

**Α.Ε.Ι ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ**

**Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**Επιβλέπων: ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ, Καθηγητής Εφαρμογών**

## **ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ-ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ**

**(RESEARCH AND SELECTION OF ELECTRICAL  
COMPONENTS FOR THE ELECTRIC-HYBRID CAR)**

**Πτυχιακή Εργασία:  
Γκυρτής Δανιήλ (41921)  
Γαλανόπουλος Γαβριήλ Χρήστος (42364)**

**ΑΙΓΑΛΕΩ  
ΜΑΡΤΙΟΣ 2017**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστούμε τον καθηγητή μας κύριο Βυλλιώτη Ηρακλή για την συνεργασία και την καθοδήγηση στην εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

## Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η επιλογή των καταλληλότερων στοιχείων για την κατασκευή ενός ηλεκτρικού υβριδικού αυτοκινήτου, επίσης γίνεται αναφορά στην χρησιμότητα και στην ιστορία του ηλεκτρικού υβριδικού αυτοκινήτου και σε διάφορα συμπληρωματικά συστήματα που εξυπηρετούν στην χρήση του όπως για παράδειγμα φορτιστές και σταθμοί φόρτισης.

Πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στην ενέργεια, στα ορυκτά καύσιμα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που δημιουργεί η χρήση τους.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύονται οι τεχνολογίες και οι διαφορετικοί τύποι των υβριδικών οχημάτων και επιλέγεται η κατάλληλη διάταξη για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται διάφορα εμπορικά υβριδικά αυτοκίνητα και η τεχνολογία τους.

Συνεχίζοντας στο κεφάλαιο 4 αναλύουμε διάφορους τύπους ηλεκτρικών κινητήρων και γεννητριών και επιλέγουμε τον καταλληλότερο.

Στο κεφάλαιο 5 αναφέρονται οι βασικότεροι τύποι συσσωρευτών και τα συστήματα υποστήριξης τους. Στη συνέχεια επιλέγουμε τον ιδανικότερο τύπο για την συγκεκριμένη κατασκευή.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφονται οι βασικές μέθοδοι ελέγχου του ηλεκτρικού κινητήρα καθώς και οι μετατροπείς που θα χρησιμοποιήσουμε για την οδήγηση των ηλεκτρικών μηχανών. Τέλος επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος.

Και τέλος στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους και τρόπους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

### **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Ηλεκτρικό υβριδικό όχημα, ηλεκτρικός κινητήρας, συσσωρευτής, σύστημα οδήγησης, φορτιστές, ενέργεια, περιβάλλον, υβριδικά συστήματα

## **ABSTRACT**

The aim of this study is the research and the selection of the appropriate components for the construction of an electric hybrid car, also we make a reference to the utility and the history of the electric hybrid car and several complementary systems that serve the use of such as chargers and charging stations.

More specifically Chapter 1 refers to the energy, fossil fuels and the environmental impacts created by their use.

Chapter 2 analyzes the technologies and the different types of hybrid vehicles and the suitable selection for this particular application.

In the third chapter there are presented various commercial electric hybrid cars and their technology.

Continuing in chapter 4 we analyze various types of electric motors and generators and choose the most appropriate.

Chapter 5 lists the basic types of batteries and their support systems. We then choose the most suitable type for the particular construction.

Chapter 6 describes the basic control methods and electric converters used for driving the electric motor. Finally selecting the appropriate method.

And finally the seventh chapter refers to the different types and ways of charging electric vehicles.

## **KEY WORDS**

Hybrid electric vehicle, electric motor, battery, drive system, chargers, energy, environment, hybrid systems

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	
1.1 ενέργεια.....	8
1.2 γενικά περί ορυκτών καυσίμων .....	9
1.2.1 πετρέλαιο .....	10
1.3 επιπτώσεις στο περιβάλλον από τη χρήση ορυκτών καυσίμων .....	12
1.3.2 ρυπανση περιβαλλοντος απο τα αυτοκινητα.....	12
1.3.3 όξινη βροχή.....	14
1.3.4 φαινόμενο του θερμοκηπίου.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	
2.1 εισαγωγή.....	16
2.2 ιστορική αναδρομή.....	17
2.3 κατηγοριοποίηση υβριδικών οχημάτων ως προς το είδος της ενέργειας τους.....	22
2.3.1 υβριδικό όχημα με ηλεκτροκινητήρα.....	22
2.3.2 υβριδικό θερμικό σύστημα .....	22
2.3.3 υδραυλικό υβριδικό σύστημα .....	23
2.3.4 μηχανικό υβριδικό σύστημα.....	23
2.3.5 μεικτά υβριδικά συστήματα.....	24
2.4 κατηγοριοποίηση των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με το βαθμό υβριδοποίησης .....	24
2.4.1 μικρουβριδικά (micro hybrids).....	24
2.4.2 ήπια υβριδικά (mild hybrids) .....	25
2.4.3 πλήρως υβριδικά (full yhybrids) .....	25
2.4.4 ‘plug-in’ υβριδικά (phevs) .....	26
2.5 διατάξεις ηλεκτρικών-υβριδικών οχημάτων .....	27
2.5.1 σειριακή διάταξη.....	27
2.5.2 παράλληλη διάταξη .....	29
2.5.3 συνδυαστική διάταξη.....	31
2.5.4 ανεξάρτητη λειτουργία .....	32
2.6 μέθοδοι ανάκτησης και εξοικονόμησης ενέργειας ηλεκτρικών-υβριδικών οχημάτων..	33
2.6.1 αναγεννητική πέδηση.....	33
2.6.2 σύστημα “start-stop”.....	35
2.7 επιλογή υβριδικού συστήματος.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΕΜΠΟΡΙΟΥ.....	
3.1 chevrolet volt.....	37
3.2 opel ampera.....	38
3.3 Toyota prius.....	39
3.4 lexus rx 400h .....	41
3.5 bmw i8.....	42
3.6 honda insight.....	44
3.7 audi a3 e-tron.....	45
3.8 toyota yaris hybrid .....	46

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ</b> .....	
4.1 εισαγωγή.....	48
4.1.1 βασικά μέρη ηλεκτρικών μηχανών.....	49
4.2 μηχανές συνεχούς ρεύματος.....	51
4.2.1 κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μηχανών συνεχούς ρεύματος.....	52
4.2.2 κινητήρες συνεχούς ρεύματος.....	53
4.2.3 γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.....	56
4.3 επαγωγικές μηχανές.....	58
4.3.1 επαγωγικός κινητήρας.....	58
4.3.1.1 αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα.....	61
4.3.1.2 καμπύλες ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.....	64
4.3.2 επαγωγική γεννήτρια.....	69
4.3.2.1 εφαρμογές της επαγωγικής γεννήτριας.....	70
4.4 σύγχρονες μηχανές.....	71
4.4.1 σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη.....	72
4.4.2 σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος.....	76
4.4.2.1 ταχύτητα περιστροφής των σύγχρονων γεννητριών.....	77
4.5 κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης.....	80
4.5.1 χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.....	81
4.6 επιλογή κατάλληλου κινητήρα.....	82
4.7 επιλογή κατάλληλης γεννήτριας.....	82
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ</b> .....	
5.1 εισαγωγή.....	83
5.2 τύποι μπαταριών.....	88
5.2.1 leadacid (μολύβδου οξέως).....	88
5.2.2 νικελίου καδμίου.....	89
5.2.3 νικελίου μετάλλου υδριδίου.....	90
5.2.4 ιόντων λιθίου.....	91
5.2.5 νατρίου νικελίου.....	94
5.3 επιλογή κατάλληλου συσσωρευτή.....	95
5.4 συστήματα υποστήριξης μπαταριών.....	96
5.4.1 σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας.....	96
5.4.2 σύστημα ψύξης και θέρμανσης.....	99
5.4.3 συστοιχία μπαταριών.....	99
5.4.4 ομαδοποίηση πακετάρισμα μπαταριών.....	100
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ</b> .....	
6.1 εισαγωγή.....	101
6.2 τεχνικές ελέγχου κινητήρα επαγωγής.....	103
6.2.1 βασικές τεχνικές ελέγχου.....	103
6.2.2 τεχνική ελέγχου μέσω μεταβολής της rms τιμής ή της συχνότητας της τάσης του στάτη.....	105
6.2.3 τεχνική ελέγχου διατηρώντας το λόγο $v_s/f_s$ σταθερό (βαθμωτός ή μονόμετρος έλεγχος).....	107
6.2.4 άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (direct torque control, dtc).....	108

6.2.4.1 αναγεννητική πέδηση .....	112
6.2.5 διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου ( <i>field oriented control, foc</i> )	113
6.3 επιλογή μεθόδου ελέγχου.....	115
6.4 μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας .....	117
6.4.1 αντιστροφέας ( <i>inverter</i> ) .....	117
6.4.1.1 ημιαγωγικοί διακόπτες.....	117
6.4.2 ανορθωτής.....	118
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΦΟΡΤΙΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....</b>	
7.1 εισαγωγή.....	121
7.2 χώροι φόρτισης.....	122
7.2.1 ιδιωτικοί χώροι φόρτισης με ιδιωτική πρόσβαση.....	122
7.2.2 ιδιωτικοί χώροι φόρτισης με δημόσια πρόσβαση.....	123
7.2.3 δημόσιοι χώροι φόρτισης με δημόσια πρόσβαση .....	124
7.3 τύποι σύνδεσης.....	125
7.3.1 ενσύρματη σύνδεση .....	125
7.3.2 επαγωγική σύνδεση .....	127
7.4 τύποι φόρτισης.....	129
7.5 τρόποι σύνδεσης.....	131
7.5.1 οικιακή πρίζα και καλώδιο επέκτασης .....	131
7.5.2 οικιακή πρίζα και καλώδιο με μια συσκευή προστασίας.....	132
7.5.3 ειδική πρίζα σε ένα ειδικό κύκλωμα.....	133
7.5.4 συνεχούς ρεύματος σύνδεση για γρήγορη φόρτιση.....	134
7.6 υποδοχείς φόρτισης.....	134
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	138

# Κεφάλαιο 1

## ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

### 1.1 Ενέργεια

Σχεδόν κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα εξαρτάται από την ενέργεια. Το επίπεδο ευημερίας που έχουμε σήμερα κατακτήθηκε χάρη στην άφθονη και φθηνή ενέργεια που απολαμβάνει σημαντικό (αλλά δυστυχώς όχι όλο) τμήμα της ανθρωπότητας. Η ενέργεια μάς ζεσταίνει, μας δίνει φως, κινεί τα αυτοκίνητά μας, τα αεροπλάνα, τα εργοστάσια. Μεταβολές στην προσφορά της ενέργειας ή της τιμής της μπορεί να έχουν τεράστιες επιπτώσεις στην οικονομία και στην ποιότητα ζωής κάθε χώρας. Αυτό έγινε καθαρό με το σκληρότερο τρόπο στη δεκαετία του 70 με τις δύο ενεργειακές κρίσεις (όταν η ανθρωπότητα έμαθε με οδυνηρό τρόπο τη λέξη «ενέργεια»), αλλά και μέχρι πρόσφατα (2015) με την αλματώδη αύξηση της τιμής του πετρελαίου που άγγιξε τα 140 δολάρια το βαρέλι. Συγχρόνως, η ενεργειακή κατανάλωση συνδέεται άμεσα με την οικολογική ισορροπία του πλανήτη μας. Η παραγωγή ενέργειας σε όλα τα στάδιά της προκαλεί αναμφίβολα υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Η «όξινη βροχή», «το φαινόμενο του θερμοκηπίου» και η «τρύπα του όζοντος» μας απασχολούν όλους, το συζητάμε, ενώ τα θέματα αυτά «παίζονται» στα μαζικά μέσα ενημέρωσης. Οι παραπάνω βέβαια επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας μπορούν να περιοριστούν με τη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη λήψη μέτρων για εξοικονόμηση ενέργειας, θέματα που αποτελούν τον κορμό αυτών των σημειώσεων.

Το πρόβλημα της ενέργειας, εκτός από τις συνιστώσες της τιμής της (ανάγκη για φθηνότερη ενέργεια και ενέργεια για όλους) και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ανάγκη για ενέργεια με το μικρότερο περιβαλλοντικό κόστος), έχει και μια τρίτη, σημαντική επίσης, συνιστώσα: την εξαντλησιμότητα των συμβατικών καυσίμων, δηλαδή του γαιάνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, αλλά και των πυρηνικών καυσίμων.

Πρακτικά υπάρχουν πολλές μορφές ενέργειας: η χημική ενέργεια από τα ορυκτά καύσιμα, η ηλεκτρική ενέργεια, η πυρηνική, η ηλιακή. Ενεργειακές πηγές είναι οι πηγές από τις οποίες μπορεί να παραχθεί ενέργεια για θέρμανση, κίνηση, φωτισμό και ηλεκτρική ισχύ, με απόλυτη πηγή τον ήλιο.



## 1.2 Γενικά περί ορυκτών καυσίμων

Καύσιμα καλούνται οι ουσίες που όταν καίγονται παράγεται θερμότητα ή/και έργο. Ορυκτά καύσιμα (fossil fuels) είναι οι ουσίες που έχουν δημιουργηθεί από οργανισμούς και φυτά που έζησαν πριν από εκατομμύρια χρόνια. Βρίσκονται με τη μορφή κοιτασμάτων, σχετικά κοντά στην επιφάνεια της γης (τυπικά σε βάθος λιγότερο των 10 km). Έχουν διαφορετική εξωτερική εμφάνιση (ο άνθρακας είναι ένα καφετί ή μαύρο στερεό, το αργό πετρέλαιο ένα υποκίτρινο μαύρο υγρό και το φυσικό αέριο ένα άχρωμο αέριο), αλλά παρουσιάζουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά, αναφορικά με τη σύστασή τους, την επιβάρυνση του περιβάλλοντος και την εξαντλησιμότητά τους. Τα κυριότερα συστατικά τους είναι ο άνθρακας και το υδρογόνο, ενώ σε μικρότερα ποσοστά βρίσκονται οξυγόνο, άζωτο και θείο.

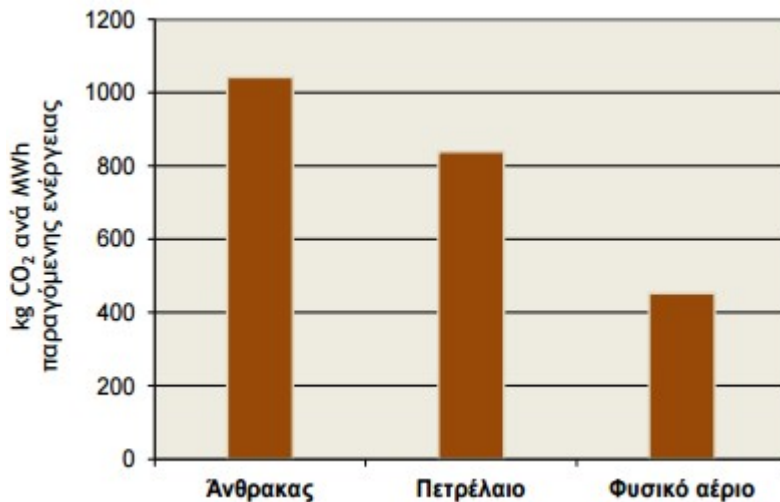
Σήμερα, περισσότερο από το 87% των ενεργειακών πόρων που χρησιμοποιεί ή ανθρωπότητα προέρχονται από τα ορυκτά καύσιμα. Βέβαια, η κατάσταση αυτή έχει δημιουργηθεί μόλις τον περασμένο αιώνα και δεν αναμένεται να διαρκέσει για πολύ. Εκτός από τον άνθρακα, τα δύο άλλα ορυκτά καύσιμα δεν αναμένεται να διαρκέσουν περισσότερο από μία με δύο γενιές ανθρώπων. Στην ιστορία της ανθρωπότητας, η εποχή των ορυκτών καυσίμων θα χαρακτηρίζεται ως ένα μικρό διάλειμμα!

Τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Υπάρχουν και άλλα ορυκτά καύσιμα, όπως οι πισσούχοιςχίστες και οι ασφαλτούχοι άμμοι, που όμως δεν αξιοποιούνται σε μεγάλο βαθμό ακόμη εξαιτίας του υψηλού κόστους επεξεργασίας και των περιβαλλοντικών προβλημάτων που ανακύπτουν κατά την επεξεργασία τους.

Ορυκτό καύσιμο	Θερμογόνος Δύναμη (MJ/kg)
Φυσικό αέριο (μεθάνιο)	56
Αργό Πετρέλαιο	42
Άνθρακας (πισσούχος)	30
Άνθρακας (λιγνίτης)	10

Σχήμα 1.1: Τυπικές τιμές θερμογόνου δύναμης ορυκτών καυσίμων

Τα ορυκτά καύσιμα αντιπροσωπεύουν σήμερα την κυριότερη πηγή ενέργειας, όχι μόνο για την παραγωγή ηλεκτρισμού, αλλά και για άλλες χρήσεις όπως μεταφορές, βιομηχανία και οικιακή θέρμανση.



Σχήμα 1.2: Εκπομπές CO<sub>2</sub> (σε kgCO<sub>2</sub> ανά MWh παραγόμενης ενέργειας) από την καύση των ορυκτών καυσίμων

### 1.2.1 Πετρέλαιο

Το πετρέλαιο περιέχει ενώσεις του θείου, του αζώτου και διάφορα οξείδια. Για να χρησιμοποιηθεί πρέπει να υποστεί επεξεργασία (διύλιση) σε ειδικές εγκαταστάσεις (διυλιστήρια) οπότε προκύπτουν τα διάφορα προϊόντα του (ντίζελ, βενζίνη, κηροζίνη, φωτιστικό πετρέλαιο, προπάνιο, νάφθα, άσφαλτος). Τα προϊόντα του πετρελαίου χρησιμοποιούνται κυρίως στις μεταφορές, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για σκοπούς θέρμανσης.

Το πετρέλαιο είναι μια πηγή ενέργειας με περιορισμένο αριθμό αποθεμάτων. Λόγω της μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας, της εύκολης σχετικά μεταφοράς του και των πολλών χρήσεων του, αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή ενέργειας από τη δεκαετία του 1950 μέχρι σήμερα. Η ζήτηση πετρελαίου αυξάνεται κυρίως στον τομέα των μεταφορών, καθώς οι μεταφορές εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικά από το πετρέλαιο και αποτελούν τον κυριότερο καταναλωτή του. Η Ευρώπη εισάγει περίπου το 80% του πετρελαίου που καταναλώνει με τη Νορβηγία να αποτελεί τη μεγαλύτερη παραγωγό χώρα στην Ευρώπη.

Οι επιπτώσεις της χρήσης πετρελαίου εμφανίζονται τόσο στην άντληση και τη μεταφορά του, όσο και ως αποτελέσματα της καύσης του κατά την οποία εκλύονται διάφοροι

ρύποι, όπως αιθάλη, οξείδια του θείου και του αζώτου, μόλυβδος και κυρίως διοξείδιο του άνθρακα με αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που απασχολεί τους μελλοντολόγους και θα απασχολήσει τις αυτοκινητοβιομηχανίες στο μέλλον, είναι η μείωση των παγκόσμιων αποθεμάτων πετρελαίου, ο πιθανός χρόνος εξάντλησης τους και η μορφή που θα έχει ο πολιτισμός με το τέλος της εποχής του πετρελαίου.

Η μεγαλύτερη παραγωγή εντοπίζεται στη Μέση Ανατολή ενώ η μεγαλύτερη κατανάλωση στη Βόρεια Αμερική και την Άπω Ανατολή. Έτσι, οι καταναλωτές (κυρίως δυτικοί πολιτισμοί) πρέπει να εισάγουν το πετρέλαιό τους και εξαρτώνται άμεσα οικονομικά. Η ολοένα αυξανόμενη τιμή του πετρελαίου οδηγεί σε αναζήτηση οικονομικότερων αλλά και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις του παγκόσμιου πληθυσμού.



Σχήμα 1.3: Τιμή πετρελαίου (Δολάριο ανά βαρέλι)

### **1.3 Επιπτώσεις στο περιβάλλον από την χρήση ορυκτών καυσίμων**

Η κύρια επιβλαβής επίδραση στο περιβάλλον της χρήσης των ορυκτών καυσίμων είναι η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρά που έχει ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πλανήτη. Με την καύση των ορυκτών καυσίμων, εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα, απελευθερώνονται και άλλες επιβλαβείς ουσίες στην ατμόσφαιρα όπως νιτρικά, θειικά ή ανθρακικά οξέα.

#### **1.3.1 Ρύπανση περιβάλλοντος από τα αυτοκίνητα**

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας από τα αυτοκίνητα, τη βιομηχανία και τις άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες έχει φτάσει σήμερα σε ανησυχητικά επίπεδα. Ένα μεγάλο ποσοστό της οφείλεται και στα αυτοκίνητα.

Τα αυτοκίνητα κινούνται χάρη στην καύση βενζίνης και συγγενών καυσίμων. Παγκοσμίως τα οχήματα αυτά ευθύνονται για το 1/3 της παγκόσμιας ζήτησης για πετρέλαιο συνεισφέροντας σε όλα τα προβλήματα που η εύρεση του πετρελαίου δημιουργεί. Μερικά από αυτά είναι: καταστροφή και απώλεια οικοσυστημάτων, εκχύλιση πετρελαίου σε θάλασσες, ρύπανση των υδάτων και της ατμόσφαιρας, εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, καταπάτηση ανθρωπίνων δικαιωμάτων και πόλεμοι για την εξασφάλισή του.

Τα αυτοκίνητα και γενικά τα μηχανοκίνητα οχήματα είναι η πρωταρχική πηγή ρύπανσης στις αστικές περιοχές. Οι μεταφορές εκπέμπουν περίπου 63% των οξειδίων του αζώτου, 47% οργανικών χημικών ενώσεων όπως το βενζόλιο, 10-25% αιωρούμενων μικροσωματιδίων (PM<sub>10</sub>) καθώς και 6.5% διοξειδίου του θείου σε αγροτικές περιοχές, δημιουργώντας σαφέστερα υψηλότερους δείκτες στις αστικές περιοχές. Η εισπνοή αυτών των ουσιών δημιουργούν διάφορα προβλήματα υγείας τα οποία κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες μπορεί να αποβούν και μοιραία. Παραδείγματος χάρη στην Αθήνα το 1987 προκλήθηκαν 2000 θάνατοι μέσα σε μια βδομάδα λόγω του συνδυασμού υψηλών θερμοκρασιών, υγρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Σχήμα 1.4: Ρύπανση της ατμόσφαιρας από εκπομπή ρύπων βενζινοκίνητου οχήματος

Ωστόσο, είναι γεγονός ότι έχει επιτευχθεί μεγάλη τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της μείωσης των ρύπων που εκλύουν οι κινητήρες των αυτοκινήτων, στον τομέα της αεροδυναμικής (καλύτερη αεροδυναμική σημαίνει χαμηλότερη κατανάλωση, άρα εκπομπή λιγότερων ρύπων), στον τομέα του σχεδιασμού του θαλάμου καύσης και στην έρευνα για την χρήση εναλλακτικών καυσίμων, όπως το υδρογόνο, το υγραέριο και τις αλκοόλες (αιθανόλη, μεθανόλη). Τα ηλεκτρικά, τα υβριδικά, τα ηλιακά αυτοκίνητα, η νέα ώθηση που δόθηκε στην έρευνα για τους κινητήρες diesel, οι κεραμικοί κινητήρες και η νέα γενιά των δίχρονων κινητήρων είναι άμεση συνέπεια των οικολογικών ανησυχιών και της έντονης αναζήτησης για εναλλακτικά καύσιμα και κινητήρες.

Ο θόρυβος είναι μια ακόμη επίπτωση των μεταφορών που είναι δυνατό να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας. Η έκθεση αναφέρει ότι στις μεγαλύτερες πόλεις της Ευρώπης, τρεις στους πέντε κατοίκους εκτίθενται σε επιβλαβή επίπεδα κυκλοφοριακού θορύβου. Ακόμα και στην ύπαιθρο, 24 εκατομμύρια Ευρωπαίοι εκτίθενται σε επιβλαβή επίπεδα κυκλοφοριακού θορύβου κατά τη διάρκεια της νύχτας, γεγονός το οποίο μπορεί να έχει ως συνέπεια την εμφάνιση σωματικών και ψυχολογικών προβλημάτων.

### 1.3.2 Όξινη Βροχή

Ο όρος όξινη βροχή αναφέρεται στην παρουσία σε αυτήν όξινων διαλυμένων ρύπων, δηλαδή ουσιών που δεν αποτελούν φυσιολογικά χαρακτηριστικά της καθαρής ατμόσφαιρας. Οι ρύποι αυτοί είναι κυρίως προϊόντα ηφαιστειακής και ανθρώπινης δραστηριότητας, ιδίως όσον αφορά τη χρήση ορυκτών καυσίμων και μεγάλης έκτασης πυρκαγιές. Τέτοιοι ρύποι είναι τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και του θείου ( $\text{SO}_x$ ), τα οποία μεταφέρονται με τη βροχή, το χιόνι, την ομίχλη, το χαλάζι κ.λπ., και δίνουν ισχυρά όξινα και οξειδωτικά διαλύματα με προφανείς και καταστρεπτικές επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα, καθώς και σε κτίρια και μνημεία.

Το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) εκλύονται κυρίως κατά την καύση ορυκτών καυσίμων. Κατά την αντίδρασή τους με το οξυγόνο και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας σχηματίζουν αντίστοιχα θειικό ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) και νιτρικό οξύ ( $\text{HNO}_3$ ), τα οποία στη συνέχεια, διαλυμένα στο νερό της βροχής ή στα σταγονίδια της ομίχλης, προσβάλλουν το έδαφος, το νερό, τα φυτά, τα ζώα και τα κτίσματα με αρκετά καταστροφικές συνέπειες.

Τα αέρια  $\text{SO}_x$  και  $\text{NO}_x$  μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια των ανέμων και να δημιουργήσουν όξινη βροχή χιλιόμετρα μακριά από τον τόπο εκπομπής τους. Το pH της όξινης βροχής κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 4,6 και 4, ενώ κατά καιρούς μετρούνται και πιο ακραίες τιμές του pH (έως και 2,4). Σύμφωνα με έρευνες των επιστημόνων κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1980, αποδείχτηκε ότι η ομίχλη, λόγω των πολλών μικρών σταγονιδίων από τα οποία αποτελείται, προσφέρει τελικά μεγαλύτερη επιφάνεια προσρόφησης στα  $\text{SO}_x$  και  $\text{NO}_x$  και γι' αυτό περιέχει συνήθως πολλαπλάσιες ποσότητες θειικού και νιτρικού οξέος από ότι άλλες μορφές όξινης κατακρήμνισης.

### 1.3.3 Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια φυσική διαδικασία. Δίχως αυτό, η Γη θα ήταν κρύα (περίπου στους  $-20^\circ\text{C}$ ) και δεν θα μπορούσε να υπάρχει ζωή. Αντιθέτως λόγω του φαινομένου αυτού, η μέση θερμοκρασία της γης διατηρείται στο επίπεδο των  $15^\circ\text{C}$ . Σε απόσταση 25 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γης υπάρχει ένα λεπτό στρώμα αποτελούμενο κυρίως από  $\text{CO}_2$  και υδρατμούς, το οποίο δρα όπως γυαλί ενός θερμοκηπίου. Δηλαδή, ενώ επιτρέπει την είσοδο της θερμότητας που μεταφέρει η υπεριώδης ακτίνα του

ηλίου, εμποδίζει την έξοδο της θερμότητας προς το διάστημα. Έτσι η επιφάνεια της Γης συγκρατεί ένα ποσό θερμότητας και διατηρεί σταθερή τη μέση θερμοκρασία της, βασική συνθήκη για να μπορεί να διατηρείται η ζωή πάνω στην επιφάνεια της.

Περίπου το 86% της κατακρατούμενης από την ατμόσφαιρα γήινης ακτινοβολίας, οφείλεται στην παρουσία υδρατμών (H<sub>2</sub>O), διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και νεφών. Οι υδρατμοί αποτελούν το πλέον ενεργό συστατικό, κατά ποσοστό 60%, ενώ μικρότερη συνεισφορά έχουν και τα αέρια: μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), οξείδιο του νατρίου (N<sub>2</sub>O) και όζον (O<sub>3</sub>). Τα αέρια που έχουν την ιδιότητα να κατακρατούν την ηλιακή ακτινοβολία εντός της γήινης ατμόσφαιρας ονομάζονται αέρια του θερμοκηπίου.

Τα τελευταία χρόνια, καταγράφεται μία αύξηση στη συγκέντρωση αρκετών αερίων του θερμοκηπίου και ειδικότερα του διοξειδίου του άνθρακα. Τα τρία τέταρτα της ανθρωπογενούς παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα, οφείλεται σε χρήση ορυκτών καυσίμων (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορές, βιομηχανία, οικιστικός τομέας κλπ) ενώ το υπόλοιπο μέρος προέρχεται από αλλαγές που συντελούνται στο έδαφος, κυρίως μέσω της αποδάσωσης.

## Κεφάλαιο 2

# ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Ο όρος «υβριδικός» χρησιμοποιείται για να δηλώσει το συνδυασμό δύο διαφορετικών μορφών στην επίτευξη ενός στόχου. Η θεματολογία των υβριδικών σχεδιασμών δεν υπόκειται σε κανέναν περιορισμό, οπότε συναντάμε υβριδικά συστήματα στη φύση, στην τεχνολογία ακόμα και στη μουσική.

Ως υβριδικό όχημα αναφέρεται εκείνο που φέρει δύο ή περισσότερες πηγές ενέργειας με σκοπό την κίνηση του. Οι συνδυασμοί των πηγών ενέργειας όσον αφορά το είδος τους και τη σύνδεση τους είναι πολλοί και περιορίζονται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τη φαντασία του σχεδιαστή. Το πιο απλό παράδειγμα υβριδικού οχήματος είναι το μοτοποδήλατο, στο οποίο ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης συνδυάζεται με τη μυϊκή δύναμη του αναβάτη για να το κινήσει.

Στην αυτοκίνηση, ως υβριδικά οχήματα έχει επικρατήσει να θεωρούνται εκείνα που συνδυάζουν θερμικούς κινητήρες και κυρίως κινητήρες εσωτερικής καύσης (όπως κινητήρες βενζίνης, πετρελαίου ή φυσικού αερίου) και ηλεκτροκινητήρες. Η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε κινητική από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε στοιχεία συσσωρευτών ή πυκνωτές μετατρέπεται σε κινητική μέσω του ηλεκτροκινητήρα.

Σήμερα τα υβριδικά οχήματα προορίζονται κυρίως για την επίτευξη χαμηλότερων καταναλώσεων καυσίμου και την παραγωγή μειωμένων ρύπων σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα. Η συνεισφορά της υβριδικής τεχνολογίας για την επίτευξη των στόχων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο άξονες:

Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα εσωτερικής καύσης και μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του.

Η ύπαρξη του ηλεκτροκινητήρα, επιτρέπει την χρησιμοποίηση του κινητήρα εσωτερικής καύσης στο εύρος στροφών και στις συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες παρουσιάζει τη βέλτιστη απόδοση και τη μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου. Στις περιοχές που ο τελευταίος είναι αντισυμβατικός, ο ηλεκτροκινητήρας αναλαμβάνει την υποβοήθηση του συστήματος. Παραδείγματα αποτελούν η κίνηση με μικρές ταχύτητες ή υπό μεγάλο φορτίο,



όπως κατά τη διάρκεια πλήρους επιτάχυνσης ή της συνεχούς εναλλαγής κίνησης και ακινητοποίησης του οχήματος σε αστικό περιβάλλον. Στην τελευταία περίπτωση, ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί και ως μίζα ώστε να μπορεί επανεκκινείται τακτικά ο βενζινοκινητήρας στις περιπτώσεις που τίθεται εκτός για την επίτευξη ακόμα καλύτερης οικονομίας (συστήματα Start-Stop). Τέλος, με την ύπαρξη του ηλεκτροκινητήρα, οι διαστάσεις του βενζινοκινητήρα για την επίτευξη ίδιων αποδόσεων μπορούν να μειωθούν, κάτι που συμβάλλει επιπλέον στην οικονομία, καθώς μειώνεται το βάρος και οι τριβές των κινούμενων μερών.

### **Ανάκτηση ενέργειας κατά τη διαδικασία επιβράδυνσης.**

Ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του οχήματος μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική αντιστρέφοντας τη ροή ισχύος του ηλεκτροκινητήρα. Λόγω της σπουδαιότητας της λειτουργίας αυτής, θα υπάρξει περαιτέρω ανάλυση.

## **2.2 Ιστορική αναδρομή**

**1839** Ο Robert Anderson, από το Αμπερντίν της Σκωτίας, κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό όχημα.

**1870** Ο Σερ David Salomon κατασκεύασε ένα αυτοκίνητο με ένα ελαφρύ ηλεκτρικό μοτέρ και πολύ βαριές μπαταρίες αποθήκευσης. Η ταχύτητα ταξιδιού και η αυτονομία ήταν κακές.

**1886** Ιστορικά αρχεία αποδεικνύουν ότι παρουσιάστηκε στην Αγγλία ένα ηλεκτροκίνητο ταξί που χρησιμοποιούσε μια μπαταρία με 28 στοιχεία και ένα μικρό ηλεκτρικό μοτέρ.

**1888** Η Immisch&Company κατασκεύασε για τον σουλτάνο της οθωμανικής αυτοκρατορίας μια άμαξα τεσσάρων ατόμων, που κινούνταν με μοτέρ ενός ίππου και με μπαταρία 24 στοιχείων, την ίδια χρονιά ο Magnus Volk, στο Μπράιτον της Αγγλίας, κατασκεύασε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο με τρεις τροχούς.

**1890-1910** Περίοδος σημαντικών βελτιώσεων στην τεχνολογία των μπαταριών, ειδικά με την ανάπτυξη των σύγχρονων μπαταριών μολύβδου-οξέος από τον H. Tudor και των μπαταριών νικελίου-σιδήρου από τους Edison και Junger.

**1897** Η London Electric Cab Company (Εταιρεία Ηλεκτρικών ταξί του Λονδίνου) ξεκίνησε τακτικά δρομολόγια χρησιμοποιώντας αυτοκίνητα που σχεδιάστηκαν από τον Walter Bersey.

Το Bersey Cab (ταξί του Bersey), το οποίο χρησιμοποιούσε μία μπαταρία 40 στοιχείων και ηλεκτρικό μοτέρ 3 ίππων, μπορούσε να διανύσει 50 μίλια μεταξύ των φορτίσεων.

**1897** Η Pope Manufacturing Company του Χάρτφορντ, στο Κονέκτικατ, κατασκεύασε περίπου 500 ηλεκτρικά αυτοκίνητα σε διάστημα δύο ετών.

**1898** Ο Γερμανός dr.Ferdinand Porsche κατασκεύασε, σε ηλικία 23 ετών, το πρώτο του αυτοκίνητο, το Lohner Electric Chaise. Ήταν το πρώτο αυτοκίνητο στον κόσμο με κίνηση στους μπροστινούς τροχούς.

**1898** Η Electric Carriage and Wagon Company στη Νέα Υόρκη διέθετε έναν στόλο δώδεκα ανθεκτικών και κομψών ηλεκτρικών ταξί.

**1899** Η Pope Manufacturing Company συγχωνεύτηκε με δύο μικρότερες εταιρείες ηλεκτρικών αυτοκινήτων για να δημιουργήσει την Electric Vehicle Company, την πρώτη μεγάλης κλίμακας επιχείρηση στην αμερικανική αυτοκινητοβιομηχανία. Η εταιρεία είχε περιουσιακά στοιχεία ύψους 200 εκατομμυρίων δολαρίων. δύο υβριδικά οχήματα παρουσιάστηκαν στο σαλόνι του Παρισιού.

**1900** Το 1900 ο Ferdinand Porsche, ενώ ήταν υπάλληλος της Lohne Coach Factory, εξέλιξε το M9te, μια τετρακίνητη έκδοση της υβριδικής σε σειρά άμαξας «System Lohner- Porsche», που είχε εμφανιστεί νωρίτερα το 1900, στην παγκόσμια έκθεση του Παρισιού. Το M9te περιλάμβανε ένα ζεύγος γεννητριών που τροφοδοτούνταν από κινητήρες εσωτερικής καύσης 2,5 hp της Daimler, ώστε να επεκτείνει την εμβέλεια λειτουργίας και να μπορεί να ταξιδέψει 40 σχεδόν μίλια μόνο με την μπαταρία, και παρουσιάστηκε το 1901 στην Έκθεση Αυτοκινήτων του Παρισιού. Το M9te έσπασε πολλά αυστριακά ρεκόρ ταχύτητας και κέρδισε στο Ράλι Εξελμπερκτο 1901 με τον ίδιο τον Porsche στο τιμόνι. Το M9te χρησιμοποιούσε έναν κινητήρα βενζίνης που τροφοδοτούσε μία γεννήτρια, η οποία με τη σειρά της κινούσε τα ηλεκτρικά μοτέρ που ήταν τοποθετημένα στα μωαγιέ των τροχών, με μια μικρή συστοιχία μπαταριών για αξιοπιστία. Είχε μέγιστη ταχύτητα 50 km/h και ισχύ 5,22 kW για διάρκεια 20 λεπτών. Την ίδια χρονιά οι αμερικανικές εταιρείες αυτοκινήτων κατασκεύασαν 1.681 ατμοκίνητα, 1.575 ηλεκτροκίνητα και 936 βενζινοκίνητα αυτοκίνητα. Σε δημοσκόπηση που έγινε κατά την πρώτη Εθνική Έκθεση Αυτοκινήτου της Νέας Υόρκης, οι υποστηρικτές ανέδειξαν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ως πρώτη επιλογή τους, ακολουθούμενα στενά από τα ατμοκίνητα.



Σχήμα 2.1: Αυτοκίνητο που κατασκευάστηκε από την εταιρεία Krieger το 1903 και χρησιμοποιούσε έναν βενζινοκινητήρα για να υποστηρίξει μία συστοιχία μπαταριών.

**1913** Χρονιά-σταθμός για την αυτοκίνηση. Μέσα στα πρώτα χρόνια του 20ού αιώνα, παρήχθησαν χιλιάδες ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα, όμως, με τη γραμμή συναρμολόγησης του Henry Ford και με τον ερχομό του αυτοεκκινούμενου βενζινοκινητήρα, τα ατμοκίνητα και τα ηλεκτροκίνητα σχεδόν εξαφανίστηκαν. Τη χρονιά εκείνη οι πωλήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έπεσαν στις 6.000, ενώ το Μοντέλο T της Ford πούλησε 182.809 βενζινοκίνητα αυτοκίνητα. Τα επόμενα χρόνια σηματοδότησαν την ταχεία μείωση των υβριδικών αυτοκινήτων.

**1920-1965** Αδρανής περίοδος για μαζική παραγωγή ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων. Τα επονομαζόμενα εναλλακτικά αυτοκίνητα έγιναν αντικείμενο έρευνας και κατασκευής για μικρούς οικοτέχνες κατασκευαστές και βραχύβιους επιχειρηματίες.

**1966** Το κοινοτικό των Ηνωμένων Πολιτειών παρουσίασε τα πρώτα σχέδια νόμου, συνιστώντας τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως μέσο για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μια νέα περίοδος ξαναρχίζει για την ηλεκτρική και την υβριδική τεχνολογία.

**1977-1979** Το 1977 η Toyota επέλεξε, για να καταδείξει τις μελλοντικές προθέσεις της, το υβριδικό Toyota Sports 800 με αεροστρόβιλο. χρησιμοποιώντας ένα спор αυτοκίνητο υψηλών επιδόσεων, η Toyota πρότεινε μια έξυπνη και περιβαλλοντικά συμβατή λύση και δημιούργησε μια φιλοσοφία που θα ωριμάζε και θα εξελισσόταν σε αυτό που σήμερα ονομάζεται «Hybrid Synergy Drive». Είκοσι χρόνια μετά, το 1997, η Toyota παρουσίασε ένα υβριδικό λεωφορείο παραγωγής, το Coaster Hybrid, και το Prius, το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο.



Σχήμα 2.2: Το πρώτο υβριδικό όχημα της Toyota

**1989** Η Audi παρουσίασε την πρώτη γενιά του πειραματικού οχήματος Audi Duo βασισμένο στο Audi 100 Avant Quattro. το αυτοκίνητο είχε έναν ηλεκτρικό κινητήρα 12,6 hp, ο οποίος κινούσε τους πίσω τροχούς αντί για έναν κεντρικό άξονα. Η μπαταρία νικελίου-καδμίου παρείχε την ενέργεια. Η μπροστινή κίνηση τροφοδοτούνταν από έναν κινητήρα πέντε κυλίνδρων 2,3L με απόδοση 136 hp. δύο χρόνια αργότερα η Audi παρουσίασε τη δεύτερη γενιά του Duo, επίσης βασισμένη στο Audi 100 Avant Quattro.

**1997** Το Toyota Prius παρουσιάστηκε στην ιαπωνική αγορά δύο χρόνια πριν από την ημερομηνία του επίσημου λανσαρίσματός του και πριν από την παγκόσμια διάσκεψη για την υπερθέρμανση του πλανήτη στο Κιότο, που πραγματοποιήθηκε τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους. Οι πωλήσεις του πρώτου χρόνου έφτασαν σχεδόν τις 18.000.

**1997** Η Audi έγινε ο πρώτος κατασκευαστής στην Ευρώπη που έβαλε ένα υβριδικό όχημα στη μαζική παραγωγή: το Audi Duo βασισμένο στο A4 Avant. Το όχημα κινούνταν από έναν κινητήρα TDI 1,9 L, 90 hp σε συνδυασμό με ένα ηλεκτρικό μοτέρ 29 hp. Και οι δύο πηγές ισχύος κινούσαν τους μπροστινούς τροχούς. Μία μπαταρία ζελέ μολύβδου στο πίσω μέρος αποθήκευε την ηλεκτρική ενέργεια. Το Duo δεν υπήρξε εμπορική επιτυχία και για τον λόγο αυτό καταργήθηκε, παρακινώντας τους Ευρωπαίους κατασκευαστές αυτοκινήτων να εστιάσουν τις επενδύσεις έρευνας και ανάπτυξης στα ντίζελ.



Σχήμα 2.3: Audi duo το πρώτο ευρωπαϊκής κατασκευής υβριδικό όχημα στη μαζική παραγωγή.

**1997-1999** Στην Καλιφόρνια παρουσιάστηκε από τους μεγάλους κατασκευαστές αυτοκινήτων ένας μικρός αριθμός εξ ολοκλήρου ηλεκτρικών οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των: EV Plus της Honda, EV1 της GM, το ηλεκτρικό μικρό ανοιχτό φορτηγό S-10, ένα μικρό ανοιχτό φορτηγό Ford Range και το RAV4 EV της Toyota. Παρά τον αρχικό ενθουσιασμό αυτών που υιοθέτησαν αυτή την τεχνολογία, τα ηλεκτρικά απέτυχαν να προσελκύσουν περισσότερους από μερικές εκατοντάδες οδηγούς για το κάθε μοντέλο. Μέσα σε λίγα χρόνια τα προγράμματα της εξ ολοκλήρου ηλεκτροκίνησης εγκαταλείφθηκαν.

**1999** Η Honda παρουσίασε το δίπορτο Insight, το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο που θα «χτυπούσε» τη μαζική αγορά των Ηνωμένων Πολιτειών. Το Insight κέρδισε πλήθος βραβείων και έλαβε βαθμολογίες χιλιομετρικής διάνυσης της EPA των 61 μιλίων ανά γαλόνι (m/g) στην πόλη και 70 m/g στον αυτοκινητόδρομο.

**2000** Η Toyota παρουσίασε το Toyota Prius, το πρώτο υβριδικό τετράπορτο sedan που διατέθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες.

**2002** Η Honda παρουσίασε το Honda Civic Hybrid, το δεύτερο εμπορικά διαθέσιμο υβριδικό βενζινοκίνητο-ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο. Η εμφάνιση και η απόδοση του Civic Hybrid ήταν (και εξακολουθούν να είναι) πανομοιότυπες με αυτές του συμβατικού Civic.

**2004** Το Toyota Prius I κέρδισε τα βραβεία Αυτοκινήτου της Χρονιάς του 2004 από το περιοδικό Motor Trend Magazine και από την Έκθεση Αυτοκινήτου της Βόρειας Αμερικής. Η

Toyota εξεπλάγη από τη ζήτηση και αύξησε την παραγωγή της από 36.000 σε 47.000 αυτοκίνητα για την αγορά των ΗΠΑ. Οι ενδιαφερόμενοι αγοραστές περίμεναν έως και έξι μήνες για να αγοράσουν το Prius του 2004. Ο πρόεδρος πωλήσεων της Toyota Motor των ΗΠΑ Jim Presso αποκάλυψε ως «το πιο καυτό αυτοκίνητο που είχαμε ποτέ».

**2009** Νέα εξελιγμένα μοντέλα κάνουν την εμφάνισή τους στις γραμμές παραγωγής Toyota. Τα Prius MI, Lexus X 450h, Honda Insight και άλλα διεκδικούν μερίδιο στην αγορά του αυτοκινήτου και στην Ελλάδα.

**2010** Νέα μοντέλα, όπως τα Honda Jazz, Auris hybrid, Porsche Cayenne, VW Touareg και άλλα, που εμφανίζονται συνεχώς, αποδεικνύουν ότι οι τεχνολογίες της εναλλακτικής αυτοκίνησης, λόγω των συνεχώς αυξανόμενων αυστηρών περιβαλλοντικών προϋποθέσεων για την αυτοκινητοβιομηχανία, έχει γίνει μονόδρομος.

## **2.3 Κατηγοριοποίηση υβριδικών οχημάτων ως προς το είδος της ενέργειας τους.**

### **2.3.1 Υβριδικό όχημα με ηλεκτροκινητήρα**

Τα οχήματα αυτά χρησιμοποιούν ένα συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης και έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Υπάρχουν πολλά είδη διατάξεων ανάλογα με διάφορα κριτήρια, θα παρουσιασθούν αναλυτικότερα παρακάτω.

### **2.3.2 Υβριδικό θερμικό σύστημα**

Σε αυτά τα οχήματα υπάρχει μια διάταξη, η οποία χρησιμοποιεί τη θερμική ενέργεια των καυσαερίων για να παράγει ατμό, ο οποίος διοχετεύεται σε έναν αμοστρόβιλο. Ο αμοστρόβιλος υποβοηθά την κίνηση του οχήματος μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων.

### 2.3.3 Υδραυλικό υβριδικό σύστημα

Σε αυτά τα οχήματα υπάρχει μια αντλία - κινητήρας, η οποία διακινεί μια ποσότητα υδραυλικού υγρού (λαδιού) μεταξύ δύο δοχείων. Το ένα δοχείο είναι η αποθήκη του υγρού και το άλλο είναι ένα έμβολο το οποίο περιέχει ένα αέριο.

Κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης του οχήματος η αντλία αντλεί το υγρό το οποίο συμπιέζει το αέριο. Με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται να ασκηθεί μεγάλη δύναμη στα φρένα του οχήματος και έτσι η ενέργεια που θα χανόταν σε μορφή θερμότητας μετατρέπεται σε μηχανικό έργο (αποθηκεύεται).

Κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης το δοχείο με το συμπιεσμένο αέριο εκτονώνεται και δίνει κίνηση στην αντλία - κινητήρα, η οποία κινεί τους τροχούς. Έτσι δεν απαιτείται μεγάλη συμβολή του κινητήρα εσωτερικής καύσης κατά την επιτάχυνση. Η συμπεριφορά του συστήματος ελέγχεται από έναν ψηφιακό ελεγκτή.

Το σύστημα αυτό βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλα οχήματα όπως φορτηγά και μεγάλα αυτοκίνητα, γιατί απαιτεί κάποιο χώρο εγκατάστασης, όμως η εγκατάσταση του μπορεί να γίνει εκ των υστέρων. Η χρήση του μπορεί να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου κατά 20%-30% και τις εκπομπές καυσαερίων σε αντίστοιχο ποσοστό.

### 2.3.4 Μηχανικό υβριδικό σύστημα

Ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιεί μια μεγάλη περιστρεφόμενη μάζα (σφόνδυλο) για τις ανάγκες επιβράδυνσης και επιτάχυνσης. Κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης η κίνηση από τους τροχούς μεταφέρεται απ' ευθείας στον σφόνδυλο ή μέσω ενός ηλεκτρικού κινητήρα και δεν χάνεται στο περιβάλλον, ενώ κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης μεταφέρεται ξανά στους τροχούς μέσω ενός κιβωτίου συνεχώς μεταβαλλόμενων σχέσεων (CVT). Η αποθηκευμένη ενέργεια είναι ανάλογη της μάζας του σφονδύλου και ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητάς του. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη ζυγοστάθμισή του προς αποφυγή ζημιών. Θέμα ερευνών αποτελεί η εξέλιξη των ρουλεμάν, ώστε να μηδενισθούν οι απώλειες ενέργειας, τα λιπαντικά τους όπως και η αποτελεσματική και αξιόπιστη σύζευξη του σφονδύλου με την ηλεκτρική μηχανή. Βασικό μειονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι ότι προσθέτει ένα υπολογίσιμο επιπλέον βάρος στο όχημα.

