



**ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ**

ΤΜΗΝΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ**

ΜΕΤΑΛΛΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ



Φοιτητής ΜΕΤΑΛΛΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ  
Αρ. Μητρώου: 517087

Επιβλέπων ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

Ημερομηνία 25/11/25

Τίτλος Δ.Ε.ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ

Κωδικός Δ.Ε. 25289

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/των ΜΕΤΑΛΛΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Όνοματεπώνυμο εισηγητή ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.19-07-2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. ...

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή ΜΕΤΑΛΛΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας θα μελετηθούν και θα αναλυθούν οι βασικοί τύποι ηλεκτροκινητήρων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα .Θα αναλυθεί η λειτουργία τους ,τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους ,οι επιδόσεις τους και η καταλληλότητα τους για τους διαφορετικούς τύπους αυτοκινήτων καθώς και οι μελλοντικές τεχνολογίες που μας πλησιάζουν.

## ABSTRACT

Within the framework of the thesis, the basic types of electric motors used in electric cars will be studied and analyzed. Their operation, technical characteristics, performance and suitability for different types of cars will be analyzed, as well as the future technologies that are approaching us.

## Περιεχόμενα

1° ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	7
2° Ηλεκτροκινητήρες ΕV .....	8
2.1 Ιστορική Εξέλιξη .....	8
2.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας.....	12
2.3 Τεχνικές απαιτήσεις.....	13
2.4 Πιο Διαδεδομένοι Κινητήρες .....	14
3° Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη (PMSM) .....	15
3.1 Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμου Μαγνήτη.....	15
3.2 Surface-Mounted PMSM (SPMSM) .....	16
3.2.1 Αρχή λειτουργίας.....	16
3.2.2 Κατασκευή .....	16
3.3 Interior PMSM (IPMSM) .....	17
3.3.1 Αρχή λειτουργίας.....	17
3.3.2 Κατασκευή .....	17
3.4 Εφαρμογές σε Οχήματα.....	18
3.5 Χαρακτηριστικά .....	18
4° Επαγωγικός Κινητήρας (IM).....	20
4.1 Επαγωγικός Κινητήρας (IM).....	20
4.1.1 Αρχές λειτουργίας.....	20
4.2 Κατασκευή.....	21
4.3 Χαρακτηριστικά .....	23
4.4 Εφρμογές.....	23
5° Ηλεκτροκινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Ψήκτρες ( BLDC) .....	24
5.1 Αρχή Λειτουργίας BLDC .....	25
5.2 Κατασκευή.....	26
5.3 Εφαρμογές.....	27
5.4 Χαρακτηριστικά .....	28
6° Κινητήρας Μεταγωγής Απρόθυμιας ( SRM ) .....	30
6.1 Αρχή Λειτουργίας.....	30
6.2 Κατασκευή.....	31
6.3 Χαρακτηριστικά .....	32
6.4 Εφαρμογές.....	34
7° Συγκριτική Ανάλυση Κινητήρων .....	35
1. Ανάλυση Πυκνότητας Ροπής (Torque Density).....	35
2. Ανάλυση Ψύξης (Cooling).....	36

3. Ανάλυση Κόστους (Cost Efficiency) .....	36
4. Ανάλυση Απόδοσης (Efficiency) .....	37
5. Ανάλυση Απλότητας Ελέγχου (Control Simplicity) .....	37
6. Συγκριτική Αξιολόγηση Χαρακτηριστικών Ροπής-Ταχύτητας.....	38
8° Αναδυόμενες Τεχνολογίες.....	39
9° Συμπεράσματα.....	41
10° Βιβλιογραφία.....	42

## 1° ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια ,η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας και η ανάγκη για πιο καθαρές μορφές ενέργειας έχουν φέρει στο προσκήνιο την ηλεκτροκίνηση που με την πλευρά του οδηγεί την βιομηχανία των μεταφορών σε μια βαθιά τεχνολογική μετάβαση .Τα ηλεκτρικά οχήματα (EV-Electric Vehicles) αποτελούν πλέον ένα από τα πιο σημαντικά επιτεύγματα αυτής της μετάβασης προσφέροντας ένα πιο βιώσιμο τρόπο μετακινήσεις με χαμηλές εκπομπές ρύπων ,υψηλή απόδοση και βελτιωμένη οδηγική εμπειρία.

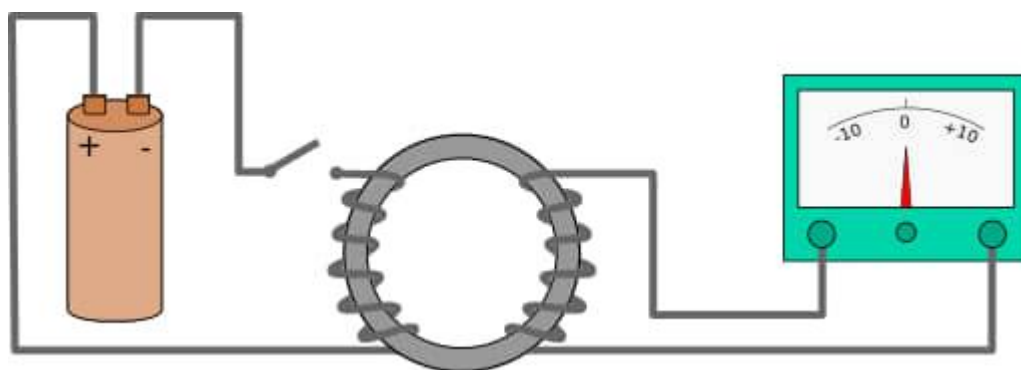
Η εξέλιξη των ηλεκτροκινητήρων έχει υπάρξει συνεχής από τις αρχές του 20<sup>00</sup> αιώνα με σημαντικές αναβαθμίσεις τόσο στα υλικά όσο και στα συστήματα ελέγχου .Σήμερα οι πιο χρησιμοποιημένοι τύποι κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα είναι ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη **PMSM**, ο επαγωγικός κινητήρας **IM**, ο κινητήρας εσωτερικού μαγνήτη **IPM**, ο κινητήρας συνεχούς ρέματος χωρίς ψήκτρες **BLDC** και ο κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης **SRM** .Κάθε τύπος διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την απόδοση ,το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο στην μελέτη ,ανάλυση και σύγκριση των βασικών τύπων ηλεκτροκινητήρα που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα καθώς και μια αναφορά στις νέες τεχνολογίες που βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Επιδιώκουμε μέσα από την θεωρητική ανάλυση των χαρακτηριστικών και την σύγκριση τους να δοθεί μια συνολική εικόνα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων όπως επίσης και το ρόλο τους στην διαμόρφωση της επόμενης γενιάς ηλεκτροκινητήρων ηλεκτρικών αυτοκινήτων [1]

## 2<sup>ο</sup> Ηλεκτροκινητήρες EV

### 2.1 Ιστορική Εξέλιξη

Η ιστορία των ηλεκτροκινητήρων άρα και των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρίες ξεκινάει στις αρχές του 1800 .Η βάση για την ανάπτυξη αρχισε με τα πειράματα του Michael Faraday (1821) όταν απέδειξε ότι ένα αγωγικό σύρμα μπορεί να κινηθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο όταν διαρρέεται από ρεύμα.. Το 1828, ένας Ούγγρος μηχανικός με το όνομα Άnyos Jedlik εφηύρε ένα μικρό μοντέλο οχήματος που τροφοδοτείται από έναν βασικό ηλεκτροκινητήρα. Αυτή η πρόωμη εφεύρεση έδειξε τις δυνατότητες της ηλεκτρικής ενέργειας για την οδήγηση οχημάτων και έθεσε το έδαφος για μελλοντικές καινοτομίες. Παρόλο που ο κινητήρας του Jedlik ήταν πολύ απλός σε σύγκριση με τους σημερινούς κινητήρες, ήταν η αρχή μιας επαναστατικής ιδέας, την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση των αυτοκινήτων.[5]



Εικόνα 1.Κύκλωμα του Michael Faraday στην μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής

Η δεκαετία του 1830 ήταν μια βασική εποχή για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο Σκωτσέζος εφευρέτης Ρόμπερτ Άντερσον δημιούργησε το πρώτο ηλεκτρικό καρότσι, που τροφοδοτείται από μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Αν και ήταν βασικό, αυτό το βαγόνι απέδειξε ότι η ηλεκτρική ενέργεια μπορούσε να λειτουργήσει για τις μεταφορές. Περίπου την ίδια εποχή ακολούθησε ο William Sturgeon το 1832 δημιούργησε το πρώτο ηλεκτρικό καρότσι, που τροφοδοτείται από μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και ο Thomas Davenport το 1834 κατασκεύασε μια μικρή ατμομηχανή με μπαταρίες, επιδεικνύοντας περαιτέρω τις δυνατότητες της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εφεύρεση του Ντάβενπορτ άνοιξε το δρόμο για τα μελλοντικά ηλεκτρικά τρένα και τραμ, δείχνοντας πώς οι ηλεκτροκινητήρες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους.

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, υπήρξαν και άλλες σημαντικές ανακαλύψεις. Το 1834, ο Αμερικανός χημικός Moritz Hermann von Jacobi χρησιμοποίησε μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία για να τροφοδοτήσει ένα μικρό ηλεκτρικό σκάφος. Αυτή ήταν η πρώτη φορά που κάποιος χρησιμοποίησε ηλεκτρική ενέργεια για πρακτική πλοήγηση, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για την ηλεκτρική τεχνολογία στις μεταφορές. Το ίδιο έτος, ο καθηγητής χημείας και τεχνολογίας Sibrandus Stratingh από την Ολλανδία και ο βοηθός του Christopher Becker από τη Γερμανία

κατασκεύασαν στο Groningen ένα μικρό ηλεκτρικό αυτοκινούμενο όχημα που λειτουργούσε με μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Ο Stratingh βελτίωσε τον ηλεκτρικό κινητήρα του Moritz von Jacobi. Ο Stratingh συνειδητοποίησε ότι μπορούσε να παράγει διπλάσια ποσότητα ενέργειας με καμπυλωτούς μαγνήτες. Το αυτοκίνητο αυτό ζύγιζε περίπου τρία κιλά. Μπορούσε να κινείται για είκοσι λεπτά όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη και να μεταφέρει 1,5 κιλό.

Το 1859, ο Γάλλος εφευρέτης Gaston Planté ανέπτυξε την πρώτη πρακτική μπαταρία μολύβδου-οξέος, παρέχοντας μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας για το μέλλον των ηλεκτρικών οχημάτων. Στα τέλη του 19ου αιώνα, τα ηλεκτρικά οχήματα άρχισαν να προσελκύουν περισσότερη προσοχή. Το 1881, ο Γάλλος εφευρέτης Gustave Trouvé παρουσίασε ένα τρίτροχο EV στη Διεθνή Έκθεση Ηλεκτρισμού στο Παρίσι. Αυτή η εκδήλωση έφερε τα ηλεκτρικά οχήματα στο προσκήνιο και παρουσίασε τα πιθανά οφέλη τους έναντι των κινητήρων ατμού και βενζίνης .

Το 1884 ο Thomas Parker κατασκεύασε ένα πρακτικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο στο Wolverhampton, χρησιμοποιώντας επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που είχε σχεδιάσει ο ίδιος.[2]



**Εικόνα 2 Ένα από τα Ηλεκτρικά αυτοκίνητα του Parker**

Το 1888, ο Γάλλος εφευρέτης δημιούργησε το πρώτο τετράτροχο ηλεκτρικό αυτοκίνητο, το οποίο τράβηξε πολύ την προσοχή με τον καινοτόμο σχεδιασμό και την εξαιρετική του απόδοση. Την ίδια χρονιά, ο Γερμανός μηχανικός Andreas Flocken κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο και το δοκίμασε δημόσια στην Γερμανία.

Αυτές οι πρώτες καινοτομίες και πειράματα άνοιξαν νέες ευκαιρίες και προκλήσεις για τη βιομηχανία ηλεκτρικών οχημάτων, επιταχύνοντας την ανάπτυξή της. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα κέρδισαν γρήγορα έλξη. Το 1889, ο William Morrison κατασκεύασε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο στο Des Moines της Αϊόβα. Το αυτοκίνητό του χρησιμοποιούσε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, μπορούσε

να πάει πάνω από 20 μίλια και είχε τελική ταχύτητα 6 έως 8 μίλια την ώρα. Το αυτοκίνητο του Morrison προκάλεσε μεγάλο ενδιαφέρον και ενέπνευσε άλλους κατασκευαστές να αρχίσουν να κατασκευάζουν και ηλεκτρικά οχήματα.

Το 1895 οι Morris & Salom επινοούν ένα κομψό νέο σχέδιο, το οποίο ονομάζουν Electrobat II. Είναι ελαφρύτερο και έχει κίνηση στους μπροστινούς τροχούς με ανάρτηση σπειροειδών ελατηρίου στους πίσω τροχούς. Μαζί με το ηλεκτρικό Morrison συμμετέχει στον πρώτο αγώνα αυτοκινήτου της Αμερικής, που διεξάγεται στο Σικάγο. Το 1897, στην Αμερική και στην Βρετανία τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούνταν ως ταξί. Στο Λονδίνο τα {Walter Bersey's electric cabs}, ήταν τα πρώτα αυτοκινούμενα ταξί, όταν εκείνη την εποχή τα ταξί ήταν ιππήλατα. Στην Νέα Υόρκη, ένας στόλος 13 ηλεκτρικών ταξί, βασισμένα στο Electrobat II, ήταν μέρος ενός πρότζεκτ χρηματοδοτούμενο από την Electric Storage Battery Company of Philadelphia.[3]



Εικόνα 3 Walter Bersey's Electric Cab 1887

Στις αρχές του 20ου αιώνα, η διαδικασία αστικοποίησης οδήγησε την ευρεία αποδοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αστικές περιοχές καθώς είχαν τεράστια οφέλη λόγω αθόρυβης λειτουργίας και ευκολία χρήσης. Εταιρείες όπως η Baker Electric, η Columbia και η Detroit Electric αναδείχθηκαν ηγέτες σε αυτήν την αναδυόμενη αγορά, προωθώντας την ταχεία ανάπτυξη της βιομηχανίας ηλεκτρικών οχημάτων. Παρά την αρχική αύξηση της δημοτικότητας, τα ηλεκτρικά οχήματα άρχισαν να χάνουν έδαφος τη δεκαετία του 1920. Η γραμμή συναρμολόγησης του Henry Ford έκανε τα αυτοκίνητα που κινούνται με φυσικό αέριο, ειδικά το Model T, πολύ φθηνότερα, καθιστώντας τα προσιτά για τους απλούς ανθρώπους.[2]

Η ανακάλυψη μεγάλων αποθεμάτων πετρελαίου και καλύτερων δρόμων έκανε επίσης πιο βολικά τα αυτοκίνητα αερίου. Τα βενζινάδικα εμφανίστηκαν παντού και ο γρήγορος ανεφοδιασμός έγιναν οι μεγάλοι λόγοι για τους οποίους τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα έγιναν τόσο δημοφιλή.

Εν τω μεταξύ, η πρόοδος στην τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων επιβραδύνθηκε. Οι ηλεκτροκινητήρες παρέμειναν κυρίως σε βιομηχανικές και σιδηροδρομικές εφαρμογές όπου η ηλεκτρική ενέργεια ήταν πιο εύκολα διαθέσιμη. Ωστόσο η τεχνολογία συνέχισε να βελτιώνεται με την ανάπτυξη των ασύγχρονων κινητήρων και των συλλεκτικών DC κινητήρων.

Κατά τη δεκαετία του 1960, η ενεργειακή κρίση και οι αυξανόμενες ανησυχίες για τη ρύπανση οδήγησαν ξανά σε διαφέρον για την ηλεκτροκίνηση. Εμφανίστηκαν ερευνητικά προγράμματα στις ΗΠΑ, την Ευρώπη και την Ιαπωνία, με στόχο την ανάπτυξη αποδοτικότερων ηλεκτροκινητήρων και νέων τύπων μπαταριών. Οι ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος παρέμειναν κυρίαρχοι, αλλά άρχισαν να εμφανίζονται οι πρώτες εφαρμογές ασύγχρονων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος (AC induction motors), χάρη στη βελτίωση των ηλεκτρονικών ισχύος.

Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα μαζικής παραγωγής είναι το Enfield 8000, που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε αρχικά στο Ηνωμένο Βασίλειο τη δεκαετία του '70 και στη συνέχεια μεταφέρθηκε στην Ελλάδα, όπου παράχθηκε στη Σύρο. (Gocar.gr, 2021) Αν και υπήρξαν πρωτότυπα ηλεκτρικά οχήματα νωρίτερα, το Enfield 8000 θεωρείται το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο που μπήκε σε παραγωγή.



**Εικόνα 4. Enfield 8000 στο Χάιντ Παρκ, στο Λονδίνο**

Από τη δεκαετία του 1990 και μετά, η εξέλιξη των μετατροπέων συχνότητας (inverters) και των ημιαγωγικών στοιχείων επέτρεψε την ευρεία χρήση σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη (PMSM) και ασύγχρονων κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα. Η Tesla Motors ήδη από το 2008 με το Tesla Roadster, απέδειξε την πρακτικότητα και την υψηλή απόδοση της ηλεκτροκίνησης.[3]

## 2.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, σύμφωνα με το οποίο όταν ένα αγωγίμο στοιχείο διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο δέχεται δύναμη. Η δύναμη αυτή ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική δύναμη Lorentz, η οποία προκαλεί περιστροφή του ρότορα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ροπής.

Συγκεκριμένα, όλοι οι ηλεκτροκινητήρες ανεξάρτητα από τον τύπο τους αποτελούνται από δύο βασικά μέρη.

- Στάτης (Stator) : Το ακίνητο μέρος του κινητήρα. Περιλαμβάνει τα τυλίγματα (πηνία) ή μαγνήτες, που δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο και μετέπειτα την περιστροφή του δρομέα.
- Δρομέας (Rotor): Το κινητό μέρος που περιστρέφεται και μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική.[4]

Αυτή είναι η βασική δομή που υπάρχει σε όλους τους ηλεκτροκινητήρες. Ανάλογα με το πώς δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο και η τροφοδοσία τους υπάρχουν διαφορές στα επιμέρους μέρη και στα υλικά. Η λειτουργία ενός ηλεκτροκινητήρα βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρικού ρεύματος. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παρέχεται από τη μπαταρία ή τον μετατροπέα (inverter) τροφοδοτεί τα τυλίγματα του κινητήρα. Καθώς δημιουργείται μαγνητικό πεδίο, ο δρομέας αρχίζει να περιστρέφεται. Η ροπή που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος και της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Η διαδικασία αυτή είναι αντιστρέψιμη: όταν ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια (κατά την πέδηση ή επιβράδυνση), η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται και πάλι σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται στη μπαταρία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αναγεννητική πέδηση (regenerative braking) και συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του οχήματος.

Η ταχύτητα και η ροπή του ηλεκτροκινητήρα ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος, όπως ο μετατροπέας συχνότητας (inverter), ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) της μπαταρίας σε εναλλασσόμενο (AC) κατάλληλης συχνότητας και τάσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο ακριβής έλεγχος της περιστροφής και της απόδοσης του κινητήρα, ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες και αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση.

Τα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης κινητήρα (Motor Control Units - MCU), τα οποία ρυθμίζουν την παροχή ρεύματος ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης, τη φόρτιση της μπαταρίας και τις απαιτήσεις του οδηγού.

### **2.3 Τεχνικές απαιτήσεις**

Ο ηλεκτροκινητήρας που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά οχήματα πρέπει να ικανοποιεί ένα σύνολο προδιαγραφών ,ώστε να εξασφαλίζει την απόδοση την ασφάλεια και την αξιοπιστία .Οι απαιτήσεις αυτές σχετίζονται με την ισχύ, τη ροπή , την απόδοση ,το βάρος και την συμβατότητα με τα συστήματα ελέγχου και την πηγή ενέργειας του οχήματος.[19][20]

#### **1. Ισχύς και ροπή**

Η βασική απαίτηση ενός ηλεκτροκινητήρα για ηλεκτρικό όχημα είναι να παρέχει επαρκή ροπή και ισχύ σε όλο το φάσμα ταχυτήτων .Η ροπή πρέπει να είναι υψηλή στις χαμηλές στροφές, ώστε να εξασφαλίζεται καλή επιτάχυνση και απόκριση .Η ισχύς πρέπει να επαρκεί για την κίνηση του οχήματος σε υψηλές ταχύτητες και σε συνθήκες ανηφόρας ή πλήρους φόρτου.

#### **2. Απόδοση και ενεργειακή αποδοτικότητα**

Η ενεργειακή απόδοση αποτελεί βασικό κριτήριο για την επιλογή κινητήρα, καθώς επηρεάζει άμεσα την αυτονομία του οχήματος. Οι σύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες επιτυγχάνουν αποδόσεις άνω του 90–95%, αξιοποιώντας βελτιωμένα μαγνητικά υλικά, ανεπτυγμένους inverter και έξυπνους αλγορίθμους ελέγχου ροπής .Η ελαχιστοποίηση των απωλειών χαλκού και απωλειών σιδήρου είναι κρίσιμη για τη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα.

#### **3. Θερμική διαχείριση και ψύξη**

Η λειτουργία του κινητήρα προκαλεί θερμικές απώλειες, κυρίως λόγω της αντίστασης των τυλιγμάτων και των μαγνητικών απωλειών. Για τη διατήρηση της απόδοσης απαιτείται αποτελεσματική ψύξη, μέσω υδρόψυκτων ή αερόψυκτων συστημάτων. Η θερμοκρασία πρέπει να παραμένει σε ασφαλή επίπεδα (συνήθως κάτω από 150°C στον στάτη) ώστε να αποφευχθεί υποβάθμιση των υλικών μόνωσης.

#### **4. Βάρος και διαστάσεις**

Η πυκνότητα ισχύος (power density) αποτελεί κρίσιμο δείκτη ποιότητας. Ένας καλός ηλεκτροκινητήρας πρέπει να προσφέρει υψηλή ισχύ ανά κιλό βάρους, μειώνοντας το συνολικό βάρος του οχήματος και αυξάνοντας την αυτονομία. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ελαφρά κράματα, σύνθετα υλικά και μαγνήτες σπάνιων γαιών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας

#### **5. Έλεγχος και συμβατότητα με ηλεκτρονικά ισχύος**

Ο κινητήρας πρέπει να συνεργάζεται αρμονικά με το σύστημα ελέγχου (Motor Control Unit) και τον μετατροπέα συχνότητας (inverter), που ρυθμίζει το ρεύμα, τη συχνότητα και τη φάση του σήματος τροφοδοσίας .Η ακριβής ρύθμιση αυτών των παραμέτρων επιτρέπει την ομαλή μετάβαση ροπής λειτουργίας ανάκτησης ενέργειας (regenerative braking) ,και προστασία από υπερφόρτιση ή υπέρταση.

## 6. Ηλεκτρική ασφάλεια και κανονισμοί

Η ασφάλεια είναι θεμελιώδης προϋπόθεση σχεδίασης. Οι ηλεκτροκινητήρες πρέπει να τηρούν τα διεθνή πρότυπα ISO 6469, IEC 60034, και SAE J2344, τα οποία καθορίζουν όρια για ηλεκτρική μόνωση υψηλής τάσης, προστασία από ηλεκτροπληξία, ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC).

### 2.4 Πιο Διαδεδομένοι Κινητήρες

Στις μέρες μας υπάρχουν αρκετές επιλογές ηλεκτροκινητήρα, καθένας από τους οποίους παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά απόδοσης, κόστους και εφαρμογής. Οι πιο διαδεδομένοι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα στα ηλεκτρικά οχήματα είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM), οι επαγωγικοί κινητήρες (Induction Motor – IM), οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες συνεχούς ρεύματος (Brushless DC Motor – BLDC) και οι κινητήρες με μεταβλητή μαγνητική αντίδραση (Switched Reluctance Motor – SRM).[19]

Οι PMSM είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς λόγω της υψηλής απόδοσης, του μικρού βάρους και της εξαιρετικής πυκνότητας ισχύος, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για επιβατικά ηλεκτρικά οχήματα. Αντίθετα οι IM (επαγωγικοί κινητήρες) λειτουργούν χωρίς μόνιμους μαγνήτες, είναι πιο ανθεκτικοί και οικονομικοί, και χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρικά οχήματα υψηλών επιδόσεων, όπως αυτά της Tesla. Οι BLDC κινητήρες, που βασίζονται επίσης σε μόνιμους μαγνήτες, προσφέρουν αθόρυβη λειτουργία, υψηλή απόδοση και μικρές ανάγκες συντήρησης, κάτι που τους καθιστά κατάλληλους για μικρότερα ηλεκτρικά οχήματα και υβριδικά συστήματα. Τέλος, οι SRM κινητήρες, αν και λιγότερο διαδεδομένοι σήμερα, παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον λόγω της απλής κατασκευής, της μεγάλης ανθεκτικότητας και της δυνατότητας λειτουργίας χωρίς μαγνήτες σπάνιων γαιών, χαρακτηριστικό που μειώνει το κόστος και εξαρτήσεις από πρώτες ύλες.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου κινητήρα εξαρτάται από τις τεχνικές απαιτήσεις του οχήματος, όπως η επιθυμητή ισχύς, η ροπή, η απόδοση και το κόστος παραγωγής. Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστεί αναλυτικά η αρχή λειτουργίας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τύπου.[20]

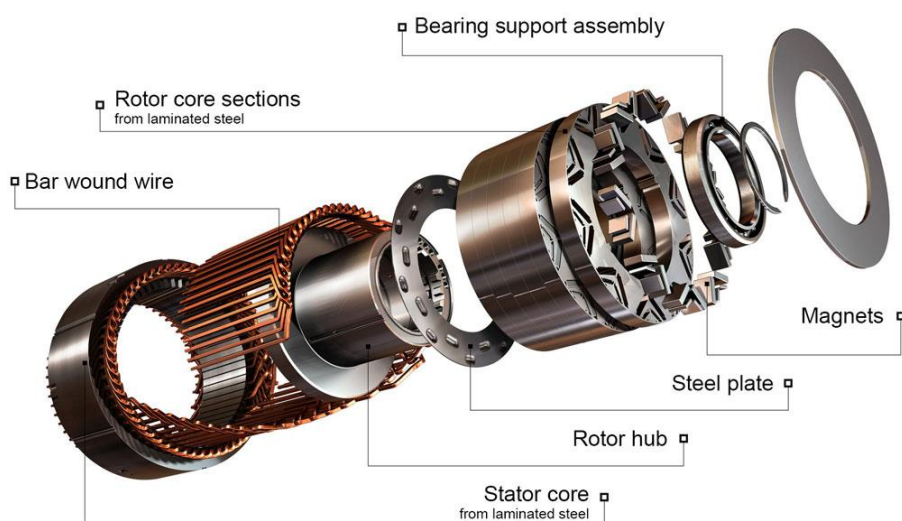
## 3<sup>ο</sup> Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη (PMSM)

### 3.1 Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη

Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor PMSM) αποτελεί έναν από τους πιο αποδοτικούς και ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους ηλεκτρικών κινητήρων στη σύγχρονη τεχνολογία. Πρόκειται για ηλεκτρικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, στους οποίους ο ρότορας φέρει μόνιμους μαγνήτες αντί για περιελίξεις διέγερσης, όπως στους συμβατικούς σύγχρονους κινητήρες. Οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με το περιστρεφόμενο πεδίο του στάτη, οδηγώντας τον κινητήρα σε συγχρονισμένη περιστροφή χωρίς ολίσθηση.[14]

Παρόλο που όλοι οι PMSM βασίζονται στην ίδια θεμελιώδη αρχή – την αλληλεπίδραση του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη με το σταθερό πεδίο των μόνιμων μαγνητών του ρότορα – υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στη μηχανική δομή του ρότορα και κατά συνέπεια στη μαγνητική συμπεριφορά και την παραγωγή ροπής.

Ανάλογα με τη θέση και τη διάταξη των μόνιμων μαγνητών, οι PMSM διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους Surface-Mounted PMSM (SPMSM), όπου οι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του ρότορα, και τους Interior PMSM (IPMSM), όπου οι μαγνήτες ενσωματώνονται στο εσωτερικό του ρότορα. Και οι δύο τύποι μοιράζονται κοινά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, όπως τριφασικό τύλιγμα στάτη, λειτουργία σε συγχρονική ταχύτητα και δυνατότητα ελέγχου μέσω μετατροπέων συχνότητας (inverters). Ωστόσο, η διαφορετική τοποθέτηση των μαγνητών καθορίζει τη μορφή του μαγνητικού πεδίου, τη ροπή, την ενεργειακή απόδοση και τη συμπεριφορά του κινητήρα στις υψηλές ταχύτητες.[8]



Εικόνα 5 Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

## 3.2 Surface-Mounted PMSM (SPMSM)

### 3.2.1 Αρχή λειτουργίας

Ο κινητήρας SPMSM λειτουργεί ως σύγχρονος κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι ίση με την ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη. Στον στάτη υπάρχουν τριφασικά τυλίγματα, τα οποία τροφοδοτούνται από έναν αντιστροφέα που δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ο ρότορας φέρει μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους στην επιφάνειά του, με τους μαγνητικούς πόλους του να ευθυγραμμίζονται με το πεδίο του στάτη. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του πεδίου των μαγνητών και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του στάτη δημιουργεί ροπή συγχρονισμού, που αναγκάζει τον ρότορα να περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. [8]

Σε αντίθεση με τον IPMSM, ο SPMSM δεν εκμεταλλεύεται ροπή εξ αναγκασμού, καθώς ο ρότοράς του είναι μαγνητικά συμμετρικός (ισοτροπικός). Αυτό καθιστά τον κινητήρα απλούστερο στον έλεγχο και ιδανικό για εφαρμογές ακριβείας, όπου απαιτείται σταθερή ροπή και ομαλή περιστροφή χωρίς διακυμάνσεις. Παράλληλα, ο SPMSM παρουσιάζει υψηλό βαθμό απόδοσης, ειδικά σε χαμηλές και μέσες στροφές, λόγω της απουσίας απωλειών διέγερσης. Ωστόσο, η αδυναμία εξασθένισης πεδίου περιορίζει τη λειτουργία του σε υψηλές ταχύτητες, καθιστώντας τον λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλο εύρος ταχυτήτων λειτουργίας.

### 3.2.2 Κατασκευή

Η κατασκευή του SPMSM χαρακτηρίζεται από απλότητα και ακρίβεια, καθώς οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι απευθείας στην επιφάνεια του ρότορα. Συνήθως χρησιμοποιούνται μαγνήτες νεοδυμίο-σιδήρου-βορίου (NdFeB), οι οποίοι προσφέρουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο με μικρό όγκο. Οι μαγνήτες είναι στερεωμένοι πάνω σε κυλινδρικό χαλύβδινο πυρήνα με κόλληση, βίδωμα ή δακτύλιο συγκράτησης (retaining sleeve) από ανθρακονήματα ή ατσάλι, ώστε να αντέχουν τις φυγόκεντρες δυνάμεις σε υψηλές ταχύτητες.

Ο ρότορας περιστρέφεται μέσα στον στάτη, ο οποίος αποτελείται από στοιβαγμένα φύλλα πυριτιούχου χάλυβα με εγκοπές για την τοποθέτηση τριφασικών τυλιγμάτων. Τα τυλίγματα αυτά, όταν διεγείρονται από τον αντιστροφέα, δημιουργούν περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που αλληλεπιδρά με το πεδίο των μαγνητών του ρότορα. Η διάταξη αυτή επιτρέπει πολύ χαμηλή ροπή κυμάτωσης (torque ripple) και ελάχιστο θόρυβο λειτουργίας. Επιπλέον, η τοποθέτηση των μαγνητών στην επιφάνεια εξασφαλίζει άμεση και αποτελεσματική ψύξη, ενώ η απουσία σύνθετων μηχανικών μερών μειώνει το κόστος παραγωγής και απλοποιεί τη συντήρηση.

