



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ευφυής Έλεγχος DC κινητήρα για την κίνηση Ηλεκτρικού
Οχήματος με χρήση Ασαφούς Λογικής
(Artificial Intelligent Control of DC motor for EV using
FLC)**

Κατσάτος Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής: Κώττας Θεόδωρος

Κοζάνη, Ιούλιος 2021

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη και προσομοίωση μιας ευφυούς μεθόδου χρήσης δύο ηλεκτρικών κινητήρων σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο με την ενσωμάτωση ασαφών ελεγκτών. Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται μια θεωρητική προσέγγιση, μέσω της μελέτης και θεμελίωσης των βασικών εννοιών. Σε δεύτερη φάση, διεκπεραιώνεται το πειραματικό μέρος.

Το θεωρητικό μέρος ξεκινά με μια περιγραφή της έννοιας και δομής του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, συμπεριλαμβανομένης μίας ιστορικής αναδρομής. Ακολουθεί μια εκτενής ανασκόπηση των βασικών κατηγοριών ηλεκτροκινητήρων και της δομής και λειτουργίας τους, με έμφαση σε όσους βρίσκουν εφαρμογή στην ηλεκτροκίνηση. Στη συνέχεια, περιγράφεται η λειτουργία των μετατροπών ισχύος, με τους dc/dc και dc/ac μετατροπείς να επεξηγούνται περαιτέρω. Η θεωρητική προσέγγιση ολοκληρώνεται με την κατανόηση του τρόπου δράσης ενός ασαφούς ελεγκτή, μέσω του προσδιορισμού των επιμέρων σταδίων της ασαφούς συλλογιστικής.

Στο πειραματικό μέρος αναλύεται και υπολογίζεται το σύνολο των ασκούμενων δυνάμεων αντίστασης του προτεινόμενου οχήματος, αφού νωρίτερα έχει προηγηθεί μια δήλωση των χαρακτηριστικών του. Τα δεδομένα ανάγονται στο παγκόσμιο πρωτόκολλο κατανάλωσης, με την προσθήκη της κλίσης του οδοστρώματος ως μία επιπλέον μετρική. Έπεται η σχεδίαση του συστήματος ισχύος, το οποίο πλαισιώνεται από δύο ηλεκτροκινητήρες ανά άξονα. Μια συστοιχία μπαταριών αντιστοιχεί σε κάθε κινητήρα, ενώ παράλληλα το ζεύγος των συσσωρευτών γεφυρώνεται με ένα σύστημα αυτοφόρτισης. Από την άλλη, ένα σύνολο ασαφών ελεγκτών FLC αναλαμβάνει τον έλεγχο και τη διαχείριση ισχύος, με στόχο την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, με την προσομοίωση να πραγματοποιείται στο περιβάλλον του Matlab. Εν τέλει, στην προτεινόμενη πλατφόρμα ενσωματώνεται ένα πρωτοπόρο σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω της χρήσης δυναμό, ως ένα μέσο υποβοήθησης ημι-αυτόνομης φόρτισης, με σκοπό την αύξηση της αυτονομίας και απόδοσης.

Λέξεις-κλειδιά: Brushless Κινητήρες, Ασαφείς Ελεγκτές (FLC), Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο (ΗΑ), Σύστημα Παραγωγής Ισχύος, Σύστημα Ανάκτησης Ενέργειας, Ηλεκτρικό Όχημα (ΗΟ), Δυνάμεις Αντίστασης, Πρωτόκολλο WLTP

Abstract

This paper was made out at the Department of Electrical Engineering and Computer Engineering of the University of Western Macedonia. The purpose of this paper is to research and theoretically simulate an intelligent method using two separate electric motors in an electric vehicle (EV) with the contribution of a fuzzy controller. In the first phase, a theoretical approach is carried out, through the study and understanding of the basic concepts. In the second phase, the experimental part is performed.

The theoretical part begins with a description of the concept and structure of EVs, including a historical background. Then, there is an extensive overview of the main categories of electric motors and their structure and operation, with an emphasis on those that find application in electric vehicles. The principle of power converters is described later, with dc / dc and dc / ac being further explained. The theoretical approach is completed by understanding the mode of action of an FLC controller, since the individual stages of the fuzzy reasoning are clarified earlier.

In the experimental part, the total amount of exercised resistance forces of the proposed vehicle are analyzed and calculated, after a declaration of its technical specifications. The data is reduced to the global harmonized standard WLTP, through the extension of the road's slope as an additional metric. The design of the power system is following, which is a frame of two electric motors per axle. A battery pack corresponds to each motor, while are connected by a self-charging system. Meanwhile, a set of FLC takes over control and power management, in order to optimize system performance, while Matlab platform is used for simulation scopes. Finally, the proposed design incorporates a pioneering energy recovery system through the use of a generator, as a means of assisting semi-autonomous charging, for the purpose of increasing its range and efficiency.

Keywords: Brushless Motors, Fuzzy Logic Controllers (FLC), Electric Vehicle (EV), Powertrain Design, Energy Recovery System, Dynamic Forces Exerted, WLTP Protocol

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε την περίοδο της πανδημικής κρίσης του ιού COVID-19. Ωστόσο, παρά τις δυσμενείς συγκυρίες που επέβαλλε η κρίση στην κοινωνία μας, είχα την τύχη να πλαισιώνομαι από άτομα που ήταν δίπλα μου, με υποστήριξαν και με βοήθησαν να φέρω εις πέρας το εγχείρημα αυτό. Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, κ. Κώττα Θεόδωρο για την εμπιστοσύνη και στήριξη που μου έδειξε στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος μελέτης. Έπειτα, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμηση μου στον διδακτορικό φοιτητή Γεώργιο Μαρασλίδη για την επίβλεψη και την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε στην ολοκλήρωση της διπλωματικής.

Αφιερώνω αυτήν την εργασία στην οικογένεια μου, στους ανθρώπους που ήταν και θα είναι πάντοτε δίπλα μου.

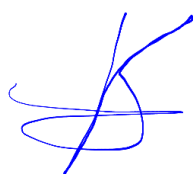
Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “Ευφυής Έλεγχος DC κινητήρα για την κίνηση Ηλεκτρικού Οχήματος με χρήση Ασαφούς Λογικής” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Κώττα Θεόδωρου αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

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

Copyright (C) Δημήτρης Κατσάτος, Θεόδωρος Κώττας, 2021, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή:



Περιεχόμενα

<i>Περίληψη</i>	<i>i</i>
<i>Abstract</i>	<i>ii</i>
<i>Ευχαριστίες</i>	<i>iii</i>
<i>Εισαγωγή</i>	<i>1</i>
Κεφάλαιο 1^ο: Το Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο	5
1.1 Εισαγωγή	5
1.2 Η έννοια του ηλεκτρικού αυτοκινήτου	6
1.3 Δομή ηλεκτρικού οχήματος	7
1.4 Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου	10
1.5 Η εξέλιξη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου	11
Κεφάλαιο 2^ο: Ηλεκτρικοί Κινητήρες	16
2.1 Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές	16
2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)	17
2.2.1 Σύνοψη ιστορική ανασκόπηση κινητήρων ΣΡ	17
2.2.2 Δομή κινητήρων ΣΡ	20
2.2.3 Αρχή λειτουργίας των κινητήρων ΣΡ	22
2.2.3 Είδη κινητήρων ΣΡ	22
2.2.3.1 Κινητήρας ξένης διέγερσης	23
2.2.3.2 Κινητήρας παράλληλης διέγερσης	23
2.2.3.3 Κινητήρας διέγερσης σειράς	24
2.2.3.4 Κινητήρας σύνθετης διέγερσης	24
2.2.3.5 Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (Brushless)	25
2.3 Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ)	28
2.3.1 Σύνοψη ιστορική ανασκόπηση κινητήρων ΕΡ	28
2.3.2 Κατασκευαστική δομή κινητήρων ΕΡ	30
2.3.3 Αρχή λειτουργίας κινητήρων ΕΡ	33
2.3.4 Είδη κινητήρων ΕΡ	33
2.3.4.1 Σύγχρονοι κινητήρες	34
2.3.4.2 Ασύγχρονοι κινητήρες	35
2.3.4.3 Κινητήρες με συλλέκτη (Universal)	36
2.4 Κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων	36
Κεφάλαιο 3^ο: Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος	39
3.1 Εισαγωγή	39
3.2 Εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος	40
3.3 Βασικά στοιχεία και τρόπος λειτουργίας τους	43
3.3.1 Θυρίστορ	43
3.3.2 Τρανζίστορ	45
3.4 Είδη ηλεκτρικών ισχύος	47
3.5 Μετατροπείς DC-DC	48

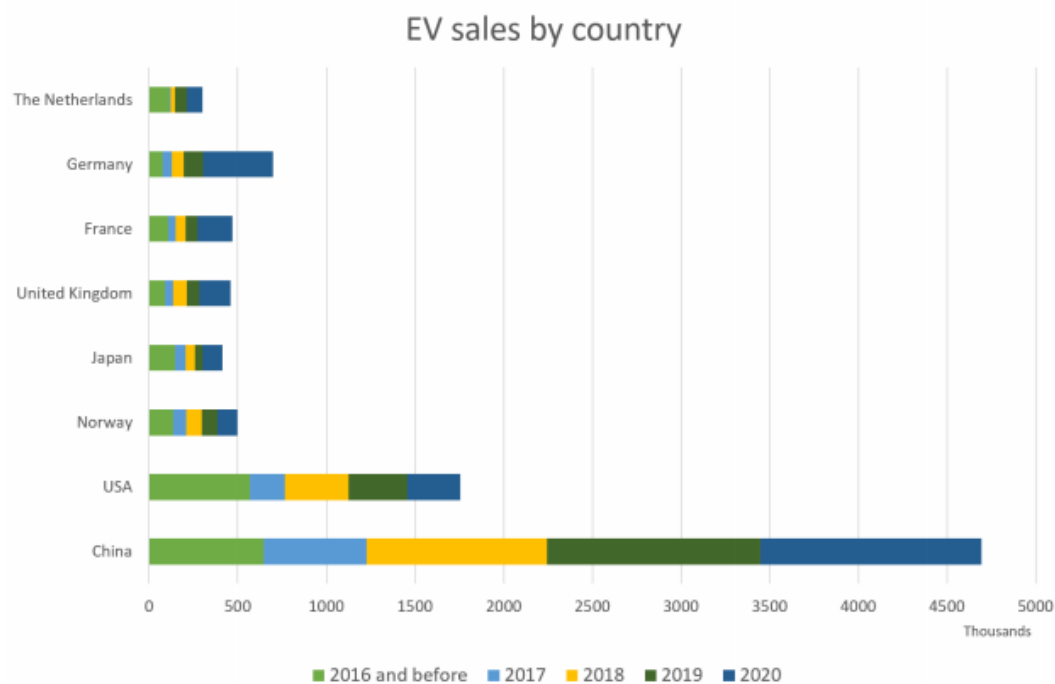
3.5.1 Μετατροπείς DC-DC υποβιβασμού.....	50
3.5.2 Μετατροπείς DC-DC ανύψωσης	51
3.5.3 Μετατροπείς DC-DC υποβιβασμού ανύψωσης.....	52
3.5.4 Cuk μετατροπείς DC-DC.....	52
3.6 Μετατροπείς DC-AC.....	53
3.6.1 Αντιστροφέας ημιγέφυρας (Half-Bridge Inverter)	55
3.6.2 Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας (Full-Bridge Inverter)	55
3.6.3 Αντιστροφέας διαμόρφωσης παλμών (PWM)	57
3.6.4 Τριφασικοί αντιστροφείς.....	57
Κεφάλαιο 4^ο: Fuzzy Ελεγκτές.....	58
4.1 Ασαφής λογική.....	58
4.2 Ασαφή σύνολα και συναρτήσεις συμμετοχής.....	59
4.3 Ασαφείς πράξεις	63
4.4 Ασαφείς κανόνες.....	65
4.5 Ασαφής συλλογιστική.....	67
4.5.1 Ασαφοποίηση δεδομένων εισόδου	67
4.5.2 Κατασκευή κανόνων.....	68
4.5.3 Επεξεργασία κανόνων	69
4.5.4 Από-ασαφοποίηση	69
Κεφάλαιο 5^ο: Χρήση Πρωτοκόλλου WLTP και Προσδιορισμός Ασκούμενων Δυνάμεων.....	71
5.1 Πρότυπο WLTP	71
5.2 Αναγωγή πειραματικών δεδομένων σε πρωτόκολλο WLTC	75
5.3 Ανάλυση και υπολογισμός ασκούμενων δυνάμεων στο προτεινόμενο όχημα	77
5.3.1 Δύναμη τριβής κύλισης	79
5.3.2 Δύναμη αεροδυναμικών αντιστάσεων	81
5.3.3 Δύναμη βαρύτητας σε άνοδο	83
5.3.4 Δύναμη της επιτάχυνσης.....	85
Κεφάλαιο 6^ο: Σχεδιασμός Συστήματος Παραγωγής Ισχύος με Έλεγχο από FLC	88
6.1 Εισαγωγή	88
6.2 Σύστημα παραγωγής και μετάδοσης ισχύος.....	89
6.2.1 Δύο κινητήρες, δύο άξονες.....	89
6.2.2 Μελέτη χρήσης δύο ηλεκτροκινητήρων	90
6.3 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	94
6.3.1 Υπολογισμός χωρητικότητας συσσωρευτών.....	94
6.3.2 Ανατροφοδότηση συστοιχιών μπαταρίας μέσω ηλεκτρονόμου	95
6.4 Σύστημα ανάκτησης ενέργειας	96
6.4.1 Η τάση της αγοράς γύρω από την αναγεννητική πέδηση	96
6.4.2 Σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω δυναμό	98
6.5 Ασαφής έλεγχος και διαχείριση ισχύος	101
6.5.1 Οι FLC ελεγκτές έναντι των PID σε μη γραμμικά συστήματα.....	101
6.5.2 Η δομή των FLC στην προτεινόμενη σχεδίαση.....	102

6.6 Σύνοψη προτεινόμενης σχεδίασης.....	110
<i>Κεφάλαιο 7^ο: Μελλοντικοί Στόχοι</i>	<i>112</i>
<i>Βιβλιογραφία</i>	<i>116</i>

Εισαγωγή

Η πορεία της ηλεκτροκίνησης

Εν έτει 2021, η παγκόσμια αγορά κατατοπίζεται ολοένα και περισσότερο προς την ηλεκτροκίνηση, η οποία αποτελεί μια ελκυστική λύση για αστικές και μη μετακινήσεις. Παρά την υψηλή τιμή αγοράς ενός ηλεκτρικού οχήματος στην ηλεκτρική έκδοση σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατική έκδοση μηχανής εσωτερικής καύσης, το ποσοστό αγοράς των EV έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη, ειδικά τα τελευταία χρόνια. Επιπλέον, πολλές χώρες προετοιμάζουν την σταδιακή μετάβαση προς την ηλεκτροκίνηση, αποθαρρύνοντας την αγορά των ICE (Internal Combustion Engine) και ταυτόχρονα ενισχύοντας τα δημόσια κονδύλια για το σύνολο των πλατφόρμων ηλεκτρικών οχημάτων (BEVs, PHEVs, HEVs, FCEVs, ER-EVs). Στην πραγματικότητα, η πλειονότητα των κυβερνήσεων αναπτυγμένων χωρών συνεχώς εφαρμόζει νέα νομοσχέδια υποστήριξης και πολιτικές προώθησης της χρήσης των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων, με απώτερο σκοπό την επικράτηση μιας βιώσιμης και φιλικής προς το περιβάλλον λύσης.



Διάγραμμα 1: Η μεγάλη άνοδος της ηλεκτροκίνησης στην παγκόσμια αγορά τα τελευταία χρόνια [1]

Σύμφωνα με έρευνες [2], οι αριθμοί αναμένεται να συνεχίσουν να σημειώνουν ανοδική πορεία μιας και αρκετές χώρες έχουν εκφράσει την επιθυμία τους να απαγορεύσουν την πώληση οχημάτων ICE στο εγγύς μέλλον (χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Νορβηγία, η οποία ήδη ανακοίνωσε ότι από το 2025 και έπειτα, όλα τα νέα οχήματα προς πώληση θα έχουν μηδενικές εκπομπές).

Ηλεκτροκινητήρες τύπου Brushless

Στο πλαίσιο αυτής της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρικών οχημάτων, ένα θέμα μείζονος σημασίας είναι τα κινητήρια συστήματα που ενσωματώνονται στις εν λόγω πλατφόρμες. Οι ανάγκες για υψηλή απόδοση, χαμηλό βάρος και κόστος είναι ολοένα και πιο απαιτητικές. Για τον σκοπό αυτό, οι αυτοκινητοβιομηχανίες τείνουν να χρησιμοποιούν κινητήρες τύπου Brushless, δηλαδή σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM) και κινητήρες DC μόνιμου μαγνήτη (Brushless DC Motors - BLDC) όπως και τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες (3-Phase AC Induction Motors).

Ανάμεσα τους, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PM) είναι αυτοί που σημειώνουν την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και φαίνεται να είναι η καλύτερη λύση. Ωστόσο, η επιλογή ενός PM κινητήρα (είτε PMSM ή BLDC) δεν είναι η μόνη στην αγορά, καθώς τη θέση της μοιράζεται με τους επαγωγικούς κινητήρες. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η διαφορά μεταξύ των PMSM και BLDC ανάγεται στην ημιτονοειδής κυματομορφή (sinusoidal back EMF) των πρώτων, έναντι της τραπεζοειδούς μορφής των δεύτερων [3]. Στην παρούσα χρονική στιγμή, ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη παρουσιάζει αυξανόμενο ποσοστό εφαρμογής σε ηλεκτρικά οχήματα εξαιτίας της υψηλής απόδοσης και πυκνότητας ισχύος, αλλά και της στιβαρότητάς του [4].

Ασαφής λογική για έλεγχο ισχύος

Η μετάφραση του όρου fuzzy logic σε ασαφή λογική δεν αποδίδει πλήρως τη σημασία της λέξης αυτής καθ' αυτής. Ουσιαστικά, δεν πρόκειται για μια ασαφή μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων. Εντούτοις, πρόκειται για μια μεθοδολογία που επιχειρεί να δώσει λύση σε ένα σύνολο ασαφών προβλημάτων. Η προσέγγιση αυτή πλησιάζει ιδιαίτερα την καθημερινή ζωή, την αβεβαιότητα και την πολυπλοκότητα του κόσμου μας.

Στις μέρες μας, η ασαφής λογική εφαρμόζεται σε ένα ευρύ σύνολο θετικών και οικονομικών επιστημών, καθώς και σε επιστημονικά πεδία της σύγχρονης μηχανικής. Στο πλαίσιο αυτό, ο έλεγχος και η διαχείριση των συστημάτων παραγωγής και

μετάδοσης ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων, έχει αποδειχθεί ένα σημαντικό πεδίο εφαρμογής των ασαφών ελεγκτών (FLC), ως προς τη βελτιστοποίηση των ελεγκτηρίων συστημάτων. Σε κάθε περίπτωση, η προσέγγιση της ασαφούς λογικής σημειώνει πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι της παραδοσιακής μεθόδου ελέγχου (PI, PID ελεγκτών), εξαιτίας της διαχείρισης πολυπλοκότητας, της πλήρως παραμετροποιήσιμης μορφής της, αλλά και της ευπροσάρμοστης συμπεριφοράς της σε περιπτώσεις μη γραμμικών συστημάτων.

Σκοπός και αντικείμενο παρούσας εργασίας

Στους καιρούς που διανύουμε η ανοδική πορεία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι αδιαμφισβήτητη, καθώς και των επιμέρους συνιστωσών που ενσωματώνουν. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη αφενός ενός εναλλακτικού συστήματος παραγωγής, μετάδοσης και ανάκτησης ισχύος και αφετέρου στη βέλτιστη διαχείριση των συστημάτων αυτών για την περίπτωση ενός ηλεκτρικού οχήματος. Οι ενέργειες αυτές έχουν απώτερο σκοπό την αύξηση της αυτονομίας του οχήματος, ενδεχομένως του κυρίαρχου κριτηρίου επιλογής των σημερινών EVs.

Για το σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε μια πλατφόρμα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος που χρησιμοποιεί brushless ηλεκτροκινητήρες και ελέγχεται μέσω ενός συνόλου ασαφών ελεγκτών. Μεταξύ άλλων, η εν λόγω διάταξη καινοτομεί με τη δημιουργία ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας κατά τη διάρκεια κίνησης του οχήματος μέσω της χρήσης δυναμό.

Δομή παρούσας εργασίας

Στο κεφάλαιο 1^ο, γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, καθώς αναλύονται συνοπτικά τα κύρια μέρη ενός ΗΟ και ο τρόπος λειτουργίας του. Επιπλέον, το κεφάλαιο περιλαμβάνει μια εκτενή ιστορική ανασκόπηση της πορείας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου από τις απαρχές της ηλεκτροκίνησης μέχρι τη σύγχρονη εποχή.

Στο κεφάλαιο 2^ο, προσδιορίζονται τα βασικά είδη ηλεκτρικών κινητήρων. Στο στάδιο αυτό, διαχωρίζονται οι κινητήρες εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος ως προς την κατασκευαστική δομή και λειτουργία τους. Ταυτόχρονα, επεξηγούνται σε βάθος τα επιμέρους είδη καθεμιάς βασικής κατηγορίας και αναλύονται τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα χρήσης τους σε κάθε περίπτωση. Βάσει αυτών, στο τέλος αναφέρεται

ένα σύνολο από είδη ηλεκτροκινητήρων που χρησιμοποιούνται σε ΗΟ, με τις διαφοροποιήσεις που συναντώνται στον κάθε τύπο.

Στο κεφάλαιο 3^ο, περιγράφονται τα ηλεκτρονικά στοιχεία υπό το πρίσμα των μετατροπών ισχύος. Με τη σειρά τους, οι μετατροπείς ισχύος συνιστούν αναπόσπαστο μέρος ενός ΗΟ, με τους μετατροπείς DC/DC και DC/AC να πρωταγωνιστούν στο χώρο της ηλεκτροκίνησης, οι οποίοι είναι και αυτοί που αναλύονται περεταίρω. Παράλληλα, εξηγούνται και θεμελιώδεις έννοιες και στοιχεία της Ηλεκτρονικής για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των μετατροπών ισχύος.

Στο κεφάλαιο 4^ο, αναλύονται οι βασικές αρχές της ασαφούς λογικής και επεξηγούνται οι βασικές πράξεις που χρησιμοποιεί. Στην συνέχεια, αποσαφηνίζεται η έννοια της ασαφούς συλλογιστικής και τα επιμέρους στάδια της, τα οποία εφαρμόζονται σε κάθε εφαρμογή, η οποία ενσωματώνει τα ασαφή γνωστικά δίκτυα (FCN). Με τον τρόπο αυτό γίνεται κατανοητός ο τρόπος δράσης ενός ασαφούς ελεγκτή.

Στο κεφάλαιο 5^ο, γίνεται μια περιγραφή των ασκούμενων δυνάμεων με τις οποίες έρχεται αντιμέτωπο, σε πρώτο στάδιο ένα οποιοδήποτε όχημα και σε επόμενο στάδιο, το προτεινόμενο όχημα. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που θεωρήθηκαν για το όχημα πραγματοποιείται ο υπολογισμός των δυνάμεων αυτών με βάση αληθινά δεδομένα της κλίσης του οδοστρώματος για μια ορισμένη διαδρομή. Παράλληλα, γίνεται μια αναγωγή των δεδομένων στο παγκόσμιο πρωτόκολλο κατανάλωσης WLTP.

Στο κεφάλαιο 6^ο, παρουσιάζεται η προτεινόμενη πλατφόρμα του συστήματος μετάδοσης και παραγωγής ισχύος με χρήση δύο ηλεκτροκινητήρων. Αναλύεται το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με δύο συστοιχίες μπαταριών και το σύνολο ασαφών ελεγκτών που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τη διαχείριση ισχύος. Τέλος, προτείνεται μια πρωτοποριακή σχεδίαση ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας μέσω της χρήσης δυναμό για ημι-αυτόνομη φόρτιση.

Κεφάλαιο 1^ο: Το Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο



Εικόνα 1.1: Το Ford Model T, γνωστό και ως “Tin Lizzie”, δεσπόζει «ειρωνικά» δίπλα στο σημερινό Tesla Model S, αναπολώντας στιγμές από το μακρινό 1908, όταν η εμφατική επιτυχία του Model T σηματοδότησε τα πρώτα χρόνια παρακμής των Ηλεκτρικών Οχημάτων της εποχής [5]

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων (ΗΑ) δεν είναι μία ιδέα της τελευταίας δεκαετίας. Αντιθέτως, πρόκειται για μια παλιά και ενδιαφέρουσα ιστορία που συμβαδίζει με την αρχή της αυτοκίνησης. Πιο συγκεκριμένα, η ηλεκτροκίνηση συνυπήρχε με τους ατμοκινητήρες και βενζινοκινητήρες, δίχως όμως να καταφέρνει να εδραιωθεί στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, παρά την αέναη ανάγκη για μια οικολογική εναλλακτική. Μάλιστα, πρόκειται για μια εναλλακτική που διατηρούσε τον υψηλότερο συντελεστή ενεργειακής απόδοσης από όλα τα αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης.

Ωστόσο, κατά την περίοδο του 1910 και έπειτα, η πορεία της ηλεκτροκίνησης άρχισε να φθίνει ραγδαία. Πίσω από την κατάληξη αυτή βρισκόταν η χαμηλή τιμή της βενζίνης/πετρελαίου, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος αγοράς ενός ΗΑ (περίπου διπλάσιο κόστος από την αγορά ενός βενζινοκίνητου). Στο πλαίσιο αυτό, καθοριστική, για την τότε πορεία της ηλεκτροκίνησης, υπήρξε η παρουσίαση του βενζινοκίνητου Ford Model T (1908). Αποκαλούμενο και ως *Tin Lizzie*, θεωρείται το πρώτο στην ιστορία προσιτό αυτοκίνητο, το οποίο, κατά συνέπεια, επέτρεψε τα ταξίδια στην αμερικανική μεσαία τάξη. Στην συνέχεια, κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκόσμιου Πολέμου και έπειτα σημειώθηκε μεγάλη ανάπτυξη γύρω από τις μηχανές εσωτερικής

καύσης (ΜΕΚ). Όλα τα παραπάνω, σηματοδότησαν μια στροφή της αυτοκίνησης προς τους βενζινοκινητήρες, γυρνώντας την πλάτη στην ηλεκτροκίνηση.

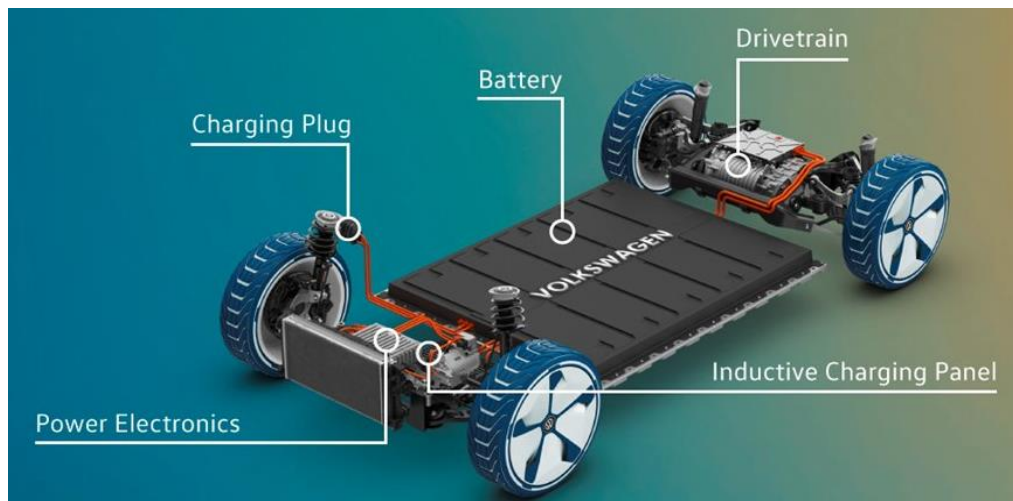
Έτσι, μετά από μια πρωτοφανή πτώση, η ηλεκτροκίνηση επέστρεψε στο προσκήνιο την τελευταία δεκαετία. Εν έτει 2021, αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν στρέψει την προσοχή τους στην παραγωγή ηλεκτρικών εκδόσεων των μοντέλων τους. Φυσικά, σε αυτό το σημείο δε θα μπορούσαμε να μην αναφερθούμε στους λόγους επιστροφής της ηλεκτροκίνησης.

Το πρώτο σημείο καμπής, ήταν η παρουσίαση του υβριδικού αυτοκινήτου Toyota Prius (1997), το οποίο παράχθηκε παγκοσμίως και έλαβε σημαντική στήριξη από δημόσια πρόσωπα πετυχαίνοντας αξιοσημείωτη διάδοση. Σε επόμενο χρόνο, κομβικό σημείο της ηλεκτροκίνησης υπήρξε η είδηση ότι μια νεοφυής εταιρεία, η Tesla Motors, από το Silicon Valley της Καλιφόρνια, υποσχέθηκε την παραγωγή πολυτελών ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Κατά πολλούς, οι δύο εξελίξεις αυτές θεωρούνται ότι ήταν το εναρκτήριο έναυσμα, προκειμένου η ηλεκτροκίνηση να επανέλθει σε θέση ισχύος [6].

1.2 Η έννοια του ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Ως ηλεκτρικό αυτοκίνητο (ΗΑ) νοείται κάθε όχημα που εξασφαλίζει την κίνηση του εξ' ολοκλήρου μέσω ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο αναλυτικά, κύρια πηγή ενέργειας σε ένα ΗΑ αποτελούν συστοιχίες επαναφορτιζόμενων μπαταριών, οι οποίες με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία ηλεκτρικών μηχανών. Η αποκλειστική χρήση ηλεκτρικών κινητήρων, έναντι μηχανών εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), είναι αυτή που διαχωρίζει τα ηλεκτρικά οχήματα από τις υπόλοιπες κατηγορίες, στις οποίες ανήκουν και τα υβριδικά οχήματα. Τα δύο αυτά είδη, ηλεκτρικά και υβριδικά, δε θα πρέπει να συγχέονται, καθώς στα υβριδικά αυτοκίνητα κάνουμε λόγο για ένα πάντρεμα μεταξύ των ηλεκτρικών κινητήρων και των ΜΕΚ. Στην πραγματικότητα, ένα υβριδικό όχημα, πέρα του ηλεκτροκινητήρα, χρησιμοποιεί υποστηρικτικά μια μηχανή εσωτερικής καύσης, τόσο για την φόρτιση των συσσωρευτών του, όσο και για εναλλαγή ή παράλληλη λειτουργία των κινητήριων συνόλων ανά περίπτωση (εντός/εκτός αστικού κύκλου).

1.3 Δομή ηλεκτρικού οχήματος

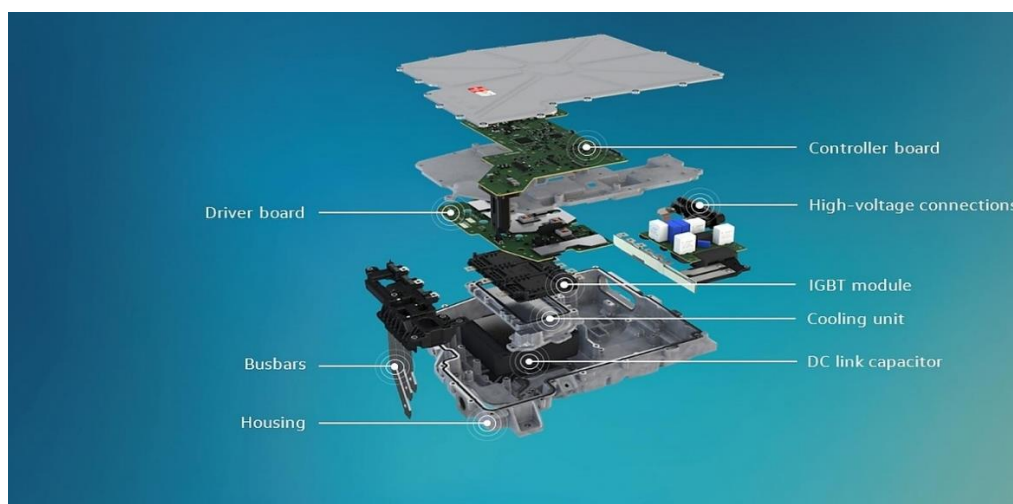


Εικόνα 1.3.1: Η δομή ενός σύγχρονου ηλεκτροκίνητου οχήματος, συγκεκριμένα στη φωτογραφία απεικονίζεται η βασική πλατφόρμα της νέας σειράς μοντέλων της VW με την ονομασία ID

Τα βασικά δομικά μέρη ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος δε διαφέρουν ιδιαίτερα από τα συμβατικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης. Πιο συγκεκριμένα, μέρη που απαρτίζουν το αμάξωμα, το πλαίσιο, το σύστημα διεύθυνσης, την ανάρτηση και τα φρένα συνήθως παραμένουν ίδια. Ωστόσο, το στοιχείο που αλλάζει δραστικά είναι η δομή του κινητήριου συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό, στο δομικό σύνολο ενός ηλεκτρικού αυτοκίνητου συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

1. Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος (Ελεγκτής)
2. Συσσωρευτές (Μπαταρίες)
3. Ηλεκτρικός κινητήρας

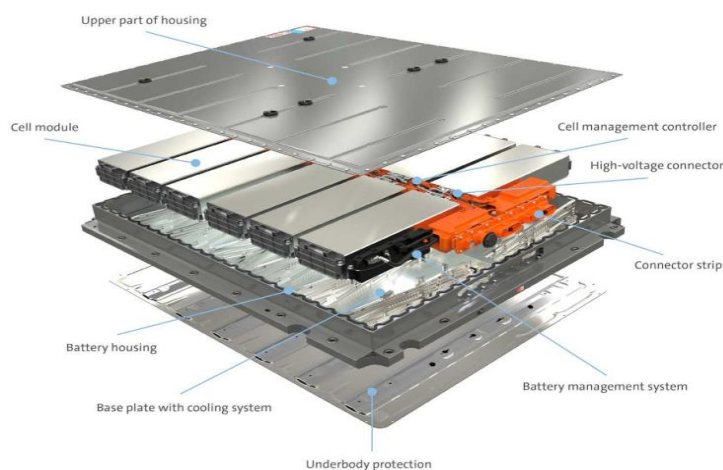
Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος



Εικόνα 1.3.2: Η δομή ενός σύγχρονου inverter, συγκεκριμένα πρόκειται για τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος της VW MEB platform, του μοντέλου ID.4

Πρόκειται για μια ηλεκτρονική διάταξη, η οποία διαχειρίζεται την ηλεκτρική ισχύ και μετατρέπει την τάση και την ένταση του ρεύματος, με σκοπό να αντιστοιχιστούν οι δυνατότητες του συστήματος παραγωγής στις απαιτήσεις του συστήματος κατανάλωσης. Στην περίπτωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, το σύστημα του ελεγκτή δέχεται την συνεχή τάση των συσσωρευτών, προκειμένου να την μετατρέψει στην κατάλληλη μορφή για την τροφοδοσία του κινητήρα και ταυτόχρονα εκτελεί έλεγχο της ροπής και των στροφών του ηλεκτροκινητήρα. Οι μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται στα ΗΑ ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα που διαθέτει το όχημα. Ουσιαστικά, για την επιλογή του ελεγκτή θα πρέπει να γνωρίζει κανείς αν η τάση, που θα παράγει στην έξοδο του, θα είναι συνεχής ή εναλλασσόμενη. Κατά συνέπεια, βάσει των κινητήρων που θα τροφοδοτεί, τα ηλεκτρονικά ισχύος διαχωρίζονται σε μετατροπείς τύπου inverter DC-AC (αντιστροφείς) και σε μετατροπείς τύπου chopper DC-DC (δηλαδή, τα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται και για την μετατροπή του συνεχούς σε συνεχές, διαφορετικής τάσης και έντασης) [7].

Συσσωρευτές

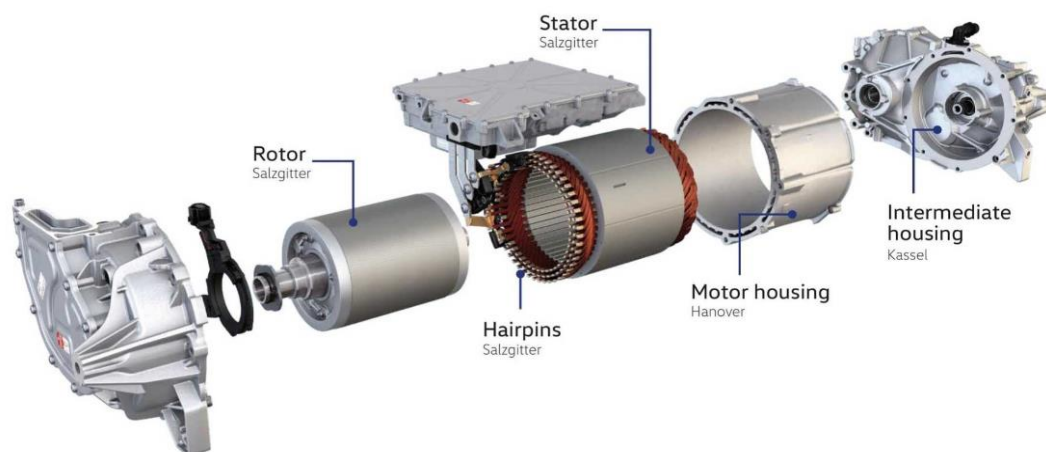


Εικόνα 1.3.3: Η μορφή μιας σύγχρονης συστοιχίας μπαταριών, συγκεκριμένα πρόκειται για την μπαταρία της VW MEB platform, με κυψέλες ιόντων λιθίου (Li-ion) και χωρητικότητα έως 77kWh

Οι μπαταρίες είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που επιτρέπουν την μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική κατά το στάδιο εκφόρτισης τους, ενώ κατά το στάδιο της φόρτισης τους συμβαίνει η μετατροπή αντιστρόφως. Αποτελούνται από συστοιχίες επαναφορτιζόμενων στοιχείων και συνιστούν την κύρια πηγή ενέργειας του ΗΑ. Στα ηλεκτρικά οχήματα πλέον συνηθίζεται η χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου, εξαιτίας της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας τους, της μεγάλης διάρκειας ζωής και του χαμηλού βάρους τους. Βέβαια, το βασικό πλεονέκτημα των μπαταριών λιθίου είναι η

εξάλειψη του «φαινομένου μνήμης» που εντοπίζεται στις μπαταρίες (Διευκρίνιση: Το «φαινόμενο μνήμης» είναι μια παρενέργεια που εντοπίζεται στις επαναφορτιζόμενες διατάξεις και δημιουργείται όταν ο χρήστης φορτίζει διακεκομμένα την μπαταρία ή δεν έχει αποφορτίσει πλήρως την μπαταρία πριν την φόρτιση. Αυτό επιδρά αρνητικά στα δομικά υλικά της μπαταρίας και ο βαθμός των επιπτώσεων εξαρτάται από τη φύση των υλικών). Από την άλλη πλευρά, στα αρνητικά των πολλά υποσχόμενων μπαταριών λιθίου, συμπεριλαμβάνονται το υψηλό κόστος και η πτώση απόδοσης υπό μεγάλες θερμοκρασίες. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται και μπαταρίες μεταλλικού υδριδίου του νικελίου (NiMH) ως μια πιο οικονομική λύση, ωστόσο διατηρούν χαμηλό λόγο ισχύος-βάρους σε σύγκριση με τις μπαταρίες λιθίου και εμφανίζουν ελαφρώς το εν λόγω φαινόμενο της μνήμης. Στην πράξη όμως, το φαινόμενο μνήμης είναι ανεπαίσθητο λόγω της υψηλής αυτοεκφόρτισης τους [8].

Ηλεκτρικοί Κινητήρες



Εικόνα 1.3.4: Η όψη ενός σύγχρονου ηλεκτρικού κινητήρα, εν προκειμένω ενός brushless ηλεκτροκινητήρα 150KW (ονομασία κινητήρα «APP 310» με την τιμή 310 να καθορίζει το μέγιστο όριο ροπής σε Nm), ο οποίος χρησιμοποιείται στο VW ID.3

Στα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούνται κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος αλλά και κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Πλέον, οι περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες τείνουν να επιλέγουν ολοένα και περισσότερο σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM), τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες (3-Phase AC Induction Motors), κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Brushless DC Motors - BLDC) και λιγότερο κινητήρες dc διέγερσης σειράς (DC Series Motor). Ωστόσο, στο παρελθόν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος - που ήταν και οι πρώτοι που χρησιμοποιήθηκαν σε HA - βρέθηκαν σε θέση ισχύος έναντι των εναλλασσόμενων, λόγω της αδυναμίας μετατροπής του συνεχούς ρεύματος του συσσωρευτή σε

εναλλασσόμενο. Έπειτα, ήρθαν στο προσκήνιο τα ηλεκτρονικά ισχύος που έδωσαν λύση στην μετατροπή αυτή και άνοιξαν τον δρόμο για τους AC κινητήρες, χωρίς όμως να σημαίνει το τέλος των DC κινητήρων στην αυτοκίνηση.

Στο πλαίσιο αυτό, να σημειωθεί ότι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος διακρίνονται για την ευκολία ρύθμισης της ταχύτητάς τους, την διασφάλιση σταθερής ροπής και ισχύος. Εντούτοις, βρίσκονται σε μειονεκτική θέση εξαιτίας του αυξημένου κόστους συντήρησης, της ογκώδης κατασκευής τους και της συγκριτικά μικρής απόδοσης σε σχέση με τους AC κινητήρες. Από την άλλη, οι δε επαγωγικοί κινητήρες, υστερούν έναντι των DC κινητήρων, λόγω της πολυπλοκότητας των inverters που απαιτούνται για τη λειτουργία τους, αλλά και της δυσκολίας ελέγχου τους. Ωστόσο, οι AC κινητήρες στο σύνολο τους (σύγχρονοι/ασύγχρονοι) έχουν ικανοποιητική ροπή, οι ασύγχρονοι έχουν χαμηλό κόστος, ελάχιστα έξοδα συντήρησης και μικρό όγκο, ενώ οι σύγχρονοι εμφανίζουν μεγάλη ροπή και απόδοση. Συμπερασματικά, είναι αντιληπτό ότι δεν υπάρχει μία βέλτιστη λύση για την επιλογή ηλεκτροκινητήρα σε ΗΑ, αντ' αυτού πάντα εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Πέρα από τις δύο βασικές κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων, εναλλασσόμενους και συνεχείς, διακρίνουμε ένα σύνολο υποπεριπτώσεων για καθεμιά. Επιγραμματικά, οι ηλεκτροκινητήρες που επρόκειτο να αναλυθούν περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο είναι οι εξής:

Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

- Κινητήρες Ξένης Διέγερσης
- Κινητήρες Διέγερσης Σειράς
- Κινητήρες Παράλληλης Διέγερσης
- Κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Brushless DC)

Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

- Ασύγχρονοι Τριφασικοί Κινητήρες Βραχυκυκλωμένου Κλωβού
- Ασύγχρονοι Τριφασικοί Κινητήρες Δακτυλιοφόρου Δρομέα
- Σύγχρονοι Τριφασικοί Κινητήρες

1.4 Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα στηρίζονται στην συνεργασία μεταξύ μιας τριμελούς δομής. Οι μπαταρίες, γνωστές και ως ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, αποτελούν το κύριο τρόπο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε

ένα ΗΑ, προκειμένου να τροφοδοτήσουν τον ηλεκτρικό κινητήρα με την απαιτούμενη ενέργεια. Ωστόσο, μεταξύ του ηλεκτροκινητήρα και των μπαταριών, παρεμβάλλεται ένας ελεγκτής (ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος), με σκοπό εύρυθμη μεταφορά και διαμόρφωση της τάσης των συσσωρευτών, πριν αυτή φτάσει στα άκρα του κινητήρα. Παράλληλα, ο μετατροπέας ισχύος αυτός αποτελεί την «καρδιά» του κινητήριου συνόλου, μιας και καθ' όλη τη διάρκεια, ελέγχει την λειτουργία του οχήματος, καθορίζοντας την ταχύτητα και την ροπή του κινητήρα. Ο ίδιος ο κινητήρας είναι η διάταξη που θα λάβει την τάση μέσω του ελεγκτή, η οποία θα έχει προσαρμοστεί κατάλληλα με βάση τόσο τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα, όσο και από τις τιμές του ποτενσιόμετρου που αντιστοιχεί στο πάτημα του γκαζιού από τον οδηγό, και θα μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Έτσι, ο άξονας του κινητήρα θα αρχίσει να περιστρέφεται και να μεταφέρει την κίνηση στους τροχούς του οχήματος, διαμέσου του συστήματος μετάδοσης.

1.5 Η εξέλιξη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Τα πρώτα χρόνια

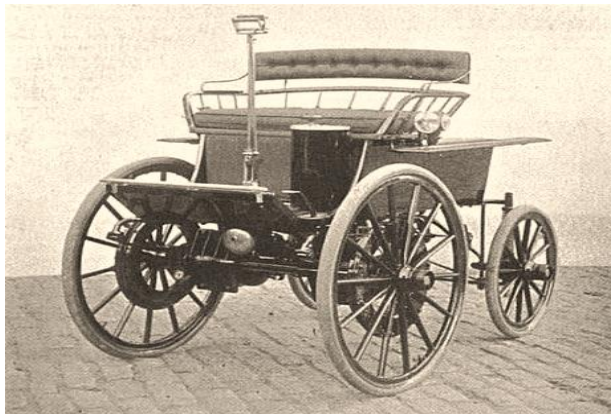
Η εξέλιξη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου πάντοτε ήταν άρρηκτα συνυφασμένη με την τεχνολογική πρόοδο της εκάστοτε περιόδου. Τα πρώτα βήματα ξεκίνησαν από το 1830 και έπειτα, και το 1834 ο Αμερικανός εφευρέτης Thomas Davenport δημιουργεί ένα από τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ωστόσο δίχως να χρησιμοποιεί επαναφορτιζόμενες συστοιχίες μπαταριών. Αργότερα, την χρονιά του 1859 ο Gaston Plante αναπτύσσει την πρώτη πρακτική μπαταρία οξέος-μολύβδου και ανοίγει τον δρόμο για την εξέλιξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων της εποχής.

Φτάνουμε στο 1887, όταν ο Σκοτσέζος χημικός William Morrison παρουσιάζει την εξαθέσια ηλεκτροκίνητη άμαξα, η οποία καταφέρνει να υπερβαίνει τα τριάντα χιλιόμετρα την ώρα και να διατηρεί την αυτονομία της για περίπου ογδόντα χιλιόμετρα χωρίς φόρτιση. Ωστόσο, ο ίδιος ο Morrison εγκαταλείπει την ιδέα του καθώς το ενδιαφέρον του ήταν γύρω από την εξέλιξη των μπαταριών, στο πλαίσιο αυτό άλλωστε κατασκεύασε το εν λόγω ηλεκτρικό αυτοκίνητο.



Εικόνα 1.5.1: Το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο του William Morrison

Αργότερα, τον Αύγουστο του 1894 οι ερευνητές Pedro Salom και Henry Morris στην Πενσυλβάνια κατασκευάζουν ένα από τα πρώτα αξιόλογα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και το παρουσιάζουν με την επωνυμία «Electrobat». Το Electrobat, με μέγιστη ταχύτητα 32 χιλιομέτρων/ώρα και αυτονομία 40 χιλιομέτρων ανά φόρτιση καταφέρνει να ξεχωρίσει. Ζυγίζει τουλάχιστον δύο τόνους, εκ των οποίων κάτι λιγότερο από το ήμισυ, αποτελούσε το βάρος της μπαταρίας οξέος-μολύβδου που χρησιμοποιούσε.



Εικόνα 1.5.2: Το Electrobat του 1894 Morrison

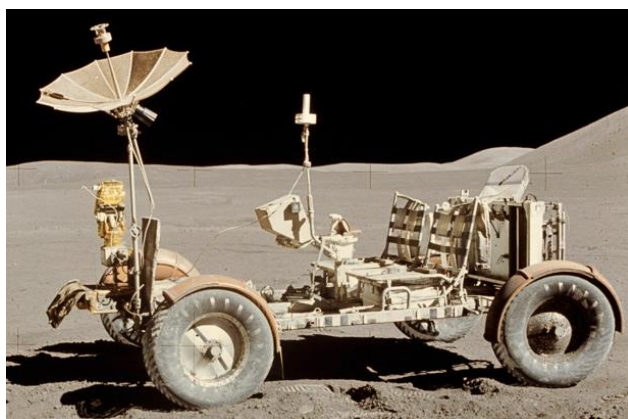
Παράλληλα, στις ΗΠΑ το 1889 ο Thomas Edison, ως μεγάλος υποστηρικτής της ηλεκτροκίνησης αγοράζει το ηλεκτροκίνητο της Baker Electric, σε μια προσπάθεια για βελτίωση της μπαταρίας του. Ουσιαστικά, ο Edison προσπαθούσε να μειώσει το βάρος και να αυξήσει την αυτονομία και ισχύ των μπαταριών. Το 1906 καταφέρνει να εφεύρει την αλκαλική μπαταρία και οι αυτοκινητοβιομηχανίες της εποχής, στηρίζοντας την εφεύρεση του αρχίζουν και τις χρησιμοποιούν. Γρήγορα, διαπιστώνεται ότι οι μπαταρίες έρχονταν περαιτέρω βελτίωσης και η χρήση τους σταματά. Λίγα χρόνια αργότερα, ο Edison επιστρέφει με ανανεωμένα σχέδια για τις μπαταρίες του και συνεργάζεται με τον στενό του φίλο, Henry Ford, για την παραγωγή ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος. Την ίδια στιγμή, ο Ford λανσάρει το Model T, το οποίο

σημειώνει τρομερή επιτυχία και η ιδέα για κατασκευή ηλεκτρικού αυτοκινήτου, από κοινού με τον Edison, εγκαταλείπεται.



