαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου, με φορά από το βόρειο πόλο προς το νότιο πόλο. Επιπλέον οι δυναμικές γραμμές συνεχίζουν και στο εσωτερικό του μαγνήτη, με φορά από το νότιο προς το βόρειο πόλο. Ορισμένα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν οι δυναμικές γραμμές είναι τα εξής:

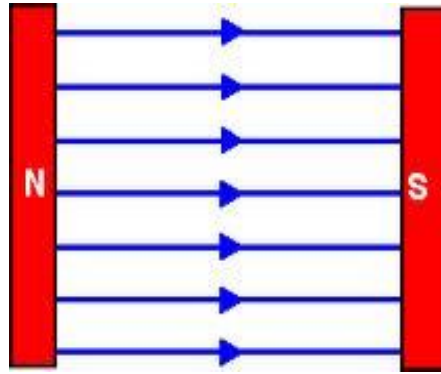
- Είναι κλειστές διότι δεν υπάρχουν απομονωμένη μαγνητικοί πόλοι
- Δεν τέμνονται ούτε εφάπτονται



Σχήμα 1.1: Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου

Ανάλογα με την πυκνότητα των δυναμικών γραμμών που επικρατούν στο χώρο, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αλλάζει. Αυτό που παρατηρείτε είναι ότι κοντά στα σημεία των πόλων οι μαγνητικές δυνάμεις είναι πιο ισχυρές και όσο απομακρυνόμαστε οι δυνάμεις εξασθενούν. Αυτό οφείλεται διότι οι δυναμικές γραμμές είναι πιο πυκνές κοντά στους πόλους συγκριτικά με το υπόλοιπο πεδίο.

Όπως μπορούμε να δούμε από το σχήμα 1.1, η μορφή του μαγνητικού πεδίου δεν είναι ίδια σε όλα τα σημεία της καθώς η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών είναι διαφορετική. Ωστόσο, υπάρχουν μαγνητικά πεδία στα οποία οι δυναμικές γραμμές είναι παράλληλες και έχουν τις ίδιες αποστάσεις. Τέτοια πεδία χαρακτηρίζονται ως **ομογενές μαγνητικά πεδία** στα οποία η ένταση του μαγνητικού πεδίου παραμένει σταθερή.



Σχήμα 1.2: Ομογενές μαγνητικό πεδίο

Όταν υπάρχει το σύμβολο \times δίπλα από το διάνυσμα B , δείχνει ότι το μαγνητικό πεδίο έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της σελίδας με φορά από τον αναγνώστη προς τη σελίδα, ενώ όταν υπάρχει το σύμβολο \bullet , η διεύθυνση είναι ίδια αλλά η φορά του αντίθετη, δηλαδή από τη σελίδα προς τον αναγνώστη.

1.2.2. Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ένας ευθύγραμμος αγωγός ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Για να εξετάσουμε τη μορφή του πεδίου, συνδέουμε μια πηγή σταθερής τάσης στα άκρα του αγωγού και πλησιάζουμε μια μαγνητική βελόνα. Θα διαπιστώσουμε ότι η θέση ισορροπίας της βελόνας θα μεταβάλλεται αλλά αυτή τη φορά κυκλικά. Με αυτό το τρόπο καταλαβαίνουμε ότι οι δυναμικές γραμμές ενός τέτοιου πεδίου είναι ομόκεντροι κύκλοι με κέντρο πάνω στον αγωγό και επίπεδο κάθετο σε αυτόν. Το μέτρο της έντασης B είναι σταθερό σε κάθε σημείο του κύκλου που απέχει απόσταση ακτίνας r από το κέντρο και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\bullet \quad B = K_{\mu} \frac{2I}{r} \quad (1.5)$$

όπου $K_{\mu} = 10^{-7} \text{N/A}^2$ μαγνητική σταθερά

I = η ένταση του ρεύματος

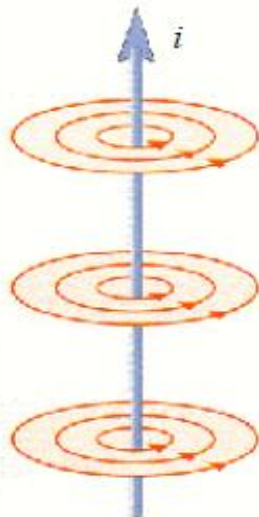
Αν αντί για έναν ευθύγραμμο αγωγό έχουμε πολλούς ευθύγραμμους αγωγούς που διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα τότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου υπολογίζεται

$$\bullet \quad B = N * K_{\mu} * \frac{2I}{r} \quad (1.6)$$

όπου N ο αριθμός των αγωγών

Η φορά των δυναμικών γραμμών εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος. Αν το ρεύμα αντιστραφεί θα αλλάξει η φορά των γραμμών. Για να βρούμε τη φορά χρησιμοποιούμε το κανόνα του δεξιού χεριού. Σύμφωνα με το κανόνα ο αντίχειρας

δείχνει την φορά του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό ενώ κάμπτοντας τα υπόλοιπα δάχτυλα βλέπουμε τη φορά των δυναμικών γραμμών. Τέλος, σε αντίθεση με το μαγνητικό πεδίο ενός φυσικού μαγνήτη, στον ρευματοφόρο αγωγό δεν υπάρχουν ο βόρειος και νότιος μαγνητικός πόλος.



Σχήμα 1.3: Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού

1.2.3. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ρευματοφόρους αγωγούς μπορεί να ενισχυθεί με μεγαλύτερη ένταση αν τυλίξουμε ένα σύρμα γύρω από έναν μονωτικό κύλινδρο, δημιουργώντας με αυτό το τρόπο ένα σωληνοειδές πηνίο με N σπείρες.

Η μορφή του που έχει το μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς πηνίου παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς παρατηρείται ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο, στο οποίο οι δυναμικές γραμμές είναι ευθείες και παράλληλες στον άξονα του σωλήνα και η ένταση του πεδίου έχει μέτρο:

$$\bullet \quad B = K_{\mu} 4\pi \frac{N}{L} I \quad (1.7)$$

όπου $K_{\mu} = 10^{-7} \text{N/A}^2$ μαγνητική σταθερά

N = ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

L = το μήκος του πηνίου

I = η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο

- Η φορά των δυναμικών γραμμών καθορίζεται με το κανόνα του δεξιού. Ο αντίχειρας δείχνει τη φορά του μαγνητικού πεδίου \vec{B} ενώ τα υπόλοιπα δάχτυλα δείχνουν τη φορά του ρέματος

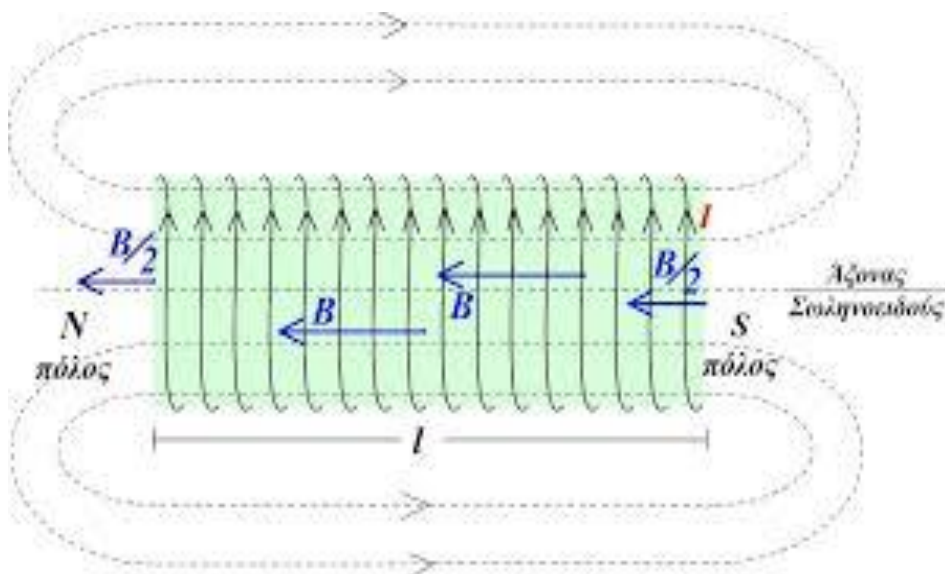


Σχήμα 1.4: Κανόνας δεξιού χεριού σωληνοειδούς πηνίου

- Στα άκρα του σωληνοειδούς το μαγνητικό πεδίο είναι ανομοιογενές και η ένταση είναι η μισή από αυτή που έχει στο εσωτερικό του με μέτρο ίσο:

$$\bullet \quad B_{\text{άκρων}} = \frac{B}{2} = K_{\mu} 2\pi \frac{N}{L} I \quad (1.8)$$

- Οι μαγνητικές γραμμές εισέρχονται από το ένα άκρο του πηνίου που είναι ο νότιος πόλος (S) και εξέρχονται από το άλλο άκρο που είναι ο βόρειος πόλος (N).



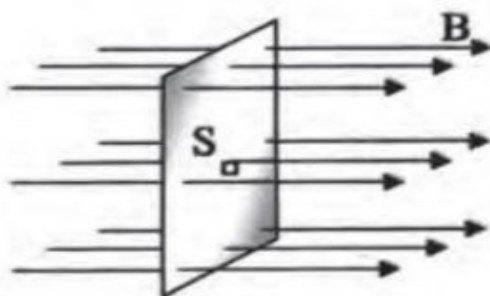
Σχήμα 1.5: Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου

1.3. Μαγνητική επαγωγή – Μαγνητική ροή

Για τη μελέτη της ύπαρξης του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο μεγέθη που είναι ανάλογα μεταξύ τους. Αυτά είναι η **μαγνητική επαγωγή** και η **μαγνητική ροή**

Η μαγνητική επαγωγή εκφράζει τη πυκνότητα των δυναμικών γραμμών στο πεδίο και συμβολίζεται με το γράμμα \vec{B} . Μονάδα μέτρησης είναι το Tesla (T) και το όργανο που μας βοηθά να το μετρήσουμε είναι το μαγνητόμετρο.

Έστω ότι έχουμε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης B και μια επιφάνεια με εμβαδό S κάθετη στο πεδίο αυτό. Ορίζουμε ως **μαγνητική ροή** Φ , το γινόμενο του μέτρου της έντασης B του πεδίου επί το εμβαδό της επιφάνειας S



Σχήμα 1.6 : Μαγνητική ροή για επιφάνεια κάθετη με τις δυναμικές γραμμές

Η μαγνητική ροή εκφράζει τον αριθμό των μαγνητικών γραμμών που διέρχονται από μία επιφάνεια με μονάδα μέτρησης το Weber (Wb) [$1\text{Wb} = 1\text{T}\cdot\text{m}^2$]. Το Weber είναι μια πολύ μεγάλη μονάδα ,έτσι, σε πιο πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται το microweber ($\mu\text{Wb} = 10^{-6}\text{Wb}$). Ένα microweber ισούται με 100 γραμμές μαγνητικής ροής

Αν η επιφάνεια δεν είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές, τότε η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς όλο και λιγότερες μαγνητικές γραμμές διαπερνούν την επιφάνεια. Στη περίπτωση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

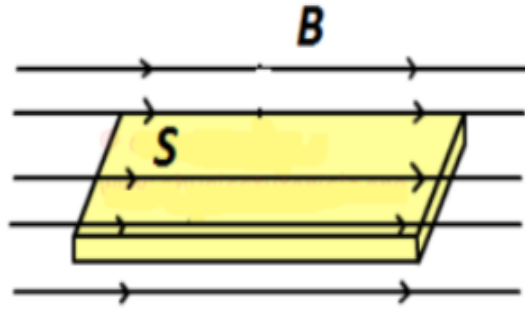
$$\bullet \quad \Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (1.9)$$

Όπου α είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δυναμικών γραμμών έντασης B και της επιφάνειας με εμβαδό S



Σχήμα 1.7: Μαγνητική ροή για επιφάνεια

Όταν η επιφάνεια είναι παράλληλη με τις δυναμικές γραμμές, δηλαδή $\alpha = 90^\circ$ τότε το $\cos\alpha = 0$ και $\Phi = 0$. Στη περίπτωση αυτή καμία δυναμική γραμμή δεν περνά την επιφάνεια



Σχήμα 1.8: Μαγνητική ροή παράλληλη στις δυναμικές γραμμές μια επιφάνειας

Στη γενική περίπτωση όπου το μαγνητικό πεδίο είναι ανομοιογενές, για να υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή ακολουθούμε τα εξής βήματα:

- a) Χωρίζουμε την επιφάνεια σε μικρά στοιχειώδη εμβαδά
- b) Υπολογίζουμε τη ροή σε καθένα από αυτά
- c) Ολοκληρώνουμε για τον υπολογισμό της ολικής ροής

$$\bullet \quad \Phi = \int_{\text{επιφάνεια}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.10)$$

Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε από τη γενική σχέση (1.9) της μαγνητικής ροής

$$\bullet \quad \Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \Rightarrow B = \Phi/S \quad (1.11)$$

Είναι ότι η μαγνητική επαγωγή εκφράζει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής σε κάθε σημείο του πεδίου.

1.4. Μαγνητικές δυνάμεις

1.4.1. Δύναμη σε κινούμενο φορτίο

Μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο παραμένει ακίνητο σημαίνει ότι το πεδίο δε του ασκεί καμία δύναμη. Αντίθετα, στη περίπτωση που εκτραπεί η πορεία που είχε αρχικά το σωματίδιο, φανερώνει ότι το φορτίο δέχεται κάποια δύναμη από το μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο σε ένα φορτισμένο σωματίδιο είναι:

- Ανάλογη του μαγνητικού πεδίου B
- Ανάλογη του φορτίου q και της ταχύτητάς v
- Εξαρτάται από την κατεύθυνση της κίνησης.

Η πειραματική μελέτη έδειξε ότι το μαγνητικό πεδίο ασκεί στα κινούμενα φορτία δύναμη [(ονομάζεται δύναμη Lorentz (Λόρεντζ)] μέτρου:

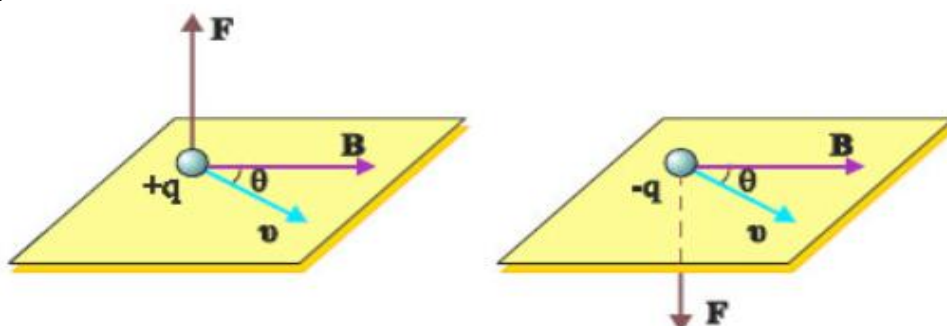
$$\bullet \quad F = B|q|v \eta\mu\phi \quad (1.12)$$

όπου φ είναι η γωνία που σχηματίζει η ταχύτητα v του σωματιδίου με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου B .

- Αν το φορτίο **κινείται παράλληλα** προς τις δυναμικές γραμμές ($\varphi = 0^\circ$ ή $\varphi = 180^\circ \Rightarrow \eta\mu\varphi = 0$), τότε το μαγνητικό πεδίο **δεν ασκεί κάποια δύναμη στο φορτίο** ($F=0$).
- Αν το φορτίο **κινείται κάθετα** προς το πεδίο ($\varphi = 90^\circ \Rightarrow \eta\mu\varphi = 1$) τότε **δέχεται τη μέγιστη δύναμη** μέτρου

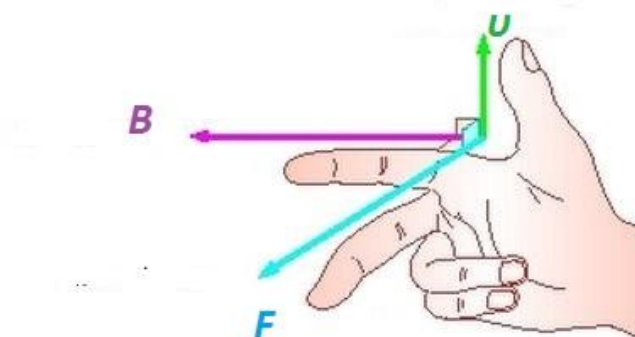
$$F = B|q|v \quad (1.13)$$

Η δύναμη αυτή είναι κάθετη προς το επίπεδο που ορίζεται από την ταχύτητα και τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Η φορά της δύναμης εξαρτάται από το αν το φορτίο είναι θετικό ή αρνητικό. Τα αρνητικά φορτία δέχονται δύναμη αντίθετης φοράς με τα θετικά.



Σχήμα 1.9: Η δύναμη που ασκείται σε ένα θετικό ή αρνητικό σωματίδιο από το μαγνητικό πεδίο.

Ωστόσο για να προσδιορίσουμε τη φορά της δύναμης σε ένα φορτίο χρησιμοποιούμε το κανόνα του δεξιού χεριού. Σύμφωνα με το κανόνα αυτόν, ο αντίχειρας δείχνει τη φορά της ταχύτητας του φορτίου, ο δείκτης δείχνει τη φορά του μαγνητικού πεδίου B και ο μεσαίος δείχνει τη φορά της μαγνητικής δύναμης. Αν το φορτίο είναι θετικό τότε η φορά της κίνησης του δίνει και τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Αντίθετα, όταν το φορτίο είναι αρνητικό η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αντίθετο της κίνησης.



Σχήμα 1.10: Προσδιορισμός της φοράς της δύναμης με βάση των κανόνα του δεξιού χεριού

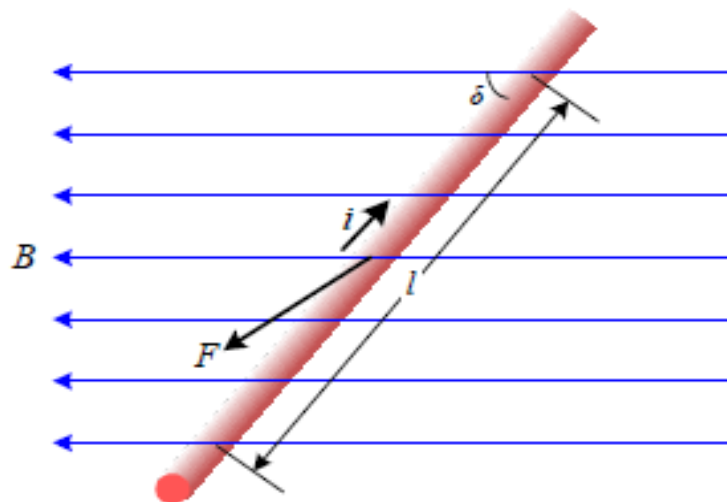
1.4.2. Δύναμη εξ επαγωγής ή δύναμη Laplace

Όπως είπαμε και προηγουμένως, ένα μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις στο περιβάλλοντα χώρο του. Ωστόσο, όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο, δέχεται από αυτό μια δύναμη γνωστή και ως **δύναμη εξ επαγωγής ή δύναμη Laplace (Λαπλάς)**.

Έστω ότι έχουμε έναν ευθύγραμμο αγωγό που έχει μήκος L και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I . Η δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο σταθερής έντασης B έχει μέτρο

$$\bullet F = B \cdot I \cdot L \cdot \eta\mu\delta \quad (1.14)$$

Όπου δ η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης του αγωγού και του μαγνητικού πεδίου



Σχήμα 1.11: Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό στο εσωτερικό ενός μαγνητικού πεδίου

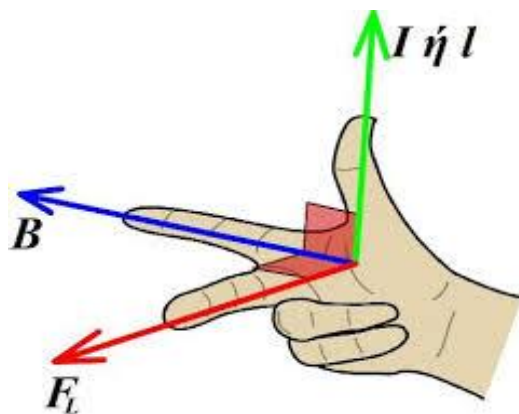
Το μέγεθος της δύναμης Laplace είναι ανάλογο :

- Με τη μαγνητική επαγωγή (B) του πεδίου
- Με την ένταση του ρεύματος (I) που διαρρέει τον αγωγό
- Με το μήκος του αγωγού (L) ο οποίος βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο

Όταν ο ρευματοφόρος αγωγός είναι **παράλληλος προς το μαγνητικό πεδίο** τότε η **δύναμη Laplace παίρνει την ελάχιστη τιμή**. ($\delta = 0^{\circ}$ ή $\delta = 180^{\circ} \Rightarrow \eta\mu\delta = 0$). Αντίθετα όταν ο ρευματοφόρος αγωγός είναι **κάθετος με το μαγνητικό πεδίο** ($\delta = 90^{\circ} \Rightarrow \eta\mu\delta = 1$), η **δύναμη Laplace παίρνει τη μέγιστη τιμή** μέτρου

$$\bullet F = B \cdot I \cdot L \quad (1.15)$$

Η φορά της δύναμης Laplace προσδιορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Ο αντίχειρας προσδιορίζει τη φορά του ρεύματος I , ο δείκτης τη φορά του μαγνητικού πεδίου \vec{B} και ο μέσος τη φορά της δύναμης Laplace.



Σχήμα 1.12: Ο κανόνας του δεξιού χεριού για την εύρεση της δύναμης Laplace

Στη δύναμη Laplace βασίζεται η αρχή λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων, καθώς το μαγνητικό πεδίο διέγερσης παράγει μηχανικές δυνάμεις και ροπές στα αγώγιμα πλαίσια της περιφέρειας του δρομέα, μεταφέρονται μέσω του μηχανικού μέρους στον άξονα του κινητήρα, δημιουργώντας έτσι την απαιτούμενη ροπή για να κινηθεί ο κινητήρας.

1.4.3. Μαγνητική δύναμη ανάμεσα σε δύο παράλληλους ρευματοφόρους αγωγούς

Όπως είπαμε και προηγουμένως, ένας ρευματοφόρος αγωγός που βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο δέχεται μια δύναμη εξ επαγωγής ή δύναμη Laplace. Γνωρίζουμε επίσης ότι ένας ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί ένα δικό του μαγνητικό πεδίο. Έστω ότι έχουμε τοποθετήσει δύο ευθύγραμμους ρευματοφόρους αγωγούς A1 και A2 μήκους L παράλληλα ο ένας με τον άλλο σε μια απόσταση r, όπως βλέπουμε στο σχήμα 1.10. Το μαγνητικό πεδίο του ενός αγωγού ασκεί μια δύναμη Laplace στον άλλο αγωγό και το αντίστροφο.

Για να υπολογίσουμε τη δύναμη Laplace που δέχεται ο ένας αγωγός από το μαγνητικό πεδίο του άλλου χρησιμοποιούμε τη σχέση $F = B \cdot I \cdot L \cdot \eta_{\mu\delta}$. Στη περίπτωση αυτή η γωνία δ είναι 90^0 , οπότε το $\eta_{\mu\delta} = 1$.

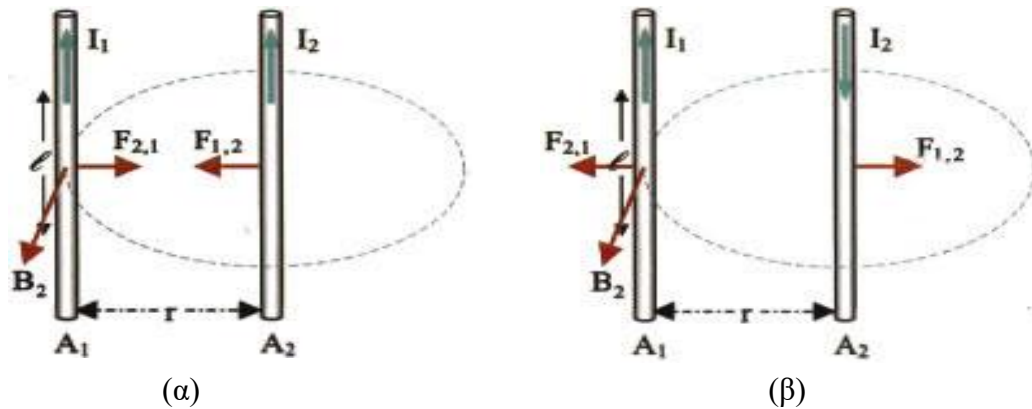
Η μαγνητική επαγωγή B είναι ίδια σε όλα τα σημεία των δυο αγωγών. Με βάση τη σχέση (1.5) που μας δίνει την ένταση του μαγνητικού πεδίου όταν αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, η δύναμη Laplace που θα ασκηθεί στον ρευματοφόρο αγωγό A1 υπολογίζεται :

$$\bullet \quad F_{2,1} = B_2 \cdot I_1 \cdot L \Rightarrow F_{2,1} = K_{\mu} \frac{2I_2}{r} \cdot I_1 \cdot L \Rightarrow F_{2,1} = K_{\mu} \frac{2I_1 I_2}{r} \cdot L \quad (1.16)$$

Ομοίως και για τον αγωγό A2 η δύναμη Laplace είναι ακριβώς η ίδια.

Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε από τη παραπάνω σχέση είναι ότι η δύναμη Laplace είναι ανάλογη του γινομένου των εντάσεων των δύο ρευμάτων και του μήκους των αγωγών και αντιστρόφως ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης.

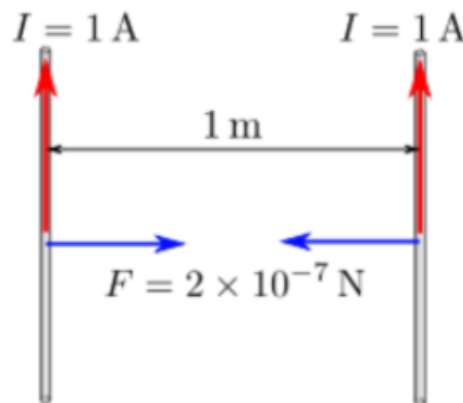
Οι δυνάμεις που ασκούνται στους δύο παράλληλους ρευματοφόρους αγωγούς μπορεί να είναι είτε **ελκτικές** είτε **απωστικές**. Αυτό εξαρτάται κάθε φορά από τη φορά που έχουν τα δύο ρεύματα. Όταν τα ρεύματα είναι ομόρροπα, οι δυνάμεις έλκονται ενώ όταν είναι αντίρροπα τα ρεύματα οι δυνάμεις απωθούνται.



Σχήμα 1.13: Δύο παράλληλοι ευθύγραμμοι ρευματοφόροι αγωγοί που διαρρέονται από σταθερό ρεύμα. Στη πρώτη περίπτωση (α) τα ρεύματα είναι ομόρροπα ενώ στη περίπτωση (β) αντίρροπα

Από τους παραπάνω υπολογισμούς που κάναμε για να βρούμε τη δύναμη Laplace που δέχονται δύο παράλληλοι αγωγοί, μπορούμε πειραματικά να ορίσουμε το αμπέρ (ampere) ως εξής:

Όταν δύο παράλληλοι αγωγοί που διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα και βρίσκονται σε απόσταση 1m μεταξύ τους, αν το μέτρο της δύναμης ανά μονάδα μήκους που δέχεται ο κάθε αγωγός είναι $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$, τότε η ένταση του ρεύματος εξ ορισμού είναι 1A.



Σχήμα 1.14: ορισμός του 1A

1.5. Ο νόμος του Ampere (Αμπέρ)

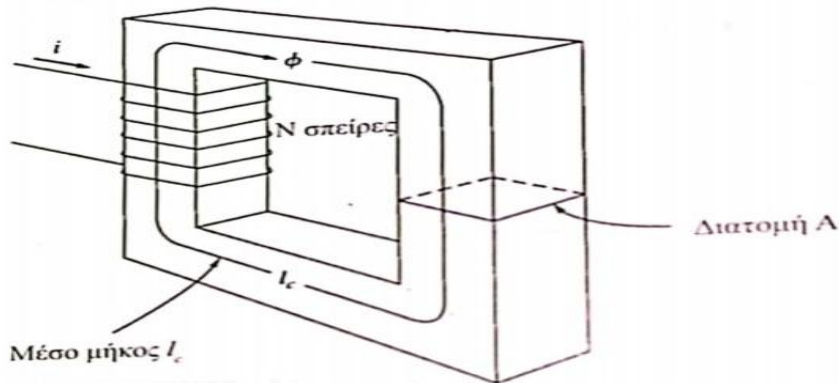
Ο νόμος του Ampere είναι μία γενική σχέση ανάμεσα στο μαγνητικό πεδίο ενός κλειστού βρόχου με το ηλεκτρικό ρεύμα. Με βάση το νόμο αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό ρεύμα που την προκαλεί.

$$\oint_C \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} ds = \sum i \quad (1.17)$$

Η σχέση (1.17), αποτελεί τον **μαθηματικό ορισμό του νόμου του Ampere**, όπου το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής, ισούται με το συνολικό ρεύμα που περικλείεται από τη συγκεκριμένη διαδρομή. Το συνολικό αυτό ρεύμα είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων αγωγιμότητας και των ρευμάτων μετατόπισης.

Ωστόσο, θεωρούμε ότι έχουμε ένα πυρήνα ενός υλικού (πχ σιδηρομαγνητικό) τυλιγμένο από ένα πηνίο με N σπείρες, όπου στη μια πλευρά του πυρήνα τροφοδοτείται με ρεύμα έντασης I . Στη περίπτωση αυτή, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τον ρευματοφόρο αγωγό περιορίζεται εσωτερικό του πυρήνα του υλικού. Κατά μήκος του πυρήνα, σύμφωνα με το νόμο του Ampere, για να ορίσουμε το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα την υπολογίζουμε με τη σχέση:

$$\mathbf{H} * \mathbf{L} = \mathbf{N} * \mathbf{I} \Rightarrow \mathbf{H} = \frac{\mathbf{N} * \mathbf{I}}{\mathbf{L}} \quad (1.18)$$



Σχήμα 1.15: Πηνίο με πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H είναι ένα μέγεθος που εκφράζει τη προσπάθεια του ηλεκτρικού ρεύματος I για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα. Μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου H είναι το αμπέρ ανά μέτρο (A/m). Είναι διανυσματικό μέγεθος όπου οι διεύθυνση και η φορά δίνεται από τις μαγνητικές γραμμές. Κατά συνέπεια το διάνυσμα \vec{H} έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με τη μαγνητική επαγωγή \vec{B} . Η σχέση που συνδέει τη μαγνητική επαγωγή B με την ένταση του μαγνητικού πεδίου H στο εσωτερικό ενός υλικού είναι:

- $B = \mu \cdot H$ (1.19)

Όπου μ = μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

Η μαγνητική διαπερατότητα είναι ένας καθαρός αριθμός ο οποίος εκφράζει την ευκολία με την οποία μπορεί μέσα σε κάποιο υλικό να αναπτυχθεί ένα μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό χώρο συμβολίζεται με μ_0 και είναι ίση με:

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ (1.20)

Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε ένα υλικό περιγράφεται από τη *σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας* μ_r

- $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ (1.21)

Η *σχετική μαγνητική διαπερατότητα* μ_r είναι αδιάστατη ποσότητα. Τα υλικά που μαγνητίζονται εύκολα έχουν μεγάλες μαγνητικές διαπερατότητες.

Όπως είπαμε και προηγουμένως, απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου είναι η κίνηση σωματιδίων. Από το ηλεκτρικό ρεύμα, οι κινήσεις των ηλεκτρονίων μέσα σε έναν αγωγό δημιουργούν μια μαγνητική ροή Φ γύρω από τον αγωγό. Η ιδιότητα που έχει το ηλεκτρικό ρεύμα να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο ορίζεται με το μέγεθος της **μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ)**.

Για την καλύτερη κατανόηση της ΜΕΔ, από τη σχέση (1.18) όπου υπολογίσαμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσα σε ένα πυρήνα ενός υλικού τυλιγμένο από N σπείρες, το συνολικό ρεύμα που διαπερνά το πυρήνα είναι ίσο με N φορές το I . Στη περίπτωση αυτή, το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελεί τη δύναμη που παράγει το μαγνητικό πεδίο και το μέτρο της ΜΕΔ ισοδυναμεί με το γινόμενο του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο επί των αριθμό των σπειρών :

- $ΜΕΔ = N \cdot I$ (1.21)

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η ΜΕΔ είναι ανάλογη με τον αριθμό των σπειρών του πηνίου και της έντασης του ρεύματος I που διαρρέει τον αγωγό. Μονάδα μέτρησης της μαγνητεγερτικής δύναμης είναι οι αμπεροστροφές ή αμπερελίγματα (At)

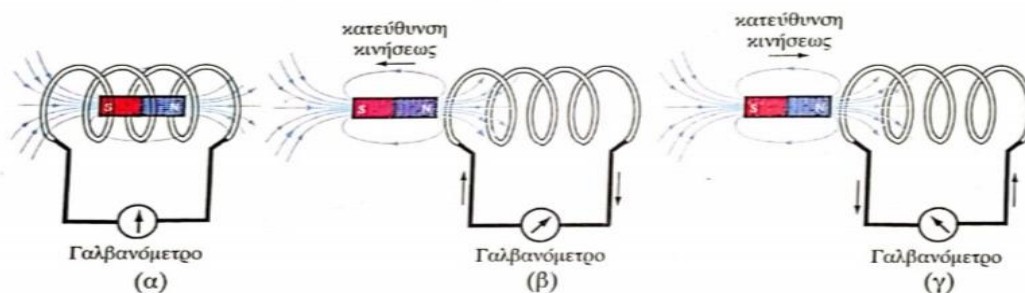
1.6. Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

1.6.1. Ηλεκτεγερτική δύναμη εξ επαγωγής

Ως τώρα έχουμε αναφερθεί στην επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος πάνω στο μαγνητικό πεδίο. Ωστόσο, δεν έχουμε μιλήσει για το πως το μαγνητικό πεδίο επιδρά στο ηλεκτρικό ρεύμα. Η μελέτη αυτή γίνεται με το εξής πείραμα:

Έστω ότι έχουμε ένα πηνίο που δεν τροφοδοτείται από κάποια πηγή ρεύματος και στο εσωτερικό του τοποθετούμε έναν ραβδοφόρο μαγνήτη. Στα άκρα του πηνίου συνδέουμε ένα γαλβανόμετρο, ένα ευαίσθητο όργανο που μας βοηθά να μετράμε μικρές εντάσεις ρεύματος, δημιουργώντας με αυτό το τρόπο ένα κλειστό κύκλωμα. Όταν ο μαγνήτης είναι ακίνητος, το γαλβανόμετρο δείχνει μηδέν. Στη συνέχεια απομακρύνοντας το μαγνήτη από το εσωτερικό του πηνίου, ο δείκτης του γαλβανόμετρου θα δείξει κάποια τιμή που σημαίνει ότι το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα. Η τιμή της ένδειξης από το όργανο μεγαλώνει όσο πιο γρήγορα απομακρύνουμε το μαγνήτη από το πηνίο. Το ίδιο συμβαίνει και όταν χρησιμοποιούμε έναν πιο ισχυρό μαγνήτη. Έπειτα επαναφέρουμε το μαγνήτη στο εσωτερικό του πηνίου, όπου αυτή τη φορά το γαλβανόμετρο θα δείξει μια τιμή ρεύματος αντίθετη με εκείνη της προηγούμενης φοράς.

Αυτό που παρατηρούμε από το πείραμα είναι ότι όταν μεταβάλλουμε τη μαγνητική ροή μέσα σε ένα πηνίο, εμφανίζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) στο πηνίο, με διάρκεια το χρόνο της μεταβολής της μαγνητικής ροής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.



Σχήμα 1.15: Ανάπτυξη ΗΕΔ μεταβάλλοντας τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πηνίου

1.6.2. Νόμος επαγωγής του Faraday (Φαραντέι)

Ο Faraday ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε και διατύπωσε μαθηματικά το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, στον οποίο στηρίζεται η λειτουργία όλων των ηλεκτρικών μηχανών. Σύμφωνα με το νόμο, όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από τα άκρα ενός πηνίου, τότε επάγεται μια τάση ϵ_{ind} που είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής.

$$\bullet \quad \epsilon_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.20)$$

όπου ϵ_{ind} = η τάση που επάγεται στα άκρα του πηνίου

Φ = μαγνητική ροή που διέρχεται από το πηνίο

Όταν το πηνίο αποτελείται από N σπείρες και η μαγνητική ροή μεταβάλλεται με ρυθμό $\frac{d\Phi}{dt}$ τότε η επαγόμενη τάση ισούται με

$$\bullet \quad e_{\text{ind}} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.21)$$

Το αρνητικό πρόσημο στις παραπάνω εξισώσεις οφείλεται στο νόμο του Lenz. Σύμφωνα με αυτό το νόμο η πολικότητα της τάσης που αναπτύσσεται είναι τέτοια ώστε, αν τα άκρα του πηνίου βραχυκυκλωθούν, το παραγόμενο ρεύμα να δημιουργεί μαγνητική ροή που αντιτίθεται στη μεταβολή της αρχικής ροής.

