

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

— ΑΣΠΑΙΤΕ —

ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

Πτυχιακή Εργασία

Φοιτητές: Δουράλας Θεόδωρος | Μπέρμπερι Κλέα

ΑΜ: 1086 | 1120

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΕΚΠ/ΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρίτσας Λεωνίδα

Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία: Μάιος 2020

ΔΟΥΡΑΛΛΑΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Όνομα Πρώτου Φοιτητή

ΜΠΕΡΜΠΕΡΙ ΚΛΕΑ.

Όνομα Δεύτερου Φοιτητή

**Copyright © ΔΟΥΡΑΛΛΑΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ, ΜΑΪΟΣ 2020
ΜΠΕΡΜΠΕΡΙ ΚΛΕΑ**

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της ΑΣΠΑΙΤΕ.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας σε όσους μας βοήθησαν για την δημιουργία της.

Ευχαριστούμε θερμά, τον Καθηγητή μας κ. Λεωνίδα Δρίτσα, που δέχθηκε να συνεργαστεί μαζί μας σε αυτή την εργασία, καθώς και για την συνεχή ενθάρρυνσή, υπομονή και καθοδήγηση του όλη αυτή την περίοδο.

Τέλος ευχαριστούμε τις οικογένειες μας και τους φίλους μας για την πολύτιμη στήριξή τους.

Πίνακας περιεχομένων

ΑΣΠΑΙΤΕ.....	0
Περίληψη	5
Κεφάλαιο 1	7
Ηλεκτρικά οχήματα και οφέλη από την χρήση τους.....	7
1.1 Ιστορία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.....	7
1.2 Τι είναι ηλεκτρικό αυτοκίνητο.....	8
1.3 Το σύστημα κίνηση στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο.....	11
1.4 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικού αυτοκινήτου.....	13
1.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	14
Κεφάλαιο 2	15
Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε EV.....	15
2.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος.....	15
2.1.1 Δομή κινητήρα Σ.Ρ.....	16
2.1.2 Κινητήρας Σ.Ρ. χωρίς ψήκτρες.....	19
2.1.3 Αρχή λειτουργίας κινητήρα Σ.Ρ.....	20
2.1.4 Μοντελοποίηση κινητήρα Σ.Ρ.....	21
2.2 Επαγωγικός κινητήρας.....	24
2.2.1 Δομή επαγωγικού κινητήρα.....	25
2.2.2 Αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα.....	27
2.2.3 Μοντελοποίηση επαγωγικού κινητήρα.....	31
2.3 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών.....	34
2.3.1 Υλικά μόνιμων μαγνητών.....	35
2.3.2 Ρυθμίσεις συστήματος.....	38
2.3.3 Κινητήρες μόνιμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες.....	39
2.3.4 Δομή κινητήρα μόνιμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες.....	40
2.3.5 Αρχή λειτουργίας κινητήρα μόνιμων μαγνητών.....	44
2.4 Κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης.....	45
2.4.1 Δομή κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης.....	45
2.4.2 Αρχή λειτουργίας κινητήρα μαγνητικής μαγνητικής αντίδρασης.....	48
2.5 Σύγκριση των κινητήρων.....	53
2.6 Απόδοση κινητήρων.....	55
Κεφάλαιο 3	57
Έλεγχος των κινητήρων σε ηλεκτρικά οχήματα.....	57

3.1 Έλεγχος κινητήρων Σ.Ρ.	57
3.1.1 Έλεγχος ταχύτητας κινητήρων Σ.Ρ.	57
3.1.2 Αναγεννητική πέδηση στις μηχανές Σ.Ρ.....	60
3.2 Έλεγχος επαγωγικών κινητήρων	62
3.2.1 Έλεγχος μεταβαλλόμενης τάσης και συχνότητας (VVVF)	62
3.2.2 Έλεγχος προσανατολισμού πεδίου (FOC).....	66
3.2.3 Άμεσος έλεγχος ροπής (DTC)	73
Κεφάλαιο 4	79
Συμπεράσματα – Βιβλιογραφία.....	79
4.1 Συμπεράσματα	79
4.2 Βιβλιογραφία	80
Παράρτημα	81

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό την παρουσίαση τεσσάρων ειδών ηλεκτρικών κινητήρων, που επιλέγονται για την οδήγηση ηλεκτρικών οχημάτων. Οι κινητήρες αυτοί είναι: (1) ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος, (2) ο επαγωγικός κινητήρας, (3) ο κινητήρας μόνιμων μαγνητών και (4) ο κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης.

Στο κεφάλαιο 1, γίνεται μια παρουσίαση του ηλεκτρικού οχήματος, της ιστορίας του, της αρχής λειτουργίας του, καθώς και τα οφέλη που αποκομίζουμε από την χρήση του.

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα τέσσερα είδη ηλεκτρικών κινητήρων που προαναφέραμε. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύουμε την δομή, την αρχή λειτουργίας του κάθε κινητήρα, επιπλέον ασχολούμαστε με την μοντελοποίηση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος και του επαγωγικού κινητήρα. Τέλος, συγκρίνουμε και αξιολογούμε τα είδη κινητήρων ανάλογα με την καταλληλότητα τους για χρήση σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Στο 3^ο κεφάλαιο, εστιάζουμε στα δύο είδη κινητήρων, τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος και τον επαγωγικό κινητήρα, αναλύοντας τον τρόπο ελέγχου αυτών των κινητήρων στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται και η αναγεννητική πέδηση. Για τον επαγωγικό κινητήρα παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες ελέγχου: μεταβλητής τάσης μεταβλητής συχνότητας (*Variable-Voltage Variable-Frequency Control*, VVVF), προσανατολισμού πεδίου (*field-oriented control*, FOC) και τον άμεσο έλεγχο ροπής (*Direct Torque Control*, DTC).

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικό αυτοκίνητο, κινητήρας συνεχούς ρεύματος, επαγωγικός κινητήρας, κινητήρας μόνιμων μαγνητών, κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης, δομή κινητήρα, αρχή λειτουργίας κινητήρα, μοντελοποίηση κινητήρα, έλεγχος κινητήρα, αναγεννητική πέδηση,

Abstract

The aim of this thesis is to present four types of electric motors, which are selected for driving electric vehicles. These motors are: (1) the DC motor, (2) the induction motor, (3) the permanent magnet motor and (4) the magnetic reaction motor.

In Chapter 1, there is a presentation of the electric vehicle, its history, its operating principle, as well as the benefits we derive from its use.

In Chapter 2, the four types of electric motors mentioned above are presented in more detail. In this chapter we analyze the structure and the principle of operation of each engine. In addition we deal with the modeling of the DC motor and the induction motor. Finally, we compare and evaluate the types of engines according to their suitability for use in electric cars.

In Chapter 3, we focus on the two types of motors, the DC motor and the induction motor, analyzing how these motors are controlled in the electric car. For the DC motor, we also present the regenerative braking. For the induction motors are presented the control methodologies VVVF (Variable-Voltage Variable-Frequency Control), FOC (field-oriented control) and DTC (Direct Torque Control).

Keywords: Electric car, DC motor, induction motor, permanent magnet motor, magnetic reaction motor, motor structure, principle of electric motor, motor modeling, motor control, regenerative braking,

Κεφάλαιο 1

Ηλεκτρικά οχήματα και οφέλη από την χρήση τους

1.1 Ιστορία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicle ή EV) που στις μέρες μας λανσάρονται ως κάτι πρωτοποριακό και νέο, αποτελούν ανακάλυψη από το 1834. Το πρώτο EV κατασκευάστηκε από τον Thomas Davenport, το οποίο ήταν ένα τρίκυκλο που τροφοδοτούνταν με μπαταρία. Τα EVs όμως δεν κυριάρχησαν στον τομέα της μεταφοράς, καθώς εκτοπίστηκαν από τα οχήματα τα οποία έφεραν κινητήρα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine Vehicles or ICEVs). Το αποτέλεσμα μιας έρευνας του 1900 μας δείχνει ότι από μια ετήσια πώληση 4200 αυτοκινήτων στις ΗΠΑ, το 38% ήταν EVs, το 22% ICEVs, και το 40% ατμοκίνητα οχήματα. Εκείνον τον καιρό, τα EVs ήταν το προτιμώμενο μέσο μεταφοράς της πλούσιας ελίτ. Για να κατανοήσουμε καλύτερα το ύψος του κόστους των EVs εκείνης της εποχής, φτάνει να κοιτάξουμε την τιμή σε μια Rolls Royce της σημερινής εποχής. Εκείνος ο οποίος «έδωσε ένα τέλος» στα EVs ήταν ο Ford. Το μαζικής παραγωγής Model T του Ford μπορούσε να προσφέρει μια διπλάσια ή και τριπλάσια απόσταση (απόσταση χρησιμοποιώντας την ρεζέρβα καυσίμου), από εκείνη που μπορούσαν να προσφέρουν τα EVs (range), με συγκριτικά μικρότερο κόστος. Κατά την δεκαετία του '30, τα EVs είχαν σχεδόν εξαφανιστεί από το προσκήνιο. Η αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τα EVs επιστρέφει ξανά κατά το ξέσπασμα της ενεργειακής κρίσης και την έλλειψη του πετρελαίου την δεκαετία του '70. Λόγω της αυξανόμενης ανησυχίας σχετικά με την ποιότητα του αέρα και τις πιθανές συνέπειες του φαινομένου του θερμοκηπίου στη δεκαετία του '80, επιταχύνθηκε ο ρυθμός ανάπτυξης των EVs.

1.2 Τι είναι ηλεκτρικό αυτοκίνητο

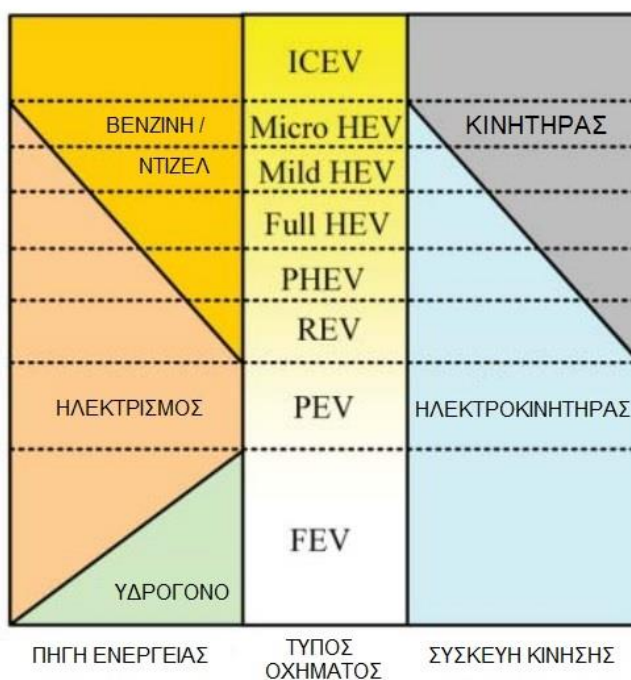
Τα Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα (EVs) χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες συστοιχίες συσσωρευτών. Τα EVs χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες αντί των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Τα EVs χωρίζονται σε:

- PEV (Plug-in Electric Vehicle),
- HEV (Hybrid Electric Vehicle),
- FEV (Full Electric Vehicle),

ανάλογα με τις πηγές ενέργειάς και τις συσκευές οδήγησής τους.

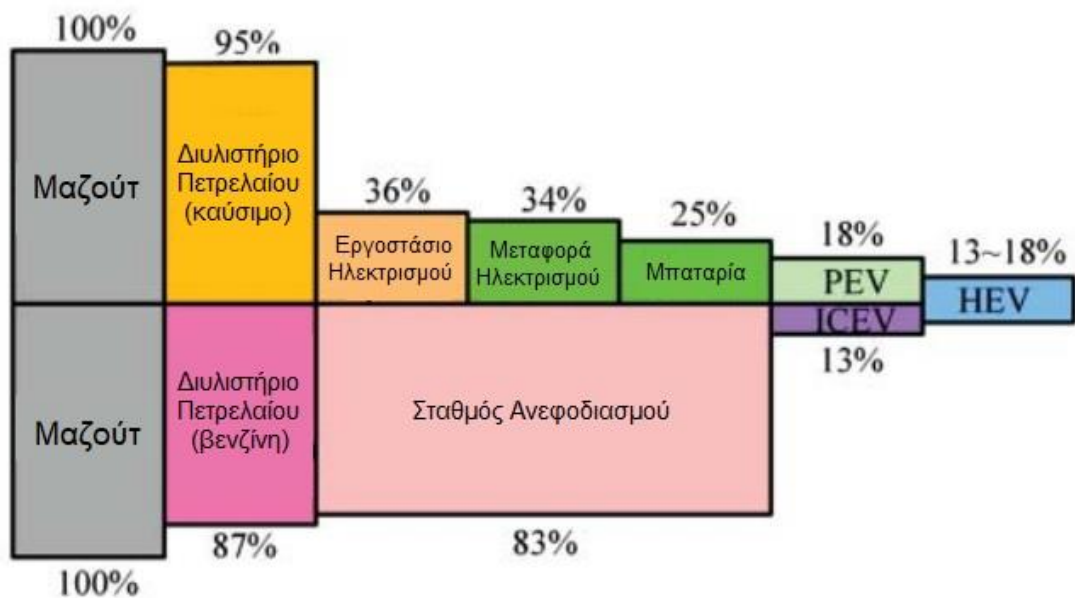
Ένα ηλεκτρικό όχημα PEV τροφοδοτείται μόνο από ηλεκτρισμό, ενώ η κίνηση του οδηγείται αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα. Σε ένα ηλεκτρικό όχημα FEV η τροφοδοσία προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από το υδρογόνο, ενώ η κίνηση οδηγείται αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα. Η τροφοδοσία ενός ηλεκτρικού οχήματος HEV προέρχεται τόσο από ηλεκτρισμό όσο και από βενζίνη/ντίζελ, ενώ για την κίνηση του είναι αποτέλεσμα του ηλεκτροκινητήρα καθώς και του κινητήρα. Προκειμένου να γίνει διάκριση μεταξύ των μέσων ανεφοδιασμού, το HEV μπορεί να κατηγοριοποιηθεί περαιτέρω στο συμβατικό HEV και στο HEV το οποίο συνδέεται σε ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα (gridable HEV). Το συμβατικό ανεφοδιάζεται αποκλειστικά με βενζίνη / ντίζελ στα πρατήρια καυσίμων, ενώ το gridable HEV μπορεί να φορτιστεί με ηλεκτρική ενέργεια μέσω θυρών φόρτισης. Με βάση το επίπεδο υβριδισμού και το χαρακτηριστικό λειτουργίας μεταξύ του ηλεκτροκινητήρα και του κινητήρα, το συμβατικό HEV μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε micro HEV, mild HEV και full HEV. Επιπλέον με βάση το συντονισμό μεταξύ του ηλεκτροκινητήρα και του κινητήρα, το gridable HEV μπορεί να χωριστεί περαιτέρω στο PHEV (Plug-in HEV) και το ηλεκτρικό όχημα με επέκτασης εμβέλειας (REV Range-Extended EV).



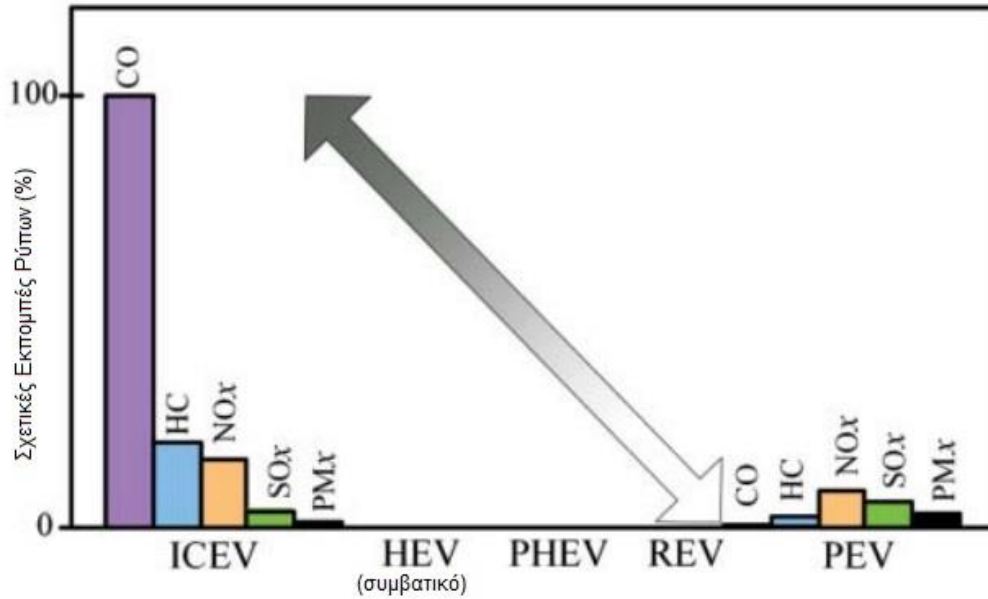
Εικόνα 1: Ταξινόμηση των EVs

Προερχόμενα από το αργό πετρέλαιο, η βενζίνη και το ντίζελ είναι τα κύρια υγρά καύσιμα για τα ICEVs. Τα EVs αποτελούν μια εξαιρετική λύση για την αντιμετώπιση αυτής της “ανθυγιεινής εξάρτησης”, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να δημιουργηθεί από σχεδόν όλους τους τύπους ενεργειακών πόρων (ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, πυρηνική ενέργεια, βιομάζα, κτλ). Επιπλέον, τα EVs μπορούν να ανακτήσουν την κινητική ενέργεια κατά τη διάρκεια της πέδησης και να την χρησιμοποιήσουν για επαναφόρτιση της μπαταρίας, ενώ τα ICEVs διαχέουν με σπατάλη αυτή την κινητική ενέργεια ως θερμότητα στους δίσκους των φρένων. Με αυτήν την τεχνολογία αναγεννητικής πέδησης, η ενεργειακή απόδοση των EVs μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω κατά 10%. Σε πολλές μητροπόλεις, οι ICEVs ευθύνονται για περισσότερο από το 50% των επιβλαβών ατμοσφαιρικών ρύπων και ενώσεων που σχηματίζουν νέφη. Για να μειωθεί η ατμοσφαιρική ρύπανση από τις οδικές μεταφορές, η χρήση EVs είναι η πιο βιώσιμη επιλογή.

Σίγουρα, τα περισσότερα EV προσφέρουν μηδενικές οδικές εκπομπές (roadside emissions). Λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές από τα διυλιστήρια για την παραγωγή βενζίνης για τα ICEV και τις εκπομπές από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα EV, οι συνολικές επιβλαβείς εκπομπές των EV εξακολουθούν να είναι πολύ χαμηλότερες από εκείνες των ICEVs. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνολική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) μπορεί επίσης να μειωθεί κατά περίπου 5% με τη χρήση των EV και ενεργειακά αποδοτικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.



Εικόνα 2: Ενεργειακή Απόδοση των EVs



Εικόνα 3: Συνολικές Επιβλαβείς Εκπομπές Ρύπων των EVs

Η βελτίωση αυτή μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω εάν ενσωματωθεί με υψηλότερα ποσοστά καθαρής ή ανανεώσιμης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά μπορεί ακόμη και να είναι αρνητική όταν υιοθετούν μη αποδοτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα. (inefficient coal-fired) Επί του παρόντος, το συμβατικό HEV είναι διαθέσιμο στο εμπόριο και ευρέως αποδεκτό ως ενεργειακά αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον όχημα, ενώ το PEV γίνεται εμπορικά διαθέσιμο και επισημαίνεται με ετικέτα μηδενικών εκπομπών. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν πολλές προκλήσεις και ευκαιρίες για την έρευνα και ανάπτυξη των EV.

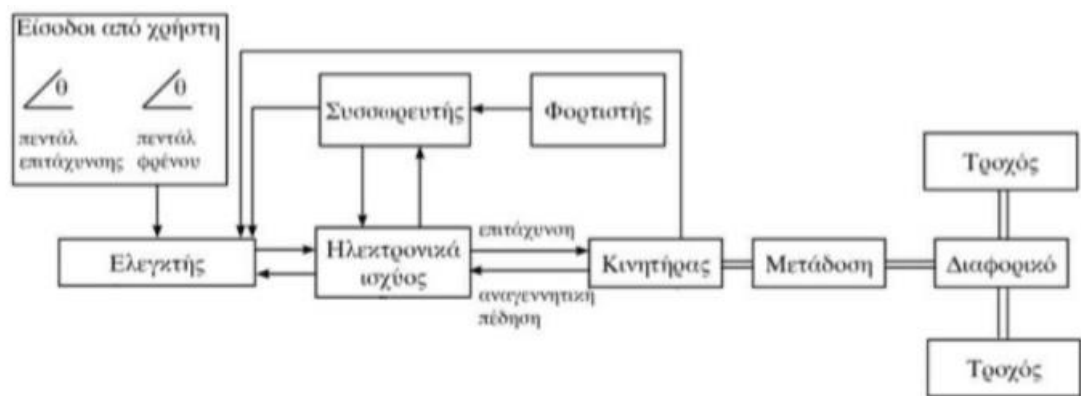
1.3 Το σύστημα κίνηση στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Όπως αναφέραμε προηγουμένως το χαρακτηριστικό ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι ότι η κίνηση παρέχεται αποκλειστικά από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες, καθώς και ότι η πηγή ενέργειας είναι ο ηλεκτρισμός μέσω μπαταριών.



Εικόνα 4: Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Ο ηλεκτρικός και μηχανικός εξοπλισμός, που μετατρέπει την ενέργεια της πηγής σε κινητική ονομάζεται σύστημα πρόωσης. Στην Εικόνα 4 φαίνεται το σύστημα κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου, που τροφοδοτείται από φορητή πηγή ενέργειας (Μπαταρία, DC ρεύμα). Τα υποσυστήματα του συστήματος κίνησης ενός EV είναι: ο ελεγκτής με τον μετατροπέα (σύστημα οδήγησης), η πηγή ενέργειας, ο κινητήρας και η μετάδοση. Στην Εικόνα 5 βλέπουμε μια πιο αναλυτική δομή του συστήματος κίνησης, καθώς και την αλληλεπίδραση των υποσυστημάτων.



Εικόνα 5: Αναλυτική δομή του συστήματος κίνησης

Οι παραδοσιακή πηγή ενέργειας στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι οι μπαταρίες (Συσσωρευτές). Οι μπαταρίες είναι επαναφορτιζόμενες με βασικό τύπο συσσωρευτών τον μολύβδου-οξέως. Όμως, η ανάγκη για βελτιωμένα χαρακτηριστικά είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη και άλλων ειδών συσσωρευτών όπως είναι οι:

- Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου (NiCd),
- Συσσωρευτές Νικελίου μετάλλου-Υδριδίου (NiMH),

- Συσσωρευτές Ιόντων λιθίου (LiON),
- Συσσωρευτές Λιθίου-Ιόντων πολυμερών και
- Εξελιγμένοι συσσωρευτές μολύβδου-οξέως.

Αυτά τα είδη έχουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ισχύος, επίσης έχουν μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.

1.4 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Σε ένα Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο τα μηχανικά του τμήματα διαφέρουν πολύ από τα μέρη ενός αυτοκινήτου με μια μηχανή εσωτερικής καύσης. Ένα EV εξαρτάται απλά από τις μπαταρίες. Τα EVs έχουν συνήθως τρία βασικά τμήματα: ο ελεγκτής, η μπαταρία και η ηλεκτρική μηχανή. Στα Ηλεκτρικά αυτοκίνητα, το πεντάλ επιτάχυνσης συνδέεται με ένα ποτενσιόμετρο, το οποίο στέλνει ένα σήμα σε έναν ελεγκτή που του λέει πόση ενέργεια πρέπει να στείλει η μπαταρία στην ηλεκτρική μηχανή, ανάλογα με την δύναμη που ασκεί ο οδηγός στο πεντάλ.

1.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι:

Πλεονεκτήματα:

1. Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία οφείλεται κυρίως στους ρύπους συμβατικών οχημάτων.
2. Μείωση της ηχορύπανσης, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο είναι ουσιαστικά αθόρυβο συγκρινόμενο με τα οχήματα που φέρουν Μ.Ε.Κ..
3. Είναι περισσότερο αξιόπιστα από τα συμβατικά οχήματα και σαφώς έχουν πιο εύκολο χειρισμό από ένα συμβατικό αυτοκίνητο.
4. Η κατασκευή του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι πιο εύκολη γιατί ο ηλεκτροκινητήρας είναι πολύ απλός στη δομή του σε σύγκριση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.
5. Δεν εμφανίζονται προβλήματα από την χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς στους ηλεκτροκινητήρες δεν χρησιμοποιούν φίλτρα και λάδι και δεν απαιτείται, συνήθως, νερό για την ψύξη τους..
6. Δεν έχουμε σπατάλη ενέργειας από στάσεις. Επειδή, όταν δεν κινείται (π.χ. στάση σε κυκλοφοριακή συμφόρηση ή σε σηματοδότες) δεν καταναλώνει ενέργεια.
7. Η διάρκεια ζωής μιας ηλεκτρικής μηχανής αναμένεται να είναι πάνω από 1,000,000 μίλια, που την κάνει αρκετά πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με ενός συμβατικού αυτοκινήτου που αναμένεται να διαρκέσει 100,000 μίλια.

Μειονεκτήματα:

1. Το ηλεκτρικό όχημα έχει μικρή αυτονομία σε σύγκριση με το συμβατικό.
2. Εξαιτίας της ανεπάρκειας των συσσωρευτών, έχει μικρότερες επιδόσεις από ένα συμβατικό αυτοκίνητο.
3. Το κόστος των συσσωρευτών, το οποίο επηρεάζει το συνολικό κόστος του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.
4. Στις περισσότερες χώρες υπάρχουν ελάχιστα σημεία φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου, σε αντίθεση με τους σταθμούς καυσίμων, όπου εφοδιάζονται τα συμβατικά οχήματα και τους συναντάμε παντού.
5. Για την φόρτιση των συσσωρευτών ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ ένα συμβατικό αυτοκίνητο χρειάζεται ελάχιστο χρόνο.

Κεφάλαιο 2

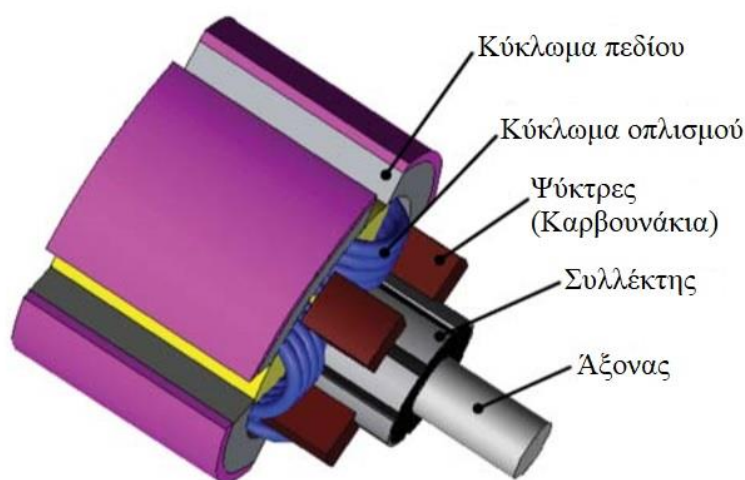
Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε EV

2.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος εφευρέθηκαν από τον Βρετανό επιστήμονα William Sturgeon το 1832 και λειτουργούν για περισσότερο από έναν αιώνα. Από την εφεύρεση των μηχανών AC, ο ρόλος των μηχανών συνεχούς ρεύματος για ηλεκτρική κίνηση σταδιακά εξαλείφεται. Παρόλα αυτά, μερικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα εξακολουθούν να χρησιμοποιούν μηχανές συνεχούς ρεύματος κυρίως για λόγους απλότητας.