Εικόνα 1.5.3: Το Ford Model T του 1909 Morrison

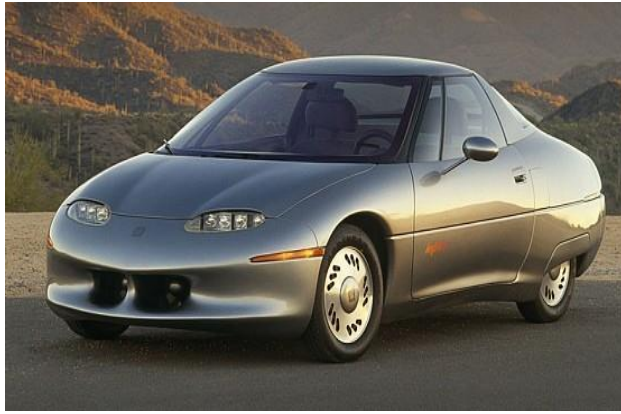
Τα επόμενα χρόνια χαρακτηρίστηκαν από μια μεγάλη πτώση της ηλεκτροκίνησης (όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 1.1), και αν εξαιρέσουμε το ηλεκτροκίνητο Lunar Rover της αποστολής του Apollo 15 στη σελήνη το 1971, η ιδέα της ηλεκτροκίνησης είχε περιθωριοποιηθεί. Ωστόσο, στα χρόνια της πετρελαϊκής κρίσης του '73, σημειώθηκε μια μικρή άνοδος για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, αλλά γρήγορα εγκαταλείφθηκε και τα projects της εποχής παρέμειναν σε πειραματικό στάδιο [6].



Εικόνα 1.5.4: Το Lunar Rover στην αποστολή του Apollo 15 το 1971 Morrison

Η νεότερη περίοδος

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, η General Motors παρουσιάζει το EV1, το πρώτο σύγχρονο ηλεκτροκίνητο όχημα με αυτονομία 100 χιλιομέτρων και ταχύτητα κοντά στα 130 χιλιόμετρα/ώρα. Το ιστορικό EV1 του 1996, διέθετε ένα ολοκληρωμένο σύνολο, με προηγμένης τεχνολογίας μπαταρία, μηχανική υπεροχή και την αίγλη της GM. Ωστόσο, το υψηλό κόστος απόκτησης του σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες της μπαταρίας του, επιφύλασαν ένα εμφατικό τέλος [9].



Εικόνα 1.5.5: Το εμβληματικό EV1 του 1996 Morrison

Η Toyota ακολουθεί την ιδέα της GM, και την ίδια εποχή, τον Δεκέμβρη του 1997 παρουσιάζει το νέο της μοντέλο, και μάλιστα το πρώτο στην ιστορία υβριδικό αυτοκίνητο μαζικής παραγωγής με την ονομασία «Prius». Με ιδιαίτερη σχεδιαστική φιλοσοφία, το Prius καταφέρνει να γίνει πρωτοσέλιδο της εποχής και να χαρακτηριστεί ως ο πρωτοπόρος του αυτοκινήτου του 21^{ου} αιώνα. Παγκοσμίως, οι πωλήσεις του βρέθηκαν στα ύψη και το ίδιο το Prius έμεινε στην ιστορία, σηματοδοτώντας τα πρώτα χρόνια επανεμφάνισης της ηλεκτροκίνησης στην σύγχρονη εποχή.



Εικόνα 1.5.6: Το Toyota Prius του 2003

Το 2003 ιδρύεται από τον Michael Marks η Tesla Motors στο Silicon Valley της Καλιφόρνια, ενώ 5 χρόνια μετά παρουσιάζει το πρωτοποριακό ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο με спор χαρακτήρα και εμφάνιση, το λεγόμενο Tesla Roadster του 2008. Το σασί του αυτοκινήτου βασίστηκε στο μοντέλο της Lotus Elise και κατάφερε να γράψει ιστορία ως το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο με αυτονομία μεγαλύτερη των 320 χιλιομέτρων. Επιπλέον, το διαθέσιμο της Tesla ξεχώρισε για τις επιδόσεις του, με την τελική ταχύτητα να αγγίζει τα 200 χιλιόμετρα/ώρα και επιτάχυνση 0-100χλμ/ώρα σε μόλις 4 δευτερόλεπτα. Πρόκειται για ένα αυτοκίνητο που άλλαξε παγκοσμίως τα

Ευφυής Έλεγχος DC κινητήρα για την κίνηση Ηλεκτρικού Οχήματος με χρήση Ασαφούς Λογικής

δεδομένα τόσο γύρω από την ηλεκτροκίνηση όσο και την ίδια την αυτοκίνηση γενικότερα [10].



Εικόνα 1.5.7: Το Tesla Roadster 2008, πρώτο αυτοκίνητο της Tesla Motors

Κεφάλαιο 2^ο: Ηλεκτρικοί Κινητήρες



Εικόνα 2.1: Σύγχρονος ηλεκτροκινητήρας τοποθετημένος σε όχημα της Tesla Motors

2.1 Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές

Η ηλεκτρική μηχανή είναι μια διάταξη ικανή να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και την μηχανική σε ηλεκτρική. Κατά την περίπτωση που λαμβάνει στην είσοδο της ηλεκτρική ενέργεια και παράγει μηχανική λειτουργεί ως κινητήρας, ενώ κατά τη περίπτωση που λαμβάνει μηχανική ενέργεια στην είσοδο της και παράγει ηλεκτρική στην έξοδο λειτουργεί ως γεννήτρια. Οι ηλεκτρικές μηχανές θεωρούνται ως η καρδιά των κινητήριων συστημάτων και με βάση αυτές καθορίζεται ο σχεδιασμός και παράμετροι λειτουργίας τους.

Οι ηλεκτρικές μηχανές έχουν διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας και της τεχνολογίας. Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουμε στην καθημερινότητα μας προέρχεται εξολοκλήρου από ηλεκτρικές γεννήτριες, αφού αποτελούν το βασικό συστατικό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλές φορές μάλιστα, ένα Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (H/Z) αποτελεί την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μέρη ή εγκαταστάσεις όπου δε φθάνει το δίκτυο διανομής. Άλλοτε, χρησιμοποιούνται ως εφεδρική πηγή είναι απαραίτητο να διασφαλίσουμε την αδιάκοπη και απρόσκοπτη λειτουργία εγκαταστάσεων σε 24ωρη βάση, όπως νοσοκομειακές μονάδες, παραγωγικές διαδικασίες ψυκτικούς θαλάμους κ.λπ. Επιπλέον, μπορεί να λειτουργήσουν συνδυαστικά με το δίκτυο διανομής για να καλύψουν φορτίο αιχμής. Από την άλλη πλευρά, οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν βασικό άξονα των παραγωγικών διαδικασιών με βιομηχανικές εφαρμογές (συστήματα

μεταφοράς, ανυψωτικά κ.λπ.), καθώς και σε αυτούς στηρίζεται ο τομέας παραγωγής των ηλεκτρικών οχημάτων. Παράλληλα, βρίσκουν εφαρμογή σε ένα σύνολο οικιακών συσκευών όπως είναι ψυγεία, πλυντήρια είτε συστήματα ψύξης και θέρμανσης.

Η αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα στηρίζεται στον νόμο του Laplace. Πιο αναλυτικά, όλα ξεκινούν από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές με τη σειρά τους οδηγούν σε ανάπτυξη μαγνητικών δυνάμεων (δύναμη Laplace) που κινούν τον δρομέα του ηλεκτροκινητήρα. Από την άλλη πλευρά, η αρχή λειτουργίας της γεννήτριας στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (νόμος του Faraday). Κατά τον Faraday, όταν ένας αγωγός βρίσκεται σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγεται τάση σε αυτόν. Ωστόσο, επειδή ο αγωγός - ο δρομέας στην περίπτωση μας - είναι βραχυκυκλωμένος διαρρέεται από ρεύμα και πλέον ασκείται δύναμη σε αυτόν. Κατά συνέπεια, ο δρομέας αρχίζει και περιστρέφεται.

Οι ηλεκτρικές μηχανές διαχωρίζονται σε διάφορα είδη. Ωστόσο, δύο είναι οι βασικές κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες είναι οι μηχανές συνεχούς ρεύματος (DC) και οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Με βάση αυτό τον αρχικό διαχωρισμό, διακρίνουμε για κάθε περίπτωση τις εξής υποκατηγορίες:

Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος (DC Μηχανές)

- Ξένης Διέγερσης
- Διέγερσης Σειράς
- Παράλληλης Διέγερσης
- Σύνθετης Διέγερσης

Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC Μηχανές)

- Σύγχρονες Μηχανές
- Επαγωγικές Μηχανές
- Μηχανές με Συλλέκτη

2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)

2.2.1 Σύντομη ιστορική ανασκόπηση κινητήρων ΣΡ

Ιστορικά, η ανάπτυξη των μηχανών συνεχούς ρεύματος, η οποία προηγήθηκε των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος (οι προσπάθειες των επιστημόνων του 19^{ου} αιώνα εστιάζονταν γύρω από την παραγωγή συνεχούς ρεύματος, αφού οι συσσωρευτές αδυνατούσαν να μετατρέψουν το dc σε ac ρεύμα), χρονολογείται από τα πρώτα κιόλας

χρόνια της θεμελίωσης των ηλεκτρομαγνητικών αρχών (από τους Michael Faraday και Joseph Henry).

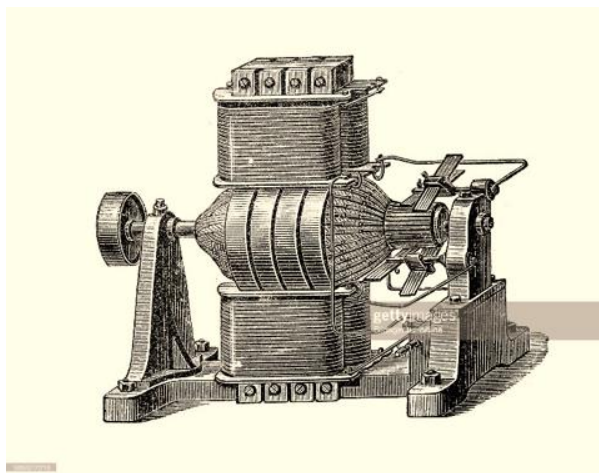
Οι πρώτες αναφορές ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος ξεκινούν το 1832 όταν ο Βρετανός επιστήμονας William Sturgeon ανακαλύπτει τον συλλέκτη και δημιουργεί τις θεωρητικές βάσεις για την ανάπτυξη του πρώτου κινητήρα ΣΡ με συλλέκτη. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1834 ο Αμερικανός εφευρέτης Thomas Davenport έρχεται να ρίξει φως στις ερευνητικές ανακαλύψεις του Sturgeon και να κατασκευάσει επισήμως τον πρώτο κινητήρα συνεχούς ρεύματος με συλλέκτη. Ωστόσο, εμπόδιο στις εφευρέσεις του Davenport στάθηκε το υψηλό κόστος της μπαταρίας τροφοδοσίας για τη λειτουργία του κινητήρα, που οδήγησαν στην αφάνεια τον κινητήρα αυτόν με την πάροδο του χρόνου. Βέβαια, ο Davenport άνοιξε τον δρόμο για πολλούς ερευνητές της γενιάς του και ενέπνευσε την ευρεία επιστημονική κοινότητα στην ανάπτυξη νέων ιδεών γύρω από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Έτσι, το 1834 ο Ρωσικής καταγωγής μηχανικός Moritz Von Jacobi δημιουργεί ένα εκπληκτικά ισχυρό κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ενώ το 1838 καταφέρνει να εμπλουτίσει το δημιούργημα του με νέες βελτιώσεις [11].



Εικόνα 2.2.1: Ο κινητήρας του Davenport του 1834

Παράλληλα, από την σκοπιά των γεννητριών συνεχούς ρεύματος, ένα χρόνο μετά την ανακάλυψη του νόμου της επαγωγής του M.Faraday (1831), ο Γάλλος επιστήμονας Hippolyte Pixii κατασκευάζει την πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος με τη μορφή γεννήτριας (1832). Η μηχανή αυτή διέθετε συλλέκτη δύο τομέων για την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης που δημιουργούταν στους αγωγούς. Φυσικά, όπως ήταν λογικό, εξαιτίας της έλλειψης μεγάλου πλήθους τομέων, παρατηρούνταν μεγάλη κυμάτωση της ανορθωμένης τάσης. Επόμενος σταθμός στην εξέλιξη των γεννητριών

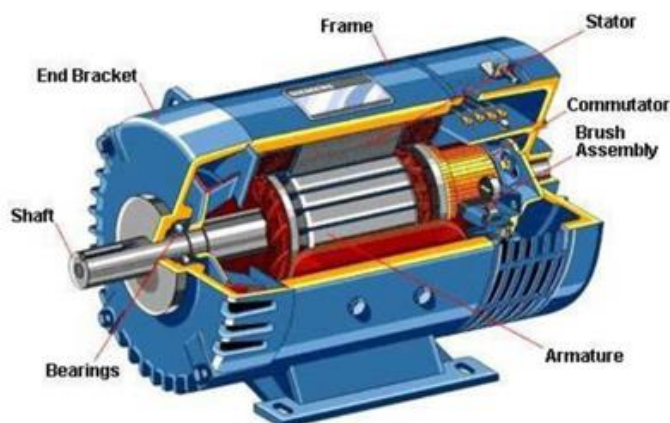
ΣΡ αποτέλεσε η μηχανή του Werner Von Siemens (1856) , η οποία θεωρείται ως η πρώτη γεννήτρια ΣΡ με περιέλιξη τυμπάνου. Ωστόσο, και αυτή η μηχανή λειτούργησε με συλλέκτη δύο τομέων. Το επόμενο βήμα έγινε τελικά το 1860, όταν ο Ιταλός επιστήμονας Antonio Pacinotti εφύρε μια ολοκληρωμένη μηχανή με επαγωγικό δακτύλιο και συλλέκτη με πολλούς τομείς. Μια δεκαετία αργότερα, το 1870 ο Βέλγος Gramme βελτίωσε την μηχανή του Pacinotti και παρουσίασε ευρέως το σημαντικό πλεονέκτημα της μηχανής αυτής, δηλαδή τη μικρή κυμάτωση της ανορθωμένης τάσης. Εν τέλει, ο τύπος της μηχανής (γεννήτριας) που επικράτησε ήταν αυτός του Friedrich Von Hefner-Alteneck (1872), που διέθετε περιέλιξη τυμπάνου και συλλέκτη με πολλούς τομείς [12].



Εικόνα 2.2.2: Η μηχανή του Friedrich Von Hefner-Alteneck του 1873

Οι εφευρέσεις του Pacinotti (1860-1864) γύρω από τις μηχανές συνεχούς ρεύματος ήταν ιδιαίτερα καθοριστικές, τόσο για την πορεία των γεννητριών όσο και για την εξέλιξη των κινητήρων. Ωστόσο, μέχρι και την επόμενη 20ετία που ακολούθησε δεν είχε παρουσιαστεί κάποιος κινητήρας που να παρέχει αξιόλογο έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής. Το σκηνικό αυτό έμελλε να ανατραπεί το 1886, όταν ο Αμερικανός, αξιωματικός του ναυτικού και σπουδαίος εφευρέτης, Frank Julian Sprague δημιουργεί τον πρώτο ηλεκτροκινητήρα με την ικανότητα να διατηρεί σταθερή ταχύτητα υπό μεταβλητά φορτία στο άξονα. Με τον τρόπο αυτό, ο Frank Julian Sprague κατάφερε να αναδείξει τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, γεγονός που αργότερα οδήγησε στη χρήση τους σε ανελκυστήρες και τρόλεϊ.

2.2.2 Δομή κινητήρων ΣΡ



Εικόνα 2.2.3: Εσωτερικό DC μηχανής

Στάτης

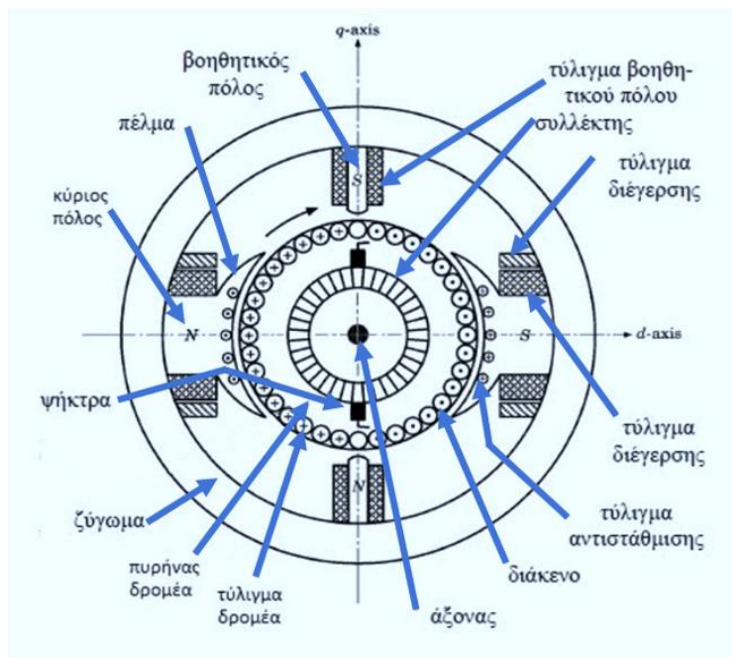
Πρόκειται για το στατικό τμήμα κάθε ηλεκτρικής μηχανής, το οποίο στοχεύει στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου B . Ο στάτης αποτελείται από ένα σύνολο επιμέρους στοιχείων. Πιο αναλυτικά, εκ πρώτης όψευς συναντάμε το κέλυφος, το εξωτερικό περίβλημα της μηχανής, το οποίο στηρίζεται στο έδαφος μέσω των διαμορφωμένων βάσεων της μηχανής. Εσωτερικά του κελύφους τοποθετείται το ζύγωμα. Το ζύγωμα, με κυλινδρικό σχήμα, είναι το στοιχείο της μηχανής που αποτελεί τον βασικό κορμό της μηχανής και επιτυγχάνει τη δημιουργία ενός κλειστού μαγνητικού κυκλώματος.

Έπειτα, έχουμε τους μαγνητικούς πόλους, που στελεχώνουν το εσωτερικό του ζυγώματος και διακρίνονται σε κύριους και βοηθητικούς πόλους. Ο κύριος πόλος είναι αυτοί που δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο και αποτελούνται από τον πυρήνα και το πέδιλο. Κατασκευαστικά, ο πυρήνας αποτελείται από λεπτά σιδερένια ελάσματα και είναι διαμορφωμένος έτσι ώστε το ένα του άκρο να καταλήγει σε πέδιλο του πόλου στην πλευρά του δρομέα. Το πέδιλο αυτό, συμβάλλει στον ισομερή διαμοιρασμό του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο, δηλαδή την απόσταση μεταξύ των πελμάτων και του δρομέα. Παράλληλα, στους κύριους πόλους τυλίγονται τα πηνία του τυλίγματος διέγερσης, τα οποία με τη σειρά τους συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας το τύλιγμα διέγερσης με δύο άκρα. Έτσι, όταν αρχίσει να διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, προκαλείται το κύριο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Το ρεύμα αυτό καλείται ρεύμα διέγερσης.

Όσον αφορά τους βοηθητικούς πόλους είναι ίσοι στο πλήθος με τους κύριους πόλους και πρόκειται για ελάσματα που τοποθετούνται ανάμεσα στους κύριους πόλους.

Χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ενός δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου με σκοπό την εξάλειψη των σπινθηρισμών, εξαιτίας του φαινομένου της μετατόπισης της ουδέτερης ζώνης. Για το ίδιο σκοπό, χρησιμοποιείται και το λεγόμενο τύλιγμα αντιστάθμισης, το οποίο βρίσκεται (εφόσον υπάρχει, δεν είναι απαραίτητο σε όλες τις μηχανές) σε αυλάκια στα πέδιλα των κύριων πόλων.

Τέλος, ένα από τα βασικότερα στοιχεία των μηχανών συνεχούς ρεύματος είναι οι ψήκτρες. Συνήθως είναι κατασκευασμένες από άνθρακα και χαρακτηρίζονται από μεγάλη αγωγιμότητα. Τοποθετούνται στις ψηκτροθήκες και πιέζονται στον συλλέκτη από ελατήρια που βρίσκονται στις θήκες [13].



Εικόνα 2.2.4: Τομή μηχανής συνεχούς ρεύματος με τη σκιαγράφιση των βασικών επιμέρους στοιχείων της.

Δρομέας

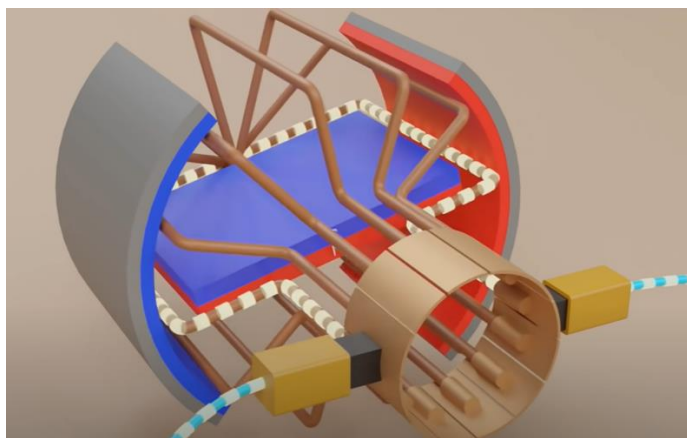
Ο δρομέας είναι το περιστρεφόμενο μέρος μια μηχανής ΣΡ και αποτελείται από τον άξονα τον συλλέκτη και τον ανεμιστήρα. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας κουβαλά επάνω του μια κυλινδρική περιέλιξη από ελάσματα (μονωμένα μεταξύ τους), η οποία καλείται επαγωγικό τύμπανο/τύλιγμα ή σπλισμός και πάνω σε αυτή επάγεται η τάση. Ταυτόχρονα, επάνω στον άξονα στηρίζεται και ο ανεμιστήρας της μηχανής με στόχο την ψύξη της.

Έπειτα, ο συλλέκτης αναλύεται σε ένα πλήθος χάλκινων τομέων, που είναι μονωμένοι μεταξύ τους (οι τομείς στερεώνονται ανάμεσα σε δύο σιδερένια δαχτυλίδια, προκειμένου να αντιστοιχούν στην κυλινδρική μορφή του συλλέκτη). Με τη σειρά τους, οι τομείς αυτοί ολισθαίνουν πάνω στις ακίνητες ψήκτρες του στάτη, και

επιτυγχάνεται η μηχανική ανόρθωση της τάσης (δηλ. οι ακίνητες ψήκτρες σε συνδυασμό με τον συλλέκτη «κλέβουν» την θετική ημιπερίοδο της τάσης, απορρίπτοντας την αρνητική, και μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές). Επίσης, να σημειώσουμε ότι στους τομείς συγκολλούνται τα άκρα των αγωγών του επαγωγικού τυλίγματος.

2.2.3 Αρχή λειτουργίας των κινητήρων ΣΡ

Μια ηλεκτρική μηχανή κατά την περίπτωση που τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς ρεύματος στην είσοδο και παράγει μηχανική ισχύ στην έξοδο αποκαλείται *κινητήρας συνεχούς ρεύματος*. Κάθε μηχανή ΣΡ αποτελείται από 2 κύρια τμήματα. Το ακίνητο μέρος ονομάζεται *στάτης* και το περιστρεφόμενο μέρος ονομάζεται *δρομέας* (γνωστό και ως ρότορας). Ο στάτης διαθέτει κυκλική μορφή και σκοπός του είναι η δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του. Από την άλλη, το στρεφόμενο μέρος της μηχανής, ο δρομέας, είναι μια κυλινδρική κατασκευή που τοποθετείται στο εσωτερικό του στάτη και μπορεί να στραφεί γύρω από τον άξονα. Έτσι, όταν ο στάτης τροφοδοτηθεί με συνεχή τάση (διέγερση), θα δημιουργηθεί ένα μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο θα βρεθεί ο δρομέας. Με τη σειρά του, ο δρομέας θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα μέσα στο μαγνητικό πεδίο αυτό και κατά συνέπεια θα ασκείται σε αυτόν μια δύναμη F (δύναμη Laplace). Η δύναμη αυτή είναι αρκετή προκειμένου ο δρομέας να αρχίσει να περιστρέφεται [14].



Εικόνα 2.2.5: Λειτουργία DC μηχανής: Διπολική μηχανή (δύο μαγνητικούς πόλους, κόκκινος & μπλε) με τους τομείς του συλλέκτη (καφέ ελίγματα) να ολισθαίνουν πάνω στις ακίνητες ψήκτρες (τα 2 κίτρινα κουτάκια). [15]

2.2.3 Είδη κινητήρων ΣΡ

Αν εξαιρέσουμε τις μικρές μηχανές συνεχούς ρεύματος, στις οποίες το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από μόνιμο μαγνήτη, σε όλες τις υπόλοιπες μηχανές ΣΡ, η δημιουργία

του μαγνητικού πεδίου οφείλεται στους μαγνητικούς πόλους, τα τυλίγματα των οποίων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα (δηλ. *ηλεκτρομαγνήτης*). Η τροφοδοσία των τυλιγμάτων του ηλεκτρομαγνήτη, δηλαδή των τυλιγμάτων που βρίσκονται στους πόλους του μαγνήτη καθορίζει και την κατηγορία της κάθε μηχανής ΣΡ. Κατά συνέπεια, οι μηχανές, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης διαχωρίζονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες:

- **Κινητήρας Ξένης Διέγερσης** (separately excited dc motor)
- **Κινητήρας Παράλληλης Διέγερσης** (shunt dc motor)
- **Κινητήρας Διέγερσης Σειράς** (series dc motor)
- **Κινητήρας Σύνθετης Διέγερσης** (compound dc motor)
- **Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη** (brushless dc motor)

2.2.3.1 Κινητήρας ξένης διέγερσης

Οι μηχανές ξένης ή ανεξάρτητης διέγερσης, όπως μας προϋποθέτει και το όνομα τους, χρησιμοποιούν μια εξωτερική πηγή διέγερσης για την τροφοδοσία του κυκλώματος που δημιουργεί το κύριο πεδίο. Δηλαδή, η τροφοδοσία του τυλίγματος διέγερσης είναι διαφορετική από την τάση του δρομέα. Πρόκειται για ένα είδος μηχανής κατά το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια το ρεύμα διέγερσης και η μαγνητική ροή του πεδίου, με ανάλογη ρύθμιση της τάσης. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι είναι πιο ακριβές, λόγω της ανεξάρτητης πηγής τροφοδοσίας που απαιτείται για την παροχή του ρεύματος διέγερσης. Παράλληλα, χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος συντήρησης, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του μηχανισμού λειτουργίας. Τέλος, οι μηχανές ξένης διέγερσης έχουν ένα περιορισμένο όριο απόδοσης του κινητήρα σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής.

2.2.3.2 Κινητήρας παράλληλης διέγερσης

Κατά την περίπτωση των μηχανών παράλληλης διέγερσης, το επαγωγικό τύμπανο του δρομέα είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το τύλιγμα διέγερσης και με την συνδεσμολογία αυτή επιτυγχάνεται η τροφοδοσία του κλάδου διέγερσης. Δηλαδή, δεν υπάρχει κάποια εξωτερική πηγή τάσης που να διεγείρει την μηχανή αυτή, όπως συναντήσαμε στις μηχανές ξένης διέγερσης. Αντιθέτως, οι μηχανές παρ/λης διέγερσης στηρίζονται στη διαδικασία της αυτοδιέγερσης, δηλαδή την ύπαρξη μια αρχικής τάσης από την ίδια την μηχανή. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω του φαινομένου του παραμένουτος μαγνητισμού. Πιο αναλυτικά, οι πυρήνες των μαγνητικών πόλων διατηρούν μία ελάχιστη μαγνητική ροή που είναι αρκετή για την εκκίνηση της

μηχανής. Να σημειωθεί ότι η μαγνητική ροή του παραμένουτος μαγνητισμού αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό της τάξης του 2-8% της ονομαστικής τιμής λειτουργίας [14].

Κατά πολλούς, ο κινητήρας παράλληλης διέγερσης χαρακτηρίζεται ως μηχανή σταθερής ταχύτητας ανεξάρτητα από το φορτίο που θα τροφοδοτήσει. Αντίστοιχα, όταν η μηχανή λειτουργήσει ως γεννήτρια, θεωρείται μηχανή σταθερής τάσης. Ωστόσο, συγκριτικά με ένα κινητήρα διέγερσης σειράς, παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης.

2.2.3.3 Κινητήρας διέγερσης σειράς

Όπως οι μηχανές παρ/λης διέγερσης, έτσι και οι μηχανές διέγερσης σειράς είναι αυτοδιεγχειρόμενες μηχανές. Όμως, στην περίπτωση αυτή, το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με τον οπλισμό αλλά και το φορτίο της μηχανής. Δηλαδή, όπως και πριν, η αυτοδιέγερση επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο, ωστόσο, για να υπάρξει ροή ρεύματος διέγερσης θα πρέπει να είναι μόνιμα συνδεδεμένο φορτίο στον άξονα της μηχανής. Είναι φανερό ότι, στις μηχανές διέγερσης σειράς κυκλοφορεί ένα ρεύμα στο κύκλωμα, αφού το ρεύμα οπλισμού είναι και ρεύμα διέγερσης και ρεύμα εισόδου.

Είναι γεγονός ότι ένας κινητήρας διέγερσης σειράς παρουσιάζει αντίθετες ιδιότητες από αυτές του κινητήρα ξένης διέγερσης, μιας και πρόκειται για μια μηχανή μεταβαλλόμενης ροής εν συναρτήσει με το ρεύμα φορτίου. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα κινητήρα που παρουσιάζει υψηλή ροπή εκκίνησης, όμως η ταχύτητα περιστροφής του άξονα, μεταβάλλεται σημαντικά με την προσθήκη φορτίου.

Πιο αναλυτικά, η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του είναι ανάλογη του ρεύματος του οπλισμού. Κατά συνέπεια, η αύξηση του ρεύματος εισόδου θα οδηγήσει σε αύξηση της μαγνητικής ροής, η οποία με τη σειρά της θα προκαλέσει μείωση της ταχύτητας στον άξονα. Το γεγονός αυτό εξηγεί την κλίση στο διάγραμμα ροπής-ταχύτητας ενός κινητήρα με διέγερση σειράς. Η μεγάλη ροπή εκκίνησης καθιστά τους κινητήρες διέγερσης σειράς ιδανικούς για εφαρμογές όπως ανελκυστήρες, ανυψωτικά μηχανήματα (π.χ. γερανούς). Εν τέλει, να σημειωθεί ότι, ο κινητήρας δ.σ. δεν πρέπει να λειτουργήσει χωρίς φορτίο, καθώς αν κάτι τέτοιο συμβεί, θα υπερταχύνθει και θα καταστραφεί.

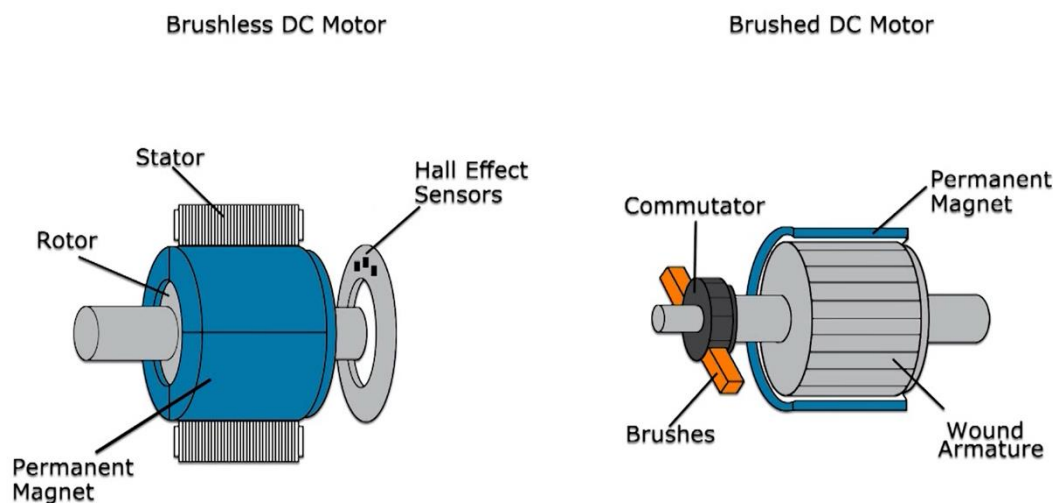
2.2.3.4 Κινητήρας σύνθετης διέγερσης

Μια μηχανή σύνθετης διέγερσης συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των μηχανών παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σειράς. Δηλαδή, κάθε κύριος πόλος αποτελείται

από δύο τυλίγματα, το τύλιγμα σειράς και το παράλληλο τύλιγμα. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι στις μηχανές σύνθετης διέγερσης, το τύλιγμα σειράς δύναται να συνδεθεί με δύο τρόπους. Υπό την οπτική γωνία των κινητήρων σύνθετης διέγερσης, στον πρώτο τρόπο το ρεύμα θα έχει φορά προς το άκρο του τυλίγματος με σκοπό να ενισχύει το μαγνητικό πεδίο του παράλληλου τυλίγματος (αθροιστική σύνθετη διέγερση). Κατά τον δεύτερο τρόπο, το ρεύμα θα έχει αντίθετη φορά από πριν και θα απομακρύνεται από το άκρο του τυλίγματος. Με τον τρόπο αυτό θα εξασθενεί το μαγνητικό πεδίο του παράλληλου τυλίγματος (διαφορική σύνθετη διέγερση). Φυσικά, η συμπεριφορά της μηχανής θα διαφοροποιείται με την εφαρμογή του κάθε τρόπου λειτουργίας.

Γενικά, οι μηχανές σύνθετης διέγερσης εμφανίζουν χαρακτηριστικά και των δύο τύπων που ενσωματώνουν. Κατά συνέπεια, ένας κινητήρας σύνθετης διέγερσης διαθέτει αρκετά υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως συμβαίνει και με τους κινητήρες διέγερσης σειράς. Παράλληλα, ένας κινητήρας αυτής της μορφής, εξαιτίας της ύπαρξης του τυλίγματος σειράς, όταν αυξάνεται το φορτίο λαμβάνει περισσότερη ροή και κατά συνέπεια επιβραδύνεται, σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο κινητήρα παράλληλης διέγερσης [14].

2.2.3.5 Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (Brushless)



Εικόνα 2.2.6: Δομικές διαφορές μεταξύ κινητήρων μόνιμο μαγνήτη και κινητήρων με ψήκτρες

Όπως προαναφέρθηκε, στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται ψήκτρες για να επιτευχθεί η μηχανική ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, οι ψήκτρες αυτές φθείρονται και χρήζουν αντικατάστασης. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη για ανάπτυξη κινητήρων χωρίς ψήκτρες, που έγιναν ευρέως γνωστοί ως brushless κινητήρες συνεχούς ρεύματος

(**BLDC**) και σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (**PMSM**). Οι πρώτοι, διαθέτουν τυλίγματα στον στάτη, τα οποία τροφοδοτούνται με DC ρεύμα μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα και χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες για την διέγερση τους, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι στο δρομέα του κινητήρα. Οι δεύτεροι υπόκεινται στην ίδια αρχή λειτουργίας, αλλά τροφοδοτούνται με AC ρεύμα, συνιστώντας το ισοδύναμο των BLDC κινητήρων στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Από την στιγμή που οι κινητήρες αυτοί δεν χρησιμοποιούν ψήκτρες, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός συστήματος ελέγχου για την γνώση της θέσης του δρομέα. Για τον σκοπό αυτό, έχουν αισθητήρες (συνηθίζεται η χρήση αισθητήρων Hall) για τον εντοπισμό της θέσης του ρότορα, ενώ παράλληλα κάνουν χρήση ενός ψηφιακού κυκλώματος που προσφέρει διακοπτικές λειτουργίες. Συμπερασματικά, το αισθητήριο σύστημα θα στείλει σήματα στην πλακέτα προκειμένου να γνωστοποιήσει σε αυτήν με ακρίβεια την κατάλληλη στιγμή εναλλαγής της πολικότητας του ρεύματος, κατά τη διάρκεια που ο δρομέας περιστρέφεται [16].



Εικόνα 2.2.7: Η διαφορά στη κυματομορφή μεταξύ των BLDC και PMSM, με την τραπεζοειδή και ημιτονοειδή μορφή αντίστοιχα να τους διακρίνει [17]

Διαφορές κινητήρων BLDC και PMSM

Εκτός της τροφοδοσίας των PMSM και BLDC με εναλλασσόμενο και συνεχές ρεύμα αντίστοιχα, παρατηρούνται ορισμένες διαφοροποιήσεις ως προς τη δομή αλλά και την χαρακτηριστική εξόδου τους. Επισημαίνεται ότι μια δομική διαφορά ανάμεσα τους, είναι ότι οι BLDC απαιτούν ένα σύνολο 3 αισθητήρων Hall για τον εντοπισμό της θέσης του δρομέα, σε αντίθεση με τους PMSM που χρησιμοποιούν μόνο έναν αισθητήρα Hall. Έτσι, στους BLDC κινητήρες η εναλλαγή της πολικότητας του

ρεύματος επιτυγχάνεται μέσω μιας διεργασίας έξι καταστάσεων (τραπεζοειδής ροή), που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρών κενών στην εναλλαγή. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού εμφανίζονται περιοδικές αυξομειώσεις της ροπής εξόδου του κινητήρα (torque ripples) σε κάθε βήμα του. Αντιθέτως, οι PMSM λόγω της χρήσης του ενός αισθητήρα Hall, η θέση του δρομέα ελέγχεται σε κάθε στιγμιότυπο και προσμετράται από τον αισθητήρα. Ως επακόλουθο, δεν εμφανίζεται το φαινόμενο των BLDC στην κυματομορφή της ροπής εξόδου, που καθιστά τους κινητήρες αυτούς που αποδοτικούς. Ουσιαστικά, η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ημιτονοειδούς μορφής για τους κινητήρες PMSM και τραπεζοειδούς μορφής για τους BLDC. Εν κατακλείδι, οι PMSM έχουν όλα τα χαρακτηριστικά των BLDC, με το πρόσθετο πλεονέκτημα της υψηλότερης απόδοσης και του αισθητά μειωμένου θορύβου.

Brushless: Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και εφαρμογές

Οι brushless κινητήρες επιλέγονται ολοένα και περισσότερο εξαιτίας της μηδαμινής απαιτούμενης συντήρησης και το υψηλού βαθμού απόδοσης που τους χαρακτηρίζει, ειδικά σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Είναι ικανοί να λειτουργήσουν σε υψηλή ταχύτητα και να προσφέρουν δυνατότητες ηλεκτρονικού ελέγχου. Βέβαια, μιας και η λειτουργία τους απαιτεί τη χρήση μιας πλακέτας, έχουν μεγαλύτερο κόστος και πολυπλοκότητα.

Στο πλαίσιο αυτό, τα μειονεκτήματα ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη σχετίζονται με τον κίνδυνο απομαγνήτισης (που μπορεί να προκαλέσει ένα υψηλό ρεύμα τυμπάνου), καθώς και με φαινόμενα υπερθέρμανσης εξαιτίας της συνεχόμενης υπερφόρτισης της μηχανής. Να σημειωθεί ότι, οι brushless κινητήρες δεν προσφέρουν έλεγχο της ταχύτητας τους μέσω της μεταβολής του πεδίου διέγερσης, αλλά παρά μόνο μέσω ελέγχου της τάσης του τυμπάνου [18].

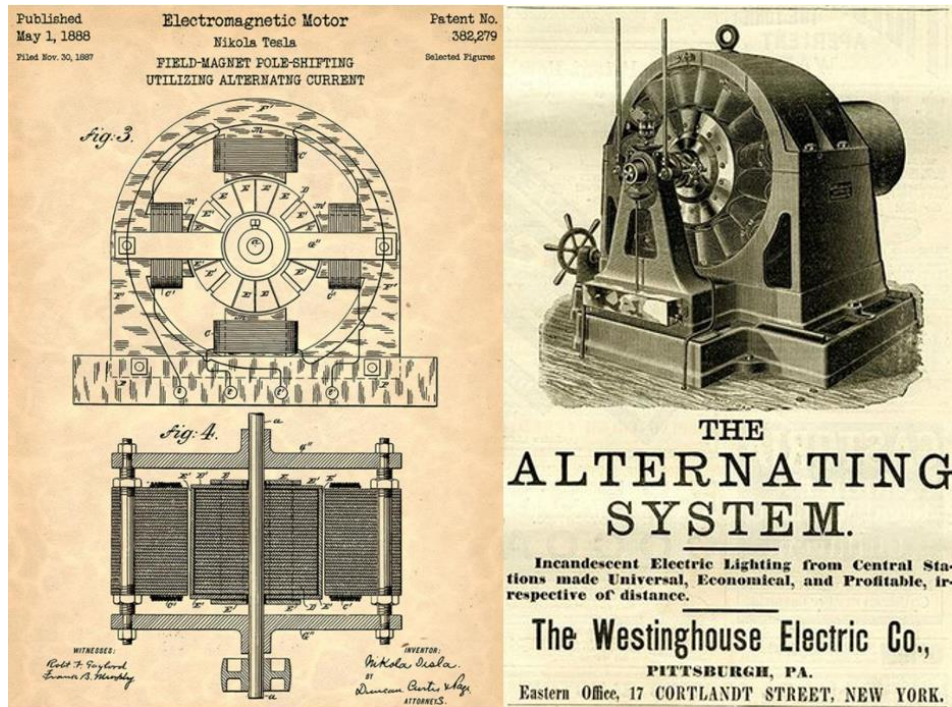
Τέλος, οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες συναντώνται σε πληθώρα εφαρμογών αυτοκίνησης, καθώς καλύπτουν κάθε περίπτωση χρήσης. Από την άλλη, πέρα από εφαρμογές σε αυτοκινητοβιομηχανίες, οι brushless κινητήρες χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μικρής ιπποδύναμης, όπως σε ηλεκτρικά σκούτερ και τρίκυκλα. Παράλληλα, εφαρμόζονται και σε περιπτώσεις ελάχιστης ιπποδύναμης (κλάσματα του ίππου) όπως απαιτείται σε ηλεκτρικά παράθυρα αυτοκινήτου, αντλίες, υαλοκαθαριστήρες, ενώ παράλληλα δεν είναι λίγες οι φορές που εφαρμόζονται σε συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρίες όπως drones κ.α.

2.3 Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (EP)

2.3.1 Σύντομη ιστορική ανασκόπηση κινητήρων EP

Σήμερα, οι ηλεκτροκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σήμερα, λόγω της απλοϊκής τους κατασκευαστικής δομής, καθώς και εξαιτίας των μικρών φθορών που μπορεί να υποστούν. Παράλληλα, οι μηχανές αυτές λειτουργούν κάνοντας χρήση εναλλασσόμενης τάσης, η οποία συνηθίζεται να τροφοδοτεί τα περισσότερα εθνικά δίκτυα. Ωστόσο, προκειμένου οι μηχανές αυτές να πάρουν τη σημερινή μορφή μεσολάβησαν διάφορα στάδια.

Τα πρώτα βήματα για τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος έγιναν αρκετά χρόνια αργότερα από τους περίοδο ανάπτυξης των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Φυσικά, η εξήγηση πίσω από αυτό βρίσκεται στην απουσία των ηλεκτρονικών ισχύος στις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Έτσι, φτάνουμε στο καλοκαίρι του 1883, όταν ο Σέρβο-Αμερικανός Nicola Tesla κατασκευάζει τον πρώτο επαγωγικό κινητήρα και την επόμενη χρονιά παρουσιάζει την εφεύρεση του στον T. Edison. Με τη σειρά του, ο Edison αποδοκιμάζει την ανακάλυψη του Tesla (*ο Edison υποστήριξε τη χρήση του συνεχούς ρεύματος ενώ ο Tesla τη χρήση του εναλλασσόμενου*), εντούτοις αντιλαμβανόμενος την μεγαλοφυΐα του, του προσφέρει θέση βοηθού στην εταιρεία του. Έπειτα, το διάστημα που μεσολαβεί, ο Tesla βελτιώνει τους κινητήρες του Edison, με τον Αμερικανό εφευρέτη στην πορεία να αθετεί τη συμφωνία τους περί αμοιβής. Με αυτό τον τρόπο αυτόν, προδίδει τον Tesla και ο Tesla εκνευρισμένος παραιτείται από την εταιρεία [12]. Τον Οκτώβρη του 1887, ο Nicola Tesla παρουσιάζει την πατέντα του με το όνομα Πολυφασικό Σύστημα Τέσλα και εισάγει για πρώτη φορά την έννοια του επαγωγικού κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος. Ωστόσο, ο κινητήρας του Tesla ακόμη δεν είναι «συμβατός» για χρήση στον τομέα της αυτοκίνησης. Στα χρόνια που ακολουθούν, ο βιομήχανος G. Westinghouse αποφασίζει να βοηθήσει τον Tesla, χρηματοδοτώντας την έρευνα του. Παράλληλα, ο Thomas Edison, εξαιτίας της επιστημονικής διαμάχης του με τον Τέσλα, σχετικά με τους κινητήρες εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος, καταφέρνει να ανοίξει ένα μέτωπο δυσφήμισης εναντίον του Τέσλα [19].



Εικόνα 2.3.1: Η επαγωγική μηχανή του N.Tesla με την χρηματοδότηση της εταιρείας «Westinghouse Electric Co.» και η κατοχύρωση της ευρεσιτεχνίας του

Οι επαγωγικοί κινητήρες όπως το γνωρίζουμε σήμερα έγιναν εμπορικά διαθέσιμοι στα μέσα του 1890. Έκτοτε ως και το 1970, αναπτύχθηκαν σημαντικές βελτιώσεις όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα κατασκευαστικά τους μέρη αλλά και στη μόνωση των τυλιγμάτων. Οι εξελίξεις αυτές επέφεραν αξιοσημείωτη μείωση του όγκου και του κόστους κατασκευής των επαγωγικών μηχανών. Ενδεικτικά, να αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας ισχύς 100 ίππων, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα ισχύς 7.5 ίππων του 1897. Βέβαια, η δραστική μείωση των διαστάσεων δε συνοδεύτηκε από αντίστοιχη βελτίωση του βαθμού απόδοσης.

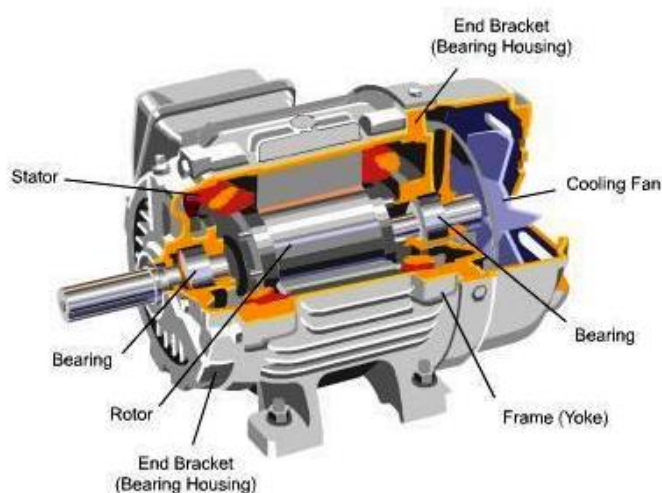
Η ολοκληρωτική επανάσταση στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, ήρθε όταν βρέθηκε η δυνατότητα για ακριβή και αυτόματου ελέγχου των κινητήρων αυτών. Η εφεύρεση που ήταν υπεύθυνη για την δυνατότητα αυτή, δεν ήταν άλλη από το τρανζίστορ των William Shockley, Walter Brattain και John Bardeen την χρονιά του 1947.