1.7. Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης

Τα μαγνητικά υλικά με βάση τις μαγνητικές τους ιδιότητες κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: **τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά.**

Τα **διαμαγνητικά υλικά** είναι τα υλικά στα οποία η επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί παραμόρφωση στην εσωτερική δομή του ατόμου. Εξαιτίας της αλλοίωσης της εσωτερικής δομής τους διαταράσσεται η μαγνητική κατάσταση των ατόμων και δημιουργούνται μαγνητικά δίπολα που αντιστρατεύονται το εξωτερικό πεδίο προκαλώντας αρνητική μαγνήτιση. Η διαμαγνητική συμπεριφορά δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και χάνεται με την απομάκρυνση του υλικού από το μαγνητικό πεδίο. Έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα ελάχιστα μικρότερη της μονάδας ($\mu_r < 1$). Ορισμένα υλικά που κατατάσσονται στη κατηγορία αυτή είναι ο χαλκός, ο χρυσός, ο άργυρος και το πυρίτιο.

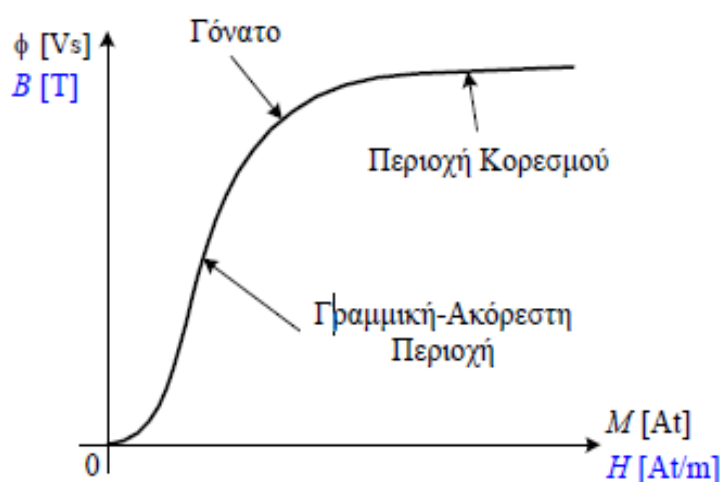
Τα **παραμαγνητικά υλικά** μια κατηγορία υλικών όπου με την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σχηματίζουν εσωτερικά, επαγόμενα μαγνητικά πεδία στη κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η παραμαγνητική συμπεριφορά των υλικών αυτών οφείλεται στον προσανατολισμό των μαγνητικών διπολικών ροπών των ατόμων ή των μορίων τους παράλληλα προς το εξωτερικό πεδίο. Όταν απομακρυνθεί το παραμαγνητικό υλικό από το μαγνητικό πεδίο, τα μαγνητικά δίπολα του υλικού αποκτούν τυχαίες διευθύνσεις που επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται σημαντικά η παραμαγνητική ιδιότητα του υλικού. Έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα λίγο μεγαλύτερη της μονάδας ($\mu_r > 1$). Ενδεικτικά ορισμένα υλικά που συναντάμε στη κατηγορία αυτή είναι το αλουμίνιο, το χρώμιο, το μαγνήσιο και το βρώμιο.

Τα παραμαγνητικά και τα διαμαγνητικά υλικά δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες τεχνολογικές εφαρμογές.

Τα **σιδηρομαγνητικά υλικά** ανήκουν στη κατηγορία των υλικών όπου με την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αποκτούν μεγάλη μαγνήτιση την οποία

διατηρούν και μετά την απομάκρυνση τους από το μαγνητικό πεδίο. Έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r πολύ μεγαλύτερη της μονάδας ($\mu_r \gg 1$). Συγκεκριμένα έχει σημειωθεί ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν τιμές μαγνητικής διαπερατότητας από 2000 έως 6000. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί ότι για ορισμένη μαγνητεγερτική δύναμη, μπορούμε να πετύχουμε μεγάλες πυκνότητες μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του υλικού σε σχέση με αυτή του κενού. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται τα σιδηρομαγνητικά υλικά για την κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, διότι τόσο για τη τάση που παράγει μια γεννήτρια όσο και για τη ροπή που αναπτύσσει ένας κινητήρας, εξαρτώνται από το μέγεθος της μαγνητικής ροής. Τα πιο διαδεδομένα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι ο σίδηρος, το κοβάλτιο και το νικέλιο.

Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή καθώς αυτή εξαρτάται από τη μαγνητική ροή. Για να διευκρινίσουμε τη μαγνητική διαπερατότητα ενός σιδηρομαγνητικού υλικού θεωρούμε αρχικά ότι το υλικό είναι αμαγνήτιστο ($B = 0$) και δεν επιδρά πάνω του μαγνητικό πεδίο ($H = 0$). Στη συνέχεια αρχίζουμε να μαγνητίζουμε το υλικό επιβάλλοντας ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο γύρω από το υλικό αυτό. Αν σχεδιάσουμε το διάγραμμα της μαγνητικής ροής ϕ που παράγεται ως προς την εφαρμοζόμενη μαγνητεγερτική δύναμη, προκύπτει μια καμπύλη που ονομάζεται **καμπύλη κορεσμού ή καμπύλη μαγνήτισης**. Μέσο της καμπύλης αυτής, αρχικά βλέπουμε ότι μια μικρή αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί πολύ μεγάλη αύξηση της μαγνητικής ροής. Στη συνέχεια η επιπλέον αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί μετά από ένα σημείο μια γραμμική αύξηση της μαγνητικής ροής. Η γραμμική περιοχή της καμπύλης ονομάζεται **ακόρεστη περιοχή**. Τελικά η περαιτέρω αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης οδηγεί σε ένα σημείο που η μαγνητική ροή παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Η περιοχή στην οποία η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια ονομάζεται **περιοχή κορεσμού**. Η περιοχή μετάβασης από τη γραμμική περιοχή στη περιοχή κορεσμού ονομάζεται **γόνατο** της καμπύλης. Οι ηλεκτρικές μηχανές δουλεύουν κοντά στο γόνατο της καμπύλης μαγνήτισης αφού στο σημείο αυτό παράγουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μαγνητική ροή ϕ .



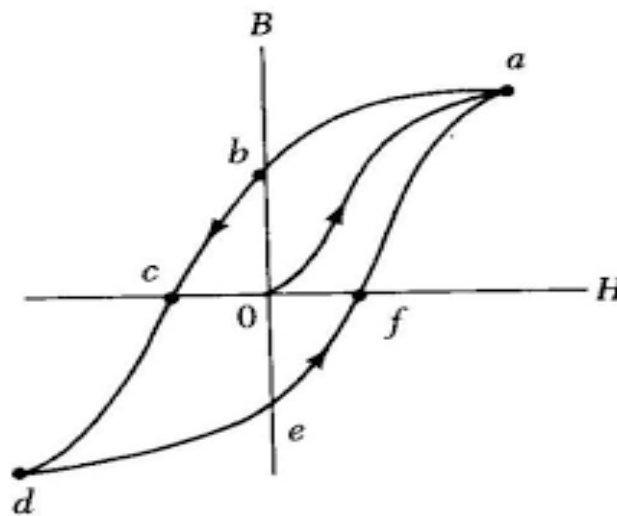
Σχήμα 1.16: Τυπική καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού

Από τη σχέση (1.18) προκύπτει ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου H είναι ανάλογη με τη μαγνητεγερτική δύναμη. Επίσης από τη σχέση (1.11), η μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής. Επομένως, η καμπύλη μαγνήτισης του σχήματος (1.16) δίνει τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου B ($B = f(H)$). Η κλίση της καμπύλης ορίζει τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού για κάθε τιμή της έντασης του πεδίου. Φαίνεται πως η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού είναι μεγάλη και σχετικά σταθερή όταν βρίσκεται στη γραμμική περιοχή ενώ μειώνεται σε μεγάλο βαθμό όταν βρίσκεται στη περιοχή κορεσμού. Παρόλα αυτά τα σιδηρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν έντονη μη γραμμικότητα και αυτό οφείλεται για δύο λόγους:

- Λόγο του κορεσμού
- Λόγο της μαγνητικής υστέρησης

1.8. Μαγνητική υστέρηση των σιδηρομαγνητικών υλικών

Η μαγνητική συμπεριφορά ενός υλικού δεν εξαρτάται μόνο από την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αλλά και από το πρόσφατο ιστορικό μαγνήτισης του υλικού. Συγκεκριμένα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, λόγω της μη γραμμικότητας η καμπύλη μαγνήτισης δεν είναι μοναδική αλλά παίρνει τη μορφή του σχήματος 1.17



Σχήμα 1.17: Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού

Θεωρούμε αρχικά ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αμαγνήτιστο (σημείο o της χαρακτηριστικής, όπου $H = B = 0$). Καθώς αυξάνουμε για πρώτη φορά την ένταση του μαγνητικού πεδίου H , η καμπύλη μαγνήτισης του υλικού ακολουθεί τη διαδρομή o - a . Στο σημείο a ($+H, +B$) το υλικό βρίσκεται στο **μαγνητικό κορεσμό**. Στη συνέχεια, μειώνοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου, η διαδρομή που προκύπτει (a - b) είναι διαφορετική από αυτή που προέκυψε κατά

την αρχική αύξηση του μαγνητικού πεδίου (o-a). Παρατηρούμε στο σημείο αυτό ότι για ίδιες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου, έχουμε μεγαλύτερες τιμές στη μαγνητική επαγωγή σε σχέση με την αρχική διαδρομή. Αυτό συμβαίνει γιατί οι στοιχειώδεις μαγνήτες του σιδηρομαγνητικού υλικού έχουν ήδη προσανατολιστεί προς μια ορισμένη φορά και έχουν τη τάση να παραμείνουν προσανατολισμένοι, παρά το γεγονός ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου μειώθηκε. Στο σημείο b, η ένταση του μαγνητικού πεδίου έχει πλέον μηδενιστεί όμως εξακολουθεί να υπάρχει στο υλικό μια ορισμένη ποσότητα μαγνητικής επαγωγής. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται **παραμένουσα μαγνήτιση** του υλικού.

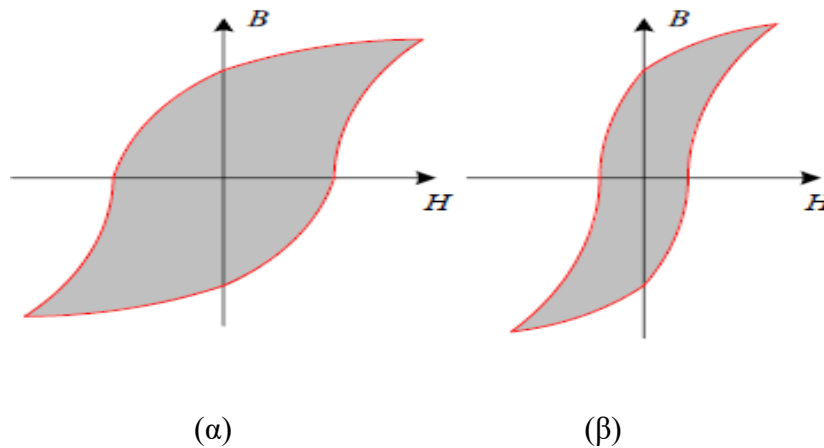
Έπειτα, εφαρμόζουμε ένα μαγνητικό πεδίο αρνητικής έντασης ώστε να απομαγνητίσουμε το υλικό. Η διαδρομή που ακολουθεί η καμπύλη είναι η b-c. Στο σημείο c της χαρακτηριστικής, το σιδηρομαγνητικό υλικό έχει απομαγνητιστεί πλήρως ($B = 0$). Η ένταση του πεδίου απομαγνήτισης έχει αρνητική τιμή και είναι γνωστή ως **απομαγνητίζουσα δύναμη**. Η περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου με αρνητική ένταση οδηγεί τη καμπύλη πλέον στη διαδρομή c-d. Στο σημείο d έχουμε τη μέγιστη αρνητική μαγνήτιση κορεσμού, η οποία είναι συμμετρική ως προς το σημείο a. Από το σημείο αυτό αρχίζουμε να μειώνουμε την αρνητική ένταση μέχρι να μηδενιστεί στο σημείο e. Βλέπουμε τώρα ότι έχουμε έναν παραμένοντα μαγνητισμό αλλά αυτή τη φορά με αρνητική ένταση. Για να μηδενίσουμε την παραμένουσα αρνητική μαγνήτιση εφαρμόζουμε ένα μαγνητικό πεδίο με θετική ένταση. Καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου γίνεται θετική, η καμπύλη ακολουθεί τη διαδρομή e-f, όπου στο σημείο f έχουμε την πλήρη απομαγνήτιση του υλικού. Αυξάνοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου, οδηγούμαστε ξανά στο σημείο a και μετά επαναλαμβάνεται ο κύκλος της διαδρομής abcdefa.

Η παραπάνω κλειστή καμπύλη που περιγράψαμε ονομάζεται **βρόχος υστέρησης**. Στη μαγνητική υστέρηση, οφείλεται η καθυστέρηση της μαγνήτισης του υλικού έναντι της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Ο βρόχος υστέρησης είναι ένα χαρακτηριστικό των σιδηρομαγνητικών υλικών και το εμβαδό του ισοδυναμεί με τις απώλειες ενέργειας που χάνονται με τη μορφή θερμότητας.

Τα υλικά στα οποία το εμβαδό του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο, χαρακτηρίζονται ως **σκληρά μαγνητικά υλικά**. Τα συγκεκριμένα υλικά έχουν μικρή μαγνητική διαπερατότητα και χρειάζονται μεγάλη ένταση ώστε να φτάσουν στο σημείο του μαγνητικού κορεσμού. Ωστόσο παρουσιάζουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών

Σε αντίθεση με τα σκληρά μαγνητικά υλικά, υπάρχουν και τα **μαλακά μαγνητικά υλικά**, στα οποία το εμβαδό του βρόχου υστέρησης είναι μικρό. Επιπλέον τα υλικά αυτά έχουν μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και διαθέτουν μικρή παραμένουσα μαγνήτιση. Ακόμη, οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης είναι μικρότερες σε σύγκριση με τα σκληρά μαγνητικά υλικά. Με βάση τα παραπάνω

χαρακτηριστικά τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για την κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών και μετασχηματιστών διότι οι εφαρμογές αυτές απαιτούν εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία

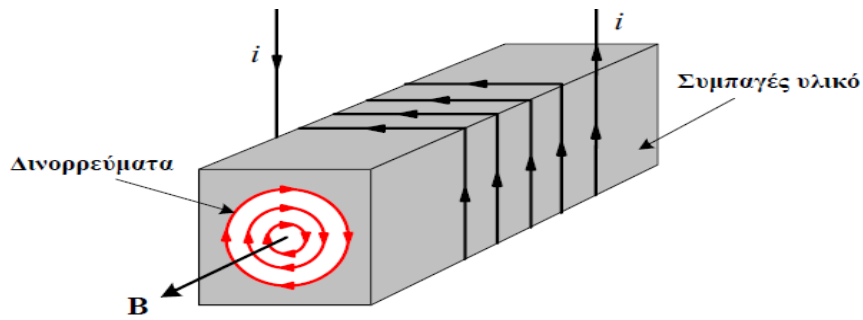


Σχήμα 1.18: Βρόχοι υστέρησης για (α) σκληρά μαγνητικά υλικά (β) μαλακά μαγνητικά υλικά

1.9. Απώλειες δινορρευμάτων

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό υπόκειται σε μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, σύμφωνα με το νόμο του Faraday επάγονται τάσεις μέσα στον ίδιο τον πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυτές οι τάσεις να προκαλούν στο εσωτερικό του πυρήνα ρεύματα με τη μορφή στροβίλων. Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται **δινορρεύματα**. Καθώς τα δινορρεύματα διαρρέουν το εσωτερικό του σιδηρομαγνητικού υλικού, ένα μέρος της ενέργειας του πεδίου χάνεται με τη μορφή θερμότητας και θερμαίνει το πυρήνα. Οι απώλειες αυτές λέγονται **απώλειες δινορρευμάτων**. Το ποσό της ενέργειας που χάνεται εξαιτίας των δινορρευμάτων είναι ανάλογο του μήκους της διαδρομής που αυτά διαγράφουν στο εσωτερικό του σιδηρομαγνητικού υλικού. Για να περιορίσουμε αυτές τις απώλειες, οι πυρήνες των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν γίνονται συμπαγές αλλά κατασκευάζονται σε λεπτά μονωμένα ελάσματα πάχους από 0,35mm έως 0,70mm που ονομάζονται **δυναμοελάσματα**. Ανάμεσα στα δυναμοελάσματα παρεμβάλλονται μονωτικές ρητίνες που περιορίζουν τα δινορρεύματα. Η πρόσμιξη του σιδηρομαγνητικού υλικού με τις μονωτικές ρητίνες δεν επιδρά σχεδόν καθόλου στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού, αντίθετα αυξάνουν την ειδική αντίσταση του πυρήνα ώστε να μειώσουν σε μεγάλο βαθμό τις απώλειες από τα δινορρεύματα.

Οι απώλειες υστέρησης μαζί με τις απώλειες των δινορρευμάτων προκαλούν τη θέρμανση του πυρήνα. Αυτές οι δύο απώλειες ονομάζονται μαζί ως **απώλειες σιδήρου ή πυρήνα**.

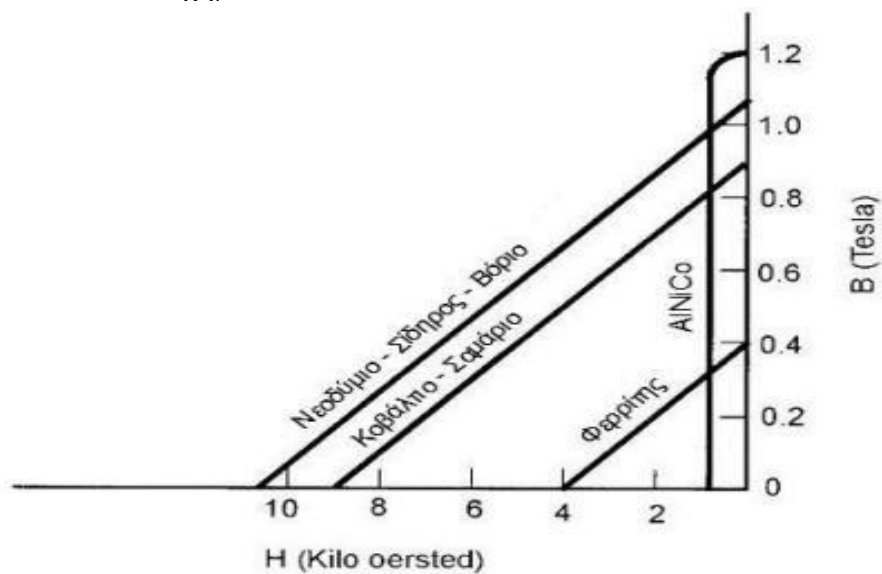


Σχήμα 1.19: Απεικόνιση δινορρευμάτων ενός σιδηρομαγνητικού πυρήνα

1.10. Μόνιμοι μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τα υλικά που διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες για αρκετά μεγάλο χρονικά διάστημα. Τέτοια υλικά όπως αναφέραμε και προηγουμένως ονομάζονται «σκληρά» μαγνητικά υλικά. Διάφορα υλικά όπως ο μαγνήτης κράματος AlNiCo-5, οι φερριτές, το κράμα σαμαρίου-κοβαλτίου, και το κράμα νεοδυμίου – βορίου - αργύρου, είναι τα πιο διαδεδομένα κράματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μόνιμων μαγνητών στις ηλεκτρικές μηχανές..

Με βάση το βρόχο υστέρησης των σκληρών μαγνητικών υλικών, το εμβαδό που έχουν είναι μεγάλο που σημαίνει ότι διαθέτουν μια αρκετά καλή τιμή παραμένουσας μαγνήτισης προκειμένου να εξασφαλίσουν την απαιτούμενη μαγνητική ροή και ταυτόχρονα χρειάζεται μεγάλη ένταση του μαγνητικού πεδίου ώστε να απομαγνητίσουμε το υλικό. Το τμήμα που μας ενδιαφέρει για τη μελέτη της μαγνητικής συμπεριφοράς των μόνιμων μαγνητών από το βρόχο υστέρησης, είναι εκείνο του 2^{ου} τεταρτημορίου ($B > 0, H < 0$), δηλαδή η περιοχή της απομαγνήτισης του υλικού. Η τυπική χαρακτηριστική της καμπύλης απομαγνήτισης ενός μόνιμου μαγνήτη δίνεται από το σχήμα 1.20



Σχήμα 1.20: Χαρακτηριστική καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμων μαγνητών

Το κράμα AlNiCo -5 έχει υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, θερμική ευστάθεια και υψηλή τιμή μαγνητικής επαγωγής. Η χαμηλή τιμή ΜΕΔ απομαγνήτισης όμως σε συνδυασμό με την σχεδόν τετραγωνική μορφή της $B(H)$ χαρακτηριστικής, η οποία προκαλεί πολύ μεγάλη μόνιμη απομαγνήτιση, καθιστούν ακατάλληλο το υλικό αυτό για την κατασκευή μηχανών μόνιμων μαγνητών.

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

Ο μαγνήτης κοβαλτίου – σαμαρίου (CoSm) είναι φτιαγμένος από σίδηρο, νικέλιο, κοβάλτιο και από τη σπάνια γαία σαμάριο. Έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής παραμένουσας μαγνήτισης, της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που εκφράζεται από το γινόμενο (BH_{max}) και των γραμμικών χαρακτηριστικών απομαγνήτισης. Η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να φτάσει και τους 300°C⁰, ενώ η θερμοκρασιακή ευστάθεια (% αλλαγής μαγνητική επαγωγή B ανά °C) είναι πολύ καλή (-0.03%). Όμως το υλικό αυτό είναι αρκετά ακριβό λόγω της ανεπαρκούς διάθεσης του σαμαρίου.

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

Ένα σημαντικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή των μόνιμων μαγνητών, είναι το **μέγιστο γινόμενο ενέργειας**. Το μέγεθος αυτό αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του γινομένου των τιμών H και B , της περιοχής απομαγνήτισης του βρόχου υστέρησης. Όταν βρισκόμαστε στο συγκεκριμένο σημείο επιτυγχάνουμε την επιθυμητή τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής με το μικρότερο δυνατό όγκο μόνιμου μαγνήτη.

Κεφάλαιο 2^ο

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος και βηματικοί κινητήρες

2.1. Εισαγωγή στις μηχανές συνεχούς ρεύματος

Μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος χαρακτηρίζεται εκείνη η μηχανή η οποία όταν λειτουργεί ως γεννήτρια, μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική με τη μορφή συνεχούς τάσης και όταν δουλεύει ως κινητήρας, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική αφού πρώτα τη τροφοδοτήσουμε με συνεχές ρεύμα.

Η πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος κατασκευάστηκε από το Γάλλο Hippolyte Pixii το 1832, η οποία βασίστηκε από το νόμο της επαγωγής του Faraday. Η μηχανή αυτή είχε συλλέκτη δύο τομέων ώστε να ανορθώνει την εναλλασσόμενη τάση που παραγόταν στους αγωγούς. Η κυμάτωση της ανορθωμένης τάσης ήταν πολύ μεγάλη. Αργότερα, το 1856 ο Werner Von Siemens, κατασκεύασε τη πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος με περιέλιξη τυμπάνου που τοποθετήθηκε μέσα στα λούκια του δρομέα και με συλλέκτη αρχικά δύο τομέων. Η κατασκευή αυτή αποτέλεσε αφορμή για την εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών. Το 1860 ο Pacinotti κατασκεύασε τη μηχανή με τον επαγωγικό δακτύλιο και συλλέκτη με πολλούς τομείς. Το 1870 ο Gramme κατασκεύασε μηχανή που είχε ως πλεονέκτημα της μικρής κυμάτωσης της ανορθωμένης τάσης. Παρόλα αυτά εξαιτίας των μεγάλων τεχνοοικονομικών μειονεκτημάτων της δακτυλιοειδούς της περιέλιξης, η συγκεκριμένη μηχανή σταμάτησε να χρησιμοποιείται. Η μηχανή η οποία επικράτησε με μορφή αντίστοιχη της σημερινής ήταν αυτή από τον Hefner-Alteneck το 1872, η οποία αποτελούταν από περιέλιξη τυμπάνου και συλλέκτη με πολλούς τομείς.

Στις βιομηχανικές χώρες, οι ηλεκτρικοί κινητήρες καταναλώνουν περίπου το 65% της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας. Το 8% αυτής της κατανάλωσης οφείλεται από κινητήρες συνεχούς ρεύματος, που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ελεγχόμενης λειτουργίας. Το υπόλοιπο ποσοστό της ενέργειας καταναλώνεται από κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, οι οποίοι λειτουργούν με μη ελεγχόμενες ταχύτητες περιστροφής. Μέχρι σήμερα οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά δημοφιλείς σε συστήματα ηλεκτροκίνησης. Σε εφαρμογές που το σύστημα ισχύος τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα, όπως είναι στα επιβατικά αυτοκίνητα, στα φορτηγά και στα αεροπλάνα, χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Συγκριτικά με τους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι πιο αξιόπιστη σε εφαρμογές όπου απαιτούνται μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής διότι ο έλεγχος της ταχύτητας είναι πιο εύκολος. Ακόμη και όταν δεν υπάρχει μια πηγή συνεχούς τάσης για την τροφοδοσία της μηχανής, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί ανορθωτές ή κυκλώματα μετατροπής σταθερής συνεχούς τάσης (dc chopper).

2.2. Κατασκευαστικά στοιχεία μηχανών συνεχούς ρεύματος

Κάθε ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από δύο κύρια μέρη, το ακίνητο μέρος που ονομάζεται **στάτης** και το στρεφόμενο μέρος που ονομάζεται **δρομέας**.

Ο στάτης μια ηλεκτρικής μηχανής αποτελείται από **το ζύγωμα, τους κύριους και τους βοηθητικούς πόλους, τον ψηκτροφορέα με τις ψήκτρες και τα δύο καλύμματα**. Ακόμη στον στάτη υπάρχει **το τύλιγμα διέγερσης, το τύλιγμα των βοηθητικών πόλων και το τύλιγμα αντιστάθμισης**.

Το ζύγωμα που αποτελεί το κορμό της μηχανής, ο οποίος κατασκευάζεται από χυτοχάλυβα ή μαλακό σίδηρο. Μέσα στο ζύγωμα τοποθετούνται οι μαγνητικοί πόλοι οπού κλείνει και το μαγνητικό κύκλωμα. Το κάτω μέρος από το ζύγωμα αποτελεί τη βάση της μηχανής.

Οι κύριοι μαγνητικοί πόλοι τοποθετούνται πάνω στο ζύγωμα της μηχανής και είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία του κύριου μαγνητικού πεδίου. Ο κάθε μαγνητικός πόλος αποτελείται από το πυρήνα και το τύλιγμα του. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από πολλά λεπτά μονωμένα φύλλα σιδήρου ώστε να περιορίσουμε τις απώλειες από δινορρεύματα. Τα άκρα των κύριων μαγνητικών πόλων προς τη πλευρά του δρομέα ονομάζονται **πέδιλα των πόλων**. Είναι το πλατύτερο μέρος του πόλου και βρίσκονται πλησιέστερα στο δρομέα. Σκοπός τους είναι να διανέμουν ομοιόμορφα τη μαγνητική ροή σε ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας του δρομέα. Η περιοχή μεταξύ του πέδilu του πόλου και του δρομέα ονομάζεται διάκενο (air gap). Κάθε μηχανή, ανάλογα με τον αριθμό των πόλων, ονομάζεται διπολική, τετραπολική, εξαπολική κτλ. Οι μηχανές έχουν πάντα άρτιο αριθμό μαγνητικών πόλων.

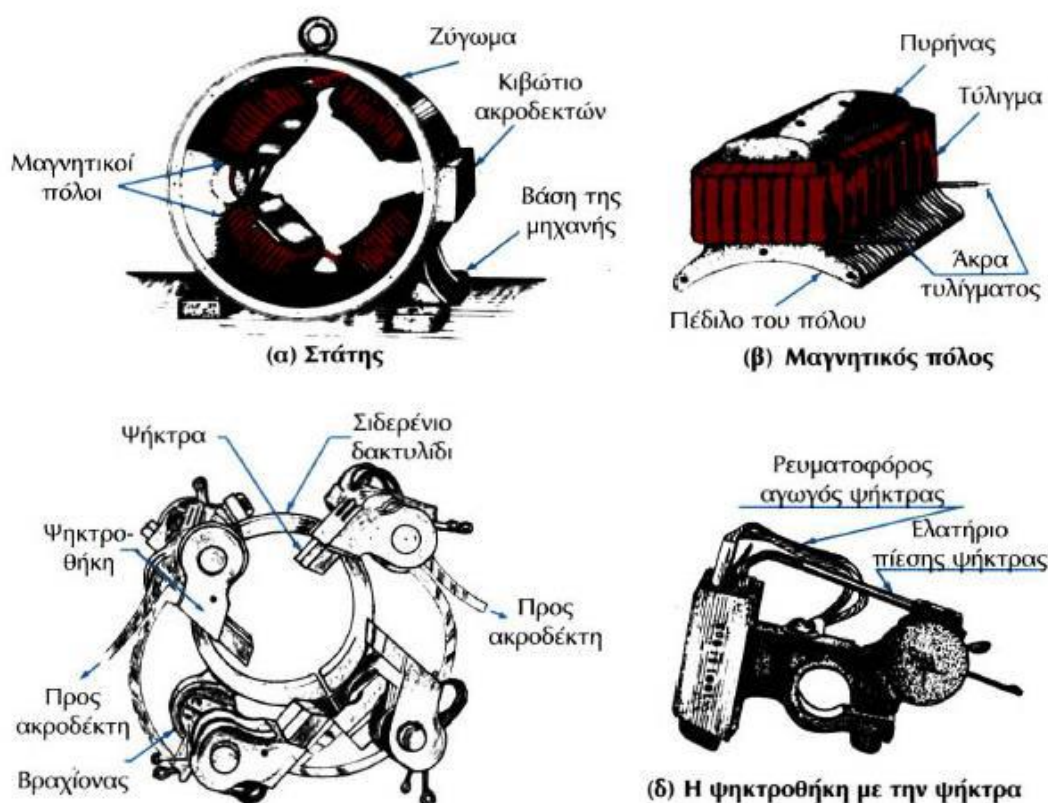
Το τύλιγμα του κάθε πόλου αποτελείται από πολλές σπείρες χάλκινου μονωμένου σύρματος, το οποίο για να έχει καλύτερη μόνωση προς τον πυρήνα, τυλίγεται με βαμβακερή ταινία βαφτισμένη με μονωτικό βερνίκι. Ο αριθμός των ελιγμάτων αυτών καθώς και η διατομή τους εξαρτάται από την εγκαταστημένη μαγνητική ροή στο διάκενο, από τη γεωμετρία της μηχανής και από το είδος των σιδηρομαγνητικών υλικών. Αυτό το τύλιγμα τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και ονομάζεται **τύλιγμα διέγερσης**. **Το τύλιγμα διέγερσης προκαλεί το κύριο μαγνητικό πεδίο της μηχανής**.

Οι βοηθητικοί πόλοι τοποθετούνται μεταξύ των κύριων πόλων. Σκοπός τους είναι να εξαλείψουν τους σπινθήρες που εμφανίζονται στο συλλέκτη όταν η μηχανή λειτουργεί υπό φορτίο. Αυτό γίνεται με τη σύνδεση του τυλίγματος τυμπάνου (οπλισμού) σε σειρά με το τύλιγμα των βοηθητικών πόλων. Όπως και οι κύριοι μαγνητικοί πόλοι έτσι και οι βοηθητικοί κατασκευάζονται από λεπτά μονωμένα φύλλα σιδήρου για να περιορίσουν τις απώλειες από δινορρεύματα.

Ο ψηκτροφορέας με τις ψήκτρες χρησιμοποιείται για την σύνδεση του τυλίγματος του δρομέα με το εξωτερικό κύκλωμα που περιλαμβάνει τη πηγή τροφοδοσίας. Οι ψήκτρες κατασκευάζονται από άνθρακα ή γραφίτη ή από μίγμα άνθρακα και χαλκού.

Οι ψήκτρες είναι τοποθετούνται μέσα στις ψηκτροθήκες και πιέζονται από ελατήριο, ώστε να κάνουν καλή επαφή με την επιφάνεια του συλλέκτη. Η πίεση που ασκούν τα ελατήρια πρέπει να είναι συγκεκριμένη. Αν η πίεση από τα ελατήρια είναι μικρή, τότε δεν θα έχουμε καλή επαφή μεταξύ ψηκτρών και συλλέκτη με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σπινθήρες και να κάψουν το συλλέκτη. Αντίθετα, αν η πίεση είναι πολύ μεγάλη θα έχουμε μεγάλη φθορά των ψηκτρών και θα υπερθερμάνουμε τον συλλέκτη.

Τέλος τα δύο καλύμματα (καπάκια) της μηχανής στερεώνονται με κοχλίες στο ζύγωμα και χρησιμεύουν για τη στήριξη του άξονα του δρομέα και του ψηκτροφορέα και να προφυλάσσουν το εσωτερικό της μηχανής.



Σχήμα 2.1: Βασικά μέρη του στάτη

Ο δρομέας μιας ηλεκτρικής μηχανής αποτελείται από έναν χαλύβδινο άξονα πάνω στον οποίο τοποθετείται το **επαγωγικό τύμπανο, ο συλλέκτης και ο ανεμιστήρας**.

Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από μονωμένα ελάσματα ενωμένα μεταξύ τους με σκοπό να μειώσει τις απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Οι οδοντώσεις που έχουν τα ελάσματα σχηματίζουν τα αυλάκια μέσα στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα. Το **τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου (οπλισμού) είναι τύλιγμα ισχύος και συμβάλει στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας**. Αποτελείται από ομάδες (πηνία), ομοιόμορφα διανεμημένα και κατάλληλα συνδεδεμένα στις οδοντώσεις του τυμπάνου. Τα δύο άκρα της κάθε ομάδας συνδέονται με τους τομείς του συλλέκτη.

Κάθε άκρο της κάθε ομάδας τοποθετείται σε διαφορετικό αυλάκι του πυρήνα ώστε σε κάθε αυλάκι να υπάρχουν δύο στοιχεία από δύο διαφορετικές ομάδες.

Η απόσταση μεταξύ των στοιχείων της κάθε ομάδας μετριέται σε αριθμό στοιχείων και καλείται **πρώτο μερικό βήμα ψ_1** . Συνήθως, είναι ίσο ή λίγο μικρότερο του πολικού βήματος. Η απόσταση του δεύτερου στοιχείου μιας ομάδας από το πρώτο στοιχείο της αμέσως επόμενης σε σειρά συνδεδεμένης ομάδας ονομάζεται **δεύτερο μερικό βήμα ψ_2** . Τέλος η απόσταση μεταξύ του πρώτου στοιχείου μια ομάδας από το πρώτο στοιχείο της αμέσως επόμενης συνδεδεμένης σε σειρά ομάδας ονομάζεται **βήμα του τυλίγματος**.

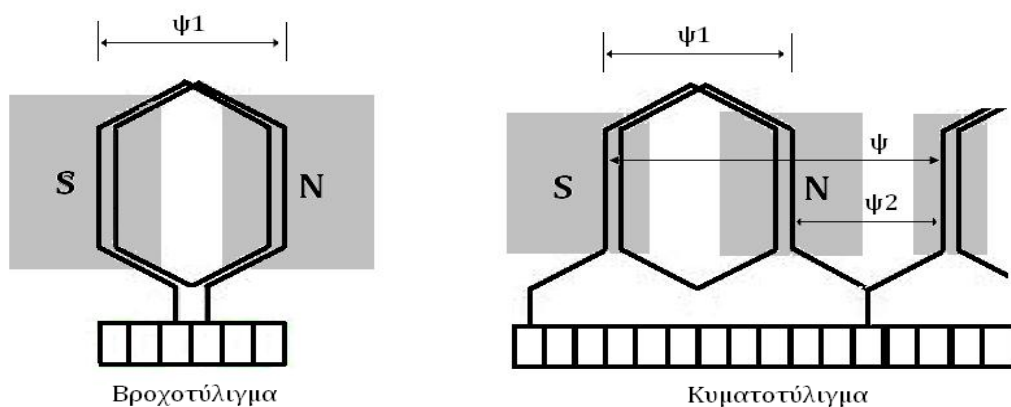
Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι συνδεσμολογίας του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου. Αυτοί είναι το **βροχοτύλιγμα** και το **κυματοτύλιγμα**.

Το απλό βροχοτύλιγμα παρουσιάζει τις εξής ιδιότητες:

1. Ο αριθμός των τομέων του συλλέκτη είναι ίσος με τον αριθμό των ομάδων του τυλίγματος,
2. Ο αριθμός των παράλληλων κλάδων του τυλίγματος είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων της μηχανής.
3. Ο αριθμός των ψηκτρών ισούται με τον αριθμό των πόλων της μηχανής.

Στο απλό κυματοτύλιγμα ισχύει το εξής:

1. Υπάρχουν μόνο δύο παράλληλοι κλάδοι ανεξάρτητα από τον αριθμό των πόλων της μηχανής.