2.1.1 Δομή κινητήρα Σ.Ρ.

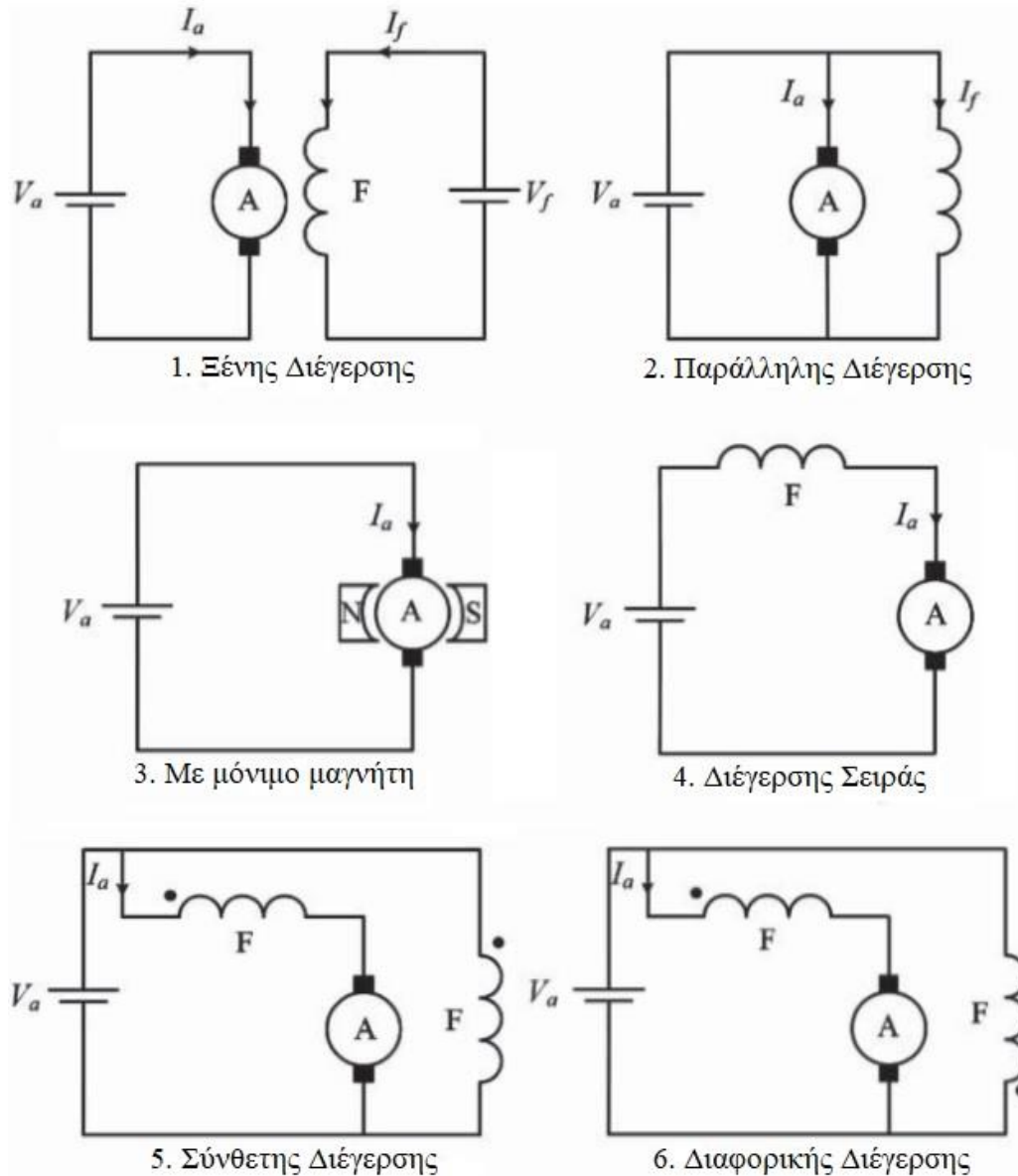
Στην εικόνα 6 φαίνεται η βασική δομή μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος που αποτελείται κυρίως από τον στάτη (stator) τον ρότορα (rotor) και τον συλλέκτη (commutator). Ο στάτης είναι το κύκλωμα πεδίου που ενσωματώνει την περιέλιξη πεδίου ή του μόνιμους μαγνήτες (permanent magnets) (PMs) για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου διέγερσης, ενώ ο ρότορας είναι το κύκλωμα οπλισμού που εγκαθιστά την περιέλιξη του οπλισμού όπου το ρεύμα του οπλισμού είναι αμφίδρομο και μεταβιβάζεται από τον συλλέκτη μέσω των ψυκτρών (carbon brushes).



Εικόνα 6: Διάγραμμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Διαφορετικές ρυθμίσεις των κυκλωμάτων πεδίου και οπλισμού δημιουργούν διαφορετικούς τύπους μηχανών DC, παρέχοντας έτσι διαφορετικές χαρακτηριστικές ταχύτητας-ροπής. Όπως φαίνεται στην εικόνα 7, ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος μπορεί να ταξινομηθεί ως:

1. Ξένης διέγερσης (separately excited dc motor)
2. Παράλληλης διέγερσης (shunt dc motor)
3. Με μόνιμο μαγνήτη (permanent magnet dc motor)
4. Διέγερσης σειράς (series dc motor)
5. Σύνθετης διέγερσης (Cumulative compound)
6. Διαφορικής διέγερσης (Differential compound)



Εικόνα 7: Δομές μηχανών DC

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, τα κυκλώματα πεδίου και οπλισμού τροφοδοτούνται χωριστά από διαφορετικές πηγές τάσης έτσι ώστε τα ρεύματα του να ελέγχονται ανεξάρτητα.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης τα κυκλώματα πεδίου και οπλισμού συνδέονται παράλληλα και τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή έτσι ώστε τα ρεύματα τους να ελέγχονται ταυτόχρονα.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, το κύκλωμα πεδίου συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού έτσι ώστε τα ρεύματα πεδίου και οπλισμού να ελέγχονται ταυτόχρονα.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης, υπάρχουν δύο κυκλώματα πεδίου, όπου ένα συνδεδεμένο σε σειρά και το άλλο συνδεδεμένο παράλληλα με το κύκλωμα οπλισμού, ενώ η ροή του πεδίου σειράς βρίσκεται στην ίδια

κατεύθυνση με εκείνη του παράλληλου (shunt) πεδίου. Σε αντίθεση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης, ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης DC έχει τη ροή του πεδίου σειράς να αντιτίθεται στη ροή του παράλληλου πεδίου.

Με την αντικατάσταση της περιέλιξης πεδίου και της δομής του πόλου με μόνιμους μαγνήτες (PMs), ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες έχει σχετικά υψηλότερη πυκνότητα ισχύος και υψηλότερη απόδοση από τους παραπάνω τύπους τυλιγμάτων πεδίου (wound-field types) εξαιτίας του οφέλους εξοικονόμησης χώρου από τους μόνιμους μαγνήτες (PMs) και την απουσία απωλειών πεδίου. Ωστόσο, δεδομένου ότι η διέγερση πεδίου στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες είναι ανεξέλεγκτη, δεν μπορεί να επιτύχει τις χαρακτηριστικές λειτουργίας με έλεγχο ροής.

Τόσο οι κινητήρες τυλιγμάτων πεδίου (wound-field) όσο και οι κινητήρες DC μόνιμων μαγνητών πάσχουν από το ίδιο βασικό πρόβλημα λόγω της χρήσης του συλλέκτη και των ψηκτρών. Ο συλλέκτης προκαλεί κυματισμούς ροπής (torque ripples) και περιορίζει την ταχύτητα λειτουργίας, ενώ τα καρβουνάκια ευθύνονται για τριβές και παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων. Επιπλέον, λόγω φθοράς, είναι απαραίτητη η τακτική συντήρηση του συλλέκτη και των ψηκτρών. Αυτά τα μειονεκτήματα καθιστούν τα μηχανήματα συνεχούς ρεύματος λιγότερο αξιόπιστα και ακατάλληλα για λειτουργία χωρίς συντήρηση, περιορίζοντας έτσι την εφαρμογή τους στα σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

2.1.2 Κινητήρας Σ.Ρ. χωρίς ψήκτρες

Οι κινητήρες DC διακρίνονται σε αυτούς που έχουν ψήκτρες και συλλέκτη και σε αυτούς που δεν έχουν τα στοιχεία αυτά. Στους τελευταίους, που λέγονται κινητήρες DC χωρίς ψήκτρες (DC brushless motors), η δράση του συλλέκτη δεν γίνεται μηχανικά αλλά ηλεκτρονικά (από την οδήγηση).

Οι κινητήρες DC χωρίς ψήκτρες (Brushless DC motors) είναι μία αντιστροφή των κινητήρων DC μόνιμου μαγνήτη, όπου το πεδίο βρίσκεται τώρα στο δρομέα και το τύμπανο στο στάτη. Το ρόλο του συλλέκτη και των ψηκτρών τον παίζει τώρα η οδήγηση ημιαγωγών. Ένα κύκλωμα με αισθητήρες αναγνωρίζει τη θέση του δρομέα και ρυθμίζει την παροχή ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη έτσι ώστε να παράγει ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Οι κινητήρες αυτοί έχουν τα προτερήματα των κινητήρων DC χωρίς τα πιο σημαντικά προβλήματα, που είναι συνδεδεμένα με την παρουσία συλλέκτη και ψηκτρών. Η έλλειψη συλλέκτη τους καθιστά πολύ αξιόπιστους και είναι η πρώτη επιλογή όταν οι ώρες λειτουργίας ξεπερνούν τις 10.000. Συνήθεις χρήσεις είναι οι εργαλειομηχανές, οι αυτοματισμοί, οι μηχανές συσκευασίας, τα ρομπότ και οι μηχανές γραφείου (σκληροί δίσκοι, ανεμιστήρες υπολογιστών, κλπ.)

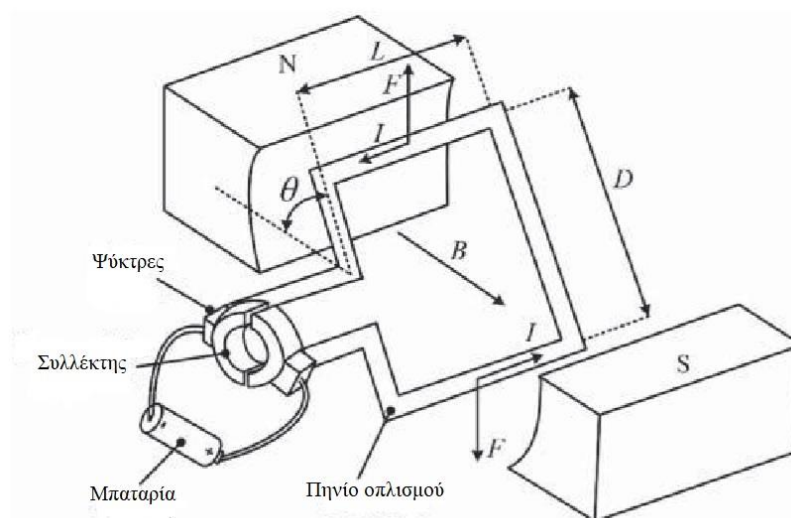
Αποδίδουν μεγάλη ροπή στο ονομαστικό φορτίο και κατά την εκκίνηση αλλά απορροφούν υψηλό ρεύμα εκκίνησης. Παράγουν χαμηλό ηλεκτρικό θόρυβο. Μπορούν να φτάσουν σε ιδιαίτερα υψηλές στροφές (60.00 rpm) αποδίδοντας ικανοποιητική ροπή. Παράγονται σε σχετικά μεγάλο εύρος ισχύος που ξεκινά από μερικά W (κινητήρες ανεμιστήρων ηλεκτρονικών συσκευών) μέχρι μερικά kW.

Τα μειονεκτήματά τους είναι η απαραίτητη για αισθητήρες και ανάδραση (που όμως απαιτείται σε όλες τις εφαρμογές ελέγχου κλειστού βρόχου), η πολυπλοκότητα της ηλεκτρονικής τους οδήγησης και η χαμηλή απόδοσή τους, ιδίως σε χαμηλές τάσεις λειτουργίας. Γενικά, έχουν πολύ υψηλότερο κόστος από ένα κινητήρα DC μόνιμου μαγνήτη με ψήκτρες ενώ λειτουργίες που είναι απλές στους τελευταίους, όπως η αντιστροφή της φοράς περιστροφής, είναι εδώ πολύπλοκες.

Ο κινητήρας DC χωρίς ψήκτρες κατασκευάστηκε με σκοπό να επιλύσει το πρόβλημα των ψηκτρών στους κοινούς κινητήρες DC. Από αυτό το γεγονός έλκει και το όνομά του. Ένας κινητήρας DC χωρίς ψήκτρες αποτελείται από τέσσερα μέρη δηλαδή από (α) τον ηλεκτρονικό συλλέκτη (οδήγηση), (β) τον αισθητήρα θέσης δρομέα, (γ) το στάτη και (δ) το δρομέα. Ο στάτης περιέχει τα τυλίγματα τυμπάνου τα οποία μοιάζουν με αυτά των επαγωγικών και σύγχρονων κινητήρων. Συνήθως, αυτά είναι τριφασικά τυλίγματα διανεμημένα κατά την περιφέρεια του στάτη και συνδεδεμένα σε σύνδεση αστέρα. Ο στάτης έχει συνήθως 4-6 πόλους. Ο δρομέας αποτελείται από τμήματα μόνιμου μαγνήτη έτσι ώστε να σχηματίζουν αντίστοιχους μαγνητικούς πόλους. Η κατασκευή των κινητήρων αυτών μοιάζει πολύ με αυτή των σύγχρονων κινητήρων όπου ο δρομέας είναι μόνιμος μαγνήτης.

2.1.3 Αρχή λειτουργίας κινητήρα Σ.Ρ.

Η εικόνα 8 δείχνει μια βασική διπολική DC μηχανή. Το κύκλωμα οπλισμού αποτελείται από ένα απλό πηνίο μονής περιστροφής (simple single-turn armature coil) που συνδέεται με μια DC πηγή μέσω ενός συλλέκτη δύο τμημάτων και ενός ζεύγους ψηκτρών. Ο συλλέκτης χρησιμεύει για να αντιστρέψει την κατεύθυνση της ροής ρεύματος διαμέσου του πηνίου οπλισμού, έτσι ώστε το εξωτερικό ρεύμα να ρέει πάντα μόνο σε μία κατεύθυνση· εν τω μεταξύ οι ψηκτρες επιτρέπουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ του περιστρεφόμενου συλλέκτη και της σταθερής πηγής DC (Ehsani, Gao και Emadi, 2009).



Εικόνα 8: Αρχή περιστροφής κινητήρα DC

Όταν η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και το αντίστοιχο επίπεδο του πηνίου (coil plane) ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό πεδίο, η δύναμη F που δημιουργείται σε κάθε πλευρά του πηνίου δίνεται από την σχέση:

$$F = BIL$$

Εξίσωση 1

όπου B είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής (magnetic flux density) που παράγεται από το κύκλωμα πεδίου στον στάτη, I είναι η ένταση του ρεύματος οπλισμού, και το L είναι το αξονικό μήκος του πηνίου οπλισμού (armature coil) στο ρότορα. Ως εκ τούτου, η αναπτυσσόμενη ροπή μπορεί να εκφραστεί ως:

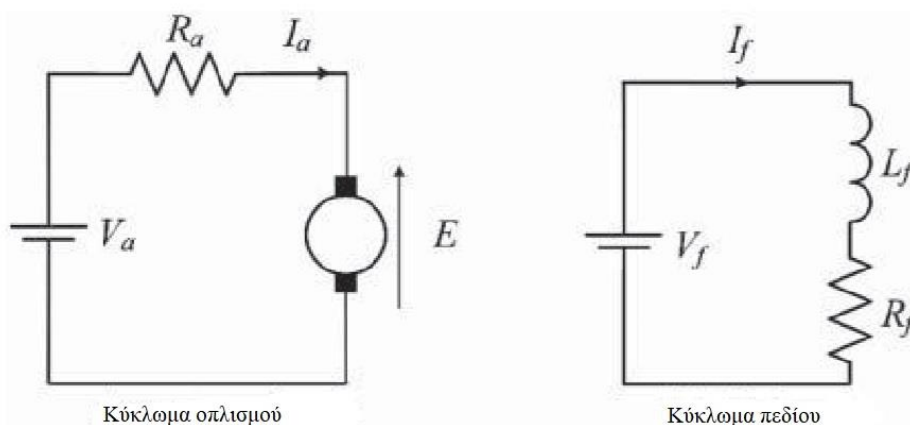
$$T = FD \cos \theta$$

Εξίσωση 2

όπου D είναι η διάμετρος του πηνίου οπλισμού ή αντίστοιχα ο ρότορας και θ είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου του πηνίου και του μαγνητικού πεδίου. Προκειμένου να παραχθεί η μέγιστη ροπή στρέψης, το πηνίο οπλισμού πρέπει να διεγερθεί στη θέση $\theta = 0^\circ$. Στην πράξη, εγκαθίστανται περισσότερα τμήματα συλλέκτη και ζεύγη ψηκτρών για να παράγουν συνεχή και σταθερή ροπή.

2.1.4 Μοντελοποίηση κινητήρα Σ.Ρ.

Η μοντελοποίηση των μηχανών DC είναι απλή. Βασικά, όλοι οι τύποι μηχανών DC μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα ισοδύναμο κύκλωμα του κυκλώματος οπλισμού και ένα ισοδύναμο κύκλωμα του κυκλώματος πεδίου ή απλά σταθερή ροή ανά πόλο όταν το πεδίο διεγείρεται από μόνιμους μαγνήτες.



Εικόνα 9: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα DC ξένης διέγερσης

Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 9, η λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος ελέγχεται από:

Εξίσωση 3	$E = K_e \Phi \omega_m$
Εξίσωση 4	$V_a = E + R_a I_a$
Εξίσωση 5	$T = K_e \Phi I_a$
Εξίσωση 6	$V_f = R_f I_f$
Εξίσωση 7	$\Phi = K_f I_f$

όπου E είναι η αντιηλεκτρομαγνητική δύναμη (EMF), K_e είναι η σταθερή τις αντιηλεκτρομαγνητικής δύναμης, ϕ είναι η ροή αέρα-διάκενου ανά πόλο, ω_m είναι η μηχανική ταχύτητα, V_a είναι η τάση οπλισμού, R_a είναι η αντίσταση κυκλώματος οπλισμού, I_a είναι το ρεύμα οπλισμού, T είναι η αναπτυσσόμενη ροπή, V_f είναι η τάση πεδίου, R_f είναι η αντίσταση κυκλώματος πεδίου, I_f είναι το ρεύμα πεδίου και K_f είναι η κλίση της χαρακτηριστικής μαγνήτισης, η οποία είναι στην ακόρεστη περιοχή.

Για αυτές τις μηχανές συνεχούς ρεύματος τυλιγμάτων πεδίου, η ροή είναι γενικά ανάλογη προς το ρεύμα πεδίου το οποίο μπορεί να ελέγχεται ανεξάρτητα από την τάση του πεδίου, εξαρτώμενη με την τάση του οπλισμού, εξαρτώμενη με το ρεύμα οπλισμού ή εξαρτώμενη τόσο από την τάση οπλισμού όσο και από το ρεύμα οπλισμού, αντιστοίχως, για τους ανεξάρτητες διέγερσης, παράλληλης διέγερσης, διέγερσης σειράς ή σύνθετης διέγερσης τύπους κινητήρων. Αντίθετα, η ροή είναι ουσιαστικά ανεξέλεγκτη για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες.

Χωρίς εξωτερικό έλεγχο, οι χαρακτηριστικές ταχύτητας-ροπής των μηχανών συνεχούς ρεύματος μπορούν εύκολα να εξαχθούν από τις εξισώσεις (3)-(7) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 10. Για τον κινητήρα DC ξένης διέγερσης, οι τάσεις του οπλισμού και του πεδίου διατηρούνται στην ονομαστική τιμή. Είναι στην πραγματικότητα ισοδύναμη με τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης και τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες στην ονομαστική ροή. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3)-(5), η αντίστοιχη χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής μπορεί να προκύψει:

$$T = \frac{K_e \Phi V_a}{R_a} = \frac{K_e^2 \Phi^2 \omega_m}{R_a}$$

Εξίσωση 8

Αυτή η χαρακτηριστική είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν καλή ρύθμιση ταχύτητας και κατάλληλη ρυθμιζόμενη ταχύτητα. Στην περίπτωση της μηχανής συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3)-(5) και (7), η αντίστοιχη χαρακτηριστική της ταχύτητας-ροπής μπορεί να εκφραστεί ως:

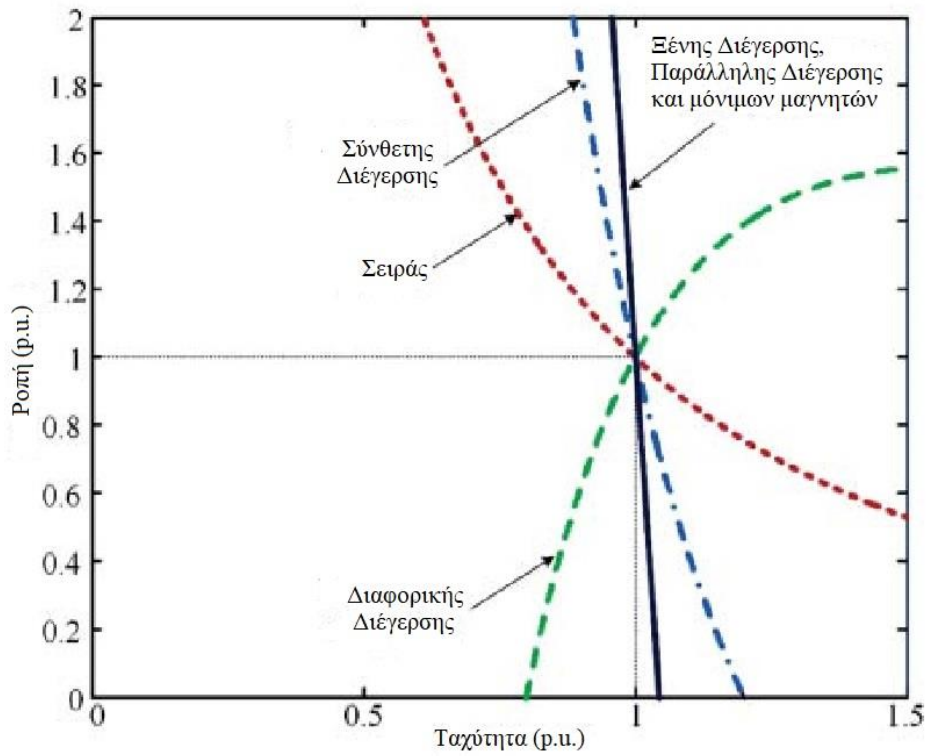
$$T = \frac{K_e K_f V_a^2}{(R_a + K_e K_f \omega_m)^2}$$

Εξίσωση 9

που δείχνει ότι η ταχύτητα σχετίζεται αντιστρόφως με τη ροπή. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης και μεγάλη υπερφόρτωση. Ωστόσο, πάσχει από το πρόβλημα υπερβολικής ταχύτητας όταν λειτουργεί με ονομαστική τάση χωρίς φορτίο ή ελαφρύ φορτίο. Στην περίπτωση του κινητήρα σύνθετης διέγερσης συνεχούς ρεύματος, η χαρακτηριστική της ταχύτητας-ροπής βρίσκεται μεταξύ αυτών των κινητήρων συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης και των κινητήρων συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, ανάλογα με τη σχετική ισχύ του παράλληλου πεδίου και του πεδίου σειράς.

Η αντίστοιχη συμπεριφορά χωρίς φορτίο εξαρτάται κυρίως από το παράλληλο πεδίο, ενώ η πεπερασμένη συμπεριφορά (drooping behavior) υπαγορεύεται από το πεδίο σειράς. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης, και ταυτόχρονα, η ταχύτητα χωρίς φορτίο μπορεί να περιοριστεί σε μια ασφαλή τιμή.

Για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης αντίστασης, το πεδίο σειράς μειώνει τη ροή του διάκενου όταν η ροπή αυξάνεται, προκαλώντας την αύξηση της ταχύτητας κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει την πτώση της ταχύτητας λόγω της αντίστασης του οπλισμού. Ωστόσο, σε περίπτωση υπερφόρτωσης, αυτό το φαινόμενο θα προκαλέσει την ταχύτητα να φτάσει στην αστάθεια. Έτσι, αυτή η μηχανή εφαρμόζεται σπάνια στους κινητήρες οδήγησης.



Εικόνα 10: Χαρακτηριστικές Ροπής-Ταχύτητας του κινητήρα DC

2.2 Επαγωγικός κινητήρας

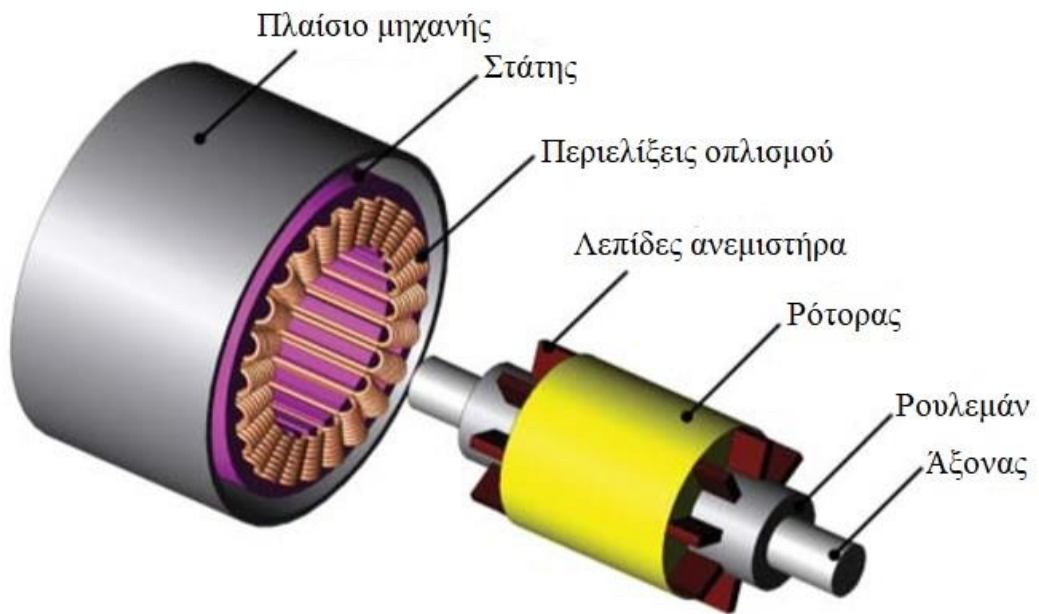
Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, οι κινητήριои κινητήρες χωρίς συλλέκτη προσφέρουν ένα πλήθος πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος για ηλεκτρική κίνηση. Επί του παρόντος, οι επαγωγικοί ηλεκτροκινητήρες είναι η πλέον πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία μεταξύ των διαφόρων κινητήρων χωρίς συλλέκτη.

