



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

Διπλωματική Εργασία

**Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας για τη
Μεγιστοποίηση του Βαθμού Απόδοσης
Κυψελών Καύσιμου σε Ηλεκτρικά Οχήματα**

Παπαργυρίου Αθανάσιος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Χανιά Οκτώβριος 2019

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά την περίοδο του ακαδημαϊκού έτους 2018 – 2019, στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προϋποθέσεων για την λήψη του πτυχίου από το Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ευτύχιο Κουτρούλη, για την βοήθεια και τις χρήσιμες ιδέες του, που συνέβαλαν στην βελτίωση της εργασίας.

Περισσότερο από όλους, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, διότι χωρίς εκείνους η απόκτηση ενός πτυχίου θα ήταν αδύνατη ή έστω πολύ δύσκολο εγχείρημα. Τους ευχαριστώ που στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και για την υπομονή που επέδειξαν μέχρι την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι αυτοκινητοβιομηχανίες διανύουν μια περίοδο αλλαγών και μετατροπής της φιλοσοφίας των οχημάτων, με σκοπό την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από εναλλακτικές «πράσινες» μεθόδους. Σημαντικό ρόλο στην αναζήτηση αυτή νέων τεχνολογιών οδήγησε όχι μόνο η παγκόσμια ενεργειακή κρίση, αλλά και η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος από ρύπους που οδηγούν στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ανάμεσα στις ποικίλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας βρίσκονται και τα ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία εμφανίζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα οχήματα που κάνουν χρήση μηχανών εσωτερικής καύσεως. Ωστόσο, δύο είναι τα κύρια μειονεκτήματα τα οποία εμποδίζουν την άμεση εξάπλωσή τους, ο χρόνος φόρτισης και η ενεργειακή πυκνότητα. Έτσι προκειμένου οι κατασκευαστές να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις, έχουν δημιουργήσει διαφορετικές αρχιτεκτονικές, όπως τα Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (HEV), τα plug-in Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (PHEV) και τα Extended Range Electric Vehicles (EREV).

Σε αυτήν την εργασία μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε ένα ηλεκτρικό όχημα με χρήση κυψελών καυσίμου. Η επιλογή της κυψέλης καυσίμου έγινε βάση της μηδενικής εκπομπής ρύπων και της μη χρήσης ορυκτών καυσίμων για την λειτουργία της. Η μοντελοποίηση και οι προσομοιώσεις του οχήματος έγιναν σε περιβάλλον MATLAB/Simulink, καθώς δίνεται η δυνατότητα χρήσης ευρέος φάσματος επιλογών από την βιβλιοθήκη που διαθέτει.

Το κύριο αντικείμενο της εργασίας είναι η δημιουργία ενός συστήματος ελέγχου λειτουργίας στο μέγιστο σημείο απόδοσης της κυψέλης καυσίμου και ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Το σύστημα αυτό θα εξασφαλίζει την αποδοτικότερη διαχείριση των υποσυστημάτων (κυψέλη καυσίμου, μπαταρία), ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη αυτονομία οχήματος. Για τον έλεγχο λειτουργίας της κυψέλης δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος MPPT – P&O, ενώ αναπτύχθηκαν δύο συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Το πρώτο υλοποιήθηκε με βάση την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής αυτονομίας, ενώ το δεύτερο στηρίχθηκε στην υλοποίηση αλγορίθμου της βιβλιογραφίας, ο οποίος χωρίζει τις διάφορες οδηγικές συνθήκες του οχήματος σε 6 διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας, με σκοπό την καλύτερη κατανομή ισχύος και την ταχύτερη απόκριση των συστημάτων του οχήματος στις υψηλές ταχύτητες κίνησης και στις μεγάλες επιταχύνσεις του οχήματος. Σκοπός είναι η σύγκριση μεταξύ των δύο και ο καθορισμός του ιδανικότερου ποσοστού χρήσης της μπαταρίας. Για την εξασφάλιση εγκυρότητας των αποτελεσμάτων αυτονομίας, η συνολική προσομοίωση του οχήματος έγινε με την χρήση κύκλων οδήγησης.

Μετά το τέλος των προσομοιώσεων, έγινε μια παρουσίαση της λειτουργίας του αλγορίθμου MPPT – P&O και των συστημάτων του οχήματος. Ουσιαστικά γίνεται μια περιγραφή της συνολικής λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και της ηλεκτρικής μηχανής για κάθε κύκλο οδήγησης και κάθε ποσοστό χρήσης της μπαταρίας. Επιπλέον, με την βοήθεια πινάκων και ενός γραφήματος παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση όπως καταγράφηκε από κάθε προσομοίωση ξεχωριστά. Δύο είναι τα συμπεράσματα στα οποία οδηγούμαστε με το πέρας των συγκρίσεων. Το πρώτο σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελεί την οικονομικότερη λύση από άποψη οικονομίας καυσίμου σε σύγκριση με το δεύτερο σύστημα. Ταυτόχρονα, το ποσοστό χρήσης της μπαταρίας επηρεάζει με ποικίλους τρόπους την κατανάλωση του οχήματος, ενώ δύο είναι τα επικρατέστερα ποσοστά με την μικρότερη κατανάλωση καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα το ποσοστό χρήσης της μπαταρίας 30 %, σε συνδυασμό με το πρώτο σύστημα διαχείρισης ενέργειας εμφάνισε την μικρότερη κατανάλωση καυσίμου κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων, με το ποσοστό χρήσης της μπαταρίας 40 % να ακολουθεί. Το ποσοστό χρήσης της μπαταρίας 50 % παρουσίασε την μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου, χρήζοντας το ως την μη οικονομικότερη επιλογή από άποψη αυτονομίας του οχήματος.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1. Γενικά.....	8
2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	10
2. Πληροφορίες για τα ηλεκτρικά οχήματα	11
2.1 Κίνητρα για την ηλεκτροκίνηση των οχημάτων	11
2.2 Αρχιτεκτονικές σχεδίασης οχημάτων	11
2.2.1 Ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες (BEVs)	11
2.2.2 Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs).....	13
2.2.3 Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)	14
2.2.4 Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου (FCEVs)	15
2.2.5 Extended Range Electric Vehicles (EREVs)	17
2.3 Αρχιτεκτονική οχημάτων HEV και PHEV	17
2.3.1 Σχεδίαση σε σειρά	17
2.3.2 Παράλληλη σχεδίαση.....	18
2.3.3 Συνδυασμός παράλληλης σχεδίασης και σχεδίασης σε σειρά.....	18
2.4 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	19
2.4.1 Βασικές παράμετροι	19
2.4.2 Μπαταρία μολύβδου – οξέος (Lead Acid Battery)	21
2.4.3 Μπαταρία νικελίου υδριδίου μετάλλου (Nickel Metal Hydride).....	21
2.4.4 Μπαταρία ιόντων λιθίου	22
2.5 Κυψέλη καυσίμου (Fuel Cells)	22
2.6 Ηλεκτρικές μηχανές	26
2.6.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες – γεννήτριες.....	27
2.6.2 Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος.....	27
2.6.3 Ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος	30
2.6.4 Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές	30
2.6.5 Επαγωγικοί κινητήρες.....	31
2.7 Μετατροπείς ισχύος	31
2.7.1 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC – DC)	32
2.7.2 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (Μετατροπείς DC - AC).....	37
3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	40
3. Εισαγωγή	41
3.1 Υλοποίηση συστήματος διαχείρισης ενέργειας	42

3.1.1	Πρώτη έκδοση συστήματος διαχείρισης ενέργειας – EMS_1	43
3.1.2	Δεύτερη έκδοση συστήματος διαχείρισης ενέργειας – EMS_2	45
4.	ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	49
4.	Εισαγωγή	50
4.1	Μοντελοποίηση οχήματος.....	50
4.1.1	Κυψέλη υδρογόνου και DC-DC Converter	51
4.1.2	Ηλεκτροκινητήρας (Permanent Magnet Synchronous Machine - PMSM) ..	58
4.1.3	Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	59
4.1.4	Vehicle dynamics.....	60
4.1.5	Συστήματα διαχείρισης ενέργειας EMS_1, EMS_2	62
4.1.6	Μοντέλο οδηγού και κύκλοι οδήγησης	64
4.1.7	Συνολικό όχημα	66
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	68
5.	Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων	69
5.1.1	Προσομοίωση κυψέλης καυσίμου και MPPT – P&O controller.....	69
5.1.2	Προσομοίωση κίνησης οχήματος.....	84
5.2	Σύγκριση κατανάλωσης καυσίμου	158
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	162
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	165

Κατάλογος Συμβόλων

V	μονάδα μέτρησης τάσης (Volts)
Vdc	μονάδα μέτρησης τάσης συνεχούς ρεύματος (Volts)
A	μονάδα μέτρησης έντασης ρεύματος (Ampere)
kW	μονάδα μέτρησης ισχύος (kiloWatt)
Nm	μονάδα μέτρησης ροπής (Newton x meter)
Kgm	μονάδα μέτρησης ροπής (kilogram x meter)
lpm	μονάδα μέτρησης ροής καυσίμου (Liters per Minute)
lt	μονάδα μέτρησης όγκου (liters)
Wg	τιμή κατανάλωσης καυσίμου σε γραμμάρια (g)
kWh	μονάδα μέτρησης ενέργειας (kilowatt hour)
MPa	μονάδα μέτρησης πίεσης (megaPascal)
PS	μονάδα μέτρησης ιπποδύναμης (horsepower)
BEVs	Battery Electric Vehicles
HEVs	Hybrid Electric Vehicles
PHEVs	Plug-in Hybrid Electric Vehicles
FCEVs	Fuel Cell Electric Vehicles
FCHEVs	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles
EREVs	Extended Range Electric Vehicles
MEK	Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως
PEM	Proton-Exchange Membrane fuel cell
USD	United States Dollar

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Γενικά

Η δραματική διακύμανση των τιμών του πετρελαίου και οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην δημόσια υγεία και στην αλλαγή του κλίματος έχουν ωθήσει την ακαδημαϊκή κοινότητα και τις αυτοκινητοβιομηχανίες να αναζητήσουν εναλλακτικά και πιο οικονομικά συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Η μετατροπή των οχημάτων σε ηλεκτρικά βοήθα στην αύξηση της απόδοσης των συστημάτων, καθώς και στην μείωση των εκπομπών ρύπων [1]. Έτσι, Υβριδικά Ηλεκτρικά οχήματα (HEVs), plug-in Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (PHEVs) και Ηλεκτρικά Οχήματα με χρήση Μπαταρίας (BEVs) σημείωσαν αύξηση στις πωλήσεις και στην προτίμηση των καταναλωτών. Μέχρι το τέλος του 2018 σημειώθηκε αύξηση της τάξεως του 0,65 %, ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί στην πώληση περίπου δύο εκατομμυρίων οχημάτων στην διάρκεια ενός έτους [2].