Εικόνα 2.3.2: Το 1997 η εταιρεία Lucent Technologies, ενόψει τον 50 χρόνων από την ανακάλυψη του τρανζίστορ, δημιουργεί ένα πιστό αντίγραφο του πρώτου τρανζίστορ των Shockley, Brattain και Bardeen, όπως παρουσιάστηκε το 1947. [20]

Λίγο αργότερα, εμφανίστηκαν και οι πρώτες παραλλαγές όπως το θυρίστορ (1957) και το MOSFET (1969) και φυσικά οι βελτιώσεις τους για εφαρμογές ισχύος (όπως τα GTO, SCR, IGBT). Οι εφευρέσεις εκείνης την περιόδου σηματοδότησαν την ανάδειξη ενός νέου ηλεκτρολογικού πεδίου, το πεδίο των ηλεκτρονικών ισχύος. Τα επόμενα χρόνια, με βάση τα ηλεκτρονικά ισχύος, άνοιξε ο δρόμος για την κατασκευή προηγμένων συστημάτων με δυνατότητες τροφοδοσίας μεταβλητού πλάτους και συχνότητας για τους εκάστοτε κινητήρες.

2.3.2 Κατασκευαστική δομή κινητήρων ΕΡ



Εικόνα 2.3.3: Βασικά μέρη λειτουργίας μιας AC μηχανής

Ουσιαστικά, η δομή μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό με την αντίστοιχη κατασκευή των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, εντοπίζονται μερικές αποκλίσεις με τις μηχανές ΣΡ, με τη σημαντικότερη διαφορά να έγκειται στον τρόπο κατασκευής του δρομέα.

Στάτης

Δομικά, ο στάτης κατασκευάζεται συνήθως από δυναμοελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, με στόχο να μειωθούν οι απώλειες ισχύος που θα προκληθούν από την ανάπτυξη δινορρευμάτων. Στο εσωτερικό του μέρους, παρατηρούνται αυλακώσεις μέσα στις οποίες βρίσκεται ένα τύλιγμα, το λεγόμενο τύλιγμα του στάτη ή τύλιγμα τυμπάνου. Με τη σειρά του, το τύλιγμα αυτό αποτελείται από επιμέρους τυλίγματα, που διαφέρουν ως προς το πλήθος ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων τροφοδοσίας. Για παράδειγμα για την περίπτωση του επαγωγικού κινητήρα, το τύλιγμα του στάτη διαθέτει τρία όμοια μονοφασικά τυλίγματα κατανεμημένα στο χώρο με διαφορά 120 ηλεκτρικών μοιρών. Σε κάθε περίπτωση, κατά τη λειτουργία της μηχανής, τα τυλίγματα αυτά θα τροφοδοτηθούν με εναλλασσόμενη τάση προκειμένου να δημιουργήσουν το κύριο μαγνητικό πεδίο της (στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο).

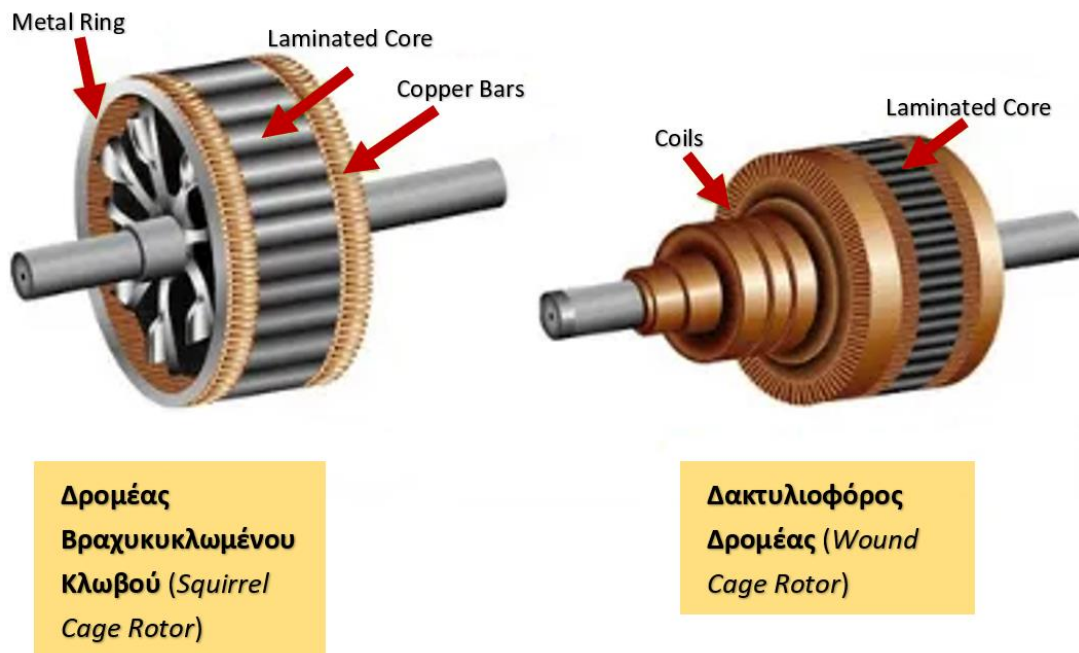
Κατά την κατασκευή του στάτη, καθορίζεται και ο αριθμός των μαγνητικών πόλων της μηχανής. Δηλαδή, οι περιελίξεις (τυλίγματα) συνενώνονται και ομαδοποιούνται έτσι ώστε να προκύψει η δημιουργία του επιθυμητού πλήθους πόλων. Συνεπώς, κάθε ομάδα περιελίξεων μαζί με τον πυρήνα συνιστούν έναν ηλεκτρομαγνήτη, ο οποίος απευθείας τροφοδοτείται από το δίκτυο. Τέλος, να σημειωθεί ότι, ο στάτης πρόκειται για ένα τμήμα της μηχανής που δε διαφοροποιείται για κάθε περίπτωση κινητήρα ΕΡ και φυσικά διαθέτει εξωτερικό περίβλημα (κέλυφος) και βάσεις στήριξης, όπως στις μηχανές συνεχούς ρεύματος.

Στο ακίνητο μέρος των ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος όπως έχουμε δει συμπεριλαμβάνονται και άλλα λειτουργικά μέρη, τα οποία στις μηχανές ΕΡ μπορεί να συναντώνται ή όχι. Για παράδειγμα οι ψήκτρες στις μηχανές ΕΡ, άλλοτε δεν είναι απαραίτητο στοιχείο όπως στους τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού και άλλοτε απαιτούνται για την λειτουργία, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των τριφασικών κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα [14].

Δρομέας

Το δεύτερο μέρος της μηχανής είναι ο δρομέας, που αντιθέτως με τον στάτη, αλλάζει δραστικά για κάθε περίπτωση κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος. Στο πλαίσιο αυτό,

ο δρομέας μπορεί να διαθέτει κυλινδρικό σχήμα με αυλακώσεις και στο εσωτερικών αυτών να τοποθετείται το τύλιγμα. Διαφορετικά, ο δρομέας, κατά μήκος της περιφέρειας του μπορεί να έχει ένα σύνολο από πόλους που προεξέχουν. Πιο αναλυτικά, κάθε τύπος δρομέα επαγωγικού κινητήρα:



Εικόνα 2.3.4: Κατασκευαστικές διαφορές μεταξύ των 2 διαφορετικών τύπων δρομέα [21]

- Δρομέας Βραχυκυκλωμένου Κλωβού (Squirrel Cage Rotor): Στην περίπτωση αυτή, ο δρομέας αποτελείται από μονωμένα ελάσματα, προσαρμοσμένα στον άξονα. Τα ελάσματα αυτά διαθέτουν προεξοχές, οι οποίες δημιουργούν αυλάκια στην επιφάνεια του δρομέα. Στο εσωτερικό των αυλακώσεων αυτών τοποθετούνται ράβδοι χαλκού με τα άκρα τους βραχυκυκλωμένα μέσω δακτυλίων (δακτύλιοι βραχυκύκλωσης). Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα. Η ύπαρξη του τυλίγματος κλωβού επιτρέπει στον κινητήρα αυτού του τύπου να λειτουργεί δίχως να κάνει χρήση κάποιας εξωτερικής πηγής.
- Δακτυλιοφόρος Δρομέας (Wound Rotor): Όταν ο δρομέας της επαγωγικής μηχανής είναι δακτυλιοφόρος, τότε κατά μήκος του θα σχηματίζει αυλακώσεις. Στο εσωτερικό των αυλακώσεων τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα (όπως το τριφασικό τύλιγμα τροφοδοσίας στο τύλιγμα τυμπάνου), το οποίο συνηθίζεται να βρίσκεται σε συνδεσμολογία αστέρα. Έπειτα, καθένα από τα τρία άκρα του αστέρα αντιστοιχίζονται σε ένα δακτυλίδι. Παράλληλα, στα δακτυλίδια αυτά εφάπτονται ψήκτρες και μέσω των δύο αυτών στοιχείων καθίσταται εφικτή η

σύνδεση μεταβλητών αντιστάσεων (ροοστάτες/ποτενσιόμετρα) στο τύλιγμα του δρομέα, προκειμένου να ελέγχουμε-ρυθμίζουμε την λειτουργία της μηχανής.

2.3.3 Αρχή λειτουργίας κινητήρων EP

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως και οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, είναι οι ηλεκτρικές μηχανές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και διακρίνονται σε σύγχρονους και ασύγχρονους ή επαγωγικούς κινητήρες. Εντούτοις, παρουσιάζουν μια σημαντική διαφορά με τις μηχανές ΣΡ: Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, το τύλιγμα του τυμπάνου τοποθετείται στον στάτη (σε αντίθεση με τις dc μηχανές) και το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται πάντα στο δρομέα. Έτσι, ανεξαρτήτως του είδους του εναλλασσόμενου κινητήρα, είτε σύγχρονοι είτε επαγωγικοί, βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Σύμφωνα με αυτή, ο παράγοντας που θέτει τον δρομέα του κινητήρα σε στρέψη είναι η ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν από τον στάτη και τον δρομέα. Πιο συγκεκριμένα, όταν το τύλιγμα οπλισμού του στάτη του κινητήρα, τροφοδοτηθεί με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων με ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης 120 μοιρών μεταξύ τους, στο εσωτερικό του δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Όπως είναι αναμενόμενο, το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με τη σειρά του θα δημιουργήσει μια μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή που θα αλληλοεπιδρά με το πεδίο του δρομέα. Δηλαδή, θα ασκηθεί μια μαγνητική ροή σε έναν βραχυκυκλωμένο αγωγό (δρομέα), οπότε θα αναπτυχθεί μια ηλεκτρεγερτική δύναμη και αφού αναφερόμαστε σε βραχυκυκλωμένο αγωγό, τότε αυτός θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα. Τούτο, έχει ως απόρροια για την μηχανή, την εμφάνιση ροπής στον άξονα. Αντίστοιχα, αν ο κινητήρας χρειαστεί να λειτουργήσει ως γεννήτρια, το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα θα επάγει τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα στο τύλιγμα οπλισμού του στάτη [13].

2.3.4 Είδη κινητήρων EP

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους: τους **σύγχρονους** κινητήρες και τους **ασύγχρονους** ή επαγωγικούς κινητήρες. Οι σύγχρονες μηχανές διατηρούν σταθερή σχέση μεταξύ ταχύτητας περιστροφής και συχνότητας ρεύματος, καθώς στις ασύγχρονες μηχανές η ταχύτητα περιστροφής για την αντίστοιχη συχνότητα του

ρεύματος είναι άμεσα εξαρτημένη από το φορτίο που εφαρμόζεται κάθε φορά στον άξονα. Δηλαδή, δε διατηρούν σταθερή τη σχέση ανάμεσα στα δύο μεγέθη. Σε κάθε περίπτωση, είτε πρόκειται για σύγχρονους είτε για επαγωγικούς κινητήρες, η αναστρεψιμότητα ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους (δηλαδή η ίδια μηχανή να συμπεριφέρεται είτε ως γεννήτρια ή ως κινητήρας), εξακολουθεί να ισχύει ακριβώς όπως συμβαίνει στις μηχανές συνεχούς ρεύματος.

Ωστόσο, στην πράξη, οι σύγχρονες μηχανές συνηθίζεται να λειτουργούν με την μορφή γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος (γνωστές και ως *εναλλακτήρες*) σε χρήσεις όπως του ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς. Από την άλλη πλευρά, οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται κατά κόρον με τη μορφή κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.3.4.1 Σύγχρονοι κινητήρες

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος που περιστρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα, ονομάζονται σύγχρονοι κινητήρες, μιας και ο άξονας του περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του πεδίου στο διάκενο, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του εφαρμοζόμενου φορτίου. Πιο αναλυτικά, σύγχρονη ταχύτητα n_s ονομάζεται η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη μιας εναλλασσόμενης μηχανής, ενώ n_m θεωρείται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Η διαφορά αυτών των δύο ταχυτήτων εισάγει την έννοια της ταχύτητας ολίσθησης, η οποία περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$n_{slip} = n_s - n_m ,$$

όπου n_s ως ορίζεται $n_s = \frac{60 \cdot f}{p} ,$

(f : η συχνότητα τροφοδοσίας, p : ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα).

Η πρώτη σχέση υποδηλώνει την διαφορά της σχετικής ταχύτητας του δρομέα από το πεδίο του στάτη. Η έννοια της ολίσθησης δίνεται από τον τύπο:

$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} \cdot (100\%) = \frac{n_s - n_m}{n_s} \cdot (100\%)$$

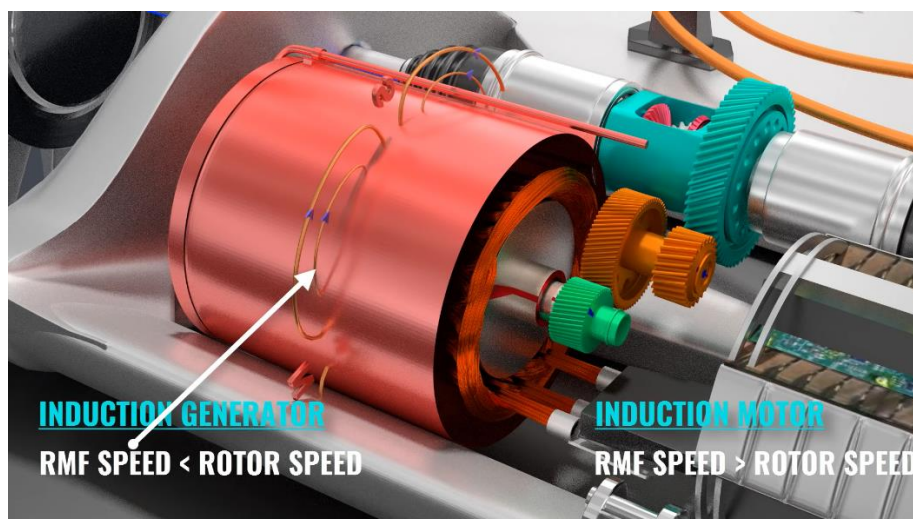
Κατά συνέπεια, με βάση το παραπάνω θεωρητικό υπόβαθρο, αν η μηχανή αυτή περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα του πεδίου του στάτη ($n_s = n_m$), τότε η σχετική τους ταχύτητα και άρα και η ολίσθηση s θα είναι μηδενική. Έτσι, ο σύγχρονος κινητήρας απαιτεί μία πρόσθετη πηγή συνεχούς τάσης για την αρχική περιστροφή του δρομέα μέχρι την σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου του στάτη (για τον λόγο αυτό ο δρομέας διαθέτει περιελίξεις που τροφοδοτούνται από dc τάση). Δηλαδή, το ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων μηχανών

δημιουργείται από ξένες πηγές ισχύος. Ως επακόλουθο, ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο δημιουργείται στο δρομέα, σαν να ήταν ένας μόνιμος μαγνήτης, ενόσω το πεδίο του στάτη παράγει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εξαιτίας της τριφασικής του τροφοδοσίας. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μαγνητικών πεδίων οδηγούν στην εμφάνιση ροπής στον άξονα [14].

2.3.4.2 Ασύγχρονοι κινητήρες

Πρόκειται για τον πιο συνηθισμένο τύπο κινητήρα εξαιτίας της απλοϊκής κατασκευής και λειτουργίας του. Η ονομασία των ασύγχρονων κινητήρων προέρχεται από την τη σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και της ταχύτητας περιστροφής του πεδίου του στάτη. Κατά συνέπεια, όταν οι δύο αυτές ταχύτητες είναι διαφορετικές, δηλαδή, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη, τότε κάνουμε λόγο για έναν ασύγχρονο κινητήρα. Εδώ, σύμφωνα με όσα είδαμε στους σύγχρονους κινητήρες, η ολίσθηση δε θα είναι μηδενική, αφού η ταχύτητα του δρομέα ασύγχρονου κινητήρα θα είναι πάντα μικρότερη από την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Με τον τρόπο αυτό θα παράγεται τάση εξ'επαγωγής στους αγωγούς του δρομέα.

Διαφορετικά, αν η ολίσθηση ήταν ίση με μηδέν, δηλαδή οι δύο ταχύτητες ήταν όμοιες, τότε δε θα υπήρχε σχετική ταχύτητα μεταξύ των δύο πεδίων ($n_{slip} = 0$), και δε αναπτυσσόταν επαγωγική τάση στα άκρα του δρομέα.



Εικόνα 2.3.5: Εδώ παρουσιάζεται η λειτουργία ενός ασύγχρονου ηλεκτροκινητήρα τοποθετημένου σε ένα ηλεκτρικό όχημα Tesla. Όσο λειτουργεί ως επαγωγικός κινητήρας θα πρέπει να υπερσχύει η ταχύτητα στρεφόμενου πεδίου έναντι της ταχύτητας δρομέα και αντιστρόφως για λειτουργία επαγωγικής γεννήτριας [22]

Με βάση τα παραπάνω, οι ασύγχρονοι κινητήρες συνηθίζεται να καλούνται και επαγωγικοί και να ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με την αρχή λειτουργίας των

μετασχηματιστών. Στους εν λόγω κινητήρες, δεν τοποθετούνται ψήκτρες και δακτύλιοι, ενώ παράλληλα, ο δρομέας δεν χρειάζεται τροφοδοσία από ανεξάρτητη πηγή ενέργειας. Εν τέλει, να σημειωθεί ότι οι ασύγχρονοι κινητήρες διαχωρίζονται σε ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού και σε ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα. Ειδοποιός διαφορά μεταξύ των κινητήρων αυτών αποτελεί η χρήση διαφορετικού δρομέα, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην υποενότητα 2.3.3, για την κατασκευαστική δομή των κινητήρων EP.

2.3.4.3 Κινητήρες με συλλέκτη (Universal)

Πρόκειται για μια μορφή κινητήρα μικρής ισχύος που ονομάζεται και κινητήρας δύο ρευμάτων. Ουσιαστικά, είναι ένας κινητήρας διέγερσης σειράς συνεχούς ρεύματος, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε εναλλασσόμενη, όσο και σε συνεχή τροφοδοσία, εξού και η ονομασία του. Όπως οι υπόλοιποι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, έτσι και αυτός διαθέτει συλλέκτη με ψήκτρες. Διακρίνεται για τον μικρό όγκο και βάρος του, γεγονός που τον καθιστά ιδανικό για πολλές οικιακές συσκευές όπως εργαλεία χειρός, ηλεκτρικές σκούπες, τρυπάνια κ.λπ. Λειτουργεί σε υψηλό εύρος στροφών που κυμαίνεται από 1500 έως και 10000 στροφές/λεπτό. Τέλος, μιας και είναι ένας κινητήρας διέγερσης σειράς χαρακτηρίζεται από υψηλή ροπή εκκίνησης.

Η χρήση ενός Universal κινητήρα συχνά μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και παρεμβολές σε δέκτες τηλεόρασης και ραδιοφώνου. Για το σκοπό αυτό, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ένας πυκνωτής παράλληλα μεταξύ των πόλων του, προκειμένου να βραχυκυκλώσει τις υψίσυχνες τάσεις.

2.4 Κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων

Εν έτει 2021, το επενδυτικό κλίμα γύρω από την αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων είναι πλέον δεδομένο. Ολοένα και περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες παρουσιάζουν ηλεκτρικές εκδόσεις των υπαρχόντων μοντέλων τους ή και ολόκληρες σειρές ηλεκτρικών οχημάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, η σειρά ID της Volkswagen που σηματοδοτεί την έναρξη μιας αποκλειστικής σειράς αμιγών ηλεκτρικών αυτοκινήτων μοντέλων.

Όπως συμβαίνει και στα βενζινοκίνητα/πετρελαιοκίνητα οχήματα, ανάλογα με την κάθε κατηγορία οχήματος και ένα πλαίσιο απαιτήσεων/αναγκών τροφοδοτούνται από συστήματα ισχύος διαφορετικών προδιαγραφών, το ίδιο συμβαίνει και σε όλες αυτές τις πλατφόρμες παραγωγής EVs. Έτσι, τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν ένα

σύνολο διαφορετικών ηλεκτρικών κινητήρων, εκ των οποίων οι πλέον περισσότερο διαδεδομένοι είναι οι εξής:

- **Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη** (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM)
- **Κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη** (Brushless DC Motor - BLDC)
- **Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας** (3-Phase AC Induction Motor)
- **Κινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς** (DC Series Motor)

Στο σημείο αυτό, ενθυμούμενοι όσα έχουν προαναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες περί χαρακτηριστικών κάθε είδους κινητήρα, είναι απαραίτητο να γίνει μια συνοπτική σύγκριση ανάμεσα στις κύριες κατηγορίες κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, ο **κινητήρας PMSM** χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση και μπορεί να καλύψει υψηλές απαιτήσεις ισχύος (ωστόσο, για υψηλές απαιτήσεις συνηθίζεται η χρήση των επαγωγικών κινητήρων). Το γεγονός αυτό, καθιστά τους κινητήρες αυτούς ιδανικούς για χρήση σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα και λεωφορεία. Παρά το υψηλό κόστος, μπορούμε να συγκριθεί με τους επαγωγικούς κινητήρες εξαιτίας της αυξημένης απόδοσης των πρώτων έναντι των δεύτερων. Επίσης, συγκριτικά με τους κινητήρες BLDC, οι PMSM έχουν μεγαλύτερο κόστος. Αυτή τη στιγμή είναι ο **PMSM είναι ο δημοφιλέστερος ηλεκτροκινητήρας** για χρήση σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Ενδεικτικά, τους εν λόγω κινητήρες χρησιμοποιούν μοντέλα όπως τα: Nissan Leaf, Tesla Model 3, BMW i3, Chevrolet Bolt EV, Toyota Prius, Zero motorcycles S/SR, Honda Accord.

Ο **τριφασικός επαγωγικός κινητήρας** δε διαθέτει υψηλή ροπή εκκίνησης σε αντίθεση με τους λοιπούς dc κινητήρες, εντούτοις το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με διάφορες μεθόδους (FOC, v/f methods). Πέρα από αυτό, αυτοί με δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής εξαιτίας της ελάχιστων αναγκών συντήρησης. Παράλληλα, η απόδοση τους κυμαίνεται μεταξύ 92-95%. Το μεγάλο αρνητικό με τους επαγωγικούς κινητήρες είναι ότι απαιτούν σύνθετα και δαπανηρά κυκλώματα αντιστροφών (inverters), καθώς και ότι δεν έχουν την ευκολία ελέγχου και ικανότητα η ταχύτητας όπως στους κινητήρες dc (ο έλεγχος ταχύτητας/ροπής επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρικών ισχύος). Παραδείγματα χρήσης επαγωγικού κινητήρα είναι οχήματα υψηλών απαιτήσεων ισχύος και υψηλού κόστους

κατασκευής. Πρόκειται για τις ναυαρχίδες στο χώρο της ηλεκτροκίνησης, τα κορυφαία Tesla Model S, Mercedes Bend EQC και Audi e-Tron.

Ο κινητήρας BLDC, όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη ενότητα με σχετικό τίτλο, διακρίνεται για υψηλή ροπή εκκίνησης, υψηλή απόδοση της τάξης του 95-98%. Χρησιμοποιείται σε ελαφριά ηλεκτρικά οχήματα όπως δίκυκλα και τρίκυκλα. Συναντάται σε ηλεκτρικά σκούτερ μικρής και μεσαία κλίμακας και μικρές μοτοσυκλέτες όπως η Yamaha EC-03 [23].

Ο κινητήρας διέγερσης σειράς είναι μια κατηγορία που κυριάρχησε στα πρώτα χρόνια της ηλεκτροκίνησης και πλέον χρησιμοποιείται ολοένα και λιγότερο. Παρόλα αυτά, είναι ο κινητήρας που προσφέρει τον ευκολότερο έλεγχο ταχύτητας και μπορεί να υπομείνει απότομες αυξήσεις του φορτίου. Από την άλλη, είναι ογκώδεις κινητήρες σε σχέση με τους προηγούμενους και υστερεί σε μεγάλο βαθμό στο υψηλό κόστος συντήρησης.

Εν κατακλείδι, οι επαγωγικοί κινητήρες τείνουν να χρησιμοποιούνται σε EVs με υψηλές απαιτήσεις ισχύος και κατά συνέπεια συναντώνται σε ογκώδη και βαριά οχήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα δύο μοντέλα της Tesla Motors, το Model S και το Model 3, εκ των οποίων το πρώτο χρησιμοποιεί επαγωγικό κινητήρα ενώ το δεύτερο σύγχρονο κινητήρα. Βέβαια, παρατηρούνται και εξαιρέσεις του «κανόνα» όπως συμβαίνει με την περίπτωση του i-Pace της Jaguar που χρησιμοποιεί κινητήρα PMSM. Έπειτα, σε ότι αφορά εφαρμογές μεσαίας κλίμακας, όπως είναι το Nissan Leaf, BMW i3, η επικρατέστερη επιλογή είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PMSM). Από την άλλη, για εφαρμογές μικρών αναγκών ισχύος, συνίσταται η χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (BLDC) [24].

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος



Εικόνα 3.1: Ο μετατροπέας DC/AC (Inverter) που ενσωματώνεται στο πίσω σύστημα κίνησης ενός Tesla Model S δύο ηλεκτροκινητήρων [25]

3.1 Εισαγωγή

Ο όρος Ηλεκτρονικά Ισχύος ανταποκρίνεται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών ημιαγωγικών στοιχείων με σκοπό την επεξεργασία, τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος, όταν και όπου αυτό απαιτείται. Οι διατάξεις των ηλεκτρικών ισχύος καλούνται μετατροπείς ισχύος ή μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος συνιστώνται από το τρίπτυχο ηλεκτρονικά - ισχύς - έλεγχος. Ηλεκτρονικά, υπό την έννοια των ηλεκτρικών δομικών στοιχείων και του συνόλου των συσκευών που βασίζονται στις ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών. Από την άλλη πλευρά, ο χαρακτηρισμός της ισχύος αποδίδεται, εξαιτίας των στατικών και περιστρεφόμενων συσκευών, με σκοπό την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ισχύος. Εν τέλει, ο όρος του ελέγχου αφορά την εφαρμογή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και λοιπών στοιχείων μικροεπεξεργαστών, με στόχο την διαχείριση των ημιαγωγικών υλικών για την διαμόρφωση ροής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο αναλυτικά, κάθε ηλεκτρονικός μετατροπέας μετασχηματίζει τις κυματομορφές των ηλεκτρικών μεγεθών. Για παράδειγμα, η εν λόγω ηλεκτρική διάταξη

χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η μετατροπή της συνεχής σε εναλλασσόμενη τάση ή της εναλλασσόμενης σε συνεχής, μια μετατροπή που συνδυάζεται με την ταυτόχρονη διαμόρφωση της συχνότητας και της ενεργού ισχύος της. Φυσικά, η ανάγκη για μετατροπή των μεγεθών αυτών είναι κάτι αναμενόμενο, αφού η ηλεκτρική ενέργεια διατηρεί σταθερά χαρακτηριστικά, σε αντίθεση με τα χαρακτηριστικά των συσκευών που απαιτούν την τροφοδοσία της. Κατά συνέπεια, τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι αυτή η διάταξη, που παρεμβάλλεται μεταξύ μιας πηγής ισχύος και μιας ηλεκτρικής μηχανής, προκειμένου να διαχειριστεί την ηλεκτρική ισχύ και να τη μετατρέψει στην κατάλληλη ένταση του ρεύματος και της τάσης, ώστε να εξισωθούν οι δυνατότητες της πηγής με τις εκάστοτε απαιτήσεις της ηλεκτρικής μηχανής [26].

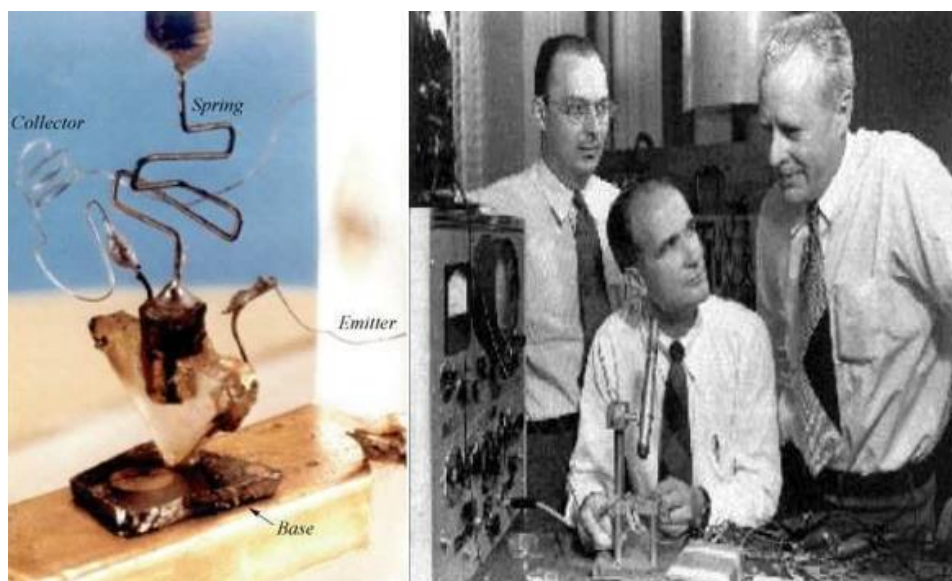
Το κλειδί για την ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρικών ισχύος αποτελεί ο έλεγχος ροής με υψηλή ακρίβεια σε ελάχιστο χρονικό διάστημα, καθώς και οι διακοπτικές ικανότητες που προσφέρουν, μέσω της χρήσης των διαφόρων λογής τρανζίστορ που χρησιμοποιούν. Παράλληλα, στην πρόοδο τους, καθοριστική υπήρξε η μελέτη και η εξελιξιμότητα των μικροεπεξεργαστών αλλά και γενικότερα η άνοδος που έχει επέλθει στην επιστήμη της μικροηλεκτρονικής. Έτσι, τα ηλεκτρικά ισχύος έχουν καταλήξει να υλοποιούν έλεγχο της ροής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα συντριπτικά μεγάλο ποσοστό εφαρμογών. Αναφορικά, ορισμένες εφαρμογές τους είναι στα ηλεκτρικά τρένα, τραμ και τρόλεϋ αλλά και για την τροφοδοσία τηλεπικοινωνιακών ή δορυφορικών συστημάτων και αεροσκαφών.

3.2 Εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος

Το πρώτο βήμα στην ιστορία των Ηλεκτρονικών Ισχύος έγινε το 1882, το έτος κατά το οποίο ξεκίνησαν οι μελέτες γύρω από το φωτεινό τόξο Hg και παράλληλα υπήρξε η σκέψη για την εφαρμογή του σε ανορθωτικές διατάξεις. Έτσι, 20 χρόνια αργότερα, το έτος 1902 κατασκευάζεται ο πρώτος ανορθωτής ατμών υδραργύρου (Hg) από τον Αμερικανό μηχανικό Peter Cooper-Hewitt και τις επόμενες δεκαετίες χρησιμοποιείται κατά κόρον για τεχνικές εφαρμογές. Στα χρόνια που ακολούθησαν, οι ερευνητές εστίασαν την προσοχή τους στους κρυσταλλικούς ανορθωτές, (ως τότε οι κρυσταλλικοί ανιχνευτές είχαν πρώτο-ερευνηθεί και χρησιμοποιηθεί στα ραδιόφωνα για την επίτευξη της φώρασης του ραδιοφωνικού σήματος) και συγκεκριμένα σε ένα από τα πιο αξιολογα ημιαγώγιμα στοιχεία, το πυρίτιο. Κατά τις έρευνες αυτές, ανακαλύφθηκε η επαφή p-n, που επρόκειτο για δυο περιοχές πυριτίου, στην πρώτη εκ των οποίων

φορέας πλειονότητας αποτελούν τα ηλεκτρόνια (ημιαγωγός τύπου-n), ενώ στη δεύτερη περιοχή, φορέας πλειονότητας είναι οι οπές (ημιαγωγός τύπου-p). Η ανακάλυψη της επαφής p-n έμελλε να αποβεί καθοριστική για την εξέλιξη της ιστορίας των ηλεκτρικών ισχύος, μιας και έθεσε τα θεμέλια για την μετέπειτα εφεύρεση του τρανζίστορ.

Στο πλαίσιο αυτό, το έτος 1947 οι ερευνητές John Bardeen, Walter Brattain και William Shockley (εργαστήρια Bell, Η.Π.Α.) αναζητούν ένα νέο μέσο ενίσχυσης και επιχειρούν με επιτυχία να τοποθετήσουν ένα ηλεκτρόδιο στην υπάρχουσα επαφή p-n, με στόχο τον έλεγχο της ροής το ρεύματος που διαρρέει τον ημιαγωγό. Η συνεχής έρευνα και οι πειραματικές δοκιμές, με ημιαγωγούς πυριτίου και έπειτα γερμανίου, οδήγησε στην εφεύρεση του τρανζίστορ. Το τρανζίστορ του 1948 αποτέλεσε σταθμό για την εξέλιξη των ηλεκτρικών μετατροπών ισχύος και σήμανε μια περίοδο αλματώδης ανάπτυξης στον κλάδο της Ηλεκτρονικής [27].

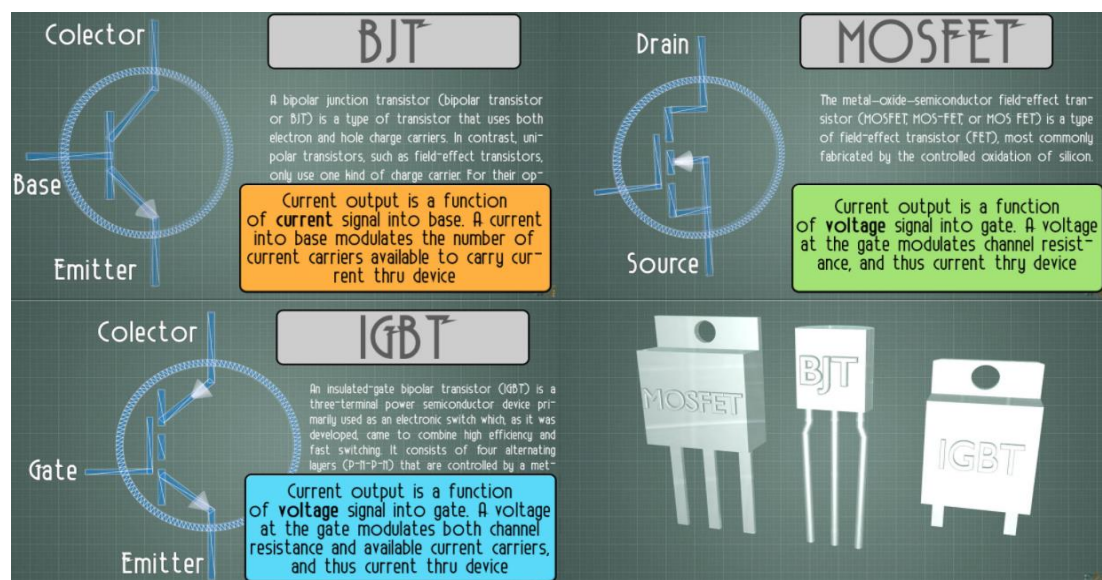


Εικόνα 3.2.1: Η ιστορική στιγμή της ανακάλυψης του τρανζίστορ το έτος 1947 με τους John Bardeen, Walter Brattain και William Shockley σε φωτογραφία της εποχής, και από δίπλα η μορφή με την οποία πρωτοεμφανίστηκε το τρανζίστορ

Κατά συνέπεια, το 1958, δέκα χρόνια μετά την εμφάνιση του τρανζίστορ, έρχεται μια ακόμη επαναστατική ανακάλυψη, το λεγόμενο θυρίστορ από την Αμερικάνικη εταιρεία General Electric Company. Η νέα αυτή διάταξη παρουσίασε μια σημαντική διαφοροποίηση από το τρανζίστορ. Πιο αναλυτικά, η βασική τους διαφορά σχετίζεται με το γεγονός ότι το θυρίστορ έχει την τάση να άγει με παλμό έναυσης, όταν ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο υπάρχει θετική τάση αλλά δεν διακόπτεται η ροή του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό, δε σταματά και η ροή στην πλευρά της πύλης, εκτός από όταν αντιστραφεί η τάση μεταξύ ανόδου-καθόδου. Παράλληλα, η μεγάλη αντοχή

του σε υψηλές τιμές τάσης-ρεύματος καθιστά το θυρίστορ αξιόλογη επιλογή μέχρι και σήμερα όταν πρόκειται για εφαρμογές ελέγχου μεγάλης ισχύος.

Ωστόσο, η ανοδική περίοδος στα ηλεκτρονικά δε σταμάτησε παρά την μεγάλη επιτυχία του θυρίστορ και αργότερα το έτος 1959, ήρθε το θυρίστορ GTO (Gate Turn Off). Το στοιχείο αυτό μπορούσε να τεθεί σε αγώγιμη κατάσταση με έναν παλμό σβέσεως, όμως ο παλμός αυτός θα έπρεπε να είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο παλμό έναυσης, γεγονός που ήταν ένα σημαντικό μειονέκτημα. Εν συνεχεία, το έτος 1970 κατασκευάζεται το για πρώτη φορά και το τρανζίστορ MOSFET (Metal Oxide Field Effect Transistor). Από την μια πλευρά, το τρανζίστορ BJT χρησιμοποιείται για υψηλά ρεύματα της τάξης των 20A, ενώ από την άλλη, το MOSFET προσφέρει υψηλές διακοπτικές ικανότητες (διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του ύψους των 100kHz). Αργότερα, το 1980 εμφανίστηκε ένα νέο τρανζίστορ, το λεγόμενο IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor), το οποίο κατάφερε να συνδυάσει τα βασικά στοιχεία των προκατόχων του, του τρανζίστορ και του θυρίστορ. Ουσιαστικά, μια μικρή τάση στην πύλη του είναι αρκετή προκειμένου να τεθεί σε αγώγιμη κατάσταση, ενώ όταν η τάση αυτή σταματήσει να υφίσταται, διακόπτεται και η διέλευση του ρεύματος. Ταυτόχρονα, όπως και το θυρίστορ, το τρανζίστορ IGBT παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην εφαρμογή υψηλών τάσεων και στην διέλευση μεγάλων ρευμάτων [28].



Εικόνα 3.2.2: Βασική δομή, σχηματική αναπαράσταση και περιγραφή της κύριας λειτουργίας καθενός από τα 3 είδη τρανζίστορ (διπολικό τρανζίστορ, Mosfet, IGBT)

Μια δεκαετία αργότερα, το έτος 1990 δημιουργείται μια μετεξέλιξη του θυρίστορ GTO, με την ονομασία IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor). Πρόκειται για

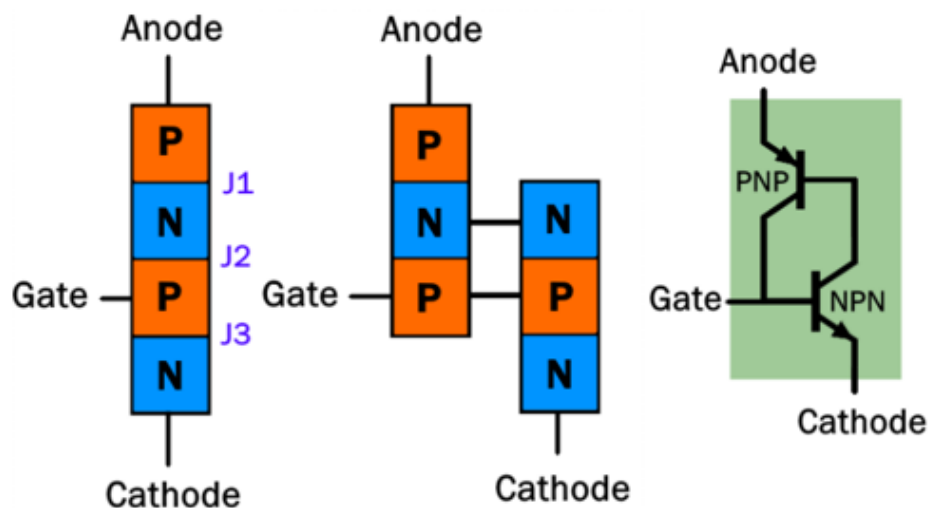
ένα θυρίστορ με βελτιωμένες διακοπτικές ικανότητες που βρίσκει εφαρμογή σε ηλεκτρικά ισχύος με μεγάλες ανάγκες ισχύος της τάξης των MW.

Τέλος, με βάση αυτή τη σύντομη ιστορική αναδρομή και κυρίως την χρήση του κάθε ημιαγωγικού υλικού, είναι φανερό ότι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος επιλέγονται κατά περίπτωση εφαρμογής. Στις μέρες μας, στις περιπτώσεις που απαιτούνται μεγάλα φορτία, υπό υψηλού επιπέδου τάσεις και μεγάλα ρεύματα, συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται μετατροπείς ισχύος με θυρίστορ. Από την άλλη πλευρά, σε περιπτώσεις, κατά τις οποίες το ζητούμενο είναι η κάλυψη υψηλών συχνοτήτων λειτουργίας επιλέγονται τρανζίστορ MOSFET, ενώ σε εφαρμογές χαμηλότερων απαιτήσεων ισχύος συχνά χρησιμοποιούνται τα τρανζίστορ IGBT.

3.3 Βασικά στοιχεία και τρόπος λειτουργίας τους

3.3.1 Θυρίστορ

Ο όρος θυρίστορ (thyristor) περιλαμβάνει μια πολυμελή οικογένεια ημιαγωγίων διατάξεων που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρικοί ελεγχόμενοι διακόπτες. Δομικά, ένα θυρίστορ αποτελείται από 4 στρώματα τύπου p-n, γι' αυτό και μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός 2 τρανζίστορ. Η εν λόγω διάταξη διαθέτει 3 ακροδέκτες, την άνοδο, την κάθοδο και την πύλη. Σχηματικά, φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.3.1: Δομή ενός θυρίστορ με τα 4 στρώματα p-n. Παρατηρούνται και οι 3 ακροδέκτες της διάταξης: άνοδος, κάθοδος και πύλη

Σε αντίθεση με την ενδιάμεση κατάσταση της διακοπτικής λειτουργίας του τρανζίστορ, το θυρίστορ έχει μόνο δύο ευσταθείς καταστάσεις λειτουργίας, την κατάσταση αγωγιμότητας (On) και την κατάσταση αποκοπής (Off). Στην οικογένεια των θυρίστορ ανήκουν ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου SCR (Silicon Controlled Rectifier), ο

ελεγχόμενος διακόπτης πυριτίου SCS (Silicon Controlled Switch), το GTO (Gate Turn-Off), ελεγχόμενο από MOS (MOS-controlled thyristor - MCT), στατικής επαγωγής (Static Induction Thyristor - SITh), η δίοδος Shockley, η δίοδος εναλλασσόμενου ρεύματος DIAC (Diode Alternating Current), η τρίοδος εναλλασσόμενου ρεύματος TRIAC (Triode Alternating Current), καθώς και τα νεότερα αμφίδρομα SCR (Bi-Directional Controlled Thyristor) και IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) [29].

Πάρα τις διάφορες μορφές των θυρίστορ, όλα στο σύνολο τους υπακούν σε κάποιες βασικές δομικές και λειτουργικές αρχές. Συνεπώς, πρόκειται για διακόπτες στερεάς κατάστασης και συμπεριφέρονται ως ανοικτά κυκλώματα με την ικανότητα αντοχής υπό ονομαστική τάση, μέχρι να ενεργοποιηθούν. Κατά την περίοδο που είναι ενεργά, τα θυρίστορ γίνονται χαμηλής αντίστασης και παραμένουν στην κατάσταση αυτή, μέχρις ότου η διέλευση του ρεύματος διακοπεί είτε η ένταση του ρεύματος βρεθεί κάτω από μια ελάχιστη οριακή τιμή.

Όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας ενός θυρίστορ, όταν υπάρχει παλμός έναυσης στην πύλη (Gate), ανεξάρτητα από το αν είναι θετικά πολωμένο, τότε δεν είναι εφικτή η διέλευση του ρεύματος διαμέσου του θυρίστορ. Προκειμένου το θυρίστορ να άγει, απαραίτητη προϋπόθεση είναι τόσο η εφαρμογή ενός παλμού έναυσης στην πύλη του όσο και να είναι θετικά πολωμένο. Έτσι, όταν το θυρίστορ βρεθεί σε αγώγιμη κατάσταση θα παραμείνει σε αυτή, ακόμα και αν ο εναρκτήριο παλμός αφαιρεθεί. Για να βρεθεί το θυρίστορ σε μη αγώγιμη κατάσταση θα πρέπει είτε ο ρυθμός διέλευσης του ρεύματος μέσα σε αυτό να μηδενισθεί ή να αντιστραφεί η πολικότητα της ανόδου (σε σχέση με την κάθοδο). Μέσω της διαδικασίας αυτής, το θυρίστορ μπορεί να μεταβαίνει από την μια κατάσταση στην άλλη και να επιτρέπει ή να διακόπτει αποτελεσματικά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος [30].

Εν κατακλείδι, το θυρίστορ είναι ένα αργό διακοπτικό ημιαγωγικό στοιχείο, σε σχέση με τα τρανζίστορ BJT ή με τα MOSFET, γεγονός που σχετίζεται με το υψηλό προσδόκιμο ζωής των χρησιμοποιούμενων φορέων, προκειμένου να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση των απωλειών αγωγιμότητας. Στο πλαίσιο αυτό, το θυρίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μικρές ταχύτητες μετάβασης

Τα θυρίστορ χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου είναι αναγκαίος ο έλεγχος του φορτίου ισχύος συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Πολλές φορές, μπορούν να βρουν εφαρμογή σε περιπτώσεις που απαιτείται η τροφοδοσία ενός φορτίου με ένα καθορισμένο ποσό ισχύος, είτε η αφαίρεση ενός ποσού ισχύος από το φορτίο αυτό.

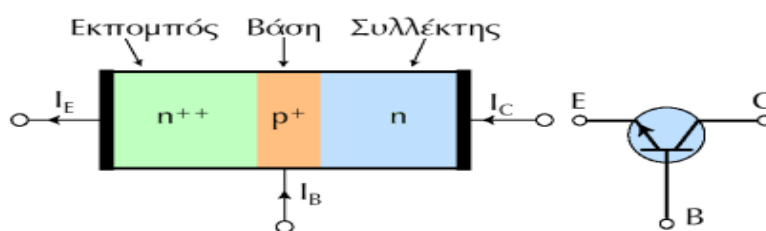
Παράλληλα, ένα θυρίστορ χρησιμοποιείται για να προσαρμόσει το ποσό ισχύος με το επιθυμητό, ώστε να «ταιριάξει» με τις απαιτήσεις του εκάστοτε φορτίου. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβεί στην περίπτωση ενός ηλεκτρικού κινητήρα, όπου η διάταξη του θυρίστορ θα μπορούσε να συμβάλλει στην ρύθμιση της ταχύτητας και της ροπής στρέψης του κινητήρα.

3.3.2 Τρανζίστορ

Το τρανζίστορ είναι μια από τις σπουδαιότερες εφευρέσεις του 20^{ου} αιώνα και πολύ συχνά είναι το βασικό συστατικό πίσω από όλες τις σύγχρονες ηλεκτρονικές δημιουργίες. Επιτέλεσε μια δεύτερη επανάσταση στον κόσμο της Ηλεκτρονικής μετά την ανακάλυψη της διόδου του Φλέμινγκ. Το τρανζίστορ επέφερε σημαντική βελτίωση στην απόδοση των συστημάτων και διακρίθηκε για το μικρό μέγεθος, βάρος και τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

Το τρανζίστορ είναι μια διάταξη ημιαγωγών στερεάς κατάστασης με χρήση σε ευρύ πλήθος εφαρμογών, προσφέροντας ενίσχυση, σταθεροποίηση τάσης και διαμόρφωση συχνότητας. Παράλληλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας διακόπτης on-off ή ως μία μεταβλητή αντίσταση. Οι δύο κύριοι τύποι ημιαγωγών 3 ακροδεκτών είναι το διπολικό τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor BJT) και το τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου (Field Effect Transistor FET). Στους κυριότερους τύπους τρανζίστορ πέρα από τα BJT, FET τρανζίστορ, συγκαταλέγονται και τα μονωμένα διπολικά τρανζίστορ πύλης (Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT).