Υπάρχουν δύο τύποι επαγωγικών μηχανών (IMs): οι επαγωγικές μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα και οι επαγωγικές μηχανές βραχυκυκλωμένου δρομέα ή κλωβού. Λόγω του υψηλού κόστους, της ανάγκης για συντήρηση και της έλλειψης ανθεκτικότητας, ο επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα δεν προτιμάται έναντι του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα, ειδικά για την ηλεκτρική κίνηση σε ηλεκτρικά οχήματα (EVs). Ως εκ τούτου, ο επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα ονομάζεται και ως επαγωγικός κινητήρας για κίνηση ηλεκτρικών οχημάτων.

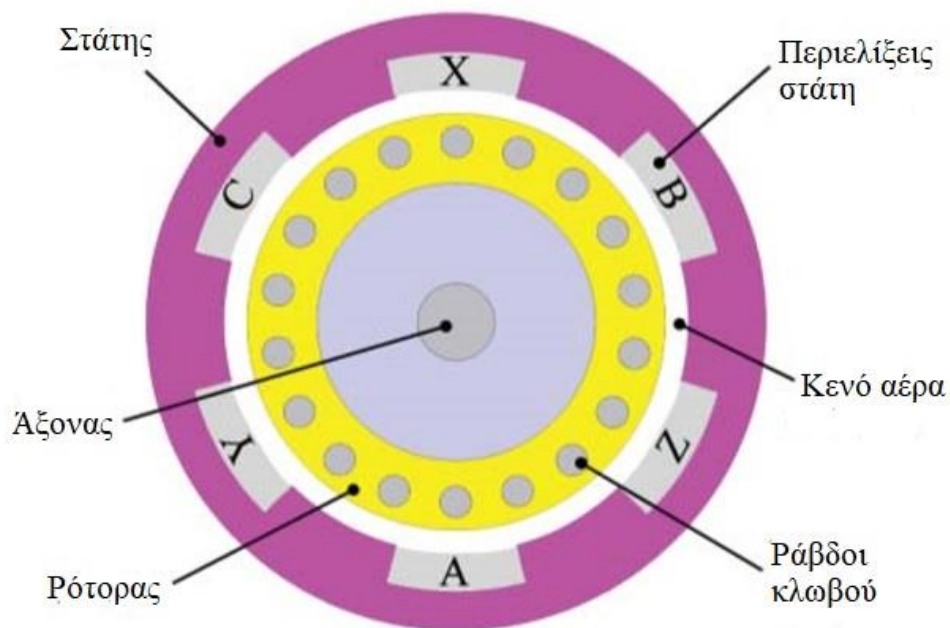
Εκτός από τα κοινά πλεονεκτήματα των κινητήρων χωρίς συλλέκτη, οι επαγωγικοί κινητήρες διαθέτουν το πλεονέκτημα χαμηλού κόστους και αντοχής. Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορούν γενικά να αντισταθμίσουν το μειονέκτημα τους όσον αφορά την πολυπλοκότητα του ελέγχου και να διευκολύνουν την ευρεία αποδοχή αυτής της τεχνολογίας για τα ηλεκτρικά οχήματα.

2.2.1 Δομή επαγωγικού κινητήρα

Ο πιο συνηθισμένος τύπος επαγωγικού κινητήρα είναι ο επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα (squirrel-cage IM). Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 11, αποτελείται από έναν στάτη ενσωματωμένο σε τριφασικές περιελίξεις οπλισμού (three-phase armature windings), ένα ρότορα ενσωματωμένο με ράβδους κλωβών που βραχυκυκλώνονται από δύο ακραίες δακτυλίους (end-rings), οι οποίες μπορούν επίσης να χυτευθούν (molded) με λεπίδες ανεμιστήρα για να βοηθήσουν να ψυχθεί η μηχανή κατά τη διάρκεια της περιστροφής, δύο ακραία ρουλεμάν (end-bearings) για στήριξη του ρότορα και ένα πλαίσιο μηχανής (machine frame) με δύο καπάκια (end-bells) για να «στεγαστεί» η μηχανή.



Εικόνα 11: Διάγραμμα επαγωγικού κινητήρα

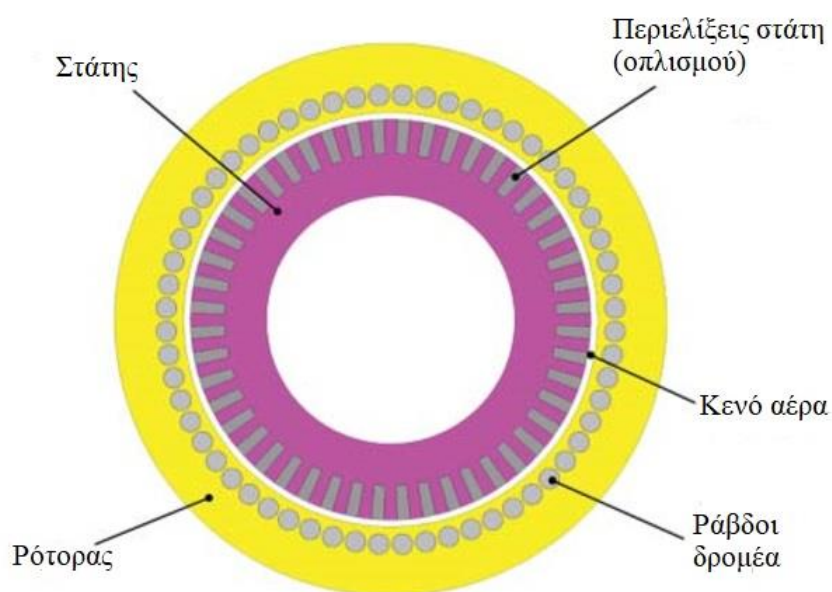


Εικόνα 12: Βασική τοπολογία επαγωγικού κινητήρα

Η Εικόνα 12 δείχνει την διατομή ενός βασικού τριφασικού διπολικού επαγωγικού κινητήρα, στον οποίο ο στάτης είναι εγκατεστημένος με τριφασικές περιελίξεις A-X, B-Y και C-Z και ο ρότορας εισάγεται με ράβδους βραχυκυκλωμένου κλωβού (ή αλλιώς ράβδοι κλωβών) . Οι περιελίξεις του στάτη κατανέμονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα περιέλιξης να παράγει μια ημιτονοειδούς κατανεμημένη πυκνότητα ροής διακένου γύρω από την περιφέρεια.

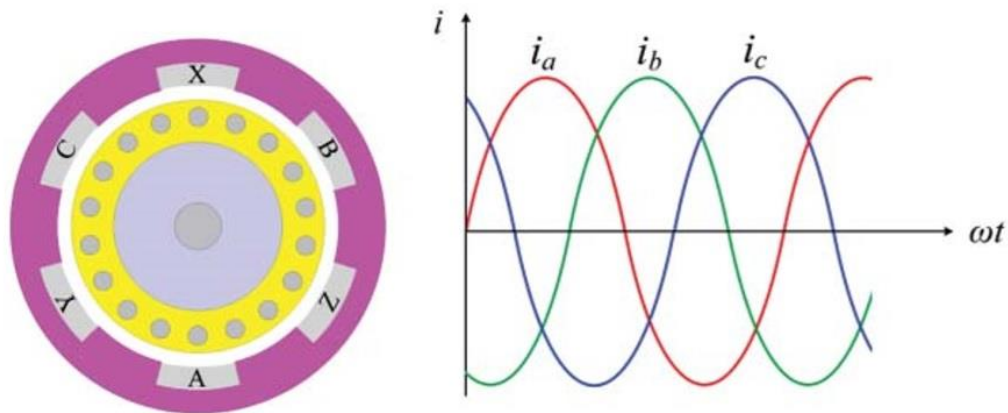
Όλες οι ράβδοι κλωβών βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους από τους δύο ακραίους δακτυλίους έτσι ώστε το κύκλωμα του ρότορα να μπορέσει επαγωγικά να παράξει τον ίδιο αριθμό πόλων με τον στάτη.

Η Εικόνα 13 δείχνει τη διατομή ενός σπάνιου τριφασικού 16-πολικού εξωτερικού ρότορα επαγωγικού κινητήρα. Η αρχή λειτουργίας του είναι η ίδια με αυτή του συμβατικού εσωτερικού ρότορα αντίστοιχα. Αυτή η τοπολογία εξωτερικού ρότορα υιοθετεί κατά προτίμηση το σχήμα «τηγανίτας» (pancake-shaped design) , δηλαδή μια μεγάλη ακτινική διάμετρο και ένα μικρό αξονικό μήκος, έτσι ώστε να μπορεί εύκολα να φιλοξενήσει έναν μεγάλο αριθμό πόλων, προσφέροντας έτσι άμεση κίνηση σε τροχούς. Επίσης, ο κινητήριος άξονας της «τηγανίτας» (pancake shaft) διευκολύνει την εμφύτευση της μηχανής στον τροχό.



Εικόνα 13: Τοπολογία επαγωγικού κινητήρα εξωτερικού ρότορα

2.2.2 Αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα



Εικόνα 14: Βασικές απαιτήσεις της παραγωγής περιστρεφόμενου πεδίου

Η Εικόνα 14 δείχνει δύο βασικές απαιτήσεις ενός επαγωγικού κινητήρα για να μπορέσει να παράξει το περιστρεφόμενο πεδίο, δηλαδή των τριφασικών τυλιγμάτων και των τριφασικών ρευμάτων (Ehani, Gao και Emadi, 2009). Τα τριφασικά ρεύματα δίνονται από:

$$i_a = I_m \sin(\omega t)$$

Εξίσωση 10

$$i_b = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

Εξίσωση 11

$$i_c = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Εξίσωση 12

όπου I_m είναι το εύρος (amplitude) και ω είναι η γωνιακή συχνότητα των εφαρμοζόμενων ρευμάτων. Οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις του στάτη (MMFs) που παράγονται από τα ρεύματα φάσης εκφράζονται ως:

$$F_a = F_m \sin(\omega t)$$

Εξίσωση 13

$$F_b = F_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

Εξίσωση 14

$$F_c = F_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Εξίσωση 15

όπου $F_m = I_m N$ και N είναι ο αριθμός των στροφών ανά φάση. Επομένως, το διάνυσμα MMF του στάτη, που προκύπτει, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F = F_a e^{j0^\circ} + F_b e^{j120^\circ} + F_c e^{j240^\circ}$$

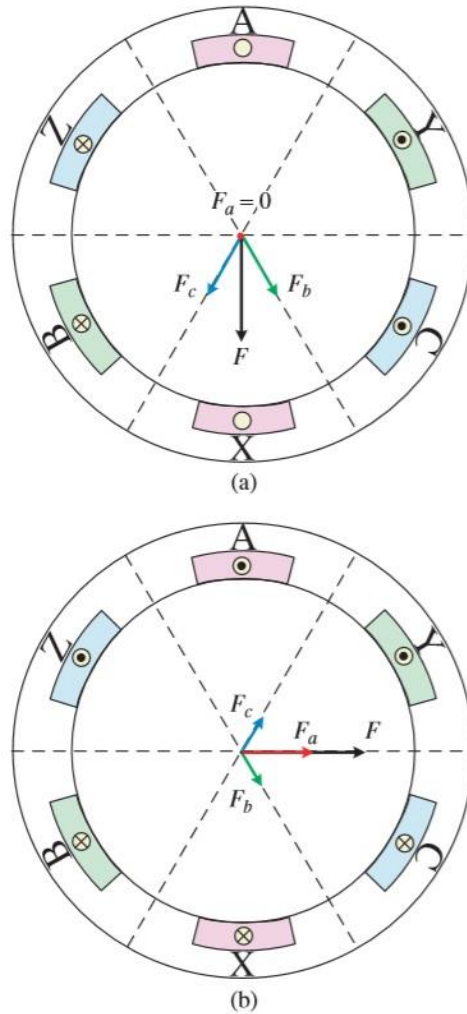
Εξίσωση 16

Μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$F = \frac{3}{2} F_m e^{j(\omega t - 90^\circ)}$$

Εξίσωση 17

που είναι ένα διάνυσμα της μαγνητογενετικής δύναμης MMF (Magnetomotive Force) που περιστρέφεται περιμετρικά με την γωνιακή ταχύτητα ω , και είναι 90° καθυστέρηση σε σχέση με το MMF της φάσης A.



Εικόνα 15: Περιστρεφόμενος φορέας MMF (a) $\omega t = 0^\circ$ και (b) $\omega t = 90^\circ$

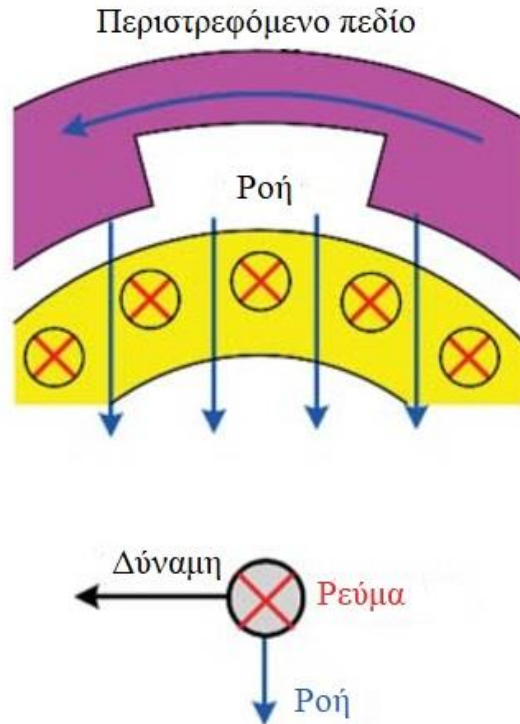
Η Εικόνα 15 απεικονίζει γραφικά τους φορείς MMF του στάτη σε $\omega t = 0^\circ$ και $\omega t = 90^\circ$, επιβεβαιώνοντας ότι το διάνυσμα MMF που προκύπτει περιστρέφεται κατά 90° . Είναι ισοδύναμο με τους μαγνητικούς πόλους του στάτη που περιστρέφονται περιφερειακά με τη γωνιακή ταχύτητα ίση με τη γωνιακή συχνότητα του ρεύματος φάσης.

Σε περίπτωση που η μηχανή έχει περισσότερους από δύο πόλους, η περιστροφική ταχύτητα πεδίου διαφέρει από τη γωνιακή συχνότητα, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\omega_s = \frac{\omega}{p} \quad \text{ή} \quad n_s = \frac{f}{p}$$

Εξίσωση 18

όπου p είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων, το f είναι η συχνότητα του ρεύματος φάσης και τα ω_s και n_s είναι η περιστρεφόμενη ταχύτητα πεδίου (συνήθως αναφερόμενη ως σύγχρονη ταχύτητα) σε rad/s και σε rev/s, αντίστοιχα.



Εικόνα 16: Αρχή παραγωγής της ροπής

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 16, η σχετική κίνηση μεταξύ περιστροφής του πεδίου του στάτη και των αγωγών του δρομέα προκαλεί τάση στο ρότορα. Για παράδειγμα, η κατεύθυνση της ροής είναι προς τα κάτω και το πεδίο κινείται από τα δεξιά προς τα αριστερά. η παραγόμενη ηλεκτροκινητική δύναμη (EMF) και συνεπώς το ρεύμα στους αγωγούς θα είναι προς μέσα στο χαρτί (will be into the paper).

Συνεπώς, η κατεύθυνση της μηχανικής δύναμης θα είναι προς τα αριστερά, προκαλώντας τους αγωγούς να ακολουθήσουν την κατεύθυνση κίνησης του περιστρεφόμενου πεδίου και συνεπώς την ροπή οδήγησης. Δεδομένου ότι η σχετική κίνηση μεταξύ του περιστρεφόμενου πεδίου και του ρότορα είναι το κλειδί για την παραγωγή ροπής, η ολίσθηση s ορίζεται ως:

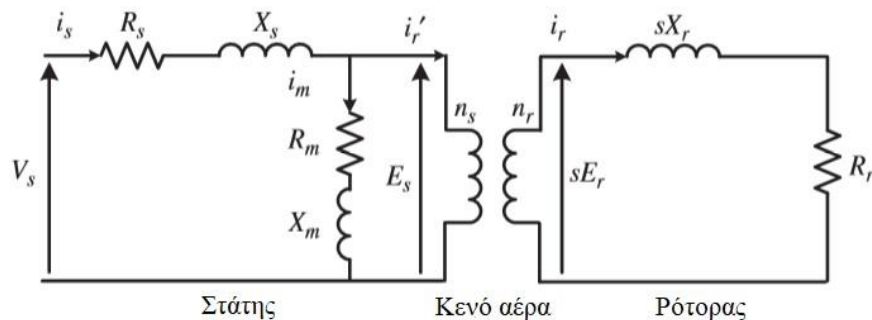
$$s = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} = \frac{\omega_{s1}}{\omega_s}$$

Εξίσωση 19

όπου ω_{s1} ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης, η οποία είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του πεδίου περιστροφής του στάτη και των στροφών του ρότορα. Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας όταν $0 < s < 1$, ενώ ως γεννήτρια όταν $s < 0$.

2.2.3 Μοντελοποίηση επαγωγικού κινητήρα

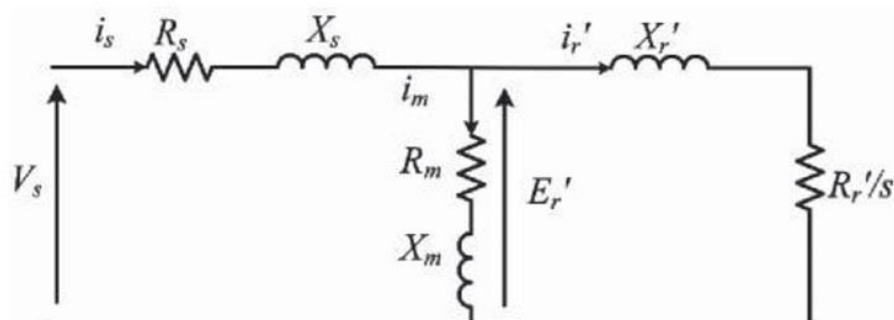
Δεδομένου ότι η αρχή των επαγωγικών κινητήρων (IMs) μοιάζει με την αρχή του μετασχηματιστή, το βασικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός IM εμφανίζεται στην Εικόνα 17, όπου R_s και X_s είναι αντιστοίχως αντίσταση περιέλιξης και αντίσταση διαρροής στον στάτη, R_r και X_r είναι αντιστοίχως η αντίσταση σε περιελίξεις και η αντίδραση διαρροής στον ρότορα σε στάση.



Εικόνα 17: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Τα E_s και E_r είναι αντιστοίχως το επαγόμενο EMF στον στάτη και προκαλούν EMF στον δρομέα σε ηρεμία, R_m και X_m είναι αντιστοίχως αντίσταση απώλειας πυρήνα και αντίδραση μαγνητισμού στον στάτη και k είναι ο λόγος του αριθμού στροφών της περιέλιξης του στάτη με τον αριθμό των στροφών της περιέλιξης του ρότορα.

Διαφορετικά από αυτό, σε ένα μετασχηματιστή, η συχνότητα στάτη f δεν είναι ίση με τη συχνότητα του ρότορα f_r λόγω της παρουσίας σχετικής κίνησης. Επομένως, η συχνότητα του ρότορα εξαρτάται από την ολίσθηση όπως δίνεται από το $f_r = sf$. Κατά συνέπεια, το EMF του ρότορα και η αντίδραση του ρότορα είναι όλα εξαρτώμενα από την ολίσθηση και εκφράζονται ως sE_r και sX_r , αντίστοιχα.



Εικόνα 18: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής

Προκειμένου να απλουστευθεί το ισοδύναμο κύκλωμα των IM, όλες οι ποσότητες του ρότορα διαιρούνται με s και στη συνέχεια αναφέρονται στην πλευρά του στάτη. Το

απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στην Εικόνα 18, όπου οι αναφερόμενες ποσότητες ρότορα δίδονται από τα $R'_r = k^2 R_r$, $X'_r = k^2 X_r$, $E'_r = k E_r$ και $I'_r = I_r/k$. Ο στάτης, ο κλάδος μαγνήτισης και η αντίσταση του ρότορα αναφέρονται μπορούν να εκφράζονται ως:

$$Z_s = R_s + jX_s$$

Εξίσωση 20

$$Z_m = R_m + jX_m$$

Εξίσωση 21

$$Z'_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_r$$

Εξίσωση 22

Επομένως, το ρεύμα του στάτη και το αναφερόμενο ρεύμα δρομέα μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$I_s = \frac{V_s}{(Z_s + Z_m || Z'_r)}$$

Εξίσωση 23

$$I'_r = \frac{Z_m}{(Z_m + Z'_r)} I_s$$

Εξίσωση 24

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς του διάκενου που μεταφέρεται από τον στάτη στον ρότορα δίνεται από:

$$P_s = m I'^2_r \frac{R'_r}{s}$$

Εξίσωση 25

όπου m είναι ο αριθμός φάσης. Μετά την αφαίρεση της απώλειας χαλκού του ρότορα $m I'^2_r R_r$, της ακαθάριστης μηχανικής παραγωγής δύναμη μπορεί να γραφτεί ως:

$$P_m = m I'^2_r \frac{R'_r}{s} (1 - s)$$

Εξίσωση 26

Ως εκ τούτου, η ροπή εξόδου μπορεί να ληφθεί ως:

$$T = \frac{P_m}{\omega_r}$$

Εξίσωση 27

Δεδομένου ότι $\omega_r = (1 - s)$, η ροπή εξόδου μπορεί να ξαναγραφεί ως:

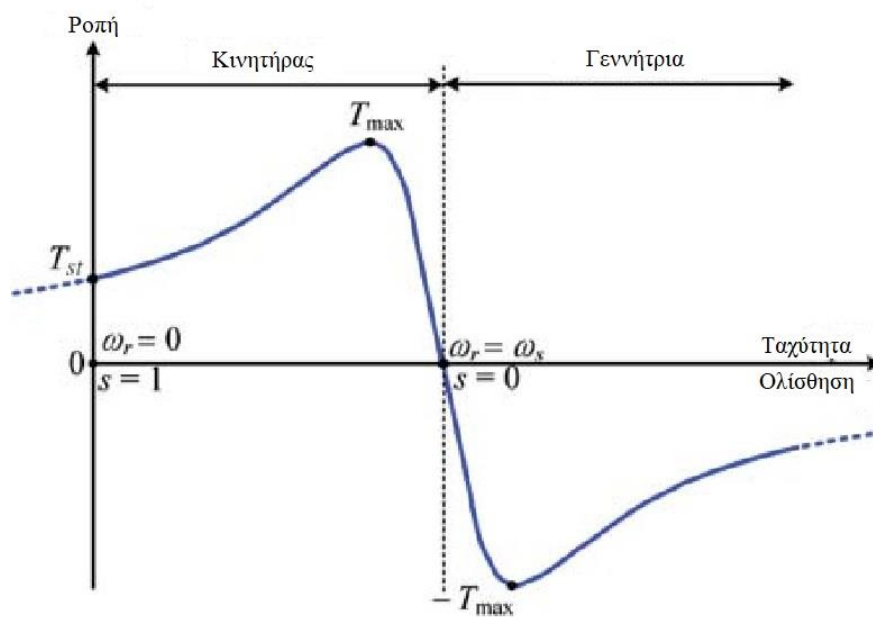
$$T = \frac{P_s}{\omega_s}$$

Εξίσωση 28

Όταν αμελείται ο κλάδος μαγνητισμού, η εξίσωση ροπής μπορεί να απλοποιηθεί ως:

$$T = \frac{1}{\omega_s} \frac{mV_s^2}{(R_s + R'_r/s)^2 + (X_s + X'_r)^2} \frac{R'_r}{s}$$

Εξίσωση 29



Εικόνα 19: Χαρακτηριστική ροπή-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα

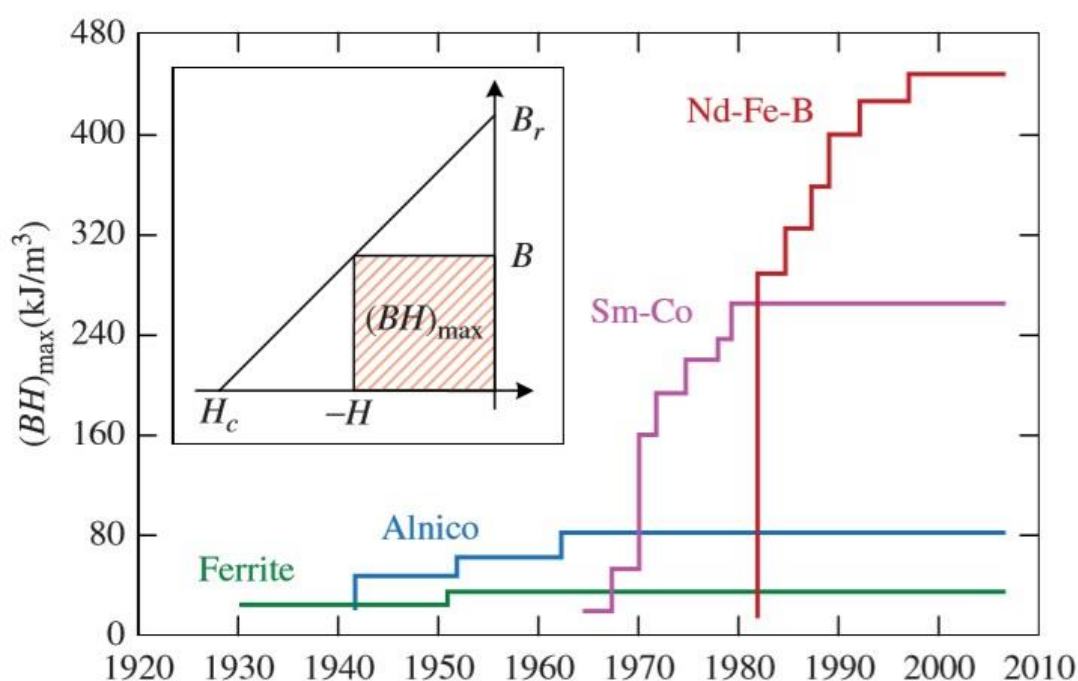
Η Εικόνα 19 παρουσιάζει την χαρακτηριστική της ταχύτητας-ροπής ενός επαγωγικού κινητήρα με σταθερή τάση και συχνότητα, όπου το T_{st} είναι η ροπή εκκίνησης και το T_{max} είναι η μέγιστη ροπή. Είναι προφανές ότι η χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής δεν είναι αρκετά καλή για την οδήγηση ενός EV λόγω της χαμηλής ροπής εκκίνησης και της περιορισμένης ταχύτητας. Συνεπώς, η ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών ισχύος στην οδήγηση του επαγωγικού κινητήρα είναι σχεδόν υποχρεωτική για την εφαρμογή σε ένα EV.