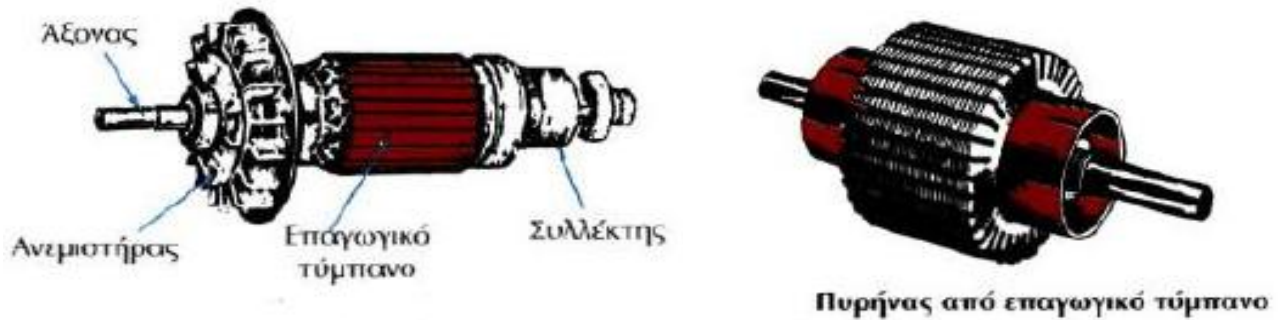


Σχήμα 2.2: Συνδέσεις ομάδων τυλιγμάτων μηχανών συνεχούς ρεύματος

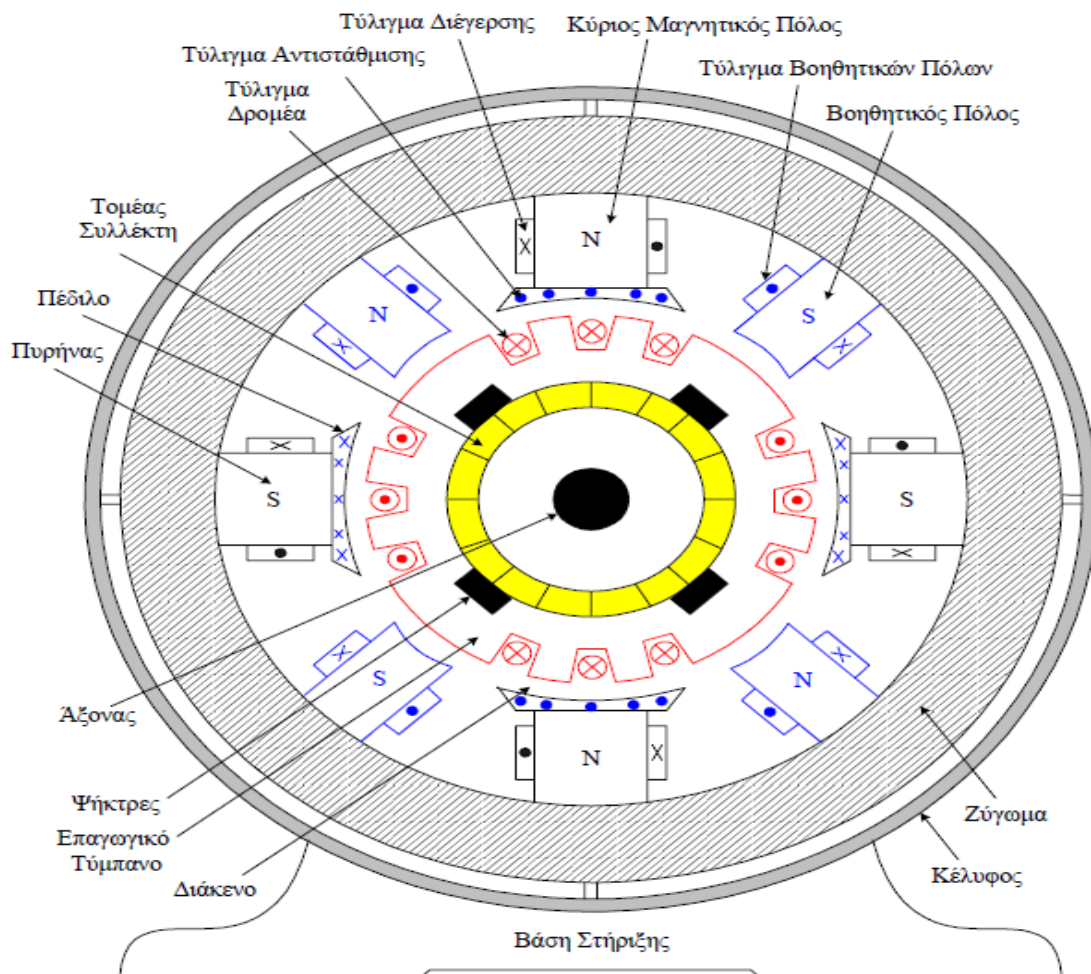
Ο συλλέκτης είναι κατασκευασμένος από πολλά χάλκινα ελάσματα τα οποία είναι χωρισμένα σε τομείς. Στις εγκοπές που φέρουν οι τομείς συγκολλούνται τα άκρα των ομάδων από το τύλιγμα το επαγωγικού τυμπάνου. Οι τομείς στερεώνονται ανάμεσα σε δύο σιδερένια δαχτυλίδια, ώστε να σχηματίζουν την κυλινδρική επιφάνεια του

συλλέκτη. Ανάμεσα στους τομείς του συλλέκτη τοποθετείτε κάποιο μονωτικό υλικό τύπου μίκας και φίμπερ, ώστε να αποφύγουμε τη βραχυκύκλωση τους

Ο ανεμιστήρας που στερεώνεται στον άξονα του δρομέα, δημιουργεί κατά τη περιστροφή του ένα ρεύμα αέρα με σκοπό να προστατεύσει τη μηχανή λόγω υπερθέρμανσης της.



Σχήμα 2.3: Βασικά μέρη του δρομέα



Σχήμα 2.4: Τομή μηχανής συνεχούς ρεύματος με τα επιμέρους μέρη της

2.3. Αρχή λειτουργίας κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος στηρίζεται στην ανάπτυξη δυνάμεων Laplace σε ρευματοφόρους αγωγούς από τα μαγνητικά πεδία. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί ένα μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής μέσω της τροφοδοσίας του τύλιγματος διέγερσης και στη συνέχεια να τροφοδοτηθεί με ρεύμα από μια πηγή συνεχούς τάσης το τύλιγμα του δρομέα μέσω των ψηκτρών του συλλέκτη. Ως αποτέλεσμα θα έχουμε την ανάπτυξη δύναμης Laplace σε κάθε αγωγό του δρομέα ίση με:

$$\bullet \quad F = B \cdot I \cdot L \quad (2.1)$$

Η ροπή στρέψης που αναπτύσσεται στο επαγωγικό τύμπανο (τύλιγμα δρομέα) λόγω της εμφάνισης δυνάμεων Laplace είναι ίση με:

$$\bullet \quad \tau_{\text{ind}} = K \cdot \Phi \cdot I_A \quad (2.2)$$

Όπου τ_{ind} : ροπή που παράγει η μηχανή

Φ : μαγνητική ροή στο εσωτερικό του κινητήρα

I_A : το ρεύμα του δρομέα

K : ένα σταθερό μέγεθος που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της μηχανής

Όταν το επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα τροφοδοτηθεί με ρεύμα, αρχίζει να περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων. Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται, αναπτύσσεται στο επαγωγικό τύμπανο μια αντιηλεκτρεγερτική δύναμη E_a , η οποία αντιτίθεται στην τάση της πηγής τροφοδοσίας του δρομέα. Το μέγεθος της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης υπολογίζεται από τη σχέση

$$\bullet \quad E_a = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (2.3)$$

Όπου Φ : η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του κινητήρα

ω : η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

K : ένα σταθερό μέγεθος που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της μηχανής

Θα πρέπει η τάση που τροφοδοτούμε τον κινητήρα να είναι μεγαλύτερη από την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ), καθώς και από την πτώση τάσης που οφείλεται στις ωμικές αντιστάσεις των αγωγών, των επαφών και των ψηκτρών. Η σχέση που επαληθεύει τα παραπάνω είναι:

$$\bullet \quad V_T = E_a + I_A \cdot R_A \quad (2.4)$$

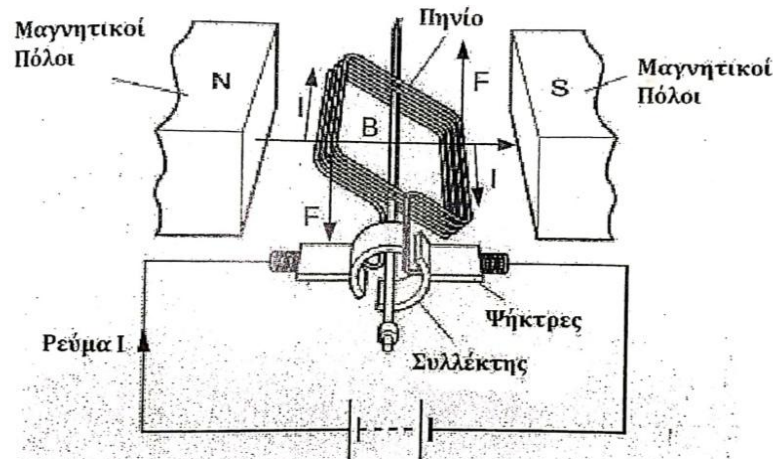
Όπου V_T : η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα (σε V)

E_a : αναπτυσσόμενη ΑΗΕΔ (σε V)

I_A : η ένταση μέσα από το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου (οπλισμού)

R_A : σύνολο των αντιστάσεων του επαγωγικού τυμπάνου και των ψηκτρών

Συνεπώς στη περίπτωση της λειτουργίας της μηχανής ως κινητήρας συνυπάρχουν τα φαινόμενα ανάπτυξης δυνάμεων Laplace (εμφανίζεται πρώτα) και επαγωγής τάσης στους αγωγούς (η τάση εμφανίζεται αφού ο δρομέας αρχίσει να περιστρέφεται).



Σχήμα 2.5: Βασικά μέρη ενός απλού κινητήριου συστήματος συνεχούς ρεύματος

2.4. Είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο είναι συνδεδεμένο το τύλιγμα διέγερσης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος με το επαγωγικό τύμπανο, διακρίνονται σε:

- Κινητήρες ξένης διέγερσης
- Κινητήρες με παράλληλη διέγερση
- Κινητήρες με διέγερση σειράς
- Κινητήρες με σύνθετη διέγερση

2.4.1. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης και παράλληλης διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης, ενώ το αντίστοιχο κύκλωμα ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης τροφοδοτείται από το κύκλωμα οπλισμού. Αν θεωρήσουμε πως η τάση τροφοδοσίας ενός κινητήρα παραμένει σταθερή, τότε η συμπεριφορά ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης είναι απολύτως ίδια με την αντίστοιχη του κινητήρα ξένης διέγερσης. Έτσι η ανάλυση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης περιλαμβάνει και την ανάλυση κινητήρα ξένης διέγερσης.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν με βάση το **ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα ξένης διέγερσης** είναι:

- $V_T = E_A + I_A \cdot R_A$

Όπου I_A : ρεύμα του δρομέα

R_A : αντίσταση του τυλίγματος δρομέα

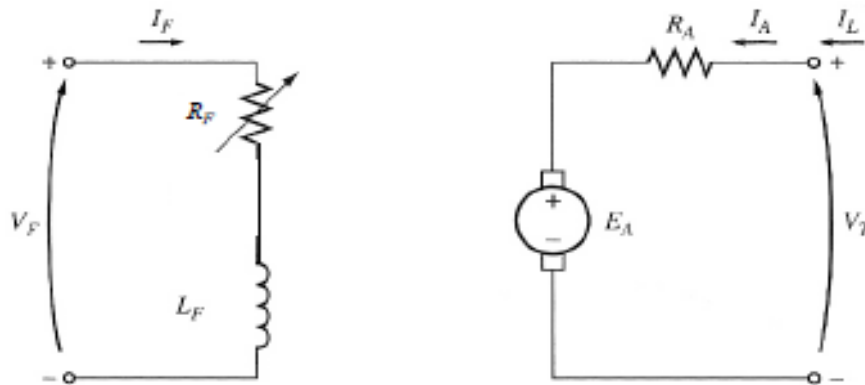
- $I_f = \frac{V_f}{R_f}$ (2.5)

Όπου I_f : το ρεύμα διέγερσης

V_f : η τάση τροφοδοσίας του τυλίγματος διέγερσης

- $I_L = I_A$ (2.6)

Όπου I_L : είναι το συνολικό ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο και είναι ίσο με το ρεύμα του δρομέα (οπλισμού)



Σχήμα 2.6: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ξένης διέγερσης

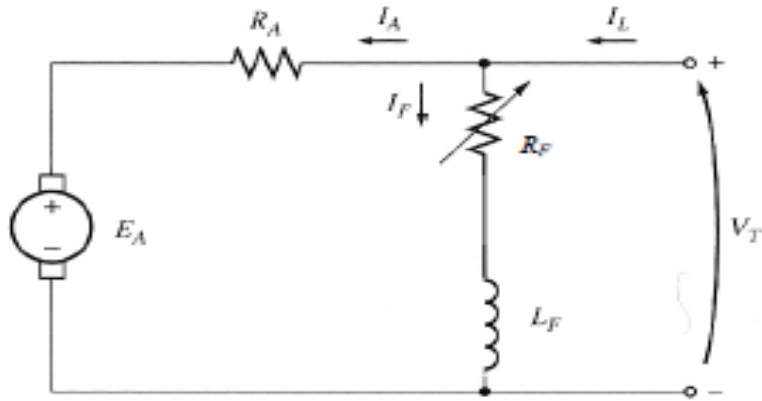
Οι εξισώσεις που προκύπτουν με βάση το **ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα με παράλληλη διέγερση** είναι:

- $V_T = E_A + I_A \cdot R_A$

- $I_f = \frac{V_f}{R_f}$

- $I_L = I_A + I_f$ (2.7)

Όπου I_L : το συνολικό ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο που είναι ίσο με το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων του τυλίγματος τυμπάνου και της κύριας διέγερσης



Σχήμα 2.7: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης

Χαρακτηριστική φορτίου

Χαρακτηριστική φορτίου μιας μηχανής ονομάζεται η γραφική παράσταση μεταξύ των ποσοτήτων εξόδου της μηχανής. Συγκεκριμένα τα μεγέθη εξόδου ενός κινητήρα είναι η ροπή στον άξονα του και η ταχύτητα περιστροφής του. Έτσι η χαρακτηριστική φορτίου αποτελεί τη ροπή εξόδου ως προς τη ταχύτητα του ($\omega = f(\tau_{ind})$).

Για τον υπολογισμό της μαθηματικής έκφρασης της χαρακτηριστικής φορτίου λαμβάνουμε υπόψη τις εξής εξισώσεις:

- $V_T = E_A + I_A \cdot R_A$ και $E_a = K \cdot \Phi \cdot \omega$ οπότε
- $V_T = K \cdot \Phi \cdot \omega + I_A \cdot R_A$ (2.8)

Λόγω της $\tau_{ind} = K \cdot \Phi \cdot I_A$, το I_A εκφράζεται ως εξής:

- $I_A = \frac{\tau_{ind}}{K\Phi}$ (2.9)

Συνεπώς ο συνδυασμός των σχέσεων (2.8) και (2.9) δίνει την εξής σχέση:

- $V_T = K \cdot \Phi \cdot \omega + \frac{\tau_{ind}}{K\Phi} \cdot R_A$ (2.10)

Αν τελικά λύσουμε τη σχέση (2.10) ως προς τη ταχύτητα ω τότε γίνεται:

- $\omega = \frac{V_T}{K\Phi} - \frac{R_A}{(K\Phi)^2} \cdot \tau_{ind}$ (2.11)

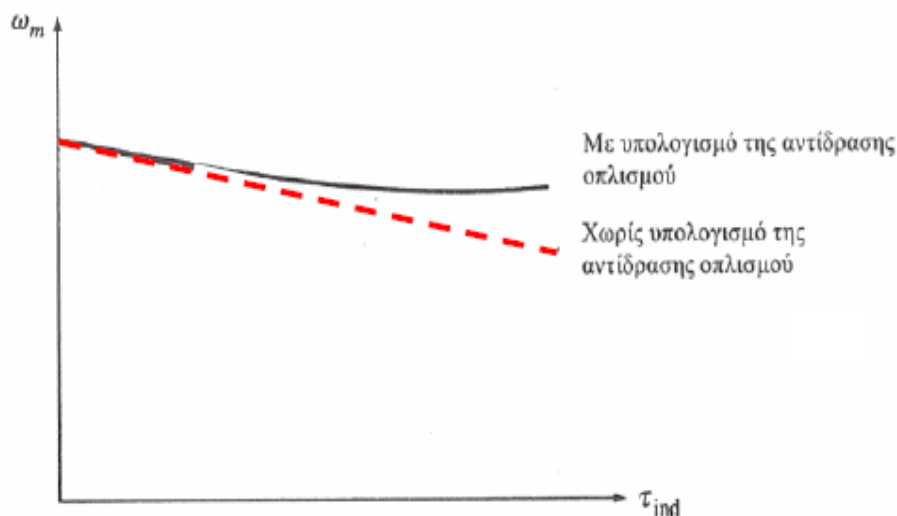
Για να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε τη χαρακτηριστική φορτίου σε έναν κινητήρα ξένης ή παράλληλης διέγερσης, υποθέτουμε πως ο κινητήρας στρέφεται με ταχύτητα ω και ότι η ροπή του φορτίου (τ_{load}) είναι ίση με τη ροπή της μηχανής (τ_{ind}). Στη συνέχεια αρχίζουμε να αυξάνουμε το φορτίο άρα και τη ροπή φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα της μηχανής ($\tau_{load} \uparrow$). Η ροπή του φορτίου (τ_{load}), θα ξεπεράσει τη ροπή που παράγει η μηχανής (τ_{ind}) με αποτέλεσμα να αρχίσει να μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής ($\omega \downarrow$). Με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής

θα μειωθεί η επαγόμενη τάση $E_a (=K\Phi\omega \downarrow)$ και έτσι θα αυξηθεί το ρεύμα του οπλισμού $I_A (= (V_T - E_a)/R_A)$. Ως αποτέλεσμα, η αύξηση του ρεύματος οπλισμού θα οδηγήσει στην παραγωγή μεγαλύτερης ροπής από ότι είχε πριν ο κινητήρας ($\tau_{ind} = K\Phi I_A \uparrow$) και τελικά η ροπή του κινητήρα θα γίνει ίση με τη ροπή που εφαρμόζεται στο φορτίο. Η περιστροφή που θα έχει ο κινητήρας θα είναι σταθερή αλλά μικρότερη από την αρχική.

Η χαρακτηριστική που προκύπτει σύμφωνα με τη μαθηματική έκφραση (2.11) και από όσο ειπώθηκαν παραπάνω, προκύπτει μία ευθεία με αρνητική κλίση. Η ευθεία αυτή τείνει να γίνει παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα. Επομένως ο αριθμός των στροφών δεν επηρεάζεται αισθητά από την τιμή της ροπής στρέψης. Για να ισχύει η παραπάνω γραμμική σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της ροπής ενός κινητήρα, θα πρέπει η τάση τροφοδοσίας V_T του κινητήρα και η μαγνητική ροή Φ να παραμείνουν σταθερά.

Στη περίπτωση που ο κινητήρας δεν διαθέτει τύλιγμα αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων, η αντίδραση οπλισμού που εμφανίζεται στο εσωτερικό του κινητήρα επηρεάζει τη καμπύλη ροπής – ταχύτητας. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του φορτίου, θα εμφανιστεί μια μικρή εξασθένηση στη μαγνητική ροή λόγω της αντίδρασης οπλισμού με αποτέλεσμα η μείωση στις στροφές για τα ίδια φορτία να είναι μικρότερη από εκείνη που επέρχεται όταν ο κινητήρας διαθέτει τύλιγμα αντιστάθμισης. Προφανώς, όταν ο κινητήρας διαθέτει τύλιγμα αντιστάθμισης δεν εμφανίζεται εξασθένηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της μηχανής, οπότε η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή.

Η μεταβολή των στροφών για μια ευρεία περιοχή μεταβολής φορτίου είναι αρκετά μικρή και για το λόγο αυτό οι κινητήρες ξένης και παράλληλης διέγερσης καλούνται και **κινητήρες σταθερής ταχύτητας**. Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν σχεδόν σταθερή ταχύτητα, αλλά όχι υψηλή ροπή εκκίνησης.



Σχήμα 2.8: Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας κινητήρα ξένης/παράλληλης διέγερσης

2.4.2. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς

Αυτή η κατηγορία κινητήρων συνεχούς ρεύματος **το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο**. Έτσι λοιπόν το ρεύμα τυμπάνου είναι ίσο με το ρεύμα διέγερσης και το ρεύμα εισόδου. Επειδή το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται με το ρεύμα τυμπάνου, για να δώσει την ίδια μαγνητεγερτική δύναμη είναι κατασκευασμένο από μικρότερο αριθμό σπειρών και φυσικά αγωγούς μεγαλύτερης διατομής σε σχέση με τους κινητήρες ξένης και παράλληλης διέγερσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός τέτοιου κινητήρα φαίνεται στο σχήμα (2.9) από όπου προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

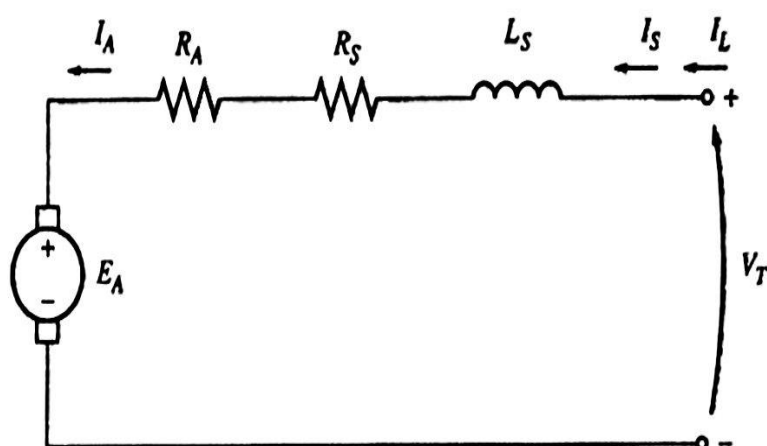
- $I_A = I_S = I_L$ (2.12)

- $V_T = E_a + I_A(R_A + R_S)$ (2.12)

Όπου I_A : το ρεύμα του δρομέα

R_A : αντίσταση τυλίγματος δρομέα

R_S : αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης σειράς



Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς

Χαρακτηριστική φορτίου

Η χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα με διέγερσης σειράς είναι διαφορετική από εκείνη που είχαμε στους κινητήρες ξένης και παράλληλης διέγερσης. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας των κινητήρων είναι ότι **η μαγνητική ροή στο εσωτερικό τους είναι ανάλογη του ρεύματος οπλισμού**. Αυτό βέβαια ισχύει όταν ο κινητήρας δουλεύει στη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής καμπύλης μαγνήτισης. Έτσι λοιπόν, με την αύξηση του ρεύματος οπλισμού αυξάνεται η μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής με συνέπεια τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Το αποτέλεσμα είναι ότι η καμπύλη ροπής – ταχύτητας ($\omega = f(\tau_{ind})$) ενός κινητήρα με διέγερση σειράς παρουσιάζει πολύ απότομη κλίση. Έτσι λοιπόν προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

- $\tau_{\text{ind}} = K \cdot \Phi \cdot I_A$ και $\Phi = c \cdot I_A$ (2.13)

Όπου c : ένας σταθερός συντελεστής αναλογίας

- $\tau_{\text{ind}} = K \cdot c \cdot I_A^2$ (2.14)

Από τη παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η αναπτυσσόμενη ροπή σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ρεύματος οπλισμού. Προκύπτει λοιπόν ότι **οι κινητήρες με διέγερση σειράς δίνουν τη μεγαλύτερη ροπή ανά μονάδα ρεύματος τυμπάνου σε σχέση με τους κινητήρες ξένης και παράλληλης διέγερσης**. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές ροπές (π.χ. ανελκυστήρες φορτίων, γερανούς κλπ)

Για να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε τη χαρακτηριστική φορτίου σε έναν κινητήρα διέγερσης σειράς, υποθέτουμε ότι η καμπύλη μαγνήτισης είναι γραμμική, (δηλαδή $\Phi = c \cdot I_A$).

Για τον υπολογισμό της μαθηματικής έκφρασης της χαρακτηριστικής φορτίου λαμβάνουμε υπόψη τις εξής εξισώσεις:

- $V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$ και $E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega$

Λόγω της $\tau_{\text{ind}} = K \cdot c \cdot I_A^2$, το I_A δίνεται από τη σχέση

- $I_A = \sqrt{\frac{T_{\text{ind}}}{Kc}}$ (2.15)

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει

- $V_T = K \cdot \Phi \cdot \omega + \sqrt{\frac{T_{\text{ind}}}{Kc}} (R_A + R_S)$ (2.16)

Αν γίνει δυνατή η απαλοιφή της ροής στη παραπάνω εξίσωση, αυτή θα δώσει αμέσως τη σχέση της ροπής με την ταχύτητα του κινητήρα. Για την απαλοιφή της ροής έχουμε:

- $I_A = \frac{\Phi}{c}$ (2.17)

Επομένως η επαγόμενη ροπή γράφεται ως εξής:

- $\tau_{\text{ind}} = \frac{K}{c} \cdot \Phi^2$ (2.18)

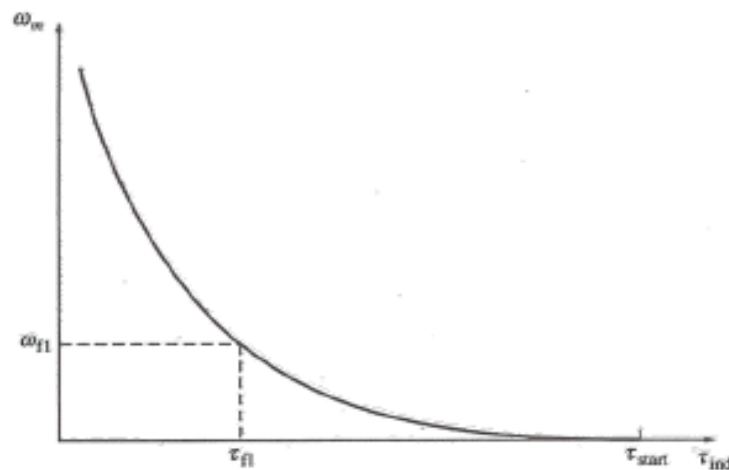
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.17) και (2.18) η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του κινητήρα γίνεται:

- $\Phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \cdot \sqrt{T_{\text{ind}}}$ (2.19)

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.16) και (2.19) και λύνοντας ως προς την ταχύτητα

- $V_T = K \cdot \sqrt{\frac{c}{K}} \cdot \sqrt{T_{ind}} \cdot \omega + \sqrt{\frac{T_{ind}}{Kc}} (R_A + R_S) \Rightarrow$
- $\sqrt{Kc} \cdot \sqrt{T_{ind}} \cdot \omega = V_T - \frac{R_A + R_S}{\sqrt{Kc}} \cdot \sqrt{T_{ind}} \Rightarrow$
- $\omega = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{T_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc} \quad (2.20)$

Από την εξίσωση (2.20) παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του κινητήρα με διέγερση σειράς μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της επαγόμενης ροπής. Η μορφή της χαρακτηριστικής που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα (2.10), με σταθερή τάση τροφοδοσίας ίση με την ονομαστική. Η απότομη μεταβολή της ταχύτητας με τη ροπή, οφείλεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής με το φορτίο.



Σχήμα 2.10: Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας κινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς

Με βάση τη χαρακτηριστική φορτίου παρατηρούμε ότι όταν η ροπή του φορτίου τείνει προς το μηδέν, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα αποκτά υψηλές τιμές. Στη πράξη, αν δεν συνδεθεί κάποιο φορτίο στον κινητήρα, ο άξονας του απορροφά ένα μικρό ρεύμα το οποίο καθώς διαρρέει το τύλιγμα διέγερσης σειράς, δημιουργεί μια μικρή μαγνητική ροή με αποτέλεσμα η ταχύτητα του να γίνει γρήγορα πολύ μεγάλη, προκαλώντας σημαντικές βλάβες στη μηχανή. Έτσι λοιπόν **δεν πρέπει ποτέ ένας κινητήρας με διέγερση σειράς να λειτουργεί χωρίς φορτίο**, ούτε να συνδέεται στο φορτίο του μέσω κάποιου ιμάντα, ο οποίος είναι πιθανό να σπάσει και να αφήσει αφόρτιστο τον κινητήρα.

2.4.3. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης

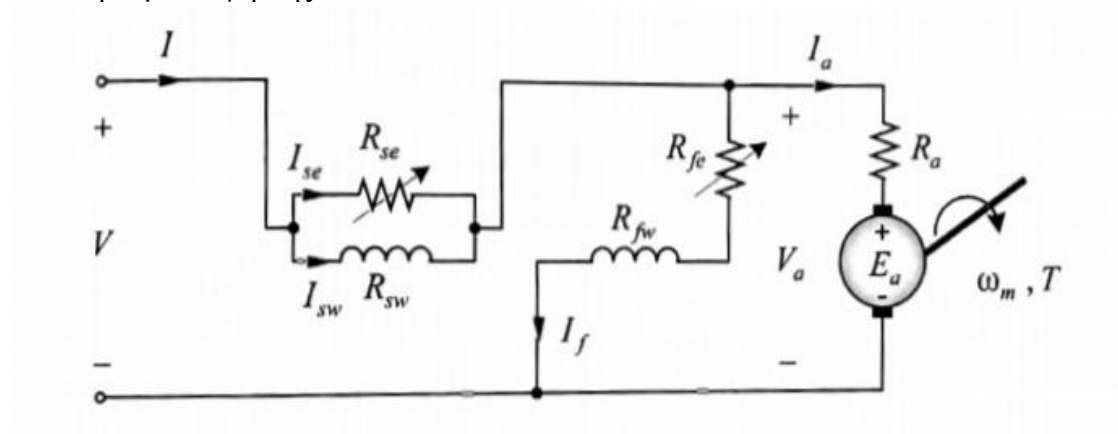
Αυτή η κατηγορία των κινητήρων συνεχούς ρεύματος διαθέτουν ταυτόχρονα ένα τύλιγμα διέγερσης σειράς και ένα τύλιγμα παράλληλης διέγερσης. Ο κινητήρας σύνθετης διέγερσης συνδυάζει τα επιμέρους χαρακτηριστικά των κινητήρων παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σειράς. Ανάλογα με το αν το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης, συνδέεται πιο κοντά με το επαγωγικό τύμπανο σε σχέση με το τύλιγμα διέγερσης σειράς, διακρίνουμε δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες, **τη βραχεία σύνδεση** και τη **μακρά σύνδεση**. Τα ισοδύναμα κυκλώματα απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (2.11). Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

- $I = I_{sw} + I_{se} = I_f + I_a$
- $V = E_a + I_a \cdot R_a + I_{sw} \cdot R_{sw}$
- $I_f = \frac{V}{R_f}$

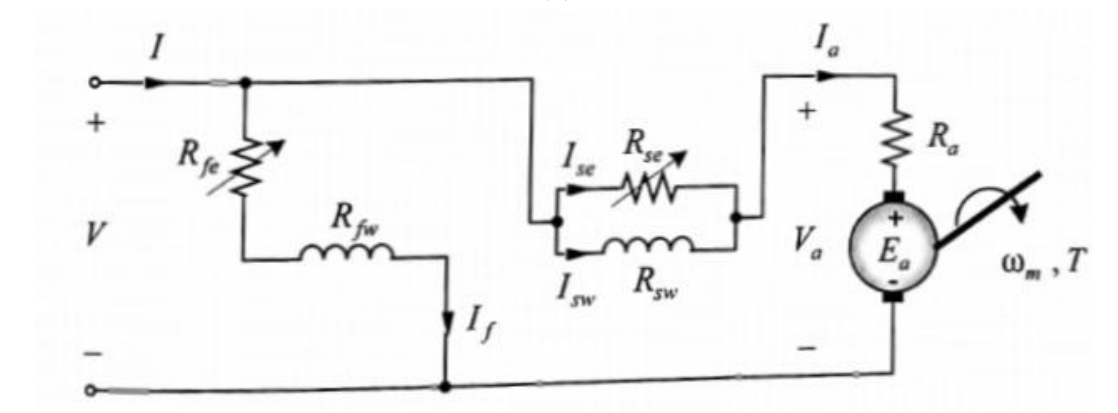
Όπου I: ρεύμα τροφοδοσίας

V: τάση τροφοδοσίας

I_f : ρεύμα διέγερσης



(α)



(β)

Σχήμα 2.11: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης (α) βραχείας σύνδεσης, (β) μακράς σύνδεσης

Ανάλογα με τις συνδέσεις των δύο τυλιγμάτων, οι μαγνητικές τους ροές στο εσωτερικό του κινητήρα μπορεί να προστίθενται (**αθροιστική σύνθετη διέγερση**), ή μπορεί να αφαιρούνται (**αφαιρετική ή διαφορική σύνθετη διέγερση**). Η συνολική μαγνητική ροή ανά πόλο, προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους τυλιγμάτων.

$$\bullet \quad \Phi = \Phi_{\Pi} \pm \Phi_{\Sigma} \quad (2.21)$$

Όπου \pm : είναι για τις περιπτώσεις της αθροιστικής και της διαφορικής σύνδεσης

Φ_{Π} : η μαγνητική ροή που προκαλείται από το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης

Φ_{Σ} : η μαγνητική ροή που προκαλείται από το τύλιγμα διέγερσης σειράς

Για τη λειτουργία στο γραμμικό τμήμα της μαγνητικής χαρακτηριστικής η εξίσωση (2,21) παίρνει τη μορφή:

$$\bullet \quad \Phi = \Phi_{\Pi} \pm K \cdot I_{\Sigma} \quad (2.22)$$

Χαρακτηριστική φορτίου για αθροιστική και διαφορική σύνθετη διέγερση

Ο κινητήρας **αθροιστικής σύνθετης διέγερσης** συνδυάζει κατά κάποιο τρόπο τα πλεονεκτήματα των κινητήρων διέγερσης σειράς και των κινητήρων παράλληλης διέγερσης. Στο εσωτερικό του η μαγνητική ροή αποτελείται από ένα σταθερό μέρος, ενώ το υπόλοιπο είναι ανάλογο του ρεύματος οπλισμού (ή αλλιώς του φορτίου). Αυτό σημαίνει πως ο κινητήρας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης διαθέτει υψηλή ροπή εκκίνησης (όπως ο κινητήρας διέγερσης σειράς) και δεν επιταχύνεται ασταμάτητα κατά την αφόρτιστη λειτουργία (όπως ο κινητήρας παράλληλης διέγερσης).

Η επαγόμενη ροπή στον άξονα του κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

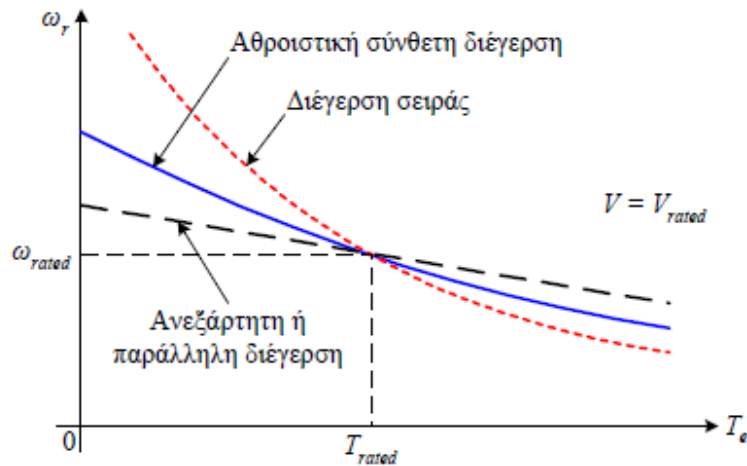
$$\bullet \quad T = K \cdot \Phi \cdot I_A = K \cdot \Phi_{\Pi} \cdot I_A + K \cdot \Phi_{\Sigma} \cdot I_A \quad (2.23)$$

Αν θεωρήσουμε ότι $\Phi_{\Pi} = K_f \cdot I_f$ και $\Phi_{\Sigma} = K_{\Sigma} \cdot I_A$ και αντικαταστήσουμε στη σχέση (2.23) προκύπτει η εξής σχέση:

$$\bullet \quad T = K \cdot K_f \cdot I_f \cdot I_A + K \cdot K_{\Sigma} \cdot I_A \cdot I_A = K \cdot K_f \cdot I_f \cdot I_A + K \cdot K_{\Sigma} \cdot I_A^2 \quad (2.24)$$

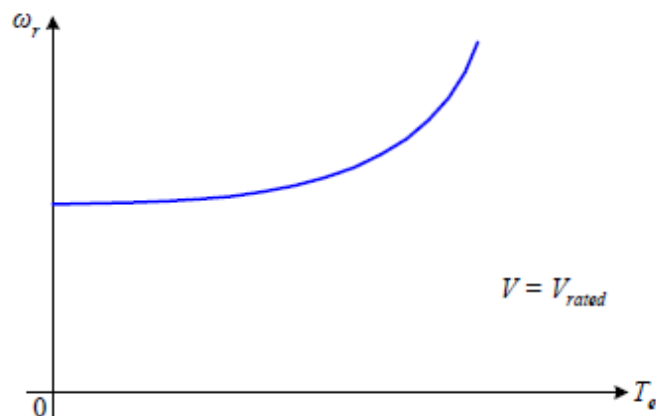
Όταν το φορτίο του κινητήρα είναι μικρό, το τύλιγμα διέγερσης σειράς δεν παίζει μεγάλο ρόλο και ο κινητήρας συμπεριφέρεται σαν κινητήρα παράλληλης διέγερσης. Αντίθετα στη περίπτωση που το φορτίο γίνει μεγάλο, η επίδραση του τυλίγματος σειράς είναι έντονη, εξαιτίας της αύξησης του ρεύματος τυμπάνου. Επομένως, ο

κινητήρας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης τείνει να συμπεριφερθεί ως κινητήρας με διέγερση σειράς, εμφανίζοντας μεγάλη ροπή εκκίνησης.