Ο SPMSM επομένως συνδυάζει υψηλή απόδοση, χαμηλό κόστος και σταθερή λειτουργία, καθιστώντας τον κατάλληλο για ρομποτικά συστήματα, σερβομηχανισμούς, ανεμιστήρες, αντλίες και οχήματα μικρής ισχύος, όπου η ακρίβεια και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες παράμετροι.[10]

### 3.3 Interior PMSM (IPMSM)

#### 3.3.1 Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία του κινητήρα IPMSM βασίζεται στη σύγχρονη περιστροφή του ρότορα σε σχέση με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Ο στάτης διαθέτει τριφασικά τυλίγματα, τα οποία τροφοδοτούνται από αντιστροφέα (inverter) που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας σε τριφασική εναλλασσόμενη τάση. Η εναλλαγή αυτή δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που κινείται με τη λεγόμενη σύγχρονη ταχύτητα. Ο ρότορας, στον οποίο οι μόνιμοι μαγνήτες είναι ενσωματωμένοι στο εσωτερικό του πυρήνα, ευθυγραμμίζεται με αυτό το πεδίο λόγω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων έλξης μεταξύ των αντίθετων πόλων.

Η ιδιαιτερότητα του IPMSM είναι ότι, πέρα από τη ροπή μαγνητικού συγχρονισμού, παράγεται και ροπή εξ αναγκασμού (reluctance torque) εξαιτίας της ανισοτροπίας του ρότορα — δηλαδή της διαφοράς στη μαγνητική διαπερατότητα μεταξύ των αξόνων d (άξονας μαγνήτη) και q (ορθογώνιος άξονας). Η συνολική ροπή του κινητήρα είναι το άθροισμα της ροπής μόνιμου μαγνήτη και της ροπής εξ αναγκασμού, γεγονός που προσδίδει στον IPMSM μεγαλύτερη ροπή ανά ampere, υψηλότερη απόδοση και ευρύτερο φάσμα λειτουργίας σε σχέση με άλλους σύγχρονους κινητήρες. Επίσης, μέσω ελέγχου εξασθένησης μαγνητικού πεδίου (field weakening control), ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά και σε υψηλές στροφές, επιτυγχάνοντας ομαλή μετάβαση από ροπή εκκίνησης σε λειτουργία σταθερής ισχύος.[20]

#### 3.3.2 Κατασκευή

Ο κινητήρας Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) διακρίνεται από τη δομική ενσωμάτωση των μόνιμων μαγνητών στο εσωτερικό του ρότορα, γεγονός που τον διαφοροποιεί ουσιαστικά από τον επιφανειακό τύπο (SPMSM). Ο ρότορας του IPM αποτελείται από στρώσεις σιδηρομαγνητικού υλικού (συνήθως πυριτιούχου χάλυβα), οι οποίες φέρουν εγκοπές ή κοιλότητες ειδικά σχεδιασμένες για την τοποθέτηση των μαγνητών τύπου NdFeB (νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου) ή SmCo (σαμαρίου-κοβαλτίου). Οι μαγνήτες αυτοί τοποθετούνται μεταξύ των στρωμάτων του πυρήνα, δημιουργώντας διαδρομές μαγνητικής ροής που επιτρέπουν την εκμετάλλευση τόσο της μαγνητικής ροπής όσο και της ροπής εξ αναγκασμού που προκύπτει από την ανισοτροπία του ρότορα (διαφορά στη μαγνητική αντίσταση μεταξύ των αξόνων d και q).

Η σχεδίαση των θυλάκων των μαγνητών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή και επιδιώκει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ροπής, ταχύτητας και μηχανικής αντοχής. Υπάρχουν διαμορφώσεις με V-σχήμα, U-σχήμα ή πολλαπλά στρώματα μαγνητών, που βελτιώνουν την κατανομή της μαγνητικής ροής και αυξάνουν τη ροπή εκκίνησης.

Η μηχανική αντοχή του IPM είναι υψηλότερη από εκείνη του SPMSM, καθώς οι μαγνήτες βρίσκονται προστατευμένοι στο εσωτερικό του ρότορα, μειώνοντας τους φυγόκεντρους κινδύνους σε υψηλές στροφές. Επιπλέον, η τοποθέτηση των μαγνητών σε εσωτερικά κανάλια επιτρέπει τη βελτιωμένη ψύξη και την ανθεκτικότητα σε απομαγνήτιση, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του κινητήρα.

Ο στάτης του IPMSM είναι όμοιος με εκείνον ενός συμβατικού PMSM και φέρει εγκοπές στις οποίες τοποθετούνται τα τριφασικά τυλίγματα, που τροφοδοτούνται από αντιστροφή (inverter) για τη δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Η αλληλεπίδραση αυτού του πεδίου με εκείνο των εσωτερικών μαγνητών προκαλεί τη σύγχρονη περιστροφή του ρότορα, ενώ η ανισοτροπία του ρότορα προσθέτει ένα επιπλέον συνθετικό συνιστώσα ροπής, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει στον IPMSM να λειτουργεί αποδοτικά σε ευρύ φάσμα ταχυτήτων, με δυνατότητα εξασθένησης πεδίου (field weakening), κάτι που αποτελεί κρίσιμο πλεονέκτημα σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων υψηλής απόδοσης.[12]

### 3.4 Εφαρμογές σε Οχήματα

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη τύπου Surface-Mounted (SPMSM) και Interior (IPMSM) χρησιμοποιούνται ευρέως στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία, με κάθε τύπο να εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες σχεδίασης και λειτουργίας. Οι SPMSM συναντώνται κυρίως σε οχήματα μικρότερης ισχύος ή αστικής μετακίνησης, όπως ηλεκτρικά σκούτερ, μοτοποδήλατα, μικρά ηλεκτρικά αυτοκίνητα πόλης και plug-in υβριδικά οχήματα, όπου προέχει η υψηλή απόδοση, η χαμηλή πολυπλοκότητα και η σταθερή λειτουργία σε περιορισμένο εύρος ταχυτήτων.


Αντίθετα, οι IPMSM χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά και υβριδικά επιβατικά οχήματα μεγάλης ισχύος, όπως τα Toyota Prius, Nissan Leaf, Hyundai Ioniq, Kia EV6, BMW i3 και Tesla Model 3, καθώς προσφέρουν ευρύ φάσμα λειτουργίας, μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης και αποδοτική λειτουργία σε υψηλές στροφές, κάτι που τους καθιστά κατάλληλους για δυναμική οδήγηση και ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση.[19][20]

### 3.5 Χαρακτηριστικά

Ο Surface-Mounted PMSM (SPMSM) υπερέχει λόγω της απλής κατασκευής, της υψηλής ενεργειακής απόδοσης, της αθόρυβης λειτουργίας και της εύκολης ψύξης των μαγνητών. Επιπλέον, παρουσιάζει πολύ χαμηλή κυμάτωση ροπής (torque ripple) και γραμμική συμπεριφορά μεταξύ ρεύματος και ροπής, διευκολύνοντας τον έλεγχο. Ωστόσο, μειονεκτεί στη μηχανική αντοχή των μαγνητών σε υψηλές ταχύτητες, καθώς και στην περιορισμένη δυνατότητα εξασθένησης ροής, γεγονός που καθιστά δυσκολότερη τη λειτουργία σε μεγάλα φάσματα στροφών.

Ο Interior PMSM (IPMSM) προσφέρει υψηλότερη πυκνότητα ροπής, ευρύτερη περιοχή λειτουργίας, και αυξημένη αντοχή σε υψηλές ταχύτητες, ενώ η συνεισφορά της ροπής εξ αναγκασμού ενισχύει σημαντικά την αποδοτικότητα. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, ο IPMSM είναι πιο πολύπλοκος και δαπανηρός στην κατασκευή, απαιτεί προσεκτικό έλεγχο μαγνητικής ροής και διαθέτει μεγαλύτερο βάρος λόγω του πρόσθετου σιδηρομαγνητικού υλικού του ρότορα.

<u>Χαρακτηριστικό</u>	<u>(SPMSM)</u>	<u>(IPMSM)</u>
<b>Θέση μαγνητών</b>	Επάνω στην επιφάνεια του ρότορα	Ενσωματωμένοι στο εσωτερικό του ρότορα
<b>Παραγωγή ροπής</b>	Μόνο μαγνητική ροπή	Μαγνητική + ροπή εξ αναγκασμού
<b>Ανισοτροπία ρότορα</b>	Ομοιογενής (καμία)	Παρούσα (διαφορά d-q αξόνων)
<b>Μηχανική αντοχή</b>	Περιορισμένη σε υψηλές στροφές	Πολύ υψηλή
<b>Περιοχή λειτουργίας</b>	Στενή (σταθερή ταχύτητα)	Ευρεία (με εξασθένιση ροής)
<b>Ροπή ανά ampere</b>	Μέτρια	Υψηλή
<b>Απλότητα κατασκευής</b>	Πολύ απλή	Πιο σύνθετη
<b>Κόστος κατασκευής</b>	Χαμηλό	Υψηλότερο
<b>Απόδοση</b>	Πολύ υψηλή στις χαμηλές στροφές	Υψηλή σε όλο το φάσμα ταχυτήτων
<b>Τυπικές εφαρμογές</b>	Ρομποτική, σερβοκινητήρες, μικρά EV	Ηλεκτρικά/υβριδικά αυτοκίνητα, αντλίες, ανελκυστήρες

 Permanent magnets



Εικόνα 6.

Interior PMSM

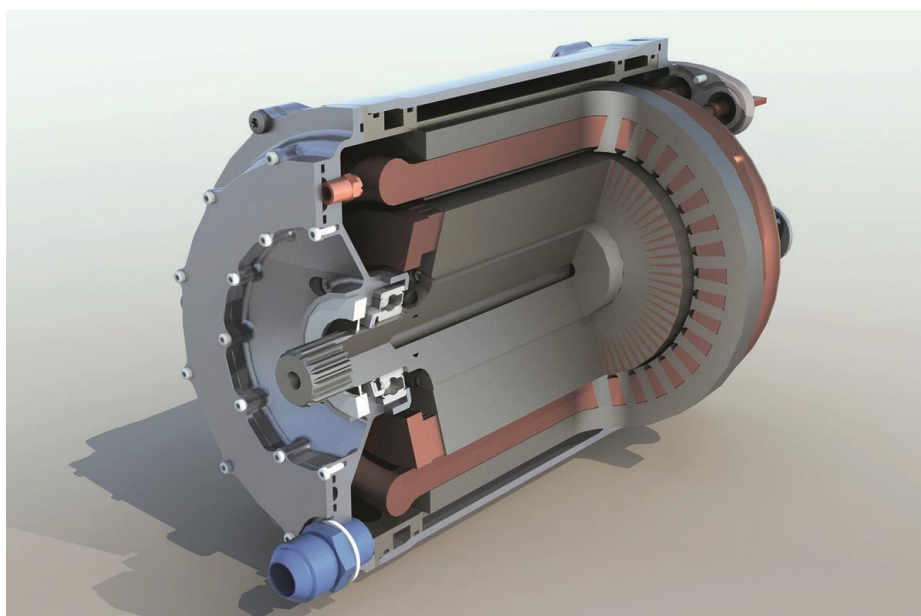


Surface PMSM

## 4° Επαγωγικός Κινητήρας (IM)

### 4.1 Επαγωγικός Κινητήρας (IM)

Ο επαγωγικός κινητήρας (Induction Motor – IM) αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους τύπους ηλεκτρικών κινητήρων στη βιομηχανία και στα ηλεκτρικά οχήματα, λόγω της απλής κατασκευής του, της αξιοπιστίας και του χαμηλού κόστους συντήρησης. Χρησιμοποιείται ευρέως σε αντλίες, ανεμιστήρες, μηχανές παραγωγής, αλλά και σε σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ροπή και αντοχή. Ο κινητήρας αυτός λειτουργεί βάσει της αρχής της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η διαφορά του με τους άλλους κινητήρες, όπως οι σύγχρονοι (PMSM), είναι ότι ο επαγωγικός κινητήρας δεν διαθέτει μόνιμους μαγνήτες, η ροπή του παράγεται από την αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του στάτη με τα επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα.[6]



Εικόνα 7 AC Induction Motor

#### 4.1.1 Αρχές λειτουργίας

Το ηλεκτρικό ρεύμα στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα προέρχεται από την μπαταρία. Επειδή η μπαταρία παρέχει συνεχές ρεύμα χρειαζόμαστε έναν μετατροπέα η αλλιώς όπως συνηθίζουμε να το λέμε έναν inverter για να το μετατρέψει σε εναλλασσόμενο ρεύμα για να λειτουργήσει ο ασύγχρονος κινητήρας. Ο οδηγός ελέγχει την ταχύτητα του αυτοκινήτου πατώντας το πεντάλ του γκαζιού, το οποίο στέλνει σήμα στον inverter για να ρυθμίσει τη συχνότητα του ρεύματος που δίνει στον κινητήρα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα από τον inverter τροφοδοτεί τα τυλίγματα του στάτη (το σταθερό μέρος του κινητήρα). Στους ασύγχρονους κινητήρες των EV, τα τυλίγματα είναι συνήθως τριφασικά, δηλαδή υπάρχουν τρία σετ τυλιγμάτων. Όταν το ρεύμα περνάει από αυτά τα τυλίγματα, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο που περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, τη λεγόμενη σύγχρονη ταχύτητα.[4][6]

Καθώς το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη περνά μέσα από τον δρομέα, προκαλείται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, που δημιουργεί ρεύμα στους αγωγούς του δρομέα.

Το ρεύμα που παράγεται στον δρομέα δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη παράγει μια δύναμη που δημιουργεί ροπή, ωθώντας τον δρομέα να περιστραφεί. Η ροπή αυτή, με τη σειρά της, κινεί τους τροχούς του αυτοκινήτου. Ο δρομέας περιστρέφεται πάντα λίγο πιο αργά από το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Αυτή η διαφορά ταχύτητας ονομάζεται ολίσθηση και είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του κινητήρα. Η ταχύτητα του κινητήρα, και άρα του αυτοκινήτου, ελέγχεται από τον inverter, ο οποίος μεταβάλλει τη συχνότητα του ρεύματος που δίνεται στον στάτη.

Κατά το φρενάρισμα ή την επιβράδυνση, ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει αντίστροφα, σαν γεννήτρια. Σε αυτή την περίπτωση, οι τροχοί περιστρέφουν τον δρομέα, ο οποίος, μέσω της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό το ρεύμα επιστρέφει στην μπαταρία, φορτίζοντάς την. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως αναγεννητική πέδηση. [6][20]

### 4.2 Κατασκευή

Ο επαγωγικός κινητήρας αποτελείται κυρίως από δύο βασικά μέρη: τον στάτη και τον δρομέα, τα οποία είναι τοποθετημένα ομόκεντρα και χωρίζονται από ένα μικρό κενό αέρα, γνωστό ως διάκενο.

Ο στάτης είναι το ακίνητο τμήμα του κινητήρα και αποτελείται από έναν κυλινδρικό πυρήνα από λεπτές ελασματοποιημένες χαλύβδινες πλάκες που μειώνουν τις απώλειες δινορρευμάτων. Στον πυρήνα του στάτη υπάρχουν αυλακώσεις όπου τοποθετούνται τα τριφασικά τυλίγματα από χάλκινο σύρμα, τα οποία συνδέονται συνήθως σε αστέρα ή τρίγωνο ανάλογα με την επιθυμητή τάση λειτουργίας. Όταν τροφοδοτηθεί με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, ο στάτης δημιουργεί το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που είναι υπεύθυνο για την έναρξη της περιστροφής. Ο δρομέας είναι το περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα και βρίσκεται στο εσωτερικό του στάτη. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι δρομέα, του squirrel cage rotor και του wound rotor.

#### **Δρομέας κλωβού (squirrel cage rotor):**

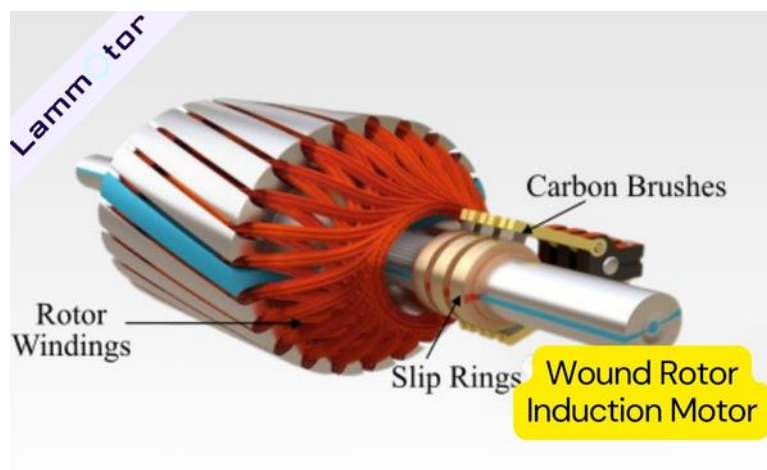
Ο ρότορας του κινητήρα κλωβού σκίουρου είναι εξαιρετικά απλός και στιβαρός στην κατασκευή του. Ο πυρήνας ρότορα αποτελείται από ελασματοποιημένο χάλυβα (για μείωση των απωλειών δινορρευμάτων) σε κυλινδρικό σχήμα, οι αγωγοί ρότορα δεν διαθέτουν τυλιγμένες περιελίξεις σύρματος. Αντίθετα, φέρει χοντρές ράβδους αγωγού (συνήθως χαλκού ή αλουμινίου) που είναι ενσωματωμένες (χυτές ή πρεσαριστές) στις υποδοχές (σχισμές) του πυρήνα. Και στις δύο άκρες του ρότορα, αυτές οι ράβδοι βραχυκυκλώνονται μόνιμα από δύο χοντρούς αγωγίσιμους δακτυλίους (τελικοί δακτύλιοι). Συχνά, οι ράβδοι είναι ελαφρώς λοξές (κλινόμενες) σε σχέση με τον άξονα του ρότορα για να μειωθεί ο θόρυβος και να αποφευχθεί το "μαγνητικό κλείδωμα" με τον στάτη.