2.3 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών

Μεταξύ των διαφόρων τύπων κινητήριων μηχανισμών, οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες με μόνιμο μαγνήτη (PM), ειδικά ο σύγχρονος κινητήρας PM, είναι σήμερα οι πιο ελκυστικοί κινητήριοι μηχανισμοί για την οδήγηση ηλεκτρικών οχημάτων (EV). Τα βασικά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή η υψηλή πυκνότητα ισχύος και η υψηλή απόδοση, αποδίδονται στη χρήση υλικών PM υψηλής ενέργειας. Στην πραγματικότητα, αποκτούν κυρίαρχη θέση στο μερίδιο αγοράς των κινητήρων EV. Ωστόσο, αυτοί οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες PM εξακολουθούν να παρουσιάζουν ορισμένες αδυναμίες, όπως το υψηλό κόστος και η θερμική αστάθεια του υλικού PM.

2.3.1 Υλικά μόνιμων μαγνητών

Σίγουρα, τα υλικά μόνιμων μαγνητών (PM) είναι το κλειδί των κινητήρων χωρίς ψήκτρες PM που παρέχουν στις μηχανές μόνιμη διέγερση. Η ανάπτυξη υλικών PM χρονολογείται από πολλούς αιώνες. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 20, η πρόοδος των υλικών PM προχώρησε σταδιακά και κάθε υλικό PM αναπτύχθηκε και βελτιώθηκε πριν αντικατασταθεί από ένα νέο (Gutfleisch, 2000). Συγκεκριμένα, το αντίστοιχο ενεργειακό προϊόν είχε δραστική βελτίωση ξεκινώντας από τη δεκαετία του 1980.

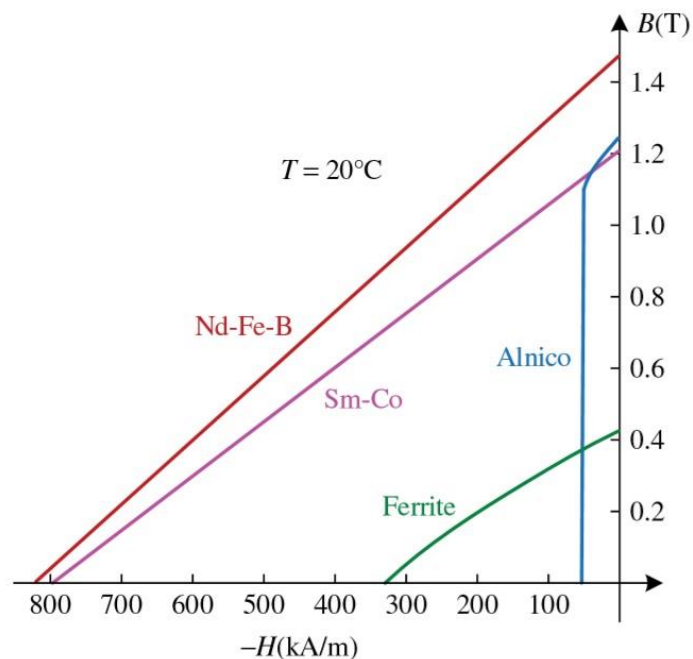


Εικόνα 20: Ανάπτυξη υλικών μόνιμων μαγνητών

Επί του παρόντος, υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι υλικών PM που χρησιμοποιούνται ευρέως για κινητήρες:

- **Φερρίτης:** Ο μαγνήτης φερρίτη επινοήθηκε τη δεκαετία του 1930. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως εμπορικοί μαγνήτες για τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της αφθονίας των πρώτων υλών και του χαμηλού κόστους παραγωγής. Προσφέρει επίσης το πλεονέκτημα της υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία μπορεί να καταστείλει την αντίστοιχη απώλεια ρεύματος στροβίλου. Ωστόσο, παρουσιάζει μειονεκτήματα όπως ο υψηλός συντελεστής θερμοκρασίας και η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας (energy density), με αποτέλεσμα να είναι ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας και ογκώδη σε μέγεθος, αντίστοιχα, για εφαρμογή σε μηχανές PM.

- Alnico: Είναι ψευδώνυμο κράματος αλουμινίου-νικελίου-κοβαλτίου (Al-Ni-Co) με βάση το σίδηρο, το οποίο εφευρέθηκε στη δεκαετία του 1940. Ήταν το πρώτο σύγχρονο υλικό PM το οποίο προσφέρει υψηλή αντίσταση. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας Curie, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Δυστυχώς, η Μαγνητική αντίσταση (coercivity) του είναι πολύ χαμηλή, ώστε να είναι πολύ εύκολο να απομαγνητιστεί, γεγονός που περιορίζει την αντίστοιχη εφαρμογή σε μηχανές PM.
- Σαμάριο-κοβάλτιο (Sm-Co): Ανακαλύφθηκε στη δεκαετία του 1960, αυτό το υλικό σπάνιων γαιών PM έχει πλεονεκτήματα όπως υψηλή αντίσταση, υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, υψηλή θερμοκρασία Curie και συντελεστή χαμηλής θερμοκρασίας. Είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε μηχανές PM, οι οποίες επιθυμούν υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση και υψηλή σταθερότητα. Ωστόσο, το κόστος του είναι το βασικό μειονέκτημα. Ιδιαίτερα, το στοιχείο σπάνιων γαιών, το σαμάριο, είναι πολύ ακριβό.
- Νεοδύμιο-σίδηρος-βόριο (Nd-Fe-B): Κατασκευάστηκε πρώτα το 1984, ενώ οι μαγνητικές ιδιότητες του μαρμαρυγίου από το σαμάριο-κοβάλτιο. Δεδομένου ότι το νεοδύμιο είναι ένα σχετικά λιγότερο δαπανηρό στοιχείο σπάνιων γαιών, το αντίστοιχο κόστος καθίσταται λογικό για εφαρμογή σε μηχανές PM. Η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία Curie (345 °C) είναι η κύρια ανησυχία, η οποία περιορίζει τη χρήση της σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Επί του παρόντος, αυτό το υλικό PM χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων. Λόγω μιας τόσο εκθετικής αύξησης της ζήτησης, η τιμή είναι εξαιρετικά ασταθής, μερικές φορές αδικαιολόγητα δαπανηρή.



Εικόνα 21: Καμπύλες απομαγνητοποίησης υλικών μόνιμων μαγνητών

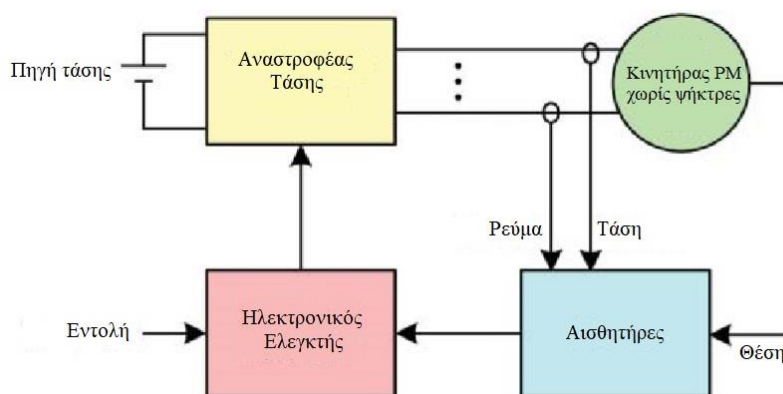
Η Εικόνα 21 δείχνει τα τυπικά χαρακτηριστικά απομαγνήτισης των παραπάνω υλικών PM όπου το υπόλοιπο B_r δηλώνει την ισχύ του μαγνητικού πεδίου που παράγεται και η μαγνητική αντίσταση, H_c δηλώνει την αντίσταση στην απομαγνητοποίηση. Το μέγιστο προϊόν ενός σημείου λειτουργίας στην χαρακτηριστική ονομάζεται ενεργειακό προϊόν $(BH)_{max}$, το οποίο στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει την αντίστοιχη ενεργειακή πυκνότητα. Επιπλέον, οι ιδιότητες PM είναι συνήθως εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία και ποικίλλουν ανάλογα με τον συντελεστή θερμοκρασίας. Η έκθεση σε μια θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie, T_c , το υλικό PM χάνει εντελώς τη μαγνητισμό του. Κατά συνέπεια, το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των μηχανών PM. Μια σύντομη περίληψη των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων μόνιμων μαγνητών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά ιδιοτήτων υλικών μόνιμων μαγνητών

	Φερρίτης	Alnico	Sm-Co	Nd-Fe-b
Ισχύ του μαγνητικού πεδίου που παράγεται, B_r (T)	0.43	1.25	1.21	1.47
Αντίσταση στην απομαγνητοποίηση, H_c (kA/m)	330	51	796	820
Ενεργειακό προϊόν $(BH)_{max}$ (kJ/m ³)	35	44	271	422
Συντελεστής θερμοκρασίας του B_r (%/°C)	-0.18	-0.02	- 0.03	- 0.11
Συντελεστής θερμοκρασίας του H_c (%/°C)	0.2	0.01	- 0.22	- 0.65
Θερμοκρασία Curie	450	860	825	345

2.3.2 Ρυθμίσεις συστήματος

Η διαμόρφωση του συστήματος των κινητήρων χωρίς ψήκτρες PM για ηλεκτρική οδήγηση είναι παρόμοια με αυτή των κινητήριων μηχανισμών κίνησης. Παρέχονται σημαντικές εναλλακτικές λύσεις όπως διαμορφώσεις ενός μοτέρ και πολλαπλών κινητήρων, καθώς και κιβώτια ταχυτήτων και κιβωτίου ταχυτήτων. Βασικά, η διαμόρφωση ενός μοτέρ αποτελείται από ένα κινητήρα χωρίς ψήκτρες PM, έναν αναστροφέα τροφοδοτούμενο από τάση, έναν ηλεκτρονικό ελεγκτή και ορισμένους αισθητήρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 22. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν κάποιες παραλλαγές:



Εικόνα 22: Βασική διαμόρφωση κινητήρα μόνιμων μαγνητών

- Όταν το μηχάνημα χωρίς ψήκτρες PM έχει σχεδιαστεί με ημιτονοειδή κατανομή του διάκενου ροής και διανεμημένη διάταξη περιελίξεων στάτη, το μηχάνημα λειτουργεί ως σύγχρονη μηχανή, το λεγόμενο σύγχρονο μηχάνημα PM ή μηχάνημα AC χωρίς ψήκτρες (BLAC). Παρόμοια με αυτή για τους κινητήρες με επαγωγικούς κινητήρες, ο σύγχρονος κινητήρας PM υιοθετεί εξελιγμένες στρατηγικές ελέγχου της ταχύτητας, όπως ο έλεγχος ροπής (FOC) και ο άμεσος έλεγχος ροπής, οι οποίοι γενικά απαιτούν έναν ακριβό αισθητήρα θέσης όπως ο κωδικοποιητής απόλυτης θέσης ή ο αναλυτής θέσης. Αν και αυτός ο αισθητήρας θέσης μπορεί θεωρητικά να αγνοηθεί για λειτουργία ανοιχτού βρόχου, αυτή η στρατηγική σπάνια υιοθετείται για πρόωση EV.
- Όταν το μηχάνημα χωρίς ψήκτρες PM έχει σχεδιαστεί με τραπεζοειδή κατανομή του διακένου ροής και με συγκεντρωμένη διάταξη περιελίξεων στάτη, το μηχάνημα λειτουργεί ταυτόχρονα με μηχανή συνεχούς ρεύματος αλλά χωρίς ψήκτρες, το λεγόμενο μηχάνημα PM BLDC. Ο αντίστοιχος έλεγχος της ταχύτητας είναι σχετικά απλός στον οποίο τα ρεύματα στάτη ελέγχονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ορθογώνιο ρεύμα να ευθυγραμμίζεται σωστά με την τραπεζοειδή ροή. Ο αισθητήρας θέσης είναι υποχρεωτικός για να διασφαλιστεί ο συγχρονισμός του ρεύματος με τη ροή. Η απαίτηση ανάλυσης αυτού του αισθητήρα θέσης δεν είναι απαιτητική δεδομένου ότι χρειάζονται μόνο έξι στιγμές μεταγωγής ανά ηλεκτρικό κύκλο. Γενικά, υιοθετείται ένας χαμηλού κόστους αισθητήρα Hall.

2.3.3 Κινητήρες μόνιμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες

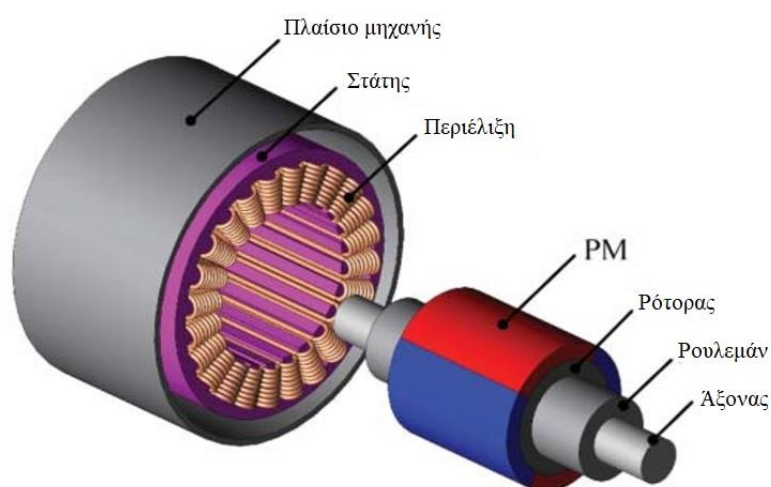
Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών (PM) έχουν αντικαταστήσει τους επαγωγικούς κινητήρες τα τελευταία χρόνια, καθιστώντας τους προτεινόμενους κινητήρες για τα ηλεκτρικά οχήματα. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα τους είναι τα εξής:

- Δεδομένου ότι το μαγνητικό πεδίο διεγείρεται από PM υψηλής ενέργειας, το συνολικό βάρος και ο όγκος μπορούν να μειωθούν σημαντικά για μια δεδομένη ισχύ εξόδου, οδηγώντας σε υψηλότερη πυκνότητα ισχύος.
- Λόγω της απουσίας απώλειας χαλκού από ρότορα, προσφέρουν εγγενώς υψηλότερη απόδοση.
- Δεδομένου ότι η θερμότητα προέρχεται κυρίως από τον στάτη, μπορεί να διαχέεται πιο αποτελεσματικά προς το περιβάλλον, οδηγώντας σε ευκολότερη ψύξη.
- Καθώς η διέγερση του PM δεν παρουσιάζει κανένα κίνδυνο για ελαττώματα κατασκευής, υπερθέρμανσης ή μηχανικής βλάβης, αυτά εγγενώς προσφέρουν υψηλότερη αξιοπιστία.
- Λόγω της απουσίας περιελίξεων χαλκού στον ρότορα, έχουν χαμηλότερη ηλεκτρομηχανική χρονική σταθερά και επομένως καλύτερη δυναμική απόκριση. Ωστόσο, αυτά τα μηχανήματα εξακολουθούν να παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα ως εξής:
- Δεδομένου ότι οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών υψηλής ενέργειας είναι βασισμένοι σε σπάνια στοιχεία γαιών, η τιμή του κινητήρα αυτού είναι σημαντικά πιο υψηλή από τους επαγωγικούς.
- Καθώς οι μόνιμοι μαγνήτες ευρίσκονται στον ρότορα, η μηχανική λειτουργία του ρότορα, ειδικά ο μόνιμος μαγνήτης που είναι προσκολλημένος στην επιφάνεια, παρουσιάζει πρόβλημα για λειτουργία μεγάλης ταχύτητας.
- Λόγω της εγγενώς ανεξέλεγκτης ροής PM, η περιοχή λειτουργίας σταθερής ισχύος είναι περιορισμένη.
- Σε περίπτωση που το μηχανήμα δεν έχει σχεδιαστεί ή λειτουργήσει σωστά, οι μόνιμοι μαγνήτες ενδέχεται να απομαγνητιστούν κατά λάθος από το πεδίο υψηλής αντίδρασης οπλισμού ή υπό υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

Η οικογένεια των κινητήρων μόνιμων μαγνητών έχει δύο κύρια μέλη: το σύγχρονο κινητήρα μόνιμων μαγνητών και τον κινητήρα DC μόνιμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες (PM BLDC). Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την κίνηση ηλεκτρικών οχημάτων. εν τω μεταξύ, ο κινητήρας PM BLDC γίνεται όλο και πιο ελκυστικός.

2.3.4 Δομή κινητήρα μόνιμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες

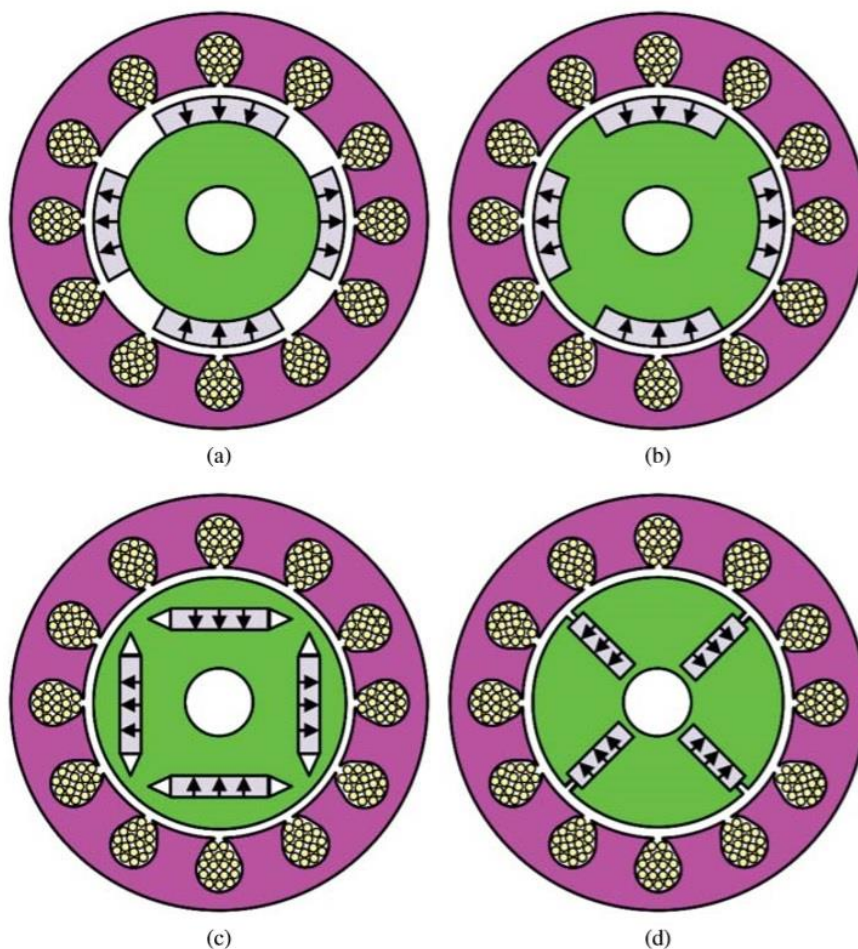
Η βασική δομή της μηχανής χωρίς ψήκτρες PM, που περιλαμβάνει τόσο τους σύγχρονους PM όσο και τους τύπους PM BLDC, απεικονίζεται στην Εικόνα 23. Αποτελείται κυρίως από έναν στάτη ενσωματωμένο στην τριφασική περιέλιξη του οπλισμού και έναν ρότορα ενσωματωμένο στους πόλους του PM. Σε σύγκριση με την επαγωγική μηχανή, είναι σχετικά απλούστερη λόγω της απουσίας των ράβδων κλωβού και των ακραίων δακτυλίων. Επιπλέον, επειδή η σχετική απώλεια θερμότητας στον ρότορα δεν είναι σημαντική, γενικά δεν απαιτείται η τοποθέτηση λεπίδων ανεμιστήρα στον δρομέα ή στον άξονα για ψύξη με αναγκαστικό αέρα.



Εικόνα 23: Διάγραμμα κινητήρα μόνιμων μαγνητών

2.3.4.1 Δομή σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών

Παρόμοια με τη συμβατική σύγχρονη μηχανή, ο στάτης έχει την τριφασική κατανομημένη περιστροφή οπλισμού στον στάτη. Όταν η περιέλιξη του οπλισμού τροφοδοτείται με τριφασικά ημιτονοειδή ρεύματα, δημιουργείται συγχρόνως περιστροφική ροή ημιτονοειδούς διακένου αέρα. Ως εκ τούτου, ο ρότορας PM με τον ίδιο αριθμό πόλων με την περιστρεφόμενη ροή αέρα-διακένου πάντα περιστρέφεται σε συγχρονισμό, η οποία εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη συχνότητα.



Εικόνα 24: Τοπολογίες σύγχρονου κινητήρα PM: (a) τοποθέτηση σε επιφάνεια, (b) επιφανειακή ένθεση, (c) εσωτερική-ακτινική και (d) εσωτερική-περιφερειακή

Με βάση την τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών στο ρότορα, η σύγχρονη μηχανή PM μπορεί να προσδιοριστεί ως τοποθέτηση σε επιφάνεια, επιφανειακή ένθεση, εσωτερική-ακτινική και εσωτερική-περιφερειακή, ενώ ο στάτης είναι ο ίδιος όπως φαίνεται στην Εικόνα 24:

- Για την επιφανειακή τοποθέτηση όπως φαίνεται στην Εικόνα 24 (a), τα PM απλώς κολλούν στην επιφάνεια του ρότορα χρησιμοποιώντας εποξειδική κόλλα, προσφέροντας έτσι το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής. Δεδομένου ότι η

μεταβλητότητα των PM είναι κοντά σε εκείνη του αέρα, το αποτελεσματικό κενό αέρα είναι το άθροισμα του πραγματικού μήκους διακένου αέρα και του ακτινικού πάχους των PM. Ως εκ τούτου, το αντίστοιχο πεδίο αντίδρασης οπλισμού είναι μικρό και η επαγωγική κατάσταση περιέλιξης στάτη είναι χαμηλή. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι επαγωγικότητες περιέλιξης του ρότορα του άξονα d και του άξονα q είναι σχεδόν ίδιες, η ροπή αντίδρασης του είναι σχεδόν μηδενική. Επιπλέον, υπάρχει η πιθανότητα οι PM να φύγουν από την θέση τους κατά τη λειτουργία μεγάλης ταχύτητας.

- Για την επιφανειακή ένθεση όπως φαίνεται στην Εικόνα 24 (b), οι PM τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα. Έτσι, η επαγωγή του άξονα q γίνεται υψηλότερη από την επαγωγή του άξονα d, δημιουργώντας έτσι μια πρόσθετη ροπή στρέψης. Επιπροσθέτως, δεδομένου ότι τα PM είναι τοποθετημένα στο ρότορα, μπορεί να προσφέρουν καλύτερη μηχανική ακεραιότητα από την επιφανειακή για να αντέχουν τη φυγόκεντρη δύναμη σε λειτουργία υψηλής ταχύτητας.
- Για την εσωτερική-ακτινική τοπολογία όπως φαίνεται στην Εικόνα 24 (c), τα PM ακτινικά μαγνητίζονται και θάβονται μέσα στο ρότορα. Σε σύγκριση με την επιφανειακή επένδυση, αυτή η τοπολογία επιτρέπει στα PMs να προστατεύονται από την απομάκρυνση, βελτιώνοντας έτσι περαιτέρω τη μηχανική ακεραιότητα για λειτουργία υψηλής ταχύτητας. Επίσης, λόγω της αξιοπιστίας του d-q, δημιουργείται μια πρόσθετη ροπή στρέψης. Διαφορετικά από την επιφανειακή τοποθέτηση, αυτή η εσωτερική ακτινική τοπολογία υιοθετεί γραμμικά PMs που είναι ευκολότερα για εισαγωγή και είναι εύκολα μηχανικά επεξεργάσιμα.
- Για την εσωτερική-περιφερειακή τοπολογία όπως φαίνεται στην Εικόνα 24 (d), τα PMs μαγνητίζονται περιφερειακά και θάβονται μέσα στο ρότορα. Παίρνει το καθορισμένο πλεονέκτημα ότι η πυκνότητα ροής αέρα-διακένου μπορεί να είναι υψηλότερη από την ανάκαμψη PM, τη λεγόμενη εστίαση ροής ή συγκέντρωση ροής. Επιπλέον, κατέχει τα πλεονεκτήματα της καλής μηχανικής ακεραιότητας και της πρόσθετης ροπής αντίδρασης. Ωστόσο, λόγω της σημαντικής διαρροής ροής στα εσωτερικά άκρα των PM, απαιτείται γενικά ένας μη μαγνητικός άξονας ή περιλαίμιο, ο οποίος μπορεί να υποβαθμίσει τη στρεπτική ακαμψία του άξονα του ρότορα.

Οι προαναφερθείσες τοπολογίες σύγχρονης μηχανής PM εσωτερικού ρότορα μπορούν εύκολα να επεκταθούν στο εξωτερικό ρότορα. Η αρχή της λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής PM με εξωτερικό ρότορα είναι η ίδια με την αντίστοιχη του εσωτερικού ρότορα. Η τοπολογία μηχανής εξωτερικού ρότορα προτιμάται ιδιαίτερα από την κίνηση σε τροχούς επειδή ο αντίστοιχος εξωτερικός ρότορας έχει μεγάλη ακτινική διάμετρο η οποία μπορεί να φιλοξενήσει μεγάλο αριθμό πόλων PM, προσφέροντας έτσι δυνατότητα άμεσης οδήγησης χαμηλής ταχύτητας υψηλής ροπής.

2.3.4.2 Δομή κινητήρα DC μόνιμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες

Με την τοπολογική αναστροφή του στάτη και του δρομέα της μηχανής PM DC, μπορεί να δημιουργηθεί η μηχανή PM BLDC. Το κλειδί είναι η χρήση ηλεκτρονικής μεταγωγής για την αντικατάσταση της μηχανικής μεταγωγής. Ως εκ τούτου, το πιο προφανές πλεονέκτημα της μηχανής PM BLDC είναι η αφαίρεση του μεταγωγέα και των βουρτσών, οδηγώντας στην εξάλειψη πολλών προβλημάτων που σχετίζονται με αυτά.

