



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**Διαχείριση Ενέργειας Ηλεκτρικού
Οχήματος με Ηλεκτρονικό Μετατροπέα
Ισχύος Πολλαπλών Θυρών**

Μεταβιτσιάδης Ιωάννης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος

Χανιά Φεβρουάριος 2024

Περίληψη

Ένα από τα σημαντικότερα σύμβολα του σύγχρονου πολιτισμού είναι το αυτοκίνητο, το οποίο για περισσότερο από έναν αιώνα επιτρέπει την μετακίνησή σε κοντινές και μακρινές αποστάσεις. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια αυξάνεται η προσοχή στην περιβαλλοντική ρύπανση και στην ανησυχία για την εξάντληση των αποθεμάτων του πετρελαίου παγκοσμίως, με αποτέλεσμα τη στροφή προς τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά αυτοκίνητα, τα οποία θεωρούνται βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις, έναντι των βενζινοκίνητων οχημάτων. Παρά το γεγονός ότι τα πλεονεκτήματά τους είναι πολλαπλά, ο χρόνος φόρτισης, το υψηλό κόστος και η ενεργειακή πυκνότητα αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα ενάντια στην άμεση εξάπλωσή τους.

Παράλληλα με τις εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων, έχουν αναπτυχθεί καινοτόμες τοπολογίες ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος πολλαπλών θυρών με κύριο στόχο την ελάττωση του κόστους και της πολυπλοκότητας στον έλεγχο των συμβατών μετατροπέων που χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχες εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία μοντελοποιείται ένα ηλεκτρικό όχημα κυψέλης καυσίμου με την χρήση ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος πολλαπλών θυρών. Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση του οχήματος γίνεται στο περιβάλλον του Simulink του προγράμματος της MATLAB.

Κύριο θέμα της εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας το οποίο εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του οχήματος καθώς και την αποδοτικότερη ενεργειακή διαχείριση του. Αναλυτικότερα γίνεται χρήση ενός μετατροπέα πολλαπλών θυρών και αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος για τον έλεγχο της λειτουργίας του. Επιπλέον δημιουργήθηκε ένα σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας με σκοπό να μην ξεπερνά τα όρια φόρτισης και εκφόρτισης. Για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων το όχημα ακολουθεί την ταχύτητα ορισμένων κύκλων οδήγησης.

Μετά το τέλος των προσομοιώσεων, παρουσιάζεται η λειτουργία του οχήματος, ενώ με την χρήση διαγραμμάτων παρουσιάζεται η λειτουργία του μετατροπέα, της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και του ηλεκτροκινητήρα. Από τα αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η χρήση του μετατροπέα πολλαπλών θυρών διασφαλίζει την σταθερή τάση στη έξοδο του και την ομαλή εναλλαγή της ροής ισχύος μεταξύ των θυρών του.

Abstract

An important symbol of modern civilization is the automobile, which for more than a century has allowed transportation over short and long distances. However, in recent years, attention to environmental pollution and concerns regarding the depletion of oil reserves has increased worldwide, resulting in a shift of interest towards electric and hybrid vehicles, which are considered viable alternatives to gasoline-powered vehicles. Despite the fact that their advantages are multiple, charging time, high cost and energy density are the main disadvantages that slow-down their immediate spread.

Alongside the developments regarding electric and hybrid vehicles, innovative topologies of multi-port power converters have been designed targeting the reduction of the cost and complexity of controlling compatible converters applied in corresponding renewable energy applications.

In this thesis, a fuel cell electric vehicle is modeled using a multiport power electronic converter. Modeling and simulation is conducted in the Simulink environment of MATLAB.

The primary focus of the thesis revolves around developing an energy management system which ensures the smooth operation of the vehicle along with its efficient energy management. More thoroughly, a multiport converter is used and an algorithm is developed to control its operation. In addition, a battery management system was designed with the purpose of ensuring that the battery remains within its charging and discharging limits. To achieve reliable results, the vehicle conforms to the speed of certain driving cycles.

After the simulations, the vehicle's operation is presented, while the operation of the inverter, fuel cell, battery and electric motor is presented through the use of diagrams. Based on the results, it can be deduced that the use of the multi-port converter ensures a constant output voltage and the smooth switching of power flow between its ports.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 Εισαγωγή.....	7
2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	9
2.1 Ηλεκτρικά αυτοκίνητα	10
2.1.1 Ιστορική αναδρομή	10
2.1.2 Εννοιολογική προσέγγιση ηλεκτρικού οχήματος	11
2.1.3 Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων	11
2.1.4 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων	12
2.2 Δομή ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	14
2.2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2.2 Ηλεκτρικός κινητήρας	15
2.2.3 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος.....	16
2.2.4 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	16
2.2.5 Ηλεκτροχημικός συσσωρευτής (μπαταρία)	17
2.2.6 Κυψέλες καυσίμου (Fuel cell).....	18
3. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΘΥΡΩΝ	20
3.1 Μετατροπέας ισχύος πολλαπλών θυρών	21
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	28
4.1 Ηλεκτροκινητήρας.....	29
4.2 Vehicle dynamics.....	31
4.3 Driver	32
4.4 Converter	35
4.4.1 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	36
4.4.2 Κυψέλη καυσίμου	36
4.4.3 Fuel Rate Regulator	37
4.5 Control Block	39
4.6 Συνολικό Μοντέλο Οχήματος	43
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	44
5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	45
5.1.1 Κύκλος οδήγησης NEDC	45
5.1.2 Κύκλος οδήγησης FTP	52
5.1.3 Κύκλος οδήγησης WLTP Class 3.....	58

5.1.4	Κύκλος οδήγησης ArtMw 150	62
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί έντονη ανησυχία, συζήτηση κι ευαισθητοποίηση για τη ραγδαία αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των αρνητικών αποτελεσμάτων που επιφέρει στη δημόσια υγεία, αλλά και στην κλιματική αλλαγή του πλανήτη. Ταυτόχρονα, η υπερβολική κατανάλωση των ορυκτών πόρων οδήγησε προς αναζήτηση πιο εναλλακτικών και «πράσινων» λύσεων. Από αυτές τις εξελίξεις, δε θα μπορούσε να λείπει και η αυτοκινητοβιομηχανία.

Σήμερα, καθώς η αυτοκινητοβιομηχανία εισέρχεται σε μια νέα φάση ανάπτυξης, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι μια θετικά υποσχόμενη μετάβαση στον τομέα των μετακινήσεων, με τεράστια ενεργειακά και περιβαλλοντολογικά οφέλη.

Αναλυτικότερα, αυτά τα παγκόσμια ζητήματα, αναγκάζουν την τεχνολογία κινητήρων της αυτοκινητοβιομηχανίας να αλλάξει τη βάση της: από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) στους ηλεκτρικούς κινητήρες (electric motors). Αυτή η στροφή, έπειτα από περισσότερο ενός αιώνα κυριαρχίας του κινητήρα εσωτερικής καύσης στην αυτοκινητοβιομηχανία, προκαλεί μια σειρά τροποποιήσεων και δημιουργίας νέων σχεδίων [14].

Μάλιστα, πολλές χώρες χρηματοδοτούν σημαντικά ερευνητικά προγράμματα που στοχεύουν στην ανάπτυξη και τελειοποίηση της τεχνολογίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, συμπεριλαμβανομένων των προηγμένων κινητήρων υψηλής απόδοσης, των μπαταριών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και μακράς διάρκειας, των επαναφορτιζόμενων κυψελών και κυψελών καυσίμου, καθώς και των πρωτοποριακών συστημάτων διαχείρισης ισχύος και ελέγχου αναγεννητικής πέδησης [8].

Παραδοσιακά, στα ηλεκτρικά οχήματα, αλλά και στις υπόλοιπες εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η χρήση πολλαπλών μετατροπών ισχύος είναι απαραίτητη. Κάθε πηγή ενέργειας συνδέεται ξεχωριστά με έναν συμβατό μετατροπέα ισχύος με σκοπό την αξιόπιστη μεταφορά ισχύος της. Βέβαια, από αυτή την χρήση προκύπτουν αρκετά μειονεκτήματα, όπως η χρήση πολλών εξαρτημάτων, το υψηλό κόστος, τα περισσότερα στάδια μετατροπής που απαιτούνται και η πολυπλοκότητα του ελέγχου του συστήματος, καθώς απαιτείται τοπικός έλεγχος για τον ελεγκτή του κάθε μετατροπέα ξεχωριστά.

Εξαιτίας αυτών των μειονεκτημάτων, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί καινοτόμες τοπολογίες και μοντέλα μετατροπών ισχύος πολλαπλών θυρών (multiport DC-DC converter).

Στους μετατροπείς ισχύος πολλαπλών θυρών γίνεται χρήση λιγότερων εξαρτημάτων, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους. Επιπλέον, ελαχιστοποιούνται τα βήματα μετατροπής και κυρίως, μειώνεται αισθητά η πολυπλοκότητα του ελέγχου του συστήματος καθώς υπάρχει ένας ενιαίος ελεγκτής για τον έλεγχο του μετατροπέα ισχύος πολλαπλών θυρών [2].

Στην παρούσα εργασία, υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB/Simulink ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε ηλεκτρικό όχημα με την χρήση μετατροπέα ισχύος πολλαπλών θυρών. Με την χρήση του προγράμματος της MATLAB/Simulink μοντελοποιείται ένα ηλεκτρικό όχημα με χρήση κυψέλης καυσίμου και η λειτουργία του προσομοιώνεται σε συνθήκες οδήγησης βασισμένες σε διεθνή πρότυπα. Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά των χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και της δομής τους, ενώ στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο μετατροπέας ισχύος που επιλέχθηκε. Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή των τμημάτων της μοντελοποίησης που αποτελούν το όχημα και παρουσιάζεται η διασύνδεση τους στο περιβάλλον του Simulink. Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και στο 6^ο Κεφάλαιο καταγράφονται τα συνολικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

2.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

2.1 Ηλεκτρικά αυτοκίνητα

2.1.1 Ιστορική αναδρομή

Η δημοτικότητα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, η ιστορία τους ξεκινάει περίπου δύο αιώνες πριν. Σημαντικό είναι να διευκρινιστεί, ότι η εφεύρεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου βασίζεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών, όπως η μπαταρία και ο ηλεκτρικός κινητήρας που ξεκινάει από τον 19^ο αιώνα [7], [8].

Με βάση τη βιβλιογραφία, δεν υπάρχει η δυνατότητα να αναφερθεί επακριβώς ποιος είναι ο εφευρέτης και ποια η χώρα προέλευσης, καθώς ευρωπαϊκά κράτη, όπως η Αυστροουγγαρία, η Ολλανδία αλλά και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής ασχολήθηκαν με την κατασκευή ηλεκτρικών αυτοκινήτων μικρής κλίμακας [22].

Αξιοσημείωτο όμως, αποτελεί το γεγονός ότι το 1827 ο Σλοβάκος-Ούγγρος Άνγος Jedlik κατασκεύασε το πρώτο, αργό αλλά βιώσιμο, ηλεκτροκινητήρα, εφοδιασμένο με στάτορα, ρότορα και μεταγωγέα και τον επόμενο χρόνο το χρησιμοποίησε για να τροφοδοτήσει ένα μικρό αυτοκίνητο [8].

Το 1835, ο Αμερικανός Thomas Davenport σχεδίασε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, το οποίο χρησιμοποιούσε μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, όπως και το αυτοκίνητο που κατασκεύασε ο Σκωτσέζος Robert Anderson (1832-1839), η μπαταρία του οποίου διαρκούσε μόνο για 6 χλμ. [13].

Ο Gaston Plante ανακάλυψε τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες οξέος – μόλυβδου το 1859 και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο επανήλθε στο προσκήνιο. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ο Thomas Edison ανακάλυψε και τοποθέτησε αλκαλικές μπαταρίες σε ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ενώ το 1890, ο Σκωτσέζος William Morrison κατασκεύασε εξολοκλήρου ένα ηλεκτρικό όχημα έξι επιβατών, με την δυνατότητα μετακίνησης επί 12 με 13 συνεχείς ώρες και μπορούσε να αναπτύξει ταχύτητα που έφτανε τα 22 km/h [8].

Ο παραγκωνισμός των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ξεκίνησε το 1913, όταν ήρθε στο προσκήνιο ο κινητήρας εσωτερικής καύσης του «Model T» του Henry Ford, το οποίο ήταν και το πρώτο αυτοκίνητο μαζικής παραγωγής. Αυτό, σε συνδυασμό με την ταχύτερη ανάπτυξη αυτοκινητόδρομων και οδικού δικτύου, αλλά και την εύρεση μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου

στην πολιτεία του Τέξας είχε ως συνέπεια την μείωση του κόστους των καυσίμων για τους καταναλωτές, καθιστώντας ασύμφορη την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων [8].

Σήμερα, η ποσότητα των αερίων ρύπων που εκπέμπονται από τα οχήματα βενζίνης στο περιβάλλον, έχουν ως αποτέλεσμα τη ρύπανση της ατμόσφαιρας που συνεπάγεται σοβαρές κλιματικές αλλαγές στον πλανήτη. Αυτό, αποτελεί σημαντικό προωθητικό παράγοντα στην προσπάθεια για αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικών αυτοκινήτων [3].

Καθώς ο τομέας της αυτοκίνησης εισέρχεται σε μια νέα φάση ανάπτυξης, κορυφαίες εταιρίες αυτοκινήτων στον κόσμο έχουν αρχίσει να εργάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικών μοντέλων αυτοκινήτων. Ο πολλαπλασιασμός τέτοιων εμπορικών σημάτων δείχνει ότι σύντομα πλησιάζουμε σε πλήρη στροφή προς το ηλεκτρικό αυτοκίνητο [13], αφού η μείωση στις εκπομπές ρύπων και η αύξηση της αυτονομίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, χάρη στην βελτίωση των μπαταριών συμβάλλουν σημαντικά στην προώθησή τους. Για αυτούς τους λόγους, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αναγνωρίζονται σήμερα ως τα αυτοκίνητα του μέλλοντος.

2.1.2 Εννοιολογική προσέγγιση ηλεκτρικού οχήματος

«Ηλεκτρικό ή ηλεκτροκίνητο όχημα (Η/Ο)», σύμφωνα με την ΚΥΑ 42863/438/27-05-2019, «είναι κάθε μηχανοκίνητο όχημα (αυτοκίνητο, μοτοποδήλατο, μοτοσυκλέτα, τρίκυκλα και ελαφρά τετράκυκλα οχήματα) που έχει εξοπλιστεί με σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το οποίο διαθέτει ως μετατροπέα ενέργειας τουλάχιστον μία μη-περιφερειακή ηλεκτρική μηχανή, εξοπλισμένο με ηλεκτρικό επαναφορτιζόμενο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας» [19].

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο (ΗΑ ή αλλιώς EV – electric vehicle) τροφοδοτείται με ενέργεια από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες, η οποία αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Από την πρώτη στιγμή που εμφανίστηκαν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είχαν μεγαλύτερο συντελεστή ενεργειακής απόδοσης συγκριτικά με τα αυτοκίνητα μηχανών εσωτερικής καύσης [18].

2.1.3 Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων

Τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίζονται σε αρκετές υποκατηγορίες, δεδομένου ότι τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται μαζικά πολλοί τύποι αυτοκινήτων που εντάσσονται στην οικογένεια των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, η βασική κατηγοριοποίηση γίνεται βάσει δύο κριτηρίων: α) των εκπομπών ρύπων, όπου υπάρχει ο διαχωρισμός μηδενικών ή χαμηλών ρύπων και β) την πηγή ενέργειας που διαθέτουν.

Με βάση την ΚΥΑ 42863/438/27-05-2019, τρεις είναι οι βασικές κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων:

- «Αμιγώς ηλεκτρικό όχημα» (BEV- Battery Electric Vehicle): όχημα που τροφοδοτείται από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες, χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε μια ενσωματωμένη μπαταρία, που επαναφορτίζεται με σύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω καλωδίου. Βασικό πλεονέκτημα, αποτελεί η απουσία κινητήρα εσωτερικής καύσης και κατά συνέπεια οι μηδενικές εκπομπές ρύπων. [4]
- «Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα εξωτερικής φόρτισης» (PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle): όχημα χαμηλών ρύπων το οποίο διαθέτει κινητήρα εσωτερικής καύσης (συνήθως με βενζίνη ή diesel) και ηλεκτρικό κινητήρα με μπαταρία που φορτίζεται από εξωτερική πηγή μέσω καλωδίου. Τα Plug-in υβριδικά αυτοκίνητα έχουν δύο λειτουργίες. Η πρώτη λειτουργία είναι πλήρως ηλεκτρική, κατά την οποία τόσο ο κινητήρας, όσο και η μπαταρία παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια για την λειτουργία του αυτοκινήτου. Η δεύτερη λειτουργία είναι η υβριδική, βάσει της οποίας γίνεται χρήση τόσο της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και καυσίμου όπως η βενζίνη. Αυτό αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημά τους, καθώς το όχημα μπορεί να κινείται αποκλειστικά ηλεκτρικά ή να κάνει χρήση καυσίμου όταν εκφορτιστεί η μπαταρία. [5].
- «Υβριδικό όχημα κυψέλης καυσίμου» (FCEV- Fuel Cell Electric Vehicle): όχημα που κάνει χρήση της τεχνολογίας «κυψελών υδρογόνου» για την διάθεση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλυτικότερα, η χημική ενέργεια του καυσίμου (υδρογόνο) μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική, ενώ η περίσσεια ενέργεια αποθηκεύεται στην μπαταρία του οχήματος. Βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου αυτοκινήτων, αποτελούν οι μηδενικές εκπομπές ρύπων, καθώς για να κινηθεί το όχημα θα πρέπει η δεξαμενή του να έχει αρκετή ποσότητα υδρογόνου, με το μόνο παράγωγο να είναι το νερό (H_2O) [3].

2.1.4 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων

Τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν πολλά οφέλη. Χάρη στις νέες αναπτυσσόμενες τεχνολογίες, η αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων τείνει να αποτελέσει μια προτιμότερη εναλλακτική. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων - πέρα από τους μηδενικούς ρύπους - είναι το χαμηλό κόστος φόρτισης, συντήρησης, αλλά και η στιγμιαία ροπή όποτε το απαιτήσει ο οδηγός.

Αναλυτικότερα, τα οφέλη ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι [7], [18]:

- Οι μηδενικές εκπομπές ρύπων. Λόγω του ότι οι κινητήρες των ηλεκτρικών οχημάτων δεν εκπέμπουν επιβλαβή αέρια στο περιβάλλον, μειώνεται η περιβαλλοντική ρύπανση.
- Η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών στον τομέα των μπαταριών παράλληλα με την συνεχή βελτίωση και εξέλιξη της υδρογονοκίνησης και των ηλεκτροκινητήρων προωθούν πιο φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις.
- Η μηδενική κατανάλωση καυσίμου, καθώς ο κινητήρας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου τροφοδοτείται από ηλεκτρική ενέργεια.
- Το χαμηλό κόστος συντήρησης, αφού δεν απαιτείται η αλλαγή λαδιών ή μπουζί, ενώ αποτρέπεται η διάβρωση.
- Η παραγωγή ελάχιστου θορύβου σε σχέση με τα συμβατικά αυτοκίνητα (μείωση ηχορύπανσης).
- Η γρήγορη και εύκολη φόρτιση στο σπίτι.
- Η χρήση λιγότερης ενέργειας. Αποδίδουν έργο σε ποσοστό 90% σε σχέση με την ενέργεια που καταναλώνουν, ενώ οι βενζινοκινητήρες έχουν ποσοστό απόδοσης περίπου 30%. Παράλληλα, κατά την λειτουργία των ηλεκτροκινητήρων αναπτύσσονται πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες.
- Η ανάκτηση ενέργειας. Τα ηλεκτρικά οχήματα μέσω του regenerative braking μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια μέρος της κινητικής ενέργειας κατά την πέδηση αποθηκεύοντάς την στις μπαταρίες τους.
- Η ασφαλής οδήγηση. Σε περίπτωση σύγκρουσης, το ηλεκτρικό όχημα θα σταματήσει αυτόματα χάρη στην αποσύνδεση των μπαταριών από τον αισθητήρα σύγκρουσης.
- Η ηλεκτρομαγνητική πέδηση του ηλεκτροκινητήρα επιτρέπει την πέδηση έκτακτης ανάγκης.

Στον αντίποδα των πλεονεκτημάτων, εμφανίζονται τα μειονεκτήματα με βασικό την περιορισμένη αυτονομία. Όταν το συμβατικό μοντέλο διανύει 300 - 400 χιλιόμετρα ή και

περισσότερα, η αυτονομία του ηλεκτρικού περιορίζεται περίπου στον μισό αριθμό χιλιομέτρων. Αυτό όπως φαίνεται θα αλλάξει, αν θεωρηθεί δεδομένο ότι οι κατασκευαστές κάνουν προσπάθειες για την κατασκευή μπαταριών με αυξημένη χωρητικότητα, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική αυτονομία [7].

Ο μικρός αριθμός σταθμών φόρτισης και ο χρόνος φόρτισης που ποικίλει ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης της μπαταρίας (σταθμός φόρτισης, τριφασικός φορτιστής σπιτιού, κ.α.), αλλά και με την χωρητικότητά της, αποτελούν επίσης σημαντικές παραμέτρους. Αυτό τείνει να αλλάξει, καθώς μεγάλοι κατασκευαστές όπως η Tesla και το PSA Group επεκτείνουν τα δίκτυα τους σε όλο τον κόσμο και εγκαθιστούν τέτοιους σταθμούς φόρτισης [13].

Τέλος, ανασταλτικός παράγοντας απόκτησης ενός ηλεκτρικού οχήματος αποτελεί και το υψηλό κόστος, καθώς η τεχνολογία βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης και δεν υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός. Το γεγονός μάλιστα, ότι με την πάροδο του χρόνου μειώνεται ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας και η αντικατάστασή της κοστίζει αρκετά, αποτελεί επίσης ανασταλτικό παράγοντα αγοράς [13], [7].

Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα συνεχίζουν να αποκτούν αυξανόμενο μερίδιο στην αγορά και οι κατασκευαστές προσπαθούν να αντιμετωπίσουν τα μειονεκτήματα, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξής και ζήτησής τους στην παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία. Υπόσχονται να μειώσουν σημαντικά τους χρόνους φόρτισης και να βελτιώσουν περαιτέρω την αυτονομία, την ασφάλεια και τα συστήματα αυτοματοποίησης.

2.2 Δομή ηλεκτρικών αυτοκινήτων

2.2.1 Εισαγωγή

Η δομή ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι διαφορετική σε σχέση με ένα συμβατικό αυτοκίνητο με μηχανή εσωτερικής καύσης. Μολονότι το αμάξωμα, το πλαίσιο και τα συστήματα διεύθυνσης, ανάρτησης και πέδησης, είναι ουσιαστικά πανομοιότυπα, υπάρχουν διαφοροποιήσεις στον τρόπο που προκαλείται η κίνηση.

Η ειδοποιός διαφορά των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα υβριδικά, είναι η απουσία του

βενζινοκινητήρα. Ο ηλεκτρικός κινητήρας (electric motor), ο μετατροπέας ισχύος-ελεγκτής (controller) και ο συσσωρευτής (μπαταρία), αποτελούν το σύστημα κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος.

Η μπαταρία παρέχει την απαραίτητη ενέργεια στον ηλεκτρικό κινητήρα και επαναφορτίζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω καλωδίου, ενώ ο μετατροπέας ισχύος ελέγχει την ισχύ που παρέχεται στον κινητήρα και ως εκ τούτου την ταχύτητα του οχήματος [10].

2.2.2 Ηλεκτρικός κινητήρας

Ο ηλεκτροκινητήρας (electric motor) είναι ενδεχομένως, το σημαντικότερο κομμάτι ενός ηλεκτρικού οχήματος. Είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται στις μπαταρίες σε κινητική ενέργεια, με αποτέλεσμα, το όχημα να μπορεί να κινείται. Βέβαια, οι κινητήρες μπορούν να κάνουν και το αντίθετο, για παράδειγμα κατά την πέδηση, μέρος της κινητικής ενέργειας του οχήματος μετατρέπεται και αποθηκεύεται με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. [22]

Ο βαθμός απόδοσης των ηλεκτρικών κινητήρων είναι μεγαλύτερος από των μηχανών εσωτερικής καύσης (MEK), καθώς οι ηλεκτρικοί κινητήρες μετατρέπουν το 90% της χημικής ενέργειας των μπαταριών σε μηχανική, εν αντιθέσει με τον βαθμό απόδοσης των MEK, ο οποίος είναι 20% - 40%. [23]

Οι κινητήρες που συναντιούνται συχνά σε ηλεκτρικά οχήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors) και στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC motors).

Οι τύποι των κινητήρων συνεχούς ρεύματος (DC) είναι: α) οι κινητήρες ανεξάρτητης διέγερσης β) οι κινητήρες με διέγερση σειράς, γ) οι κινητήρες με σύνθετη διέγερση και δ) οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.[16]

Στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) συγκαταλέγονται οι σύγχρονοι και οι ασύγχρονοι ή επαγωγικοί κινητήρες, στους οποίους ανήκουν: α) ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού, αποτελώντας το συνηθέστερο τύπο στους επαγωγικούς κινητήρες β) ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα και γ) ο σύγχρονος τριφασικός με/χωρίς μόνιμο μαγνήτη.

2.2.3 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος, αποτελεί το κομμάτι του συστήματος που διαχειρίζεται την ηλεκτρική τάση των συσσωρευτών προκειμένου να τροφοδοτήσει τον ηλεκτρικό κινητήρα. [20]

Ανάλογα τον κινητήρα που χρησιμοποιείται (συνεχούς ή εναλλασσόμενο ρεύματος), όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται: α) μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC–DC Converters or DC Regulators) και β) μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση (DC –AC Conventers or Inverters) μονοφασικοί και τριφασικοί. [24]

Οι βασικοί μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης είναι :

- Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης (Boost Converter)
- Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης (Buck Converter)
- Μετατροπέας Υποβιβασμού - Ανύψωσης Τάσης (Buck-Boost Converter)
- Μετατροπέας Υποβιβασμού - Ανύψωσης Τάσης (Cuk Converter)
- Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας (Full-bridge Converter)

Από τους παραπάνω μετατροπείς ισχύος βασικές τοπολογίες αποτελούν ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης και υποβιβασμού τάσης, ενώ οι υπόλοιποι προκύπτουν από συνδυασμούς αυτών των δύο.

Ο σκοπός του μετατροπέα ισχύος είναι η ρύθμιση της τάσης εξόδου στο επιθυμητό επίπεδο που απαιτείται. Κάθε μετατροπέας κάνει χρήση ενός ή πολλαπλών διακοπών για την επίτευξη της επιθυμητής τιμής στην έξοδο του. Ελέγχοντας την χρονική διάρκεια που ο διακόπτης είναι ανοιχτός ή κλειστός ρυθμίζεται και η τάση εξόδου του μετατροπέα. Θεωρώντας σταθερή την διακοπτική περίοδο του διακόπτη ($T_s = t_{on} + t_{off}$) και μεταβάλλοντας την διάρκεια αγωγής του διακόπτη (Duty Cycle), επιτυγχάνεται η ρύθμιση της τάσης εξόδου στην επιθυμητή τιμή [11].