Εικόνα 8 Παράδειγμα Δρομέα Κλώβου

### Δρομέας Ολίσθησης (Slip Ring Motor or wound rotor)

Ο ρότορας δακτυλίου ολίσθησης έχει πιο σύνθετη και περίπλοκη κατασκευή. Ομοίως με τον κλωβό σκίουρου, έχει ελασματοποιημένο πυρήνα. Αντί για ράβδους, ο ρότορας διαθέτει τριφασική περιέλιξη τυλιγμένη με μονωμένο χάλκινο σύρμα, παρόμοια με την περιέλιξη του στάτη. Οι περιελίξεις συνήθως συνδέονται σε διάταξη αστέρα. Τα τρία άκρα (ή τα τρία σημεία σύνδεσης, αν είναι συνδεδεμένα σε αστέρα) της περιέλιξης του ρότορα συνδέονται με τρεις αγώγιμους δακτυλίους, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στον άξονα περιστροφής και περιστρέφονται μαζί του. Σταθερές ψήκτρες από άνθρακα εφάπτονται συνεχώς στους περιστρεφόμενους δακτυλίους ολίσθησης. Αυτές οι ψήκτρες επιτρέπουν τη σύνδεση του κυκλώματος του ρότορα με ένα εξωτερικό κύκλωμα αντίστασης. Αυτό το εξωτερικό κύκλωμα μπορεί να μεταβληθεί ή να αφαιρεθεί τελείως μετά την εκκίνηση, επιτρέποντας τον έλεγχο των χαρακτηριστικών του κινητήρα (ροπή, ρεύμα εκκίνησης).



Εικόνα 9 Παράδειγμα Δρομέα Ολίσθησης

Ο άξονας του δρομέα συνδέεται με το μηχανικό φορτίο μέσω ρουλεμάν που εξασφαλίζουν ομαλή περιστροφή και μειώνουν τις τριβές. Το περίβλημα του κινητήρα είναι συνήθως από χυτοσίδηρο ή αλουμίνιο και περιλαμβάνει ανεμιστήρα για ψύξη, καθώς η λειτουργία προκαλεί θερμότητα. Η κατασκευή του επαγωγικού κινητήρα συνδυάζει μηχανική αντοχή, ηλεκτρική αποδοτικότητα και θερμική σταθερότητα, καθιστώντας τον έναν από τους πιο ανθεκτικούς και αξιόπιστους ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται τόσο στη βιομηχανία όσο και στα ηλεκτρικά οχήματα.[6][15]

### 4.3 Χαρακτηριστικά

Ο επαγωγικός κινητήρας διαθέτει ορισμένα χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση. Ξεχωρίζει για την απλή και στιβαρή κατασκευή του, η οποία δεν περιλαμβάνει μόνιμους μαγνήτες, μειώνοντας έτσι το κόστος και την ανάγκη για υλικά σπάνιων γαιών. Παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία, αντοχή σε θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, προσφέρει ομαλή ροπή εκκίνησης, καλή δυναμική απόκριση και ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, όπως inverter μεταβλητής συχνότητας.

Παρά τα σημαντικά του πλεονεκτήματα, ο επαγωγικός κινητήρας παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Η απόδοσή του είναι μικρότερη σε χαμηλές ταχύτητες σε σύγκριση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PMSM), ενώ απαιτεί πιο πολύπλοκο και ακριβό σύστημα ελέγχου για τη ρύθμιση της ταχύτητας και της ροπής. Επιπλέον, κατά τη λειτουργία του παράγεται θερμότητα στον δρομέα, η οποία πρέπει να απομακρύνεται αποτελεσματικά για να μην μειώνεται η συνολική του απόδοση.

Συνολικά, ο επαγωγικός κινητήρας χαρακτηρίζεται από γραμμική σχέση ροπής-ολίσθησης, υψηλή ροπή εκκίνησης, σταθερή λειτουργία σε μεγάλο εύρος στροφών και ικανότητα ανάκτησης ενέργειας κατά την επιβράδυνση. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με την αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος λειτουργίας του, τον καθιστούν ιδιαίτερα ανταγωνιστικό για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα και βιομηχανικές εφαρμογές.[9]

### 4.4 Εφαρμογές

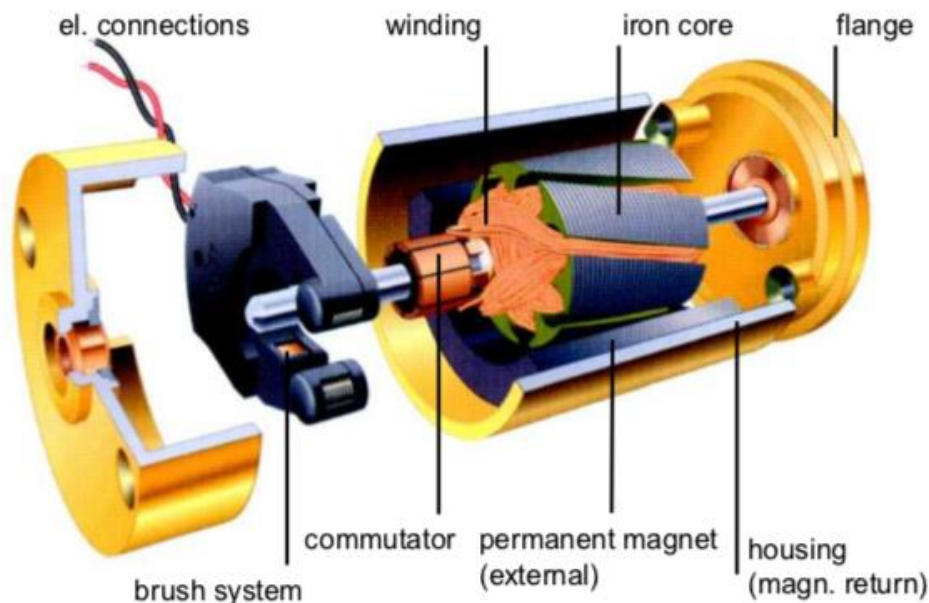
Ο επαγωγικός κινητήρας έχει βρει σημαντική εφαρμογή στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, κυρίως λόγω της αξιοπιστίας, της στιβαρής κατασκευής και του χαμηλού κόστους του σε σχέση με τους κινητήρες μόνιμων μαγνητών. Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα είναι η Tesla, η οποία χρησιμοποίησε επαγωγικούς κινητήρες στα πρώτα της μοντέλα (όπως το Model S και Model X) εξαιτίας της ικανότητάς τους να λειτουργούν αποτελεσματικά σε ένα ευρύ φάσμα στροφών και φορτίων χωρίς την ανάγκη μόνιμων μαγνητών από σπάνιες γαίες. Οι επαγωγικοί κινητήρες επιτρέπουν υψηλή απόδοση, ροπή εκκίνησης και ταχύτητα μέσω ελέγχου μεταβλητής συχνότητας (inverter), ενώ αντέχουν σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για την οδήγηση σε απαιτητικές συνθήκες.

Επιπλέον, λόγω της αντοχής τους σε υπερφόρτιση και των χαμηλών απαιτήσεων συντήρησης, χρησιμοποιούνται συχνά σε οχήματα βαρέως τύπου, λεωφορεία και φορτηγά, όπου η αξιοπιστία είναι κρίσιμη.[3][5]

## 5° Ηλεκτροκινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Ψήκτρες ( BLDC)

Ο Ασύρματος Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος ή κινητήρας BLDC (Brushless Direct Current Motor) αποτελεί έναν από τους πλέον εξελιγμένους τύπους ηλεκτρικών κινητήρων που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Η ανάπτυξη του προήλθε από την ανάγκη βελτίωσης των παραδοσιακών κινητήρων συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι, παρότι προσέφεραν καλή ρύθμιση ταχύτητας και υψηλή ροπή εκκίνησης, εμφάνιζαν σημαντικά μειονεκτήματα όπως η φθορά των ψηκτρών, οι σπινθήρες και η ανάγκη συχνής συντήρησης. Ο BLDC κινητήρας, καταργώντας πλήρως τις ψήκτρες και τον μηχανικό συλλέκτη, χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό έλεγχο για την τροφοδοσία των πηνίων του στάτη και την εναλλαγή των φάσεων, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλή αξιοπιστία, μεγάλη διάρκεια ζωής και πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση.

Η ευρεία χρήση των BLDC κινητήρων οφείλεται στην ικανότητά τους να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των κινητήρων συνεχούς ρεύματος (όπως ο ακριβής έλεγχος ταχύτητας και ροπής) με την απλότητα και την αποδοτικότητα των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Επιπλέον, η λειτουργία τους είναι αθόρυβη, οι απώλειες λόγω τριβής είναι ελάχιστες και η συμπεριφορά τους σε μεταβατικά φαινόμενα είναι ιδιαίτερα ομαλή. Χάρη σε αυτά τα χαρακτηριστικά, οι BLDC κινητήρες έχουν καθιερωθεί σε κρίσιμες εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια, χαμηλή συντήρηση και ενεργειακή αποδοτικότητα, όπως στα ηλεκτρικά οχήματα, στη ρομποτική, στα drones και στις βιομηχανικές αυτοματοποιήσεις.[11]



Εικόνα 10 Ηλεκτροκινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Ψήκτρες ( BLDC)

## 5.1 Αρχή Λειτουργίας BLDC

Η λειτουργία του BLDC κινητήρα βασίζεται στις αρχές ηλεκτρομαγνητισμού με συνδυασμό τον ηλεκτρονικού ελέγχου. Ουσιαστικά, ο κινητήρας αυτός μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική μέσω της αλληλεπίδρασης ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου, που προέρχεται από τους μόνιμους μαγνήτες του ρότορα, και ενός περιστρεφόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το οποίο δημιουργείται από τα πηνία του στάτη. ακολουθώντας τις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού

Σε έναν παραδοσιακό κινητήρα συνεχούς ρεύματος, η εναλλαγή της πολικότητας στα τυλίγματα πραγματοποιείται μηχανικά μέσω ψηκτρών και συλλέκτη. Στον BLDC, όμως, η διαδικασία αυτή εκτελείται ηλεκτρονικά μέσω ενός μετατροπέα (inverter) που ελέγχει τη διαδοχή της τροφοδοσίας των φάσεων του στάτη. Ο μετατροπέας λαμβάνει συνεχές ρεύμα από την πηγή τροφοδοσίας και το μετατρέπει σε εναλλασσόμενα παλμικά σήματα κατάλληλης ακολουθίας, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ισχύος (τρανζίστορ, MOSFETs). Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα τεχνητό, τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), το οποίο προσομοιάζει ένα ημιτονοειδές κύμα (ή τετραγωνικό κύμα, ανάλογα με τον έλεγχο) μέσα στις περιελίξεις.

Καθώς το πεδίο αυτό μεταβάλλεται, οι πόλοι του ρότορα (οι μόνιμοι μαγνήτες) έλκονται και απωθούνται συνεχώς. Αυτή η αλληλεπίδραση δημιουργεί μια δύναμη (δύναμη Laplace) και μια ροπή που αναγκάζει τον ρότορα να περιστραφεί για να ευθυγραμμιστεί με το πεδίο του στάτη προκαλώντας τη συνεχή περιστροφή του. Ο συγχρονισμός των παλμών και η γωνιακή θέση του ρότορα ανιχνεύονται με αισθητήρες Hall, που είναι τοποθετημένοι γύρω από τον στάτη και ενημερώνουν τον ελεγκτή για τη θέση του ρότορα ανά πάσα στιγμή. Με βάση αυτά τα δεδομένα, ο ελεγκτής προσαρμόζει άμεσα τη φάση του ρεύματος στα πηνία, διασφαλίζοντας συνεχή και ομαλή ροπή χωρίς διακοπές.

Στους πιο σύγχρονους κινητήρες εφαρμόζεται έλεγχος χωρίς αισθητήρες (sensorless control), όπου η θέση του ρότορα υπολογίζεται μέσω της επαγόμενης τάσης στα πηνία, μειώνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα. Η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της συχνότητας των ηλεκτρονικών παλμών, ενώ η ροπή εξαρτάται από το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα

Στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, η μηχανική ενέργεια που παράγεται από τον BLDC κινητήρα μεταδίδεται στους τροχούς μέσω ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης. Ο άξονας εξόδου του κινητήρα συνδέεται είτε άμεσα με τους τροχούς είτε μέσω κιβωτίου ταχυτήτων ή διαφορικού, ανάλογα με τον σχεδιασμό του οχήματος. Ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα, και επομένως της κίνησης του οχήματος, πραγματοποιείται μέσω της ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας του ρεύματος που αποστέλλεται από τον ελεγκτή στις περιελίξεις του στάτη. Όταν αυξάνεται η συχνότητα των παλμών, το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται γρηγορότερα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα. Ομοίως, με τη μείωση της συχνότητας, μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής, επιτρέποντας ακριβή έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής του κινητήρα.

Τέλος, κατά την επιβράδυνση ή το φρενάρισμα, ο BLDC κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει ως γεννήτρια (αναγεννητική πέδηση), μετατρέποντας μέρος της κινητικής ενέργειας των τροχών ξανά σε ηλεκτρική και επιστρέφοντάς την στη μπαταρία. Αυτό συμβάλλει στη σημαντική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και στην αύξηση της αυτονομίας του οχήματος.[11][16]

## 5.2 Κατασκευή

Η κατασκευή του BLDC κινητήρα είναι ιδιαίτερα προσεγμένη, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ενεργειακή απόδοση και αξιοπιστία. Ο κινητήρας αποτελείται από δύο κύρια μέρη: τον στάτη και τον ρότορα όπως και στα προηγούμενα .

Ο στάτης κατασκευάζεται από ελασματοποιημένο χάλυβα (steel laminations), ο οποίος βοηθά στη μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω δινορρευμάτων, είναι το σταθερό μέρος του κινητήρα και περιλαμβάνει πολυφασικά τυλίγματα (συνήθως τριφασικά), τα οποία είναι τοποθετημένα σε ειδικές αυλακώσεις του πυρήνα από μονωμένο χαλκό. Τα τυλίγματα συνδέονται με την σειρά τους με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα.

Ο ρότορας είναι το κινούμενο τμήμα του κινητήρα και φέρει μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι σχηματίζουν τους δυο πόλους ,αυτό σχηματίζει και την μεγάλη διαφορά από τους κινητήρες με ψύκτρες. Στην επιφάνεια ή εντός του πυρήνα του ρότορα, ενσωματώνονται ισχυροί μόνιμοι μαγνήτες (Permanent Magnets). Για υψηλή απόδοση, χρησιμοποιούνται συχνά μαγνήτες σπάνιων γαιών (όπως NdFeB - Νεοδύμιο, Σίδηρος, Βόριο), ένα υλικό που προσφέρει εξαιρετικά ισχυρό μαγνητικό πεδίο με μικρό βάρος και όγκο.

Δεν υπάρχουν περιελίξεις, συλλέκτης (commutator) ή ψύκτρες στον ρότορα του BLDC, εξαλείφοντας έτσι τη μηχανική τριβή και τη φθορά. Ανάλογα με τη διάταξη των μαγνητών, διακρίνονται δύο βασικοί τύποι BLDC κινητήρων. Επιφανειακής τοποθέτησης μαγνητών (Surface-Mounted BLDC), όπου οι μαγνήτες είναι κολλημένοι στην επιφάνεια του ρότορα και Εσωτερικής τοποθέτησης μαγνητών (Interior BLDC), όπου οι μαγνήτες είναι ενσωματωμένοι στο εσωτερικό του ρότορα, προσφέροντας μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και καλύτερη κατανομή ροπής.