Σχήμα 2.12: Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης και σύγκριση με τις χαρακτηριστικές των κινητήρων παράλληλης ή ανεξάρτητης διέγερσης και διέγερσης σειράς

Από την άλλη, ο κινητήρας **διαφορικής σύνθετης διέγερσης** η μαγνητευερτική δύναμη του τυλίγματος διέγερσης σειράς αφαιρείται από τη μαγνητευερτική δύναμη του τυλίγματος παράλληλης διέγερσης. Αυτό σημαίνει ότι με την αύξηση του φορτίου προκαλείτε μείωση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του κινητήρα με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Αυτή η επιτάχυνση προκαλεί επιπλέον αύξηση στο φορτίο και στο ρεύμα I_A , που οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της μαγνητικής ροής και αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Ως αποτέλεσμα, ο κινητήρας διαφορικής σύνθετης διέγερσης να παρουσιάζει μια αστάθεια κατά τη λειτουργία του και για αυτό το λόγω δεν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές.



Σχήμα 2.13: Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης

2.5. Ροή ισχύος και απώλειες στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Σε όλες τις ηλεκτρικές μηχανές, έτσι και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, κατά τη διαδικασία της μετατροπής της ισχύος, από ηλεκτρική σε μηχανική (για κινητήρες), η ισχύς εισόδου δε μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε χρήσιμη μορφή ισχύος στην έξοδο του κινητήρα, καθώς ένα μέρος της εμφανίζει κάποιες απώλειες. Η ισχύς εξόδου P_{out} είναι πάντα μικρότερη από την ισχύς εισόδου P_{in} κατά την ισχύ απωλειών P_{loss} .

$$\bullet \quad P_{out} = P_{in} - P_{loss} \quad (2.25)$$

Ο συντελεστής απόδοσης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ορίζεται ως εξής:

$$1) \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.26)$$

Απώλειες στις μηχανές συνεχούς ρεύματος

Οι απώλειες που εμφανίζονται στις μηχανές συνεχούς ρεύματος διακρίνονται ως εξής:

1. Απώλειες χαλκού
2. Απώλειες πυρήνα
3. Μηχανικές απώλειες
4. Καταναεμημένες απώλειες

- Απώλειες χαλκού

Είναι οι απώλειες που οφείλονται στη ροή ρεύματος του τυλίγματος του δρομέα (επαγωγικό τύμπανο) και του στάτη (τύλιγμα διέγερσης, βοηθητικοί πόλοι)

$$\text{Απώλειες τυλίγματος τυμπάνου: } P_A = I_A^2 \cdot R_A \quad (2.27)$$

$$\text{Απώλειες τυλίγματος διέγερσης: } P_f = I_f^2 \cdot R_f \quad (2.28)$$

$$\text{Απώλειες χαλκού: } P_{cu} = P_A + P_f \quad (2.29)$$

- Απώλειες πυρήνα

Είναι οι απώλειες που οφείλονται εξαιτίας της μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων στον πυρήνα της μηχανής

- Μηχανικές απώλειες

Οι μηχανικές απώλειες οφείλονται στα μηχανικά μέρη της μηχανής. Αυτές οι απώλειες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Στις **απώλειες τριβών**, που οφείλονται στα ρουλεμάν της μηχανής καθώς επίσης και στις τριβές μεταξύ του συστήματος

συλλέκτη – ψηκτρών, και στις **απώλειες εξαιρισμού** που οφείλονται από τη πτερωτή του άξονα της μηχανής. Οι απώλειες τριβών αλλά και οι απώλειες εξαιρισμού είναι ανάλογες της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής.

- **Κατανεμημένες απώλειες**

Πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες δεν μπορούν να ενταχθούν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες. Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών (P_{stray}) είναι εξαιρετικά δύσκολος. Έτσι, συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής, σε λειτουργία με το ονομαστικό φορτίο.

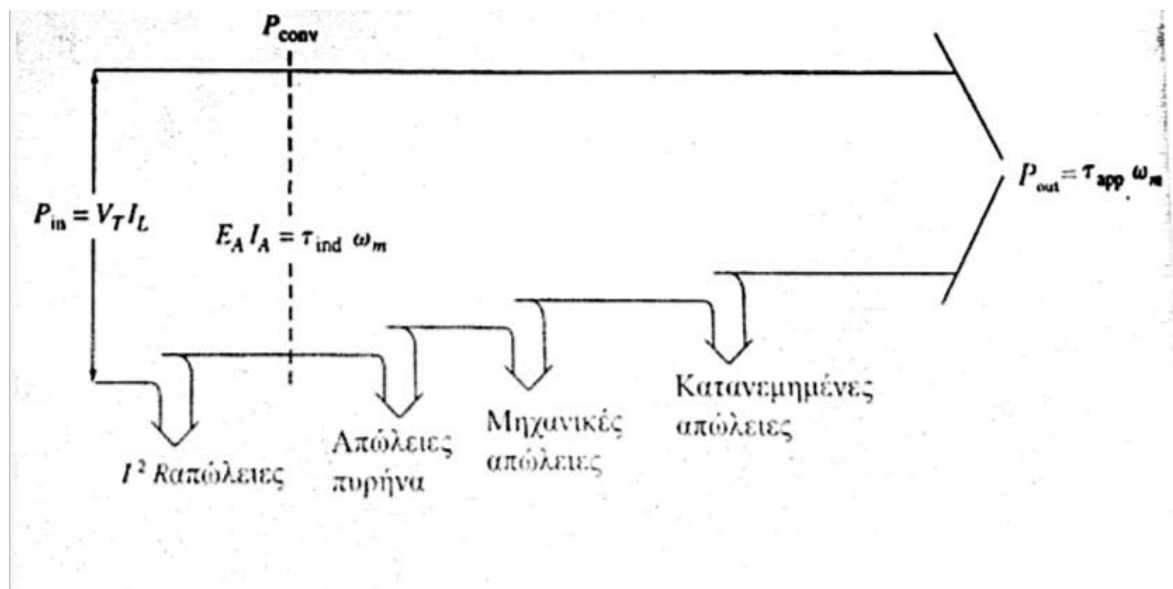
Διάγραμμα ροής ισχύος

Με τη χρήση του διαγράμματος ροής ισχύος απεικονίζονται οι απώλειες που παρουσιάζει ο κινητήρας κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Το ποσό της ισχύος που θεωρείται ότι μετατρέπεται ιδανικά από την ηλεκτρική στη μηχανική είναι η P_{conv} . Η ηλεκτρική ισχύς που μετατρέπεται είναι:

- $P_{\text{conv}} = E_A \cdot I_A$ (2.30)

Και η μηχανική ισχύς που προκύπτει είναι:

- $P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \cdot \omega_m$ (2.31)



Σχήμα 2.14: Διάγραμμα ροής ισχύος κινητήρα συνεχούς ρεύματος

2.6. Βηματικοί κινητήρες

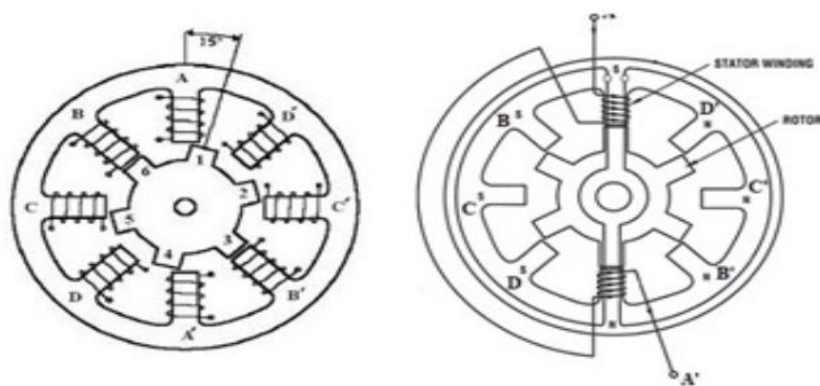
2.6.1. Εισαγωγή στους βηματικούς κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες (stepper motor) είναι ένας ειδικός σύγχρονος κινητήρας ο οποίος χρησιμοποιείται σε ειδικές εφαρμογές, όπου απαιτείται ακριβείς έλεγχος της θέσης και της ταχύτητας περιστροφής (εκτυπωτές, μηχανές CNC, κάμερες κ.τ.λ.). Η κίνηση που εκτελεί ένας τέτοιος κινητήρας γίνεται με τη χρήση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, το οποίο ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τα τυλίγματα του κινητήρα στέλνοντας παλμούς. Το χαρακτηριστικό που έχουν οι βηματικοί κινητήρες είναι ότι δεν κινούνται ανεξέλεγκτα αλλά περιστρέφονται σε διακεκριμένα βήματα (steps), όπου με βάση το των αριθμό και τη ταχύτητα των ψηφιακών παλμών (βημάτων) μπορούμε να προσδιορίσουμε την θέση και τη ταχύτητα του δρομέα. Προφανώς, όσο μικρότερα είναι τα βήματα τόσο περισσότερο με μεγαλύτερη ακρίβεια είναι η θέση του δρομέα.

2.6.2. Δομή ενός βηματικού κινητήρα

Η κατασκευή των βηματικών κινητήρων είναι απλή. Όπως και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, έτσι και στους βηματικούς κινητήρες αποτελούνται από το σταθερό μέρος (**στάτη**) και από το κινούμενο (**δρομέα**). Το μαγνητικό υλικό από το οποίο αποτελείται ο πυρήνας του δρομέα και του στάτη είναι από μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό κράματος χάλυβα με πυρίτιο, το οποίο είναι με τη μορφή ελασμάτων και παρουσιάζει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα για να δημιουργούν μεγάλη μαγνητική ροή, ακόμα και αν εφαρμόζεται χαμηλή τάση.

Στο στάτη της μηχανής βρίσκονται τα τυλίγματα τα οποία αποτελούν τους πόλους του κινητήρα, οι οποίοι είναι σε ζεύγη και προεξέχουν (έκτυποι). Σε κάθε ζεύγος τα τυλίγματα είναι σε σειρά και περιελιγμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε ένα να δρα σαν βόρειος πόλος και το άλλο σαν νότιος πόλος. Οι ακροδέκτες που προέρχονται τα τυλίγματα συνδέονται σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο δίνει παλμούς, για τη διέγερση των τυλιγμάτων

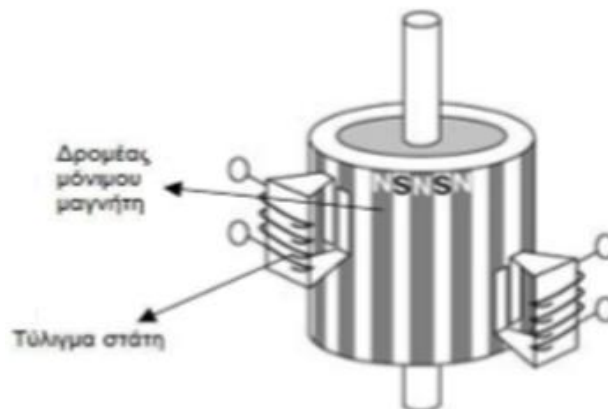


Σχήμα 2.15: Σχηματική αναπαράσταση τυλιγμάτων μονοπολικού βηματικού κινητήρα

Ωστόσο όμως η κατασκευή του δρομέα είναι διαφορετική και για το λόγω αυτό διακρίνουμε τρία είδη βηματικών κινητήρων.

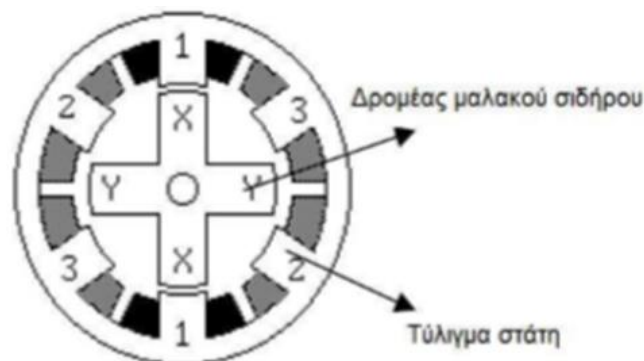
1. Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
2. Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης
3. Υβριδικός βηματικός κινητήρας

Στους βηματικούς κινητήρες **μόνιμου μαγνήτη**, ο δρομέας είναι ένας συμπαγής κύλινδρος ο οποίος αποτελείται από μια συστοιχία από μόνιμους μαγνήτες που βρίσκονται σε εναλλαγή. Με το τρόπο αυτό ο δρομέας περιστρέφεται με την εναλλαγή του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη, αλλάζοντας δηλαδή τη φορά του μαγνητικού πεδίου



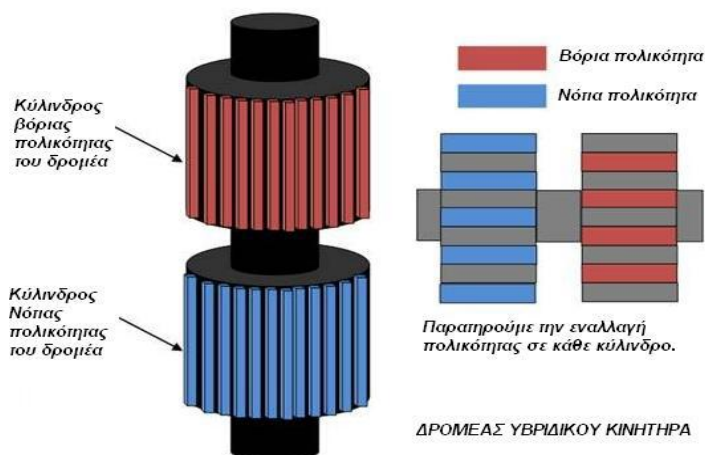
Σχήμα 2.16: Δρομέας βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη

Στους βηματικούς κινητήρες **μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης** ο δρομέας κατασκευάζεται με ένα τμήμα ή με πολλαπλά τμήματα, τοποθετημένα στην ίδια άτρακτο, με το βόρειο και νότιο πόλο να εναλλάσσονται. Επιπλέον ο δρομέας αποτελείται από έκτυπους πόλους (οδόντες), με διαφορετικό αριθμό από εκείνων του στάτη, με αποτέλεσμα οι πόλοι του δρομέα να μην είναι ευθυγραμμισμένοι με τους πόλους του στάτη. Για να περιστραφεί ο δρομέα θα πρέπει να ενεργοποιηθεί το κατάλληλο τύλιγμα του πόλου του στάτη ώστε να ευθυγραμμίσει το κατάλληλο ζεύγος πόλων του δρομέα.



Σχήμα 2.17: Δρομέας βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στους υβριδικούς βηματικούς κινητήρες ο δρομέας αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες. Στα άκρα των μαγνητών προσαρμύζονται τμήματα με τη μορφή οδοντωτών τροχών. Λόγω του ενδιάμεσου μαγνήτη αυτά μετατρέπονται σε βόρειο και νότιο πόλο. Ο άξονας βρίσκεται στερεωμένος σε ένα κεντρικό γρανάζι, οπότε οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται στα 'δόντια' του γραναζιού το περιστρέφουν και κατά συνέπεια περιστρέφεται ο άξονας.



2.18: Δρομέας υβριδικού βηματικού κινητήρα

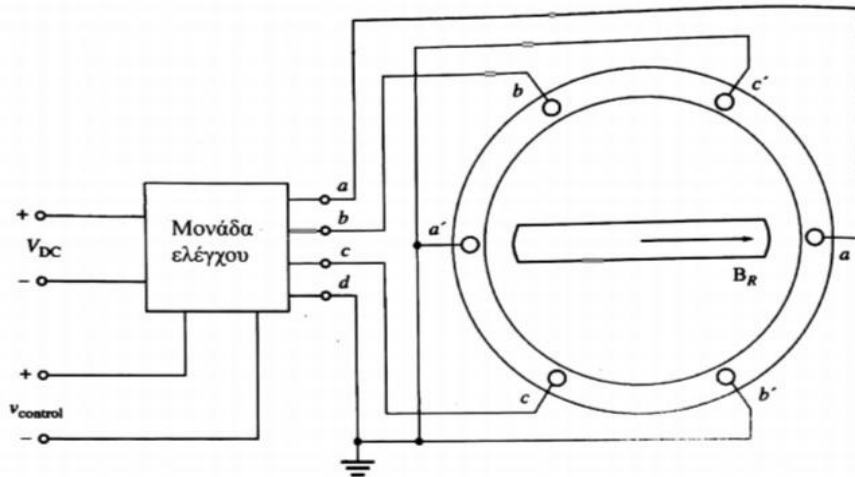
2.6.3. Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα

Ένας απλός βηματικός κινητήρας για να λειτουργήσει χρειάζεται μια μονάδα ελέγχου που να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί τα τυλίγματα ακολουθώντας μια σειρά παλμών. Κάθε παλμός που στέλνεται από τη μονάδα ελέγχου, εφαρμόζει τάση στα διαδοχικά τυλίγματά του στάτη σε μικρά διακριτά χρονικά βήματα, περιστρέφοντας το δρομέα κατά μια συγκεκριμένη γωνία. Μόλις σταματήσει η εφαρμογή της τάσης, ο δρομέας σταματάει ακαριαία. Όταν είναι σταματημένος ο βηματικός κινητήρας κλειδώνει και δεν κινείται ελεύθερα όπως ο αναλογικός κινητήρας. Το κλείδωμα αυτό επιτυγχάνεται λόγω της μαγνητικής έλξης του σταματημένου δρομέα πάντοτε απέναντι από ένα τυλίγμα. Το κλείδωμα είναι ακόμα πιο ισχυρό αν συνεχιστεί η τροφοδοσία με τάση του τυλίγματος.

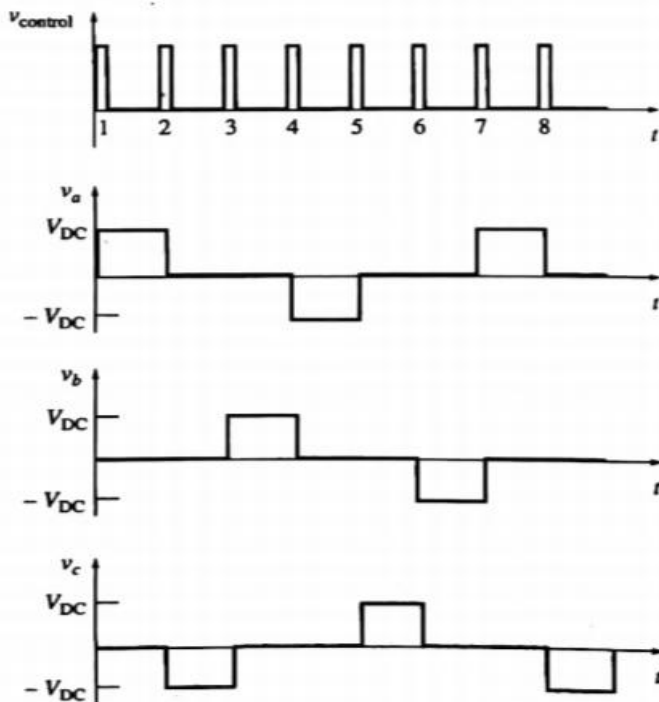
Για να έχουμε μια πιο καλή εικόνα για το πως λειτουργεί ένας βηματικός κινητήρας, εξετάζουμε το κινητήρα που φαίνεται το σχήμα 2.19. Ο συγκεκριμένος κινητήρας αποτελείται από ένα τριφασικό στάτη 2 πόλων και ένα δρομέα μόνιμου μαγνήτη. Έστω ότι εφαρμόζεται τάση στη φάση Α του στάτη και δεν εφαρμόζεται τάση στις άλλες δύο (φάσεις Β, C), τότε στο δρομέας επάγεται ροπή που τον αναγκάζει να περιστραφεί κατά μια συγκεκριμένη γωνία και να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Στη συνέχεια, σταματάμε να δίνουμε τάση στη φάση Α και εφαρμόζουμε έναν νέο παλμό στη φάση C. Το νέο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο στάτη στέφει το δρομέα σε μια νέα θέση και το ευθυγραμμίζει με το μαγνητικό πεδίο. Αν συνεχίσουμε αυτή τη διαδικασία τότε οδηγούμαστε στη κίνηση του

κινητήρα. Επιπλέον δημιουργούμε ένα πίνακα στον οποίο μπορούμε να δούμε τη θέση του δρομέα συναρτήσει της τάσης που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη

Μεταξύ των βημάτων παρεμβάλλεται μια χρονοκαθυστερίση. Όσο μικρότερη είναι αυτή η χρονοκαθυστερίση τόσο πιο γρήγορα γίνεται η εναλλαγή και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Για να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής, αρκεί να αντιστραφεί η σειρά με την οποία εφαρμόζονται οι παλμοί από την μονάδα ελέγχου που ενεργοποιεί τα τυλίγματα του στάτη



Σχήμα 2.19: Απλός τριφασικός βηματικός κινητήρας με τη μονάδα ελέγχου



Αρίθμηση παλμών	Φασικές τάσεις V		
	v_a	v_b	v_c
1	V_{DC}	0	0
2	0	0	$-V_{DC}$
3	0	V_{DC}	0
4	$-V_{DC}$	0	0
5	0	0	V_{DC}
6	0	$-V_{DC}$	0

Σχήμα 2.20: Παράσταση της τάσης εξόδου από τη μονάδα ελέγχου, όταν στην είσοδο εφαρμόζονται παλμοί και ο πίνακας που δείχνει τη τάση εξόδου της μονάδας σύμφωνα με την αρίθμηση των παλμών

Κεφάλαιο 3^ο

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC)

3.1. Εισαγωγή στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

Στη σύγχρονη κοινωνία, η ηλεκτρική ενέργεια είναι η πιο δημοφιλής δευτερεύουσα πηγή ενέργειας. Η εφαρμογή των κινητήρων έχει εξαπλωθεί σε όλους τους τομείς της οικονομίας και της καθημερινότητάς μας ως η κύρια συσκευή μετατροπής μηχανικής – ηλεκτρονικής ενέργειας για περισσότερο από έναν αιώνα.

Σήμερα, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Στους κλασικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος, η μεταγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας υλοποιείται με τη χρήση ψηκτρών (καρβουνάκια), τα οποία οδηγούν σε προβλήματα κατά τη λειτουργία. Καθώς οι ψήκτρες τρίβονται πάνω στην επιφάνεια του συλλέκτη της μηχανής, εμφανίζονται υπολείμματα σκόνης και κάρβουνου τα οποία εισχωρούν μέσα στα ρουλεμάν, δημιουργώντας με αυτό το τρόπο μια αγωγίμη τροχιά που προκαλεί σπινθήρες. Σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί οι σπινθήρες να καταστρέψουν τον συλλέκτη ή ακόμα αν είναι τέτοιο το περιβάλλον να οδηγήσει στην ανάφλεξη της μηχανής. Επιπλέον οι φθορές των ψηκτρών γίνονται μεγαλύτερες όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες μειώνοντας περισσότερο τη διάρκεια ζωής των ψηκτρών. Σε αυτή την κατάσταση, λαμβάνοντας υπόψη τα μειονεκτήματα του υψηλού κόστους παραγωγής και της ακατάλληλης συντήρησης, το εύρος των εφαρμογών σε συγκεκριμένους τομείς έχει περιοριστεί. Επομένως, εφαρμογές μικρού και μεσαίου μεγέθους χρειάζονται επειγόντως νέους κινητήρες υψηλής απόδοσης.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (brushless dc motors ή BLDC) είναι νέοι τύποι κινητήρων που εφευρέθηκαν κατά την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Οι εξελίξεις της τεχνολογίας των υλικών στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οδήγησαν στην εφεύρεση του πρώτου κινητήρα DC χωρίς ψήκτρες (BLDC) το 1962 από τους T.G. Wilson και P.H. Trickey, που τον ονόμασαν «μηχανή DC με μεταγωγή στερεάς κατάστασης». Το βασικό στοιχείο των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες σε αντίθεση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες είναι ότι δεν απαιτείται ένας « φυσικός μεταγωγέας » αλλά ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ισχύος, κάτι που είναι αρκετά καινοτόμο.

Παρά την αξιοπιστία τους, το αρχικό μειονέκτημα των πρώτων κινητήρων χωρίς ψήκτρες ήταν ότι δεν μπορούσαν να παράγουν μεγάλη ισχύ. Όλα αυτά άλλαξαν τη δεκαετία του 1980, όταν έγιναν διαθέσιμα καλύτερα υλικά μόνιμου μαγνήτη. Η χρήση μόνιμων μαγνητών, σε συνδυασμό με τρανζίστορ υψηλής τάσης, επέτρεψε στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες να παράγουν τόση ισχύ ή και μεγαλύτερη με τους παλιούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες. Κοντά στα τέλη της δεκαετίας του 1980, ο Robert E. Lordo της POWERTEC Industrial

Corporation παρουσίασε τους πρώτους μεγάλους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες, οι οποίοι είχαν τουλάχιστον δέκα φορές μεγαλύτερη ισχύ από τους προηγούμενους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες.

Οι σημερινοί κινητήρες χωρίς ψήκτρες επιλύουν πολλούς περιορισμούς των κινητήρων με ψήκτρες συνδυάζοντας υψηλότερη ισχύ εξόδου, μικρότερο μέγεθος και βάρος, καλύτερη απαγωγή θερμότητας και απόδοση, ευρύτερα εύρη στροφών λειτουργίας και λειτουργία πολύ χαμηλού ηλεκτρικού θορύβου. Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες δεν έχουν ηλεκτρικές επαφές σχεδιασμένες για φθορά, παρέχοντας το μεγαλύτερο πλεονέκτημα στην αξιοπιστία και μειωμένα διαστήματα συντήρησης για εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

3.2. Κατασκευαστικά μέρη BLDC

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες [Brushless motor (BLDC)] είναι ένας σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη, καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με τη ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. Με τον όρο «brushless» δηλώνουμε ότι η μεταγωγή του ρεύματος γίνεται με τη χρήση ενός ελεγκτή (controller) και όχι μέσω ψηκτρών, όπως στους περισσότερους dc κινητήρες. Όπως και οι άλλοι κινητήρες έτσι και αυτοί αποτελούνται από το στάτη και από το δρομέα. Ο δρομέας αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες ενώ τα τυλίγματα των φάσεων είναι τοποθετημένα στο στάτη. Οι κινητήρες BLDC ανάλογα με την περιέλιξη που υπάρχει στο στάτη, διακρίνονται σε μονοφασικές, διφασικές και τριφασικές μηχανές. Ωστόσο οι πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι οι τριφασικές μηχανές.

Στάτης

Η κατασκευή του στάτη ενός κινητήρα BLDC είναι όμοια με αυτή ενός επαγωγικού κινητήρα. Αποτελείται από στοιβαγμένα ελάσματα χάλυβα με πάχος 0,3mm – 0,5mm, τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους για να περιορίσουν τα δινορρέυματα. Τα τυλίγματα που υπάρχουν στο εσωτερικό του είναι τοποθετημένα στις εγκοπές οι οποίες βρίσκονται κατά μήκος της περιφέρειας του. Στους περισσότερους κινητήρες BLDC ο στάτης αποτελείται από τρεις φάσεις, στις οποίες οι περιελίξεις τους είναι συνδεδεμένες συνήθως σε διάταξη αστέρα (Y). Το τύλιγμα της κάθε φάσης μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα υποτυλίγματα (περιελίξεις ή πυρήνες), που συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν έναν ομοιόμορφο αριθμό πόλων γύρω από τη περιφέρεια του στάτη. Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται κατά τη λειτουργία των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι η εμφάνιση δονήσεων. Για το λόγο αυτό, στον στάτη των BLDC κινητήρων κατασκευάζονται καλούπια ώστε να εξαλείψουν αυτούς τους θορύβους.

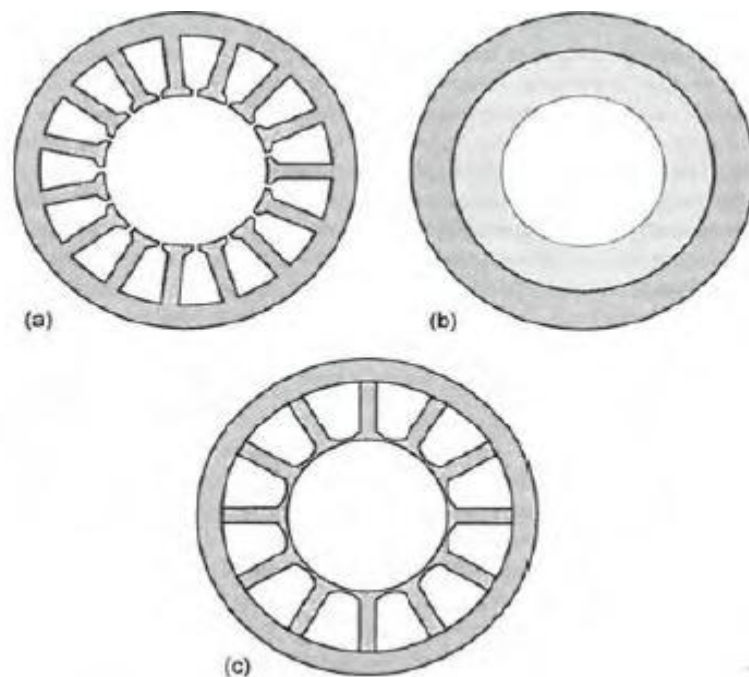


Σχήμα 3.1: Στάτης μηχανής brushless, όπου φαίνονται οι εγκοπές στην εσωτερική περιφέρεια του στάτη οι πυρήνες και τα τυλίγματα

Υπάρχουν 3 είδη στάτη που έχουν κατασκευαστεί: **με αυλακώσεις, χωρίς αυλακώσεις, με αυλακώσεις χωρίς ανοίγματα.**

- 1) **Ο στάτης με αυλακώσεις**, στον οποίο τα τυλίγματα τοποθετούνται συμμετρικά με διαφορά 120° , έχει κατασκευαστεί με ένα μικρό διάκενο αέρα, με αποτέλεσμα ο συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας και η πυκνότητα μαγνητικής ροής να εμφανίζουν αρκετά μεγάλες τιμές. Ως εκ τούτου αυξάνεται η απόδοση του κινητήρα και μεγαλώνει η ροπή του. Επίσης η μεγάλη περιοχή επαφής μεταξύ των τυλιγμάτων και του φερομαγνητικού υλικού του στάτη προσφέρει καλή απαγωγή θερμότητας από τα τυλίγματα προς το περιβάλλον. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει αυτή η μορφολογία του στάτη είναι ότι εμφανίζονται ταλαντώσεις στην παραγόμενη ροπή, εξαιτίας της μη ομοιογενούς κατανομής της μαγνητικής διαπερατότητας του διακένου (ροπή αντιδράσεως), καθώς και το αυξημένο κόστος για την εισαγωγή των τυλιγμάτων στα μικρά ανοίγματα των αυλακώσεων.
- 2) **Ο στάτης χωρίς αυλακώσεις**, στον οποίο τα τυλίγματα παίρνουν τη μορφή δακτυλιδιού και τοποθετούνται στην εσωτερική επιφάνεια του δρομέα, όπου χωρίζεται από το δρομέα με ένα διάκενο αέρα. Σε αυτού του είδους του στάτη έχουμε τα πλεονεκτήματα ότι δεν παρουσιάζονται ταλαντώσεις στην παραγόμενη ροπή, καθώς επίσης υπάρχει αρκετός χώρος για την εισαγωγή των τυλιγμάτων. Ωστόσο όμως λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζεται στην απαγωγή θερμότητας από τα τυλίγματα προς το περιβάλλον, μειώνονται τα επιτρεπτά όρια ρεύματος. Επιπλέον, το μαγνητικό διάκενο, το οποίο αποτελείται από το διάκενο αέρα και το πάχος των τυλιγμάτων, αυξάνει τα διαστάσεις του διακένου προκαλώντας μείωση στον συντελεστή διαπερατότητας και της πυκνότητας της μαγνητικής ροής. Κατά συνέπεια ο βαθμός απόδοσης και η παραγόμενη ροπή να είναι μικρότερη σε σχέση με εκείνη που έχει μια μηχανή με αυλακώσεις.

- 3) **Ο στάτης με αυλακώσεις χωρίς ανοίγματα**, είναι μια διαφοροποιημένη μορφή του στάτη με αυλακώσεις. Αυτή η δομή του στάτη έχει δημιουργηθεί ώστε να αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ροπής αντιδράσεως που αναπτύσσεται στη δομή του στάτη με αυλακώσεις. Συγκεκριμένα, οι αυλακώσεις δεν έχουν ανοίγματα και τα δόντια του στάτη ενώνονται με την εσωτερική επιφάνεια του και φτάνουν μέχρι το εξωτερικό του τμήμα. Αυτή η μορφή διευκολύνει την εισαγωγή των τυλιγμάτων, διότι εισάγονται από την εξωτερική επιφάνεια του στάτη και όχι από μικρά ανοίγματα στο εσωτερικό, αλλά υστερεί σε μαγνητική απόδοση, μιας και οι ενώσεις των αυλακώσεων αυξάνουν τη διαρροή επαγωγής και απομακρύνουν ένα τμήμα μαγνητικής ροής από τις σπείρες, οδηγώντας στην παραγωγή μικρότερης τάσης εξ' επαγωγής.



Σχήμα 3.2: Μορφές στάτη κινητήρων BLDC, (a) με αυλακώσεις, (b) χωρίς αυλακώσεις, (c) με αυλακώσεις χωρίς ανοίγματα

Δρομέας

Ο δρομέας των κινητήρων BLDC αποτελεί μια συμπαγή κατασκευή ατσάλινου υλικού. Ο πυρήνας είναι κυλινδρικού σχήματος και στη περιφέρεια του υπάρχουν μόνιμοι μαγνήτες με κάποια κενά ανάμεσά τους, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε οριζόντια ή κάθετη διάταξη. Συνολικά υπάρχουν από δύο έως οκτώ ζεύγη πόλων με εναλλακτικά τον βόρειο (N) και νότιο (S) πόλο, ανάλογα με την απαίτηση της εφαρμογής.

Το μαγνητικό πεδίο καθορίζεται από τη φύση των μαγνητών που τοποθετούνται πάνω στο δρομέα. Προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη ροπή στον κινητήρα, η πυκνότητα ροής του υλικού πρέπει να είναι υψηλή. Συγκριμένα τα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου είναι είτε μαγνήτες από

φερρίτη, είτε από κράματα σπάνιων γαιών [το νεοδύμιο (Nd), το κοβάλτιο σαμάρου (SmCo) και το κράμα νεοδυμίου, φερρίτη και βορίου (NdFeB) είναι μερικά παραδείγματα μαγνητών από κράμα σπάνιων γαιών]. Οι μαγνήτες από φερρίτη χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών. Είναι αρκετά φθηνοί αλλά έχουν το μειονέκτημά της χαμηλής πυκνότητας ροής ενός δεδομένου όγκου. Καθώς η τεχνολογία προχωρά, οι μαγνήτες από κράμα σπάνιων γαιών κερδίζουν δημοτικότητα. Οι μαγνήτες από κράματα σπάνιων γαιών έχουν υψηλή μαγνητική πυκνότητα ανά όγκο, μειώνοντας ακόμα περισσότερο τον όγκο του δρομέα διατηρώντας σταθερή την τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Συγκριτικά με τους μαγνήτες από φερρίτη, τα κράματα σπάνιων γαιών είναι πιο αποδοτικοί καθώς έχουν βελτιώσει την αναλογία μεγέθους – βάρους, δίνοντας υψηλότερη ροπή για κινητήρα ίδιου μεγέθους χρησιμοποιώντας μαγνήτες από φερρίτη.



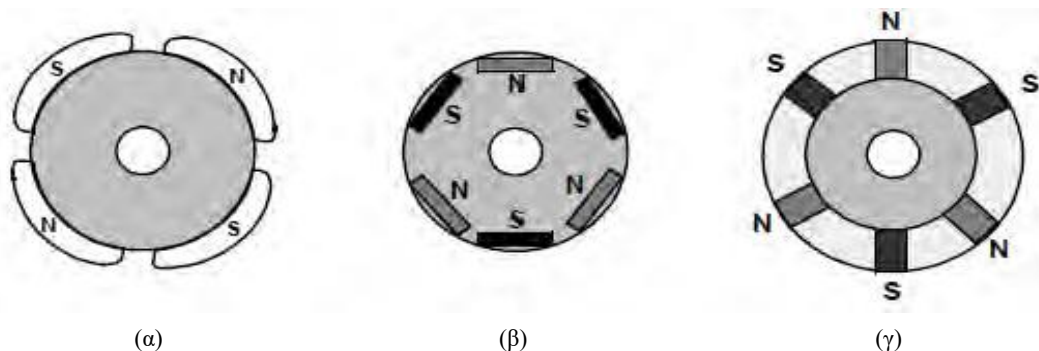
Σχήμα 3.3: Δρομέας κινητήρα BLDC αποτελούμενο από μόνιμους μαγνήτες

Ανάλογα με το σχήμα και την τοποθέτηση των μαγνητών υπάρχουν οι εξής τοπολογίες δρομέα:

- **Δρομέας με μαγνήτες τοποθετημένους στην εξωτερική επιφάνεια του.** Στην περίπτωση αυτή, οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στη περιφέρεια του δρομέα και παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο καθώς έρχονται σε άμεση επαφή με αυτό, χωρίς να παρεμβάλλεται το σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα. Ένα πρόβλημα που ερχόμαστε αντιμέτωποι κατά τη κατασκευή αυτού του τύπου δρομέα είναι η εμφάνιση υψηλών τιμών ταχυτήτων που προκαλούν ακτινωτές δυνάμεις, την χρονική στιγμή που ο κινητήρας επιταχύνεται ή επιβραδύνεται απότομα. Για την αντιμετώπιση τους, οι μόνιμοι μαγνήτες που βρίσκονται στην περιφέρεια του δρομέα θα πρέπει να είναι γερά συγκρατημένοι χρησιμοποιώντας ειδικές

κόλλες με τους κατάλληλους μηχανικούς και θερμικούς συντελεστές διαστολής.