2.2.4 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Ένα από τα σημαντικότερα τμήματα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι η τροφοδοσία του, καθώς αυτή καθορίζει τη λειτουργία του και την αποδοτικότητά του. Η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί με διάφορους τρόπους. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα, έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει ενέργεια, να την απελευθερώνει όταν είναι απαραίτητο και να τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1830, που πρωτοεμφανίστηκαν τα ηλεκτρικά οχήματα, οι ερευνητές δε σταμάτησαν τις προσπάθειες για την ανάπτυξη κατάλληλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Σήμερα, πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες επικεντρώνονται στην εξέλιξη των μπαταριών, ενώ άλλες έχουν στραφεί σε εναλλακτικές μορφές τεχνολογιών όπως οι κυψέλες καυσίμου [23].

2.2.5 Ηλεκτροχημικός συσσωρευτής (μπαταρία)

Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, κοινώς οι μπαταρίες, είναι υπεύθυνοι για την αποθήκευση της ενέργειας που απαιτείται για να λειτουργήσει το όχημα. Συνήθως, οι μπαταρίες αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συνδεδεμένα μικρότερα στοιχεία, τα λεγόμενα κελιά (cells). Τα κελιά μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική [10]. Κάθε κελί περιλαμβάνει θετικά και αρνητικά ηλεκτρόδια σε έναν ηλεκτρολύτη. Η ροή ηλεκτρονίων εξ 'αίτιας της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη, εκφράζεται ως ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα συνδεδεμένο εξωτερικό κύκλωμα. Στην αντίστροφη διαδικασία, όπου η μπαταρία φορτίζεται μέσω καλωδίου από εξωτερικό ρεύμα, τότε η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται ως χημική [21].

Οι συσσωρευτές ποικίλλουν ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους και διαθέτουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά αναφορικά με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Οι μπαταρίες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες [9]:

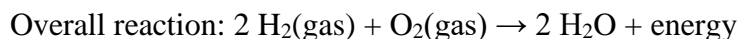
- Μπαταρίες μόλυβδου (Lead Acid Batteries)
- Μπαταρίες νικελίου (Nickel–Based Batteries)
- Μπαταρίες νατρίου (Sodium–Based Batteries)
- Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium Batteries)
- Μπαταρίες αερίου-μετάλλου (Metal–Air Batteries)

Το σύστημα φόρτισης των μπαταριών του ελέγχεται από το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας (Battery Management System – BMS). Το BMS καταγράφει τις βασικές λειτουργικές παραμέτρους όπως την τάση, το ρεύμα και την εσωτερική θερμοκρασία της μπαταρίας, κατά τη διαδικασία της φόρτισης και εκφόρτισης. Οι μπαταρίες αρκετά συχνά παρουσιάζουν προβλήματα όταν λειτουργούν εκτός από τα όρια ασφαλής λειτουργίας τους, όπως σε περιπτώσεις υπερφόρτισης ή πλήρους αποφόρτισης. Βασικός δείκτης του BMS έτσι ώστε η μπαταρία να λειτουργεί μέσα σε ασφαλή όρια και να παραταθεί η διάρκεια ζωής της είναι η κατάσταση φόρτισης (State of Charge – SoC). Το SoC είναι μέγεθος που με την μορφή ποσοστού επί τοις εκατό δείχνει την υπόλοιπη διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία και σύμφωνα με αυτό γίνονται οι έλεγχοι για την αποφυγή της πλήρους εκφόρτισης ή φόρτισης της μπαταρίας [9].

2.2.6 Κυψέλες καυσίμου (Fuel cell)

Οι κυψέλες καυσίμου (Fuel cell), αποτελούν μία από τις βιώσιμες τεχνολογίες του μέλλοντος. Τα τελευταία 20 χρόνια οι εφαρμογές κυψελών καυσίμου αντικαθιστούν, ως επί το πλείστον, κινητήρες εσωτερικής καύσης και παρέχουν ενέργεια σε σταθερές και φορητές εφαρμογές. Ωστόσο, η ιστορία των κυψελών καυσίμου είναι μεγαλύτερη από 20 χρόνια, στην πραγματικότητα, κυψέλες καυσίμου υπάρχουν εδώ και δύο αιώνες.

Η κυψέλη καυσίμου - Fuel Cell (FC), μετατρέπει σε ηλεκτρική την αρχική χημική ενέργεια του καυσίμου, διατηρώντας συνεχή ηλεκτρική τάση [15]. Επεξηγηματικά, ο μηχανισμός της κυψέλης καυσίμου μετατρέπει το υδρογόνο (ή τα καύσιμα που περιέχουν υδρογόνο) σε νερό και οξυγόνο, ενώ ταυτόχρονα, με αυτή τη διαδικασία παράγεται ηλεκτρισμός και θερμότητα.



Το συνηθέστερο καύσιμο είναι το υδρογόνο. Το υδρογόνο ως καύσιμο εμφανίζεται σε μίγματα άλλων αερίων (CO₂, N₂, CO) ή με τη μορφή υδρογονανθράκων, όπως το μεθάνιο (CH₄), καθώς και υγρών υδρογονανθράκων πχ. μεθανόλη (CH₃OH). Επιπλέον, ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελείται σε σημαντικό βαθμό από οξυγόνο το οποίο χρησιμοποιείται στις κυψέλες καυσίμου ως οξειδωτικό μέσο. Η αδιάλειπτη παροχή οξυγόνου και καυσίμου αποτελεί προαπαιτούμενο για την παράγωγή συνεχούς τάσης.

Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από: (i) έναν ηλεκτρολύτη (ηλεκτρολυτική μεμβράνη), (ii) ένα θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) που τροφοδοτείται με το καύσιμο και από (iii) ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) που τροφοδοτείται με το οξειδωτικό μέσο.

Η ταξινόμησή τους γίνεται βάσει του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται, σε:

- Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC). Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιούνται ενώσεις του άνθρακα με λίθιο, νάτριο και κάλιο σε υγρή μορφή εμποτισμένες σε κατάλληλο υλικό. Όμως, αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες που, διαβρώνουν και καταστρέφουν τις κυψέλες κι έτσι δεν ενδείκνυνται για καθημερινή χρήση.
- Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC): αντί για ηλεκτρολύτη υγρής μορφής, γίνεται χρήση ενός σκληρού κεραμικού στερεού οξειδίου ζirkονίου καθώς και μικρή ποσότητα υτρίου.
- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC): ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται KOH.
- Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEMFC): το πιο γνωστό είδος στο εμπόριο. Τα κελιά καυσίμου PAFC χρησιμοποιούν φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη. Οι κυψέλες παράγουν αρκετή ισχύ, και λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, με βασικό μειονέκτημα τον ακριβό καταλύτη (λευκόχρυσος).
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC): για καταλύτη χρησιμοποιούν φωσφορικό οξύ. [1]

Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Κάποια από αυτά, είναι: η υψηλότερη απόδοση, οι μηδενικές εκπομπές CO₂, το μικρότερο βάρος [15], η απλή δομή (στρώσεις επαναλαμβανόμενων στοιχείων χωρίς κινούμενα μέρη), δεν παράγουν θόρυβο και βέβαια, το υδρογόνο μπορεί να εξαχθεί από εγχώριες πρώτες ύλες (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, βιομάζα, κλπ), γεγονός που μπορεί να συμβάλλει στην απεξάρτηση από το πετρέλαιο. Αντίθετα, κύριο μειονέκτημά τους είναι η χαμηλή ταχύτητα απόκρισης και το υψηλό κόστος [6].

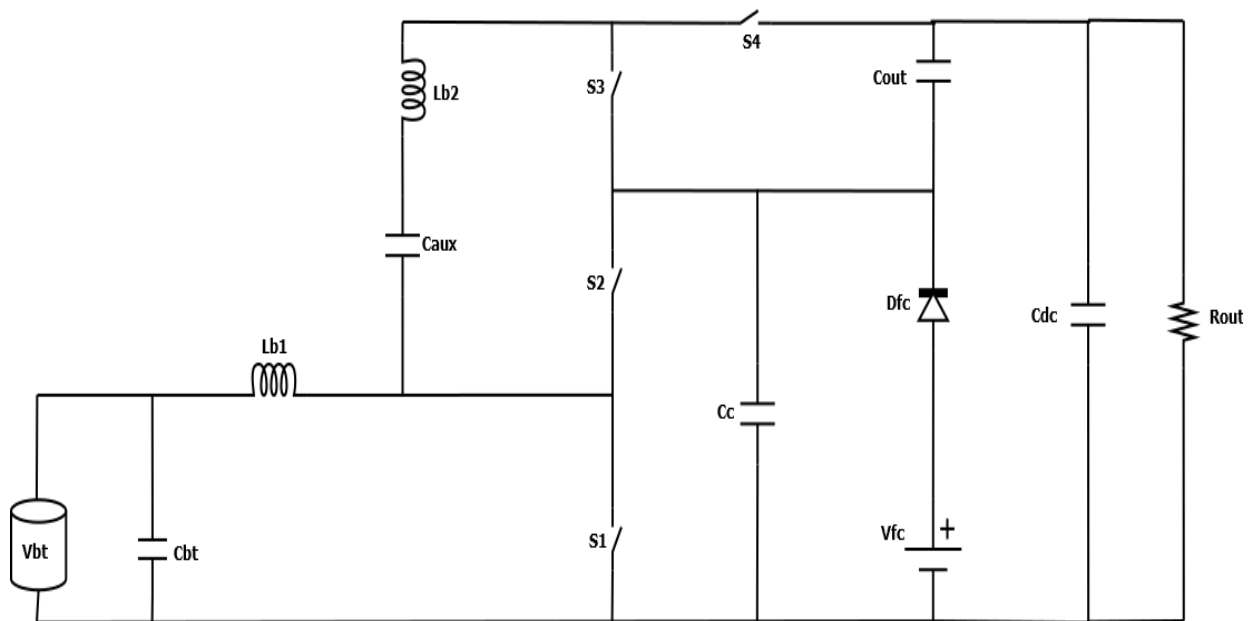
3.

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΘΥΡΩΝ

3.1 Μετατροπέας ισχύος πολλαπλών θυρών

Όπως αναφέρεται στην εισαγωγή, η ραγδαία ανάπτυξη των εφαρμογών που συσχετίζονται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δημιούργησε την ανάγκη για ανάπτυξη νέων στρατηγικών και αρχιτεκτονικών για τη βέλτιστη απόδοση κάθε εφαρμογής φέρνοντας στο προσκήνιο τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος πολλαπλών θυρών (multi-port power electronic converters). Με κίνητρο την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι multiport- converters σε σχέση με τη χρήση πολλαπλών δίθυρων μετατροπέων, έχουν αναπτυχθεί πολλές νέες τοπολογίες και μοντέλα multi-port converters. Βάσει αυτών, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε ένας μετατροπέας ισχύος πολλαπλών θυρών για εφαρμογές σε ηλεκτρικά οχήματα με χρήση κυψέλης καυσίμου, που αναπτύχθηκε στην εργασία [12]. Ο βασικός λόγος επιλογής, ήταν η απλή τοπολογία του με τη χρήση ελάχιστων ηλεκτρικών στοιχείων, η δυνατότητα εύκολου ελέγχου για την ρύθμιση της τάσης εξόδου, καθώς και ο έλεγχος για την ροή ισχύος.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία του μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από 2 πηνία L_{b1} , L_{b2} τα οποία λειτουργούν ως φίλτρα με σκοπό τη μείωση των κυματώσεων του ρεύματος, 4 διακόπτες και 3 πυκνωτές.



Σχήμα 3-1. Τοπολογία του μετατροπέα ισχύος πολλαπλών θυρών που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

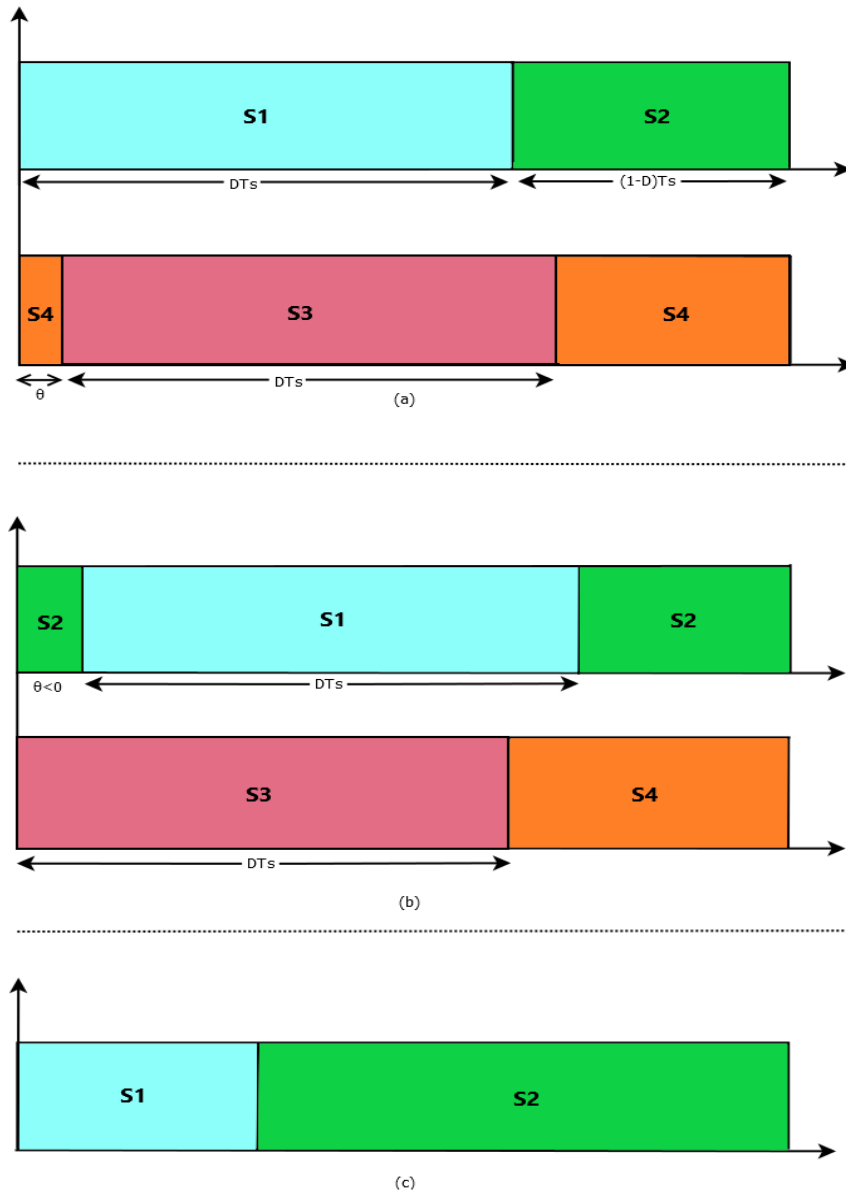
Επίσης, είναι συνδεδεμένη μια μπαταρία για αποθήκευση ή παροχή ενέργειας και μια κυψέλη καυσίμου, με μια δίοδο στην είσοδό της, έτσι ώστε να εμποδίζει τη ροή του ρεύματος προς αυτή. Ο πυκνωτής C_{aux} αποθηκεύει τη μαγνητική ενέργεια του πηνίου L_{b2} και τη διοχετεύει στον πυκνωτή C_o . Καθ' όλη τη λειτουργία του μετατροπέα, κάθε στιγμή 2 διακόπτες είναι κλειστοί και 2 ανοικτοί.

Ανάλογα με την τιμή ισχύος που απαιτεί το φορτίο και σε σύγκριση με τη παραγόμενη ισχύ από την κυψέλη καυσίμου, ο μετατροπέας διαθέτει 4 διαφορετικές λειτουργίες:

Λειτουργία 1. Σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς της κυψέλης δεν μπορεί να καλύψει τη ζήτηση του φορτίου $P_{fc} < P_{load}$, επομένως η μπαταρία καλείται να καλύψει το υπόλοιπο της απαιτούμενης ισχύος από το φορτίο.

- Λειτουργία 2. Όταν η ισχύς που προέρχεται από την κυψέλη καυσίμου είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση του φορτίου $P_{fc} > P_{load}$ τότε ο μετατροπέας φορτίζει την μπαταρία με την περίσσεια ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.
- Λειτουργία 3. Όταν το όχημα επιβραδύνει και ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια (regenerative – braking), τότε ο μετατροπέας έχει τη δυνατότητα να εναλλάσσει τη ροή ισχύος με τέτοιο τρόπο, ώστε να φορτίζεται η μπαταρία μέσω μετατροπέα DC/AC από τον κινητήρα όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4.
- Λειτουργία 4. Σε περίπτωση που το φορτίο είναι αποσυνδεδεμένο, δηλαδή υπάρχει μηδενική ζήτηση και άρα $P_{load} = 0$ (το όχημα είναι ακίνητο), η μπαταρία φορτίζεται αποκλειστικά από την κυψέλη καυσίμου.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα ζεύγη διακοπών που είναι σε λειτουργία μέσα σε μια διακοπτική περίοδο σε κάθε σενάριο, με σκοπό την ορθή λειτουργία του μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 3-2. Κυματομορφές λειτουργίας των διακοπών του μετατροπέα.

Στο Σχήμα 3.2 διακρίνεται ότι οι διακόπτες S_1 , S_3 και S_2 , S_4 αντίστοιχα έχουν κοινό duty cycle και όταν οι S_1 , S_3 είναι ανοικτοί οι S_2 , S_4 κλείνουν και αντιστρόφως. Οι διακόπτες S_1 , S_3 είναι κλειστοί για χρονικό διάστημα DT_s , όπου D το duty cycle και T_s η διακοπτική περίοδος, ενώ οι S_2 , S_4 για χρονικό διάστημα $(1 - D)T_s$. Επιπλέον, στις λειτουργίες 1, 2 [Σχήμα 3-2(a)] ο διακόπτης S_3 έχει μια καθυστέρηση σε σχέση με τον διακόπτη S_1 . Αυτός ο λόγος μετατόπισης φάσης θ (phase – shift ratio θ) αποτελεί βασικό κομμάτι στη στρατηγική ελέγχου του μετατροπέα. Στη λειτουργία 3 [Σχήμα 3-2(b)] ο λόγος μετατόπισης φάσης θ είναι αρνητικός, διότι όπως φαίνεται, ο S_3 προηγείται του S_1 , και επομένως υπάρχει αλλαγή της ροής ισχύος από

το φορτίο προς την μπαταρία. Στη λειτουργία 4 [Σχήμα 3-2(c)] οι διακόπτες S_3, S_4 είναι ανοικτοί και στο κύκλωμα σε λειτουργία βρίσκονται μόνο οι S_1, S_2 .

Βασικός στόχος της διαχείρισης ενέργειας του μετατροπέα που περιγράφεται στην παρούσα εργασία, είναι η ομαλή λειτουργία της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου, καθώς και οι ανώδυνες εναλλαγές στη ροή ισχύος διατηρώντας σταθερή την τάση εξόδου του μετατροπέα. Για την επίτευξη του ελέγχου του μετατροπέα γίνεται χρήση του duty cycle καθώς και του phase- shift ratio θ . Με τη ρύθμιση του duty cycle καθορίζεται η ισχύς της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου και ταυτόχρονα, η τάση στους ακροδέκτες της κυψέλης καυσίμου. Με το phase – ratio ρυθμίζεται η τάση εξόδου του μετατροπέα. Ανάλογα με το πρόσημο της φάσης θ , ελέγχεται η ροή ισχύος του μετατροπέα. Στην περίπτωση αρνητικού πρόσημου στο θ , ο μετατροπέας βρίσκεται λειτουργία 3. Επομένως, και ο διακόπτης S_3 προηγείται του S_1 , ενώ με θετικό πρόσημο, ο μετατροπέας βρίσκεται στις λειτουργίες 1 και 2 με τον διακόπτη S_3 να ακολουθεί τον διακόπτη 1.

Όσο ο διακόπτης S_1 είναι σε λειτουργία το ρεύμα της μπαταρίας περνάει από το πηνίο L_{b1} και το πηνίο φορτίζεται. Στο διάστημα που ο διακόπτης S_1 είναι ανοικτός και ο S_2 είναι σε λειτουργία το ρεύμα μειώνεται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3. Το ρεύμα του πηνίου δίνεται από την σχέση (3.1) για το χρονικό διάστημα που λειτουργεί ο διακόπτης S_1 και από την σχέση (3.2) για το διάστημα λειτουργίας του διακόπτη S_2 :

$$L_{b1} \frac{di_{Lb1}}{dt} = V_{BT} \quad (3.1)$$

$$L_{b1} \frac{di_{Lb1}}{dt} = V_{BT} - V_{Cc} \quad (3.2)$$

όπου:

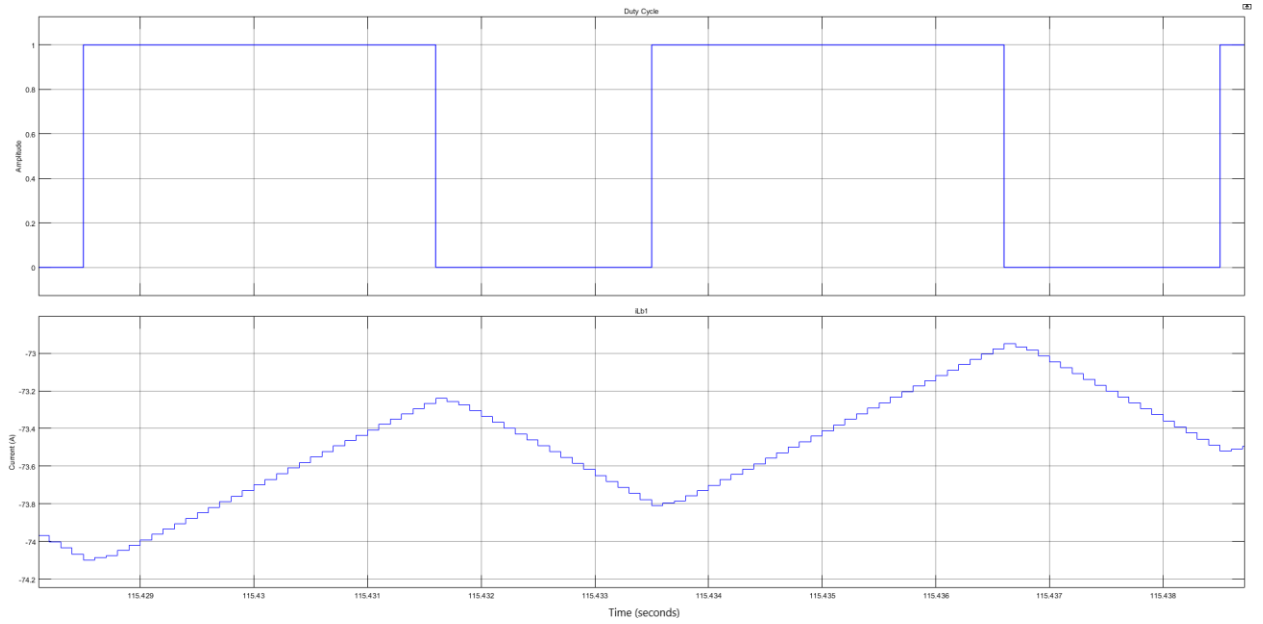
L_{b1} η αυτεπαγωγή του πηνίου L_{b1} ,

V_{BT} η τάση της μπαταρίας,

V_{Cc} η τάση στον πυκνωτή C_c ,

i_{Lb1} το ρεύμα του πηνίου L_{b1} .

Το ρεύμα του πηνίου L_{b2} δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις αναλόγως ποιο ζεύγος διακοπών λειτουργεί.



Σχήμα 3.3. Duty Cycle διακόπτη S_1 και ρεύμα πηνίου L_{b1} .