Για την παρακολούθηση της θέσης του ρότορα, χρησιμοποιούνται αισθητήρες Hall ή οπτικοί αισθητήρες, πρόκειται για μικρές ηλεκτρονικές συσκευές τοποθετημένες με ακρίβεια γύρω από τον στάτη (ή στο άκρο του στάτη), σε συγκεκριμένες γωνιακές θέσεις ενώ σε κάποιες εφαρμογές προτιμάται ο sensorless έλεγχος. Όλα τα μέρη στεγάζονται σε ένα ανθεκτικό μεταλλικό περίβλημα συνήθως από αλουμίνιο ή χάλυβα, το οποίο προστατεύει τον κινητήρα από εξωτερικούς παράγοντες και βοηθά στη θερμική απαγωγή. Σε πολλές περιπτώσεις ενσωματώνεται και σύστημα ψύξης (αερόψυκτο ή υδρόψυκτο) για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε ασφαλή επίπεδα, ειδικά σε εφαρμογές υψηλής ισχύος όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα .

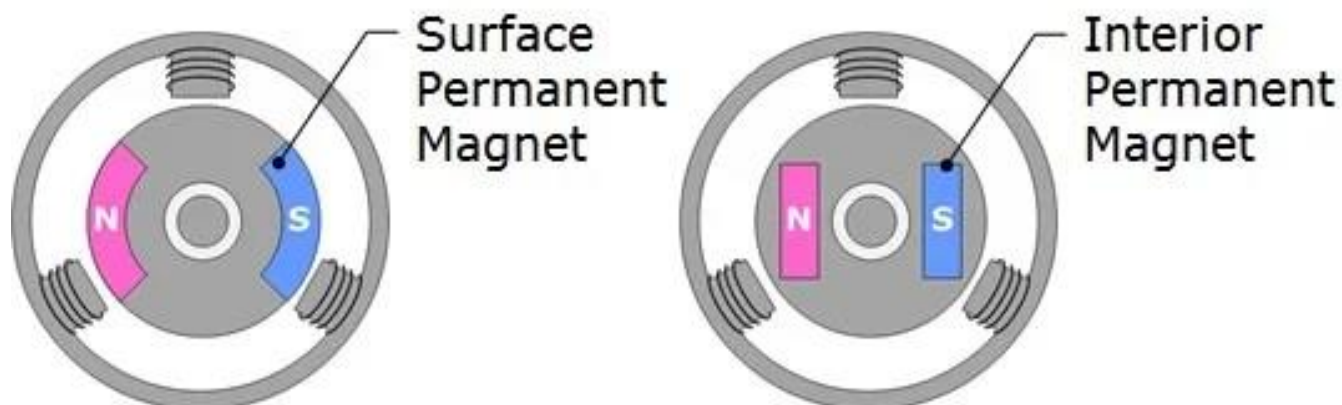
Τέλος έχουμε τον ηλεκτρονικό ελεγκτή (Electronic Speed Controller - ESC/Inverter) αν και είναι εξωτερικό εξάρτημα, είναι αναπόσπαστο μέρος του συστήματος BLDC. Ο ελεγκτής αποτελείται από διάφορα βασικά τμήματα, τον μικροελεγκτή (Microcontroller - MCU) ή DSP που λειτουργεί σαν κεντρική μονάδα επεξεργασίας λαμβάνει εντολές από τον οδηγό και πληροφορίες από τους αισθητήρες θέσης του κινητήρα.Ο ελεγκτής περιλαμβάνει επίσης ηλεκτρονικά ισχύος που είναι υπεύθυνο για την μετατροπή ενέργειας συνήθως τρανζίστορ MOSFET ή IGBT διατεταγμένα σε "γέφυρα" τριών φάσεων.

### 5.3 Εφαρμογές

Οι κινητήρες BLDC Brushless DC (BLDC) διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των μόνιμων μαγνητών στον ρότορα, .Επιφανειακής τοποθέτησης μαγνητών και τους Εσωτερικής τοποθέτησης μαγνητών . Και οι δύο λειτουργούν με την ίδια βασική αρχή, δηλαδή μέσω της εναλλαγής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο στάτη που προκαλούν την περιστροφή του ρότορα.

Επιφανειακής τοποθέτησης οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια του ρότορα, δηλαδή πάνω στην περιφέρειά του. Αυτή η διάταξη έχει ως αποτέλεσμα ο αέρας του κενού μεταξύ ρότορα και στάτη να είναι ομοιόμορφος, κάτι που οδηγεί σε πολύ ομαλή περιστροφή, χαμηλές ροπές κυμάτωσης και υψηλή απόδοση. Λόγω της απλής τους κατασκευής και της υψηλής αποδοτικότητας σε μικρά φορτία, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι σε οικιακές συσκευές, όπως ανεμιστήρες, πλυντήρια και ηλεκτρικές σκούπες, καθώς και σε συστήματα ψύξης και εξαερισμού. Επιπλέον, βρίσκουν εφαρμογή σε ρομποτικά συστήματα ακριβείας, drones, σκληρούς δίσκους, εκτυπωτές, αλλά και σε μικρά ηλεκτρικά οχήματα ή ηλεκτρικά ποδήλατα, όπου η σταθερότητα περιστροφής και η ενεργειακή απόδοση αποτελούν κρίσιμους παράγοντες.

Αντίθετα, στους εσωτερικής τοποθέτησης οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται εσωτερικά μέσα στον πυρήνα του ρότορα, σε ειδικές εσοχές ή διαγώνιες σχισμές. Αυτή η διάταξη δημιουργεί ανισοτροπία στη μαγνητική ροή, δηλαδή διαφορά στη μαγνητική διαπερατότητα ανάλογα με τη διεύθυνση. Ως αποτέλεσμα, ο κινητήρας παράγει επιπλέον ροπή , πέρα από τη ροπή που προκαλείται από τους μαγνήτες. Αυτό αυξάνει σημαντικά τη συνολική ροπή εξόδου και την απόδοση σε χαμηλές στροφές. Έχει επίσης πιο ανθεκτική μηχανική δομή, αφού οι μαγνήτες προστατεύονται εσωτερικά από τις φυγόκεντρες δυνάμεις, κάτι που του επιτρέπει να λειτουργεί σε υψηλότερες ταχύτητες χωρίς αποκόλληση των μαγνητών. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, βιομηχανικούς αυτοματισμούς, αντλίες υψηλής ισχύος, συμπιεστές και ανελκυστήρες. Επιπλέον, η υψηλή ροπή εκκίνησης και η αποδοτικότητα σε χαμηλές στροφές καθιστούν τους IM-BLDC κατάλληλους για εφαρμογές έλξης, όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα, λεωφορεία και AGV οχήματα σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.[12]



Εικόνα 11 Επιφανειακής τοποθέτησης

Εσωτερικής τοποθέτησης

## 5.4 Χαρακτηριστικά

Ο κινητήρας χωρίς ψήκτρες συνεχούς ρεύματος (BLDC) χαρακτηρίζεται από μια σειρά τεχνικών και λειτουργικών ιδιοτήτων που τον καθιστούν ιδιαίτερα αποδοτικό και αξιόπιστο στις σύγχρονες εφαρμογές ηλεκτροκίνησης.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημά του είναι η υψηλή ενεργειακή απόδοση, συνήθως μεγαλύτερη από 85–90%, καθώς δεν υπάρχουν τριβές από ψήκτρες ή απώλειες λόγω σπινθηρισμών αφού η απουσία ψήκτρων μειώνει τις απώλειες λόγω τριβής και σπινθηρισμού. Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική πραγματοποιείται με ελάχιστες απώλειες, επιτρέποντας την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, ο κινητήρας προσφέρει υψηλή ροπή εκκίνησης, κάτι που τον καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε εφαρμογές που απαιτούν άμεση και ισχυρή εκκίνηση, όπως στα ηλεκτρικά οχήματα και στα ρομποτικά συστήματα.

Η απουσία ψήκτρων σημαίνει ότι δεν υπάρχει μηχανική φθορά στα στοιχεία της μεταγωγής, άρα μειώνεται δραστικά η ανάγκη για συντήρηση και επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του κινητήρα. Η λειτουργία του είναι αθόρυβη και χωρίς κραδασμούς, λόγω της ομαλής εναλλαγής των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ενώ η ρύθμιση της ταχύτητας και της ροπής γίνεται με εξαιρετική ακρίβεια μέσω ηλεκτρονικού ελέγχου. Ο BLDC κινητήρας έχει επίσης τη δυνατότητα αναγεννητικής πέδησης, δηλαδή μπορεί να μετατρέπει μέρος της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική κατά το φρενάρισμα, αυξάνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η συμπαγής και ελαφριά κατασκευή του, που επιτρέπει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα βάρους, γεγονός που τον καθιστά ιδανικό για φορητές και κινητές εφαρμογές, όπως drones και ηλεκτρικά οχήματα. Επιπλέον, ο BLDC κινητήρας προσφέρει μεγάλο εύρος ταχύτητας λειτουργίας και ταχεία απόκριση σε αλλαγές φορτίου ή εντολών, ενώ παραμένει σταθερός και αξιόπιστος σε συνεχή λειτουργία. Ο ηλεκτρονικός του έλεγχος επιτρέπει επίσης την ενσωμάτωσή του σε έξυπνα συστήματα, με μικροελεγκτές ή αισθητήρες, που βελτιώνουν περαιτέρω την απόδοση και την ασφάλεια της λειτουργίας του.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά του, ο κινητήρας BLDC παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα που σχετίζονται κυρίως με την πολυπλοκότητα και το κόστος της τεχνολογίας του. Το πιο βασικό μειονέκτημα είναι το αυξημένο κόστος κατασκευής, κυρίως εξαιτίας των μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται στον ρότορα. Οι μαγνήτες αυτοί, ειδικά όταν προέρχονται από σπάνιες γαίες, έχουν υψηλό κόστος και είναι ευαίσθητοι στις μεταβολές της παγκόσμιας αγοράς. Επίσης, η πολυπλοκότητα του ηλεκτρονικού ελέγχου αυξάνει το κόστος του συνολικού συστήματος, καθώς απαιτείται μετατροπέας, αισθητήρες θέσης και λογισμικό ελέγχου, που καθιστούν τη λειτουργία πιο σύνθετη σε σχέση με έναν απλό κινητήρα DC ή επαγωγικό κινητήρα.

Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι η ευαισθησία στη θερμότητα. Οι μόνιμοι μαγνήτες του ρότορα μπορεί να υποστούν απομαγνήτιση αν η θερμοκρασία ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο, κάτι που μειώνει την απόδοση και τη ροπή του κινητήρα. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου ο έλεγχος βασίζεται αποκλειστικά σε αισθητήρες, υπάρχει η πιθανότητα δυσλειτουργίας ή σφαλμάτων θέσης, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση ή να προκαλέσουν διακοπή λειτουργίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8°

Ο BLDC κινητήρας απαιτεί επίσης εξειδικευμένο προσωπικό για τη συντήρηση ή την επισκευή του, λόγω της τεχνολογικής του πολυπλοκότητας, ενώ ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος (EMI) που προκαλείται από τον μετατροπέα μπορεί να απαιτεί πρόσθετη θωράκιση και φίλτρα.

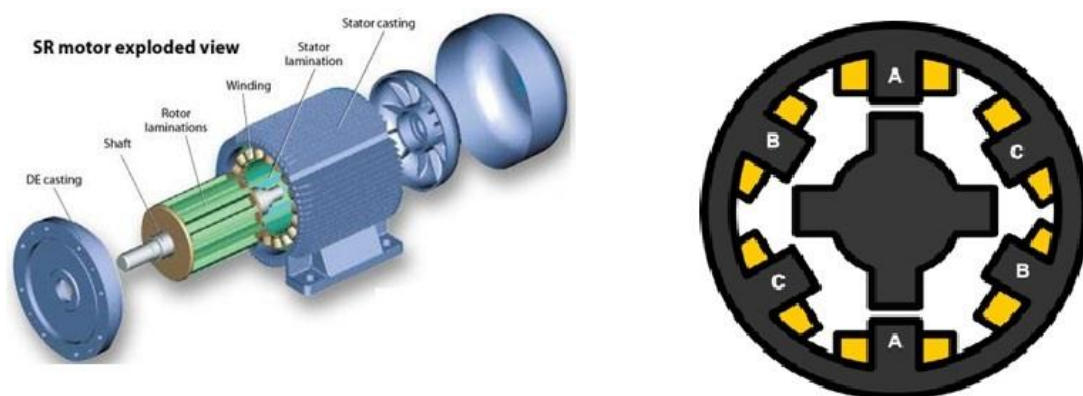
Τέλος, σε πολύ χαμηλές ταχύτητες λειτουργίας, ο BLDC κινητήρας ενδέχεται να εμφανίζει μειωμένη ομαλότητα κίνησης αν δεν χρησιμοποιούνται εξελιγμένες μέθοδοι ελέγχου ή αν απουσιάζουν οι αισθητήρες θέσης. Παρ' όλα αυτά, οι εξελίξεις στην ηλεκτρονική ισχύος και στους αλγορίθμους ελέγχου συνεχίζουν να βελτιώνουν τις επιδόσεις και να μειώνουν τα παραπάνω μειονεκτήματα, καθιστώντας τον κινητήρα BLDC μια από τις πλέον αποδοτικές και αξιόπιστες επιλογές για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, απόδοση και διάρκεια ζωής.

## 6° Κινητήρας Μεταγωγής Απρόθυμιας ( SRM )

Ο Κινητήρας Μεταγωγής Απρόθυμιας (Switched Reluctance Motor - SRM) είναι ένας διακριτός τύπος ηλεκτροκινητήρα που ξεχωρίζει θεμελιωδώς για την απλή και εξαιρετικά ανθεκτική κατασκευή του, καθώς δεν περιέχει καθόλου μόνιμους μαγνήτες, ούτε περιελίξεις στον ρότορα. Ο ρότορας αποτελείται απλώς από έναν οδοντωτό πυρήνα από μαλακό μαγνητικό υλικό, ενώ ο στάτορας διαθέτει προεξέχοντες πόλους, καθένας από τους οποίους φέρει ένα πηνίο. Η αρχή λειτουργίας του δεν βασίζεται στην έλξη/άπωση μαγνητών (όπως στους PMSM), αλλά στο φυσικό φαινόμενο της ελάχιστης μαγνητικής απρόθυμιας όπου η μαγνητική ροή προτιμά πάντα να διαρρέει τη διαδρομή με τη μικρότερη δυσκολία. Η όλη διαδικασία βασίζεται στον εξαιρετικά ακριβή χρονισμό και τον ηλεκτρονικό έλεγχο, καθώς ο SRM είναι μηχανικά απλός αλλά ηλεκτρονικά πολύπλοκος.[7]