Παρά την συνεχή ανάπτυξη της αγοράς τα τελευταία χρόνια, η προτίμηση των ηλεκτρικών οχημάτων εξακολουθεί να αποθαρρύνεται από εμπόδια που παρουσιάζει η ίδια η τεχνολογία, η αγορά του αυτοκινήτου και η πολιτική των μεταφορών. Τα σημαντικότερα εμπόδια είναι το κόστος και η απόδοση των συστημάτων και ιδιαίτερα η μπαταρία. Η κυρίαρχη τεχνολογία μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου με την τιμή δολαρίου ανά kilowatt hour να κυμαίνεται στα 200 - 250 USD, τιμή η οποία είναι αρκετά σημαντική αν συμπεριλάβουμε τις επιδόσεις και την ενεργειακή πυκνότητά της. Επομένως το πιο ακριβό σύστημα σε ένα ηλεκτρικό όχημα αποτελεί το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα από τα νεότερα ηλεκτρικά οχήματα, το Audi e-tron, είναι εξοπλισμένο με μια μπαταρία 95 kWh, της οποίας το κόστος είναι σημαντικό. Επίσης τα plug-in Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (PHEVs), είναι ακριβότερα λόγω του πολύπλοκου συστήματος μετάδοσης κίνησης.

Ένα ακόμη εμπόδιο το οποίο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην προτίμηση των μη-ηλεκτρικών οχημάτων είναι η περιορισμένη αυτονομία την οποία παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά οχήματα. Η περαιτέρω αύξηση της αυτονομίας συνδέεται άμεσα με την αύξηση των kWh της μπαταρίας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την άνοδο του κόστους του ηλεκτρικού οχήματος.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας, ηλεκτρικού οχήματος με χρήση κυψελών καυσίμου για την επίτευξη μεγαλύτερης αυτονομίας καθώς και ένα σύστημα ελέγχου της κυψέλης καυσίμου για τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσής της. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται μια κυψέλη υδρογόνου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM), ένας μετατροπέας ισχύος DC/DC, για την μετατροπή της ισχύος εισόδου της κυψέλης σε ισχύ εξόδου για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής και της μπαταρίας και ένας ελεγκτής μετατροπέα, για την μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης και ισχύος της κυψέλης. Ακόμη γίνεται χρήση μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου για την κίνηση του οχήματος όταν η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται εκτός λειτουργίας και μια ηλεκτρική μηχανή για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική.

Με την βοήθεια του περιβάλλοντος της MATLAB/Simulink μοντελοποιήθηκε το κάθε σύστημα και προσομοιώθηκε με βάση τα διεθνή πρότυπα για την εύρεση της μέγιστης αυτονομίας. Στα κεφάλαια που ακολουθούν, θα αναλυθούν όλες οι παράμετροι που οδήγησαν στην σωστή επιλογή του κάθε συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Συνοπτικά, στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων, της δομής τους και των δομικών στοιχείων που τα συνθέτουν. Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας τα οποία αναπτύχθηκαν, ενώ στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η διάταξη των συστημάτων καθώς και των υποσυστημάτων που διασυνδέονται για την εκτέλεση των επιμέρους λειτουργιών. Τέλος στο 5^ο Κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά τα

αποτελέσματα των προσομοιώσεων του οχήματος και της σύγκρισης μεταξύ των δύο συστημάτων διαχείρισης ενέργειας, ενώ στο 6^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη διπλωματική εργασία.

2.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

2. Πληροφορίες για τα ηλεκτρικά οχήματα

2.1 Κίνητρα για την ηλεκτροκίνηση των οχημάτων

Με το πέρασμα των τελευταίων δεκαετιών και την συνεχή χρήση καυσίμων με βάση το πετρέλαιο έχει γίνει ολοένα και μεγαλύτερη η ευαισθητοποίηση του ανθρώπου για την προστασία του περιβάλλοντος. Ολόκληρη η βιομηχανία αυτοκινήτου αφιερώνει μεγάλο μέρος της έρευνας και ανάπτυξης στην κατασκευή βιώσιμων μεταφορών. Η δημιουργία ηλεκτρικών οχημάτων (χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας και όχι της καύσης) συνδυάζεται με την μείωση των εκπομπών ρύπων καθώς και με την βελτίωση της απόδοσής τους. Τα κίνητρα που οδήγησαν σε αυτήν την στροφή στην εξέλιξη των οχημάτων είναι:

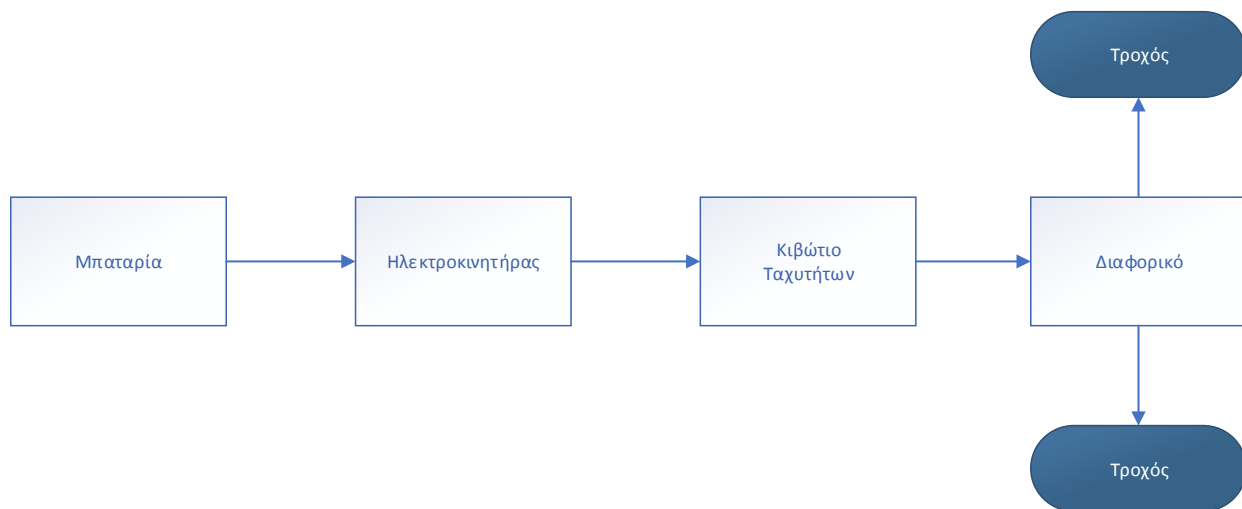
- **Μεγάλη απόδοση των ηλεκτροκινητήρων:** Οι ηλεκτρικοί κινητήρες που χρησιμοποιούν τα ηλεκτρικά οχήματα, εμφανίζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με τις μηχανές εσωτερικής καύσεως (ΜΕΚ). Οι ηλεκτροκινητήρες μετατρέπουν το 75% της χημικής ενέργειας των μπαταριών σε μηχανική, ενώ οι ΜΕΚ, μόλις το 20% (αν και την τελευταία πενταετία πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν επενδύσει αρκετά στην αύξηση του βαθμού απόδοσης των ΜΕΚ σε ένα ποσοστό του ~40%).
- **Υψηλή οικονομία καυσίμου:** Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να βελτιώσει την κατανάλωση καυσίμου στις ΜΕΚ, με τεχνολογίες όπως το Launch Assist, Regenerative Braking κλπ.
- **Υψηλότερες επιδόσεις οχημάτων:** Ο χρόνος απόκρισης των ηλεκτρικών μηχανών είναι γρηγορότερος καθώς εμφανίζει λιγότερα μηχανικά μέρη, έναντι των ΜΕΚ, και απουσιάζει το μέρος της ανάφλεξης καυσίμου που δίνει ένα επιπλέον προβάδισμα στους ηλεκτροκινητήρες.

Παρ' όλα αυτά, τα ηλεκτρικά οχήματα εξακολουθούν να μη βρίσκονται στην λίστα προτίμησης των καταναλωτών αφού το υψηλό κόστος, η μικρή αυτονομία και η έλλειψη υποδομών (σημείων φόρτισης) λαμβάνονται αυστηρά υπόψη. Για αυτό αναπτύχθηκαν υβριδικές αρχιτεκτονικές οχημάτων, καθώς και άλλες αρχιτεκτονικές όπως τα Extended Range Electric Vehicles.

2.2 Αρχιτεκτονικές σχεδίασης οχημάτων

2.2.1 Ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες (BEVs)

Τα ηλεκτρικά οχήματα με χρήση μπαταρίας, είναι οχήματα που λειτουργούν αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται σε μπαταρίες υψηλής τάσης και για την μετάδοση κίνησης χρησιμοποιείται ηλεκτροκινητήρας. Η αρχιτεκτονική του οχήματος αυτού είναι αρκετά απλή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 [3].



Σχήμα 2.1. Ηλεκτρικό όχημα με χρήση μπαταρίας.

Αυτού του είδους η αρχιτεκτονική εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα:

- **Μηδενικές εκπομπές ρύπων:** Τα οχήματα αυτά δεν χρησιμοποιούν καύσιμα επομένως, δεν εκπέμπουν ρύπους στο περιβάλλον. Βέβαια, υπάρχει έμμεση εκπομπή ρύπων, αφού η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την φόρτιση της μπαταρίας είναι ρυπογόνα.
- **Υψηλή απόδοση ηλεκτροκινητήρων:** Εξαιτίας του υψηλού βαθμού απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων, εμφανίζουν υψηλότερη απόδοση από ένα όχημα που χρησιμοποιεί ΜΕΚ.
- **Απλή αρχιτεκτονική:** Τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία, χρησιμοποιούν κιβώτια ταχυτήτων μιας ταχύτητας και όχι πολύπλοκες διατάξεις ταχυτήτων όπως άλλα οχήματα με ΜΕΚ, απλοποιώντας έτσι τον σχεδιασμό τους.