### **2.3.5 Μικτά υβριδικά συστήματα**

Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να περιέχει διάφορες διατάξεις που έχουν σκοπό την υποβοήθηση του συμβατικού κινητήρα εσωτερικής καύσης, για παράδειγμα, το TIGERS (Turbo-Generator Integrated Gas Energy Recovery System, σύστημα ανάκτησης ενέργειας με χρήση υπερσυμπιεστή). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί την κινητική ενέργεια των καυσαερίων για τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος με χρήση ηλεκτρογεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο ο κινητήρας εσωτερικής καύσης απαλλάσσεται από την υποχρέωση να δίνει κίνηση στο δυναμό του κινητήρα ή και σε άλλα κινούμενα μέρη.

## **2.4 Κατηγοριοποίηση των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με το βαθμό υβριδοποίησης**

Ως βαθμός υβριδοποίησης ενός οχήματος ορίζεται ο λόγος της ισχύος του κινητήρα που εκμεταλλεύεται τη δευτερεύουσα πηγή ενέργειας προς την ισχύ του κινητήρα που τροφοδοτείται από την κύρια πηγή ενέργειας. Στα ηλεκτρικά υβριδικά οχήματα, ο λόγος αυτός υπολογίζεται, δηλαδή, από τη διαίρεση της ισχύος του ηλεκτροκινητήρα (ή των ηλεκτροκινητήρων) προς την ισχύ του βενζινοκινητήρα. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο εμφανίζονται οι εξής κατηγορίες υβριδικών οχημάτων:

### **2.4.1 Μικρουβριδικά (micro hybrids)**

Τα μικρουβριδικά οχήματα φέρουν έναν ηλεκτρικό κινητήρα και μια διάταξη αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία έχουν πολύ περιορισμένη ισχύ. Συγκεκριμένα ο βαθμός υβριδοποίησης είναι στα όρια του 5 με 15%. Το ηλεκτρικό σύστημα του οχήματος δεν προορίζεται για συμμετοχή στην πρόωση του οχήματος. Είναι, όμως, συνδεδεμένο με τους τροχούς του οχήματος έτσι ώστε, λειτουργώντας ως γεννήτρια, να ανακτά μέρος της κινητικής ενέργειας του οχήματος. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στις αρμόδιες μπαταρίες, ή ακόμα και στην κλασσική μπαταρία του οχήματος, που έχει όμως βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Η ανακτημένη ενέργεια χρησιμοποιείται έπειτα για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών υποσυστημάτων του οχήματος, όπως το κύκλωμα φωτισμού, του κύκλωμα εξαερισμού ή την αντλία συστήματος ψύξης. Η ηλεκτρική μηχανή αντικαθιστά και τη μίζα του οχήματος και δίνει τη δυνατότητα για υλοποίηση συστήματος Start-Stop. Το κέρδος σε



κατανάλωση καυσίμου και σε εκπομπές ρύπων είναι, εδώ, σχετικά μικρό, στα επίπεδα του ποσοστού του βαθμού υβριδοποίησης. Κάποια αυτοκίνητα που εμπίπτουν στην κατηγορία αυτή είναι το CitroenC3 και οι σειρές 1 και 5 της BMW.

#### **2.4.2 Ήπια υβριδικά (mild hybrids)**

Στα ήπια υβριδικά το ποσοστό υβριδοποίησης κυμαίνεται μεταξύ 15 και 25%. Ο μεγαλύτερος, σε σχέση με των μικρουβριδικών οχημάτων, κινητήρας είναι ικανός να συμμετέχει στην πρόωση του οχήματος, δεν δύναται όμως να την αναλάβει εξ' ολοκλήρου. Εκτός από τη συμμετοχή στην κίνηση, ο ηλεκτροκινητήρας δύναται να ανακτήσει ενέργεια και να υποκαταστήσει τη μίζα. Στα πλεονεκτήματα των ήπιων υβριδικών περιλαμβάνεται το μειωμένο βάρος του υβριδικού κινητηρίου συστήματος και το μικρότερο κόστος του. Οι δυνατότητες του παραμένουν όμως περιορισμένες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τεχνολογίας αυτής είναι τα μοντέλα IMA (Integrated Motor Assist) της Honda. Τα κέρδη σε κατανάλωση και εκπομπές ρύπων κυμαίνονται και εδώ στα όρια του βαθμού υβριδοποίησης των οχημάτων.

#### **2.4.3 Πλήρως υβριδικά (full hybrids)**

Η κατηγορία αυτή αφορά τα οχήματα που ο ηλεκτροκινητήρας τους μετέχει με το μεγαλύτερο ποσοστό, άνω του 25%, στο ισοζύγιο ισχύος του αυτοκινήτου. Στα πλήρως υβριδικά, η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα είναι τέτοια ώστε να επαρκεί για την εξ' ολοκλήρου κίνηση στις χαμηλές ταχύτητες και στα χαμηλά φορτία. Όταν οι απαιτήσεις ισχύος αυξηθούν εισέρχεται και ο βενζινοκινητήρας στη διαδικασία μετάδοσης ισχύος στους τροχούς. Και εδώ ο ηλεκτροκινητήρας ανακτά ενέργεια κατά την επιβράδυνση, μπορεί να λειτουργήσει όμως και ως γεννήτρια παίρνοντας κίνηση από τον άξονα του βενζινοκινητήρα, όταν οι μπαταρίες απαιτούν φόρτιση λόγω χαμηλών αποθεμάτων. Ο διαμοιρασμός της ισχύος γίνεται συνήθως μέσω μίας μηχανικής μονάδας με πλανητικούς μειωτήρες. Ο αδιαμφισβήτητος εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι το Prius της Toyota και τα αυτοκίνητα που ενσωματώνουν το Lexus Hybrid Drive.

#### 2.4.4 “Plug-in” υβριδικά (PHEVs)

Ένα plug-in υβριδικό όχημα (plug-in hybrid electric vehicle - PHEV) είναι ένα υβριδικό όχημα με μπαταρίες που επαναφορτίζονται συνδέοντας το όχημα με μια πρίζα σε μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα plug-in υβριδικά έχουν χαρακτηριστικά και των συμβατικών υβριδικών ηλεκτρικών αλλά και των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα plug-in υβριδικά αποτελούν την εξέλιξη των σημερινών "πλήρως" υβριδικών οχημάτων. Ένα πλήρως υβριδικό αυτοκίνητο έχει τη δυνατότητα να εκκινεί και να επιταχύνει σε χαμηλές ταχύτητες χωρίς τη χρήση του κινητήρα, με την μπαταρία να φορτίζεται, ωστόσο, αποκλειστικά από τον κινητήρα και το σύστημα ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα. Ένα plug-in υβριδικό λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο αλλά έχει μεγαλύτερη μπαταρία και δίνει στον οδηγό την επιλογή να την φορτίζει στο σπίτι του χρησιμοποιώντας μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και έτσι μπορεί να κινεί το όχημα του μόνο με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως, η φόρτιση του αυτοκινήτου θα γίνεται τη νύχτα που θα είναι και ακινητοποιημένο για αρκετή ώρα. Έτσι και τα PHEVs και τα HEVs κάνουν χρήση ηλεκτροκινητήρων που τροφοδοτούνται από μπαταρίες και Μ.Ε.Κ., για την εξοικονόμηση καυσίμου, ωστόσο τα PHEVs μπορούν να αναβάλλουν ακόμη περισσότερο τη χρήση καυσίμου με τη φόρτιση του οχήματος από το σπίτι. Επίσης, τα plug-in υβριδικά έχουν πλεονέκτημα έναντι των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων στο ότι οι οδηγοί τους δεν χρειάζεται να ανησυχούν για το ενδεχόμενο "αποφόρτισης" του οχήματος τους. Και αυτό διότι όταν η μπαταρία αποφορτίζεται, τα plug-in οχήματα λειτουργούν όπως και τα συμβατικά και κάνουν χρήση του κινητήρα τους και του συστήματος ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα για τη φόρτιση της μπαταρίας και την προώθηση του οχήματος. Επειδή, λοιπόν, χρησιμοποιούν και κινητήρα και ηλεκτροκινητήρα, τα PHEVs διαθέτουν μικρότερες και φτηνότερες συστοιχίες μπαταριών απ' ότι τα αντίστοιχα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα.



Σχήμα 2.4: Plug-in υβριδικό όχημα της Toyota.

## 2.5 Διατάξεις ηλεκτρικών-υβριδικών οχημάτων

Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες, ανάλογα με τη διάταξη του κινητήριου συστήματός τους και τα υποσυστήματα που το αποτελούν. Σε αυτή την κατηγοριοποίηση προφανώς δε συμμετέχουν τα μικρουβριδικά οχήματα, καθώς, όπως αναφέραμε, δεν διαθέτουν ηλεκτρικό σύστημα που να συνεισφέρει στην κίνηση του οχήματος.

### 2.5.1 Σειριακή διάταξη (Series Hybrid)

Αυτό το είδος διάταξης, ο ηλεκτροκινητήρας είναι αποκλειστικά υπεύθυνος για την τελική μετάδοση της κίνησης στους τροχούς του οχήματος. Πηγή ενέργειας για τον ηλεκτροκινητήρα αποτελεί μία συστοιχία ηλεκτρικών συσσωρευτών. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές φορτίζονται από μία ηλεκτρική γεννήτρια η οποία είναι μηχανικώς συνδεδεμένη και στρέφεται από την μηχανή εσωτερικής καύσης του οχήματος. Η ενεργειακή διαχείριση επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και κυκλωμάτων μικροελεγκτών.

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος έχει ως εξής. Κατά την επιτάχυνση και κίνηση του οχήματος η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και τροφοδοτούμενη με

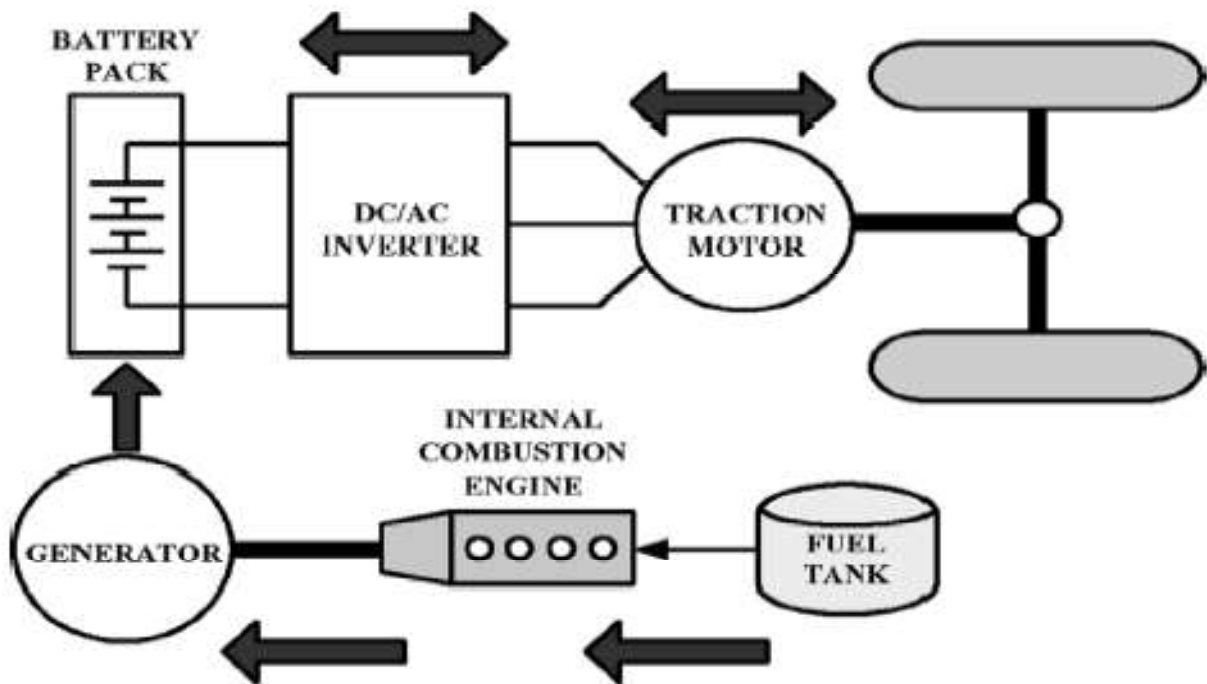
ηλεκτρική ισχύ από τις μπαταρίες ασκεί ροπή στους τροχούς. Παράλληλα ο κινητήρας εσωτερικής καύσης φορτίζει μέσω της γεννήτριας τις μπαταρίες έτσι ώστε να διατηρείται η ενεργειακή τους στάθμη σε υψηλά επίπεδα ή ακόμα μπορεί να δίνει ενέργεια στον κινητήρα μέσω της γεννήτριας παρακάμπτοντας τις μπαταρίες. Ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις καθορίζεται η διάρκεια λειτουργίας της Μ.Ε.Κ. και της γεννήτριας. Κατά την φάση της επιβράδυνσης η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια και μέσω του συστήματος ανάκτησης ενέργειας (αναγεννητική πέδηση) επιστρέφεται ηλεκτρική ισχύς στις μπαταρίες.

Το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα σε αυτή την περίπτωση είναι μηχανικώς απομονωμένο και με αυτό τον τρόπο βελτιστοποιείται εν μέρει η συνολική του απόδοση. Τα επιμέρους συστήματα (Μ.Ε.Κ., ηλεκτρική γεννήτρια), κατά τη λειτουργία τους, δε χρειάζεται να «ακολουθούν» το «απρόσμενο» εκάστοτε φορτίο που θα βλέπει ο ηλεκτροκινητήρας σύμφωνα με την πορεία που διαγράφει το όχημα στο δρόμο, ειδικότερα σε έναν υψηλό κύκλο φορτίσεων ξεκινήματος-στάσης. Έτσι, η μηχανή εσωτερικής καύσης μπορεί να λειτουργεί συνεχώς στην ονομαστική της κατάσταση, αφού δε χρειάζεται να μεταβάλλονται οι στροφές της. Με αυτό τον τρόπο παρουσιάζει μικρότερη κατανάλωση και χαμηλότερους ρύπους, και είναι μικρότερη σε όγκο και σε ισχύ σε σχέση με μία αντίστοιχη ενός συμβατικού αυτοκινήτου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της σειριακής τοπολογίας είναι ο μεγάλος βαθμός ελευθερίας της χωροταξικής προσαρμογής του κινητήριου συστήματος πάνω στο όχημα, λόγω της μηχανικής ανεξαρτησίας του ηλεκτρικού κινητήρα από την Μ.Ε.Κ. και τη γεννήτρια. Τέλος, το σύνθετο σύστημα μετάδοσης της κίνησης (κιβώτιο ταχυτήτων) απλοποιείται χάρη στον ηλεκτροκινητήρα.

Από την άλλη μεριά, η συνολική απόδοση της διάταξης δεν είναι ιδιαίτερος ικανοποιητική λόγω της σειριακής σύνδεσης των υποσυστημάτων για τη μετατροπή της ενέργειας και τη μετάδοση της κίνησης στους τροχούς. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι ίσος με το γινόμενο των βαθμών απόδοσης των επιμέρους συστημάτων. Επίσης, απαιτείται μεγάλος σε ισχύ κινητήρας έτσι ώστε να μπορεί να αναλάβει εξ ολοκλήρου την κίνηση του οχήματος. Η συγκεκριμένη τοπολογία δεν ενδείκνυται για διάνυση μεγάλων αποστάσεων καθώς σε αυτή την περίπτωση αυξάνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις του ηλεκτροκινητήρα και συνεπώς η ισχύς, το βάρος και το κόστος των υπολοίπων συστημάτων που τον τροφοδοτούν.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, τα ηλεκτροκινητήρια συστήματα με σειριακή διάταξη εφαρμόζονται κυρίως σε μικρού βάρους αυτοκίνητα τα οποία προορίζονται για χρήση στα αστικά κέντρα. Σε τέτοια περιβάλλοντα τα οχήματα δεν αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες και δε διανύουν μεγάλες αποστάσεις. Η οδηγική τους συμπεριφορά χαρακτηρίζεται

από συχνά ξεκινήματα και στάσεις κι έτσι τους παρέχεται η δυνατότητα επαναφόρτισης των μπαταριών τους μέσω του συστήματος αναγεννητικής πέδησης.



Σχήμα 2.5:Υβριδικό όχημα με σειριακή διάταξη

### 2.5.2 Παράλληλη διάταξη (Parallel Hybrid)

Η παράλληλη διάταξη αποτελεί την πιο διαδεδομένη τοπολογία κινητήριου συστήματος σε υβριδικά οχήματα. Σε αυτό το είδος διάταξης την κίνηση των τροχών αναλαμβάνει είτε ο ηλεκτροκινητήρας είτε ο κινητήρας εσωτερικής καύσης είτε και οι δύο ταυτόχρονα. Η συνεργασία και η συμμετοχή στην κίνηση των δύο διαφορετικών κινητήριων μονάδων ελέγχεται από μικροελεγκτή. Σε αυτή την διάταξη παρουσιάζονται δύο υποκατηγορίες, η παράλληλη διάταξη με υποβοήθηση στο σύστημα κίνησης και η πλήρως παράλληλη διάταξη.

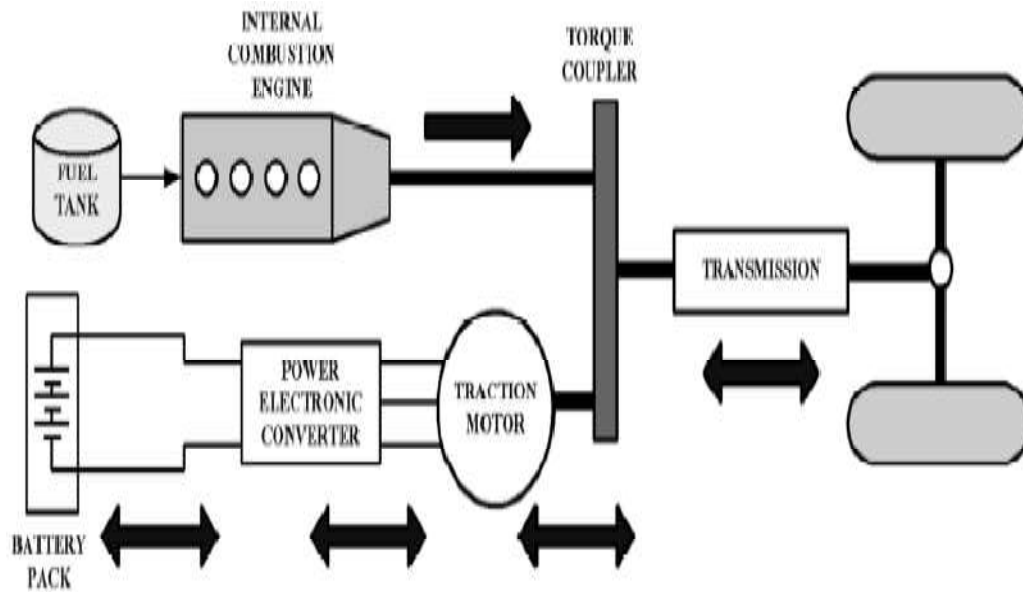
Στην παράλληλη διάταξη με υποβοήθηση στο σύστημα κίνησης, η μηχανή εσωτερικής καύσης και ο ηλεκτροκινητήρας μεταδίδουν την κίνηση μέσω κοινού άξονα, πάνω στον οποίο έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα. Ανάλογα με την ισχύ της ηλεκτρικής μηχανής που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζεται και το ποσοστό συμμετοχής αυτής στην κίνηση του οχήματος. Βέβαια, όσο αυξάνεται η ισχύς αυτή τόσο αυξάνεται και το μέγεθος και η ενέργεια αποθήκευσης των μπαταριών. Σε αυτή τη διάταξη χρησιμοποιείται συνήθως μικρή ηλεκτρική μηχανή και γι αυτό είναι περιορισμένη η επιπρόσθετη ισχύς που μπορεί να

παρέχει. Όταν το όχημα βρίσκεται σε στάση, απενεργοποιείται τελείως η μηχανή εσωτερικής καύσης, εξοικονομώντας ενέργεια, ενώ όταν είναι έτοιμο να εκκινήσει, η Μ.Ε.Κ. τίθεται και πάλι σε λειτουργία. Τέλος, παρέχεται επίσης η δυνατότητα επιστροφής ενέργειας κατά την επιβράδυνση του αυτοκινήτου μέσω του συστήματος αναγεννητικής πέδησης, όπου εδώ η ηλεκτρική μηχανή θα λειτουργεί ως γεννήτρια φορτίζοντας τις μπαταρίες. Η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάζει γενικά χαμηλό κόστος.

Στην πλήρως παράλληλη διάταξη, η δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας της μηχανής εσωτερικής καύσης και της ηλεκτρικής μηχανής απαιτούν τη μηχανική συμπλοκή αυτών με το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, γεγονός που το κάνει πιο πολύπλοκο.

Κατά την ομαλή εκκίνηση του οχήματος και για χαμηλές ταχύτητες, αρχικά την κίνηση αναλαμβάνει η ηλεκτρική μηχανή η οποία λειτουργεί σαν κινητήρας. Όταν απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς, όπως σε μία επιτάχυνση ή σε κίνηση του οχήματος σε μεγαλύτερες ταχύτητες, στην κίνηση συνεισφέρουν και οι δύο κινητήριες μονάδες. Το ποσοστό συμβολής της καθεμιάς καθορίζεται από την υπολογιστική μονάδα ελέγχου του αυτοκινήτου. Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος, η μηχανή εσωτερικής καύσης αναλαμβάνει τη φόρτιση των μπαταριών όταν η στάθμη της ενέργειάς τους πέσει σε χαμηλά επίπεδα για να υπάρχει εκ νέου διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς. Σε αυτή τη φάση η ηλεκτρική μηχανή θα λειτουργεί ως γεννήτρια. Τέλος, κατά τη φάση της επιβράδυνσης, η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια και εκμεταλλεύομενη την κινητική ενέργεια των τροχών επιστρέφει σημαντικά ποσά ενέργειας φορτίζοντας τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

Συγκριτικά με την σειριακή διάταξη, στην παράλληλη χρησιμοποιείται μικρότερος σε ισχύ ηλεκτροκινητήρας, καθώς αυτός λειτουργεί παράλληλα με την μηχανή εσωτερικής καύσης, και για αυτό το λόγο είναι μικρότεροι και οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές για την αποθήκευση της ενέργειας. Παρόλα αυτά, το συνολικό κόστος της παράλληλης διάταξης παραμένει ίδιο με αυτό της σειριακής λόγω της ανάγκης ύπαρξης κιβωτίου ταχυτήτων και μηχανικού συστήματος για τη σύμπλεξη της ηλεκτρικής μηχανής και της μηχανής εσωτερικής καύσης με τον άξονα μετάδοσης της κίνησης. Επίσης ο έλεγχος αυτής της συνεργασίας των δύο κινητήρων για την διαχείριση της ισχύος καθίσταται πιο δύσκολος. Τέλος, η παράλληλη διάταξη αυτή είναι ηλεκτρική είτε χημική και το όχημα μπορεί να διανύει μεγαλύτερες αποστάσεις και να κινείται και εκτός πόλης.



Σχήμα 2.6: Υβριδικό όχημα με παράλληλη διάταξη

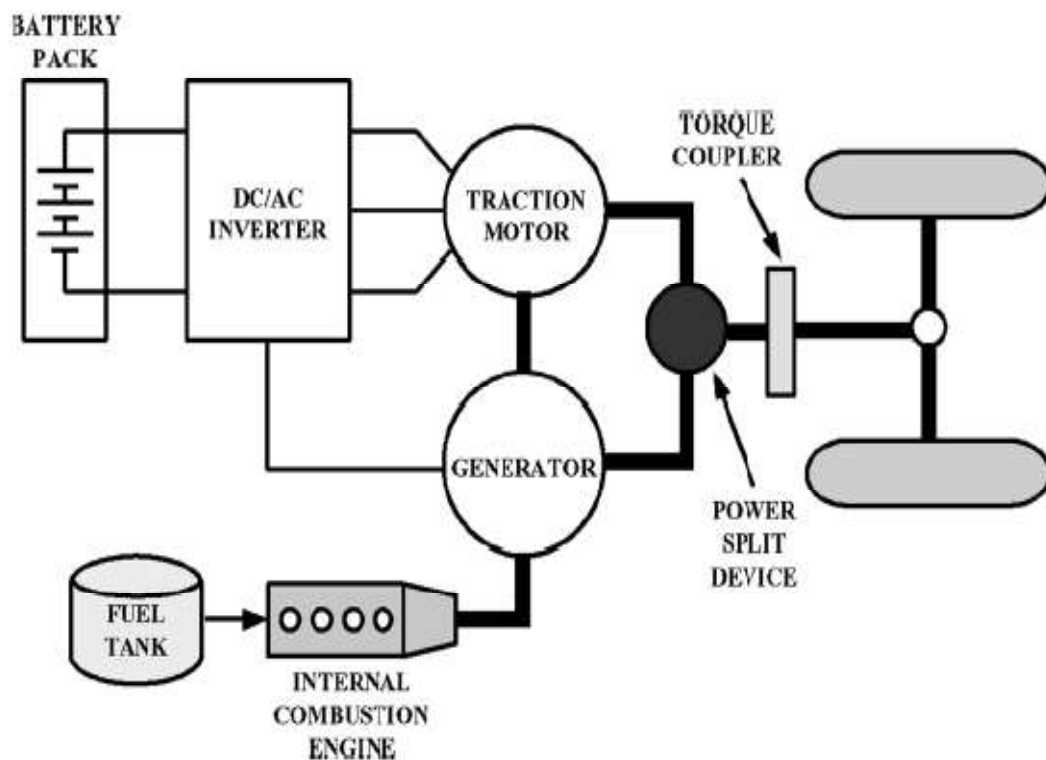
### 2.5.3 Συνδυαστική διάταξη (Combined Hybrid ή Series-Parallel Hybrid)

Το σειριακό-παράλληλο ή συνδυαστικό σύστημα είναι ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω διατάξεων και αποτελείται από μια μηχανή εσωτερικής καύσης, έναν ηλεκτρικό κινητήρα, μία ηλεκτρική γεννήτρια και τη συστοιχία των μπαταριών. Έτσι η διάταξη των εξαρτημάτων είναι κυρίως όπως στο παράλληλο σύστημα, μόνο που στο συγκεκριμένο χρησιμοποιείται ξεχωριστά μία δεύτερη ηλεκτρική μηχανή ως γεννήτρια για την φόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών.

Η συνεισφορά των διαφόρων υποσυστημάτων στην κίνηση (κατά τις διάφορες φάσεις: ομαλή εκκίνηση, επιτάχυνση, κίνηση σε υψηλές ταχύτητες, επιβράδυνση) είναι ακριβώς ίδια όπως και στην παράλληλη διάταξη. Η διαφορά αυτής της τοπολογίας σε σχέση με αυτήν της παράλληλης έγκειται στο ότι η μηχανή εσωτερικής καύσης μπορεί να προσδίδει κίνηση στους τροχούς του οχήματος όταν είναι συμπλεγμένη με το σύστημα μετάδοσης ή εναλλακτικά να φορτίζει τις μπαταρίες μέσω της ηλεκτρικής γεννήτριας, αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα. Σε χαμηλές ταχύτητες, η Μ.Ε.Κ. είναι αποσυνδεδεμένη από το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και η συγκεκριμένη διάταξη εμφανίζει χαρακτηριστικά της σειριακής. Έτσι ο κινητήρας εσωτερικής καύσης έχει τη δυνατότητα να δουλεύει σε αυτή την περίπτωση στο βέλτιστο βαθμό απόδοσής του και την πρόωση του οχήματος αναλαμβάνει ο ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτούμενος από τις μπαταρίες. Σε υψηλότερες ταχύτητες ή επιταχύνσεις, όπου η Μ.Ε.Κ. μπορεί να προσφέρει πιο αποδοτικά ισχύς για την κίνηση του οχήματος,

περιορίζεται η λειτουργία της σειριακής διάταξης και την κίνηση τώρα αναλαμβάνει η παράλληλη διάταξη. Η επιλογή της παράλληλης ή της σειριακής λειτουργίας επιλέγεται μέσω της υπολογιστικής μονάδας ελέγχου και υλοποιείται μέσω ενός συμπλέκτη.

Η συνδυαστική διάταξη προσπαθεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της σειριακής και της παράλληλης διάταξης, ωστόσο ο έλεγχος για τη διαχείριση της ισχύος και η κατανομή αυτής γίνονται πιο πολύπλοκα.

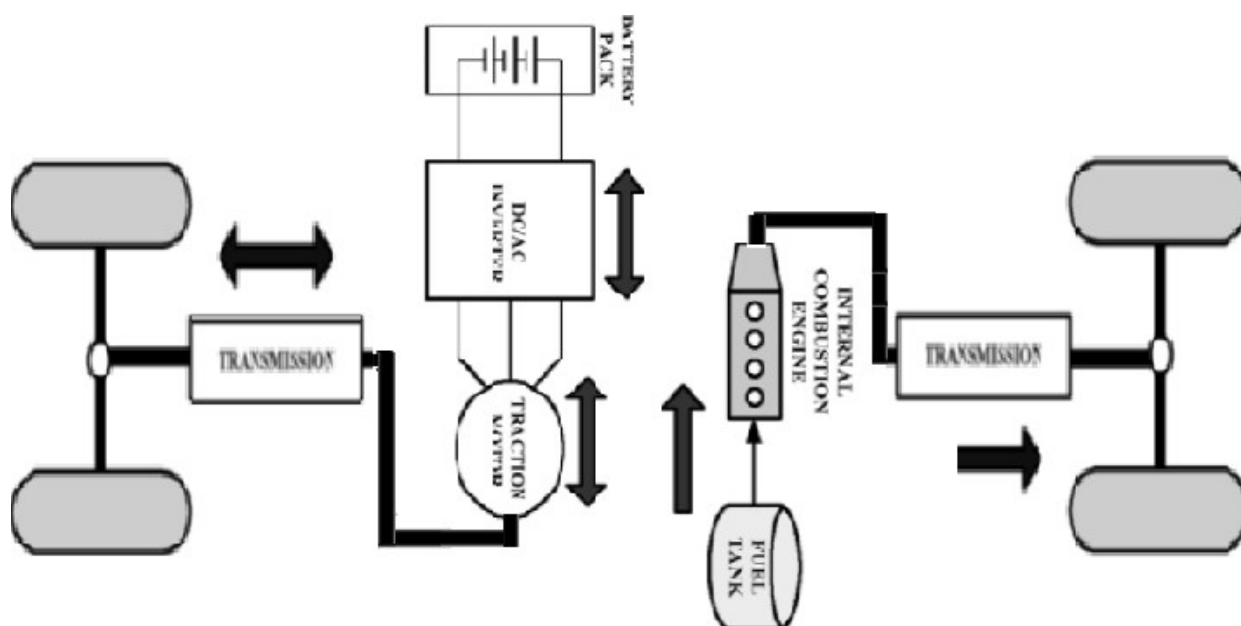


Σχήμα 2.7: Υβριδικό όχημα με συνδυαστική διάταξη

#### 2.5.4 Ανεξάρτητη λειτουργία

Η συγκεκριμένη διάταξη θεωρείται μια παραλλαγή της παράλληλης διάταξης, όμως είναι η απλούστερη δυνατή διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιεί σε ένα υβριδικό όχημα. Οι μπροστινοί συνήθως τροχοί κινούνται από έναν συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης και οι πίσω από μια ηλεκτρική μηχανή η οποία λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια. Η διάταξη αυτή είναι μια πολύ καλή επιλογή για τετρακίνητα οχήματα αφού μπορούν να κινηθούν ο μπροστινός και ο πίσω άξονας ανεξάρτητα, χωρίς την ύπαρξη άξονα μετάδοσης και διαφορικού, κάτι που μειώνει το συνολικό βάρος του οχήματος.





Σχήμα 2.8:Ανεξάρτητη λειτουργία κινητήρων.

## 2.6 Μέθοδοι ανάκτησης και εξοικονόμησης ενέργειας ηλεκτρικών-υβριδικών οχημάτων

### 2.6.1 Αναγεννητική πέδηση

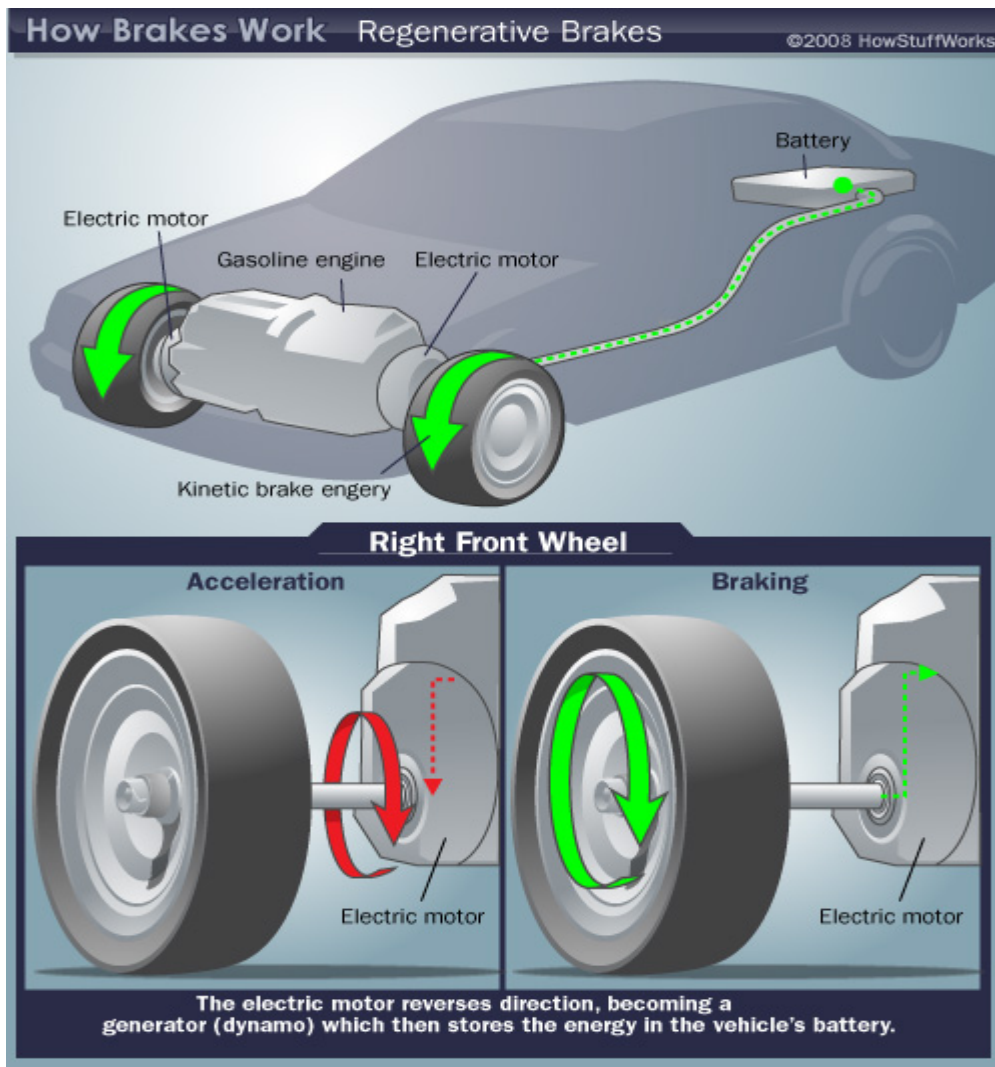
Στην ορολογία των υβριδικών οχημάτων, ο όρος «ανάκτηση» δηλώνει την ανάκτηση της ενέργειας. στα συμβατικά οχήματα το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία παραμένει αναξιοποίητη. Όμως υπάρχει η δυνατότητα να επιστραφεί τμήμα της ενέργειας αυτής, μέσω του ηλεκτρικού κινητήρα ή της γεννήτριας, χρησιμοποιώντας κατάλληλες υβριδικές διατάξεις. Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την επιβράδυνση της πέδησης μετατρέπεται σε ηλεκτρική και φορτίζει την μπαταρία.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος στις άλλες λειτουργίες οδήγησης εξασφαλίζει την προώθηση του οχήματος, λειτουργεί τώρα παραγωγικά. Η διάταξη του ηλεκτρικού μοτέρ πίσω από το κιβώτιο ταχυτήτων (απευθείας στην κίνηση) αποτρέπει τυχόν απώλειες στην αποδοτικότητα της τροφοδοσίας της μετάδοσης κίνησης. Καθώς εξελίσσεται το ταξίδι, η ενέργεια μπορεί να διατεθεί πάλι στο σύστημα.

Όμως είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθεί το σύνολο της ενέργειας που απελευθερώνεται, καθώς η ταχύτητα κίνησης μειώνεται επίσης από μεταβλητές, όπως η αντίσταση κύλισης και η αεροδυναμική οπισθέλκουσα, οι οποίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Η πολλαπλή μετατροπή και οι αντίστοιχες απώλειες στην αποδοτικότητα έχουν επιπλέον ως αποτέλεσμα ένα μέρος της ενέργειας να χάνεται στη διαδρομή από τον ηλεκτρικό κινητήρα προς την τροφοδοσία της μπαταρίας. Όπως και στην περίπτωση των άλλων στρατηγικών, βασικός παράγοντας στη χρήση της ανάκτησης είναι οι τιμές της κατάστασης του συστήματος.

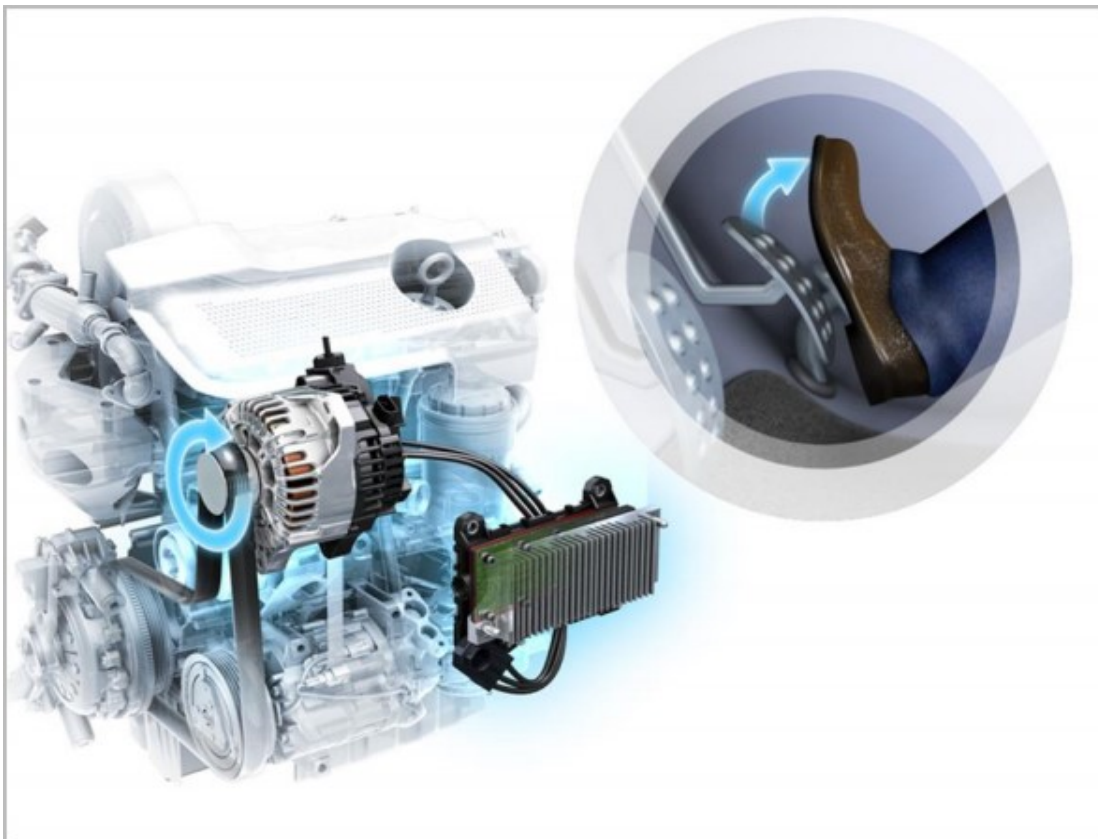
Για παράδειγμα: δεν πραγματοποιείται ανάκτηση εάν ο συσσωρευτής ενέργειας είναι πλήρης. Για να είναι αποτελεσματική αυτή η στρατηγική, θα πρέπει να διατίθεται ένας κατάλληλος ηλεκτρικός κινητήρας και ένας κατάλληλος συσσωρευτής ενέργειας. Μια άλλη προϋπόθεση είναι η υψηλής απόδοσης ρύθμιση της διαχείρισης της ενέργειας, η οποία επιτρέπει την εκμετάλλευση της ανακτώμενης ενέργειας.



Σχήμα 2.9: Αναγεννητική πέδηση

## 2.6.2 Σύστημα "Start&Stop"

Όταν το υβριδικό αυτοκίνητο πρέπει να σταματήσει σε ένα φανάρι ή στην κυκλοφορία, ο βενζινοκινητήρας αυτόματα παύει να λειτουργεί για την εξοικονόμηση πολύτιμης ενέργειας, μειώνοντας επομένως την κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο, όταν το αυτοκίνητο ξεκινά, ανά βαθμός της επιτάχυνσης το απαιτεί, ο βενζινοκινητήρας θα ξεκινήσει ομαλά και γρήγορα προκειμένου να προσφέρει το μέγιστο επίπεδο απόδοσης.



Σχήμα 2.10: Σύστημα start-stop

## 2.7 Επιλογή υβριδικού συστήματος

Επειδή θέλουμε το όχημα μας να λειτουργεί κυρίως ως ηλεκτρικό, έχοντας την βοήθεια του βενζινοκινητήρα μόνο όταν χρειάζεται επιλέξαμε την σειριακή διάταξη καθώς σε αυτό το είδος διάταξης ο ηλεκτροκινητήρας είναι αποκλειστικά υπεύθυνος για την τελική μετάδοση της κίνησης στους τροχούς του οχήματος. Ακόμα επιλέξαμε το όχημα να είναι ‘‘plug-in’’ δηλαδή να μπορεί να συνδέεται στο δίκτυο για να φορτίζονται οι συσσωρευτές έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η φόρτιση των μπαταριών μέσω του βενζινοκινητήρα. Για τον ίδιο λόγο αλλά και γενικά για εξοικονόμηση-ανάκτηση ενέργειας θα ενσωματωθεί σύστημα αναγεννητικής πέδησης συνδεδεμένο με τον επαγωγικό κινητήρα που έχει επιλεγθεί καθώς κατά την πέδηση του οχήματος θα λειτουργεί ως γεννήτρια μέσω του άμεσου έλεγχου ροπής που είναι ικανός να εκτελέσει μια τέτοια λειτουργία.

## Κεφάλαιο 3

### ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΕΜΠΟΡΙΟΥ

#### 3.1 Chevrolet Volt

Το 5θυρο μοντέλο της Chevrolet, που από το Δεκέμβριο του 2010 που βγήκε στην αγορά έχει παραχθεί σε 87.000 μονάδες, είναι το best-seller της κατηγορίας των plug-in hybrid ξεπερνώντας ακόμα και το Prius. Κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς το Volt διαθέτει ένα πρωτοποριακό τρόπο κίνησης.

Η κίνηση του Chevrolet Volt γίνεται με ηλεκτρική ενέργεια από τις μπαταρίες και όταν αυτή τελειώσει ένας βενζινοκινητήρας ενεργοποιείται έτσι ώστε να δώσει ισχύ σε μια γεννήτρια που με τη σειρά της θα δώσει ενέργεια στον ηλεκτροκινητήρα ο οποίος θα δώσει κίνηση στους μπροστινούς τροχούς. Η διαφορά με τα απλά υβριδικά αυτοκίνητα είναι ότι ο βενζινοκινητήρας δεν κινεί ποτέ αυτός τις ρόδες, απλά βοηθάει συμπληρωματικά στη παραγωγή νέας ηλεκτρικής ενέργειας όταν οι μπαταρίες αδειάζουν.



Σχήμα 3.1: Chevrolet Volt

Για να γίνει ακόμα απλούστερη η διαδικασία της φόρτισης η GM φρόντισε να εξοπλίσει το Chevrolet Volt 2015 με έναν σύστημα το οποίο με τη βοήθεια GPS δίνει τη δυνατότητα στον οδηγό να προγραμματίζει ακριβώς πότε θα ξεκινάει η κάθε φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, ο οδηγός μπορεί να προγραμματίσει έτσι αυτό το σύστημα έτσι ώστε όταν το GPS εντοπίσει ότι το αυτοκίνητο βρίσκεται στο σπίτι να ξεκινάει η διαδικασία της φόρτισης μια συγκεκριμένη ώρα. Έτσι ώστε αυτή να εμπίπτει στο βραδινό τιμολόγιο ρεύματος, άρα πιο φθηνή, ή να πληκτρολογήσει την ώρα αναχώρησης του δηλαδή την ώρα που θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η φόρτιση.

### **3.2 Opel Ampera**

Το πεντάθυρο, τετραθέσιο Ampera διαθέτει έναν ηλεκτροκινητήρα απόδοσης 150 ίππων ενώ η ροπή του φτάνει στα 37,8 kgm. Με 3 ώρες φόρτισης δίνει αυτονομία 60 km. Όμως στην περίπτωση που η ενέργεια της μπαταρίας αρχίζει να μειώνεται, υπάρχει και μία γεννήτρια- βενζινοκινητήρας που μπαίνει σε λειτουργία παράγοντας ηλεκτρισμό, και γεμίζοντας την μπαταρία. Έτσι, η αυτονομία του Ampera επεκτείνεται στα 500 km. Οι περισσότεροι οδηγοί εύκολα θα αποδεχτούν ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο όπως το Ampera. Και αυτό επειδή πέρα από την ισχυρή μπαταρία ιόντων λιθίου 16 kWh, έχει ένα μοναδικό ηλεκτρικό σύστημα κίνησης που επεκτείνει την αυτονομία λειτουργίας του. Παρά το ότι προσφέρει όλα τα πλεονεκτήματα των προηγμένων ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας, όπως μηδενικές εκπομπές ρύπων και ζωηρές επιδόσεις, το καινοτόμο Ampera δεν υποφέρει από τα συνήθη μειονεκτήματα της περιορισμένης αυτονομίας ή της πολύωρης ακινητοποίησης λόγω επαναφόρτισης μιας μεγάλης μπαταρίας.



Σχήμα 3.2: Opel Ampera

### 3.3 Toyota prius

Η Toyota μπορεί να έγινε «πρωτοσέλιδο» το 1997 όταν παρουσίασε το πρώτο Prius κερδίζοντας την παγκόσμια αποδοχή, αλλά η ενασχόλησή της με την εξέλιξη συμβατών περιβαλλοντικά υβριδικών αυτοκινήτων ξεκίνησε πριν από 40 χρόνια, το 1965, όταν άρχισε να ερευνά τη βιωσιμότητα της χρήσης αεροστροβίλων για την τροφοδοσία ενός ηλεκτρικού συστήματος λειτουργίας των αυτοκινήτων. το 1977 η Toyota επέλεξε, για να παρουσιάσει τις μελλοντικές προθέσεις της, το υβριδικό Toyota Sports 800 με αεροστρόβιλο. χρησιμοποιώντας ένα σπορ αυτοκίνητο υψηλών επιδόσεων, η Toyota πρότεινε μία έξυπνη και περιβαλλοντικά συμβατή λύση και δημιούργησε μια φιλοσοφία που θα ωριμάζε και θα εξελισσόταν σε αυτό που ονομάζεται σήμερα «Hybrid Synergy Drive». Είκοσι χρόνια μετά, το 1997, η Toyota παρουσίασε ένα υβριδικό λεωφορείο παραγωγής, το Coaster Hybrid και το Prius, το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο είχε εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές ρύπων σε αστικές συνθήκες, απεριόριστη αυτονομία και σύστημα πέδησης με ανάκτηση ενέργειας που ανακύκλωνε την περίσσεια ενέργεια αποθηκεύοντάς την στις μπαταρίες του αυτοκινήτου. Από τότε η Toyota παρουσίασε επίσης το πρώτο υβριδικό τετρακίνητο όχημα, το Estima, και την υβριδική έκδοση του Crown Sedan, καθώς και ένα πειραματικό όχημα κυψελών καυσίμου. το Prius νέας γενιάς της Toyota είναι ένα από τα πιο προηγμένα αυτοκίνητα τεχνικά και το «καθαρότερο» αυτοκίνητο παραγωγής. τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την ασφαλή οδική συμπεριφορά του και την εντυπωσιακή σχεδίασή του, επιβεβαιώνουν αυτό που

σημαίνει το όνομά του: «Prius» είναι η λατινική λέξη για την έκφραση «μπροστά από την εποχή του».