Στην περίπτωση που το ζεύγος διακοπών είναι το S_1, S_4 το ρεύμα στο πηνίο L_{b2} μειώνεται και δίνεται από την σχέση (3.3). Στο ζεύγος S_1, S_3 το ρεύμα αλλάζει αναλόγως με τις τιμές των τάσεων των πυκνωτών C_{aux} και C_c όπως φαίνεται στην σχέση (3.4). Όταν λειτουργούν οι S_2, S_3 το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται [σχέση (3.5)] και τέλος στην περίπτωση του ζεύγους διακοπών S_2, S_4 το ρεύμα αλλάζει ανάλογα με τις τιμές της τάσης του πυκνωτή C_{aux} και C_{out} και δίνεται από την σχέση (3.6):

$$L_{b2} \frac{di_{Lb2}}{dt} = V_{Ca} - V_{Cc} - V_{Co} \quad (3.3)$$

$$L_{b2} \frac{di_{Lb2}}{dt} = V_{Ca} - V_{Cc} \quad (3.4)$$

$$L_{b2} \frac{di_{Lb2}}{dt} = V_{Ca} \quad (3.5)$$

$$L_{b2} \frac{di_{Lb2}}{dt} = V_{Ca} - V_{Co} \quad (3.6)$$

όπου:

L_{b2} η αυτεπαγωγή του πηνίου L_{b2} ,

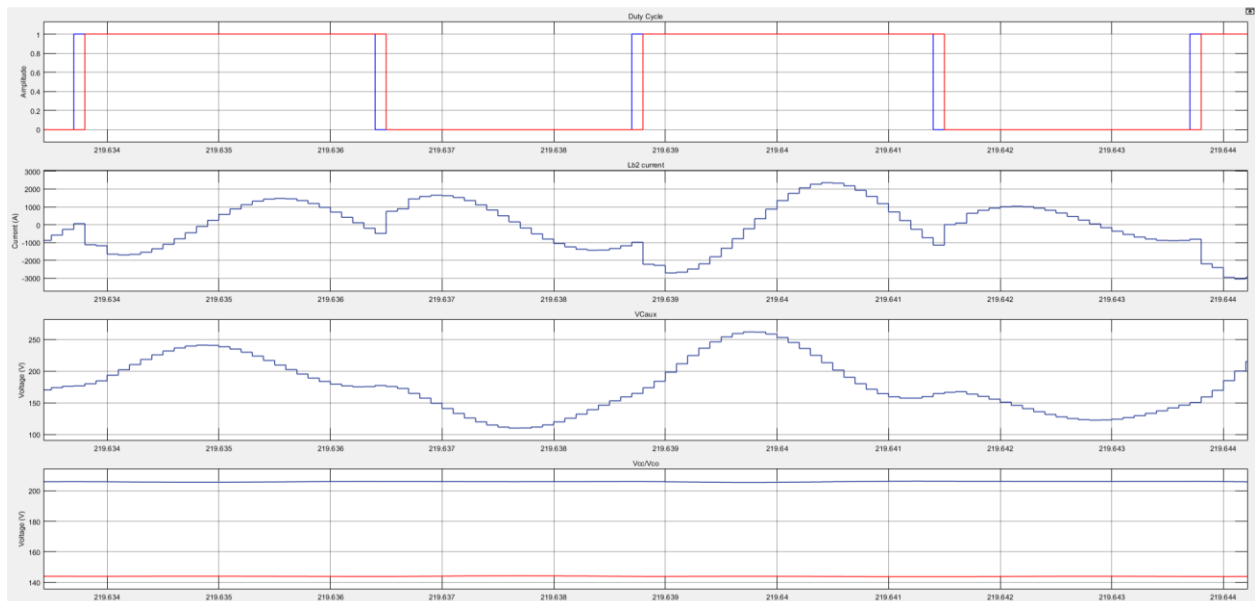
V_{Ca} η τάση του πυκνωτή C_{aux} ,

V_{Cc} η τάση στον πυκνωτή C_c ,

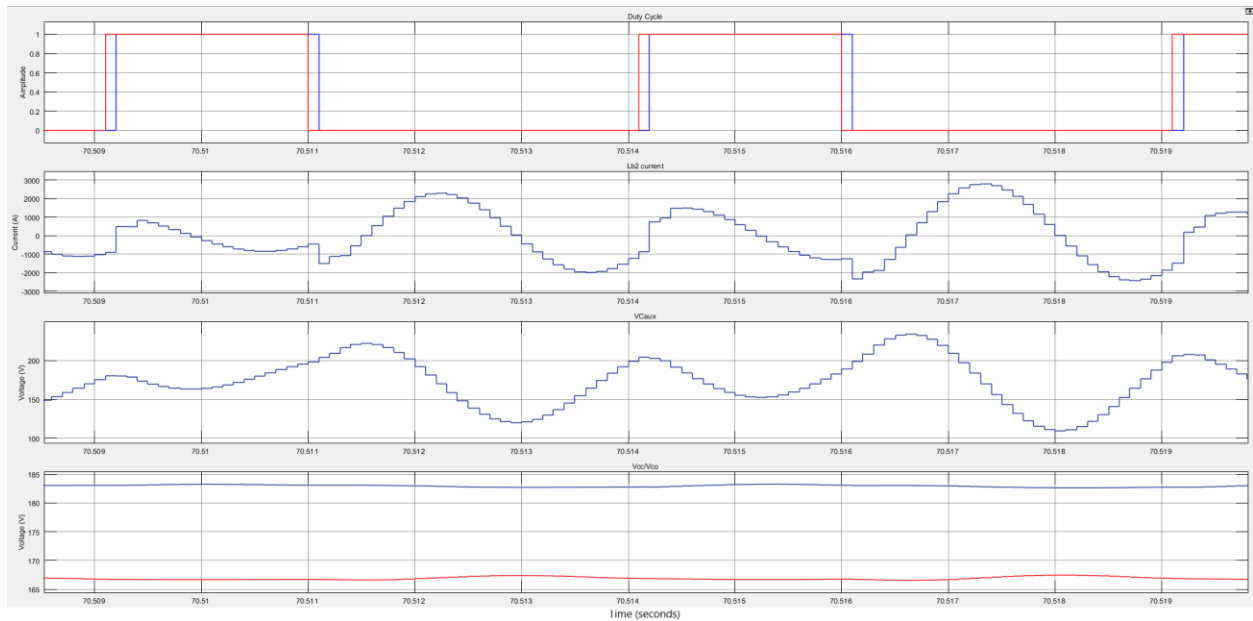
V_{Co} η τάση του πυκνωτή C_{out} ,

i_{Lb2} το ρεύμα του πηνίου L_{b2} .

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ρεύματος του πηνίου L_{b2} κατά την διάρκεια δύο διακοπτικών περιόδων στην λειτουργία 2 και οι τάσεις των πυκνωτών που την επηρεάζουν. Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται τα παραπάνω κατά την λειτουργία 3 του μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 3.4. Duty Cycle διακόπτη S_1 με μπλε και S_3 με κόκκινο. Ρεύμα πηνίου L_{b2} . Τάση πυκνωτή C_{aux} . Τάση πυκνωτή C_c με μπλε και C_{out} με κόκκινο.



Σχήμα 3.5. Duty Cycle διακόπτη S_1 με μπλε και S_3 με κόκκινο. Ρεύμα πηνίου L_{b2} . Τάση πυκνωτή C_{aux} . Τάση πυκνωτή C_c με μπλε και C_{out} με κόκκινο.

Οι σχέσεις των ρευμάτων είναι ίδιες για όλες τις λειτουργίες του μετατροπέα. Αν το duty cycle των διακοπών βρίσκεται πάνω από το 50% της διακοπτικής περιόδου τότε το ρεύμα της μπαταρίας αυξάνεται ενώ όταν βρίσκεται κάτω του 50% μειώνεται. Επιπλέον με το duty cycle ρυθμίζεται η τάση της κυψέλης καυσίμου όπως φαίνεται από την σχέση (3.7). Η τάση εξόδου του μετατροπέα όπως προκύπτει εύκολα και από το Σχήμα 3.1 δίνεται από την σχέση (3.8):

$$V_{FC} = \frac{V_{BT}}{1-D} \quad (3.7)$$

$$V_{out} = V_{FC} + V_{Co} \quad (3.8)$$

όπου:

V_{FC} η τάση της κυψέλης καυσίμου,

V_{BT} η τάση της μπαταρίας,

V_{Co} η τάση του πυκνωτή C_{out} ,

V_{out} η τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος,

D το Duty Cycle των διακοπών του μετατροπέα.

4.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Για την μοντελοποίηση του οχήματος της παρούσας εργασίας γίνεται χρήση του Simulink της Matlab. Το περιβάλλον του Simulink δίνει την δυνατότητα της μοντελοποίησης του μετατροπέα πολλαπλών θυρών που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 σε μια εφαρμογή ηλεκτρικού οχήματος κυψέλης υδρογόνου, το οποίο εκτελεί διάφορους κύκλους οδήγησης.

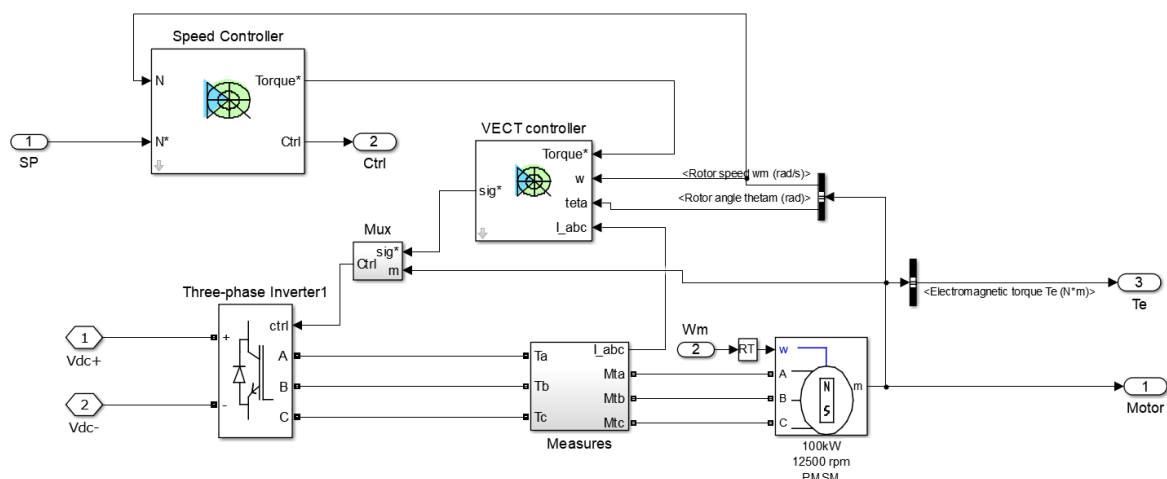
Στην συνέχεια, γίνεται λεπτομερής παρουσίαση όλων των τμημάτων της μοντελοποίησης που αποτελούν το όχημα.

4.1 Ηλεκτροκινητήρας

Η προσομοίωση του ηλεκτροκινητήρα του οχήματος βασίστηκε σε μοντέλο της βιβλιοθήκης του Simulink. Αποτελείται από 4 blocks τα οποία συμβάλουν στην ορθή λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα και είναι τα εξής:

- Permanent Magnet Synchronous Machine,
- Speed Controller,
- Vect Controller ,
- Three-phase Inverter.

Στον Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία τους στο περιβάλλον του Simulink.



Σχήμα 4-1. Μοντελοποίηση ηλεκτροκινητήρα στο περιβάλλον του Simulink.

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρικά οχήματα χάρη στην υψηλή αναλογία ροπής/βάρους, της ανταπόκρισης στον έλεγχο ταχύτητας και στην υψηλή πυκνότητα ισχύος που παρουσιάζουν [17].

Το block PMSM αναπαριστά έναν τριφασικό κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, ο οποίος δύναται να λειτουργεί και ως γεννήτρια. Ως είσοδο δέχεται την ταχύτητα περιστροφής του κεντρικού άξονα του οχήματος (Wm). Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του:

Πίνακας 4 -1 . Χαρακτηριστικά Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη.	
Pairs of poles	4
Inductances [L_d, L_q]	[0.17415845761 (mH) , 0.29268882377 (mH)]
Maximum Power	100 kW
Maximum Torque	256 Nm

Ο Speed Controller αποτελεί έναν PI ελεγκτή ταχύτητας, ο οποίος δέχεται ως είσοδο μια ροπή αναφοράς (στη συγκεκριμένη περίπτωση, η ροπή υπολογίζεται από το block driver acceleration) και την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Έπειτα, στην έξοδό του υπολογίζει τη ροπή στην οποία πρέπει να φτάσει η μηχανή.

Η έξοδος των Speed Controller συνδέεται με αυτή των VECT Controller. Ο VECT Controller υπολογίζει τα τριφασικά ρεύματα της ηλεκτρικής μηχανής σύμφωνα με τη ροπή αναφοράς του Speed Controller. Στη συνέχεια, δημιουργεί με τη χρήση ενός τριφασικού ρυθμιστή ρεύματος ένα σήμα διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse-Width Modulation - PWM).

Ο Three-Phase Inverter αναπαριστά ένα τριφασικό αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα του μετατροπέα ισχύος σε τριφασικό για τη σύνδεσή του με τον κινητήρα μόνιμου μαγνήτη. Το σήμα ελέγχου για την ορθή του λειτουργία, είναι το σήμα που αναφέρθηκε προηγουμένως από τον VECT Controller.

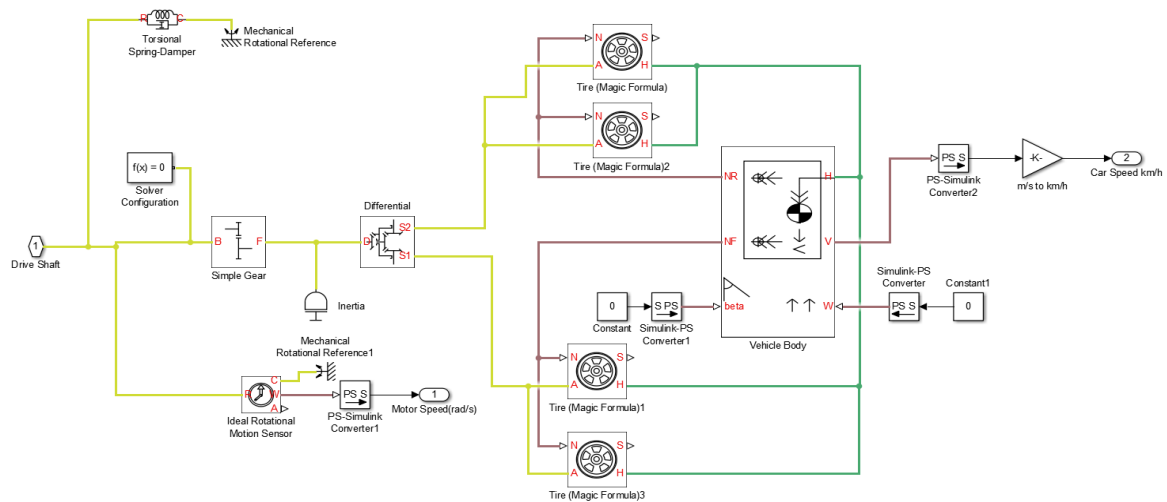
4.2 Vehicle dynamics

Το Vehicle Dynamics αποτελεί το κομμάτι στο οποίο γίνεται η μοντελοποίηση των μηχανικών μερών του οχήματος. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η υλοποίηση του. Δέχεται ως είσοδο τη ροπή του κινητήρα προσομοιώνοντας έναν κινητήριο άξονα, ο οποίος συνδέεται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων και έναν αισθητήρα ταχύτητας. Για το κιβώτιο ταχυτήτων, στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται το block simple gear μιας ταχύτητας. Η σχέση μεταξύ εισόδου (Base-B) και εξόδου (follower F) του κιβωτίου είναι $2,7 (F/B)$, κάτι που σημαίνει ότι μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής και αυξάνεται η ροή που φτάνει στο διαφορικό.

Το διαφορικό χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της ροπής στους τροχούς ισόποσα. Στη μοντελοποίηση των τροχών του οχήματος χρησιμοποιείται το block Tire (Magic formula) της Simulink το οποίο προβλέπει τις δυνάμεις που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των τροχών με το έδαφος και την κίνηση του οχήματος. Το block με την ονομασία Vehicle body είναι και αυτό από την βιβλιοθήκη του Simulink και αναπαριστά το αμάξωμα του οχήματος. Σκοπός του, είναι ο ορισμός συγκεκριμένων παραμέτρων, οι οποίες δίνουν μια ρεαλιστική προσέγγιση στις συνθήκες οδήγησης του οχήματος. Κάποιες από αυτές τις παραμέτρους είναι η μάζα του οχήματος, η αεροδυναμική αντίσταση, η κλίση του δρόμου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Οι συνθήκες οδήγησης θεωρούνται ιδανικές και για αυτό τον λόγο δεν συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο η οποιαδήποτε κλίση του δρόμου ή η δύναμη του αέρα που μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα του οχήματος.

Πίνακας 4-2. Παράμετροι Αμαξώματος Αυτοκινήτου.	
Mass	1400 kg
Number of wheels per axle	2
Horizontal distance from CG to rear and front axles	1.4m
CG height above the ground	0.5m
Drag coefficient	0.26

Ο αισθητήρας ταχύτητας που αναφέρθηκε παραπάνω, έχει ως σκοπό τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήριου άξονα που μετέπειτα μετατρέπεται σε σήμα εισόδου στο block του κινητήρα.



Σχήμα 4-2. Μοντελοποίηση του Vehicle Dynamics στο περιβάλλον του Simulink.

4.3 Driver

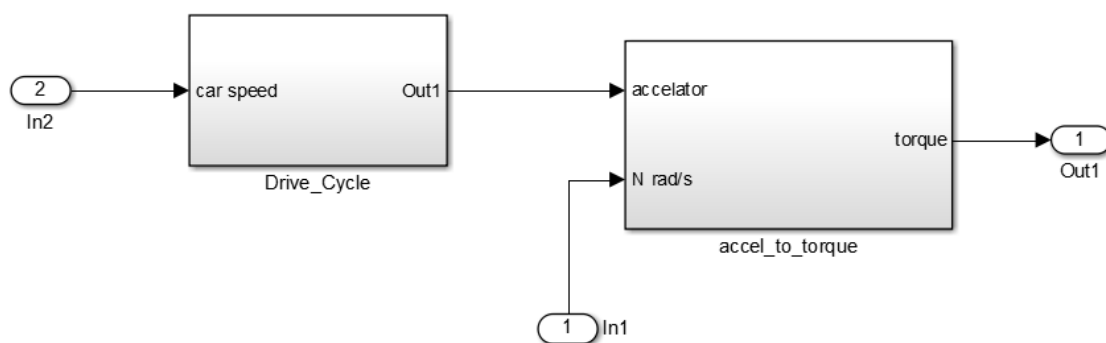
Το block driver αναπαριστά τις λειτουργίες του οδηγού του οχήματος και αποτελείται από δύο block, το Drive_Cycle και το accel_to_torque. Στα Σχήματα 4.3, 4.4 και 4.5 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία τους. Για να γίνει ορθή σύγκριση της συμπεριφοράς των επιδόσεων του οχήματος, γίνεται η χρήση ορισμένων κύκλων οδήγησης. Ο κύκλος οδήγησης είναι μια συλλογή δεδομένων που αναπαριστά την ταχύτητα ενός οχήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. Κάθε κύκλος οδήγησης διαφέρει από τον άλλον ως προς την ταχύτητα που αναπτύσσει το όχημα, την επιβράδυνση και την επιτάχυνση που παρουσιάζει, αλλά και το διάστημα που παραμένει με σταθερή ταχύτητα ή ακόμη και ακίνητο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται 4 πρότυπα μοντέλα κύκλων οδήγησης:

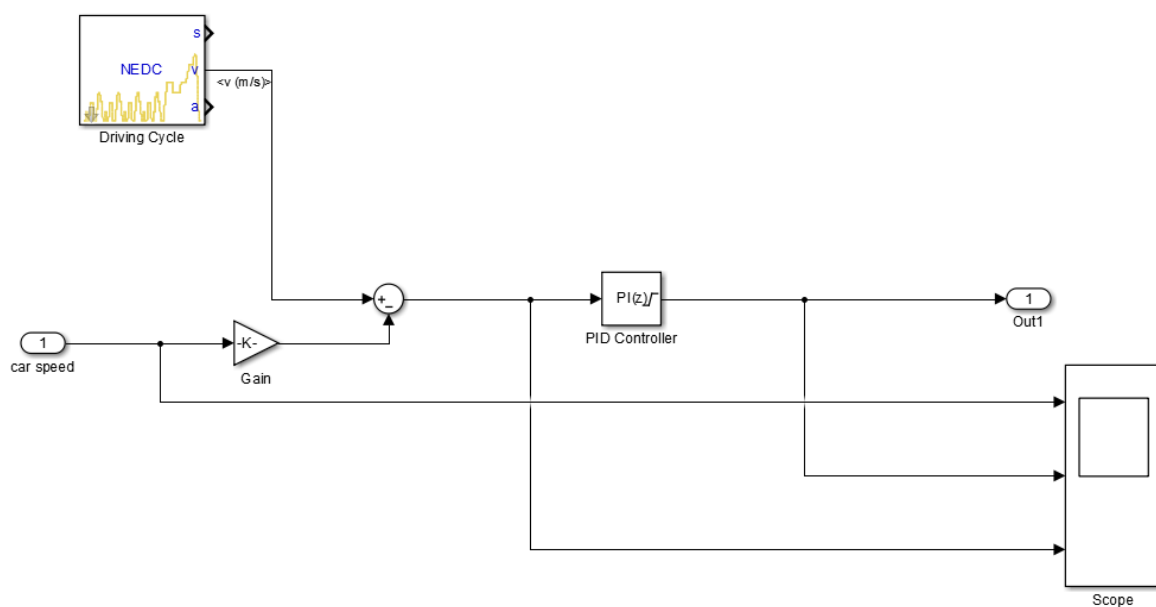
- NEDC,
- FTP-75,
- WLTP Class 3 και
- Art MW 150.

Ουσιαστικά, γίνεται χρήση της ταχύτητας του κύκλου οδήγησης ως ταχύτητα αναφοράς, η οποία στη συνέχεια συγκρίνεται με την ταχύτητα του οχήματος με σκοπό τη δημιουργία ενός σήματος επιτάχυνσης.

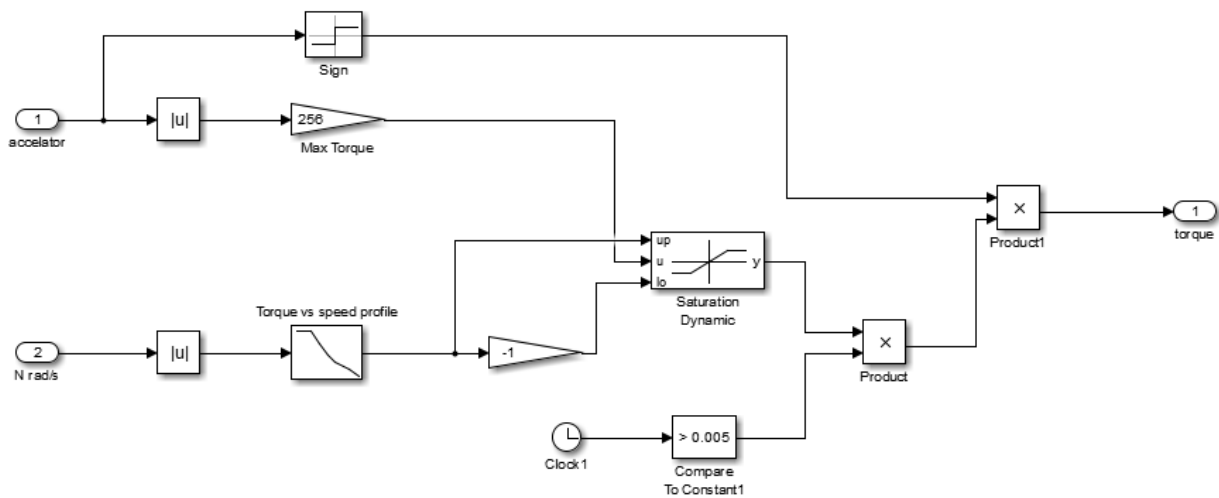
Αν η διαφορά της ταχύτητας αναφοράς με την ταχύτητα του οχήματος της μοντελοποίησης είναι θετική, αυτό σημαίνει ότι το όχημα πρέπει να επιταχύνει, αν είναι αρνητική, τότε αυτό σημαίνει ότι το όχημα πρέπει να επιβραδύνει. Για τη μείωση σφάλματος και την ομαλή εναλλαγή τιμών χρησιμοποιείται ένας PI ελεγκτής με όριο εξόδου τις τιμές 1 και -1 και τιμές proportional gain 0,645 και integral gain 0,015. Η τιμή του πεταλιού επιτάχυνσης η οποία κυμαίνεται από το -1 έως 1 με τη σειρά της γίνεται είσοδος στο block accel_to_torque. Εκεί, πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό 256 που είναι η μέγιστη ροπή του κινητήρα και μετατρέπεται σε ροπή. Στο τέλος, πολλαπλασιάζεται με το πρόσημο που είχε. Αν το αποτέλεσμα έχει θετικό πρόσημο, έχει τη σημασία της επιτάχυνσης, ενώ με αρνητικό πρόσημο, του φρεναρίσματος. Αυτή η ροπή γίνεται ροπή αναφοράς και είσοδος στο block του ηλεκτροκινητήρα, έτσι ώστε να λειτουργεί ως κινητήρας ή ως γεννήτρια από το regenerative braking. Επίσης, με τη χρήση ενός lookup table γίνεται η μετατροπή ταχύτητας του άξονα κίνησης του οχήματος σε ροπή και χρησιμοποιείται ως μέγιστο και ελάχιστο όριο, έτσι ώστε να μην υπερβαίνεται το όριο στις στροφές του κινητήρα.



Σχήμα 4-3. Driver block.



Σχήμα 4-4. Μοντελοποίηση του Drive Cycle στο Simulink.



Σχήμα 4-5. Μοντελοποίηση του *accel_to_torque* στο περιβάλλον του *Simulink*.

4.4 Converter

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το μοντέλο του μετατροπέα ισχύος, οποίος αναλύεται στο Κεφάλαιο 3. Επιπλέον, διακρίνεται η τοπολογία του μετατροπέα στο περιβάλλον του *Simulink*. Οι τιμές των ηλεκτρικών στοιχείων του μετατροπέα δίνονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4-3. Χαρακτηριστικών ηλεκτρικών στοιχείων μετατροπέα ισχύος.	
Πηνίο L_{b1}	0.3 H
Πηνίο L_{b2}	0.01 mH
Πυκνωτής C_{bt}	0.1 F
Πυκνωτής C_{aux}	0.02 F
Πυκνωτής C_c	2 F
Πυκνωτής C_{out}	2.2 F
Πυκνωτής C_{dc}	1 F

Οι τιμές των παθητικών στοιχείων προέκυψαν έπειτα από δοκιμές, με σκοπό τη μείωση των κυματώσεων στα ρεύματα των πηνίων και την μέγιστη δυνατή ελαχιστοποίηση των κυματώσεων της τάσης στις πηγές εισόδου του μετατροπέα καθώς και στην έξοδο του.

4.4.1 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας του μοντέλου επιλέγεται η χρήση μπαταρίας ιόντων λιθίου, που χρησιμοποιείται στα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα, εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής της πυκνότητας. Η κυψέλη καυσίμου μπορεί να καλύψει την ζήτηση του φορτίου όταν λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση όμως η σχετικά αργή της απόκριση δημιουργεί προβλήματα στις στιγμιαίες απότομες απαιτήσεις ισχύος που μπορούν να προκύψουν [12]. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η χρήση ενός στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας. Εκμεταλλευομένη την υψηλή πυκνότητα ισχύος που διαθέτει, η μπαταρία λιθίου έχει την δυνατότητα να παρέχει την εφεδρική ισχύ με γρήγορη απόκριση και να αποτρέψει οποιαδήποτε αστάθεια στο σύστημα. Επιπλέον αποθηκεύει ενέργεια μέσω του Regenerative Braking και επιτρέπει την κυψέλη καυσίμου να λειτουργεί σε χαμηλότερη ισχύ καταναλώνοντας λιγότερο καύσιμο. Από την βιβλιοθήκη του Simulink, το block Battery υλοποιεί την μπαταρία παρέχοντας την δυνατότητα επιλογής του τύπου της μπαταρίας και τον ορισμό των παραμέτρων της. Τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας εμφανίζονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4-4. Χαρακτηριστικά συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.	
Nominal Voltage	75 V
Rated Capacity	50 Ah
Battery Type	Lithium-ion

4.4.2 Κυψέλη καυσίμου

Για την μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου γίνεται η χρήση block του Simulink και οι παράμετροι της κυψέλης καυσίμου επιλέγονται με στόχο την προσέγγιση σε κυψέλες καυσίμου

του εμπορίου, προκειμένου τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας να είναι όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου.

Πίνακας 4-5 . Χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου	
Number of cells	220
Nominal operating point [I _{nom} , V _{nom}]	200 A, 200 V
Maximum operating point [I _{end} , V _{end}]	390 A , 135 V
Nominal stack efficiency	47 %
Operating temperature	75 °C
Nominal Air flow rate	2000 lpm
Nominal supply pressure [Fuel, Air]	1.5 bar, 1 bar
Nominal composition [H ₂ , O ₂ , H ₂ O (Air)]	99.97 %, 21%, 1%

4.4.3 Fuel Rate Regulator

Στο συγκεκριμένο block πραγματοποιείται η ρύθμιση της ροής καυσίμου της κυψέλης καυσίμου. Ρυθμίζοντας την ροή καυσίμου επιτυγχάνεται ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος από την κυψέλη και η αξιοποίηση της στο μέγιστο βαθμό, όσον αφορά την εξοικονόμηση καυσίμου καθώς και την βέλτιστη διαχείριση ενέργειας του συστήματος. Η ρύθμιση της ροής καυσίμου γίνεται με τρόπο που διασφαλίζει την επαρκή ποσότητα καυσίμου για την παραγωγή ρεύματος από την κυψέλη καθ' όλη την λειτουργία της.