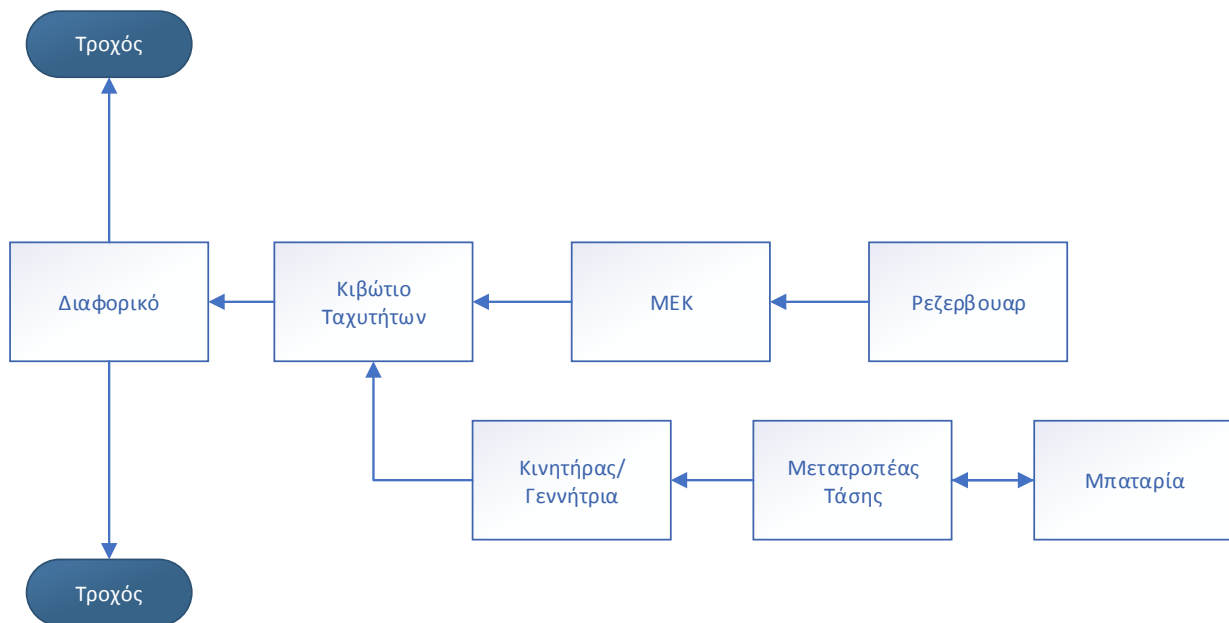
Αντιθέτως, υπάρχουν κάποια σημαντικά μειονεκτήματα τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την διάδοση αυτού του τύπου οχημάτων. Τα τρία σημαντικότερα είναι, η αυτονομία του οχήματος, το μεγάλο κόστος των μπαταριών και ο χρόνος φόρτισής τους.

- Η αυτονομία του οχήματος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία. Η μεγαλύτερη αυτονομία που έχει επιτευχθεί από ένα ηλεκτρικό όχημα είναι 560 km, ενώ ένα απλό συμβατικό όχημα με ΜΕΚ παρουσιάζει μέση αυτονομία 893 km. Επίσης, ηλεκτρικά οχήματα που παρουσιάζουν μεγάλη αυτονομία κάνουν χρήση αρκετά μεγάλων μπαταριών που με την σειρά τους αυξάνουν το κόστος.
- Το κόστος επηρεάζει και αυτό με την σειρά του αρνητικά την προτίμηση του οχήματος από τους καταναλωτές. Παρ' όλο που η τεχνολογία των μπαταριών συνεχώς εξελίσσεται το κόστος τους παραμένει σε υψηλά επίπεδα και καταλαμβάνει το 1/3 της τιμής των ηλεκτρικών οχημάτων. Το 2016 η τιμή ανά kWh ανερχόταν σε 350 – 400 USD (\$/kWh).
- Ο χρόνος φόρτισης των οχημάτων ποικίλει ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης της μπαταρίας (σταθμός φόρτισης, τριφασικός φορτιστής σπιτιού κ.α.) καθώς και με την χωρητικότητα της. Μερικά οχήματα χρειάζονται από 1 ώρα και 30 λεπτά για πλήρη φόρτιση έως 12 ώρες, ενώ σε ένα όχημα με ΜΕΚ χρειάζονται μόλις μερικά λεπτά για το γέμισμα του ρεζερβουάρ. Ακόμα και με τον πιο γρήγορο τρόπο φόρτισης της μπαταρίας που μπορεί να

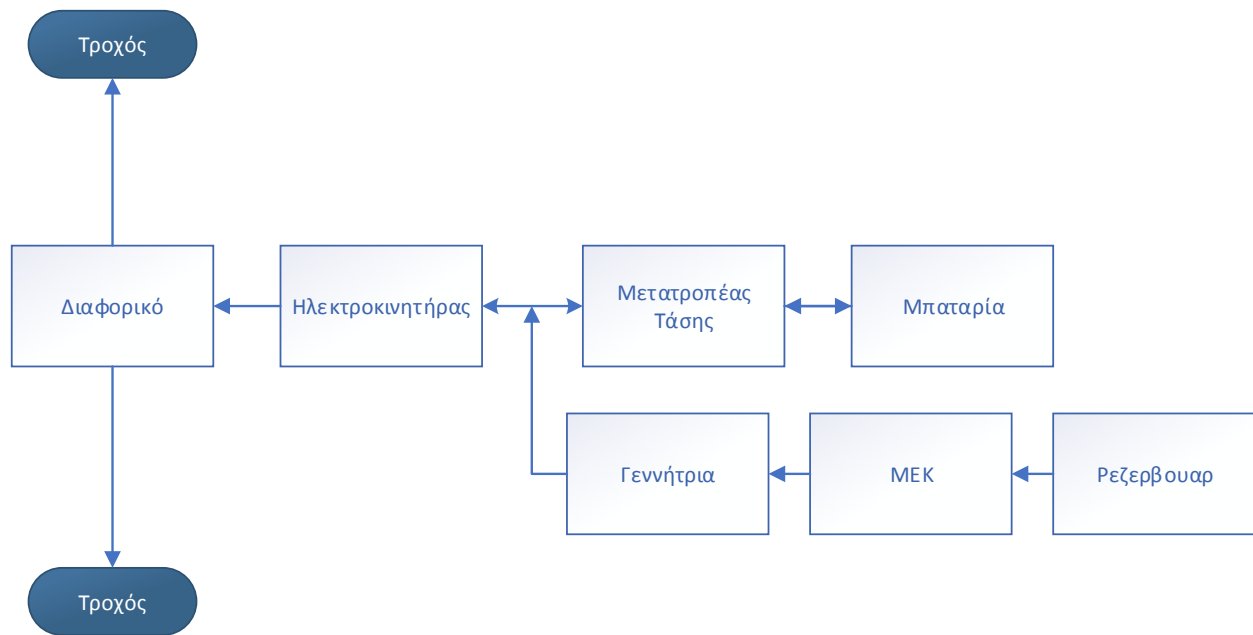
μειώσει τον χρόνο ακόμα και στα 20 λεπτά, ένα όχημα με MEK υπερτερεί σημαντικά έναντι του ηλεκτρικού οχήματος.

2.2.2 Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs)

Με τον όρο υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα αναφερόμαστε στα οχήματα τα οποία για την κίνησή τους χρησιμοποιούν MEK καθώς και ένα ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος έχει διπλή λειτουργία, κινητήρα-γεννήτριας. Ο όρος αυτός δεν αναφέρεται αποκλειστικά στα οχήματα αυτά, αφού υβριδικό ονομάζεται οποιοδήποτε όχημα χρησιμοποιεί δυο διαφορετικά συστήματα για την μετάδοση της κίνησης στους τροχούς. Για παράδειγμα, μια ακόμη αρχιτεκτονική που θεωρείται υβριδική είναι ένα όχημα με κυψέλες καυσίμου και μπαταρία. Οι αρχιτεκτονικές ποικίλουν ανάλογα με το τύπο του οχήματος και συναντώνται σε δύο διαφορετικές κατηγορίες, σε παράλληλη σύνδεση ή σε σύνδεση σε σειρά. Παραδείγματα φαίνονται στο Σχήμα 2.2 και στο Σχήμα 2.3 που ακολουθούν [4].



Σχήμα 2.2. Αρχιτεκτονική παράλληλης σύνδεσης υβριδικού οχήματος.



Σχήμα 2.3. Αρχιτεκτονική σύνδεσης σε σειρά υβριδικού οχήματος.

Η σχεδίαση των υβριδικών οχημάτων μπορεί να προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στην λειτουργία των οχημάτων, όπως η μείωση των ρύπων και επίτευξη μεγαλύτερων τιμών αυτονομίας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα αυτά με περισσότερες λεπτομέρειες:

- **Regenerative Braking:** Στα υβριδικά οχήματα ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια για την φόρτιση της μπαταρίας, εκμεταλλευόμενος την αδράνεια της MEK κατά το φρενάρισμα.
- **Αναμμένη ή Σβηστή μηχανή:** Η χρήση του ηλεκτροκινητήρα σε ένα τέτοιο όχημα, μπορεί να βελτιώσει την συνολική απόδοση του συστήματος. Στις χαμηλές στροφές, όπου και απαιτείται υψηλή ροπή, είναι ιδανική η χρήση του ηλεκτροκινητήρα, κρατώντας την MEK κλειστή. Έτσι δίνεται η δυνατότητα λειτουργίας της MEK στην περιοχή η οποία είναι περισσότερο αποδοτική.
- **Μικρότερος κυβισμός MEK:** Με την ταυτόχρονη λειτουργία ηλεκτροκινητήρα και MEK, δίνεται η δυνατότητα μείωσης του κυβισμού, δηλαδή του κόστους κατασκευής της MEK και των εκπομπών ρύπων.

Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα παρά τα όλα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, εμφανίζουν αρκετές δυσκολίες εξαιτίας της πολυπλοκότητας της εκάστοτε αρχιτεκτονικής καθώς και των πολύπλοκων διαδικασιών ελέγχου ώστε να ελέγξουν αποδοτικά παραπάνω από μια μονάδες ισχύος.

2.2.3 Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)

Τα PHEVs, εμφανίζουν τις ίδιες ομοιότητες με τα υβριδικά οχήματα (HEVs), με την μόνη διαφορά να βρίσκεται στο μέγεθος των μπαταριών και στο τρόπο φόρτισής τους. Τα PHEVs, χρησιμοποιούν την μπαταρία σαν μονάδα ισχύος σε μεγαλύτερο βαθμό από τα υβριδικά και για αυτό είναι εξοπλισμένα και με μεγαλύτερο μέγεθος μπαταρίας. Επιπλέον η φόρτιση της μπαταρίας γίνεται μέσω μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας (σταθμούς φόρτισης, τριφασικός φορτιστής κλπ.) και θεωρείται το μεταβατικό μοντέλο μεταξύ του υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος και του ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία. Η αυτονομία του οχήματος εξαρτάται σε

μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της μπαταρίας, Χρησιμοποιούνται διαφορετικές αρχιτεκτονικές τόσο παράλληλης όσο και σύνδεσης σε σειρά.