Σχήμα 3.3:Toyota Prius 2005

#### Hybrid Synergy Drive.

Το νέο υβριδικό σύστημα, που χρησιμοποιήθηκε στο Toyota Prius, είναι το πρώτο που δημιουργήθηκε σύμφωνα με μια διαφορετική αντίληψη και ονομάστηκε Hybrid Synergy Drive. Τα υβριδικά συστήματα της σημερινής γενιάς βασίζονται, για την επίτευξη των μέγιστων επιδόσεων, στον βενζινοκινητήρα, έχοντας τον ηλεκτροκινητήρα ως συμπληρωματικό. Το Hybrid Synergy Drive λειτουργεί αντίθετα, καθώς προσφέρει στον ηλεκτροκινητήρα σημαντικότερο ρόλο, με έμφαση στις επιδόσεις και έχει συμπληρωματικό τον βενζινοκινητήρα.

Το Hybrid Synergy Drive δεν αποτελεί απλή εξέλιξη του αρχικού Toyota Hybrid System (THS). πρόκειται για μία εντελώς νέα πρόταση που θεωρείται η καλύτερη λύση για όσους επιζητούν οδηγικές απολαύσεις σε συνδυασμό με τις χαμηλότερες δυνατές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. στην πραγματικότητα, το Hybrid Synergy Drive διεκδικεί περισσότερες από 530 πατέντες σε σύγκριση με το αρχικό THS που είχε περίπου 300.



Ο ηλεκτροκινητήρας είναι τώρα ισχυρότερος συγκρινόμενος με τους περισσότερους κινητήρες 1,0 L-1,2 Lεσωτερικής καύσης, ενώ με ροπή που φτάνει τα 400 N-μαπό τις 0-1200 στροφές, το Prius υπερέρχει στον τομέα αυτό πολλών αυτοκινήτων που διαθέτουν ακόμα και πετρελαιοκινητήρα V6. Έτσι, η επιτάχυνση από 0 στα 100 km/hεπιτυγχάνεται σε λιγότερο από 11 δευτερόλεπτα, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν τρία δευτερόλεπτα ταχύτερο από το σημερινό μοντέλο και εφάμιλλο με ένα συμβατικό πετρελαιοκίνητο 2,0 L.

Επειδή ο προηγμένος έλεγχος του υβριδικού συστήματος χρησιμοποιεί τον ηλεκτροκινητήρα ως κύρια πηγή ισχύος, η λειτουργία του είναι εξαιρετικά αθόρυβη. Η επιτάχυνση είναι ισχυρή αλλά γραμμική, ιδιαίτερα από τα 50 έως τα 80 km/h, ενώ οι θόρυβοι και οι κραδασμοί περιορίζονται στο ελάχιστο. Για πρώτη φορά σε υβριδικό όχημα ο οδηγός μπορεί να χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα οδήγησης EV (Electric Vehicle) απλώς με το πάτημα ενός μπουτόν στο ταμπλό. Αυτό επιτρέπει την αποκλειστική χρήση του ηλεκτροκινητήρα για την κίνηση του αυτοκινήτου, με την παραγωγή μηδενικών εκπομπών ρύπων και πολύ χαμηλών θορύβων. Το πρόγραμμα EVμπορεί να χρησιμοποιηθεί συνεχόμενα για 2 kmμάξιμουμ, ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα είναι 50 km/h.

### **3.4 Lexus RX 400H**

Με βενζινοκινητήρα 3.3 λίτρων, με δύο ηλεκτροκινητήρες, έναν εμπρόσθιο και έναν οπίσθιο, για την τετρακίνηση, με μέγιστη απόδοση ισχύος συστήματος 200 kW/272 DIN hp, με επιτάχυνση 0-100 km/hσε 7,6 sκαι τη χαμηλότερη κατανάλωση της κατηγορίας του στην αγορά, 8,1 L/100 kmστον μεικτό κύκλο, αποτελεί ένα ξεχωριστό οικολογικό αυτοκίνητο. Όλα δείχνουν ότι η χρήση της υβριδικής τεχνολογίας θα υπερισχύσει μελλοντικά στην αγορά. Σήμερα το πρόβλημα είναι πώς θα χρησιμοποιείται η βενζίνη όσο πιο αποτελεσματικά γίνεται, σε συνδυασμό με τη μέγιστη ιπποδύναμη που μπορεί να επιτευχθεί και τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Η αντίληψη αυτή διέπει την κατασκευή και τον οδηγικό χαρακτήρα του RX 400h.



Σχήμα 3.4: Lexus RX 400H 2008

Η υβριδική τεχνολογία. Στο RX 400h οι μηχανικοί του Lexus δημιούργησαν εντελώς νέα υβριδικά εξαρτήματα προσαρμοσμένα για όχημα SUV και βασισμένα στη φιλοσοφία Hybrid Synergy Drive®. Μέσα από αυτή την επαναστατική τεχνολογική εξέλιξη γεννήθηκε το παγκοσμίως πρώτο υβριδικό σύστημα που συνδυάζει υψηλής ισχύος εμπρός και οπίσθιο ηλεκτροκινητήρα και έναν άκρως αποδοτικό βενζινοκινητήρα.

Χάρη στην άριστη συνεργασία τους επιτυγχάνεται έξυπνη ηλεκτρική τετρακίνηση, σημαντική βελτίωση της επιτάχυνσης στις μεσαίες στροφές και οικονομία καυσίμου, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές CO<sub>2</sub>.

### 3.5 Bmw i8

Το BMW i8 είναι ένα υβριδικό spor αυτοκίνητο που κατασκευάζεται από τη γερμανική αυτοκινητοβιομηχανία BMW, από τον Απρίλιο του 2014 έως σήμερα. Είναι το δεύτερο μοντέλο μαζικής παραγωγής που εισήγαγε το παρακλάδι της εταιρείας που ονομάζεται BMW i και ασχολείται με τη δημιουργία ηλεκτροκίνητων μοντέλων, μετά το BMW i3 που είχε μπει στην παραγωγή τον Σεπτέμβριο του 2013.

Το δάπεδο είναι εξ ολοκλήρου κατασκευασμένο από αλουμίνιο και φιλοξενεί εμπρός έναν ηλεκτροκινητήρα, που μεταφέρει τους 131 ίππους και τα 25,5 χλγμ. ροπής μέσω μιας αυτοματοποιημένης μετάδοσης 2 σχέσεων στους εμπρός τροχούς, ενώ σαν ραχοκοκαλιά στο μέσον του πατώματος, κατά μήκος ανάμεσα στον εμπρός και τον πίσω άξονα, φιλοξενείται η συστοιχία μπαταριών ιόντων-λιθίου χωρητικότητας 7,1 kWh. Ακριβώς εμπρός από τους πίσω τροχούς είναι τοποθετημένοι ένας μικρότερος ηλεκτροκινητήρας, που λειτουργεί και ως γεννήτρια για τη φόρτιση των μπαταριών, και ένας υπερτροφοδοτούμενος 3κύλινδρος 1.500άρης Twin Power Turbo, με την πίεση υπερπλήρωσης στο 1,5 bar, φθάνει τους 231 ίππους και τα 32,6 χλγμ. ροπής, ξεπερνώντας σε ειδική απόδοση ακόμα και τον κινητήρα της 911 TurboS. Το μηχανολογικό πακέτο συμπληρώνεται από ένα αυτόματο κιβώτιο 6 σχέσεων.



Σχήμα 3.5:BMW i8

### 3.6 Honda Insight

Στην κατηγορία των μικρομεσαίων επιβατικών αυτοκινήτων κατατάσσεται το Honda Insight. Πρόκειται για ένα ήπιο υβριδικό (mild hybrid) όχημα, παράλληλης διάταξης, με μέση κατανάλωση στο μεικτό κύκλο 4,4 λίτρα ανά 100 km και εκπομπές CO<sub>2</sub> 101 γραμμάρια ανά χιλιόμετρο.

Το σύστημα πρόωσης του οχήματος αποτελείται από ένα βενζινοκινητήρα χωρητικότητας 1,3 λίτρων, μέγιστης ισχύος 73 kW (98 ίππων) και μέγιστης ροπής 120,6 Nm, έναν τριφασικό σύγχρονο κινητήρα ισχύος 10,4 kW (13 ίππων) και ροπής 78 Nm και συσσωρευτές νικελίου – μετάλλου υδριδίου με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας της τάξεως των 0,58 kWh.

Το όχημα έχει τη δυνατότητα αμιγούς ηλεκτροκίνησης όταν το φορτίο δεν υπερβαίνει τα 5 kW κι όσο επιτρέπεται από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Εξαιτίας της έλλειψης γεννήτριας οι μπαταρίες φορτίζονται αποκλειστικά μέσω ενεργειακής πέδησης. Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι διαρκώς συνδεδεμένος με το βενζινοκινητήρα και περιστρέφεται ως φορτίο από τη ΜΕΚ όταν δε τροφοδοτείται με τάση. Αντίθετα, κατά την κίνηση αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα ανοίγουν οι βαλβίδες των κυλίνδρων του βενζινοκινητήρα, ώστε τα έμβολα του να κινούνται ελεύθερα κι ο ηλεκτροκινητήρας να έχει το ελάχιστο δυνατό φορτίο. Το κιβώτιο για τη μετάδοση της κίνησης είναι και σε αυτή την περίπτωση συνεχώς μεταβαλλόμενων σχέσεων (CVT).



Σχήμα 3.6: Honda Insight 2014

### 3.7 Audi A3 e-tron

Η καρδιά του A3 e-tron χωρίζεται σε δύο μέρη: Στον κινητήρα βενζίνης 1.4 TFSI και στον ηλεκτροκινητήρα. Μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένας συμπλέκτης έτσι ώστε να μπορεί να απομονωθεί και να σβήσει ο κινητήρας εσωτερικής καύσης. Συνδυάζονται αποκλειστικά με κιβώτιο DSG, έξι σχέσεων.

Η συνολική ισχύς φτάνει τους 204 ίππους, ενώ η μέγιστη ροπή είναι 35,7 kgm, για μικρά χρονικά διαστήματα.

Ακόμα και στην αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία EV, είναι μια χαρά. Από εκεί και πέρα, μπορείς να επιλέξεις ανάμεσα σε τρία προγράμματα Hybrid: Για ανάλωση του υπόλοιπου της μπαταρίας αυτόματα, για φόρτιση της μπαταρίας ή για διατήρηση σταθερού ποσοστού φόρτισης.

Το AudiA3 e-tron παρότι δεν έχει πολύ μεγάλη χωρητικότητα μπαταριών σε κιλοβατώρες (8,8kWh), καταφέρνει να κάνει πολύ καλή εκμετάλλευση της διαθέσιμης ενέργειας. Και το σημαντικότερο είναι ότι ανακτά πολύ αποτελεσματικά ενέργεια στη φάση της επιβράδυνσης.

Από τη στιγμή που θα το βάλεις στην πρίζα, χρειάζεται το πολύ δύο ώρες για να φορτίσει σε βιομηχανική τάση ή 3h 45” για οικιακό ρεύμα. Μόλις αποσυνδέσεις τον ειδικό φορτιστή, από το βύσμα που κρύβεται πίσω από το σήμα, έχεις αυτονομία 50 α και μέγιστη ταχύτητα 130km/h με χρήση μόνο του ηλεκτρικού κινητήρα.

Η απολύτως γραμμική απόδοση του ηλεκτροκινητήρα και οι γρήγορες αλλαγές του DSG κάνουν πραγματικά αδιάκοπη την παροχή ισχύος.



Σχήμα 3.7:Audi A3 e-tron

### 3.8 Toyota Yaris hybrid

Το Yaris Hybrid εφοδιάζεται με ένα βενζινοκινητήρα 1500 cc κύκλου Άτκινσον με μεταβλητό χρονισμό των βαλβίδων VVT-i βασισμένο στο δεύτερης γενιάς Prius αλλά πλήρως ανανεωμένο και έναν ηλεκτροκινητήρα. Όπως συμβαίνει σε όλα τα υπόλοιπα πλήρως υβριδικά μοντέλα της Toyota, η μπαταρία νικελίου μετάλλου υβριδίου που βρίσκεται κάτω από τα πίσω καθίσματα επαναφορτίζεται κατά το φρενάρισμα και την επιτάχυνση (χωρίς σύνδεση σε ηλεκτρική πρίζα) και υπό συνθήκες χαμηλών φορτίων μπορεί να διανύσει έως 2 χιλιόμετρα μόνο με την χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την επιτάχυνση και σε ήπιους ρυθμούς σε ταχύτητες έως 50 χλμ./ώρα, το Yaris HSD εκκινεί με την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και αυτόματα εμπλέκεται και το θερμικό μοτέρ με ομαλό τρόπο. Όταν το αυτοκίνητο ακινητοποιείται σταματά να λειτουργεί ο κινητήρας και έτσι επιτυγχάνεται

μεγάλη εξοικονόμηση βενζίνης στις αστικές συνθήκες κίνησης. Όσον αφορά την απόδοση, ο βενζινοκινητήρας έχει ισχύ 74 ίππων και 111 Α ροπής και το ηλεκτρικό μοτέρ φτάνει τους 60 ίππους και 169 Α ροπής (συνδυαστική ισχύς 100 ίππων).



Σχήμα 3.8: Toyotayarishybrid 2012

## Κεφάλαιο 4

# ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Ως ηλεκτρική μηχανή ορίζεται η κάθε συσκευή που πραγματοποιεί ηλεκτρομηχανική μετατροπή δηλαδή μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντιστρόφως. Αποτελεί την κύρια πηγή κίνηση του ΗΥ( Ηλεκτρικού-Υβριδικού) οχήματος καθώς αναλαμβάνει να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ροπή στρέψης στους τροχούς. Η ηλεκτρική μηχανή είναι η καρδιά ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης.

Σε οποιαδήποτε στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή υφίστανται ταυτόχρονα δύο μηχανισμοί, ο μηχανισμός παραγωγής ροπής και ο μηχανισμός παραγωγής τάσης, χάρη στη δράση και στην αλληλεπίδραση των οποίων βασίζεται το όλο φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας. Ο μηχανισμός παραγωγής της ροπής, βασίζεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης των δύο μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Υπάρχουν και ειδικές κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων, όπως οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης (reluctance motors) και οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors), στους οποίους η παραγωγή της ροπής οφείλεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης του σιδηρομαγνητικού υλικού του δρομέα με το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Στις περισσότερες των περιπτώσεων λοιπόν, τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται μέσα από κατάλληλα διαμορφωμένα τυλίγματα, στο στάτη και στο δρομέα της στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής. Η παραγωγή της τάσης σε ένα τύλιγμα, σχετίζεται άμεσα με τη χρονική μεταβολή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής που δέχεται το ίδιο το τύλιγμα. Στις περιπτώσεις των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες και αποτελούν τις βασικές συνιστώσες των συστημάτων μετατροπής της ενέργειας, η χρονική μεταβολή αυτή της πεπλεγμένης ροής σε ένα τύλιγμα, σχετίζεται πάντα με τη μηχανική κίνηση. Για το λόγο αυτό και οι επαγόμενες με αυτό τον τρόπο τάσεις, χαρακτηρίζονται ως τάσεις ταχύτητας. Η χρονική μεταβολή της πεπλεγμένης ροής, μπορεί να προέλθει είτε από την περιστροφή του τυλίγματος σε χώρο σταθερού μαγνητικού πεδίου, είτε δια της περιστροφής ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου σε σχέση με το μαγνητικό άξονα του σταθερού τυλίγματος.

Ανεξάρτητα από το είδος λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής (κινητήρας ή γεννήτρια), οι μηχανισμοί παραγωγής τάσης και ροπής οι οποίοι συνυπάρχουν και χάρη στη



συνύπαρξη αυτή καθίσταται δυνατή η ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας, απαιτούν τη χρήση τουλάχιστον δύο βασικών τυλιγμάτων, από τα οποία το ένα είναι τοποθετημένο στο στάτη και το άλλο στο δρομέα. Το ένα από τα δύο αυτά βασικά τυλίγματα, έχει ως σκοπό την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό (διάκενο) της μηχανής και χαρακτηρίζεται ως τύλιγμα διέγερσης (field winding), καθότι όπως προαναφέραμε το μαγνητικό πεδίο αποτελεί το μέσον για τη σύζευξη μεταξύ του ηλεκτρικού και του μηχανικού συστήματος. Το τύλιγμα διέγερσης είναι συνήθως τύλιγμα χαμηλής ισχύος, σε σχέση πάντα με τη συνολική ηλεκτρική ισχύ της μηχανής. Σε πολλές ηλεκτρικές μηχανές συνήθως μικρής ισχύος, το τύλιγμα διέγερσης υποκαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες. Το δεύτερο τύλιγμα, το οποίο στρέφεται σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το τύλιγμα διέγερσης και στο οποίο υπάγονται τάσεις και ροπές, είναι γνωστό ως τύλιγμα τυμπάνου. Το τύλιγμα τυμπάνου (armature winding) είναι τύλιγμα ισχύος και έχει ουσιαστικό ρόλο στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας. Ανάλογα του είδους της ηλεκτρικής μηχανής, το τύλιγμα τυμπάνου μπορεί να βρίσκεται στο στάτη ή στο δρομέα.

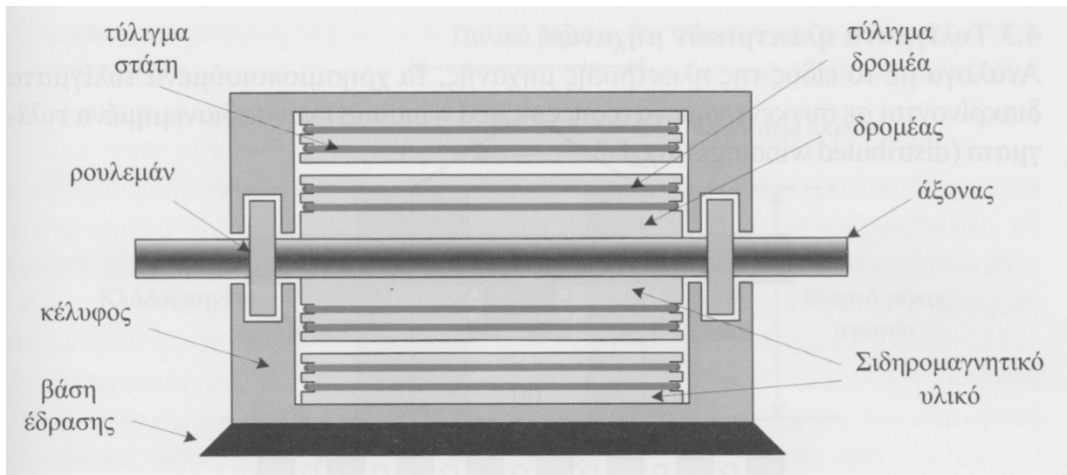
#### **4.1.1 Βασικά μέρη ηλεκτρικών μηχανών**

Το ότι σε κάθε ηλεκτρική μηχανή έχουμε κίνηση αγωγών εντός μαγνητικού πεδίου σημαίνει ότι, κάθε μηχανή αποτελείται από ένα σταθερό και ένα κινητό μέρος. Τα βασικά μέρη μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι:

- α. Σταθερό μέρος (πυρήνας στάτη και τύλιγμα)
- β. Στρεφόμενο μέρος (πυρήνας δρομέα και τύλιγμα)
- γ. Διάκενο αέρα, απαραίτητο για τη σχετική κίνηση στάτη και δρομέα

Για την ελάττωση της μαγνητικής αντίστασης των δρόμων της ροής, οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά, είτε συμπαγή είτε υπό μορφή ελασμάτων. Παλλόμενες ροές, απαιτούν τη χρήση ελασμάτων μονωμένων μεταξύ τους, για την ελάττωση των απωλειών από τα δινορρέυματα. Οι εξωτερικές συνδέσεις των τυλιγμάτων του δρομέα γίνονται ανάλογα με το είδος της μηχανής, μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων.

Τα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα, παράγονται από κατάλληλα τοποθετημένα τυλίγματα συγκεντρωμένα ή διανεμημένα. Ο αριθμός των πόλων των τυλιγμάτων είναι πάντα άρτιος. Επίσης για καθαρά λειτουργικούς λόγους, ο αριθμός των πόλων των τυλιγμάτων στάτη πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων των τυλιγμάτων του δρομέα.



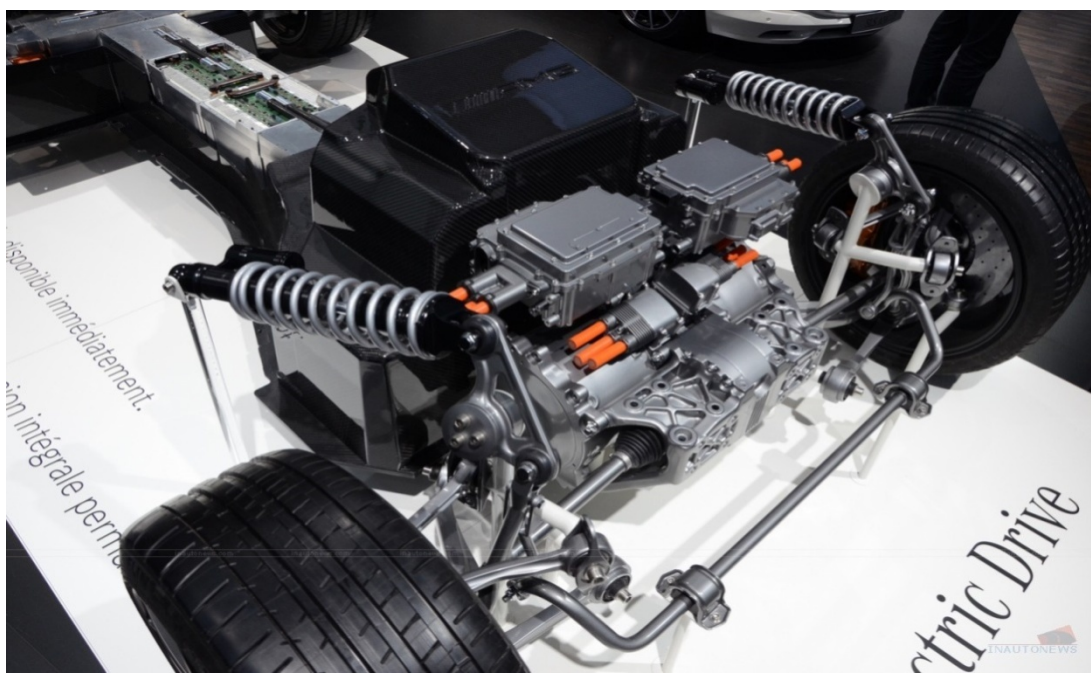
Σχήμα 4.1: Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή

Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών, οι βασικές κατηγορίες ταξινόμησης τους είναι στις ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) και στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος (Ε.Ρ.). Ανάλογα με τον αριθμό και τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων διέγερσης, οι μηχανές Σ.Ρ. χαρακτηρίζονται ως ξένης διέγερσης, παράλληλης διέγερσης, διέγερσης σειράς και σύνθετης διέγερσης. Οι μηχανές Σ.Ρ. προσφέρονται για έλεγχο της τάσης και της ροπής, ανάλογα αν λειτουργούν ως γεννήτριες ή κινητήρες (με σημαντικό πλεονέκτημα την καθετότητα των πεδίων διέγερσης και τυμπάνου).

Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος για τον έλεγχο των μηχανών Ε.Ρ., η χρήση τους ολοένα και περιορίζεται. Οι βασικές κατηγορίες των στρεφόμενων μηχανών Ε.Ρ. είναι, οι ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής (induction machines) και οι σύγχρονες μηχανές (synchronous machines). Λόγω της στιβαρότητας της κατασκευής, οι ασύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται κατά κόρο ως ηλεκτρικοί κινητήρες, καλύπτοντας σχεδόν το σύνολο των βιομηχανικών εφαρμογών. Αντίθετα με τις ασύγχρονες, οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον ως γεννήτριες.

Λαμβάνοντας υπόψη κανείς την ανάπτυξη των ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων κατά την τελευταία δεκαετία, μπορεί κανείς να δει ότι εφαρμόστηκαν διάφορα είδη μηχανών όπως κινητήρας συνεχούς ρεύματος, κινητήρας επαγωγής, σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη και κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης. Η εφαρμογή όλων αυτών των τύπων μηχανών υποδηλώνει ότι υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατά την εφαρμογή τους σε ηλεκτρικά-υβριδικά οχήματα.

Για την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα μας ενδιαφέρει η υψηλή ροπή σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας, η ελεγχσιμότητα, η αξιοπιστία του καθώς και να έχει μικρό βάρος και όγκο και παράλληλα να έχει ένα μικρό κόστος αγοράς και συντήρησης.

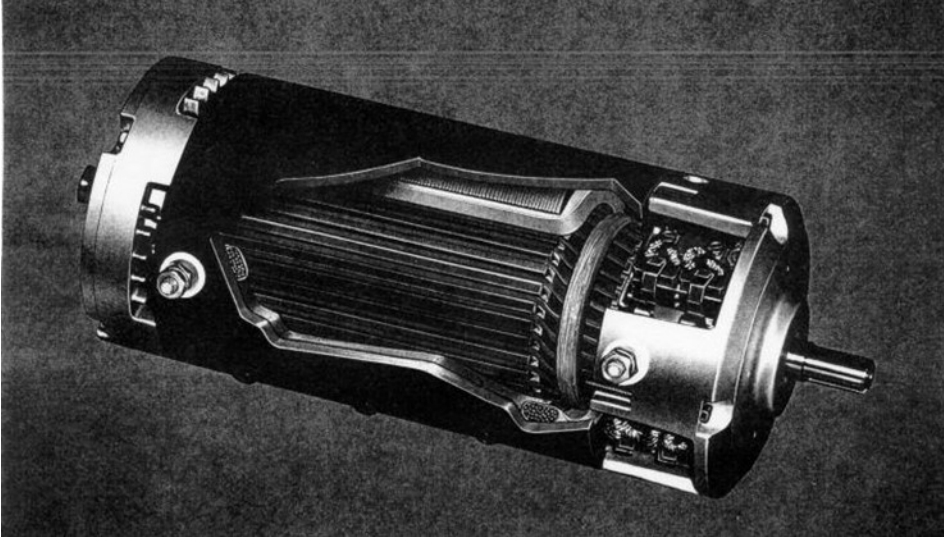


Σχήμα 4.2: Ηλεκτροκίνητες SLS AMG Electric drive

#### 4.2 Μηχανές συνεχούς ρεύματος (DC)

Υπάρχουν μερικοί λόγοι που κάνουν αρκετά δημοφιλείς στις μέρες μας τις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Ένας από αυτούς είναι το γεγονός ότι τα συστήματα συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται ακόμα σε κάποιες εφαρμογές στα επιβατικά αυτοκίνητα, στα φορτηγά και στα αεροπλάνα. Όταν ένα όχημα διαθέτει κάποιο σύστημα ισχύος που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα, προφανώς θα χρησιμοποιεί κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες αυτοί εμφανίζονται επίσης πολύ συχνά σε εφαρμογές όπου απαιτούνται μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής. Σε τέτοιες εφαρμογές έλεγχου της ταχύτητας οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι πραγματικά αξεπέραστοι. Ακόμη κι όταν δεν είναι διαθέσιμη μια πηγή συνεχούς ρεύματος, συνήθως χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί ανορθωτές ή κυκλώματα chopper για την παραγωγή της απαιτούμενης συνεχούς τάσης ενώ οι κινητήρες dc χρησιμοποιούνται για την παροχή του επιθυμητού ελέγχου της ταχύτητας.

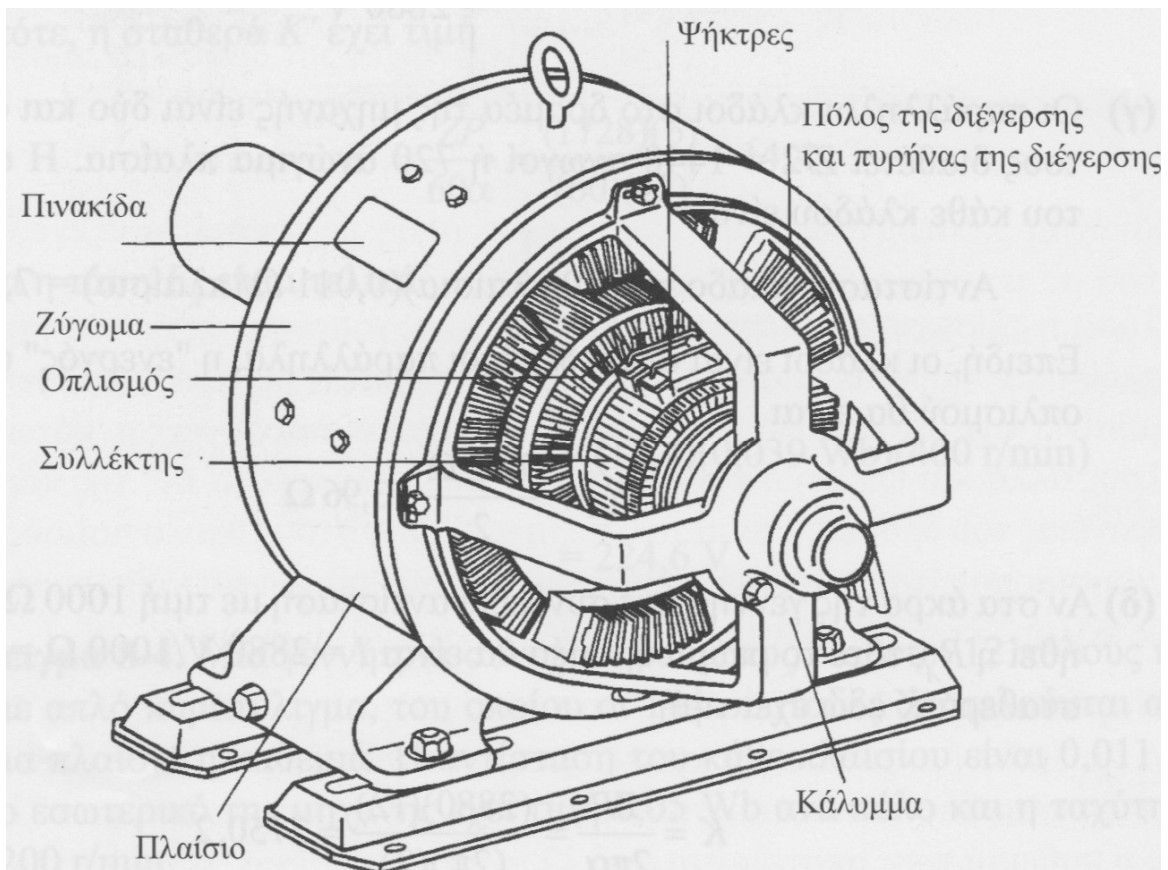
Στις μέρες μας, οι επαγωγικοί κινητήρες με ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης είναι η επιλογή που προτιμάται σε σύγκριση με τους κινητήρες dc για τις περισσότερες εφαρμογές. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη ορισμένες εφαρμογές στις οποίες προτιμώνται οι κινητήρες dc.



Σχήμα 4.3: Τομή Κινητήρα συνεχούς ρεύματος

#### 4.2.1 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Κατασκευαστικά η μηχανή αποτελείται από δυο μέρη: το στάτη, που είναι το ακίνητο μέρος της, και το δρομέα, δηλαδή, το περιστρεφόμενο τμήμα. Το ακίνητο μέρος περιλαμβάνει το πλαίσιο - σασί (frame) πάνω στο οποίο στηρίζεται η μηχανή και τους πόλους που τοποθετούνται στο εσωτερικό του πλαισίου και παράγουν το μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Τα άκρα των πόλων προς το μέρος του δρομέα απλώνονται πάνω από την επιφάνειά του και διανέμουν ομοιόμορφα τη μαγνητική ροή σ' όλο το πλάτος αυτής της επιφάνειας. Τα άκρα των πόλων ονομάζονται πέλματα (ή πέδιλα ή μάγουλα) (pole shoes) των πόλων. Η επιφάνεια του πέλματος ονομάζεται επιφάνεια του πόλου (pole face) και η απόσταση μεταξύ πέλματος και δρομέα ονομάζεται διάκενο (air gap).



Σχήμα 4.4: Σκαρίφημα μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.

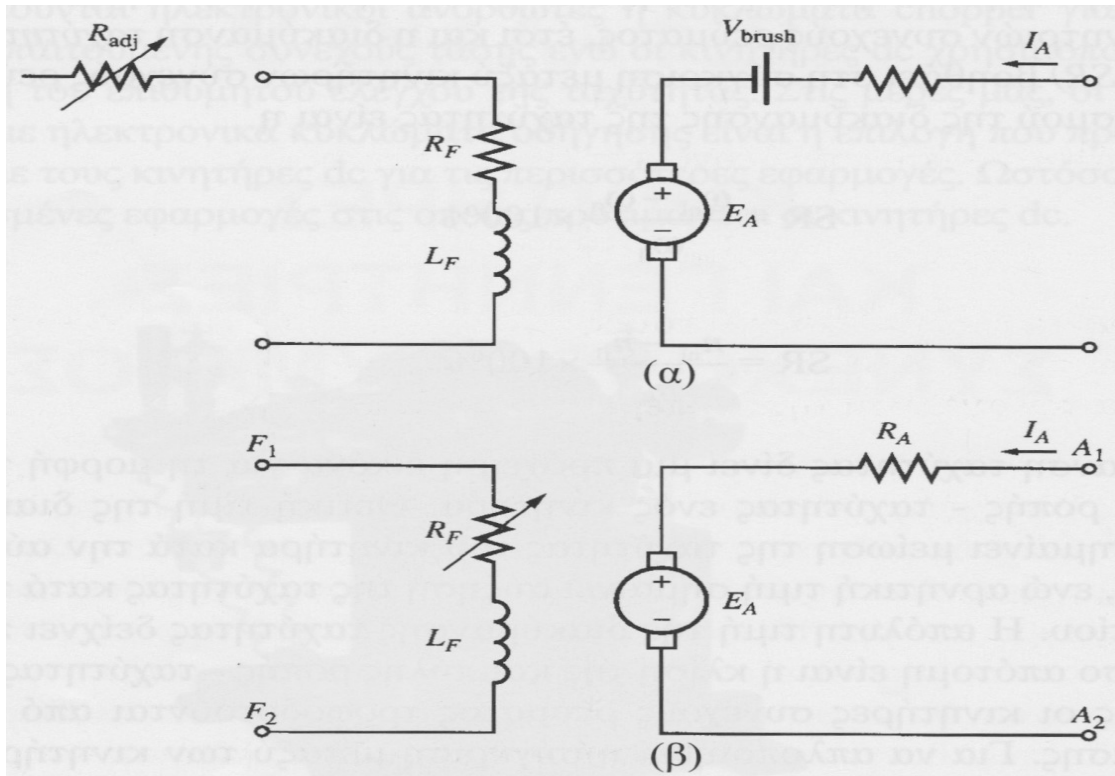
#### 4.2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος φαίνεται στο Σχήμα 4,5. Το κύκλωμα οπλισμού παριστάνεται με μια ιδανική πηγή τάσης  $E_A$  και με μια αντίσταση  $R_A$ . Στην ουσία πρόκειται για το ισοδύναμο Thevenin της συνολικής δομής του δρομέα, που περιλαμβάνει τους αγωγούς του δρομέα, τους βοηθητικούς πόλους και το τύλιγμα αντιστάθμισης, αν υπάρχει. Η πτώση τάσης  $Y_\psi$  στις ψήκτρες παρουσιάζεται με μια μικρή πηγή συνεχούς τάσης που έχει πολικότητα αντίθετη προς το ρεύμα του δρομέα της μηχανής. Τα τυλίγματα της διέγερσης, που παράγουν την κύρια μαγνητική ροή του κινητήρα παρουσιάζονται με την αυτεπαγωγή  $L_F$  και την αντίσταση  $R_F$ . Η αντίσταση  $R_{adj}$  παρουσιάζει την εξωτερική μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ποσότητας του ρεύματος της διέγερσης.

Σ' αυτό το κύκλωμα μπορούν να γίνουν κάποιες απλοποιήσεις. Η πτώση τάσης στις ψήκτρες είναι ένα πολύ μικρό κλάσμα της παραγόμενης τάσης στα άκρα του κινητήρα. Έτσι,

σε περιπτώσεις που δεν είναι σημαντική, μπορεί να παραλειφθεί ή να περιληφθεί προσεγγιστικά στην τιμή της  $R_A$ . Η εσωτερική αντίσταση των αγωγών διέγερσης μπορεί επίσης να συμπεριληφθεί στην τιμή της μεταβλητής αντίστασης οπότε η συνολική τιμή των δύο αντιστάσεων συμβολίζεται με  $R_F$  (βλ. Σχήμα 9-2β). Μια ακόμη παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος περιλαμβάνει όλους τους αγωγούς διέγερσης του κινητήρα.



Σχήμα 4.5 (α) Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, (β) Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα. Εδώ η πτώση τάσης στις ψήκτρες δε λαμβάνεται υπόψη και η  $R_{adj}$  υπολογίζεται μαζί με την αντίσταση διέγερσης.

Η τάση εξεπαγωγής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής δίνεται από την εξίσωση:

$$E_A = K\Phi\omega$$

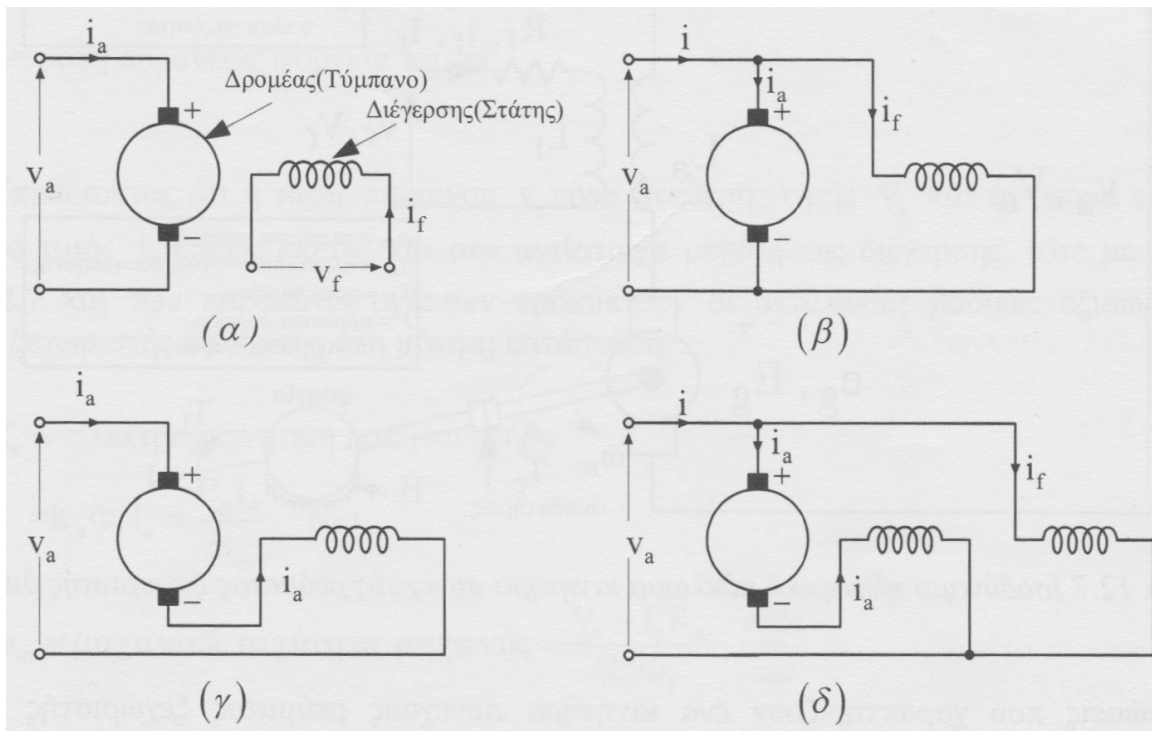
Ενώ η παραγόμενη ροπή στον άξονα της δίνεται από την εξίσωση:

$$\tau_{ind} = K\Phi I_A$$

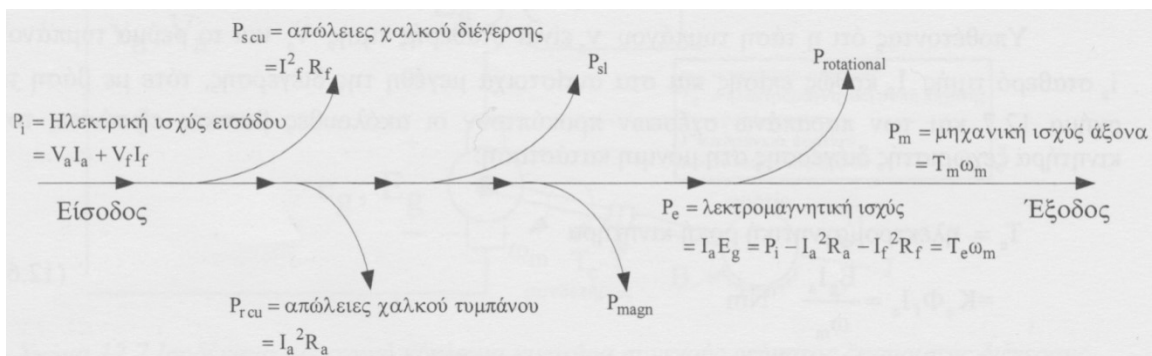
Προφανώς οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Για να απλοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ των κινητήρων συνεχούς ρεύματος διαφορετικού τύπου και για να γίνει ευκολότερη η ανάλυσή τους, η τάση εισόδου ενός κινητήρα θεωρείται σταθερή, εκτός κι αν σημειώνεται το αντίθετο.

Πέντε είναι οι βασικές κατηγορίες κινητήρων συνεχούς ρεύματος:

- 1.Κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης (separately excited dc motor)
- 2.Κινητήρας συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης (shunt dc motor)
- 3.Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη (permanent-magnet dc motor)
- 4.Κινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς (series dc motor)
- 5.Κινητήρας συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης (compounded dc motor)



Σχήμα 4.6 :Κατηγορίες μηχανών συνεχούς ρεύματος. Σχήμα α:Κινητήρες ξεχωριστής διέγερσης. Σχήμα β: Κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Σχήμα γ: Κινητήρες διέγερσης σειράς. Σχήμα δ: Κινητήρες σύνθετης διέγερσης



Σχήμα 4.7: Ροή ισχύος και απώλειες ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Οι dc κινητήρες έχουν αποτελέσει αντικείμενο ενδιαφέροντος από τα πρώτα χρόνια πειραματισμού του ηλεκτρικού οχήματος λόγω του απλού ελέγχου στροφών και της

αποσύνδεσης μεταξύ ροής και ροπής. Ωστόσο τα dc μοτέρ έχουν μια ογκώδη κατασκευή, χαμηλή απόδοση, χαμηλή αξιοπιστία, και ακόμα χρειάζονται συντήρηση, κυρίως λόγω της παρουσίας του μηχανικού συλλέκτη, ακόμη και αν έχει σημειωθεί πρόοδος με τις ολισθηρέςεπαφές. Επιπλέον, η ανάπτυξη της τραχιάς-στερεάς κατάστασης ημιαγωγών ισχύος γίνεται όλο και πιο πρακτική για την εισαγωγή του 3φ κινητήρα επαγωγής και του 3φ σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη που είναι πια ώριμες πλέον για να αντικαταστήσει τη μονάδα του dc κινητήρα σε εφαρμογές κίνησης. Στην πραγματικότητα, οι κινητήρες που δεν χρειάζονται συλλέκτες είναι ελκυστικοί διότι έχουν υψηλή αξιοπιστία και λειτουργία χωρίς απαιτήσεις συντήρησης που είναι πρωταρχικοί παράγοντες για την ηλεκτροκίνηση. Παρ'όλα αυτά, με βάση το κόστος του μετατροπέα, οι μονάδες α χρησιμοποιούνται γενικά για ανάγκες μεγάλης ισχύος. Σε χαμηλές τιμές ονομαστικής ισχύος, ο dc κινητήρας είναι κάτι περισσότερο από ό, τι μια εναλλακτική λύση. Βελτίωση των υφιστάμενων αυτοκινήτων («αναδιαμόρφωση»), χωρίς να αλλάξει το μηχανικό τμήμα μπορεί να επιτευχθεί με τα νέα ηλεκτρονικά dc συστήματα ισχύος. Ως εκ τούτου, το κύκλωμα ηλεκτρονικής ισχύος μπορεί να διατηρείται σχετικά απλό και έτσι έχει χαμηλό κόστος.

#### 4.2.3 Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι μηχανές συνεχούς ρεύματος που εργάζονται ως γεννήτριες. Όπως έχει σημειωθεί στα προηγούμενα, δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των γεννητριών και των κινητήρων συνεχούς ρεύματος παρά μόνο στην κατεύθυνση ροής της ισχύος τους. Πέντε είναι οι κύριες κατηγορίες γεννητριών συνεχούς ρεύματος και ο χωρισμός τους έχει γίνει με βάση τον τρόπο παραγωγής του κύριου μαγνητικού πεδίου τους:

Γεννήτριες ανεξάρτητης διέγερσης (separately excited).

Σ' αυτού του τύπου τις γεννήτριες το κύκλωμα που παράγει το κύριο πεδίο (κύκλωμα διέγερσης) τροφοδοτείται από μια ξεχωριστή πηγή, ανεξάρτητη από τη γεννήτρια.

Γεννήτριες παράλληλης διέγερσης (shunt).

Σ' αυτές το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από την ίδια τη γεννήτρια, καθώς συνδέεται παράλληλα με τους ακροδέκτες της.

Γεννήτριες διέγερσης σειράς (series).

Σ' αυτές το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται πάλι από την ίδια τη γεννήτρια, καθώς συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του οπλισμού της γεννήτριας.

Γεννήτριες με αθροιστική σύνθετη διέγερση (cumulatively compounded).



Σ' αυτές τις γεννήτριες υφίστανται τόσο η παράλληλη διέγερση όσο και η διέγερση σειράς, ενώ τα αποτελέσματα των δυο διεγέρσεων προστίθενται.

Γεννήτριες με διαφορική σύνθετη διέγερση (differentially compounded).

Και σ' αυτές τις γεννήτριες συνυπάρχουν μια διέγερση σειράς και μια παράλληλη διέγερση των οποίων τα αποτελέσματα αφαιρούνται μεταξύ τους.

Οι χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος των παραπάνω γεννητριών διαφέρουν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να είναι διαφορετικές οι εφαρμογές της κάθε κατηγορίας γεννητριών.

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος συγκρίνονται μεταξύ τους με βάση τις τάσεις στα άκρα τους, την ονομαστική ισχύ τους, την απόδοσή τους και τη διακύμανση της τάσης τους.

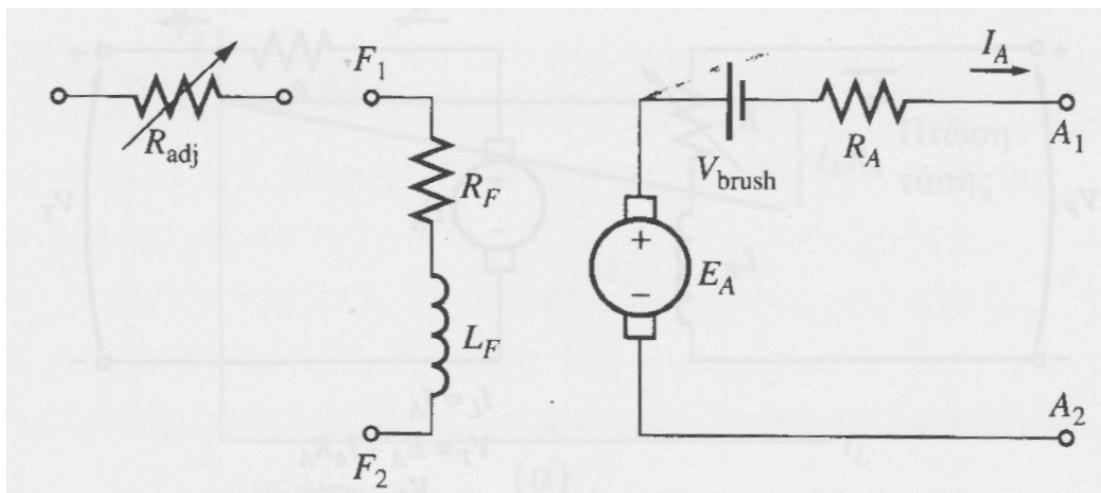
Η διακύμανση τάσης (voltage regulation- VR ) μιας γεννήτριας ορίζεται από τη σχέση

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100\%$$

Όπου  $V_{nl}$  και  $V_{fl}$  είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται στα άκρα της γεννήτριας κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο και κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο, αντίστοιχα. Η διακύμανση τάσης δίνει μια πρόχειρη εκτίμηση του σχήματος της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος μιας γεννήτριας. (Θετική διακύμανση τάσης σημαίνει φθίνουσα χαρακτηριστική, ενώ αρνητική διακύμανση τάσης σημαίνει αύξουσα χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της γεννήτριας).