- **Δρομέας με μαγνήτες τοποθετημένους στο εσωτερικό της περιφέρειας του δρομέα.** Οι μηχανές αυτές είναι πιο στιβαρές, όσον αφορά την κατασκευή τους, αφού οι μαγνήτες πλέον δεν μπορούν να αποκολληθούν κατά την περιστροφή του δρομέα. Η διαμόρφωση αυτή προτιμάται κυρίως σε μηχανές με τραπεζοειδή τάση εξ επαγωγής, καθώς το τόξο του μαγνητικού πόλου μπορεί να προσαρμοσθεί έτσι ώστε να συμβάλει στη βελτίωση της μορφής της τάσης εξ επαγωγής. Η παρουσία μαγνητικού υλικού μπροστά στο φυσικό διάκενο, ανάμεσα στους μαγνητικούς πόλους, μειώνει την μαγνητική ασυμμετρία κατά μήκος της περιφέρειας του δρομέα και δημιουργεί μια επιπλέον διαφοροποίηση στην επαγωγή του τυλίγματος, με τη μεγαλύτερη τιμή αυτής να παρατηρείται στις θέσεις του δρομέα για τις οποίες, τα τόξα των μαγνητικών πόλων δεν ευθυγραμμίζονται με τον άξονα των τυλιγμάτων.
- **Δρομέας με μαγνήτες τοποθετημένους στο εσωτερικό του δρομέα.** Σε αυτή τη δομή, οι μαγνήτες σφηνώνονται εσωτερικά του δρομέα και μπορούν να είναι οριζόντια ή κάθετα. Σε μηχανές με ημιτονοειδή τάση εξ επαγωγής, σφηνώνονται οριζόντια καθώς έτσι επιτυγχάνεται η απαραίτητη ημιτονοειδής μορφή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο. Σαν αποτέλεσμα, έχουμε μεγαλύτερες τιμές επαγωγών σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Αν οι μαγνήτες σφηνωθούν κάθετα στο δρομέα, τότε παρατηρείται το χαρακτηριστικό της έντονης συγκέντρωσης μαγνητικής ροής, μιας και συμβάλλουν δύο ξεχωριστοί μαγνήτες στη δημιουργία της σε ένα πολικό βήμα του δρομέα.



Σχήμα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση του δρομέα με βάση την τοποθέτηση των μαγνητών. (α) Δρομέας με μαγνήτες τοποθετημένους στην εξωτερική επιφάνεια του, (β) Δρομέας με μαγνήτες τοποθετημένους στο εσωτερικό της περιφέρειας του δρομέα., (γ) Δρομέας με μαγνήτες τοποθετημένους στο εσωτερικό του δρομέα.

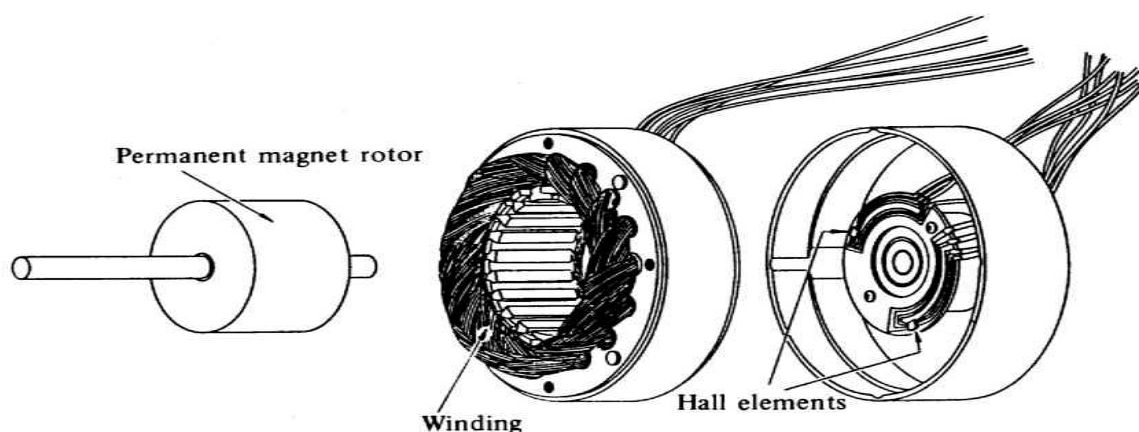
Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου (hall sensors)

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν ψήκτρες σε έναν κινητήρα BLDC, η μετάβαση του ρεύματος γίνεται ηλεκτρονικά. Για να περιστραφεί ο κινητήρας, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να ενεργοποιούνται διαδοχικά. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη θέση του δρομέα ώστε να ξέρουμε ποια περιέλιξη θα ενεργοποιηθεί.

Οι αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της θέσης του δρομέα, ώστε να είμαστε σε θέση να ξέρουμε ποιο τυλίγμα πρέπει να διαρρέεται από ρεύμα κατά τη διάρκεια της περιστροφής. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου, στηρίζονται στο φαινόμενο Hall, το οποίο δηλώνει ότι *«εάν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται σε ένα μαγνητικό πεδίο, ασκείται εγκάρσια δύναμη στους κινούμενους φορείς ρεύματος, ωθώντας τους στη μία πλευρά του αγωγού, με συνέπεια την παραγωγή μιας μετρήσιμης τάση μεταξύ των δύο πλευρών του αγωγού.»* Η παρουσία αυτής της μετρήσιμης εγκάρσιας τάσης ονομάζεται επίδραση Hall, και ονομάστηκε έτσι επειδή ανακαλύφθηκε από το Edwin Hall το 1879.

Οι περισσότεροι κινητήρες BLDC χρησιμοποιούν τρεις αισθητήρες Hall εκ των οποίων ένας (υποχρεωτικά) ή δύο μπορούν να ενεργοποιούνται ταυτόχρονα σε κάθε χρονική στιγμή. Η έξοδος του αισθητήρα Hall θα είναι είτε υψηλή είτε χαμηλή ανάλογα με το αν ο βόρειος ή ο νότιος πόλος του δρομέα περνάει κοντά του. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από τους τρεις αισθητήρες, μπορεί να προσδιοριστεί η ακριβής σειρά ενεργοποίησης.

Πιο αναλυτικά θα μιλήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο που έχει να κάνει με τον έλεγχο των κινητήρων BLDC.



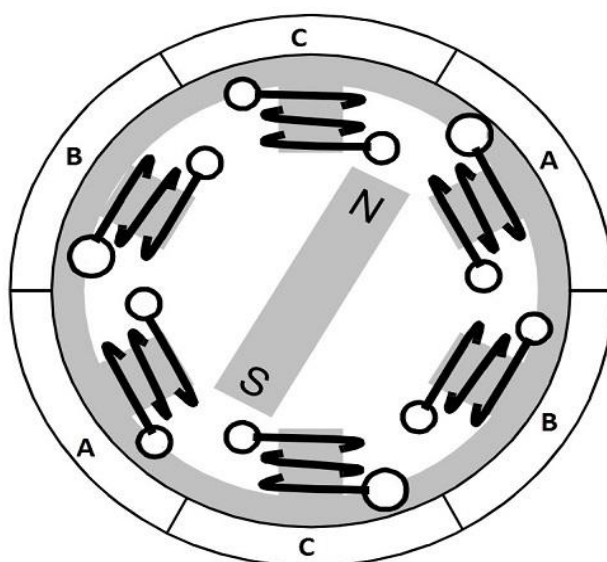
Σχήμα 3.5: Συνολική αναπαράσταση των κατασκευαστικών στοιχείων του κινητήρα BLDC

3.3. Αρχή λειτουργίας των brushless DC κινητήρων (BLDC)

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων BLDC προϋποθέτει την ύπαρξη τριών τυλιγμάτων στο στάτη, από τα οποία τα δύο να διαρρέονται από ρεύμα και το τρίτο να παραμένει ανενεργό. Συγκεκριμένα, από τα ενεργά τυλίγματα, στο ένα το ρεύμα εισέρχεται (θετική ισχύς) ενώ στο δεύτερο το ρεύμα εξέρχεται (αρνητική ισχύς). Τα τυλίγματα αυτά βρίσκονται συνδεδεμένα σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου, το οποίο ενεργοποιεί και απενεργοποιεί κάθε χρονική στιγμή τα κατάλληλα τυλίγματα. Η ροπή παράγεται λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από τα πηνία του στάτη και των μόνιμων μαγνητών κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα. Η ροπή μεγιστοποιείται, όταν τα διανύσματα αυτών των

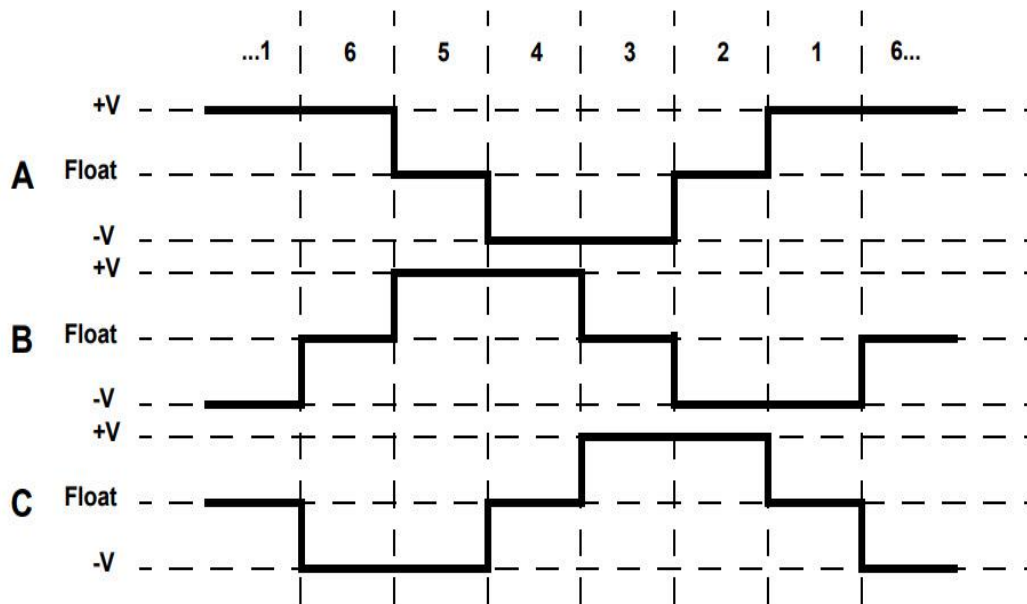
πεδίων είναι κάθετα μεταξύ τους και μειώνεται όταν τα διανύσματα πάνε να γίνουν παράλληλα.

Για να καταλάβουμε την αρχή λειτουργίας του κινητήρα BLDC, εξετάζουμε το κινητήρα του σχήματος 3.4, ο οποίος αποτελείται από τα τυλίγματα A,B,C. Όταν το πηνίο A τροφοδοτηθεί με ρεύμα, τότε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται περιστρέφει το δρομέα του κινητήρα προς εκείνη τη κατεύθυνση. Όταν ο δρομέας φτάσει στη θέση A, τότε σταματά να τροφοδοτείται με ρεύμα το πηνίο A και ενεργοποιείται το πηνίο B, όπου ο δρομέας ακολουθεί τη φορά του μαγνητικού πεδίου από τους ηλεκτρομαγνήτες του στάτη. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται για όλη τη διάρκεια της περιστροφής. Για να αυξήσουμε την απόδοση του κινητήρα, μπορούμε να ενεργοποιούμε δύο πηνία ταυτόχρονα, έτσι ώστε το ένα πηνίο να έλκει τους μαγνήτες του δρομέα και το άλλο να τους απωθεί. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, το τρίτο πηνίο θα είναι αδρανές.



Σχήμα 3.6: Απλός κινητήρας BLDC

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5, για μια πλήρη περιστροφή του κινητήρα απαιτούνται έξι μεταβάσεις του ρεύματος, όπου η κάθε μία αντιστοιχεί σε 60° ηλεκτρικές μοίρες. Είναι σημαντικό να ξέρουμε τη θέση του δρομέα κατά τη διάρκεια της περιστροφής του κινητήρα, ώστε το κύκλωμα ελέγχου να ξέρει ποια τυλίγματα να τροφοδοτήσει. Με τη χρήση των αισθητήρων Hall που βρίσκονται τοποθετημένα στο στάτη του κινητήρα, μπορεί το κύκλωμα ελέγχου να ξέρει τη θέση του δρομέα και να ελέγξει τα τυλίγματα της μηχανής (sensored). Ωστόσο δεν είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούμε τους αισθητήρες θέσης για εφαρμογές όπου η αξιοπιστία είναι υψίστης σημασίας, επειδή μια βλάβη του αισθητήρα μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα ελέγχου. Αυτοί οι περιορισμοί στη χρήση αισθητήρων θέσης σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα ισχυρών και οικονομικών μικροεπεξεργαστών έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογίας ελέγχου χωρίς αισθητήρες (sensorless).



Σχήμα 3.7: Οι έξι μεταβάσεις του ρεύματος για μία πλήρη περιστροφή

3.4. Κατηγορίες κινητήρων Brushless DC

Οι τύποι των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες είναι πολλών τύπων. Ανάλογα με την κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη και της μορφής της επαγόμενης τάσης που προκύπτει διακρίνονται σε **ημιτονοειδής** και **τραπεζοειδής** κινητήρες χωρίς ψήκτρες. Μια άλλη κατηγορία των BLDC μηχανών έχει να κάνει με τον τρόπο που κατανέμετε το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής, όπου χωρίζονται σε μηχανές **ακτινικής ροής (radial flux ή RF)** και σε **αξονικής ροής (axial flux ή AF)**. Όσον αφορά τη σχεδίαση του δρομέα, χωρίζονται σε **κινητήρες με εξωτερικό δρομέα (outrunner motor)** και **κινητήρες με εσωτερικό δρομέα (inrunner motor)**.

Ημιτονοειδής και τραπεζοειδής κινητήρες χωρίς ψήκτρες

Στους κινητήρες με ημιτονοειδής κατανεμημένα τυλίγματα στο στάτη, η τροφοδοσία των τυλιγμάτων γίνεται από ημιτονοειδής τάση και ρεύματα, μέσω παλμικής ρύθμισης της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας στην είσοδο του αντιστροφέα του κινητήρα και είναι αρκετά σημαντικό να έχουμε μια συνεχή γνώση της θέσης του δρομέα. Οι κινητήρες αυτού του τύπου έχουν το πλεονέκτημα της σταθερότερη ροπή με πολύ μικρή κυμάτωση, ωστόσο έχουν υψηλό κόστος που οφείλεται στην περίπλοκη διασύνδεση των περιελίξεων. Παρόλα αυτά, η συμπεριφορά της είναι όμοια με εκείνη μιας σύγχρονης μηχανής που συχνά στη βιβλιογραφία τη συναντάμε και ως «Brushless AC».

Οι κινητήρες με τραπεζοειδής κατανεμημένα τυλίγματα στο στάτη, τροφοδοτούνται με ρεύματα τετραγωνικής μορφής, όπου σε ένα τριφασικό κινητήρα τα ρεύματα αυτά έχουν διαφορά φάσης 120^0 . Οι κινητήρες αυτού του τύπου έχουν χαμηλό κόστος και

παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από ότι μια ημιτονοειδής μηχανή. Επίσης είναι σημαντικό να ξέρουμε τη θέση του δρομέα μόνο στα σημεία μετάβασης δηλαδή κάθε 60°. Χρησιμοποιούνται από συστήματα οδήγησης χαμηλής ισχύος (έως λίγα KW) αλλά και σε συσκευές οικιακής χρήσης. Το μειονέκτημα τους είναι ότι η παραγόμενη ροπή εμφανίζει κάποια κυμάτωση, κυρίως κατά τη μετάβαση του ρεύματος από τη μία φάση στην άλλη. Η εξίσωση της ροπής είναι ανάλογη με το ρεύμα του στάτη καθώς επίσης η τάση εξ επαγωγής είναι ευθέως ανάλογη με τη γωνιακή ταχύτητα το κινητήρα.

- $E=2NlrB\omega$ (3.1)

Όπου: N = ο αριθμός των τυλιγμάτων ανά φάση

l = το μήκος του δρομέα

r = η εσωτερική ακτίνα του δρομέα

B = η πυκνότητα της μαγνητικής ροής του δρομέα

ω = η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

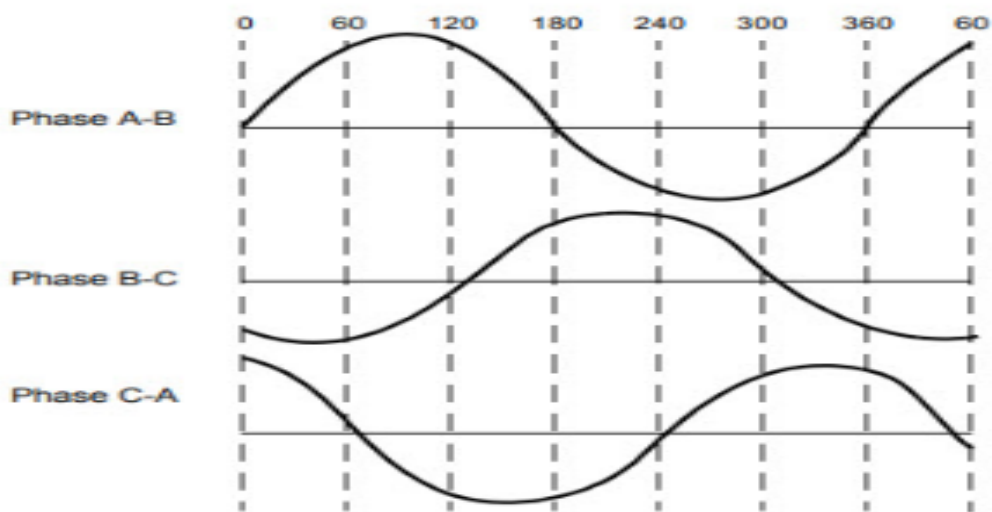
- $T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} B^2 \frac{dR}{d\theta} + \frac{4N}{\pi} Brl\pi i$ (3.2)

Όπου i = το φασικό ρεύμα

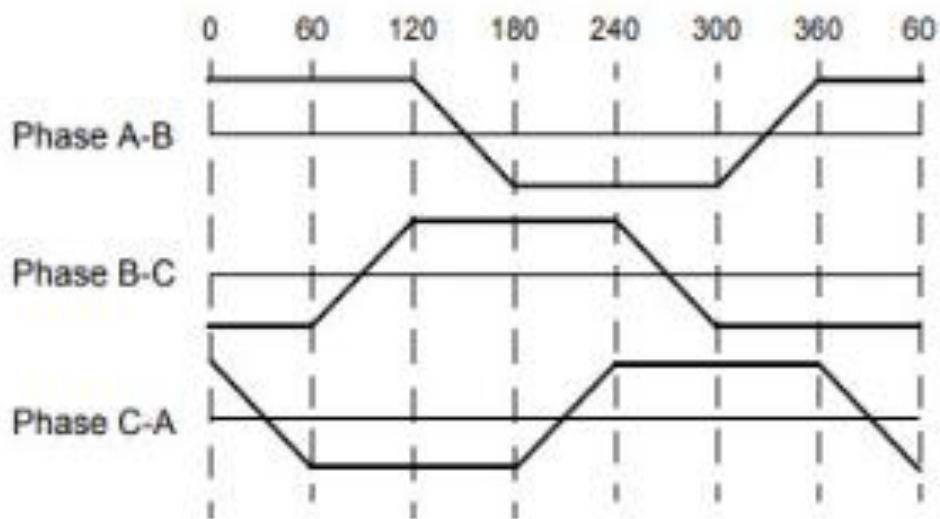
L = η επαγωγή των τυλιγμάτων μιας φάσης

θ = η θέση του δρομέα

R = η αντίσταση των τυλιγμάτων μιας φάσης

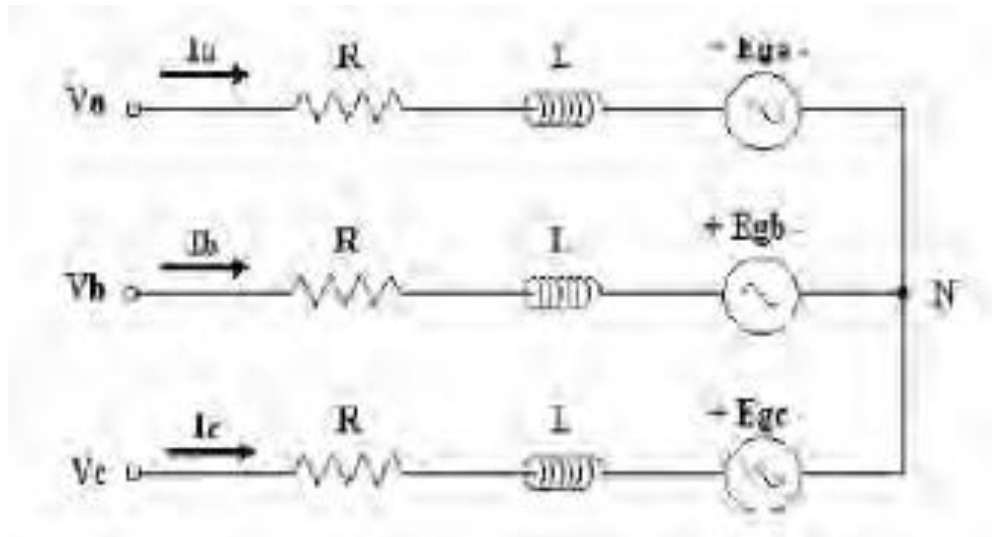


(α)



(β)

Σχήμα 3.8: Ημιτονοειδής (α) και τραπεζοειδής (β) τάση εξ' επαγωγής



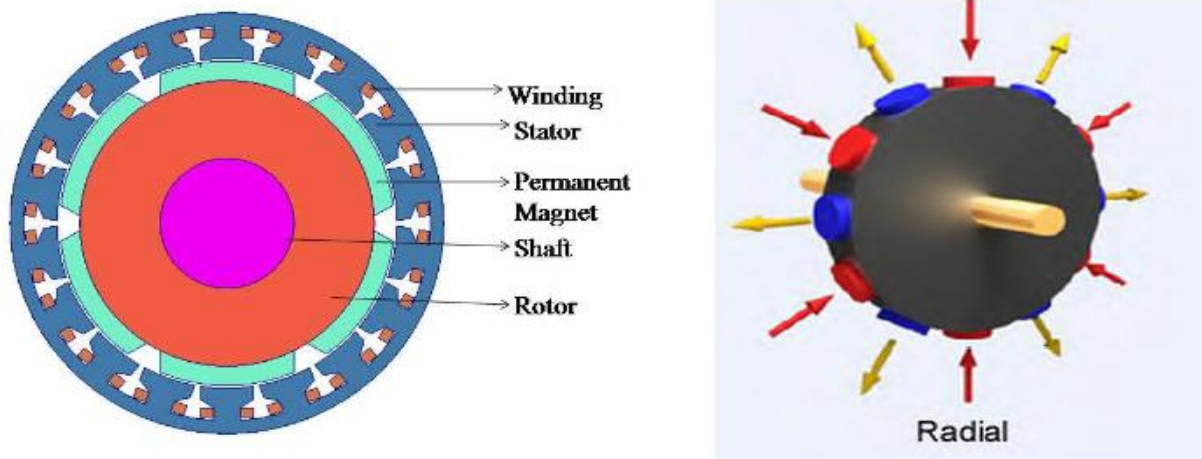
3.9: Τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα BLDC

Κινητήρες ακτινικής και αξονικής ροής

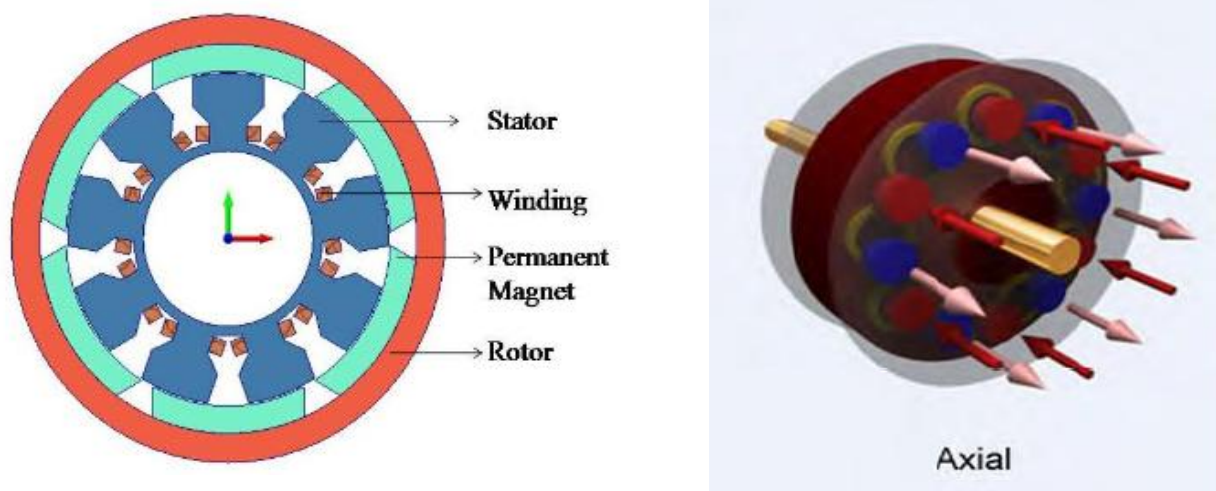
Ο κινητήρας BLDC μπορεί επίσης να ταξινομηθεί ως προς τη κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής. Συνήθως οι κινητήρες BLDC χρησιμοποιούνται στην τοπολογία δηλαδή **ακτινικής ροής** και δηλαδή **αξονικής ροής**.

Στους κινητήρες BLDC **ακτινικής ροής** [Radial Flux (RF)], οι γραμμές της μαγνητικής ροής μεταξύ δρομέα και στάτη ακολουθούν ακτινική διεύθυνση. Οι κινητήρες αυτής της κατηγορίας έχουν μεγάλο μήκος στον άξονα τους και η αδράνεια του δρομέα είναι μικρή ώστε να μειώσουμε το χρόνο απόκρισης στις αλλαγές του φορτίου. Γενικότερα ο τρόπος κατασκευής τους είναι απλός και χρησιμοποιούνται σε σερβομηχανισμούς. Από την άλλη, οι κινητήρες **αξονικής ροής** [Axial Flux (AF)], η

ροή των μαγνητικών γραμμών έχει κατεύθυνση των άξονα του κινητήρα. Οι κινητήρες αξονικής ροής μπορούν να σχεδιαστούν τοποθετώντας τον δρομέα έξω από τον στάτη. Το κύριο μειονέκτημα των κινητήρων αξονικής ροής είναι η παρουσία δύο διακένων αέρα (σε κινητήρες τύπου RF υπάρχει μόνο ένα διάκενο αέρα). Ο μηχανικός σχεδιασμός πρέπει να γίνεται προσεκτικά στους κινητήρες αξονικής ροής (AF). Οι κινητήρες ακτινικής και αξονικής ροής φαίνονται στα σχήματα 3.10 και 3.11



Σχήμα 3.10: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες ακτινικής ροής



Σχήμα 3.11: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες αξονικής ροής

BLDC κινητήρες με εσωτερικό και εξωτερικό δρομέα

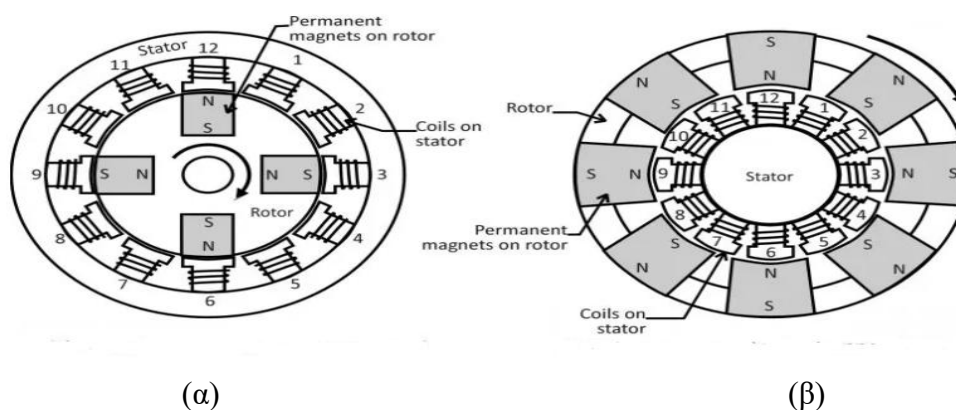
Αυτού του τύπου κινητήρες BLDC διακρίνονται με βάση τη θέση του δρομέα στο σχεδιασμό του κινητήρα. Πρόκειται για κινητήρες στους οποίους ο δρομέας

βρίσκεται στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό της μηχανής. Στη ξένη βιβλιογραφία τους συναντάμε ως «**inrunner motors**» και «**outrunner motors**».

Στον κινητήρα **inrunner**, ο δρομέας βρίσκεται στο εσωτερικό των πηνίων του στάτη με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα μικρό διάκενο αέρα. Επιπλέον, οι μόνιμοι μαγνήτες που αποτελούν τον δρομέα δε μονώνουν τη θερμότητα που εμφανίζεται στο εσωτερικό του κινητήρα, με αποτέλεσμα, λόγω και του μικρού διακένου αέρα, η θερμότητα στο εσωτερικό του κινητήρα να διαχέεται πιο αποτελεσματικά. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που παρουσιάζουν οι κινητήρες inrunners είναι ότι έχουν υψηλή απόδοση λόγω της μικρής αδράνειας του περιστρεφόμενου άξονα, επιτυγχάνοντας υψηλή ταχύτητα ανά τάση. Ωστόσο όμως η σχέση μεταξύ ροπής και τάσης είναι αντιστρόφως ανάλογα εξαιτίας της μικρής αδράνειας με συνέπεια να παρουσιάζουν χαμηλή ροπή.

Όσο αναφορά τους κινητήρες **outrunners**, οι μόνιμοι μαγνήτες του δρομέα βρίσκονται σε ένα δακτύλιο στο εξωτερικό του στάτη, με αποτέλεσμα ο δρομέας του κινητήρα να αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο δακτύλιο αντί για έναν περιστρεφόμενο άξονα. Οι κινητήρες outrunner παράγουν περισσότερη ροπή για τον ίδιο όγκο κατασκευής σε σύγκριση με τους κινητήρες inrunners. Αυτό οφείλεται διότι οι κινητήρες έχουν μεγαλύτερο διάκενο αέρα, το οποίο βοηθά στη δημιουργία περισσότερης ηλεκτρομηχανικής δύναμης καθώς επίσης έχουν μακρύτερο βραχίονα ροπής λόγω του ότι η δύναμη δημιουργείται πιο μακριά από το κέντρο περιστροφής. Ωστόσο έχουν σχετικά χαμηλότερη απόδοση εξαιτίας της υψηλής αδράνειας καθώς επίσης η ταχύτητα περιστροφής ανά τάση είναι πιο χαμηλή σε σχέση με τους inrunners.

Για να βελτιώσουν οι κινητήρες inrunners την τιμή της ροπής, χρησιμοποιούν ένα μηχανικό κιβώτιο ταχυτήτων. Όμως με αυτή τη προσθήκη αυξάνεται ο όγκος κατασκευής του κινητήρα και οι μηχανικές απώλειες. Επιπλέον, απαιτεί περισσότερη συντήρηση λόγω υπολειμμάτων από λάδι ή γράσο, μειώνοντας σημαντικά την ακρίβεια του κινητήρα. Έτσι, όταν ο όγκος κατασκευής είναι περιορισμένος και απαιτούνται υψηλά επίπεδα ροπής, οι κινητήρες outrunner είναι η καλύτερη επιλογή.



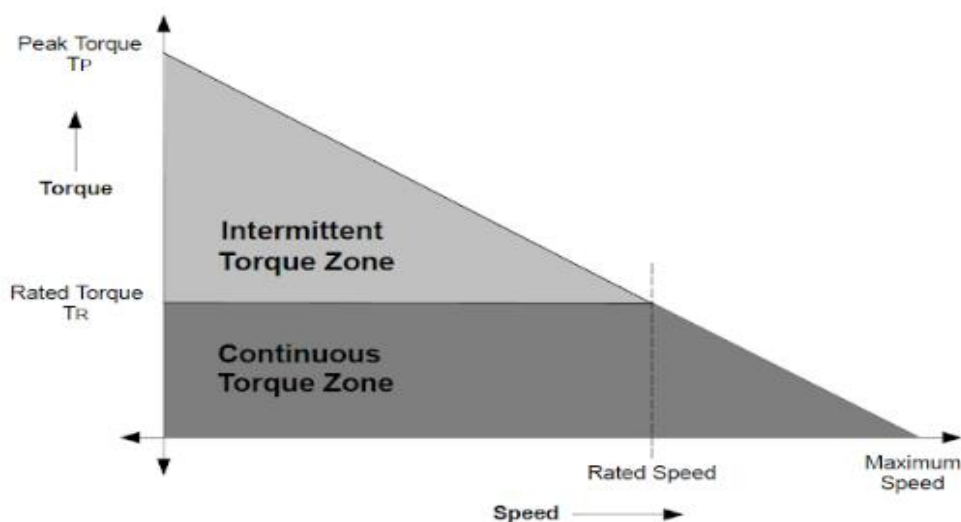
Σχήμα 3.7: Κινητήρας με εσωτερικό δρομέα (α),κινητήρα με εξωτερικό δρομέα (β)

3.5. Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας κινητήρων BLDC

Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τη ροπή σε έναν κινητήρα χωρίς ψήκτρες, πρέπει να γνωρίζουμε δύο βασικές παραμέτρους. Αυτές είναι η **ροπή ονομαστικού φορτίου (TR)** και η **μέγιστη ροπή φορτίου (TP)**.

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερό φορτίο, αναπτύσσεται μια σταθερή ροπή με μέγιστη τιμή την ονομαστική ροπή TR. Η ροπή αυτή παραμένει σταθερή, όσο η ταχύτητα περιστροφής είναι μικρότερη της ονομαστικής. Στη περίπτωση όμως που η ταχύτητα περιστροφής φτάσει τη μέγιστη τιμή της, η παραγόμενη ροπή μειώνεται σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, όταν η τιμή του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή, ο κινητήρας για να μπορέσει να αντιμετωπίσει αυτή την αύξηση της ροπής του φορτίου, αυξάνει την τιμή του ρεύματος πάνω από την ονομαστική στα τυλίγματα του, προκαλώντας σε αυτά υπερθέρμανση και πιθανώς βλάβες.

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε εφαρμογές στις οποίες υπάρχουν συχνές εκκινήσεις και παύσεις με προσθήκη κάποιου φορτίου, τότε αναπτύσσετε μία ροπή που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική. Αυτή η αύξηση της ροπής διαρκεί για ένα μικρό χρονικό διάστημα, και συμβαίνει κυρίως κατά την εκκίνηση και επιτάχυνση του κινητήρα. Αυτή η αύξηση της ροπής χρειάζεται ώστε να ξεπεραστεί η αδράνεια του φορτίου και του ίδιου του δρομέα, όμως δεν μπορεί να γίνει μεγαλύτερη από τη μέγιστη ροπή φορτίου TP. Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε για τη ροπή φορτίου είναι ότι μπορεί να ξεπεράσει την ονομαστική ροπή για μικρό χρονικό διάστημα, όμως θα είναι πάντα μικρότερη από τη μέγιστη ροπή φορτίου TP.



Σχήμα 3.8: Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας κινητήρα BLDC

Κεφάλαιο 4^ο

Έλεγχος κινητήρα BLDC

4.1. Έλεγχος θέσης και ταχύτητας των κινητήρων BLDC με τη χρήση αισθητήρων

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούν αισθητήρες θέσης στο δρομέα ώστε να εκτελέσουν σωστά τη μετακίνηση της φάσης και τον έλεγχο του ρεύματος. Οι κινητήρες με ημιτονοειδή τάση εξ επαγωγής ή αλλιώς «brushless AC», χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα θέσης με υψηλής ανάλυσης, ο οποίος είναι ένας **κωδικοποιητής άξονας** ή ένας **λυτρωτής**. Για τους κινητήρες BLDC, απαιτείται μόνο η γνώση έξι στιγμιαίων μεταβάσεων του ρεύματος για ένα ηλεκτρικό κύκλο. Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιούνται **αισθητήρες Hall** χαμηλού κόστους. Επίσης, **αισθητήρες ηλεκτρομαγνητικής μεταβλητοί απροθυμίας (VR)** και **επιταχυνσιόμετρα** χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θέσης και της ταχύτητας του κινητήρα. Κάθε ένα από αυτούς τους τύπους αισθητήρων αναλύεται παρακάτω.