Η μηχανή PM BLDC έχει παρόμοια δομή με τη σύγχρονη μηχανή PM, δηλαδή τις τριφασικές περιελίξεις του στάτη και τον ρότορα PM. Εντούτοις, η μηχανή PMDB γενικά υιοθετεί τον συμπτυκνωμένο κύλινδρο αντί για την κατανεμημένη περιέλιξη και έχει την κατανομή πυκνότητας ροής τραπεζοειδούς διακένου αντί για την κατανομή ημιτονοειδούς ροής. Λόγω της χρήσης συμπτυκνωμένων περιελίξεων, οι τελικές περιελίξεις μπορούν να μειωθούν σημαντικά, εξοικονομώντας έτσι το χάλκινο υλικό και τη σχετική απώλεια χαλκού. Γενικά, η μηχανή PM BLDC υιοθετεί τον επιφανειακά τοποθετημένο ρότορα PM όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.6, το οποίο λαμβάνει τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα της απλότητας τόσο στη δομή όσο και στον έλεγχο. Παρόλα αυτά, μπορούν να υιοθετηθούν και άλλοι τύποι στροφείων PM όπως οι τοπολογίες επιφανείας, εσωτερικής ακτίνας και εσωτερικής περιφέρειας, δεδομένου ότι η κατανομή της πυκνότητας ροής αέρα είναι κοντά στην τραπεζοειδή. διαφορετικά, η παραγωγή ροπής στρέψεως θα επιδεινωθεί.

2.3.5 Αρχή λειτουργίας κινητήρα μόνιμων μαγνητών

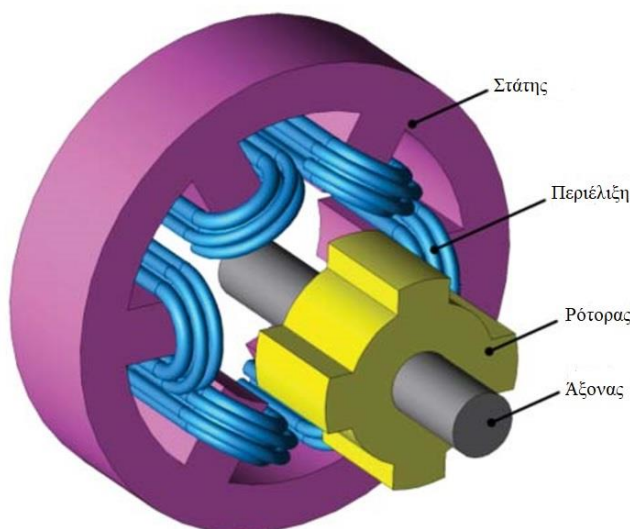
Η αρχή λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής PM βασίζεται στην αλληλεπίδραση των κυματομορφών ημιτονοειδούς ηλεκτρομαγνητικής δύναμης (EMF) και των κυματομορφών ρεύματος ημιτονοειδούς οπλισμού, ενώ η αρχή της μηχανής PMDC βασίζεται στην αλληλεπίδραση των κυματομορφών τραπεζοειδούς αντι-ηλεκτρεγερτικής και τις κυματομορφές του ορθογώνιου ρεύματος οπλισμού.

2.4 Κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

Ο κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης (Switched Reluctance Motor Drives) (SR) είναι ένα συγκεκριμένο είδος διπλής σημασίας μηχανής. Το παλαιότερο εγγεγραμμένο κατασκευάστηκε από τον Davidson στη Σκωτία το 1838 για να κινήσει μια ατμομηχανή. Ο ηλεκτροκινητήρας SR δεν μπορούσε να προσφέρει το πλήρες δυναμικό του μέχρι την εμφάνιση των ηλεκτρονικών ισχύος, του ψηφιακού ελέγχου και των αισθητήριων κυκλωμάτων. Ο σύγχρονος ηλεκτροκινητήρας SR γίνεται ελκυστικός για την κίνηση ηλεκτρικών οχημάτων (EV) λόγω του χαμηλού κόστους του συστήματος, της ισχυρής δομής του μηχανήματος, της αξιοπιστίας του μετατροπέα, της απλότητας ελέγχου και της υψηλής απόδοσης. Από την άλλη πλευρά, υποφέρει από τα μειονεκτήματα της μεγάλης ροπής ολίσθησης (large torque ripple), των υψηλών μη γραμμικών μηχανών και του ενοχλητικού ακουστικού θορύβου.

2.4.1 Δομή κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

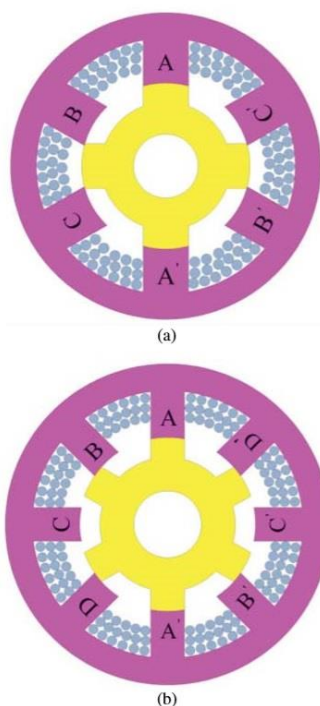
Ο κινητήρας SR έχει προεξέχοντες πόλους, στην πραγματικότητα δόντια, τόσο στον στάτη όσο και στον δρομέα, όπως φαίνεται στη Εικόνα 25, στο οποίο έχει εγκατεστημένες πολυφασικές περιελίξεις στον στάτη, αλλά χωρίς περιέλιξη χαλκού ή κομμάτι PM στο ρότορα. Υπάρχουν πολλές πιθανές δομές για τη μηχανή SR, κυρίως ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων καθώς και τους αριθμούς των πόλων στάτη και ρότορα.



Εικόνα 25: Διάγραμμα κινητήρα SR

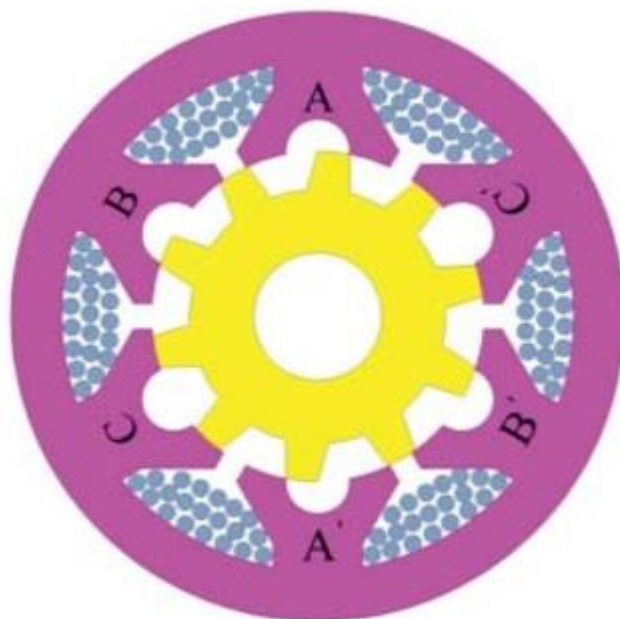
Στην Εικόνα 26 δείχνει δύο βασικές τοπολογίες μηχανής SR: την τριφασική 6/4-πόλο τοπολογία, η οποία έχει έξι πόλους στάτη και τέσσερις πόλους ρότορα και την τετραφασική 8/6-πόλο τοπολογία, η οποία έχει οκτώ πόλους στάτη και έξι πόλους ρότορα. Η τριφασική 6/4-πόλος SR μηχανή έχει τα πλεονεκτήματα του χαμηλότερου κόστους και την καλύτερη δυνατότητα προώθησης φάσης για λειτουργία υψηλής

ταχύτητας. Παρ' όλα αυτά, υποφέρει από μεγαλύτερη ροπή ροπής και ακουστικό θόρυβο. Από την άλλη πλευρά, η τετραφασική 8/6-πόλος SR μηχανή έχει καλύτερη ροπή εκκίνησης και χαμηλότερη ροπή στρέψης, αλλά απαιτεί περισσότερες συσκευές ισχύος και συνεπάγεται υψηλότερο κόστος μετατροπέα. Προκειμένου να βελτιωθεί η πυκνότητα ροπής, η μηχανή SR μπορεί να υιοθετήσει πολλαπλά δόντια ανά πόλο στάτη (Miller, 1993).



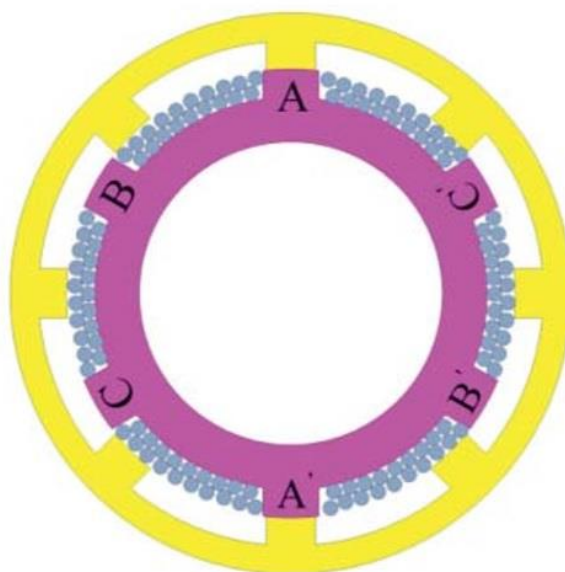
Εικόνα 26: Τοπολογίες βασικής μηχανής SR: (a) τριφασικό 6/4 πόλων (b) τετραφασικό 8/6 πόλων

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζεται ένα τριφασικό μηχανήμα SR 12/10 πόλων με δύο δόντια ανά πόλο στάτη. Βασίζεται με την αρχή ότι η χρήση δύο δοντιών στάτη μπορεί να διπλασιάσει θεωρητικά την παραγωγή ροπής υπό την ίδια ηλεκτρική φόρτιση. Εντούτοις, πρακτικά, η δομή πολλαπλών δοντιών οδηγεί σε μείωση της επιφάνειας για περιελίξεις χαλκού και μείωση της διαφοράς αυτεπαγωγής μεταξύ των ευθυγραμμισμένων και των μη ευθυγραμμισμένων θέσεων, οι οποίες με τη σειρά τους μειώνουν την παραγωγή ροπής. Επειδή αυτή η δομή γενικά προσφέρει μικρότερη γωνία βήματος, αυξάνει ουσιαστικά τη συχνότητα μεταγωγής και συνεπώς τις απώλειες πυρήνα. Επομένως, το όφελος από τη χρήση πολλαπλών δοντιών ανά πόλο στάτη για τη βελτίωση της πυκνότητας ροπής πρέπει να περιορίζεται σε σχεδιασμό χαμηλής ταχύτητας, όπως για την πρόωση EV με άμεση κίνηση. Λόγω των πλεονεκτημάτων της ισχυρής δομής, της αντοχής στη θερμότητα και του εύκαμπτου σχήματος, το μηχανήμα SR είναι ελκυστικό για κίνηση σε τροχούς σε EVs. Συγκεκριμένα, η τοπολογία εξωτερικού ρότορα επιτρέπει στον ρότορα να τοποθετείται με το χείλος του τροχού, εξαλείφοντας έτσι το μειωτήρα και την αντίστοιχη απώλεια μετάδοσης.



Εικόνα 27: Τριφασική μηχανή SR 12/10 πόλων με δύο δόντια ανά πόλο στο στάτη

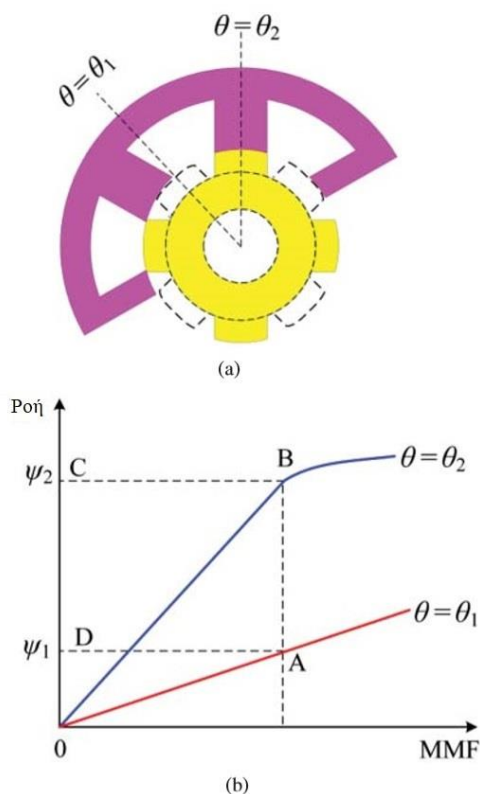
Στην Εικόνα 28 δείχνει μια τριφασική 6/8-πολική μηχανή SR εξωτερικού ρότορα. Διαφορετικά από τη συμβατική τοπολογία της μηχανής SR ότι ο ρότορας έχει μικρότερη διάμετρο από τον στάτη, αυτή η τοπολογία εξωτερικού ρότορα έχει μεγαλύτερη διάμετρο ρότορα. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των πόλων ρότορα επιλέγεται γενικά ώστε να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των πόλων του στάτη προκειμένου να μειωθεί η ροπή ροπής που επιβάλλεται απευθείας στον τροχό. Εν τω μεταξύ, αυτή η μηχανή εξωτερικού στροφέα SR υιοθετεί κατά προτίμηση τον σχεδιασμό σε σχήμα κελύφους, δηλαδή μεγάλη ακτινική διάμετρο και κοντό αξονικό μήκος, έτσι ώστε να μπορεί να εμφυτευθεί εύκολα στον τροχό.



Εικόνα 28: Τριφασικός κινητήρας SR 6/8 πόλων εξωτερικού ρότορα

2.4.2 Αρχή λειτουργίας κινητήρα μαγνητικής μαγνητικής αντίδρασης

Λόγω της ιδιαίτερης φύσης και των δύο πόλων στάτη και ρότορα της μηχανής SR, η απροθυμία της διαδρομής μαγνητικής ροής για κάθε περιέλιξη φάσης ποικίλει ανάλογα με τη θέση του ρότορα. Έτσι, η αρχή της παραγωγής ροπής βασίζεται στον κανόνα "ελάχιστης αντίστασης", δηλαδή, ένας πόλος ρότορα τείνει να ευθυγραμμιστεί με τον διεγερμένο πόλο στάτη, έτσι ώστε η αντίδραση της διαδρομής μαγνητικής ροής να είναι ελάχιστη.



Εικόνα 29: Αρχή λειτουργίας κινητήρα SR: (a) θέση ρότορα (b) χαρακτηριστική ροής

Η παραγωγή ροπής μπορεί να εξηγηθεί μαθηματικά με τη χρήση θεμελιωδών αρχών της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας (Krishnan, 2001). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 29, οι πόλοι του στάτη τυλίγονται με συγκεντρωμένες περιελίξεις N στροφών. Όταν διεγείρονται με ένα ρεύμα i , δημιουργείται μια μαγνητική ροή ψ . Τα χαρακτηριστικά ροής έναντι μαγνητεγερτικής δύναμης (MMF) σχεδιάζονται για την μη ευθυγραμμισμένη θέση μεταξύ των πόλων του στάτη και του ρότορα στο $\theta = \theta_1$ και της ευθυγραμμισμένης θέσης μεταξύ των στύλων του στάτη και του ρότορα στο $\theta = \theta_2$. Μπορεί να φανεί ότι η ροή έναντι του MMF που είναι χαρακτηριστική της μη ευθυγραμμισμένης θέσης είναι σχεδόν γραμμική επειδή η αντίδραση του διακένου αέρα είναι μεγάλη και κυρίαρχη, ενώ το χαρακτηριστικό της ευθυγραμμισμένης θέσης είναι μη γραμμικό επειδή η αντίδραση της διαδρομής μαγνητικής ροής πάσχει από μαγνητικό κορεσμό.

Με τη διέγερση του τυλίγματος φάσης, η ενέργεια εισόδου W_i εκφράζεται ως:

$$W_i = \int e i dt$$

Εξίσωση 30

όπου e είναι η επαγόμενη ηλεκτρομαγνητική δύναμη (EMF) που δίνεται από:

$$e = \frac{d(N\psi)}{dt}$$

Εξίσωση 31

Ως εκ τούτου, η ενέργεια εισόδου μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$W_i = \int F_i d\psi$$

Εξίσωση 32

όπου $F_i = N i$ είναι το MMF που διεγείρεται στην εκκαθάριση φάσης. Αυτή η ενέργεια εισόδου είναι ίση με το άθροισμα της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου που είναι αποθηκευμένη στη φάση τύλιξης W_f και της μηχανικής ενέργειας εξόδου που μετατρέπεται σε κίνηση W_o :

$$W_i = W_f + W_o$$

Εξίσωση 33

Για διαδοχικές αλλαγές, η εξίσωση 33 μπορεί να ξαναγραφεί ως

$$\delta W_i = \delta W_f + \delta W_o$$

Εξίσωση 34

Για ένα δεδομένο ρεύμα και MMF, οι αντίστοιχες ενέργειες μπορούν να εξαχθούν ως:

$$\delta W_i = \int_{\psi_1}^{\psi_2} F_i d\psi = \text{area}(ABCD)$$

Εξίσωση 35

$$\delta W_f = \text{area}(OBC) = \text{area}(OAD)$$

Εξίσωση 36

Ως εκ τούτου, η αυξητική ενέργεια εξόδου δίνεται από

$$\delta W_o = \delta W_i - \delta W_f = \text{area}(OAB)$$

Εξίσωση 37

που είναι στην πραγματικότητα η περιοχή μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών για ένα δεδομένο MMF. Η αυξητική ενέργεια εξόδου σε σχέση με τη μεταβολή της θέσης του ρότορα $\delta\theta$ είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή T που μπορεί να εκφράζεται ως

$$T = \frac{\delta W_o}{\delta\theta}$$

Εξίσωση 38

Αυτή η αυξητική ενέργεια εξόδου είναι στην πραγματικότητα ίση με την αλλαγή συνέργειας μεταξύ των ευθυγραμμισμένων και μη ευθυγραμμισμένων θέσεων και η συνένωση W_f' ορίζεται ως συμπλήρωμα της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου:

$$W_f' = \int \psi dF_i = \int N\psi di = \int L(\theta, i) i di$$

Εξίσωση 39

όπου L είναι η επαγωγή που ορίζεται ως η σύνδεση ροής πάνω από το ρεύμα και είναι συνάρτηση του ρότορα θέση και ρεύμα.

Ως εκ τούτου, η ροπή μπορεί να ξαναγραφεί ως

$$T = \left. \frac{\delta W_f'(\theta, i)}{\delta\theta} \right|_{i=\text{constant}}$$

Εξίσωση 40

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει μαγνητικός κορεσμός, η αυτεπαγωγή μεταβάλλεται γραμμικά με τη θέση του ρότορα για δεδομένο έτσι ώστε η ροπή να δίνεται από:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta}$$

Εξίσωση 41

Σε περίπτωση μαγνητικού κορεσμού, η ροπή δεν μπορεί πλέον να εκφραστεί ως μια απλή αλγεβρική εξίσωση. Στην πραγματικότητα, πρέπει να εκφραστεί ως μια ολοκληρωτική εξίσωση:

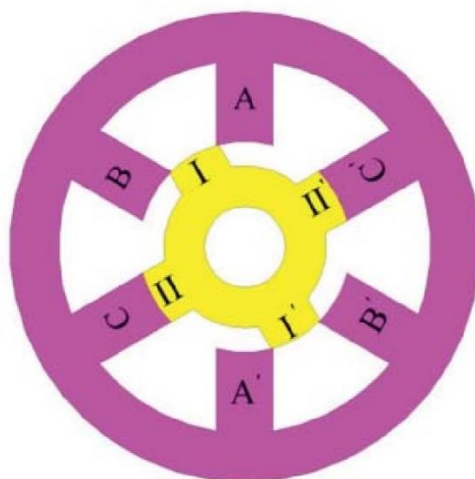
$$T = \int_0^i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i di$$

Εξίσωση 42

Βάσει της προαναφερθείσας αρχής της παραγωγής ροπής, η αρχή της περιστροφής μπορεί εύκολα να εξηγηθεί χρησιμοποιώντας τη μηχανή τριφασικών 6/4-πόλων SR όπως φαίνεται στο στην Εικόνα 30.

Όταν η περιέλιξη φάσης A διεγείρεται, ο ρότορας τείνει να περιστρέφεται δεξιόστροφα για να μειώσει την αντίδραση της διαδρομής ροής μέχρι να ευθυγραμμιστούν οι πόλοι I και I' του ρότορα με τους πόλους στάτη A και A' όπου η απροθυμία της διαδρομής ροής έχει μια ελάχιστη τιμή. Στη συνέχεια, η φάση A είναι απενεργοποιημένη και η φάση B ενεργοποιείται έτσι ώστε η ροπή στρέψεως να τείνει να ευθυγραμμίσει τους πόλους II και II του ρότορα με τους πόλους του στάτη B και B'. Παρομοίως, η διέγερση της περιέλιξης φάσης C έχει ως αποτέλεσμα την ευθυγράμμιση των στύλων I και I' του ρότορα με τους πόλους στάτη C και C' αντίστοιχα.

Η φορά ροπής είναι πάντα προς την πλησιέστερη ευθυγραμμισμένη θέση. Συνεπώς, με τη διεξαγωγή των περιελίξεων φάσης στην ακολουθία του A-B-C σύμφωνα με την ανάδραση θέσης του ρότορα από τον αισθητήρα θέσης, ο ρότορας μπορεί να περιστρέφεται συνεχώς δεξιόστροφα. Αντίθετα, με τη διεξαγωγή των περιελίξεων φάσης στην ακολουθία του A-C-B, ο δρομέας περιστρέφεται αριστερόστροφα.



Εικόνα 30: Αρχή Λειτουργίας κινητήρα SR

2.5 Σύγκριση των κινητήρων

Οι γενικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται από τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες, ευρεία περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας υπό σταθερή ισχύ, υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση, μικρό βάρος, χαμηλό κόστος, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής με την ελάχιστη δυνατή ανάγκη για συντήρηση. Αφού πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, επιλέγεται ο τύπος κινητήρα που είναι καταλληλότερος για την εκάστοτε εφαρμογή.

Ένας τύπος κινητήρα που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος. Η τεχνολογική ωριμότητα και ο απλός έλεγχός τους υπερισχύουν σε κάποιες εφαρμογές έναντι της απαίτησης για συντήρηση και αντικατάσταση των ψηκτρών. Ωστόσο η αξιοπιστία των κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και η ανάγκη για εξάλειψη της ανάγκης για συντήρηση είναι πρωτεύουσας σημασίας. Τεχνολογικές εξελίξεις έχουν θέσει τους κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψήκτρες στο προσκήνιο, επειδή έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

Ο επαγωγικός κινητήρας είναι ένας τύπος κινητήρα με ευρεία εφαρμογή στα ηλεκτροκίνητα οχήματα, με κύριες αιτίες το μικρό κόστος, τον εύκολο έλεγχο και την υψηλή αξιοπιστία. Για την οδήγησή τους χρησιμοποιείται διάταξη αντιστροφes με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.

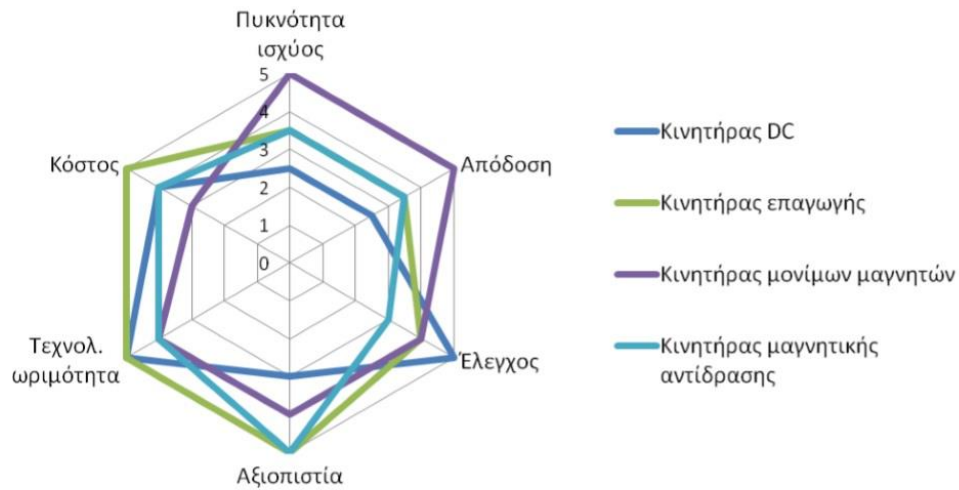
Μια ακόμα εναλλακτική λύση που αναπτύσσεται όλο και περισσότερο είναι ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα. Με την αντικατάσταση του τυλίγματος πεδίου από μόνιμους μαγνήτες επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών χαλκού και η έλλειψη ψηκτρών αυξάνει την αξιοπιστία. Οι κινητήρες αυτοί τροφοδοτούνται από ημιτονοειδή τάση, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ισχύος και υψηλή απόδοση.

Ένας άλλος τύπος μηχανής είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης οι οποίοι δε διαθέτουν ούτε τυλίγμα διέγερσης ούτε μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, αλλά εκμεταλλεύονται αποκλειστικά τη ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους, δεν έχει όμως την ικανότητα παροχής μεγάλης ισχύος εξόδου.

Επιπρόσθετα από τα παραπάνω είδη μηχανής, υπάρχει ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες (Brushless DC). Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν επίσης υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη πυκνότητα ισχύος, ενώ δύνανται να παρέχουν υψηλές τιμές ροπής λόγω της ορθογώνιας μορφής της μαγνητικής ροής και του ρεύματος. Ένα μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτείται ακριβής γνώση της θέσης του δρομέα για την οδήγησή τους, η οποία επιτυγχάνεται με αισθητήρες ή με τεχνικές υπολογισμού της θέσης του δρομέα από μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών.

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των βασικών κατηγοριών κινητήρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω χρησιμοποιείται ένα σύστημα βαθμολόγησης. Αξιολογούνται έξι βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων και η κλίμακα εκτείνεται από το ένα ως το πέντε. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 31, οι επαγωγικοί κινητήρες

προσφέρονται για χρήση σε τέτοιου είδους οχήματα. Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών επίσης ενδείκνυνται για τέτοιες εφαρμογές, καθώς εμφανίζουν υψηλή απόδοση και αποκτούν μεγαλύτερη οικονομοτεχνική βιωσιμότητα καθώς το κόστος των μονίμων μαγνητών μειώνεται. Μια σημαντική ανακάλυψη που επέφερε τη μείωση του κόστους των μονίμων μαγνητών είναι αυτή του κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου - Βορίου το 1982, η οποία έδωσε στην αγορά φθηνότερους μαγνήτες ενώ παράλληλα οι μαγνήτες Νεοδυμίου είναι μέχρι σήμερα οι πιο ισχυροί που κυκλοφορούν.



Εικόνα 31: Σύγκριση κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων

2.6 Απόδοση κινητήρων

Παρόλο που ο ηλεκτροκινητήρας είναι αυτός που κινεί ένα EV οι συζητήσεις για την ηλεκτροκίνηση αναλώνονται γύρω από τις μπαταρίες. Δικαιολογημένα, μιας και αυτές αποτελούν το στοιχείο που απαιτεί σημαντικές βελτιώσεις ως προς τον χρόνο φόρτισης και την προσφερόμενη αυτονομία. Ωστόσο, αυτό δε σημαίνει πως οι ηλεκτροκινητήρες δεν είναι εξίσου σημαντικοί.