Όλες οι γεννήτριες "οδηγούνται" από μια πηγή μηχανικής ενέργειας που συνήθως ονομάζεται κινητήρια μηχανή (prime motor) της γεννήτριας. Η κινητήρια μηχανή μιας γεννήτριας μπορεί να είναι ένας ατμοστρόβιλος, ένας νηξελοκινητήρας ή ακόμη και ένας ηλεκτροκινητήρας. Επειδή η κινητήρια μηχανή επηρεάζει την τάση εξόδου της μηχανής και υπάρχει πλήθος χαρακτηριστικών κίνησης της κινητήριας μηχανής, συνήθως γίνεται η υπόθεση ότι αυτή έχει σταθερή ταχύτητα, όταν χρειάζεται να συγκριθούν μεταξύ τους τα χαρακτηριστικά εξόδου διαφορετικών γεννητριών.

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά σπάνιες στα σύγχρονα συστήματα ισχύος. Ακόμα και τα συστήματα ισχύος συνεχούς ρεύματος, όπως εκείνα των αυτοκινήτων χρησιμοποιούν τώρα γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος μαζί με ανορθωτές για να δημιουργούν συνεχές ρεύμα.



Σχήμα 4.8: Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος.

## 4.3 Επαγωγικές μηχανές (IM)

### 4.3.1 Επαγωγικός κινητήρας

Σε αντίθεση με τις μηχανές Σ.Ρ. των οποίων τα τυλίγματα τροφοδοτούνται με συνεχείς τάσεις και τις σύγχρονες μηχανές οι οποίες διαθέτουν ένα τύλιγμα εναλλασσόμενης τάσης και ένα τύλιγμα συνεχούς τάσης, ο ασύγχρονος κινητήρας (asynchronous motor) αποτελείται από δύο τυλίγματα Ε.Ρ., ένα στο στάτη και ένα στο δρομέα. Το συγκεκριμένο είδος κινητήρα παράγει μη μηδενική μέση ροπή σε οποιαδήποτε ταχύτητα εκτός από τη σύγχρονη ταχύτητα και για το λόγο αυτό δικαιολογείται και η ονομασία του ως ασύγχρονου κινητήρα. Το τύλιγμα του στάτη, είναι γνωστό και ως τύλιγμα τυμπάνου. Κατασκευαστικά το τύλιγμα του στάτη, στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα αποτελείται από τρία όμοια διανεμημένα μονοφασικά τυλίγματα, μετατιθέμενα στο χώρο κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες. Ο αριθμός των πόλων των τυλιγμάτων αυτών, για δεδομένη συχνότητα τροφοδοσίας, καθορίζει τις ονομαστικές στροφές του κινητήρα. Ανάλογα δε με τις τάσεις τροφοδοσίας και τον τύπο του κινητήρα, τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται είτε σε αστέρα είτε σε τρίγωνο. Το τύλιγμα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένο και τροφοδοτείται με Ε.Ρ. έμμεσα από το στάτη λόγω επαγωγής, όπως ακριβώς και το δευτερεύον τύλιγμα στην περίπτωση των μετασχηματιστών. Για το λόγο αυτό, ο ασύγχρονος κινητήρας ονομάζεται και κινητήρας επαγωγής (induction motor).

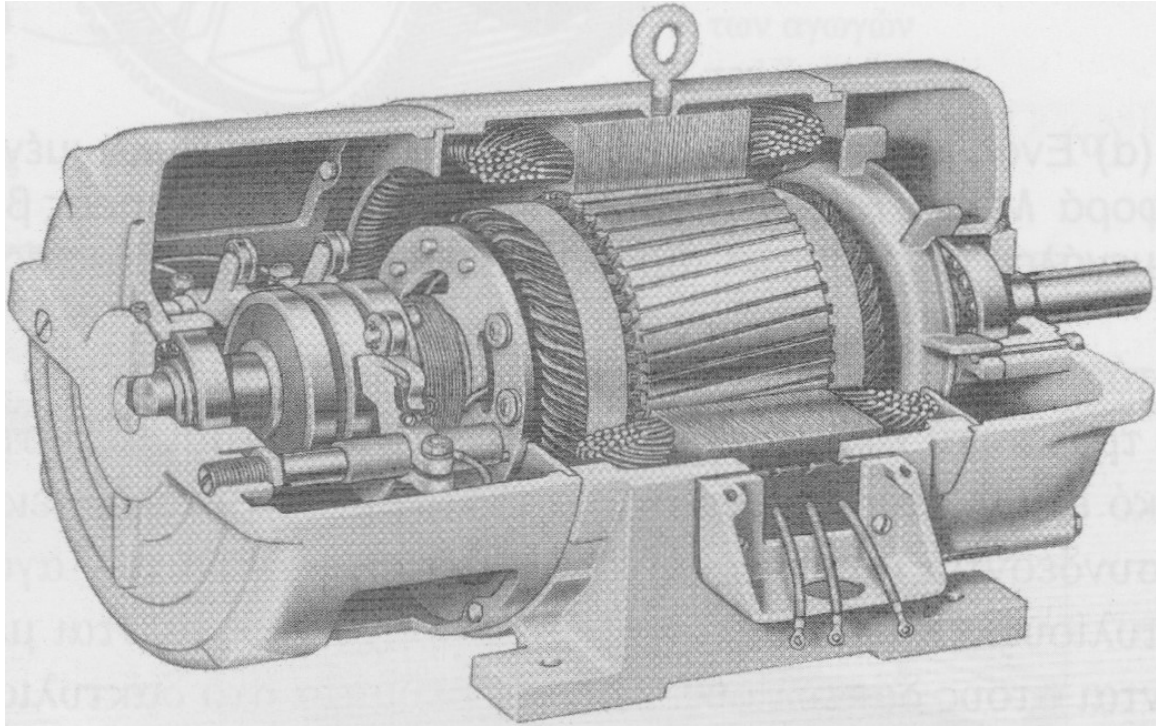
Μιας και για τη λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα, απαιτείται η τροφοδότηση με εναλλασσόμενη τάση μόνο του ενός από τα δύο τυλίγματα (και συγκεκριμένα του τυλίγματος του στάτη), ο ασύγχρονος κινητήρας χαρακτηρίζεται και σαν κινητήρας απλής τροφοδότησης (single-fed motor). Σε αντίθεση με το μετασχηματιστή, το ρεύμα διέγερσης που απαιτείται για τη δημιουργία της συνισταμένη μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής, είναι αρκετά μεγαλύτερο (της τάξης του 40% περίπου του ονομαστικού ρεύματος), λόγω της σημαντικά αυξημένης μαγνητικής αντίστασης που εισάγεται στο σιδηρομαγνητικό κύκλωμα από την ύπαρξη του διακένου. Μιας και ο ασύγχρονος κινητήρας όπως προαναφέραμε είναι κινητήρας απλής τροφοδότησης, το ρεύμα διέγερσης που απαιτείται για τη λειτουργία του, το απορροφά από το δίκτυο του Ε.Ρ.. Αυτό σημαίνει ότι, ο ασύγχρονος κινητήρας λειτουργεί πάντα με συντελεστή ισχύος μικρότερο από τη μονάδα, λόγω της απορρόφησης επαγωγικής άεργης ισχύος και για το λόγο αυτό στους κινητήρες μεσαίας και μεγάλης ισχύος, η χρήση τοπικών μονάδων αντιστάθμισης (με πυκνωτές) για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος είναι επιβεβλημένη.

Ως προς την κατασκευή του τυλίγματος του δρομέα, οι ασύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

Κινητήρες τυλιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι (wound rotor)

Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού (squirrel-cage rotor)

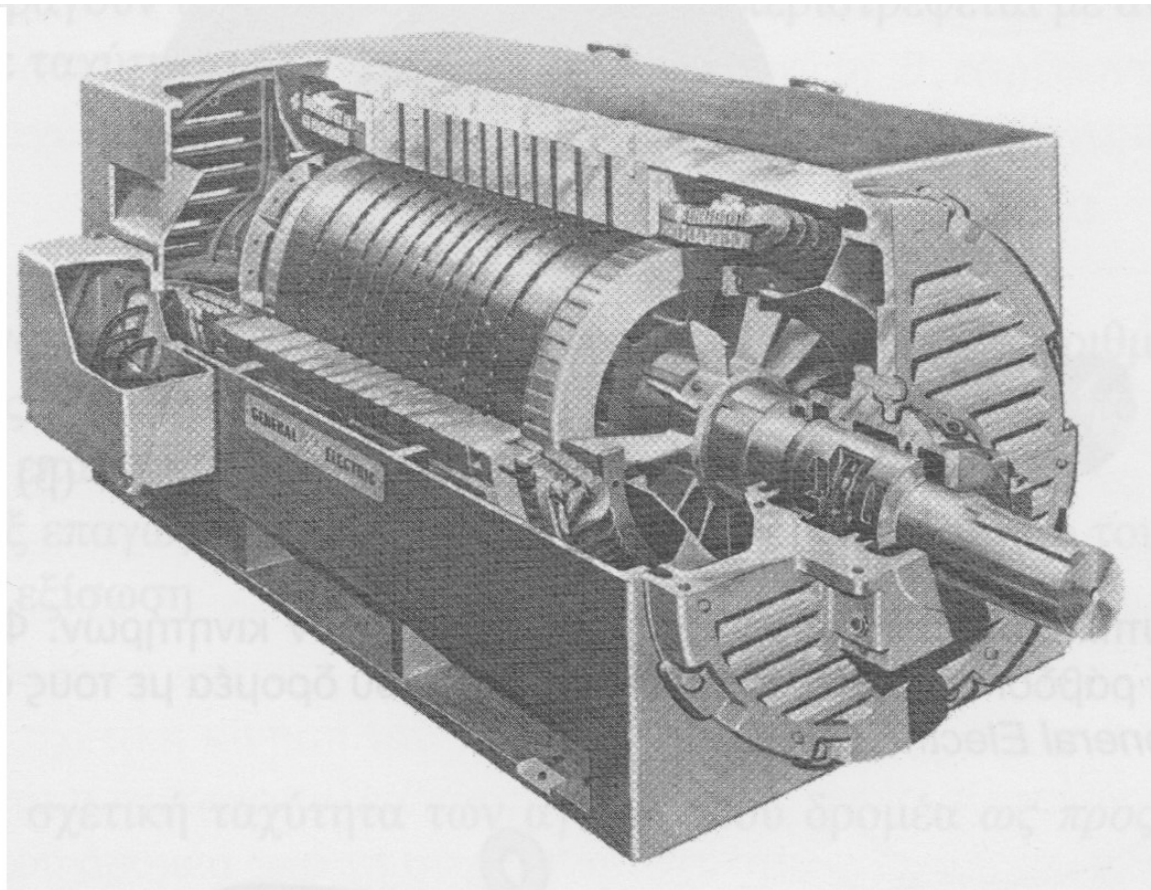
Το τύλιγμα των δακτυλιοφόρων κινητήρων, είναι και αυτό ένα διανεμημένο τριφασικό τύλιγμα, του ίδιου αριθμού πόλων με το τύλιγμα τυμπάνου του στάτη. Οι τρεις φάσεις ενός τέτοιου τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Οι αγωγοί του δρομέα βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίους. Έτσι τα ρεύματα στο δακτυλιοφόρο δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες και ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα της διέγερσης. Στους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, υπάρχει η δυνατότητα μέσω των ψηκτρών, παρεμβολής πρόσθετης εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά σε κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλες ισχύς και σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε ροπή εκκίνησης.



Σχήμα 4.9: Ένας επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα σε τομή. Εδώ, φαίνονται οι ψήκτρες και οι δακτύλιοι. Ακόμη, παρατηρείται το γεγονός ότι τα τύλιγματα στο δρομέα έχουν κάποια κλίση, ώστε να περιορίζονται οι αρμονικές εγκοπών.

Στους κινητήρες τύπου κλωβού, το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από χάλκινες ή αλουμιένιες μπάρες (ράβδοι), τοποθετημένες κατά μήκος των αυλακώσεων (κατά την έννοια της γενέτειρας) και οι οποίες βραχυκυκλώνονται περιμετρικά στα δύο άκρα μέσω κατάλληλων δακτυλίων. Ένα πλεονέκτημα του δρομέα τύπου κλωβού είναι ότι, ο ίδιος δρομέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε κινητήρα με μονοφασικό τύλιγμα στάτη, καθόσον ο αριθμός των επαγομένων πόλων καθορίζεται από το τύλιγμα του στάτη. Το τύλιγμα κλωβού μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα πολυφασικό τύλιγμα με αριθμό φάσεων ίσο με τον αριθμό των ράβδων του κλωβού, οι οποίες φάσεις μέσω του ενός από τους δύο δακτυλίους συνδέονται μεταξύ τους σε αστέρα και μέσω του άλλου δακτυλίου βραχυκυκλώνονται.

Αν και οι κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία για τον έλεγχο της ροπής και των στροφών, οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, λόγω χαμηλότερου κόστους, μικρότερου όγκου και στιβαρότερης κατασκευής, προτιμούνται περισσότερο στις συνηθισμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Σε περιπτώσεις που απαιτούνται υψηλές ροπές κατά την εκκίνηση, μπορεί να γίνει χρήση δρομέα διπλού κλωβού.



Σχήμα 4.10: Επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού σε τομή

Ο Επαγωγικός κινητήρας τύπου κλωβού είναι ευρέως αποδεκτός ως ο πιο πιθανός υποψήφιος προς την ηλεκτρική πρόωση ηλεκτρικών-υβριδικών οχημάτων, λόγω της αξιοπιστίας τους, της ανθεκτικότητας, του χαμηλού κόστους συντήρησης, του χαμηλού κόστους αγοράς, και της ικανότητας να λειτουργεί σε εχθρικά για κινητήρες περιβάλλοντα. Σήμερα, η ηλεκτρική κίνηση με επαγωγικούς κινητήρες είναι η πιο ώριμη τεχνολογία μεταξύ των κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος.

#### 4.3.1.1 Αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα

Απαραίτητη προϋπόθεση για να έχουμε μέση ροπή διάφορη από το μηδέν σε έναν κινητήρα είναι να μην υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ των δύο αλληλεπιδρώντων πεδίων στάτη και δρομέα. Αυτό σημαίνει ότι τα δύο πεδία είτε θα είναι ακίνητα στο χώρο (μηχανές Σ.Ρ.) είτε θα κινούνται με την ίδια ταχύτητα (μηχανές Ε.Ρ.). Το μέγεθος της παραγόμενης ροπής είναι ανάλογο του γινομένου των μεγεθών των δύο πεδίων, καθώς και της μεταξύ τους γωνίας.

Όταν λοιπόν τροφοδοτήσουμε το τύλιγμα του στάτη με ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων, δημιουργείται στο διάκενο της μηχανής ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ταχύτητα περιστροφής (και η γωνιακή συχνότητα) του πεδίου είναι συνάρτηση της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας και του αριθμού των πόλων του τυλίγματος στάτη.

Δηλαδή:

$$n_s = 120 \frac{f_1}{P}$$

$$\omega_s = 2\pi \frac{n_s}{60} = \frac{2}{P} 2\pi f_1 = \frac{2}{P} \omega_1$$

όπου:

$n_s$  = σύγχρονη ταχύτητα, (rpm),

$\omega_s$  = σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα, (mech.rad/s),

$\omega_1 = 2\pi f_1$  = ηλεκτρική κυκλική συχνότητα των τυλιγμάτων του στάτη, (rad/s),

P = αριθμός των πόλων της μηχανής

Η συμπεριφορά του ασύγχρονου κινητήρα, όταν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος ( $n_r = 0$ ), είναι όμοια με εκείνη ενός μετασχηματιστή (Μ/Σ), στο μαγνητικό κύκλωμα του οποίου παρεμβάλλεται και κάποιο διάκενο αέρος. Οι επαγόμενες τάσεις στο δρομέα, στην περίπτωση αυτή, έχουν την ίδια συχνότητα με την τάση τροφοδοσίας.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, οι επαγόμενες Α.Η.Ε.Δ. ανά φάση, των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα, δίνονται από τις σχέσεις

$$E_1 = 4.44 K_1 f_1 N_1 \Phi_\delta \quad (1)$$

$$E_2 = 4.44 K_2 f_1 N_2 \Phi_\delta \quad (2)$$

όπου:

$K_1, K_2$  = κατασκευαστικοί συντελεστές των τυλιγμάτων,

$N_1, N_2$  = συνολικοί αριθμοί σπειρών ανά φάση,

$\Phi_\delta$  = συνισταμένη ροή διακένου, (Wb).

Όταν λοιπόν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος, από τις (1) και (2) προκύπτει ότι

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη (ανάλογα με το μετασχηματιστή, Μ/Σ) αποτελείται από δύο συνιστώσες, τη συνιστώσα φορτίου και τη συνιστώσα του ρεύματος μαγνήτισης, η οποία είναι υπεύθυνη για την εγκατάσταση του πεδίου. Σε αντίθεση δε με το

M/Σ, που το ρεύμα μαγνήτισης είναι το 5-10% του ονομαστικού ρεύματος, στην ασύγχρονη μηχανή το αντίστοιχο ποσοστό είναι αρκετά μεγαλύτερο, της τάξης του 40-50%, λόγω της μαγνητικής αντίστασης του παρεμβαλλόμενου διάκενου.

Στην περίπτωση του ακινητοποιημένου δρομέα, τα δύο πεδία στάτη και δρομέα στρέφονται με την ίδια ταχύτητα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μη μηδενικής ροπής εκκίνησης.

Έστω τώρα ότι ο κινητήρας λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση, σε κάποιο συγκεκριμένο αριθμό στροφών  $n_r$ , ( $n_r < n_s$ ). Για κάποιον παρατηρητή στο δρομέα, το συνιστάμενο πεδίο διακένου φαίνεται να περιστρέφεται με ταχύτητα  $n_s - n_r$ . Ονομάζουμε ολίσθηση το λόγο της σχετικής ταχύτητας του πεδίου ως προς το δρομέα προς τη σύγχρονη ταχύτητα.

Δηλαδή,

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Συνηθισμένες τιμές της ολίσθησης για ονομαστική λειτουργία κινητήρων είναι από 2-5%

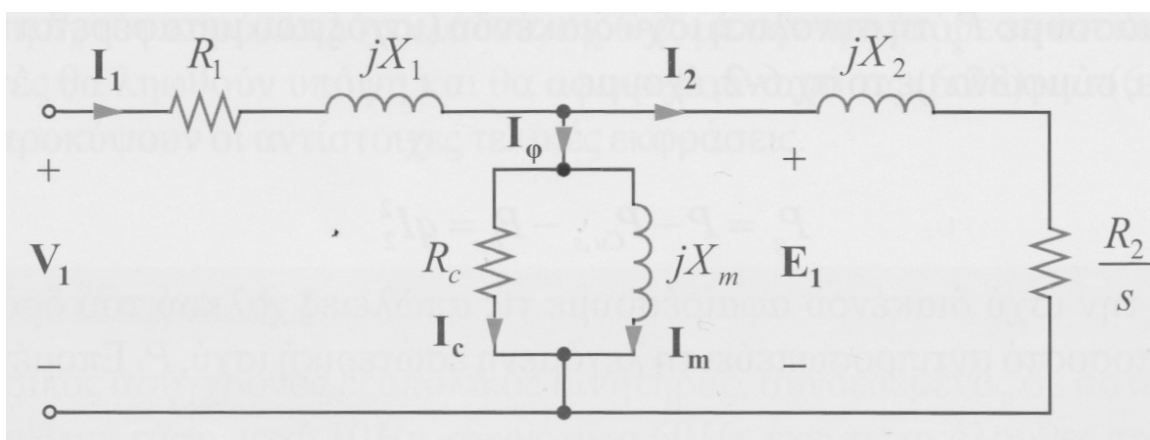
Η ροή διάκενου προκύπτει από το άθροισμα των δύο επιμέρους ροών των πεδίων στάτη και δρομέα.

Δηλαδή:

$$\Phi_\delta = \Phi_1 + \Phi_2 \text{όπου:}$$

$\Phi_1$  = ροή τυλίγματος στάτη, (Wb),

$\Phi_2$  = ροή τυλίγματος δρομέα, (Wb)



Σχήμα 4.11: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.

Από το νόμο του Kirchhoff για το τύλιγμα στάτη έχουμε την εξίσωση:

$$V_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_1$$

όπου:

$I_1$  = ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος στάτη, (A),

$R_1$  = ωμική αντίσταση τυλίγματος στάτη, ( $\Omega$ ),

$X_1 = 2\pi f_1 L_1$  = αντίδραση σκέδασης τυλίγματος στάτη, ( $\Omega$ ).

Εναλλακτικά γράφεται και ως εξής:

$$V_1 = (I_o + I_L)(R_1 + jX_1) + E_1$$

όπου:

$I_L$  = ρεύμα φορτίου (A) και

$$I_o = I_m + I_h$$

όπου:

$I_m$  = συνιστώσα του ρεύματος μαγνήτισης, (A),

$I_h$  = συνιστώσα απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων, (A).

Για το τύλιγμα του δρομέα έχουμε:

$$E_2 = \frac{E_{2s}}{s} = I_2 \left[ \frac{r_2}{s} + jx_2 \right]$$

Αναγωγή του τυλίγματος του δρομέα στο τύλιγμα του στάτη. Δηλαδή:

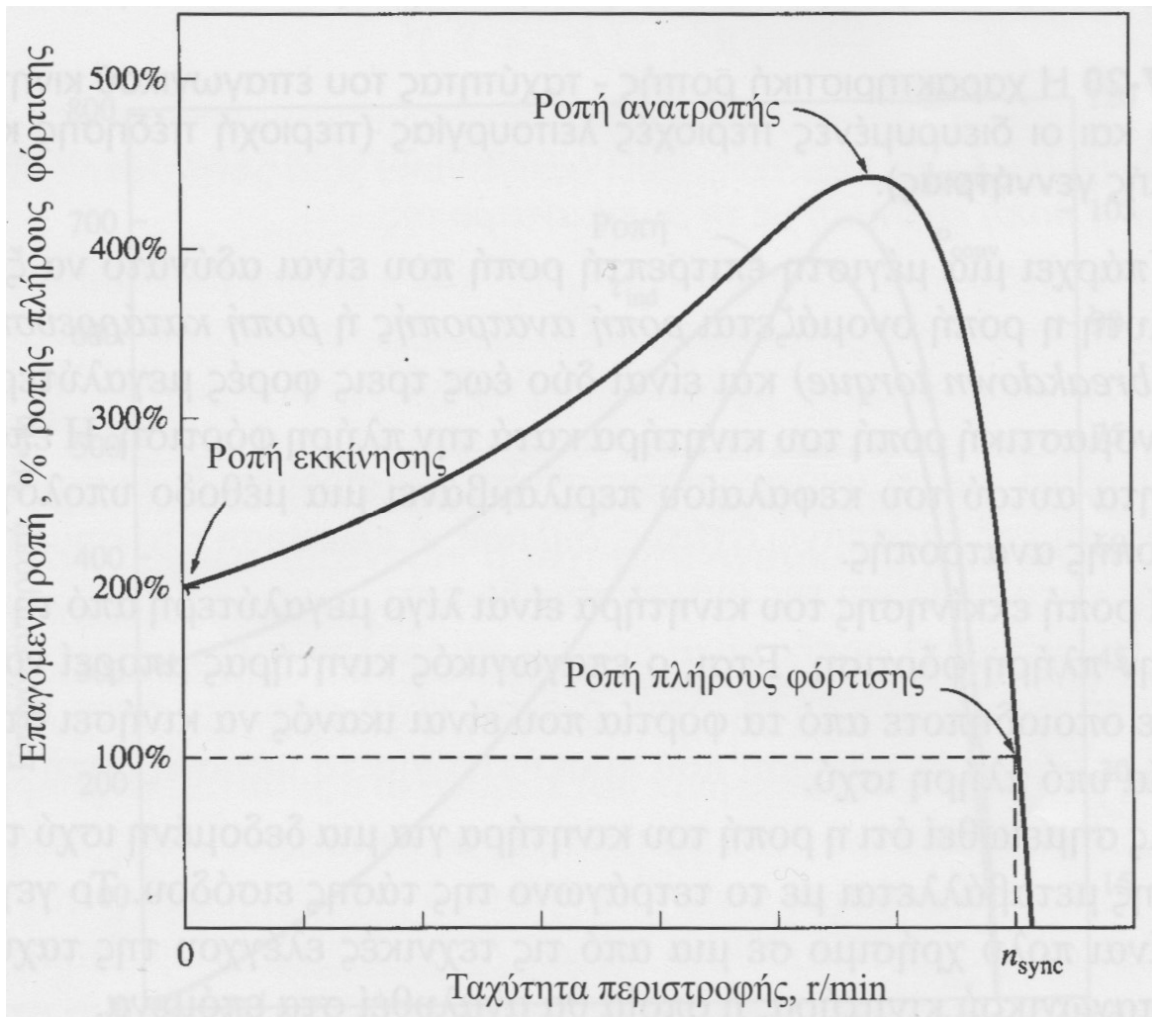
$$E_1 = \frac{K_1}{K_2} \frac{N_1}{N_2} E_2 = I_2 \left[ \frac{R_2}{s} + jX_2 \right]$$

#### 4.3.1.2 Καμπύλες Ροπής - Ταχύτητας των Επαγωγικών Κινητήρων

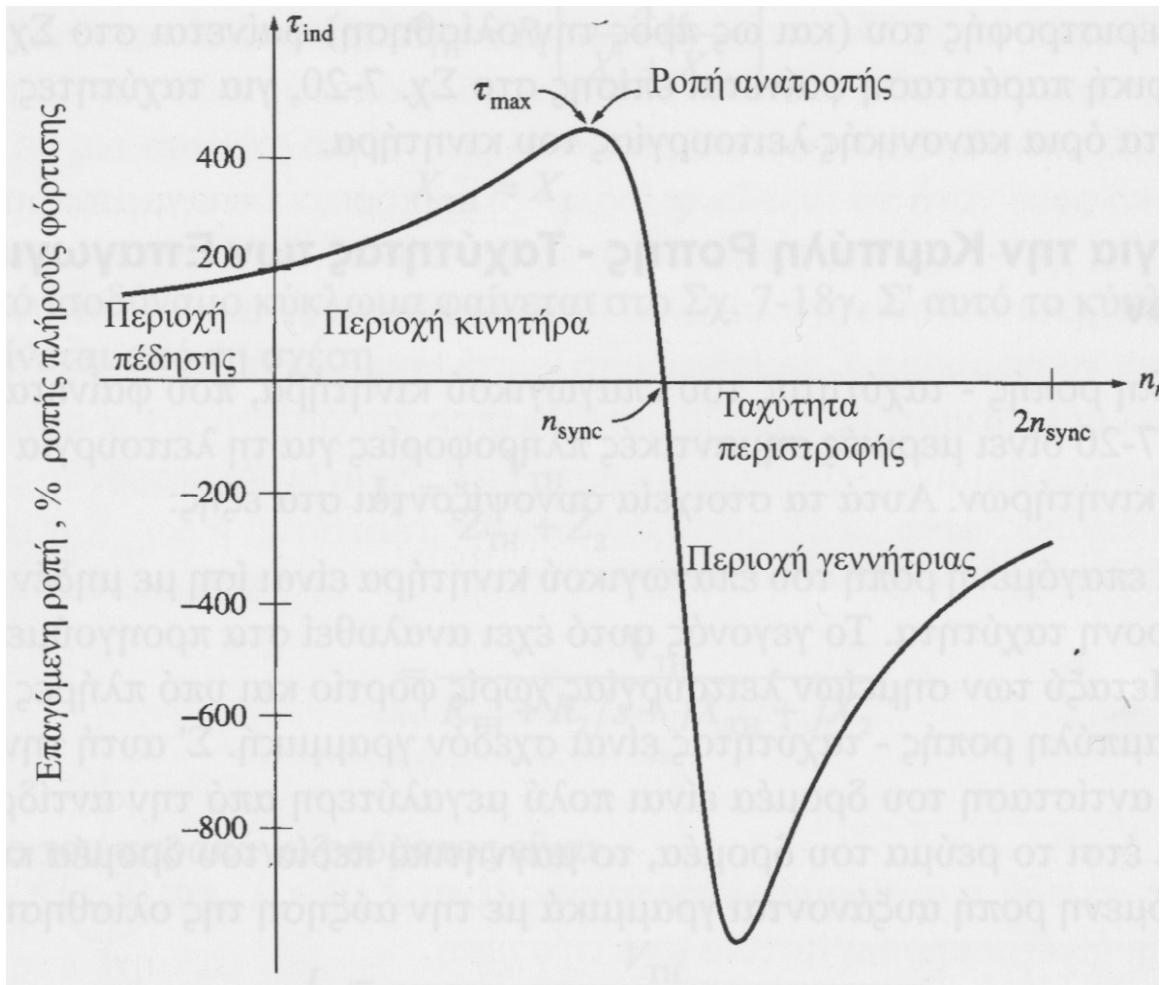
Η καμπύλη ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, που φαίνεται στο Σχ. 1 και 2 δίνει μερικές σημαντικές πληροφορίες για τη λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων. Αυτά τα στοιχεία συνοψίζονται στα εξής:

1. Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι ίση με μηδέν στη σύγχρονη ταχύτητα.
2. Μεταξύ των σημείων λειτουργίας χωρίς φορτίο και υπό πλήρες φορτίο η καμπύλη ροπής - ταχύτητας είναι σχεδόν γραμμική. Σ' αυτή την περιοχή η αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίδρασή του κι έτσι το ρεύμα του δρομέα, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα και η επαγόμενη ροπή αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της ολίσθησης.





Σχήμα 4.12: Η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.



Σχήμα 4.13: Η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου φαίνονται και οι διευρυμένες περιοχές λειτουργίας (περιοχή πέδησης και περιοχή επαγωγικής γεννήτριας).

3. Υπάρχει μια μέγιστη επιτρεπτή ροπή που είναι αδύνατο να ξεπεραστεί. Αυτή η ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής ή ροπή κατάρρευσης (pull out-breakdown torque) και είναι δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση.
4. Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι λίγο μεγαλύτερη από τη ροπή κατά την πλήρη φόρτιση. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.
5. Ας σημειωθεί ότι η ροπή του κινητήρα για μια δεδομένη ισχύ της ολίσθησης μεταβάλλεται με το τετράγωνο της τάσης εισόδου. Το γεγονός αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε μια από τις τεχνικές ελέγχου της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.
6. Αν ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από τη σύγχρονη ταχύτητα, η φορά περιστροφής της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται, με

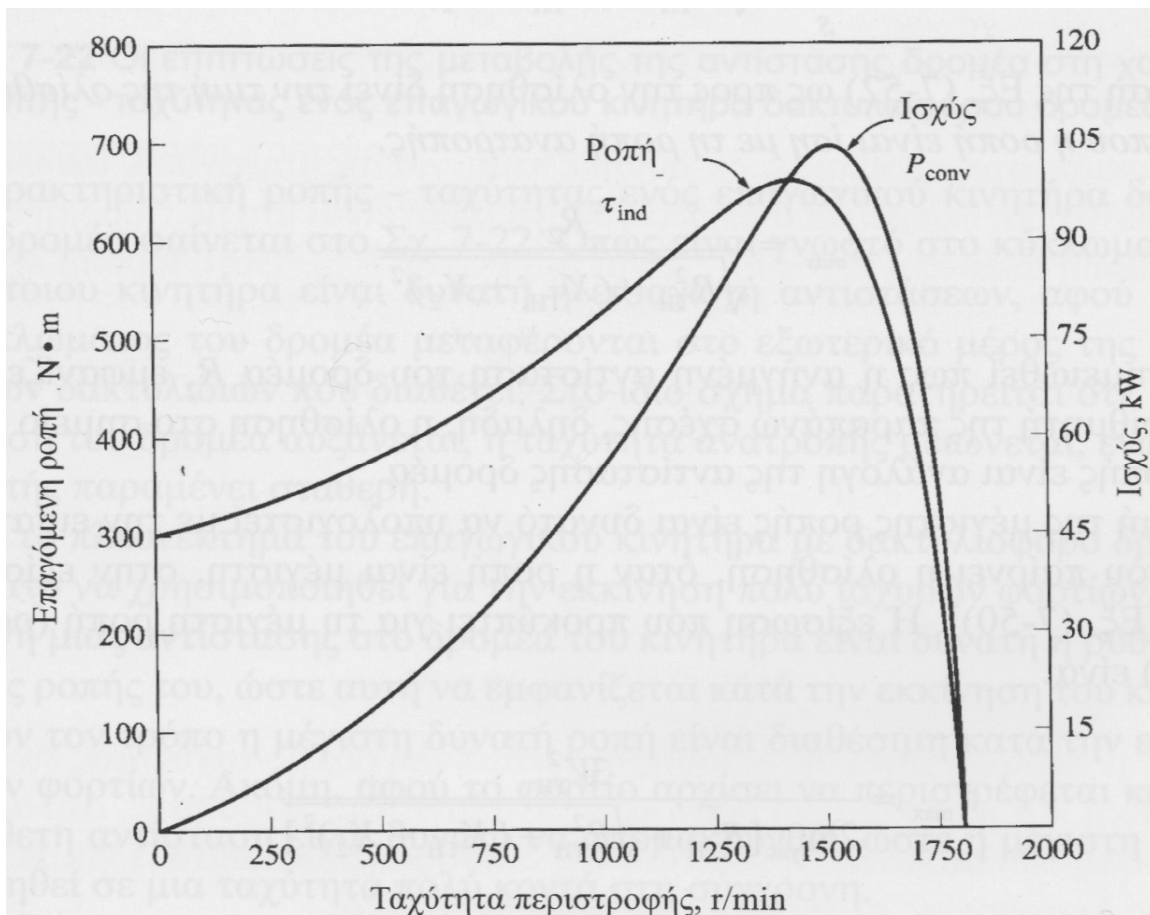
αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική.

7. Αν η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του, η επαγόμενη ροπή θα σταματήσει τον κινητήρα και θα προσπαθήσει να τον περιστρέφει προς την αντίθετη φορά. Όμως, επειδή η φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στον επαγωγικό κινητήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ απλά με την αντιμετάθεση των συνδέσεων σε δύο από τις τρεις φάσεις του, η παραπάνω παρατήρηση είναι δυνατό να χρησιμοποιείται με σκοπό το απότομο σταμάτημα του κινητήρα. Η αντιμετάθεση των συνδέσεων σε δύο από τις τρεις φάσεις του κινητήρα με σκοπό το απότομο σταμάτημα του κινητήρα ονομάζεται ακαριαία πέδηση (plugging).

Η ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική στον επαγωγικό κινητήρα είναι ίση με

$$P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \omega_m$$

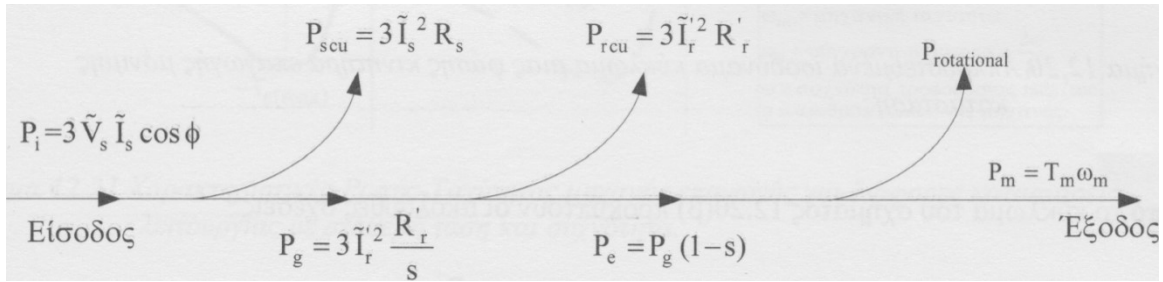
Ας σημειωθεί ότι, η μέγιστη τιμή της ισχύος που προσφέρει ο επαγωγικός κινητήρας εμφανίζεται σε διαφορετική ταχύτητα απ' ότι η μέγιστη ροπή. Επίσης, όπως είναι φυσικό, όταν η ταχύτητα του κινητήρα είναι μηδενική, δεν υφίσταται καμιά μετατροπή από ηλεκτρική σε μηχανική ισχύ.



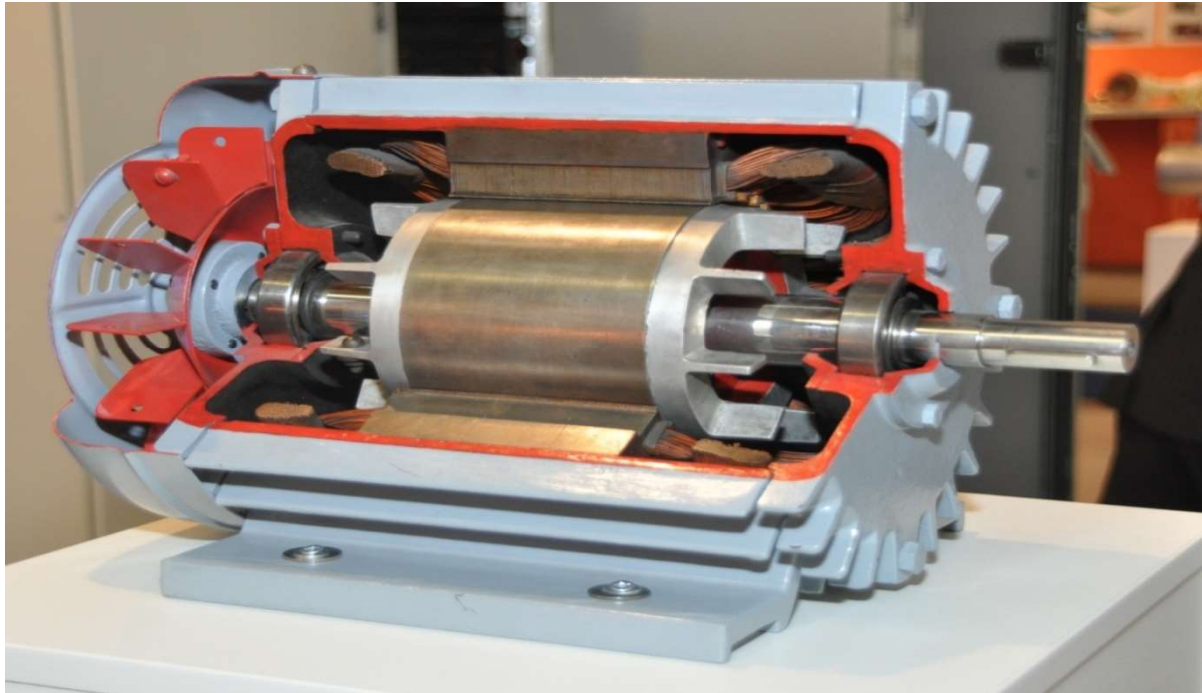
Σχήμα 4.14: Γραφική παράσταση της επαγόμενης ροπής και της μετατρεπόμενης ισχύος ως προς την ταχύτητα (σε r/min) ενός τετραπολικού επαγωγικού κινητήρα.

Η ροπή και ο έλεγχος του πεδίου μπορεί να ελεγχθεί με τις χρήση νέων μεθόδων ελέγχου όπως ο διανυσματικός. Το εύρος ταχύτητας μπορεί να επεκταθεί με τη χρήση εξασθένησης ροής στην σταθερή περιοχή ισχύος.

Οι κυρίαρχες απώλειες στις επαγωγικές μηχανές είναι οι απώλειες χαλκού. Λόγω του χαμηλότερου ρεύμα μαγνήτισης στο εύρος εξασθένησης πεδίου, οι απώλειες χαλκού μειώνονται και κατά συνέπεια ο επαγωγικός κινητήρας παρέχει ένα ευρύ φάσμα στροφών σε συνδυασμό με μια σχετικά καλή απόδοση σε υψηλές ταχύτητες. Το απαιτούμενο ρεύμα μαγνήτισης και οι απώλειες χαλκού στο δρομέα μειώνουν την αποδοτικότητα στην περιοχή της ονομαστικής ταχύτητας. Ένα μειονέκτημα είναι η θερμότητα στο δρομέα ως αποτέλεσμα των απωλειών, η οποία απαιτεί ψύξη. Ακόμα ένα διάκενο αέρα όσο το δυνατόν μικρότερο είναι απαραίτητο για την μείωση του ρεύματος μαγνήτισης, αλλά αυτό απαιτεί σφιχτές ανοχές κατά την κατασκευή και ως εκ τούτου αυξάνει το κόστος παραγωγής.



Σχήμα 4.15: Ροή ισχύος και απώλειες ενός ασύγχρονου κινητήρα επαγωγής



Σχήμα 4.16: Τομή επαγωγικού κινητήρα εμπορίου

### 4.3.2 Επαγωγική γεννήτρια

Όταν ένας επαγωγικός κινητήρας οδηγείται από μια κινητήρια μηχανή σε μια ταχύτητα μεγαλύτερη της  $n_{sync}$  φορά της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται και λειτουργεί ως γεννήτρια. Καθώς αυξάνεται η ροπή που εφαρμόζει η κινητήρια μηχανή στον άξονα της επαγωγικής μηχανής, αυξάνεται η ισχύς που παράγει η γεννήτρια. Υπάρχει κάποια μέγιστη επαγόμενη ροπή κατά τη λειτουργία της μηχανής, όταν αυτή εργάζεται ως γεννήτρια. Αυτή η ροπή ονομάζεται ροπή αναστροφής (push over torque) της γεννήτριας. Αν συμβεί η κινητήρια μηχανή να ασκεί στον άξονα της επαγωγικής γεννήτριας μια ροπή μεγαλύτερη από τη ροπή αναστροφής, η γεννήτρια θα επιταχυνθεί επικίνδυνα.

Όπως κάθε γεννήτρια, έτσι και η επαγωγική γεννήτρια παρουσιάζει κάποια όρια λειτουργίας. Επειδή στερείται ενός ξεχωριστού κυκλώματος διέγερσης, η επαγωγική γεννήτρια δεν μπορεί να παράγει άεργο ισχύ. Στην πραγματικότητα αυτή καταναλώνει άεργο ισχύ και γι' αυτό θα πρέπει να συνδέεται σε μια εξωτερική πηγή άεργης ισχύος, ώστε να διατηρείται το μαγνητικό πεδίο του στάτη της. Αυτή η πηγή άεργης ισχύος θα πρέπει επίσης να ρυθμίζει την τάση στα άκρα της γεννήτριας - επειδή δεν υφίσταται το ρεύμα διέγερσης, η επαγωγική γεννήτρια δεν είναι ικανή να ρυθμίζει μόνη της την τάση εξόδου της. Κάτω από κανονικές συνθήκες η τάση της γεννήτριας διατηρείται από το εξωτερικό σύστημα ισχύος στο οποίο είναι συνδεδεμένη.

Το μόνο σημαντικό πλεονέκτημα της επαγωγικής γεννήτριας είναι η απλότητά της. Με τέτοια γεννήτρια δε χρειάζεται ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης και δεν είναι απαραίτητο να κινείται συνεχώς σε μια σταθερή ταχύτητα. Σε όσο διάστημα η ταχύτητα της μηχανής έχει τιμή μεγαλύτερη από την για το σύστημα ισχύος στο οποίο συνδέεται, λειτουργεί ως γεννήτρια. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονά της (μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο), τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς εξόδου της. Το γεγονός ότι μια τέτοια γεννήτρια δεν απαιτεί κάποια περίπλοκη ρύθμιση, την αναδεικνύει σε καλή επιλογή για συνεργασία με ανεμόμυλους, για συστήματα ανάκτησης της θερμότητας και για άλλες παρόμοιες πηγές ισχύος που συνδέονται σε υπάρχοντα συστήματα. Σε τέτοιες εφαρμογές η διόρθωση του συντελεστή ισχύος μπορεί να πραγματοποιείται με πυκνωτές και η τάση εξόδου της γεννήτριας να ελέγχεται από το εξωτερικό σύστημα ισχύος.

#### 4.3.2.1 Εφαρμογές της Επαγωγικής Γεννήτριας

Οι επαγωγικές γεννήτριες χρησιμοποιούνταν ήδη από τις αρχές του 20ου αιώνα, αλλά στις δεκαετίες 1960 και 1970 είχαν εξαφανιστεί από τις εφαρμογές. Όμως, οι γεννήτριες αυτές έκαναν την επανεμφάνισή τους μετά τη θεαματική αύξηση της τιμής του πετρελαίου το 1973. Με την αύξηση του κόστους της ενέργειας η εξοικονόμηση της ενέργειας έχει αποκτήσει μεγάλη σημασία για την οικονομία κάθε βιομηχανικής διαδικασίας. Η επαγωγική γεννήτρια είναι ιδανική σε τέτοιες περιπτώσεις, επειδή τα συστήματα ελέγχου της και η συντήρησή της απαιτούν πολύ μικρό κόστος.

Οι επαγωγικές γεννήτριες επίσης, προτιμούνται ιδιαίτερα για συνεργασία με μικρούς ανεμόμυλους λόγω της απλής κατασκευής τους και λόγω του μικρού τους μεγέθους ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος. Πολλοί ανεμόμυλοι του εμπορίου είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν παράλληλα με μεγάλα συστήματα ισχύος τροφοδοτώντας ένα τμήμα της

συνολικής ισχύος που απαιτεί το φορτίο του συστήματος. Σε μια τέτοια εφαρμογή το σύστημα ισχύος μπορεί να εγκατασταθεί, ώστε να έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας, ενώ είναι δυνατό να τοποθετηθούν στατοί πυκνωτές για διόρθωση του συντελεστή ισχύος

#### 4.4 Σύγχρονες μηχανές

Σε αντίθεση με την ασύγχρονη μηχανή η οποία είναι απλής τροφοδότησης (καθόσον το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται εξ' αλληλεπαγωγής από το τύλιγμα του στάτη), η σύγχρονη μηχανή είναι διπλής τροφοδότησης (doubly excited). Το τύλιγμα τυμπάνου είναι απόλυτα όμοιο με εκείνο των μηχανών επαγωγής, βρίσκεται συνήθως στο στάτη και είναι τριφασικό διανεμημένο τύλιγμα. Το τύλιγμα του δρομέα γνωστό και ως τύλιγμα διέγερσης ή τύλιγμα πεδίου, είναι τύλιγμα συνεχούς ρεύματος και ανάλογα του αριθμού των πόλων μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο. Σε σπάνιες περιπτώσεις, είναι δυνατόν το τύλιγμα τυμπάνου να βρίσκεται στο δρομέα και το τύλιγμα διέγερσης στο στάτη.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της σύγχρονης μηχανής, ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της ως κινητήρα ή γεννήτρια και τις συνθήκες φόρτισης, είναι ότι στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στρέφεται πάντα με σταθερό αριθμό στροφών (γνωστό ως σύγχρονο αριθμό στροφών) και στην ιδιότητα αυτή οφείλει και την ονομασία της. Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας στη συγκεκριμένη κατηγορία μηχανών, γίνεται σε μια ορισμένη ταχύτητα περιστροφής, τη σύγχρονη ταχύτητα (synchronous speed), η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των μαγνητικών πόλων των τυλιγμάτων και από τη συχνότητα των ρευμάτων του τυλίγματος τυμπάνου. Σε αντίθεση λοιπόν με τις ασύγχρονες μηχανές, στις σύγχρονες μηχανές η ολίσθηση του δρομέα είναι μηδενική. Δηλαδή, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής και ο δρομέας, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Οι σύγχρονες μηχανές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες και λιγότερο ως κινητήρες.