2.2.4 Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου (FCEVs)

Τα οχήματα με χρήση κυψελών καυσίμου, χρησιμοποιούν την κυψέλη καυσίμου για την μετατροπή της χημικής ενέργειας (αντίδραση καυσίμου με το οξυγόνο) σε ηλεκτρική. Εξαιτίας του υψηλού βαθμού απόδοσης των κυψελών σε συνδυασμό με τις μηδενικές εκπομπές ρύπων, τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου έχουν προσεγγίσει το ενδιαφέρον αρκετών αυτοκινητοβιομηχανιών, ενώ πολλές από αυτές προωθούν στην αγορά την τεχνολογία αυτή.

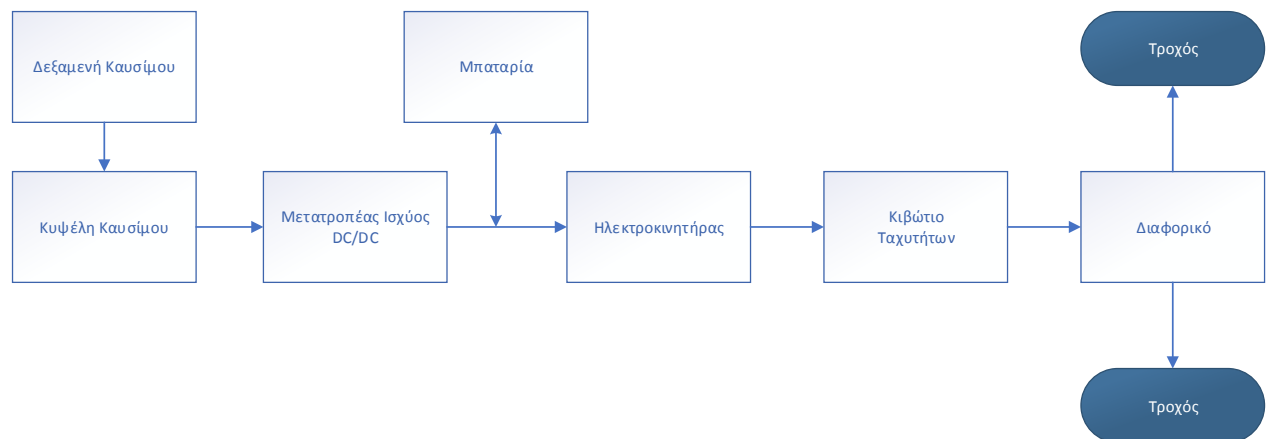
Η κυψέλη καυσίμου εκμεταλλεύεται την χημική αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο του αέρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία σταθεροποιείται όσο η τροφοδοσία καυσίμου είναι επαρκής. Επομένως, παρέχεται η δυνατότητα μεγαλύτερων τιμών αυτονομίας και μικρών χρόνων πλήρωσης ρεζερβουάρ, σε σύγκριση με τα PHEVs και τα BEVs αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τα οχήματα MEK, δεν χρησιμοποιείται ανάφλεξη καυσίμου, επομένως δεν εκπέμπονται ρύποι. Παράλληλα, η υψηλή απόδοση της κυψέλης καυσίμου τα καθιστά μια αποτελεσματική λύση.

Τα FCEVs χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την αρχιτεκτονική που χρησιμοποιούν, αυτά που κάνουν αποκλειστική χρήση της κυψέλης καυσίμου και τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου (FCHEV), τα οποία παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα.

- Με την χρήση της μπαταρίας μπορεί να διασφαλιστεί η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου στην περιοχή που είναι περισσότερο αποδοτική.
- Συμβάλλει στην μείωση του μεγέθους της κυψέλης, δηλαδή του κόστους του συνολικού οχήματος, ενώ παράλληλα γίνεται εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων του υβριδικού συστήματος (Regenerative Braking, Fast Start).

Μια απλή αρχιτεκτονική σχεδίασης FCHEV (Σχήμα 2.4) περιλαμβάνει μια δεξαμενή υδρογόνου, την κυψέλη καυσίμου, ένα μετατροπέα τάσης (DC/DC), μια μπαταρία, ένα ηλεκτροκινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων, το διαφορικό και τους τροχούς του οχήματος. Δύο από τα δημοφιλέστερα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες υδρογόνου είναι, το Toyota Mirai και το Honda FCX Clarity. Και τα δύο, μοιράζονται την ίδια φιλοσοφία στην αρχιτεκτονική, δηλαδή η μετάδοση της κίνησης γίνεται στους μπροστινούς τροχούς και ανήκουν στην ίδια κατηγορία μοντέλου (Mid-size Luxury Car). Οι βασικές αρχές λειτουργίας είναι τέσσερις [5]:

- Εισαγωγή αέρα (οξυγόνο) και υδρογόνου (καύσιμο) στην κυψέλη για την έναρξη της χημικής αντίδρασης.
- Ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την χημική αντίδραση.
- Η κυψέλη παράγει ισχύ για την τροφοδότηση του ηλεκτροκινητήρα και τη φόρτιση της μπαταρίας, η οποία με την σειρά καλύπτει μέρος της ισχύος όταν είναι αναγκαίο.
- Νερό αποβάλλεται από την κυψέλη (υποπροϊόν της χημικής αντίδρασης).



Σχήμα 2.4. Αρχιτεκτονική σχεδίασης ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλη καυσίμου (FCHEV).

Ωστόσο, η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου καλείται να αντιμετωπίσει κάποιες προκλήσεις ώστε να γίνει η πρώτη επιλογή στην αγορά των αυτοκινήτων. Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η αποθήκευση του υδρογόνου στην δεξαμενή καυσίμου. Παρ' όλο που το υδρογόνο έχει τρεις φορές μεγαλύτερη βαρυμετρική πυκνότητα από την βενζίνη, η ογκομετρική πυκνότητα του είναι το ένα τρίτο από αυτό της βενζίνης. Αυτό καθιστά δύσκολη την αποθήκευση του υδρογόνου σε ποσότητες τέτοιες, ώστε να δίνουν τη ίδια ή και μεγαλύτερη αυτονομία από ένα όχημα ΜΕΚ. Η δεύτερη πρόκληση είναι η έλλειψη υποδομών ανεφοδιασμού με υδρογόνο. Οι εγκαταστάσεις παροχής υδρογόνου σε καταναλωτές είναι αρκετά διαφορετικές από τα σημερινά πρατήρια καυσίμων. Μια τέτοια μετάβαση θα σήμαινε τεράστια επένδυση στον χώρο του ανεφοδιασμού, που αποτελεί έναν ακόμα σημαντικό λόγο για την υιοθέτηση των αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου. Άρα, το κόστος κατασκευής είναι αρκετά υψηλό για να μπορέσει αυτή η καινούργια τεχνολογία να αντικαταστήσει τα οχήματα ΜΕΚ ή τα υβριδικά οχήματα (HEVs). Παρ' όλα αυτά μια τέτοια μετατροπή των πρατηρίων καυσίμου, θα μπορούσε να είναι έως και πέντε φορές μικρότερη από την δημιουργία σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, δημιουργώντας ευνοϊκότερες συνθήκες για την επικράτηση έναντι των ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση μπαταρίας (BEVs).

Δεξαμενή υδρογόνου

Οι επιδόσεις των αυτοκινήτων είναι συνδυασμένες με την επίτευξη του χαμηλού βάρους των επιμέρους συστημάτων καθώς και με τον μικρό όγκο τον οποίο καταλαμβάνουν. Επομένως, η δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις αυτές. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, το υδρογόνο έχει την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους (33.3 kWh/kg) σε σύγκριση με τα κοινά καύσιμα, την δεύτερη χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου (0.53 kWh/l) και είναι ασταθές όταν αναμιγνύεται με τον αέρα. Έτσι, η δημιουργία μιας αξιόπιστης και χαμηλού κόστους δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου είναι σημαντική [5]. Να σημειωθεί ότι, για να ανταγωνιστεί τα οχήματα ΜΕΚ, θα πρέπει η χωρητικότητα της δεξαμενής να μπορεί να καλύψει υψηλές τιμές χιλιομετρικής απόστασης (τουλάχιστον 500 km), μεταξύ των γεμισμάτων.

Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικοί τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου. Ο πιο κοινός τρόπος αποθήκευσης υδρογόνου, για οχήματα, είναι συμπιεσμένο υδρογόνο (Compressed Gas Hydrogen), το οποίο βρίσκεται είτε σε υγρή είτε σε αέρια μορφή. Επειδή απαιτείται αρκετά υψηλή πίεση για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων, ακριβώς συνθετικά υλικά είναι αναγκαία για την κατασκευή της δεξαμενής. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μορφής αποθήκευσης είναι η απλότητα και ο γρήγορος ανεφοδιασμός της διαδικασίας. Υπάρχουν και άλλες μορφές

αποθήκευσης όπως, νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes), χημικά υδρίδια (chemical hydrides, LiH), συμπλοκοποιημένα μεταλλικά υδρίδια (complex metal hydrides, alanates, NaAlH_4), και μεταλλικά υδρίδια (metal hydrides LaNi_5). Όλες οι παραπάνω μορφές αποθήκευσης εκμεταλλεύονται διαφορετικές τεχνολογίες, για παράδειγμα τα μεταλλικά υδρίδια έχουν την δυνατότητα να απορροφούν αέριο υδρογόνο κάτω από μικρές πιέσεις. Παρ' αυτά καμία μορφή αποθήκευσης δεν μπορεί να αποδώσει μεγάλες τιμές αυτονομίας. Δεν είναι μόνο θέμα κόστους αλλά και τεχνολογικής εξελισμότητας.

Πίνακας 2.1. Σύγκριση ενεργειακών φορέων (*δεν έχει συμπεριληφθεί το βάρος του εξοπλισμού αποθήκευσης του κάθε ενεργειακού φορέα).