Ο βαθμός απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων είναι ένα άλλο θαυμάσιο προτέρημα του. Ένα συμβατικό μοτέρ εκμεταλλεύεται μόλις το 1/3 από την καύση του καυσίμου για την μετατροπή του σε ροπή και ισχύ. Η Toyota κατάφερε να φτιάξει ένα κινητήρα βενζίνης με απόδοση 40%. Ένα ηλεκτρικό μοτέρ έχει απόδοση πάνω από 90%.

Για παράδειγμα σε έναν κινητήρα DC η απόδοση του κυμαίνεται από 75% έως 90% και δίδεται από τον λόγο της μηχανικής ισχύος στον άξονα (P_{out}) προς την ηλεκτρική ισχύ που απορροφά (P_{in}) από τον δίκτυο.

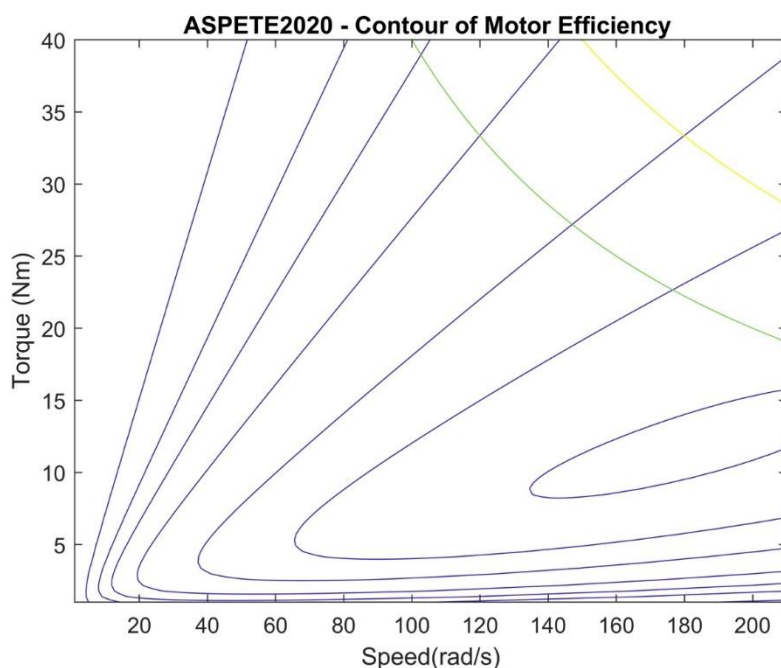
Η ισχύς που αποδίδει ο κινητήρας στον άξονα του δίνεται από τη σχέση:

$$P_{out} = T_a \Omega = T_a 2\pi n$$

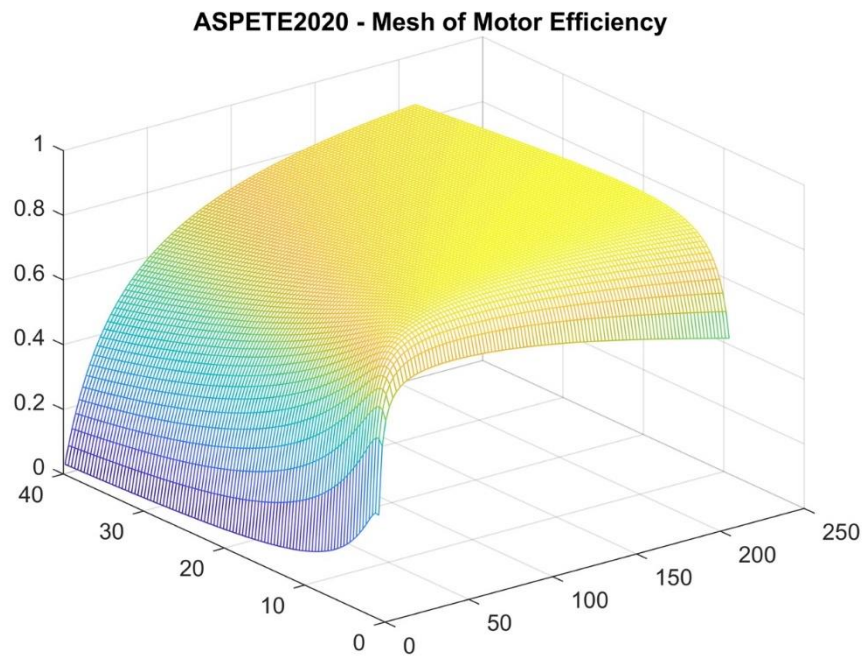
Εξίσωση 43

όπου T_a : είναι η ροπή (σε Nm) που αναπτύσει ο κινητήρας στον άξονα του και
 n : είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (σε στρ/sec= rpm)

Η γραφική παρακάτω μας δείχνει την απόδοση του κινητήρα DC στον άξονα για διαφορετικές τιμές ροπής/ταχύτητας.



Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την χαρακτηριστική κυκλικού περιγράμματος ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC Motor)



Ο κώδικας MATLAB που χρησιμοποιήθηκε δίνεται στο παράρτημα.

Κεφάλαιο 3

Έλεγχος των κινητήρων σε ηλεκτρικά οχήματα

3.1 Έλεγχος κινητήρων Σ.Ρ.

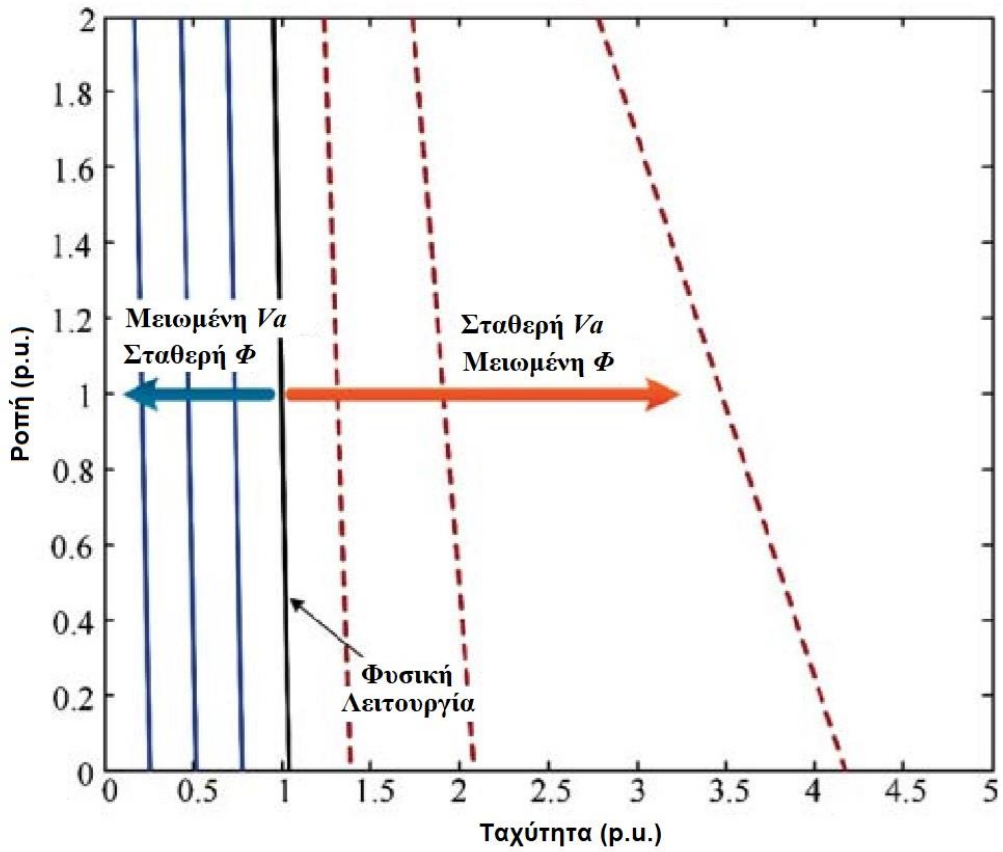
Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας ελέγχου (control simplicity). Μεταξύ όλων των ειδών κινητήρων DC, ο κινητήρας DC ξένης διέγερσης προσφέρει την υψηλότερη δυνατότητα ελέγχου επειδή ο οπλισμός και τα ρεύματα πεδίου μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα, ενώ ο κινητήρας σειράς DC είναι σχετικά άκαμπος δεδομένου ότι ο οπλισμός και ρεύματα του πεδίου αναγκάζονται να είναι τα ίδια.

3.1.1 Έλεγχος ταχύτητας κινητήρων Σ.Ρ.

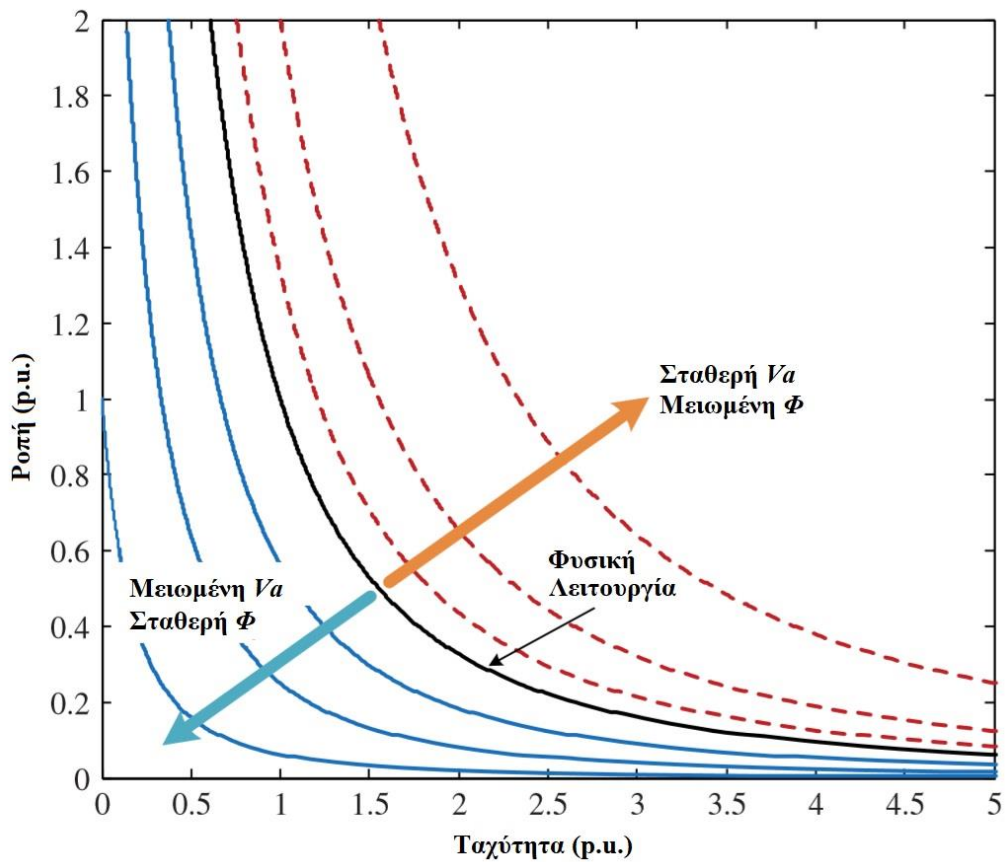
Γενικά, ο έλεγχος ταχύτητας σε έναν DC κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: με τον έλεγχο της τάσης του οπλισμού (armature voltage control) και με τον έλεγχο εξασθένησης ροής (flux-weakening control). Όταν η τάση οπλισμού ενός DC κινητήρα μειωθεί, το ρεύμα του οπλισμού και ως εκ τούτου και η ροπή του κινητήρα θα μειωθούν, μειώνοντας έτσι και την ταχύτητα του κινητήρα. Εν αντιθέσει, όταν η τάση οπλισμού αυξηθεί, η ροπή του κινητήρα αυξάνεται, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα του κινητήρα. Κάτω από τον έλεγχο της τάσης του οπλισμού, οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας ενός κινητήρα ξένης διέγερσης και ενός κινητήρα σειράς DC παρουσιάζονται με σταθερές γραμμές στις Εικόνες 32 και 33 αντίστοιχα.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν για οποιαδήποτε τιμή στις χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας κάτω από την καμπύλη της φυσικής λειτουργίας των χαρακτηριστικών. Επίσης, η κλίση αυτών των χαρακτηριστικών δεν αλλάζει με την μεταβολή της ταχύτητας. Επειδή το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα του οπλισμού παραμένει σταθερό, ο έλεγχος τάσης του οπλισμού έχει το πλεονέκτημα να διατηρεί τη μέγιστη δυνατή ροπή σε όλες τις ταχύτητες. Ωστόσο, επειδή η τάση του οπλισμού δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω πέρα από την ονομαστική τιμή, ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιείται μόνο όταν ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος λειτουργεί κάτω από την βασική του ταχύτητα (base speed).

Όταν η τάση πεδίου του κινητήρα συνεχούς ρεύματος εξασθενεί ενώ σταθεροποιείται η τάση του οπλισμού, μειώνεται η ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα. Λόγω της χαμηλής αντίστασης στον οπλισμό, το ρεύμα του οπλισμού θα αυξηθεί κατά ένα ποσό πολύ μεγαλύτερο από τη μείωση του πεδίου (decrease in the field). Έτσι, η πρόσθετη ροπή του κινητήρα προκαλεί την αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα. Κάτω από αυτόν τον έλεγχο εξασθένησης ροής (flux-weakening control), οι χαρακτηριστικές ταχύτητας ροπής των κινητήρων DC ξένης διέγερσης και των κινητήρων σειράς DC παρουσιάζονται με διακεκομμένες γραμμές στα σχήματα στις εικόνες 32 και 33, αντίστοιχα. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η κλίση αυτών των χαρακτηριστικών δεν διατηρείται πλέον σταθερή, αλλά επηρεάζεται από τη ροή.

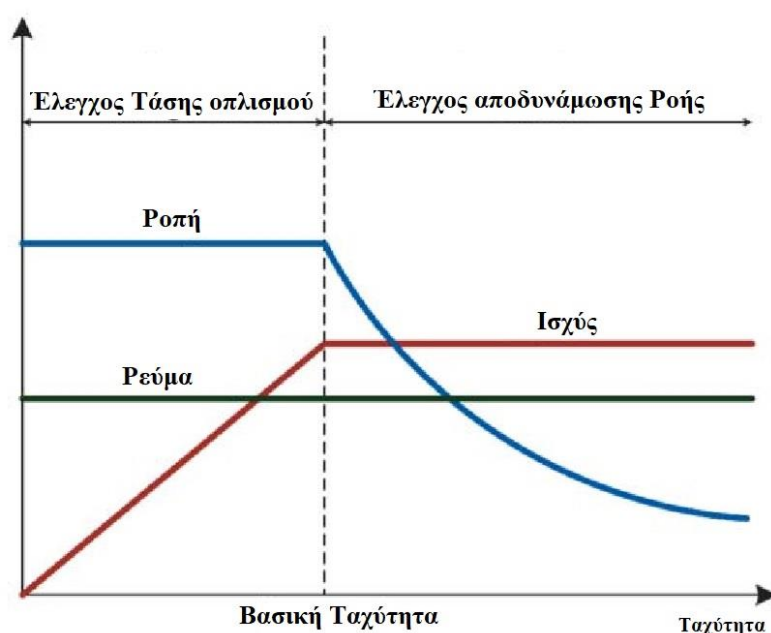


Εικόνα 32: Χαρακτηριστικές Ελέγχου κινητήρα DC ξένης διέγερσης



Εικόνα 33: Χαρακτηριστικές Ελέγχου κινητήρα DC σειράς

Προκειμένου να επιτευχθεί ένα ευρύ φάσμα ελέγχου της ταχύτητας, ο έλεγχος της τάσης του οπλισμού και ο έλεγχος απόσβεσης της ροής πρέπει να είναι ανεξάρτητοι, οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν μόνο στον κινητήρα ξένης διέγερσης DC. Κάτω από την βασική ταχύτητα, η τάση οπλισμού μεταβάλλεται, ενώ η ροή διατηρείται στην ονομαστική τιμή. Δεδομένου ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα οπλισμού είναι σταθερό, η δυνατότητα ροπής υπό τον έλεγχο της τάσης οπλισμού μπορεί να διατηρηθεί σταθερή, η επονομαζόμενη περιοχή σταθερής ροπής. Πάνω από την βασική ταχύτητα, η ροή εξασθενεί, ενώ η τάση οπλισμού διατηρείται στην ονομαστική τιμή. Δεδομένου ότι η τάση οπλισμού είναι σταθερή και το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα οπλισμού είναι σταθερό, η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) παραμένει σταθερή για όλες τις ταχύτητες.



Εικόνα 34: Λειτουργικές δυνατότητες κινητήρων DC σειράς υπό συνδυασμένο έλεγχο οπλισμού και ροής

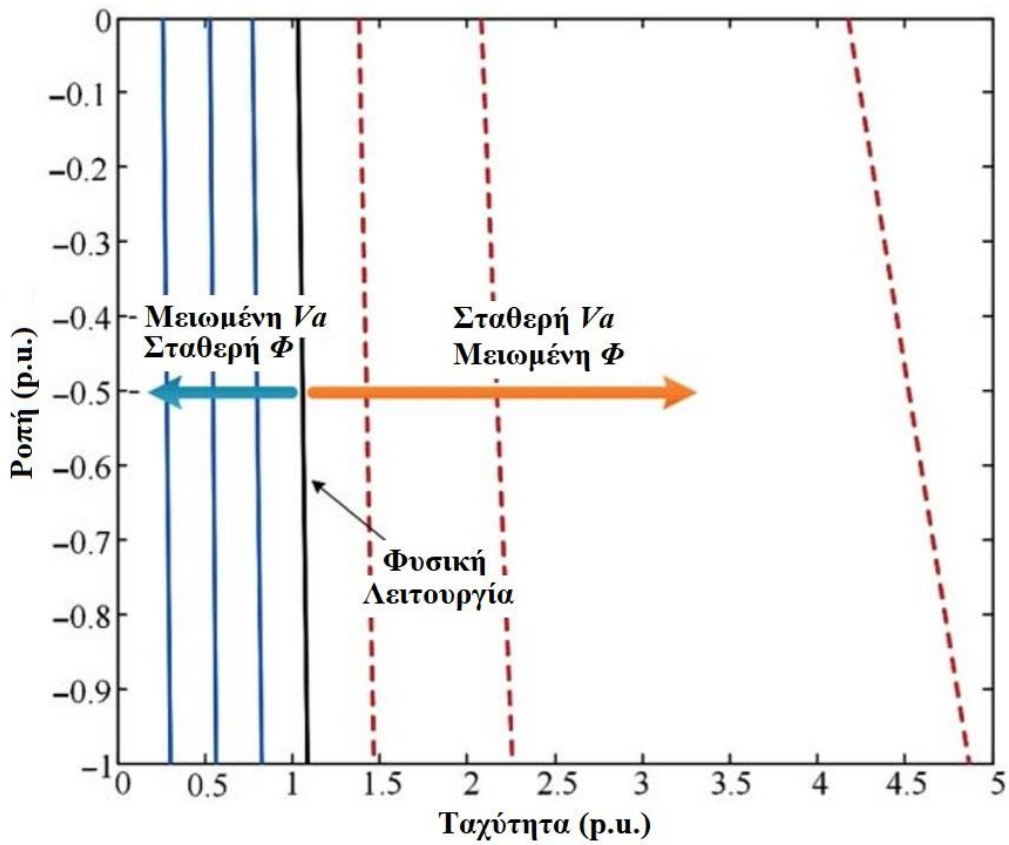
Ως εκ τούτου, η ισχύς είναι σταθερή, η λεγόμενη περιοχή σταθερής ισχύος, και η δυνατότητα ροπής (torque capability) μεταβάλλεται αντίστροφα με την ταχύτητα του κινητήρα. Στο σχήμα της Εικόνας 34 απεικονίζει αυτές τις δυνατότητες ροπής και ισχύος.

3.1.2 Αναγεννητική πέδηση στις μηχανές Σ.Ρ.

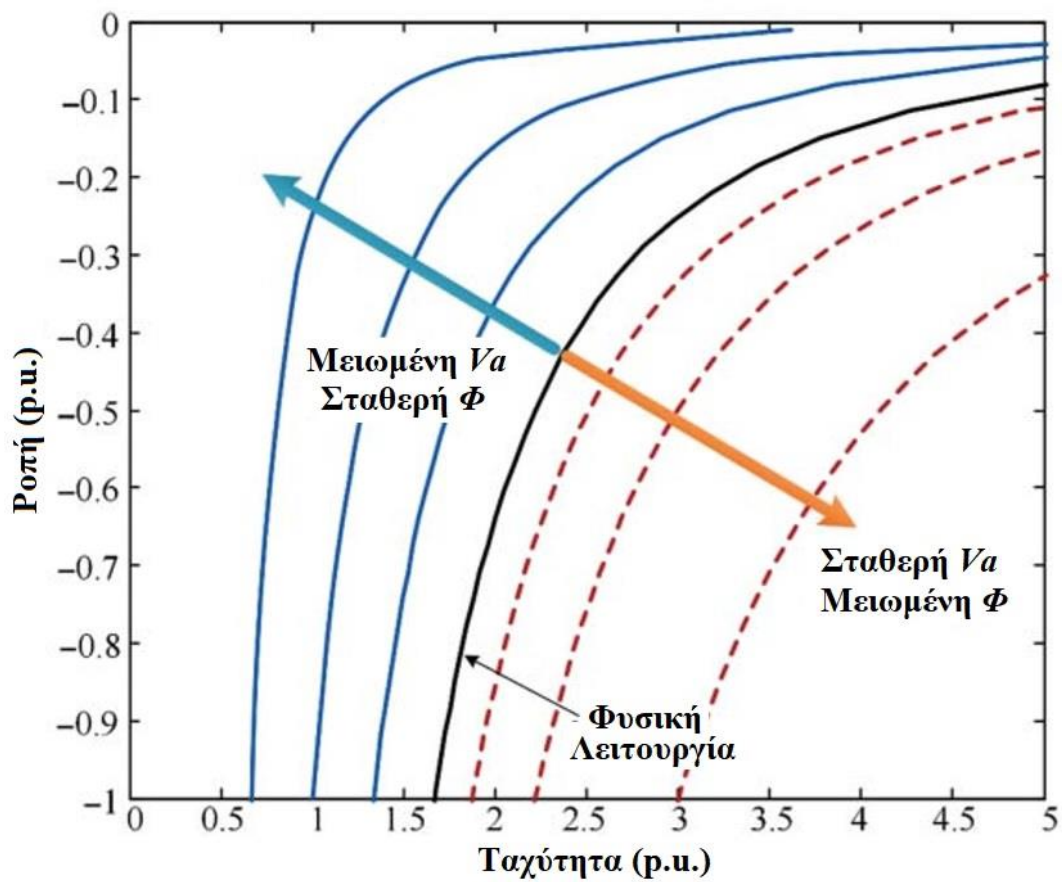
Υπάρχουν διάφορες τεχνικές πέδησης ηλεκτρικού ρεύματος για κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ενδεικτικά υπάρχει το φρενάρισμα με αναγεννητική πέδηση (regenerative braking), ρεοστατικό φρενάρισμα (rheostatic braking) και σύνδεση (plugging). Η αναγεννητική πέδηση υιοθετείται σχεδόν αποκλειστικά από τα EVs επειδή το αντίστοιχο πακέτο μπαταριών έχει την ικανότητα να απορροφά και να αποθηκεύει την ενέργεια μηχανικής πέδησης, ενώ η ρεοστατική πέδηση και η σύνδεση σπάνια χρησιμοποιούνται σε EVs καθώς η αντίστοιχη ενέργεια φρεναρίσματος σπαταλάται σε αντιστάσεις.

Εάν ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος τροφοδοτείται από μια σταθερή πηγή τάσης V_s , η αναγεννητική πέδηση μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για ταχύτητες πάνω από την ονομαστική ταχύτητα. Με τη χρήση του ελέγχου DC chopper, είναι δυνατό να επιτευχθεί αναγεννητική πέδηση μέχρι σχεδόν τη μηδενική ταχύτητα. Δηλαδή, με βάση τον DC chopper δύο τεταρτημορίων, η τάση του ακροδέκτη του οπλισμού μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας τον κύκλο εργασίας δ να είναι χαμηλότερος από την αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη E έτσι ώστε το ρεύμα του οπλισμού να είναι αρνητικό, δημιουργώντας έτσι αρνητική ροπή για φρενάρισμα με ανάκτηση ενέργειας. Για τον κινητήρα DC με ξένη διέγερση, η έκφραση ροπής για την αναγεννητική πέδηση είναι η ίδια με αυτή για την οδήγηση, αλλά με αρνητική τιμή του ρεύματος οπλισμού όταν $\delta < (E/V_s)$. Επίσης, όταν επιθυμείτε φρενάρισμα αναγεννητικής λειτουργίας πάνω από την ονομαστική ταχύτητα, η ροή πρέπει να αποδυναμωθεί αναλόγως. Οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές ταχύτητας ροπής εμφανίζονται στην Εικόνα 35.

Για τον ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος σειράς, η αναγεννητική πέδηση μπορεί να εκτελείται με βάση την ίδια αρχή με αυτήν του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, αλλά το πεδίο πρέπει να αντιστραφεί σε σχέση με τον οπλισμό σε σύγκριση με τη σύνδεση για οδήγηση (motoring). Δηλαδή, συνδέοντας το πεδίο μέσω ενός ανορθωτή γέφυρας, το ρεύμα του πεδίου μπορεί να διατηρηθεί στην ίδια κατεύθυνση τόσο υπό την οδήγηση όσο και κατά την πέδηση με ανάδραση, ενώ η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη μπορεί να διατηρηθεί θετική. Οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές ταχύτητας-ροπής εμφανίζονται στην Εικόνα 36.



Εικόνα 35: Αναγεννητική Πέδηση κινητήρα DC ξένης διέγερσης



Εικόνα 36: Αναγεννητική Πέδηση κινητήρα DC σειράς

3.2 Έλεγχος επαγωγικών κινητήρων

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι στρατηγικών ελέγχου για τους επαγωγικούς κινητήρες: ο έλεγχος μεταβλητής τάσης μεταβλητής συχνότητας (*Variable-Voltage Variable-Frequency Control*, VVVF), τον έλεγχο προσανατολισμού πεδίου (*field-oriented control*, FOC) και τον άμεσο έλεγχο ροπής (*Direct Torque Control*, DTC).

3.2.1 Έλεγχος μεταβαλλόμενης τάσης και συχνότητας (VVVF)

Ο έλεγχος VVVF έχει υιοθετηθεί ευρέως για τον έλεγχο της ταχύτητας των μηχανισμών διέγερσης (*induction drives*). Βασίζεται σε σταθερό έλεγχο volts / hertz για συχνότητες κάτω από την ονομαστική συχνότητα, και έλεγχο μεταβλητής συχνότητας με σταθερή ονομαστική τάση για συχνότητες πέρα από την ονομαστική συχνότητα. Για πολύ χαμηλές συχνότητες, εφαρμόζεται ενίσχυση τάσης για να αντισταθμιστεί η διαφορά μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης και του επαγόμενου EMF (Dubey, 1989).