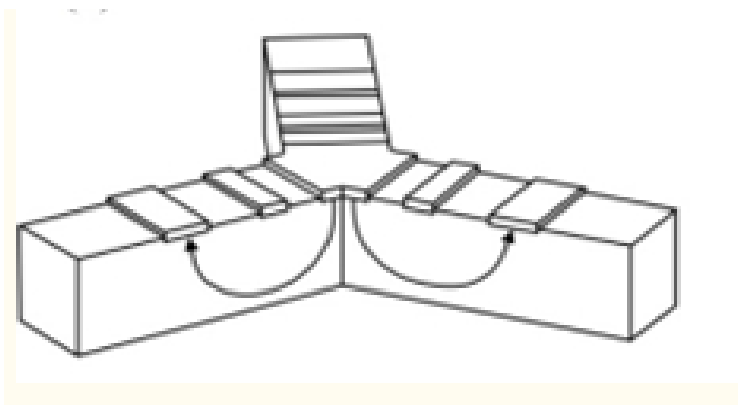
4.1.1. Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου (hall sensors)

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα, οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου (hall sensors) στηρίζονται στο φαινόμενο hall, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της θέσης του δρομέα κατά τη διάρκεια της περιστροφής του. Συγκεκριμένα κάθε BLDC κινητήρας αποτελείται από τρεις τέτοιους αισθητήρες, που τοποθετούνται στο στάτη του κινητήρα. Κάθε φορά που οι μαγνητικοί πόλοι του δρομέα περνούν κοντά στους αισθητήρες Hall, κλείνουν κύκλωμα με τα τρανζίστορ του ελεγκτή (controller) στέλνοντας ένα σήμα σε αυτόν που υποδεικνύει ποιος μαγνήτης περνά από το συγκεκριμένο αισθητήριο. Με βάση το συνδυασμό αυτών των τριών σημάτων, προσδιορίζεται η ακριβής ακολουθία των φάσεων.

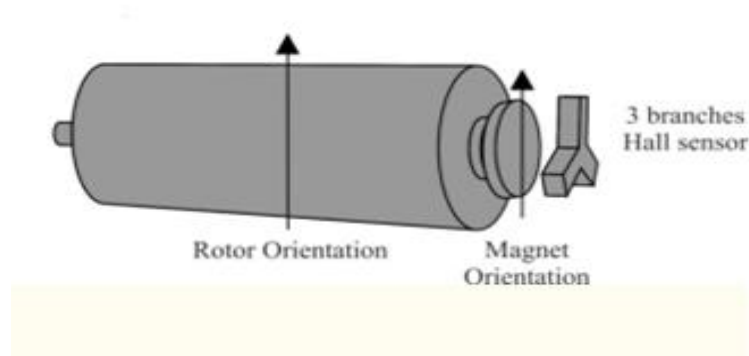
Η ενσωμάτωση των αισθητήρων Hall στο στάτη είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, καθώς σε περίπτωση που υπάρχει κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των αισθητήρων και των μόνιμων μαγνητών του δρομέα, θα δημιουργήσει ένα σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης του δρομέα. Για να απλοποιηθεί η διαδικασία τοποθέτησης των αισθητήρων Hall στο στάτη, ορισμένοι κινητήρες μπορεί να έχουν στο δρομέα εκτός από τους κύριους μαγνήτες που ήδη υπάρχουν, αισθητήρες Hall με μαγνήτες τοποθετημένους στον δρομέα. Έτσι, κάθε φορά που ο δρομέας περιστρέφεται, οι μαγνήτες αισθητήρων Hall δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα με τους κύριους μαγνήτες. Οι αισθητήρες Hall συνήθως τοποθετούνται σε έναν τυπωμένο πίνακα κυκλωμάτων και στερεώνονται στο καπάκι του περιβλήματος στο άκρο που δεν οδηγεί. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να ρυθμίσουν την πλήρη συναρμολόγηση των αισθητήρων Hall ώστε

να ευθυγραμμιστούν με τους μαγνήτες δρομέα, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη απόδοση.

Σήμερα, επειδή μικροσκοπικοί κινητήρες χωρίς ψήκτρες εισάγονται σε πολλές εφαρμογές, αναπτύσσονται νέοι αισθητήρες θέσης, όπως ένας κάθετος **αισθητήρας Hall τριών κλαδιών** που απεικονίζεται στο σχήμα 4.1. Η αρχή σύνδεσης μεταξύ του κινητήρα χωρίς ψήκτρες και αυτού του αισθητήρα θυμίζει τον μικροσκοπικό μαγνητικό γωνιακό κωδικοποιητή που βασίζεται σε αισθητήρες 3-D Hall. Ένας μόνιμος μαγνήτης στερεώνεται στο τέλος ενός περιστροφικού άξονα, πάνω στον οποίο τοποθετείται και ο μαγνητικός αισθητήρας. Με το τρόπο αυτό ο μαγνήτης δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο παράλληλο με την επιφάνεια του αισθητήρα, όπου αυτή η επιφάνεια αντιστοιχεί στις ευαίσθητες κατευθύνσεις του μαγνητικού αισθητήρα. Οι τριφασικές μηχανές χωρίς ψήκτρες χρειάζονται τρία σήματα με μετατόπιση φάσης 120° για έλεγχο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ρύθμιση κλειστού βρόχου για τη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα. Κάθε κλάδος θα μπορούσε να ερμηνευθεί ως μισός κάθετος αισθητήρας Hall και να περιστρέφεται κατά 120° σε σύγκριση με τον άλλο. Μόνο μισός κάθετος αισθητήρας Hall χρησιμοποιείται, δεδομένου ότι λίγος χώρος είναι διαθέσιμος για τις πέντε ηλεκτρικές επαφές (δύο για την τάση ανεφοδιασμού και τρεις για να εξαγάγουν τις τάσεις αιθουσών). Αυτός ο αισθητήρας δημιουργεί αυτόματα τρία σήματα με μετατόπιση φάσης 120° , τα οποία αντιστοιχούν άμεσα στα σήματα οδήγησης του κινητήρα, για να απλοποιήσει τον έλεγχο του κινητήρα σε διαμόρφωση κλειστού βρόχου.



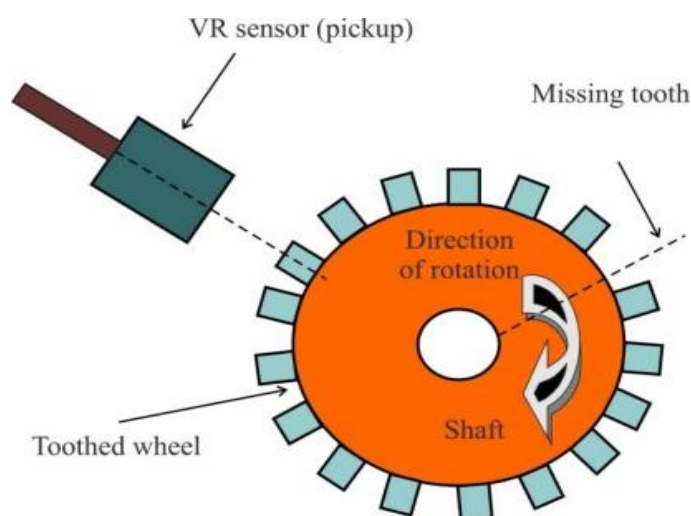
Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα Hall τριών κλάδων



Σχήμα 4.2: Αισθητήρας Hall τριών κλάδων τοποθετημένος για τον έλεγχο BLDC κινητήρα

4.1.2. Αισθητήρες ταχύτητας μεταβαλλόμενης αντίστασης (VR)

Αυτό το είδος αισθητήρα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θέσης και της ταχύτητας των κινούμενων μεταλλικών εξαρτημάτων και συχνά αναφέρεται ως παθητικός μαγνητικός αισθητήρας, επειδή δεν χρειάζεται να τροφοδοτείται. Αποτελείται από έναν μόνιμο μαγνήτη, ένα σιδηρομαγνητικό κομμάτι πόλου, ένα πηνίο παραλαβής και έναν περιστρεφόμενο οδοντωτό τροχό, όπως απεικονίζει το σχήμα 4.3. Αυτή η συσκευή είναι βασικά ένας μόνιμος μαγνήτης με σύρμα τυλιγμένο γύρω του. Είναι συνήθως ένα απλό κύκλωμα μόνο δύο καλωδίων, όπου στις περισσότερες περιπτώσεις η πολικότητα δεν είναι σημαντική καθώς ο τρόπος λειτουργίας στηρίζεται στη μαγνητική επαγωγή.



Σχήμα 4.3: Αισθητήρας ταχύτητας μεταβλητής απροθυμίας

Καθώς οι οδοντώσεις του κυκλικού τροχού περνούν μέσα από το μαγνητικό πεδίο του αισθητήρα, η ποσότητα της μαγνητικής ροής που διέρχεται από τον μόνιμο μαγνήτη ποικίλλει. Όταν ο εξοπλισμός των δοντιών είναι κοντά στον αισθητήρα, η ροή είναι στο μέγιστο. Όταν το δόντι είναι πιο μακριά, η ροή πέφτει. Αυτός ο τροχός δημιουργεί μια χρονικά μεταβαλλόμενη ροή η οποία προκαλεί μια τάση στο πηνίο, παράγοντας ένα ηλεκτρικό αναλογικό σήμα. Η συχνότητα και η τάση του αναλογικού σήματος είναι ανάλογες με την ταχύτητα του περιστρεφόμενου οδοντωτού τροχού. Κάθε διακοπή της διέλευσης του τροχού προκαλεί στον αισθητήρα VR να παράγει ένα παλμό. Η κυκλική παλμική σειρά ή μια ψηφιακή κυματομορφή που δημιουργείται μπορεί να ερμηνευθεί από τον ελεγκτή κινητήρα.

Τα πλεονεκτήματα του αισθητήρα VR μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: χαμηλό κόστος, ισχυρή αποδεδειγμένη τεχνολογία ανίχνευσης ταχύτητας και θέσης (μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες άνω των 300 °C), αυτοπαραγωγή ηλεκτρικού σήματος που δεν απαιτεί εξωτερική παροχή ρεύματος, λιγότερες καλωδιακές συνδέσεις που συμβάλλουν στην εξαιρετική αξιοπιστία και στο ευρύ φάσμα των απαιτήσεων εξόδου, αντίστασης και επαγωγής, έτσι ώστε η συσκευή να μπορεί να προσαρμοστεί και να πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις ελέγχου.

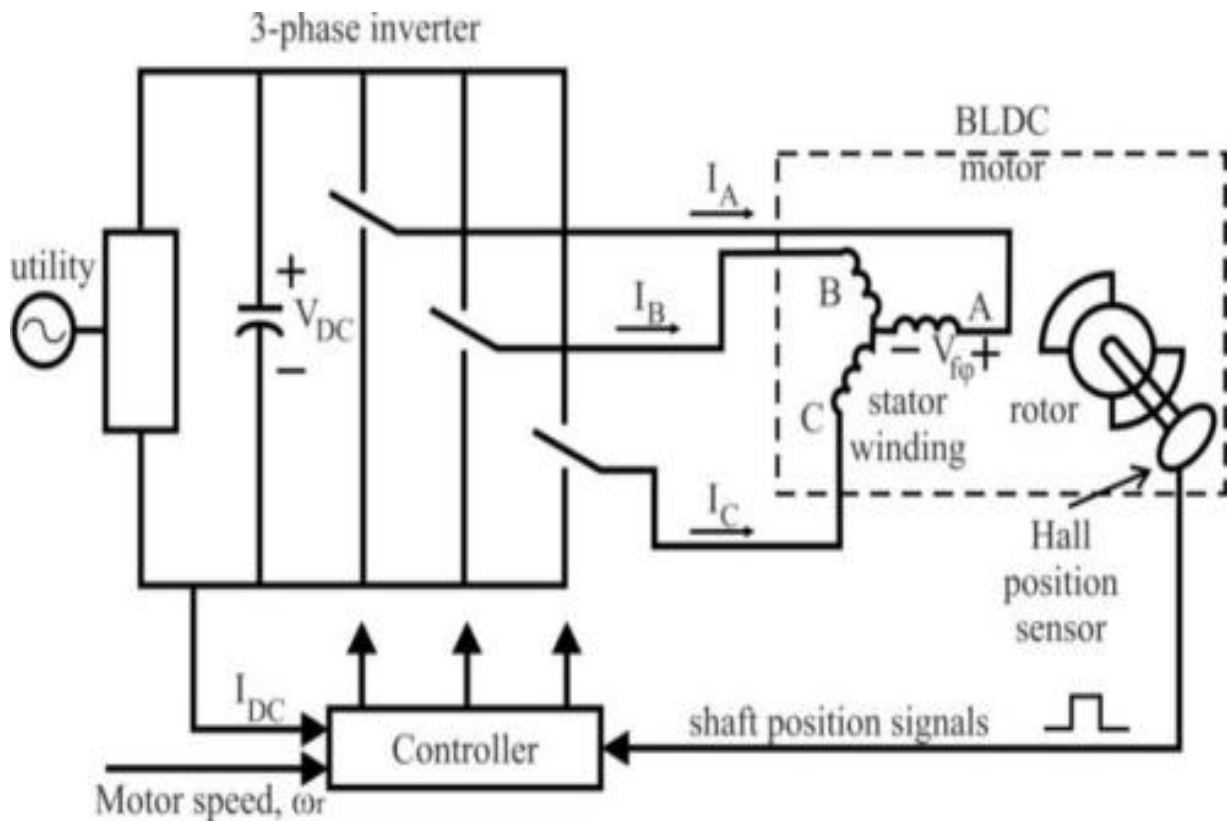
Λόγω του γεγονότος ότι αυτοί οι αισθητήρες είναι πολύ μικροί, μπορούν να ενσωματωθούν σε μέρη όπου άλλοι αισθητήρες μπορεί να μην μπορούν. Για παράδειγμα, όταν σφραγίζονται σε προστατευτικές περιπτώσεις, μπορούν να είναι ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις, καθώς και σε χημικές επιθέσεις. Μέσω της παρακολούθησης της κατάστασης στην οποία βρίσκονται οι κινητήρες που λειτουργούν, μπορούν να αποφευχθούν σοβαρές και απροσδόκητες βλάβες του κινητήρα και να βελτιωθεί η αξιοπιστία και η συντήρηση του συστήματος ελέγχου. Εάν το αισθητήριο VR ήταν ενσωματωμένο μέσα σε μια θήκη του κινητήρα, για μια εφαρμογή σε σκληρό περιβάλλον, τα καλώδια των αισθητήρων θα μπορούσαν εύκολα να καταστραφούν σε αυτό το περιβάλλον. Στη συνέχεια, θα πρέπει να εφαρμόζεται ένα ασύρματο και ανίσχυρο διάλυμα ανίχνευσης χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς για τη διέλευση μέσω του περιβλήματος του κινητήρα για την παράδοση του σήματος του αισθητήρα στον ελεγκτή κινητήρα.

Ο αισθητήρας επίδρασης Hall που εξηγείται προηγουμένως είναι μια εναλλακτική αλλά πιο ακριβή τεχνολογία, οπότε οι αισθητήρες VR είναι η πιο κατάλληλη επιλογή για τη μέτρηση της θέσης και της ταχύτητας του δρομέα.

4.2. Συμβατική μέθοδος ελέγχου με τη χρήση αισθητήρων

Ένας κινητήρας BLDC οδηγείται από χτυπήματα τάσης σε συνδυασμό με τη θέση του δρομέα. Αυτά τα χτυπήματα πρέπει να εφαρμόζονται σωστά στις ενεργές φάσεις του τριφασικού συστήματος περιέλιξης, έτσι ώστε η γωνία μεταξύ της μαγνητικής ροής του στάτη και της ροής του δρομέα να διατηρείται κοντά στις 90° για να πάρει τη μέγιστη παραγόμενη ροπή. Ως εκ τούτου, ο ελεγκτής χρειάζεται κάποιο μέσο για τον προσδιορισμό της θέσης του δρομέα, όπως είναι για παράδειγμα οι αισθητήρες θέσης Hall, οι οποίοι τοποθετούνται μέσα ή κοντά στο κενό αέρα του κινητήρα για την ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου από τους μαγνήτες που είναι τοποθετημένοι στο δρομέα. Κάθε αισθητήρας παράγει ένα υψηλό επίπεδο για 180° μιας ηλεκτρικής περιστροφής, και ένα χαμηλό επίπεδο για το άλλο 180° . Οι τρεις αισθητήρες έχουν σχετική μετατόπιση 60° μεταξύ τους. Αυτό χωρίζει μια περιστροφή σε έξι φάσεις.

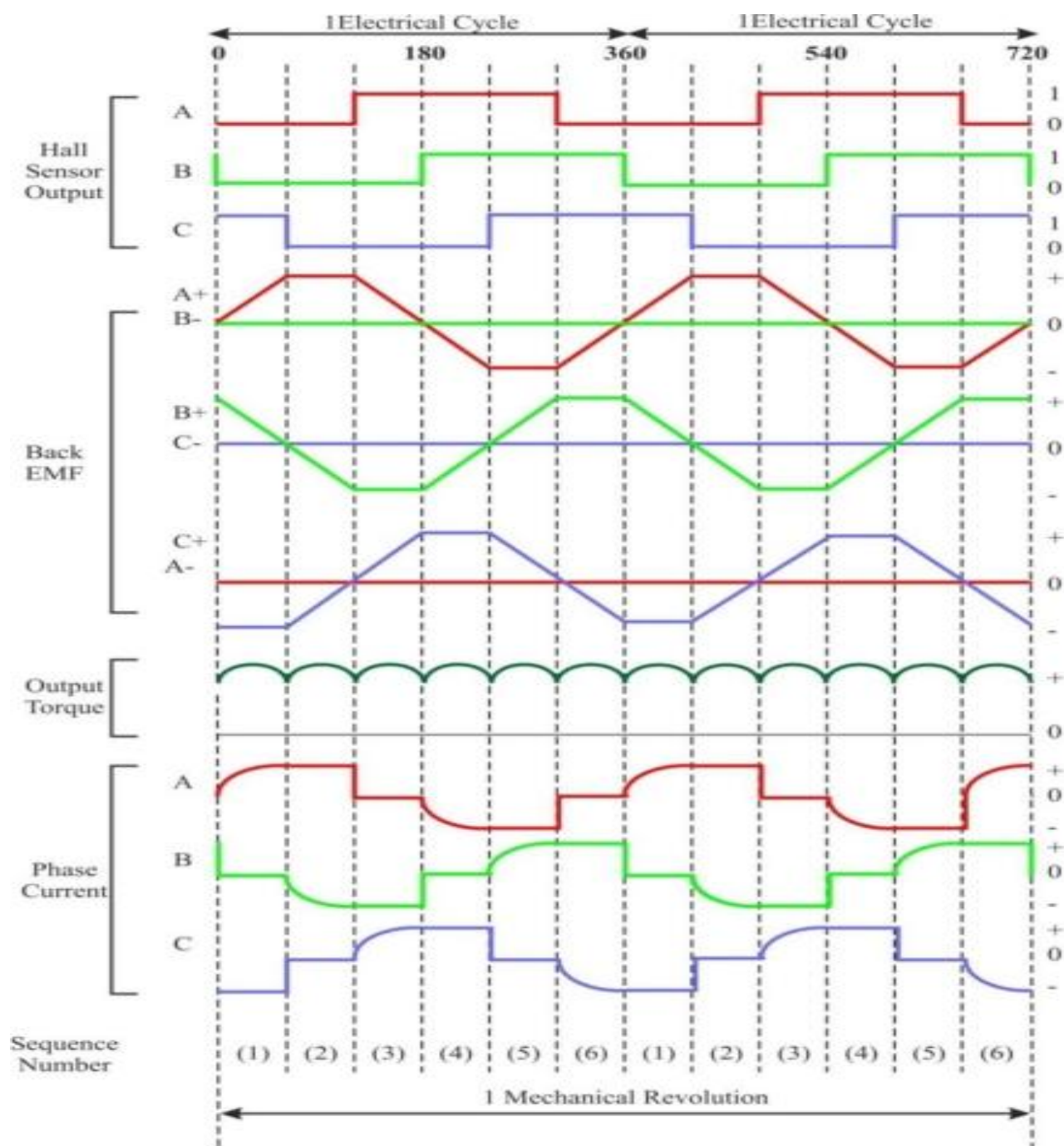
Η διαδικασία της μετατροπής του ρεύματος σε ροή μόνο δύο φάσεων για κάθε περιστροφή 60° ηλεκτρικών μοιρών του δρομέα ονομάζεται **ηλεκτρονική μετακίνηση**. Ο κινητήρας αποτελείται από έναν τριφασικό μετατροπέα όπου οι ενέργειες μεταγωγής μπορούν να ενεργοποιηθούν με τη χρήση σημάτων από αισθητήρες θέσης που τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία γύρω από το στάτη. Όταν τοποθετούνται σε διαστήματα 60° ηλεκτρικών μοιρών και ευθυγραμμίζονται σωστά με τις φάσεις του στάτη, αυτοί οι διακόπτες Hall παρέχουν ψηφιακούς παλμούς που μπορούν να αποκωδικοποιηθούν στην επιθυμητή τριφασική ακολουθία μεταγωγής. Μια μονάδα κινητήρα BLDC με μετατροπέα έξι βημάτων και αισθητήρες θέσης Hall εμφανίζεται στο σχήμα 4.5



Σχήμα 4.4: Μονάδα ελέγχου BLDC κινητήρα με αισθητήρες Hall

Μια τέτοια μονάδα ελέγχου αποτελείται από έναν βρόχο ρεύματος για τη ρύθμιση του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη, και έναν εξωτερικό βρόχο ταχύτητας για τον έλεγχο ταχύτητας. Η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να ελεγχθεί εάν αλλάξει η τάση σε ολόκληρο τον κινητήρα, η οποία μπορεί να επιτευχθεί εύκολα μεταβάλλοντας τον κύκλο λειτουργίας του σήματος PWM που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των έξι διακοπών της τριφασικής γέφυρας.

Μόνο δύο διακόπτες του μετατροπέα, ένας στην πάνω συστοιχία του μετατροπέα και ένας στην κάτω συστοιχία, ενεργοποιούνται ανά πάσα στιγμή. Αυτά τα διακριτά συμβάντα μεταγωγής εξασφαλίζουν τη διατήρηση της ακολουθίας των ζευγών των ακροδεκτών του στάτη. Στο σχήμα 4.6, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα παραγωγής σημάτων ενός συστήματος με αισθητήρες Hall, όσο αναφορά την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη και το ρεύμα της κάθε φάσης. Ένας από τους αισθητήρες hall αλλάζει την κατάσταση κάθε 60 ηλεκτρικές μοίρες περιστροφής. Δεδομένου αυτού, χρειάζονται έξι βήματα για να ολοκληρωθεί ένας ηλεκτρικός κύκλος. Ωστόσο, ένας ηλεκτρικός κύκλος μπορεί να μην αντιστοιχεί σε πλήρη μηχανική περιστροφή του δρομέα. Κατά τη διάρκεια ενός πλήρους ηλεκτρικού κύκλου, τροφοδοτείται ένα ζεύγος πόλων του δρομέα. Ο αριθμός των ηλεκτρικών κύκλων που πρέπει να επαναληφθούν για να ολοκληρωθεί μια μηχανική περιστροφή καθορίζεται από τα ζεύγη πόλων δρομέα. **Για κάθε ζεύγος πόλου του δρομέα, ολοκληρώνεται ένας ηλεκτρικός κύκλος. Έτσι λοιπόν, ο αριθμός των ηλεκτρικών κύκλων ισούται με τα ζεύγη πόλου του δρομέα.** Αυτή η ακολουθία αγωγίμων ζευγών είναι απαραίτητη για την παραγωγή σταθερής ροπής εξόδου.

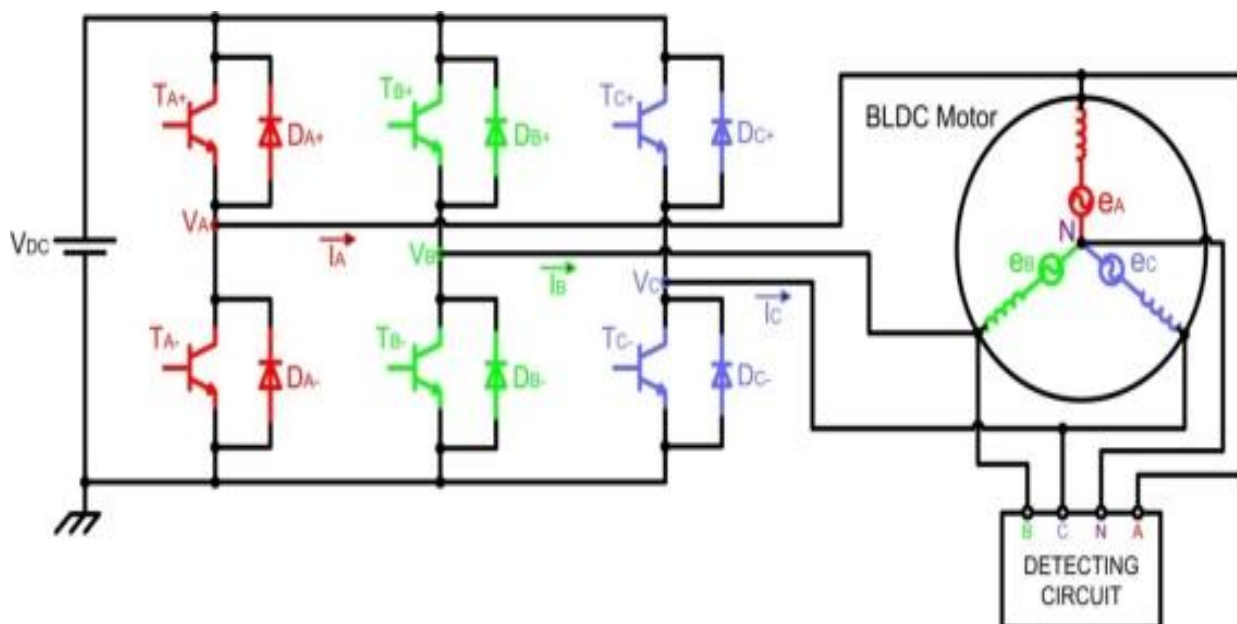


Σχήμα 4.5: Κατάσταση μεταβάσεων με τη χρήση αισθητήρων Hall

Συνοπτικά, οι κινητήρες BLDC απαιτούν έναν αισθητήρα θέσης στο δρομέα για να εκτελέσουν σωστά τη μετακίνηση φάσης. Ωστόσο όμως υπάρχουν διάφορα μειονεκτήματα όταν χρησιμοποιούνται τέτοιοι τύποι αισθητήρων θέσης. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι το αυξημένο κόστος και το μέγεθος του κινητήρα και πρέπει να γίνει ειδική ρύθμιση για την τοποθέτηση των αισθητήρων. Επιπλέον, οι αισθητήρες hall είναι ευαίσθητοι στη θερμοκρασία και ως εκ τούτου η λειτουργία του κινητήρα είναι περιορισμένη, γεγονός που θα μπορούσε να μειώσει την αξιοπιστία του συστήματος λόγω των επιπλέον εξαρτημάτων και καλωδίωσης. Για να μειωθεί το κόστος και να βελτιωθεί η αξιοπιστία, οι αισθητήρες θέσης μπορούν να εξαλειφθούν. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναφερθεί πολλά συστήματα χωρίς αισθητήρες για τον έλεγχο θέσης και της ταχύτητας των κινητήρων BLDC.

4.3. Τεχνικές και πρόοδοι στον έλεγχο χωρίς αισθητήρες

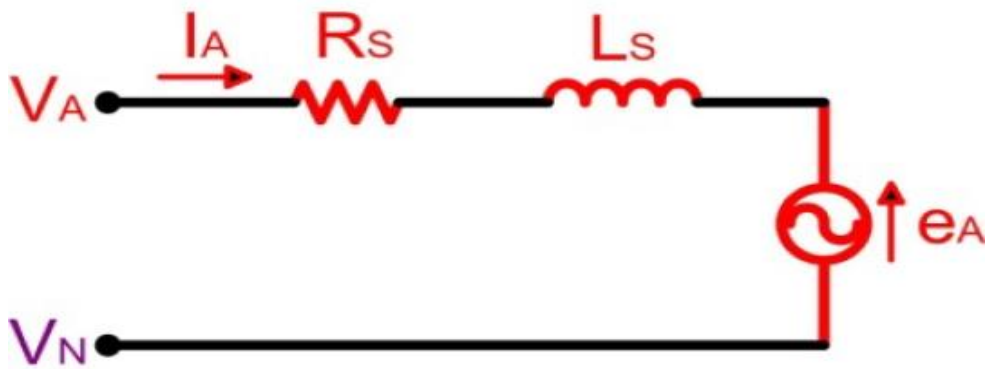
Όπως αναφέραμε προηγουμένως, είναι αρκετά σημαντικό να ξέρουμε τη θέση του δρομέα για τον έλεγχο του κινητήρα BLDC. Με τους αισθητήρες θέσης, είναι ένας τρόπος ελέγχου του κινητήρα όμως παρουσιάζονται ορισμένα μειονεκτήματα που κάνουν το σύστημα ελέγχου αναξιόπιστο. Υπάρχουν ορισμένες μέθοδοι ελέγχου, όπως η ανίχνευση της αντιηλεκτρογενετικής δύναμης (back-EMF) και η ανίχνευση του τρέχοντα ρεύματος, που παρέχουν, αρκετές πληροφορίες για να εκτιμήσουν με επαρκή ακρίβεια τη θέση του δρομέα. Για το λόγο αυτό, οι αισθητήρες θέσης μπορούν να εξαλειφθούν πλήρως, μειώνοντας έτσι το περαιτέρω κόστος και το μέγεθος του κινητήρα. Στη περίπτωση αυτή το σύστημα ελέγχου ονομάζεται **μονάδα χωρίς αισθητήρες**.



Σχήμα 4.6: Τυπική μονάδα κινητήρα BLDC χωρίς αισθητήρα

Η ανάλυση του κυκλώματος που απεικονίζεται στο σχήμα 4.6 βασίζεται στο μοντέλο κινητήρα για τη φάση A (επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα), που απεικονίζεται στο σχήμα 4.8, και εξετάζονται οι ακόλουθες παραδοχές :

- Ο κινητήρας δεν είναι κορεσμένος.
- Οι αντιστάσεις στοτών όλων των περιέλιξης είναι ίσες (R_S), οι αυτοαγωγές είναι σταθερές (L_S) και οι αμοιβαίες επαγωγές (M) είναι μηδενικές.
- Οι απώλειες σιδήρου είναι αμελητέες.



Σχήμα 4.7 : Ισοδύναμο κύκλωμα της φάσης A του BLDC κινητήρα

Η λειτουργία τάσης της περιέλιξης φάσης διεξαγωγής μπορεί να εκφραστεί όπως υποδεικνύεται στην παρακάτω εξίσωση :

$$\bullet \quad V_{DC} = I \cdot R_S + L_S \cdot \frac{dI}{dt} + e \quad (4.3)$$

Όπου V_{DC} : Η τάση dc-link

R_S , L_S : Η ισοδύναμη αντίσταση και επαγωγή της περιέλιξης φάσης του στάτη αντίστοιχα

e : το τραπεζοειδές σχήμα της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (back-EMF)

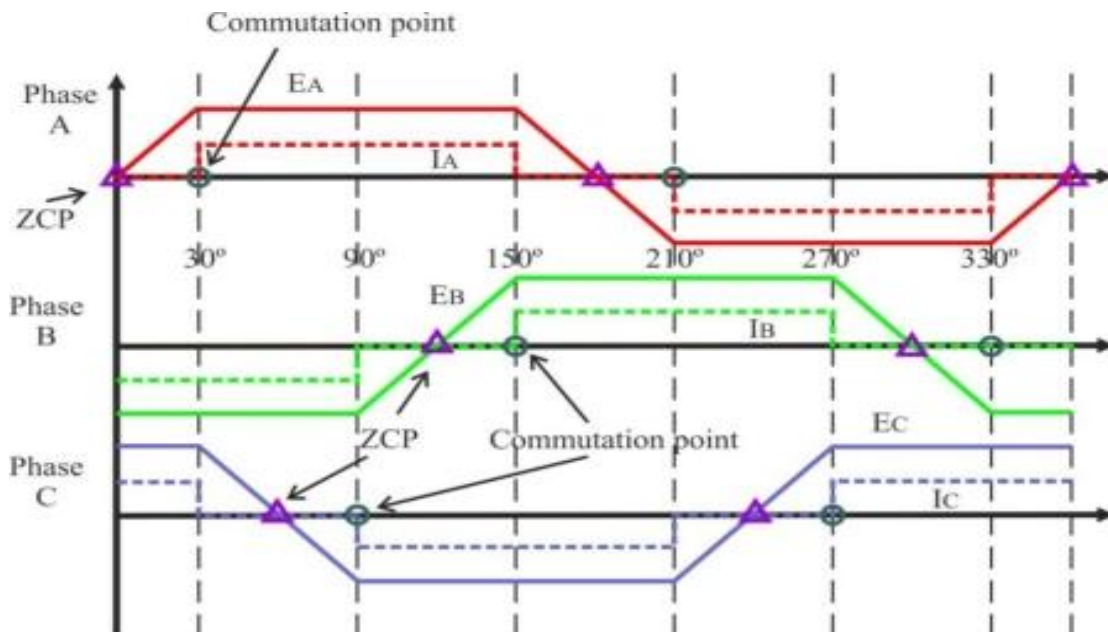
Παρακάτω θα αναλύσουμε τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να ελέγξουμε ένα σύστημα ενός κινητήρα BLDC χωρίς αισθητήρες με τη μέθοδο της ανίχνευσης της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (back – EMF), που χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, άμεση και έμμεση ανίχνευση back – EMF.

- Μέθοδοι άμεσης ανίχνευσης της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (back- EMF):
Η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη της «πλωτής – ανενεργής» φάσης είναι αισθητή και το σημείο μηδενικής διάσχισής ανιχνεύεται συγκρίνοντάς το με το σημείο ουδέτερης τάσης. Αυτό το σύστημα πάσχει από υψηλή κοινή τάση λειτουργίας και θόρυβο υψηλής συχνότητας λόγω της μονάδας PWM, οπότε απαιτεί φίλτρα χαμηλής διέλευσης και διαχωριστικά τάσης. Οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν ως:
 - Ανίχνευση μηδενικής διέλευσης back-EMF (ZCD) ή ανίχνευση τελικής τάσης.
 - Στρατηγικές PWM.
- Έμμεσες μέθοδοι ανίχνευσης του EMF: Λόγω του φιλτραρίσματος που εισάγεται καθυστέρηση μετακίνησης σε υψηλές ταχύτητες και η εξασθένιση προκαλεί μείωση της ευαισθησίας του σήματος σε χαμηλές ταχύτητες, το εύρος ταχύτητας περιορίζεται στις μεθόδους άμεσης ανίχνευσης του EMF. Προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος μεταγωγής, χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι έμμεσης ανίχνευσης του EMF. Αυτές οι μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:
 - Ενσωμάτωση της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (back- EMF)
 - Τρίτη αρμονική ενσωματωμένης τάσης.
 - Αγωγιμότητα διόδων ελεύθερης ρόδας ή ανίχνευση τερματικού ρεύματος

4.3.1. Μέθοδος ανίχνευσης μηδενικής διέλευσης back – EMF (ανίχνευση τελικής τάσης)

Η μέθοδος ανίχνευσης μηδενικής διέλευσης της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, είναι μία από τις απλούστερες μεθόδους ελέγχου ενός BLDC κινητήρα που βασίζεται στην στιγμή κατά την οποία η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη της ενθουσιωδώς φάσης διασχίζει το μηδέν. Αυτή η μηδενική διασταύρωση ενεργοποιεί ένα χρονόμετρο, το οποίο μπορεί να είναι μια χρονική σταθερά RC, έτσι ώστε η επόμενη διαδοχική μετακίνηση του μετατροπέα να συμβεί στο τέλος αυτού του χρονικού διαστήματος.

Για τυπική λειτουργία ενός κινητήρα BLDC, το ρεύμα της φάσης και η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν για να παράγουν σταθερή ροπή. Το τρέχον σημείο μεταγωγής που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα μπορεί να εκτιμηθεί από το σημείο μηδενικής διασταύρωσης (ZCP) των back-EMFs και τη μετατόπιση φάσης 30° , χρησιμοποιώντας ένα σύστημα μεταγωγής έξι βημάτων μέσω ενός τριφασικού μετατροπέα για την οδήγηση του κινητήρα BLDC. Το διάστημα διεξαγωγής για κάθε φάση είναι 120° . Ως εκ τούτου, μόνο δύο φάσεις διεξάγουν ρεύμα ανά πάσα στιγμή, αφήνοντας την τρίτη φάση ανενεργή. Για την παραγωγή μέγιστης ροπής, ο μετατροπέας θα πρέπει να μετακινείται κάθε 60° ανιχνεύοντας μηδενική διασταύρωση στην αντιηλεκτρεγερτική δύναμη «του πλωτό πηνίου του κινητήρα», έτσι ώστε το ρεύμα να βρίσκεται σε φάση με την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (back –EMF).



Σχήμα 4.8: Μηδενικά σημεία διέλευσης των σημείων μεταγωγής πίσω EMF και φάσης

Αυτή η τεχνική καθυστέρησης 30° (ηλεκτρικών βαθμών) από τη μηδενική διέλευση της άμεσης αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης δεν επηρεάζεται πολύ από τις αλλαγές της ταχύτητας. Για την ανίχνευση των ZPS, η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη της φάσης θα πρέπει να παρακολουθείται κατά τη διάρκεια της αθόρυβης φάσης (όταν το συγκεκριμένο ρεύμα φάσης είναι μηδέν) και οι τάσεις του τερματικού πρέπει πρώτα να φιλτράρονται με φίλτρο χαμηλής διέλευσης.