Ενεργειακός Φορέας	Υδρογόνο	Φυσικό Αέριο	Προπάνιο (LPG)	Μεθανόλη	Βενζίνη	Μπαταρίες Μολύβδου
Ενεργειακή Πυκνότητα ανά μονάδα Βάρους (Kwh/kg)*	33.3	13.9	12.9	5.6	12.7	0.03
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου (kWh/ltr)	0.53	2.6	7.5	4.4	8.7	0.09

2.2.5 Extended Range Electric Vehicles (EREVs)

Αυτή η κατηγορία οχημάτων αποτελεί μια παραλλαγή των οχημάτων PHEVs. Λειτουργούν εξ' ολοκλήρου με ηλεκτρική ενέργεια και συνήθως χρησιμοποιούν μία ΜΕΚ για την φόρτιση της μπαταρίας. Μόνο σε περιπτώσεις υψηλής ισχύος φορτίου η ΜΕΚ παράγει ισχύ για κίνηση του οχήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως έχουν την ίδια φιλοσοφία με τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου τα οποία μοιράζονται τον ίδιο τρόπο λειτουργίας.

2.3 Αρχιτεκτονική οχημάτων HEV και PHEV

Η αρχιτεκτονική ανάμεσα σε οχήματα HEV και PHEV είναι όμοια σε μεγάλο βαθμό και περιλαμβάνει την παράλληλη σχεδίαση και την σχεδίαση σε σειρά των μονάδων ισχύος. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στο ότι το PHEV έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα μπαταρίας, διότι φορτίζεται από εξωτερική πηγή.

2.3.1 Σχεδίαση σε σειρά

Τα οχήματα που χρησιμοποιούν σχεδίαση σε σειρά, είναι αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα. Αντλούν ηλεκτρική ενέργεια από τις μπαταρίες για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος με την σειρά του κινεί τους τροχούς [6]. Μια ΜΕΚ μικρού κυβισμού συνδέεται με μια γεννήτρια η οποία αναλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι χαμηλή. Σχεδίαση σε σειρά χρησιμοποιούν και τα EREVs, τα οποία λειτουργούν μόνο με ηλεκτρική ενέργεια που αντλείται από τις μπαταρίες με τι οποίες είναι εφοδιασμένα, με την μηχανή να ενεργοποιείται

μόνο για την φόρτιση της μπαταρίας κατά την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Ένα παράδειγμα του τρόπου σχεδίασης φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

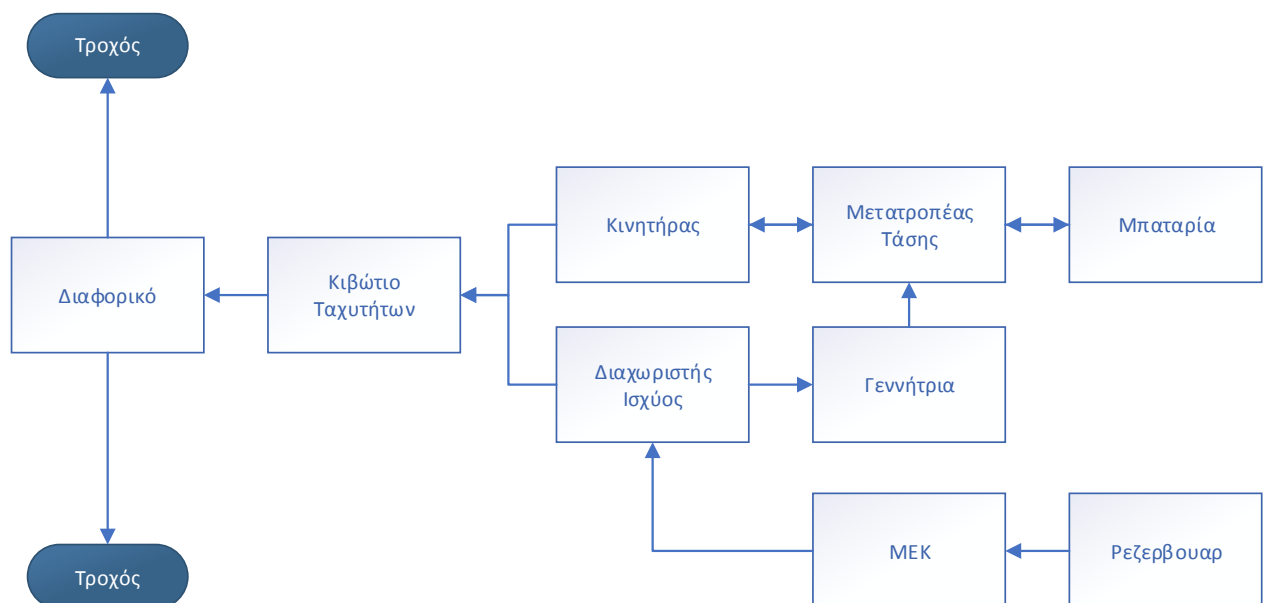
2.3.2 Παράλληλη σχεδίαση

Κατά την παράλληλη σχεδίαση χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μονάδες ισχύος για την κίνηση του οχήματος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, μια MEK και ένας ηλεκτροκινητήρας συνδέονται παράλληλα σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων για παραγωγή της συνολικής ισχύος του οχήματος. Κατά την κίνηση του οχήματος οι δύο μονάδες ισχύος τροφοδοτούν το σύστημα είτε ταυτόχρονα είτε κάθε μια ξεχωριστά, ανάλογα με τιμή του φορτίου [6].

Μια άλλη διαφοροποίηση η οποία συναντάται σε οχήματα παράλληλης σχεδίασης είναι, η θέση του ηλεκτροκινητήρα στο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Η πρώτη κατηγορία τοποθετεί τον ηλεκτροκινητήρα πριν το κιβώτιο ταχυτήτων, η δεύτερη κατηγορία τον τοποθετεί ανάμεσα στο κιβώτιο ταχυτήτων και την MEK. Η τρίτη κατηγορία τον τοποθετεί μετά το κιβώτιο ταχυτήτων και η τελευταία κατηγορία σε διαφορετικό άξονα από αυτό της MEK. Κάθε μια σχεδίαση επιλέγεται ανάλογα με το είδος του οχήματος το οποίο κατασκευάζεται. Για παράδειγμα HEVs υψηλών επιδόσεων χρησιμοποιούν την τελευταία κατηγορία αφού τους δίνει την δυνατότητα χρήσης συστήματος κίνησης και στους τέσσερις τροχούς αυξάνοντας έτσι τις επιδόσεις του οχήματος (η MEK αναλαμβάνει την κίνηση των πίσω τροχών, ενώ ο ηλεκτροκινητήρας την κίνηση των μπροστινών τροχών).

2.3.3 Συνδυασμός παράλληλης σχεδίασης και σχεδίασης σε σειρά

Αποτελεί τον συνδυασμό και το δύο αρχιτεκτονικών με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσης και της αυτονομίας στα HEVs. Ο συνδυασμός αυτός είναι αρκετά περίπλοκος, και απαιτεί την χρήση μιας επιπλέον γεννήτριας σε σύγκριση με την σχεδίαση σε σειρά. Κατά το μεγαλύτερο διάστημα το όχημα λειτουργεί όπως σε μια παράλληλη σχεδίαση, με την μόνη διαφορά να βρίσκεται στην κατά διαστήματα φόρτιση της μπαταρίας από την MEK. Αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η Toyota, χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική στο μοντέλο Prius. Παράδειγμα του οχήματος φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Παράλληλη/Σειρά σχεδίαση οχήματος.

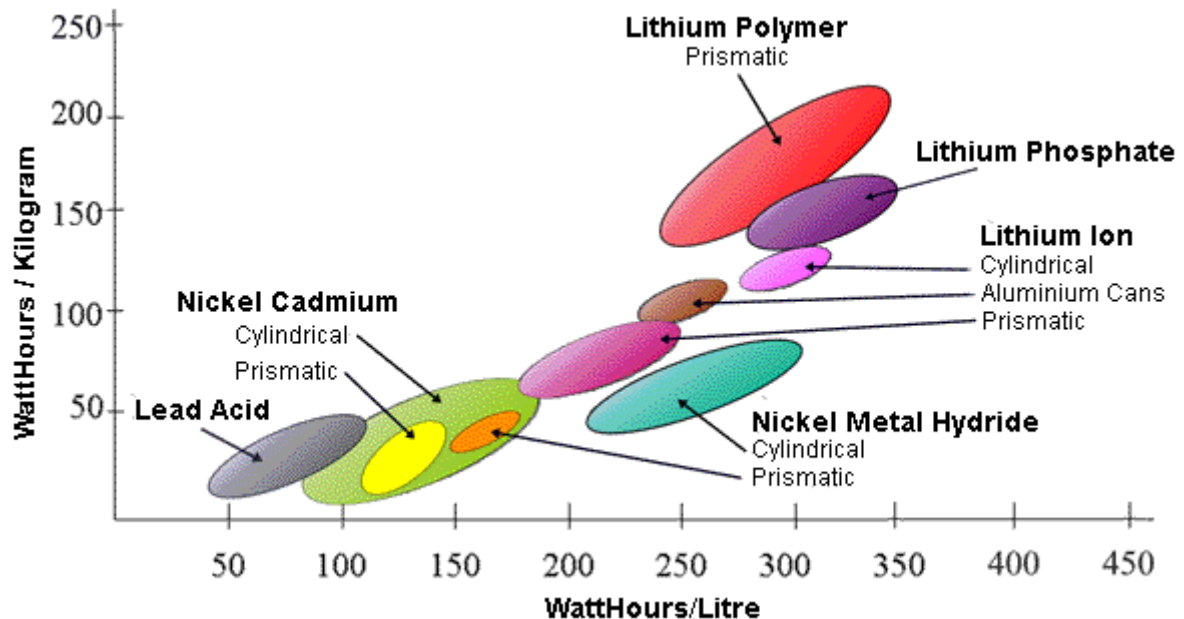
2.4 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα αναφέρεται σε οποιοδήποτε σύστημα έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει ενέργεια και να τροφοδοτεί ένα ηλεκτροκινητήρα. Από την πρώτη εμφάνιση των ηλεκτρικών οχημάτων, οι ερευνητές δεν σταμάτησαν να αναπτύσσουν το κατάλληλο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες επικεντρώνονται στην εξέλιξη των μπαταριών (κυρίως ιόντων λιθίου), ενώ άλλες έχουν στραφεί σε εναλλακτικές μορφές τεχνολογιών όπως οι κυψέλες καυσίμου.

2.4.1 Βασικές παράμετροι

Ειδική ενέργεια και ενεργειακή πυκνότητα

Ειδική ενέργεια ορίζεται ως η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα σύστημα ανά μονάδα μάζας (Wh kg^{-1}), ενώ η ενεργειακή πυκνότητα αναφέρεται στην ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα όγκου (Wh l^{-1}). Οι παραπάνω δύο παράμετροι χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την αποθηκευτική ικανότητα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, η ειδική ενέργεια ως προς την ενεργειακή πυκνότητα ποικίλει για κάθε τεχνολογία μπαταριών, με την μπαταρία μολύβδου - οξέος (Lead Acid) να έχει τις χαμηλότερες τιμές, ενώ η μπαταρία ιόντων λιθίου – πολυμερούς (Lithium Polymer) να καταλαμβάνει τις υψηλότερες τιμές. Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί πως η πραγματική ειδική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραμετροποίηση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και αφορά την πραγματική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει το σύστημα και όχι την ιδανική.