Η δομή του διπολικού τρανζίστορ στηρίζεται στην επαφή pn, περιλαμβάνει στρώματα opών και ηλεκτρονίων (p και n περιοχής αντίστοιχα). Το διπολικό τρανζίστορ τύπου npn, το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον στα ηλεκτρονικά ισχύος, αποτελείται από ένα κρύσταλλο γερμανίου ή πυριτίου, μέσα στο οποίο βρίσκεται τοποθετημένο ένα λεπτό στρώμα p, το οποίο εκατέρωθεν περιτοιχίζεται από στρώματα n (αντίστοιχη είναι και η δομή ενός npn τρανζίστορ, με την ενδιάμεση περιοχή να αποτελείται από opές και τις 2 γύρω περιοχές με ηλεκτρόνια).



Εικόνα 3.3.2: Δομική αναπαράσταση ενός τρανζίστορ τύπου npn με τους 3 ακροδέκτες του (Εκπομπός, Βάση, Συλλέκτης). [31]

Δομικά, ένα τρανζίστορ αποτελείται από 3 περιοχές με διαφορετικές λειτουργίες η καθεμία:

- **Εκπομπός:** Είναι μια έντονα εμπλουτισμένη περιοχή, είτε σε ηλεκτρόνια n , είτε σε οπές p ανάλογα αν πρόκειται για npn ή pnp τρανζίστορ. Ο ρόλος του είναι η εκπομπή φορτίου προς την περιοχή της βάσης.
- **Βάση:** Είναι μια λεπτή περιοχή λιγότερο εμπλουτισμένη που καθορίζει αν το φορτίο θα εγχυθεί από τον εκπομπό προς τον συλλέκτη.
- **Συλλέκτης:** Είναι ο αποδέκτης των φορτίων που στέλνει ο εκπομπός και το επίπεδο εμπλουτισμού του είναι μεταξύ του εκπομπού και της βάσης.

Η λειτουργία ενός διπολικού τρανζίστορ στηρίζεται στην έγχυση φορέων από τον εκπομπό στον συλλέκτη. Σε κανονική λειτουργία, η επαφή του εκπομπού είναι πάντοτε ορθά πολωμένη, ενώ η επαφή του συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη. Το κλειδί πίσω από την αρχή λειτουργίας του τρανζίστορ βρίσκεται στην τιμή της τάσης που εμφανίζεται στην περιοχή βάσης-εκπομπού (τάση V_{BE}). Συγκεκριμένα, στην περίπτωση κατά την οποία η τάση V_{BE} είναι μεγαλύτερη των $0,7V$ τότε υπάρχει ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων (για τρανζίστορ npn) από την περιοχή του εκπομπού προς τη βάση και ελεύθερων οπών από τη περιοχή της βάσης προς τον εκπομπό. Διαφορετικά, αν δηλαδή η τάση V_{BE} είναι μικρότερη των $0,7V$ τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος από τη βάση προς τον εκπομπό [32].

Όπως προαναφέρθηκε, το διπολικό τρανζίστορ αποτελείται από δύο ενώσεις pn επαφών, την ένωση εκπομπού-βάσης (EBJ) και την ένωση συλλέκτη-βάσης (CBJ). Με βάση την κατάσταση της πόλωσης κάθε επαφής προκύπτουν και οι διαφορετικές περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ. Έτσι, όταν το τρανζίστορ πρόκειται να λειτουργήσει ως διακόπτης θα πρέπει να βρίσκεται τόσο στην περιοχή αποκοπής, όσο και στην περιοχή κορεσμού. Αντιθέτως, όταν απαιτείται η χρήση του ως ενισχυτής (π.χ. ενίσχυση εναλλασσόμενου σήματος), το τρανζίστορ θα χρησιμοποιηθεί στην ενεργό περιοχή. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ BJT και η χρήση του σε καθεμιά από αυτές.

Περιοχή	EBJ	CBJ	
Αποκοπής	Ανάστροφα	Ανάστροφα	Διακόπτης
Ενεργός	Ορθά	Ανάστροφα	Ενισχυτής
Κορεσμού	Ορθά	Ορθά	Διακόπτης

Πίνακας 3.3.3: Περιοχές λειτουργίας διπολικού τρανζίστορ

3.4 Είδη ηλεκτρικών ισχύος

Ο μετατροπέας ισχύος είναι η διάταξη που θα ενώσει την πηγή ισχύος και την ηλεκτρική μηχανή. Κατά συνέπεια, τόσο το είδος της πηγής ισχύος όσο και το είδος της εκάστοτε μηχανής καθορίζουν την κατηγορία των μετατροπών ισχύος ανάλογα με την μορφή ισχύος εισόδου και ισχύος εξόδου. Με βάση τη διάκριση αυτή, διακρίνονται σε 4 κατηγορίες, οι οποίες είναι:

- **Μετατροπείς AC-DC ή Ανορθωτές (Rectifiers):** Πρόκειται για τις διατάξεις εκείνες, με τις οποίες επιτυγχάνεται η μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Σύμφωνα με το είδος της εναλλασσόμενης τάσης που φτάνει στην είσοδο τους, οι ανορθωτές διαχωρίζονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς. Επιπλέον, με βάση το αν η τάση στην έξοδο θα είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη, διακρίνονται σε ελεγχόμενους και μη ελεγχόμενους αντίστοιχα.
- **Μετατροπείς DC-AC ή Αντιστροφείς (Inverters):** Η οικογένεια των αντιστροφέων επιτρέπει την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, δηλαδή εκτελούν την αντίθετη διεργασία από την αντίστοιχη των ανορθωτών. Όσον αφορά τις διαφοροποιήσεις τους, ανάλογα με την απαιτούμενη μορφή εξόδου διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς. Εν τέλει, τόσο το πλάτος της τάσης/ρεύματος εξόδου, όσο και η συχνότητα λειτουργίας μπορούν να ελεγχθούν-ρυθμιστούν ανά περίπτωση.
- **Μετατροπείς DC-DC (Choppers):** Οι μετατροπείς αυτής της κατηγορίας διαφέρουν από τους προηγούμενους, καθώς δεν αλλάζουν το είδος του ρεύματος, ωστόσο μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά του συνεχούς ρεύματος. Δηλαδή, μετατρέπουν τη συνεχή τάση που λαμβάνουν σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος με διαφορετική (ή την ίδια) πολικότητα. Έπειτα, αν η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη από την τάση εξόδου, τότε πρόκειται για μετατροπείς υποβιβασμού της τάσης (step-down choppers ή buck converters), ειδάλλως για μετατροπείς ανύψωσης της τάσης (step-up choppers ή boost converters).
- **Μετατροπείς AC-AC ή Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters):** Οι μετατροπείς ac-ac είναι υπεύθυνοι για την μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας και πλάτους σε εναλλασσόμενο ρεύμα με ρυθμιζόμενη συχνότητα και πλάτος. Οι κυκλομετατροπείς διαχωρίζονται σε υποβιβασμού και ανύψωσης συχνότητας, ανάλογα με τη συχνότητα εξόδου, αν

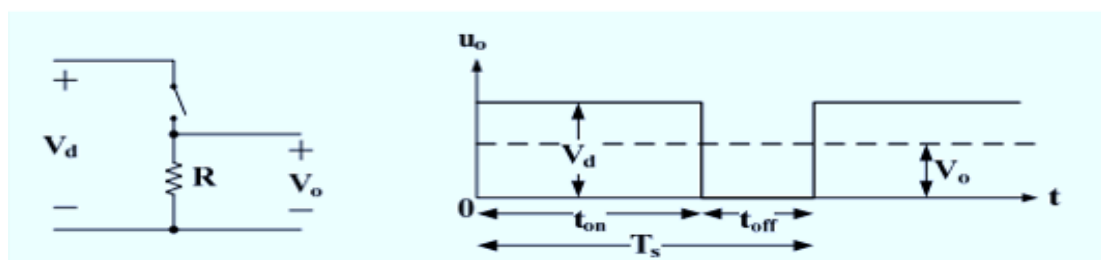
αυτή είναι μεγαλύτερη από εκείνη της εισόδου, τότε θεωρείται ως ανύψωσης και διαφορετικά ως υποβιβασμού.

Από τις παραπάνω κατηγορίες μετατροπών ισχύος στα ηλεκτρικά οχήματα συναντώνται οι μετατροπείς **DC-DC** και **DC-AC**. Στο πλαίσιο αυτό, αμφότεροι αναλύονται στις επόμενες σελίδες.

3.5 Μετατροπείς DC-DC

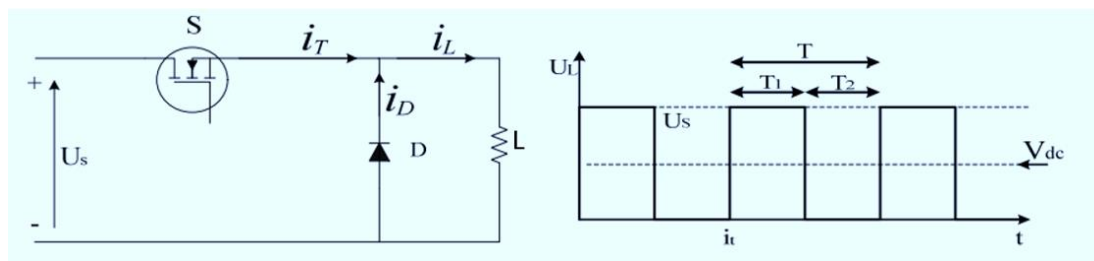
Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, οι μετατροπείς dc-dc διαχειρίζονται μια ορισμένη τιμή συνεχούς τάσης για τον έλεγχο και την προσαρμογή της σε μια συνεχή τιμή με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Γνωστοί και ως ψαλιδιστές (chopper), κατά πολλούς χαρακτηρίζονται ως το ισοδύναμο ενός μετασχηματιστή για το συνεχές ρεύμα. Ουσιαστικά, πρόκειται για έναν διακόπτη on-off υψηλής ταχύτητας, ο οποίος μπορεί να είναι είτε ένα τυπικό θυρίστορ ή ένα GTO θυρίστορ, είτε ένα MOSFET ή ένα τρανζίστορ ισχύος. Το χαμηλό κόστος κατασκευής και ο μικρός τους όγκος, σε συνδυασμό με έναν αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης (της τάξης του 95%), καθιστούν τους μετατροπείς αυτούς ιδανικούς για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Στους μετατροπείς dc-dc, υπάρχει η απαίτηση για συνεχή έλεγχο της τάσης εξόδου, προκειμένου να διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα, ενόσω τόσο το φορτίο όσο και η τάση εισόδου υπόκεινται σε συνεχείς αυξομειώσεις. Οι μετατροπείς dc-dc διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούν ένα σύνολο διακοπών (έναν ή περισσότερους), ώστε να μετασχηματίσουν τη συνεχή τάση από το ένα επίπεδο στο άλλο. Η μεταβολή της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται με την ρύθμιση των χρόνων έναυσης και σβέσης των διακοπών (δηλαδή, των χρονικών διαστημάτων t_{on} και t_{off} κατά τα οποία το στοιχείο άγει ή δεν άγει αντίστοιχα). Πιο συγκεκριμένα, στην παρακάτω εικόνα όπου φαίνεται το κυκλωματικό ισοδύναμο ενός μετατροπέα dc-dc διακοπτικού τύπου και η γραφική παράσταση του v-t, η τάση εξόδου V_o εξαρτάται άμεσα από τα χρονικά διαστήματα των t_{on} και t_{off} .



Εικόνα 3.5.1: Μετατροπέας dc-dc διακοπτικού τύπου

Ένας από τους τρόπους ελέγχους της τάσης εξόδου είναι να διατηρηθεί σταθερή η συχνότητα μετάβασης, οπότε και σταθερή περίοδος μετάβασης ($T = t_{on} + t_{off}$) και να αλλάξει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο διακόπτης είναι κλειστός. Δηλαδή, σύμφωνα με την εικόνα, η μέθοδος αυτή επεξεργάζεται τον λόγο μεταξύ του χρονικού διαστήματος t_{on} ως προς τον συνολικό χρόνο T (δηλαδή, τον λόγο κατάτμησης ή duty cycle $\delta = t_{on}/T$) και είναι γνωστή ως μετάβαση με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM). Επιπλέον, ένας δεύτερος τρόπος ελέγχου της τάσης μπορεί να εφαρμοστεί με την μεταβολή της συχνότητας και της περιόδου μετάβασης, αλλά και της χρονικής διάρκειας, κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει την χρήση θυρίστορ με εξαναγκασμένη μετάβαση [26].



Εικόνα 3.5.2: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα dc-dc

Συνοψίζοντας, με βάση τις παραπάνω εικόνες, είναι φανερό ότι η μέση τάση μπορεί να λάβει τιμές σε ένα εύρος μεταξύ του μηδενός και της τάσης U_s , που αναπαριστά την τάση εισόδου. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η μέση τιμή της τάσης εξαρτάται από: Την συχνότητα επανάληψης των καταστάσεων λειτουργίας του διακόπτη S (on και off). Δηλαδή, συχνότητα και τάση είναι ανάλογα μεγέθη.

Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο διακόπτης είναι ανοιχτός (χρονικό διάστημα t_{on}). Συνεπώς, η τιμή της τάσης είναι ανάλογη με το χρονικό διάστημα t_{on} .

Ανάλογα με τη φύση του διακοπτικού στοιχείου που διαχειρίζεται το ανωτέρω κύκλωμα, αντίστοιχα θα καθορίζεται και ο τρόπος έναυσης και σβέσης του. Πιο συγκεκριμένα, κατά την περίπτωση που ο διακόπτης είναι ένα τρανζίστορ, τότε το ρεύμα βάσης θα σηματοδοτήσει την έναυση ή την σβέση του. Εάν πρόκειται για ένα GTO θυρίστορ, τότε ένας αρνητικός παλμός στην πύλη θα προκαλέσει το κλείσιμο του διακόπτη, ενώ ένας θετικός παλμός θα τον ανοίξει. Τέλος, αν ο διακόπτης είναι ένα θυρίστορ, τότε θα είναι απαραίτητη η παρουσία ενός κυκλώματος εξαναγκασμένης μετάβασης για τη σβέση του [33].

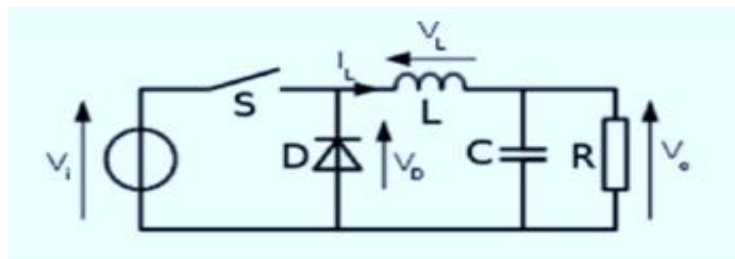
Στο σημείο αυτό, να σημειωθεί ότι οι μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. είναι ευπροσάρμοστοι σε διάφορες λειτουργικές απαιτήσεις, με την έννοια ότι με βάση την απαιτούμενη σχέση

μεταξύ τάσης εισόδου/εξόδου (π.χ. ανάγκη για ανύψωση/υποβιβασμό της συνεχούς τάσης), αναλόγως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετική τοπολογία του μετατροπέα. Κατά συνέπεια, με βάση την τοπολογία και επομένως τον ρόλο τους, οι μετατροπείς dc-dc, διαχωρίζονται στις εξής 4 υποκατηγορίες:

- Μετατροπέας Σ.Π./Σ.Π. ανύψωσης (Step-Up ή Boost DC/DC Converter)
- Μετατροπέας Σ.Π./Σ.Π. υποβιβασμού (Step-Down ή Buck DC/DC Converter)
- Μετατροπέας Σ.Π./Σ.Π. υποβιβασμού/ανύψωσης (Step-Down-Up ή Buck-Boost- DC/DC Converter)
- Συνεχής μετατροπέας Σ.Π./Σ.Π. (Cuk DC/DC Converter)

3.5.1 Μετατροπείς DC-DC υποβιβασμού

Οι μετατροπείς Σ.Π./Σ.Π. υποβιβασμού επιτυγχάνουν τον υποβιβασμό της τάσης εισόδου κατά την έξοδο τους. Δηλαδή, στην περίπτωση αυτή, πάντοτε η τάση εισόδου θα είναι μεγαλύτερη ή ίση με την τάση εξόδου. Η υψηλότερη τάση που μπορεί να παράγει ένας μετατροπέας ανύψωσης θα είναι ίση με την τάση που λαμβάνει στην είσοδο του.



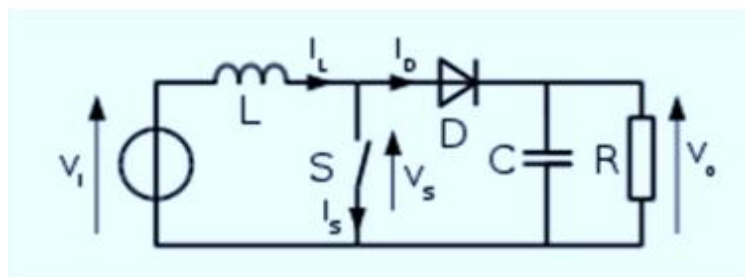
Εικόνα 3.5.3: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα dc-dc υποβιβασμού

Προχωρώντας στην κυκλωματική ανάλυση, βλέπουμε ότι σε αυτή την περίπτωση όταν ο διακόπτης S είναι κλειστός, η αυτεπαγωγή L απορροφά ενέργεια και αποθηκεύει σε μορφή μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα η τάση που φτάνει στην έξοδο να μειώνεται και να επιτυγχάνεται η διαδικασία του υποβιβασμού. Ταυτόχρονα, η διάοδος ελευθέρως ροής δεν άγει, εξαιτίας της ανάστροφης πόλωσης της. Διαφορετικά, όταν ο διακόπτης S είναι ανοιχτός τότε το μαγνητικό πεδίο που η αυτεπαγωγή είχε «φιλοξενήσει», πλέον καταρρέει και η τάσης επαγωγής παρουσιάζει αντίστροφη πολικότητα. Τώρα, το ρεύμα από την αυτεπαγωγή θα ρέει προς το φορτίο και θα επιστρέψει κυκλικά προς την διάοδο D, όπου θα ανορθωθεί. Κατά συνέπεια, ανεξαρτήτως της κατάστασης του διακόπτη, το ρεύμα στην έξοδο θα είναι μη μηδενικό [26].

Επισημαίνεται ότι, όσο το ρεύμα ρέει στην αυτεπαγωγή κατά το διάστημα αποκοπής του διακοπτικού στοιχείου, ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος. Αντιθέτως, όταν το ρεύμα επαγωγής μηδενίζεται στην περίοδο αποκοπής του διακόπτη, ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος. Επιπρόσθετα, ο λόγος πίσω από τη χρήση της διόδου ελευθέρως ροής σχετίζεται με την αντιμετώπιση υπερτάσεων.

3.5.2 Μετατροπείς DC-DC ανύψωσης

Οι μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. ανύψωσης επιτυγχάνουν την ανύψωση της τάσης εισόδου κατά την έξοδο τους. Δηλαδή, στην περίπτωση αυτή, πάντοτε η τάση εισόδου θα είναι μικρότερη ή ίση με την τάση εξόδου. Η χαμηλότερη τάση που μπορεί να παράγει ένας μετατροπέας ανύψωσης θα είναι ίση με την τάση που λαμβάνει στην είσοδο του.

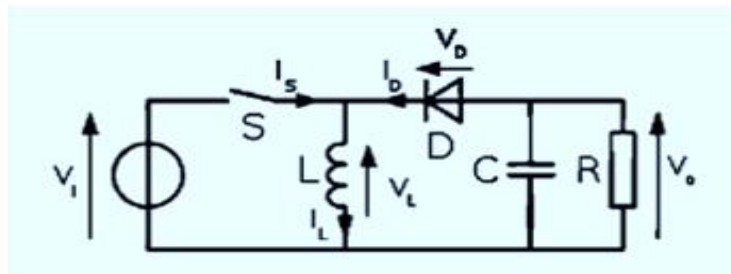


Εικόνα 3.5.4: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα dc-dc ανύψωσης

Κυκλωματικά, παρατηρώντας το ισοδύναμο της παραπάνω εικόνας, έχουμε δύο «οδούς» για την καθοδήγηση του ρεύματος στο φορτίο. Αναλυτικότερα, κατά την περίοδο που το διακοπτικό στοιχείο S είναι κλειστό, το ρεύμα θα επιλέξει τον «εύκολο» δρόμο, ρέοντας στο υποκύκλωμα που δημιουργείται. Όσο συμβαίνει αυτό, η αυτεπαγωγή L απορροφά ενέργεια και αποθηκεύει σε μορφή μαγνητικού πεδίου. Παράλληλα, η διάδος D δεν άγει, εξαιτίας της ανάστροφης πόλωσης της. Ωστόσο, μόλις ο διακόπτης S ανοίξει, η αυτεπαγωγή σταματά να καταναλώνει ενέργεια, το ρεύμα της μειώνεται και αλλάζει πολικότητα. Έπειτα, όταν η τάση στην αυτεπαγωγή γίνει ίση με $V_{πηγής} - V_0$, η διάδος πολώνεται ορθά και το σύνολο της ενέργειας οδηγείται στο φορτίο. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι, η τάση της πηγής και η τάση της αυτεπαγωγής βρίσκονται σε συνδεσμολογία σειράς και προστίθενται μεταξύ τους. Έπειτα, το άθροισμα των τάσεων, αφού ανορθωθεί μέσω της διόδου D, καταλήγει στο φορτίο. Με τον τρόπο αυτόν, υφίσταται η μεγαλύτερη δυνατή τάση κατά την έξοδο και επιτυγχάνεται η διαδικασία της ανύψωσης της τάσης [34].

3.5.3 Μετατροπείς DC-DC υποβιβασμού ανύψωσης

Οι μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. υποβιβασμού-ανύψωσης καταφέρνουν να ενώσουν τις προαναφερθείσες περιπτώσεις μετατροπών σε μια συνδυαστική κατηγορία. Ουσιαστικά, πρόκειται για μετατροπείς που είναι σε θέση να πετύχουν είτε ανύψωση είτε υποβιβασμό στην έξοδο τους, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Η εναλλαγή αυτή επιτυγχάνεται με την μεταβολή του duty cycle. Σε κάθε περίπτωση η τάση εξόδου διατηρεί πολικότητα αντίθετη αυτής της τάσης εισόδου.



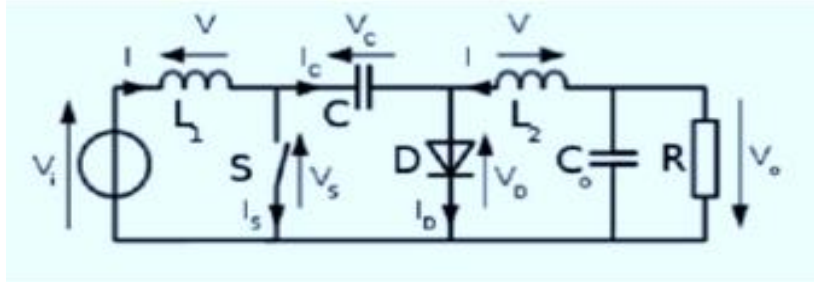
Εικόνα 3.5.5: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα dc-dc υποβιβασμού ανύψωσης

Συγκεκριμένα, όσο το διακοπτικό στοιχείο S παραμένει κλειστό, η αυτεπαγωγή απορροφά ενέργεια από την πηγή τροφοδοσίας και η διάοδος είναι ανάστροφα πολωμένη. Δηλαδή, στο στάδιο αυτό δεν υπάρχει ροή ενέργειας προς το φορτίο. Αντιθέτως, μόλις ο διακόπτης ανοίξει, η τάση επαγωγής εμφανίζει αντίστροφη πολικότητα. Όταν η τάση επαγωγής εξισωθεί με την τάση εξόδου, η διάοδος αποκτά ορθή πόλωση.

Χάρη στη δράση της διάοδος, επιτυγχάνεται η μερική μεταφορά ενέργειας (συνεχής αγωγή ρεύματος) ή η ολική (ασυνεχής αγωγή ρεύματος), προς το φορτίο. Τέλος, να σημειωθεί ότι όσο το διακοπτικό στοιχείο βρίσκεται σε αποκοπή, η πηγή δεν είναι δυνατό να παρέχει ενέργεια στο κύκλωμα [26].

3.5.4 Cuk μετατροπείς DC-DC

Ο συνεχής μετατροπέας Σ.Ρ./ΣΡ παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με την προαναφερθείσα κατηγορία. Η διαφορά του με τους μετατροπείς υποβιβασμού-ανύψωσης έγκειται στο γεγονός ότι συμπληρωματικά με την προηγούμενη τοπολογία διαθέτει ένα παραπάνω πηνίο και έναν πυκνωτή. Επιπλέον, οι Cuk Converters παρέχουν συνεχές ρεύμα εξόδου και πολλές φορές χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές πηγές ρεύματος.



Εικόνα 3.5.6: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα dc-dc cuk

3.6 Μετατροπείς DC-AC

Οι μετατροπείς Σ.Ρ./Ε.Ρ. ή αντιστροφείς (Inverters), είναι μια ηλεκτρονική διάταξη μέσω της οποίας γίνεται εφικτή η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Ταυτόχρονα, ένας αντιστροφέας είναι σε θέση να ελέγξει τόσο τη συχνότητα εξόδου όσο και το πλάτος της κυματομορφής. Οι εν λόγω μετατροπείς μπορούν να τροφοδοτηθούν είτε από πηγή συνεχούς τάσης (VSI), είτε από πηγή συνεχούς ρεύματος (CSI). Ανάλογα με την κυματομορφή εξόδου, διακρίνονται σε αντιστροφείς τετραγωνικού παλμού και ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμού. Και οι μεν και οι δε κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε μονοφασικούς και πολυφασικούς αντιστροφείς, με συνδυασμούς ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας (Half-Bridge Inverter και Full-Bridge Inverter) να συναντώνται στους πρώτους και τριφασικούς αντιστροφείς στους δεύτερους.

Κυκλωματικά, ένας αντιστροφέας αναλύεται σε ένα σύνολο ελεγχόμενων ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων, τα οποία σε συνδυασμό με το ελεγκτήριο κύκλωμα του αντιστροφέα, είτε ελέγχεται παρά μόνο η έναυση (συνήθως θυρίστορ), ή ρυθμίζεται έναυση και σβέση (συνήθως MOSFET, BJT, IGBT). Η διαμόρφωση ενός κυκλώματος ελέγχου εξαρτάται από την εκάστοτε χρήση του, προκειμένου να συμπεριλαμβάνει όλους εκείνους τους απαραίτητους ελέγχους για την ασφαλή και συνεχή λειτουργία της εφαρμογής. Με τη σειρά τους, τα διακοπτικά στοιχεία, λαμβάνουν τα ηλεκτρικά σήματα, ως την έξοδο του κυκλώματος ελέγχου, και καθορίζουν την κυματομορφή εξόδου.

Ιδανικά, ένα κύκλωμα αντιστροφέα στην έξοδο του παρουσιάζει τάση αμιγούς ημιτονοειδούς μορφής, ωστόσο στην πραγματικότητα η ικανότητα προσέγγισης «καθαρού» ημιτόνου είναι μια δύσκολη διεργασία. Θεωρητικά, το «καθαρό» ημίτονο δεν αναλύεται σε ανώτερες αρμονικές εκτός της βασικής. Από την άλλη πλευρά, η τετραγωνική μορφή περιέχει υψηλό αρμονικό περιεχόμενο. Ουσιαστικά, όσο λιγότερο

αρμονικό περιεχόμενο, τόσο πιο κοντά πλησιάζουμε στην βέλτιστη μορφή του ημιτόνου. Προς όφελος αυτού, γίνεται χρήση τόσο φίλτρων όσο και τεχνικών ελέγχου και διαμόρφωσης του εύρους παλμών με σκοπό την κατά το δυνατό καλύτερη ταύτιση με την κυματομορφή του ημιτόνου [33].

Οι μετατροπείς Σ.Ρ./Ε.Ρ. δύναται να διαχωριστούν σε διάφορες κατηγορίες όπως ειπώθηκε και παραπάνω, ανάλογα με το είδος της κυματομορφής εξόδου τους σε αντιστροφείς τετραγωνικού παλμού ή σε ημιτονοειδής διαμόρφωσης παλμού. Επίσης, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει του αριθμού φάσεων στην έξοδο τους, σε μονοφασικούς και πολυφασικούς (κυρίως τριφασικούς), όπως και βάσει του πλήθους βαθμίδων που απαρτίζονται σε μετατροπείς μίας, δύο ή πολλαπλών βαθμίδων. Στο πλαίσιο αυτό, με κριτήριο το σύνολο των βαθμίδων, ισχύουν τα εξής:

Μετατροπείς μίας βαθμίδος

Πρόκειται για διατάξεις κατά τις οποίες σε μια βαθμίδα η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται στην εναλλασσόμενη στην έξοδο. Στην προκειμένη περίπτωση, αφού εφαρμοστεί το κατάλληλο φίλτρο στην τάση, έπειτα πραγματοποιείται η ανύψωση της μέσω μετασχηματιστή, προκειμένου να είναι εφικτή η σύνδεση στο δίκτυο. Στους μετατροπείς μίας βαθμίδος μεταξύ άλλων συναντώνται οι συνδεσμολογίες αντιστροφών ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας.

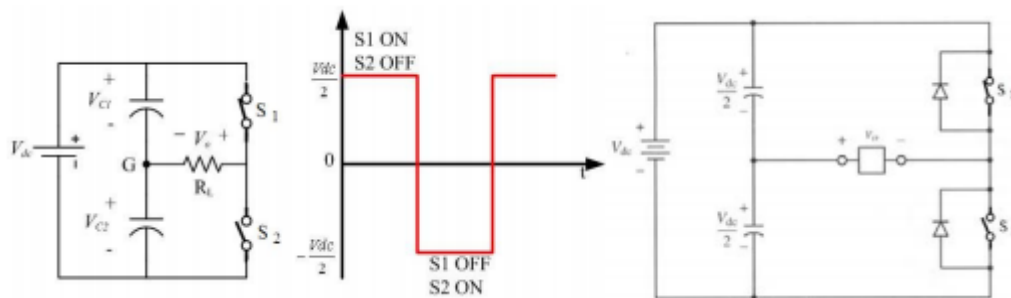
Μετατροπείς δύο βαθμίδων

Όπως προιδέαζει και η ονομασία τους, η μετατροπή της συνεχούς σε εναλλασσόμενη τάση περιλαμβάνει δύο επιμέρους μετατροπές. Στη πρώτη φάση, συναντάται ένας μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ. (όπως οι κατηγορίες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο 3.5, δηλαδή μετατροπείς ανύψωσης, υποβιβασμού, ανύψωσης-υποβιβασμού κ.λπ.), προκειμένου να επιτευχθεί η ανύψωση της τάσης σε μια ορισμένη τιμή. Σε δεύτερη φάση, είναι η σειρά ενός κυκλώματος αντιστροφέα που ενσωματώνει ένα βαθυπερατό φίλτρο για τη μετατροπή στη ζητούμενη ημιτονοειδή κυματομορφή. Το είδος του αντιστροφέα που συνήθως χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι οι αντιστροφείς διαμόρφωσης παλμών (PWM). Εναλλακτικά, στην κατηγορία των μετατροπών δύο βαθμίδων υπάρχει περίπτωση χρήσης του μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. για την απευθείας παραγωγή ανορθωμένου ρεύματος σε ημιτονοειδή μορφή. Στη συνέχεια, ο αντιστροφέας αναλαμβάνει να παρέχει και την εναλλασσόμενη συνιστώσα. Εν κατακλείδι, μπορεί οι εν λόγω διατάξεις να παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα ως

προς το μέγεθος και βάρος τους, ωστόσο χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής, συντήρησης αλλά και μειωμένες δυνατότητες ελέγχου.

3.6.1 Αντιστροφείας ημιγέφυρας (Half-Bridge Inverter)

Ο αντιστροφείς ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας είναι δύο πολύ βασικές συνδεσμολογίες και συχνά συμπεριλαμβάνονται σε άλλες διατάξεις αντιστροφέων, όπως στους τριφασικούς αντιστροφείς (συνδυασμός 3 μονοφασικών ημιγέφυρας-πλήρους γέφυρας). Το κυκλωματικό ισοδύναμο του εν λόγω αντιστροφέα απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί.

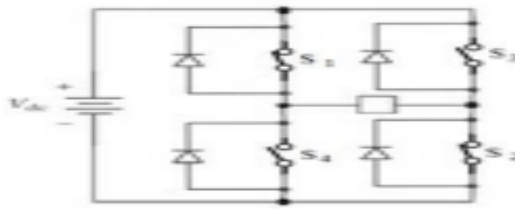


Εικόνα 2.6.1: Συνήθης τοπολογία κυκλώματος αντιστροφέα half-bridge

Παρατηρώντας την τοπολογία του παραπάνω κυκλώματος, φαίνεται η χρήση δύο πυκνωτών προκειμένου να καταμεριστεί ισόποσα η εισερχόμενη τάση. Έπειτα, η τάση που προκύπτει στην έξοδο ως μέγεθος μπορεί να φτάνει και το ήμισυ της εισόδου και με τη δυνατότητα για διαφορετική πολικότητα βάσει της εναλλαγής στην αγωγή ή μη του αντίστοιχου διακοπτικού στοιχείου. Παράλληλα, πάλι μέσω του τρόπου συνδυασμού των διακοπών, δηλαδή τόσο του χρονικού διαστήματος που είναι σε αγωγή κατάσταση, όσο και της σειράς με την οποία αυτοί ενεργοποιούνται, η κυματομορφή της τάσης εξόδου θα έχει μορφή τετραγωνικού παλμού με πλάτος ανάλογο των απαιτήσεων.

3.6.2 Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας (Full-Bridge Inverter)

Το κυκλωματικό ισοδύναμο του full-bridge αντιστροφέα απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.6.2: Συνήθης τοπολογία κυκλώματος αντιστροφέα full-bridge

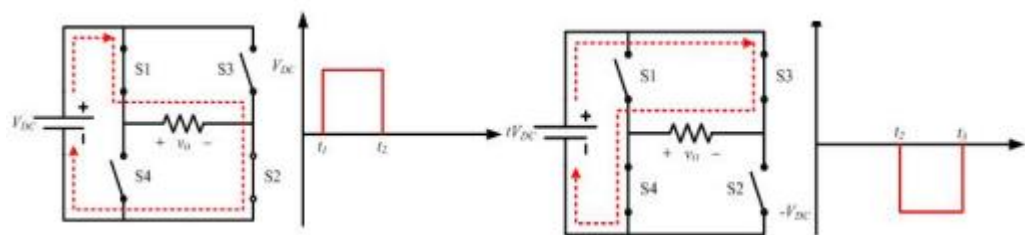
Στην προκειμένη περίπτωση, ο αντιστροφέας αυτής της μορφής συνίσταται από δύο διατάξεις ημιγέφυρας. Έχει την ικανότητα να παράγει τάση εξόδου δύο φορές μεγαλύτερη από την προηγούμενη τοπολογία του αντιστροφέα ημιγέφυρας, για δεδομένη τάση εισόδου. Και αντιστοίχως από την πλευρά της εξόδου, όταν οι δύο μορφές inverter έχουν ίδια ισχύ, τότε η ποσότητα του ρεύματος που διαπερνά τους διακόπτες θα είναι μειωμένη κατά το ήμισυ σε σύγκριση με την προηγούμενη κατηγορία.

Κυκλωματικά, βάσει της παραπάνω εικόνας διακρίνονται οι εξής λειτουργικές περιπτώσεις:

1^η περίπτωση: Διακόπτες S1, S3 ή S2,S4 σε κατάσταση ON, τότε $V_{out}=0$

2^η περίπτωση: Διακόπτες S1, S2 σε κατάσταση ON, τότε $V_{out}=V_{dc}$

3^η περίπτωση: Διακόπτες S3, S4 σε κατάσταση ON τότε $V_{out}=-V_{dc}$



Εικόνα 3.6.3: Επεξήγηση των δύο λειτουργικών περιπτώσεων (2,3) που αναλύθηκαν προηγουμένως [33]

Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση, παρατηρούμε ότι οι διακόπτες s1, s3 βρίσκονται άνω μισό του κυκλώματος και s2,s4 στο κάτω μισό. Αν είναι ανοιχτό το άνω μισό, το φορτίο θα συνδεθεί παράλληλα σε βραχυκύκλωμα με αποτέλεσμα η τάση στην έξοδο (V_{out}) να είναι ίση με μηδέν. Το ίδιο θα συμβεί τόσο στην περίπτωση που οι κάτω διακόπτες ανοίξουν, όσο και στην περίπτωση που οι διακόπτες ως προς το σύνολό τους είναι κλειστοί. Έπειτα, οι υπόλοιπες περιπτώσεις (2), (3) επεξηγούνται σύμφωνα με τις παραπάνω σχηματικές απεικονίσεις. Συμπερασματικά, βλέπουμε ότι και σε αυτή την περίπτωση αντιστροφέων πλήρους γέφυρας, το χρονικό διάστημα που οι διακόπτες

άγουν και η σειρά με την οποία αυτοί ανοίγουν καθορίζει το πλάτος της πλέον εναλλασσόμενης τάσης εξόδου [33].

3.6.3 Αντιστροφέας διαμόρφωσης παλμών (PWM)

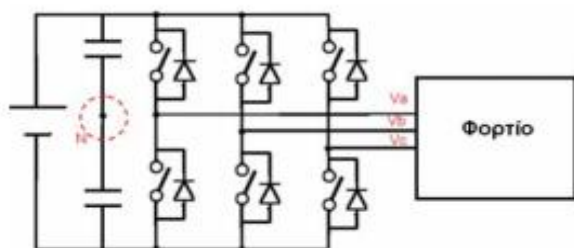
Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται τεχνικές διαμόρφωσης παλμών με σκοπό τόσο τον βέλτιστο έλεγχο του ρεύματος, όσο και την μερική εξάλειψη των αρμονικών από την ζητούμενη μορφή ημιτόνου. Οι συνηθέστερες κατηγορίες εξ' αυτών είναι:

- Μονοπαλμική PWM (Single PWM)
- Πολυπαλμική PWM (Multiple PWM)
- PWM ημιτόνου (SPWM)
- PWM τροποποιημένου ημιτόνου (MSPWM)

Συνοπτικά, στην μονοπαλμική διαμόρφωση παλμών, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου υπάρχει ένας μόνο παλμός για κάθε ένα από τα διακοπτικά στοιχεία σε αντίθεση με την πολυπαλμική PWM, στην οποία ένα σύνολο παλμών, μεγαλύτερο του ενός, παράγεται ανάμεσα σε κάθε περίοδο. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις το εύρος καθενός από τους παλμούς παραμένει ίδιο. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση της PWM ημιτόνου, καθένας από τους παλμούς έχει μεταβλητό εύρος που αντιστοιχεί στο πλάτος του σήματος ημιτόνου. Στο ίδιο μήκος κύματος βρίσκεται και η διαμόρφωση παλμών τροποποιημένου ημιτόνου, με την κύρια διαφορά από την προηγούμενη κατηγορία να έγκειται στο γεγονός ότι η μορφή ημιτόνου βρίσκει εφαρμογή μόνο στις αρχικές και τελικές 60 μοίρες της κάθε ημιπεριόδου .

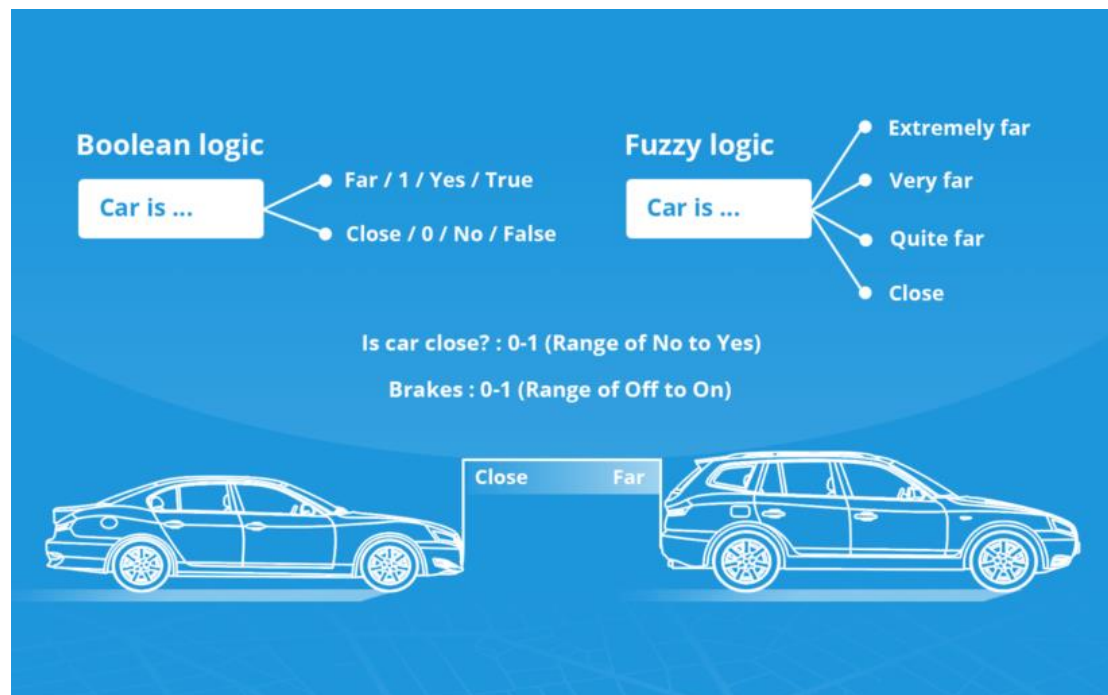
3.6.4 Τριφασικοί αντιστροφείς

Στους αντιστροφείς 3 φάσεων συνηθίζεται η χρήση τριών μονοφασικών αντιστροφέων, οι οποίοι έχουν ένα κοινό σημείο εισόδου, καθώς στην έξοδο τους τροφοδοτούν ένα τριφασικό φορτίο. Η επιμέρους σύνδεση των μονοφασικών αντιστροφών είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί είτε με συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας ή με συνδεσμολογία ημι-γέφυρας, με την πρώτη επιλογή να προτιμάται περισσότερο [34].



Εικόνα 3.6.4: Κυκλωματικό ισοδύναμο τριφασικού αντιστροφέα με συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας

Κεφάλαιο 4^ο: Fuzzy Ελεγκτές



Εικόνα 4.1: Συγκριτικό παράδειγμα περιγραφής της ασαφής και δυαδικής λογικής σχετικά με την απόσταση που απέχουν δύο οχήματα. [35]

4.1 Ασαφής λογική

Στην καθημερινότητα, πολλές φορές χρησιμοποιούνται εκφράσεις και έννοιες ποσοτικού προσδιορισμού, συχνά ωστόσο η αποσαφήνιση τους καθίσταται δύσκολη διεργασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πρόταση «ο Γιώργος είναι ψηλός», στην οποία δε γίνεται αντιληπτό το ακριβές ύψος του Γιώργου, ωστόσο μπορούν να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα για το ύψος του. Βέβαια, η παραπάνω διατύπωση δεν είναι ασαφής εξαιτίας του ποσοτικού προσδιορισμού, αλλά εξαιτίας της αντίληψης του καθενός για τους ποσοτικούς προσδιορισμούς μεγεθών. Από την άλλη πλευρά, μια μηχανή δε μπορεί να διαχειριστεί λεκτικούς όρους με τη μορφή φυσικής γλώσσας, αλλά μονάχα μέσω της αναπαράστασης αριθμητικών τιμών και μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές λαμβάνουν μόνο οριακές τιμές καταστάσεων ενός φαινομένου (δηλαδή, 0 ή 1), με αποτέλεσμα να θυσιάζεται η ακρίβεια προς όφελος της σαφήνειας. Κάπως έτσι μπαίνει στο παιχνίδι η έννοια της ασαφούς λογικής (fuzzy logic), ως ένας διάυλος επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπου και μηχανής, που επιχειρεί να επιλύσει την ασάφεια της δίτιμης αριστοτέλειας λογικής, εισάγοντας την πλειότιμη λογική (multi-valued logic).

Η ασαφής λογική, η οποία επινοήθηκε από τον Lotfi Zadeh το 1965, αποτελεί μια επέκταση της κλασσικής λογικής και κύριο συστατικό στοιχείο της υπολογιστικής νοημοσύνης (computational intelligence) και κατ' επέκταση της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence). Χαρακτηρίζεται για τους μηχανισμούς προσεγγιστικού συλλογισμού (approximate reasoning) και εξαγωγής συμπερασμάτων (decision making), με τους οποίους προσφέρει μείωση πολυπλοκότητας σε πληθώρα συστημάτων. Όσον αφορά τον μηχανισμό του προσεγγιστικού συλλογισμού, αποτελεί μια απόπειρα προσομοίωσης της ανθρώπινης σκέψης και συμπερασμού, αφού η λειτουργία του ανθρώπινου νου είναι πολύ πιο σύνθετη από την συλλογή δεδομένων για την λήψη αποφάσεων και εξαγωγή συμπερασμάτων. Αντιθέτως, στηρίζεται σε ένα σύνολο προσωπικών κριτηρίων και αντιλήψεων και έπειτα δημιουργείται μέσω προσεγγιστικών διατάξεων.

Ουσιαστικά, η ασαφής λογική υποστηρίζει ότι η διατύπωση μιας πρότασης εμπεριέχει το βαθμό αλήθειας σε μια αληθή πρόταση και δεν περιορίζεται στο διαχωρισμό αληθής ή ψευδής. Δηλαδή, η ασαφής λογική ξεφεύγει από το λογικό μηδέν ή ένα της κλασσικής λογικής και παρέχει έναν τρόπο ποσοτικοποίησης του διαστήματος που μεσολαβεί από το μηδέν ως την μονάδα. Με τον τρόπο αυτόν καταφέρνει να προσεγγίσει καλύτερα την ανθρώπινη λογική, που δεν διαθέτει τόσο ακριβή όρια μεταξύ αληθούς και ψευδούς [36].

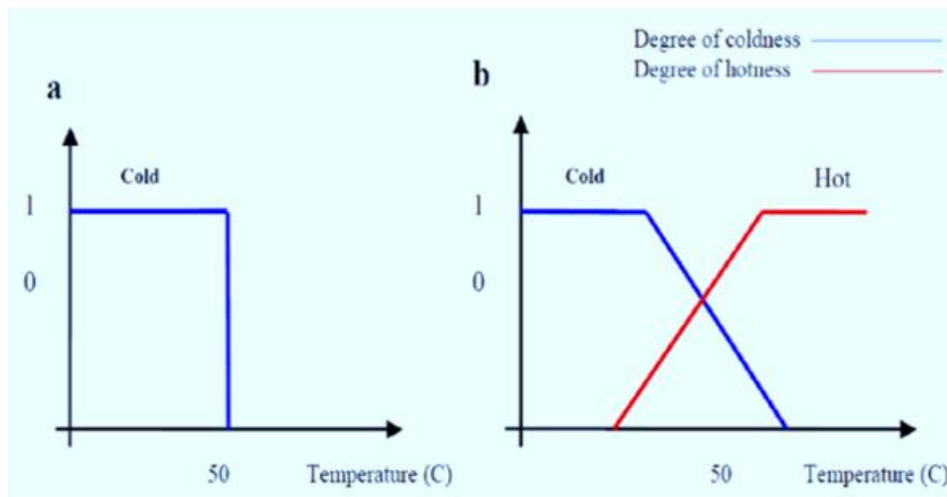
4.2 Ασαφή σύνολα και συναρτήσεις συμμετοχής

Ένα ασαφές σύνολο αποτελείται από ένα σύνολο τιμών που ανήκει σε αυτό, με την ιδιαιτερότητα ότι κάθε στοιχείο του μπορεί να κατέχει διαφορετικό βαθμό συμμετοχής στο σύνολο αυτό. Θεωρητικά, ο βαθμός συμμετοχής εμπεριέχεται και στα κλασσικά σύνολα, με την έννοια ότι ένα στοιχείο μπορεί είτε να «συμμετέχει», είτε να «μη συμμετέχει» στο σύνολο. Εντούτοις, στα ασαφή σύνολα υπάρχει μια παραπάνω ευελιξία κατά την μετάβαση από το απόλυτο μηδέν στο απόλυτο ένα της δίτιμης λογικής. Η ευελιξία αυτή βασίζεται στη συνάρτηση συμμετοχής (membership function), η οποία ορίζεται ως η συμμετοχή ενός στοιχείου x στο ασαφές σύνολο A και συμβολίζεται με $\mu_A(x)$. Ο όρος $\mu_A(x)$ καλείται και βαθμός συμμετοχής (membership degree) του στοιχείου x στο σύνολο A , υποδηλώνοντας το κατά πόσο ανήκει το x στο A . Τέλος, επισημαίνεται ότι η συνάρτηση συμμετοχής μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή στο διάστημα $[0,1]$ [37].