Η δημιουργία του ρυθμιστή βασίζεται σε μοντέλο της βιβλιοθήκης του Simulink. Το block Fuel Cell Stack δέχεται ως όρισμα την επιθυμητή τιμή της ροής καυσίμου, η οποία είναι ανάλογη της τιμής του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{(lpm)fuel} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{fuel}U_{fH_2}x\%} \quad (4.1)$$

όπου:

R σταθερά ιδανικών αερίων 8.3145 J/(mol K),

T θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης 348 K,

N αριθμός κελιών κυψέλης,

i_{fc} ρεύμα αναφοράς κυψέλης καυσίμου,

z αριθμός κινούμενων ηλεκτρονίων ίσος με 96485,

F σταθερά του Faraday 96485 C/mol ,

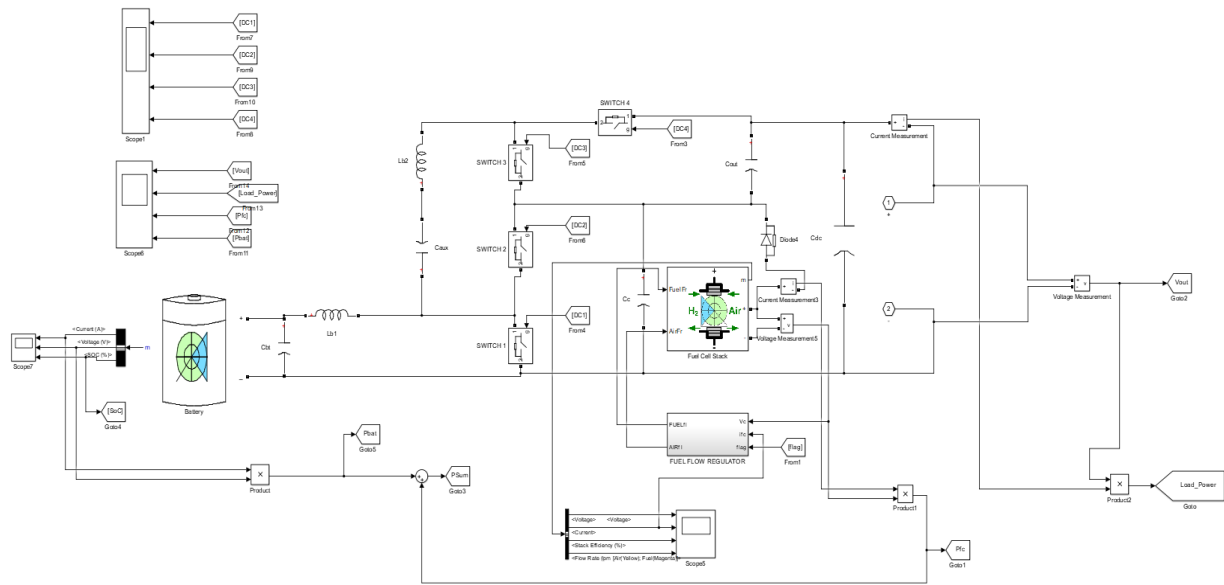
P_{fuel} πίεση καυσίμου ίση με 1,5 bar,

U_{fH_2} ποσοστό χρήσης υδρογόνου ίσο με 64.79%,

$x\%$ ποσοστό του υδρογόνου στο καύσιμο ίσο με 99.79%.

Ο αριθμός 60000 είναι ο συντελεστής μετατροπής lpm (liters per minute) σε m³/s (1 lt/min = 1/60000 m³/s).

Καθότι η τάση της κυψέλης καυσίμου ρυθμίζεται από το duty cycle του μετατροπέα ισχύος και την τάση της μπαταρίας για την εύρεση της κατάλληλης τιμής του ρεύματος αναφοράς της κυψέλης καυσίμου, για τον ρυθμιστή της ροής καυσίμου γίνεται χρήση ενός look-up table. Αναλόγως την τιμή της τάσης στους ακροδέκτες της κυψέλης καυσίμου, εξάγεται η τιμή του ρεύματος αναφοράς, τέτοια ώστε η κυψέλη να παράγει την επιθυμητή τιμή ισχύος.



Σχήμα 4-6. Συνδεσμολογία του μετατροπέα ισχύος πολλαπλών θυρών στο περιβάλλον του Simulink.

4.5 Control Block

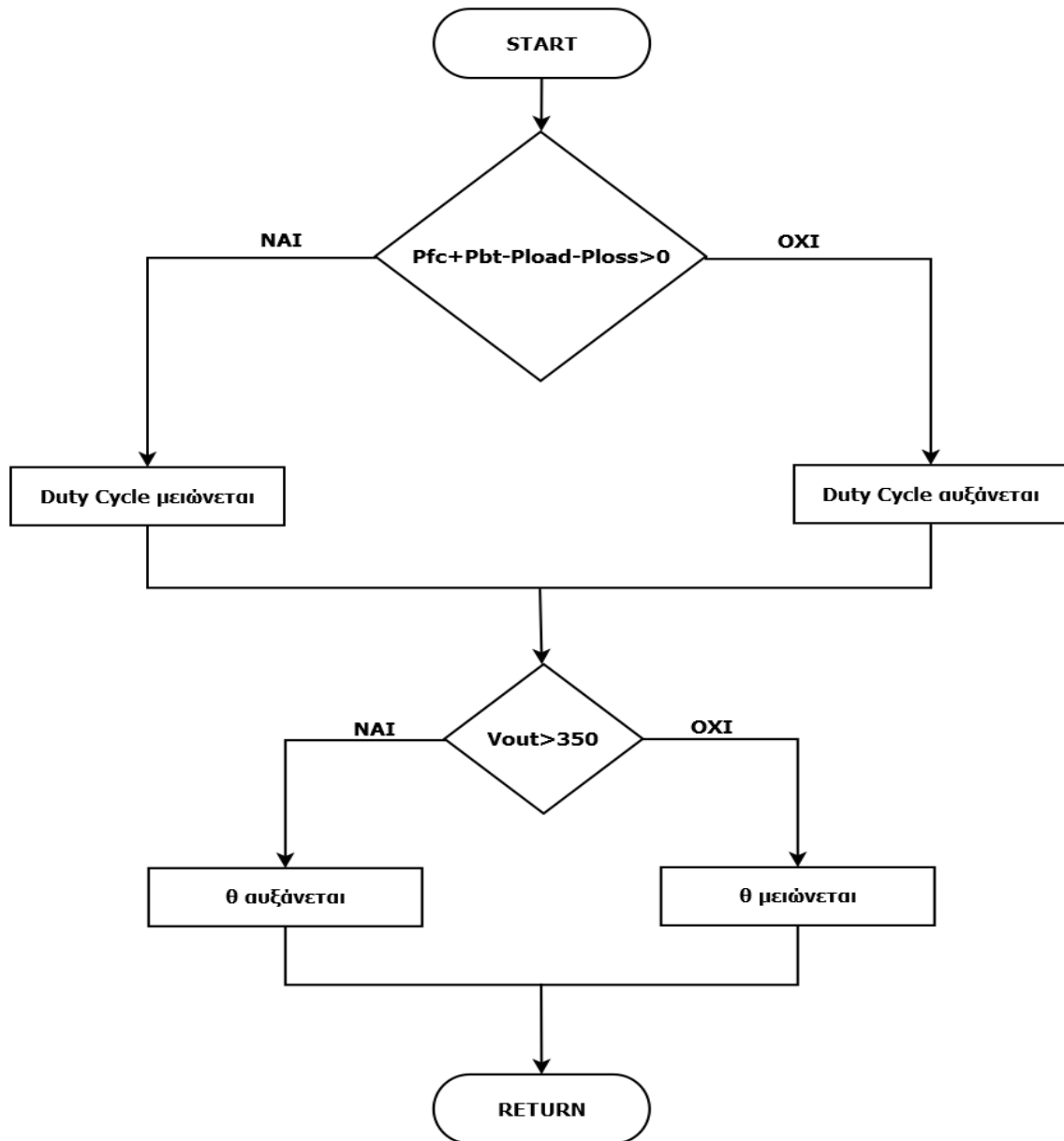
Το Control block αποτελεί τη μονάδα ελέγχου του συστήματος. Το συγκεκριμένο κομμάτι της μοντελοποίησης είναι από τα σημαντικότερα τμήματα του συστήματος για την εύρυθμη λειτουργία όλων των στοιχείων της παρούσας εργασίας. Συλλέγει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε να γίνεται η ορθή λήψη αποφάσεων με στόχο την διασφάλιση της λειτουργικότητας και αποδοτικότητας του οχήματος.

Για την δημιουργία των τετραγωνικών παλμών, οι οποίοι αποτελούν τα σήματα ελέγχου για την λειτουργία των διακοπών του μετατροπέα, χρησιμοποιείται το block Triangle Generator, το οποίο παράγει τριγωνικούς παλμούς. Το σήμα του τριγωνικού παλμού εφόσον ανορθωθεί πλήρως, μετατρέπεται σε τετραγωνικό παλμό με την χρήση ενός αλγορίθμου. Αυτός ο τετραγωνικός παλμός αποτελεί και το επιθυμητό duty cycle για κάθε διακόπτη, όπως ορίζει η στρατηγική ελέγχου του μετατροπέα. Εξαιτίας της πολύ χαμηλής ταχύτητας των προσομοιώσεων κατά την εκτέλεση του προγράμματος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε χαμηλή διακοπτική συχνότητα στα 200 Hz, γεγονός που επηρεάζει και την επιλογή

στις τιμές των ηλεκτρικών στοιχείων του μετατροπέα ισχύος.

Όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3, οι διακόπτες S_1 και S_3 έχουν κοινό duty cycle και παρουσιάζουν μια καθυστέρηση θ μεταξύ τους και το ίδιο συμβαίνει αντίστοιχα με τους διακόπτες S_2 και S_4 . Με την χρήση του block Discrete Variable Time Delay, επιτυγχάνεται η καθυστέρηση του σήματος για τον επιθυμητό χρόνο που ζητείται από τον έλεγχο του μετατροπέα. Για την λειτουργία 3 του μετατροπέα όπου το θ είναι αρνητικό και επομένως ο διακόπτης S_3 προηγείται του S_1 , γίνεται έλεγχος με την χρήση block του Simulink. Αρχικά, ελέγχεται αν η ισχύς του φορτίου είναι αρνητική, έπειτα, στην περίπτωση που είναι αρνητική το σήμα το οποίο προοριζόταν για τον διακόπτη S_1 , συνδέεται με τον διακόπτη S_3 , ενώ το σήμα με την καθυστέρηση θ συνδέεται με τον S_1 . Αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει με το τους διακόπτες S_2 S_4 . Με αυτό τον τρόπο, ο διακόπτης S_3 προηγείται του S_1 στην περίπτωση όπου η ισχύς του φορτίου είναι αρνητική.

Για την υλοποίηση της στρατηγικής ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετές διαφορετικές μέθοδοι όπως για παράδειγμα, η χρήση συστημάτων κλειστού βρόχου με PID ελεγκτές. Το block MATLAB Function του Simulink δίνει την δυνατότητα εκτέλεσης αλγόριθμων με την χρήση κώδικα στην γλώσσα προγραμματισμού της Matlab. Λαμβάνοντας ως σήματα εισόδου την τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος, την ισχύ του φορτίου καθώς και την ισχύ της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου εκτελείται ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7. Βασικός σκοπός του αλγόριθμου είναι η συνεχής σύγκριση της αθροιστικής ισχύος του μετατροπέα με την ισχύ του φορτίου συμπεριλαμβάνοντας και τις όποιες απώλειες ισχύος του μετατροπέα υπάρχουν. Με την εκτέλεση του αλγόριθμου ρυθμίζονται οι τιμές του duty cycle και του phase shift ratio θ επιτυγχάνοντας τον συνεχή έλεγχο του μετατροπέα ισχύος και διασφαλίζοντας την αρμονική λειτουργία της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου ρυθμίζοντας την ροή ισχύος του συστήματος. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3 όταν το duty cycle είναι μεγαλύτερο του 0,5 το ρεύμα της μπαταρίας αυξάνεται ενώ σε αντίθετη περίπτωση μειώνεται.



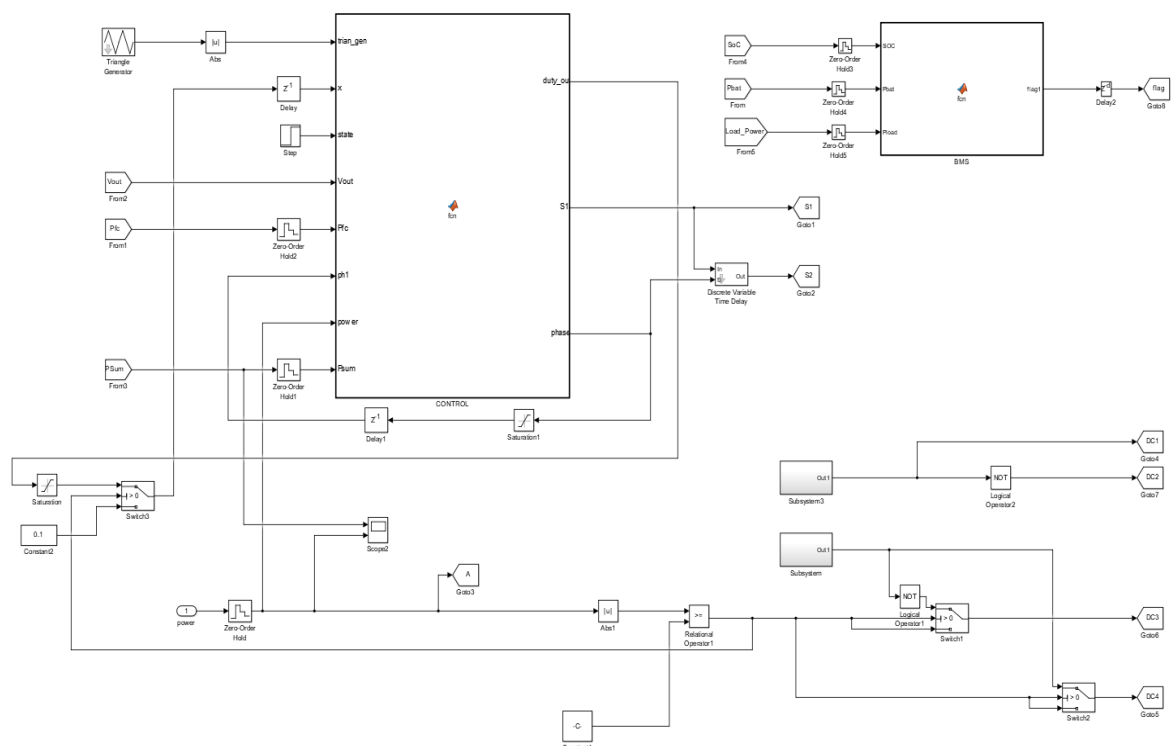
Σχήμα 4-7. Διάγραμμα ροής ελέγχου του μετατροπέα ισχύος.

Αντίστοιχα, με την χρήση ενός ακόμη Matlab function block γίνεται η διαχείριση ενέργειας της μπαταρίας (Battery Management System-BMS) στο block BMS. Με τον συνεχή έλεγχο της τιμής SoC της μπαταρίας το BMS αποφασίζει για την φόρτιση ή εκφόρτιση της ανάλογα με τις τιμές κατωφλίου που έχουν οριστεί.

Αναλυτικότερα, όταν το SoC της μπαταρίας υπερβεί το ανώτατο όριο που έχει οριστεί (SoC = 90%), τότε δίνεται σήμα στον ρυθμιστή ροής καυσίμου της κυψέλης καυσίμου να μειώσει την

ροή καυσίμου. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα η κυψέλη καυσίμου να παράγει την ελάχιστη δυνατή ισχύ και η ζήτηση του φορτίου να καλύπτεται από την μπαταρία και επομένως να εκφορτίζεται. Θέτοντας το ανώτατο όριο στο 90% και όχι στο 100% επιτυγχάνεται να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα η μπαταρία να υπερφορτιστεί και να αποφευχθεί ο κίνδυνος της υπερθέρμανσής της μπαταρίας, κάτι που επηρεάζει την διάρκεια ζωής της[9]. Επιπλέον στην περίπτωση που η μπαταρία είναι στο 100% φορτισμένη και το όχημα επιβραδύνει δεν θα υπάρχει η δυνατότητα να αποθηκευτεί η ενέργεια που παράγεται εξαιτίας του regenerative – braking με αποτέλεσμα να περάσει ανεκμετάλλευτη και να χαθεί. Στην περίπτωση που το SoC της μπαταρίας ξεπεράσει το κατώτατο όριο ($SoC = 55\%$), τότε στέλνεται εκ νέου σήμα στο ρυθμιστή ροής καυσίμου, οπότε αυτή την φορά ρυθμίζει την ροή καυσίμου να είναι η μέγιστη δυνατή και η μπαταρία να φορτιστεί. Επιπλέον, στην περίπτωση όπου η ζήτηση είναι αρκετά υψηλή σε βαθμό που δεν μπορεί να καλυφθεί εξ' ολοκλήρου από την μπαταρία και η μπαταρία βρίσκεται στην φάση της εκφόρτισης, τότε στέλνεται σήμα στον ρυθμιστή της ροής καυσίμου να θέσει την κυψέλη καυσίμου στον μέγιστο δυνατό βαθμό παραγωγής ενέργειας.

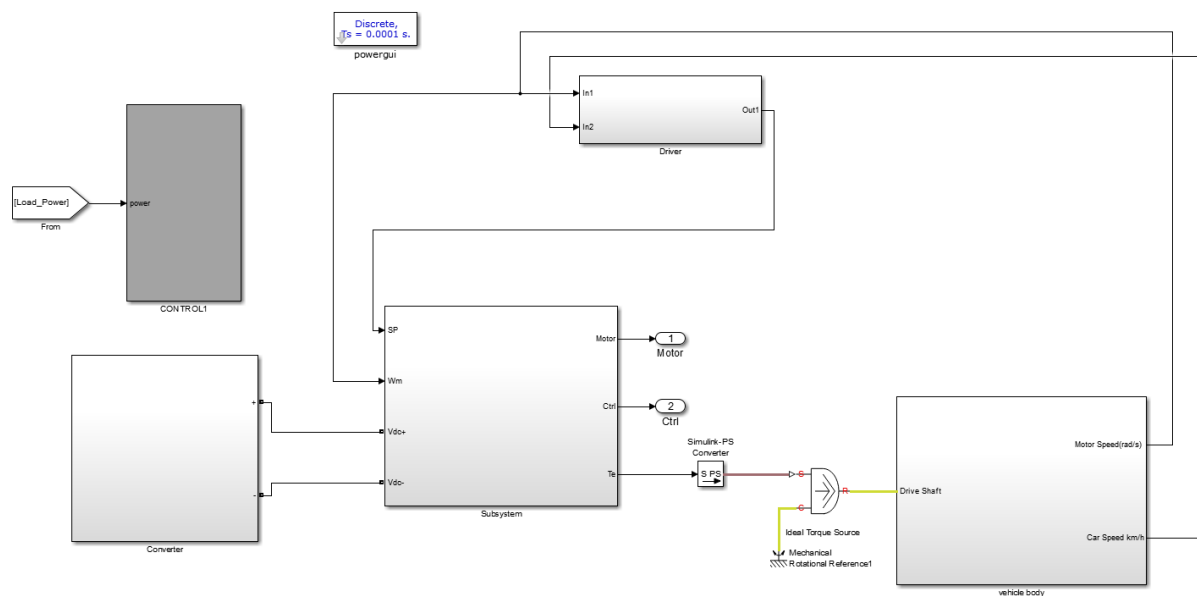
Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του block Control.



Σχήμα 4-8. Μοντελοποίηση του Control block στο περιβάλλον του Simulink.

4.6 Συνολικό Μοντέλο Οχήματος

Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται το συνολικό μοντέλο του οχήματος και ο τρόπος που συνδέονται μεταξύ τους όλα τα τμήματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4. Το block Driver δέχεται ως είσοδο την ταχύτητα του οχήματος από το block Vehicle Body και συγκρίνοντας την με την ταχύτητα αναφοράς του driving cycle παράγει μια ροπή αναφοράς που με την σειρά της συνδέεται με το block του ηλεκτροκινητήρα. Ο τριφασικός αντιστροφέας του ηλεκτροκινητήρα με τις εισόδους Vdc+ και Vdc- συνδέεται με τον μετατροπέα ισχύος. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα μετατρέπεται σε μηχανική μέσω του Ideal Torque Source και συνδέεται με το Vehicle Body. Το block Control δέχεται και παράγει σήματα για την ορθή λειτουργία του συστήματος και αποτελεί το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του οχήματος.



Σχήμα 4-9. Συνολικό μοντέλο του οχήματος στο περιβάλλον του Simulink.

5.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

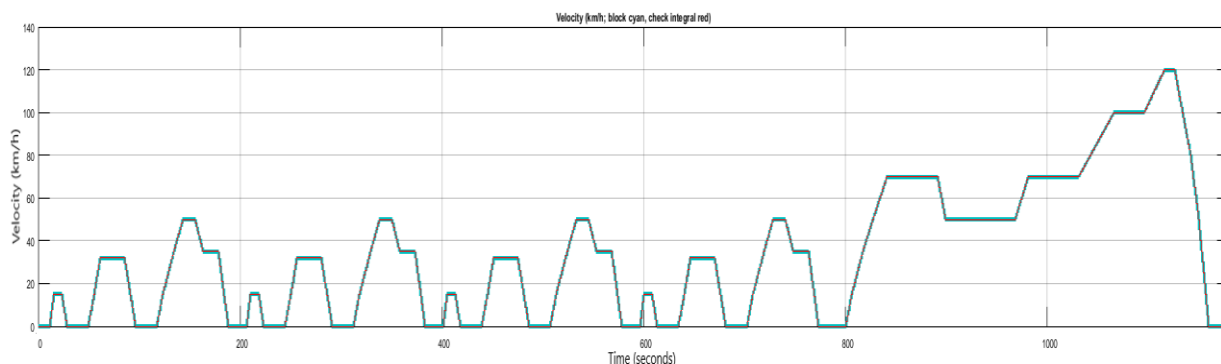
5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Όλα τα αποτελέσματα προσομοιώνονται στο περιβάλλον του Simulink της Matlab με την χρήση Scopes. Η προσομοίωση εκτελείται τέσσερις φορές με την χρήση διαφορετικών κύκλων οδήγησης για την παρατήρηση της λειτουργίας του οχήματος και της συμπεριφοράς του συστήματος διαχείρισης ενέργειας σε διαφορετικές συνθήκες οδήγησης. Επιπλέον, ως όρια λειτουργίας της μπαταρίας στο σύστημα διαχείρισης μπαταρίας BMS έχουν τεθεί οι τιμές SoC 55%-90%. Το sample time της προσομοίωσης είναι 0.0001 sec.

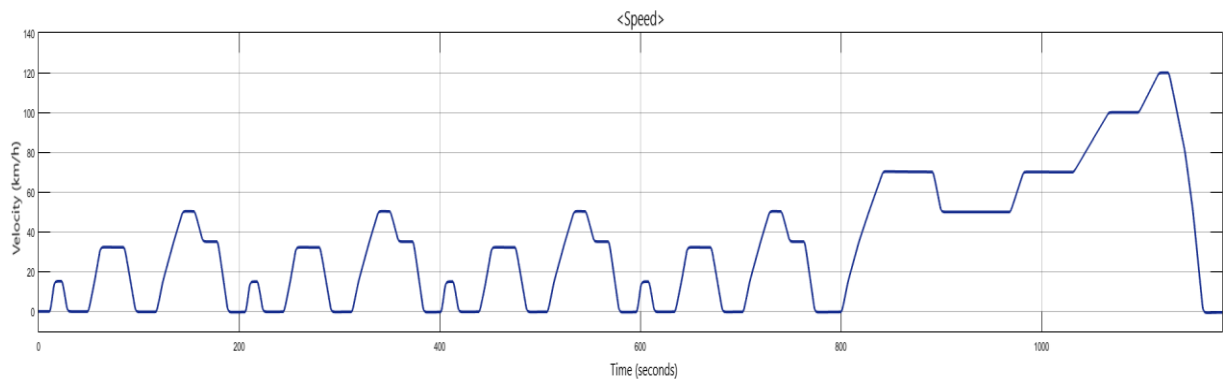
Παρακάτω παρουσιάζονται με την σειρά όλα τα αποτελέσματα που προσομοιώθηκαν με τους κύκλους οδήγησης NEDC , FTP ,WLTP Class3 και ArtMW 150.

5.1.1 Κύκλος οδήγησης NEDC

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η ταχύτητα του κύκλου οδήγησης NEDC, η διάρκεια του οποίου είναι 1180 sec. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.2, η ταχύτητα του οχήματος της μοντελοποίησης είναι η ίδια με την ταχύτητα του κύκλου οδήγησης με ελάχιστες αποκλίσεις της τάξης του 1 m/s.

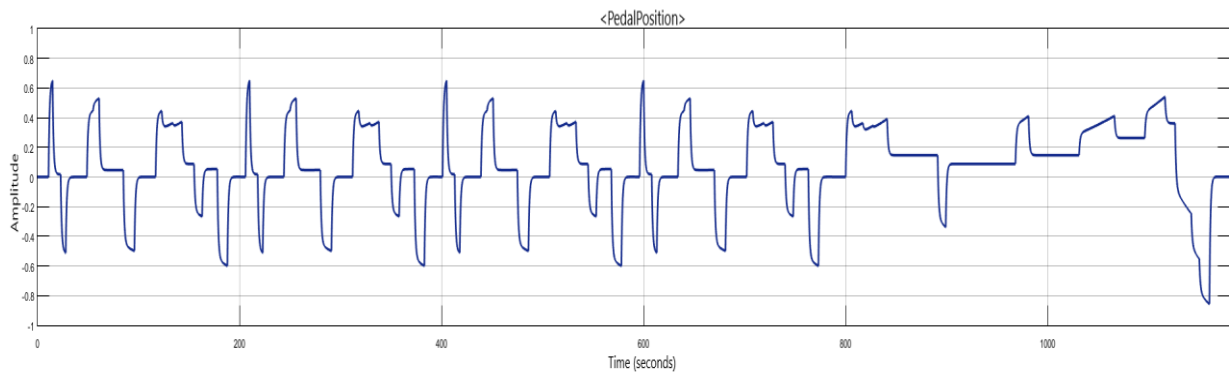


Σχήμα 5.1. Ταχύτητα κύκλου οδήγησης NEDC.



Σχήμα 5.2. Ταχύτητα οχήματος μοντελοποίησης στον κύκλο οδήγησης NEDC.