Σχήμα 2.6. Γράφημα ειδικής ενέργειας – ενεργειακής πυκνότητας μπαταριών διαφόρων τεχνολογιών.

Ειδική ισχύς

Η ειδική ισχύς ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς ανά μονάδα βάρους που μπορεί να αποδώσει το σύστημα ($W\ kg^{-1}$). Η ειδική ισχύς της μπαταρίας κατέχει σημαντικό ρόλο στην μείωση του βάρους των μπαταριών, και ειδικά σε περιπτώσεις κατασκευής οχημάτων υψηλής ισχύος, όπως τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα. Η ειδική ισχύς της μπαταρίας εξαρτάται από την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας.

Ενεργειακή απόδοση

Οι απώλειες ενέργειας κατά την εκφόρτιση (Εξίσωση 2.1) και φόρτιση (Εξίσωση 2.2) της μπαταρίας εκφράζονται με την μορφή απώλειας τάσης. Έτσι η ενεργειακή απόδοση εκφράζεται ως το πηλίκο της τάσης λειτουργίας του κελιού ως προς τη θερμοδυναμική τάση:

$$n = \frac{V}{Va} \quad (2.1)$$

$$n = \frac{Va}{V} \quad (2.2)$$

όπου:

V τάση λειτουργίας,

Va θερμοδυναμική τάση.

Κατάσταση φόρτισης ή State of Charge (SoC)

Η κατάσταση φόρτισης εκφράζει την εναπομένουσα χωρητικότητα της μπαταρίας και δίνεται συνήθως σε ποσοστό επί τοις εκατό ($0\% =$ άδεια, $100\% =$ πλήρης). Είναι πολύ χρήσιμο μέγεθος στην διαχείριση ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης, αφού βοηθά στον καθορισμό ορίων φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας και στην αποφυγή πλήρους αποφόρτισης και υπερφόρτισής της.

Βάθος εκφόρτισης ή Depth of Discharge (DOD)

Είναι το αντίθετο της κατάστασης φόρτισης ($100\% =$ άδεια, $0\% =$ πλήρης), και αποτελεί το ποσοστό χωρητικότητας της μπαταρίας ως προς το οποίο έχει εκφορτιστεί κατά την χρήση της. Η εκφόρτιση μιας μπαταρίας σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 80% της χωρητικότητας, ονομάζεται βαθιά εκφόρτιση (deep discharge).

Γήρανση ή Aging

Αναφέρεται στην κατάσταση στην οποία βρίσκεται η μπαταρία μετά από μεγάλο διάστημα χρήσης. Για τον υπολογισμό της, συγκρίνεται η χωρητικότητα και η εσωτερική αντίσταση στην αρχή ζωής της μπαταρίας με την χωρητικότητα και την εσωτερική αντίσταση μετά από αρκετούς κύκλους φόρτισης. Το αποτέλεσμα είναι το ποσοστό γήρανσης της μπαταρίας και εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο (Εξίσωση 2.3):

$$\varepsilon(n) = \varepsilon(n-1) + \frac{0.5}{N(n-1)} \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOC(n)}{DOD(n-1)} \right), \text{ αν } \frac{k}{2} \neq 0$$

$$\varepsilon(n) = \varepsilon(n-1), \text{ αλλιώς} \quad (2.3)$$

όπου:

$n = k \cdot T_h$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$),

T_h διάρκεια μισού κύκλου (φόρτισης ή αποφόρτισης) σε sec,

DOD βάθος εκφόρτισης ή Depth of discharge,

N ο μέγιστος αριθμός κύκλων φόρτισης.

Τάση ανοικτοκυκλώματος

Αναφέρεται στην τάση μεταξύ του θετικού και αρνητικού πόλου της μπαταρίας όταν δεν συνδέεται σε αυτήν φορτίο. Η τάση ανοικτοκυκλώματος εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης, την θερμοκρασία λειτουργίας και τη γήρανση της μπαταρίας.

2.4.2 Μπαταρία μολύβδου – οξέος (Lead Acid Battery)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπαταριών επινοήθηκε στο 1859 από τον φυσικό Γκαστόν Παλντ και αποτελεί την παλαιότερη και περισσότερο διαδεδομένη επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Είναι αρκετά διαδεδομένη στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας και συναντάται ως μπαταρίες εκκίνησης και μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης. Σαν μπαταρίες εκκίνησης, παρά την χαμηλή ειδική ενέργεια και ενεργειακή πυκνότητα που εμφανίζουν (Σχήμα 2.6) έχουν τη δυνατότητα να τροφοδοτούν την μηχανή με αρκετά υψηλής εντάσεως ρεύμα. Επιπλέον παρέχουν ενέργεια στις διάφορες ηλεκτρικές συσκευές του οχήματος και αποθηκεύουν το ρεύμα που παράγεται από το δυναμό. Σαν μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης, χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα όπως ανυψωτικά οχήματα, αμαξίδια του γκόλφ, τροχόσπιτα κα. Παρουσιάζουν ιδιαιτερότητα όσον αφορά την φόρτιση, διότι δεν πρέπει να αποφορτίζεται παραπάνω από το 50% της χωρητικότητας τους καθώς μειώνει τον κύκλο ζωής τους [7].

Η δομή των μπαταριών εκκίνησης διαφέρει από αυτή των μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης. Οι μπαταρίες εκκίνησης διαθέτουν μεγαλύτερη και λεπτότερη επιφάνεια πλακών στην οποία βρίσκεται ο ηλεκτρολύτης ώστε να παράγεται μέγιστο ρεύμα εξόδου, σε αντίθεση με τις μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης που διαθέτουν πιο χοντρές και βαριές πλάκες, υψηλότερη πυκνότητα ενεργού υλικού, πιο παχύς διαχωριστές και μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρολύτη. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία της μπαταρίας κατά τις συνεχείς φορτίσεις και αποφορτίσεις.

Κατά την πρώτη εμφάνιση των ηλεκτρικών οχημάτων, η χρήση των μπαταριών αυτής της τεχνολογίας ήταν αρκετά προσιτή και με χαμηλό κόστος, όμως λόγω της μικρής διάρκειας ζωής των μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης και του μεγάλου βάρους οι αυτοκινητοβιομηχανίες στράφηκαν σε διαφορετικού τύπου τεχνολογίες.

2.4.3 Μπαταρία νικελίου υδριδίου μετάλλου (Nickel Metal Hydride)

Αποτελεί μια τεχνολογία μπαταριών που χρησιμοποιείται ευρέως στα περισσότερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, όπως η Toyota, η General Motors, η Ford, η Honda κα. Θεωρείται αρκετά ώριμη τεχνολογία και ενώ παρουσιάζει αρκετά χαμηλή απόδοση κατά την φόρτιση και αποφόρτιση της ακόμα και από την μπαταρία μολύβδου – οξέος, ο δείκτης ειδικής ενέργειας και ενεργειακής πυκνότητας παραμένει αρκετά υψηλότερος με αποτέλεσμα να προτιμάται σε ηλεκτρικά οχήματα και κυρίως στα υβριδικά, όπου ενσωματώνεται σε πληθώρα οχημάτων.

Παρά την ευρεία χρήση της παραπάνω τεχνολογίας, εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα, όπως ο χαμηλός βαθμός απόδοσης, η χαμηλή απόδοση της μπαταρίας στις χαμηλές θερμοκρασίες, η ανάγκη έξυπνου συστήματος φόρτισης της μπαταρίας και ο υψηλός δείκτης αυτοεκφόρτισης. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω μειώνει την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί πως με την ύπαρξη ενός πολύπλοκου συστήματος έξυπνης φόρτισης μπορεί να επιτευχθεί σωστή διαχείριση της τεχνολογίας, ώστε τα οχήματα να διανύουν αρκετά χιλιόμετρα μέχρι την επόμενη αλλαγή μπαταρίας. Έχουν καταγραφεί αποστάσεις 160,000 km σε οχήματα Toyota RAV4 EV (αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα).

2.4.4 Μπαταρία ιόντων λιθίου

Η τεχνολογία ιόντων λιθίου (όπως και οι μπαταρίες ιόντων λιθίου πολυμερούς) κατασκευαστήκαν για την χρήση σε προϊόντα φορητών υπολογιστών, κάμερες και άλλες φορητές συσκευές. Λόγω του υψηλού δείκτη ειδικής ενέργειας και ενεργειακής πυκνότητας της τεχνολογίας αυτής (Σχήμα 2.6) καθώς και της χαμηλής αυτοεκφόρτισης, γρήγορα κατέλαβε το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς.

Η δομή των μπαταριών ιόντων λιθίου, όπως και στις προηγούμενες τεχνολογίες που αναφέρθηκαν, αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο καθόδου, ένα ηλεκτρόδιο ανόδου, έναν ηλεκτρολύτη, ένα συλλέκτη ρεύματος και ένα μονωτή. Κατά την διάρκεια αποφόρτισης, τα ιόντα λιθίου κινούνται, μέσω το ηλεκτρολύτη, από το ηλεκτρόδιο της ανόδου προς το ηλεκτρόδιο της καθόδου και αντίστροφα κατά την διάρκεια της φόρτισης.

Αφού επιλεχθούν σωστά οι βασικές παράμετροι της μπαταρίας για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να επιλεχθεί ο τύπος (σχήμα) της μπαταρίας. Τα σχήματα τα οποία είναι διαθέσιμα είναι τέσσερα, μικρά κυλινδρικά, μεγάλα κυλινδρικά, τύπου «σακιδίου» (pouch) και πρισματικό. Τα στοιχεία με κυλινδρικό σχήμα εμφανίζουν μεγαλύτερη σειριακή επαγωγή, ενώ οι μπαταρίες τύπου «σακιδίου» εμφανίζουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα. Για παράδειγμα το ηλεκτρικό μοντέλο Tesla Model S, κάνει χρήση 7104 κελιών μπαταρίας, σαν αυτές που χρησιμοποιούνται στους φορητούς υπολογιστές. Σε κάθε διαφορετική σχεδίαση οχήματος οι κατασκευαστές θα χρησιμοποιήσουν τον σωστό τύπο μπαταριών βασισμένοι στις επιδόσεις, τον διαθέσιμο χώρο και την οδηγική συμπεριφορά του οχήματος.