Για παράδειγμα, έστω ότι θεωρούμε το σύνολο «υψηλή ταχύτητα» σχετικά με την ταχύτητα ενός πλήθους οχημάτων και καθορίζουμε ότι οι ταχύτητες από 90km/h ως 130km/h ανήκουν στο σύνολο αυτό κατά 100%. Αν υποθέσουμε ότι στο παράδειγμα μας υπάρχουν δύο οχήματα, τα οποία κινούνται με ταχύτητα 89km/h και 91km/h αντίστοιχα, τότε συμβαίνει το εξής παράδοξο: Όσο το δεύτερο όχημα κινείται με 91km/h και παίρνει τιμή ίση με 1 στο διάστημα $[0,1]$, αφού ανταποκρίνεται πλήρως στις τιμές της «υψηλής ταχύτητας», το πρώτο όχημα που κινείται με 89km/h δε θεωρείται ότι κινείται με υψηλή ταχύτητα (δηλαδή παίρνει τιμή ίση με 0), παρά την αμελητέα διαφορά στις ταχύτητες τους. Εν προκειμένω, παρατηρούμε πόσο απότομα χάνεται η έννοια της υψηλής ταχύτητας σε ένα κλασικό σύνολο.

Σε αντιδιαστολή, εάν εξαρχής είχε θεωρηθεί το ασαφές σύνολο «υψηλή ταχύτητα», τότε θα είχαμε μια ομαλή μετάβαση ανάμεσα στις δύο ταχύτητες, μιας και οι δύο θα είχαν εκφραστεί με βάση τη συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου της «υψηλής ταχύτητας». Με τον τρόπο αυτό, θα συμπεραίναμε ότι όλα τα οχήματα κινούνται με υψηλή ταχύτητα αλλά όχι στον ίδιο βαθμό.

Ένα ακόμη πιο απλοϊκό σενάριο που συναντάμε στην καθημερινότητα είναι το παράδειγμα του ζεστού και του κρύου νερού μίας βρύσης. Με ένα κλασικό σύνολο (crisp set) θα είχε κανείς είτε μόνο ζεστό νερό είτε μόνο κρύο νερό, ενώ σε ένα ασαφές σύνολο μπορούμε να ρυθμίσουμε το βαθμό συμμετοχής του καθενός.



Εικόνα 4.2.1: Το κλασικό σύνολο με την απότομη μετάβαση από το κρύο στο ζεστό του σχήματος (a) και το ασαφές σύνολο με την ομαλή μετάβαση του κρύου στο ζεστό του σχήματος (b) [38]

Κάθε ασαφές σύνολο αναπαρίσταται μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής, οι οποίες μπορούν να έχουν πολλές διαφορετικές μορφές. Διακρίνονται σε τριγωνική (triangular), τραπεζοειδή (trapezoidal), καμπανοειδή (gbell), γκαουσιανή (gaussian), σιγμοειδής (sigmoidal) κ.α. Δύο εξ' αυτών, η τριγωνική και η τραπεζοειδής, είναι οι

πιο γνωστές και αυτές που επρόκειτο να αναλυθούν περαιτέρω. Μάλιστα, η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής είναι αυτή που χρησιμοποιείται κατά την δημιουργία του ασαφούς ελεγκτή (Κεφάλαιο 6^ο) στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής

Η τριγωνική μορφή περιγράφεται από ένα σύνολο 3 παραμέτρων, a , b , c , οι οποίες αναπαριστούν καθεμιά από τις κορυφές του τριγώνου. Μαθηματικά, για την τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής ισχύει ότι:

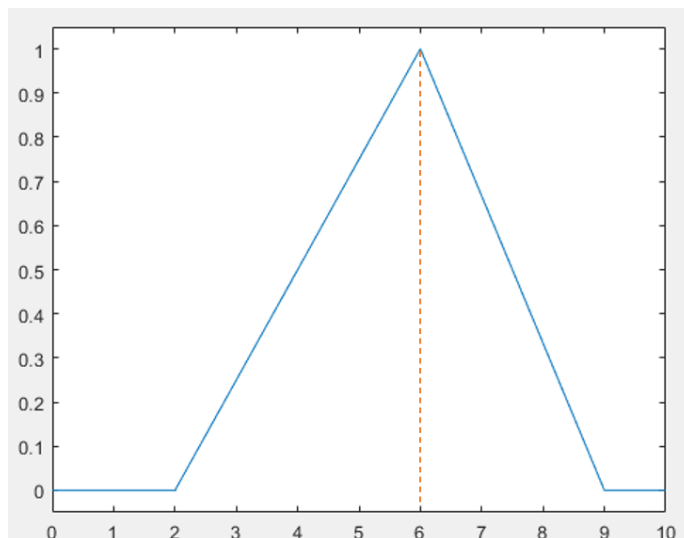
$$triang_{MF(x;a,b,c)} = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x < c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

Η τριγωνική συνάρτηση προκειμένου να μοντελοποιηθεί στο περιβάλλον του MATLAB διατυπώνεται με την εξής μορφή:

$$tri_MF(x; a, b, c) = \max \left\{ \min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right\}$$

Δηλαδή, όπως απεικονίζεται και στην παραπάνω σχέση, ο βαθμός συμμετοχής μ_{triang} υπολογίζεται σύμφωνα με τον μέγιστο αριθμό ανάμεσα στο μηδέν και της ελάχιστης τιμής μεταξύ της εισόδου x και των παραμέτρων του τριγώνου a, b, c .

Για παράδειγμα, έστω τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής με κορυφές τριγώνου: $a = 0.2$, $b = 0.6$, $c = 0.9$. Σχηματικά, θα αναπαρίσταται ως εξής:



Εικόνα 4.2.2: Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής για τις συγκεκριμένες τιμές των κορυφών του τριγώνου

Τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής

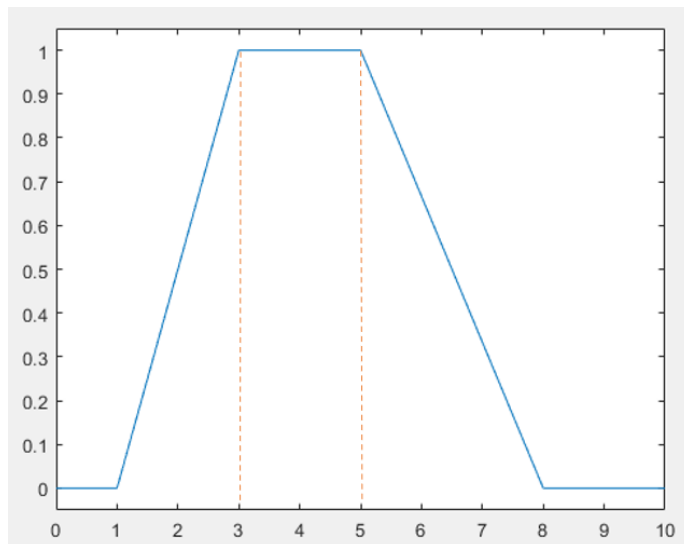
Η τραπεζοειδής μορφή διαμορφώνεται μέσω ενός συνόλου 4 παραμέτρων a,b,c,d, που οριοθετούν τις κορυφές το τραπέζιου. Με τον τρόπο αυτό, σκιαγραφούνται τόσο η ενεργός περιοχή όσο και ο πυρήνας της τραπεζοειδούς συνάρτησης. Η μαθηματική έκφραση της δίνεται από τα κλάσματα των κορυφών της, όπως συνέβαινε και στην περίπτωση της τριγωνικής μορφής. Αναλυτικά, ισχύει:

$$\text{trap}_{MF(x;a,b,c,d)} = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x < d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$

Η τραπεζοειδής συνάρτηση προκειμένου να υλοποιηθεί στο περιβάλλον του MATLAB διατυπώνεται με την εξής μορφή:

$$\text{trap_MF}(x; a, b, c, d) = \max \left\{ \min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right\}$$

Για παράδειγμα, έστω τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής με κορυφές τριγώνου: $a = 0.1$, $b = 0.3$, $c = 0.5$, $d = 0.8$. Σχηματικά, θα αναπαρίσταται ως εξής:



Εικόνα 4.2.3: Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής για τις συγκεκριμένες τιμές των κορυφών του τραπέζιου.

Στο σημείο αυτό, να σημειωθεί ότι η τραπεζοειδής συνάρτηση χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη πολυπλοκότητα υπολογισμού, καθώς υλοποιείται μέσω πολυωνύμων 1^{ης} τάξεως. Άμεση συνέπεια του φαινομένου, η χρήση της σε εφαρμογές ασαφών συστημάτων πραγματικού χρόνου (real-time).

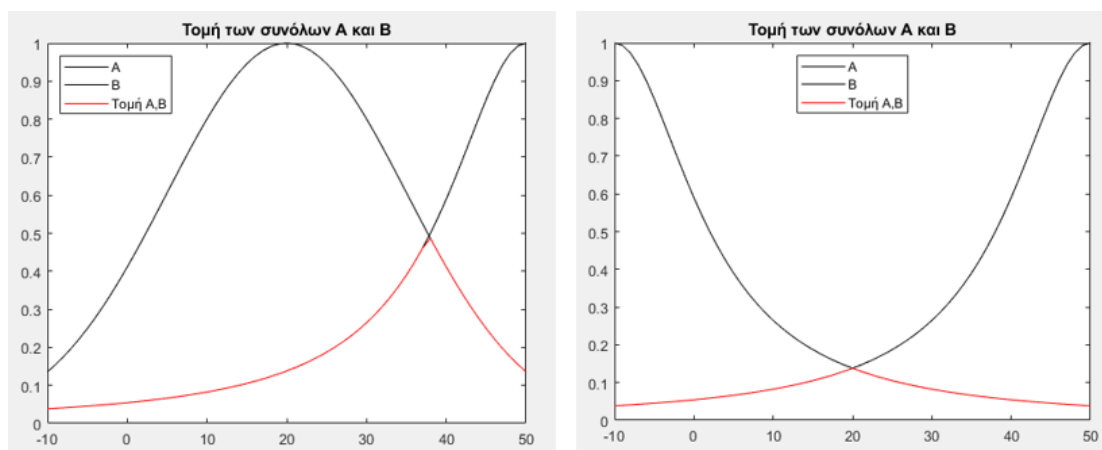
4.3 Ασαφείς πράξεις

Η ασαφής λογική πλαισιώνεται από ένα σύνολο πράξεων, οι οποίες συνιστούν απαραίτητα εργαλεία για την εφαρμογή και χρήση ασαφών συστημάτων. Οι πράξεις αυτές είναι η τομή (intersection), η ένωση (union), το αλγεβρικό άθροισμα (probor), το γινόμενο (product) και το συμπλήρωμα (complement). Πιο συγκεκριμένα, καθεμία διατυπώνονται παρακάτω με την μαθηματική της έκφραση:

- ❖ **Τομή** δύο ασαφών συνόλων A και B που ορίζονται στο ίδιο πεδίο ορισμού M δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \forall x \in M$$

Να σημειωθεί ότι, η έννοια της τομής μεταξύ δύο ασαφών συνόλων είναι το ισοδύναμο της λογικής πράξης *AND* στην ασαφή λογική. Παρακάτω απεικονίζεται στιγμιότυπο εκτέλεσης της εν λόγω πράξης στο περιβάλλον του Matlab.

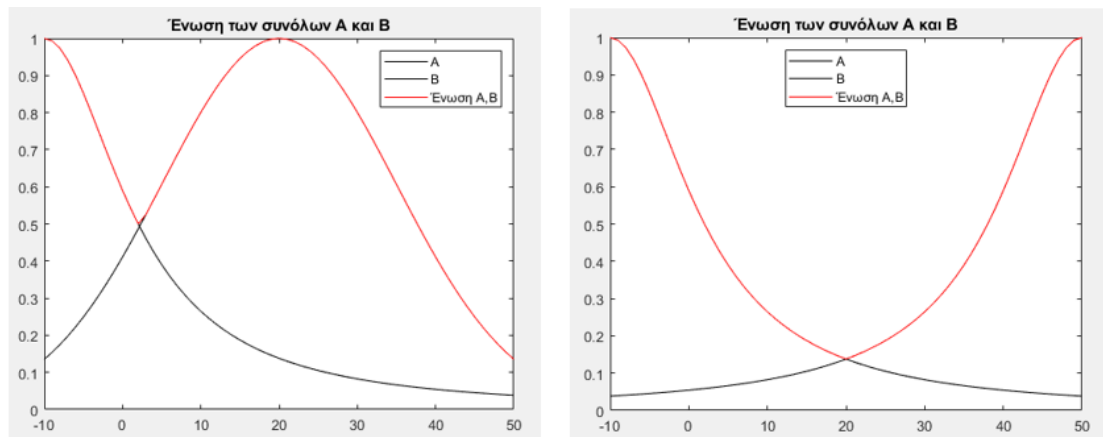


Εικόνα 4.3.1: Διαγραμματική απεικόνιση τομής συνόλων A και B

- ❖ **Ένωση** δύο ασαφών συνόλων A και B που ορίζονται στο ίδιο πεδίο ορισμού M εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \forall x \in M$$

Η έννοια της ένωσης μεταξύ δύο ασαφών συνόλων συσχετίζεται άμεσα με τη λογική πράξη *OR* στην ασαφή λογική. Παρακάτω απεικονίζεται στιγμιότυπο εκτέλεσης της εν λόγω πράξης στο περιβάλλον του Matlab.

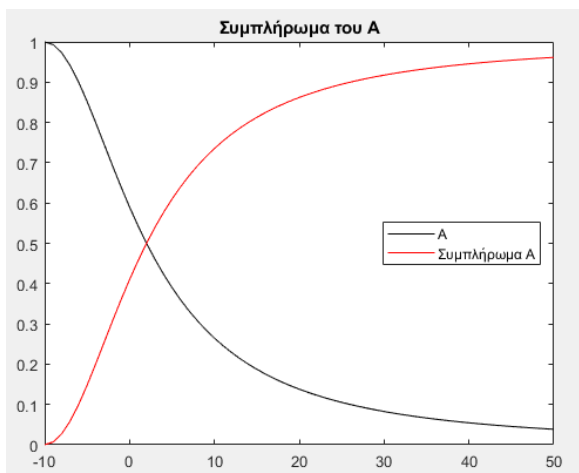


Εικόνα 4.3.2: Διαγραμματική απεικόνιση ένωσης συνόλων A και B

- ❖ **Συμπλήρωμα** ενός ασαφούς συνόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad \forall x \in M$$

Να σημειωθεί ότι, η έννοια του συμπληρώματος ενός ασαφούς συνόλου είναι το αντίστοιχο λογικό *NOT* στην ασαφή λογική. Παρακάτω απεικονίζεται στιγμιότυπο εκτέλεσης της εν λόγω πράξης στο περιβάλλον του Matlab.



Εικόνα 4.3.3: Διαγραμματική απεικόνιση συμπληρώματος συνόλου A

- ❖ **Αλγεβρικό άθροισμα** δύο ασαφών συνόλων A και B που ορίζονται στο ίδιο πεδίο ορισμού M δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_{A+B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), \quad \forall x \in M$$

- ❖ **Γινόμενο** δύο ασαφών συνόλων A και B που ορίζονται στο ίδιο πεδίο ορισμού M προκύπτει μέσω της σχέσης:

$$\mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), \quad \forall x \in M$$

- ❖ **Βαθμός περιεκτικότητας-μέτρο γειτονιάς**, όπου το ασαφές σύνολο A θεωρείται υποσύνολο ενός ασαφούς συνόλου B, όταν ισχύει:

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x), \forall x \in M \text{ και}$$

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x), \forall x \in M$$

Ουσιαστικά, ο παραπάνω ορισμός δηλώνει ότι το ασαφές σύνολο A περιέχεται εξ'ολοκλήρου στο ασαφές σύνολο B. Ωστόσο, οι ασαφές σχέσεις δεν είναι τόσο αυστηρές, αφού συχνά το σύνολο A δε θα επικαλύπτεται πλήρως από το σύνολο B, αλλά κατά ένα βαθμό επικάλυψης (overlapping). Αυτός ο βαθμός επικάλυψης πρακτικά ενσαρκώνεται μέσω του μέτρου γειτονιάς (subsethood measure).

$$S(A, B) = \text{degree}(A \subseteq B) = \frac{|A \cap B|}{|A|}$$

Στο σημείο αυτό, να διευκρινιστεί ότι το μέτρο γειτονιάς μπορεί να εκφράζει όχι μόνο το ποσοστό επικάλυψης του συνόλου A στο B, αλλά και του συνόλου B στο A.

$$S(B, A) = \text{degree}(B \subseteq A) = \frac{|A \cap B|}{|B|}$$

Ισότητα ασαφών συνόλων-μέτρο ομοιότητας, όπου τα ασαφή σύνολα A,B χαρακτηρίζονται ίσα όταν ισχύει η σχέση:

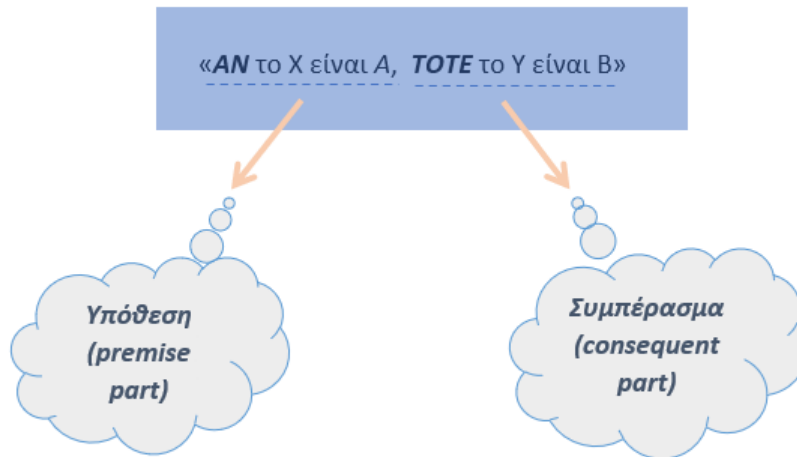
$$\mu_A(x) = \mu_B(x), \forall x \in M$$

Βέβαια, όπως και προηγουμένως στην περίπτωση των υποσυνόλων, έτσι και εδώ η έννοια της ισότητας δεν «ταιριάζει» πλήρως στην ασαφή λογική, αφού η αυστηρότητα της σχέσης δεν επιτρέπει περαιτέρω συγκρίσεις μεταξύ των δύο συνόλων, αρκείται στο αν αυτά είναι ίσα ή άνισα. Κατά συνέπεια, η ασαφής λογική εισάγει τη σχέση του μέτρου ομοιότητας για να ποσοτικοποιήσει το βαθμό ισότητας των συνόλων.

$$E(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = E(B, A)$$

4.4 Ασαφείς κανόνες

Οι ασαφείς κανόνες (fuzzy rules) αποτελούν τη συσχέτιση των δεδομένων εισόδου με τα δεδομένα εξόδου και πάντοτε αντικατοπτρίζουν τη γνώση που διαθέτουμε για το προκείμενο σύστημα. Ουσιαστικά, γεφυρώνει δύο ή περισσότερες ασαφείς προτάσεις. Κάθε ασαφής κανόνας διαχωρίζεται σε δύο κύρια μέρη: το τμήμα της υπόθεσης και το τμήμα του συμπεράσματος ή απόφασης. Η απλούστερη μορφή ενός κανόνα είναι:



Εικόνα 4.4.1: Η απλούστερη μορφή ασαφούς κανόνα που επιστρέφει ως συμπέρασμα ένα ασαφές σύνολο. Ο κανόνας αυτής της μορφής ονομάζεται κανόνας τύπου *mamdani*.

Όπου: A,B ασαφή σύνολα και X,Y οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Η μεταβλητή X είναι το δεδομένο εισόδου που πρόκειται να ασαφοποιηθεί (fuzzification), ώστε να εμπλουτιστεί με ένα βαθμό συμμετοχής. Η δε μεταβλητή εξόδου είναι η τιμή σε ασαφή μορφή, που προκύπτει μέσω της εφαρμογής του κανόνα και του μηχανισμού συμπεράσματος (inference engine). Εν συνεχεία, αφού η τιμή εξόδου εξαχθεί ως συμπέρασμα, ακολουθεί η διαδικασία από-ασαφοποίησης της (defuzzification), προκειμένου να προκύψει μια σαφής τιμή (crisp value). Τέλος, η τιμή αυτή θα είναι η τελική τιμή, η οποία θα μπορέσει να επεξεργαστεί το ανάλογο υπολογιστικό σύστημα.

Μερικά απλοϊκά παραδείγματα αποτυπώνονται παρακάτω:

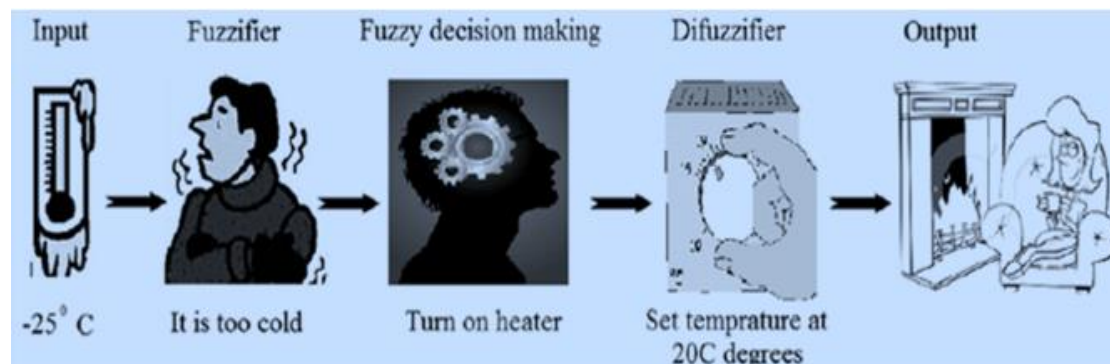
- **Παράδειγμα 1^ο:** «*EAN* η θερμοκρασία του χώρου είναι υψηλή, *TOTE* η μονάδα κλιματισμού να λειτουργεί σε υψηλό επίπεδο»
- **Παράδειγμα 2^ο:** «*EAN* η ταχύτητα του αυτοκινήτου είναι μεγάλη, *TOTE* το σύστημα πέδησης να δεχθεί μεγάλη πίεση»

Πέρα από την αρχική μορφή του ασαφούς κανόνα που αποδόθηκε παραπάνω (τύπου *mamdani*), υπάρχουν και άλλες εξισώσεις με τις οποίες συναντάται ένας ασαφής κανόνας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, η εξίσωση των Sugeno-Takagi (T-S style) με την ακόλουθη μορφή:

«*EAN* το X είναι A, *TOTE* το Y είναι C»

Όπου ισχύει ότι και νωρίτερα με την διαφορά ότι η μεταβλητή C αναπαριστά μια crisp τιμή και όχι ένα ασαφές σύνολο που πρέπει να από-ασαφοποιηθεί.

4.5 Ασαφής συλλογιστική



Εικόνα 4.5.1: Σχηματική αναπαράσταση της ασαφούς συλλογιστικής μέσω ενός παραδείγματος ασαφούς συστήματος για τον έλεγχο της θερμοκρασίας δωματίου. [39]

Μετά την ανάλυση της δομής ενός ασαφούς κανόνα, πρέπει να διευκρινιστούν τα κύρια στάδια της ασαφούς συλλογιστικής. Καθεμιά από τις φάσεις αυτές είναι απαραίτητη, ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά συμπεράσματα μέσω των ασαφών κανόνων. Τα στάδια αυτά είναι:

1. *Ασαφοποίηση δεδομένων εισόδου*
2. *Κατασκευή κανόνων*
3. *Επεξεργασία κανόνων*
4. *Από-ασαφοποίηση*

Στα κεφάλαια που έπονται αναλύεται καθένα από τα επιμέρους στάδια.

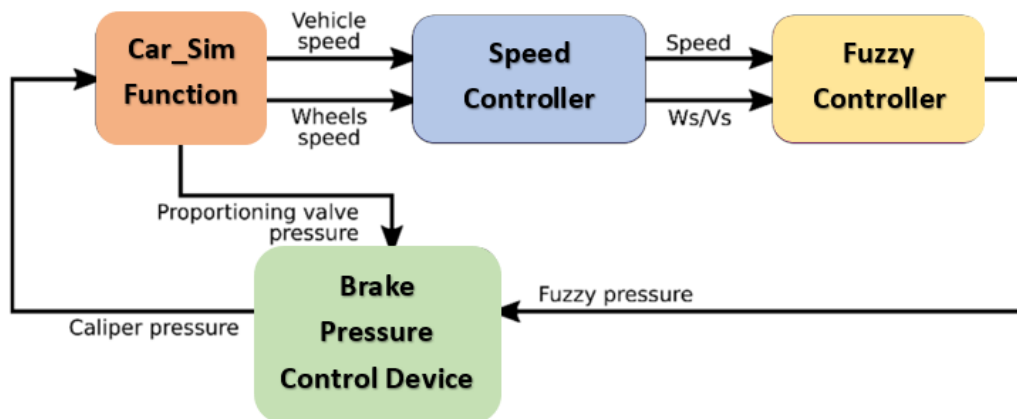
4.5.1 Ασαφοποίηση δεδομένων εισόδου

Το πρώτο στάδιο της ασαφούς συλλογιστικής είναι η διαδικασία της ασαφοποίησης των δεδομένων. Αρχικά, οι τιμές των βασικών μεταβλητών πρέπει να αποδοθούν σε λεκτικούς όρους μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής, οι οποίες όπως προειπώθηκε ορίζονται στο διάστημα $[0,1]$. Για παράδειγμα, αν θεωρηθεί η λεκτική μεταβλητή «η ταχύτητα του οχήματος», τότε με τη βοήθεια της συνάρτησης συμμετοχής, αυτή θα διαχωρισθεί στους λεκτικούς όρους «πολύ χαμηλή», «χαμηλή», «μεσαία» «υψηλή» και «πολύ υψηλή» ταχύτητα.

Κατά τη διαδικασία, οι ασαφείς αριθμοί θα λάβουν οπωσδήποτε τιμή ίση με μονάδα, είτε σε κάποιο σημείο είτε κατά μήκος ενός διαστήματος. Παράλληλα, οι αριθμοί από την δεξιά πλευρά του τριγώνου (ή τραπεζίου κ.λπ.) θα μειώνονται, ενόσω από την αριστερή θα αυξάνονται [40].

4.5.2 Κατασκευή κανόνων

Οι κανόνες αποτελούν τον συνδυαστικό κρίκο μεταξύ δύο (ή περισσότερων) προτάσεων, δηλαδή την πρόταση της υπόθεσης (**EAN** η ταχύτητα είναι X [X =πολύ χαμηλή/χαμηλή/μεσαία/υψηλή/πολύ υψηλή]) με την πρόταση του συμπεράσματος (**TOTE** το σύστημα πέδησης θα επέμβει κατά Y βαθμό [$Y=0...100\%$]). Με τον τρόπο αυτό, οι κανόνες εμπεριέχουν ένα ποσοστό βεβαιότητας, το οποίο εκφράζει την πιθανότητα εκπλήρωσής τους. Το ποσοστό αυτό προκύπτει μέσα από εμπειρικές γνώσεις για το εκάστοτε σύστημα και το εν λόγω επιστημονικό πεδίο.



Εικόνα 4.5.2: Το δομικό διάγραμμα ενός ασαφούς συστήματος με τον fuzzy ελεγκτή να λαμβάνει υπόψην του την ταχύτητα του οχήματος και σύμφωνα με το σύνολο κανόνων που διαθέτει γι' αυτή, να επεμβαίνει στην ανάδραση του συστήματος, εν προκειμένω το σύστημα πέδησης (συγκεκριμένα, η πίεση που ασκείται στα φρένα του οχήματος).

Γενικότερα, το πλήθος των κανόνων που αναπτύσσονται αναπαριστά τις γνώσεις των ειδικών επί του θέματος, οπότε είναι αντιληπτό ότι κάθε σύστημα μπορεί να στελεχώνεται από ένα διαφορετικό σύνολο. Στο παράδειγμα μας, ορισμένοι ενδεικτικοί κανόνες θα μπορούσαν να διατυπωθούν ως εξής:

EAN η ταχύτητα του οχήματος είναι χαμηλή, **TOTE** το σύστημα πέδησης θα επέμβει κατά 25%.

EAN η ταχύτητα του οχήματος είναι μεσαία, **TOTE** το σύστημα πέδησης θα επέμβει κατά 50%.

EAN η ταχύτητα του οχήματος είναι υψηλή, **TOTE** το σύστημα πέδησης θα επέμβει κατά 75%.

4.5.3 Επεξεργασία κανόνων

Στην ασαφή συλλογιστική, μετά την ανάπτυξη των κανόνων του συστήματος, ακολουθεί το στάδιο της επεξεργασίας τους και εξαγωγής συμπερασμάτων (inference engine). Η διαδικασία αυτή συνίσταται σε τρία μέρη, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- **Συσσώρευση (aggregation):** Εδώ, πραγματοποιείται μια αξιολόγηση καθενός από τους κανόνες, ως προς την εκπλήρωση του. Συνήθως, η αξιολόγηση υλοποιείται βάσει του λογικού AND (πράξη της τομής). Άλλοτε, μπορεί να γίνει χρήση και του λογικού OR (πράξη της ένωσης), ο τελεστής γ (Gamma), το αλγεβρικό γινόμενο κ.α. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή του τελεστή εξαρτάται από το ίδιο το σύστημα και το επιθυμητό συμπέρασμα.
- **Σημαντικότητα (implication):** Στο σημείο αυτό, προσμετράται η συνολική βεβαιότητα των κανόνων, όπως προκύπτει από την επιμέρους αξιολόγηση καθενός απ' αυτούς. Η σημαντικότητα ως τιμή κυμαίνεται σε ένα διάστημα μεταξύ μηδέν και ένα. Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιείται ένα σύνολο συγκεκριμένων τελεστών (συνήθως η πράξη της τομής και του αλγεβρικού γινομένου), προκειμένου ο βαθμός εκπλήρωσης πάντοτε να ανήκει στο σύνολο $[0,1]$.
- **Συγκέντρωση (accumulation):** Πολλές φορές, μελετώντας ένα ασαφές σύνολο παρατηρείται το εξής φαινόμενο: Δύο ή περισσότεροι κανόνες καταλήγουν σε ίδιο συμπέρασμα, ωστόσο διαφέρουν ως προς το ποσοστό εκπλήρωσής τους. Έτσι, στο τελικό στάδιο της συγκέντρωσης, με την βοήθεια του τελεστή OR (άλλοτε χρησιμοποιούνται τόσο η πράξη της ένωσης, όσο και του αλγεβρικού γινομένου), τα ασαφή συστήματα καταφέρνουν να «κρατήσουν» από τον εν λόγω σύνολο κανόνων, αυτόν με τον υψηλότερο βαθμό εκπλήρωσης [36].

4.5.4 Από-ασαφοποίηση

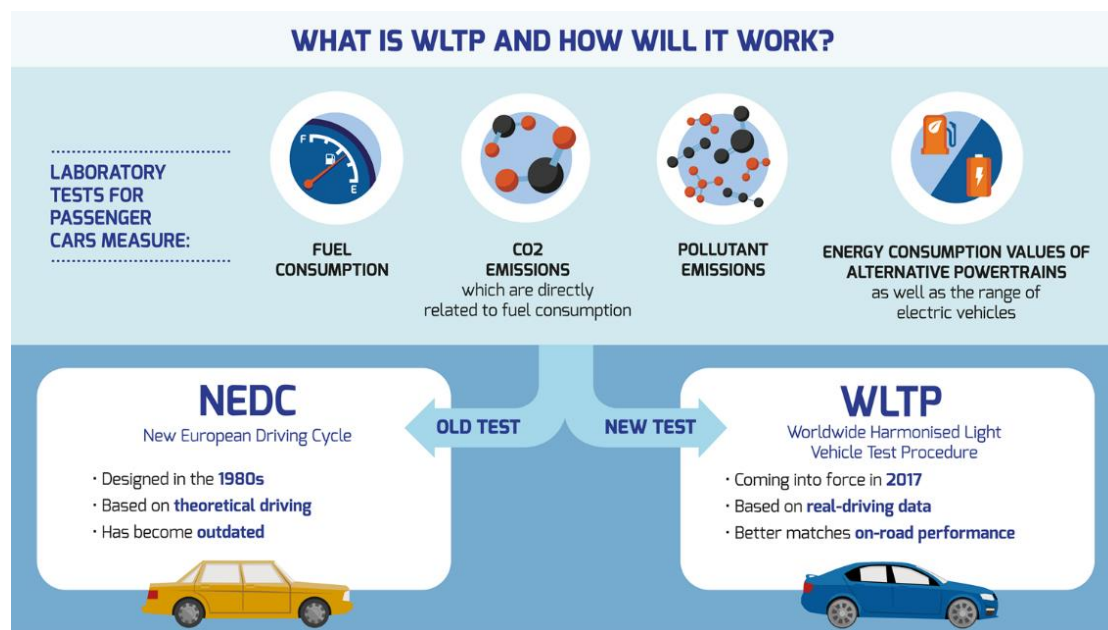
Η τελευταία ενέργεια της ασαφούς συλλογιστικής είναι η διαδικασία από-ασαφοποίησης των αριθμητικών δεδομένων που προκύπτουν από την επεξεργασία των κανόνων. Για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής απαιτείται η επιλογή μιας υπολογιστικής μεθόδου, οι οποίες μπορεί να είναι μία από τις παρακάτω:

- **Από-ασαφοποίηση κεντρικής τιμής (Centroid defuzzycation)**, κατά την οποία υπολογίζεται το κέντρο βάρους της κατανομής του ασαφούς συνόλου της εξόδου.

- **Από-ασαφοποίηση μέσου όρου εκ των μεγίστων** (Mean of maxima), όπου προσμετράται ο μέσος όρος των τιμών της εξόδου, οι οποίες κατέχουν τον υψηλότερο βαθμό συμμετοχής.
- **Από-ασαφοποίηση μικρότερου εκ των μεγίστων** (Smallest of maxima), κατά την οποία υπολογίζεται η τιμή εξόδου με το χαμηλότερο βαθμό συμμετοχής από το σύνολο των μέγιστων τιμών εξόδου.
- **Από-ασαφοποίηση μεγαλύτερου εκ των μεγίστων** (Largest of maxima), όπου προσμετράται η τιμή εξόδου με τον υψηλότερο βαθμό συμμετοχής από το σύνολο των μέγιστων τιμών εξόδου.

Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι η μέθοδος της από-ασαφοποίησης της κεντρικής τιμής χαρακτηρίζεται από το μικρότερο σφάλμα συγκριτικά με τις λοιπές μεθόδους υπολογισμού. Κατά συνέπεια, η προκειμένη μέθοδος συνηθίζεται να χρησιμοποιείται στη συντριπτική πλειοψηφία των ασαφών συστημάτων [37].

Κεφάλαιο 5^ο: Χρήση Πρωτοκόλλου WLTP και Προσδιορισμός Ασκούμενων Δυνάμεων



Εικόνα 5.1: Συγκριτικό μεταξύ των προτύπων NEDC και WLTP [41]

5.1 Πρότυπο WLTP

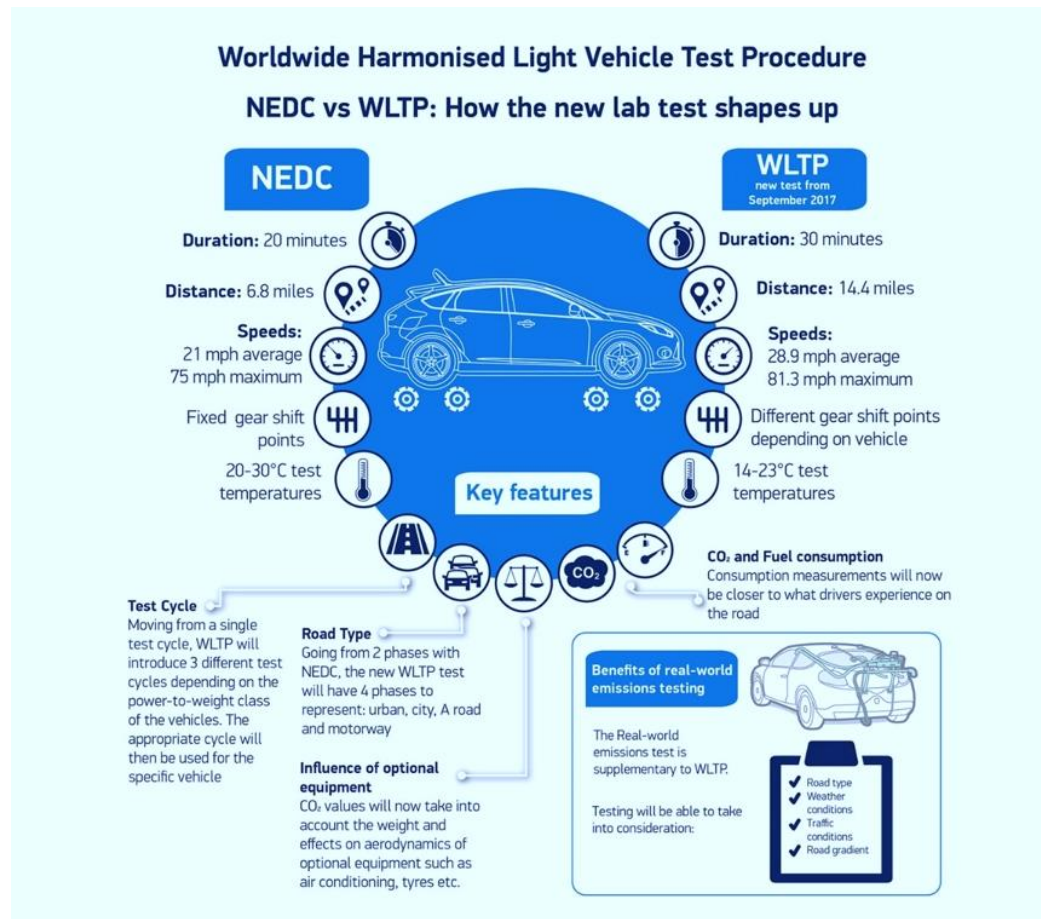
Το πρότυπο WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure - Παγκοσμίως Εναρμονισμένη Διαδικασία Δοκιμής Ελαφρών Οχημάτων) είναι ένα παγκόσμιο εναρμονισμένο πρότυπο για τον προσδιορισμό των επιπέδων CO₂ και λοιπών ρύπων, καθώς και την κατανάλωση καυσίμου στα ελαφρά οχήματα υπό τυποποιημένες συνθήκες. Η νέα αυτή κανονιστική διαδικασία ήρθε να αντικαταστήσει το προηγούμενο πρωτόκολλο, το γνωστό NEDC. Το NEDC (Νέο Ευρωπαϊκό Κύκλο Οδήγησης) τέθηκε σε ισχύ το από το 1992 και παρέμεινε ως τα τέλη του 2018, όταν και από την 1^η Σεπτεμβρίου του 2018 όλα τα νέα μοντέλα άρχισαν να λαμβάνουν έγκριση τύπου σύμφωνα με το πρότυπο WLTP.

Το WLTP βασίζεται σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης και στοχεύει στην ανάπτυξη και συλλογή δεδομένων που αντιπροσωπεύουν σε μεγαλύτερο βαθμό την καθημερινή χρήση ενός οχήματος. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι παρέχει εργαστηριακές τιμές κατανάλωσης και εκπομπών ρύπων πολύ πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Παράλληλα, το νέο πρότυπο, πέρα από τα όρια των κρατών-μέλη της ΕΕ, έχει διεισδύσει σε παγκόσμιο επίπεδο. Αναλυτικότερα, κάθε ελαφρύ όχημα που

ταξινομείται στις αγορές της Ινδίας, Νότιας Κορέας και Ιαπωνίας συμμορφώνεται με το πρωτόκολλο WLTP. Βέβαια, στις χώρες αυτές το πρότυπο εφαρμόζεται μερικώς, για παράδειγμα στην Ιαπωνία εφαρμόζεται χωρίς «εξαιρετικά υψηλή» φάση κύκλου δοκιμών. Παράλληλα, στις χώρες εκτός ΕΕ έρχεται να προστεθεί και η Κίνα, η οποία εφαρμόζει το πρωτόκολλο WLTP μόνο για τις εκπομπές ρύπων CO₂, ενώ για την κατανάλωση καυσίμου εξακολουθεί να βασίζεται στο πρωτόκολλο NEDC. Επιπλέον, δεν είναι λίγες οι χώρες που είναι υποψήφιες προς ένταξη στο νέο κύκλο δοκιμών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Τουρκία (όπου το WLTP ισχύει μόνο για εισαγόμενα οχήματα, ενώ για οχήματα εγχώριας παραγωγής ισχύει το NEDC), και το Ισραήλ.

Όσον αφορά την περίπτωση της Ελλάδας, η χρονιά του 2020 φαίνεται να ήταν η τελευταία μεταβατική χρονιά από τον παλιό κύκλο μετρήσεων στον νέο. Μέχρι πρότινος (31/12/2020), χρησιμοποιούσε το νέο πρωτόκολλο για την καταγραφή της κατανάλωσης των οχημάτων, αλλά όχι και για τις εκπομπές ρύπων CO₂, για τις οποίες βασίζεται στον προκάτοχο NEDC. Ωστόσο, από τη 1/1/2021 η Ελλάδα θα είναι ένα από τα κράτη της ΕΕ που θα συμμορφώνεται πλήρως με τον νέο πρότυπο [42].



Εικόνα 5.2.1: Επιμέρους διαφορές ανάμεσα σε NEDC και WLTP [43]

Διαφοροποίηση προτύπων NEDC και WLTP

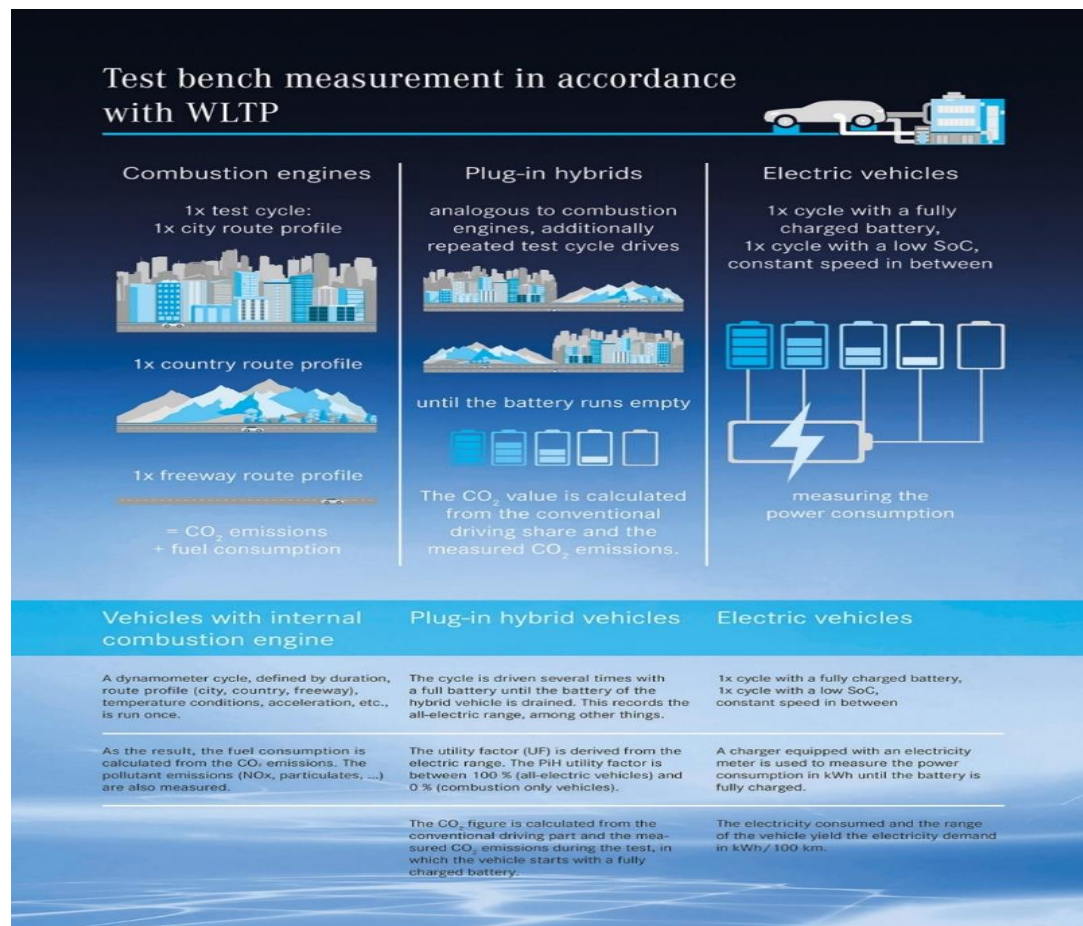
Το NEDC ήταν το πρότυπο που καθιερώθηκε στη δεκαετία του 1980 με σκοπό την προσομοίωση καταστάσεων αστικής οδήγησης ενός οχήματος. Ωστόσο, το 1992 ανανεώθηκε προκειμένου να περιλαμβάνει εκτός πόλεως διαδρομές με στόχο τη μεγαλύτερη ακρίβεια και εγκυρότητα της διαδικασίας. Αργότερα, το 1997 στο πρότυπο NEDC προστέθηκε και ένας κύκλος μέτρησης των εκπομπών CO₂. Σήμερα, το πρότυπο NEDC θεωρείται μη αντιπροσωπευτικό των σύγχρονων οδηγικών συνθηκών και από το 2017 και έπειτα ξεκίνησε η σταδιακή αντικατάστασή του.

Το πρότυπο WLTP αναπτύχθηκε σύμφωνα με δεδομένα διαδρομής που βασίστηκαν σε μια παγκόσμια βάση δεδομένων και καταφέρνει να αναπαραστήσει περισσότερο τον σύγχρονο τρόπο οδήγησης. Στο πλαίσιο αυτό, κατέχει πιο δυναμικό προφίλ οδήγησης, αφού περιλαμβάνει ένα μεγαλύτερο σύνολο επιταχύνσεων και πεδησεων μεταβαλλόμενης έντασης. Σε σύγκριση με τον προκάτοχο του, το WLTP διεξάγεται σε συνολικό χρόνο 30 λεπτών, εν αντιθέσει των 20 λεπτών του NEDC.

Άλλη μια μεγάλη διαφοροποίηση ανάμεσα στους δύο κύκλους είναι ότι 2 φάσεις του κύκλου NEDC για οδήγηση εντός πόλης κατά 66% και εκτός πόλης κατά 34%, αντικαταστάθηκαν από ένα σύνολο 4 φάσεων που αντιπροσωπεύουν οδήγηση σε αστικό κύκλο κατά 52% και εκτός πόλεως κατά 48%. Πιο συγκεκριμένα, ο WLTP ορίζει τα 4 διαφορετικά επίπεδα οδήγησης, ως Low (έως 56,5 χλμ./ώρα) Medium (έως 76,6 χλμ./ώρα), High (έως 97,4 χλμ./ώρα) και Extra High (έως 131,3 χλμ./ώρα). Παράλληλα, η μέση και μέγιστη ταχύτητα αυξήθηκαν από 34 χλμ./ώρα και 120 χλμ./ώρα του NEDC, σε 46,5 χλμ./ώρα και 131,3 χλμ./ώρα αντίστοιχα. Η χιλιομετρική απόσταση επίσης αυξήθηκε από τα 11 χιλιόμετρα που προβλεπόταν για τον παλιό κύκλο μετρήσεων σε 23,25 χιλιόμετρα.

Ένας ακόμη παράγοντας που προσδίδει ρεαλισμό στο πρωτόκολλο WLTP, είναι η έννοια του βάρους ενός οχήματος. Το νέο πρότυπο συμπεριέλαβε στους υπολογισμούς του, τον πρόσθετο εξοπλισμό που διαθέτει κάθε όχημα ανάλογα με το μοντέλο, την ώρα που το NEDC δεν λάμβανε την επίδραση αυτή ως μετρική αξιολόγησης. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι το στο παλαιό πρότυπο οι μετρήσεις λάμβαναν χώρα σε θερμοκρασίες μεταξύ 20° και 30°C, ενώ στο WLTP οι μετρήσεις της κατανάλωσης του οχήματος πραγματοποιούνται στους 23°C και η θερμοκρασία για τις μετρήσεις ρύπων ανέρχεται στους 14°C. Εν τέλει, να σημειωθεί ότι ο νέος κύκλος μετρήσεων αξιολογεί και άλλους βασικούς ρύπους εκτός του CO₂, όπως είναι το NO_x. Με τον τρόπο αυτόν, το πρωτόκολλο WLTP επιτυγχάνει την ενσωμάτωση μετρήσεων που ταιριάζουν

καλύτερα και σε υβριδικά/ηλεκτρικά οχήματα, αφού λαμβάνει υπόψιν του στοιχεία από τα διάφορα στάδια φόρτισης της μπαταρίας [42].