Το βασικό πλεονέκτημα της σύγχρονης γεννήτριας, είναι η ευκολία με την οποία γίνεται η ρύθμιση της ενεργού και της άεργης ισχύος. Επιπρόσθετα, ένα βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων κινητήρων είναι το ότι με κατάλληλη ρύθμιση της διέγερσης, για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης μπορεί να εμφανίζουν χωρητική, επαγωγική ή ωμική συμπεριφορά\

#### 4.4.1 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PMSM)

Ο σύγχρονος κινητήρας αποτελείται από τον στάτη ο οποίος φέρει ένα τριφασικό τύλιγμα και από τον δρομέα ο οποίος μπορεί να έχει δύο μορφές:

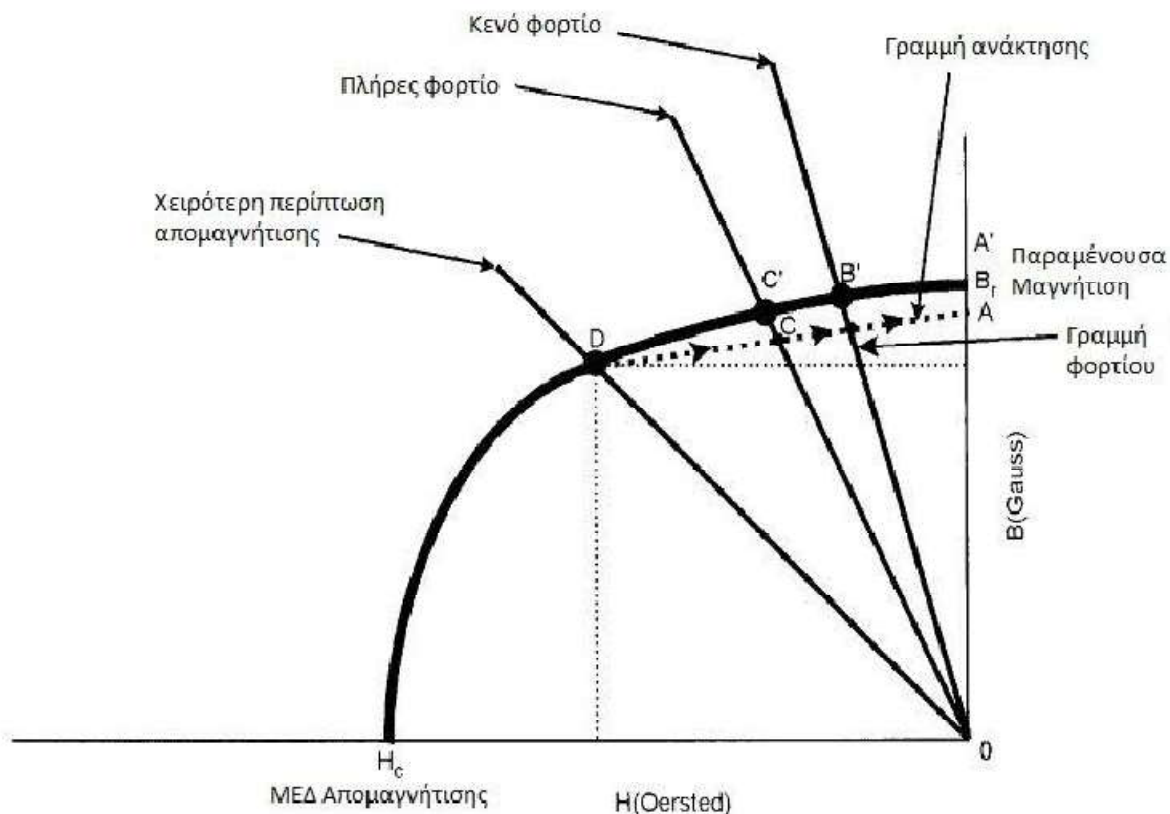
- Με τύλιγμα διέγερσης
- Με μόνιμο μαγνήτη

Στον πρώτο τύπο, το τύλιγμα διέγερσης απαιτεί τροφοδοσία με συνεχές ρεύμα, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα του. Οι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη είναι μεν πιο ακριβοί, αλλά μειώνουν την πολυπλοκότητα της κατασκευής ενός κινητηρίου συστήματος βασισμένα σε αυτούς. Στον δεύτερο αυτό τύπο διακρίνουμε δύο υποκατηγορίες, που αναφέρονται στην κατασκευή του δρομέα, η πρώτη είναι λεία και η δεύτερη παρουσιάζει έκτυπους πόλους.

Η δεύτερη κατηγορία κινητήρων, που συναντάμε σε εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, είναι οι σύγχρονοι κινητήρες, οι οποίοι μαζί με τους ασύγχρονους αποτελούν τις προτιμότερες λύσεις σήμερα.

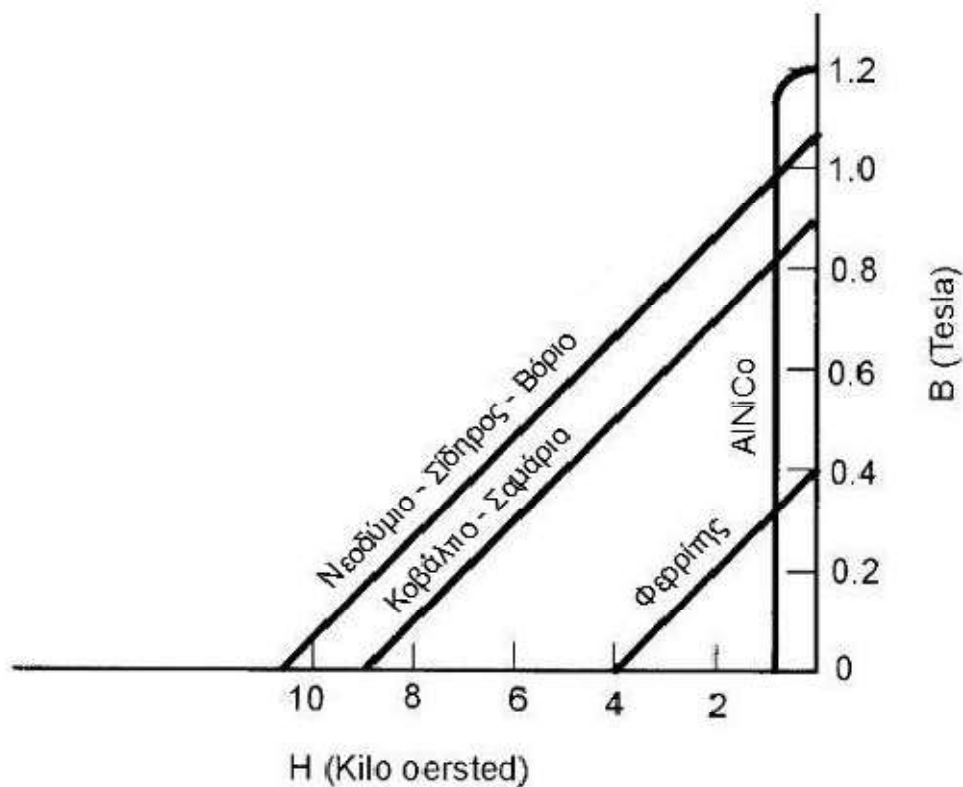
Η διέγερση του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη παρέχεται από μόνιμους μαγνήτες στο ρότορα. Πλεονέκτημα αυτής της μηχανής είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των μαγνητών, επειδή ο μόνιμος μαγνήτης διέγερσης απαιτεί λίγο χώρο. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει ρεύμα διέγερσης παρέχει μία υψηλή συνολική απόδοση στην περιοχή της ονομαστικής ταχύτητας. Οι κυρίαρχες απώλειες του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη είναι οι απώλειες σιδήρου, οι οποίες εμφανίζονται κυρίως στο στάτη, αλλά μπορούμε εύκολα τοποθετήσουμε ένα σύστημα ψύξης. Σημαντικό μειονέκτημα του είναι το υψηλό κόστος των σπάνιων-γήινων μαγνητών, όπως το νεοδύμιο NdFeB. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η πρόσθετη συνιστώσα του ρεύματος που απαιτείται για την αποδυνάμωση του πεδίου όπου εκεί έχουμε μεγαλύτερες απώλειες στον στάτη και η απόδοση στις μεγάλες ταχύτητες μειώνεται. Επιπλέον, η ικανότητα υπερφόρτωσης περιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του επιμέρους μαγνήτη. Για να αποφευχθεί η μη αναστρέψιμη απομαγνήτιση, πρέπει να αποφεύγονται οι υψηλές θερμοκρασίες στον μαγνήτη σε συνδυασμό με υψηλά ρεύματα στον στάτη, ένα αξιόπιστο σύστημα ανάχνευσης θερμοκρασίας είναι απαραίτητο.





Σχήμα 4.17 : Σημεία λειτουργίας μηχανής μόνιμων μαγνητών πάνω στη καμπύλη B(H)[1]

Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται επίσης μία γραμμή φόρτιου που αντιστοιχεί στη χειρότερη περίπτωση απομαγνήτισης που μπορεί να προκληθεί κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, ενός μεταβατικού φαινομένου ή σε περίπτωση σφάλματος. Όταν το σημείο λειτουργίας φτάσει στο D και αρθεί το φαινόμενο που προκαλεί την απομαγνήτιση, ο μαγνήτης θα επανέλθει κατά μήκος της γραμμής ανάκτησης (recoil line), η οποία έχει σχεδόν την ίδια κορυφή με την αρχική καμπύλη B(H) κοντά στο  $H = 0$ . Σε μία επόμενη λειτουργία, το σταθερό σημείο λειτουργίας θα καθοριστεί από την τομή της γραμμής φόρτιου και της γραμμής ανάκτησης. Έτσι, ο μαγνήτης απομαγνητίζεται μόνιμα στην λειτουργία εν κενό κατά την κάθετη απόσταση μεταξύ των σημείων A και A'. Το φαινόμενο αυτό αναδεικνύει τη σπουδαιότητα που έχει το σημείο της χειρότερης περίπτωσης απομαγνήτισης στην επίδοση της μηχανής και την αναγκαιότητα αποφυγής λειτουργίας της μηχανής κοντά σε αυτό το σημείο. Εναλλακτικά, αν το υλικό του μόνιμου μαγνήτη επιλεγεί ώστε η καμπύλη απομαγνήτισης να είναι ευθεία γραμμή, η γραμμή ανάκτησης θα συμπίπτει με τη γραμμή απομαγνήτισης άσχετα με το αν η μηχανή έχει περάσει από το σημείο της χειρότερης περίπτωσης απομαγνήτισης (δηλαδή ο μόνιμος απομαγνητισμός θα είναι αμελητέος).



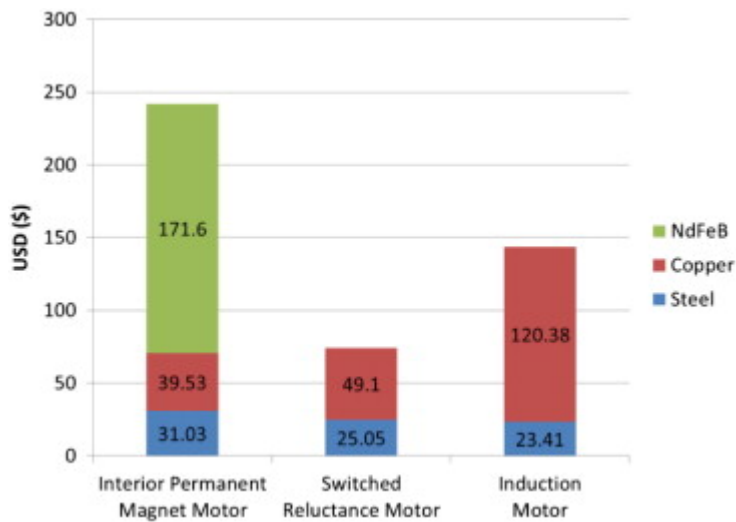
Σχήμα 4.18: Χαρακτηριστική H-B διαφόρων μαγνητών.

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

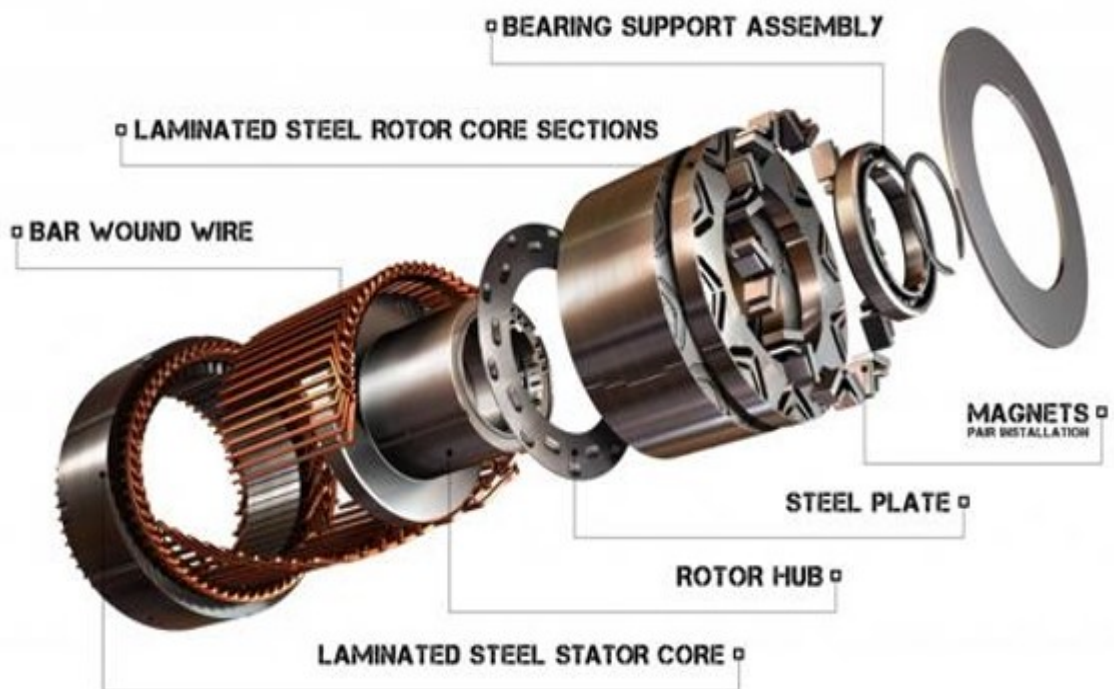
Ο μαγνήτης κοβαλτίου – σαμαρίου (CoSm) είναι φτιαγμένος από σίδηρο, νικέλιο, κοβάλτιο και από τη σπάνια γαία σαμάριο. Έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής παραμένουσας μαγνήτισης, της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που εκφράζεται από το γινόμενο (BH max) και των γραμμικών χαρακτηριστικών απομαγνήτισης. Η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

Ο μαγνήτης νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB) έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, υψηλότερη μαγνητίζουσα αντίδραση και πολύ καλή ΜΕΔ απομαγνήτισης (Hc). Τα μειονεκτήματα είναι η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (150°C) και η ευαισθησία στη οξείδωση αν δεν προστατεύεται από ειδική επίστρωση.

Επίσης, η θερμοκρασιακή ευστάθεια (-0.13%) είναι κατώτερη από εκείνη ενός μαγνήτη CoSm. Το υλικό αυτό είναι ακριβότερο συγκριτικά με το φερρίτη, αλλά εξαιτίας της μεγάλης ενεργειακής του πυκνότητας, μειώνει το βάρος της μηχανής. Η εφαρμογή των μαγνητών NdFeB στις μηχανές μονίμων μαγνητών αυξάνεται συνεχώς



Σχήμα 4.19 Κόστος υλικών σε έναν κινητήρα έλξης 30kW για έναν κινητήρα με σπάνιους μαγνήτες σε συγκριση με άλλους τύπους κινητήρα.



Σχήμα 4.20: Κατασκευαστικά μέρη σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

#### 4.4.2 Σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος(εναλλακτήρας)

Οι σύγχρονες γεννήτριες (synchronous generators) ή αλλιώς εναλλακτήρες είναι σύγχρονες μηχανές που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Δομή των σύγχρονων γεννητριών:

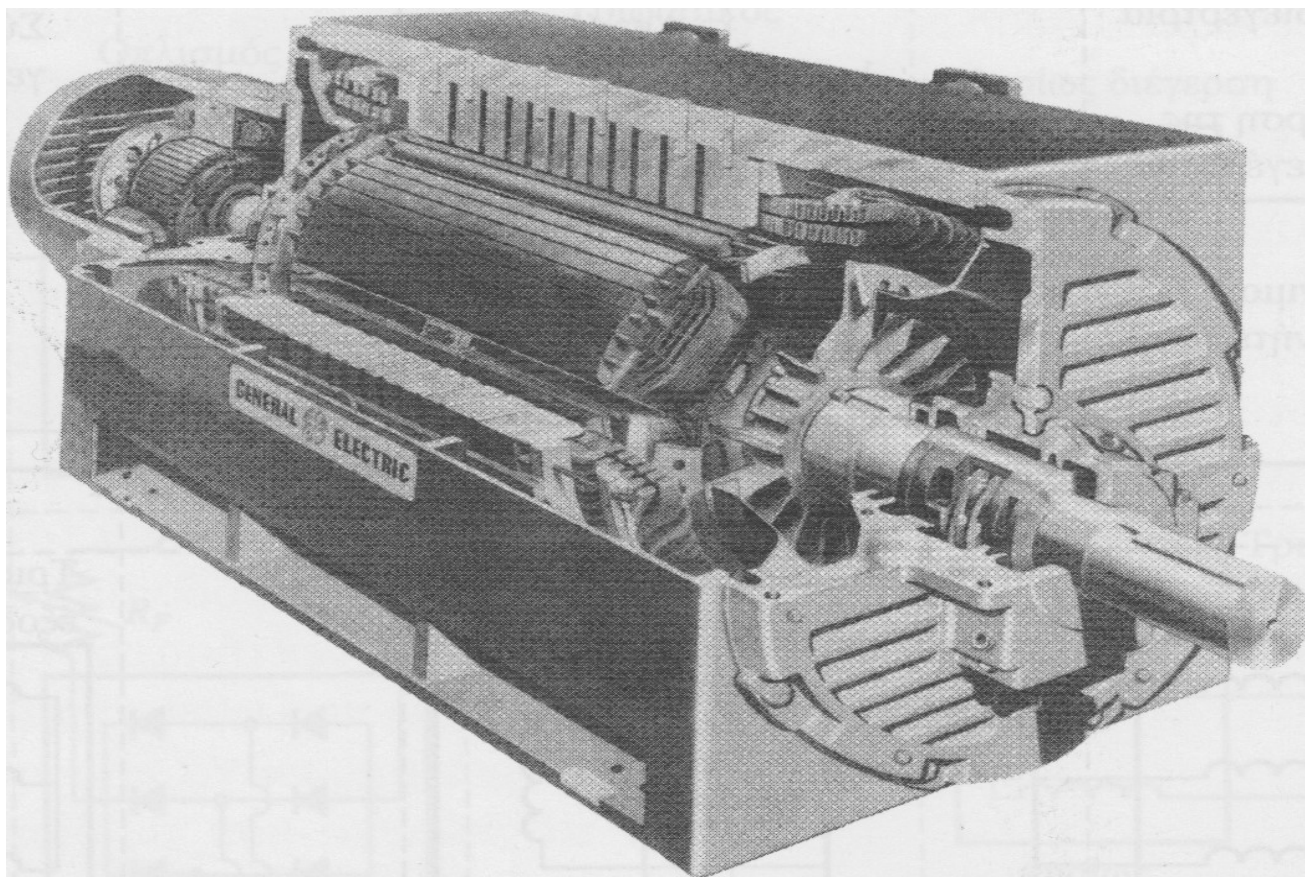
Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει μια σύγχρονη γεννήτρια είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα της με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή, το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Τελικά, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής.

Ο δρομέας μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας μεγάλος ηλεκτρομαγνήτης τόσο στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι έκτυπων πόλων, όσο και όταν αυτή διαθέτει κυλινδρικό δρομέα. Οι πόλοι μιας γεννήτριας έκτυπων πόλων διακρίνονται στην επιφάνεια του δρομέα ενώ όταν ο δρομέας είναι κυλινδρικός, οι πόλοι της βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με την υπόλοιπη επιφάνειά του. Δρομείς με κυλινδρική επιφάνεια έχουν συνήθως οι γεννήτριες δυο ή τεσσάρων πόλων, ενώ οι γεννήτριες έκτυπων πόλων συνήθως διαθέτουν πάνω από τέσσερις πόλους. Ο δρομέας των σύγχρονων γεννητριών κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα με σκοπό τη μείωση των απωλειών εξαιτίας των δινορρευμάτων. Πράγματι, επειδή ο δρομέας εκτίθεται σε συχνές μεταβολές του μαγνητικού του πεδίου, η ανάπτυξη δινορρευμάτων στο εσωτερικό του είναι αναπόφευκτη.

Ακόμη, το τύλιγμα του δρομέα στις σύγχρονες γεννήτριες θα πρέπει να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Επειδή όμως, ο δρομέας περιστρέφεται, είναι ανάγκη να αναπτυχθεί κάποιος ειδικός τρόπος τροφοδοσίας του τυλίγματος του. Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές τροφοδοσίας του δρομέα είναι:

Με τροφοδοσία από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, οπότε ο δρομέας θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ψύκτρες (brushes) και δαχτυλίδια (slip rings).

Με τροφοδοσία από ειδική πηγή συνεχούς ρεύματος τοποθετημένη πάνω στον άξονα της γεννήτριας.



Σχήμα 4.21: Τομή μιας σύγχρονης μηχανής μεγάλης ισχύος. Φαίνονται η δομή των έκτυπων πόλων και η διεγέρτρια που βρίσκεται πάνω στον άξονα της μηχανής.

#### 4.4.2.1 Ταχύτητα περιστροφής των σύγχρονων γεννητριών

Στις σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Ο δρομέας των μηχανών αυτών είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης, του οποίου το πεδίο περιστρέφεται με φορά ίδια μ' αυτή του δρομέα. Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την Εξ.

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

$f_e$  = η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

$n_m$  = η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε r/min (= η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις σύγχρονες μηχανές)

P = ο αριθμός των πόλων

Επειδή, λοιπόν, ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται και το μαγνητικό πεδίο της, η παραπάνω εξίσωση δίνει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και της ηλεκτρικής συχνότητας της.

Ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας:

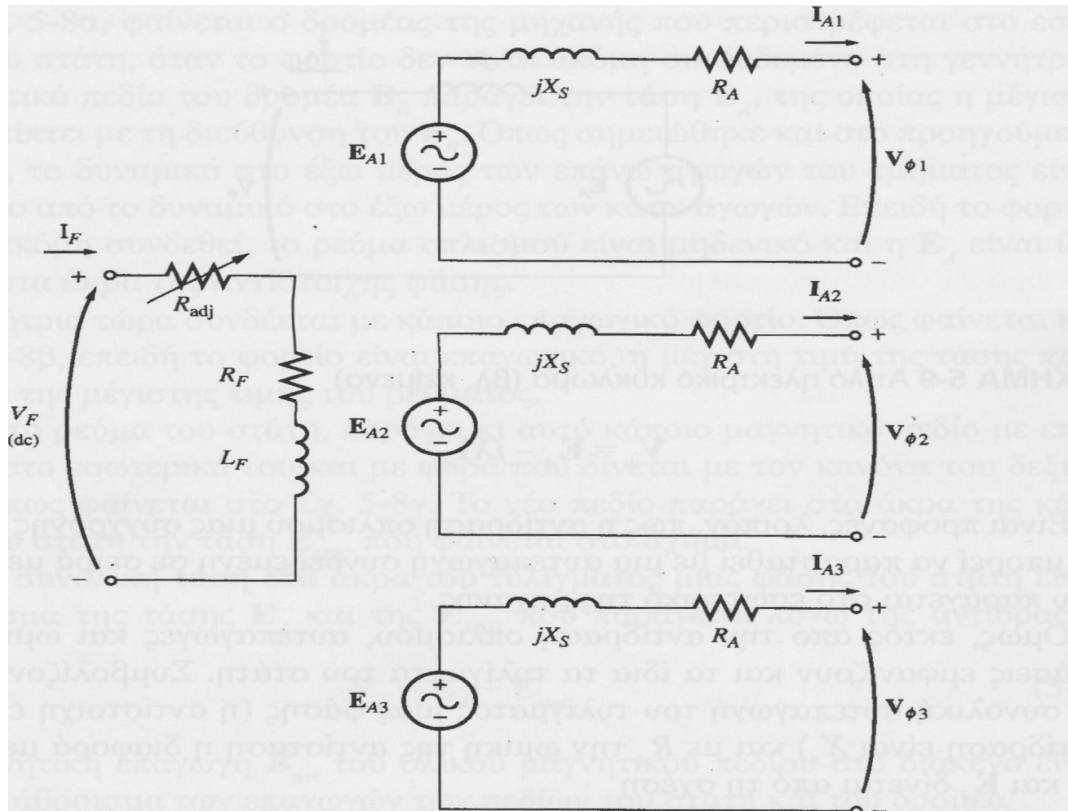
Έστω  $E_A$  η τάση στα άκρα της μιας φάσης που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας. Αυτή η τάση σπάνια εμφανίζεται στα άκρα της μηχανής. Αντίθετα, είναι ίση με την αντίστοιχη τάση στα άκρα της μηχανής  $V_\phi$  μόνο όταν το ρεύμα οπλισμού της γεννήτριας είναι μηδέν. Η ανάλυση των αιτιών που διαφοροποιούν την  $E_A$  από τη  $V_\phi$  οδηγεί στην ανάπτυξη του μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας. Οι λόγοι που διαφοροποιούν την  $E_A$  από τη  $V_\phi$  είναι οι εξής:

Η παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής που προκαλείται από το ρεύμα του στάτη. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση οπλισμού (armature reaction),

Οι αυτεπαγωγές των αγωγών του στάτη,

Οι αντιστάσεις των αγωγών του στάτη,

Το σχήμα των έκτυπων πόλων του δρομέα



Σχήμα 4.22: Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα μιας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας.

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \phi f$$

$$X_s = X + X_A$$

$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A$$

Ισχύς και ροπή των σύγχρονων μηχανών:

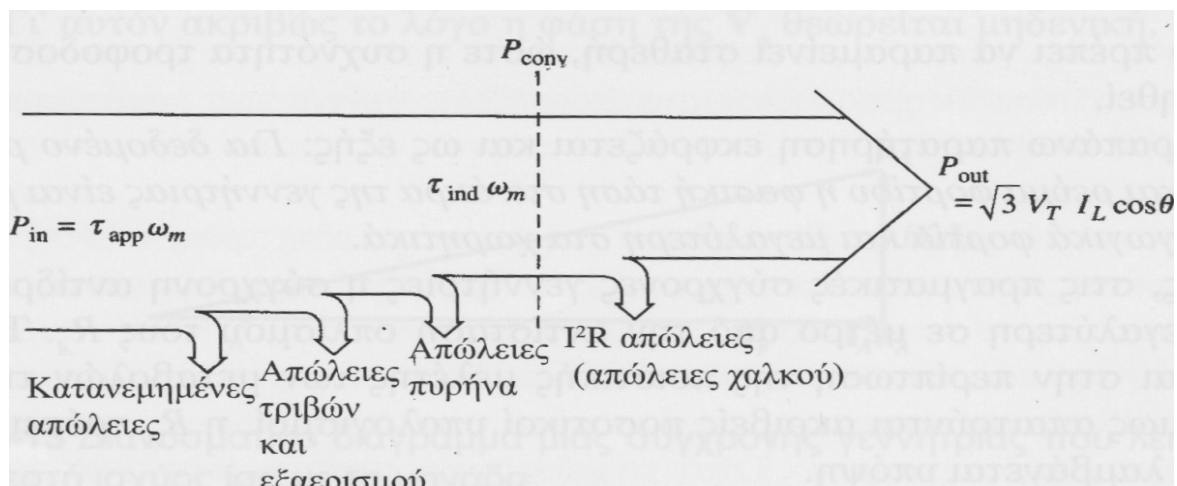
Μια σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει απώλειες κατά τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική, γι' αυτό και ποτέ η ισχύς εισόδου της δεν είναι ίση με την ισχύ εξόδου. Στο διάγραμμα ροής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας του Σχ. 4,22, φαίνεται ότι η ισχύς εισόδου στη γεννήτρια είναι η μηχανική ισχύς που εφαρμόζεται στον άξονά της ( $P_{in} = \tau_{ind}\omega_m$ ) ενώ η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική στο εσωτερικό της μηχανής είναι ίση με

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m$$

$$= 3E_A I_A \cos \gamma$$

όπου  $\gamma$  είναι η γωνία μεταξύ των  $E_A$  και  $I_A$ . Η διαφορά μεταξύ της ισχύος εισόδου στη γεννήτρια και της ισχύος που μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική οφείλεται στις απώλειες πυρήνα, στις μηχανικές απώλειες και στις κατανεμημένες απώλειες της γεννήτριας. Η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας  $P_{out}$ , δίνεται (σε πολικά μεγέθη) από την

$$P_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta$$



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα ροής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτρια

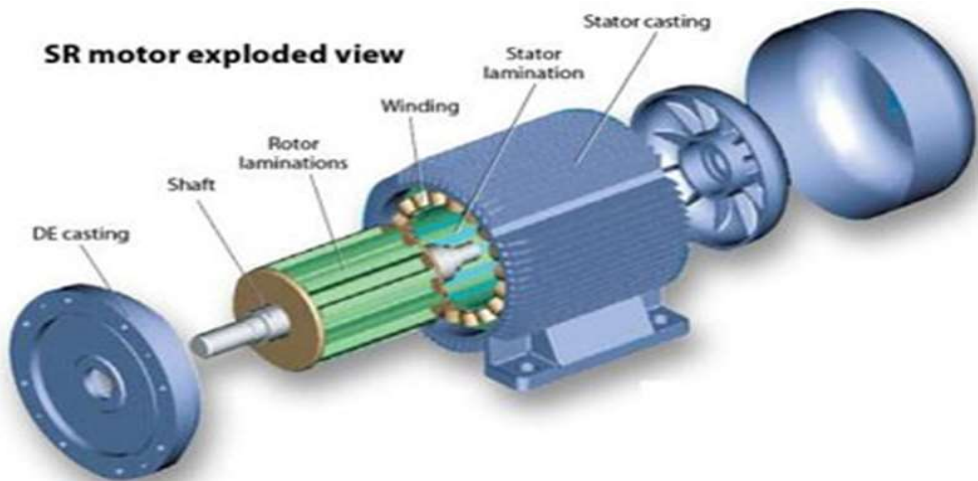
## 4.5 Κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης (SRM)

Οι κινητήρες μαγνητικής ανάδρασης παρ' όλο που δεν έχουν ακόμα εμπορικές χρήσεις κεντρίζουν το ενδιαφέρον της αγοράς εξαιτίας του ιδιαίτερα χαμηλού κόστους κατασκευής τους, που ίσως αποτελέσει λύση στην άνοδο των τιμών των μαγνητικών υλικών όταν τα ηλεκτρικά οχήματα μπουν στην μαζική παραγωγή. Αυτοί οι κινητήρες έχουν πλεονεκτήματα όπως η απλή και στιβαρή κατασκευή, ανεκτικότητα σε σφάλματα λειτουργίας, απλό έλεγχο, και εξαιρετική χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας. Το μεγάλο πλεονέκτημα των κινητήρων αυτών είναι η απουσία τυλίγματος διέγερσης και μαγνητών στον δρομέα. Έχουν πολλά μειονεκτήματα όμως, όπως ο υψηλός θόρυβος, η υψηλή κυμάτωση ροπής, η τοπολογία ειδικών μετατροπέων και ακόμα έχουν αναφερθεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές για αυτόν τον κινητήρα. Μέτρα για τη μείωση του θορύβου μειώνουν την πυκνότητα ισχύος και μειώνουν την απήχηση του κινητήρα μαγνητικής αντίδρασης σε σχέση με τον επαγωγικό κινητήρα.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην μεταβλητή αντίσταση του μαγνητικού τους κυκλώματος λόγω της εκτυπότητας των πόλων στον στάτη και τον δρομέα. Τυλίγματα υπάρχουν μόνο στον στάτη, ενώ η κατασκευή του δρομέα γίνεται μόνο από φύλλα μαγνητικής λαμαρίνας, γεγονός που τους καθιστά πολύ ανθεκτικούς σε υψηλές στροφές περιστροφής και κάνει την κατασκευή τους ιδιαίτερα φθηνή. Διαθέτουν υψηλή ροπή εκκίνησης, ευρεία περιοχή μέγιστης ισχύος και υψηλή αξιοπιστία.

Η βασική αρχή λειτουργίας του SRM είναι αρκετά απλή. καθώς ρεύμα διέρχεται μέσω μιας από τις περιελίξεις του στάτη, παράγεται ροπή από την τάση του ρότορα να ευθυγραμμιστεί με το διεγερμένο πόλο του στάτη. Η κατεύθυνση της ροπής που δημιουργείται είναι μία συνάρτηση της θέσης του ρότορα σε σχέση με τη διεγερμένη φάση, και είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος μέσα από την περιέλιξη. Συνεχής ροπή μπορεί να παραχθεί συγχρονίζοντας κάθε φάση διέγερσης με τη θέση του δρομέα.

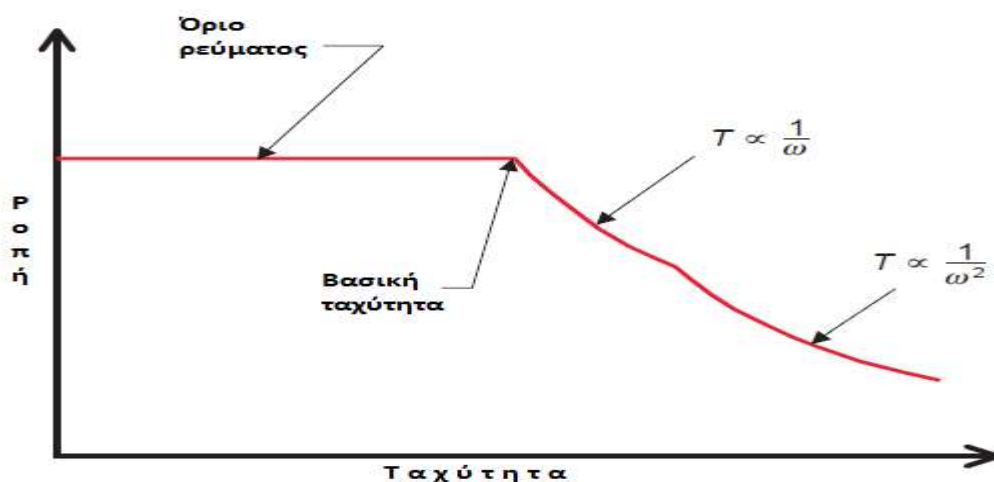




Σχήμα 4.24: Μέρη κινητήρα μαγνητικής αντίδρασης

#### 4.5.1 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας

Όπως και άλλοι κινητήρες, η ροπή περιορίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα, και η ταχύτητα από τον διαθέσιμο αγωγό τάσης. Με την αύξηση της ταχύτητας του άξονα, η οριακή περιοχή του ρεύματος παραμένει μέχρι ο ρότορας να φτάσει μία ταχύτητα με την οποία η αντίΗΕΔ του κινητήρα είναι τέτοια ώστε, δεδομένου του περιορισμού του DC αγωγού τάσης δεν μπορεί να πάρει περισσότερο ρεύμα στο τύλιγμα, άρα και περισσότερη ροπή από τον κινητήρα. Στο σημείο αυτό, το οποίο ονομάζεται βασική ταχύτητα, και πέρα, η ισχύς εξόδου του άξονα παραμένει σταθερή και μέγιστη. Σε ακόμα υψηλότερες ταχύτητες, η αντιΗΕΔ αυξάνεται και η ισχύς εξόδου του άξονα αρχίζει να πέφτει. Αυτή η περιοχή χαρακτηρίζεται από το την παραγόμενη ροπή και το τετράγωνο της ταχύτητας που παραμένει σταθερό.



Σχήμα 4.25: Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας κινητήρα SR

#### 4.6 Επιλογή κατάλληλου κινητήρα:

Σύμφωνα με τις προαναφερθείσες αναλύσεις καταλήξαμε στην επιλογή του 3φ επαγωγικού κινητήρα για τους παρακάτω λόγους:

Γενικά έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων

Προσφέρουν υψηλή ακρίβεια ελέγχου των στροφών του κινητήρα

Καλή απόδοση σε σχέση με το κόστος κατασκευής και συντήρησης

Διαθέτουν το υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας με μικρές ανάγκες συντήρησης

Κατασκευαστικά έχουν μικρό βάρος και μικρό όγκο

Χαρακτηριστικά \ Σύστημα πρόωσης	DC	IM	PM	SRM
Πυκνότητα ισχύος	2.5	3.5	5	3.5
Αποδοτικότητα	2.5	3.5	5	3.5
Ελεγχιμότητα	5	5	4	3
Αξιοπιστία	3	5	4	5
Τεχνολογική ωριμότητα	5	5	4	4
Κόστος	4	5	3	4
<b>Σύνολο</b>	 <b>22</b>	 <b>27</b>	 <b>25</b>	 <b>23</b>

Πίνακας 1. Αξιολόγηση των ηλεκτρικών συστημάτων πρόωσης

#### 4.7 Επιλογή κατάλληλης γεννήτριας:

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης θα επιλέξουμε μια σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος κυρίως λόγο της μεγαλύτερης απόδοσης σε σχέση με τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος και λόγω της πλέον διαδεδομένης χρήσης του.

## Κεφάλαιο 5

### ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

#### 5.1 Εισαγωγή

Μία από τις πιο σημαντικές και καινοτόμες ανακαλύψεις τουλάχιστον των τελευταίων 400 χρόνων, ήταν αναμφισβήτητα η ανακάλυψη του ηλεκτρισμού. Όμως, η πρώτη σημαντική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, ήρθε πολύ αργότερα και σε περιορισμένη αρχικά έκταση, με την ανακάλυψη της μπαταρίας στα μέσα με τέλη του 1800. Πολύ πριν εφευρεθούν οι ηλεκτρικές γεννήτριες και πριν αναπτυχθούν τα ηλεκτρικά δίκτυα, την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούσαν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή απλά μπαταρίες. Οι διαδοχικές βελτιώσεις της τεχνολογίας των συσσωρευτών οδήγησαν στην άνθηση πολλών σημαντικών ηλεκτρικών ανακαλύψεων, ξεκινώντας από τις πρώιμες επιστημονικές μελέτες, φθάνοντας στις απλές τεχνολογικές εφευρέσεις όπως αυτή του τηλεφώνου και του τηλεγράφου και καταλήγοντας σε φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και ηλεκτρικά οχήματα

<b>ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ</b>		
1791	L. Galvani	Ροή ηλ.ρεύματος κατά μήκος αγωγού
1800	A. Volta	Εφεύρεση βολταϊκής στήλης
1802	W. Cruickshank	Πρώτη ηλ.μπαταρία για μαζική παραγωγή
1836	J. F. Daniell	Εφεύρεση στοιχείου Daniell
1839	W. Grove	Εφεύρεση στοιχείου Grove
1859	G. Planté	Εφεύρεση επαναφορτιζόμενης μπαταρίας
1865	G. Leclanché	Εφεύρεση ξηρού στοιχείου
1886	C. Gassner	Ολοκλήρωση ξηρού στοιχείου
1899	W. Jungner	Εφεύρεση επαναφορτιζόμενης μπαταρίας NiCd
1901	Th. Edison	Εφεύρεση μπαταρίας νικελίου-σιδήρου
1912	G. N. Lewis	Πρώτα πειράματα μπαταριών λιθίου
1932	Shlecht, Ackermann	Εφεύρεση πορώδους πλάκας πόλου
1947	G. Neumann	Αεροστεγές κλείσιμο στοιχείου
1955	L. Urry	Κατασκευή πρώτων αλκαλικών συσσωρευτών
1970	-	Εμπορευματοποίηση μπαταριών λιθίου
1989	-	Εμπορευματοποίηση μπαταριών Ni-MH
1997	-	Συσσωρευτές πολυμερών ιόντων λιθίου

Σχήμα 5.1: Ιστορική εξέλιξη συσσωρευτών.

Πάρουν πολλά διαφορετικά είδη και μεγέθη ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η μπαταρία είναι το βασικό στοιχείο. Στο κλασικό ηλεκτρικό όχημα η μπαταρία είναι η μοναδική πηγή ενέργειας, και το στοιχείο με το υψηλότερο κόστος, βάρος και όγκο. Σε υβριδικά οχήματα η μπαταρία, η οποία πρέπει συνέχεια να δέχεται και να δίνει ηλεκτρική ενέργεια, είναι επίσης ένα βασικό στοιχείο υψίστης σημασίας. Εν ολίγοις, μια καλή κατανόηση της τεχνολογίας των μπαταριών και την απόδοση είναι ζωτικής σημασίας για όσους ασχολούνται με τα ηλεκτρικά οχήματα.

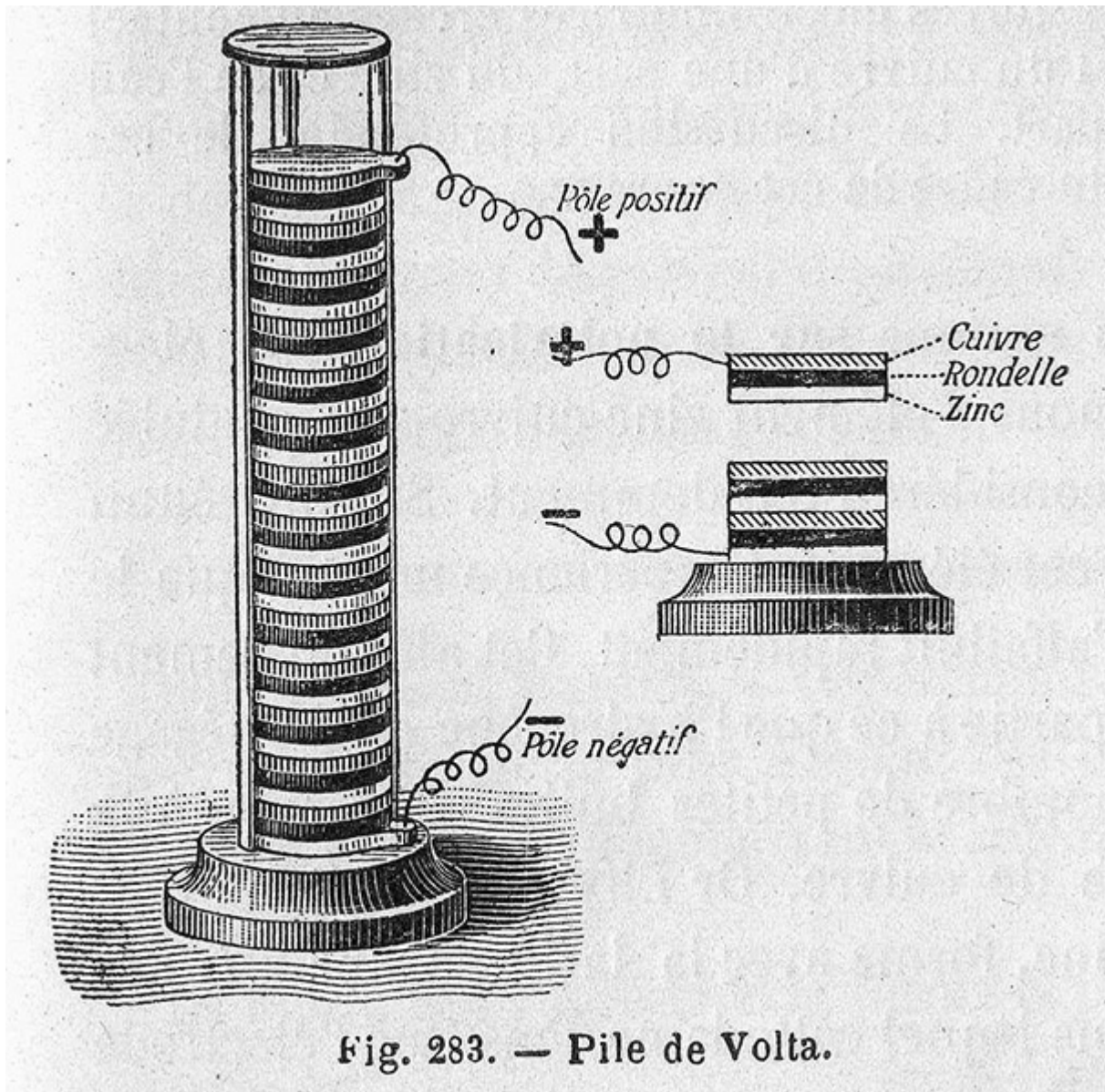
Τι είναι μια ηλεκτρική μπαταρία; Μια μπαταρία αποτελείται από δύο ή περισσότερα ηλεκτρικά κελιά που ενώνονται μεταξύ τους. Τα κελιά μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα κελιά αποτελούνται από θετικά και αρνητικά ηλεκτρόδια και συνδέονται με έναν ηλεκτρολύτη. Η χημική αντίδραση μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη είναι αυτή η οποία παράγει το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Στην περίπτωση των δευτερευόντων ή επαναφορτιζόμενων μπαταριών, η χημική αντίδραση μπορεί να αντιστραφεί με την αντιστροφή του ρεύματος και η μπαταρία επιστρέφει σε φορτισμένη κατάσταση.

Η μπαταρία «μολύβδου οξέος» είναι η πιο γνωστή επαναφορτιζόμενου τύπου μπαταρία, αλλά πλέον υπάρχουν και άλλοι τύποι μπαταριών πιο αποδοτικοί. Προς το παρόν ένας σχετικά μικρός αριθμός συνδυασμών υλικών (για την δημιουργία επαναφορτιζόμενων μπαταριών) έχει αναπτυχθεί εμπορικά που είναι κατάλληλοι για χρήση σε οχήματα. Αυτοί περιλαμβάνουν τους εξής τύπους: μολύβδου οξέος, νικελίου σιδήρου, νικελίου καδμίου, νικελίου μετάλλου υδριδίου, ιόντων λιθίου, πολυμερών λιθίου και σιδήρου λιθίου, θείου νάτριου και χλωριούχου νατρίου μέταλλου. Παρ'όλες τις διαφορετικές προσπάθειες συνδυασμών, και περίπου 150 χρόνια ανάπτυξης, μια κατάλληλη μπαταρία εξακολουθεί να μην έχει αναπτυχθεί η οποία επιτρέπει την ευρεία χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο υπήρξαν πρόσφατα ορισμένες σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών που κρατούν τη μεγάλη ελπίδα για το μέλλον. Επίσης, με την προϋπόθεση ότι οι επιδόσεις τους είναι κατανοητές και με σωστά πρότυπα, είναι απολύτως δυνατό να σχεδιάσουμε πολύ χρήσιμα οχήματα που χρησιμοποιούν τρέχουσες μπαταρίες ως τη μόνη ή την κύρια πηγή της ενέργειας τους.

Από την πλευρά του σχεδιαστή του ηλεκτρικού οχήματος η επιλογή της μπαταρίας μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα «μαύρο κουτί», το οποίο έχει μια σειρά από κριτήρια απόδοσης. Τα κριτήρια αυτά θα περιλαμβάνουν την ειδική ενέργεια, ενεργειακή πυκνότητα, ειδική ισχύ, τυπικές τάσεις, απόδοση αμπέρ/ώρα, απόδοση ενέργειας, εμπορική διαθεσιμότητα, το κόστος, οι θερμοκρασίες λειτουργίας, τα ποσοστά αυτο-εκφόρτισης, ο αριθμός των κύκλων ζωής και τα ποσοστά επαναφόρτισης. Ο σχεδιαστής πρέπει επίσης να

κατανοήσει πώς η διαθεσιμότητα ενέργειας ποικίλλει σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα ποσοστά φόρτισης και αποφόρτισης, την γεωμετρία της μπαταρίας, την βέλτιστη θερμοκρασία, τις μεθόδους φόρτισης, τις ανάγκες ψύξης και τις πιθανές μελλοντικές εξελίξεις.

Ωστόσο, τουλάχιστον μια βασική κατανόηση της χημείας της μπαταρίας είναι πολύ σημαντική, διαφορετικά οι απαιτήσεις επιδόσεων, η συντήρηση των διαφόρων τύπων, και οι περισσότερες από τις απογοητεύσεις που συνδέονται με τη χρήση της μπαταρίας, όπως η περιορισμένη διάρκεια ζωής τους, η αυτο-εκφόρτιση, η μειωμένη απόδοση σε υψηλότερα ρεύματα, και ούτω καθεξής, δεν μπορεί να γίνει κατανοητή. Αυτή η βασική γνώση είναι επίσης απαραίτητη σε σχέση με πιθανούς κινδύνους σε ένα ατύχημα και το συνολικό αντίκτυπο της χρήσης των χημικών ουσιών της μπαταρίας για το περιβάλλον. Η ανακύκλωση των χρησιμοποιημένων μπαταριών είναι επίσης όλο και πιο σημαντική.



Σχήμα 5.2: Η πρώτη μπαταρία, εφευρέθηκε από τον Alessandro Volta.