### 6.1 Αρχή Λειτουργίας

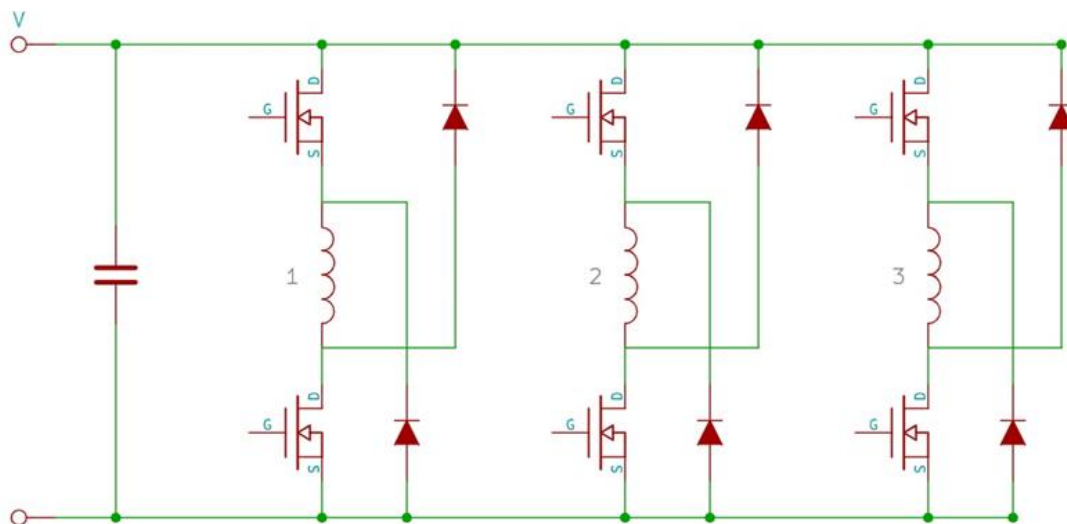
Η διαδικασία παραγωγής κίνησης σε έναν κινητήρα SRM ξεκινά με την παροχή συνεχούς ρεύματος (DC) υψηλής τάσης από την μπαταρία του οχήματος προς τον ελεγκτή ισχύος . Αυτός ο ελεγκτής αποτελεί τον εγκέφαλο του συστήματος και λειτουργεί σε συνδυασμό με αισθητήρες θέσης υψηλής ακρίβειας, οι οποίοι τον πληροφορούν ανά πάσα στιγμή για την ακριβή γωνιακή θέση του ρότορα. Όταν ζητηθεί ισχύ ο ελεγκτής δεν στέλνει ένα ομαλό ρεύμα, αλλά εκτελεί την ομώνυμη μεταγωγή (switching), στέλνει έναν μεμονωμένο, χρονισμένο παλμό ρεύματος σε ένα συγκεκριμένο ζεύγος πηνίων του στάτορα (π.χ. στη Φάση A). Αυτό δημιουργεί ένα ισχυρό, στοχευόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο ρότορας, που αποτελείται απλώς από μαγνητικά διαπερατό υλικό (σίδηρο), έλκεται βίαια από αυτό το πεδίο, καθώς η φύση του τον ωθεί να περιστραφεί για να ευθυγραμμιστεί με το πεδίο και να επιτύχει την κατάσταση ελάχιστης μαγνητικής απροθυμιας. Αυτή η κίνηση προς την ευθυγράμμιση είναι που παράγει την κινητήρια ροπή. Το κρίσιμο σημείο είναι ο χρονισμός: ακριβώς πριν ο ρότορας ολοκληρώσει την ευθυγράμμιση, ο ελεγκτής διακόπτει το ρεύμα από τη Φάση A και το μεταγωγίζει ακαριαία στην επόμενη φάση (Φάση B). Ο ρότορας, έχοντας ήδη φόρα, "κυνηγά" τώρα το νέο μαγνητικό πεδίο της Φάσης B, και αυτή η διαδοχική, ταχύτατη ηλεκτρονική εναλλαγή των πεδίων στον στάτορα δημιουργεί τη συνεχή περιστροφή. Αυτή η μηχανική ροπή στον άξονα του ρότορα μεταφέρεται έπειτα μέσω ενός απλού κιβώτιου μίας σχέσης στα ημιαξόνια, δίνοντας κίνηση στους τροχούς.



Εικόνα 12 Κινητήρας Μεταγωγής Απρόθυμιας

## 6.2 Κατασκευή

Ο SRM αποτελείται από δύο βασικά μέρη: τον στάτη και τον δρομέα, αμφότερα από μαλακό μαγνητικό υλικό (συνήθως σιδηρομαγνητική λαμαρίνα), αλλά με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ο στάτης περιλαμβάνει ένα σύνολο πόλων στους οποίους υπάρχουν τυλίγματα χαλκού οργανωμένα σε φάσεις (συνήθως 3 ή 4). Τα πηνία είναι τοποθετημένα συμμετρικά και ηλεκτρικά απομονωμένα μεταξύ των φάσεων. Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από πολυπολικό μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό, χωρίς τύλιγμα, χωρίς μόνιμους μαγνήτες, και χωρίς ηλεκτρική τροφοδότηση. Η γεωμετρία των πόλων του δρομέα είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει μεγάλη μεταβολή της αυτεπαγωγής καθώς περιστρέφεται. Ολόκληρη η δομή στηρίζεται σε έναν άξονα που φέρει ρουλεμάν, ενώ το κέλυφος του κινητήρα προσφέρει μηχανική στήριξη και απαγωγή θερμότητας. Η απλότητα της κατασκευής ιδιαίτερα του δρομέα καθιστά τον SRM στιβαρό, χαμηλού κόστους και κατάλληλο για απαιτητικά περιβάλλοντα, καθώς δεν περιέχει μαγνήτες ή πολύπλοκες περιελίξεις. Ωστόσο απαιτεί ελεγκτή ισχύος (inverter) ειδικά σχεδιασμένο, καθώς και αισθητήρες θέσης ή αλγόριθμο εκτίμησης θέσης για σωστή αλληλουχία ενεργοποίησης των φάσεων.[17]

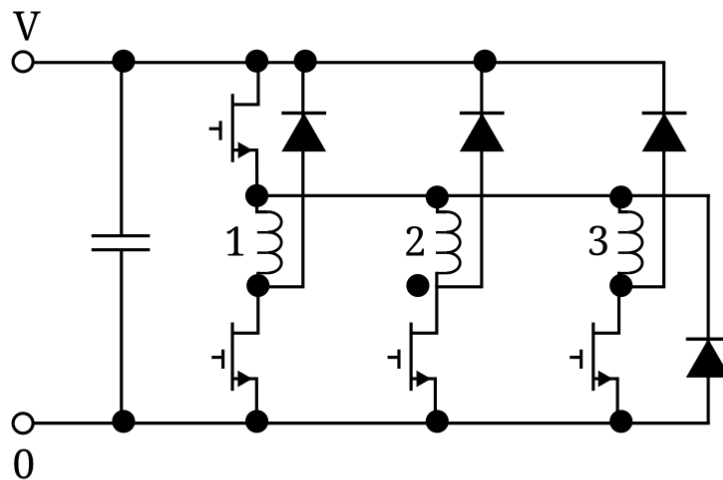


Εικόνα 13 Ασύμμετρος Μετατροπέας Γέφυρας

Ο ελεγκτής ισχύος (Power Converter) αποτελεί το πιο κρίσιμο τμήμα του Switched Reluctance Motor, καθώς η απόδοση και η ομαλότητα λειτουργίας του κινητήρα εξαρτώνται άμεσα από την ικανότητά του να ενεργοποιεί με ακρίβεια τις φάσεις του στάτη. Δεδομένου ότι ο SRM δεν απαιτεί ημιτονοειδή τροφοδοσία αλλά διακοπτόμενο παλμικό ρεύμα, ο ελεγκτής πρέπει να παρέχει γρήγορους παλμούς υψηλού ρεύματος με αυστηρό χρονισμό, ώστε ο δρομέας να οδηγείται συνεχώς προς τη θέση ελάχιστης μαγνητικής αντίστασης. Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται από διακόπτες ημιαγωγών (IGBT, MOSFET ή SiC), διόδους ανάστροφης ροής, αισθητήρες ρεύματος και κύκλωμα προστασίας, ενώ για κάθε φάση του στάτη υπάρχει ανεξάρτητο κύκλωμα οδήγησης.

Η λειτουργία του βασίζεται σε τρεις πυλώνες: α) ακριβή εναλλαγή των φάσεων (commutation) βάσει της γωνιακής θέσης του δρομέα, η οποία ανιχνεύεται με αισθητήρες Hall, encoder ή αλγορίθμους εκτίμησης θέσης, β) ρύθμιση του ρεύματος μέσω τεχνικών PWM ή hysteresis control ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ροπή με ελαχιστοποίηση θορύβου και κυματισμών, και γ) προστασία του συστήματος από υπερρεύματα, υπερθέρμανση και μεταβατικές υπερτάσεις κατά την αποκοπή των πηνίων.

Ο ασύμμετρος μετατροπέας γέφυρας είναι η πιο διαδεδομένη αρχιτεκτονική μετατροπέα ισχύος για SRM, επειδή προσφέρει πλήρη και ανεξάρτητο έλεγχο ρεύματος σε κάθε φάση, υψηλή απόδοση και πολύ καλή δυναμική απόκριση. Ονομάζεται ασύμμετρος γιατί κάθε φάση έχει δύο διακόπτες ισχύος σε σειρά και δύο διόδους ελεύθερης διέλευσης, αλλά η διάταξη δεν σχηματίζει συμμετρική γέφυρα (όπως στους BLDC/PMSM), αλλά ένα ημι-γέφυρο κύκλωμα που δεν είναι συμμετρικό ως προς τις φάσεις. Εναλλακτικά έχουμε τον C-dump μετατροπέα που αποτελεί μια απλούστερη και οικονομικότερη αρχιτεκτονική οδήγησης SRM, όπου η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αποδιέγερση των πηνίων συλλέγεται σε έναν μεγάλο πυκνωτή (Dump Capacitor) μέσω μιας κοινής διαδρομής διόδου. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιεί λιγότερους διακόπτες ισχύος σε σχέση με τον ασύμμετρο μετατροπέα και βασίζεται σε έναν κεντρικό διακόπτη ο οποίος επιτρέπει τη μεταφορά της περίσσειας ενέργειας από κάθε φάση στον πυκνωτή. Στη συνέχεια, το αποθηκευμένο φορτίο μπορεί είτε να επαναχρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση των επόμενων φάσεων, είτε να επιστραφεί στην είσοδο.



(n+1) switch and diode configuration

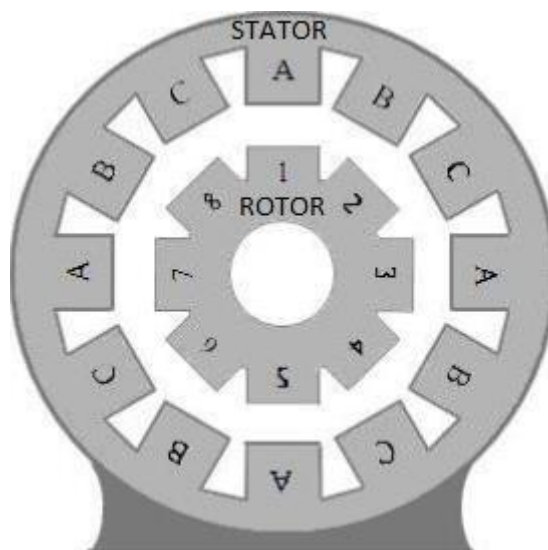
Εικόνα 14 C-Dump Μετατροπέας

### 6.3 Χαρακτηριστικά

Η βασική μέθοδος ταξινόμησης των SRM βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στον αριθμό των πόλων του στάτορα σε σχέση με τον αριθμό των πόλων (οδόντων) του ρότορα, καθώς και στον αριθμό των φάσεων στις οποίες ομαδοποιούνται τα πηνία του στάτορα. Η ταυτότητα ενός SRM εκφράζεται συχνά ως "X/Y", όπου X = Αριθμός Πόλων Στάτορα και Y = Αριθμός Πόλων Ρότορα. Ο αριθμός των πόλων του στάτορα είναι πάντα διαφορετικός από τον αριθμό των πόλων του ρότορα. Αυτή η ασυμμετρία είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι ο κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει από οποιαδήποτε θέση και να παράγει συνεχή ροπή.

Στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs), οι πιο ελπιδοφόροι σχεδιασμοί Κινητήρων Μεταγωγής Απρόθυμιας (SRM) είναι αυτοί που προσφέρουν ισορροπία μεταξύ απόδοσης, ομαλότητας λειτουργίας και διαχειρίσιμης πολυπλοκότητας. Ο συνδυασμός 8/6 (8 πόλοι στάτορα / 6 πόλοι ρότορα) με 4 φάσεις αναδεικνύεται ως ένας από τους πλέον δημοφιλείς, καθώς παρέχει επαρκή αριθμό φάσεων για σχετικά ομαλή μεταγωγή ισχύος και περιορισμό των ριπών ροπής και του θορύβου, ειδικά όταν συνδυάζεται με προηγμένους αλγορίθμους ελέγχου. Αυτός ο σχεδιασμός επιτυγχάνει μια καλή ισορροπία μεταξύ πυκνότητας ισχύος/ροπής και του κόστους του ελεγκτή (που απαιτεί 8 διακόπτες ισχύος). Για εφαρμογές που απαιτούν ακόμα μεγαλύτερη ομαλότητα και βελτιωμένη ανθεκτικότητα σε βλάβες, ο 12/8 (12 πόλοι στάτορα / 8 πόλοι ρότορα) είναι επίσης υπό εντατική διερεύνηση, προσφέροντας τη δυνατότητα υλοποίησης με 3, 4 ή ακόμα και 6 φάσεις. Οι εκδόσεις με περισσότερες φάσεις (π.χ. 6-φασικός 12/8) μειώνουν δραματικά τις ριπές ροπής και τον θόρυβο, ενώ παράλληλα ενισχύουν την αξιοπιστία, επιτρέποντας στον κινητήρα να συνεχίσει να λειτουργεί ακόμη και αν μια φάση αποτύχει.

Αντιθέτως, ο σχεδιασμός 6/4 (6 πόλοι στάτορα / 4 πόλοι ρότορα) με 3 φάσεις, αν και μηχανικά και ηλεκτρονικά ο πιο απλός και οικονομικός στην υλοποίηση (απαιτώντας μόλις 6 διακόπτες ισχύος), τείνει να παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερες ριπές ροπής και ακουστικό θόρυβο. Αυτό τον καθιστά λιγότερο κατάλληλο για την ευαίσθητη ακουστικά καμπίνα ενός επιβατικού αυτοκινήτου, αλλά παραμένει μια βιώσιμη επιλογή για ορισμένες εξειδικευμένες εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, όπως βαρέα βιομηχανικά μηχανήματα, οχήματα εκτός δρόμου ή εφαρμογές χαμηλότερου κόστους, όπου η ανθεκτικότητα και το χαμηλό αρχικό κόστος υπερτερούν του ζητήματος του θορύβου. Η συνεχής εξέλιξη στους αλγορίθμους ελέγχου παίζει καθοριστικό ρόλο στην προσπάθεια να "δαμαστούν" τα μειονεκτήματα αυτών των κινητήρων, ανεξάρτητα από τον συνδυασμό πόλων και φάσεων.



Εικόνα 15 12/8 SRM

#### 6.4 Εφαρμογές

Αν και ο κινητήρας SRM δεν αποτελεί την κυρίαρχη επιλογή στα σημερινά, μαζικής παραγωγής επιβατικά ηλεκτρικά οχήματα όπου κυριαρχούν οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PMSM), αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους υποψήφιους για το μέλλον και ένα τεράστιο πεδίο έρευνας λόγω της απουσίας σπάνιων γαιών στους μαγνήτες, γεγονός που υπόσχεται δραματική μείωση κόστους, απλοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας και εξάλειψη της γεωπολιτικής εξάρτησης. Για τον λόγο αυτό, μεγάλες εταιρείες όπως η Mahle, η Schaeffler και άλλοι προμηθευτές Tier 1 (μεγάλες, εξειδικευμένες εταιρείες που προμηθεύουν απευθείας τους κατασκευαστές αυτοκινήτων) αναπτύσσουν ενεργά προηγμένους SRM επόμενης γενιάς που στοχεύουν να λύσουν τα ιστορικά του μειονεκτήματα, κυρίως τον θόρυβο και τις ριπές ροπής, μέσω εξελιγμένων αλγορίθμων ελέγχου. Πέρα από τον μελλοντικό ρόλο τους ως κύριοι κινητήρες έλξης στα επιβατικά EV, οι SRM εφαρμόζονται ήδη σε ποικίλα άλλα μέσα μεταφοράς, όπου τα πλεονεκτήματα της εξαιρετικής τους ανθεκτικότητας, της ικανότητας λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες και της υψηλής ροπής εκκίνησης υπερτερούν έναντι του ακουστικού θορύβου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται στις σιδηροδρομικές μεταφορές (ατμομηχανές), σε βαρέα βιομηχανικά οχήματα όπως εξορυκτικά φορτηγά και ηλεκτρικά περονοφόρα, καθώς και σε ηλεκτρικά λεωφορεία, φορτηγά και οχήματα υποστήριξης αεροδρομίων, όπου η αξιοπιστία, το χαμηλό κόστος συντήρησης και η αντοχή σε σκληρές συνθήκες είναι καθοριστικοί παράγοντες.