Εικόνα 5.2.2: Η διαφοροποίηση του νέου προτύπου γύρω από το μέτρηση ρύπων για συμβατικά, plug-in υβριδικά και αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα [43]

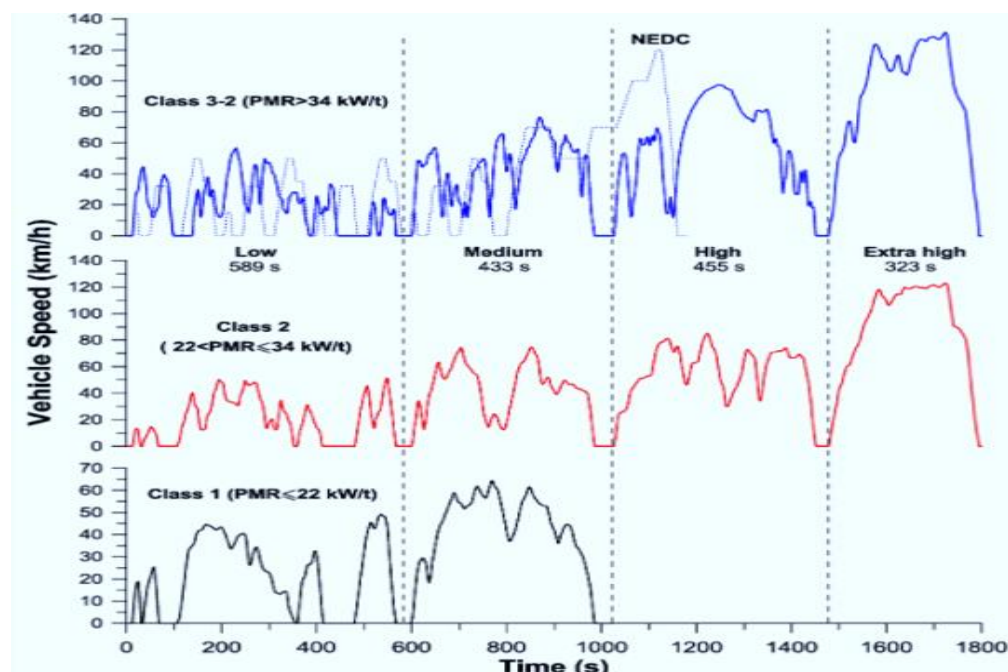
Κλάσεις του WLTP

Στο πρωτόκολλο WLTP διαμορφώθηκαν 3 διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων, με βάση τον λόγο ισχύος προς μάζα PMR (Power to Mass Ratio) και την μέγιστη ταχύτητα του αυτοκινήτου. Έτσι, δημιουργήθηκαν οι τρεις κλάσεις του κύκλου σύμφωνα με τον δείκτη PMR ως εξής και οι εκδοχές καθεμίας ανάλογα με την μέγιστη ταχύτητα:

- ❖ Κλάση WLTC 1 (PMR<22 KW/t): Στην κατηγορία αυτή, λόγω του περιορισμένου λόγου ισχύος προς μάζα δε διατίθενται οι δύο από τις 4 φάσεις οδήγησης υψηλής και πολύ υψηλής ταχύτητας και εφαρμόζονται μόνο φάσεις χαμηλής και μεσαίας ταχύτητας.
- ❖ Κλάση WLTC 2 (22 KW/t <PMR<34 KW/t): Εδώ, το πρότυπο συνήθως διατηρεί την βασική δομή με τα 4 προφίλ οδήγησης (ενδέχεται να παραληφθεί η φάση της εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας μετά από απόφαση της κάθε χώρας),

ωστόσο για να προσαρμοστεί καλύτερα στον ενδιαμέσο αυτόν PMR, διαφοροποιείται με μικρότερου μεγέθους επιταχύνσεις και μέγιστες ταχύτητες

- ❖ Κλάση WLTC 3 (PMR>34 KW/t): Στην κλάση αυτή εντάσσεται το μεγαλύτερο ποσοστό επιβατικών οχημάτων. Διακρίνεται σε εκδοχή 3a και 3b, για οχήματα με ταχύτητες μικρότερες των 120 χλμ./ώρα και ταχύτητες μεγαλύτερες των 120χλμ/ώρα. Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται και τα αμιγώς ηλεκτρικά (PEVs) και υβριδικά οχήματα (HEVs). Βέβαια, στις περιπτώσεις αυτές λαμβάνεται υπόψιν μόνο ο εντός πόλης κύκλος του WLTC 3a/3b, δηλαδή ο κύκλος μετρήσεων για χαμηλή και μεσαία φάση ταχύτητας [44].

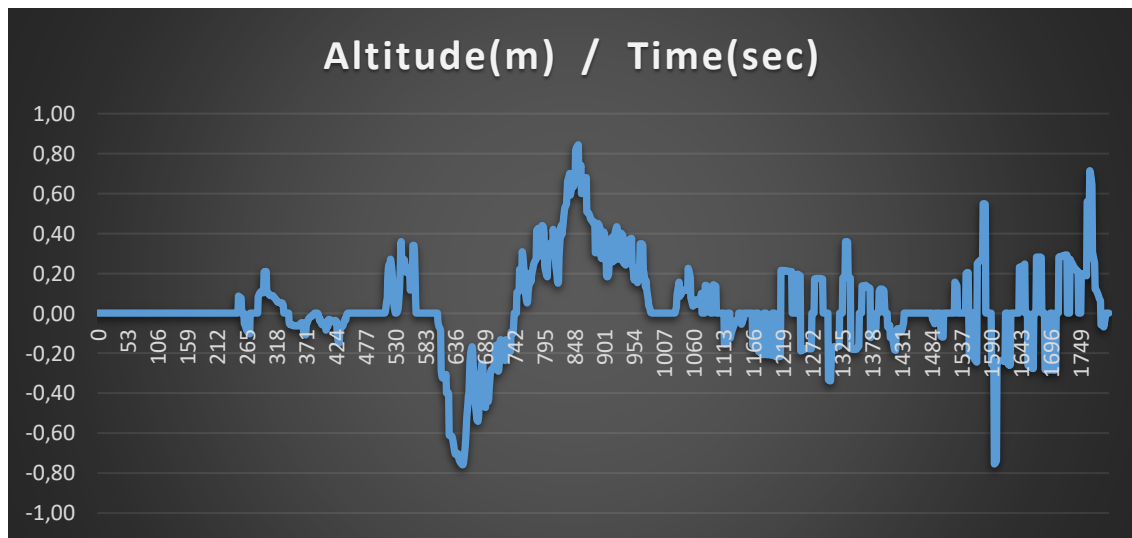


Εικόνα 5.2.3: Οι διαφορετικές κλάσεις wltc ανάλογα με τον λόγο PMR και τα προφίλ οδήγησης κάθε κατηγορίας [45]

5.2 Αναγωγή πειραματικών δεδομένων σε πρωτόκολλο WLTC

Το πειραματικό μέρος της διπλωματικής ξεκίνησε με την λήψη των απαραίτητων δεδομένων και μετρικών για την προσομοίωση της κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος, μέσω πραγματικών μετρήσεων κατά τη διάρκεια της διαδρομής Κοζάνης-Γρεβενά. Πιο αναλυτικά, κατά τη διάρκεια της διαδρομής μετρήθηκε το στιγμιαίο υψόμετρο της διαδρομής με σκοπό να υπολογιστεί η κλίση του οδοστρώματος. Έπειτα, όπως θα αναλυθεί και στις επόμενες υποενότητες, με βάση τη μέτρηση αυτή και λοιπά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου ηλεκτρικού οχήματος, υπολογίστηκαν οι δυνάμεις που επιδρούν στο όχημα καθώς και η απαιτούμενη ισχύς και ροπή για την ομαλή κίνηση του.

Ωστόσο, προτού συμβεί η εν λόγω διαδικασία υπολογισμού, κρίναμε αναγκαίο να ανάγουμε τα δεδομένα στο παγκόσμιο πρότυπο WLTP, προκειμένου να είναι πιο ακριβή και έγκυρα τα συμπεράσματα που θα προκύπταν στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας σε ότι αφορά την κατανάλωση του οχήματος. Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιήθηκε μέρος της διανυθείσας απόστασης από τη διαδρομή Κοζάνη-Γρεβενά, μιας και η χιλιομετρική απόσταση του παγκόσμιου κύκλου μετρήσεων ανέρχεται σε 23,25 χιλιόμετρα, ενώ η απόσταση της διαδρομής μας σε 46 χιλιόμετρα. Ενθυμούμενοι την προηγούμενη υποενοότητα, επισημαίνεται ότι στην περίπτωση μας, το προτεινόμενο όχημα αναφοράς κατατάσσεται στην κλάση 3b (WLTC Class 3b), σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του. Παρακάτω, αποτυπώνεται το διάγραμμα μεταξύ της κλίσης της διαδρομής και του χρόνου που διαρκεί το πρωτόκολλο WLTC 3b.



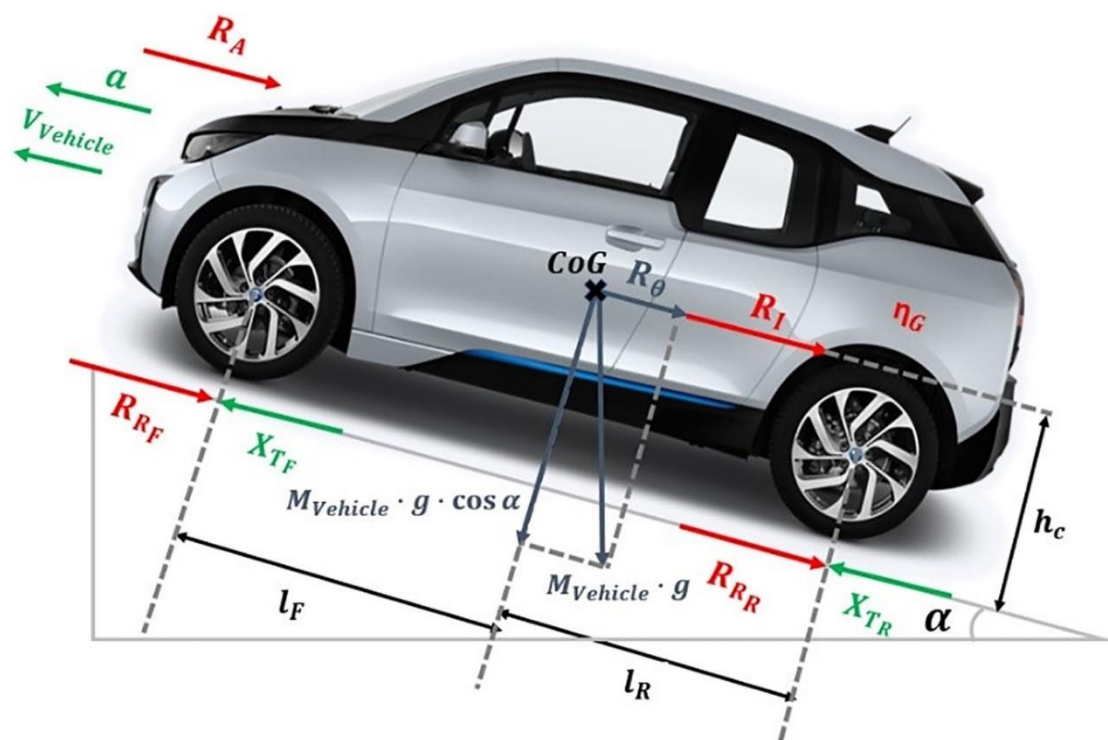
Διάγραμμα 5.2: Κλίση οδοστρώματος σε σχέση με το χρόνο του πρωτοκόλλου WLTP

Ουσιαστικά, απώτερος σκοπός της παραπάνω καταμέτρησης της κλίσης, είναι η δημιουργία μιας παραλλαγής του προτύπου WLTC 3b, το οποίο τώρα θα περιλαμβάνει επιπλέον την κλίση ως μια νέα μετρική. Παράλληλα, να σημειωθεί ότι η κλάση 3b του προτύπου κάνει χρήση τεσσάρων προφίλ οδήγησης, εκ των οποίων, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, μονάχα τα δύο συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων (συγκεκριμένα, επιλέγονται τα «εντός πόλης» προφίλ οδήγησης). Ωστόσο, για λόγους υψηλότερης ακρίβειας και εγκυρότητας, αποφασίστηκε η χρήση όλων των προφίλ οδήγησης για αυτό το ηλεκτρικό όχημα.

Η παραλλαγή αυτή του προτύπου με την προσθήκη της κλίσης του οδοστρώματος, θα βοηθήσει στην πορεία για τη βέλτιστη αξιοποίηση των κινητήριων συστημάτων του οχήματος με την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των απωλειών. Όπως είναι γνωστό, κάθε

ΗΑ κατά τις περιπτώσεις που είτε ο δρόμος είναι κατηφορικός, είτε το ίδιο το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης, ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί αντίστροφα φορτίζοντας τις συστοιχίες μπαταριών του. Αντιθέτως, όταν το αυτοκίνητο βρίσκεται σε φάση επιτάχυνσης ή διατήρηση της ταχύτητας του σε μη κεκλιμένο ή ανηφορικό επίπεδο, τότε ο ηλεκτροκινητήρας τροφοδοτείται από τους συσσωρευτές του, αποφορτίζοντας τους. Συνεπώς, με την παράμετρο της κλίσης του οδοστρώματος, υπάρχει πλήρης επίγνωση της επιμέρους λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα σε κάθε σημείο.

5.3 Ανάλυση και υπολογισμός ασκούμενων δυνάμεων στο προτεινόμενο όχημα



Εικόνα 5.3: Το γερμανικό EV i3 της BMW σε ανηφορική στάση και το σύνολο των ασκούμενων δυνάμεων σε αυτό

Μετά την προ-επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, δηλαδή την εναρμόνιση των μετρήσεων με το πρωτόκολλο WLTP, χρειάστηκε να αναλυθούν οι βασικές δυνάμεις απωλειών ενός ηλεκτρικού οχήματος. Οι δυνάμεις αυτές αντιτίθενται στην κίνηση του οχήματος και έχουν ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ταχύτητάς του. Ωστόσο, η δε ανάλυση αυτών, συμβάλει στην διαμόρφωση και ποσοτικοποίηση της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας από τα συστήματα παραγωγής και μετάδοσης ισχύος, ώστε να

ξεπεραστούν οι ασκούμενες αντιστάσεις. Οι βασικές δυνάμεις που επενεργούν σε ένα αυτοκίνητο κατά τη διάρκεια της κίνησης του είναι οι εξής:

- Δύναμη τριβής κύλισης
- Δύναμη αεροδυναμικών αντιστάσεων
- Δύναμη βαρύτητας σε άνοδο
- Δύναμη επιτάχυνσης

Να σημειωθεί ότι η τελευταία δύναμη της επιτάχυνσης δεν ανήκει στην κατηγορία των λοιπών δυνάμεων αντίστασης. Ωστόσο, συμπεριλαμβάνεται στο σύνολο αυτό, μιας και θα πρέπει να θεωρηθεί ένας επιθυμητός στόχος επιτάχυνσης για το όχημα, ο οποίος θα κληθεί να επιτευχθεί. Στο πλαίσιο αυτό, η επιτάχυνση λαμβάνεται υπόψιν ως μια δύναμη που είναι αναγκαίο να αναλυθεί στη διαδικασία υπολογισμού που έπεται.

Προτού αναλυθούν οι δυνάμεις αυτές, θα πρέπει να οριστεί ένα σύνολο χαρακτηριστικών για το προτεινόμενο όχημα και λοιπών παραμέτρων που θεωρήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία μετρήσεων. Έτσι, παρακάτω αναπαρίσταται η δήλωση των σταθερών τιμών στο περιβάλλον του Microsoft Office Excel:

Σταθερές	Ηλεκτρικού	Οχήματος
Αεροδυναμικός Συντελεστής (Cd)	0,3	-
Βαθμός Απόδοσης η	0,85	-
Πυκνότητα Ατμοσφαιρικού Αέρα (ρ)	1,2	kg/m ³
Ακτίνα Τροχού (R)	0,315	m
Διάμετρος Τροχού (D)	0,63	cm
Μετωπική Επιφάνεια Αεροδυναμικού Συντελεστή (A)	1,5	m ²
Επιτάχυνση Βαρύτητας (g)	9,8	m/s ²
Στροφές/λεπτό Τροχού	758,265	Rpm/min
Στροφές/λεπτό Μοτέρ	1994,237	Rpm/min
Βάρος Οχήματος (M)	1500	kg
Σχέση Μετάδοσης	4	-
Π Τροχού	1,978	m

Πίνακας 5.3.1: Δήλωση χαρακτηριστικών του προτεινόμενου οχήματος και λοιπών παραμέτρων

Βάσει του παραπάνω πίνακα τεχνικών προδιαγραφών του οχήματος υλοποιήθηκαν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί που ακολουθούν για να προκύψει ένα σύνολο απαιτήσεων και στόχων για την προτεινόμενη σχεδίαση.

5.3.1 Δύναμη τριβής κύλισης

Κάθε όχημα που κινείται κατά μήκος μιας επιφάνειας έρχεται αντιμέτωπο με την δύναμη της τριβής. Το αποτέλεσμα εφαρμογής της τριβής κύλισης σε ένα αυτοκίνητο προκαλεί αντιστάσεις κύλισης. Συνήθως, η τριβή κύλισης οφείλεται σε ένα συνδυασμό του τροχού, εν προκειμένω του ελαστικού του αυτοκινήτου και του είδους του εδάφους. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι καθοριστικό ρόλο στην τιμή της τριβής παίζει η σχεδίαση και το υλικό του ελαστικού που περιοδικά παραμορφώνεται, καθώς και οι διαστάσεις του. Μάλιστα, οι τριβές κύλισης είναι αντιστρόφως ανάλογες με το μέγεθος του ελαστικού, δηλαδή όσο πιο φαρδύ ελαστικό χρησιμοποιείται τόσο χαμηλότερη τιμή αποκτά η τριβή κύλισης, αφού το δεδομένο βάρος του οχήματος θα κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Ωστόσο, ένα φαρδύ ελαστικό αυτομάτως συνεπάγεται και μεγαλύτερες αεροδυναμικές αντιστάσεις από τους τροχούς.

Στις σχέσεις υπολογισμού της τριβής κύλισης πάντα λαμβάνεται υπόψιν και ένας συντελεστής τριβής κύλισης, ο οποίος αναπαριστά την αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος. Ο συντελεστής αυτός συνηθίζεται να παίρνει τιμές της τάξης του 0,010 για ένα λείο οδόστρωμα με ένα φουσκωμένο ελαστικό μέχρι και 0,050 για ένα τραχύ οδόστρωμα. Στο σημείο αυτό, να σημειωθεί ότι η έννοια του συντελεστή τριβής κύλισης δε θα πρέπει σε καμία περίπτωση να συγχέεται με τον συντελεστή τριβής ολίσθησης, καθώς ο πρώτος κατά κανόνα είναι περίπου 10 έως 100 φορές μικρότερος από τον δεύτερο (γι' αυτό άλλωστε είναι πιο εύκολο να κυλίσουμε ένα σώμα από το να το σύρουμε) [46].

Επιπλέον, η διάμετρος του τροχού επιδρά σημαντικά στην τιμή του συντελεστή τριβής κύλισης με μη γραμμικό τρόπο (μεγαλύτερη διάμετρος θα σημαίνει μικρότερο συντελεστή τριβής κύλισης). Βέβαια, όπως και στην περίπτωση του ελαστικού, ο μεγαλύτερης διαμέτρου τροχός θα έχει και αντιστοίχως μεγαλύτερη μάζα και απώλειες, εκτός αν θεωρηθεί αμελητέα η διαφορά βάρους.

Η προσέγγιση υπολογισμού της τριβής κύλισης που χρησιμοποιείται στην παρούσα πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την κάθετη δύναμη που ασκείται στα ελαστικά ως το βάρος του οχήματος, τον συντελεστή τριβής κύλισης και τις διαστάσεις της ακτίνας του τροχού. Έτσι προκύπτει ο τύπος υπολογισμού ως:

$$F_{\text{τριβής κύλισης}} = M \cdot f / R$$

Όπου:

M το βάρος του οχήματος (kg)

f ο συντελεστής τριβής κύλισης 0.035 (-)

R η ακτίνα του τροχού του οχήματος (cm)

Εν συνεχεία, με βάση την δύναμη αυτή πρέπει να υπολογιστούν ισχύς και ροπή, προκειμένου να υπερκεραστεί η δύναμη της τριβής κύλισης. Ως ισχύς και ροπές θεωρούνται τόσο ως αυτές που αναπτύσσονται στον ηλεκτροκινητήρα (P_m και T_m αντίστοιχα), όσο και ως εκείνες που ασκούνται στον τροχό του οχήματος (P_L και T_L αντίστοιχα). Οι σχέσεις υπολογισμού για κάθε περίπτωση είναι:

Δύναμη	Τριβής	Κύλισης
Ισχύς στον τροχό του οχήματος (P_L)		$P_L = F_{\text{τριβής κύλισης}} \cdot u$
Ισχύς στον ηλεκτροκινητήρα (P_m)		$P_m = P_L / n$
Ροπή στον τροχό του οχήματος (T_L)		$T_L = F_{\text{τριβής κύλισης}} \cdot R$
Ροπή στον ηλεκτροκινητήρα (T_m)		$T_m = T_L \cdot (n_m / n_L)$

Πίνακας 5.3.2: Τύποι υπολογισμού ισχύος και ροπής λόγω δύναμης τριβής κύλισης

Όπου:

u η ταχύτητα του οχήματος (m/sec)

n ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού κινητήρα (-)

R η ακτίνα του τροχού του οχήματος (cm)

(n_m/n_L) η σχέση μετάδοσης ηλεκτρικού κινητήρα σε τροχό (-)

Τέλος, στην δική μας περίπτωση, προκειμένου να υπολογίσουμε τη δύναμη τριβής κύλισης του οχήματος, χρησιμοποιήσαμε τον παραπάνω τύπο, όπως ορίστηκε με αντικατάσταση των τιμών του πίνακα 5.2.2. Για τους υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό φύλλο του Excel. Ενδεικτικά, μέρος των υπολογισμών φαίνεται στο παρακάτω στιγμιότυπο.

WLTP STANDARD									Τριβή Κύλισης		Τριβή Κύλισης	
	Phase	Total elapsed time	Phase elapsed time	Ταχύτητα (km/h)	Ταχύτητα (m/s)	Επιτάχυνση	Κλίση Οδοστρώματος Κλίμακα (A)	Κλίση Οδοστρώματος Κλίμακα (B)	PL _A	PM _A	TL _A	TM _A
max value				131,30	36,47	1,75	9,00	0,84	595,71	700,84	5,15	1,29
metric unit	Phase	s	s	km/h	m/s	m/s ²	m	m	W	W	Nm	Nm
	Low	0	0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	1	1	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	2	2	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	3	3	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	4	4	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	5	5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	6	6	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	7	7	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	8	8	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	9	9	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	10	10	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	11	11	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	12	12	0,2	0,1	0,06	0,00	0,00	0,91	1,07	5,15	1,29
	Low	13	13	1,7	0,5	0,42	0,00	0,00	7,71	9,07	5,15	1,29
	Low	14	14	5,4	1,5	1,03	0,00	0,00	24,50	28,82	5,15	1,29
	Low	15	15	9,9	2,8	1,25	0,00	0,00	44,92	52,84	5,15	1,29
	Low	16	16	13,1	3,6	0,89	0,00	0,00	59,44	69,92	5,15	1,29
	Low	17	17	16,9	4,7	1,06	0,00	0,00	76,68	90,21	5,15	1,29
	Low	18	18	21,7	6,0	1,33	0,00	0,00	98,45	115,83	5,15	1,29
	Low	19	19	26,0	7,2	1,19	0,00	0,00	117,96	138,78	5,15	1,29

Πίνακας 5.3.3: Στο κόκκινο και κίτρινο γραμμοσκιασμένο πλαίσιο απεικονίζονται οι στήλες υπολογισμού της ισχύος και της ροπής αντίστοιχα, που απαιτούνται για να υπερκεραστεί η δύναμη της τριβής κύλισης. Στο πράσινο πλαίσιο φαίνεται η αντιστοιχία με ταχύτητα και επιτάχυνση την ίδια στιγμή, οι οποίες στην αρχή του κύκλου είναι μηδενικές, και κατ' ακολουθία το ίδιο ισχύει και στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις που υπολογίζονται λόγω της τριβής κύλισης.

Συγκεκριμένα, στην παραπάνω εικόνα, στη στήλη της τριβής κύλισης υπολογίζεται η ισχύς και η ροπή που απαιτούνται για να ξεπεραστεί η δύναμη της τριβής κύλισης. Αναγράφονται PL_A , PM_A και TL_A , TM_A με τη μορφή της ισχύος/ροπής που αναπτύσσεται είτε στον τροχό, ή στον ηλεκτρικό κινητήρα αντίστοιχα. Όσον αφορά τις αρχικές μηδενικές τιμές στην ισχύ/ροπή, αυτές δικαιολογούνται αν κανείς αναλογιστεί την ταχύτητα που αντιστοιχεί στις τιμές εκείνες που είναι ίση με μηδέν (η αντιστοιχία αυτή απεικονίζεται με το πράσινο πλαίσιο). Με τον τρόπο αυτόν προκύπτει ο πρώτος από τους τέσσερις υπολογισμούς της διαδικασίας ανάλυσης ασκούμενων δυνάμεων.

5.3.2 Δύναμη αεροδυναμικών αντιστάσεων

Κατά την μελέτη και τον σχεδιασμό ενός αυτοκινήτου ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία αποτελεί η εύρεση του βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των αεροδυναμικών αντιστάσεων. Οι αεροδυναμικές αντιστάσεις ασκούνται σε κάθε όχημα κατά την περίοδο της κίνησης του και οφείλονται αφενός στις δυνάμεις τριβής μεταξύ του αέρα και των επιφανειών του αυτοκινήτου και αφετέρου στις εναλλαγές πίεσης ανάμεσα σε εμπρόσθιο και οπίσθιο τμήμα του (εξαιτίας ρευστομηχανικών φαινομένων). Σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο, θεωρείται ότι το σώμα του αυτοκινήτου προκαλεί το 65% των αεροδυναμικών απωλειών, οι τροχοί

και οι διαμορφώσεις μέσα στις οποίες τοποθετούνται συνιστούν το 20%, ο αερισμός του κινητήρα το 5% και ο υπόλοιπος εξοπλισμός αποτελεί το εναπομένον 10%.

Για λόγους απλούστευσης, κατά τον υπολογισμό των αεροδυναμικών αντιστάσεων, το όχημα ως σώμα θεωρείται πρισματικό, με μετωπική επιφάνεια A . Παράλληλα, στους τύπους υπολογισμού, μεταξύ άλλων, χρησιμοποιείται και ο συντελεστής αεροδυναμικών αντιστάσεων C_d (drag coefficient), ο οποίος αναπαριστά τις πραγματικές συνθήκες ροής. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής C_d ή συντελεστής οπισθέλκουσας είναι ένας αδιάστατος αριθμός που εξαρτάται από τη μορφή του εν λόγω αντικειμένου. Επινοήθηκε με σκοπό να δικαιολογηθούν οι αποκλίσεις των αεροδυναμικών αντιστάσεων ανάμεσα σε σώματα με την ίδια μετωπική επιφάνεια [46]. Ουσιαστικά, το γινόμενο $C_d A$ αποτελεί τον όρο που αντιπροσωπεύει τις αεροδυναμικές αντιστάσεις. Με τη σειρά του, ο όρος αυτός σε συνδυασμό με την εκάστοτε ταχύτητα του οχήματος και πυκνότητα του αέρα προσδιορίζουν την δύναμη αεροδυναμικών αντιστάσεων, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$F_{\text{αεροδυν.αντιστ.}} = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2$$

Όπου:

A η μετωπική επιφάνεια του οχήματος (m^2)

C_d ο αεροδυναμικός συντελεστής ή συντελεστής οπισθέλκουσας (-)

ρ η πυκνότητα του αέρα ($\sim 1.2 \text{kg/m}^3$)

v η ταχύτητα του οχήματος (m/sec)

Όπως και παραπάνω, ομοίως και εδώ σύμφωνα με την δύναμη αεροδυναμικών αντιστάσεων χρειάζεται να υπολογιστούν ισχύς και ροπή, προκειμένου να ξεπεραστεί η δύναμη αυτή. Οι σχέσεις υπολογισμού για κάθε περίπτωση είναι:

Δύναμη Αεροδυναμικών Αντιστάσεων	
Ισχύς στον τροχό του οχήματος (P_L)	$P_L = F_{\text{αεροδυν.αντιστ.}} \cdot v$
Ισχύς στον ηλεκτροκινητήρα (P_m)	$P_m = P_L / \eta$
Ροπή στον τροχό του οχήματος (T_L)	$T_L = F_{\text{αεροδυν.αντιστ.}} \cdot R$
Ροπή στον ηλεκτροκινητήρα (T_m)	$T_m = T_L \cdot (n_m / n_L)$

Πίνακας 5.3.4: Τύποι υπολογισμού ισχύος και ροπής λόγω δύναμης αεροδυναμικών αντιστάσεων

Έπειτα, η ισχύς και ροπή που πρέπει να εμφανιστούν στο όχημα, ώστε να ξεπεραστούν οι απώλειες αεροδυναμικών αντιστάσεων του, υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις υπολογισμού του παραπάνω πίνακα και τα χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου (πίνακας 5.2.2). Το έγγραφο του Excel διαμορφώθηκε όπως φαίνεται παρακάτω.

WLTP STANDARD									Αεροδυν. Αντιστ.			
Phase	Total elapsed time	Phase elapsed time	Ταχύτητα (km/h)	Ταχύτητα (m/s)	Επιτάχυνση	Κλίση Οδοστρώματος Κλίμακα (A)	Κλίση Οδοστρώματος Κλίμακα (B)	PL _B	PM _B	TL _B	TM _B	
<i>max value</i>			131,30	36,47	1,75	9,00	0,84	13099,37	15411,02	113,14	28,28	
<i>metric unit</i>	Phase	s	km/h	m/s	m/s ²	m	m	W	W	Nm	Nm	
Low	0	0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	1	1	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	2	2	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	3	3	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	4	4	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	5	5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	6	6	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	7	7	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	8	8	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	9	9	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	10	10	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	11	11	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	12	12	0,2	0,1	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Low	13	13	1,7	0,5	0,42	0,00	0,00	0,03	0,03	0,02	0,00	
Low	14	14	5,4	1,5	1,03	0,00	0,00	0,91	1,07	0,19	0,05	
Low	15	15	9,9	2,8	1,25	0,00	0,00	5,62	6,61	0,64	0,16	
Low	16	16	13,1	3,6	0,89	0,00	0,00	13,01	15,31	1,13	0,28	
Low	17	17	16,9	4,7	1,06	0,00	0,00	27,93	32,86	1,87	0,47	
Low	18	18	21,7	6,0	1,33	0,00	0,00	59,13	69,57	3,09	0,77	
Low	19	19	26,0	7,2	1,19	0,00	0,00	101,71	119,66	4,44	1,11	

Πίνακας 5.3.5: Στο μπλε γραμμοσκιασμένο πλαίσιο απεικονίζονται οι στήλες υπολογισμού της ισχύος και της ροπής αντίστοιχα, που απαιτούνται για να υπερνικηθεί η δύναμη των αεροδυναμικών αντιστάσεων.

Εδώ, παρατηρείται η αναπτυσσόμενη ροπή και ισχύς εξαιτίας της δύναμης αεροδυναμικών αντιστάσεων. Το υπολογιστικό φύλλο του Excel δείχνει τις δυνάμεις αυτές όπως υπολογίζονται για το κάθε προφίλ οδήγησης (Low, Medium, High, Extra High) κατά WLTP. Όπως και νωρίτερα στη δύναμη της τριβής κύλισης, έτσι και εδώ, το στιγμιότυπο απεικονίζει το χαμηλό προφίλ οδήγησης «Low» του προτύπου κατανάλωσης, κατά το οποίο πολλές από τις αρχικές τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης είναι μηδενικές ή απειροελάχιστες. Το δεδομένο αυτό επηρεάζει και τις δυνάμεις που υπολογίζονται εξού και τα αρχικά μηδενικά στις στήλες υπολογισμού στο μπλε πλαίσιο.

5.3.3 Δύναμη βαρύτητας σε άνοδο

Στο σύνολο των δύο προηγούμενων δυνάμεων προστίθεται άλλη μια κατηγορία, η αντίσταση λόγω της κλίσης του οδοστρώματος, την οποία κάθε όχημα καλείται να υπερνικήσει κατά την κύλιση του. Η δύναμη αυτή θέτει ως απαίτηση τη λειτουργία του κινητήρα με κάποιο βαθμό απόδοσης και οδηγεί σε κατανάλωση ενέργειας μεγαλύτερης της αποθηκευμένης [46]. Να σημειωθεί ότι, το συγκεκριμένο είδος αντιστάσεων δεν παρουσιάζεται στους εργαστηριακούς κύκλους οδήγησης.

Για τον υπολογισμό της δύναμης βαρύτητας σε άνοδο χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$F_{\text{βαρύτητας άνοδου}} = M \cos \varphi$$

Όπου:

M το βάρος του οχήματος (kg)

φ η γωνία κλίσης του οδοστρώματος

Έπειτα, με βάση την δύναμη βαρύτητας σε άνοδο πρέπει να υπολογιστούν ισχύς και ροπή, προκειμένου να υπερνικηθεί η δύναμη αυτή. Οι σχέσεις υπολογισμού για κάθε περίπτωση είναι:

Δύναμη Βαρύτητας Ανόδου	
Ισχύς στον τροχό του οχήματος (P_L)	$P_L = F_{\text{βαρύτητας άνοδου}} \cdot u$
Ισχύς στον ηλεκτροκινητήρα (P_m)	$P_m = P_L/n$
Ροπή στον τροχό του οχήματος (T_L)	$T_L = F_{\text{βαρύτητας άνοδου}} \cdot R$
Ροπή στον ηλεκτροκινητήρα (T_m)	$T_m = T_L \cdot (n_m/n_L)$

Πίνακας 5.4.6: Τύποι υπολογισμού ισχύος και ροπής λόγω δύναμης βαρύτητας σε άνοδο

Η ισχύς και ροπή που πρέπει να υφίστανται στο όχημα, προκειμένου να υπερνικηθούν οι απώλειες αεροδυναμικών αντιστάσεων του, υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις υπολογισμού του παραπάνω πίνακα και τα χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου (πίνακας 5.2.2). Το έγγραφο του Excel διαμορφώθηκε όπως φαίνεται παρακάτω.

WLTP STANDARD									Βαρύτητα Ανόδου		Βαρύτητα Ανόδου	
	Phase	Total elapsed time	Phase elapsed time	Ταχύτητα (km/h)	Ταχύτητα (m/s)	Επιτάχυνση	Κλίση Οδοστρώματος Κλίμακα (Α)	Κλίση Οδοστρώματος Κλίμακα (Β)	PL _c	PM _c	TL _c	TM _c
max value				131,30	36,47	1,75	9,00	0,84	12406,80	14596,24	92,61	23,15
metric unit	Phase	s	s	km/h	m/s	m/s ²	m	m	W	W	Nm	Nm
	Low	0	0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	1	1	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	2	2	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	3	3	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	4	4	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	5	5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	6	6	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	7	7	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	8	8	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	9	9	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	10	10	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	11	11	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	12	12	0,2	0,1	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	13	13	1,7	0,5	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	14	14	5,4	1,5	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	15	15	9,9	2,8	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	16	16	13,1	3,6	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	17	17	16,9	4,7	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	18	18	21,7	6,0	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	19	19	26,0	7,2	1,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίνακας 5.3.7: Στο καφέ γραμμοσκιασμένο πλαίσιο απεικονίζονται οι στήλες υπολογισμού της ισχύος και της ροπής αντίστοιχα, που απαιτούνται για να υπερκεραστεί η δύναμη της βαρύτητας ανόδου.

Εδώ, φαίνεται η αναπτυσσόμενη ροπή και ισχύς εξαιτίας της δύναμης βαρύτητας ανόδου. Το υπολογιστικό φύλλο του Excel δείχνει τις δυνάμεις αυτές όπως υπολογίζονται για το κάθε προφίλ οδήγησης (Low, Medium, High, Extra High) κατά WLTP. Ομοίως με προηγουμένως, το στιγμιότυπο απεικονίζει το χαμηλό προφίλ οδήγησης «Low» του προτύπου κατανάλωσης, κατά το οποίο πολλές από τις αρχικές τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης είναι μηδενικές ή απειροελάχιστες. Το δεδομένο αυτό έχει άμεση συσχέτιση με τις δυνάμεις υπολογισμού, εξού και τα αρχικά μηδενικά στις στήλες υπολογισμού στο καφέ πλαίσιο.

5.3.4 Δύναμη της επιτάχυνσης

Στο στάδιο αυτό, έχοντας υπολογίσει τις προαναφερθείσες δυνάμεις που αντιτίθενται στην κίνηση του οχήματος, κρίθηκε αναγκαίο να συμπεριλάβουμε σε αυτές, όχι κάποια ακόμη δύναμη αντίστασης, αλλά μια απαραίτητη προϋπόθεση: την επιθυμητή επιτάχυνση του οχήματος και την δύναμη της επιτάχυνσης που αυτή συνεπάγεται. Έτσι, πέρα από το τρίπτυχο των δυνάμεων τριβής κύλισης, βαρύτητας ανόδου και αεροδυναμικών αντιστάσεων, το όχημα πλέον έρχεται αντιμέτωπο με ένα όριο μέγιστης επιτάχυνσης, το οποίο τέθηκε στα 8sec για τα 0-100χλμ/ώρα.

Ο υπολογισμός της επιτάχυνσης εύκολα προέκυψε έχοντας δεδομένη τη σχέση της μεταβολής ταχύτητας ως προς το χρόνο (ανά δευτερόλεπτο) από το πρότυπο WLTP. Έπειτα, υπό την προϋπόθεση του χρονικού ορίου που θέσαμε, θεωρώντας ως επιθυμητή επιτάχυνση τα 8sec για τη μέτρηση 0-100χλμ/ώρα μπορέσαμε να βρούμε τη

δύναμη της επιτάχυνσης που καλείται να υπερνικήσει το όχημα. Ο υπολογισμός βασίστηκε στον εξής τύπο:

$$F_{\text{επιτάχυνσης}} = M \alpha$$

Όπου:

M το βάρος του οχήματος (kg)

α η επιτάχυνση του οχήματος (m/sec²)

Έπειτα, με βάση τη δύναμη επιτάχυνσης πρέπει να υπολογιστούν ισχύς και ροπή, προκειμένου να υπερνικηθεί η δύναμη αυτή. Οι σχέσεις υπολογισμού για κάθε περίπτωση είναι:

Δύναμη Επιτάχυνσης	
Ισχύς στον τροχό του οχήματος (P_L)	$P_L = F_{\text{επιτάχυνσης}} \cdot u$
Ισχύς στον ηλεκτροκινητήρα (P_m)	$P_m = P_L/n$
Ροπή στον τροχό του οχήματος (T_L)	$T_L = F_{\text{επιτάχυνσης}} \cdot R$
Ροπή στον ηλεκτροκινητήρα (T_m)	$T_m = T_L \cdot (n_m/n_L)$

Πίνακας 5.3.8: Τύποι υπολογισμού ισχύος και ροπής λόγω δύναμης επιτάχυνσης

Τέλος, η ισχύς και ροπή που πρέπει να έχει το όχημα, προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι επιτάχυνσης, υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις υπολογισμού του παραπάνω πίνακα και τα χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου (πίνακας 5.2.2). Το έγγραφο του Excel διαμορφώθηκε όπως φαίνεται παρακάτω.

WLTP STANDARD					Επιτάχυνση		Επιτάχυνση			
	Phase	Total elapsed time	Phase elapsed time	Ταχύτητα	Ταχύτητα	Επιτάχυνση	PL _D	PM _D	TL _D	TM _D
max value				131,30	36,47	1,75	32189,81	37870,37	826,88	206,72
metric unit	Phase	s	s	km/h	m/s	m/s ²	W	W	Nm	Nm
	Low	0	0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	1	1	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	2	2	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	3	3	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	4	4	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	5	5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	6	6	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	7	7	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	8	8	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	9	9	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	10	10	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	11	11	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Low	12	12	0,2	0,1	0,06	4,63	5,45	26,25	6,56
	Low	13	13	1,7	0,5	0,42	295,14	347,22	196,88	49,22
	Low	14	14	5,4	1,5	1,03	2312,50	2720,59	485,63	121,41
	Low	15	15	9,9	2,8	1,25	5156,25	6066,18	590,63	147,66
	Low	16	16	13,1	3,6	0,89	4851,85	5708,06	420,00	105,00
	Low	17	17	16,9	4,7	1,06	7432,87	8744,55	498,75	124,69
	Low	18	18	21,7	6,0	1,33	12055,56	14183,01	630,00	157,50
	Low	19	19	26,0	7,2	1,19	12939,81	15223,31	564,38	141,09

Πίνακας 5.3.9: Απεικονίζονται οι στήλες υπολογισμού της ισχύος και της ροπής αντίστοιχα, που απαιτούνται για να υπερνικηθεί η δύναμη της επιτάχυνσης.

Εδώ, παρατηρείται η αναπτυσσόμενη ροπή και ισχύς εξαιτίας της δύναμης της επιτάχυνσης. Το υπολογιστικό φύλλο του Excel δείχνει τις δυνάμεις αυτές όπως υπολογίζονται για το κάθε προφίλ οδήγησης (Low, Medium, High, Extra High) κατά WLTP.

Κεφάλαιο 6^ο: Σχεδιασμός Συστήματος Παραγωγής Ισχύος με Έλεγχο από FLC



6.1 Εισαγωγή

Στον κόσμο της ηλεκτροκίνησης, η έννοια της αυτονομίας είναι ίσως το δημοφιλέστερο στοιχείο τεχνικών προδιαγραφών στο καταναλωτικό κοινό. Επικρατεί ένας ενθουσιασμός γύρω από την τοποθέτηση μεγαλύτερων μπαταριών, μιας και οι περισσότεροι αγοραστές θεωρούν ότι η αύξηση της αυτονομίας είναι συνάρτηση μόνον της χωρητικότητας των συσσωρευτών. Ωστόσο, η επιλογή αυτή, εκτός του ότι δεν είναι ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον, θα έπρεπε να αποτελεί την τελευταία λύση, αφού έχουν εξεταστεί και εξαντληθεί οι λοιπές εναλλακτικές. Αν μη τι άλλο, οι δυνατότητες υψηλής αυτονομίας - έναντι χαμηλού αντιτίμου σε αντίθεση με τον ανταγωνισμό των ΜΕΚ - που ως τώρα έφεραν στο προσκήνιο τα ΗΟ, δεν βασίζονται μονομερώς στους συσσωρευτές, αλλά στους ίδιους τους ηλεκτροκινητήρες και στη διαχείριση ισχύος.

Η χρήση των ηλεκτροκινητήρων στην αυτοκίνηση έχει επιφέρει πλατφόρμες drivetrain οχημάτων με υψηλά ποσοστά απόδοσης, μιας και, οι ηλεκτροκινητήρες δεν έχουν τη μεγάλη απώλεια θερμότητας που συναντάται στις ΜΕΚ. Με τον τρόπο αυτό τα ΗΟ καταφέρνουν να μεταδώσουν στον τροχό ένα ποσοστό μεταξύ 80% και 90% της παραγόμενης ισχύος, με πολύ πιο απλές πλατφόρμες μετάδοσης κίνησης από ότι στα οχήματα με ΜΕΚ. Και αυτό γιατί η διαδικασία του ελέγχου και της διαχείρισης ισχύος του ηλεκτροκινητήρα είναι πολύ πιο εύκολη, μάλιστα χωρίς να χρησιμοποιεί το

κλασικό κιβώτιο ταχυτήτων ή κάποιο διαφορικό περιορισμένης ολίσθησης (Limited Slip Differential) για να εξισορροπήσει την δύναμη στους τροχούς (τα περισσότερα EVs χρησιμοποιούν ένα απλό ελεύθερο διαφορικό, μιας και υπάρχει καλύτερος έλεγχος από τον κινητήρα και τα ηλεκτρονικά ισχύος απευθείας για τον κάθε τροχό). Κατά συνέπεια, έχοντας μια ιδιαίτερα αποδοτική πλατφόρμα, όπως είναι αυτή ενός ηλεκτρικού οχήματος, προτού φτάσουμε στην τοποθέτηση συστοιχιών υψηλής χωρητικότητας, θα ήταν χρήσιμο να διευρύνουμε και να επενδύσουμε στις δυνατότητες των οχημάτων, με στόχο βελτιώσουμε ορισμένα στοιχεία που θα διαδραματίσουν σπουδαίο ρόλο στην αύξηση του συντελεστή απόδοσης. Με τον τρόπο αυτό, η πολυπόθητη αύξηση της αυτονομίας θα προέλθει μέσω της βέλτιστης διαχείρισης και ελέγχου των συστημάτων ισχύος, αλλά και του συνδυασμού περισσότερων του ενός συνόλου ηλεκτροκινητήρων, ακολουθώντας το δρόμο που χάραξε η Tesla (χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα Model 3 και Model Y). Βέβαια, και η ίδια η Tesla, ακολουθώντας την τάση της αγοράς, επενδύει σε υπερμεγέθεις μπαταρίες, με πρωταγωνιστή την έκδοση 500+miles του Cybertruck, που ενσωματώνει συσσωρευτές των 200 Kwh.

Στο πλαίσιο αυτό, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της αυτονομίας του αυτοκινήτου, δημιουργήθηκε ένα πρωτοπόρο σύστημα κίνησης που χρησιμοποιεί ένα σύνολο δύο ηλεκτροκινητήρων για την παραγωγή της απαραίτητης ισχύος. Παράλληλα, η προτεινόμενη πλατφόρμα πλαισιώνεται από τους αναγκαίους μετατροπείς ισχύος, που ενσωματώνουν ευφυείς ελεγκτές, και συγκεκριμένα ασαφείς ελεγκτές (Fuzzy Logic Controllers), προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο έλεγχος των επιμέρους συστημάτων. Συμπληρωματικά, η εν λόγω διάταξη περιλαμβάνει ένα σύστημα αυτόνομης ανατροφοδότησης των συσσωρευτών μέσω της χρήσης ενός δυναμό.

Καθένα από τα επιμέρους στοιχεία και τις λεπτομέρειες της σχεδίασης θα αναλυθούν σε βάθος στις υποενότητες που ακολουθούν.

6.2 Σύστημα παραγωγής και μετάδοσης ισχύος

6.2.1 Δύο κινητήρες, δύο άξονες

Στα χρόνια της ανόδου της ηλεκτροκίνησης που διανύουμε, πέρα από τις νέες τεχνολογίες γύρω από τους συσσωρευτές και της αύξησης της ενεργειακής πυκνότητάς τους, παρατηρείται και το φαινόμενο χρήσης δύο κινητήρων, έναν σε κάθε άξονα του οχήματος. Ωστόσο, πρόκειται για μια τεχνολογία που συναντάται στα κορυφαία

μοντέλα της αγοράς (Audi E-tron, Tesla Model 3 & Model S) και προς το παρόν δεν έχει χρησιμοποιηθεί στις πιο μικρές και οικονομικές κατηγορίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Στο σημείο αυτό, να σημειωθεί ότι η χρήση δύο κινητήρων τοποθετείται μέχρι στιγμής σε τετρακίνητες πλατφόρμες οχημάτων.

Ο συνδυασμός του ενός κινητήρα ανά άξονα, προσφέρει καλύτερο έλεγχο της ροπής που αναπτύσσεται σε εμπρός και οπίσθιο μέρος και κατά συνέπεια καλύτερο έλεγχο της πρόσφυσης [47]. Μεταξύ άλλων, συμβάλλει στον περιορισμό των αναγκών συντήρησης και εγγυάται τη μακροζωία των κινούμενων μερών, και όπως είναι αναμενόμενο, αυξάνει δραστικά την αυτονομία του οχήματος. Έτσι, με γνώμονα την αύξηση της αυτονομίας και την αναβάθμιση των συστημάτων ισχύος, στην παρούσα διάταξη χρησιμοποιήθηκαν δύο ηλεκτρικοί κινητήρες.

6.2.2 Μελέτη χρήσης δύο ηλεκτροκινητήρων

Μετά από συνεχή ανάλυση και επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν και υπολογίστηκαν για το προτεινόμενο όχημα, όπως παρουσιάστηκαν στο 5ο Κεφάλαιο, προέκυψαν οι τελικές ενεργειακές απαιτήσεις σε ισχύ και ροπή. Πιο αναλυτικά, βάσει του προτύπου κατανάλωσης WLTP και την επιπλέον παράμετρο εισόδου της κλίσης σε αυτό για τη δεδομένη διαδρομή Κοζάνης-Γρεβενά, προσμετρήθηκαν οι απαιτούμενες απωλεστικές δυνάμεις αντίστασης (τριβή κύλισης/αεροδυναμικές αντιστάσεις/βαρύτητα ανόδου). Έπειτα, το άθροισμα των δυνάμεων αυτών – σε ισχύ και ροπή – αποτέλεσε το κατώτερο όριο των KW που θα χρειαζόταν το σύστημα ισχύος του οχήματος, με σκοπό να υπερνικά το μέτωπο των δυνάμεων αντίστασης. Στη συνέχεια, τέθηκε ένα ελάχιστο επιθυμητό όριο επιτάχυνσης του οχήματος (8 δευτερολ. /100 χλμ.), οπότε συνυπολογίστηκε και αυτός ο παράγοντας.