Κατασκευή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Κάθε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από ένα αριθμό μπαταριών. Μόλις δημιουργηθούν τα κελιά της μπαταρίας, πρέπει να τα τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο (σύνδεση σε σειρά ή παράλληλα) ώστε να δώσουν την χωρητικότητα και τάση που έχει επιλεχθεί για το σύστημα. Μια σύνδεση σε σειρά αυξάνει την τάση και την αντίσταση του συστήματος, ενώ μια παράλληλη σύνδεση βοηθά στην συσσώρευση της ενέργειας και της ισχύος. Για παράδειγμα η μπαταρία ενός ηλεκτρικού οχήματος αποτελείται από υποδιαιρέσεις μικρότερων τμημάτων. Δηλαδή, ένας αριθμός κελιών, συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα, δημιουργεί μια συστοιχία μπαταριών η οποίες θα συνδεθούν μεταξύ τους για να δώσουν το επιλεγόμενο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στον κατασκευαστή να πραγματοποιήσει διαφορετικές συστοιχίες μπαταριών ανάλογα με την επιλογή οχήματος, τον διαθέσιμο χώρο και τις επιδόσεις χωρίς να χρειάζεται εκ νέου ο σχεδιασμός όλων των κελιών. Επιπλέον βοηθά στην αντικατάστασή της διότι, δίνεται η δυνατότητα αλλαγής τμημάτων της συστοιχίας μπαταριών μειώνοντας το κόστος συντήρησης και επισκευής.

2.5 Κυψέλη καυσίμου (Fuel Cells)

Με τον όρο κυψέλη καυσίμου, αναφερόμαστε σε μια συσκευή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία εκμεταλλεύεται την χημική αντίδραση καυσίμων χωρίς την καύση τους [5]. Υπάρχουν αρκετά είδη κυψελών καυσίμου, όπως:

- Κυψέλη Καυσίμου Πολυμερισμένης Μεμβράνης (PEMFC),
- Κυψέλη Καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC),
- Κυψέλη Καυσίμου Μεθανόλης (DMFC),

- Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC),
- Κυψέλη Καυσίμου Τηγμένου Ανθρακικού Άλατος (MCFC),
- Κυψέλη Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC).

Κάθε μια κυψέλη καυσίμου εμφανίζει διαφορετική θερμοκρασία λειτουργίας και κάνει χρήση διαφορετικού ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2. Ένας από τους παράγοντες επιλογής κυψέλης καυσίμων είναι η θερμοκρασία λειτουργίας η οποία δεν πρέπει να ανέρχεται σε πολύ υψηλές τιμές. Γι' αυτό η κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEMFC) και η αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC), προτιμώνται έναντι των άλλων τεχνολογιών. Η κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC) μπορεί να εμφανίζει χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας αλλά η απόδοση της τεχνολογίας αυτής εμφανίζει ποσοστό 10% - 25%, κάνοντας την έτσι μη κατάλληλη τεχνολογία για την κίνηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Δύο ακόμη παράγοντες επιλογής της καταλληλότερης τεχνολογίας είναι η απόδοση του κάθε συστήματος και το εύρος ισχύος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3. Επομένως η ιδανικότερη επιλογή λόγω του εύρους ισχύος και του υψηλού βαθμού απόδοσης είναι η κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEMFC).

Πίνακας 2.2. Διαφορετικά είδη κυψελών καυσίμου.		
Τύπος Κυψέλης Καυσίμου	Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	Ηλεκτρολύτης
Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC)	<80	Υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου
Κυψέλη Καυσίμου Πολυμερισμένης Μεμβράνης (PEMFC)	50 - 100	Στερεά πολυμερής μεμβράνη
Κυψέλη Καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	150 – 200	Σταθεροποιημένο φωσφορικό οξύ
Κυψέλη Καυσίμου Τηγμένου Ανθρακικού Άλατος (MCFC)	600 - 650	Αλκαλικό-Ανθρακικό άλας
Κυψέλη Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC)	850 – 1100	Κεραμικό οξείδιο
Κυψέλη Καυσίμου Μεθανόλης (DMFC)	90 - 120	Στερεά πολυμερής μεμβράνη

Η τεχνολογία πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM) χρησιμοποιεί το οξυγόνο του αέρα και το υδρογόνο (καύσιμο) για την παραγωγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος και έχει παρόμοια λειτουργία με μια μπαταρία, ενώ το προϊόν της χημικής αντίδρασης είναι το νερό. Η δομή μιας τέτοιας κυψέλης καυσίμου περιλαμβάνει μια άνοδο και μια κάθοδο και ανάμεσα τους μια πολυμερισμένη μεμβράνη που δρα σαν ηλεκτρολύτης. Επίσης είναι εφοδιασμένη με κανάλια που επιτρέπουν την ροή του αέρα και του υδρογόνου. Τα βήματα λειτουργίας για την παραγωγή ρεύματος είναι τα ακόλουθα:

- Υδρογόνο και αέρας (οξυγόνο) μέσω των καναλιών οδηγούνται ταυτόχρονα στην άνοδο και κάθοδο αντίστοιχα.
- Με την βοήθεια του καταλύτη στην πλευρά της ανόδου, τα μόρια του υδρογόνου διασπώνται σε θετικά φορτισμένα ιόντα (H^+) και σε αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια (e^-).
- Λόγω της παρουσίας της πολυμερισμένης μεμβράνης (ηλεκτρολύτη), μόνο τα θετικά φορτισμένα ιόντα (H^+) μπορούν να περάσουν στην πλευρά της καθόδου, ενώ τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια (e^-) ρέουν από την άνοδο στην κάθοδο. Μέσω αυτής της κίνησης των ηλεκτρονίων παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η συγκέντρωση, ιόντων, ηλεκτρονίων και οξυγόνου του ατμοσφαιρικού αέρα, στην κάθοδο, αντιδρά και παράγει νερό.

Πίνακας 2.3. Διαφορετικά είδη κυψελών καυσίμου.

Τύπος Κυψέλης Καυσίμου	Απόδοση Συστήματος	Εύρος Ισχύος
Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC)	62%	10 – 200 kW
Κυψέλη Καυσίμου Πολυμερισμένης Μεμβράνης (PEMFC)	30% – 50 %	1 W – 500 kW
Κυψέλη Καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	40%	< 10 MW
Κυψέλη Καυσίμου Τηγμένου Ανθρακικού Άλατος (MCFC)	45% – 55 %	100 MW
Κυψέλη Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC)	40% – 45 %	10 W – 1 kW
Κυψέλη Καυσίμου Μεθανόλης (DMFC)	10% – 25 %	100 mW – 1 kW

Υδρογόνο ως καύσιμο

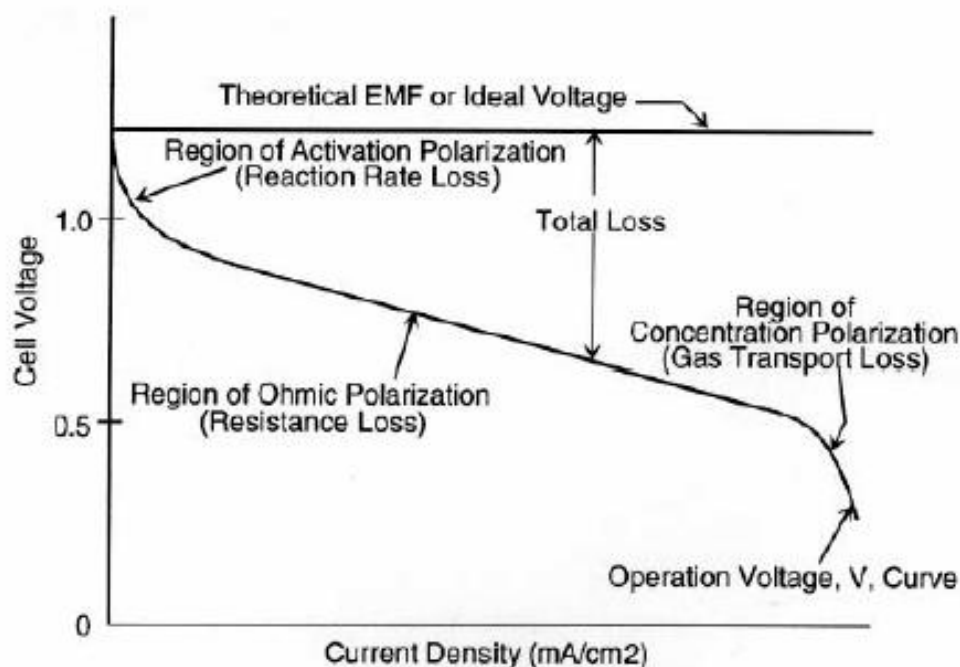
Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιήσουν σαν καύσιμο, υδρογόνο, βενζίνη και μεθανόλη. Σε αντίθεση με τα άλλα καύσιμα, όταν χρησιμοποιείται υδρογόνο σαν καύσιμο δεν είναι αναγκαίος ο έλεγχος καύσης διότι τα καυσαέρια είναι καθαροί υδρατμοί και επομένως η απόδοση του συστήματος αυξάνεται. Βέβαια υπάρχουν δυσκολίες στην παραγωγή και αποθήκευση του υδρογόνου.

Το υδρογόνο αποτελεί στοιχείο το οποίο βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες στο οικοσύστημα. Βέβαια δεν υπάρχει ελεύθερο στο περιβάλλον και επομένως πρέπει να παραχθεί από άλλα υλικά. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι παραγωγής υδρογόνου (όπως από πχ. ορυκτά καύσιμα) που όμως ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα με διοξείδιο του άνθρακα. Παρ' αυτά υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί και με μη-ρυπογόνα διαδικασία, την ηλεκτρόλυση νερού. Αν η ηλεκτρόλυση μπορεί να αναπτυχθεί ώστε η παραγωγή του υδρογόνου να γίνεται από την παραγωγή ενέργειας των ΑΠΕ, τότε η όλη διαδικασία θα μπορέσει να περιορίσει τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα

σε χαμηλά επίπεδα [5]. Οι δυσκολίες στην αποθήκευση του υδρογόνου αναφέρονται στην παράγραφο 2.2.4.