## 7<sup>ο</sup> Συγκριτική Ανάλυση Κινητήρων

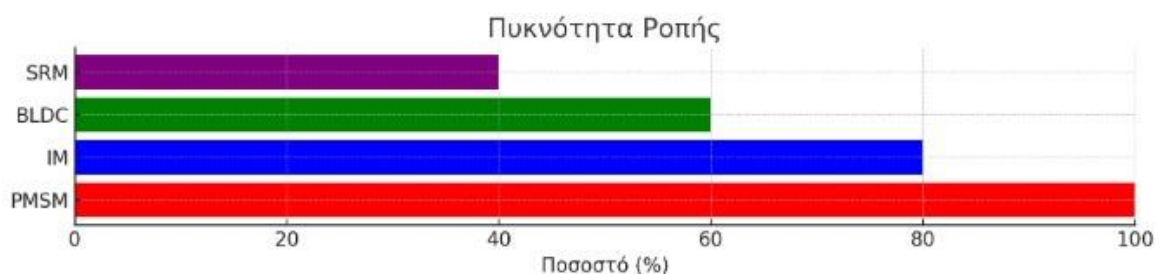
Στο παρόν κεφάλαιο, επιχειρείται μια συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων κυρίαρχων τεχνολογιών ηλεκτρικών κινητήρων που εφαρμόζονται ή ερευνώνται για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα : του Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη (PMSM), του Επαγωγικού Κινητήρα (IM), του Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Ψήκτρες (BLDC) και του Κινητήρα Εναλλασσόμενης Απρόθυμης (SRM). Η ανάλυση εστιάζει σε κρίσιμους δείκτες απόδοσης που καθορίζουν την καταλληλότητα κάθε τύπου για συγκεκριμένες οδηγικές ανάγκες. Ειδικότερα, εξετάζονται:

- Η ενεργειακή απόδοση και πώς αυτή μεταφράζεται σε αυτονομία οχήματος.
- Η πυκνότητα ροπής και ισχύος, που καθορίζουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά και το μέγεθος του κινητήρα.
- Η διαχείριση θερμότητας (ψύξη) και η ανθεκτικότητα σε σκληρή χρήση.
- Το κόστος κατασκευής και η εξάρτηση από κρίσιμες πρώτες ύλες
- Η πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου και οδήγησης.

Στόχος της σύγκρισης είναι να αποσαφηνιστούν οι λόγοι για τους οποίους συγκεκριμένες τοπολογίες (όπως οι PMSM και IM) κυριαρχούν σήμερα στην αγορά, ενώ άλλες (όπως οι SRM) εξετάζονται ως εναλλακτικές λύσεις χαμηλού κόστους για το μέλλον.

### 1. Ανάλυση Πυκνότητας Ροπής (Torque Density)

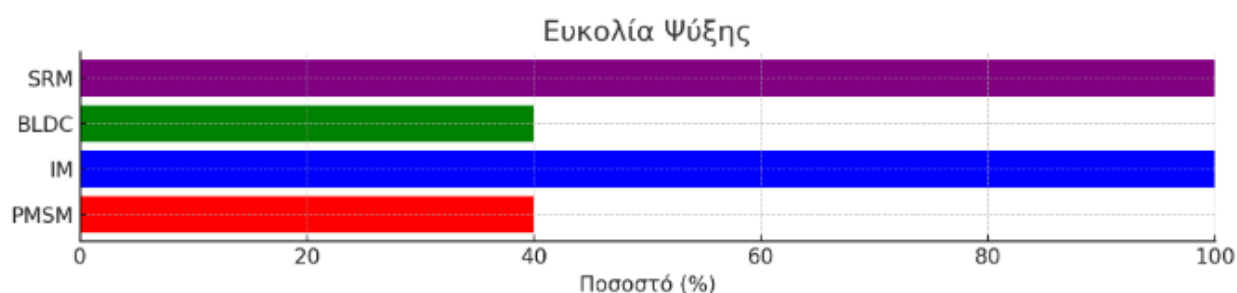
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, ο κινητήρας PMSM υπερέχει ξεκάθαρα, ακολουθούμενος από τον IM (80%). Ο SRM παρουσιάζει τη χαμηλότερη πυκνότητα ροπής. Η υπεροχή του PMSM οφείλεται στη μόνιμη μαγνητική ροή που παρέχουν οι μαγνήτες σπάνιων γαιών (όπως το Νεοδύμιο-Σίδηρος-Βόριο). Αυτό επιτρέπει την παραγωγή υψηλής ροπής σε μικρό όγκο κατασκευής, χωρίς την ανάγκη ρεύματος μαγνήτισης από τον στάτορα. Αντίθετα, ο SRM βασίζεται στην αρχή της ελάχιστης μαγνητικής αντίδρασης (reluctance) και απαιτεί μεγαλύτερο όγκο σιδήρου για να παράγει αντίστοιχα ποσά ροπής, μειώνοντας έτσι την ογκομετρική του απόδοση.



Εικόνα 16 Διάγραμμα Πυκνότητας Ροπής

## 2. Ανάλυση Ψύξης (Cooling)

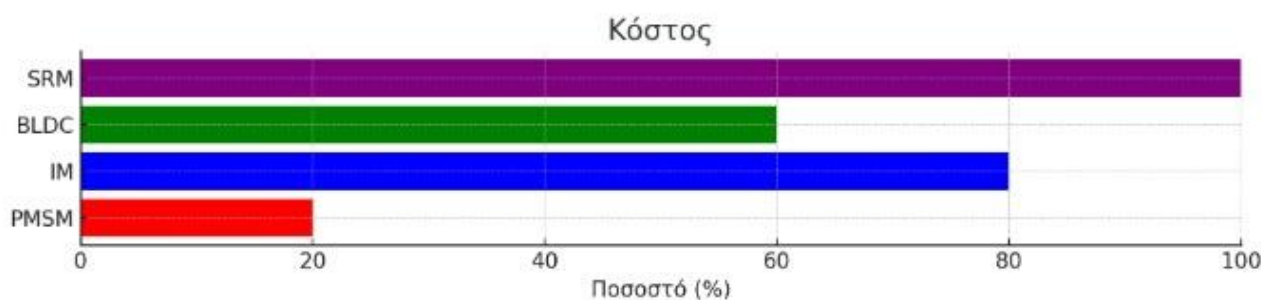
Στον τομέα της διαχείρισης θερμότητας, οι ρόλοι αντιστρέφονται. Οι IM και SRM αποδίδουν εξαιρετικά, ενώ οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PMSM, BLDC) υστερούν σημαντικά. Η χαμηλή βαθμολογία των PMSM/BLDC οφείλεται στην ευαισθησία των μόνιμων μαγνητών. Σε υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχει κίνδυνος μη αναστρέψιμης απομάγνητισης (φαινόμενο σημείου Curie), γεγονός που επιβάλλει αυστηρά και πολύπλοκα συστήματα ψύξης. Αντιθέτως, οι κινητήρες IM και SRM διαθέτουν εξαιρετικά ανθεκτικούς ρότορες (κλωβός αλουμινίου/χαλκού ή απλός χάλυβας αντίστοιχα) που μπορούν να αντέξουν πολύ υψηλές θερμικές καταπονήσεις χωρίς λειτουργική υποβάθμιση, καθιστώντας την ψύξη τους απλούστερη και την κατασκευή τους πιο στιβαρή.



Εικόνα 17 Διάγραμμα Ψύξης

## 3. Ανάλυση Κόστους (Cost Efficiency)

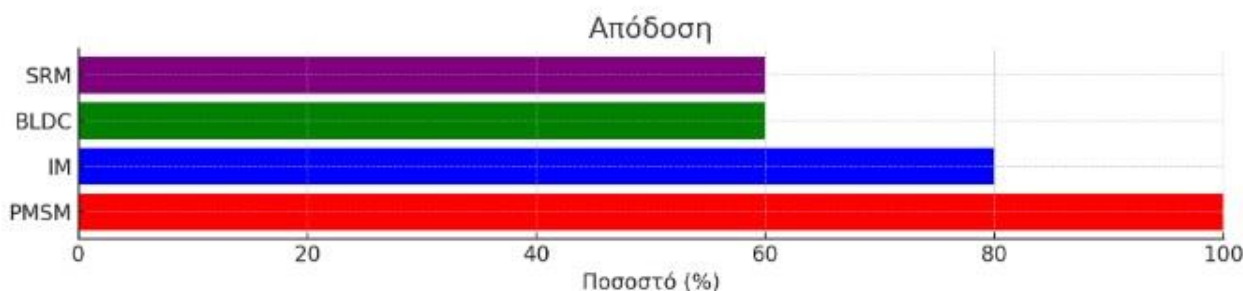
Ο κινητήρας SRM αναδεικνύεται ως η πιο οικονομική λύση, με τον PMSM να είναι μακράν η ακριβότερη επιλογή. Ο επαγωγικός (IM) διατηρεί μια ισορροπημένη θέση. Το υψηλό κόστος του PMSM είναι άμεσο αποτέλεσμα της χρήσης σπάνιων γαιών (Rare Earth Elements - REE) για τους μαγνήτες, η τιμή των οποίων είναι υψηλή και παρουσιάζει γεωπολιτική αστάθεια. Ο SRM, αντίθετα, έχει την απλούστερη δυνατή δομή χωρίς μαγνήτες και χωρίς περιελίξεις στον ρότορα, μειώνοντας δραματικά το κόστος υλικών και κατασκευής. Ο IM αποτελεί τη "μέση λύση", καθώς χρησιμοποιεί χαλκό ή αλουμίνιο, υλικά φθηνότερα από τους μαγνήτες αλλά ακριβότερα από τον απλό χάλυβα του SRM. (Σημείωση: Υψηλή μπάρα = Χαμηλό Κόστος / Οικονομικό Πλεονέκτημα)



Εικόνα 18 Διάγραμμα Κόστους

#### 4. Ανάλυση Απόδοσης (Efficiency)

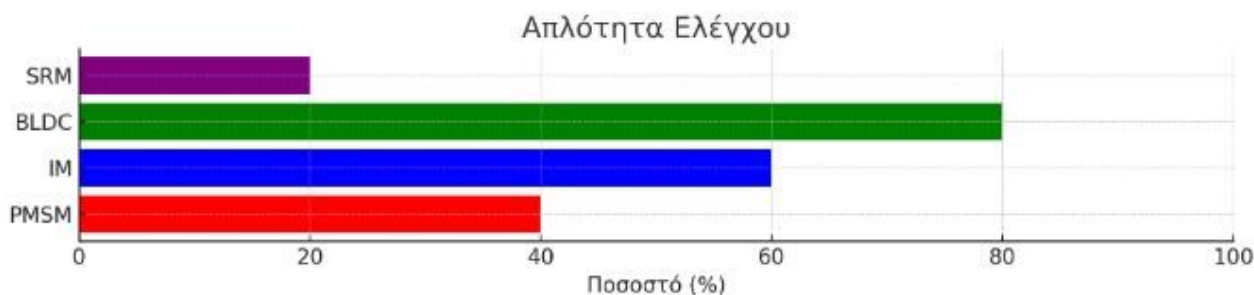
Ο PMSM κυριαρχεί στην ενεργειακή απόδοση, φτάνοντας σχεδόν το τέλειο, ειδικά σε αστικό κύκλο οδήγησης. Ο IM ακολουθεί με υψηλά ποσοστά, ενώ οι BLDC και SRM υστερούν ελαφρώς. Η υψηλή απόδοση του PMSM πηγάζει από την απουσία ρεύματος διέγερσης στον ρότορα (οι μαγνήτες κάνουν τη δουλειά δωρεάν), εξαλείφοντας ουσιαστικά τις απώλειες χαλκού στον ρότορα. Στον επαγωγικό κινητήρα (IM), μέρος της ενέργειας δαπανάται για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου και λόγω των επαγωγικών ρευμάτων (Eddy currents) στον ρότορα, μειώνοντας ελαφρώς τη συνολική απόδοση. Ο SRM υποφέρει από υψηλότερες απώλειες υστέρησης λόγω των υψηλών συχνοτήτων μεταγωγής που απαιτούνται.



Εικόνα 19 Διάγραμμα Απόδοσης

#### 5. Ανάλυση Απλότητας Ελέγχου (Control Simplicity)

Εδώ βλέπουμε τη μεγαλύτερη αδυναμία του SRM ο οποίος απαιτεί τον πιο σύνθετο έλεγχο. Ο BLDC εμφανίζεται ως ο πιο εύκολα ελεγχόμενος συγκριτικά με τους υπόλοιπους. Ο έλεγχος του BLDC είναι σχετικά απλός (τραπεζοειδής μεταγωγή 6 βημάτων), απαιτώντας λιγότερη επεξεργαστική ισχύ. Αντίθετα, ο SRM παρουσιάζει εξαιρετικά μη γραμμική συμπεριφορά. Για να λειτουργήσει ομαλά και αθόρυβα σε ένα EV, απαιτούνται πολύπλοκοι αλγόριθμοι ελέγχου για την ελαχιστοποίηση του κυματισμού ροπής (torque ripple) και των ακουστικών θορύβων. Ο PMSM απαιτεί επίσης εξελιγμένο έλεγχο (FOC - Field Oriented Control) και ακριβείς αισθητήρες θέσης, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα σε σχέση με τον



BLDC

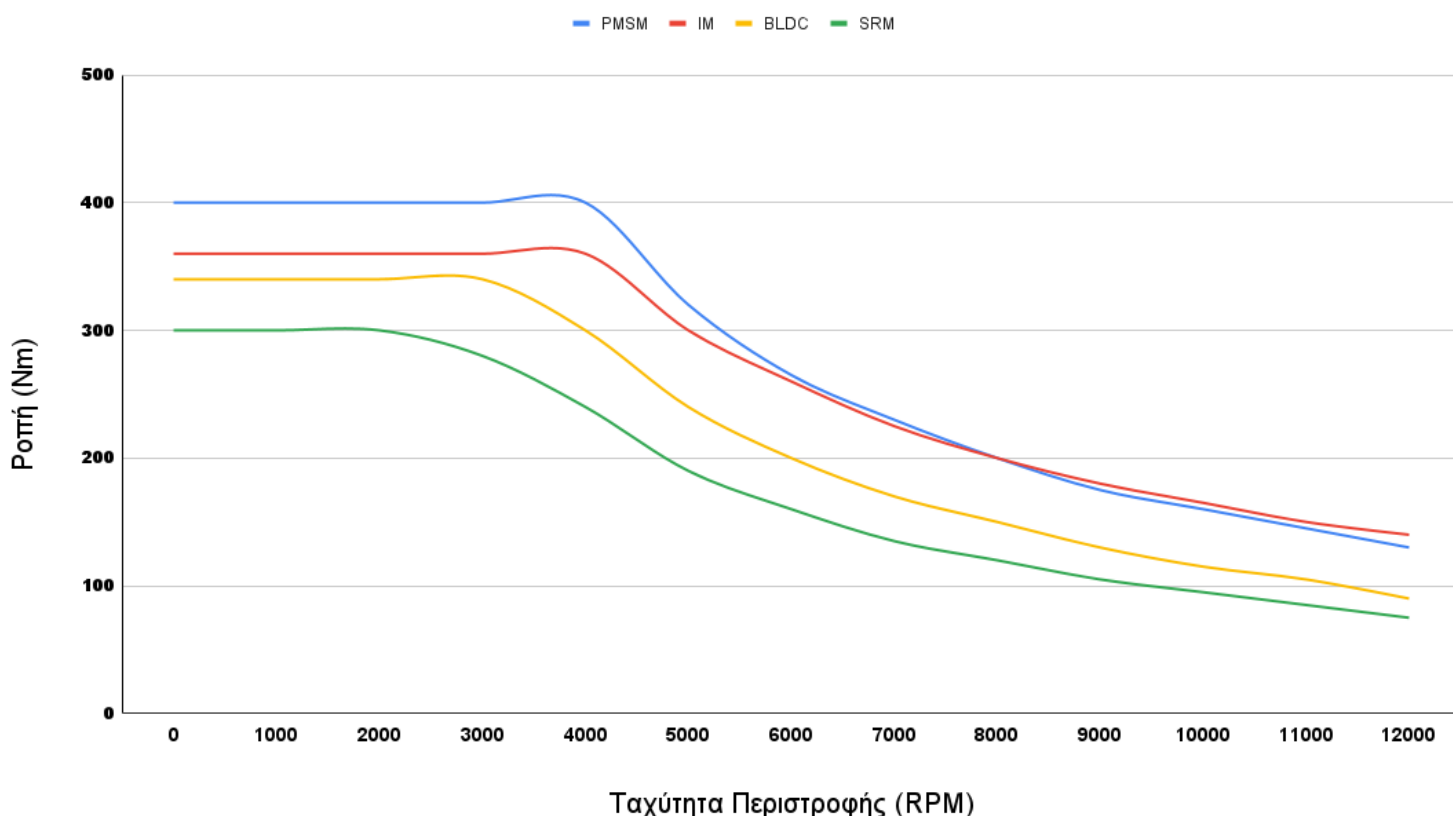
Εικόνα 20 Διάγραμμα Πολυπλοκότητας Έλεγχου

## 6. Συγκριτική Αξιολόγηση Χαρακτηριστικών Ροπής-Ταχύτητας

Για την πληρέστερη κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς των τεσσάρων κινητήρων σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης, δημιουργήθηκε το συγκριτικό διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης Ροπής-Ταχύτητας (Torque-Speed Curve). Για να διασφαλιστεί η εγκυρότητα της σύγκρισης, έχει γίνει η υπόθεση ότι και οι τέσσερις κινητήρες είναι ισοδύναμου φυσικού μεγέθους, σχεδιασμένοι για ένα τυπικό επιβατικό ηλεκτρικό όχημα μεσαίας κατηγορίας (ονομαστικής ισχύος 150 kW / 200 hp).