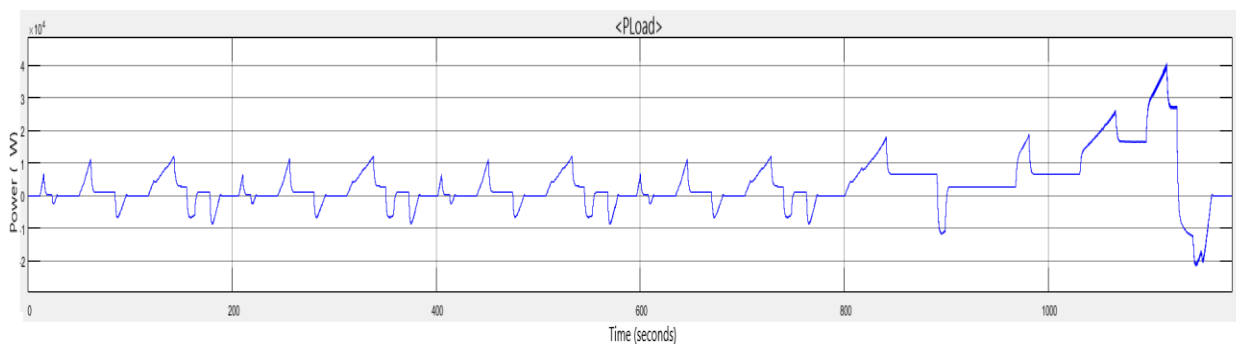
Οι εντολές του οδηγού για το πότε θα επιταχύνει ή επιβραδύνει το όχημα φαίνονται στο Σχήμα 5.3. Από αυτή την τιμή του πεταλιού επιτάχυνσης προκύπτει η ροπή αναφοράς του κινητήρα.



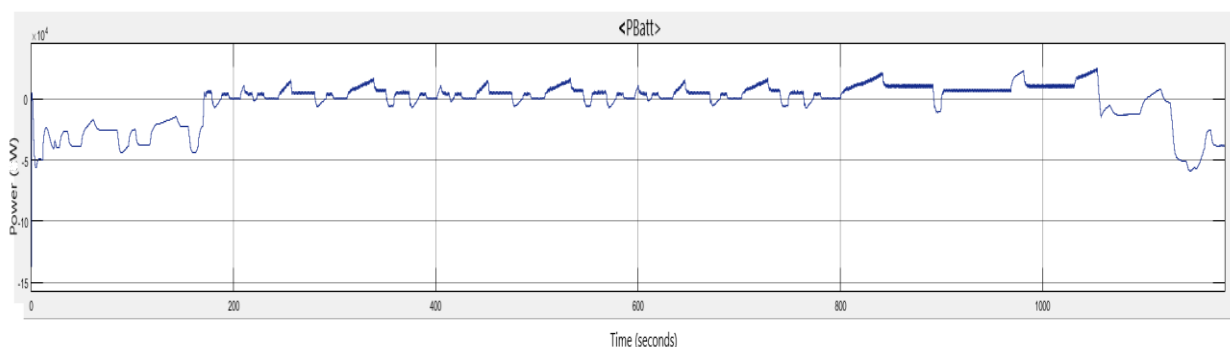
Σχήμα 5.3. Θέση πεταλιού επιτάχυνσης οχήματος στον κύκλο NEDC.

Στα Σχήματα 5.4, 5.5 και 5.6, παρουσιάζονται η ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής, της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου αντίστοιχα. Η αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας SoC έχει την τιμή 60% και η μπαταρία φορτίζεται. Η ροή καυσίμου της κυψέλης υδρογόνου είναι η μέγιστη δυνατή, επομένως και η ισχύς που έχει την δυνατότητα να παράγει η κυψέλη καυσίμου αναλόγως με την τάση στου ακροδέκτες της είναι η μέγιστη δυνατή. Το όχημα είναι ακίνητο ως την στιγμή 11 sec και σε αυτό το διάστημα η κυψέλη καυσίμου φορτίζει την μπαταρία με ισχύ που φτάνει τα 50 kW και ο μετατροπέας ισχύος βρίσκεται στην λειτουργία 4 όπως αναφέρεται

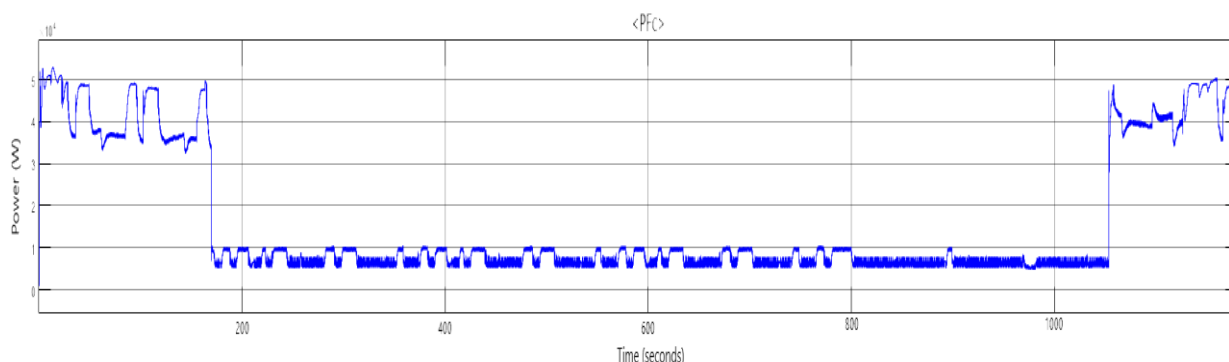
στο Κεφάλαιο 3. Εφόσον ξεκινήσει το όχημα, παρατηρείται η αύξηση της ισχύος του φορτίου που απαιτεί η τροφοδότηση του κινητήρα. Στο μεγαλύτερο μέρος του κύκλου οδήγησης η ισχύς του φορτίου είναι σχετικά χαμηλή φτάνοντας στα 1,4 kW ενώ, στο τέλος της διαδρομής, αυτή η ισχύς φτάνει ως τα 40 kW. Επίσης, η αρνητική ισχύς που παρατηρείται έχει να κάνει με το regenerative braking, δηλαδή την δυνατότητα της ηλεκτρικής μηχανής να λειτουργεί ως γεννήτρια, με αποτέλεσμα, ο μετατροπέας ισχύος να είναι στην λειτουργία 3 και να φορτίζεται η μπαταρία και από την μηχανή.



Σχήμα 5.4. Ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης NEDC.



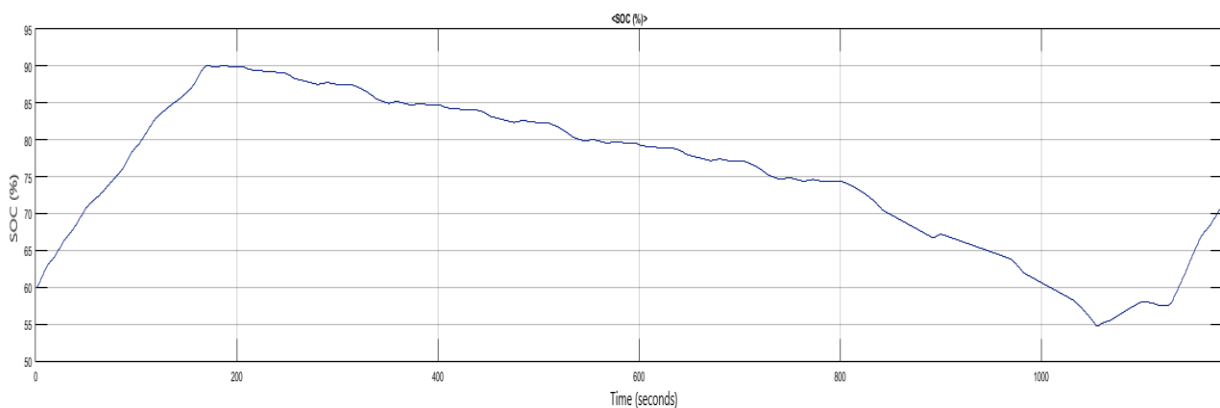
Σχήμα 5.5. Ισχύς της μπαταρίας του οχήματος στον κύκλο οδήγησης NEDC.



Σχήμα 5.6. Ισχύς της κυψέλης καυσίμου του οχήματος στον κύκλο οδήγησης NEDC.

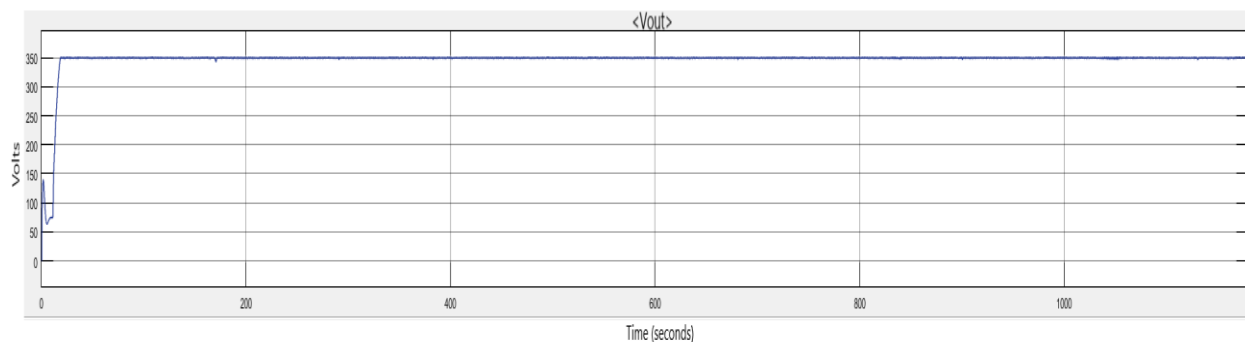
Στο Σχήμα 5.6 την χρονική στιγμή $t = 169$ sec παρατηρείται μια απότομη πτώση της ισχύος της κυψέλης καυσίμου. Αυτή η μείωση στην τιμή ισχύος οφείλεται στην διαχείριση ενέργειας της μπαταρίας. Η μπαταρία σε εκείνο το σημείο φτάνει την τιμή κατωφλίου φόρτισης που έχει οριστεί (SoC= 90%) και επομένως στέλνεται σήμα στον ρυθμιστή της ροής καυσίμου να μειώσει την ροή υδρογόνου της κυψέλης στο ελάχιστο δυνατό. Για το επόμενο διάστημα η ισχύς της κυψέλης καυσίμου κυμαίνεται στα 6 με 10 kW. Όλο αυτό το διάστημα, το φορτίο καλύπτεται από την μπαταρία με την κυψέλη να καλύπτει τις απώλειες του μετατροπέα ισχύος. Αυτό, φαίνεται και στο Σχήμα 5.5 της ισχύος της μπαταρίας καθώς, στα πρώτα δευτερόλεπτα της λειτουργίας του οχήματος μέχρι την στιγμή $t = 169$ sec η τιμή της ισχύος είναι αρνητική, δηλαδή η μπαταρία φορτίζεται ενώ, έπειτα, παίρνει θετικές τιμές που δείχνει την διαδικασία εκφόρτισης. Η λειτουργία του regenerative braking παρατηρείται και στο Σχήμα 5.5, καθώς ακόμη και όταν η μπαταρία υποστηρίζει από μόνη της το φορτίο υπάρχουν στιγμές που φορτίζεται και η τιμή της ισχύος της είναι αρνητική. Την χρονική στιγμή $t = 1053$ sec, η κυψέλη καυσίμου επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση. Η ροή καυσίμου είναι η μέγιστη δυνατή και η κυψέλη καλύπτει και την ζήτηση του φορτίου αλλά και την φόρτιση της μπαταρίας. Αυτό συμβαίνει, διότι εκείνη την στιγμή το SoC της μπαταρίας είναι στο κατώτατο όριο που έχει οριστεί και επομένως ξεκινάει εκ νέου η φόρτιση της μπαταρίας. Επιπλέον, η λειτουργία 1 του μετατροπέα ισχύος φαίνεται στο διάστημα $t_1=1103$ sec έως $t_2= 1120$ sec, όπου λαμβάνοντας υπόψιν και τις απώλειες που παρουσιάζει ο μετατροπέας η κυψέλη καυσίμου δεν μπορεί να καλύψει το φορτίο που απαιτεί ο κινητήρας και την φόρτιση της μπαταρίας ταυτόχρονα, οπότε η μπαταρία παράγει ισχύ για την κάλυψη της ζήτησης δίχως να παρουσιάζεται πτώση τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.

Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας που παρατηρείται στα προηγούμενα σχήματα επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 5.7 της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας. Η μπαταρία ξεκινάει στο 60% και όπως φαίνεται δεν ξεπερνάει ποτέ τις τιμές κατωφλίου που έχουν τεθεί. Όταν φτάσει στο 90% ξεκινάει η εκφόρτιση της ως το ποσοστό του 55%, έπειτα η μπαταρία φορτίζεται και από την κυψέλη καυσίμου και από την μηχανή όταν αυτή λειτουργεί ως γεννήτρια.

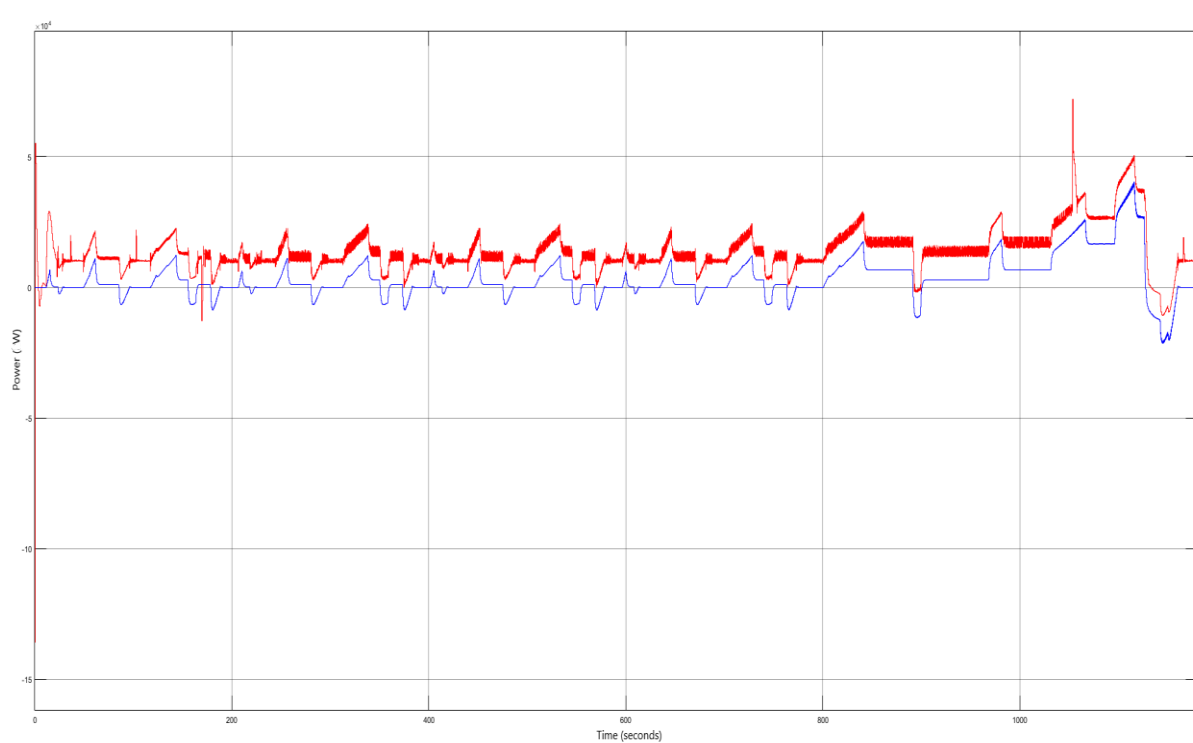


Σχήμα 5.7. Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας (SoC) στον κύκλο οδήγησης NEDC.

Η τάση εξόδου του μετατροπέα σε όλη την διάρκεια του κύκλου οδήγηση παραμένει στα 350 V με μικρή κυμάτωση μεγέθους 0,5 V όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 5.8. Αυτό δείχνει την ικανότητα του μετατροπέα να διατηρεί σταθερή την τάση εξόδου, ανεξαρτήτως της λειτουργίας του και τις αλλαγές στην ζήτηση του φορτίου και στην εναλλαγή της ροής ισχύος. Η μοναδική φορά που υπάρχει πτώση της τάσης είναι στα 169 sec, όπου ο ρυθμιστής της ροής καυσίμου αναγκάζει την απότομη πτώση της ισχύς της κυψέλης καυσίμου με αποτέλεσμα για μικρό χρονικό διάστημα η μπαταρία και η κυψέλη καυσίμου αθροιστικά να μην μπορούν να καλύψουν το φορτίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9 όπου παρουσιάζεται αθροιστικά η ισχύς της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου σε σύγκριση με την ισχύ του φορτίου.



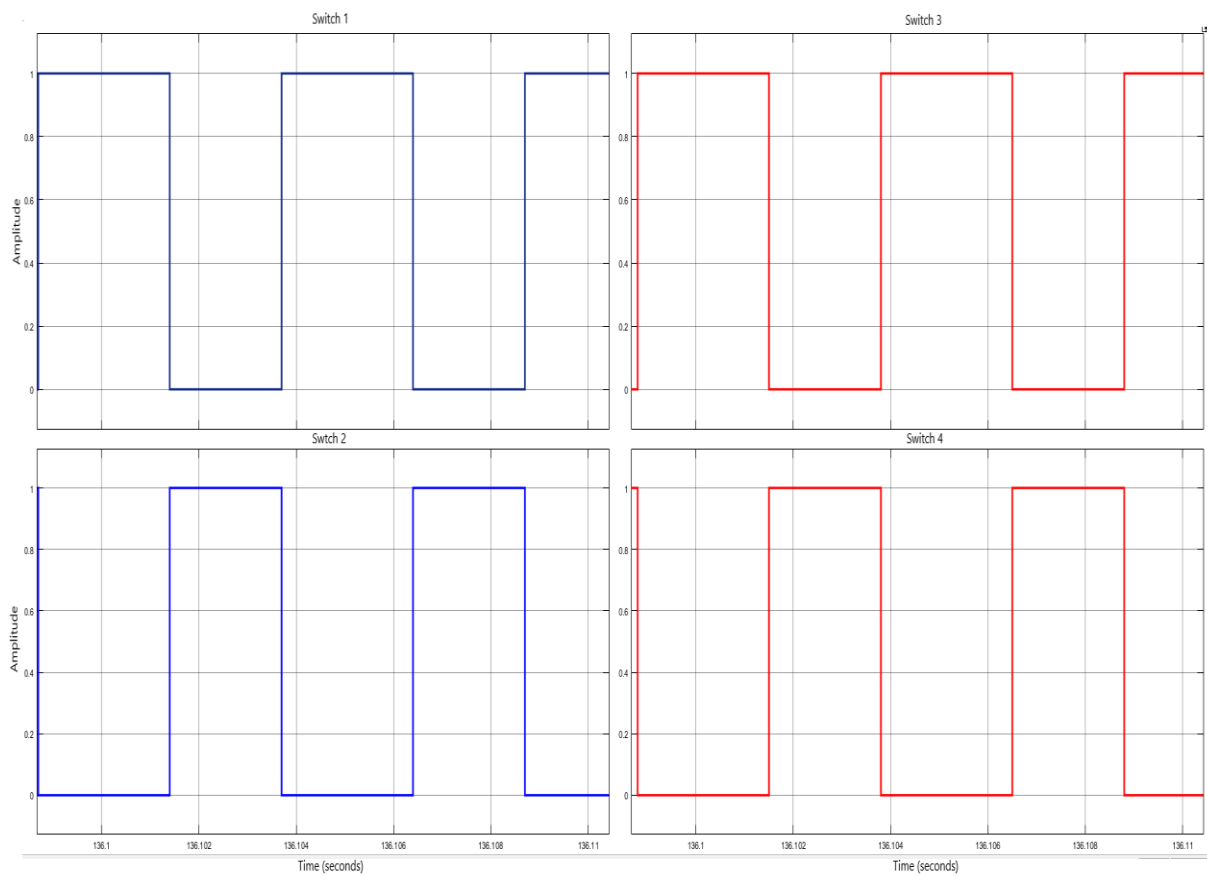
Σχήμα 5.8. Τάση εξόδου μετατροπέα ισχύος στον κύκλο οδήγησης NEDC.



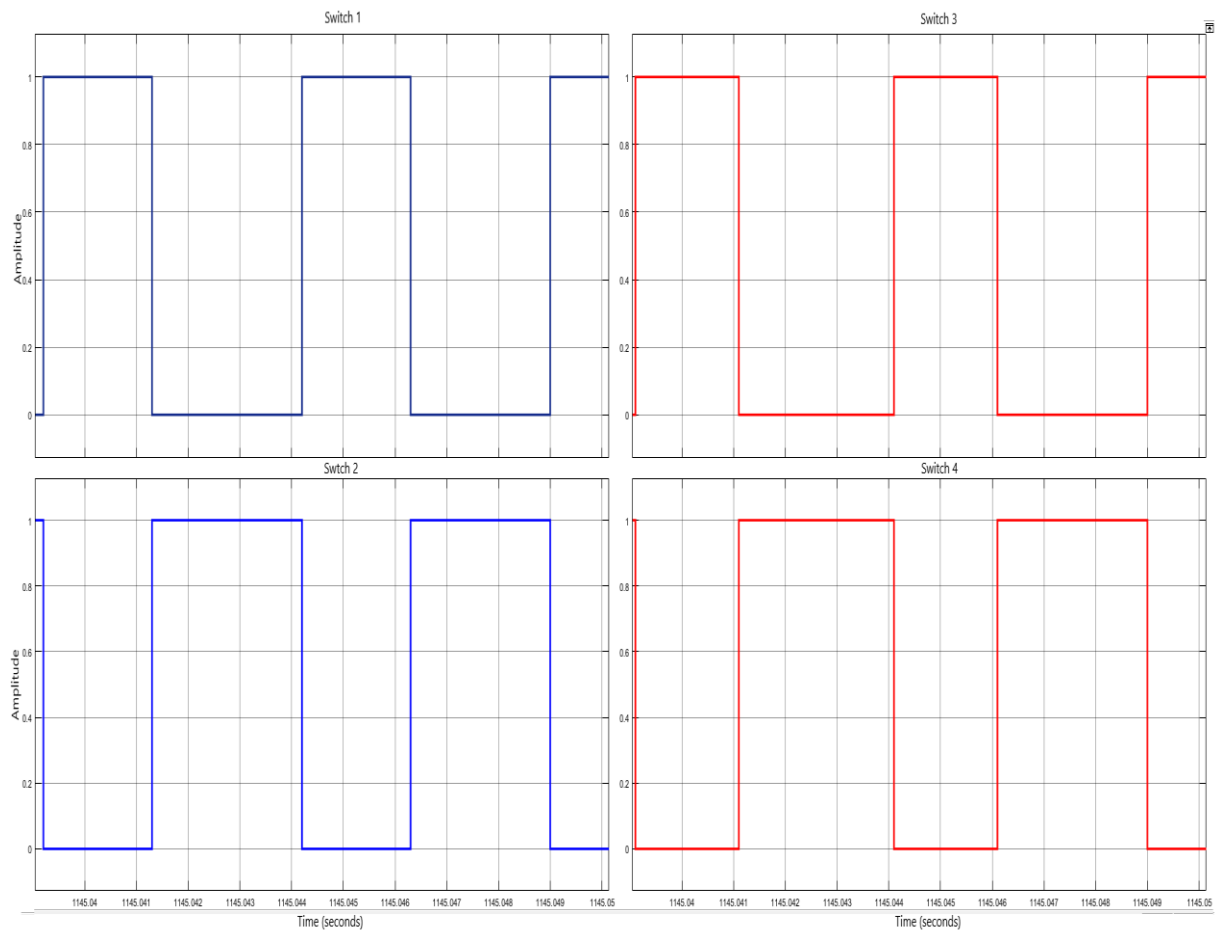
Σχήμα 5.9. Ισχύς (αθροιστική μπαταρίας-κυψέλης καυσίμου με κόκκινο, ηλεκτρικής μηχανής με μπλε) στον κύκλο οδήγησης NEDC.

Τα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζουν την λειτουργία των διακοπών του μετατροπέα σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές και σε δύο διαφορετικές λειτουργίες του μετατροπέα δείχνοντας την ρύθμιση του duty cycle και του phase shift ratio θ . Στο Σχήμα 5.10 διακρίνεται η

καθυστέρηση των διακοπών S_3 και S_4 σε σύγκριση με τους S_1 και S_2 καθώς και όταν ανοίγουν οι S_1 και S_3 κλείνουν οι S_2 και S_4 . Στο Σχήμα 5.11 όπου ο μετατροπέας βρίσκεται στην λειτουργία 3 και η μηχανή τροφοδοτεί την μπαταρία φαίνεται ότι οι διακόπτες S_3 και S_4 προηγούνται των S_1 και S_2 .



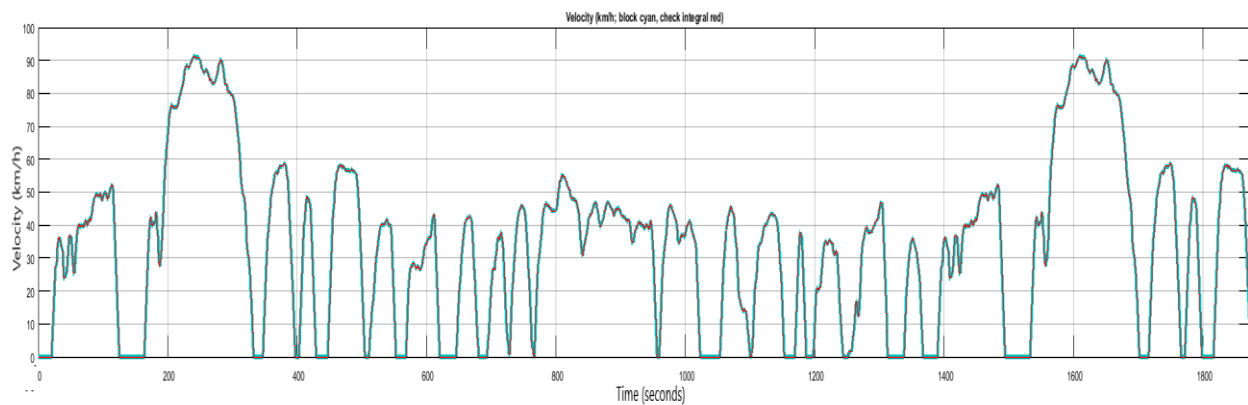
Σχήμα 5.10. Duty Cycle των διακοπών του μετατροπέα ισχύος κατά την λειτουργία 2 στον κύκλο οδήγησης NEDC.