Τρία φίλτρα χαμηλής διέλευσης (LPFs) χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη υψηλότερων αρμονικών στις τάσεις των τερματικών φάσεων που προκαλούνται από την εναλλαγή του μετατροπέα. Η χρονική καθυστέρηση των LPFs θα περιορίσει την ικανότητα λειτουργίας της μηχανής BLDC στις υψηλές ταχύτητες. Είναι απαραίτητο να επισημάνουμε τη σημασία των φίλτρων στο σχεδιασμό μιας BLDC μηχανής, καθώς χρησιμοποιούνται για να εξαλείψουν τις υψηλές συχνότητες των τελικών τάσεων και να εξάγουν την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα.

Η τελική τάση της ανοιγόμενης ή πλωτής φάσης δίνεται από την εξίσωση:

$$\bullet \quad V_C = e_c + V_N = e_c + V_{CE} - V_F^2 - e_A + e_B^2 \quad (4.4) \quad (\text{με τα τετράγωνα δε ξέρω})$$

Όπου: e_c : είναι η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη της φάσης C

V_N : είναι το δυναμικό του ουδέτερου σημείου κινητήρα

V_{CE} , V_F : η πτώση τάσης των τρανζίστορ και των διόδων αντίστοιχα που εφαρμόζονται στο μετατροπέα του κινητήρα του σχήματος 4.7.

Ωστόσο η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη των άλλων δύο φάσεων (A και B) έχουν το ίδιο πλάτος αλλά αντίθετο σημείο, η τελική τάση της κινητής φάσης έχει ως αποτέλεσμα την παρακάτω εξίσωση:

$$\bullet \quad e_A = -e_B \Rightarrow V_C = e_C + V_{CE} - V_F^2 = e_C + V_B + V_A^2 \quad (4.5) \quad (\text{με τα τετράγωνα δε ξέρω})$$

Όπου: $V_A = -V_F$ προς τα εμπρός ρεύμα της δίοδος DA-

$V_B = V_{CE}$ τάση συλλέκτη-εκπομπών τρανζίστορ TB-

Δεδομένου ότι η ανίχνευση του σημείου μηδενικής διασταύρωσης γίνεται στο τέλος της PWM σε κατάσταση και μόνο η υψηλή πλευρά του μετατροπέα κόβεται και το VCE είναι παρόμοιο με τα τρανζίστορ T_{A+} και T_{B-} , ο τελικός τύπος ανίχνευσης μπορεί να αναπαρασταθεί με την εξίσωση

$$\bullet \quad V_A + CE \approx V_B - CE \Rightarrow V_C = e_C + V_B - CE + V_{DC} - V_A + CE^2 \approx e_C + V_{DC}^2 \quad (4.6)$$

Ως εκ τούτου, η μηδενική διέλευση συμβαίνει όταν η τάση της πλωτής φάσης φθάνει το ήμισυ της τάσης της σιδηροτροχιάς DC. Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται το τέλος η PWM σε κατάσταση λειτουργίας ως σημείο ανίχνευσης μηδενικής διασταύρωσης είναι ότι εκείνη τη στιγμή η δειγματοληψία γίνεται χωρίς θόρυβο.

Από την άλλη, αντί της χρήσης αναλογικών LPFs, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα μονοπολικής διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM) για τη μέτρηση των τερματικών τάσεων. Η διαφορά μεταξύ της μεθόδου ZCD και του σήματος PWM πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Επίσης, η πραγματική φάση που επιφέρει την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (back-EMF) μπορεί να ληφθεί απευθείας από την τάση τερματικού κινητήρα επιλέγοντας σωστά τη στρατηγική PWM και ανίχνευσης (χωρίς τις πληροφορίες τάσης ουδέτερου σημείου του κινητήρα Αυτό θα επιφέρει τα πλεονεκτήματα όπως καμία ευαισθησία στο θόρυβο, δεν απαιτείται φιλτράρισμα και καλή απόδοση κινητήρα σε ένα ευρύ φάσμα ταχύτητας.

Παρ όλα αυτά, η απλότητα της μεθόδου μηδενικής διασταύρωσης τείνει να είναι ευαίσθητη στον θόρυβο κατά την ανίχνευση της μηδενικής διασταύρωσης και η απόδοση μειώνεται όταν ο κινητήρα δουλεύει σε υψηλές ταχύτητες, εκτός εάν το διάστημα χρονισμού προγραμματίζεται ως συνάρτηση της ταχύτητας του δρομέα.

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι δεν είναι δυνατή η χρήση της θορυβώδης τερματικής τάσης για να επιτευχθεί ένα μοτίβο μεταγωγής σε χαμηλές ταχύτητες, δεδομένου ότι η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι μηδέν στην ακινησία και ανάλογη με την ταχύτητα του δρομέα. Επίσης, τα εκτιμώμενα σημεία μετακίνησης έχουν σφάλμα θέσης κατά τη διάρκεια της παροδικής περιόδου κατά την οποία η ταχύτητα επιταχύνεται ή επιβραδύνεται γρήγορα, ειδικά για ένα σύστημα που έχει χαμηλή αδράνεια. Με αυτή τη μέθοδο, η θέση του στροφέα μπορεί να ανιχνευθεί συνήθως από το 20% της ονομαστικής ταχύτητας, τότε χρησιμοποιείται συνήθως ένα εύρος λειτουργίας μειωμένης ταχύτητας, συνήθως περίπου 1.000-6.000 rpm.

4.3.2. Τρίτη αρμονική ενσωματωμένης τάσης

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την τρίτη αρμονική της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (back-EMF) για τον προσδιορισμό των στιγμών μεταγωγής του κινητήρα BLDC. Βασίζεται στο γεγονός ότι σε έναν συμμετρικό τριφασικό κινητήρα συνδεδεμένο με αστέρα (Y) με τραπεζοειδή κατανομή ροής διακένου αέρα, η άθροιση των τριών τάσεων της κάθε φάσης του στάτη έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη όλων των πολυφασικών, που είναι θεμελιώδεις και όλων των αρμονικών συνιστωσών όπως η 5η, 7ο κτλ. Στο άθροισμα που προκύπτει κυριαρχεί η τρίτη αρμονική συνιστώσα που διατηρεί μια σταθερή μετατόπιση φάσης με τη θεμελιώδη τάση του διακένου αέρα για οποιοδήποτε φορτίο και ταχύτητα.

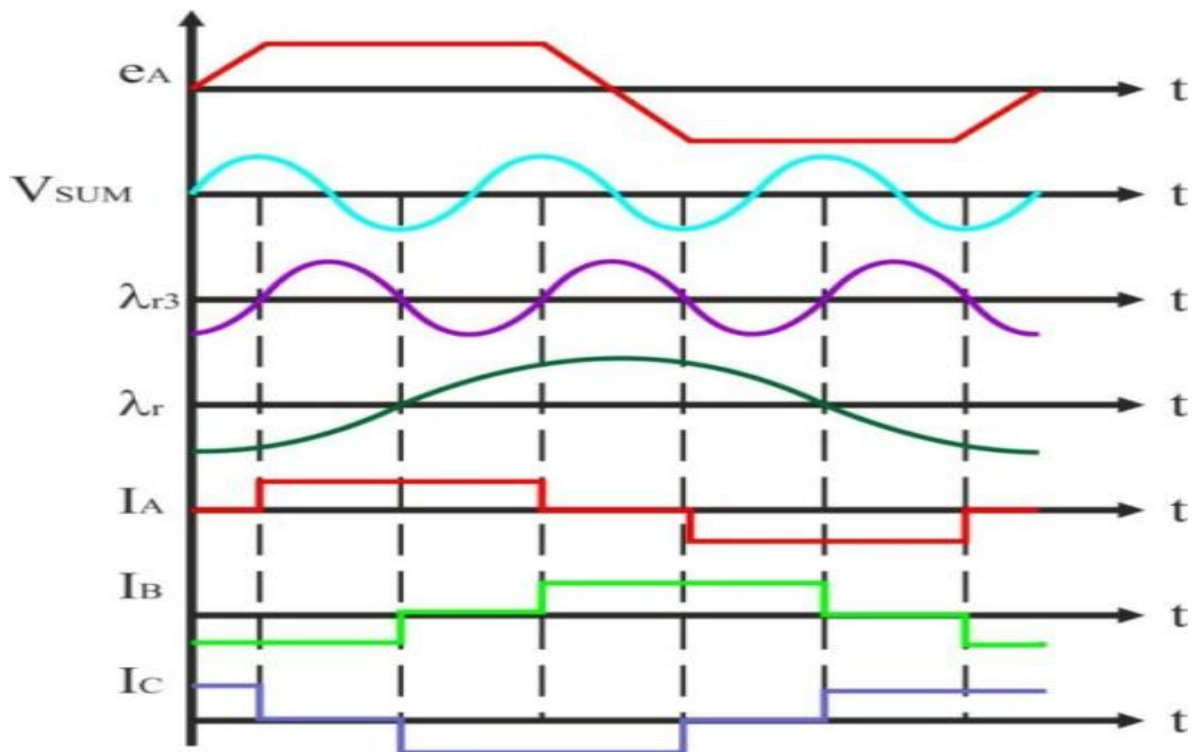
Η κατάλληλη επεξεργασία του τρίτου αρμονικού σήματος επιτρέπει την εκτίμηση της θέσης ροής του δρομέα και τον κατάλληλο έλεγχο ρεύματος στον μετατροπέα. Σε αντίθεση με τις μεθόδους έμμεσης ανίχνευσης που βασίζονται στο σήμα back-EMF, η τρίτη αρμονική απαιτεί μόνο μια μικρή ποσότητα φιλτραρίσματος. Ως αποτέλεσμα, αυτή η μέθοδος δεν είναι ευαίσθητη σε καθυστερήσεις φιλτραρίσματος, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση για μεγάλο εύρος στροφών. Επιτυγχάνεται επίσης ανώτερη απόδοση εκκίνησης του κινητήρα επειδή η τρίτη αρμονική μπορεί να ανιχνευθεί σε χαμηλές ταχύτητες.

Αναφερόμενοι στο σχήμα 4.6, η τάση του στάτη στον BLDC κινητήρα για τη φάση A μπορεί να γραφτεί παρόμοια με την εξίσωση (4.3), όπου $V_{DC}=V_A$, $I=I_A$ και $e=e_A$. Μπορούν να ληφθούν ισοδύναμες εκφράσεις για τις άλλες δύο φάσεις του στάτη. Το αρμονικό περιεχόμενο του διακένου αέρα του κινητήρα ή των εσωτερικών τάσεων e_A , e_B και e_C είναι συνάρτηση των διαμορφώσεων των μαγνητών του δρομέα και της περιέλιξης του στάτη. Για έναν μαγνήτη πλήρους βήματος και την περιέλιξη φάσης του στάτη πλήρους βήματος, οι εσωτερικές τάσεις μπορούν να αναπαρασταθούν χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier, λαμβάνοντας πολλά αρμονικά στοιχεία τάσης. Εάν κάθε επαγόμενη φάση είναι σταθερή σε οποιαδήποτε θέση του δρομέα, από το άθροισμα των τριών τερματικών έως τις ουδέτερες τάσεις, η τρίτη αρμονική της συνολικής αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης μπορεί να μετρηθεί με την εξίσωση 4.7 :

$$\bullet \quad V_{SUM} = V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} \approx (e_A + e_B + e_C) \approx 3 \cdot E_3 \cdot \sin[\frac{3}{2}\omega_e t] (4.7)$$

Οι αθροιστικές τάσεις ακροδεκτών περιέχουν μόνο την τρίτη και τα πολλαπλάσια της τρίτης αρμονικής λόγω του γεγονότος ότι μόνο στοιχεία ρεύματος μηδενικής ακολουθίας μπορούν να ρέουν μέσω του ουδέτερου κινητήρα. Για τη λήψη στιγμών μεταγωγής, το φιλτραρισμένο σήμα τάσης που παρέχει την τρίτη συνιστώσα αρμονικής τάσης ενσωματώνεται για την εκτίμηση της σύνδεσης ροής του δρομέα, όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.8:

$$\bullet \lambda_{r3} = \int V_{SUM} \cdot dt \quad (4.8)$$



Σχήμα 4.9: Απεικόνιση της εσωτερικής τάσης του κινητήρα στη φάση A (eA), το αρμονικό σήμα (V_{SUM}), το τρίτο αρμονικό στοιχείο ροής του δρομέα λ_{r3}, τη ροή του δρομέα λ_r και τα ρεύματα φάσης του στάτη (I_A,I_B,I_C).

Βασικά, υπάρχουν τρεις μέθοδοι για την εξαγωγή της τρίτης αρμονικής συνιστώσας του back-EMF, χρησιμοποιώντας ως αναφορά μια μονάδα δίσκου χωρίς ψήκτρες μόνιμου μαγνήτη με αντιστάσεις συνδεδεμένες στο Y για να γίνει δυνατή η ανίχνευση του τρίτου αρμονικού στοιχείου του back-EMF . Αυτές οι μέθοδοι είναι οι εξής:

- Από την τάση V_{SN} μεταξύ του αστέρα S του δικτύου αντιστάσεων και του ουδέτερου σημείου N των περιελίξεων του στάτη .
- Από την τάση V_{SH} μεταξύ S και του μέσου H του διαύλου DC.
- Από την τάση V_{NH} μεταξύ N και H .

Από τα προηγούμενα, μόνο η τάση V_{SH} είναι κατάλληλη για την τρίτη αρμονική λειτουργία χωρίς αισθητήρα οπίσθιου EMF των κινητήρων BLDC, αλλά όπως συμβαίνει με όλες τις μεθόδους χωρίς αισθητήρα που βασίζονται σε back-EMF, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια διαδικασία εκκίνησης ανοιχτού βρόχου.

4.3.3. Μέθοδος ανίχνευσης αγωγιμότητας διόδων ελεύθερου τροχού (Ανίχνευση τερματικού ρεύματος)

Μέχρι τώρα, οι αλγόριθμοι έμμεσης ανίχνευσης που εξηγούνται μπορούν να εφαρμοστούν μόνο στους κινητήρες με ημιτονοειδές κατανομημένη ροή (SMPM) των οποίων οι επαγωγές περιέλιξης είναι σχεδόν οι ίδιες και δεν διαφέρουν ανάλογα με τη θέση του δρομέα. Αυτοί οι αλγόριθμοι, εκτός από τη μέθοδο ανίχνευσης τερματικού ρεύματος, χρησιμοποιούν φίλτρα χαμηλής διέλευσης ή κυκλώματα ολοκλήρωσης για την εξάλειψη του θορύβου συχνότητας PWM και για την παροχή καθυστέρησης φάσης για τη σωστή εναλλαγή του ρεύματος στο στάτη. Όμως, στην περίπτωση των κινητήρων IPM, η αυτεπαγωγή της περιέλιξης του στάτη ποικίλλει ανάλογα με τη θέση του δρομέα. Αυτό το χαρακτηριστικό εισάγει ανισοροπία των σύνθετων αντιστάσεων των φάσεων και διακύμανση του δυναμικού του ουδέτερου σημείου και είναι αδύνατο να εφαρμοστεί ο τερματικός αλγόριθμος ανίχνευσης ρεύματος. Οι κινητήρες IPM είναι πιο πρακτικοί από τους κινητήρες SMPM λόγω της ανθεκτικότητας της δομής του δρομέα και της χαμηλής αδράνειας.

Σε αυτή την τεχνική, οι πληροφορίες θέσης μπορούν να ανιχνευθούν με βάση την αγωγή κατάσταση των διόδων ελεύθερου τροχού που συνδέονται αντιπαράλληλα με τρανζίστορ ισχύος επειδή ρέει ρεύμα σε μια φάση. Σε αυτή τη φάση, κάθε ενεργό σήμα κίνησης δίνεται στη θετική και αρνητική πλευρά των τρανζίστορ και το ρεύμα προκύπτει από την επαγόμενη τάση (back emf) που παράγεται στις περιελίξεις του κινητήρα. Ο τριφασικός σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη έχει μια τραπεζοειδή επαγόμενη τάση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Για να παραχθεί η μέγιστη ροπή, η μεταγωγή του μετατροπέα θα πρέπει να εκτελείται κάθε 60° έτσι ώστε το ρεύμα της γραμμής του κινητήρα να είναι σε φάση με το σήμα της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης. Απαιτείται ένα κύκλωμα εκκίνησης για να δώσει ένα σήμα μεταγωγής για την εκκίνηση. Αυτή η προσέγγιση καθιστά δυνατή την ανίχνευση της θέσης του δρομέα σε ένα ευρύ φάσμα στροφών, ειδικά σε χαμηλότερη ταχύτητα, και την απλοποίηση της διαδικασίας εκκίνησης.

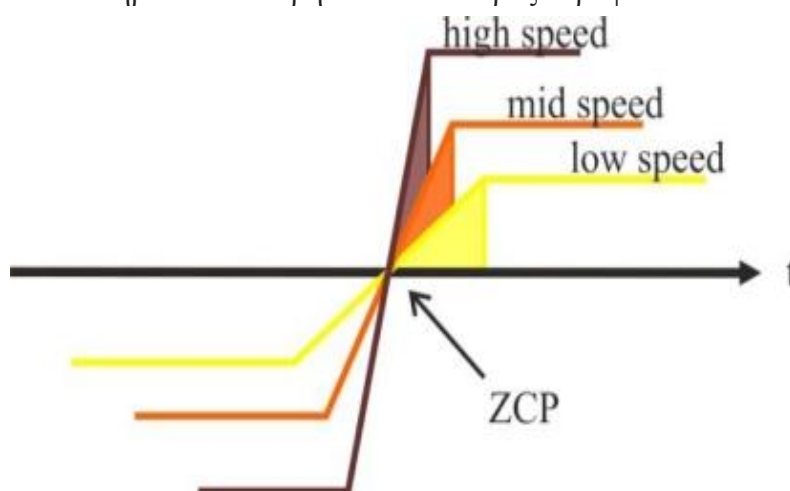
Επομένως, η συνθήκη αγωγής του DC- δίνεται από την εξίσωση 4.9, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα V_{CE} και V_F είναι πολύ μικρότερα από τις επαγόμενες τάσεις (back-EMFs). Στη συνέχεια, όταν η επαγόμενη τάση της φάσης C (e_C) γίνει αρνητική, το ρεύμα ανοικτής φάσης ρέει μέσω της αρνητικής πλευράς διόδου DC:

$$\bullet \quad V_{CE}, V_F \ll e_A, e_B, e_C \Rightarrow e_C < -V_{CE} + V_F \approx 0 \Rightarrow e_C < 0 \quad (4.9)$$

Δεδομένου ότι το ρεύμα ανοιχτής φάσης προκύπτει από τις επαγόμενης τάσης (back-EMFs), είναι αδύνατο να ανιχνευθεί η θέση του δρομέα σε στάση. Επομένως, είναι απαραίτητη μια κατάλληλη διαδικασία εκκίνησης για τη θέση του κινητήρα BLDC χωρίς αισθητήρα. Η διαδικασία ξεκινά με τη διέγερση δύο αυθαίρετων φάσεων για προκαθορισμένο χρόνο. Ο δρομέας στρέφεται προς την κατεύθυνση που αντιστοιχεί στις διεγερμένες φάσεις. Στο τέλος του προκαθορισμένου χρόνου, ολοκληρώνεται η εναλλαγή ανοιχτού βρόχου που προωθεί το μοτίβο μεταγωγής κατά 120° και η πολικότητα του ρεύματος της γραμμής του κινητήρα αλλάζει. Μετά τη διαδικασία εκκίνησης, το ρεύμα της γραμμής του κινητήρα υποδεικνύει ότι πραγματοποιούνται ικανοποιητικές εναλλαγές χωρίς αισθητήρα με τη μέθοδο αγωγιμότητας της διόδου ελεύθερου τροχού

4.3.4. Μέθοδος ολοκλήρωσης της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (Back-EMF)

Σε αυτή την τεχνική, η στιγμή μεταγωγής καθορίζεται από την ενσωμάτωση της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης της αθόρυβης φάσης (δηλαδή της μη διεγερμένης φάσης). Το κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι η ενσωματωμένη περιοχή των επαγόμενων τάσεων (back-EMFs) που φαίνεται στο σχήμα 4.10 είναι περίπου η ίδια σε όλες τις ταχύτητες. Η ενσωμάτωση ξεκινά όταν η επαγόμενη τάση της αθόρυβης φάσης περάσει το μηδέν. Όταν η ενσωματωμένη τιμή φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου, η οποία αντιστοιχεί σε ένα σημείο εναλλαγής, το ρεύμα φάσης μετατρέπεται. Εάν απαιτείται λειτουργία εξασθένησης της ροής, μπορεί να επιτευχθεί αύξηση ρεύματος αλλάζοντας την τάση κατωφλίου. Η προσέγγιση ολοκλήρωσης είναι λιγότερο ευαίσθητη στον θόρυβο μεταγωγής και προσαρμόζεται αυτόματα για αλλαγές ταχύτητας, αλλά όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε χαμηλή ταχύτητα είναι κακή λόγω της συσσώρευσης σφαλμάτων και των προβλημάτων τάσης μετατόπισης από την ενοποίηση. Καθώς η επαγόμενη τάση (back-EMF) θεωρείται ότι ποικίλλει γραμμικά από θετικό σε αρνητικό (υποτίθεται ότι έχουμε τραπεζοειδές επαγόμενη τάση), και αυτή η γραμμική κλίση θεωρείται ότι δεν είναι ευαίσθητη στην ταχύτητα, η τάση κατωφλίου διατηρείται σταθερή σε όλο το εύρος στροφών.



Σχήμα 4.10: Ενσωματωμένες περιοχές της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης

Μόλις η ενσωματωμένη τιμή φτάσει στην τάση κατωφλίου, δηλώνεται ένα σήμα επαναφοράς για να μηδενιστεί η έξοδος του ολοκληρωτή. Για να αποτραπεί η επανέναρξη της ενσωμάτωσης του ολοκληρωτή, το σήμα επαναφοράς παραμένει αναμμένο αρκετά για να διασφαλιστεί ότι ο ολοκληρωτής δεν ξεκινά έως ότου το υπολειπόμενο ρεύμα στην ανοιχτή φάση έχει περάσει ένα μηδενικό σταυροδρόμι.

Η χρήση διακριτών αισθητήρων ρεύματος για κάθε φάση κινητήρα θα παρέχει πλήρη ανατροφοδότηση ρεύματος, αλλά το κόστος που σχετίζεται με μεμονωμένους αισθητήρες ρεύματος (π.χ. μετασχηματιστές ρεύματος ή αισθητήρες επίδρασης Hall) είναι συχνά απαγορευτικό. Μια ελκυστική εναλλακτική είναι η χρήση αισθητήρων ρεύματος που είναι ενσωματωμένοι στους διακόπτες ισχύος, όπως τα power MOSFET'S και IGBT's, τα οποία διατίθενται από διάφορους κατασκευαστές συσκευών με ονομασίες έως και αρκετές εκατοντάδες volts και αρκετές δεκάδες αμπέρ. Ωστόσο, οι ενσωματωμένοι αισθητήρες ρεύματος επιβάλλουν τους δικούς τους περιορισμούς. για παράδειγμα, το τερματικό ανίχνευσης ρεύματος δεν είναι ηλεκτρικά απομονωμένο από τη σχετική συσκευή ισχύος. Επίσης, η διαθεσιμότητα νέων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ισχύος καθιστά δυνατή την πληρέστερη αξιοποίηση αυτών των αισθητήρων για τους συνδυασμένους σκοπούς της τρέχουσας ρύθμισης και της προστασίας από υπέρταση.

Τέλος, η προσέγγιση ολοκλήρωσης της επαγόμενης τάσης (back-EMF) παρέχει σημαντικά βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο μηδενικής διέλευσης που εξηγήθηκε προηγουμένως. Αντί να χρησιμοποιείται το μηδενικό σημείο διέλευσης της κυματομορφής της επαγόμενης τάσης για την ενεργοποίηση ενός χρονοδιακόπτη, η διορθωμένη κυματομορφή τροφοδοτείται σε έναν ολοκληρωτή, του οποίου η έξοδος συγκρίνεται με το προκαθορισμένο όριο. Η υιοθέτηση ενός ολοκληρωτή παρέχει διπλά πλεονεκτήματα μειωμένης ευαισθησίας θορύβου μεταγωγής και αυτόματης ρύθμισης των στιγμών μεταγωγής του μετατροπέα σύμφωνα με τις αλλαγές στην ταχύτητα του δρομέα.

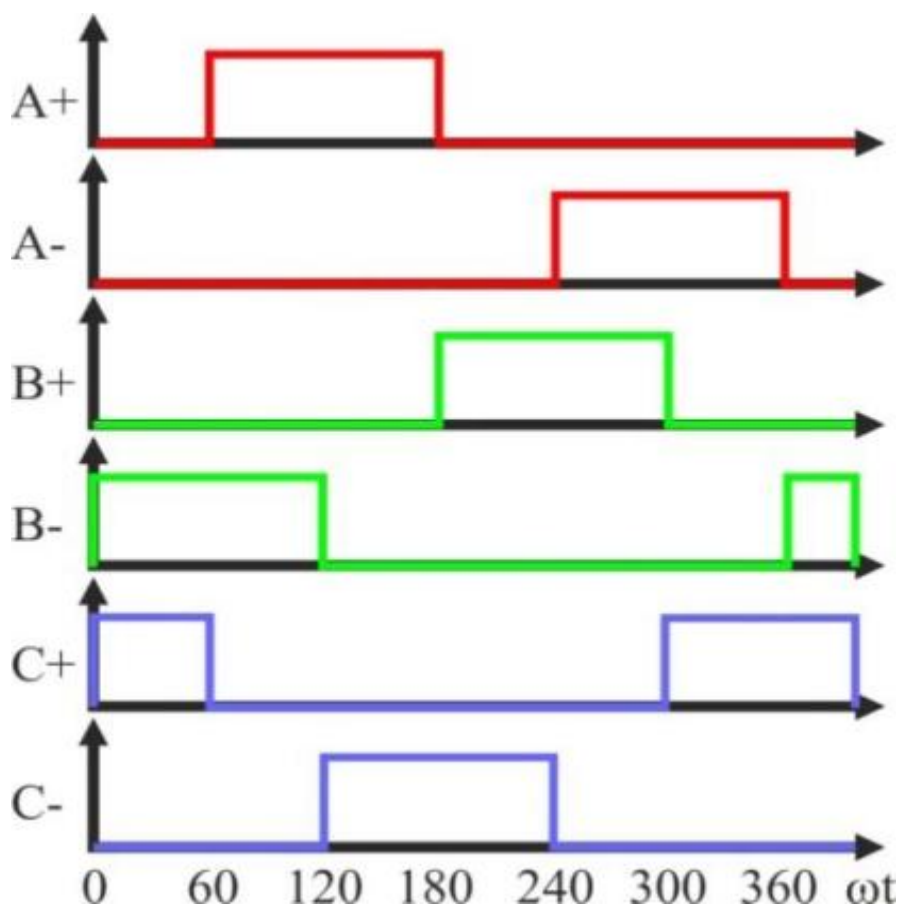
4.4. Μέθοδοι βασισμένη στη PWM

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που βασίζονται σε σχήματα ελέγχου PWM, αλλά οι πιο σχετικές είναι οι συμβατικές 120°, η εξάλειψη του εικονικού ουδέτερου σημείου, οι τεχνικές για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας, υψηλής ταχύτητας και μικρής ισχύος και ελεγχόμενο συνεχές ρεύμα, που εξηγούνται παρακάτω

4.4.1. Συμβατική τεχνική PWM 120°

Το μπλοκ διάγραμμα του σχήματος 4.6, ο οποίος αποτελείται από έναν τριφασικό μετατροπέα και έναν κινητήρα BLDC, μπορεί να ελεγχθεί με την τεχνική PWM για να δώσει σωστές μεταγωγές, έτσι ώστε δύο από τις τρεις φάσεις να είναι με on καταστάσεις και το υπόλοιπο είναι με κυμαινόμενη κατάσταση. Επιπλέον, η

ακολουθία των εναλλαγών διατηρείται με τη σωστή σειρά, έτσι ώστε ο μετατροπέας να εκτελεί τις λειτουργίες όπως σε έναν συμβατικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες, για να δημιουργήσει μια περιστροφική ροή στο στάτη. Το σχήμα 4.11 δείχνει τις κυματομορφές PWM για αυτήν τη συμβατική προσέγγιση, η οποία έχει χαμηλές απώλειες μεταγωγής στην πλευρά του μετατροπέα με κόστος σημαντικά υψηλών αρμονικών περιεχομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απώλειας στην πλευρά του κινητήρα.

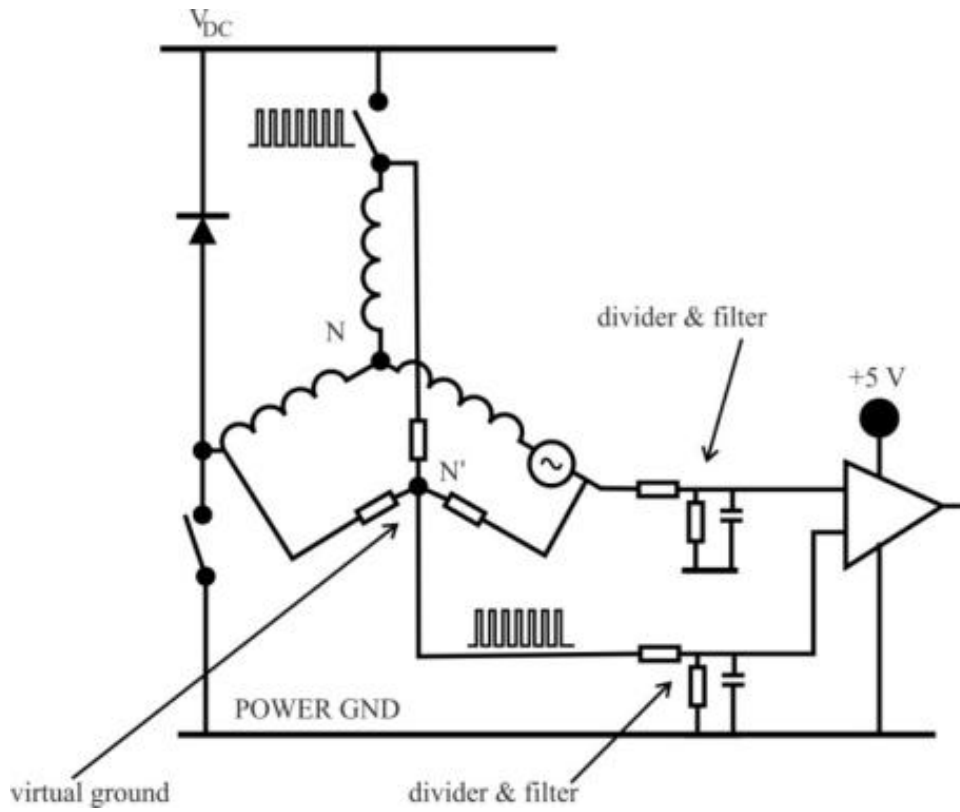


Σχήμα 4.11: Κυματομορφές PWM για μια συμβατική προσέγγιση

4.4.2. Τεχνική εικονικής εξάλειψης ουδέτερου σημείου

Σε μια τυπική διαμόρφωση του μετατροπέα, όπως δείχνει το σχήμα 4.6, δύο φάσεις φέρουν πάντα ρεύμα και μία φάση είναι διαθέσιμη μόνο για τη μέτρηση της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (back-EMF). Για τη μέτρηση της επαγόμενης τάσης (back-EMF) σε μια φάση, η συμβατική μέθοδος απαιτεί παρακολούθηση του ακροδέκτη φάσης και του ουδέτερου σημείου του κινητήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12. Η μηδενική διασταύρωση της επαγόμενης τάσης μπορεί να ληφθεί συγκρίνοντας την τάση ακροδεκτών με το ουδέτερο σημείο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το ουδέτερο σημείο του κινητήρα δεν είναι διαθέσιμο. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η κατασκευή ενός εικονικού ουδέτερου σημείου

που θα είναι θεωρητικά στο ίδιο δυναμικό με το ουδέτερο σημείο των περιελίξεων του κινητήρα.

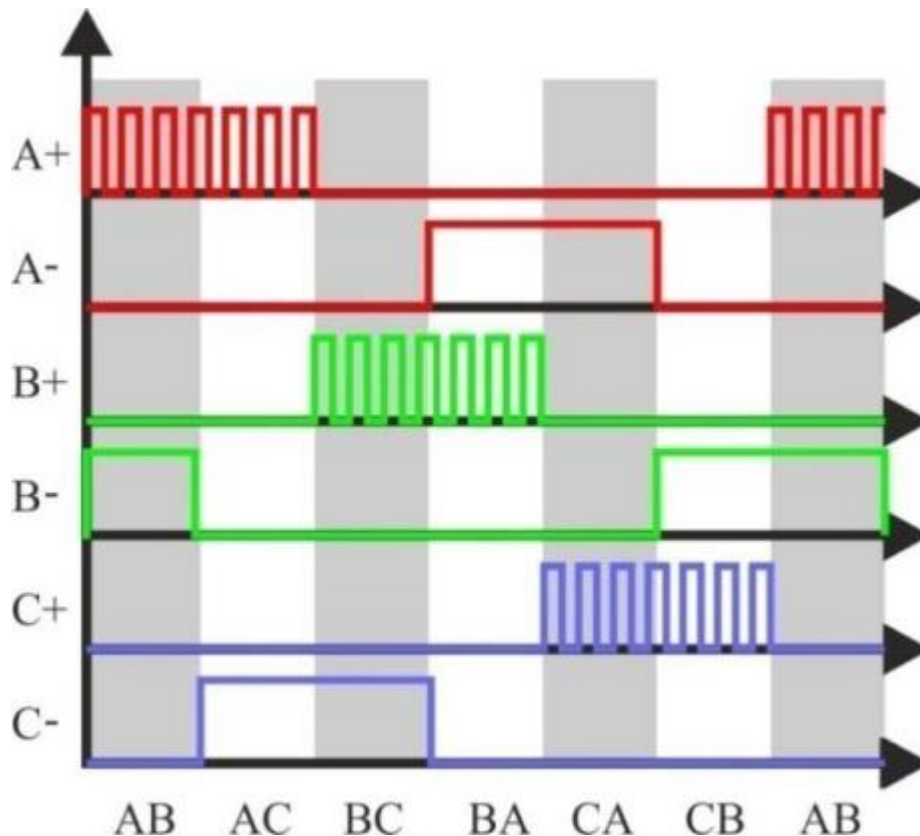


Σχήμα 4.12: Ανίχνευση της επαγόμενης τάσης με βάση το εικονικό ουδέτερο σημείο

Το συμβατικό σχήμα ανίχνευσης είναι αρκετά απλό και όταν χρησιμοποιείται ένα σήμα PWM για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα ή της ροπής/ρεύματος, το εικονικό ουδέτερο σημείο κυμαίνεται στη συχνότητα PWM. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει πολύ υψηλή τάση κοινής λειτουργίας και θόρυβος υψηλής συχνότητας. Οι διαιρέτες τάσης και τα φίλτρα χαμηλής διέλευσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12, απαιτούνται για τη μείωση της τάσης κοινής λειτουργίας και την ελαχιστοποίηση του θορύβου υψηλής συχνότητας.

Μέσω της εξάλειψης του εικονικού ουδέτερου σημείου κατά τη μέτρηση της επαγόμενης τάσης, απαιτείται μικρή ποσότητα φιλτραρίσματος και η μηδενική διέλευση της επαγόμενης τάσης της αιωρούμενης φάσης, μπορεί να επιτευχθεί απευθείας από την τάση ακροδεκτών του κινητήρα που αναφέρεται στη γείωση, χρησιμοποιώντας τη κατάλληλη τεχνική για την ανίχνευση της PWM. Επιπλέον, το δυναμικό του ουδέτερου σημείου θα είναι συνάρτηση της επαγόμενης τάσης κάθε φάσης και δεν θα επηρεάζεται από οποιαδήποτε εξωτερική κινητήρια τάση. Επίσης, σε αυτή τη μέθοδο το σήμα PWM εφαρμόζεται μόνο στους διακόπτες υψηλής πλευράς και το σήμα της επαγόμενης τάσης ανιχνεύεται συγχρόνως κατά τη διάρκεια του χρόνου απενεργοποίησης της PWM, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13. Οι διακόπτες χαμηλής πλευράς ενεργοποιούνται μόνο για την αλλαγή της φάσης του κινητήρα.

Στη συνέχεια, η πραγματική επαγόμενη τάση μπορεί να ανιχνευθεί κατά τη διάρκεια του χρόνου απενεργοποίησης PWM, επειδή η τάση τερματικού του κινητήρα είναι ευθέως ανάλογη με την επαγόμενη τάση επιστροφής φάσης κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος.



Σχήμα 4.13: Η PWM εφαρμόζεται σε διακόπτες υψηλής πλευράς ενός τυπικού μετατροπέα BLDC κινητήρα

Κατά τη διάρκεια του χρόνου απενεργοποίησης της PWM, η τάση τερματικού της αιωρούμενης φάσης είναι ευθέως ανάλογη με την τάση της επαγόμενης τάσης χωρίς υπερτιθέμενο θόρυβο μεταγωγής, όπως δείχνει η εξίσωση 4.10. Επιπλέον, αυτή η τάση ακροδεκτών αναφέρεται στη γείωση αντί για το αιωρούμενο ουδέτερο σημείο, επομένως οι πληροφορίες τάσης ουδέτερου σημείου δεν χρειάζονται για την ανίχνευση της μηδενικής διέλευσης της επαγόμενης τάσης:

$$\bullet \quad V_N = e_{C2} \Rightarrow V_C = e_C + V_N = 32 \cdot e_C \quad (4.10)$$

Το προκύπτον σήμα δεν εξασθενεί ή φιλτράρεται και έχει καλή αναλογία σήματος/θορύβου, συμπεριλαμβανομένου ενός πολύ μεγαλύτερου εύρους στροφών, το οποίο είναι ευεργετικό σε λειτουργία υψηλής ταχύτητας. Στη συνέχεια, αυτή η τεχνική ανίχνευσης έχει υψηλή ευαισθησία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε συστήματα υψηλής τάσης είτε σε συστήματα χαμηλής τάσης χωρίς τη προσπάθεια να κλιμακωθεί η τάση.