Μέσω της γραφικής παράστασης που ακολουθεί, εξετάζεται η συμπεριφορά των κινητήρων (PMSM, IM, BLDC, SRM) στις δύο κρίσιμες περιοχές λειτουργίας. Την Περιοχή Σταθερής Ροπής (Constant Torque region), η οποία είναι υπεύθυνη για την ικανότητα εκκίνησης και την επιτάχυνση του οχήματος από στάση, και την Περιοχή Σταθερής Ισχύος (Constant Power region), η οποία καθορίζει την απόδοση στις υψηλές στροφές και την τελική ταχύτητα. [19][20]

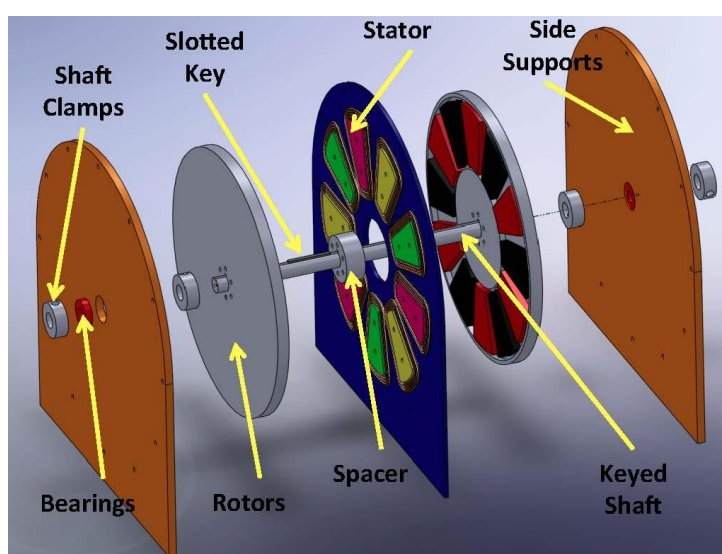
Διάγραμμα Χαρακτηριστικής Ροπής-Ταχύτητας (Torque-Speed Curve)



Εικόνα 21 Διάγραμμα Χαρακτηριστικής Ροπής-Ταχύτητας (Torque-Speed Curve)

## 8<sup>ο</sup> Αναδυόμενες Τεχνολογίες

Όπως κάθε τεχνολογία έτσι και εδώ η εξέλιξη των ηλεκτρικών κινητήρων δεν σταματά . Η έρευνα κινείται πλέον προς ριζοσπαστικές αλλαγές στη γεωμετρία, τα υλικά και την ενσωμάτωση συστημάτων.Μια από τις πιο υποσχόμενες καινοτομίες είναι η μετάβαση από την παραδοσιακή ακτινική ροή (Radial Flux) στην Αξονική Ροή (Axial Flux).Σε αυτούς τους κινητήρες, η μαγνητική ροή κινείται παράλληλα με τον άξονα περιστροφής αντί κάθετα. Ο ρότορας έχει μορφή δίσκου που περιστρέφεται δίπλα στον στάτορα. Προσφέρουν εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ροπής και πολύ μικρό αξονικό μήκος με αποτέλεσμα να ζυγίζουν πολύ λιγότερο με την ίδια ισχύ. Λόγω της συμπακνωμένης μορφής τους, είναι ιδανικοί για ενσωμάτωση απευθείας μέσα στους τροχούς (In-wheel motors) ή σε αυτοκίνητα υψηλών επιδόσεων όπου ο χώρος και το βάρος είναι κρίσιμα.[18]



Εικόνα 22Σκίτσο Κινητήρα Αξονικής Ροής

Επίσης στις μέρες μας υπάρχει έντονα το θέμα του περιβαλλοντικού και οικονομικού κόστους των σπάνιων γαιών, γι αυτό συνέχεια ερευνούνται εναλλακτικές. Μια από αυτές τις τεχνολογίες είναι οι Υποβοηθούμενοι Σύγχρονοι Κινητήρες Απρόθυμης. Αυτή η υβριδική τοπολογία χρησιμοποιεί κυρίως τη ροπή απρόθυμης (όπως ο SRM) αλλά ενσωματώνει φθηνούς μαγνήτες φερρίτη (αντί για νεοδύμιο) για να ενισχύσει την απόδοση.[20] Αποτελεί τη καλύτερη μέση λύση για την αναλογία κόστους-απόδοσης.Μετά έχουμε τους Μαγνήτες Νιτριδίου Σιδήρου (Iron Nitride). Πρόκειται για μια αναδυόμενη τεχνολογία υλικών που υπόσχεται μαγνητικές ιδιότητες ανώτερες του νεοδυμίου χωρίς τη χρήση σπάνιων γαιών, αν και βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο[5]

Στο κατασκευαστικό κομμάτι υπάρχει η τάση προ την τεχνολογία περιέλιξης "Φουρκέτας" (Hairpin Winding). Στον στάτορα, οι παραδοσιακές περιελίξεις στρογγυλού σύρματος αντικαθίστανται από ορθογώνιους αγωγούς χαλκού που μοιάζουν με φουρκέτες. Αυτή η τεχνική αυξάνει τον "συντελεστή πλήρωσης" (fill factor) του χαλκού μέσα στις σχισμές του στάτορα. Περισσότερος χαλκός στον ίδιο χώρο σημαίνει λιγότερες απώλειες, υψηλότερη απόδοση και καλύτερη διαχείριση θερμότητας.[13]



Εικόνα 23 Σύγκριση Περιελίξεων

Επιπλέον οι κατασκευαστές τείνουν στην ενοποίηση συστημάτων (The E-Axle Concept). Προσπαθούν να αποφύγουν τον σχεδιασμό μεμονωμένων κινητήρων, αλλά ολοκληρωμένων ηλεκτρικών αξόνων ενοποίησης του κινητήρα, του μετατροπέα ισχύος (Inverter) και του κιβωτίου μετάδοσης (Gearbox) σε ένα ενιαίο κέλυφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα δραματική μείωση βάρους και όγκου, εξάλειψη των καλωδιώσεων υψηλής τάσης μεταξύ των εξαρτημάτων και κοινό σύστημα ψύξης για όλα τα υποσυστήματα. Στο κομμάτι της μετάδοσης η 1η σχέση προσφέρει εκρηκτική ροπή για την εκκίνηση, ενώ η 2η σχέση επιτρέπει στον κινητήρα να λειτουργεί πιο αποδοτικά σε χαμηλότερες στροφές όταν το όχημα κινείται με υψηλή ταχύτητα στην εθνική οδό, αυξάνοντας την αυτονομία.[10]

## 9° Συμπεράσματα

Η συγκριτική ανάλυση των τεσσάρων τύπων κινητήρων φανερώνει το βασικό πρόβλημα της σύγχρονης ηλεκτροκίνησης: την εξισορρόπηση μεταξύ απόδοσης και κόστους. Σαν αποτέλεσμα βλέπουμε ότι η επιλογή του ηλεκτροκινητήρα δεν αποτελεί μια μονοδιάστατη απόφαση, αλλά αντιθέτως μια αρκετά σύνθετη λόγω των διαφόρων αντικρουόμενων παραμέτρων. Με βάση τα δεδομένα της έρευνας, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Ο Κινητήρας PMSM (Σύγχρονος Μόνιμου Μαγνήτη) αποτελεί αδιαμφισβήτητα την κορυφαία επιλογή όσον αφορά την απόδοση και την πυκνότητα ισχύος. Είναι η ιδανική λύση για οχήματα όπου η μεγάλη αυτονομία και οι επιδόσεις είναι το ζητούμενο. Ωστόσο, η εξάρτησή του από τις σπάνιες γαίες αποτελεί το μεγάλο του μειονέκτημα, τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά.[5]

Ο Κινητήρας IM (Επαγωγικός) αποδεικνύεται ως η πιο ισορροπημένη λύση. Η στιβαρότητά του, η αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες και η εξαιρετική συμπεριφορά του σε υψηλές ταχύτητες τον καθιστούν αναντικατάστατο, συχνά ως και για δεύτερο κινητήρα σε τετρακίνητα συστήματα (AWD) για υποβοήθηση στον αυτοκινητόδρομο[6].

Μετάπειτα έχουμε τον Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Ψήκτρες (BLDC). Ενώ για τα επιβατικά αυτοκίνητα υψηλών επιδόσεων μειονεκτεί λόγω του "κυματισμού ροπής" (torque ripple) που προκαλεί θόρυβο και κραδασμούς στις υψηλές ταχύτητες, αποτελεί την κορυφαία επιλογή για την ελαφρά ηλεκτροκίνηση (Light Electric Vehicles - LEVs). Σε εφαρμογές όπως ηλεκτρικά ποδήλατα (e-bikes), σκούτερ (e-scooters) και τρίκυκλα, ο BLDC προσφέρει τον βέλτιστο συνδυασμό απλότητας ελέγχου, υψηλής αξιοπιστίας και χαμηλού κόστους συντήρησης, χωρίς την πολυπλοκότητα των συστημάτων ψύξης που απαιτούν οι μεγαλύτεροι κινητήρες[11].

Τέλος οι Κινητήρες SRM (Εναλλασσόμενης Απρόθυμης) αντιπροσωπεύουν το μέλλον του χαμηλού κόστους. Αν και σήμερα υστερούν σε ποιότητα λειτουργίας (θόρυβος/ κραδασμοί), η παντελής απουσία μαγνητών τους καθιστά τη μοναδική λύση που είναι απρόσβλητη από τις διακυμάνσεις τιμών των υλικών. Με την εξέλιξη των αλγορίθμων ελέγχου, αναμένεται να κερδίσουν έδαφος σε οχήματα πόλης και χαμηλού προϋπολογισμού.[7]

Στην τελική δεν υπάρχει "νικητής" που να καλύπτει όλες τις ανάγκες. Η τάση της αγοράς κινείται πλέον προς υβριδικά συστήματα μετάδοσης, όπου συνδυάζονται διαφορετικοί τύποι κινητήρων στο ίδιο όχημα εκμεταλλευόμενοι έτσι τα πλεονεκτήματα κάθε τεχνολογίας. Το επικρατέστερο σενάριο για οχήματα υψηλών επιδόσεων είναι η χρήση ενός επαγωγικού κινητήρα (IM) στον μπροστινό άξονα για cruising με ελαχιστοποιημένες αντιστάσεις, και ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (PMSM) στον πίσω άξονα για μέγιστη επιτάχυνση και ανάκτηση ενέργειας. Παράλληλα, η ωρίμανση τεχνολογιών όπως οι Axial Flux και οι κινητήρες χωρίς σπάνιες γαίες θα επιτρέψει τη δημιουργία πιο βιώσιμων και οικονομικά προσιτών οχημάτων, καθιστώντας την ηλεκτροκίνηση προσβάσιμη στο ευρύ κοινό.

## 10<sup>ο</sup> Βιβλιογραφία

- [1] Wikipedia. (n.d.). *Electric car* [https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρικό\\_αυτοκίνητο](https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρικό_αυτοκίνητο)
- [2] Besen Group. (n.d.). *History of electric vehicles*. <https://www.besen-group.com/el/history-of-electric-vehicles/>
- [3] Gocar.gr. (n.d.). *Η ιστορία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου*. [https://www.gocar.gr/news/feed/37862\\_Η\\_istoria\\_toy\\_hlektrikoy\\_aytokinhtoy.html](https://www.gocar.gr/news/feed/37862_Η_istoria_toy_hlektrikoy_aytokinhtoy.html)
- [4] Car and Motor. (n.d.). *Πώς λειτουργούν οι ηλεκτρικοί κινητήρες*. <https://www.carandmotor.gr/electric/nea/pos-leitoyrgoyn-oi-ilektrikoi-kinitires>
- [5] Χρονάκης, Ι. (2022). *Ηλεκτροκίνητα οχήματα*. Πτυχιακή Εργασία, ΕΛΜΕΠΑ: <https://apothesis.lib.hmu.gr/bitstream/handle/20.500.12688/10692/ChronakisIoannis2022.pdf>
- [6] Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. (n.d.). *Μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος* <https://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/54094/21611.pdf>
- [7] Χαροκοπάκης, Γ. (2022). *Μελέτη SRM κινητήρων*. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. [https://repo.lib.duth.gr/jspui/bitstream/123456789/15394/1/CharokopakisG\\_2022.pdf](https://repo.lib.duth.gr/jspui/bitstream/123456789/15394/1/CharokopakisG_2022.pdf)
- [8] About Motors. (n.d.). *PMSM motor control*: <https://about-motors.com/motorcontrol/pmsm/>
- [9] 3Phase Motor. (n.d.). *Disadvantages of induction motor* <https://www.3phase-motor.com/post/what-are-the-disadvantages-of-an-induction-motor/>
- [10] Nidec. (n.d.). *Motor basics*. <https://www.nidec.com/en/technology/motor/basic/00022/>
- [11] Assun Motor. (n.d.). *BLDC motor*. <https://assunmotor.com/blog/brushless-dc-motor/>
- [12] Mechtex. (n.d.). *Introduction to BLDC motors*. <https://mechtex.com/blog/introduction-of-bl-dc-motor>
- [13] Laserax. (n.d.). *Hairpin motor*. Διαθέσιμο στο: <https://www.laserax.com/blog/hairpin-motor>
- [14] Wikipedia. (n.d.). *Synchronous motor (PMSM)*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_motor)
- [15] Wikipedia. (n.d.). *Induction motor*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Induction\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor)
- [16] Wikipedia. (n.d.). *Brushless DC electric motor*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless\\_DC\\_electric\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor)
- [17] Wikipedia. (n.d.). *Switched reluctance motor*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Switched\\_reluctance\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Switched_reluctance_motor)
- [18] Wikipedia. (n.d.). *Axial flux motor*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Axial\\_flux\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Axial_flux_motor)
- [19] Zeraoulia, M., Benbouzid, M. E. H., & Diallo, D. (2006). *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems* [https://www.researchgate.net/publication/3333394\\_Electric\\_Motor\\_Drive\\_Selection\\_Issues\\_for\\_HEV\\_Propulsion\\_Systems\\_A\\_Comparative\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/3333394_Electric_Motor_Drive_Selection_Issues_for_HEV_Propulsion_Systems_A_Comparative_Study)

[20] Yang, Z., Shang, F., Brown, I. P., & Krishnamurthy, M. (2015). *Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor.:*  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7268806>

- YouTube.(n.d.).[ Axial Flux Motors Explained: The Future of EV Powertrains?].  
<https://www.youtube.com/watch?v=dCO633KE7RA>
- YouTube. (n.d.).[Comparison of Electric Motor Drive for Electric Vehicle].  
<https://www.youtube.com/watch?v=Hlod8cusBms>
- YouTube. (n.d.). [Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it].  
<https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio>
- YouTube. (n.d.). [What is a SYNCHRONOUS MOTOR and how does it work?].  
<https://www.youtube.com/watch?v=Tk31NBSAgEg>
- YouTube.(n.d.).[How does an Induction Motor work?].  
[https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP\\_3o](https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o)
- YouTube. (n.d.). [How Electric Motors Work - 3 phase AC induction motors ac motor]. [https://www.youtube.com/watch?v=59HBolXzX\\_c](https://www.youtube.com/watch?v=59HBolXzX_c)
- YouTube. (n.d.). [Brushless DC Motor, How it works ?].  
<https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac>
- YouTube. (n.d.). [Brushless Motor - How they work BLDC ESC PWM].  
<https://www.youtube.com/watch?v=yiD5nCfmbV0>