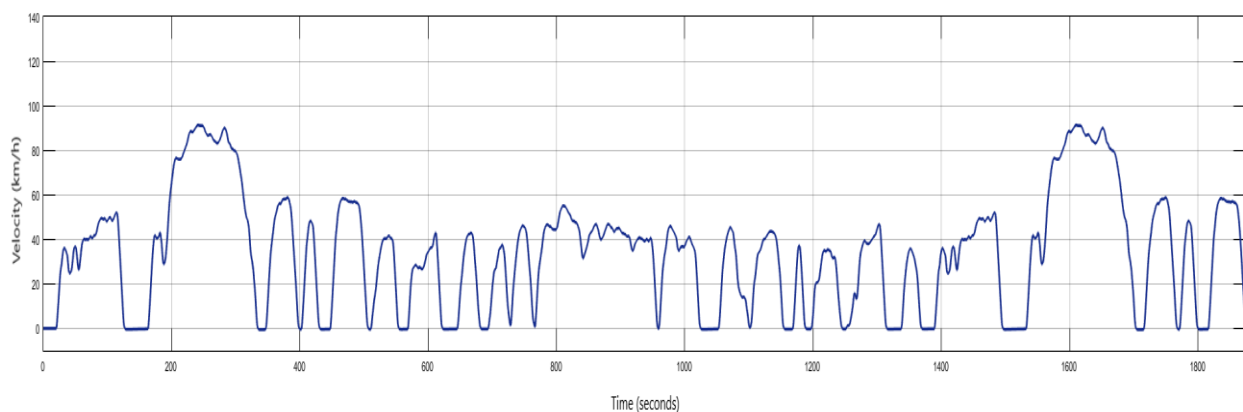
Σχήμα 5.11. Duty Cycle των διακοπών του μετατροπέα ισχύος κατά την λειτουργία 3 στον κύκλο οδήγησης NEDC.

5.1.2 Κύκλος οδήγησης FTP

Ο κύκλος οδήγησης FTP διαρκεί 1874 sec και η ταχύτητα του παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12. Οι διαφορές με την ταχύτητα που αναπτύσσει το όχημα της παρούσας εργασίας (Σχήμα 5.13) είναι σχεδόν μηδαμινές.



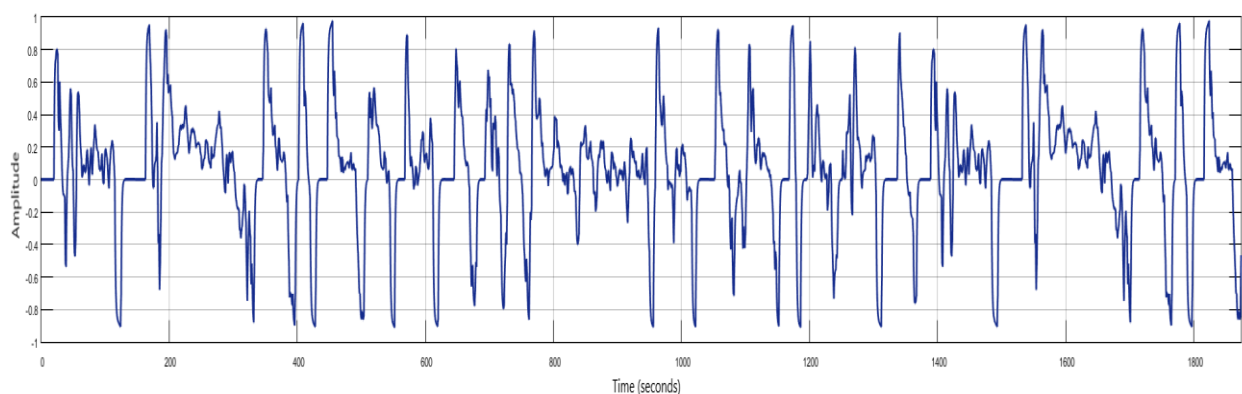
Σχήμα 5.12. Ταχύτητα κύκλου οδήγησης FTP.



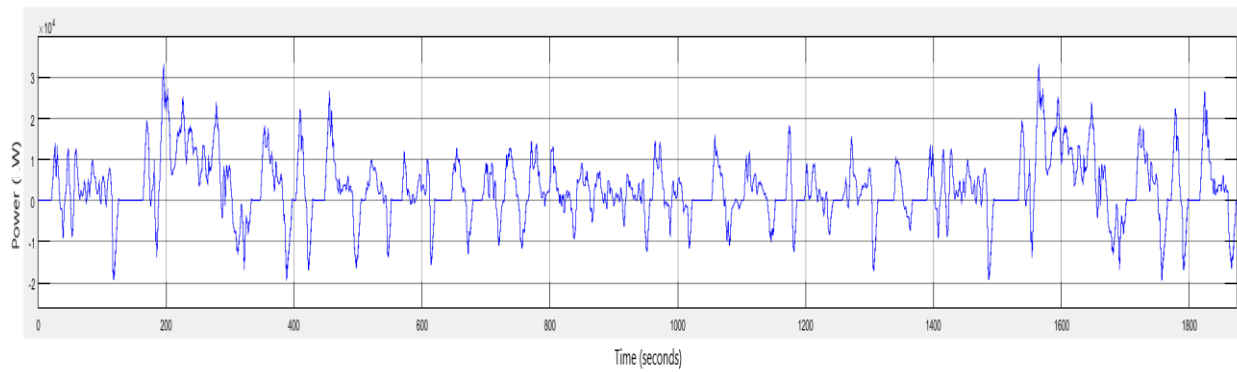
Σχήμα 5.13. Ταχύτητα οχήματος μοντελοποίησης στον κύκλο οδήγησης FTP.

Όπως είναι αναμενόμενο, με διαφορετικό κύκλο οδήγησης -εκτός από την ταχύτητα- αλλάζει η συμπεριφορά της ηλεκτρικής μηχανής και η ενέργεια που καταναλώνει. Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η ισχύς του φορτίου της ηλεκτρικής μηχανής. Η ισχύς φτάνει τα 33 kW ενώ στο μεγαλύτερο κομμάτι της διαδρομής κυμαίνεται σε τιμές χαμηλότερες από τα 20 kW. Η ισχύς της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου δίνονται στα Σχήματα 5.16 και 5.17 αντίστοιχα. Στα πρώτα 161 sec η κυψέλη καυσίμου καλύπτει το φορτίο και φορτίζει την μπαταρία με την περίσσεια ενέργειας που παράγει. Εκείνη την στιγμή, υπάρχει η ραγδαία μείωση στην ισχύ της καθώς από το BMS στέλνεται σήμα να μειωθεί η ροή του υδρογόνου στην κυψέλη, διότι η μπαταρία έχει φτάσει το ανώτατο όριο φόρτισης. Για τα επόμενα 35 sec η μπαταρία καλύπτει το φορτίο και η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στο ελάχιστο δυνατό. Στα 194 sec παρατηρείται η απότομη αύξηση της ισχύος της κυψέλης καυσίμου και η κυψέλη λειτουργεί με την μέγιστη ροή

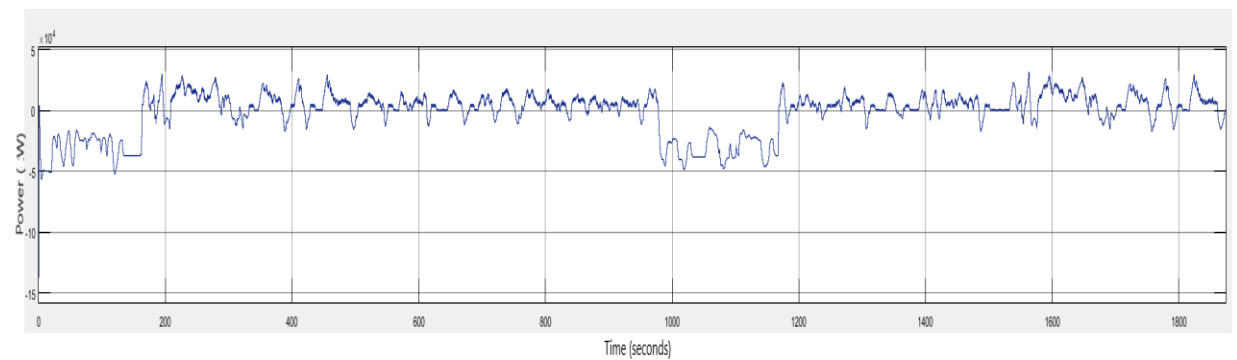
υδρογόνου για τα επόμενα 10 sec όπου και πάλι μειώνεται η ροή του καυσίμου. Αυτό συμβαίνει διότι η ισχύς της μπαταρίας φτάνει τα 30 kW και δεν μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη ισχύ της ηλεκτρικής μηχανής. Έτσι, για να παραμείνει σταθερή η τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος, ο ρυθμιστής ροής καυσίμου δέχεται εκ νέου σήμα να παρέχει την μέγιστη δυνατή ποσότητα καυσίμου. Για να μην γίνεται συνεχώς αυτή η αλλαγή της ροής καυσίμου και να δημιουργούνται συνεχώς έντονες ταλαντώσεις στην τάση εξόδου, η κυψέλη λειτουργεί με μέγιστη ροή υδρογόνου μέχρι η μπαταρία να φορτίζεται με 15 kW. Στα 204 sec ρυθμίζεται εκ νέου η ροή υδρογόνου και η μπαταρία αποφορτίζεται. Το ίδιο συμβαίνει και στα 1564 sec με διάρκεια 10 sec. Στα 977 sec διακρίνεται αλλαγή στην τιμή της ισχύος της κυψέλης, αλλά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η μπαταρία έφτασε την τιμή κατωφλίου της εκφόρτισης ($SoC = 55\%$) και ξεκινάει η φόρτιση της. Η κυψέλη αυξάνει την ισχύ της και για τα επόμενα 200 sec φορτίζει την μπαταρία και παράλληλα καλύπτει την ενέργεια που απαιτεί το όχημα. Την χρονική περίοδο που ελαττώνεται η ποσότητα του υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου, η ισχύς της κυψέλης κυμαίνεται στα 5 με 10 kW ενώ στην μέγιστη ποσότητα υδρογόνου η ισχύς κυμαίνεται από 35 ως και 50 kW αναλόγως την τιμή της τάσης στους ακροδέκτες της κυψέλης καυσίμου.



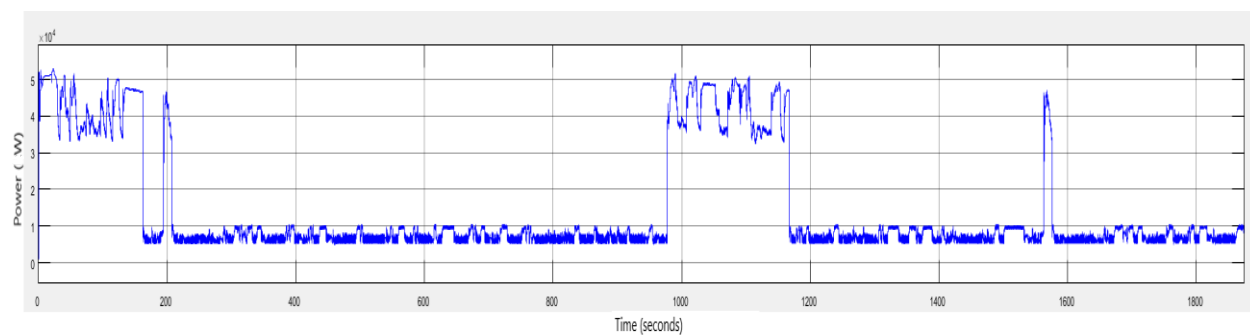
Σχήμα 5.14. Θέση πεταλιού επιτάχυνσης στον κύκλο οδήγησης FTP.



Σχήμα 5.15. Ισχύς ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης FTP.

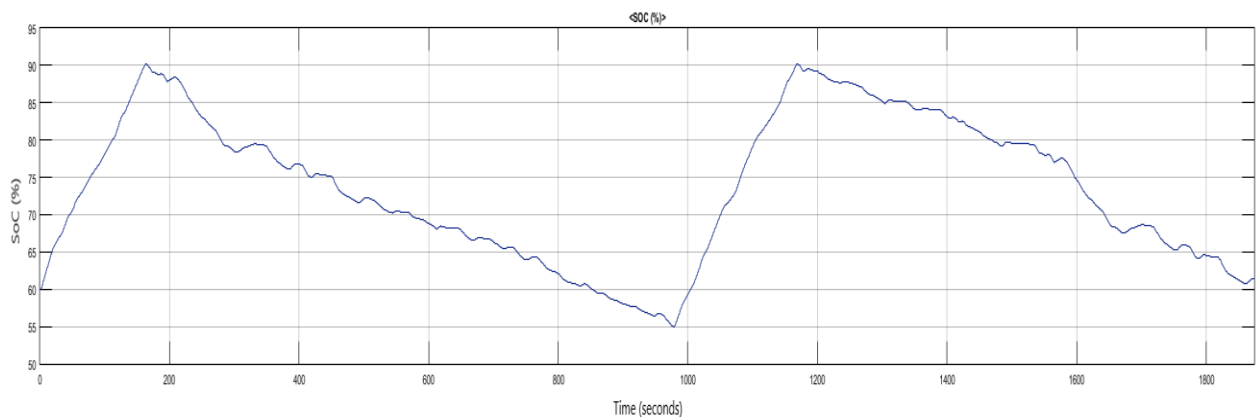


Σχήμα 5.16. Ισχύς μπαταρίας του οχήματος στον κύκλο οδήγησης FTP.



Σχήμα 5.17. Ισχύς κυψέλης καυσίμου του οχήματος στον κύκλο οδήγησης FTP.

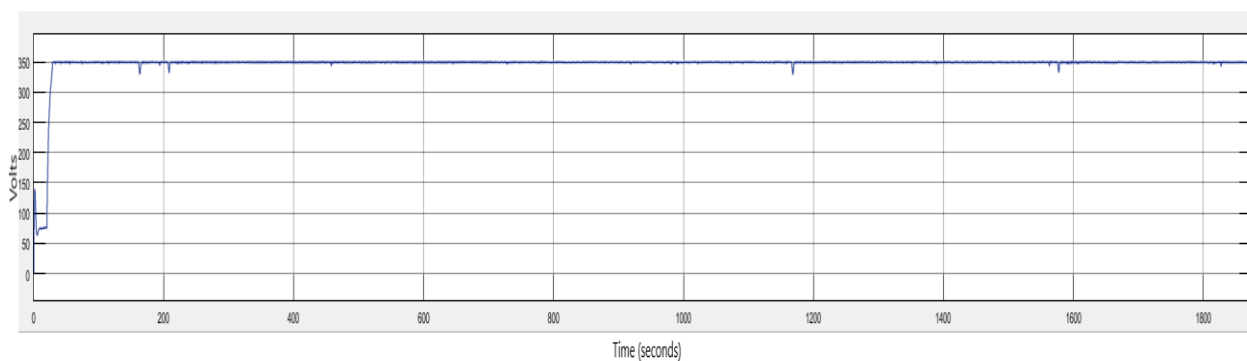
Το Σχήμα 5.18 παρουσιάζει το ποσοστό της εναπομείνουσας χωρητικότητας της μπαταρίας. Η μπαταρία σε όλη την διάρκεια του κύκλου οδήγησης λειτουργεί μέσα στα επιθυμητά όρια και δεν ξεπερνά ποτέ τις τιμές κατωφλίου που έχουν τεθεί στο σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας. Συγκεκριμένα την χρονική στιγμή $t = 161$ sec το SoC της μπαταρίας φτάνει το 90% και η μπαταρία καλύπτει το φορτίο ως τα 977 sec όπου το SoC έχει το κατώτατο όριο το 55%.



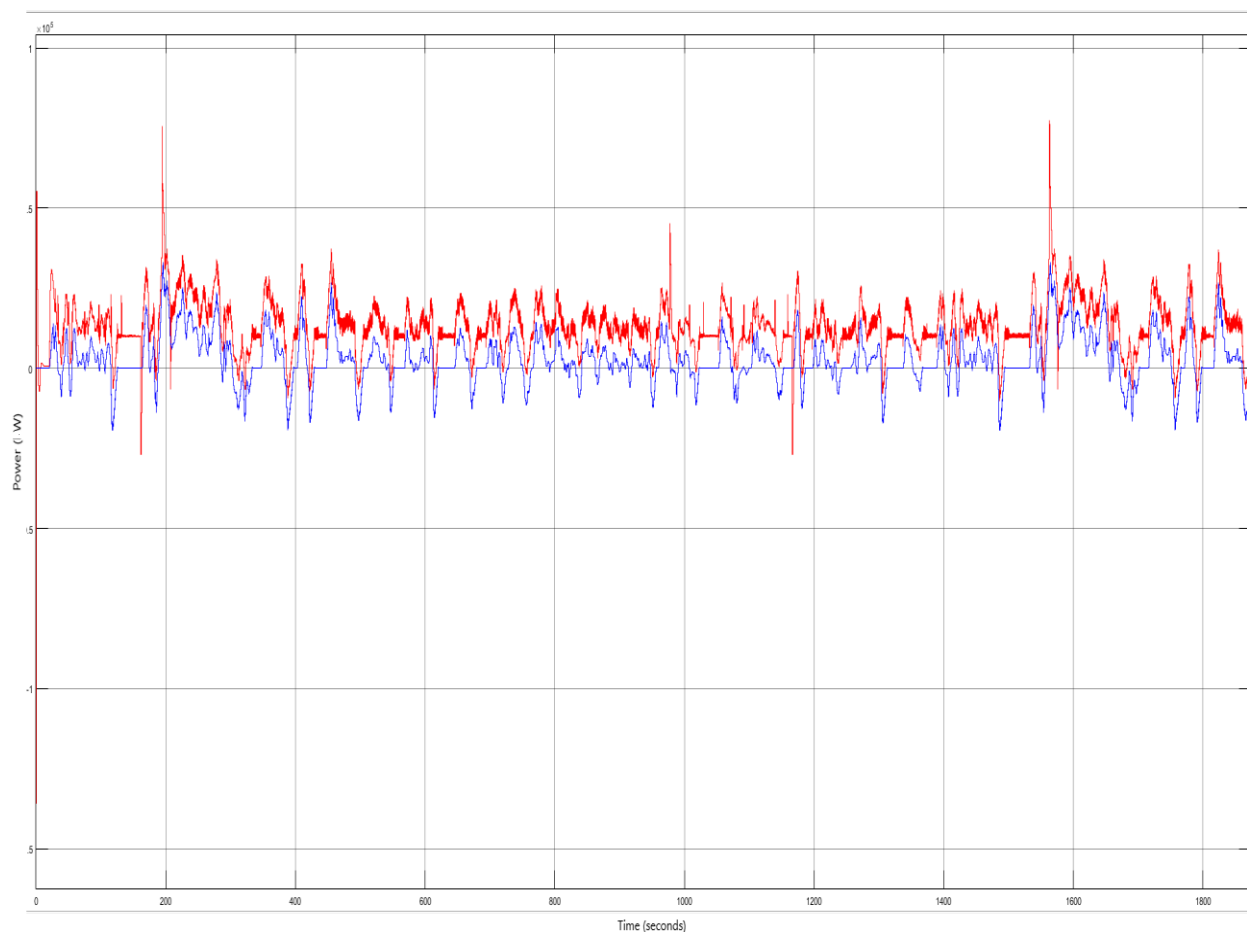
Σχήμα 5.18. Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος στον κύκλο οδήγησης FTP.

Στο διάγραμμα της τάσης εξόδου του μετατροπέα ισχύος στο Σχήμα 5.19 διακρίνεται η συμπεριφορά του μετατροπέα σε όλες τις ρυθμίσεις που γίνονται από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Η τιμή της τάσης είναι σταθερή στα 350 V με κυματώσεις από τα 350,5 V έως τα 349 V. Επίσης διακρίνεται μια μεγαλύτερη πτώση τάσης στις χρονικές στιγμές $t = 161$, 206, 1167 και 1575 sec που οφείλεται και πάλι στην απότομη μείωση της ισχύος της κυψέλης καυσίμου εκείνες τις χρονικές στιγμές, ενώ παράλληλα τότε η ισχύς της μπαταρίας είναι αρνητική, καθώς η μπαταρία φορτίζεται, με αποτέλεσμα, για μικρό χρονικό διάστημα η ισχύς του φορτίου να είναι μεγαλύτερη από την συνολική ισχύ του μετατροπέα. Αυτό, είναι πιο ευδιάκριτο στο Σχήμα 5.20 όπου παρουσιάζεται η συνολική ισχύς του μετατροπέα σε σύγκριση με το φορτίο του κινητήρα.

Γραφήματα για την λειτουργία των διακοπών δεν παρουσιάζονται για αυτόν και τους εναπομείναντες κύκλους οδήγησης, καθώς είναι ίδιοι όπως παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.10 και 5.11 του κύκλου οδήγησης NEDC. Η θέση πεταλίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14 και σύμφωνα με αυτή προκύπτει η ροπή αναφοράς του ηλεκτροκινητήρα.



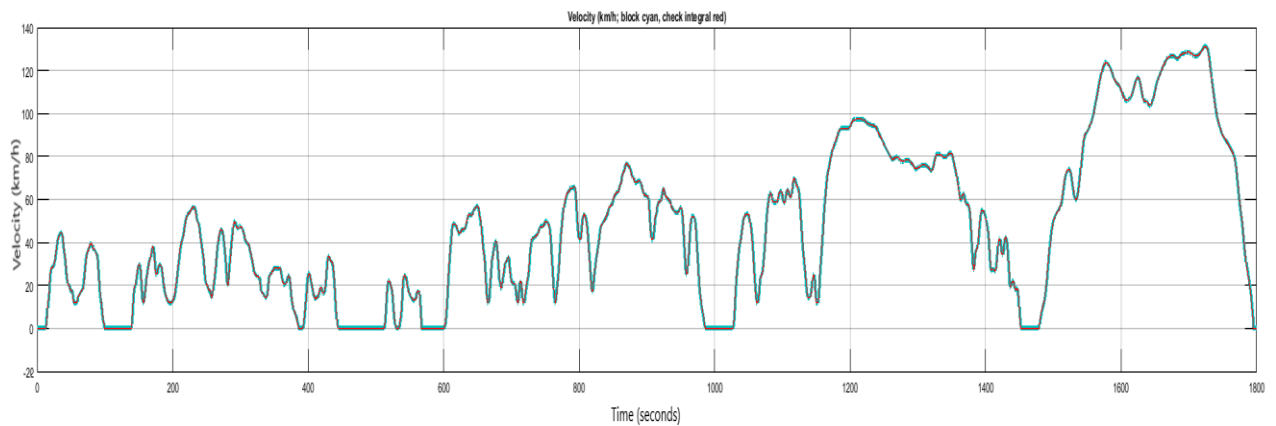
Σχήμα 5.19. Τάση εξόδου μετατροπέα ισχύος στον κύκλο οδήγησης FTP



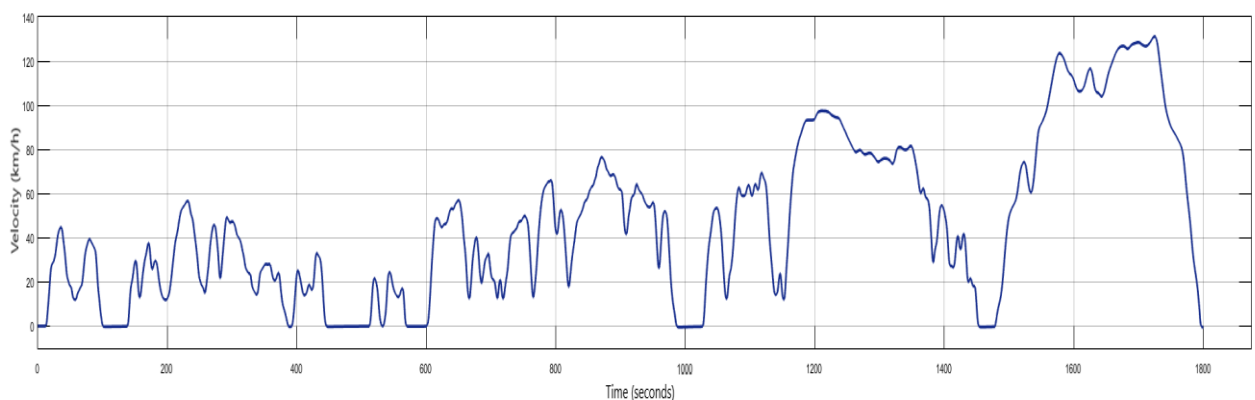
Σχήμα 5.20. Ισχύς (αθροιστική μπαταρίας-κυψέλης καυσίμου με κόκκινο, ηλεκτρικής μηχανής με μπλε) στον κύκλο οδήγησης FTP.

5.1.3 Κύκλος οδήγησης WLTP Class 3

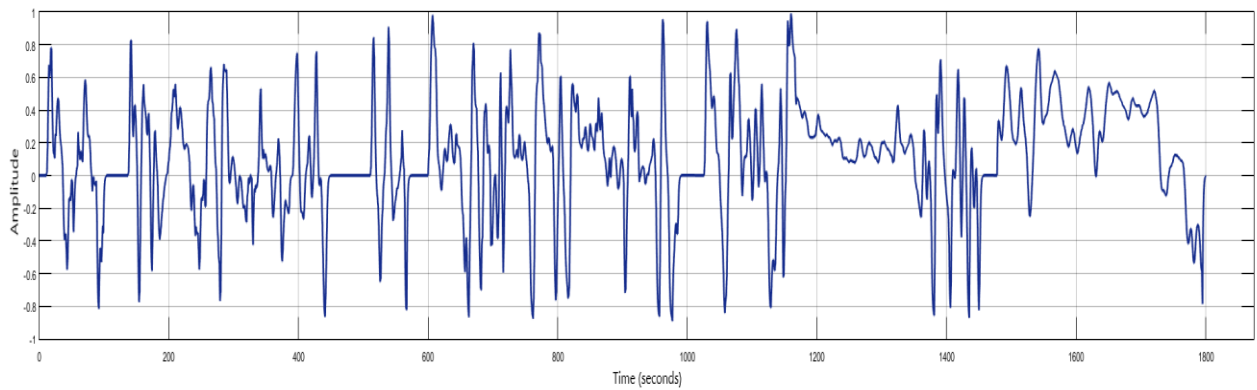
Ο κύκλος οδήγησης WLTP Class 3 έχει διάρκεια περίπου όση και ο κύκλος οδήγησης FTP. Κάνει μια διαδρομή διάρκειας 1800 sec, ενώ παρουσιάζει μεγαλύτερη επιτάχυνση και πιο απότομες επιβραδύνσεις. Συγκριτικά με τους NEDC και FTP, παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση και τελική ταχύτητα που φτάνει τα 131 km/h όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 5.21. Το όχημα της μοντελοποίησης εκτελεί τον κύκλο οδήγησης WLTP Class 3 δίχως να παρουσιάζει διαφορές συγκριτικά με την ταχύτητα του. Οι ταχύτητες που αναπτύσσει το όχημα φαίνονται στο Σχήμα 5.22. Οι εντολές του οδηγού για την επιτάχυνση ή επιβράδυνση του οχήματος προκύπτουν από την θέση του πεταλίου επιτάχυνσης η οποία διακρίνεται στο Σχήμα 5.23



Σχήμα 5.21. Ταχύτητα κύκλου οδήγησης WLTP Class 3.