Τεχνικές παράμετροι του στοιχείου μπαταρίας:

Από τη σκοπιά του σχεδιαστή του οχήματος, η μπαταρία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «μαύρο κουτί» το οποίο έχει μια σειρά από κριτήρια επίδοσης. Αυτά είναι:

- Ειδική ενέργεια (specific energy)
- Ενεργειακή πυκνότητα (energy density)
- Ειδική ισχύς (specific power)
- Τάσεις

- Ικανότητα σε Ah (amp hour efficiency)
- Ενεργειακή αποδοτικότητα (energy efficiency)
- Εμπορική διαθεσιμότητα (commercial availability)
- Κόστος
- Γεωμετρία Διάταξης
- Θερμοκρασίες λειτουργίας
- Ρυθμοί αυτό-εκφόρτισης
- Κύκλος ζωής μπαταρίας

Ο κατασκευαστής πρέπει να κατανοήσει πώς μεταβάλλεται η διαθεσιμότητα ενέργειας συναρτήσει παραμέτρων όπως είναι η θερμοκρασία, του, η γεωμετρία της μπαταρίας, οι ανάγκες ψύξης κ.α. Επίσης, απαιτείται να έχει ο κατασκευαστής μια κατανόηση της χημείας της διάταξης, ώστε να μπορεί να εξετάσει την επίδραση που έχουν τα χημικά στοιχεία στην τελική απόδοση της διάταξης. Μια αναλυτική περιγραφή των ανωτέρω παραμέτρων παρουσιάζεται στην συνέχεια. Αρχικά, ορίζεται η χωρητικότητα της μπαταρίας σαν μέγεθος δομικό για την εξέταση και στην συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους παράμετροι. Ο βασικός σκοπός της μπαταρίας είναι η αποθήκευση ενέργειας. Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε μια μπαταρία εξαρτάται από την τάση ακροδεκτών και το αποθηκευμένο φορτίο. Μονάδα ενέργειας είναι το Joule, όμως για τις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης χρησιμοποιείται η μονάδα της Wh (Watt-hour). 1 Wh είναι η ενέργεια που παράγει σε διάστημα 1h μια πηγή ισχύος 1W.

Επιπλέον, ορίζεται η ακόλουθη σχέση:  $Wh = V * Ah$

Η τάση (V) όσο και η χωρητικότητα (Ah) μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας της μπαταρίας, οπότε η εξάρτηση είναι εντελώς δυναμική. Αμφότερα τα δύο μεγέθη μειώνονται όταν το ρεύμα αυξάνεται, δηλαδή όταν η μπαταρία εκφορτίζεται. Κατά συνέπεια, η αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία είναι μια μεταβλητή ποσότητα, η οποία μειώνεται όταν η ενέργεια καταναλώνεται γρήγορα. Τέλος, η τιμή της ενέργειας που παρέχεται από τον κατασκευαστή της μπαταρίας έχει υπολογιστεί για χρονικό διάστημα εκφόρτισης που ισούται με αυτό της χωρητικότητας σε Ah.

## 5.2 Τύποι μπαταριών

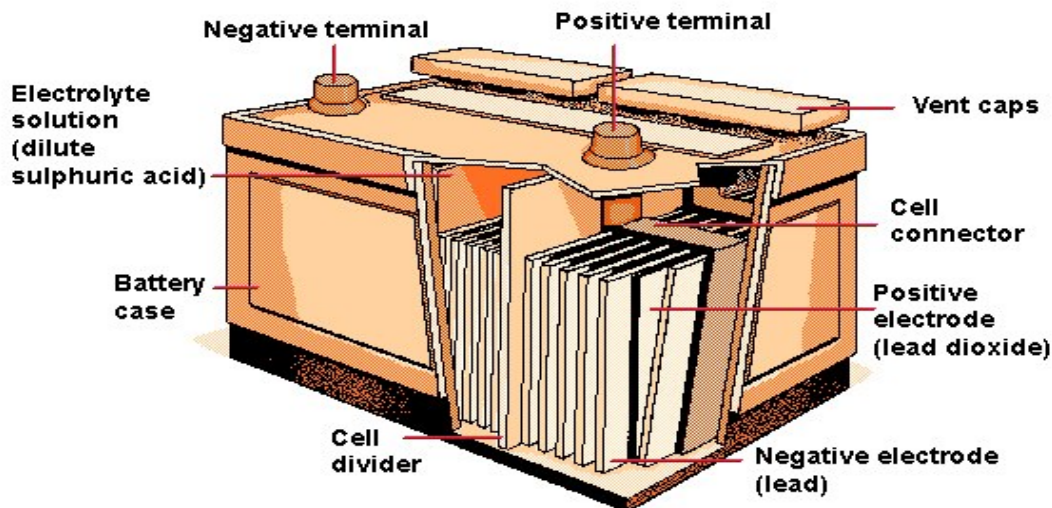
### 5.2.1 Lead-acid (μολύβδου οξέος)

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούν ένα επιτυχημένο καταναλωτικό προϊόν εδώ και τουλάχιστον έναν αιώνα. Η παραγωγή τους και η χρήση τους συνεχίζουν να αυξάνονται, ενώ οι πωλήσεις τους αντιπροσωπεύουν περίπου το 40% με 45% της αξίας των πωλήσεων όλων των συσσωρευτών παγκοσμίως. Η ευρεία χρήση των συγκεκριμένων μπαταριών σε πολλούς σχεδιασμούς, μεγέθη και επίπεδα τάσης οφείλεται στην χαμηλή τιμή και στην ευκολία της κατασκευής τους σε τοπικό γεωγραφικό επίπεδο. Είναι σχεδόν πάντα η πιο οικονομική επιλογή μπαταρίας για οποιαδήποτε εφαρμογή και παρέχει ταυτόχρονα καλή απόδοση και διάρκεια ζωής.

Η χημική σύσταση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος είναι διοξείδιο μολύβδου ως το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου και μεταλλικός μολύβδος σε μία μεγάλης επιφάνειας πορώδη δομή για το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου. Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα θειικού οξέος. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται και τα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θειικό μολύβδο. Η διαδικασία αντιστρέφεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι το πρώτο είδος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας που ερευνήθηκε-χρησιμοποιήθηκε σε ηλεκτρικά-υβριδικά οχήματα. Αυτές οι μπαταρίες έχουν πολύ χαμηλή αναλογία ενέργειας προς βάρος και ενέργειας προς όγκο. Οι παράγοντες αυτοί σημαίνουν ότι οι μπαταρίες μολύβδου οξέος καταλαμβάνουν σημαντικά ποσά του χώρου στο εσωτερικό των οχημάτων και προσθέτουν σημαντικές ποσότητες βάρους, επίσης έχουν σχετικά λίγους κύκλους ζωής (50-300 κύκλοι) και η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο ανάφλεξης. Ωστόσο έχουν αρκετά καλή απόδοση σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, μπορούν να διατηρήσουν ένα σχετικά μεγάλο λόγο ισχύος προς βάρος, χαμηλό κόστος και εύκολη ανακύκλωση των ηλεκτροχημικών στοιχείων καθιστώντας τα μια επιλογή για χρήση σε οδικά οχήματα.



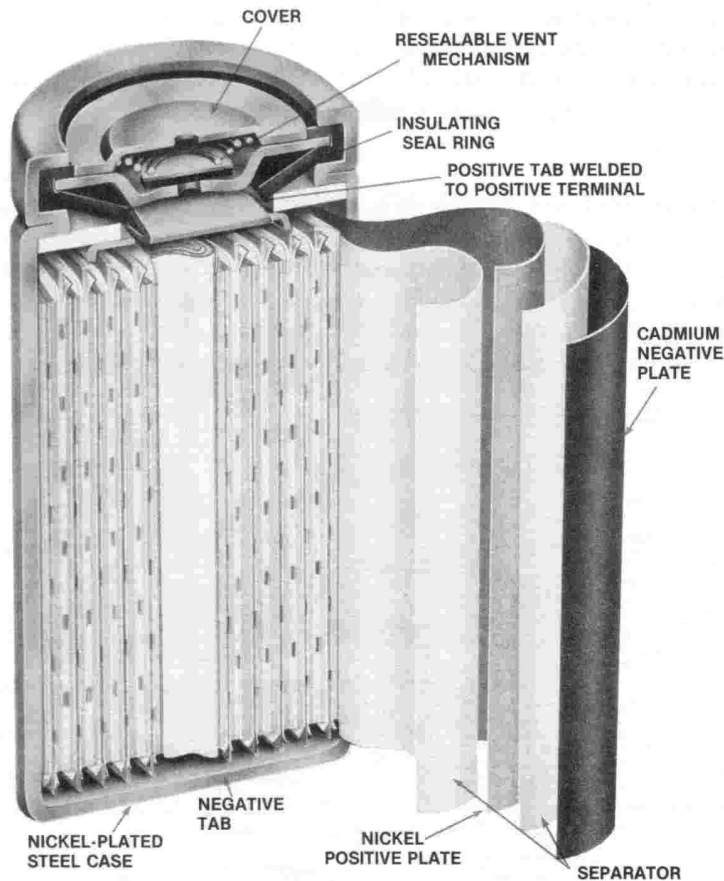


Σχήμα 5.3: Τομή μπαταρίας μολύβδου-οξέως.

### 5.2.2 Νικελίου καδμίου ( NiCd )

Όλα τα συστήματα συσσωρευτών νικελίου-καδμίου έχουν την ίδια χημική σύσταση. Η θετική πλάκα ηλεκτροδίου αποτελείται από οξυ-υδροξείδιο νικελίου και η αρνητική πλάκα από κάδμιο. Ανάμεσά τους υπάρχει ένας διαχωριστής που είναι ένα λεπτό πορώδες μονωτικό φύλλο. Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου. Κατά την εκφόρτιση, το οξυ-υδροξείδιο του νικελίου μεταπίπτει σε υδροξείδιο του νικελίου με τη συμμετοχή νερού και το κάδμιο σε υδροξείδιο του καδμίου. Κατά τη φόρτιση συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία. Ο ηλεκτρολύτης δεν μεταβάλλεται κατά την εκφόρτιση ή τη φόρτιση με αποτέλεσμα να μην αποτελεί δείκτη της κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή, όπως συμβαίνει στις μπαταρίες μολύβδου-οξέως.

Οι μπαταρίες νικελίου καδμίου έχουν το μεγαλύτερο κύκλο ζωής από κάθε άλλη διαθέσιμη μπαταρία αυτή την στιγμή (πάνω από 1.500 κύκλους) και δεν χρειάζονται συντήρηση, επίσης διαθέτουν καλή διάρκεια αποθήκευσης σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης και γρήγορη επαναφόρτιση. Στα αρνητικά έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με κάποια άλλα είδη μπαταριών. Το κάδμιο είναι επίσης τοξικό - επικίνδυνο για ανθρώπους και ζώα, έτσι από τη νομοθεσία της ΕΕ η χρήση του αναγκάστηκε (κυρίως σε οικιακές εφαρμογές) να αντικατασταθεί από Li - ion και NiMH τύπους μπαταριών.



Σχήμα 5.4: Μπαταρία ni-cd.

### 5.2.3 Νικελίου-μετάλλου - υδριδίου ( NiMH )

Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου (NiMH) είναι ιδιαίτερα εμπορικοί στις μέρες μας για μικρές φορητές συσκευές. Η γρήγορη ανάπτυξη των συσσωρευτών NiMH στην αγορά οφείλεται κυρίως στα περιβαλλοντικά και ενεργειακά πλεονεκτήματά τους έναντι των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου, αλλά και στην εκρηκτική ανάπτυξη των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών όπως είναι τα laptops και οι συσκευές επικοινωνίας. Χάρη στην τεχνολογική υπεροχή των συσσωρευτών νικελίου-μετάλλου υδριδίου σε σχέση με άλλους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές, οι NiMH άρχισαν να κατασκευάζονται και σε μεγαλύτερα μεγέθη για να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικά οχήματα και σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Τα τελευταία χρόνια, η ειδική ενέργεια και η ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών NiMH έχει αυξηθεί πάνω από 35% χάρη σε βελτιώσεις στο θετικό και αρνητικό ηλεκτρόδιο. Ταυτόχρονα, βελτιώσεις έχουν γίνει και στους κύκλους ζωής των NiMH.

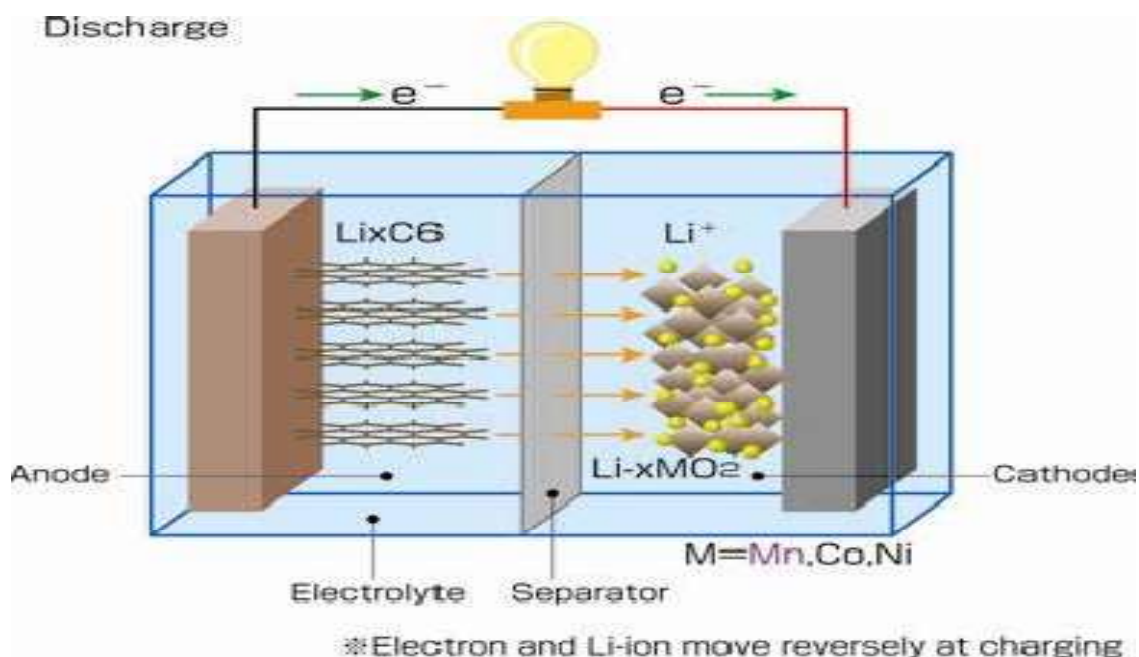
Η τεχνολογία μπαταριών νικελίου μετάλλου υδριδίου είναι παρόμοια με μια μπαταρία NiCd στο σχεδιασμό, με εξαίρεση ότι το κάδμιο αντικαθίσταται καθιστώντας τη λιγότερο επιζήμια για το περιβάλλον, μπαταρίες NiMH μπορούν επίσης να έχουν 2-3 φορές τη χωρητικότητα ενός ισοδύναμου μεγέθους NiCd, με πολύ λιγότερο σημαντική επίδραση μνήμης. Σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion), η πυκνότητα ενέργειας είναι μικρότερη και η αυτο-εκφόρτιση είναι μεγαλύτερη. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν υβριδικά οχήματα όπως το Toyota Prius, το ToyotaRAV4 – EV και άλλα.



Σχήμα 5.5: Η μπαταρία (NiMH) του Toyota prius.

#### 5.2.4 Ιόντων λιθίου( Li - ion )

Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές ιόντων λιθίου αποτελούνται από ηλεκτροχημικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούν ενώσεις παρεμβολής για το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Καθώς η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται, θετικά ιόντα λιθίου ανταλλάσσονται μεταξύ των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 5.6: Γενικό κύκλωμα μπαταριών Ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι σχετικά μια σύγχρονη τεχνολογία που έχει μια πολύ υψηλή πυκνότητα φορτίου (δηλαδή είναι ελαφριά μπαταρία που αποθηκεύει πολλή ενέργεια). Οι σημερινοί περιορισμοί περιλαμβάνουν την αστάθεια και το υψηλό κόστος. Η τεχνολογία σήμερα έχει ευρεία χρήση σε ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης (π.χ. κινητά τηλέφωνα), αλλά μόλις πρόσφατα άρχισε να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μεταφοράς (π.χ. το Tesla Roadster ηλεκτρικό αυτοκίνητο και σε μετατροπές Prius με ένα plug-in υβριδικό). Η General Motors και η Toyota πλέον κινούνται προς την κατεύθυνση χρησιμοποίησης περισσότερων μπαταριών ιόντων λιθίου. Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών τύπων μπαταρίας ιόντων λιθίου, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας είναι ότι δεν απαιτείται συντήρηση, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, ικανότητα γρήγορης φόρτισης, λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, έχουν χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης, ικανότητα εκφόρτισης σε μεγάλα ρεύματα και μεγάλη ισχύ, υψηλή απόδοση ενέργειας, υψηλή ειδική ενέργεια και ενεργειακή πυκνότητα και δεν παρουσιάζουν φαινόμενα μνήμης.

Ενώ τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι το μέτριο αρχικό κόστος, η χημική αλλοίωση σε υψηλές θερμοκρασίες, η ανάγκη κυκλώματος προστασίας, απώλεια χωρητικότητας και θερμική διαφυγή κατά την υπερφόρτιση και διαφυγή αερίων ή θερμική διαφυγή αν συνθλιβούν.

Οι βασικότεροι τύποι μπαταριών ιόντων λιθίου είναι:

Λίθιο φωσφορικού σιδήρου (LiFePO<sub>4</sub>):

Αυτός ο τύπος της μπαταρίας χρησιμοποιήθηκε αρκετά για τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρίες ιόντων-λιθίου, καθώς είναι αρκετά ασφαλές και προσφέρει μια καλή απόδοση σε μια λογική τιμή. Αλλά η ενεργειακή πυκνότητα είναι μικρότερη από ό, τι στις περισσότερες άλλες μπαταρίες ιόντων-λιθίου.

Lithium-Polymer (Li-Po):

Αυτό το είδος της μπαταρίας χρησιμοποιείται επίσης για φορητούς υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα, καθώς προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες LiFePO<sub>4</sub>.

Τιτανικού λιθίου:

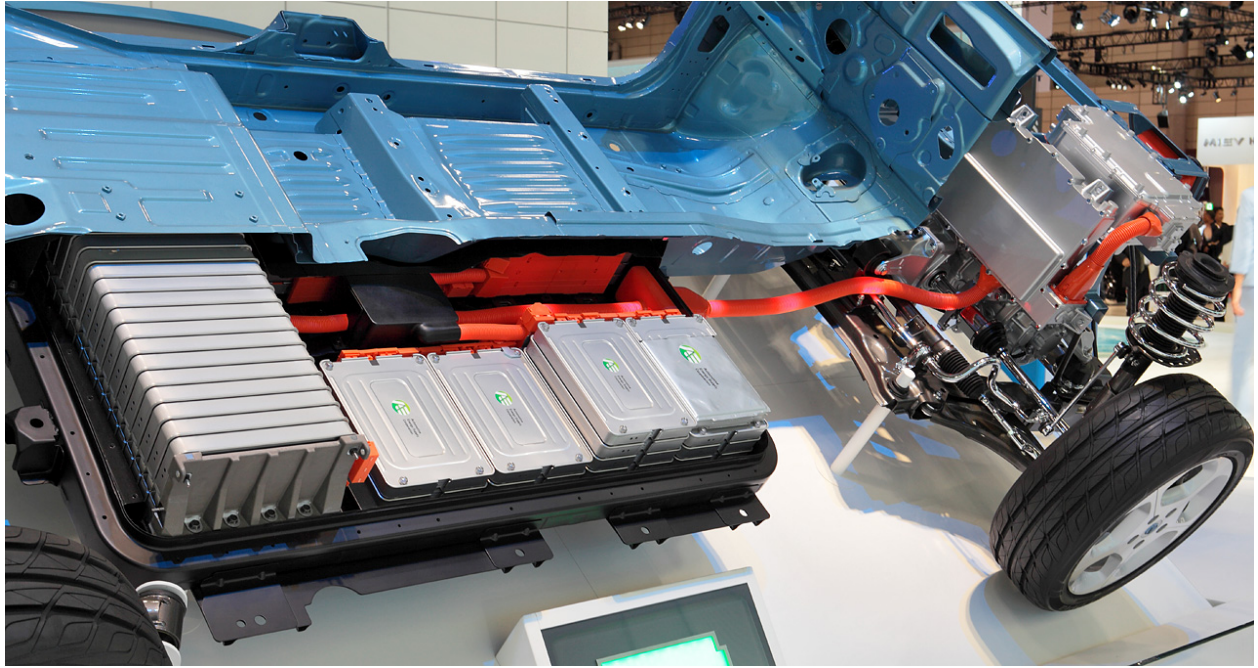
Αυτό το είδος της μπαταρίας βασίζεται σε μια μπαταρία LiFePO<sub>4</sub>, αλλά έχει μία βελτιωμένη άνοδο (τιτανικό λίθιο) το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η μπαταρία παρέχει μια πολύ καλή απόδοση αντοχής και ασφάλεια που καθιστά μια καλή επιλογή για γρήγορη φόρτιση και χρήση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ένα μειονέκτημα σε σύγκριση με άλλες μπαταρίες λιθίου-ιόντων είναι η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα.

Λιθίου Πυρίτιου:

Με τρεις φορές υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις συμβατικές μπαταρίες Li-ion, αυτός ο τύπος μπαταρίας αντιπροσωπεύει την επόμενη γενιά, δεν προβλέπεται να είναι στην αγορά πριν από το 2018.

Λιθίου αερα:

Τα κελια λιθίου αέρα περιέχουν έναν καταλύτη ως θετικό ηλεκτρόδιο που φορτίζει το λίθιο αρνητικά όταν έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Το δυναμικό όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα είναι 10 φορές υψηλότερο από τις σημερινές μπαταρίες λιθίου-ιόντων, φθάνοντας σε επίπεδα παρόμοια με την πυκνότητα ενέργειας της βενζίνης. Εμπορική ανάπτυξη δεν αναμένεται πριν από το 2025.



Σχήμα 5.7: Nissan Leaf Li-Ion battery pack

### 5.2.5 Νάτριο νικελίου (NaNiCl)

Η μπαταρία χλωριούχου νατρίου νικελίου, γνωστή ως η μπαταρία Zebra, ανήκει στην κατηγορία μπαταριών τηγμένου άλατος. Αυτές χρησιμοποιούν τήγματα αλάτων ως ηλεκτρολύτη, προσφέροντας τόσο μια υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, όπως επίσης και μια υψηλότερη πυκνότητα ισχύος καθιστώντας τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες τηγμένου άλατος μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την τροφοδοσία ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, το φυσιολογικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας είναι 270-350 °C, η οποία θέτει αυστηρότερες απαιτήσεις για τα υπόλοιπα συστατικά της μπαταρίας και μπορεί να φέρει προβλήματα της θερμικής διαχείρισης και ασφάλειας. Επιπλέον, υπάρχουν επίσης σημαντικές θερμικές απώλειες, όταν η μπαταρία δεν είναι σε χρήση.



Σχήμα 5.8: Μπαταρία  $\text{NaNiCl}$  (Zebra)

### 5.3 Επιλογή κατάλληλου συσσωρευτή

Με βάση τα δεδομένα που αναλύσαμε σε αυτό το κεφάλαιο καταλήξαμε στην επιλογή των μπαταριών τύπου ιόντων λιθίου ( $\text{Li-ion}$ ) για τους παρακάτω λόγους:

- δεν απαιτείται συντήρηση
- έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής
- ικανότητα γρήγορης φόρτισης
- λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών
- έχουν χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης
- ικανότητα εκφόρτισης σε μεγάλα ρεύματα και μεγάλη ισχύ
- υψηλή απόδοση ενέργειας
- υψηλή ειδική ενέργεια και ενεργειακή πυκνότητα
- δεν παρουσιάζουν φαινόμενα μνήμης

Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη και την ωρίμανση της συγκεκριμένης τεχνολογίας το κόστος έχει μειωθεί και πλέον χρησιμοποιούνται ευρέως και απο μεγάλους κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

	<b>Pb-Gel</b>	<b>NiMH</b>	<b>Na-NiCl<sub>2</sub></b>	<b>Li-Ion</b>
<b>Energy density (Wh/kg)</b>	20–50	40–80	100–120	110
<b>Power density (W/kg)</b>	80–100	<200–1300	110–150	500
<b>Operating temperature (°C)</b>	-10 to 40	-20 to 60	>300	-20 to 60
<b>Maintenance free</b>	yes	yes	yes	yes
<b>Lifetime (years)</b>	3–5			
<b>Lifetime (cycles)</b>	700–800	2000	>600	>2000
<b>Costs in mass production (\$/kWh)</b>	50–150	200	200	300–1000
<b>Special feature</b>	technically mature	fast charging possible	requires a heating and cooling system	needs battery management system

Σχήμα 5.9: Σύγκριση των τύπων μπαταριών (Hofmann 2010)

## 5.4 Συστήματα υποστήριξης μπαταριών

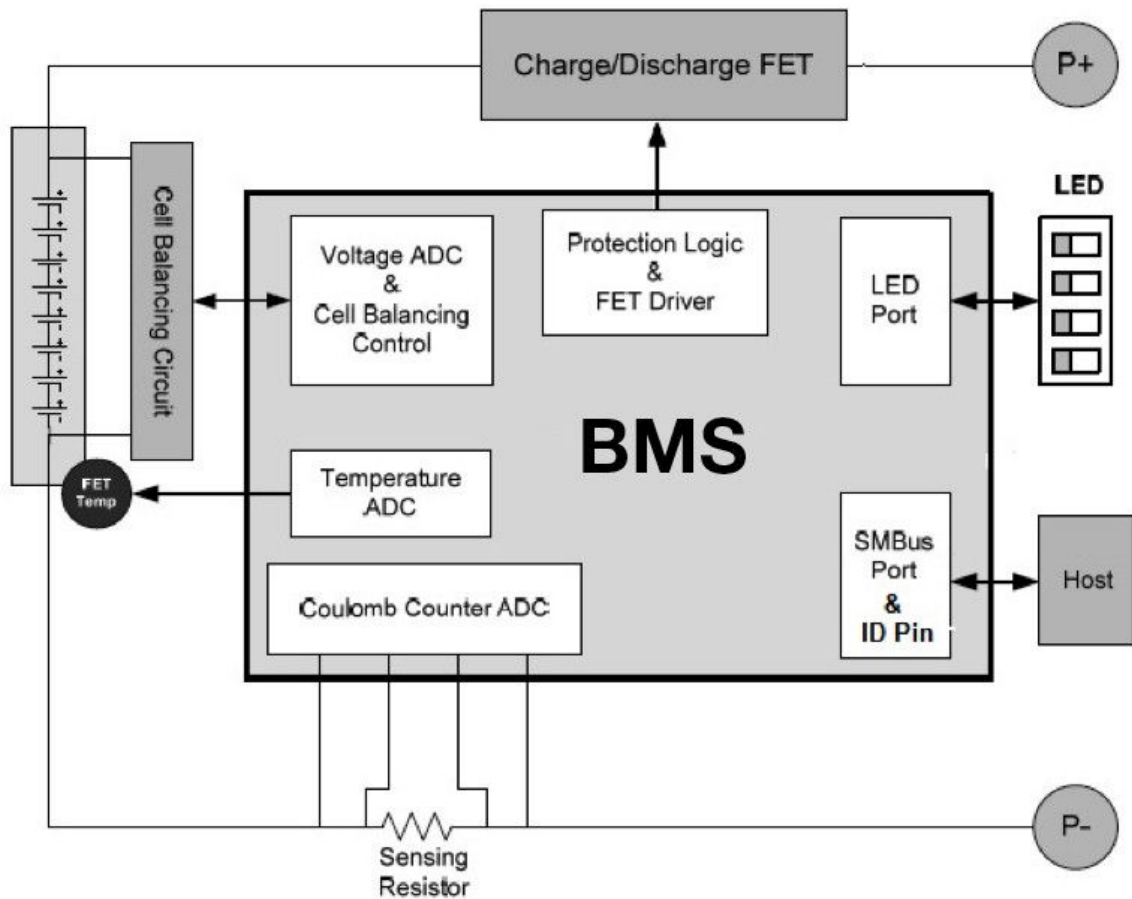
Τα συστήματα υποστήριξης συμβάλουν στη βελτίωση της απόδοσης των μπαταριών:

### 5.4.1 Σύστημα Διαχείρισης της Μπαταρίας

Η κίνηση των ηλεκτρικών οχημάτων χαρακτηρίζεται από αλλεπάλληλες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Απαιτείται λοιπόν να μπορεί η συστοιχία μπαταριών (battery pack) να ανταπεξέλθει στις πολύ γρήγορες φορτίσεις και εκφορτίσεις, οι οποίες συνοδεύουν αυτό το προφίλ κίνησης. Αυτό καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη ενός προηγμένου και με αυξημένες δυνατότητες συστήματος διαχείρισης της μπαταρίας (Battery Management System- BMS). Το BMS προσδίδει κατά κάποιο τρόπο «νοημοσύνη» στη συστοιχία μπαταριών, επιτρέποντας τη βέλτιστη και σε ασφαλή πλαίσια λειτουργία του. Συγκεκριμένα, επιτελεί τις παρακάτω λειτουργίες:



- Συλλέγει πληροφορίες από αισθητήρες για τα μεγέθη της τάσης, του ρεύματος, της θερμοκρασίας κ.α.
- Μέσα από επεξεργασία των μετρούμενων αυτών μεγεθών, προσδιορίζει χρήσιμα μεγέθη όπως το SOC, το SOH (State of Health), τη διαθέσιμη ενέργεια, τα χιλιόμετρα για τα οποία η ενέργεια αυτή επαρκεί.
- Καθιστά διαθέσιμες τις πληροφορίες αυτές στο χρήστη (π.χ μέσω fuel gauges) αλλά και πιθανόν σε άλλα συστήματα του οχήματος. Η χρήσιμη πληροφορία μεταφέρεται μέσω διαύλου επικοινωνίας (communication bus) από το BMS προς τα υπόλοιπα τμήματα.
- Ελέγχει το φορτιστή προκειμένου να διασφαλιστεί βέλτιστη φόρτιση της μπαταρίας.
- Φροντίζει για την εξισορροπημένη φόρτιση όλων των στοιχείων που απαρτίζουν τη συστοιχία (cell balancing). Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η βέλτιστη επίδοση της μπαταρίας.
- Εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία της μπαταρίας. Αποτρέπει την υπερφόρτιση και υπερ-εκφόρτιση της μπαταρίας και άλλες καταστάσεις που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τον εξοπλισμό ή το χρήστη.
- Επιτελεί θερμική διαχείριση. Το BMS παρακολουθεί τη θερμοκρασία κάθε στοιχείου της μπαταρίας τόσο κατά τη φόρτιση όσο και κατά την εκφόρτιση και αναλόγως προσαρμόζει τη ψύξη / θέρμανση.
- Βοηθά στη διάγνωση και συντήρηση της μπαταρίας. Ο εξοπλισμός διάγνωσης και συντήρησης συνδέεται με το BMS προκειμένου να επιτελέσει το έργο του.
- Εξασφαλίζει τη διεπαφή της μπαταρίας με τον κεντρικό ελεγκτή του οχήματος. Η επικοινωνία γίνεται μέσω του διαύλου CAN (CAN bus- Controller Area Network bus). Κατά αυτόν τον τρόπο το BMS μπορεί να επικοινωνεί με τα υπόλοιπα συστήματα του οχήματος (π.χ με το αντικλεπτικό σύστημα το οποίο θα αποσυνδέει την μπαταρία σε περίπτωση απόπειρας κλοπής)



Σχήμα 5.10: Το Block διάγραμμα ενός BMS για μια χαρακτηριστική μπαταρία

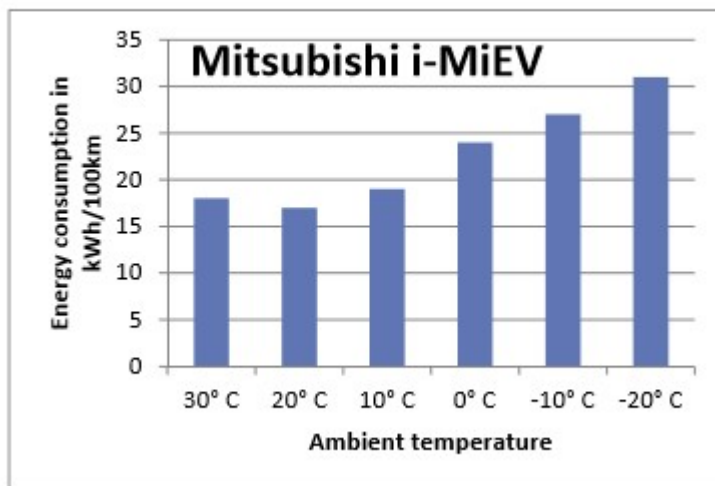
Μια από τις σημαντικές λειτουργίες που επιτελεί το BMS είναι και η εξισορροπημένη φόρτιση των στοιχείων, έτσι ώστε όλα τα στοιχεία να βρίσκονται, στο τέλος μιας πλήρους φόρτισης, στην ίδια στάθμη φόρτισης.

Ένα σημαντικό σημείο που βρίσκει εφαρμογή σε όλους τους τύπους μπαταριών είναι η διαδικασία εξισορρόπησης του φορτίου μεταξύ των στοιχείων της συστοιχίας. Το πρόβλημα είναι ότι όταν εκφορτίζεται η μπαταρία δεν χάνουν όλα τα στοιχεία της μπαταρίας το ίδιο ποσό φορτίου (δηλαδή δεν εκφορτίζονται εξίσου). Στην περίπτωση μιας συστοιχίας από εν σειρά συνδεδεμένα στοιχεία, το γεγονός αυτό φαίνεται εκ πρώτης άποψης περίεργο, αφού το ίδιο ρεύμα ρέει από όλα τα εν σειρά στοιχεία. Όμως, ο διαφορετικός βαθμός εκφόρτισης οφείλεται στο ότι ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης (με την πάροδο του χρόνου) μεταξύ των διαφόρων στοιχείων της ίδιας συστοιχίας είναι διαφορετικός. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται αφενός σε κατασκευαστικές διαφορές και αφετέρου σε θερμοκρασιακές διαφορές που εξαρτώνται από τη χωρική κατανομή της συστοιχίας.

#### 5.4.2 Σύστημα ψύξης και θέρμανσης

Η απόδοση των μπαταριών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ειδικά σε ψυχρές καιρικές συνθήκες, η απόδοση μειώνεται αρκετά. Το Σχήμα 5.11 δείχνει τη συσχέτιση αυτή για ένα Mitsubishi-MiEV που είναι εξοπλισμένο με μπαταρίες λιθίου-ιόντων. Η βέλτιστη θερμοκρασία όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας είναι περίπου στους 20 ° C.

Ένα σύστημα ψύξης και θέρμανσης μπορεί να κρατήσει την μπαταρία σε μια βέλτιστη περιοχή θερμοκρασίας και έτσι να βοηθήσει να βελτιωθεί η απόδοση και των δύο, της μπαταρίας και του οχήματος.



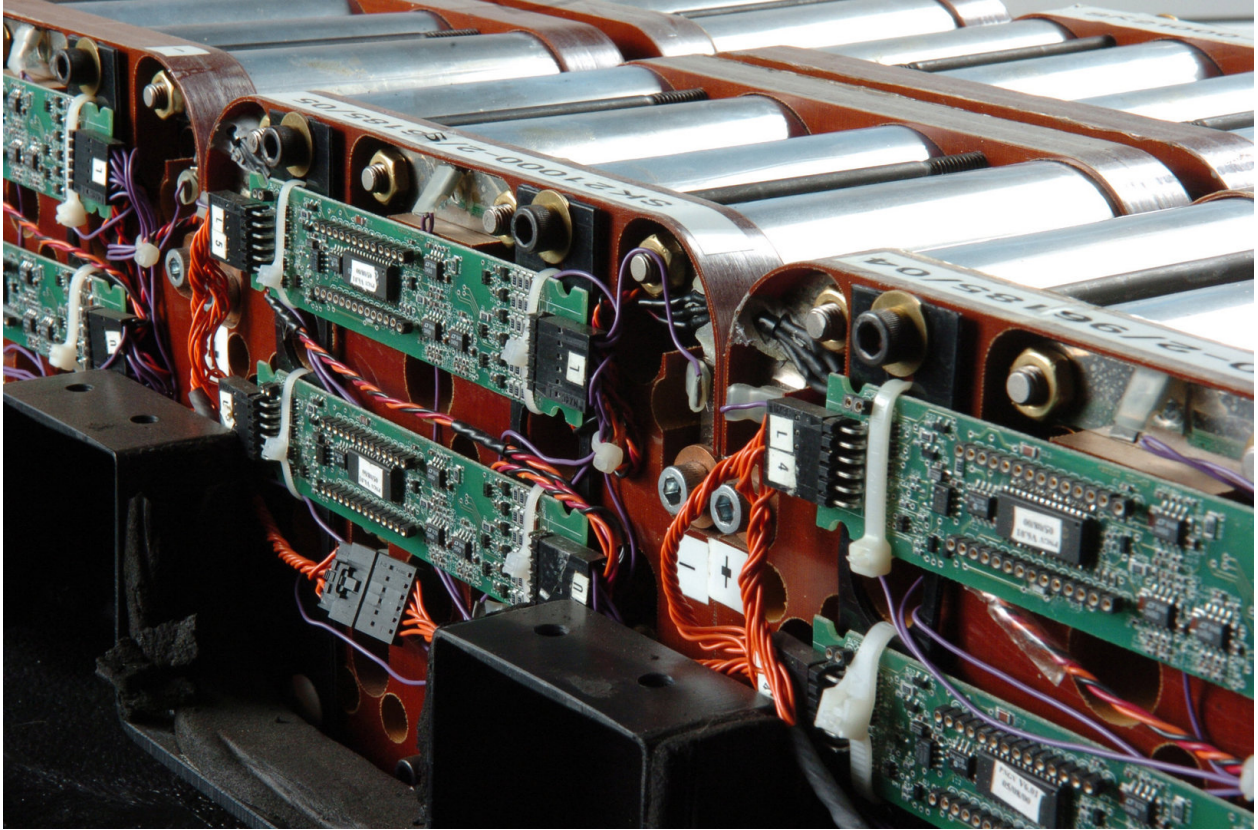
Σχήμα 5.11: Απόδοση των μπαταριών του Mitsubishi-MiEV σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

#### 5.4.3 Συστοιχία μπαταριών

Τα στοιχεία των διατάξεων από μόνα τους δεν συνθέτουν πλήρεις διατάξεις. Για το λόγο αυτό συνδυάζονται σε συστοιχίες. Οι συστοιχίες μπαταριών (battery pack) μαζί με τις μονάδες των ηλεκτρονικών ισχύος και του συστήματος ελέγχου αποτελούν το σύστημα μετάδοσης κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος. Με την εν σειρά σύνδεση του κατάλληλου πλήθους στοιχείων επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο τάσης εξόδου. Με την παράλληλη σύνδεση επιτυγχάνεται η παροχή της επιθυμητής τιμής ρεύματος.

Οι προδιαγραφές ισχύος και ενέργειας θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του οχήματος. Συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις που τίθενται για

την χρήση του οχήματος προδιαγράφουν και την τιμή της ισχύος που πρέπει να είναι σε θέση να αποδώσει η συστοιχία μπαταριών. Αντίστοιχα, οι απαιτήσεις σε αυτονομία του οχήματος προδιαγράφουν και την ενέργεια που απαιτείται να εμπεριέχει η συστοιχία.



Σχήμα 5.12:Συστοιχία μπαταριών ηλεκτρικού οχήματος

#### 5.4.4 Ομαδοποίηση-πακετάρισμα μπαταριών

Τα υλικά γύρω από τη μπαταρία, επίσης, έχουν άμεση επίδραση στην πυκνότητα, απόδοση και την ενέργεια της μπαταρίας, αυτά είναι.:

- Το κουτί-δοχείο που τοποθετούνται οι μπαταρίες
- Τα υλικά που συγκρατούν τις μπαταρίες
- Τα καλώδια που συνδέουν τις μπαταρίες μεταξύ τους
- Τα υλικά διασύνδεσης των μπαταριών με το όχημα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

#### 6.1 Εισαγωγή

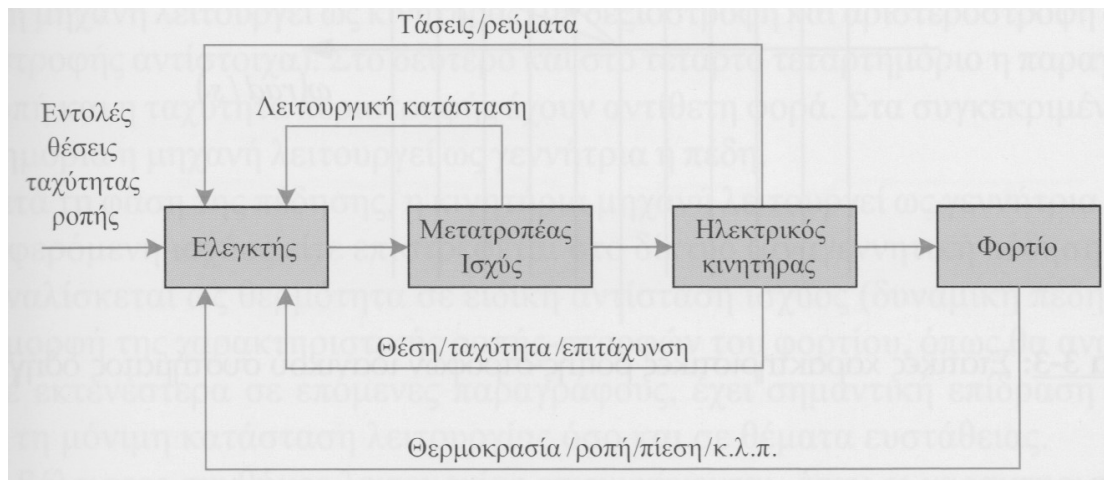
Η πραγματική επανάσταση στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, ήρθε όταν αποκτήθηκε η δυνατότητα για ακριβή έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων, ώστε να επιτυγχάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα και μάλιστα αυτόματα. Αρχικά επιχειρήθηκε ο έλεγχος με απλά μηχανικά ή ηλεκτρικά συστήματα (όπως π.χ. οι λυχνίες κενού) τα οποία δεν είχαν αρκούντως ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ η απόδοσή τους ήταν εξαιρετικά χαμηλή. Η εφεύρεση που άλλαξε εντελώς το τοπίο δίνοντας πρωτόγνωρες μέχρι τότε δυνατότητες ελέγχου ήταν το τρανζίστορ, που παρουσιάστηκε από τους William Shockley, John Bardeen και H.Brattain στις 22/01/1947. Η εξέλιξη του τρανζίστορ και η εμφάνιση τα αμέσως επόμενα χρόνια των «απογόνων» του όπως το θυρίστορ (Thyristor) (1957), το MOSFET (1969) και οι αμέσως επόμενες εξελίξεις τους για εφαρμογές ισχύος όπως το SCR, το GTO και το IGBT έδωσαν τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων ηλεκτρικών ισχύων με εξαιρετικά μεγάλες διακοπτικές συχνότητες.

Με την έλευση των ηλεκτρονικών ισχύος δόθηκε στους μηχανικούς η δυνατότητα να κατασκευάσουν προηγμένες διατάξεις ελέγχου και να αναπτύξουν τους απαραίτητους αλγορίθμους. Ιδιαίτερα με τους μετατροπείς ισχύος δόθηκε η δυνατότητα τροφοδοσίας των κινητήρων με τάσεις μεταβλητού πλάτους και συχνότητας, γεγονός που επέτρεψε τον πλήρη έλεγχό τους με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο. Σημαντικό ρόλο βεβαίως διαδραμάτισε και η εισαγωγή νέων και διαρκώς εξελισσόμενων τεχνικών ελέγχων, οι οποίες σήμερα επιτρέπουν τον έλεγχο με ηλεκτρονικό τρόπο λ.χ. μέσω ενός ψηφιακού ή ενός αναλογικού υπολογιστή κάθε σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών προδιαγραφών συνοδεύεται απαραίτητος από τον κατάλληλο μετατροπέα ισχύος, για τον οποίο έχει αναπτυχθεί και εγκατασταθεί το κατάλληλο υλικό και λογισμικό έλεγχου.

Οι διατάξεις οδήγησης και ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων (έλεγχος θέσης, ταχύτητας, ροπής), χρησιμοποιούνται με σκοπό τη συνεχή αναπροσαρμογή της κινητήριας μηχανής στις απαιτήσεις του κινουμένου συστήματος (φορτίο).

Η σωστή σχεδίαση ενός συστήματος κίνησης απαιτεί πλήρη γνώση της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς όλων των επιμέρους συνιστωσών του, καθόσον με τη δράση και την αλληλεπίδρασή τους επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η δομή ενός στοιχειώδους συστήματος κίνησης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.1: Δομικό διάγραμμα στοιχειώδους συστήματος κίνησης.

Ο κινητήρας μαζί με το μετατροπέα ισχύος αποτελούν το λεγόμενο σύστημα οδήγησης του μηχανικού φορτίου. Βασικές μεταβλητές ελέγχου, όπως προαναφέραμε, μπορεί να είναι η ροπή, η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η θέση ή και ο οποιοσδήποτε συνδυασμός αυτών. Έχοντας λοιπόν καθορίσει τις απαιτήσεις του μηχανικού φορτίου, ο μετατροπέας ισχύος μέσω του συστήματος ελέγχου τροφοδοτεί τον κινητήρα με το κατάλληλο ρεύμα και τάση, έτσι ώστε να εξασφαλίσει την επιθυμητή λειτουργία.

Στην περίπτωση συστημάτων ελέγχου κλειστού βρόχου, το σήμα ελέγχου του μετατροπέα ισχύος προέρχεται από τη βαθμίδα ανατροφοδότησης, η οποία στη γενική περίπτωση περιλαμβάνει το μετατροπέα της ελεγχόμενης μεταβλητής σε κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα (π.χ. ταχογεννήτρια), τον ενισχυτή και ίσως κάποιο φίλτρο (συνήθως 1ης τάξης). Το σφάλμα, δηλαδή η απόκλιση του ελεγχόμενου μεγέθους από την επιθυμητή τιμή (τιμή αναφοράς), αποτελεί την είσοδο της βαθμίδας ελέγχου (PID ελεγκτής). Η έξοδος της μονάδας ελέγχου αποτελεί το σήμα ελέγχου του μετατροπέα ισχύος. Στην περίπτωση ελέγχου περισσότερων της μιας παραμέτρων, το τελικό σήμα ελέγχου προέρχεται από το συνδυασμό των επιμέρους σημάτων. Εξυπακούεται ότι το κύκλωμα θα περιέχει αντίστοιχους βρόχους ανατροφοδότησης.

## 6.2 Τεχνικές ελέγχου κινητήρα επαγωγής

### 6.2.1 Βασικές τεχνικές ελέγχου

Ο έλεγχος των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται μέσω των ακόλουθων τεχνικών:

#### 1) Κλιμακωτός ή βαθμωτός έλεγχος (Scalarcontrol)

Στο κλιμακωτό έλεγχο, ο οποίος βασίζεται σε σχέσεις μόνιμης κατάστασης της μηχανής επαγωγής, χρησιμοποιείται μόνο η RMS τιμή και η συχνότητα των χωρικών διανυσμάτων της τάσης, του ρεύματος και της μαγνητικής ροής. Ο κλιμακωτός έλεγχος δεν επιδρά πάνω στη θέση των χωρικών διανυσμάτων κατά τις μεταβατικές καταστάσεις. Κλιμακωτός έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί:

μεταβάλλοντας την RMS τιμή της τάσης του στάτη κρατώντας τη συχνότητα σταθερή (πάρα πολύ απλός έλεγχος αλλά μειώνει τις δυνατότητες παραγόμενης ροπής του κινητήρα)  
μεταβάλλοντας τη συχνότητα της τάσης του στάτη κρατώντας την RMS τιμή σταθερή (πάρα πολύ απλός έλεγχος αλλά μειώνει τις δυνατότητες παραγόμενης ροπής του κινητήρα)  
μεταβάλλοντας την RMS τιμή και τη συχνότητα της τάσης του στάτη έτσι ώστε ο λόγος να είναι  $V/f$  (η πιο διαδεδομένη μέθοδος λόγω της απλότητάς της)

#### 2) Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (Direct Torque and Flux Control, DTC ή DTFC)

Η γωνία της μαγνητικής ροής του δρομέα υπολογίζεται άμεσα από την εκτίμηση ή από μέτρηση. Η τεχνική DTC χρειάζεται μόνο τη γνώση της αντίστασης του στάτη και κατά συνέπεια μειώνει την ευαισθησία που συνδέεται με την αλλαγή των παραμέτρων και επίσης δεν χρησιμοποιεί ανάδραση ταχύτητας. Στον άμεσο διανυσματικό έλεγχο ροπής και ροής ως είσοδοι εμφανίζονται οι επιθυμητές τιμές της ροπής και της μαγνητικής ροής, η μέτρηση της οποίας γίνεται με τοποθέτηση αισθητήρων Hall στο διάκενο, ή με τοποθέτηση αισθητηρίων πηνίων στο στάτη, ή με χρήση τυλιγμάτων του στάτη ως αισθητήρια πηνία. Η τεχνική DTC, η οποία χρησιμοποιεί αλγορίθμους που βασίζονται σε έλεγχο με υστέρηση έχει το μειονέκτημα

της μεταβλητής διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα ισχύος και κατά συνέπεια να χρειάζεται μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας. Η τεχνική DTC μπορεί να θεωρηθεί ως μια τεχνική βαθμωτού ελέγχου.