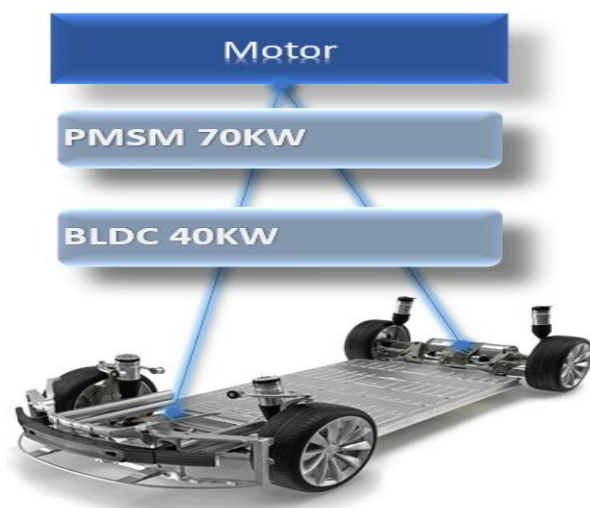
Ακολούθως, με βάση αυτά, η μελέτη προσανατολίστηκε προς την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού κινητήρων. Για το σκοπό αυτό, εξετάστηκε ένα σύνολο κινητήρων και επιμέρους κατασκευαστικών προδιαγραφών καθενός από αυτούς. Η μελέτη ολοκληρώθηκε με την απόφαση χρησιμοποίησης ενός σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM) των 70 KW και ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (Brushless DC Motor - BLDC) των 40KW.

40KW MOTOR						70KW MOTOR					
Pin	Pout	Eff	rpm	T	rpm ⁻¹	Pin	Pout	Eff	rpm	T	rpm ⁻¹
47952,00	42636,00	0,89	3950,00	144,00	3950,00	83916,00	74613,00	0,89	3950,00	252,00	3950,00
W	W	-	rpm	Nm	rpm	W	W	-	rpm	Nm	rpm
10080	6600	0,654762	3950	16	2800	17640	11550	0,654762	3950	28	2800
17280	13200	0,763889	3860	32	3225	30240	23100	0,763889	3860	56	3225
24480	19360	0,79085	3860	48	3500	42840	33880	0,79085	3860	84	3500
31200	25960	0,832051	3845	64	3700	54600	45430	0,832051	3845	112	3700
37440	31680	0,846154	3810	80	3810	65520	55440	0,846154	3810	140	3810
42720	36960	0,865169	3700	96	3845	74760	64680	0,865169	3700	168	3845
46320	41008	0,88532	3500	112	3860	81060	71764	0,88532	3500	196	3860
47952	42636	0,889139	3225	128	3860	83916	74613	0,889139	3225	224	3860
46800	41580	0,888462	2800	144	3950	81900	72765	0,888462	2800	252	3950

Εικόνα 6.2.1 Δήλωση ενδεικτικών προδιαγραφών των δύο κινητήρων, μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης.

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των κινητήρων που επιλέχθηκαν προς χρήση. Τα χαρακτηριστικά αυτά προέκυψαν έπειτα από έρευνα σε εγχειρίδια χρήσης για PMSM και BLDC κινητήρες, στα οποία αναγράφονται οι προδιαγραφές και η καμπύλη λειτουργίας τους. Στην έρευνα αυτή σπουδαίο ρόλο επιτέλεσε το εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας για την παροχή της απαραίτητης τεχνογνωσίας και συμβουλευτικής υποστήριξης, όπως και για ορισμένα δεδομένα της διαδικασίας προσομοίωσης των κινητήρων. Για τις ανάγκες μέρους των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένας brushless κινητήρας ισχύος 2kw. Τα δεδομένα που προέκυψαν από τον κινητήρα αυτά έγιναν αναγωγή στην κλίμακα των κινητήρων που προσομοιώθηκε για την προτεινόμενη σχεδίαση του συστήματος κίνησης.

Παρακάτω αποτυπώνεται στιγμιότυπο της λειτουργίας των κινητήρων για τις ίδιες απαιτήσεις ισχύος, που δείχνει τη διαφοροποίηση χρήσης του καθενός και την ανάγκη της χρήσης ενός μικρότερου για χαμηλές απαιτήσεις ισχύος και ενός μεγαλύτερου για υψηλές αντίστοιχα.



Όπως διατυπώθηκε και νωρίτερα, η χρήση ενός κινητήρα ανά άξονα έχει πολλά οφέλη ειδικά ως προς τη βελτίωση της αυτονομίας του οχήματος μέσω της αύξησης της απόδοσης του κάθε κινητήρα. Υπό άλλες συνθήκες, ένα συμβατικό ΗΟ χρησιμοποιεί έναν κινητήρα για την κίνηση του, ο οποίος καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του σε κάθε προφίλ οδήγησης. Όμως, ένας κινητήρας παραμένει αποδοτικός, όσο δουλεύει κοντά στα ονομαστικά του στοιχεία, όταν υπολειτουργεί τότε η απόδοση του πέφτει κατακόρυφα. Έτσι, σε χαμηλές απαιτήσεις ισχύος θα ήταν πιο αποδοτική η χρήση ενός μικρότερου κινητήρα, ο οποίος θα λειτουργεί στο κατάλληλο φάσμα.

Στο πλαίσιο αυτό, η ιδέα πίσω από την επιλογή του διπλού κινητήριου συστήματος, στηρίζεται στην πλήρη αξιοποίηση του μικρού κινητήρα των 40KW σε διαδρομές χαμηλών ταχυτήτων (κυρίως σε εντός πόλης διαδρομές) και την παράλληλη χρήση του κινητήρα των 70KW σε μικρό ποσοστό εμπλοκής. Με τον τρόπο αυτόν, θα έχουμε τον BLDC κινητήρα να λειτουργεί κοντά στο ονομαστικά του στοιχεία με υψηλή αποδοτικότητα. Ωστόσο, ο BLDC δε θα είναι σε θέση να καλύψει εξ' ολοκλήρου τις ανάγκες ισχύος που έχουν τεθεί για το εν λόγω όχημα. Συνεπώς, ο κινητήρας μεγαλύτερης ισχύος θα συμμετέχει σε κάθε προφίλ οδήγησης, αλλά σε διαφορετικό ποσοστό εμπλοκής και θα λειτουργεί συνδυαστικά με τον BLDC ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής δεν ολοκληρώθηκε η μελέτη ελέγχου για την εύρεση του ποσοστού εμπλοκής κάθε κινητήρα ανά χρονική στιγμή. Μελλοντικά, ο στόχος είναι ο έλεγχος να επιτελείται μέσω ενός συστήματος ασαφών γνωστικών χαρτών (Fuzzy Cognitive Map - FCM), το οποίο θα διαχειρίζεται την ταχύτητα του οχήματος και θα καθορίζει την επιθυμητή τάση εξόδου, ως επιμέρους ποσοστά χρήσης κάθε ηλεκτροκινητήρα. Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι μελλοντικά το δίκτυο των εν

λόγω FCM θα χρησιμοποιεί συμπληρωματικά το διάγραμμα της κλίσης του οδοστρώματος που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5^ο, ως μια επιπλέον μετρική για τον σχηματισμό της βάσης κανόνων του ελεγκτή. Όπως είναι αναμενόμενο, πέρα από την κλίση του οδοστρώματος, θα λαμβάνει δεδομένα για τα οδηγικά προφίλ που προκύπτουν από το παγκόσμιο πρωτόκολλο WLTP (Κεφάλαιο 5^ο).

6.3 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

6.3.1 Υπολογισμός χωρητικότητας συσσωρευτών

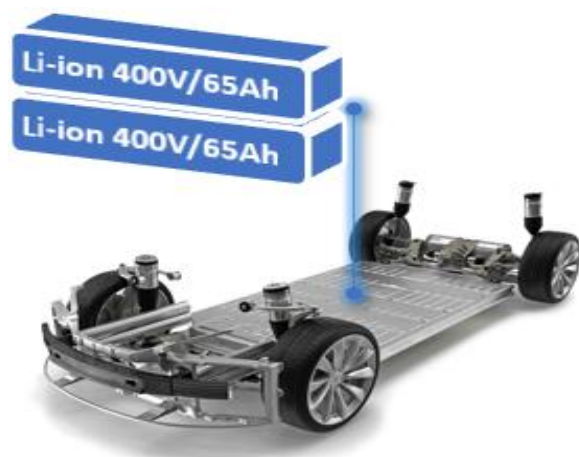
Οι συσσωρευτές των ηλεκτρικών οχημάτων συνεχώς εξελίσσονται με τις αυτοκινητοβιομηχανίες να υπόσχονται νέες τεχνολογίες γύρω από αυτές. Ήδη έχουν αρχίσει να ενσωματώνονται σε ορισμένα νέα αμιγώς ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα υπερμεγέθεις μπαταρίες, εντούτοις πρόκληση εξακολουθεί να είναι η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας των συστοιχιών. Ουσιαστικά, η ίδια συστοιχία μπαταριών να καταφέρνει να αποθηκεύσει περισσότερη ενέργεια, όπως υπόσχονται οι μπαταρίες solid state. Ωστόσο, προς το παρόν και για τα επόμενα δέκα χρόνια οι μπαταρίες ιόντων λιθίου θα είναι ο μεγάλος κυρίαρχος στην αγορά, σύμφωνα με έρευνες τις VW Group. Η συντριπτική πλειοψηφία εφαρμογών ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιεί συσσωρευτές ιόντων λιθίου. Ακολουθώντας την τάση της αγοράς, η χρήση των εν λόγω μπαταριών ήταν μονόδρομος και στην περίπτωση μας. Το σύστημα τροφοδοσίας και αποθήκευσης ενέργειας θα αποτελείται από δύο συστοιχίες μπαταριών ιόντων λιθίου, οι οποίες θα συνδυάζονται για να καλύψουν τις ανάγκες των ηλεκτροκινητήρων. Με τον τρόπο αυτό, σε χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις τροφοδοσίας, η δεύτερη συστοιχία θα απομονώνεται και θα είναι έτοιμη προς χρήση σε ανώτερης ενεργειακής ζήτησης προφίλ οδήγησης.

Έπειτα, μετά τον καθορισμό των προδιαγραφών και του τύπου καθενός από τους ηλεκτροκινητήρες, απαραίτητη διαδικασία ήταν ο υπολογισμός των απαιτήσεων του συστήματος τροφοδοσίας των συσσωρευτών. Για το σκοπό αυτό, θεωρήθηκε ως κατανάλωση οι 15Kwh ανά 100 χιλιόμετρα και μια ενδεικτική αυτονομία των 360 χιλιομέτρων. Δηλαδή, ισχύει ότι:

$$15 \times 3.6 = 54Kwh \text{ και}$$

$$54000/400 = 135Ah,$$

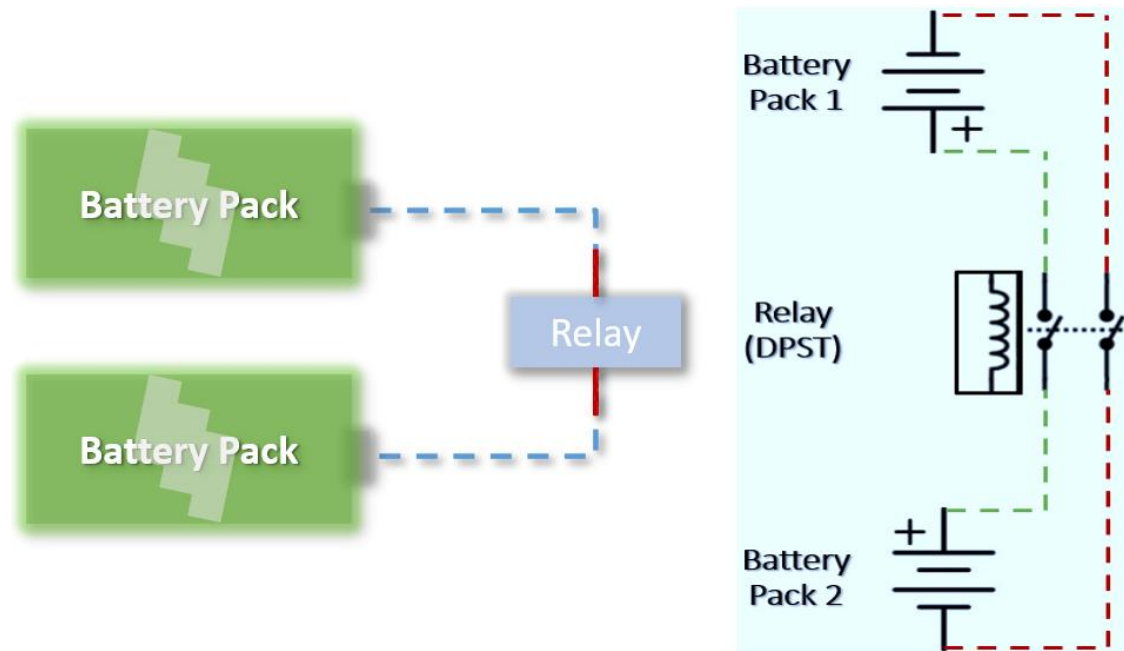
όπου 400V η τάση.



Οπότε, το σύνολο των συστοιχιών θα έχει 135Ah, με την καθεμιά από αυτές να εκτιμάται γύρω στα 65Ah. Αντίστοιχα, σε κιλοβατώρες η ισοδυναμία είναι 52Kwh, δηλαδή 26Kwh η κάθε συστοιχία.

6.3.2 Ανατροφοδότηση συστοιχιών μπαταρίας μέσω ηλεκτρονόμου

Το σύστημα τροφοδοσίας της προτεινόμενης πλατφόρμας χρησιμοποιεί ένα ευφυές σύστημα ισομοιρασμού των απαιτήσεων ισχύος ανάμεσα στις συστοιχίες και της παράλληλης αυτόνομης φόρτισής τους. Πιο αναλυτικά, μεταξύ των δύο συσσωρευτών τοποθετείται ένας ηλεκτρονόμος (relay), προκειμένου η μια συστοιχία μπαταριών να φορτίζει την άλλη ανά χρονικά διαστήματα. Την ίδια στιγμή, η χρήση του ρελέ έχει σκοπό να καταναίμει με πιο αποδοτικό τρόπο τη ζήτηση ενέργειας σε κάθε μπαταρία και να αποφευχθεί η άνιση εκφόρτιση της μίας εκ των δύο συστοιχιών. Με τον τρόπο αυτόν, δε θα υπερφορτώνεται εξ'ολοκλήρου η μια συστοιχία και θα αποφύγουμε φαινόμενα υπερθέρμανσης της. Τέλος, με την πατέντα αυτή αυξάνεται η αντοχή, η εφεδρεία και η απόδοση του συστήματος τροφοδοσίας και αποθήκευσης ενέργειας των συσσωρευτών. Η εν λόγω διάταξη παρουσιάζεται στη σχηματική απεικόνιση που ακολουθεί.



Εικόνα 6.3.1: Ανατροφοδότηση συστοιχιών μπαταρίας μέσω ηλεκτρονόμου

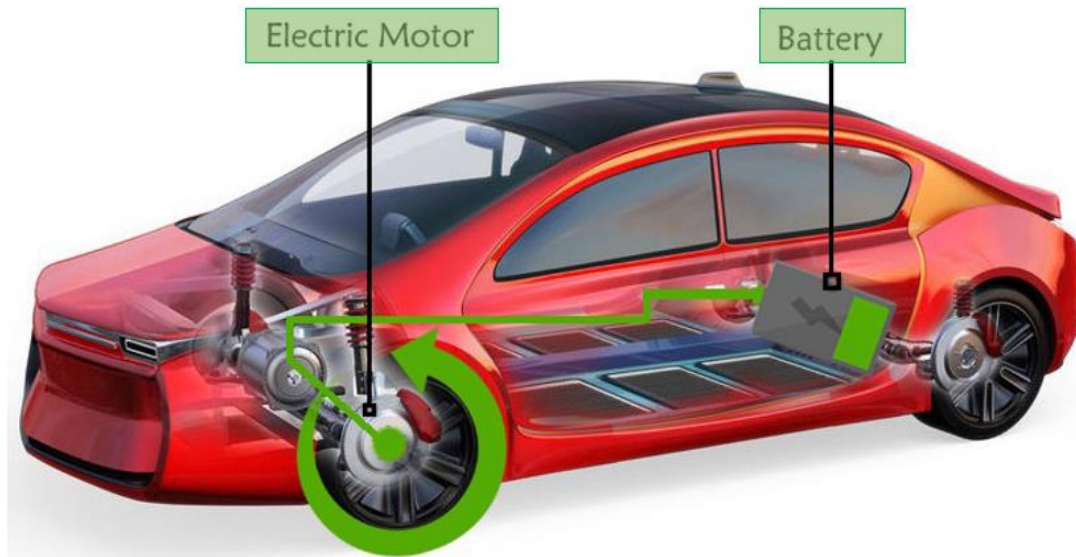
Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αυτού με το ρελέ να παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο διαφορετικών συστοιχιών και η πρώτη συστοιχία να φορτίζει τη δεύτερη. Σχετικά με τον ηλεκτρονόμο, να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται ένα ρελέ DPST (Double Pole Single Through), το οποίο ενώνει αμφίδρομα τη θετική πλευρά της πρώτης μπαταρίας με την θετική της δεύτερης και αντιστοίχως για τις αρνητικές πλευρές.

6.4 Σύστημα ανάκτησης ενέργειας

6.4.1 Η τάση της αγοράς γύρω από την αναγεννητική πέδηση

Τα τελευταία χρόνια, οι εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικών αυτοκινήτων επενδύουν διαρκώς στην εφεύρεση νέων συστημάτων αύξησης της αυτονομίας των ηλεκτρικών μοντέλων τους. Ένα σύστημα που συνέβαλε δραστικά στην αυτονομία των οχημάτων ήταν το σύστημα αναγεννητικής πέδησης (Regenerative Braking System), που πλέον ενσωματώνεται σε όλα τα αμιγώς ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Το σύστημα αυτό βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα αμφίδρομης λειτουργίας, είτε ως κινητήρες, είτε ως γεννήτριες. Έτσι, κατά το διάστημα πέδησης, όσο δηλαδή ο κινητήρας δρα αντίστροφα ως γεννήτρια, το σύστημα Regenerative Braking είναι σε θέση να αποθηκεύει την ενέργεια αυτή με απώτερο σκοπό την επανατροφοδότηση των συσσωρευτών. Σε αντιδιαστολή, κάθε φορά που ένα όχημα με μηχανή εσωτερικής καύσης βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης

παρουσιάζει μεγάλες απώλειες ενέργειας, οι οποίες κατά κύριο λόγο εκλύονται υπό τη μορφή θερμότητας στο περιβάλλον, ως αποτέλεσμα της τριβής μεταξύ φρένων-τροχών.



Εικόνα 6.4.1: Απεικόνιση λειτουργίας συστήματος αναγεννητικής πέδησης

Η αξιοποίηση της άλλοτε χαμένης κινητικής ενέργειας, πλέον είναι ικανή να φορτίζει σε ένα βαθμό τις συστοιχίες μπαταριών. Ως επακόλουθο της αναγεννητικής πέδησης, σημειώνεται ανάκτηση ενέργειας σε ένα εύρος μεταξύ του 16% και του 70%. Ο λόγος πίσω από το μεγάλη ποσοστιαία διαφορά σχετίζεται με το εκάστοτε προφίλ οδήγησης και κυρίως τις αποφάσεις του οδηγού για άσκηση απότομης ή βαθμιαίας πίεσης στο μοχλό πέδησης. Σε δεύτερη μοίρα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τόσο η εξωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος όσο και η θερμοκρασία του ίδιου του συστήματος. Όπως είναι αντιληπτό, η αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα του συστήματος αναγεννητικής πέδησης καθορίζεται σε υψηλό βαθμό από τον οδηγό του οχήματος [48]. Τέλος, επισημαίνεται ότι η χρήση του συστήματος φαίνεται να επιδρά σημαντικά στην κατανάλωση του οχήματος κατά ένα ποσοστό ύψους του 16% [49].

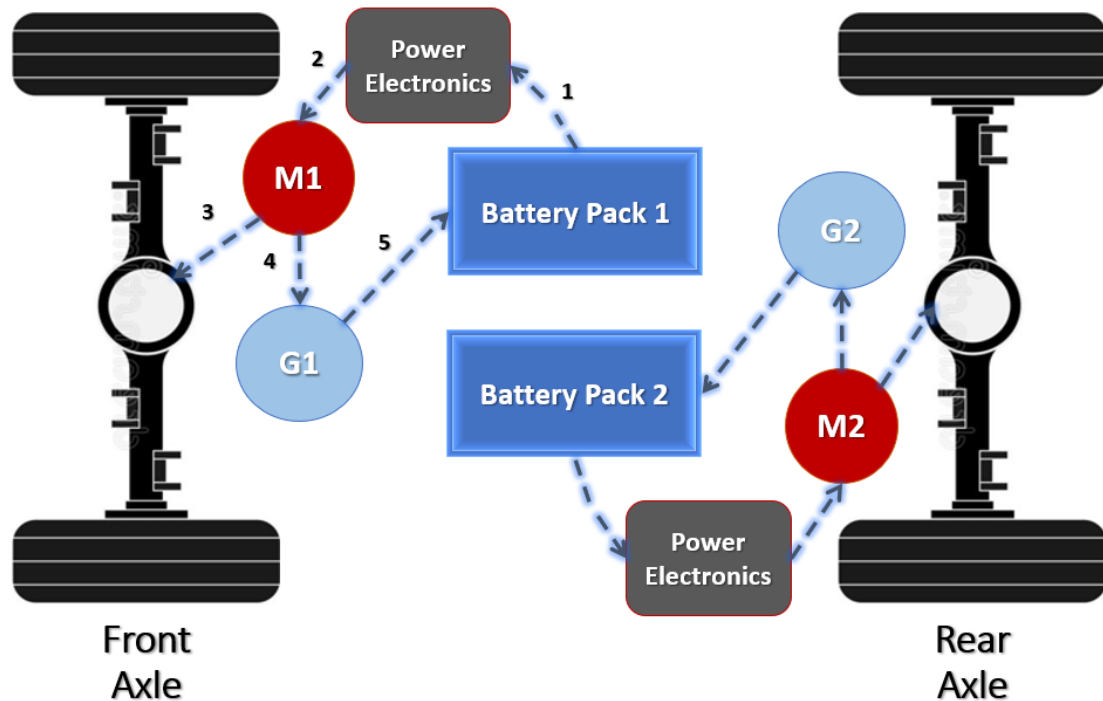
Εν έτει 2021, τα συστήματα αυτά έχουν εξελιχθεί περαιτέρω με το πρόσφατο παράδειγμα του αμιγώς ηλεκτροκίνητου Nissan Leaf που χρησιμοποιεί το δημοφιλές «e-pedal». Το εν λόγω σύστημα επιβραδύνει το όχημα με το άφημα του γκαζιού και εν μέρει πετυχαίνει τη χρήση ενός μόνο πεντάλ για την κίνηση του, ημι-καταργώντας το πεντάλ του φρένου για ένα σύνολο οδηγικών περιστάσεων.

6.4.2 Σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω δυναμό

Η ιδέα της αναγεννητικής πέδησης συνέβαλε στη μελέτη και ανάπτυξη ενός εναλλακτικού τρόπου επέκτασης της αυτονομίας του οχήματος και αύξησης του συντελεστή απόδοσης του.

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα αναγεννητικής πέδησης ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια πέδησης του οχήματος (ή κατά το άφημα του γκαζιού). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ραγδαία αύξηση της αυτονομίας του οχήματος σε αστικό κύκλο οδήγησης. Ωστόσο, σε διαδρομές εκτός πόλης όπου το αυτοκίνητο τείνει να διατηρεί μια σταθερή ταχύτητα δεν παρατηρείται μεγάλη βελτίωση στην αυτονομία του. Στο πλαίσιο αυτό, αναζητήσαμε μια νέας μορφής αναγεννητική διαδικασία, η οποία να συμβάλει κατά τη διάρκεια κίνησης - και όχι πέδησης - του οχήματος.

Στο πλαίσιο αυτό, σχεδιάστηκε μια ευφυής πλατφόρμα, η οποία έγκειται στην εξής σκέψη: Η μερική επαναχρησιμοποίηση της μηχανικής ενέργειας εξόδου του κινητήρα για φόρτιση των συσσωρευτών. Πιο αναλυτικά, ο κάθε κινητήρας στην είσοδο του λαμβάνει την απαιτούμενη ισχύ από τις μπαταρίες, καθώς στην έξοδο του παράγει μηχανικό έργο. Σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, το μηχανικό έργο αυτό, δηλαδή η περιστροφή του ρότορα του ηλεκτροκινητήρα, έχει ως αποτέλεσμα τη κίνηση του τροχού, αφού μεσολαβήσει ένα σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Η εν λόγω διάταξη που προτείνεται, χρησιμοποιεί μέρος της κινητικής ενέργειας του κινητήρα με σκοπό να δώσει κίνηση σε ένα δυναμό. Με τη σειρά του, το δυναμό αναλαμβάνει να μετατρέψει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, προκειμένου να ανατροφοδοτήσει τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας (είτε τις συστοιχίες μπαταριών ή ενδεχομένως κάποιο σύστημα υπερπυκνωτών). Όπως είναι αναμενόμενο, προτού η ενέργεια αυτή επιστρέψει στους συσσωρευτές, χρησιμοποιούνται dc/dc μετατροπείς για την διαμόρφωση της τάσης, ώστε να είναι συμβατή με την τάση εισόδου της κάθε συστοιχίας. Παρακάτω φαίνεται μια σχηματική απεικόνιση της προκείμενης πλατφόρμας.



Εικόνα 6.4.2: Σύστημα αυτόνομης ανατροφοδότησης των συσσωρευτών μέσω χρήσης δυναμό, το οποίο χρησιμοποιεί ως παράμετρο εισόδου την μηχανική ισχύ εξόδου των ηλεκτροκινητήρων και στην έξοδο του παράγει ηλεκτρική ενέργεια για φόρτιση των μπαταριών. Η αρίθμηση στον εμπρόσθιο άξονα του οχήματος σηματοδοτεί τη σειρά των ενεργειών που εκτελούνται, αντιστοίχως ισχύει και για τον πίσω άξονα.

Νωρίτερα αναφέρθηκε ότι το σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω του δυναμό λαμβάνει μέρος της μηχανικής ισχύς εξόδου του ρότορα, ωστόσο ο κινητήρας υπό άλλες συνθήκες θα διαθέτει όλο το πόσο της ενέργειας αυτής για την κίνηση των τροχών. Έτσι, δημιουργείται το εξής ερώτημα: πως θα καταφέρνει το όχημα να πετυχαίνει τους στόχους του για επιτάχυνση ή διατήρηση της ταχύτητας του, όταν ένα δευτερεύον σύστημα παρεμβάλλεται, «κλέβοντας» μέρος της ισχύος αυτής;

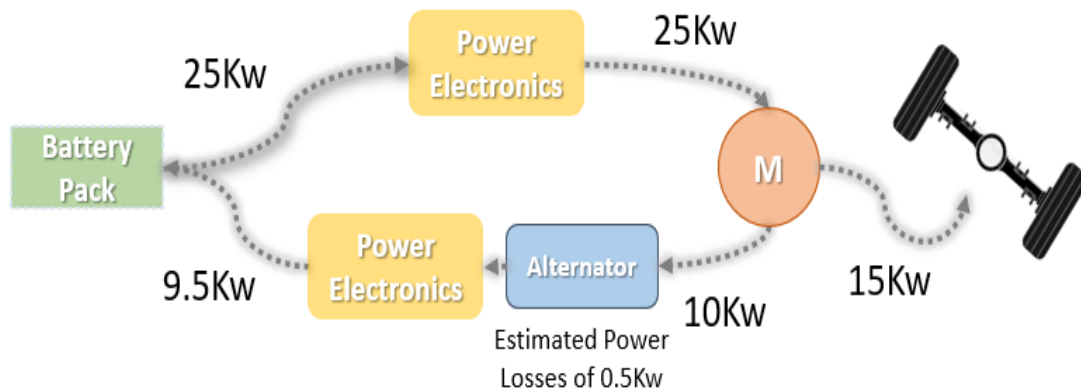
Η απάντηση είναι απλή και ιδιαίτερα αποτελεσματική στην απόδοση του οχήματος: ο κινητήρας θα «παίρνει» εξ αρχής ένα μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας από τους συσσωρευτές και θα διαθέτει το απαραίτητο ποσό στον άξονα του αυτοκινήτου (όσο θα διαθέτει και αν δεν υπήρχε το δυναμό στην διάταξη). Το επιπλέον ποσό ισχύος που μετέτρεψε σε μηχανικό έργο θα το διαθέτει στο δυναμό. Δηλαδή, οι συστοιχίες μπαταριών θα χρειαστεί να παρέχουν ένα υψηλότερο ποσό ενέργειας για το ίδιο όχημα σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν θα υπήρχε το σύστημα αυτό.

Η χρήση του συστήματος αυτού αναγκάζει τον κινητήρα να δουλέψει πιο κοντά στην χαρακτηριστική λειτουργίας του και κατά συνέπεια να αυξήσει δραστικά τον συντελεστή απόδοσης του. Πιο αναλυτικά, ας αναλογιστούμε το εξής παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση του συστήματος ανάκτησης ενέργειας καθώς και την επίδραση του στην απόδοση του οχήματος.

Παράδειγμα Επεξήγησης:

Θεωρούμε ένα ηλεκτροκίνητο όχημα που χρησιμοποιεί για την κίνηση του έναν κινητήρα 40KW. Το αυτοκίνητο κινείται με 120χλμ./ώρα και χρειάζεται 15kw ισχύος και 70Nm ροπής. Στην παρούσα φάση, το όχημα θα προσεγγίζει ένα συντελεστή απόδοσης που κυμαίνεται στο 80%.

Έστω τώρα, ότι στο εν λόγω αυτοκίνητο ενσωματώνεται το σύστημα ανάκτησης ενέργειας με το δυναμό. Το δεδομένο της ταχύτητας δεν αλλάζει, εξακολουθεί να υπάρχει η απαίτηση για κίνηση με ταχύτητα 120χλμ./ώρα. Προκειμένου να τροφοδοτήσουμε και τον άξονα του δυναμό, χρειαζόμαστε περισσότερη ισχύ. Έτσι, το κινητήριο σύστημα θα τροφοδοτηθεί με 25kw ισχύος και 170Nm ροπής, εκ των οποίων τα 15kw/70Nm θα καταλήξουν όπως και νωρίτερα στο σύστημα μετάδοσης του οχήματος. Όμως, τα υπολειπόμενα 10kw/100Nm θα οδηγηθούν στο δυναμό.



Εικόνα 6.4.3: Επεξηγηματικό παράδειγμα χρήσης του προτεινόμενου συστήματος ανάκτησης ενέργειας, στο οποίο η τρόπος λειτουργίας του μέσω της ροής ενέργειας από το κάθε επιμέρους σύστημα

Όπως φαίνεται και παραπάνω, τα 10kw που επιστρέφουν στο δυναμό δε μεταφέρονται πλήρως στους συσσωρευτές, αφού πρέπει να συνυπολογιστεί μία απώλεια ισχύος από το δυναμό, καθώς θα μετατρέψει ένα 95% της ισχύος εισόδου σε ηλεκτρική ενέργεια στην έξοδο. Να σημειωθεί ότι στην παραπάνω εικόνα δε απεικονίζεται η πλήρης μορφή της πλατφόρμας, μιας και εστιάζει στην ανάλυση του συστήματος ανάκτησης ενέργειας.



Εικόνα 6.4.4: Επεξηγηματικό παράδειγμα χρήσης του προτεινόμενου συστήματος ανάκτησης ενέργειας, στο οποίο παρατηρείται η αύξηση της απόδοσης του οχήματος

Με τον τρόπο αυτό, στο παραπάνω παράδειγμα γίνεται εφικτή η αύξηση της απόδοσης του οχήματος σε ένα ποσοστό της τάξης του 9% με 9.5% κατά προσέγγιση. Πλέον, ο συντελεστής απόδοσης του οχήματος ανέβηκε στο 0,89 από το 0,80 που είχε θεωρηθεί εξ αρχής. Παράλληλα, η αυτονομία του οχήματος αυξάνεται σημαντικά λόγω της ύπαρξης του αυτόνομου φορητού «φορτιστή», του δυναμό. Μάλιστα, η βελτίωση της αυτονομίας του συστήματος αυτού, ευδοκμεί σε κύκλους οδήγησης εκτός πόλης, σε αντίθεση με την αναγεννητική πέδηση που περιορίζεται λόγω της μείωσης του φαινομένου πέδησης σε μη αστικές διαδρομές.

6.5 Ασαφής έλεγχος και διαχείριση ισχύος

6.5.1 Οι FLC ελεγκτές έναντι των PID σε μη γραμμικά συστήματα

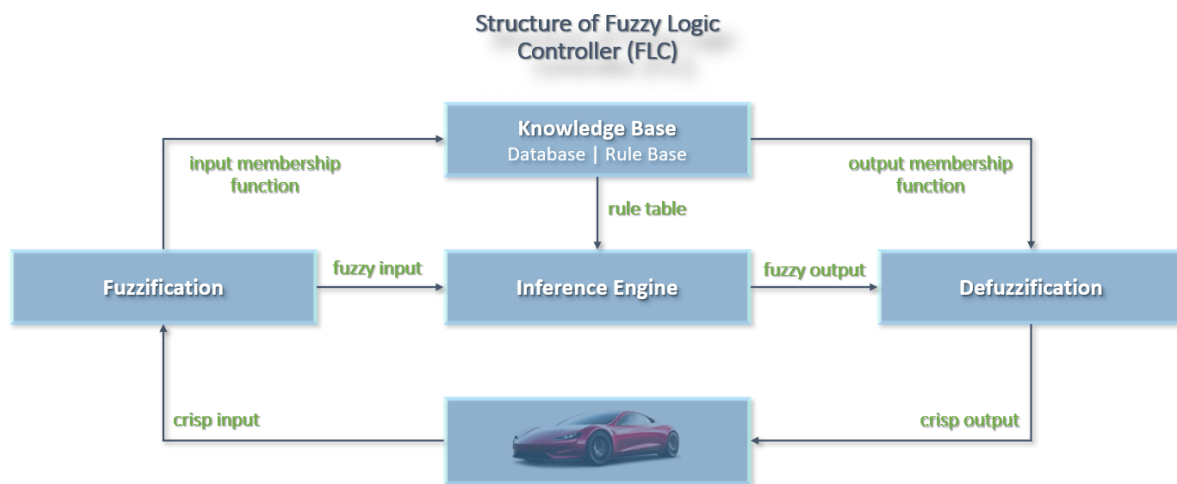
Σήμερα, η ασαφής λογική βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ σύνολο θετικών και οικονομικών επιστημών, καθώς και σε επιστημονικά πεδία της σύγχρονης μηχανικής. Ένα από τα πεδία αυτά είναι η διαχείριση ισχύος των ηλεκτροκινητήρων, όπου έχει αποδειχθεί ένα σημαντικό μέσο βελτιστοποίησης των συστημάτων ελέγχου. Η παράλληλη άνοδος των ηλεκτρικών οχημάτων της τελευταίας δεκαετίας έχει συμβάλει δραστικά στην έρευνα και ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος (inverters). Ως επακόλουθο, ολοένα και περισσότερες πειραματικές μελέτες και επιστημονικές έρευνες κατατοπίζονται στην ενσωμάτωση FLC ελεγκτών για την παροχή βελτιωμένων δυνατοτήτων ελέγχου. Οι ασαφείς ελεγκτές είναι σε θέση να εξελίξουν και να φτάσουν σε υψηλό επίπεδο την απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων, την ώρα που οι παραδοσιακοί και κυρίαρχοι στο χώρο PID ελεγκτές δε μπορούν να ανταπεξέλθουν στο ίδιο επίπεδο.

Τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος όπως ο μαγνητικός κορεσμός και η τριβή θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν την απόδοση των συμβατικών ελεγκτών. Επιπλέον, μιας και οι κλασικοί ελεγκτές έχουν προκαθορισμένη δομή και σταθερές παραμέτρους, είναι αναμενόμενο ότι σε ένα δυναμικό σύστημα προκύπτουν αρκετές δυσκολίες σε ότι αφορά την προσαρμοστική ικανότητα τους, καθώς και τις δυνατότητες βελτιστοποίησης. Από την άλλη πλευρά, ένα ασαφές σύστημα ελέγχου είναι σε θέση να ξεπεράσει τους εν λόγω περιορισμούς και να μοντελοποιήσει ανακριβή μοντέλα.

Γενικότερα, η προσέγγιση της ασαφούς λογικής πλεονεκτεί έναντι των παραδοσιακών μεθόδων ελέγχου, εξαιτίας της διαχείρισης πολυπλοκότητας, της πλήρως παραμετροποίησης μορφής της, αλλά και της ευπροσάρμοστης συμπεριφοράς της σε περιπτώσεις μη γραμμικών συστημάτων. Στην πραγματικότητα, η ασαφής λογική συνηθίζεται να χρησιμοποιείται περισσότερο για τον χειρισμό συναρτήσεων ελέγχου υψηλού επιπέδου, εκεί που τα κλασικά συστήματα ελέγχου αδυνατούν να προσφέρουν λύση. Η χρήση των FLC συνίσταται στις περιπτώσεις εκείνες, όπου η έξοδος αναμένεται να έλθει σε γρήγορο χρονικό διάστημα, με το ελάχιστο ποσοστό υπερέψωσης και χρόνο αποκατάστασης, μικρό περιθώριο σφάλματος και γρήγορο χρόνο ανόδου. Τα στοιχεία αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά και κρίσιμα στις βιομηχανικές εφαρμογές.

6.5.2 Η δομή των FLC στην προτεινόμενη σχεδίαση

Κάθε fuzzy ελεγκτής χρησιμοποιεί την ασαφή λογική για να μετατρέψει τους όρους της φυσικής γλώσσας σε ένα ασαφές σύστημα κανόνων και συμπερασμάτων. Πρακτικά, η τεχνική των συστημάτων FLC υιοθετείται εξαιτίας της ευελιξίας, της προσαρμοστικότητας και της εύκολης αντιμετώπισης μη γραμμικών συστημάτων.



Εικόνα 3.5.1: Λειτουργική δομή ενός FLC ελεγκτή

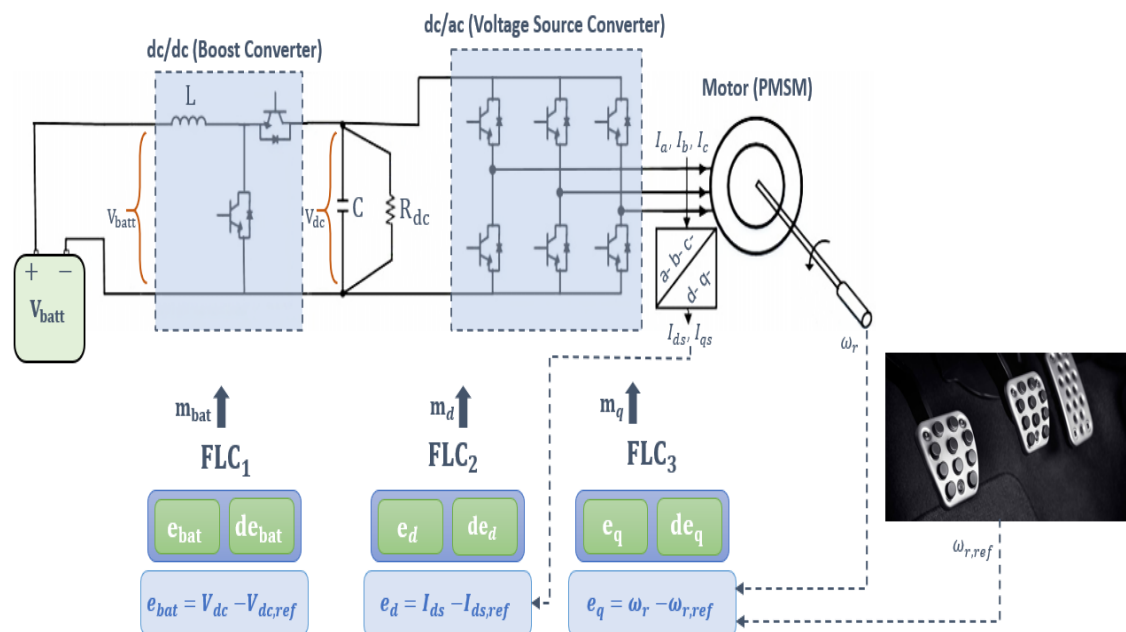
Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, ένα σύστημα FLC αποτελείται από πέντε λειτουργικές δομές, οι οποίες είναι το σύνολο κανόνων, η βάση δεδομένων, η διαδικασία της ασαφοποίησης, το σύστημα συμπερασμού και η διαδικασία της από-ασαφοποίησης. Η ασαφής λογική παρέχει ένα πλήθος αλγορίθμων συμπερασμού και η επιλογή τους βασίζεται κατά κύριο λόγο στην φύση του κάθε προβλήματος. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται το σύστημα συμπερασμού τύπου Mandami.

Έπειτα, διευκρινίζεται ότι καθένα από τα συστήματα FLC, διαθέτει δύο εισόδους, οι οποίες ορίζονται ως error (e) και change of error (ce). Οι σαφείς τιμές εισόδου ερμηνεύονται σε ασαφείς μεταβλητές μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής. Κάθε παράμετρος υπόκειται σε λεκτικό διαμερισμό, με πέντε ασαφή σύνολα να την προσδιορίζουν: BN (big negative), LN (little negative), ZO (zero), LP (little positive), BP (big positive).

Η ασαφής μεταβλητή είναι ένα μέλος των υποσυνόλων και προσδιορίζεται άμεσα μέσω του βαθμού συμμετοχής στο διάστημα μεταξύ του μηδενός και του ένα. Αργότερα, οι ασαφείς μεταβλητές επεξεργάζονται από το σύστημα συμπερασμού που εφαρμόζει ένα σύνολο κανόνων, οι οποίοι προκύπτουν από μια 5x5 βάση κανόνων. Τέλος, επεμβαίνει ο μηχανισμός συμπερασμού Mandami και ένας αλγόριθμος από-ασαφοποίησης κεντρικής τιμής προκειμένου να εξαχθεί μια σαφής τιμή εξόδου (crisp output). Στην εν λόγω μέθοδο από-ασαφοποίησης, η σαφής τιμή εξόδου του βαθμού χρήσης θεωρείται ως το κέντρο βάρους της συνάρτησης συμμετοχής.

Στο μοντέλο ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου, μπορούμε να διακρίνονται τρεις συναρτήσεις συμμετοχής, την m_{bat} , m_{ds} και m_{qs} , ως τις βασικές παραμέτρους εισόδου του συστήματος. Κατά συνέπεια, στην παρούσα πρόταση σχεδιάστηκαν τρία είδη FLC

συστημάτων, καθένα από οποία αντιπροσωπεύει τις παραμέτρους αυτές και συγκεκριμένα αντιστοιχεί στο βαθμό χρησιμοποίησής τους. Να σημειώσουμε ότι ο σχεδιαστικός στόχος του ελεγκτήριου συστήματος είναι η δημιουργία της κατάλληλης ανατροφοδότησης για τον περιορισμό σφάλματος και κατ' επέκταση οδήγηση του ΗΟ στην επιθυμητή λειτουργία. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κυκλωματική μορφή καθενός από τους ελεγκτές αυτούς:

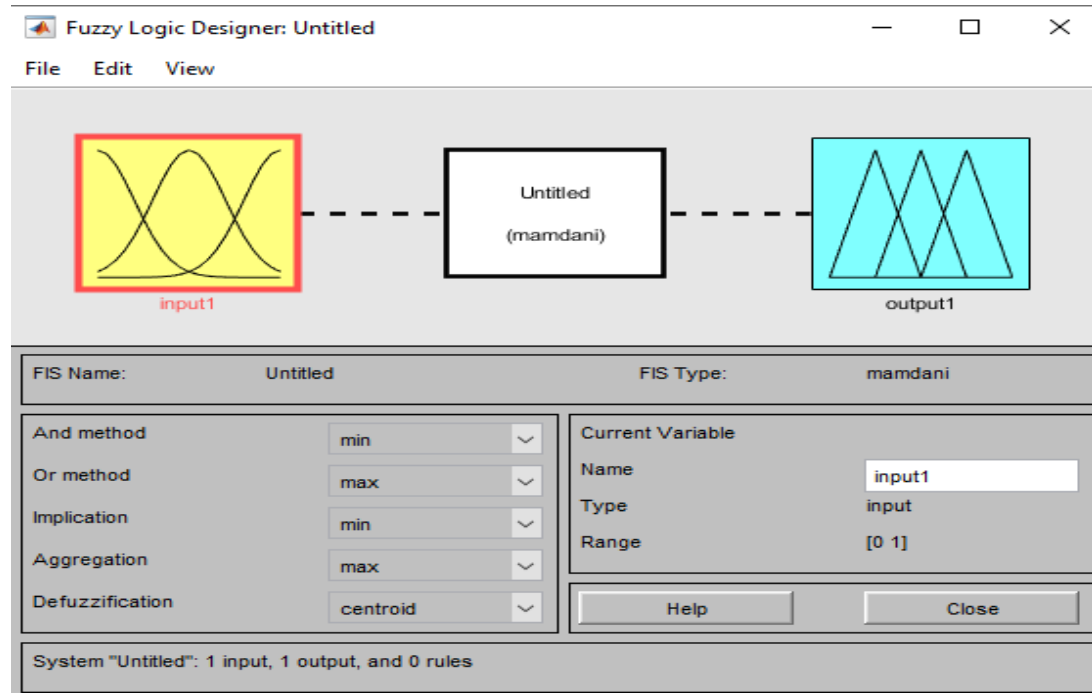


Εικόνα 6.5.2: Κυκλωματική απεικόνιση του συστήματος των FLC ελεγκτών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην παρούσα σχεδίαση [50]

Αναλυτικότερα, το FLC₁ καθορίζει το βαθμό χρήσης του μετατροπέα ανύψωσης dc/dc (boost dc/dc converter), δηλαδή το m_{bat} . Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιεί ως μεταβλητή εισόδου τη διαφορά μεταξύ της συνεχής τάσης και της τάσης αναφοράς, προκειμένου να ελέγχει την τάση της μπαταρίας. Με τη σειρά του, το FLC₂ αναλαμβάνει να παρέχει τον βαθμό χρήσης VSC (Voltage Source Converter) του μετατροπέα dc/ac, δηλαδή το m_d . Έτσι, λαμβάνει ως είσοδο την εκάστοτε διαφορά της θέσης του δρομέα από το μηδέν. Ουσιαστικά, προσπαθεί να βρει τη θέση του ρεύματος σε σχέση με την τάση και ανάλογα με την διαφορά τους να ρυθμίσει την ροπή.

Τέλος, το FLC₃ καθορίζει το βαθμό χρήσης VSC του μετατροπέα dc/ac, δηλαδή το m_q . Για τις ανάγκες αυτές, δέχεται ως τιμή εισόδου την απόκλιση της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα ω_r από την τιμή αναφοράς της. Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι η τιμή εισόδου ω_r είναι διαρκώς μεταβαλλόμενη και πλήρως εξαρτώμενη από τον οδηγό του οχήματος, αντίθετα με τις μεταβλητές εισόδου των προηγούμενων ασαφών ελεγκτών, οι οποίες είναι προκαθορισμένες από σταθερές τιμές.