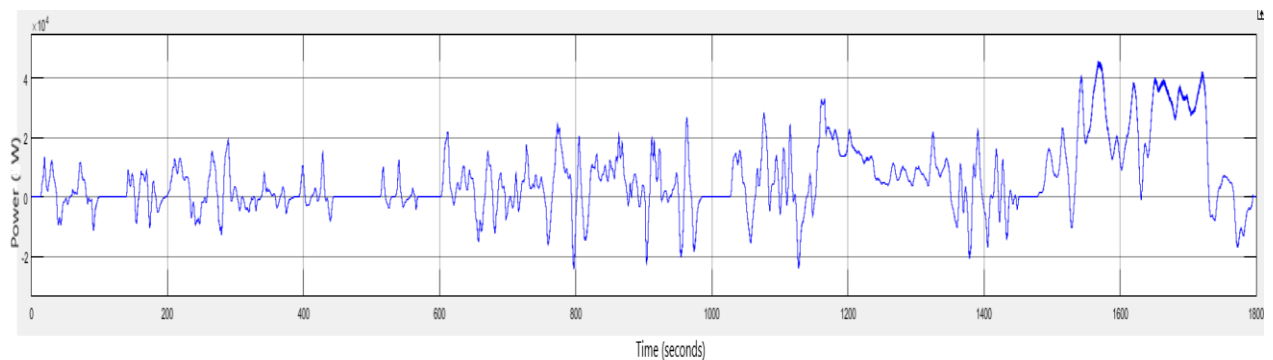


Σχήμα 5.22. Ταχύτητα κύκλου οδήγησης WLTP Class 3.



Σχήμα 5.23. Θέση πεταλίου επιτάχυνσης στον κύκλο οδήγησης WLTP Class 3.

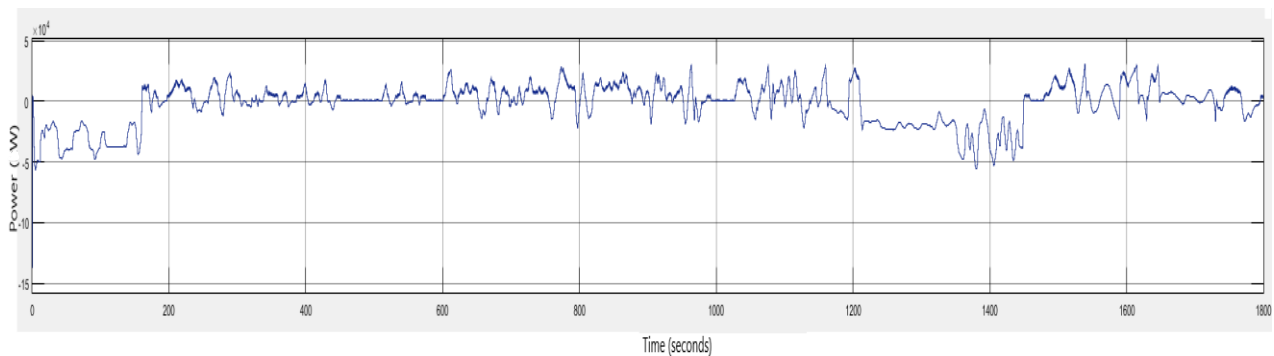
Εξαιτίας των έντονων επιταχύνσεων αλλά και επιβραδύνσεων που υπάρχουν στον WLTP, η ισχύς του κινητήρα έχει μεγαλύτερη μέση τιμή συγκριτικά με τα αποτελέσματα από τους προηγούμενους δύο κύκλους οδήγησης που εκτελέστηκαν και φτάνει σε ισχύ που ξεπερνάει τα 40 kW. Όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 5.24, η ισχύς του φορτίου στα πρώτα 1000 sec είναι σχετικά χαμηλή και φτάνει τα 25 kW. Προς το τέλος, οι αυξομειώσεις είναι μεγαλύτερες και κυμαίνονται από τα 25 kW ως και τα 45 kW.



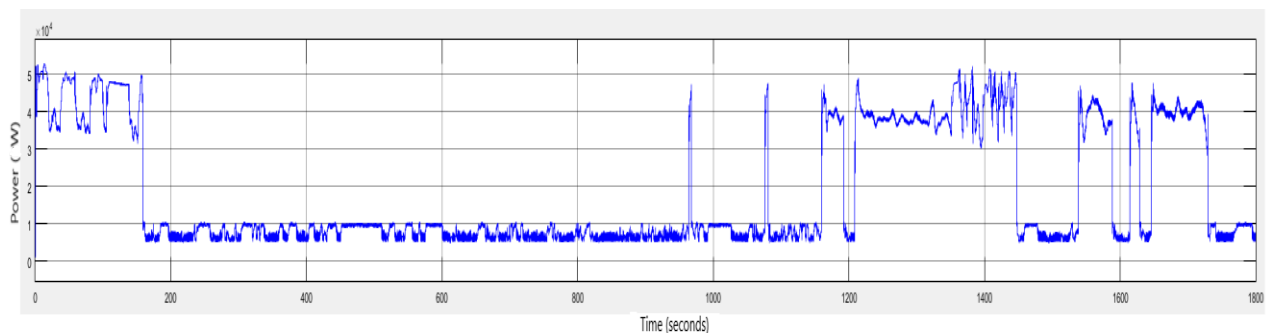
Σχήμα 5.24. Ισχύς ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης WLTP Class 3.

Στα Σχήματα 5.25 και 5.26 παρουσιάζονται η ισχύς της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου. Εξαιτίας της μορφής του WLTP Class 3 η μπαταρία όταν βρίσκεται σε κατάσταση εκφόρτισης χρειάζεται περισσότερες φορές να τεθεί σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου με μέγιστη ποσότητα καυσίμου. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.26 στα 964 sec και 1075 sec όπου η ισχύς της μπαταρίας φτάνει τα 30 kW και η ροή του υδρογόνου ρυθμίζεται στο μέγιστο για λίγα δευτερόλεπτα. Αλλά

και στα 1159 sec για μεγαλύτερη διάρκεια κοντά στο 0.5 min. Μετά τα 1200 sec η μπαταρία εκφορτίζεται μέχρι την χρονική στιγμή 1448 sec, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.25 της ισχύος της μπαταρίας όπου η ισχύς είναι αρνητική για όλο αυτό το διάστημα. Στο τέλος του κύκλου, όπου η ισχύς του φορτίου είναι μεγάλη, ενώ η κυψέλη υδρογόνου λειτουργεί με την μέγιστη ροή, η μπαταρία βοηθάει και παράγει ενέργεια για να καλυφθεί το φορτίο όπως διακρίνεται στα 1570 sec όπου το φορτίο ξεπερνάει τα 45 kW και η κυψέλη βρίσκεται στα 40 kW με την ισχύ της μπαταρίας να είναι κοντά στα 13 kW. Αυτό επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 5.29, που παρουσιάζεται η αθροιστική ισχύς της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου σε σύγκριση με την ισχύ που απαιτεί η ηλεκτρική μηχανή, καθώς στα 1570 sec η συνολική ισχύς του μετατροπέα ξεπερνάει τα 50 kW.



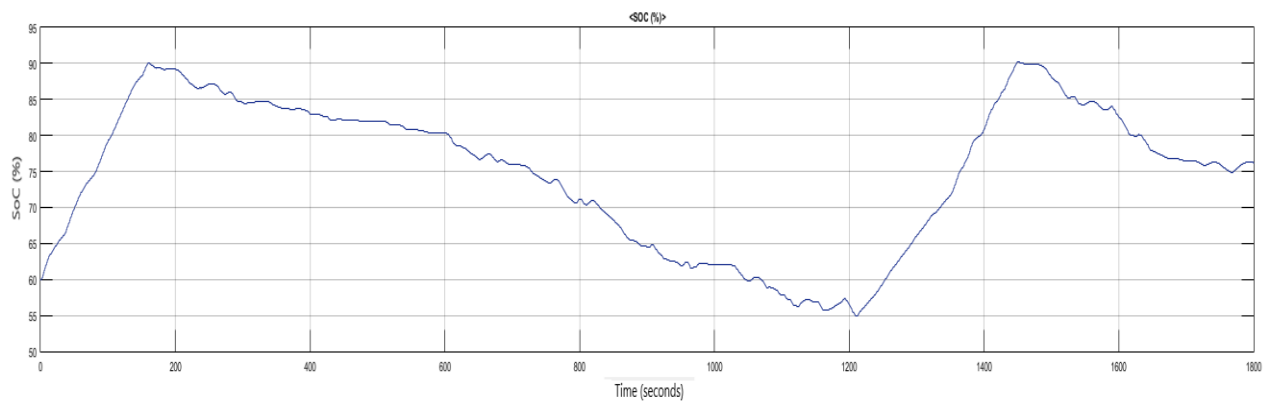
Σχήμα 5.25. Ισχύς μπαταρίας του οχήματος στον κύκλο οδήγησης WLTP Class 3.



Σχήμα 5.26. Ισχύς κυψέλης καυσίμου του οχήματος στον κύκλο οδήγησης WLTP Class 3.

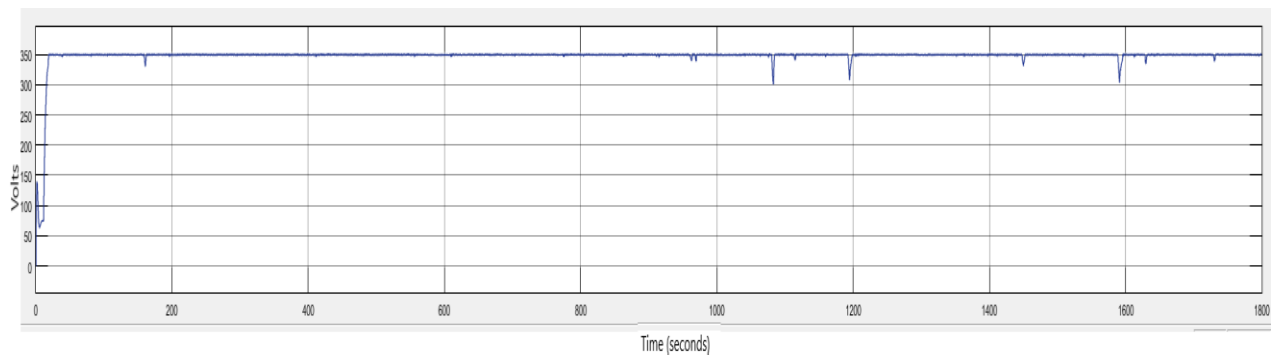
Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.27. Η μπαταρία την στιγμή που ξεκινάει η προσομοίωση βρίσκεται στο 60% SoC, και καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου οδήγησης δεν υπερβαίνει τα όρια λειτουργίας του BMS. Στα 159 sec η τιμή SoC της μπαταρίας φτάνει το 90% και ξεκινάει η εκφόρτιση της που διαρκεί 1050 sec καθώς την χρονική στιγμή $t =$

1209 sec το SoC είναι στο 55% και δίνεται εντολή στον ρυθμιστή ροής καυσίμου να αυξήσει την ποσότητα του υδρογόνου έτσι ώστε η κυψέλη καυσίμου να καλύπτει το φορτίο και να φορτίζει την μπαταρία.

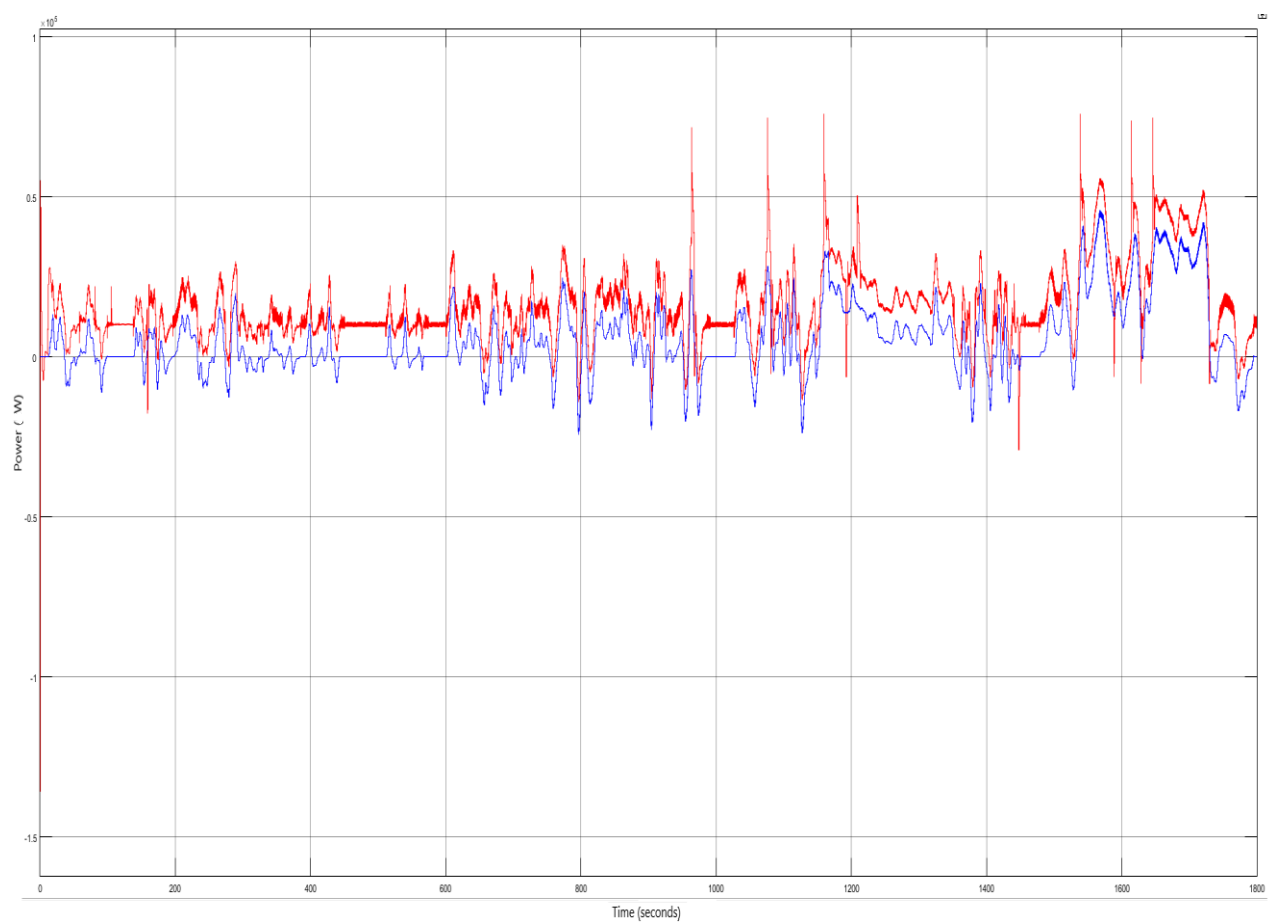


Σχήμα 5.27. Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος στον κύκλο οδήγησης WLTP Class 3.

Οι συνεχείς αλλαγές στην ροή καυσίμου για την ρύθμιση της ισχύος της κυψέλης καυσίμου έχουν ως αποτέλεσμα να υπάρχει πτώση της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 5.28 που παρουσιάζει την τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος, στην διάρκεια της προσομοίωσης υπάρχουν πτώσεις στην τάση εξόδου που φτάνουν και τα 50V. Η ραγδαία αλλαγή στην ισχύ της κυψέλης από υψηλή τιμή σε χαμηλή, έχει ως αποτέλεσμα η συνολική ισχύς του μετατροπέα να είναι μικρότερη του φορτίου για μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης, διακρίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς του φορτίου την στιγμή που γίνεται η ρύθμιση μέσω του συστήματος διαχείρισης ενέργειας τόσο μεγαλύτερο το μέγεθος της πτώσης της τάσης.



Σχήμα 5.28. Τάση εξόδου μετατροπέα ισχύος στον κύκλο οδήγησης WLTP Class 3.

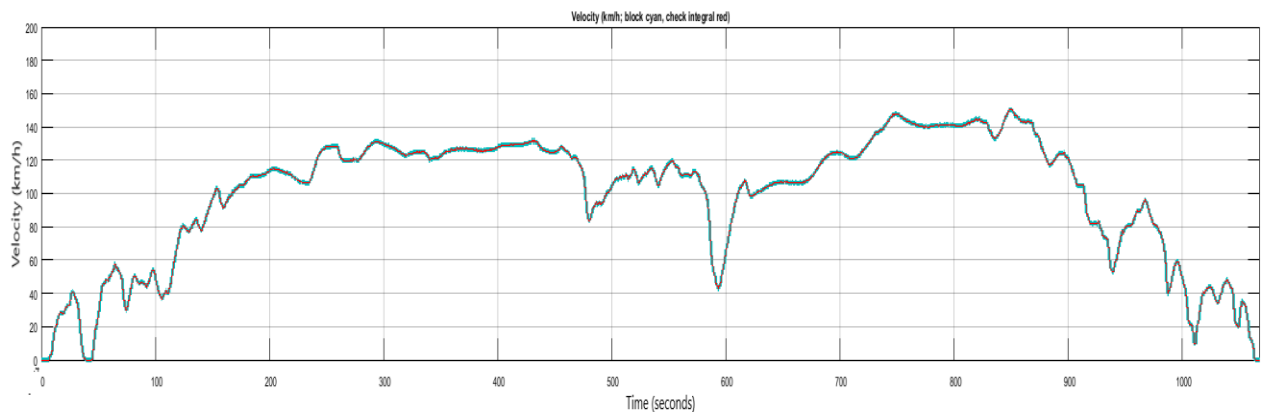


Σχήμα 5.29. Ισχύς (αθροιστική μπαταρίας-κυψέλης καυσίμου με κόκκινο, ηλεκτρικής μηχανής με μπλε) στον κύκλο οδήγησης WLTP Class 3.

5.1.4 Κύκλος οδήγησης ArtMw 150

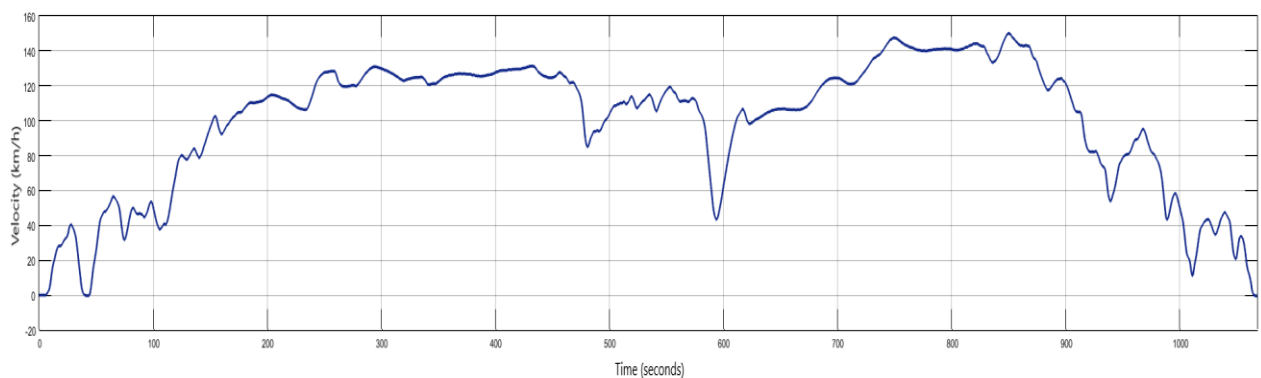
Συγκριτικά με τους προηγούμενους κύκλους οδήγησης ο κύκλος οδήγησης ArtMw 150, έχει την μεγαλύτερη μέση ταχύτητα η οποία είναι 99,6 km/h και την μεγαλύτερη τελική ταχύτητα, η οποία αγγίζει τα 150 km/h. Η διάρκεια του είναι 1068 sec, παρόμοια του NEDC και η ταχύτητα

του παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.30. Η ταχύτητα του οχήματος (Σχήμα 5.31) ακολουθεί ακριβώς την ταχύτητα του κύκλου οδήγησης με μέγιστη απόκλιση το 1 km/h.



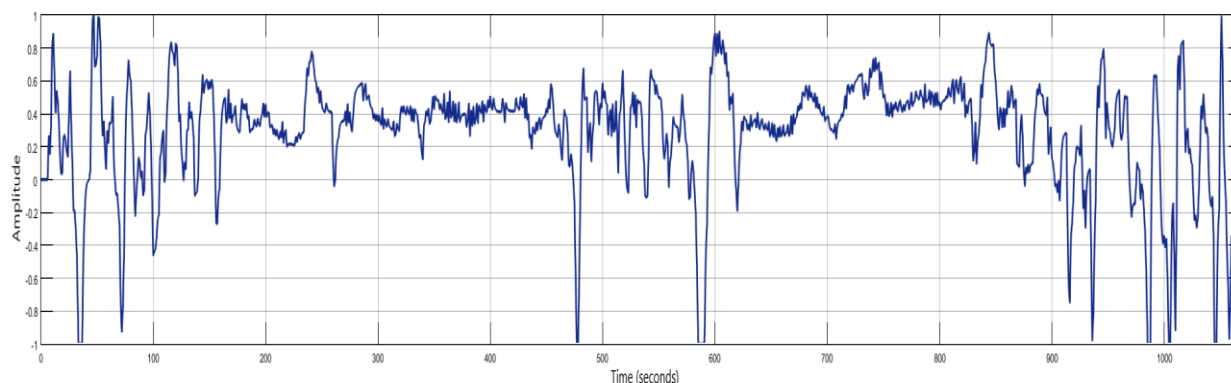
Σχήμα 5.30. Ταχύτητα κύκλου οδήγησης ArtMw 150.

Στο Σχήμα 5.31 παρουσιάζεται η θέση του πεταλιού επιτάχυνσης. Στα 585 sec εξαιτίας της ραγδαίας επιβράδυνσης της ταχύτητας του κύκλου οδήγησης, υπάρχει διαφορά με την ταχύτητα του οχήματος που φτάνει τα 4m/s. Όμως έχει σχεδιαστεί η θέση του πεταλιού να μην ξεπερνά την μονάδα και για αυτόν τον λόγο έχει σταθερή τιμή στο -1 για 5 sec.



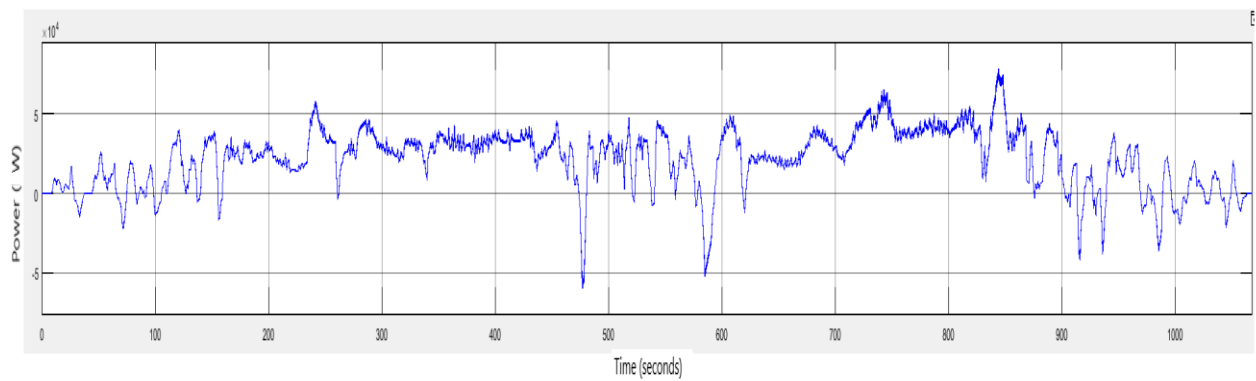
Σχήμα 5.31. Ταχύτητα οχήματος της μοντελοποίησης στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150.

Στο Σχήμα 5.32 διακρίνεται η μεγάλη ζήτηση ενέργειας που απαιτεί η ηλεκτρική μηχανή για την λειτουργία της. Ενώ στους προηγούμενους κύκλους οδήγησης η μέγιστη ισχύ του φορτίου δεν ξεπερνούσε τα 45 kW, στον ArtMw 150 στα πρώτα 250 sec η ισχύς αγγίζει τα 60 kW. Προς το τέλος της διαδρομής και όταν το αυτοκίνητο αναπτύσσει ταχύτητα που φτάνει τα 151 km/h η ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής παρουσιάζει την μέγιστη τιμή της στα 78 kW. Σε μεγάλο διάστημα κατά την εκτέλεση του κύκλου οδήγησης ArtMw 150 η ισχύς παραμένει σε υψηλά επίπεδα που κυμαίνονται από 25 ως και 45 kW.

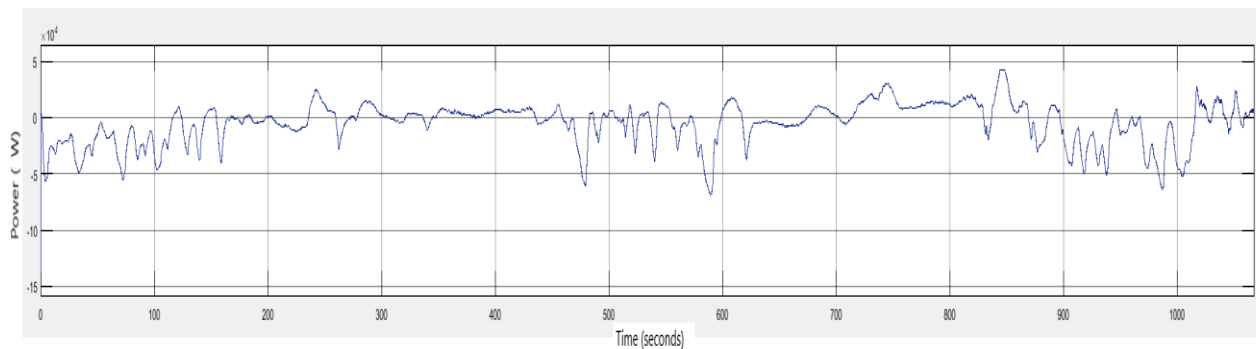


Σχήμα 5.32. Θέση πεταλιού επιτάχυνσης στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150.

Όπως είναι αναμενόμενο, οι υψηλές απαιτήσεις του ηλεκτροκινητήρα έχουν και την ανάλογη επιρροή στην λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και της μπαταρίας του οχήματος. Στα Σχήματα 5.33 και 5.34, παρουσιάζονται η ισχύς της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου αντίστοιχα. Στο 95% της διάρκειας της διαδρομής που διανύει το όχημα η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί με την μέγιστη δυνατή ποσότητα υδρογόνου και η ισχύς της έχει τιμές που κυμαίνονται από τα 30 kW ως τα 50 kW. Την χρονική στιγμή $t = 1015$ sec είναι η πρώτη φορά που η ισχύς της κυψέλης έχει τιμή που δεν ξεπερνά τα 10 kW και η μπαταρία καλύπτει το φορτίο. Στο Σχήμα 5.33 διακρίνονται οι στιγμές όπου η μπαταρία βοηθάει την κυψέλη καυσίμου για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής. Στα 241 sec ενώ η ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής ξεπερνάει τα 58 kW και η ισχύς της κυψέλης είναι στα 45 kW, η μπαταρία παράγει ισχύ ίση με 22 kW και εξασφαλίζει την λειτουργία του οχήματος στην απαιτούμενη ταχύτητα. Το ίδιο συμβαίνει και στα 844 sec όπου η ισχύς της μπαταρία φτάνει ως τα 42 kW. Επιπλέον στην διάρκεια του κύκλου οδήγησης υπάρχουν στιγμές που η μπαταρία φορτίζεται με ισχύ που ξεπερνά τα 50 kW και φτάνει την τιμή -66 kW. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στον μέγιστο βαθμό και η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια εξαιτίας του regenerative braking από την έντονη επιβράδυνση που εκτελεί το όχημα.