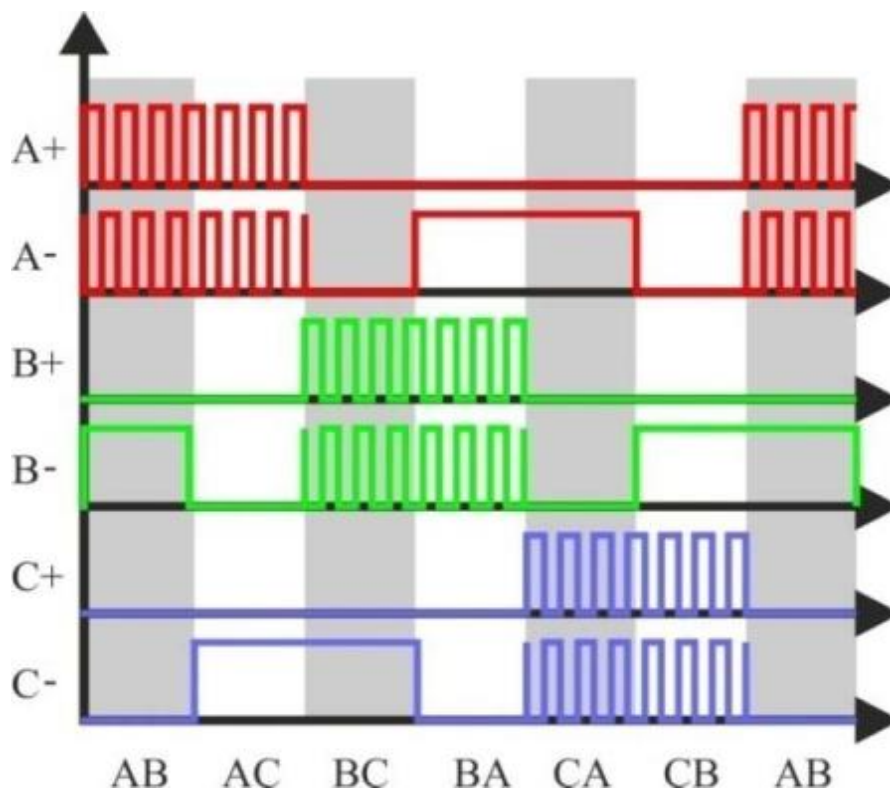
Μια καλή εφαρμογή για αυτό το σύστημα μετάδοσης κίνησης χωρίς αισθητήρες είναι σε μια αντλία καυσίμου αυτοκινήτου. Ένας αποκλειστικός ελεγκτής BLDC χωρίς

αισθητήρα μπορεί να ενσωματωθεί στο ρεζερβουάρ καυσίμου, εφαρμόζοντας ένα κύκλωμα ανίχνευσης μηδενικής διασταύρωσης της επαγόμενης τάσης ως ένα από τα περιφερειακά του, το οποίο απλοποιεί τα συστήματα του οχήματος καθώς και μειώνει το συνολικό κόστος του συστήματος. Αυτή η μέθοδος έχει επίσης εφαρμοστεί με επιτυχία σε ορισμένες οικιακές συσκευές για συμπιεστές, φουσητήρες αέρα και ηλεκτρική σκούπα, καθώς και ανεμιστήρα ψύξης κινητήρα και εφαρμογές κινητήρων ανεμιστήρα HVAC (Θέρμανση, εξαερισμός και κλιματισμός).

4.4.3. Τεχνική για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας ή χαμηλής τάσης

Για εφαρμογές χαμηλής τάσης, η πτώση τάσης στα BJT ή τα MOSFET θα επηρεάσει την απόδοση. Όταν η ταχύτητα του κινητήρα πέσει χαμηλά, η μηδενική διέλευση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα. Επιπλέον, εάν η ταχύτητα πέσει πιο χαμηλά, το πλάτος της επαγόμενης τάσης γίνεται πολύ χαμηλό για ανίχνευση.

Υπάρχουν βασικά δύο μέθοδοι για τη διόρθωση της τάσης μετατόπισης του σήματος της επαγόμενης τάσης. Ένα από αυτά είναι η χρήση συμπληρωματικού PWM όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14, το οποίο επίσης μειώνει την απώλεια αγωγιμότητας. Μια άλλη μέθοδος είναι η εξάλειψη της επίδρασης της πτώσης τάσης της διόδου, προκειμένου να προστεθεί μια σταθερή τάση για να αντισταθμιστεί η επίδραση της διόδου και της τάση κατωφλίου, για την αποφυγή της ασυμμετρίας στην κατανομή της μηδενικής διέλευσης. Στη συνέχεια, προκειμένου να εξαλειφθεί το μη μηδενικό φαινόμενο πτώσης τάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα συμπληρωματικό PWM, το οποίο θα μειώσει επίσης τη διαρροή ισχύος στις συσκευές .



Σχήμα 4.14: Συμπληρωματικός αλγόριθμος PWM

Υποθέτοντας ότι σε ένα συγκεκριμένο βήμα, η φάση A και B διαρρέονται από ρεύμα και η φάση C αιωρείται. Η τάση ακροδεκτών V_C ανιχνεύεται όταν ο επάνω διακόπτης της μισής γέφυρας είναι απενεργοποιημένος και το ρεύμα περνά πάνω από τη δίοδο D. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η τάση ακροδεκτών V_C ανιχνεύεται ως φάση C της επαγόμενης τάσης. Στη συνέχεια, η V_C φαίνεται στην εξίσωση 4.11, λαμβάνοντας υπόψη ένα MOSFET χαμηλής τάσης, στο οποίο το $R_{DS(ON)}$ είναι πολύ χαμηλό και το V_{DS} μπορεί να αγνοηθεί:

$$V_N = V_{DS} - V_{D2} + eC \Rightarrow V_C = eC + V_N = 32 \cdot eC - V_{D2} \quad (4.11)$$

Επομένως, η πτώση τάσης στη δίοδο θα πολώσει την τάση στους ακροδέκτες της φάσης C. Όταν η επαγόμενη τάση eC είναι αρκετά μεγάλη σε υψηλή ταχύτητα, η επίδραση του δεύτερου όρου της εξίσωσης 4.11 είναι αμελητέα. Ωστόσο, σε χαμηλή ταχύτητα, ειδικά κατά την εκκίνηση, η ίδια επαγόμενη τάση είναι πολύ μικρή και ο δεύτερος όρος θα παίζει σημαντικό ρόλο. Αυτή η μετατόπιση τάσης θα προκαλέσει μη ομοιόμορφα κατανεμημένες μηδενικές διασταυρώσεις EMF, κάτι που προκαλεί απροσδόκητη εναλλαγή και θα επηρεάσει την απόδοση του συστήματος. Επίσης, επειδή το σήμα back-EMF είναι πολύ αδύναμο σε χαμηλή ταχύτητα, ένας ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύκλωμα προετοιμασίας για τη ρύθμιση της μετατόπισης και την ενίσχυση του σήματος κοντά στο μηδενικό σταυροδρόμι. Τέλος, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να επεκταθεί σημαντικά με τις βελτιώσεις που εξηγήθηκαν προηγουμένως. Για παράδειγμα, εάν χρησιμοποιείται κινητήρας 48V, το εύρος λειτουργίας στροφών μπορεί να είναι από 50 rpm έως 2.500 rpm.

4.4.4. Τεχνική για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας ή υψηλής τάσης

Ένα από τα συστήματα άμεσης ανίχνευσης της επαγόμενης τάσης που αναλύθηκαν προηγουμένως θα μπορούσε να εφαρμοστεί, για παράδειγμα, σε ένα μικροστοιχείο υλικού μέσα σε έναν μικροελεγκτή. Οι τριφασικές τάσεις ακροδεκτών θα τροφοδοτούνται στον μικροελεγκτή μέσω αντιστάσεων, οι οποίες περιορίζουν το ρεύμα έγχυσης. Όταν ο κύκλος λειτουργίας PWM είναι υψηλός, εμφανίζεται λάθος ανίχνευση μηδενικής διασταύρωσης. Αυτό το πρόβλημα προκαλείται από τη μεγάλη χρονική σταθερά των αντιστάσεων ορίου ρεύματος. Επιπλέον, υπάρχει κάποια παρασιτική χωρητικότητα μέσα στον μικροελεγκτή. Δεδομένου ότι η εξωτερική αντίσταση είναι αρκετά υψηλή, παρόλο που η χωρητικότητα είναι χαμηλή, η επίδραση της χρονικής σταθεράς RC θα εμφανιστεί και η πτώση του σήματος V_C θα είναι μεγάλη.

Καθώς γίνεται η δειγματοληψία του σήματος back-EMF στο τέλος του χρόνου απενεργοποίησης PWM, εάν ο κύκλος λειτουργίας PWM είναι αρκετά υψηλός έτσι ώστε ο χρόνος απενεργοποίησης να είναι μικρότερος από τον χρόνο πτώσης, το αποτέλεσμα δειγματοληψίας δεν είναι σωστό επειδή η περίοδος εκφόρτισης δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη. Για να συντομεύσετε το χρόνο εκφόρτισης, η σταθερά χρόνου RC θα πρέπει να μειωθεί. Μια δυνατότητα είναι να χρησιμοποιηθεί μια μικρότερη αντίσταση παράλληλα με την αντίσταση της σταθεράς χρόνου και μια δίοδος για να μπλοκάρει το ρεύμα φόρτισης που διέρχεται από την παράλληλη αντίσταση.

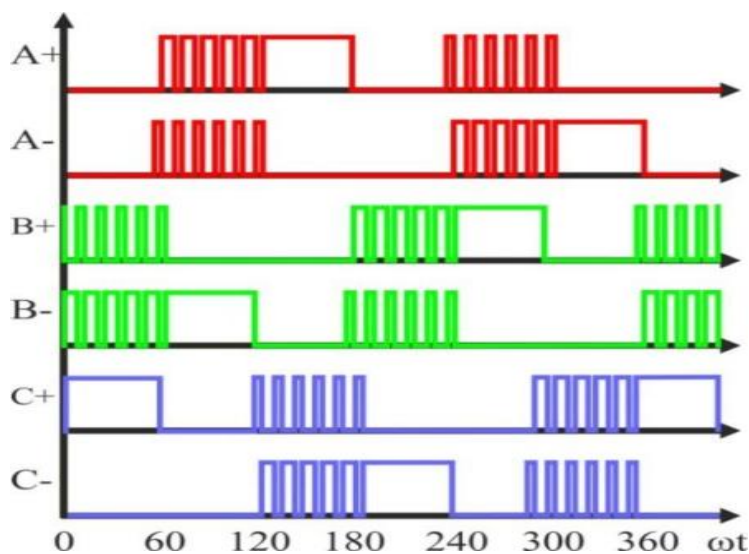
Δεδομένου ότι το back-EMF αποστέλλεται απευθείας στον μικροελεγκτή μέσω μιας αντίστασης ορίου ρεύματος, για εφαρμογές υψηλής τάσης η τιμή αντίστασης είναι

αρκετά υψηλή. Αυτή η αντίσταση με την παρασιτική χωρητικότητα στο κύκλωμα θα προκαλέσει υπερβολική καθυστέρηση και θα προκαλέσει ψευδή αντίληψη. Χρησιμοποιώντας τις βελτιώσεις που σχολιάστηκαν προηγουμένως, το σύστημα χωρίς αισθητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για εφαρμογές φυστήρα αέρα υψηλής ταχύτητας 300 V/30.000 rpm.

4.4.5. Τεχνική για εφαρμογές μικρής ισχύος

Η βασική ιδέα για την ανάπτυξη αυτής της τριφασικής τεχνικής PWM είναι παρόμοια με αυτή του σύγχρονου ανορθωτή για μετατροπέα DC/DC. Σε μια συμβατική προσέγγιση, οι απώλειες μεταγωγής είναι χαμηλές στην πλευρά του μετατροπέα με το κόστος των σημαντικά υψηλών αρμονικών περιεχομένων, που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της απώλειας στην πλευρά του κινητήρα. Για εφαρμογές μικρής ισχύος κινητήρων BLDC, για παράδειγμα εφαρμογές ανεμιστήρα και ατράκτου, λόγω της χρήσης μπαταρίας και του περιορισμένου χώρου για απαγωγή θερμότητας, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας γίνεται ένα από τα κύρια προβλήματα σε αυτήν την τεχνική PWM.

Η συσκευή υψηλής ισχύος τεμαχίζεται σε 1/6 της θεμελιώδη περίοδο και ο λόγος λειτουργίας προέρχεται από την αναφορά ταχύτητας ή το σφάλμα ταχύτητας. Παρόμοιο σήμα ελέγχου εφαρμόζεται στη συσκευή ισχύος χαμηλής πλευράς με μετατόπιση 180°. Αυτά τα σήματα ελέγχου εφαρμόζονται στις άλλες δύο φάσεις με μετατόπιση 120°. Κάτω από αυτή τη συνθήκη, στο κύκλωμα του σχήματος 4.6 το ρεύμα ρέει μέσω της αντιπαράλληλης διόδου της συσκευής ισχύος T_{A-} , με αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες αγωγιμότητας, οι οποίες ισούνται με το γινόμενο της τάσης προς τα εμπρός πτώσης της διόδου και του ρεύματος φορτίου. Αυτή η σημαντική απώλεια θερμότητας μειώνεται σε αυτήν την τεχνική. Η συσκευή ισχύος υψηλής πλευράς κόβεται σε θεμελιώδη περίοδο και συσφίγγεται στη ράγα θετικής σύνδεσης DC στη διαδοχική θεμελιώδη περίοδο, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 4.15. Καθώς η συσκευή υψηλής πλευράς είναι με έλεγχο κοπής, η σχετική χαμηλή πλευρική συσκευή τροφοδοσίας ενεργοποιείται από το αντίστροφο σήμα ελέγχου κοπής.



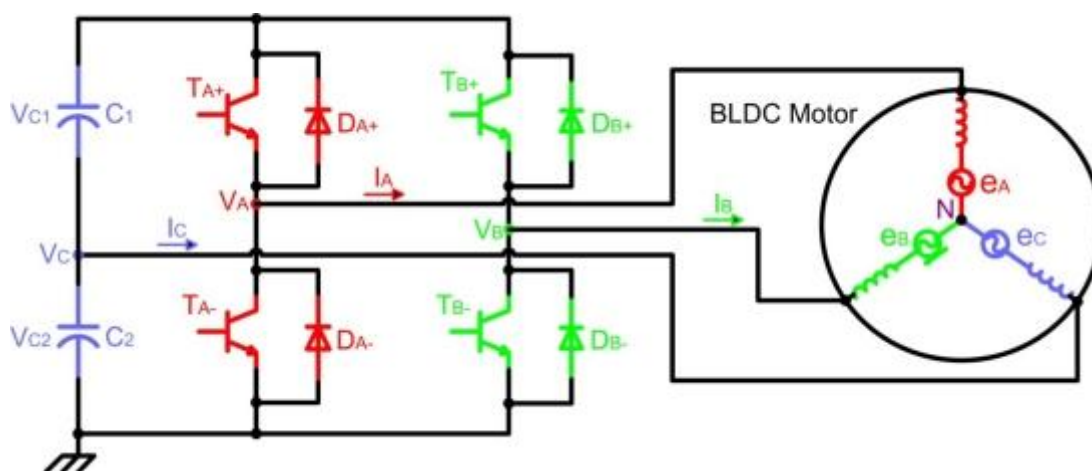
Σχήμα 4.15: Κυματομορφή PWM για τεχνική PWM χαμηλής ισχύος, όπου το ωt $[60^\circ, 120^\circ]$ και το T_{A+} είναι "off"

Για να τονιστεί το χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής PWM, η πτώση τάσης που προκαλείται από την αντίσταση ενεργοποίησης της συσκευής ισχύος και το ρεύμα φορτίου μειώνεται σημαντικά σε σύγκριση με την πτώση τάσης προς τα εμπρός της διόδου. Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας και οι απώλειες θερμότητας μπορούν να μειωθούν σημαντικά.

Μια πρακτική εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι σε συσκευές DVD που χρησιμοποιούν FPGA. Μόνο οι τερματικές τάσεις τριών φάσεων δειγματοληπτούνται και τροφοδοτούνται στον ελεγκτή FPGA για τον υπολογισμό των στιγμών μεταγωγής και μια εξωτερική αντίσταση και ένας μετατροπέας A/D οκτώ bit χρησιμοποιούνται για να δώσουν την αναφορά του λόγου λειτουργίας.

4.4.6. Τεχνική PWM ελεγχόμενου συνεχούς ρεύματος (έλεγχος ρεύματος υστέρησης)

Με τα πλεονεκτήματα των ηλεκτροκινητήρων BLDC, είναι δυνατή η χρήση μειωμένης διαμόρφωσης μετατροπέα με προηγμένες τεχνικές ελέγχου. Στη συνέχεια, ένα πόδι διακόπτη στον συμβατικό μετατροπέα έξι διακοπών, που φαίνεται στο σχήμα 4.6, είναι περιττό για την κίνηση του τριφασικού κινητήρα BLDC, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα διαμόρφωσης τεσσάρων διακοπών αντί για έξι διακόπτες, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16. Αυτή η νέα μονάδα δίσκου αποτελείται από δύο σκέλη διακοπών και χωρισμένη συστοιχία πυκνωτών, επομένως δύο φάσεις συνδέονται με τα σκέλη του διακόπτη και η άλλη φάση στο μέσο των πυκνωτών DC-Link. Αλλά με αυτή τη διαμόρφωση, οι περιορισμένες τάσεις καθιστούν πολύ δύσκολη την απόκτηση αγωγίμων προφίλ 120° . Αυτό είναι το γνωστό πρόβλημα ασύμμετρης τάσης PWM, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη στρατηγική PWM μετατόπισης φάσης 60° για τη δημιουργία τριφασικών προφίλ ισορροπημένου ρεύματος. Επίσης, τα συμβατικά σχήματα PWM δεν μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας για τη νέα διαμόρφωση μονάδας δίσκου.



Σχήμα 4.16: Μετατροπέας τεσσάρων διακοπών για κίνηση τριφασικού κινητήρα BLDC

Η τεχνική ελέγχου PWM συνεχούς ρεύματος βασίζεται στη μέθοδο PWM ελεγχόμενου ρεύματος, αντί της ελεγχόμενης τάσης PWM, η οποία δημιουργεί ισχυρές αποκρίσεις ταχύτητας και ροπής και είναι απλό να εφαρμοστεί από την άποψη του υλικού και του λογισμικού. Ως εκ τούτου, ο τριφασικός κινητήρας BLDC τεσσάρων διακοπών, που εφαρμόζεται κυρίως σε ηλεκτροκινητήρες επαγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος μέχρι τώρα, θα μπορούσε να είναι μια καλή εναλλακτική λύση στη συμβατική διαμόρφωση σε σχέση με το χαμηλό κόστος και την υψηλή απόδοση.

Σε μια στρατηγική ελέγχου PWM για τον τριφασικό κινητήρα BLDC τεσσάρων διακοπών, τα τριφασικά ρεύματα πληρούν πάντα την προϋπόθεση της εξίσωσης 4.12:

$$I_C = -(I_A + I_B) \quad (4.12)$$

Σημαίνει ότι ο έλεγχος των διφασικών ρευμάτων μπορεί να εγγυηθεί τη δημιουργία προφίλ τριφασικών αγωγίμων ρευμάτων 120°. Για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, τα διφασικά ρεύματα ελέγχονται απευθείας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελέγχου ρεύματος υστέρησης από τέσσερις διακόπτες .

Κεφάλαιο 5⁰

Συγκριτική ανάλυση BLDC με άλλους κινητήρες

5.1.Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα BLDC κινητήρων

Με δεδομένο ότι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC), δεν διαθέτουν κάποιο μηχανικό σύστημα με ψήκτρες, ώστε η να γίνει η μεταγωγή του ρεύματος αλλά χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ισχύος, οι κινητήρες αυτού του τύπου προσφέρουν μια πληθώρα από πλεονεκτήματα. Μερικά από τα σημαντικότερα **πλεονεκτήματα** που παρουσιάζουν οι κινητήρες BLDC είναι τα ακόλουθα:

- Αυξημένη αξιοπιστία και χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης, καθώς το σύστημα πλέον δεν χρησιμοποιεί ψήκτρες, οι οποίες κατά τη λειτουργία του κινητήρα φθείρονταν εξαιτίας της τριβής.
- Καθώς οι ψήκτρες απουσιάζουν, οι μηχανικές απώλειες λόγω τριβής είναι μικρότερες, γεγονός που ενισχύει την απόδοση.
- Ο κινητήρας έχει μικρότερο όγκο και είναι πιο ελαφρύς από τους κινητήρες DC με ψήκτρες, καθώς δεν υπάρχει το μηχανικό σύστημα μεταγωγής του ρεύματος.
- Υψηλή ταχύτητα λειτουργίας ακόμη και σε φορτωμένες και εκφορτωμένες συνθήκες λόγω της απουσίας ψηκτρών που περιορίζουν την ταχύτητα.
- Κατά την εκκίνηση ή και σε μικρές ταχύτητες παράγονται υψηλές τιμές ροπής.
- Έχουν εξαιρετική απόκριση στην εκκίνηση.
- Λιγότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Λειτουργούν αρκετά αθόρυβα και δεν εμφανίζονται σπινθήρες λόγω της απουσίας των ψηκτρών.
- Μπορούν να χρησιμοποιήσουν περισσότερους ηλεκτρομαγνήτες στο στάτη για πιο ακριβή έλεγχο.
- Οι κινητήρες BLDC επιταχύνουν και επιβραδύνουν εύκολα καθώς έχουν χαμηλή αδράνεια στο δρομέα.
- Επειδή οι περιελίξεις αποτελούνται από κελύφη, μπορούν να ψύχονται με αγωγιμότητα χωρίς να υπάρχει κάποια ροή αέρα που να ψήχει το εσωτερικό του κινητήρα. Έτσι οι κινητήρες μπορούν να είναι εντελώς κλειστές ώστε να αποτρέπει την είσοδο σκόνης και άλλων ξένων ουσιών.

Ωστόσο οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες παρουσιάζουν ορισμένα **μειονεκτήματα**, τα οποία είναι σημαντικό να τα γνωρίζουμε. Ορισμένα από τα μειονεκτήματα των κινητήρων αυτών είναι:

- Το κόστος τους είναι αρκετά πιο μεγάλο σε σχέση με τους κινητήρες DC με ψήκτρες.
- Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής που απαιτείται για τον έλεγχο αυτού του κινητήρα είναι ακριβός
- Δεν υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα πολλών ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών λύσεων ελέγχου, ειδικά για μικροσκοπικούς κινητήρες BLDC
- Η υπερβολική θερμοκρασία αποδυναμώνει τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα και μπορεί να καταστρέψει τη μόνωση της περιέλιξης
- Ανάγκη πρόσθετων αισθητήρων για καλύτερο έλεγχο.

5.2. Σύγκριση κινητήρα BLDC με εναλλασσόμενους επαγωγικούς κινητήρες και με κινητήρες DC με ψήκτρες

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ BLDC	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ DC ΜΕ ΨΗΚΤΡΕΣ	ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ
Μηχανική δομή	Οι μαγνήτες του πεδίου του δρομέα και του στάτη κατασκευάζονται από μόνιμους μαγνήτες	Οι μαγνήτες του πεδίου του δρομέα και του στάτη κατασκευάζονται από μόνιμους μαγνήτες ή από ηλεκτρομαγνήτες	Τόσο ο δρομέας όσο και ο στάτης έχουν περιελίξεις αλλά οι γραμμές εναλλασσομένου ρεύματος συνδέονται στο στάτη
Συντήρηση	Λιγότερη απαιτούμενη συντήρηση λόγω της απουσίας των ψηκτρών	Απαραίτητη ανά τακτές χρονικές περιόδους συντήρησης εξαιτίας της φθοράς των ψηκτρών	Λιγότερη απαιτούμενη συντήρηση
Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας	Επίπεδη - Επιτρέπει τη λειτουργία σε όλες τις ταχύτητες με ονομαστικό φορτίο	Μετρίως επίπεδη – Σε υψηλές ταχύτητες εμφανίζονται απώλειες ροπής εξαιτίας της θραύσης των ψηκτρών	Μη γραμμική – Χαμηλότερη ροπή σε χαμηλότερες στροφές
Ισχύς εξόδου/ μέγεθος	Υψηλή – Μειώνεται το μέγεθος λόγω καλύτερων θερμικών χαρακτηριστικών. Επίσης εφόσον οι μαγνήτες είναι στο δρομέα, μπορεί να επιτευχθεί μικρότερο μέγεθος για δεδομένη ισχύς εξόδου	Μέτρια/χαμηλή – Η θερμότητα που παράγεται στα τυλίγματα διαχέονται στο διάκενο και έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία του διακένου μειώνοντας τις προδιαγραφές ισχύος/μεγέθους	Μέτρια – Αφού ο δρομέας και ο στάτης έχουν τυλίγματα ο λόγος ισχύος εξόδου /μεγέθους είναι μικρότερος από αυτόν του κινητήρα BLDC
Αδράνεια δρομέα	Χαμηλή λόγω των μόνιμων μαγνητών του δρομέα. Αυξημένη δυναμική απόκριση	Υψηλή αδράνεια δρομέα που μειώνει τα δυναμικά χαρακτηριστικά	Υψηλή – Περιορισμένα δυναμικά χαρακτηριστικά

Εύρος ταχυτήτων	Υψηλό – Κανένας μηχανικός περιορισμός από ψήκτρες/συλλέκτη	Χαμηλό – Μηχανικοί περιορισμοί από ψήκτρες	Καθορίζεται από τη συχνότητα της γραμμής εναλλασσομένου ρεύματος, η αύξηση του φορτίου μειώνει περαιτέρω τη ταχύτητα
Ηλεκτρικός θόρυβος	Χαμηλός	Οι ψήκτρες δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) που προκαλούν θόρυβο	Χαμηλός
Μετάβαση	Ηλεκτρονική οδήγηση βασισμένη σε αισθητήρες Hall	Οδήγηση με ψήκτρες	Απαιτείται ειδικό κύκλωμα εκκίνησης
Απαιτήσεις ελέγχου	Απαιτείται πάντα ελεγκτής για την περιστροφή του κινητήρα. Ο ίδιος ο ελεγκτής χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο ταχύτητας	Δεν χρειάζεται ελεγκτής όταν ο κινητήρας δουλεύει με μια καθορισμένη ταχύτητα. Χρειάζεται μόνο όταν απαιτείται μεταβαλλόμενη ταχύτητα	Δεν χρειάζεται ελεγκτής όταν ο κινητήρας δουλεύει με μια καθορισμένη ταχύτητα. Χρειάζεται μόνο όταν απαιτείται μεταβαλλόμενη ταχύτητα
Κόστος κατασκευής	Υψηλό – Το κόστος των μόνιμων μαγνητών καθώς και του ηλεκτρονικού ελεγκτή είναι υψηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
Απόδοση	Υψηλή – Μηδενική πτώση τάσης στις ψήκτρες	Μέτρια – Η απόδοση του κινητήρα μειώνεται εξαιτίας των απωλειών από τις ψήκτρες	Χαμηλή – Υπάρχουν απώλειες θερμότητας και ρεύματος τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα. Παρόλα αυτά υπάρχουν και κινητήρες με υψηλή απόδοση αλλά το κόστος τους είναι μεγάλο
Ολίσθηση	Δεν παρατηρείται ολίσθηση μεταξύ των συχνοτήτων του δρομέα και του στάτη		Η συχνότητα περιστροφής του δρομέα είναι μικρότερη από τη συχνότητα περιστροφής του στάτη λόγω ολίσθησης, η οποία αυξάνεται με την προσθήκη φορτίου στο κινητήρα
Ρεύμα εκκίνησης	Ονομαστικό – Δεν απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα για την εκκίνηση		Περίπου 7 φορές του ονομαστικού. Η διαβάθμιση του κυκλώματος του εκκινητή επιλέγεται προσεκτικά. Συνήθως χρησιμοποιείται εκκινητής αστέρα τρίγωνο (Y→Δ)
Αλλαγή φοράς περιστροφής	Αντιστρέφοντας τη σειρά εναλλαγής	Αντιστρέφοντας τη τάση ακροδεκτών	Αλλάζοντας τις δύο φάσεις της εισόδου του κινητήρα

5.3. Εφαρμογές κινητήρων BLDC

Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες εκπληρώνουν πολλές λειτουργίες που εκτελούνταν αρχικά από κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες, αλλά το κόστος και η πολυπλοκότητα ελέγχου εμποδίζει τους κινητήρες χωρίς ψήκτρες να αντικαταστήσουν πλήρως τους κινητήρες με ψήκτρες στις περιοχές με το χαμηλότερο κόστος. Ωστόσο, οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες έχουν κυριαρχήσει σε πολλές εφαρμογές, που έχουν να κάνουν με τη **μεταφορά, τη θέρμανση και τον εξαερισμό, για διάφορα ασύρματα εργαλεία, τη βιομηχανική μηχανική και τον αερομοντελισμό.**

Όσο αναφορά τις εφαρμογές που έχουν να κάνουν με τη **μεταφορά**, οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες βρίσκονται σε ηλεκτρικά οχήματα, υβριδικά οχήματα, προσωπικούς μεταφορείς, και ηλεκτρικό αεροσκάφος. Πλέον ηλεκτρικά ποδήλατα χρησιμοποιούν κινητήρες χωρίς ψήκτρες που μερικές φορές είναι ενσωματωμένοι στον ίδιο τον άξονα του τροχού, με τον στάτη στερεωμένο σταθερά στον άξονα και τους μαγνήτες συνδεδεμένους και να περιστρέφονται μαζί με τον τροχό. Η ίδια αρχή εφαρμόζεται σε αυτοεξισοροπούμενο σκούτερ τροχούς. Τα περισσότερα ηλεκτρικά ραδιοελεγχόμενα μοντέλα χρησιμοποιούν κινητήρες χωρίς ψήκτρες λόγω της υψηλής απόδοσης τους.



Σχήμα 5.1: Ηλεκτροκίνητα οχήματα με κινητήρες BLDC

Πολλές βιομηχανίες χρησιμοποιούν για συστήματα θέρμανσης, ψύξης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) κινητήρες BLDC αντί για διάφορους τύπους κινητήρες AC. Ο λόγος είναι διότι οι κινητήρες BLDC απαιτούν μικρότερο ποσό ισχύος για να λειτουργήσουν σε σχέση με τους AC καθώς επίσης έχουν πιο υψηλή απόδοση. Επιπλέον όταν πρόκειται για συστήματα (HVAC) που διαθέτουν μεταβλητή ταχύτητα ή διαμόρφωση φορτίου, χρησιμοποιούνται κινητήρες BLDC διότι έχουν έναν μικροεπεξεργαστή για τον συνεχή έλεγχο της ψύξης και της θέρμανσης.

Για εφαρμογές που πρόκειται για **σύγχρονα εργαλεία μπαταρίας**, όπως για παράδειγμα τα χορτοκοπτικά, φυσητήρες φύλλων, πριόνια (εγκύκλιος και

παλινδρομική κίνηση), και τρυπάνια /οδηγούς οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες κατέχουν σημαντική θέση. Τα πλεονεκτήματα βάρους και απόδοσης των κινητήρων χωρίς ψήκτρες σε σχέση με τους κινητήρες με ψήκτρες είναι πολύ σημαντικό για τα φορητά εργαλεία που λειτουργούν με μπαταρία, παρά για τα μεγάλα, σταθερά εργαλεία που είναι συνδεδεμένα σε μια πρίζα AC.



Σχήμα 5.2: Σύγχρονα εργαλεία μπαταρίας με κινητήρες BLDC

Η εφαρμογή κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες **στη βιομηχανική μηχανική**, εστιάζει κυρίως στη κατασκευαστική μηχανική ή τη σχεδίαση βιομηχανικού αυτοματισμού. Στην κατασκευή, οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες χρησιμοποιούνται κυρίως για έλεγχο κίνησης, τοποθέτησης ή κίνηση συστήματα.

Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες είναι ιδανικά κατάλληλοι για κατασκευαστικές εφαρμογές λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος, των καλών χαρακτηριστικών ταχύτητας-ροπής, της υψηλής απόδοσης, του μεγάλου εύρους στροφών και της χαμηλής συντήρησης. Οι πιο κοινές χρήσεις των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες στη βιομηχανική μηχανική είναι οι γραμμικοί κινητήρες, σερβοκινητήρες, ενεργοποιητές για βιομηχανικά ρομπότ, κινητήρες μετάδοσης κίνησης εξωθητή και κινητήρες τροφοδοσίας για εργαλειομηχανές CNC.

Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές τοποθέτησης και ενεργοποίησης. Για ρομπότ συναρμολόγησης, οι BLDC κινητήρες χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση ενός εξαρτήματος για συναρμολόγηση ή ενός εργαλείου για μια διαδικασία κατασκευής, όπως η συγκόλληση ή η βαφή. Επιπλέον οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες χρησιμοποιούνται συνήθως ως κινητήρες αντλίας, ανεμιστήρα σε εφαρμογές ρυθμιζόμενης ή μεταβλητής ταχύτητας, καθώς είναι ικανοί να αναπτύσσουν υψηλή ροπή με καλή απόκριση ταχύτητας. Επιπλέον, μπορούν εύκολα να αυτοματοποιηθούν για τηλεχειρισμό.

Τέλος οι κινητήρες BLDC έχουν γίνει αρκετά δημοφιλής στα **ηλεκτροκίνητα μοντέλα αεροσκαφών**, όπως για παράδειγμα τα drones, καθώς χρησιμοποιούν αυτού του είδους κινητήρα. Οι ευνοϊκή αναλογία ισχύος προς βάρος, με κινητήρες από κάτω

από 5 γραμμάρια έως και μεγάλους κινητήρες με μεγάλη ισχύ εξόδου, έχουν φέρει επανάσταση στα ηλεκτροκίνητα μοντέλα, εκτοπίζοντας ουσιαστικά όλους τους ηλεκτρικούς κινητήρες με ψήκτρες. Πλέον αναπτύσσονται νέα ηλεκτρικά μοντέλα αεροσκαφών που είναι αρκετά πιο ελαφριά σε σχέση με την ισχύ τους και πιο αθόρυβα με τα προηγούμενα μοντέλα που χρησιμοποιούσαν κινητήρες εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 5.3: Ηλεκτροκίνητο drone με κινητήρα BLDC

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΣΑΒΒΑΚΗΣ, Κ. Ε. Τεχνολογία Υλικών, Υλικά τεχνολογικών εφαρμογών. Γ' έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2002.
2. Μαλατέστας, Παντελής Β. "Ηλεκτρικές Μηχανές." Εκδόσεις Τζιολας 2 (2015).
3. Charman, Stephen J. "Ηλεκτρικές μηχανές." 4^η έκδοση (2017).
4. Μαλατέστας, Παντελής Β. "Ηλεκτρική κίνηση." 4^η έκδοση (2018).
5. ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑ (Β' ΕΠΑ.Λ, Β' Εσπερινού ΕΠΑ.Λ, Γ' ΕΠΑ.Λ, Γ' Εσπερινού ΕΠΑ.Λ), Συγγραφείς: Βουρνάς Κων/νος, Δαφέρμος Ολύμπιος, Πάγκαλος Σταύρος, Χατζαράκης Γεώργιος, Κορδάτος Βασίλειος, 1^η έκδοση, 2014
6. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ (Γ' ΕΠΑ.Λ, Γ' Εσπερινού ΕΠΑ.Λ), Συγγραφείς: Γατζούδης Σωτήρης, Λαγουδάκος Μιχαήλ, Μπινιάρης Αθανάσιος, 1^η έκδοση, 2017
7. Διπλωματική εργασία του φοιτητή Χρήστου Παπασταύρου, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής ενέργειας, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, «Μελέτη και κατασκευή του κινητήριου συστήματος ενός ηλεκτροκίνητου δίκυκλου», Μάρτιος 2018
8. Διπλωματική εργασία του φοιτητή Νικολάου Βασιλάτου, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής ενέργειας, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, «Υλοποίηση παρατηρητή για τον έλεγχο τριφασικού κινητήρα τύπου Brushless χωρίς τη χρήση αισθητήρων», Ιούνιος 2018
9. Πτυχιακή εργασία του φοιτητή Χρήστου Α. Τσομπάνης, ΑΕΙ Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Συστημάτων, « Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του σε γεννήτρια», Φεβρουάριος 2017
10. Πτυχιακή εργασία των φοιτητών Κύργιο Λεωνίδα και Χοντάη Ανδρέα, ΑΕΙ Πειραιά, Τεχνολογική εκπαίδευση, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, «Μελέτη και κατασκευή βηματικού κινητήρα, Study and construction of stepper motor», 2017.
11. Πτυχιακή εργασία του φοιτητή Πάντη Γρηγόριο, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, « Βηματικοί κινητήρες, κατασκευή και μεθοδολογία ελέγχου», 2017
12. <https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2018/01/stepper-motors.html>
13. https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post_9.html
14. <https://studylib.net/doc/18796570/chapter-1-introduction-1.1-history-of-brushless-dc>
15. Σημειώσεις ηλεκτρικών μηχανών από τει κεντρικής Μακεδονίας
16. T.J.E Miler “Brushless Permanent -Magnet and Reluctance Motor Drive” , Claredon Press – Oxford 1989

17. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231115/#b10-sensors-10-06901>