Αναφερόμενοι στο ισοδύναμο κύκλωμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 18 στο οποίο παραβλέπεται το R_m , το ρεύμα μαγνήτισης I_m στην ονομαστική ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί ως

$$I_m = \frac{E'_{r_rated}}{X_m} = \frac{E'_{r_rated}}{f_{rated}} \frac{1}{2\pi L_m}$$

Εξίσωση 44

όπου το E'_{r_rated} είναι η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (*back EMF*) στην ονομαστική συχνότητα και το L_m είναι η μαγνητική επαγωγή.

Κάτω από την ονομαστική ταχύτητα, η συχνότητα λειτουργίας f μπορεί να κανονικοποιηθεί ως λόγος συχνότητας α , ο οποίος ορίζεται ως

$$\alpha = \frac{f}{f_{rated}}$$

Εξίσωση 45

Συνεπώς, το αντίστοιχο ρεύμα μαγνητισμού μπορεί να εκφραστεί ως

$$I_m = \frac{E'_r}{\alpha X_m} = \frac{E'_r}{\alpha f_{rated}} \frac{1}{2\pi L_m}$$

Εξίσωση 46

Το ρεύμα μαγνητισμού και επομένως η ροή θα παραμείνουν σταθερές αν $E'_r = aE'_{r_rated}$ ή αλλιώς η επονομαζόμενη σταθερή E / f . Συνεπώς, οι αντίστοιχες μέγιστες ροπές στρέψης, τόσο κατά τη διάρκεια της οδήγησης όσο και κατά την παραγωγή, παραμένουν σταθερές όπως δίνεται από

$$T_{max} = \pm \frac{3}{2\omega_s} \frac{E'^2_{r_rated}}{X'_r}$$

Εξίσωση 47

Επειδή η μέτρηση του αντι-ηλεκτρεγερτικού πεδίου (back EMF) είναι πολύ δύσκολη, η εφαρμοζόμενη τάση γενικά υιοθετείται για την προσέγγιση του αντι-ηλεκτρεγερτικού πεδίου. Έτσι, η επιθυμητή σταθερή στρατηγική E / f προσεγγίζεται με τη σταθερή στρατηγική V / f για τις περισσότερες συχνότητες λειτουργίας, εκτός από τις χαμηλές συχνότητες για λειτουργία χαμηλής ταχύτητας. Σε χαμηλές ταχύτητες, η πτώση της αντίστασης του στάτη καθίσταται αξιοσημείωτη, έτσι ώστε η εφαρμοζόμενη τάση να μην είναι πλέον έγκυρη για να προσεγγίσει την αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη. Συνεπώς, συνήθως απαιτείται τάση αύξησης για να αντισταθμιστεί η πτώση της αντίστασης του στάτη για λειτουργία χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποιώντας τη σταθερή στρατηγική V / f .

$$T_{max} = \frac{3}{2a\omega_s} \left[\frac{V^2_{rated}}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + a^2(X_s + X'_r)^2}} \right]$$

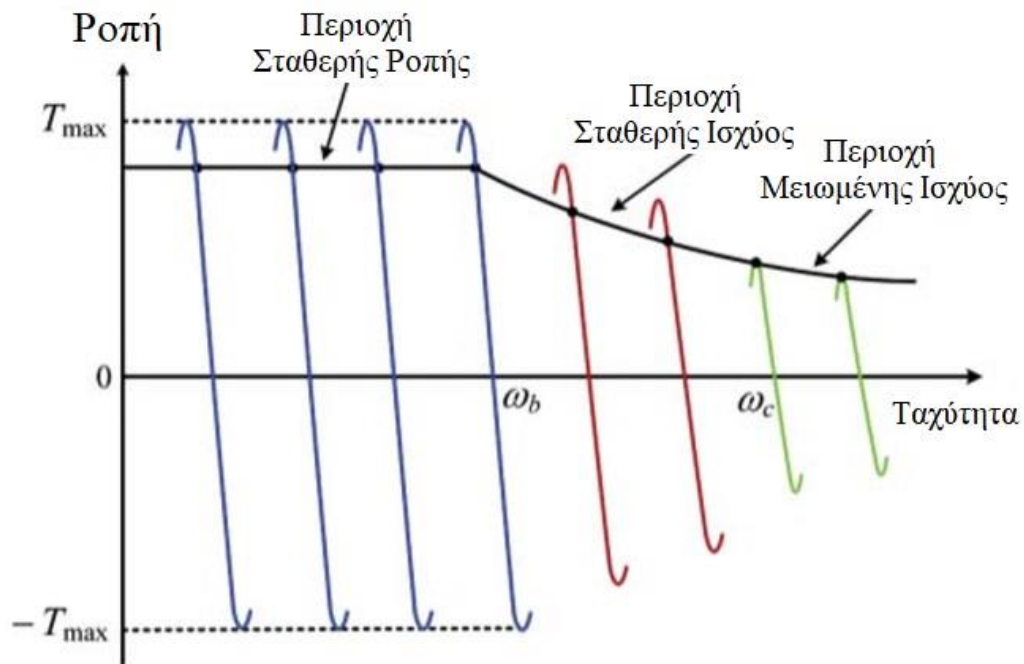
Εξίσωση 48

Δεδομένου ότι η ολίσθηση είναι μικρή, το ρεύμα του ρότορα είναι σχεδόν σε φάση με την αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη. Όταν παραμελείται η απώλεια αντίστασης του ρότορα και η πτώση της αντίστασης του στάτη, η ισχύς εξόδου είναι ίση με την παραγωγή (product) της ονομαστικής τάσης και του ρεύματος του ρότορα. Έτσι, κάτω από το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα στάτη, αυτός ο έλεγχος μεταβλητής συχνότητας προσφέρει λειτουργία σταθερής ισχύος.

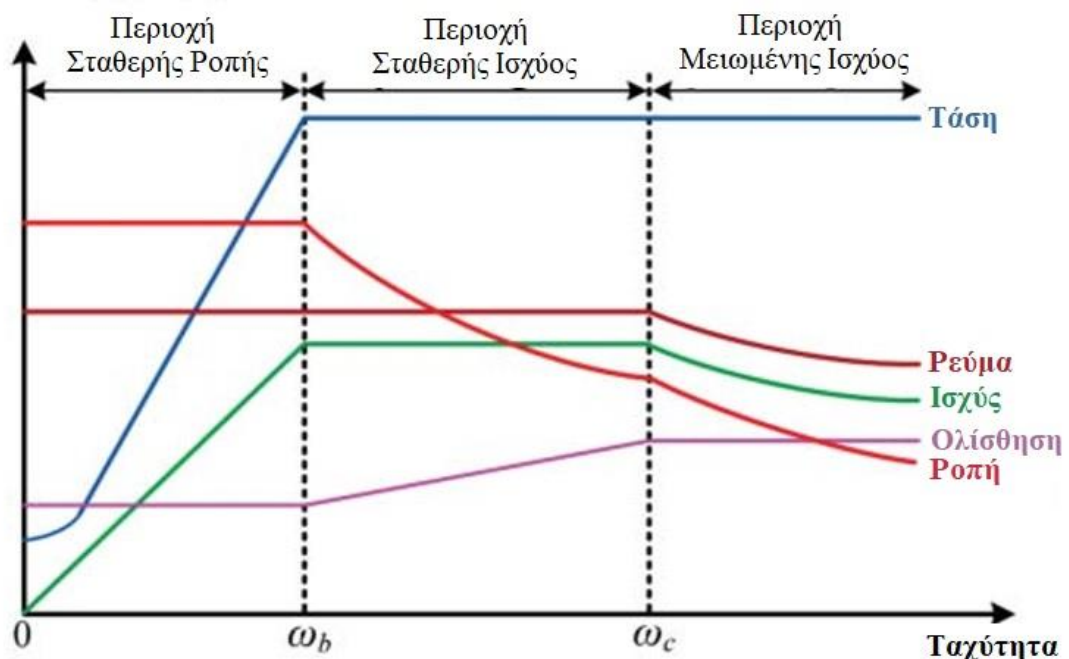
Πέρα από την κρίσιμη ταχύτητα, ο κινητήρας λειτουργεί με την ολίσθηση για τη μέγιστη ροπή. Τόσο το ρεύμα όσο και η ισχύς του κινητήρα επιτρέπεται να μειώνονται αντιστρόφως με την ταχύτητα, και η ροπή μειώνεται αντίστροφα με το τετράγωνο της ταχύτητας.

Συνοπτικά, οι χαρακτηριστικές ταχύτητας-ροπής της κινητήριας επαγωγικής μονάδας (induction motor drive) που χρησιμοποιεί τον έλεγχο VVVF φαίνονται στην Εικόνα 37 και οι αντίστοιχες δυνατότητες ταχύτητας-ροπής (corresponding torque-speed capabilities) εμφανίζονται στην Εικόνα 38. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι υπάρχουν τρεις περιοχές λειτουργίας. Η πρώτη περιοχή ονομάζεται περιοχή σταθερής ροπής, στην οποία ο κινητήρας μπορεί να αποδώσει την ονομαστική ροπή του για ταχύτητες κάτω από την ονομαστική ταχύτητα (συνήθως ονομάζεται βασική ταχύτητα

ω_b). Στη δεύτερη περιοχή, αποκαλούμενη περιοχή σταθερής ισχύος, η κλίση αυξάνεται σταδιακά στη μέγιστη τιμή έτσι ώστε το ρεύμα στάτη να παραμείνει σταθερό και ο κινητήρας να μπορεί να διατηρήσει την ονομαστική του ισχύ.



Εικόνα 37: Χαρακτηριστικές Ροπής-Ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα με έλεγχο μεταβαλλόμενης τάσης και μεταβαλλόμενης συχνότητας



Εικόνα 38: Λειτουργικές δυνατότητες του επαγωγικού κινητήρα με έλεγχο μεταβαλλόμενης τάσης και μεταβαλλόμενης συχνότητας

Όταν η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα ω_c , η ολίσθηση παραμένει σταθερή όσο μειώνεται το ρεύμα στάτη. Έτσι, η ικανότητα ροπής (torque capability) μειώνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας, την αποκαλούμενη περιοχή μειωμένης ισχύος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο η ροπή όσο και η ροή του διάκενου (air-gap flux) κάτω από τον έλεγχο VVVF είναι λειτουργίες τάσης και συχνότητας. Αυτό το φαινόμενο ζεύξης είναι στην πραγματικότητα υπεύθυνο για την αργή ανταπόκριση (sluggish response). Δηλαδή, ο αντίστοιχος έλεγχος ροπής δεν είναι αρκετά γρήγορος και ακριβής για εφαρμογή σε EV υψηλής απόδοσης.

3.2.2 Έλεγχος προσανατολισμού πεδίου (FOC)

Προκειμένου να βελτιωθεί η δυναμική απόδοση των επαγωγικών κινητήρων, η FOC προτιμάται από τον έλεγχο VVVF. Χρησιμοποιώντας το FOC, το μαθηματικό μοντέλο του επαγωγικού κινητήρα αρχικά μετασχηματίζεται από το στατικό πλαίσιο a-b-c στο σταθερό πλαίσιο d^s-q^s , στη συνέχεια στο συγχρόνως περιστρεφόμενο πλαίσιο d^e-q^e με ταχύτητα ω_e όπως φαίνεται στην Εικόνα 39. Έτσι, σε σταθερή κατάσταση, όλες οι ημιτονοειδείς μεταβλητές στο σταθερό πλαίσιο όπως η τάση του στάτη v_s , η ένταση του στάτη i_s , η σύνδεση ροής του στάτη λ_s (, stator flux linkage λ_s), η τάση του ρότορα v_r , το ρεύμα του ρότορα i_r και η σύνδεση ροής του ρότορα λ_r (rotor flux linkage λ_r) μπορούν να αναπαρασταθούν από τις ποσότητες DC σε ένα σύγχρονο περιστρεφόμενο πλαίσιο (synchronously rotating frame) (Novotny and Lipo, 1996, Sul, 2011).

Πρώτον, λαμβάνοντας την θ ως γωνία μεταξύ του άξονα q^s του πλαισίου d^s-q^s και του άξονα a του πλαισίου a-b-c, οι μετασχηματισμένες μεταβλητές στο πλαίσιο d^s-q^s μπορούν να εκφράζονται ως:

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

Εξίσωση 49

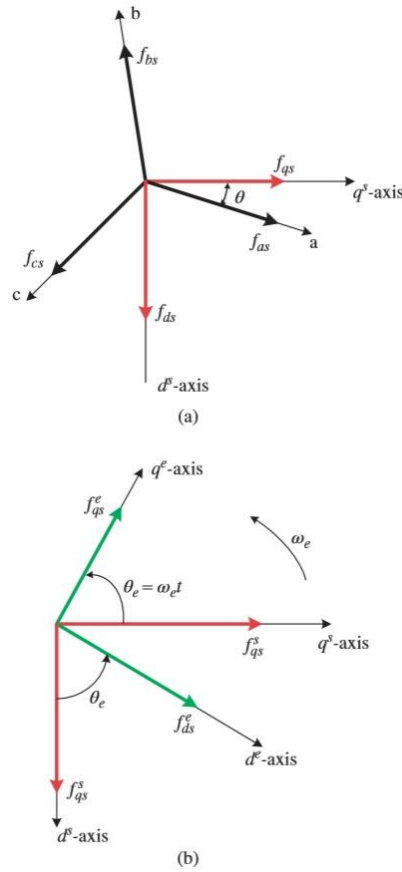
όπου το f μπορεί να είναι οποιαδήποτε μεταβλητή κυκλώματος όπως η τάση, το ρεύμα και η σύνδεση ροής (flux linkage) και ο δείκτης s αναφέρεται στη μεταβλητή που βρίσκεται στο σταθερό πλαίσιο d^s-q^s . Κανονικά, είναι βολικό να ορίσουμε το $\theta = 0$ έτσι ώστε ο άξονας q^s να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα a.

Δεύτερον, καθώς το πλαίσιο d^e-q^e περιστρέφεται συγχρόνως με ταχύτητα ω_e , η γωνία μεταξύ του πλαισίου d^e-q^e και του πλαισίου d^s-q^s είναι $\theta_e = \omega_e t$. Έτσι, οι μετασχηματισμένες μεταβλητές στο πλαίσιο d^e-q^e μπορούν να ληφθούν ως:

$$\begin{bmatrix} f_{ds}^e \\ f_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ds}^s \\ f_{qs}^s \end{bmatrix}$$

Εξίσωση 50

όπου ο δείκτης e αναφέρεται στην μεταβλητή που βρίσκεται στο συγχρονικά περιστρεφόμενο (synchronously rotating) πλαίσιο d^e-q^e



Εικόνα 39: Μετασχηματισμοί συντεταγμένων για FOC: (α) στατικό πλαίσιο a - b - c σε σταθερό πλαίσιο d^s - q^s και (β) σταθερό πλαίσιο d^s - q^s σε σύγχρονο περιστρεφόμενο πλαίσιο d^e - q^e

Μετά την εκτέλεση των δύο παραπάνω μετασχηματισμών, όλες οι ημιτονοειδείς μεταβλητές στο σταθερό πλαίσιο a - b - c γίνονται ποσότητες DC στο πλαίσιο d^e - q^e . Συνεπώς, οι εξισώσεις τάσης της μηχανής μπορούν να εκφράζονται ως:

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + p \lambda_{ds}^e - \omega_e \lambda_{qs}^e$$

Εξίσωση 51

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + p \lambda_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e$$

Εξίσωση 52

$$v_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + p \lambda_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e$$

Εξίσωση 53

$$v_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + p \lambda_{qr}^e - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e$$

Εξίσωση 54

όπου R_s είναι η αντίσταση του στάτη ανά φάση, R_r είναι η αναφερόμενη αντίσταση ρότορα ανά φάση, ω_r είναι η ταχύτητα του δρομέα, και p είναι ο διαφορικός χειριστής (differential operator). Κανονικά, το κύκλωμα του δρομέα του IM είναι βραχυκυκλωμένο έτσι ώστε και τα δύο v_{dr}^e και v_{qr}^e να είναι μηδέν. Οι δεσμοί ροής (flux linkages) στάτη και ρότορα μπορούν να εκφράζονται ως

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e$$

Εξίσωση 55

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e$$

Εξίσωση 56

$$\lambda_{dr}^e = L_s i_{dr}^e + L_m i_{ds}^e$$

Εξίσωση 57

$$\lambda_{qr}^e = L_s i_{qr}^e + L_m i_{qs}^e$$

Εξίσωση 58

όπου L_m είναι η αμοιβαία επαγωγή ανά φάση, L_s είναι η αυτεπαγωγή στάτη ανά φάση και L_r είναι η επαγωγή ρότορα ανά φάση. Ως εκ τούτου, η ροπή εξόδου T_e μπορεί να ληφθεί ως:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr}^e i_{dr}^e - \lambda_{qr}^e i_{qs}^e)$$

Εξίσωση 59

όπου P είναι ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Ευθυγραμμίζοντας εσκεμμένα τον d^e -άξονα με τη σύνδεση ροής στροφέα (rotor flux linkage), η σύνδεση ροής στροφέα στον άξονα q^e λ_{qr}^e είναι πάντα μηδενική. Στη συνέχεια, η έκφραση ροπής στην εξίσωση 59 μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e i_{qs}^e = K_e \lambda_{dr}^e i_{qs}^e$$

Εξίσωση 60

όπου K_e είναι η σταθερά ροπής. Είναι ανάλογη με την έκφραση ροπής ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. όπως δίνεται από:

$$T_e = K_e \Phi I_a$$

Εξίσωση 61

όπου η ροή Φ στον ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (ανάλογη με τον d^e άξονα ζεύξης ροής δρομέα λ_{dr}^e στον επαγωγικό κινητήρα (rotor flux linkage)) και το ρεύμα οπλισμού I_a στον κινητήρα DC (ανάλογα με το ρεύμα του στάτη i_{qs}^e του άξονα q^e στον επαγωγικό κινητήρα) μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα. Εν τω μεταξύ,

αντικαθιστώντας το $\lambda_{qr}^e = 0$ στις εξισώσεις 52 και 56, η ζεύξη ροής του δρομέα του άξονα d^e μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\lambda_{dr}^e = \left(\frac{L_m}{\tau_r P + 1} \right) i_{ds}^e$$

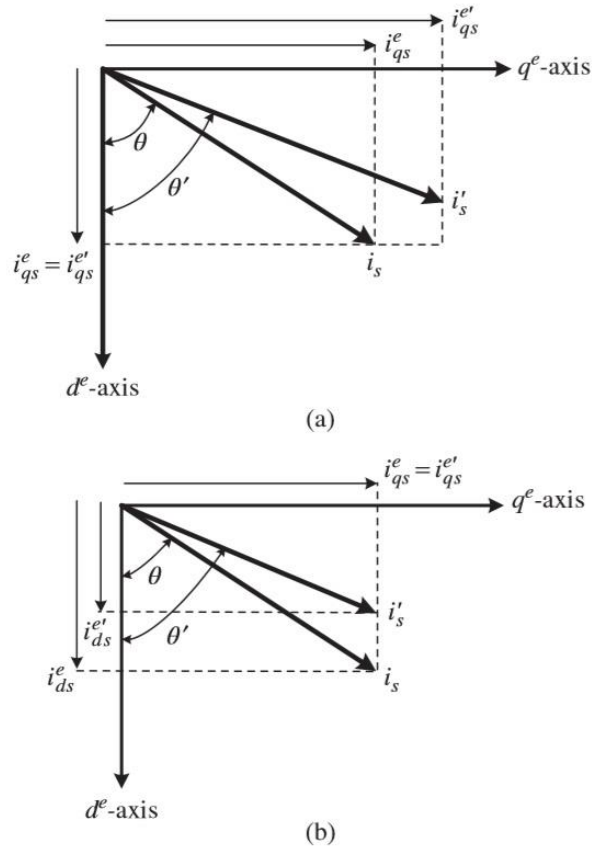
Εξίσωση 62

όπου $\tau_r = L_r/R_r$ είναι η χρονική σταθερά του ρότορα. Έτσι, η σύνδεση της ροής του δρομέα του άξονα d^e μπορεί να ρυθμιστεί ελέγχοντας το ρεύμα στάτη του άξονα d^e , το οποίο μοιάζει με το ρεύμα πεδίου I_f από τον ξεχωριστά διεγερμένο DC κινητήρα. Συγκεκριμένα, όταν το i_{ds}^e διατηρείται σταθερό, το λ_{dr}^e μπορεί να προσεγγισθεί από το $L_m i_{ds}^e$ έτσι ώστε η έκφραση ροπής στην εξίσωση 59 μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω ως

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^e i_{qs}^e$$

Εξίσωση 63

όπου i_{ds}^e είναι τη λεγόμενη συνιστώσα του πεδίου του ρεύματος στάτη (field component of the stator current) και i_{qs}^e είναι η επονομαζόμενη συνιστώσα ροπής του ρεύματος στάτη. Έτσι, μέσω του FOC, η ροπή του κινητήρα μπορεί να ελεγχθεί αποτελεσματικά ρυθμίζοντας την συνιστώσα ροπής εφ' όσον η συνιστώσα του πεδίου παραμένει σταθερή. Συνεπώς, ο κινητήρας επαγωγικής κίνησης μπορεί να προσφέρει την επιθυμητή γρήγορη παροδική απόκριση (fast transient response) παρόμοια με αυτή του κινητήρα DC ξένης διέγερσης. Συνεπώς, οι αρχές ελέγχου, δηλαδή η αύξηση της ροπής και η αποδυνάμωση της ροής, απεικονίζονται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 40: Αρχές FOC: (a) έλεγχος ροπής και (b) έλεγχος ροής

Υπάρχουν δύο τρόποι για την εφαρμογή του FOC για την οδήγηση επαγωγικού κινητήρα: άμεσες και έμμεσες προσεγγίσεις. Το άμεσο FOC, το οποίο ονομάζεται επίσης και ο άμεσος έλεγχος του διανύσματος (direct vector control) , είναι η ταυτόχρονη ταυτοποίηση της σύνδεσης ροής δρομέα με μέτρηση της ροής στο διάκενο (air-gap flux) ή της εκτίμησης της ροής από τη μετρούμενη τάση και ρεύμα στάτη.

Η μέτρηση ροής στο διάκενο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αισθητήρων Hall ή πηνίων ανίχνευσης. Ωστόσο, η τοποθέτηση των αισθητήρων Hall στο διάκενο υποφέρει από τα προβλήματα μηχανικών κραδασμών και μεταβολών της θερμοκρασίας, κάτι που δεν είναι πρακτικό στο σκληρό περιβάλλον λειτουργίας των EVs. Επιπλέον, τα πηνία ανίχνευσης υποφέρουν από τα προβλήματα της χαμηλής ανιχνευμένης τάσης και της κακής αναλογίας σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio) , γεγονός που καθιστά δύσκολο να εξαχθεί η ροή του διακένου κατά τη λειτουργία χαμηλής ταχύτητας.

Από την άλλη πλευρά, η σύνδεση της ροής του ρότορα μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση τάσης στάτη, η οποία βασίζεται στη μετρούμενη τάση (measured terminal voltage) και την ένταση, καθώς και στις παραμέτρους R_s , L_m , L_s και L_r . Ωστόσο, σε χαμηλές ταχύτητες, τα μετρούμενα σήματα τάσης είναι πολύ χαμηλά, τα οποία είναι ακατάλληλα για την εκτίμηση. Εν τω μεταξύ, η σύνδεση ροής δρομέα (rotor flux linkage) μπορεί επίσης να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση

τάσης ρότορα, η οποία βασίζεται στο μετρημένο ρεύμα και την ταχύτητα, καθώς και στις παραμέτρους R_r , L_m και L_r .

Παρόλο που αυτή η τεχνική έχει το πλεονέκτημα ότι η εκτίμηση μπορεί να είναι μηδενική (down to zero speed), απαιτεί ακριβή κωδικοποιητή ταχύτητας (accurate speed encoder). Και οι δύο αυτές τεχνικές εκτίμησης ροής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους του μηχανήματος, είναι επιθυμητή η κατάλληλη αντιστάθμιση για παραλλαγές των παραμέτρων (proper compensation for parameter variations is desirable).

Η έμμεση FOC, που επίσης αποκαλείται έμμεσος έλεγχος διανύσματος, υιοθετείται ευρέως από την κινητήρια μονάδα επαγωγικής κίνησης για την οδήγηση EV (induction motor drive for EV propulsion). Αυτή η τεχνική δεν χρειάζεται να αναγνωρίσει τη σύνδεση ροής ρότορα (rotor flux linkage). Το κλειδί είναι ο υπολογισμός της ταχύτητας ολίσθησης που απαιτείται για την εξαγωγή της στιγμιαίας θέσης ροής θ_e του ρότορα για σωστό προσανατολισμό πεδίου:

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e dt = \int_0^t (\omega_{sl} + \omega_r) dt = \int_0^t \omega_{sl} dt + \theta_r$$

Εξίσωση 64

όπου ω_e είναι η σύγχρονη ταχύτητα, ω_{sl} είναι η ταχύτητα ολίσθησης, ω_r είναι η ταχύτητα του δρομέα και θ_r είναι η θέση του ρότορα που μετράται σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας έναν κωδικοποιητή θέσης. Χρησιμοποιώντας τις εξησώσεις 53 και 57, η ταχύτητα ολίσθησης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{\tau_r} \frac{i_{qs}^e}{\lambda_{dr}^e}$$

Εξίσωση 65

το οποίο είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την εξαγωγή της στιγμιαίας θέσης ροής του ρότορα, επομένως μεταφράζεται ως η κατάσταση αποσύνδεσης (dubbed as the decoupling condition) για την έμμεση FOC. Με βάση τις εξησώσεις 59, 61, 63 και 64, το έμμεσο διάγραμμα συνιστωσών ελέγχου FOC κάτω από την εντολή ροπής T_e^* και την εντολή ροής λ_{dr}^e όπως φαίνεται στην Εικόνα 40.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ροπή και η ροή ελέγχονται με τρόπο προώθησης (feed-forward manner). Αν και η έμμεση FOC έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για επαγωγικούς κινητήρες υψηλής απόδοσης, εξακολουθεί να υφίσταται κάποια μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, η σταθερά χρόνου του ρότορα τ_r (η οποία έχει κυρίαρχη επίδραση στην κατάσταση αποσύνδεσης) αλλάζει σοβαρά με τη θερμοκρασία λειτουργίας και τον μαγνητικό κορεσμό, οδηγώντας στην επιδείνωση της επιθυμητής έμμεσης FOC.