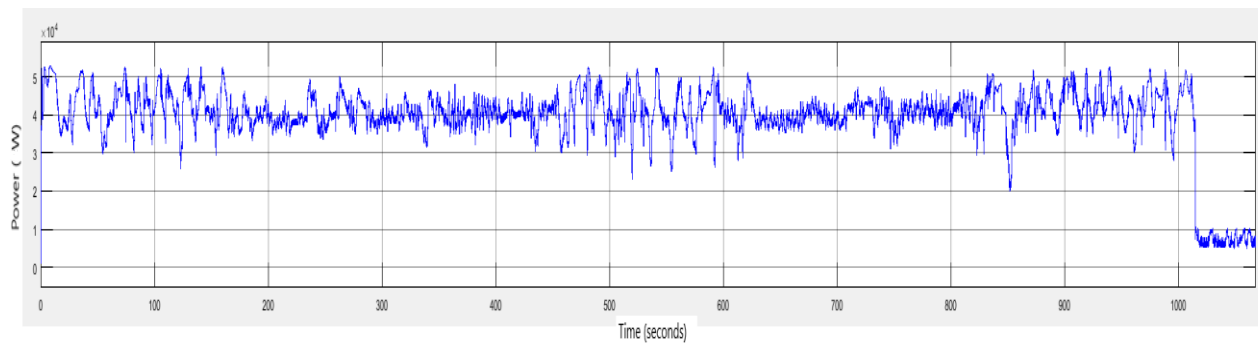


Σχήμα 5.33. Ισχύς ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150.



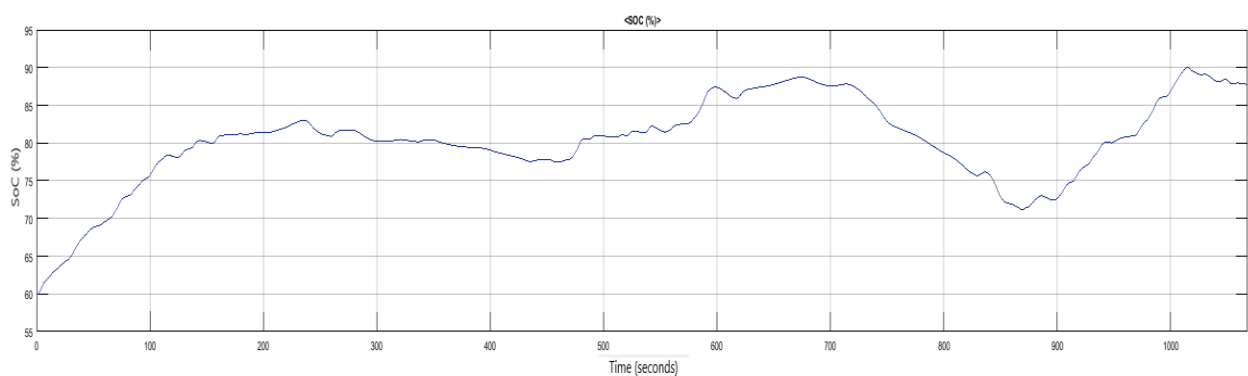
Σχήμα 5.34. Ισχύς μπαταρίας του οχήματος στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150.

Στο Σχήμα 5.35 παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Το SoC της μπαταρίας την στιγμή που ξεκινάει ο κύκλος οδήγησης είναι στο 60%. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους κύκλους οδήγησης όπου η μπαταρία προλαβαίνει να φτάσει στο ανώτατο όριο λειτουργίας της και να αποφορτιστεί ως το κατώτερο όριο του 55% κατά την διάρκεια των κύκλων οδήγησης, στην περίπτωση του ArtMw 150 η μπαταρία ξεκινάει να αποφορτίζεται στα 1015 sec λίγο πριν την ολοκλήρωση της διαδρομής. Η υψηλή τιμή της ισχύος που απαιτείται για την τροφοδότηση του ηλεκτροκινητήρα αναγκάζει την μπαταρία να απελευθερώσει την ενέργεια που έχει αποθηκευμένη για μεγάλα διαστήματα κατά την διάρκεια του ArtMw, αυτό είναι εύκολα διακριτό στο Σχήμα 5.35 στην πτώση του SoC δίχως να φτάσει στην τιμή κατωφλίου 90%.

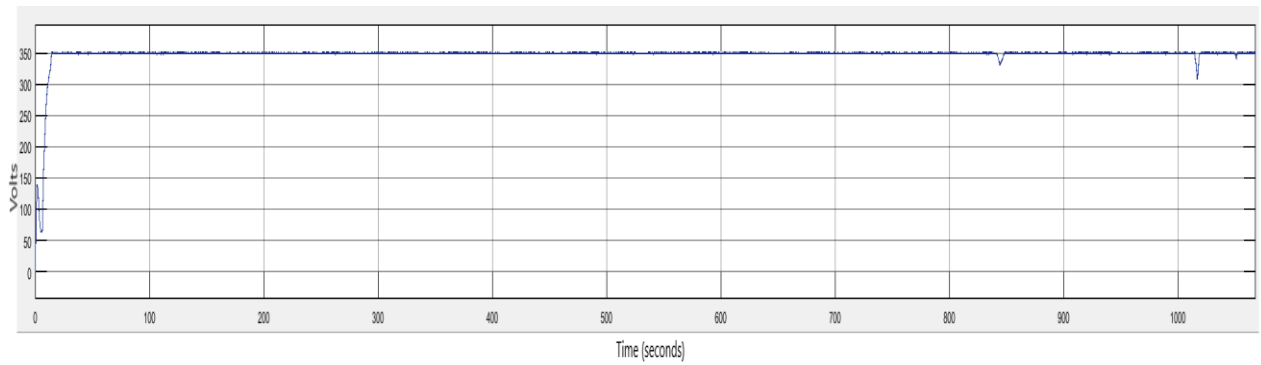


Σχήμα 5.35. Ισχύς καυσίμου κυψέλης του οχήματος στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150.

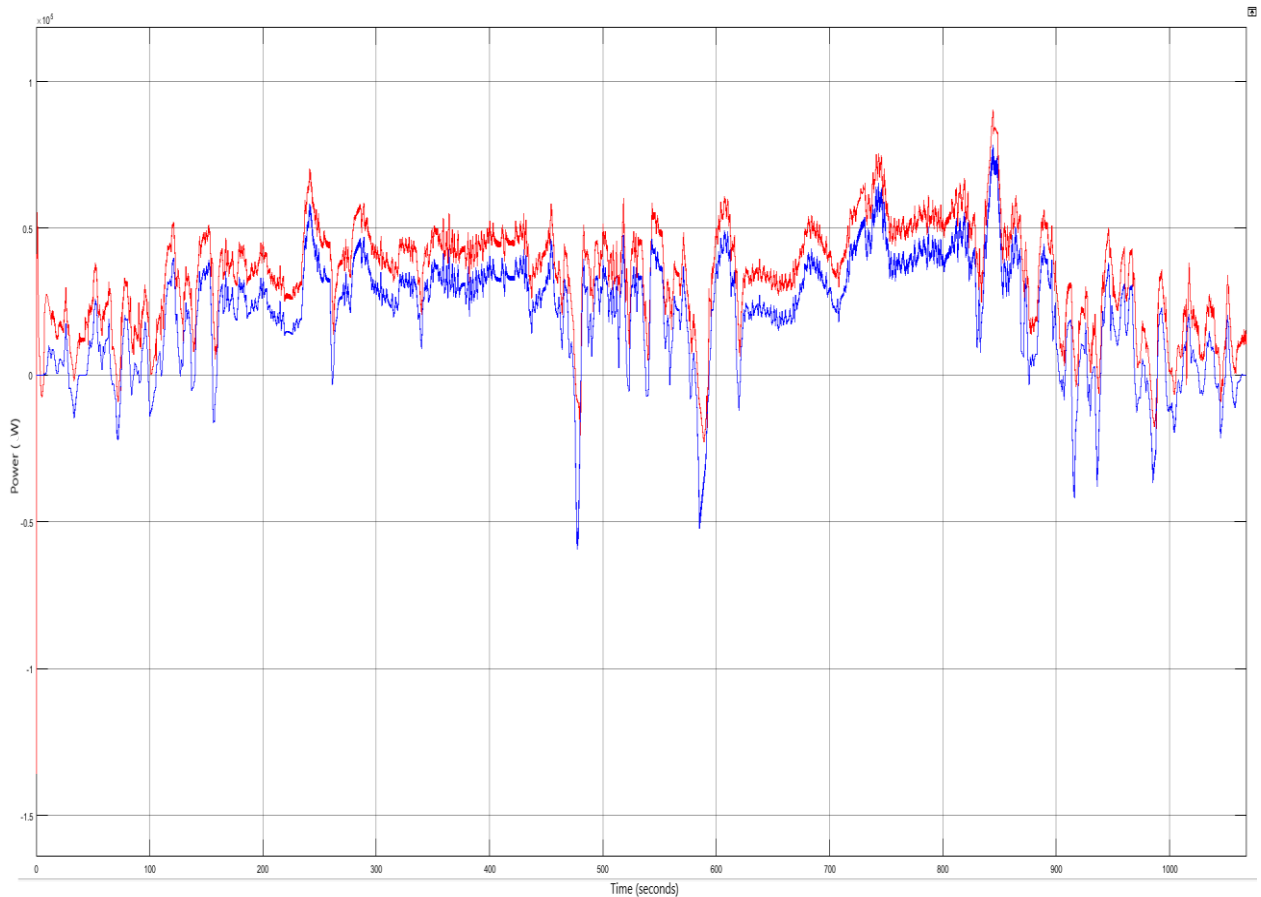
Η τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.36. Την στιγμή που η μπαταρία φτάσει στο 90% και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου μειώνεται, η τάση του μετατροπέα παρουσιάζει πτώση τάσης από τα 350 V στα 310 V εξαιτίας της απότομης μεταβολής της ισχύος όπως διακρίνεται στο Σχήμα 5.37 της συνολικής ισχύος του μετατροπέα. Επιπλέον το χρονικό διάστημα 843 sec με 847 sec η τάση φτάνει στα 330 V, το οποίο οφείλεται στις διακυμάνσεις που υπάρχουν στην ισχύ της ηλεκτρικής μηχανής εκείνο το διάστημα (73 kW με 78 kW). Σε όλη την διάρκεια του κύκλου η τάση εξόδου παραμένει σταθερή στα 350 V με κυματώσεις που δεν ξεπερνούν τα 0,5 V.



Σχήμα 5.36. Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150.



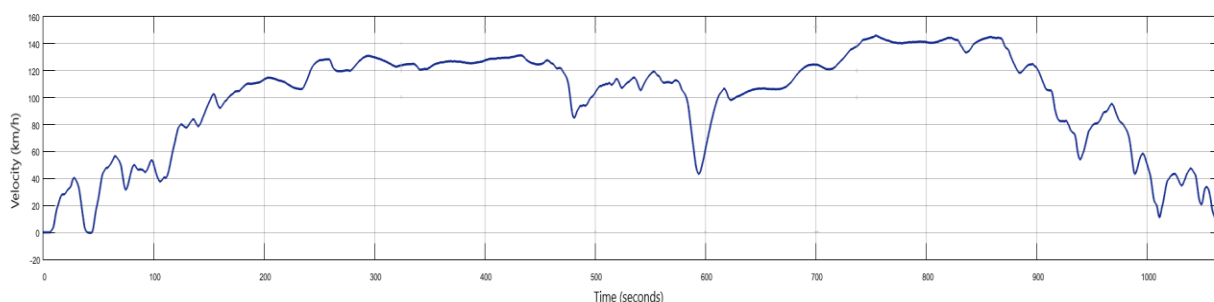
Σχήμα 5.37. Τάση εξόδου μετατροπέα ισχύος στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150.



Σχήμα 5.38. Ισχύς (αθροιστική μπαταρίας-κυψέλης καυσίμου με κόκκινο, ηλεκτρικής μηχανής με μπλε) στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150.

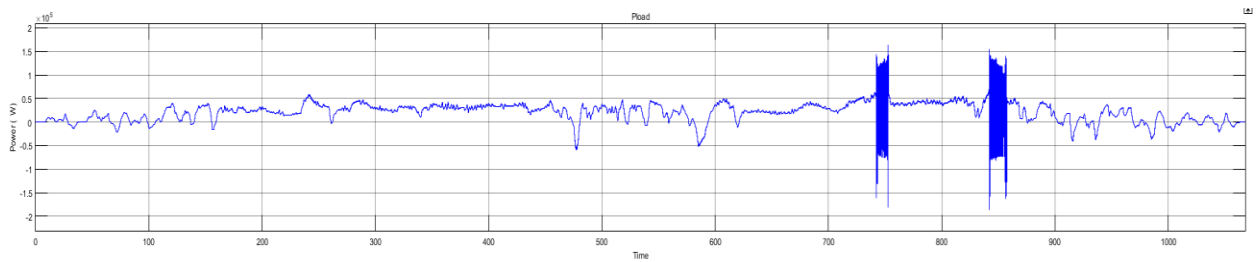
Ο κύκλος οδήγησης ArtMw 150 παρουσιάζει τις πιο έντονες επιταχύνσεις και την μεγαλύτερη ζήτηση ισχύος και για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε ώστε να παρουσιαστεί η συμπεριφορά του συστήματος δίχως την παρουσία μπαταρίας.

Η ταχύτητα του οχήματος δίνεται στο Σχήμα 5.39. Συγκρίνοντας την ταχύτητα του οχήματος με την χρήση μπαταρίας με την περίπτωση λειτουργίας δίχως μπαταρία προκύπτει ότι δίχως την μπαταρία, με την αποκλειστική χρήση την κυψέλης καυσίμου το όχημα δεν μπορεί να αναπτύξει την μέγιστη ταχύτητα των 151 km/h και φτάνει στα 142 km/h. Το ίδιο συμβαίνει και νωρίτερα, όπου με απενεργοποιημένη την μπαταρία το όχημα αναπτύσσει την ταχύτητα των 144 km/h ενώ εκείνη την χρονική στιγμή η ταχύτητα αναφοράς του κύκλου οδήγησης είναι 148 km/h.

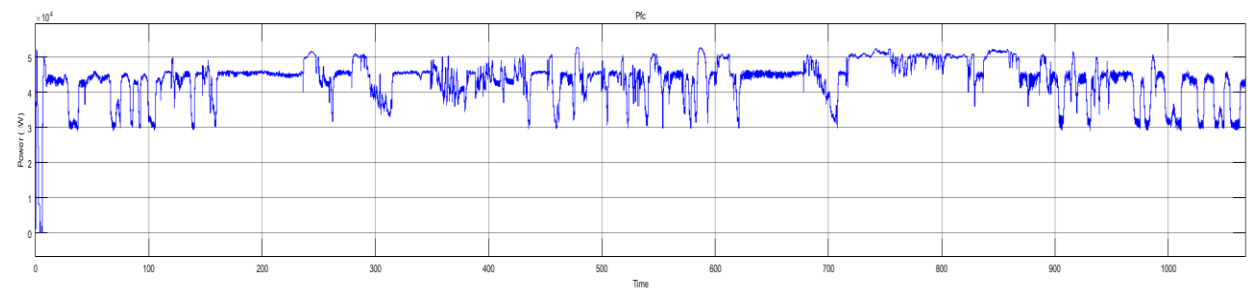


Σχήμα 5.39. Ταχύτητα οχήματος της μοντελοποίησης στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150 με απενεργοποιημένη μπαταρία.

Στα Σχήματα 5.40 και 5.41 παρουσιάζεται η ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής και της κυψέλης καυσίμου, αντίστοιχα, όταν η μπαταρία είναι απενεργοποιημένη. Την χρονική στιγμή 742 sec, όταν η ισχύς του φορτίου είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη ισχύ της κυψέλης, παρατηρείται μια έντονη ταλάντωση πλάτους 110 kW διάρκειας 10 sec. Το ίδιο συμβαίνει και την χρονική στιγμή 842 sec για 15 δευτερόλεπτα όταν ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής ξεπερνάει τα 64 kW. Σε αυτά τα διαστήματα η μηχανή δεν παράγει ροπή ώστε το όχημα να ακολουθήσει την ταχύτητα αναφοράς του κύκλου οδήγησης και παρουσιάζεται η διαφορά στις ταχύτητες που διαπιστώθηκε στο Σχήμα 5.39. Επίσης διακρίνεται από τα σχήματα ότι τις στιγμές που η ισχύς του φορτίου είναι χαμηλή η κυψέλη καυσίμου υπερκαλύπτει την ζήτηση και η περίσσεια ενέργεια δεν αξιοποιείται.

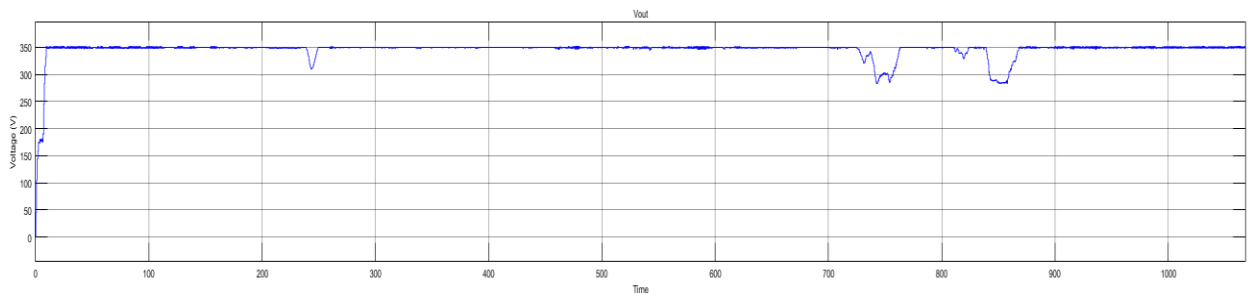


Σχήμα 5.40. Ισχύς ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150 με απενεργοποιημένη μπαταρία.



Σχήμα 5.41. Ισχύς κυψέλης καυσίμου στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150 με απενεργοποιημένη μπαταρία.

Επιπλέον στην περίπτωση λειτουργίας με μόνο μια πηγή ενέργειας παρουσιάζεται πτώση στην τάση εξόδου του μετατροπέα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.42.



Σχήμα 5.42. Τάση εξόδου μετατροπέα ισχύος στον κύκλο οδήγησης ArtMw 150 με απενεργοποιημένη μπαταρία.

Κάθε στιγμή που το φορτίο ξεπερνάει τα 50 kW η ισχύς της κυψέλης καυσίμου δεν μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη ζήτηση της ηλεκτρικής μηχανής με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη πτώση στην τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος. Στα 243 sec η τάση φτάνει στα 310 V από τα 350 V, ενώ στα χρονικά διαστήματα 725-760 sec και 838-867 sec η τάση πέφτει ως και στα 285 V. Συγκρίνοντας με την τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος στην λειτουργία με μπαταρία διακρίνεται εύκολα ότι στην περίπτωση που η μπαταρία είναι συνδεδεμένη δεν παρουσιάζεται

τέτοια πτώση της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα, ενώ και στην περίπτωση που υπάρχει απότομη πτώση της τάσης είναι για λίγα δευτερόλεπτα εξαιτίας της ρύθμισης της ροής καυσίμου της κυψέλης καυσίμου.

6.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη μελέτη ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας σε ηλεκτρικό όχημα με την χρήση μετατροπέα ισχύος πολλαπλών θυρών. Με την χρήση του προγράμματος Simulink της MATLAB προσομοιώθηκε ένα όχημα που εκτελεί τέσσερις ξεχωριστές διαδρομές οι οποίες βασίζονται σε κύκλους οδήγησης που χρησιμοποιούνται από διάφορους οργανισμούς για την αξιολόγηση της απόδοσης των οχημάτων.

Η χρησιμοποίηση του μετατροπέα ισχύος πολλαπλών θυρών που επιλέχθηκε έχει ως στόχο τον έλεγχο της τάσης εξόδου του καθώς και τον έλεγχο της ροής ισχύος μεταξύ των θυρών του. Ως βασική πηγή ενέργειας για την τροφοδοσία του οχήματος επιλέχθηκε μια κυψέλη καυσίμου και για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μια μπαταρία ιόντων λιθίου. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας που αναπτύχθηκε μέσω του ελέγχου του εξασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και του ηλεκτροκινητήρα. Επιπλέον με την δημιουργία ενός ρυθμιστή της ροής του καυσίμου της κυψέλης καυσίμου επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ισχύος της και η εξοικονόμηση καυσίμου.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει ότι ο μετατροπέας ισχύος του οχήματος διατηρεί σταθερή την τάση εξόδου του στην επιθυμητή τιμή και η εναλλαγή της ροής ισχύος μεταξύ των θυρών του γίνεται ομαλά και ελέγχεται συνεχώς καθόλη την λειτουργία του οχήματος καλύπτοντας την απαιτούμενη ενέργεια της ηλεκτρικής μηχανής. Επίσης η μπαταρία λειτουργεί σε όλες τις περιπτώσεις εντός των ορίων και σε καμία στιγμή δεν υπερβαίνει τις τιμές κατωφλίου που έχουν οριστεί, κάτι που αναδεικνύει την ορθή λειτουργία του συστήματος διαχείρισης της μπαταρίας που υλοποιήθηκε.

Εξαιτίας της χαμηλής ταχύτητας της προσομοίωσης παρουσιάζει ενδιαφέρον η εξέταση της λειτουργίας του μετατροπέα ισχύος με υψηλότερη διακοπτική συχνότητα από τα 200 Hz της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της λειτουργικότητας του συστήματος, θα μπορούσε να αναπτυχθεί το σύστημα διαχείρισης ενέργειας έτσι ώστε να μην παρουσιάζει απότομες εναλλαγές στην ροή καυσίμου που έχουν ως αποτέλεσμα την πτώση τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.

7.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Andújar, J. M., Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. *A walk along two centuries. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2309–2322.
- [2] AL-Chlahawi, S. J. M. (2016). Multiport Converter in Electrical Vechicles- A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(6), 2250-3153.
- [3] Aso, S., Kizaki, M., Nonobe, Y. (2007). *Development of Fuel Cell Hybrid Vehicles in TOYOTA. 2007 Power Conversion Conference - Nagoya.*
- [4] Bjerkan, K. Y., Nørbech, T. E., Nordtømme, M. E. (2016). *Incentives for promoting Battery Electric Vehicle (BEV) adoption in Norway. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43, 169–180.
- [5] Curtin R., Shrago Y., Mikkelsen J. (2009). *Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. University of Michigan.
- [6] Franzoni, D., Santi, E., Monti, A., Ponci, F., Patterson, D., & Barry, N. (2005). An Active Filter for Fuel Cell Applications. *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, 1607-1613.
- [7] Gelmanova, Z., Zhabalova, G., Sivyakova, G., Lelikova, O., Onishchenk, O., Smailova, A., Kamarova, S. (2018). Electric cars. Advantages and disadvantages. *Journal of Physics: Conference Series*, 1015, 052029.
- [8] Guarnieri, M. (2012). Looking back to electric cars. *Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON)*, 1-6

- [9] Hu, R. (2011). *Battery Management System For Electric Vehicle Applications*. (Thesis). Department of Electrical and Computer Engineering, University of Windsor, Ontario.
- [10] Larminie, J., Lowry, J. (2012). *Electric Vehicle Technology Explained. Second edition*. Chichester: John Wiley & Sons.
- [11] Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. (1995). *Power electronics: Converters, applications, and design* (2nd ed.). Wiley.
- [12] Moradisizkoohi, H., Elsayad, N., Mohammed, O. A. (2019). A Family of Three-Port Three-Level Converter Based on Asymmetrical Bidirectional Half-Bridge Topology for Fuel Cell Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(12), 11706-11724.
- [13] Omonov, F, Sotvoldiyev O., Dehqonov, Q. (2022). Electric cars as the cars of the future. *Eurasian Journal of Engineering*, Vol 4, (ISSN:2795-7640), 128-133.
- [14] Piperidis, S., Chrysomallis, I., Georgakopoulos, S., Ghionis N., Doitsidis L., Tsourveloudis, N. (2021). A ROS Based Energy Management System for a Prototype Fuel Cell Hybrid Vehicle. *Energies*, 14, 1964. .
- [15] Schlecht, L. (2003). Competition and alliances in fuel cell power train development. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(7), 717–723.
- [16] Toliyat, H.A., & Kliman, G.B. (Eds.). (2004). *Handbook of Electric Motors* (2nd ed.). CRC Press, ISBN 9781315220826
- [17] Wang, H., Leng, J. (2018, June). Summary on development of permanent magnet synchronous motor. *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 689-693.
- [18] Ανδρεάτης, Μ., Κωνσταντάρας, Κ. (2019). *Ανάπτυξη Εφαρμογής για αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας από Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα (EV's), με βάση το αναδυόμενο θεσμικό πλαίσιο σε Ε.Ε. και Ελλάδα* (Διπλωματική εργασία). Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- [19] Κοινή Υπουργική Απόφαση 42863/438/2019 - ΦΕΚ 2040/Β/4-6-2019. Ανακτήθηκε από: <https://www.e-nomothesia.gr/kat-aytokinita/koine-upourgike-apophase-42863-438-2019.html>
- [20] Μέτσιου, Α. (2018). *Ηλεκτρικά αυτοκίνητα, λειτουργία- υιοθέτηση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις*. (Διπλωματική εργασία). *Τμήμα Διαχείρισης Τεχνικών Έργων*, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

- [21] Νομικός, Σ., Janocha, I. (2014). Ανάλυση δομής και λειτουργίας ηλεκτρικού οχήματος. (Πτυχιακή εργασία). *Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Ηλεκτρολογία*, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Πειραιά, Αθήνα.
- [22] Παναγιώτου, Ν. (2021). Ηλεκτρικό αυτοκίνητο και εισαγωγή του στο έξυπνο δίκτυο. (Διπλωματική εργασία). *Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [23] Παπαργυρίου, Α. (2019). Σύστημα διαχείρισης ενέργειας για τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης κυψελών καυσίμου σε ηλεκτρικά οχήματα. (Διπλωματική εργασία). *Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [24] Τατάκης, Ε. (2014). Ηλεκτρονικά Ισχύος II. Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή. Ανακτήθηκε 29/03/2023, από <https://eclass.upatras.gr/courses/EE898/>