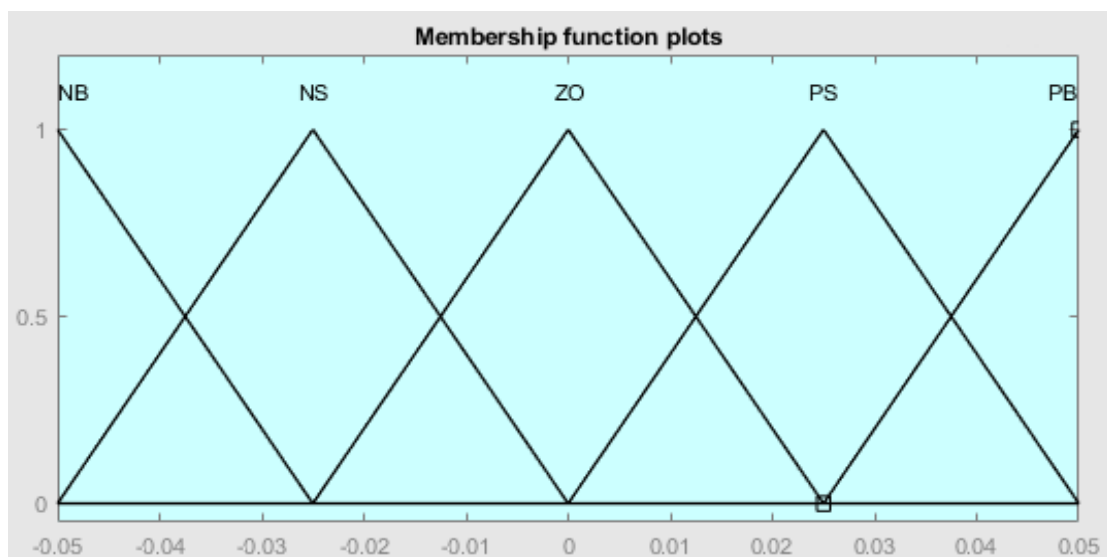
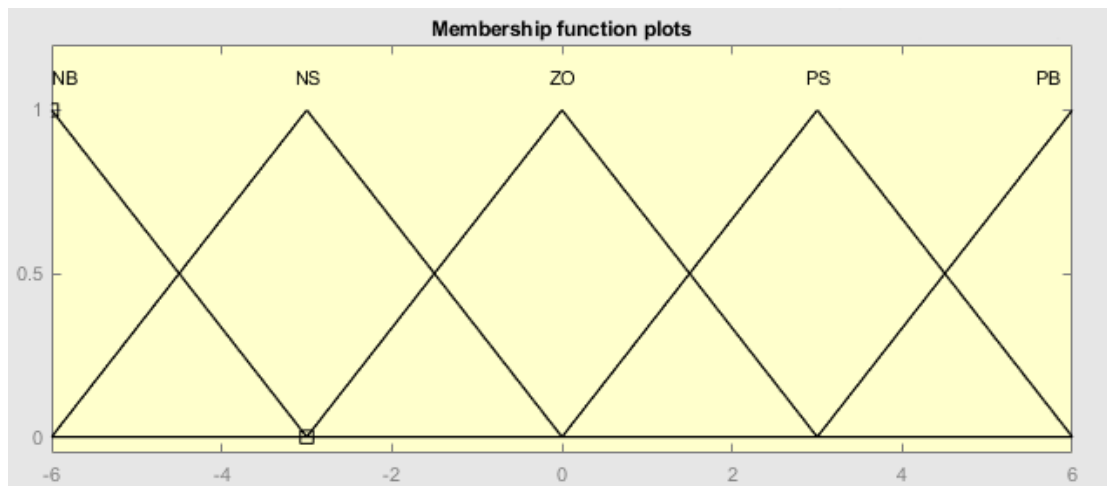
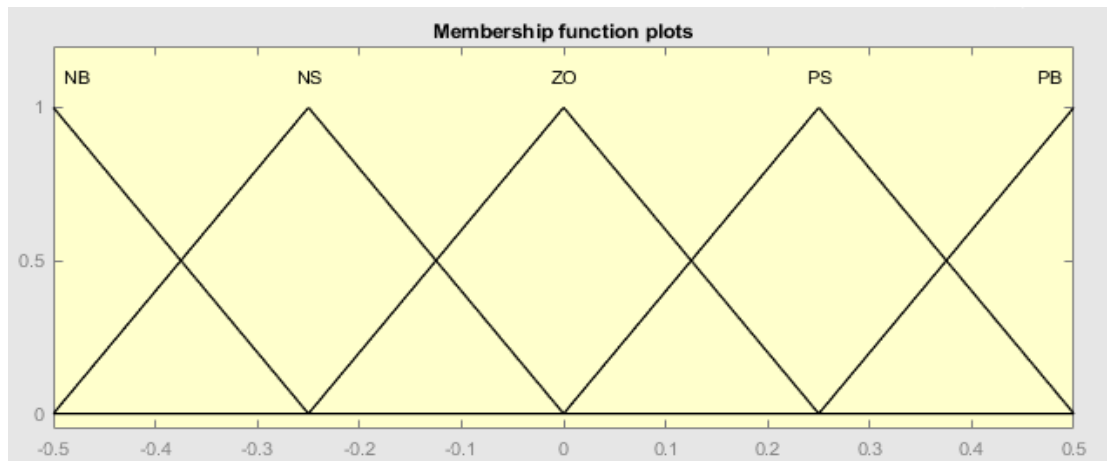
Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον του λογισμικού Matlab και συγκεκριμένα το περιβάλλον «Fuzzy Logic Designer», του πακέτου ασαφούς λογικής, όπως φαίνεται στην εικόνα που έπεται.



Εικόνα 6.5.3: Περιβάλλον ανάπτυξης ασαφών ελεγκτών (Fuzzy Logic Designer) του λογισμικού Matlab

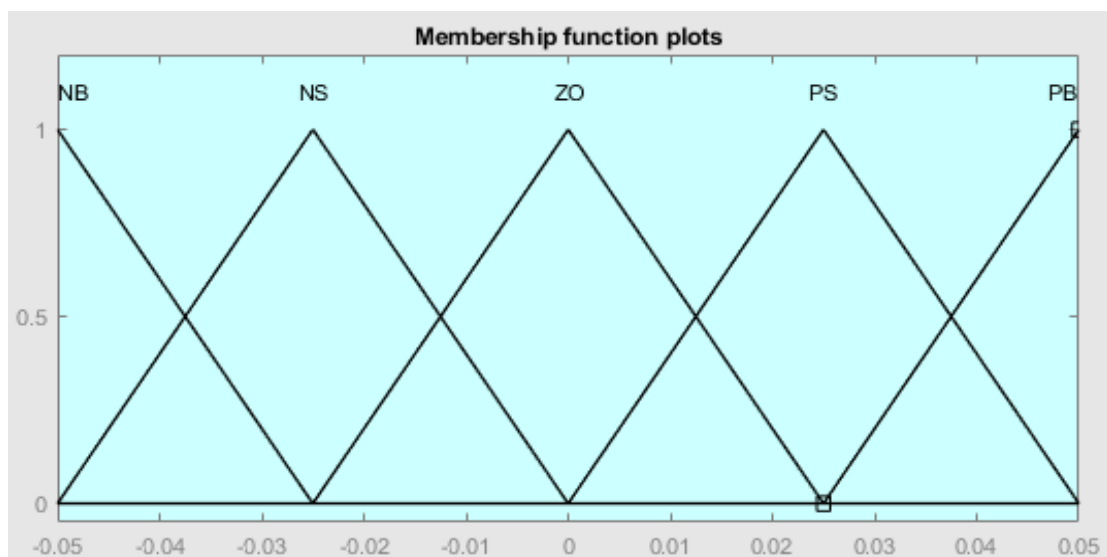
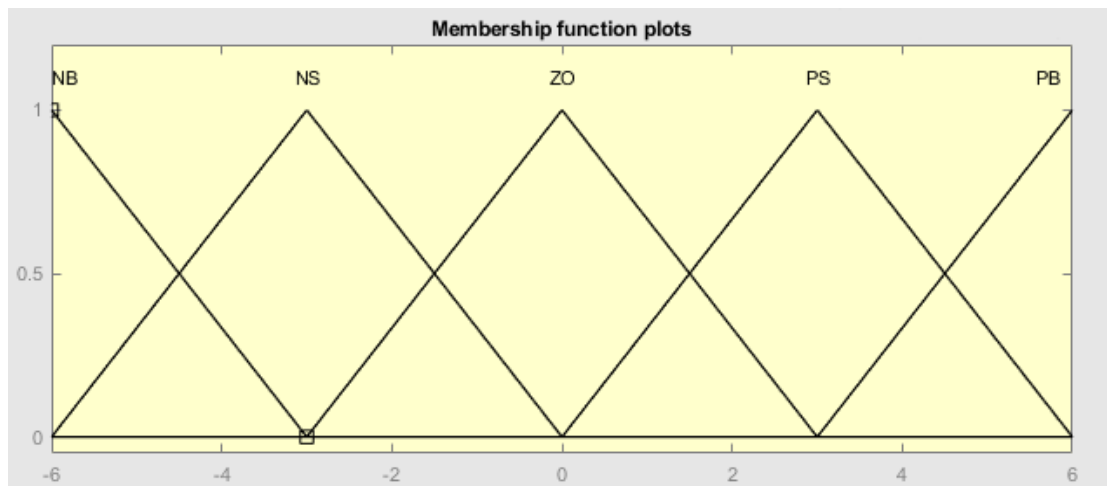
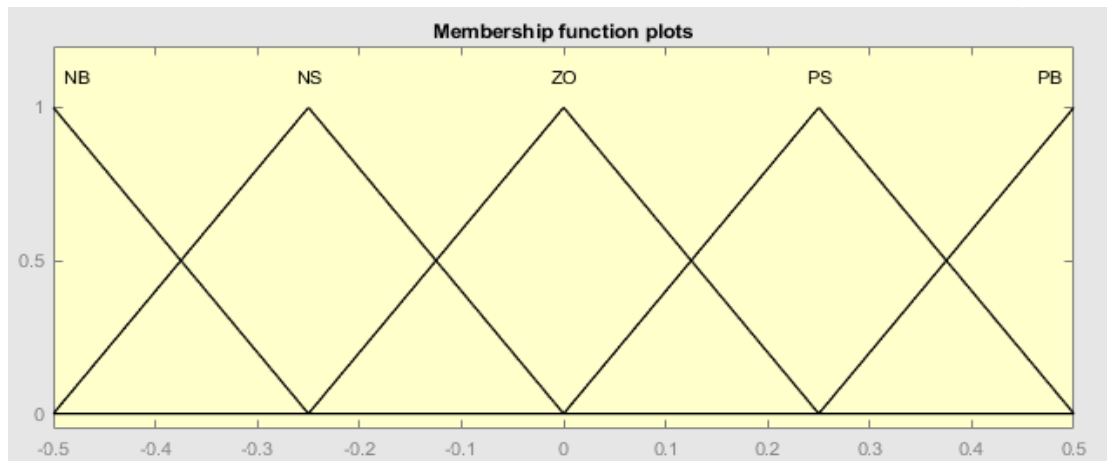
Στη συνέχεια, παραθέτονται ορισμένα στιγμιότυπα εκτέλεσης, στα οποία απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων συμμετοχής εισόδου των παραμέτρων error (e) και change of error (ce), αλλά και της συνάρτησης συμμετοχής εξόδου m_{bat} , m_{qs} και m_d , των ελεγκτών FLC₁ FLC₂ και FLC₃ αντίστοιχα.

Γραφικές Παραστάσεις συναρτήσεων συμμετοχής FLC₁



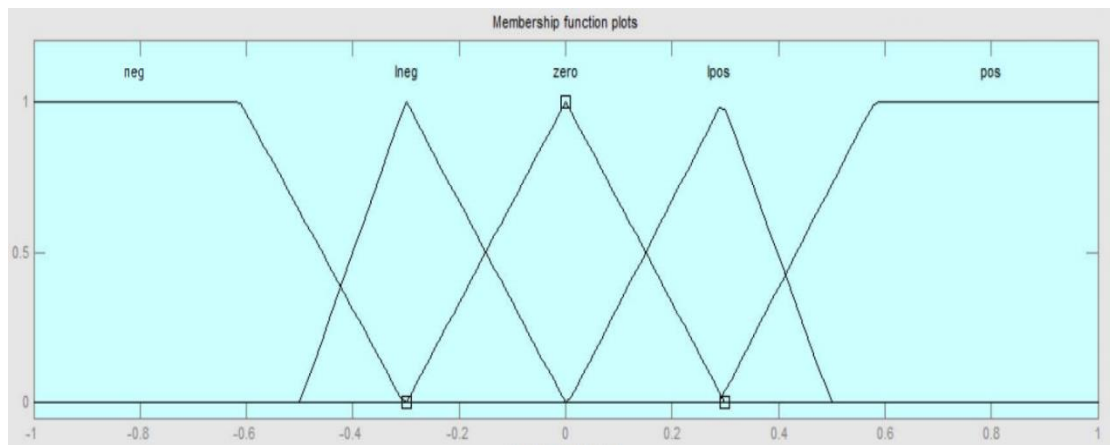
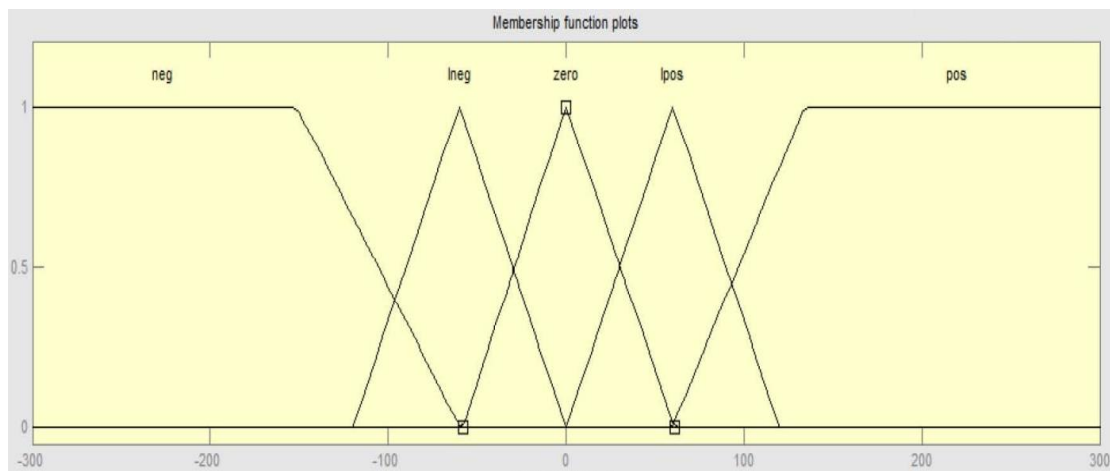
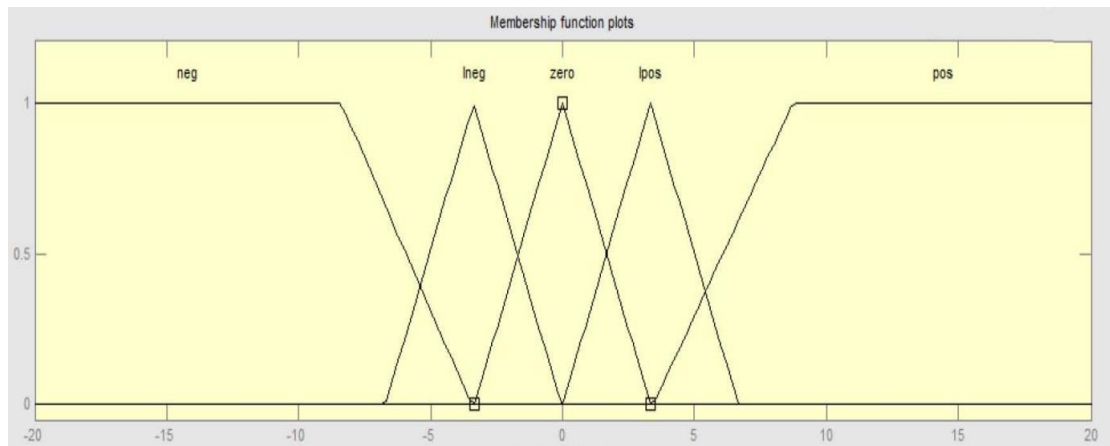
Εικόνα 6.5.4: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου e , ce , και της συνάρτησης συμμετοχής εξόδου m_{bat}

Γραφικές Παραστάσεις συναρτήσεων συμμετοχής FLC₂



Εικόνα 6.5.5: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου e , ce , και της συνάρτησης συμμετοχής εξόδου u_a

Γραφικές Παραστάσεις συναρτήσεων συμμετοχής FLC₃



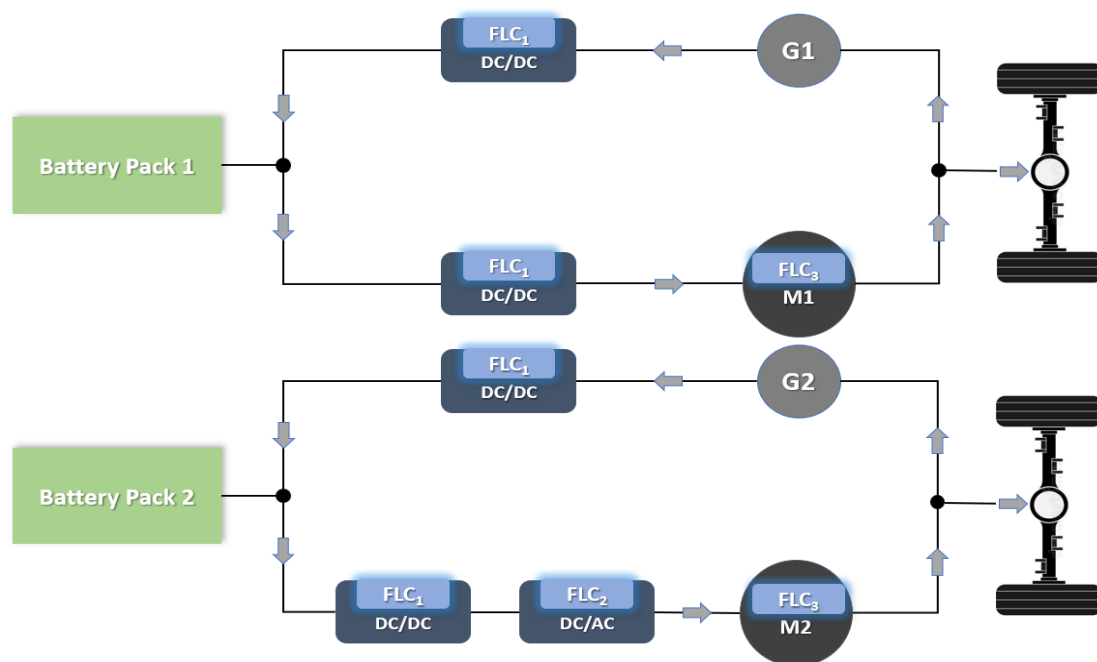
Εικόνα 6.5.6: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου e , ce και της συνάρτησης συμμετοχής εξόδου m_d

Διευκρινίζεται ότι για την κατασκευή των ελεγκτών, χρησιμοποιήθηκε η τριγωνική συνάρτηση (trimf), η μέθοδος συμπερασμού Mandami συμπεριλαμβανομένου των τελεστών max/min και ένας αλγόριθμος από-ασαφοποίησης κεντρικής τιμής (COA). Επιπλέον, μια βάση κανόνων 5 παραμέτρων χρησιμοποιείται για τις συναρτήσεις συμμετοχής των FLC₁, FLC₂ και FLC₃ [51]. Παράδειγμα χρήσης ενός 5x5 συστήματος κανόνων παρουσιάζεται παρακάτω:

ce/e	PB	PS	ZO	NS	NB
PB	NB	NB	NB	NS	ZO
PS	NB	NB	NS	ZO	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
NS	NS	ZO	PS	PB	PB
NB	ZO	PS	PB	PB	PB

Πίνακας 6.5: Μορφή μιας 5x5 βάσης κανόνων

Προηγουμένως αναφέρθηκε ότι χρησιμοποιήθηκαν τρία είδη ελεγκτών στην παρούσα σχεδίαση. Ωστόσο, στο σύνολο της η προτεινόμενη πλατφόρμα μετρά πέντε ελεγκτές. Συγκεκριμένα, διακρίνονται 4 πανομοιότυποι ελεγκτές τύπου FLC₁, ενσωματωμένοι σε μετατροπείς DC/DC και ένας ελεγκτής τύπου FLC₂, τοποθετημένος σε αντιστροφέα DC/AC. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται 2 ελεγκτές τύπου FLC₃, που ενσωματώνονται στο σύστημα καθενός από τους ηλεκτροκινητήρες. Αναλυτικά, έχουμε τα εξής:



Εικόνα 6.5.6: Σχεδιαστική απεικόνιση της πλατφόρμας με σκοπό την παρουσίαση της χρήσης του κάθε τύπου ελεγκτή

Παρατηρώντας την παραπάνω σχεδίαση ξεχωρίζουν τα γαλάζια πλαίσια των FLC. Συγκεκριμένα, στο άνω μισό του σχήματος, φαίνεται η χρήση ενός μετατροπέα dc/dc για την αντιστοίχιση της τάσης τροφοδοσίας των συσσωρευτών με τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (Brushless DC Motor - BLDC). Στο μετατροπέα αυτόν τοποθετείται το FLC₁ για τον έλεγχο της τάσης της μπαταρίας. Έπειτα, ο ίδιος ο κινητήρας BLDC ενσωματώνει τον ελεγκτή FLC₃ για να προσδιορίσει καλύτερα τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Στη συνέχεια, το δυναμό στην έξοδο του παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία προτού επιστρέψει στη συστοιχία μπαταριών, εξισορροπείται αντίστοιχα για να είναι στην προδιαγραφόμενη τάση της.

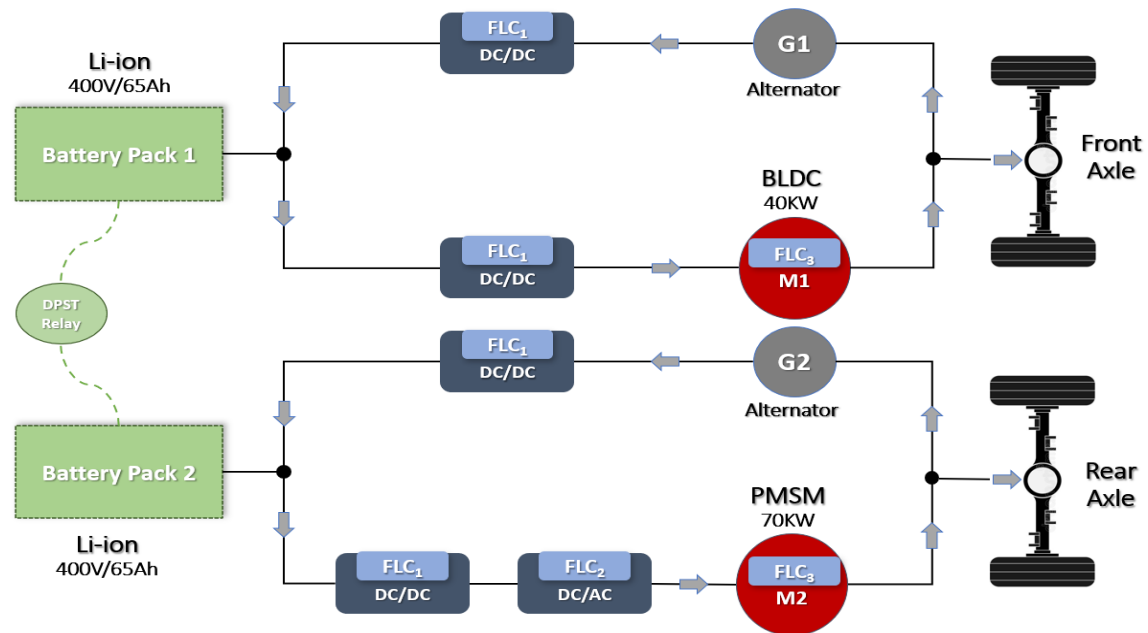
Αντιστοίχως, η σχεδίαση του κάτω μισού σχήματος δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές, με την κύρια διαφοροποίηση να έγκειται στην ύπαρξη ενός αντιστροφέα, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ του dc/dc μετατροπέα και του κινητήρα. Ο αναφερόμενος αντιστροφέας είναι απαραίτητος προκειμένου να τροφοδοτηθεί ο 2^{ος} κινητήρας της πλατφόρμας με εναλλασσόμενη τάση, αφού πρόκειται για έναν σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM). Ο inverter περιλαμβάνει έναν ασαφή ελεγκτή FLC₂, με σκοπό να εντοπίζει την εκάστοτε θέση του ρεύματος σε σχέση με την τάση. Με τον τρόπο αυτό, θα είναι σε θέση να ρυθμίσει τη αναπτυσσόμενη ροπή στα επιθυμητά επίπεδα [52].

6.6 Σύνοψη προτεινόμενης σχεδίασης

Στο στάδιο αυτό θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή σε όσα αναλύθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες του κεφαλαίου αυτού. Έπειτα, θα παρουσιαστεί η μορφή του συστήματος κίνησης στην τελική της μορφή, ενσωματώνοντας όλα τα επιμέρους στοιχεία.

Η προτεινόμενη πλατφόρμα σχεδιάστηκε με σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση ισχύος, αφενός μέσω του συστήματος ανάκτησης ενέργειας του δυναμό, αφετέρου μέσω της χρήσης των ασαφών ελεγκτών για τη διαχείριση των ηλεκτροκινητήρων. Φυσικά, το σύνολο των ενεργειών αυτών, είχε ως πρωταρχικό μέλημα την αύξηση της αυτονομίας του οχήματος και την ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης του κατά WLTP.

Στο σημείο αυτό, ακολουθεί μια ολοκληρωμένη απεικόνιση του προτεινόμενου συστήματος κίνησης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.



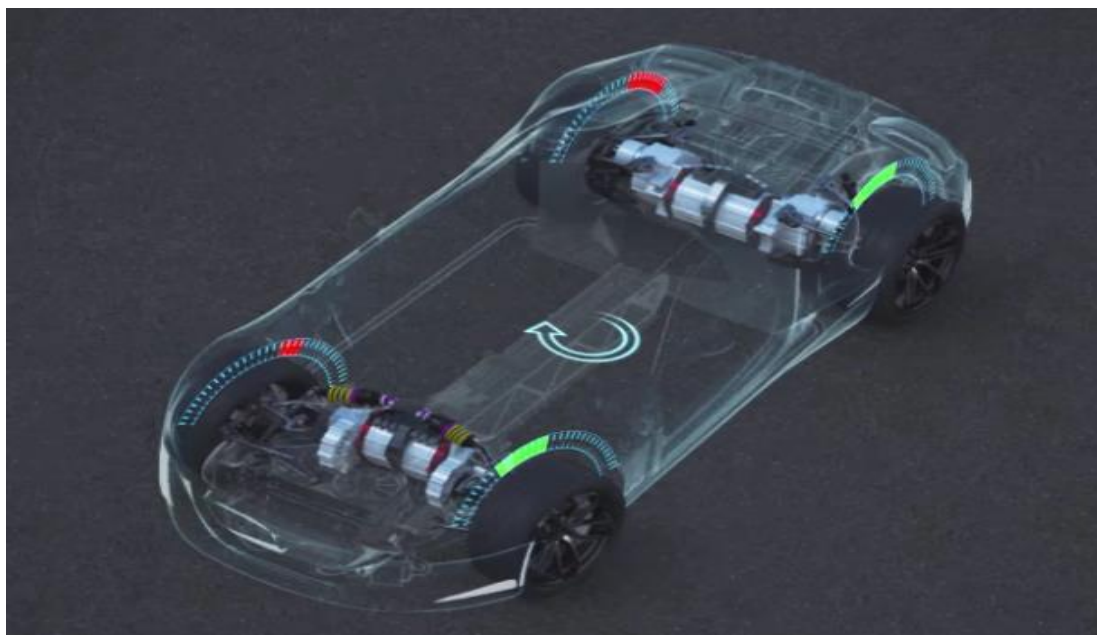
Εικόνα 6.5.7: Προτεινόμενη σχεδίαση συστήματος κίνησης ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Συνοψίζοντας, το σύστημα κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος χρησιμοποιεί δύο ηλεκτροκινητήρες για την κίνηση του · έναν κινητήρα PMSM ισχύος 70kw και έναν κινητήρα BLDC ισχύος 40kw. Η εφαρμογή των κινητήρων υλοποιήθηκε με την τοποθέτηση του BLDC κινητήρα στον εμπρός άξονα του οχήματος, ενώ του PMSM κινητήρα στον πίσω άξονα του αυτοκινήτου. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια τετρακίνητη πλατφόρμα ηλεκτρικού οχήματος με έναν κινητήρα ανά άξονα.

Έπειτα, οι κινητήρες αυτοί ελέγχονται από ένα ευφύες σύστημα FLC, το οποίο δομείται από 7 επιμέρους ελεγκτές. Οι ελεγκτές αυτοί προσφέρουν δυνατότητες ελέγχου στα κινητήρια συστήματα, καθώς και τη ικανότητα έξυπνης εναλλαγής μεταξύ των δύο ηλεκτροκινητήρων. Έπειτα, ένα ποσό του μηχανικού έργου, που παράγεται στην έξοδο καθενός από τους κινητήρες, επιστρέφει στους συσσωρευτές, μέσω της καθοδήγησης ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας που παρεμβάλλεται. Η εν λόγω διάταξη λειτουργεί μέσω ενός δυναμό για την απαραίτητη μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος, ένα σύνολο δύο συστοιχιών ιόντων λιθίου αναλαμβάνει την τροφοδοσία του οχήματος με συνολική χωρητικότητα 52 Kwh, ή ισοδύναμα 400V/135Ah. Παράλληλα, μεταξύ των συσσωρευτών βρίσκεται ένα σύστημα αλληλεπίδρασης τους με σκοπό την αυτόνομη φόρτιση και τον βέλτιστο ισομοιρασμό των αναγκών ισχύος, ώστε να μην υπερφορτώνεται μόνο η πρώτη ή η δεύτερη συστοιχία μπαταριών κατά τη λειτουργία.. Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκε ένας ηλεκτρονόμος τύπου DPST.

Κεφάλαιο 7ο: Μελλοντικοί Στόχοι

Η προτεινόμενη σχεδίαση συστήματος κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος παρουσιάζει ορισμένα καινοτόμα σημεία και μερικές πρωτοποριακές τεχνικές επέκτασης της αυτονομίας του. Ωστόσο, κάθε νέα σχεδίαση χρήζει περαιτέρω έρευνας, μελέτης και βελτίωσης. Ειδικά στο χώρο της ηλεκτροκίνησης, στα χρόνια που διανύουμε γίνονται αλματώδεις πρόοδοι καθημερινά και η συνεχής εξέλιξη κάθε καινούριου συστήματος είναι αναπόφευκτη και αναγκαία.



Εικόνα 7.1: Το Concept One της κροατικής Rimac με την ενσωμάτωση 4 ηλεκτρικών κινητήρων, έναν σε κάθε άξονα

Προσθήκη ενός επιπλέον κινητήρα

Σε μελλοντικό χρόνο ένας πρώτος στόχος θα ήταν η χρήση ενός ακόμη κινητήρα, δηλαδή ένα σύνολο τριών κινητήρων, όπως ήδη συμβαίνει με την περίπτωση του κορυφαίου ηλεκτροκίνητου μοντέλου της Audi, το επονομαζόμενο «E-tron». Η επιλογή αυτή θα απευθυνόταν πιθανά σε ένα πιο ογκώδες σκελετό οχήματος, οπότε συνοδευτικά θα ήταν απαραίτητες κάποιες τροποποιήσεις στα χαρακτηριστικά του οχήματος. Βέβαια είναι δεδομένο πως μια τέτοια πλατφόρμα θα άλλαζε ολοκληρωτικά την ισορροπία της σχεδίασης (το «ζύγισμα» της), καθώς το βάρος του οχήματος θα μετατοπιζόταν σημαντικά και θα χρειαζόταν ιδιαίτερη μελέτη για την εν λόγω εφαρμογή. Παράλληλα, με μια τέτοια προσθήκη θα έπρεπε να μεριμνήσουμε και για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, καθώς οι ανάγκες για τροφοδοσία θα ήταν

αυξημένες. Από την άλλη πλευρά, τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός επιπλέον κινητήρα θα προσέφερε καλύτερο έλεγχο της ροπής που αναπτύσσεται σε εμπρός και οπίσθιο μέρος και κατά συνέπεια καλύτερο έλεγχο της πρόσφυσης. Η σχεδίαση αυτή θα χρησιμοποιούσε δύο κινητήρες στο πίσω άξονα και έναν στον μπροστά άξονα. Σε χαμηλές και μεσαίες απαιτήσεις ισχύος και στα ανάλογα οδηγικά προφίλ, ο εμπρός κινητήρας θα είχε πιθανά μηδενικό ποσοστό εμπλοκής, αφήνοντας τον πίσω άξονα να κινεί το όχημα.

Ενσωμάτωση FCM για καθορισμό ποσοστού εμπλοκής

Σε συνδυασμό, με την προσθήκη ενός κινητήρα, αλλά και ανεξάρτητα από τον στόχο αυτόν, μια ακόμα ενέργεια που πρόκειται να πραγματοποιηθεί σε επόμενο χρόνο είναι η ενσωμάτωση μερικών ακόμη FLC ελεγκτών. Σκοπός της ενέργειας αυτής, ο προσδιορισμός αφενός του βέλτιστου ποσοστού εμπλοκής κάθε ηλεκτροκινητήρα και αφετέρου της αποδοτικότερης εναλλαγής ανάμεσα σε αυτούς. Ο FLC ελεγκτής αυτός θα λαμβάνει υπόψιν του τα οδηγικά προφίλ του WLTP κύκλου κατανάλωσης, καθώς και την κλίση του οχήματος που μετρήθηκε στο Κεφάλαιο 5^ο. Βάσει αυτών, θα είναι σε θέση να αντιστοιχίσει τα προφίλ οδήγησης – και άρα τις απαιτήσεις ισχύος – με κάθε κινητήρα σε συγκεκριμένο ποσοστό εμπλοκής.

Όπως είναι αναμενόμενο, η μελλοντική αυτή σχεδίαση με τον συνδυασμό τριών κινητήρων και την προσθήκη ορισμένων συμπληρωματικών FLC ελεγκτών, θα αυξήσει δραστικά την αυτονομία του οχήματος, με την ταυτόχρονη πτώση της κατανάλωσης.

Χρήση υπερπυκνωτών για σύστημα αναγεννητικής πέδησης και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Επιπλέον, υπάρχουν μελλοντικές βλέψεις σχετικά με την τοποθέτηση ενός συστήματος αναγεννητικής πέδησης με χρήση υπερπυκνωτών (Supercapacitors). Όπως και οι μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές είναι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες παρέχουν ικανότητες ταχύτατης φόρτισης και απελευθέρωσης μεγάλου ποσού ισχύος. Στην σημερινή αγορά, δεν είναι σε θέση να ανταγωνιστούν τις συστοιχίες ιόντων λιθίου ως προς την ενεργειακή πυκνότητά τους, αλλά η χωρητικότητα τους εξελίσσεται διαρκώς. Μάλιστα, χρησιμοποιούνται ήδη ως βοηθητικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας τόσο σε υβριδικά/ηλεκτρικά μοντέλα για το σύστημα αναγεννητικής πέδησης, όσο και σε ορισμένα αυτοκίνητα με MEK για τα συστήματα start/stop (χαρακτηριστικό παράδειγμα το Mazda 6). Αυτή τη στιγμή κατά κύριο λόγο

χρησιμοποιούνται ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας για το σύστημα αναγεννητικής πέδησης [53].



Εικόνα 7.2 Οι υπερπυκνωτές της Maxwell Technologies, εταιρεία που πρόσφατα εξαγοράστηκε από την Tesla Motors

Η χρήση υπερπυκνωτών είναι μια ιδέα που δείχνει να είναι το επόμενο βήμα από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Μάλιστα, η αμερικανική εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικών οχημάτων Fisker Automotive πρόκειται να λανσάρει σύντομα το νέο μοντέλο της, ονόματι «Emotion», το οποίο θα τροφοδοτείται μόνο από υπερπυκνωτές γραφενίου και θα έχει μια ενδεικτική αυτονομία των 640 χιλιομέτρων. Ταυτόχρονα, η Tesla πριν λίγο καιρό εξαγόρασε την Maxwell Technologies, μεγάλη εταιρεία στο χώρο της κατασκευής υπερπυκνωτών. Οι κινήσεις αυτές σηματοδοτούν μια παγκόσμια τάση της αγοράς για σταδιακή αντικατάσταση των συστοιχιών Li-ion και φέρνει τους υπερπυκνωτές στο προσκήνιο.

Έτσι, σε συνδυασμό με το σύστημα αναγεννητικής πέδησης με υπερπυκνωτές, υπάρχει και η σκέψη για την τοποθέτηση ενός υπερπυκνωτή για τη μερική αντικατάσταση της μίας, εκ των δύο υπαρχόντων συστοιχιών μπαταρίας (ή και συμπληρωματικά με τις υπάρχουσες δύο μπαταρίες), φυσικά με τον παράλληλο επανυπολογισμό χωρητικότητας της εναπομείνουσας συστοιχίας. Ο υπερπυκνωτής θα δρα βοηθητικά και συνδυαστικά με την/τις συστοιχίες ιόντων λιθίου για την ταχύτερη απόδοση της ενέργειας. Η αναφερόμενη προσθήκη θα βελτιώσει ραγδαία τον χρόνο φόρτισης του οχήματος σε σχέση με τη χρήση των κλασικών συσσωρευτών, ενώ παράλληλα θα εγγραφεί τη μακροζωία του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μιας και ένας υπερπυκνωτής έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.



Εικόνα 7.3: Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ στο αμιγώς ηλεκτρικό μοντέλο της Toyota, το Prius EV

Τοποθέτηση κινούμενων φωτοβολταϊκών πάνελ

Τέλος, σε μεταγενέστερο χρόνο πρόκειται να πραγματοποιηθεί μια μελλοντική μελέτη για ένα πρωτοπόρο σύστημα ημι-αυτόνομης φόρτισης του οχήματος μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ (PV). Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία γύρω από τα φωτοβολταϊκά παρουσιάζει ανοδική πορεία, έχοντας επιφέρει πάνελ με ιδιαίτερα λεπτό πάχος και μειωμένο όγκο. Κατά συνέπεια, έχουν διευρύνει τη χρήση τους σε ορισμένες πλατφόρμες ηλεκτρικής κίνησης, με πιο πρόσφατο παράδειγμα το αμιγώς ηλεκτρικό Prius της Toyota, που διαθέτει πάνελ σε εμπρός και πίσω μέρος του αμαξώματος, όπως και στην οροφή. Ο στόχος για την προτεινόμενη πλατφόρμα μας είναι μία τέτοιας μορφής τοποθέτηση για την υποβοήθηση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ [54]. Όμως πως ακριβώς θα λειτουργήσει η ιδέα αυτή; Τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν αποδείξει ότι μπορούν να επιφέρουν σημαντική αύξηση της αυτονομίας του οχήματος σε μια μέρα με συνθήκες ηλιοφάνειας, αντιθέτως η απόδοσή τους μειώνεται ραγδαία τις ημέρες που ο ουρανός είναι συννεφιασμένος ή όταν επικρατούν εξωτερικές συνθήκες ιδιαίτερα υψηλής θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό, θα τοποθετηθεί ένα σύνολο από αισθητήρες στις επιφάνειες των PV, για την ιχνηλάτηση της ηλιακής ακτινοβολίας και τον βέλτιστο προσανατολισμό τους προς το σημείο εντονότερης ακτινοβολίας. Να σημειωθεί ότι, μικρά πτερύγια θα επιτρέπουν μία μικρή ελευθερία κινήσεων των πάνελ σύμφωνα με το αισθητήριο σύστημα. Έπειτα, αφού συλλέγονται τα δεδομένα αυτά μέσω του PV συστήματος, η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια θα διανέμεται προς το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας των συστοιχιών Li-ion και υπερπυκνωτών. Ανάμεσα τους θα παρεμβάλλεται ένα σύστημα ασαφών γνωστικών δικτύων (FCM) για την βέλτιστη εναλλαγή φόρτισης των συστοιχιών από τα φωτοβολταϊκά και τους υπερπυκνωτές που ειπώθηκε παραπάνω ότι επρόκειτο να ενσωματωθούν στην εξελιγμένη σχεδίαση.

Βιβλιογραφία

- [1] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez και J. M. Marquez-Barja, «A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges,» *MDPI*, pp. 372-404, 28 Ιανουαρίου 2021.
- [2] K. Connolly, «German court rules cities can ban diesel cars to tackle pollution,» *The Guardian*, 2018.
- [3] J. d. Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters και M. Leijon, «Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review,» *IEEE*, pp. 475 - 484, 1 Δεκεμβρίου 2011.
- [4] A. Loganayaki and R. B. Kumar, "Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications," *IEEE*, 15 Μαρτίου 2019.
- [5] D. Pund and D. Sherman, "1915 Ford Model T vs. 2013 Tesla Model S: Race of the Centuries," *CAR AND DRIVER*, Ιανουάριος 2014. [Online]. Available: <https://www.caranddriver.com/features/a15112705/2013-tesla-model-s-vs-1915-ford-model-t-race-of-the-centuries-feature/>.
- [6] R. Matulka, «The History of the Electric Car,» U.S. Department of Energy, Σεπτέμβριος 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>.
- [7] Ά. Μέτσιου, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ-ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ,» Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη, 2018.
- [8] T. Sasaki, Y. Ukyo and P. Novák, "Memory effect in a lithium-ion battery," *Nature Materials*, Απρίλιος 2013.
- [9] Clean Technica, "We should thank the GM ev1 and its death for Tesla," *Clean Technica*, 10 Φεβρουαρίου 2020. [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/2020/02/10/we-should-thank-the-gm-ev1-and-its-death-for-tesla/>.
- [10] K. A. Wilson, "Worth the Watt: A Brief History of the Electric Car, 1830 to Present," *Car And Driver*, 2018. [Online]. Available: <https://www.caranddriver.com/features/g15378765/worth-the-watt-a-brief-history-of-the-electric-car-1830-to-present/>.
- [11] Edison Tech Center, "Thomas Davenport: Inventor of the DC electric motor," 2010. [Online]. Available: <http://edisontechcenter.org/DavenportThomas.html>.
- [12] Wikipedia, "Electric motor," 2021. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor. [Accessed 2020].
- [13] J. C. Stephen και Θ. Θεοδουλίδης, *Ηλεκτρικές μηχανές ac-dc*, 2019.

- [14] Δ. Τσιαμήτρος, Β. Μολασιώτης και Ν. Σκραπαρλής, Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς και Εναλλασσόμενου Ρεύματος, Θεσσαλονίκη, 2013.
- [15] J. Owen, "Electric Motor \ DC Motor," Ιούνιος 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=CWuIQ1ZSE3c>.
- [16] Drone Nodes, "How Brushless Motor Works," 2020. [Online]. Available: <https://dronenodes.com/drone-motors-brushless-guide/>.
- [17] Matlab, «Motor Control, Part 1: An Introduction to Brushless DC Motors,» Αύγουστος 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=gNpoTPzEkco>.
- [18] S. Sakunthala, R. Kiranmayi and P. N. Mandadi, "A study on industrial motor drives: Comparison and applications of PMSM and BLDC motor drives," *IEEE*, 1 Αυγούστου 2017.
- [19] Tesla Research, "AC the induction motor," 2015. [Online]. Available: <https://teslaresearch.jimdofree.com/ac-the-induction-motor/>.
- [20] S. Deffree, "Transistor caps off miracle month december 23 1947," Δεκέμβριος 2019. [Online]. Available: <https://www.edn.com/transistor-caps-off-miracle-month-december-23-1947/>.
- [21] Electrical4U, "Induction Motor Rotor," Οκτώβριος 2020. [Online]. Available: <https://www.electrical4u.com/induction-motor-rotor/>.
- [22] LearnEngineering, "Electric Motors / 3 Phase Induction Motors," 31 Αυγούστου 2017. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o.
- [23] Electric Vehicles, "Different types of Motors used in Electric Cars & EVs," 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=OhizH7geedQ>.
- [24] a. A. Zarma, A. A. Galadima and M. A. Aminu, "Review of Motors for Electric Vehicles," *Journal of Scientific Research & Reports*, pp. 1-6, Ιούνιος 2019.
- [25] J. Reimers, L. Dorn-Gomba, C. Mak and A. Emadi, "Automotive Traction Inverters: Current Status and Future Trends," *IEEE Magazine*, Φεβρουάριος 2019.
- [26] Θ. Τούτσας, «Study and construction of DC/DC converter,» Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ, Αθήνα, 2016.
- [27] Wikipedia, "Power electronics," 2021. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_electronics. [Accessed 2021].
- [28] Wiki Engineer, "Power Electronics History," 2012. [Online]. Available: <http://www.wikiengineer.com/Electrical/PowerElectronicsHistory>. [Accessed 2021].
- [29] All About Engineering, "Thyristor | Its Working, Types & Applications," 2020. [Online]. Available: <https://allabouteng.com/thyristor-working-types-applications/>.
- [30] Ι. Κιοσκερίδης, Ηλεκτρονικά Ισχύος, 2008.

- [31] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο / Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, «OpenCourse: Intro to Transistors,» 2015.
- [32] A. Malvino και D. Bates, Ηλεκτρονική, 2016.
- [33] Δ. Γ. Πυλαρινός, Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος με χρήση MATLAB και SIMULINK, Κρήτη: Ηώς Πολιτιστικός Σύλλογος, 2015.
- [34] Δ. Μακρυγεωργάκη και Κ. Σωτήρη, «APPLICATIONS OF POWER ELECTRONICS IN INDUSTRY,» ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ, Αθήνα, 2017.
- [35] Navixy, "Fuzzy logic for advanced transportation," Σεπτέμβριος 2020. [Online]. Available: <https://talks.navixy.com/reviews/fuzzy-logic-for-advanced-transportation/>.
- [36] Κ. Ντόντης, «Έλεγχος DC Κινητήρα με Χρήση Συμβατικού PI και Fuzzy-PI Ελεγκτών,» ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ, Αθήνα, 2020.
- [37] Β. Παπαδόπουλος και Χ. Τζιμόπουλος, FUZZY LOGIC - WITH APPLICATION IN ENGINEERING, 2013.
- [38] M. Kumar, "An Efficient Expert System Generator for Qualitative Feed-Back Loop Analysis," *Research Gate*, Απρίλιος 2012.
- [39] T. S. Hong, D. Nakhaeinia and B. Karasfi, "Application of Fuzzy Logic in Mobile Robot Navigation," *Research Gate*, Μάρτιος 2012.
- [40] Ε. Νούση, «ΜΕΘΕΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΗΝ ΛΟΓΙΚΗ ΤΗΣ ΑΣΑΦΕΙΑΣ,» ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, Αθήνα, 2007.
- [41] Wltp Facts, "What is wltp how will it work," 2020. [Online]. Available: <https://www.wltpfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/>.
- [42] Car And Driver, «WLTP vs NEDC: Οι αλλαγές που φέρνει ο νέος κύκλος μετρήσεων,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.caranddriver.gr/eidiseis/arthro/wltp_vs_nedc_ti_allages_fernei_o_neos_kyklos_metriseon-7773461/.
- [43] T. Pollard, "WLTP: Europe's range and fuel economy test explained," Car Magazine, 10 Ιουνίου 2019. [Online]. Available: <https://www.carmagazine.co.uk/car-news/tech/what-is-wltp-worldwide-harmonised-light-vehicle-test-procedure-explained/>.
- [44] Ι. Ι. Μπέη, «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ WLTC,» ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, Αθήνα, 2019.
- [45] E. G. Giakoumis and A. T. Zachiotis, "Investigation of a Diesel-Engined Vehicle's Performance and Emissions during the WLTC Driving Cycle—Comparison with the NEDC," *MDPI*, Φεβρουάριος 2017.

- [46] Θ. Αρζόγλου, «Σχεδίαση αυτοκινήτου και μελέτη αεροδυναμικών φορτίων,» ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ, Σύρος, 2018.
- [47] C. Rossi, D. Pontara, M. Bertoldi and D. Casadei, "Two-motor, two-axle traction system for full electric vehicle," *World Electric Vehicle Journal Vol. 8 - 2016 WEVA*, 2016.
- [48] A. Doyle και T. Muneer, «Traction energy and battery performance modelling,» σε *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, 2017, pp. 93-124.
- [49] Ι. Τζώρτζης, «Σχεδίαση συστήματος ανάκτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την πέδηση ηλεκτρικών οχημάτων,» Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2016.
- [50] A. T. Alexandridis και J. J. Malaygiorgou, «Fuzzy Logic Control of Electric Vehicles: Design and Analysis Concepts,» *Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2017.
- [51] T. L. KOTTAS, A. D. KARLIS και Y. S. BOUTALIS, «A Novel Control Algorithm for DC Motors Supplied by PVs Using Fuzzy Cognitive Networks,» *IEEE Access*, 4 Μάιος 2018.
- [52] T. L. Kottas, Y. S. Boutalis και A. D. Karlis, «New Maximum Power Point Tracker for PV Arrays Using Fuzzy Controller in Close Cooperation With Fuzzy Cognitive Networks,» *IEEE Magazine*, Σεπτέμβριος 2006.
- [53] M. Horn, J. MacLeod, M. Liu, J. Webb και N. Motta, «Supercapacitors: A new source of power for electric cars?,» *Science Direct: Economic Analysis and Policy*, pp. 93-103, Μάιος 2019.
- [54] A. S. Rodriguez, T. d. Santana, I. MacGill, N. Ekins-Daukes και A. Reinders, «A feasibility study of solar PV-powered electric cars using an interdisciplinary modeling approach for the electricity balance, CO2 emissions, and economic aspects: The cases of The Netherlands, Norway, Brazil, and Australia,» *EU PVSEC*, 14 Νοεμβρίου 2019.
- [55] N. Hashemnia and B. Asaei, "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles," *IEEE*, 6 Σεπτέμβριος 2008.