Προς το παρόν, υπάρχουν δύο βολικοί τρόποι επίλυσης αυτού του προβλήματος. Ένας τρόπος είναι να πραγματοποιηθεί ηλεκτρονική αναγνώριση της χρονικής σταθεράς του δρομέα και, συνεπώς, να ενημερωθούν οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον έμμεσο ελεγκτή FOC. Ένας άλλος τρόπος είναι να υιοθετήσουμε έναν περίπλοκο αλγόριθμο ελέγχου για να επιτρέψουμε στον έμμεσο ελεγκτή FOC να μην είναι ευαίσθητος στις παραλλαγές των παραμέτρων του κινητήρα.

Το σχήμα προσαρμοστικού ελέγχου μοντέλου αναφοράς (MRAC) (model-reference adaptive control) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για έμμεση FOC της κινητήριας επαγωγικής μονάδας. Ουσιαστικά, υιοθετείται ένας προσαρμοστικός μηχανισμός που ωθεί τον κινητήρα οδήγησης να ακολουθήσει το μοντέλο αναφοράς ακόμη και υπό παραλλαγές παραμέτρων συστήματος, όπως η αλλαγή της σταθεράς χρόνου του ρότορα λόγω παρατεταμένης λειτουργίας. Το καθοριστικό πλεονέκτημα αυτού του προγράμματος MRAC είναι ότι δεν χρειάζεται να διεξάγεται σαφής προσδιορισμός παραμέτρων.

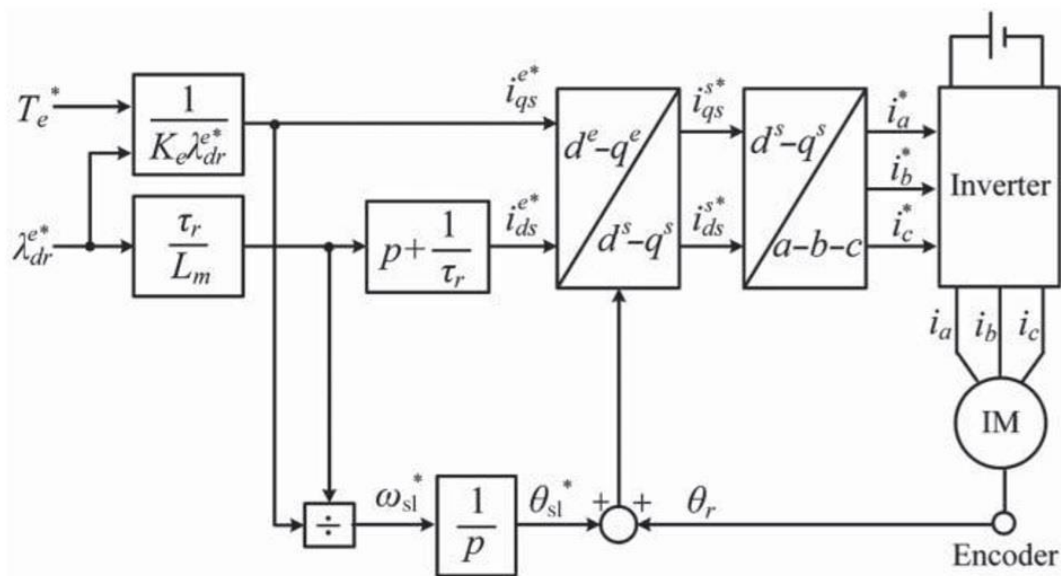
3.2.3 Άμεσος έλεγχος ροπής (DTC)

Ο Άμεσος έλεγχος ροπής (DTC, Direct Torque Control) είναι ένα προηγμένο σύστημα κλιμακωτών ελέγχων που μπορεί να προσφέρει συγκρίσιμες επιδόσεις όπως το FOC για τον επαγωγικό ηλεκτροκινητήρα. Αυτό το σχέδιο είναι για να ελέγχει άμεσα τη σύνδεση ροής του στάτη και τη ροπή, επιλέγοντας σωστά τους τρόπους μεταγωγής του αντιστροφέα PWM που τροφοδοτείται με τάση. Η επιλογή γίνεται για να περιορίσουν τα σφάλματα ροπής και ροής εντός των αντίστοιχων ζωνών υστέρησης ροπής και ροής, ώστε να επιτευχθεί ταχύτερη απόκριση ροπής και ευέλικτη ρύθμιση (Vas, 1998, Bose, 2001).

Στο IM, η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή του εξωτερικού γινομένου (cross product) του διανύσματος πεπλεγμένης ροής στάτη λ_s και του διάνυσμα ρεύματος στάτη i_s όπως δίδεται από:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}^s i_{qs}^s - \lambda_{qs}^s i_{ds}^s) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\bar{\lambda}_s \times \bar{i}_s)$$

Εξίσωση 66



Εικόνα 41: Έμμεσος FOC για επαγωγικό ηλεκτροκινητήρα

Το διάνυσμα λ_s πεπλεγμένης ροής στάτη (stator flux linkage vector) και το διάνυσμα πεπλεγμένης ροής δρομέα λ_r (and rotor flux linkage vector) μπορεί να εκφραστεί με όρους του διανύσματος ρεύματος στάτη i_s και του ρεύματος δρομέα i_r , οι οποίοι εκφράζονται ως

$$\bar{\lambda}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r$$

Εξίσωση 67

$$\bar{\lambda}_s = L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s$$

Εξίσωση 68

Εξαλείφοντας το i_r στις εξισώσεις 65 και 66, το διάνυσμα ζεύξης ροής στάτη μπορεί να γραφτεί ως:

$$\bar{\lambda}_s = \frac{L_m}{L_r} \bar{\lambda}_r + L_x \bar{i}_s$$

Εξίσωση 69

Όπου $L_x = L_s L_r - L_m^2$. Ως εκ τούτου, η έκφραση ροπής στην εξίσωση 64 μπορεί να ξαναγραφεί ως

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_x L_r} (\bar{\lambda}_r \times \bar{\lambda}_s) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_x L_r} |\bar{\lambda}_r| |\bar{\lambda}_s| \sin \gamma$$

Εξίσωση 70

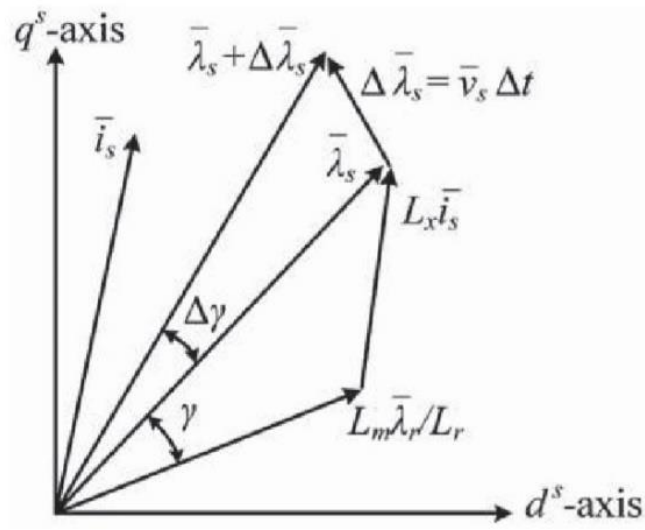
όπου γ είναι η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων σύνδεσης του στάτη και του δρομέα ροής. Στην Εικόνα 42 απεικονίζει το διανυσματικό διάγραμμα σχετικά με τον τρόπο εκτέλεσης του DTC. Δηλαδή, όταν η σύνδεση ροής του ρότορα παραμένει σταθερή, η ροπή μπορεί να μεταβληθεί ταχέως ρυθμίζοντας τη γωνία γ , η οποία μπορεί εύκολα να γίνει με την ενεργοποίηση του καταλλήλου διάνυσμα τάσης στάτη v_s με τέτοιο τρόπο ώστε $\Delta \lambda_s = v_s \Delta t$. Αυτή είναι η ουσία του DTC για τον επαγωγικό ηλεκτροκινητήρα.

Τα διανύσματα τάσης στάτη μπορούν εύκολα να παρέχονται (readily be provided) με τη χρήση του προαναφερθέντος διαγράμματος PWM διανύσματος-διαστήματος για τον αναστροφέα που τροφοδοτείται με τάση. Δηλαδή, τα διανύσματα τάσης στάτη v_{s0} , v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} , v_{s4} , v_{s5} , v_{s6} και v_{s7} είναι ίσα με V_0 (000), V_1 (100), V_2 (110), V_3 (010), V_5 (001), V_6 (101) και V_7 (111), αντίστοιχα.

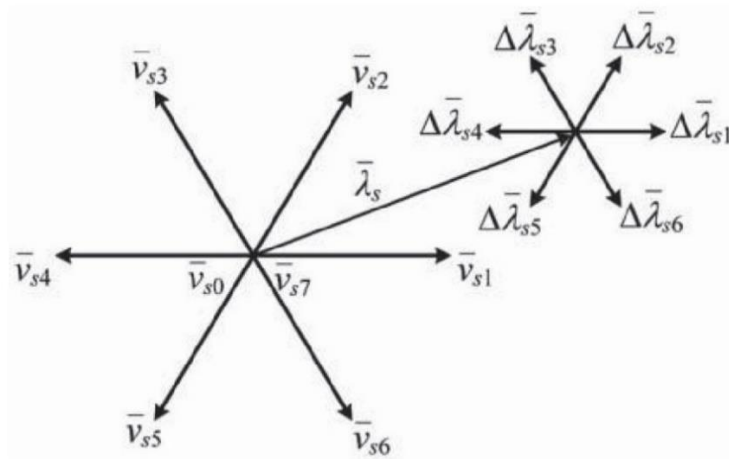
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.23, η σύνδεση ροής στάτη μεταβάλλεται με μια επαυξητική ροή ($\Delta \lambda_{s1}$, $\Delta \lambda_{s2}$, $\Delta \lambda_{s3}$, $\Delta \lambda_{s4}$, $\Delta \lambda_{s5}$ ή $\Delta \lambda_{s6}$) η οποία παράγεται από το αντίστοιχο διάνυσμα τάσης στάτη (v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} , v_{s4} , v_{s5} , ή v_{s6}). Παρατηρήστε ότι το v_{s0} και το v_{s7} δεν παράγουν καμία αλλαγή στη σύνδεση ροής στάτη.

Έτσι, η σύνδεση ροής στάτη κινείται με το διάνυσμα τάσης του στάτη. Εάν απαιτείται μειωμένη σύνδεση ροής στάτη (stator flux linkage), το διάνυσμα τάσης θα επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να κατευθύνεται προς το κέντρο. διαφορετικά, το διάνυσμα τάσης θα επιλεγεί ώστε να είναι προς τα έξω στο κέντρο. Για το DTC, η σύνδεση ροής στάτη απαιτείται για την παρακολούθηση της εντολής ροής μέσα στη ζώνη υστέρησης $2H_\lambda$.

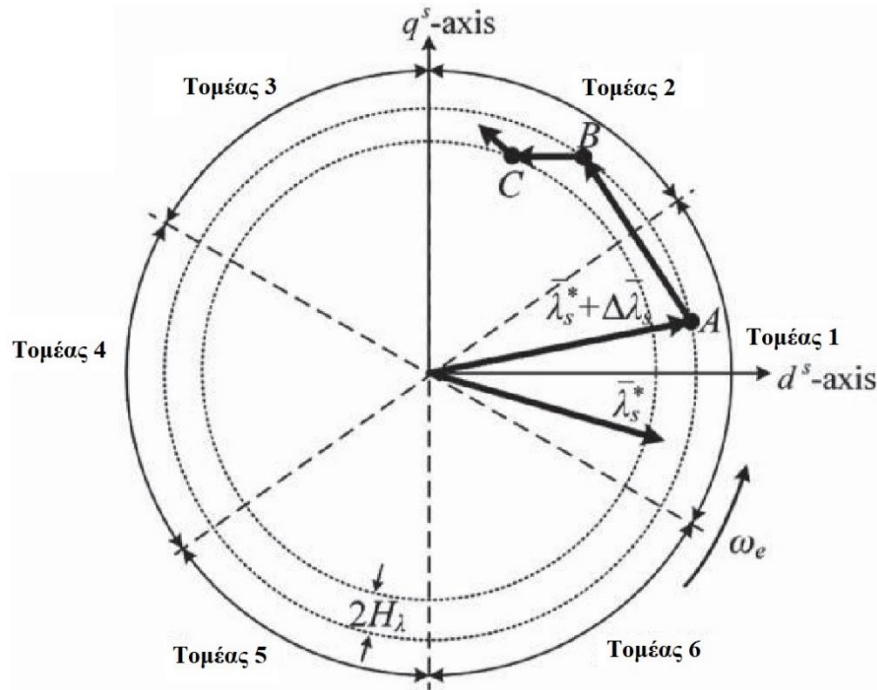
Ο αντίστοιχος τόπος (locus) χωρίζεται σε έξι τομείς. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 44, το διάνυσμα ζεύξης ροής στάτη βρίσκεται αρχικά στη θέση Α στον Τομέα 1 περιστρέφοντας αριστερόστροφα. Δεδομένου ότι η σύνδεση ροής στάτη βρίσκεται στο ανώτερο όριο της ζώνης υστέρησης, ο φορέας τάσης στάτη v_{s3} επιλέγεται για να μετακινήσει ταχέως το διάνυσμα ζεύξης ροής στάτη στη θέση Β στον τομέα 2.



Εικόνα 42: Αρχές του DTC για επαγωγικό ηλεκτροκινητήρα



Εικόνα 43: Έλεγχος του διανύσματος ροής στάτη για DTC

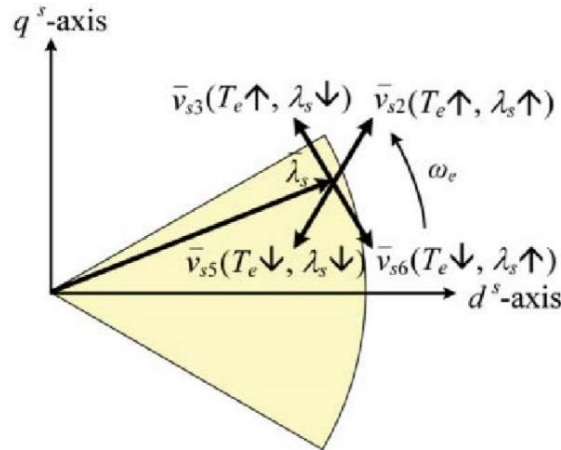


Εικόνα 44: Τροχιά διανύσματος ροής στάτη στον DCT

Καθώς η σύνδεση ροής στάτη φθάνει και πάλι στο άνω όριό της, το διάνυσμα τάσης στάτη vs4 εφαρμόζεται για να μετακινηθεί στη θέση C. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το διάνυσμα ζεύξης ροής στάτη αλλάζει γρήγορα από vsΔt, ενώ ο μετασχηματισμός το διάνυσμα ροής σύνδεσης ροής είναι πολύ υποτονικός λόγω της μεγάλης χρονικής σταθεράς του.

Στην Εικόνα 45 παρουσιάζει τον τρόπο επιλογής διαφόρων διανυσμάτων τάσης στάτη για τον έλεγχο της ροπής και της ροής (αύξηση ροπής, μείωση ροπής, ενίσχυση ροής και εξασθένηση ροής) όταν το διάνυσμα σύνδεσης ροής στάτη βρίσκεται στον τομέα 1. Γενικά, απαιτείται ροπή στρέψης, ο φορέας τάσης θα εφαρμοστεί για την προώθηση του διανύσματος δέσμευσης ροής στάτη προς την κατεύθυνση της περιστροφής. διαφορετικά, το διάνυσμα τάσης θα εφαρμοστεί απέναντι από την κατεύθυνση περιστροφής.

Εάν απαιτείται μηδενική ροπή, θα εφαρμοστεί το διάνυσμα μηδενικής τάσης (vs0 ή vs7), ανάλογα με το διάνυσμα που μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των μεταγωγών. Συνεπώς, η ζήτηση ροπής μειώνεται σε μια επιλογή αύξησης ($\delta T_e = 1$), μείωση ($\delta T_e = -1$) ή μηδέν ($\delta T_e = 0$), ενώ η ζήτηση ζεύξης ροής στάτη είναι επιλογή ενίσχυσης ($\delta \lambda_s = 1$ ή αποδυνάμωση ($\delta \lambda_s = -1$). Ο αντίστοιχος πίνακας αναζήτησης των διανυσμάτων τάσης στάτη για το DTC παρουσιάζεται στον πίνακα 2



Εικόνα 45: Επιλογή διανυσμάτων τάσης στάτη για DTC

Πίνακας 2: Αναζήτηση διανυσμάτων τάσης στάτη για DTC

δT_e	$\delta \lambda_s$	Τομέας 1	Τομέας 2	Τομέας 3	Τομέας 4	Τομέας 5	Τομέας 6
1	1	\bar{v}_{s2}	\bar{v}_{s3}	\bar{v}_{s4}	\bar{v}_{s5}	\bar{v}_{s6}	\bar{v}_{s1}
0	1	\bar{v}_{s0}	\bar{v}_{s7}	\bar{v}_{s0}	\bar{v}_{s7}	\bar{v}_{s0}	\bar{v}_{s7}
-1	1	\bar{v}_{s6}	\bar{v}_{s1}	\bar{v}_{s2}	\bar{v}_{s3}	\bar{v}_{s4}	\bar{v}_{s5}
1	-1	\bar{v}_{s3}	\bar{v}_{s4}	\bar{v}_{s5}	\bar{v}_{s6}	\bar{v}_{s1}	\bar{v}_{s2}
0	-1	\bar{v}_{s7}	\bar{v}_{s0}	\bar{v}_{s7}	\bar{v}_{s0}	\bar{v}_{s7}	\bar{v}_{s0}
-1	-1	\bar{v}_{s5}	\bar{v}_{s6}	\bar{v}_{s1}	\bar{v}_{s2}	\bar{v}_{s3}	\bar{v}_{s4}

Το διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου(control block diagram) του DTC για τον επαγωγικό ηλεκτροκινητήρα απεικονίζεται στην Εικόνα 46. Οι εντολές ροπής T_e^* και ροής λ_s^* συγκρίνονται με τις αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές και τα σφάλματα (ΔT_e και $\Delta \lambda_s$) υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω των αντίστοιχων ελεγκτών υστέρησης, οι οποίοι ορίζονται ως

$$\delta T_e = \begin{cases} 1 & \text{for } \Delta T_e > H_r \\ 0 & \text{for } -H_r < \Delta T_e < H_r \\ -1 & \text{for } \Delta T_e < -H_r \end{cases}$$

Εξίσωση 71

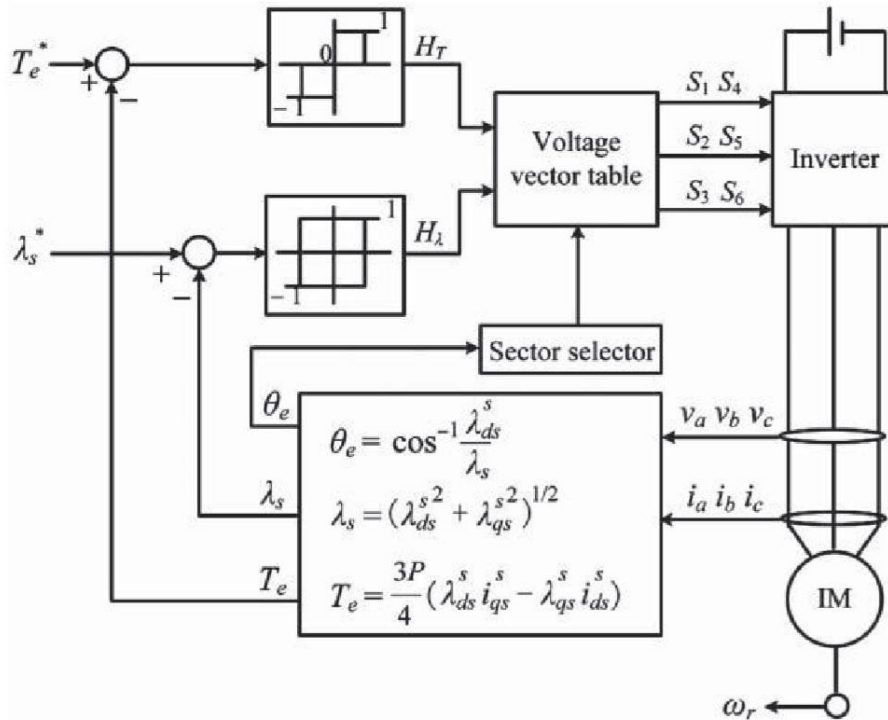
$$\delta \lambda_s = \begin{cases} 1 & \text{for } \Delta \lambda_s > H_\lambda \\ -1 & \text{for } \Delta \lambda_s < -H_\lambda \end{cases}$$

Εξίσωση 72

όπου H_T είναι η υστέρηση του ελεγκτή ροπής τριών επιπέδων και H_λ είναι η υστέρηση του ελεγκτή ροής δύο επιπέδων. Ο εκτιμητής χρησιμεύει για τον υπολογισμό της ροπής και της ροής του στάτη καθώς και της γωνίας για την επιλογή διανύσματος βάσει των μετρημένων τάσεων και ρευμάτων. Αυτή η μονάδα επαγωγικού κινητήρα DTC μπορεί εύκολα να λειτουργήσει και στα τέσσερα τεταρτημόρια και να παράσχει την απόκριση ροπής που συγκρίνεται με εκείνη που χρησιμοποιεί το FOC.

Σε σύγκριση με τον FOC, ο DTC για τον επαγωγικό ηλεκτροκινητήρα έχει ορισμένα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα:

- Δεν χρειάζεται να χρησιμοποιείτε μετασχηματισμούς συντεταγμένων που είναι υπολογιστικά εντατικοί. (computationally intensive)
- Δεν χρειάζεται να εκτελέσετε έλεγχο τρεχουσών αναδράσεων (feedback current control).
- Η ροπή του κινητήρα μπορεί να ελέγχεται άμεσα, έτσι ώστε η απόκριση ροπής (torque response) να είναι πολύ πιο γρήγορη.



Εικόνα 46: Διάγραμμα DTC για τον επαγωγικό ηλεκτροκινητήρα

Ωστόσο, ο DTC πάσχει από τα μειονεκτήματα της υποτονικής απόκρισης κατά την εκκίνηση και την υψηλή ροπή κυματισμού (torque ripple). Υπάρχουν πολλές πιθανές λύσεις όπως η ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) στη στρατηγική επιλογής των διανυσμάτων τάσης στάτη και η χρήση του προγνωστικού αλγορίθμου για την επιλογή των καταστάσεων μεταγωγής του αντιστροφέα.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα – Βιβλιογραφία

4.1 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας απαριθμούνται παρακάτω:

1. Η χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων μας παρέχει πολλά οφέλη όπως είναι: (α) μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, (β) μείωση της ηχορύπανσης, (γ) μεγαλύτερη αξιοπιστία από τα συμβατικά οχήματα και (δ) δεν έχουμε σπατάλη ενέργειας.
2. Η δομή των ηλεκτρικών κινητήρων είναι απλούστερη από αυτή των κινητήρων στα συμβατικά αυτοκίνητα, με αποτέλεσμα να καθιστά την κατασκευή τους πιο εύκολη και πιο οικονομική.
3. Κάθε είδος κινητήρα είναι διαφορετικό, από το άλλο, με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, ο κινητήρα μόνιμων μαγνητών έχει υψηλότερη ισχύ και απόδοση από τον επαγωγικό κινητήρα, όμως έχει υψηλότερο κόστος και δεν μας παρέχει την ίδια αξιοπιστία, σε αυτό παίζει ρόλο και η τεχνολογική ωριμότητα για κάθε κινητήρα. Άρα ανάλογα με την χρήση του οχήματος που τον προορίζουμε πρέπει να επιλέγουμε και τον κατάλληλο κινητήρα.
4. Ο έλεγχος του κινητήρα DC είναι ευκολότερος από του επαγωγικού κινητήρα, καθώς επίσης στον επαγωγικό κινητήρα επειδή χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά συστήματα για τον έλεγχό του είναι πιθανό να εμφανίζει πιο συχνά βλάβες.

4.2 Βιβλιογραφία

[1] K. T. Chau, *ELECTRIC VEHICLE MACHINES AND DRIVES*, University of Hong Kong, 2015, IEEE press.

[2] Stephen J. Chapman, *Ηλεκτρικές Μηχανές*, 2015, Εκδόσεις Τζιόλα, 4^η Έκδοση.

[3] Παντελής Β. Μαλατέστας, *Ηλεκτρικές Μηχανές*, 2015, Εκδόσεις Τζιόλα, 3^η Έκδοση.

[4] Κωνσταντίνος Λάσκαρης, *Σχεδιασμός και κατασκευή κινητήρων μονίμων μαγνητών για ηλεκτρικά οχήματα*, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2011, ΕΜΠ.

[5] Παντελής Β. Μαλατέστας, *Ηλεκτρική Κίνηση*, 2018, Εκδόσεις Τζιόλα, 4^η Έκδοση.

[6] James Larminie, John Lowry, *Electric vehicle technology explained*, 2012, John Wiley & Sons Ltd, 2^η Έκδοση.

[7] Χρήστος Θ. Κρασόπουλος, *Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα*, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Οκτώβριος 2013.

[8] Ε. Παπαδόπουλου, *Ηλεκτρομηχανικά συστήματα μετατροπής ενέργειας*, Θωμαΐδειου Κέντρου Εκδόσεων ΕΜΠ.

Παράρτημα

MATLAB

Απόδοση κινητήρα (Motor Efficiency)

Ο σκοπός αυτού του προγράμματος MATLAB είναι να μπορέσουμε να δούμε το εύρος λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων και το που εκείνοι λειτουργούν πιο αποτελεσματικά.

Το πρόγραμμα αυτό είναι προγραμματισμένο για να μας δείχνει την απόδοση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC Motor).

```
% A system for plotting efficiency contours for
% electric motors.
% This is for a brushless motor, of fairly high power.
% The efficiency contours for a 5kW DC motor

clear all; close all

% The x axis corresponds to motor speed (w), and the y axis to
torque T.

% First, set up values and range.
x=linspace(1,210); % N.B. rad/sec, not rpm
    % 210 rad/sec =~ 200 rpm.
y=linspace(1,40); % Torque in N.m

% Now make mesh

[X,Y]=meshgrid(x,y);

A=(X.*Y); % Power output
B=(Y.^2)*.85; % Copper losses
C= X*0.3; % Iron losses
D=(X.^3)*0.00001; % Windage losses
E= A + B + C + D + 1; % Total input power
Z= A./E; % Efficiency

% Set up an array of efficiency contours to be plotted
V=[0.6,0.7,0.75,0.8,0.85,0.88,0.9];
box off
grid off

contour(X,Y,Z,V);
%mesh(X,Y,Z);

xlabel('Speed(rad/s)'), ylabel('Torque (Nm)'),
zlabel('Efficiency');
hold on
```

```
% Now plot a contour of the power output
% The vector A has already been calculated
V=[4000,6000];
contour(X,Y,A,V);

title('ASPETE2020 - Contour of Motor Efficiency ')
print -djpeg -r600 MotorEfficiencyContour

figure(11);
mesh(X,Y,Z)
%       xlabel('Speed(rad/s)'),       ylabel('Torque (Nm)'),
xlabel('Efficiency');
title('ASPETE2020 - Mesh of Motor Efficiency ')
```