### **3) Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control, FOC)**

Αντιθέτως με το βαθμωτό έλεγχο και την DTC τεχνική ο διανυσματικός έλεγχος, ο οποίος χρησιμοποιεί σχέσεις και μοντέλα δυναμικής κατάστασης της μηχανής επαγωγής, έχει τη δυνατότητα ελέγχου του μέτρου, της συχνότητας και τη θέση των χωρικών διανυσμάτων της τάσης, του ρεύματος και της μαγνητικής ροής. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει τη αποσύζευξη του ελέγχου της ροπής και της μαγνητικής ροής. Οι τεχνικές FOC αν και μπορούν να ελέγχουν ξεχωριστά τη ροπή και τη μαγνητική ροή της μηχανής επαγωγής, είναι εξαρτημένες σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους της μηχανής και τη ταχύτητα της μηχανής και κατά συνέπεια αυτό μειώνει την ευρωστία του ελέγχου.

Υπάρχουν δύο τεχνικές επίτευξης του ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου: ο άμεσος και ο έμμεσος έλεγχος:

#### **α) Άμεσος διανυσματικός έλεγχος (Direct Field Oriented Control, DFOC)**

Στον άμεσο έλεγχο το διάνυσμα ροής (μέτρο και θέση) του δρομέα υπολογίζεται άμεσα από τις ποσότητες μέτρησης του κινητήρα.

#### **β) Έμμεσος διανυσματικός έλεγχος (Indirect Field Oriented Control, IFOC)**

Στον έμμεσο έλεγχο το διάνυσμα μαγνητικής ροής (μέτρο και θέση) του δρομέα υπολογίζεται έμμεσα από τις υπάρχουσες εκτιμήσεις ταχύτητας και ολίσθησης.

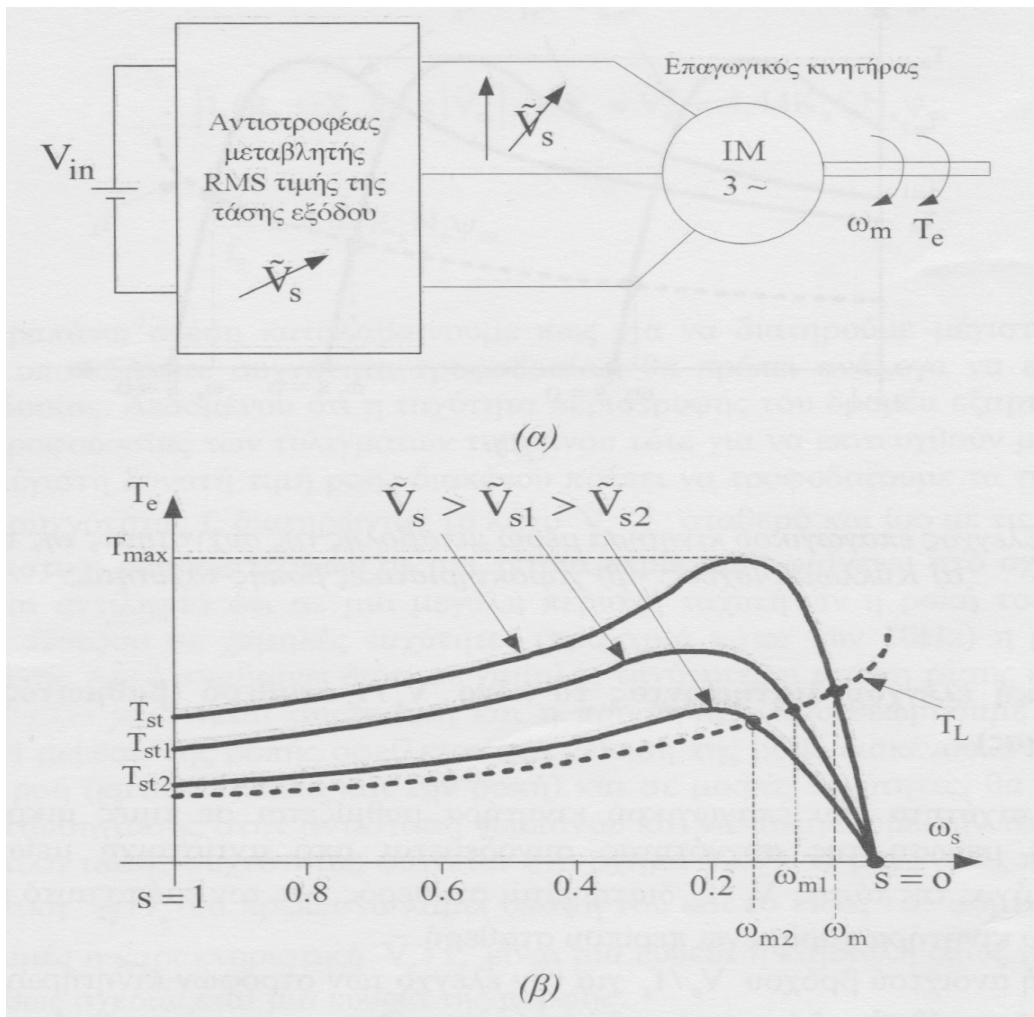
### **4) Ευφυείς τεχνικές ελέγχου**

Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι ασαφούς λογικής (fuzzy logic) και χρήση νευρωνικών δικτύων (neural networks) έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερος έλεγχος της μηχανής.



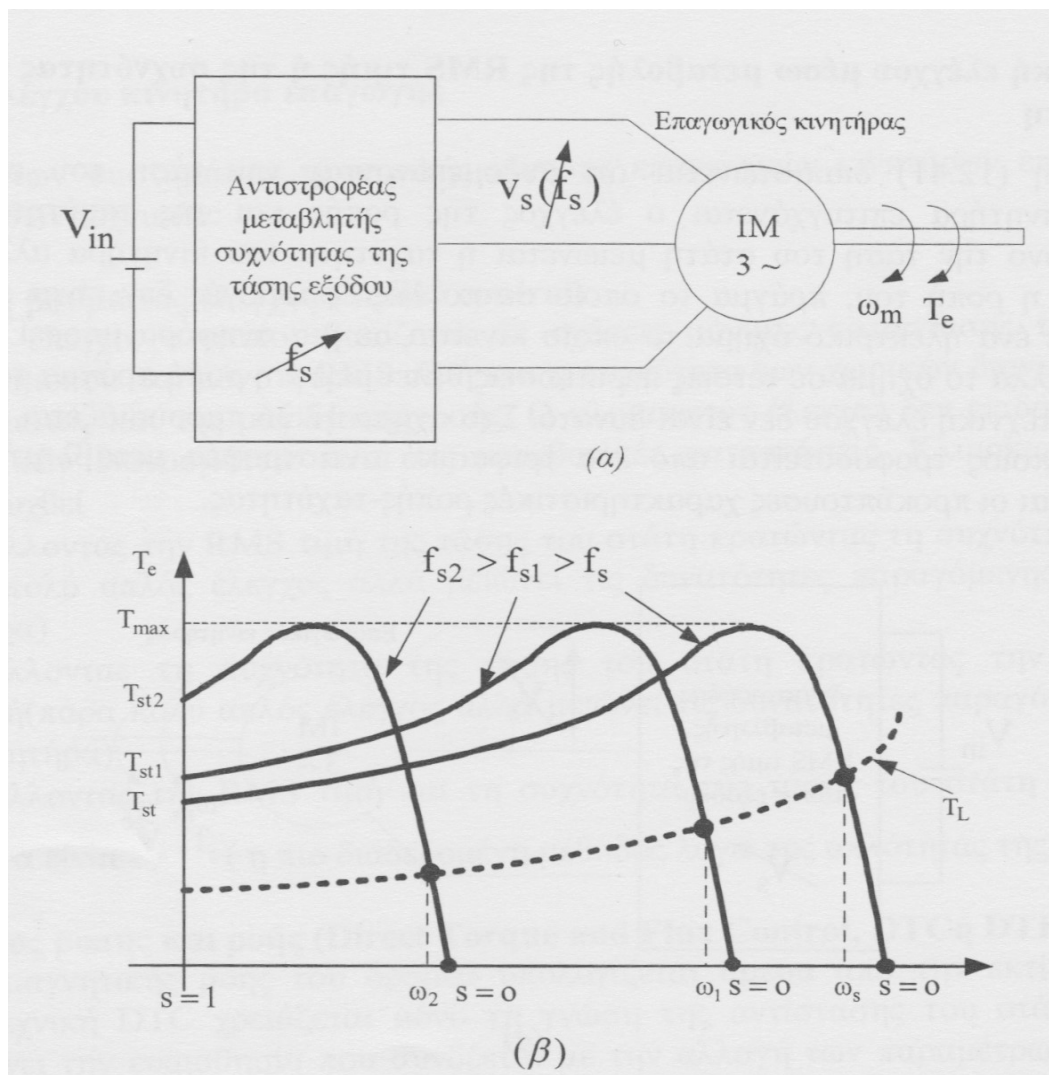
## 6.2.2 Τεχνική ελέγχου μέσω μεταβολής της RMS τιμής ή της συχνότητας της τάσης του στάτη

Αυξομειώνοντας την τάση του στάτη  $V_s$  ενός επαγωγικού κινητήρα επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ροπής και της ταχύτητάς του. Όμως μειώνοντας μόνο την τάση του στάτη μειώνεται η ταχύτητα του κινητήρα αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και η ροπή του, πράγμα το οποίο σε πολλές εφαρμογές δεν είναι επιθυμητό. Για παράδειγμα σε ένα ηλεκτρικό όχημα το οποίο κινείται σε μια ανηφόρα μπορεί η ταχύτητα να είναι χαμηλή αλλά το όχημα σε τέτοιες περιπτώσεις θέλει μεγίστη ροπή πράγμα το οποίο με τη συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου δεν είναι δυνατό. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται ένας κινητήρας επαγωγής ο οποίος τροφοδοτείται από ένα τριφασικό αντιστροφέα μεταβλητής RMS τάσης στάτη καθώς και οι προκύπτουσες χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας.



Σχήμα 6.2: Έλεγχος επαγωγικού κινητήρα μέσω μεταβολής της RMS τιμής της τάσης του στάτη. α) Κύκλωμα ισχύος, β) χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας.

Επίσης από τη σχέση διαπιστώνεται ότι μεταβάλλοντας τη συχνότητα της τάσης του στάτη  $\omega_s$  επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ροπής και της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα. Όμως μειώνοντας μόνο τη συχνότητα της τάσης του στάτη μειώνεται η ταχύτητα του κινητήρα αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και η ροπή του, πράγμα το οποίο σε πολλές εφαρμογές δεν είναι επιθυμητό. Σε όλες τις εφαρμογές πρέπει ο κινητήρας σε όποια ταχύτητα και εάν βρίσκεται να παρέχει μέγιστη δυνατή ροπή. Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας όταν μεταβάλλεται η συχνότητα της τάσης του στάτη.



Σχήμα 6.3. Έλεγχος επαγωγικού κινητήρα μέσω μεταβολής της συχνότητας της τάσης του στάτη. α) Κύκλωμα ισχύος, β) χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας.

### 6.2.3 Τεχνική ελέγχου διατηρώντας το λόγο $V_s/f_s$ σταθερό (βαθμωτός ή μονόμετρος έλεγχος)

Όταν η ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες από την ονομαστική, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης  $V_s/f_s$  διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή.

Η τεχνική ανοιχτού βρόχου  $V_s/f_s$  για τον έλεγχο των στροφών κινητήρων επαγωγής είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος λόγω της απλότητάς της. Οι κινητήρες επαγωγής σχεδιάστηκαν να λειτουργούν με τροφοδοσία σταθερής συχνότητας δικτύου σε εφαρμογές σταθερής ταχύτητας. Καθώς οι απαιτήσεις για ρύθμιση της ταχύτητας αυτών των κινητήρων μεγάλωναν ήταν απαραίτητος ο έλεγχος της συχνότητας και της τάσης τροφοδοσίας τους.

Η συμπεριφορά του ασύγχρονου κινητήρα, όταν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος ( $\omega_r = 0$ ), είναι όμοια με εκείνη ενός μετασχηματιστή, στο μαγνητικό κύκλωμα του οποίου παρεμβάλλεται και ένα διάκενο αέρος. Οι επαγόμενες τάσεις στο δρομέα στην περίπτωση αυτή, έχουν την ίδια συχνότητα με την τάση τροφοδοσίας.

Η λειτουργία με σταθερή ροή εξασφαλίζει ονομαστική ροπή για οποιαδήποτε ταχύτητα λειτουργίας. Στην πράξη, δεδομένου ότι δεν μπορούμε να ξεπεράσουμε τα ονομαστικά χαρακτηριστικά μιας μηχανής, για συχνότητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, η τάση τροφοδοσίας παραμένει σταθερή και ίση με την ονομαστική. Η περιοχή αυτή λειτουργίας ονομάζεται και περιοχή σταθερής ισχύος. Τα συστήματα που υλοποιούν μια τέτοια τεχνική ελέγχου χωρίζονται σε συστήματα ανοιχτού και συστήματα κλειστού βρόχου. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου είναι πολύ απλά στην υλοποίηση αλλά δεν προσδίδουν μεγάλη ακρίβεια στο σύστημα δεδομένου ότι δεν επιτηρούν της ελεγχόμενες μεταβλητές. Τα συστήματα κλειστού βρόχου είναι πιο πολύπλοκα στην υλοποίηση αλλά προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια δεδομένου ότι μπορούν να επιτηρούν της ελεγχόμενες μεταβλητές όπως είναι η ταχύτητα του δρομέα ή το ρεύμα του τυμπάνου.

Στην εν λόγω τεχνική ελέγχου είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η τεχνική της Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (SPWM) για τον έλεγχο του αντιστροφέα. Η τεχνική αυτή προσφέρει μειωμένη αρμονική παραμόρφωση στα ρεύματα της μηχανής, αφού οι αρμονικές συνιστώσες περιορίζονται σε συχνότητες πέριξ της συχνότητας της τριγωνικής κυματομορφής φορέα και άνω (για τριφασικό αντιστροφέα). Οι αρμονικές αυτές συνιστώσες, οι οποίες βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες, δεν απαιτούν στις συνήθεις εφαρμογές τη χρήση

φίλτρων για την καταστολή τους, αφού τις περισσότερες φορές φιλτράρονται σε ικανοποιητικό βαθμό από την επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων του στάτη.

Συμπερασματικά, η περιγραφείσα τεχνική ελέγχου είναι ιδιαίτερα απλή και παρουσιάζει ελάχιστη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών που δεν απαιτούν μεγάλη ακρίβεια και ιδιαίτερα καλή μεταβατική συμπεριφορά, όπως ανεμιστήρες, αντλίες κλπ.

#### **6.2.4 Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (Direct Torque Control, DTC)**

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 μια νέα τεχνική ελέγχου παρουσιάστηκε για συστήματα οδήγησης κινητήρων επαγωγής. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως άμεσος έλεγχος ροπής και ροής ή άμεσος αυτοέλεγχος. Η βασική ιδέα του DTC είναι να ελέγχεται άμεσα ταυτόχρονα η μαγνητική ροή του στάτη (ή μαγνητικά ροή του δρομέα) και η ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής με την επιλογή βέλτιστων διακοπτικών φάσεων του αντιστροφέα. Η τεχνική αυτή πολύ σύντομα εφαρμόστηκε σε πολλά εμπορικά προϊόντα και συγκέντρωσε πολύ μεγάλο ενδιαφέρον μελέτης από την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα. Η λογική ελέγχου βασίζεται στην ιδέα του άμεσου ελέγχου της ροπής και της ροής του στάτη από έναν αντιστροφέα με επιλογές διανύσματος τάσης τροφοδοσίας από έναν πίνακα. Η ονομασία DTC του δόθηκε για να τονίσει το γεγονός ότι δεν απαιτείται στο κύκλωμα ελέγχου εξωτερικός βρόχος ρύθμισης της θέσης ή της ταχύτητας (και επομένως η μέτρηση ταχύτητας χρειάζεται αποκλειστικά για τον υπολογισμό της θέσης και του μέτρου του διανύσματος μαγνητικής ροής στον κινητήρα) και αναφέρεται στον έλεγχο της ροπής και της ροής χωρίς τη χρήση των εσωτερικών βρόχων ρύθμισης του ρεύματος. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απλότητα στην εφαρμογή καθώς και η ικανοποιητική δυναμική συμπεριφορά.

Ο Άμεσος Έλεγχος Ροπής παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχήν, με την απουσία προκαθορισμένου τρόπου παλμοδότησης, μπορούν να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες απόκρισης καθώς και μεγάλη ακρίβεια. Παρόλη την πολυπλοκότητα της μεθόδου, η υλοποίηση της γίνεται απλούστερη λόγω της δυνατότητας απουσίας συσκευών ανάδρασης. Με τη μέθοδο αυτή ο έλεγχος του ασύγχρονου κινητήρα γίνεται εξ ίσου απλός με αυτόν του κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Τέλος, μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος που μπορεί να προκαλέσει μηχανικές βλάβες.

Στα μειονεκτήματα χρεώνεται η ύπαρξη κυμάτωσης στη ροή και στη ροπή λόγω της υστέρησης που εμφανίζουν οι αντίστοιχοι συγκριτές, καθώς και η εμφάνιση επίδρασης αρμονικών συχνοτήτων, ιδιαίτερα όταν η διακοπτική συχνότητα των στοιχείων είναι χαμηλή. Με την υιοθέτηση ασαφούς λογικής αντί του μαθηματικού μοντέλου η μέθοδος μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο σε αυτούς τους τομείς.

Το δομικό διάγραμμα της τεχνικής DTC παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Οι επιθυμητές τιμές της ροής του στάτη  $|\psi_s^*|$  και της ροπής  $T_s^*$  συγκρίνονται με τις αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές. Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 1 παίρνουμε μετρήσεις από την είσοδο του κινητήρα (δηλ. το στάτη) για τις τρεις τάσεις και τα τρία ρεύματα. Στη συνέχεια αυτές οι τριφασικές μετρήσεις μετασχηματίζονται στο διφασικό ακίνητο πλαίσιο αναφοράς  $ds^s$ - $qs^s$ . Οι εξισώσεις του κινητήρα επαγωγής οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στον εκτιμητή για την εκτίμηση της μαγνητικής ροής του στάτη  $\psi_s$  και το μέτρο της ηλεκτρομαγνητικής ροής  $T_e$  στο ακίνητο πλαίσιο αναφοράς σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\vec{V}_r^s = R_r \vec{i}_r^s + \frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} - j\omega_r \vec{\psi}_r^s$$

$$\begin{aligned} T_e &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\psi_{dm^x} i_{qr^x} - \psi_{qm^x} i_{dr^x}) = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\psi_{ds^x} i_{qs^x} - \psi_{qs^x} i_{ds^x}) \\ &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \frac{L_m}{L_r} (\psi_{dr^x} i_{qs^x} - \psi_{qr^x} i_{ds^x}) = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) L_m (i_{qs^x} i_{dr^x} - i_{ds^x} i_{qr^x}) \end{aligned}$$

δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\vec{\psi}_s^s = \int (\vec{V}_s^s - R_s \vec{i}_s^s) dt \quad \text{ή} \quad \begin{bmatrix} \psi_{ds^s} \\ \psi_{qs^s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int (V_{ds^s} - R_s i_{ds^s}) dt \\ \int (V_{qs^s} - R_s i_{qs^s}) dt \end{bmatrix}$$

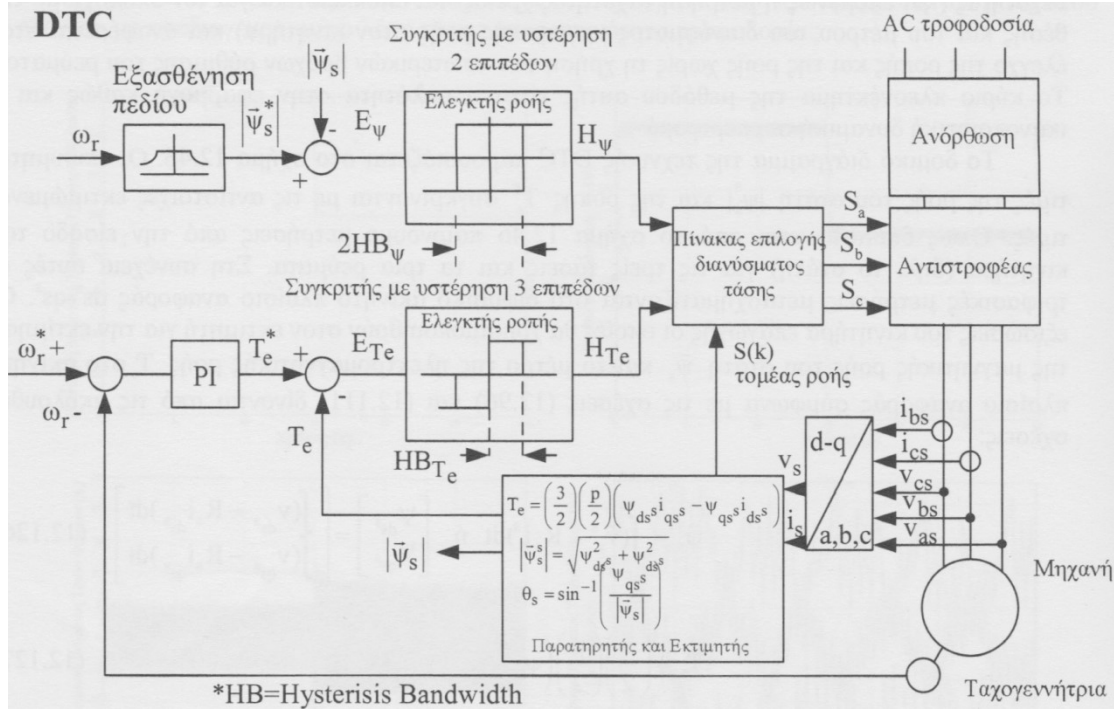
$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\psi_{ds^s} i_{qs^s} - \psi_{qs^s} i_{ds^s})$$

Το μέτρο και η θέση της μαγνητικής ροής στο ακίνητο πλαίσιο αναφοράς δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$|\vec{\psi}_s^s| = \sqrt{\psi_{ds^s}^2 + \psi_{qs^s}^2}$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{\psi_{qs^s}}{\psi_{ds^s}} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{\psi_{qs^s}}{|\vec{\psi}_s^s|} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{\psi_{ds^s}}{|\vec{\psi}_s^s|} \right)$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι για να γίνουν οι παραπάνω εκτιμήσεις θα πρέπει η αντίσταση του στάτη  $R_s$  να είναι γνωστή.



Σχήμα 6.4: Δομικό διάγραμμα της τεχνικής άμεσου ελέγχου ροπής και ροής (DTC).

Τα σφάλματα που προκύπτουν περνούν από ελεγκτές με υστέρηση όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.4. Ο ελεγκτής της ροής παράγει τα ακόλουθα δύο επίπεδα εξόδου:

$$H_{\psi} = 1 \text{ όταν } E_{\psi} > +HB_{\psi}$$

$$H_{\psi} = -1 \text{ όταν } E_{\psi} < -HB_{\psi}$$

Όπου  $2HB_{\psi}$  είναι το συνολικό εύρος ζώνης της υστέρησης του ελεγκτή της ροής. Η περιστροφική κίνηση του διανύσματος της ροής του στάτη με ελεγκτή, ο οποίος περιέχει ζώνη υστέρησης, παρουσιάζεται στο σχήμα 2α.

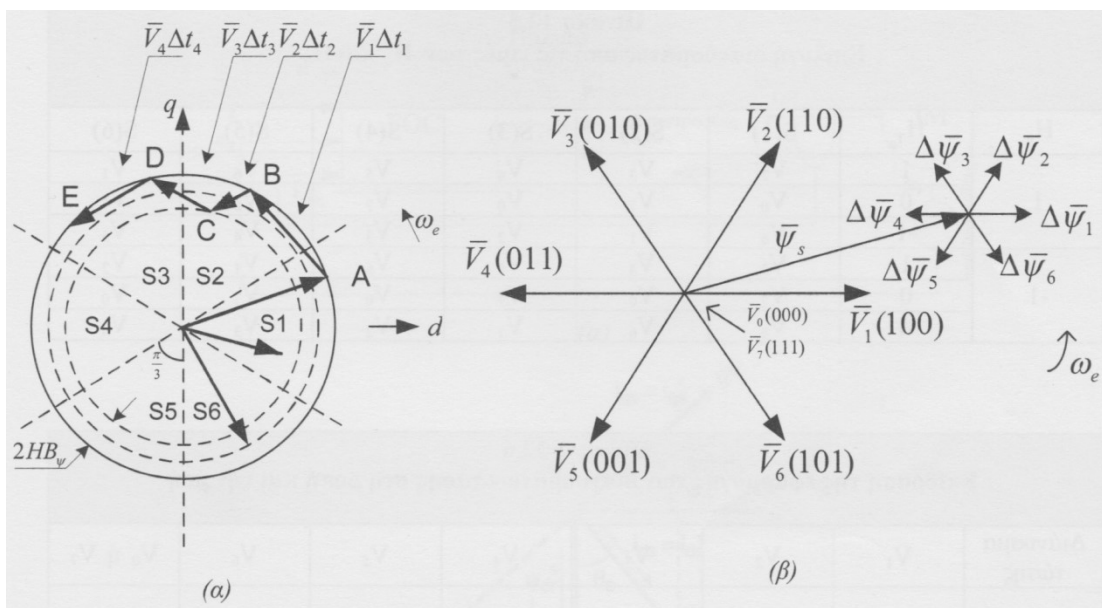
Η μέγιστη τιμή της ροής του στάτη περιορίζεται από τη ζώνη υστέρησης. Το διάνυσμα κινείται σε ένα κυκλικό μονοπάτι που δημιουργείται από τα όρια της ζώνης υστέρησης. Ο έλεγχος της ροπής έχει τρία επίπεδα εξόδου, τα οποία περιγράφονται ως εξής:

$$H_{Te} = 1 \text{ όταν } E_{Te} > +HB_{Te}$$

$$H_{Te} = -1 \text{ όταν } E_{Te} < -HB_{Te}$$

$$H_{Te} = 0 \text{ όταν } -HB_{Te} < E_{Te} < +HB_{Te}$$

Οι τιμές ανάδρασης της ροής και της ροπής υπολογίζονται από τις τιμές της τάσης και του ρεύματος που λαμβάνονται με ειδικούς αισθητήρες. Αυτοί οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται από έναν παρατηρητή. Στον παρατηρητή επίσης υπολογίζεται και σε ποιόν από τους έξι τομείς λειτουργεί το σύστημα (σχήμα 6.5(α)). Το σύστημα επιλογής διανύσματος τάσης λαμβάνει ως είσοδο τις τιμές  $H_\psi$ ,  $H_{Te}$ . Από έναν πίνακα επιλέγει το κατάλληλο διάνυσμα τάσης και δίνει στον αντιστροφέα την αντίστοιχη διακοπτική κατάσταση.



Σχήμα 6.5 (α) Περιστροφική κίνηση του διανύσματος της ροής, (β) Μεταβολή του διανύσματος της ροής.

Τα έξι διανύσματα ενός τυπικού αντιστροφέα τάσης παρουσιάζονται στο σχήμα 6.5(β). Αμελώντας την αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη  $R_s$  μπορούμε να γράψουμε:

$$V_s = (d / dt) * \psi_s$$

$$\Delta \psi_s = V_s * \Delta t$$

το οποίο σημαίνει ότι η ροή  $\psi_s$  μπορεί να μεταβληθεί σταδιακά με την εφαρμογή ενός διανύσματος τάσης στα τυλίγματα του στάτη για χρονικό διάστημα  $\Delta t$ . Αυτή η αύξηση της ροής από κάθε δυνατό διάνυσμα τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.5(β). Αρχικά η ροή της μηχανής είναι μηδέν και η αύξησή της πραγματοποιείται ακτινικά OA όπως φαίνεται στο

σχήμα 6.5(α). Κατά τη διάρκεια της αύξησης της ροής εφαρμόζεται η επιθυμητή τιμή της ροπής και στη συνέχεια το διάνυσμα της ροής  $\psi_s$  αρχίζει να περιστρέφεται.

Στον σχήμα 6.6 παρουσιάζονται τα διανύσματα επιλογής ανάλογα με τα σήματα εισόδου  $H_\psi$ ,  $H_{T_e}$  τα οποία επιδρούν στην ροή και στη ροπή ταυτόχρονα (σχήμα 6.7). Η τμηματική πορεία κατά τα διανύσματα AB, BC, CD, DE που επιβάλλεται από την εφαρμογή των διανυσμάτων  $V_3$ ,  $V_4$ ,  $V_3$ ,  $V_5$  αντίστοιχα φαίνεται στο σχήμα 6.5(α).

$H_\psi$	$H_{T_e}$	S(1)	S(2)	S(3)	S(4)	S(5)	S(6)
1	1	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$
	0	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$
	-1	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
-1	1	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$
	0	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	-1	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$

Σχήμα 6.6: Επιλογή διανύσματος από τις τιμές των  $H_\psi$  και  $H_{T_e}$

Διάνυσμα τάσης	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_0$ ή $V_7$
$\Psi_s$	↑	↑	↓	↓	↓	↑	0
$T_e$	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓

Σχήμα 6.7: Επίδραση της εφαρμογής των διανυσμάτων τάσης στην ροπή και στην ροή

#### 6.2.4.1 Αναγεννητική πέδηση

Ο άμεσος έλεγχος ροπής από τη φύση του είναι ικανός να εκτελέσει την λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης, χωρίς την προσθήκη κανενός επιπλέον στοιχείου, είτε προγράμματος είτε ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Ακόμα και κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας ως κινητήρα, ο άμεσος έλεγχος ροπής λόγω των συνεχών διορθώσεων που κάνει, εναλλάσσει τη λειτουργία της ασύγχρονης μηχανής μεταξύ γεννήτριας και μηχανής. Συγκεκριμένα κάθε φορά που ο έλεγχος διαλέγει ένα διάνυσμα διόρθωσης που επιταχύνει το διάνυσμα της ροής, τότε η μηχανή καταναλώνει ενέργεια από την τροφοδοσία της. Όμως, τις χρονικές στιγμές που ο έλεγχος διαπιστώνει ότι η παραγόμενη ροπή είναι μεγαλύτερη από τη ροπή αναφοράς, τότε

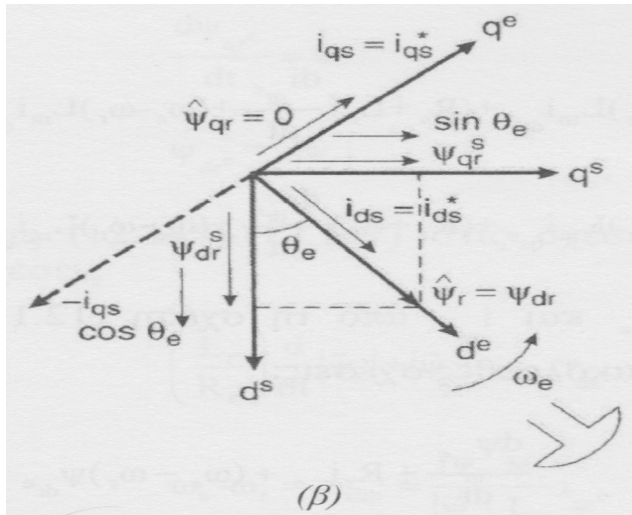
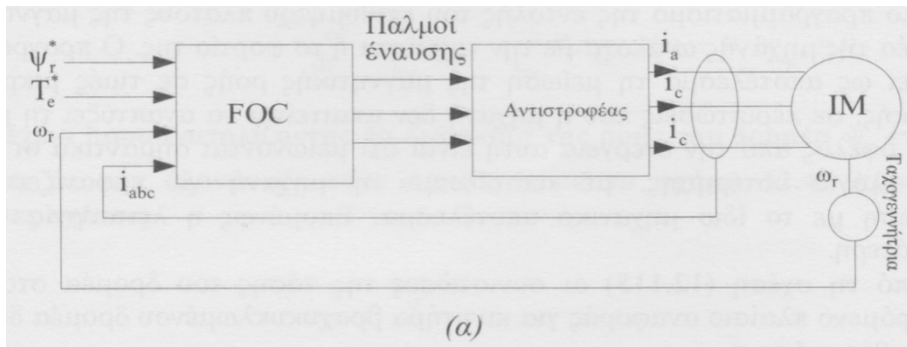


το διορθωτικό διάνυσμα διαλέγεται τέτοιο ώστε να επιβραδύνει το διάνυσμα της ροής. Δηλαδή ακόμα και κατά την κανονική λειτουργία ως καταναλωτής ενέργειας ο άμεσος έλεγχος ροπής ‘μετατρέπει’ στιγμιαία τη μηχανή σε παραγωγό ενέργειας. Οι τιμές που παίρνει δεν είναι μονίμως θετικές αλλά υπάρχουν και χρονικές στιγμές που είναι αρνητικές, δηλαδή ο κινητήρας επιστρέφει ενέργεια στην τροφοδοσία του. Αυτό που καθορίζει τη λειτουργία της μηχανής είναι η μέση τιμή αυτού του ρεύματος. Αν είναι θετική λειτουργεί ως κινητήρας, ενώ αν είναι αρνητική ως γεννήτρια.

Με αυτόν τον τρόπο η κινητική ενέργεια των τροχών δεν θα μετατρέπεται σε θερμική και θα σπαταλιέται (με τα φρένα), αλλά σε ηλεκτρική (και στη συνέχεια χημική στους συσσωρευτές) και θα αποθηκεύεται.

### **6.2.5 Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control, FOC)**

Παλαιότερα, σε εφαρμογές κίνησης που απαιτούσαν πολύ καλό έλεγχο ροπής και ταχύτητας ήταν αναγκαία η χρήση DC κινητήρων. Το πλεονέκτημα των κινητήρων αυτών είναι η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ροής και της ροπής τους. Η τεχνική ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου, Field Oriented Control (FOC) κατέστησε δυνατή τη χρήση κινητήρων επαγωγής σε εφαρμογές υψηλής επίδοσης. Με την τεχνική αυτή οι κινητήρες επαγωγής μπορούν να ελεγχθούν με τον ίδιο τρόπο όπως και οι DC κινητήρες ανεξάρτητης διέγερσης. Στο σχήμα 12.48 παρουσιάζεται η τεχνική ελέγχου διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι προσανατολισμός θα μπορούσε επίσης να επιτευχθεί με το μαγνητικό πεδίο του στάτη ή του διακένου. Η βασική ιδέα είναι η προσπάθεια αποσύζευξης του ελέγχου σε δύο κομμάτια, τον έλεγχο της συνιστώσας ρεύματος ροπής  $i_{qs}$  και τον έλεγχο της συνιστώσας ρεύματος ροής  $i_{ds}$  οι οποίες συνιστώσες να επιδρούν ανεξάρτητα σε κάθε ελεγκτή. Η αποσύζευξη επιτυγχάνεται στο σύγχρονο περιστρεφόμενο πλαίσιο όταν το διάνυσμα της ροής του δρομέα είναι ευθυγραμμισμένο με τον d-άξονα του πλαισίου αναφοράς. Στον προσανατολισμό οφείλεται και η ονομασία αυτής της τεχνικής. Ο ανεξάρτητος έλεγχος της ροής και της ροπής κάνει τα συστήματα αυτά να έχουν γρήγορη δυναμική απόκριση. Έχοντας σαν βάση τις γενικές εξισώσεις του κινητήρα επαγωγής και τη θεωρία των στρεφόμενων πλαισίων αναφοράς, η ιδέα του ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου γίνεται εύκολα αντιληπτή



Σχήμα 6.8: Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου, α) Δομικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμού πεδίου β) Διανυσματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα ( $d^e - q^e$  σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς και  $d^s - q^s$  ακίνητο πλαίσιο αναφοράς).

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που χρησιμοποιούν την εν λόγω τεχνική έλεγχου χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους απόδοση και τη μεγάλη ακρίβεια στη ρύθμιση της ταχύτητας και της μαγνητικής ροής τόσο σε στατές όσο και σε δυναμικές συνθήκες και στα τέσσερα τεταρτημόρια του πεδίου ταχύτητας-ροπής, ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες. Η απόκριση απουσία σύζευξης είναι ιδιαίτερα ταχεία και χωρίς ιδιαίτερη ταλαντωτική συμπεριφορά γεγονός που χαρακτηρίζει την επίδοση και την ακρίβεια συστημάτων που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική έλεγχου ως ιδιαίτερα βέλτιστη (Ο διανυσματικός έλεγχος είναι θεωρητικά βέλτιστος).

Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι η τεχνική αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων της μηχανής και ιδιαίτερος στη μεταβολή θέρμανση λόγω των θερμικών απωλειών εντός της μηχανής (θερμότητα Joule, μαγνητικές απώλειες πυρήνα, θερμικές απώλειες λόγω δινορρευμάτων), είτε στο επιδερμικό φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα των κυκλοφορούντων ρευμάτων δρομέα. Η μεταβολή των παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα ο προσανατολισμός με το πεδίο του δρομέα να μην είναι πάντοτε ορθός και ακριβής γεγονός που υποβαθμίζει την ποιότητα του ελέγχου και επιδεινώνει την επίδοσή του.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η δυνατότητα που παρέχει για εξοικονόμηση ενέργειας. Η εξοικονόμηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο προγραμματισμό της εντολής του επιθυμητού πλάτους της μαγνητικής ροής του δρομέα της μηχανής ανάλογα με την ταχύτητα ή το φορτίο της. Ο προγραμματισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνητικής ροής σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής, σε περιπτώσεις που η μηχανή δεν απαιτείται να αναπτύξει τη μέγιστή της ροπή. Το όφελος από την ενέργεια αυτή είναι ότι μειώνονται σημαντικά οι μαγνητικές απώλειες λόγω υστέρησης, με αποτέλεσμα η μηχανή να εμφανίζει μικρότερη κατανάλωση με το ίδιο μηχανικό αποτέλεσμα. Επομένως η λειτουργία της γίνεται αποδοτικότερη.

### **6.3 Επιλογή μεθόδου ελέγχου:**

Συγκρίνοντας όλες τις παραπάνω μεθόδους ελέγχου που αναλύθηκαν, επιλέχθηκε ο άμεσος έλεγχος ροπής (DTC) για την οδήγηση του ηλεκτροκινητήρα του υβριδικού οχήματος καθώς αποτελεί τη βέλτιστη λύση παρέχοντας αξιόπιστο έλεγχο, γρήγορη απόκριση, δυνατότητες για περεταίρω βελτίωση και έχει ήδη υλοποιηθεί σε παρόμοιες εφαρμογές όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

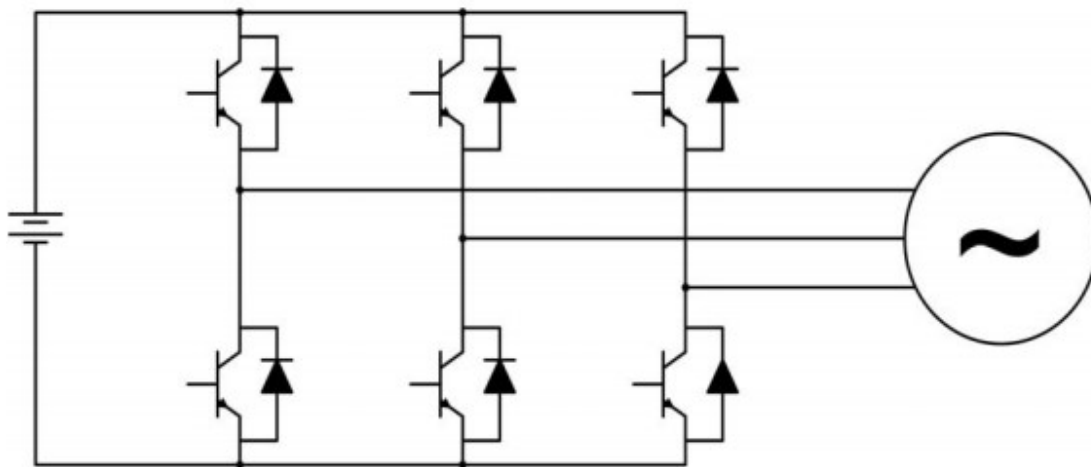
Ιδιότητα	Μονόμετρος (Βαθμωτός) Έλεγχος		Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό με το Πεδίο του Δρομέα		Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (DTC)
	Ανοικτού Βρόχου	Κλειστού Βρόχου	Άμεσος	Έμμεσος	
Ακρίβεια Ελέγχου Ταχύτητας	Κακή	Ικανοποιητική	Εξαιρετική	Εξαιρετική	Εξαιρετική
Ταχύτητα Απόκρισης	Μικρή	Αρκετά Καλή	Εξαιρετική	Εξαιρετική	Πολύ καλή
Ταλαντωτική συμπεριφορά	Ναι	Ναι	Ασήμαντη	Ασήμαντη	Μικρή
Υπερύψωση	Ναι	Σημαντική	Ασήμαντη	Ασήμαντη	Πολύ Μικρή
Υπολογιστική Πολυπλοκότητα	Ελάχιστη	Ελάχιστη	Σημαντική	Σημαντική	Όχι ιδιαίτερα μεγάλη
Αντιστάθμιση μεταβολών ταχύτητας που οφείλονται σε μεταβολή του φορτίου ή της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Τρόπος ελέγχου αντιστροφέα	SPWM		1)Έλεγχος Ρεύματος σε Ζώνη Υστέρησης 2)SPWM με πρόβλεψη των επιθυμητών τάσεων της μηχανής		Κανένας
Αρμονικές φασικού ρεύματος τροφοδοσίας της μηχανής	Αρμονικό περιεχόμενο περίξ της συχνότητας φορέα και άνω και σταθερή διακοπτική συχνότητα		1)Σημαντικότερη αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και μη σταθερή διακοπτική συχνότητα 2)Όμοιος με αριστερά		Αρμονικό περιεχόμενο που πλησιάζει εκείνο του τετραγωνικού παλμού
Δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας μέσω ρύθμισης της μαγνητικής ροής της μηχανής	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι
Ευαισθησία σε μεταβολή των παραμέτρων της μηχανής	Ναι	Μικρή	Στην τιμή της ωμικής αντίστασης του δρομέα		Στην τιμή της ωμικής αντίστασης του στάτη
Συνολική αξιολόγηση της κάθε τεχνικής ανάλογα με το αποτέλεσμα του ελέγχου (επίδοση) (από 1-5 με 5 άριστα)	1	3	4	5	5

Σχήμα 6.9 : Σύγκριση των προαναφερθέντων μεθόδων ελέγχου.

## 6.4 Μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας

### 6.4.1 Αντιστροφέας (inverter)

Το γεγονός ότι η πηγή ενέργειας (μπαταρίες) του οχήματος παρέχει συνεχή τάση στον κινητήρα, ο οποίος, αντιθέτως, είναι τριφασικός εναλλασσόμενος οδηγεί στη χρήση του τριφασικού αντιστροφέα ισχύος. Ουσιαστικά, πρόκειται για έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα, ο οποίος έχει ως είσοδο συνεχή τάση και ως έξοδο τριφασική εναλλασσόμενη.



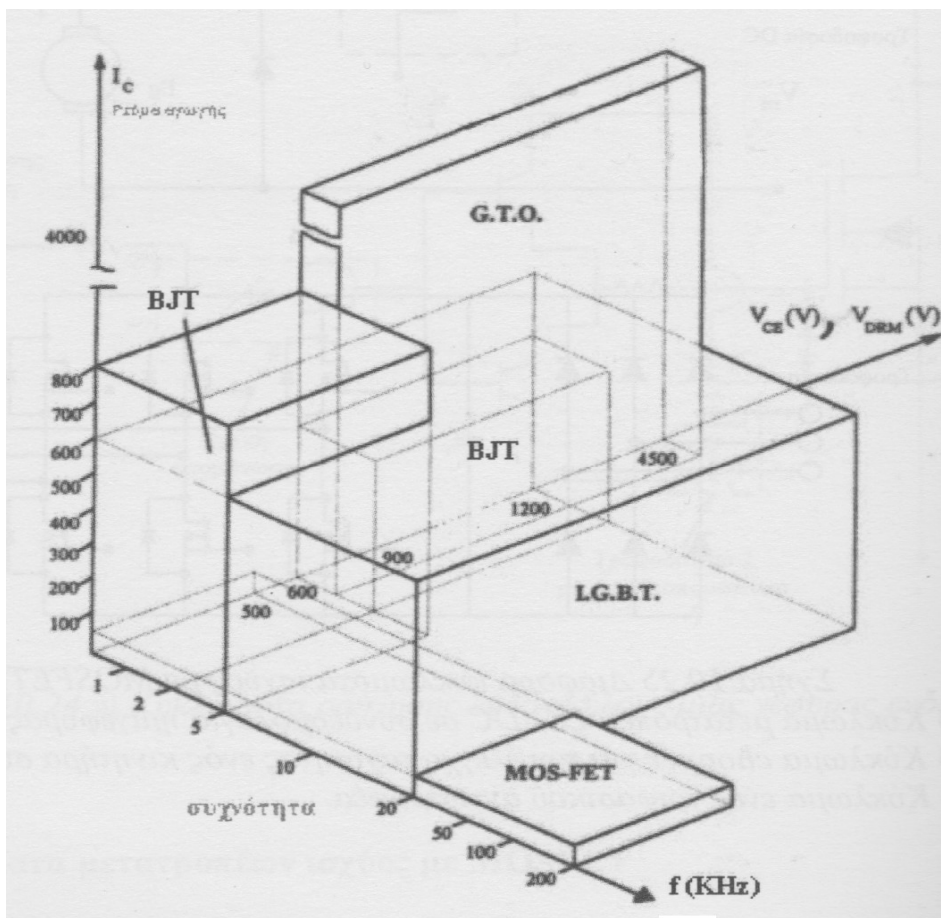
Σχήμα 6.10: Γενική δομή τριφασικού αντιστροφέα ισχύος

Ο τριφασικός αντιστροφέας, γενικότερα, αποτελείται από δύο βασικά τμήματα: το κύκλωμα υψηλής τάσης και το κύκλωμα χαμηλής τάσης – κύκλωμα ελέγχου. Το κύκλωμα υψηλής τάσης, ή αλλιώς κύκλωμα ισχύος, αποτελείται, κυρίως, από τους ημιαγωγικούς διακόπτες και την ψήκτρα στην οποία προσαρμόζονται, καθώς και τις κατάλληλες καλωδιώσεις. Το κύκλωμα χαμηλής τάσης είναι η πλακέτα παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων. Τέλος, υπάρχει, απαραίτητως, κύκλωμα προστασίας για να εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία του συστήματος.

#### 6.4.1.1 Ημιαγωγικοί διακόπτες

Η επιλογή του είδους των ημιαγωγικών στοιχείων και εν συνεχεία των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους είναι ζήτημα πρωταρχικής σημασίας για τον τριφασικό αντιστροφέα.

Τα υποψήφια είδη ημιαγωγικών στοιχείων είναι τα θυρίστορς, τα MOSFET, τα IGBTs , τα GTOs και τα BJTs. Η επιλογή μας είναι τα IGBTs (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Τα IGBTs, όπως τα MOSFETs, έχουν χαμηλές απώλειες αγωγής, παραλληλίζονται εύκολα (θετικός θερμοκρασιακός συντελεστής κατά τη διέλευση υψηλών ρευμάτων), ενώ κι η διακοπτική τους συχνότητα επιτρέπει τη χρήση τους στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Σημαντική είναι η ανοχή τους σε υψηλές τάσεις και ρεύματα, μεγαλύτερη από αυτή των MOSFETs και των BJTs.



Σχήμα 6.11: Χαρακτηριστικά διαφόρων ημιαγωγών ισχύος

#### 6.4.2 Ανορθωτής

Χρησιμοποιούμε ανορθωτή στη γεννήτρια για να μετατρέψουμε το εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα ώστε να μπορούμε να το αξιοποιήσουμε.

Το κύκλωμα της ανόρθωσης αυτής, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 1 αποτελεί — καλύτερη λύση μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Αυτό οφείλεται στις δυνατότητες παροχής υψηλής ισχύος εξόδου και της μικρής κυμάτωσης της τάσης εξόδου.

Επίσης, ένα μεγάλο πλεονέκτημα της ανόρθωσης αυτής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει μετασχηματιστή εισόδου χωρίς να υπάρχει το πρόβλημα του μαγνητικού κορεσμού, όπως στην περίπτωση της τριφασικής ανόρθωσης κοινού σημείου. Οι διάφορες τάσεις εισόδου εφαρμόζονται στην έξοδο της ανόρθωσης σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά αγωγής:

$V_{cb}$  μέσω των thyristor  $Q_5, Q_6$

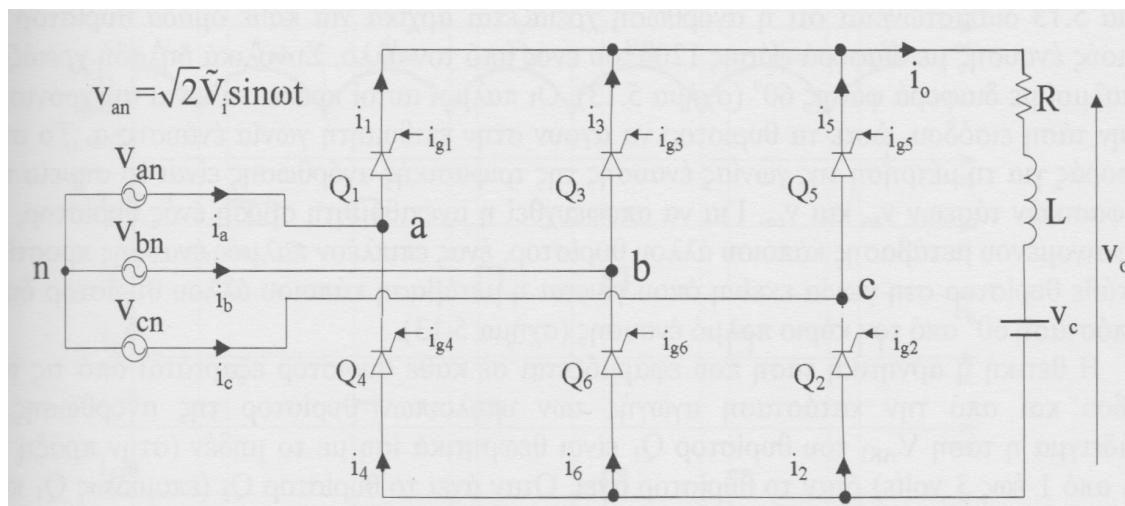
$V_{ab}$  μέσω των thyristor  $Q_6, Q_1$

$V_{ac}$  μέσω των thyristor  $Q_1, Q_2$

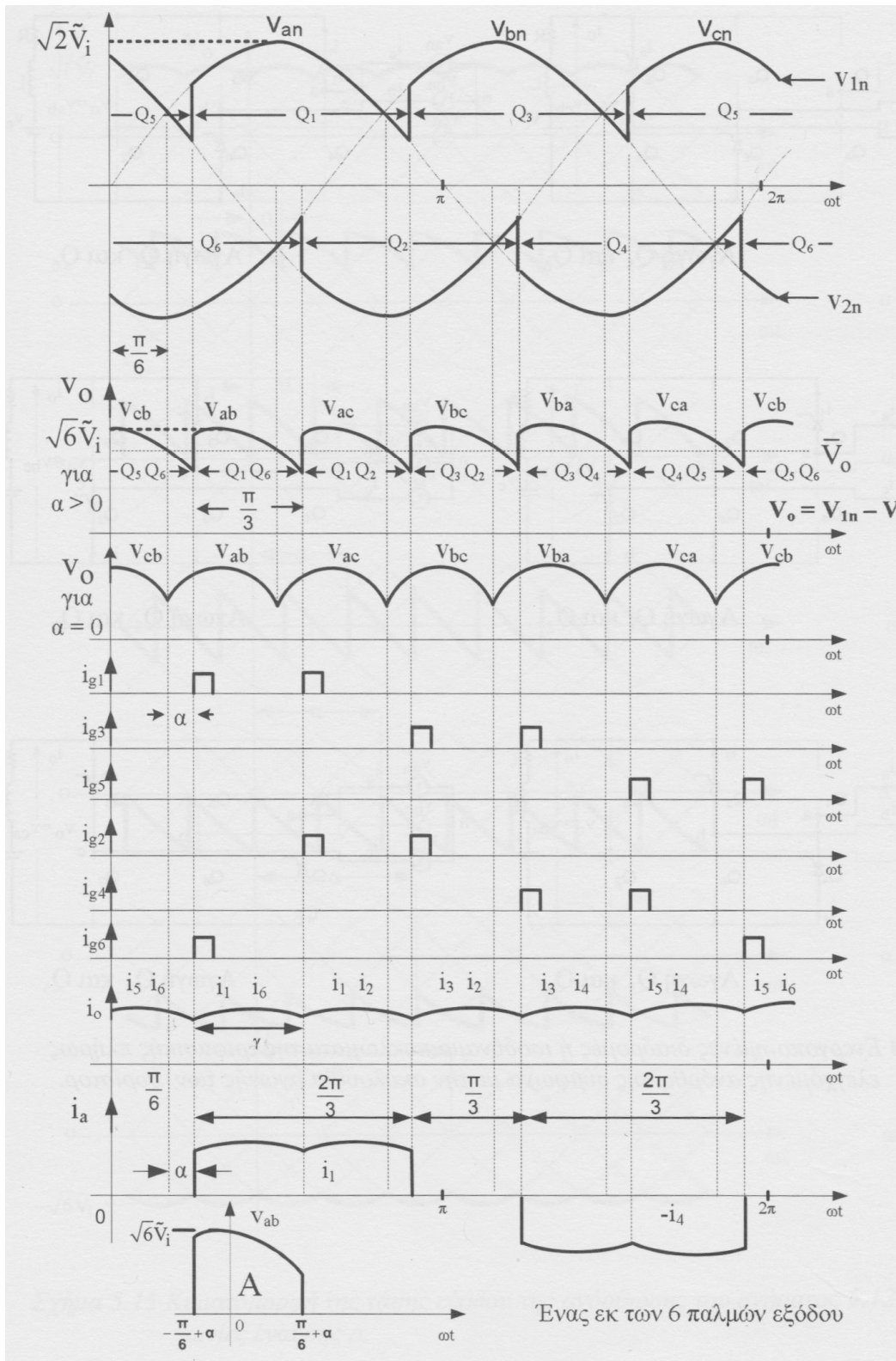
$V_{bc}$  μέσω των thyristor  $Q_2, Q_3$

$V_{ba}$  μέσω των thyristor  $Q_3, Q_4$

$V_{ca}$  μέσω των thyristor  $Q_4, Q_5$



Σχήμα6.12: Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανόρθωση γέφυρας



Σχήμα 6.13: Κυματομορφές της ανόρθωσης του σχήματος 1 όταν το ρεύμα εξόδου είναι συνεχές.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΦΟΡΤΙΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

#### 7.1 Εισαγωγή

Τα οχήματα που κινούνται με κύρια πηγή τον ηλεκτρισμό απαιτούν διαφορετικές συνήθειες φόρτισης από ό, τι έχουμε συνηθίσει από τα οχήματα με ορυκτό καύσιμο. Η φόρτιση ηλεκτρικών οχήματα παίρνει πολύ περισσότερο χρόνο από ό, τι γεμίζει ένα συμβατικό όχημα με βενζίνη. Απαραίτητη υποδομή για την εξάπλωση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η δημιουργία σταθμών φόρτισης. Έτσι τα επιφορτιζόμενα (plug-in) οχήματα είναι ευνοϊκά όταν υπάρχουν μεγάλης διάρκειας στάθμευσης σταθμοί φόρτισης, όπως παρκινγκ κατά την διάρκεια της νύχτας στο σπίτι ή κατά τη διάρκεια της εργασίας του κάτοχου οχήματος στο parking της δουλειάς. Ακόμα είναι χρήσιμο να υπάρχουν σταθμοί ταχείας φόρτισης ειδικά σε μεγάλους αυτοκινητοδρόμους που χρησιμοποιούνται κυρίως για ταξίδια γρήγορη φόρτιση έτσι με μια “δυνατή φόρτιση” να κερδίζονται επιπλέον χιλιόμετρα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Εκεί θα υπάρχει δυνατότητα φόρτισης των οχημάτων ποικιλοτρόπως (επιλογή ταχύτητας φόρτισης, παροχής τάσης και ρεύματος).

Καθώς ηλεκτρικά οχήματα εισέρχονται στην αγορά, υπάρχει μία αυξανόμενη ζήτηση για σταθμούς φόρτισης. Οι σταθμοί αυτοί μειώνουν το άγχος των χρηστών (πιθανό και πραγματικό) οπότε αυξάνεται η χρήση οχημάτων. Σύμφωνα με έρευνες το συνολικό κόστος ενός συστήματος μεταφοράς που βασίζεται σε ηλεκτρικά οχήματα μπορεί να μειωθεί παρέχοντας σταθμούς φόρτισης αντί για μεγάλες μπαταρίες.

Οι σταθμοί φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα δεν απαιτούν πολύ μεγάλες επενδύσεις για υποδομές στις ανεπτυγμένες χώρες. Οι απαιτούμενοι σταθμοί μπορούν να αξιοποιήσουν το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο και τις οικίες των ιδιοκτητών για την επαναφόρτιση. Όταν η χρήση των οχημάτων γίνεται για μικρές καθημερινές αποστάσεις μπορεί η φόρτιση να γίνεται οικιακά. Ωστόσο, για μετακινήσεις μεταξύ πόλεων απαιτείται ένα δίκτυο δημόσιων σταθμών φόρτισης ή κάποια άλλη μέθοδο για να επεκταθεί το φάσμα των ηλεκτρικών οχημάτων πέρα από την κανονική καθημερινή μετακίνηση. Μία πρόκληση σε μια τέτοια υποδομή είναι το επίπεδο της ζήτησης : ένας απομονωμένος σταθμός κατά μήκος ενός πολυσύχναστου αυτοκινητόδρομο μπορεί να χρησιμοποιείται από εκατοντάδες πελάτες ανά ώρα αν κάθε διερχόμενο ηλεκτρικό όχημα πρέπει να σταματήσει εκεί για να ολοκληρώσει το ταξίδι.

Οι σταθμοί μπορούν να αξιοποιήσουν το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο για την επαναφόρτιση των οχημάτων. Για τοπικές μετακινήσεις (μικρότερες από 80χλμ) δεν απαιτείται επαναφόρτιση. Ωστόσο για μετακινήσεις μεταξύ μακρινών πόλεων απαιτείται ένα δίκτυο δημόσιων σταθμών φόρτισης ή κάποια άλλη μέθοδο για να επεκταθεί το φάσμα των ηλεκτρικών οχημάτων πέρα από την κανονική καθημερινή μετακίνηση. Πρόκληση αποτελεί το επίπεδο της ζήτησης που μπορεί να διαφέρει από σταθμό σε σταθμό και δεν μπορεί να προβλεφτεί.

## **7.2 Χώροι Φόρτισης**

### **7.2.1 Ιδιωτικοί χώροι φόρτισης με ιδιωτική πρόσβαση**

Μια κατηγορία χώρων φόρτισης αποτελούν οι ιδιωτικοί χώροι με αποκλειστικά ιδιωτική πρόσβαση. Η φόρτιση που πραγματοποιείται κυρίως κατά τις νυχτερινές ώρες, με το ανάλογο φθινό τιμολόγιο και με μονοφασική παροχή, δίνει την δυνατότητα χαμηλότερων επιπέδων χρέωσης στο τιμολόγιο κατανάλωσης. Με τον τρόπο αυτό η φόρτιση διαρκεί περίπου 6-8 ώρες ενώ το μέγιστο ρεύμα της φόρτισης δεν ξεπερνάει τα 15 A. Υπάρχει η δυνατότητα για οποιονδήποτε καταναλωτή να ανήκει σε έναν «στόλο» οχημάτων, οπότε να πληρώνει το ανάλογο μερίδιο ο καθένας από αυτούς κλείνοντας έτσι καλύτερες συμφωνίες με το κεντρικό δίκτυο, δηλαδή την πώληση και την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ καλύτερες τιμές. Εδώ οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό είναι ελάχιστες. Όσον αφορά την πληρωμή σε περίπτωση χρησιμοποίησης κάποιου σταθμού φόρτισης, αυτή μπορεί να γίνει είτε εκ των προτέρων ή με ένα συνολικό λογαριασμό στο τέλος μιας προσυμφωνημένης χρονικής περιόδου.



Σχήμα 7.1: Ιδιωτικός χώρος στάθμευσης με δυνατότητα φόρτισης ηλεκτρικού/ηλεκτρ.-υβριδικού οχήματος

### **7.2.2 Ιδιωτικοί χώροι φόρτισης με δημόσια πρόσβαση**

Ιδιωτικοί με δημόσια πρόσβαση (παραδείγματος χάριν, μεγάλα παρκινγκ εμπορικών καταστημάτων, εργασιακοί χώροι). Εδώ τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα θα μπορούν να φορτίζουν τις ώρες που παραμένουν παρκαρισμένα, πληρώνοντας το ανάλογο αντίτιμο. Ανάλογα με τη φύση του χώρου και τις απαιτήσεις του πελάτη θα δημιουργηθούν σταθμοί όλων των ειδών, για να καλύψουν έτσι τις ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες για ταχύτερη φόρτιση.



Σχήμα 7.2: Ιδιωτικός χώρος φόρτισης με δημόσια πρόσβαση στο Québec

### 7.2.3 Δημόσιοι χώροι φόρτισης με δημόσια πρόσβαση

Δημόσιοι με δημόσια πρόσβαση (π.χ. δημόσιοι δρόμοι). Πολλοί ιδιοκτήτες αυτοκινήτων, ιδίως στις πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, δεν έχουν πρόσβαση σε ιδιωτικά παρκινγκ. Η δημιουργία σταθμών φόρτισης στις λωρίδες παρκαρίσματος των δρόμων αποτελεί έναν έξυπνο και συνάμα αποτελεσματικό τρόπο αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων.



Σχήμα 7.3: Δημόσιος σταθμός φόρτισης στο San Francisco

## 7.3 Τύποι σύνδεσης

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να γίνει με δύο είδη σύνδεσης, την ενσύρματη και την επαγωγική, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

### 7.3.1 Ενσύρματη σύνδεση

Η ενσύρματη φόρτιση απαιτεί εξαρτήματα (καλώδια και βύσματα) για την διασύνδεση του οχήματος με το σταθμό φόρτισης. Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται όταν οι φορτιστές είναι ενσωματωμένοι στο ηλεκτρικό όχημα. Η μέθοδος αυτή δεν έχει τελειοποιηθεί οπότε εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα. Για την φόρτιση των οχημάτων ακολουθείται η μη αυτοματοποιημένη διαδικασία που ακολουθείται σε οποιαδήποτε άλλη συσκευή χρειάζεται τροφοδότηση μέσω ρεύματος. Οπότε ο χρήστης του οχήματος είναι υπεύθυνος για την σύνδεση και αποσύνδεση του οχήματος από το δίκτυο κάτι που αφήνει μεγάλα περιθώρια λάθους και ελλοχεύει ο κίνδυνος της ηλεκτροπληξίας, ιδίως σε υγρά περιβάλλοντα (υγρασία, βροχή). Ακόμα το μακρύ καλώδιο μπορεί να αποτελέσει αιτία ατυχήματος ή/και τροφή για τυχόν τρωκτικά της περιοχής. Η αντικατάσταση του εξοπλισμού αυξάνει το λειτουργικό

κόστος της εγκατάστασης. Τέλος, σε περιοχές που ο πάγος και το χιόνι είναι συνηθισμένο φαινόμενο, το βύσμα φόρτισης μπορεί να παγώσει πάνω στο όχημα κατά την διάρκεια μιας φόρτισης π.χ. 30 λεπτών σε έναν εξωτερικό σταθμό φόρτισης.



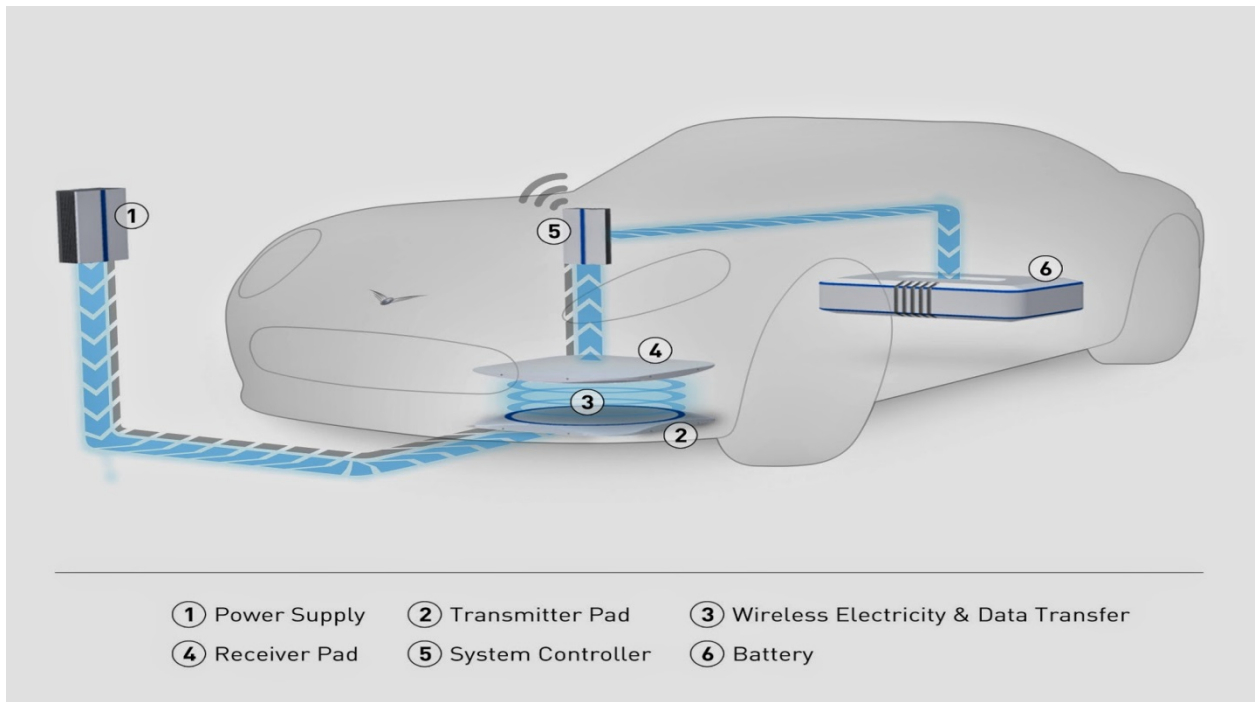
Σχήμα 7.4: Φόρτιση οχήματος μέσω ενσύρματης σύνδεσης στο Παρίσι



Σχήμα 7.5: Σύνδεση οχήματος σε σταθμό ενσύρματης φόρτισης στη Ρώμη

### 7.3.2 Επαγωγική σύνδεση

Στην φόρτιση του οχήματος με επαγωγικό τρόπο η μεταφορά ενέργειας από το σταθμό προς το όχημα γίνεται χωρίς αγώγιμη ζεύξη, μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ειδικότερα, τα συστήματα επαγωγικής φόρτισης μεταφέρουν εναλλασσόμενη ισχύ δημιουργώντας ένα μαγνητικό κύκλωμα μεταξύ ενός πρωτεύοντος τυλίγματος στην μεριά της τροφοδοσίας και ενός δευτερεύοντος τυλίγματος στην μεριά του οχήματος. Έτσι η ισχύς ρέει από το πρωτεύον στο δευτερεύον όπως συμβαίνει και σε ένα μετασχηματιστή με δύο τυλίγματα. Ακόμη, αφού ο συσσωρευτής έχει DC τάση και μπορεί να φορτιστεί μόνο με DC ρεύμα οπότε το AC ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος τυλίγματος ανορθώνεται με την κατάλληλη διάταξη πριν φτάσει σε αυτόν. Οι επαγωγικοί φορτιστές έχουν τα περισσότερα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου εκτός του οχήματος και επικοινωνούν με αυτό μέσω υπερύθρων ή ραδιοσυχνοτήτων. Η επαγωγική φόρτιση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη συμβατική φόρτιση καθώς μπορεί να γίνει απλά και μόνο σταθμεύοντας το όχημα πάνω στο σημείο φόρτισης. Εξελίξεις στην τεχνολογία των υλικών, στα ηλεκτρονικά ισχύος και στους μικροελεγκτές έχουν προσφέρει σημαντική βοήθεια στην ανάπτυξη αυτού του τρόπου φόρτισης.



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα επαγωγικής σύνδεσης.



Εικόνα 7.7: Φορητός επαγωγικός φορτιστής για τα αυτοκίνητα ασφαλείας στη FormulaE



## 7.4 Τύποι φόρτισης

Υπάρχουν διάφοροι τύποι φόρτισης οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την διάρκεια φόρτισης, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο (1φ-3φ), την τάση και το ρεύμα παροχής.

- Διάρκεια φόρτισης: 6 – 8 ώρες με μονοφασική παροχή:  
Τάση 230V, Ρεύμα 16A, Ισχύς 3,3kW.
- Διάρκεια φόρτισης: 4 – 6 ώρες με μονοφασική παροχή:  
Τάση 230V, Ρεύμα 32A, Ισχύς 7kW.
- Διάρκεια φόρτισης: 2 – 4 ώρες με μονοφασική παροχή:  
Τάση 400V, Ρεύμα 16A, Ισχύς 11kW.
- Διάρκεια φόρτισης: 1 – 2 ώρες με τριφασική παροχή:  
Τάση 400V, Ρεύμα 32A, Ισχύς 22kW.
- Διάρκεια φόρτισης: 20 – 30 λεπτά ώρας με τριφασική παροχή:  
Τάση 400V, Ρεύμα 63A, Ισχύς 43kW
- Διάρκεια φόρτισης 10 λεπτά ώρας με τριφασική παροχή:  
Τάση 500VDC, Ρεύμα 350 A, Ισχύς 120 kW

Εφαρμογή	Ονομαστική Τάση	Χρόνος Φόρτισης	Παρατηρήσεις
Οικιακή	1p 230V 50Hz	6 με 8 ώρες	Νυχτερινή φόρτιση
Ιδιωτική & Δημόσια Στάθμευση	1p 230V 50Hz	6 με 8 ώρες	Η εγκατεστημένη ηλεκτρική τροφοδοσία είναι ένα ζήτημα
Στάθμευση σε Εμπορικά Κέντρα	1p 230V 50Hz & 3p 400V 50Hz	2 ώρες (συστήνεται)	Οποιαδήποτε ώρα
Στόλος αυτοκινήτων & Εμπορικά Οχήματα	1p 230V 50Hz & 3p 400V 50Hz	6 με 8 ώρες	Νυχτερινή φόρτιση
Σταθμοί φόρτισης κατά μήκος των δρόμων	1p 230V 50Hz & 3p 400V 50Hz	2 ώρες (συστήνεται)	Οποιαδήποτε ώρα
Σταθμοί ταχείας φόρτισης πάνω στους δρόμους	3p 400V 50Hz AC 500 or 600V DC	10 με 30 λεπτά	Οποιαδήποτε ώρα
Αμαξοστάσια λεωφορείων και τούλμαν	3p 400V 50Hz	5 με 6 ώρες	Συνεχής φόρτισης
Σταθμοί φόρτισης μοτοσικλετών	1p 230V 50Hz	2 - 4 ώρες (συστήνεται)	Οποιαδήποτε ώρα

Σχήμα 7.8: Περιπτώσεις επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η αποδοτικότητα ενός φορτιστή και ο χρόνος φόρτισης εξαρτάται από τη μέθοδο φόρτισης. Η απόδοση ενός γρήγορου φορτιστή είναι 87% ενώ ενός αργού 92%.

Ο τελικός χρήστης του δικτύου των φορτιστών θέλει οι φορτιστές να πληρούν κάποιες βασικές προδιαγραφές, οι οποίες είναι :

- Να λειτουργούν πλήρως εναρμονισμένοι με κανόνες ασφαλείας (φώτα, ηλεκτροπληξία, κλπ)
- Να είναι σωστά κατανεμημένοι στον χώρο
- Να είναι διαλειτουργικοί (χρήση κοινών πρωτοκόλλων, ασφαλείς συναλλαγές)
- Να είναι έξυπνοι (δυνατότητα προγραμματισμένης φόρτισης όταν η κοστολόγηση της ενέργειας είναι χαμηλή)

Με σκοπό να διασφαλιστούν τα κοινά πρότυπα φόρτισης οχημάτων η Society of Automotive Engineers (SAE) έχει αναπτύξει πρότυπα για την μεταφορά ενέργειας και ένα κοινό καλώδιο. Αυτά τα πρότυπα θα εξασφαλίσουν ότι όλα τα ηλεκτρικά επαναφορτιζόμενα οχήματα έχουν κοινό καλώδιο φόρτισης έτσι ώστε κάθε όχημα να φορτίζει σε οποιονδήποτε σταθμό.

Το σύστημα φόρτισης μπαταριών περιλαμβάνει δύο είδη φορτιστών τους οικιακούς και τους δημόσιους. Οι δημόσιοι φορτιστές είναι η βέλτιστη λύση και χρησιμοποιούν ενέργεια από διάφορες πηγές όπως ήλιος και άνεμος και μπορεί να υπάρξει σε διάφορα μέρη. Οι οικιακοί φορτιστές σχεδιάζονται για να παρέχουν μικρή ισχύ με αποτελεσματικό τρόπο καθώς η φόρτιση μπορεί να διαρκεί πολλές ώρες μιας και τα οχήματα τις περισσότερες ώρες της μέρας είναι παρκαρισμένα στα σπίτια. Τα οφέλη από αυτούς τους δύο τύπους φορτιστών είναι η άνεση των χρηστών και η ελευθερία τους να φορτίσουν τα οχήματα όταν θέλουν σύμφωνα με την καλύτερη τιμή της ενέργειας. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι κάθε φόρτιση είναι ανεξάρτητη και το όριο της υπερφόρτισης μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί.

Η φόρτιση των μπαταριών μπορεί να γίνει με δύο τρόπους ελεγχόμενη ή μη. Στην ελεγχόμενη φόρτιση οι μπαταρίες φορτίζονται ή εκφορτίζονται σύμφωνα με την ικανότητα και τις ανάγκες του δικτύου αλλά και τις προτιμήσεις του χρήστη. Για έλεγχο σε πραγματικό χρόνο πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κάποιοι παράμετροι όπως η τιμή της ενέργειας (πώλησης ή αγοράς), το επίπεδο φόρτισης (State of Charge - SoC) και η κατάσταση «υγείας» (State of Health - SoH) που σχετίζεται με την υποβάθμιση των μπαταριών κατά την διάρκεια ζωής τους. Έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι ελεγχόμενης φόρτισης που στηρίζονται στην συνεργασία των οχημάτων με το δίκτυο διανομής.

Στην μη ελεγχόμενη φόρτιση δεν υπάρχει ουσιαστικά κανένας έλεγχος πέρα από ορισμένες φορές που μπορεί να καθοριστεί η στιγμή της έναρξης της φόρτισης, δηλαδή ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να φορτιστεί το όχημα του με μία καθυστέρηση. Η φόρτιση σταματάει μόλις φορτιστεί η μπαταρία πλήρως για κανονική φόρτιση ή φτάσει το 80% της στάθμης φόρτισης για γρήγορη φόρτιση. Αν όλα τα οχήματα φορτίζονται ταυτόχρονα αυξάνεται η ζήτηση και το φορτίο αιχμής που προκύπτει προκαλεί προβλήματα υπερφόρτισης του δικτύου. Ωστόσο, αυτός ο τρόπος φόρτισης είναι πιο διαδεδομένος σήμερα.

## **7.5 Τρόποι σύνδεσης**

### **7.5.1 Οικιακή πρίζα και καλώδιο επέκτασης**

Το όχημα συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιώντας κοινούς ρευματολήπτες (συνήθως 10 A) που βρίσκονται στις κατοικίες. Για να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ο τρόπος αυτός φόρτισης η ηλεκτρική εγκατάσταση της κατοικίας πρέπει να πληροί όλες τις

προϋποθέσεις ασφάλειας και οπωσδήποτε να υπάρχει σύστημα γειώσεως καθώς και ασφαλιστικές διατάξεις, με σκοπό την προστασία από υπερφόρτωση και προστασία από διαρροή ρεύματος, που μπορεί να προκληθεί ακόμα και εντός του οχήματος. Αυτός ο τρόπος φόρτισης είναι ο συνηθέστερος, χάρις στην απλότητα και το φθηνός κόστος που απαιτεί, παρόλα αυτά εγκυμονεί κινδύνους σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί λανθασμένα, καθώς και διακρίνεται από πολλούς περιορισμούς.



Σχήμα 7.9: Τρόπος σύνδεσης 1

Ο πρώτος περιορισμός είναι η διαθέσιμη ισχύς, για την αποφυγή των κινδύνων από την υπερθέρμανση από της πρίζας και των καλωδίων μετά από εντατική χρήση για αρκετές ώρες, αν υπερβαίνει τη μέγιστη ισχύ, πυρκαγιά ή ηλεκτροπληξία εάν η ηλεκτρική εγκατάσταση είναι ελαττωματική ή εάν ορισμένες προστατευτικές διατάξεις απουσιάζουν.

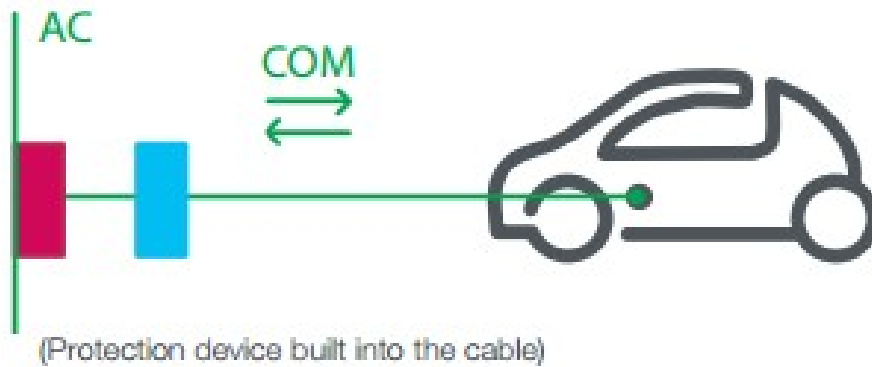
Ο δεύτερος περιορισμός σχετίζεται με τη διαχείριση ενέργειας της εγκατάστασης αν οι υποδοχή φόρτισης μοιράζεται μια τροφοδοσία από τον πίνακα με τις άλλες υποδοχές (χωρίς ειδικό κύκλωμα) και το ρεύμα υπερβαίνει το όριο προστασίας (σε γενικές γραμμές 16A), ο διακόπτης θα σκοντάψει, σταματώντας τη φόρτιση.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες επιβάλλουν ένα όριο στην ισχύ 1<sup>ου</sup> τρόπου, για λόγους ασφάλειας και ποιότητας των υπηρεσιών. Αυτό το όριο επί του παρόντος ορίζεται, και μια τιμή 10A φαίνεται να είναι η καλύτερη συμβιβαστική λύση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με αυτή την ισχύ, θα χρειαστούν 10-12 ώρες για να φορτίσει πλήρως ένα όχημα.

### 7.5.2 Οικιακή πρίζα και καλώδιο με μια συσκευή προστασίας

Το όχημα είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των οικιακών ρευματοδοτών. Η φόρτιση γίνεται μέσω ενός μονοφασικού ή τριφασικού δικτύου

και ενός καλωδίου γείωσης. Τέλο ζμια συσκευή προστασίας είναι ενσωματωμένη στο καλώδιο.

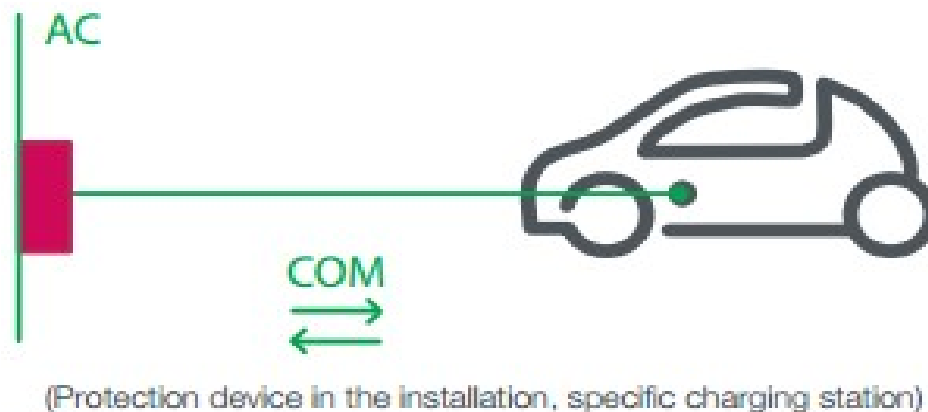


Σχήμα 7.10: Τρόπος σύνδεσης 2

Η λύση αυτή είναι ιδιαίτερα δαπανηρή λόγω των προδιαγραφών του καλωδίου.

### 7.5.3 Ειδική πρίζα σε ένα ειδικό κύκλωμα

Το όχημα είναι συνδεδεμένο απευθείας με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω συγκεκριμένης πρίζας και ρευματολήπτη ειδικού κυκλώματος. Μια λειτουργία ελέγχου και προστασίας είναι επίσης μόνιμα εγκατεστημένη.

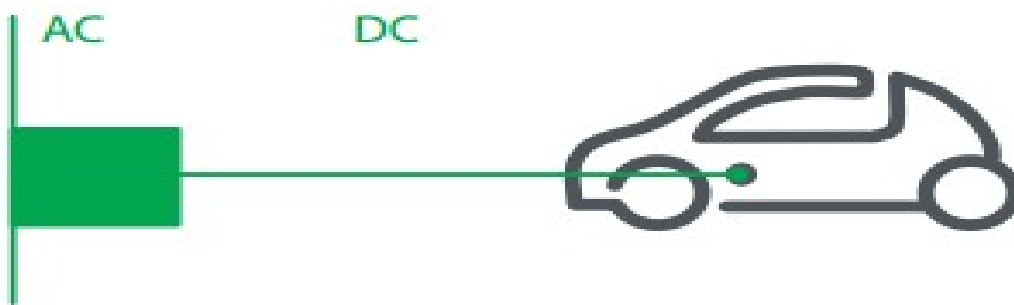


Σχήμα 7.11: Τρόπος σύνδεσης 3

Αυτός είναι ο μόνος τρόπος φόρτισης που πληροί τις ισχύουσες προδιαγραφές που διέπουν τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Επιτρέπει επίσης την απόρριψη φορτίου, έτσι ώστε οι ηλεκτρικές οικιακές συσκευές να μπορούν να είναι λειτουργούν κατά τη διάρκεια της φόρτισης του οχήματος ή, αντιθέτως να βελτιστοποιείται ο χρόνος φόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος.

#### 7.5.4 Συνεχούς ρεύματος (DC) σύνδεση για γρήγορη φόρτιση

Το ηλεκτρικό όχημα είναι συνδεδεμένο με το κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός εξωτερικού φορτιστή. Οι λειτουργίες ελέγχου και προστασίας είναι μόνιμα εγκατεστημένες στο καλώδιο φόρτισης του οχήματος.



(AC/DC external to the vehicle)

Σχήμα 7.12: Τρόπος σύνδεσης 4

#### 7.6 Υποδοχείς φόρτισης

Τρεις τύποι "ηλεκτρικού οχήματος" πρίζες με υποδοχές για την πιλοτικό καλώδιο μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων.

Τύπος 1: Το ζευγάρι πρίζας / ρευματολήπτη που χρησιμοποιείται στις Η.Π.Α και την Ιαπωνία, γνωστό και ως "SAE 1772" υπόκειται στο αντίστοιχο πρότυπο των ΗΠΑ. Καθώς η ΗΠΑ και η Ιαπωνία δεν έχουν πλέγμα ισχύος τριών φάσεων, το πρότυπο αυτό περιορίζεται σε μονοφασικής και λιγότερης ισχύς έξοδο από ό, τι το τύπου 2. Επίσης, σημειώνεται ότι για το τύπου 1, το καλώδιο φόρτισης είναι εγκατεστημένο μόνιμα στο σταθμό φόρτισης.



Σχήμα 7.13: ζευγάρι πρίζας / ρευματολήπτη SAE 1772

Τύπος 2: Η Το ζευγάρι πρίζας / ρευματολήπτη που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη, γνωστός και ως "Mennekes". Το τύπου 2 υποστηρίζει τόσο μονοφασικό όσο και τριφασική φόρτιση σε υψηλότερες τιμές ισχύος από τον τύπο 1. Για τους σταθμούς φόρτισης το τύπου 2 ζευγάρι, το καλώδιο φόρτισης είναι αποσπώμενο, έτσι ώστε ένας σταθμός τύπου 2 να μπορεί να φορτίσει τόσο, τα τύπου 1 αυτοκίνητα και τύπου 2 αυτοκίνητα με τα σωστά καλώδια φόρτισης. Ένας σταθμός φόρτισης τύπου 1 από την άλλη πλευρά μπορεί να φορτίσει μόνο τύπου 1 αυτοκίνητα, αφού το καλώδιο είναι εγκατεστημένο στο σταθμό και η χρήση των προσαρμογέων απαγορεύεται.



Σχήμα 7.14: ζευγάρι πρίζας / ρευματολήπτη Mennekes

Τύπος 3: Ενώ το πρώτο πρότυπο φόρτισης DC ήταν το ιαπωνικό CHAdeMO, οι κορυφαίες οκτώ αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν πλέον συμφωνήσει να στηρίξουν το νέο πρότυπο φόρτισης Combo, το οποίο συνδυάζει AC και DC φόρτιση σε ένα ενιαίο υποδοχέα. Το CHAdeMO σε αντίθεση, είναι ένα μόνο φόρτιση DC. Το CHAdeMO, αναμένεται ότι θα αντικατασταθεί από το Combo πρότυπο φόρτισης σε όλες τις χώρες (συμπεριλαμβανομένων των ΗΠΑ), με εξαίρεση την Ιαπωνία.



Σχήμα 7.15: ζευγάρι πρίζας / ρευματολήπτη CHAdeMO



Τύπος 4: Πλέον χρησιμοποιούνται και οι Combo υποδοχείς οι οποίοι συνδυάζουν τον τύπο 1 ή 2 με τον τύπο 3, δηλαδή έχουμε ένα υποδοχέα που υποστηρίζει μονοφασική ή τριφασική εναλλασσόμενη φόρτιση συν ότι έχουμε και ένα υποδοχέα για DC φόρτιση. Θα μπορούσαμε να τα χωρίσουμε σε Combo1 (μονοφασική εναλλασσόμενη + DC) και Combo2 (τριφασική εναλλασσόμενη + DC)



Σχήμα 7.16 : Combo1 (μονοφασική εναλλασσόμενη + DC)

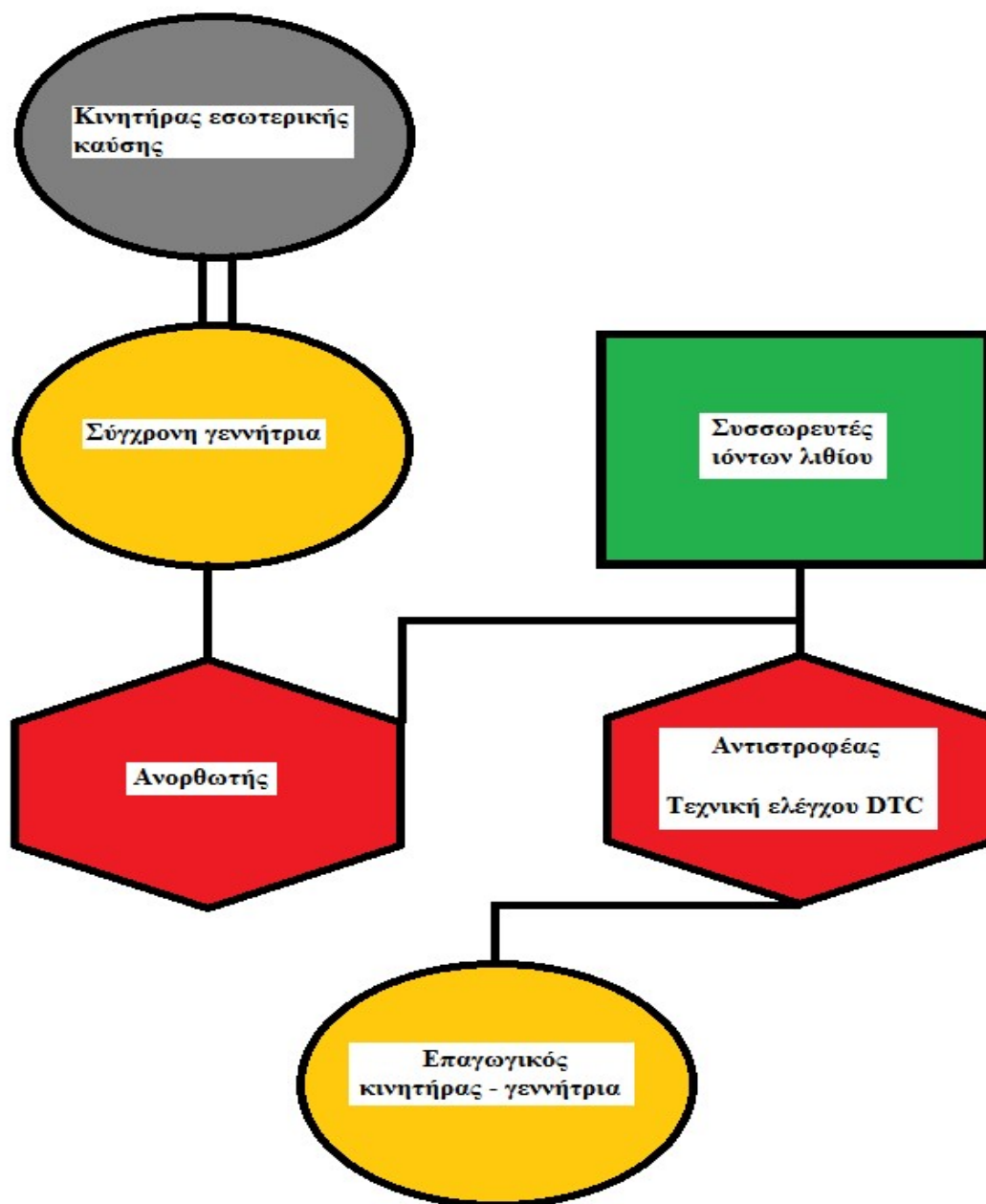


Σχήμα 7.17: Combo2 (τριφασική εναλλασσόμενη + DC)

## Κεφάλαιο 8

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η μελέτη των στοιχείων ενός ηλεκτρικού υβριδικού οχήματος δίνοντας μεγαλύτερη βάση στο ηλεκτρικό κομμάτι της κατασκευής με σκοπό την λειτουργία του σαν plug-in hybrid και έχοντας τον κινητήρα εσωτερικής καύσης μόνο για περιπτώσεις ανάγκης.



Σχήμα 8.1: μπλοκ διάγραμμα

Για το σκοπό αυτό επιλέξαμε σειριακή διάταξη όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα 8.1.

Για να μετατρέψουμε τη μηχανική ενέργεια του κινητήρα εσωτερικής καύσης σε ηλεκτρική επιλέξαμε μια σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος κυρίως λόγω της μεγαλύτερης απόδοσης σε σχέση με τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος και λόγω της πλέον διαδεδομένης χρήσης τους. Η έξοδος της γεννήτριας μετατρέπεται από έναν ανορθωτή και χρησιμοποιείται είτε για τη φόρτιση των μπαταριών είτε για τη λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα

Χρησιμοποιούμε συσσωρευτές ιόντων λιθίου για την αποθήκευση της ενέργειας διότι έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής με μηδαμινή συντήρηση, ικανότητα γρήγορης φόρτισης, υψηλή απόδοση ενέργειας και υψηλή ειδική ενέργεια και ενεργειακή πυκνότητα καθώς και χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης.

Για τη μετατροπή της ενέργειας από DC-AC χρησιμοποιούμε έναν τριφασικό αντιστροφέα και για τον έλεγχο του κινητήρα-γεννήτριας χρησιμοποιούμε τεχνική ελέγχου DTC καθώς αποτελεί τη βέλτιστη λύση παρέχοντας αξιόπιστο έλεγχο, γρήγορη απόκριση, δυνατότητες για περαιτέρω βελτίωση και δυνατότητα χρήσης αναγεννητικής πέδησης χωρίς την προσθήκη επιπλέον στοιχείων.

Τέλος θα επιλέξουμε τριφασικό επαγωγικό κινητήρα για τους παρακάτω λόγους. Γενικά έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων, προσφέρουν υψηλή ακρίβεια ελέγχου των στροφών του κινητήρα, καλή απόδοση σε σχέση με το κόστος κατασκευής και συντήρησης και διαθέτουν το υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας με μικρές ανάγκες συντήρησης και κατασκευαστικά έχουν μικρό βάρος και μικρό όγκο.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Στέφανος Μ. Μανιάς , « Ηλεκτρονικά ισχύος », Εκδόσεις Συμεών, 2012
- [2] Παντελής Β. Μαλατέστας , «Ηλεκτρική κίνηση », Εκδόσεις Τζιόλα, 3<sup>η</sup> έκδοση
- [3] StephenJ. Chapman , «Ηλεκτρικές μηχανές », Εκδόσεις Τζιόλα, 4<sup>η</sup> έκδοση
- [4] Παντελής Β. Μαλατέστας , «Ηλεκτρικές μηχανές», Εκδόσεις Τζιόλα
- [5] Nasser Hashemniaand Behzad Asaei , « Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles », 2008
- [6] Mounir Zeraoulia, Mohamed Benbouzid, Demba Diallo , « Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study», 2010
- [7] Thomas Finken, Matthias Felden and Kay Hameyer ,« Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles. »2008
- [8] Παναγιώτης Ασημακόπουλος, « Μελέτη και κατασκευή κινητήριου συστήματος υβριδικού οχήματος ενεργειακή διαχείριση μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. »
- [9] James Larminie, John Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained », 2003.
- [10] Sustainable Energy Ireland, «A study on the costs and benefits of hybrid electric and battery electric vehicles in Ireland » ,2007 Edition, Version 1
- [11] Robin Krutak, Willy Raimund, Reinhard Jellinek, Christine Zopf-Renner, Bettina Emmerling, Erik Figenbaum, Randi Hjorthol, Hans Bendsen, Gerd Marbjerg, Rasmus Stahlfest Holck Skov, «State of the Art Electric Propulsion: Vehicles and Energy Supply» , 2013
- [12] Nirupama Patra, « Study of induction motor drive with direct torque control scheme and indirect field oriented control scheme using space vector modulation » , 2013
- [13] Δημήτριος Π. Γυπαράκης, « Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικού μετατροπέα με στόχο τον έλεγχο κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης » , 2012
- [14] Michael T. Di Renzo , «Switched Reluctance Motor Control – Basic Operation and Example Using the TMS320F240 » , 2000
- [15] Μούρκα Γεωργία , « Μοντελοποίηση μπαταριών σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης » , 2014

- [16] Claude Ricaud and Philippe Vollet «Connection method for charging systems – a key element for electric vehicles»
- [17] Thomas Braunl « EV charging standards »
- [18] Μπάλας Σ. (Μονίνα),« Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και οι τεχνολογικές εξελίξεις » ,2014
- [19] Αικατερίνη Νικολάου Συκά , « Ηλεκτρικά οχήματα και έξυπνα δίκτυα: Ανοιχτά προβλήματα και ερευνητικές κατευθύνσεις » ,2014
- [20] Θανασιά-Σπανού Δημητρίου και Τσάκαλου Πέτρου , « Τεχνολογίες σύνδεσης οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο » ,2012
- [21] Ευστάθιος Πατσιάς , «μελέτη και κατασκευή ηλεκτροκινητήριου συστήματος υβριδικού οχήματος - σχεδιασμός και κατασκευή ηλεκτρονικού κυκλώματος ελέγχου της υβριδικής κατάστασης» , 2009
- [22] Γιώργος Εμμανουηλίδης (Ενεργειακό γραφείο Αιγαίου), «Ηλεκτρικά αυτοκίνητα » , 2011
- [23] Σόλων Κασίνης, Κατερίνα Πιριπίτη (Υπηρεσία Ενέργειας: Υπουργείο εμπορίουβιομηχανίας και τουρισμού), «Εκπαιδευτικό πρόγραμμα για μαθητές μέσης και τεχνικής εκπαίδευσης » , 2010
- [24] Καπετανάκης Γεώργιος & Καραμπίλας Πέτρος, « Υβριδική τεχνολογία αυτοκίνητων » Εκδόσεις ΙΜΕ ΓΣΕΒΕΕ , 2014