Επιδόσεις των κυψελών καυσίμου

Οι επιδόσεις αυτού του τύπου κυψελών προσδιορίζονται από μια καμπύλη πόλωσης που ορίζει την πτώση τάσης που υφίσταται η κυψέλη καυσίμου κατά την λειτουργία της. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7, η καμπύλη αυτή χωρίζεται σε 3 περιοχές ανάλογα με το ρεύμα εξόδου που παράγει. Για παράδειγμα στην πρώτη περιοχή, περιοχή ενεργοποίησης (Region of Activation Polarization), παρατηρείται πτώση τάσης εξαιτίας της αργής ταχύτητας με την οποία γίνεται η χημική αντίδραση στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Το μέγεθος αυτής της περιοχής ποικίλει ανάλογα με τη θερμοκρασία, την πίεση, τον τύπο του ηλεκτροδίου και του καταλύτη του συστήματος. Η δεύτερη περιοχή ονομάζεται ωμική περιοχή (Region of Ohmic Polarization) και καταγράφει την πτώση τάσης της κυψέλης εξαιτίας των απωλειών της εσωτερικής αντίστασης που εμφανίζει. Και τέλος, η τρίτη περιοχή που ονομάζεται περιοχή μαζικής μεταφοράς (Region of Concentration Polarization), αντιπροσωπεύει τις απώλειες μαζικής μεταφοράς που προκύπτουν από την μεταβολή της συγκέντρωσης των αντιδρώντων καθώς χρησιμοποιείται το καύσιμο.

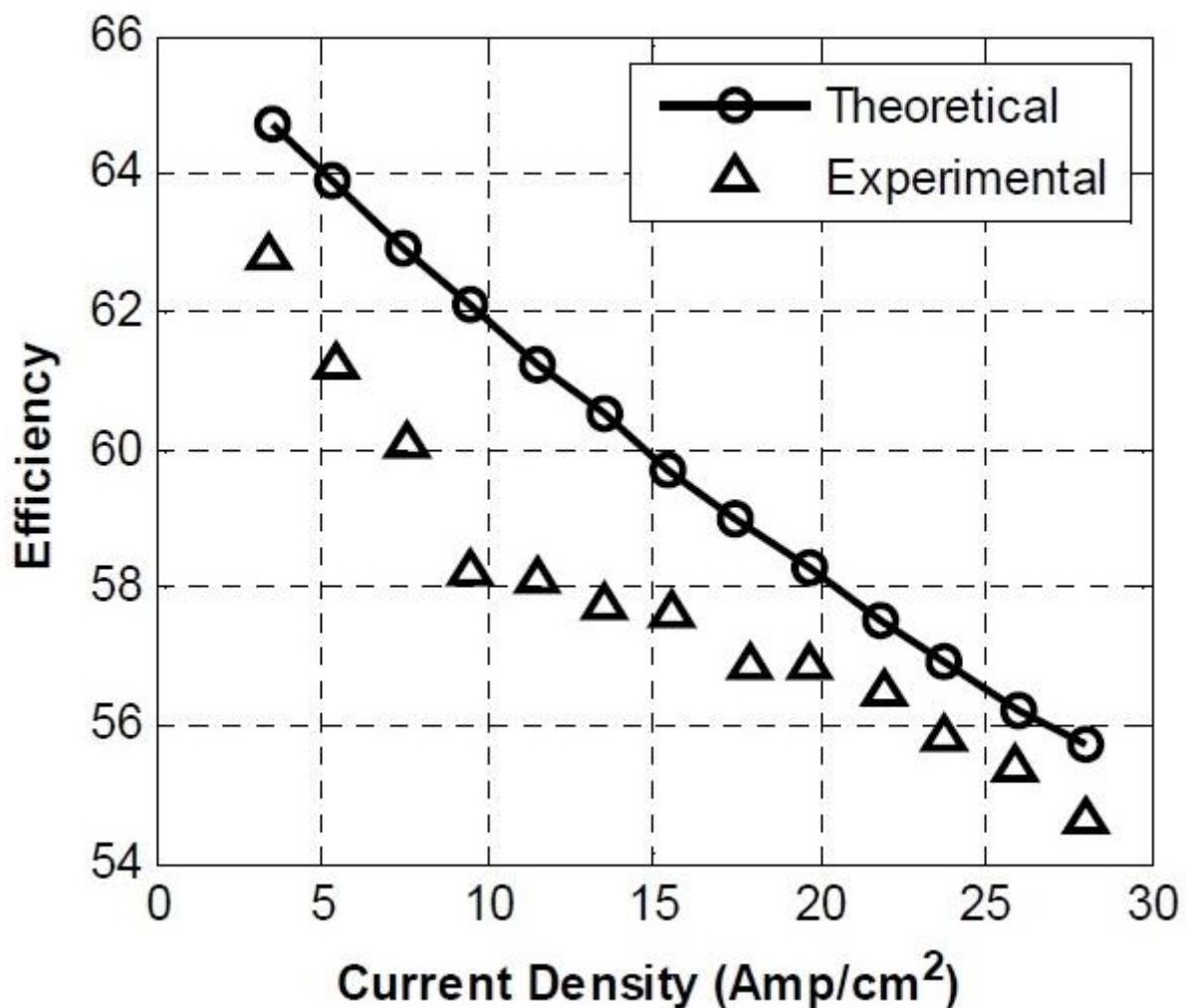


Σχήμα 2.7. Καμπύλη πόλωσης κυψέλης καυσίμου [8].

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8, η απόδοση της κυψέλης μειώνεται καθώς η ένταση του ρεύματος αυξάνεται. Επομένως, για να επιτευχθούν αρκετά υψηλές τιμές απόδοσης κατά την λειτουργία των κυψελών πρέπει να λειτουργούν σε μεσαίες έως και μικρές τιμές τάσεων και πιο συγκεκριμένα κάπου στο μέσο της καμπύλης πόλωσης (ωμική περιοχή).

Η κυψέλη καυσίμου σαν σύστημα

Η τάση κάθε κελιού μια κυψέλης καυσίμου παράγει περίπου 1.16 volts. Επομένως, πολλά κελιά κυψελών πρέπει να τοποθετηθούν μεταξύ τους ώστε να ικανοποιούν την ισχύ και την τάση του οχήματος που σχεδιάζεται. Δηλαδή η πιθανή ισχύ και τάση κάθε συστήματος κυψελών καυσίμου εξαρτάται από τον αριθμό των κελιών και μπορεί να διαφοροποιηθεί για κάθε σύστημα.



Σχήμα 2.8. Απόδοση – Πυκνότητα ρεύματος κυψελών καυσίμου [9].

2.6 Ηλεκτρικές μηχανές

Ηλεκτρικές μηχανές είναι η γενική ονομασία μηχανών που κάνουν χρήση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων, όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι ηλεκτρικές γεννήτριες και αποτελούν μετατροπείς ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Για παράδειγμα, ένας ηλεκτρικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, ενώ μια ηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα κινούμενα μέρη της μηχανής έχουν την δυνατότητα είτε να περιστρέφονται (μηχανές με δυνατότητα περιστροφής), είτε να κινούνται γραμμικά (γραμμικές μηχανές) [9].

2.6.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες – γεννήτριες

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συμβάλλουν στην μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και το αντίστροφο. Οποιαδήποτε ηλεκτρική μηχανή μπορεί να μετατρέψει ενέργεια και προς τις δύο κατευθύνσεις, δηλαδή είναι δυνατόν κάθε τέτοια μηχανή να χρησιμοποιηθεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Αποτελούνται από κινούμενα και σταθερά μέρη. Τα κινούμενα μέρη είναι ο δρομέας, ο άξονας στον οποίο στηρίζεται και τα τυλίγματά του, ενώ τα σταθερά μέρη είναι το έδρανο στήριξης του άξονα, και ο στάτης με τα τυλίγματά του. Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο είναι το διάκενο (η απόσταση μεταξύ στάτη και δρομέα), που είναι απαραίτητο για τη σχετική κίνηση τους.

Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων βασίζεται στην ιδιότητα ότι όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα μέσα σε μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται σε αυτόν, από το μαγνητικό πεδίο, δύναμη που τείνει να τον κινήσει προς ορισμένη κατεύθυνση. Η δύναμη αυτή είναι συνισταμένη των δυνάμεων Laplace [11]. Το μέγεθος της δύναμης αυτής είναι ανάλογο προς:

- Τη μαγνητική επαγωγή (B) του πεδίου (σε T),
- Την ένταση του ρεύματος (I) που διαρρέει τον αγωγό (σε A),
- Το μήκος του αγωγού (l), ο οποίος βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο (ενεργό μήκος σε m),
- Τη γωνία (α), την οποία σχηματίζουν οι διευθύνσεις του αγωγού και του πεδίου.

Οι ηλεκτρικές μηχανές ανάλογα με τον τύπο ηλεκτρικού ρεύματος, που χρησιμοποιούν χωρίζονται σε:

- Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος,
- Ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.6.2 Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος αποτελούν από τα πρώτα συστήματα τα οποία αναπτύχθηκαν και ακόμη και σήμερα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από επιβατικά αυτοκίνητα, φορτηγά και αεροπλάνα. Όταν ένα όχημα, ένα φορτηγό ή ένα αεροπλάνο διαθέτει κάποιο σύστημα ισχύος που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα προφανώς θα χρησιμοποιεί κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Επίσης συναντώνται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής.

Μια τυπική κατασκευή μηχανής συνεχούς ρεύματος αποτελείται από ένα στάτη και ένα δρομέα. Ο στάτης, όπως δηλώνει και η ονομασία του, συγκροτεί τα ακίνητα τμήματα της μηχανής και έχει ως κύριο προορισμό του να δημιουργεί καθορισμένη μαγνητική ροή. Τα κύρια μέρη του είναι, οι μαγνητικοί πόλοι, τα τυλίγματα των πόλων, οι ψύκτρες, οι βραχίονες κα. Ο δρομέας, αποτελεί το κινητό τμήμα της μηχανής, και τα κύρια δομικά του μέρη είναι, ο άξονας, ο πυρήνας επαγωγικού τυμπάνου, τα τυλίγματα επαγωγικού τυμπάνου, ο συλλέκτης, ο ανεμιστήρας κα.

Είδη μηχανών συνεχούς ρεύματος

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε κατηγορίες που διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο παραγωγής του μαγνητικού πεδίου και της διέγερσής τους. Οι γεννήτριες από την άλλη

χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό τους. Οι κατηγορίες κινητήρων είναι οι εξής:

- Ηλεκτρικός Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Ανεξάρτητης Διέγερσης,
- Ηλεκτρικός Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Παράλληλης Διέγερσης,
- Ηλεκτρικός Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος με Μόνιμους Μαγνήτες,
- Ηλεκτρικός Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Διέγερσης Σειράς,
- Ηλεκτρικός Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Σύνθετης Διέγερσης.

Οι κατηγορίες γεννητριών είναι οι εξής:

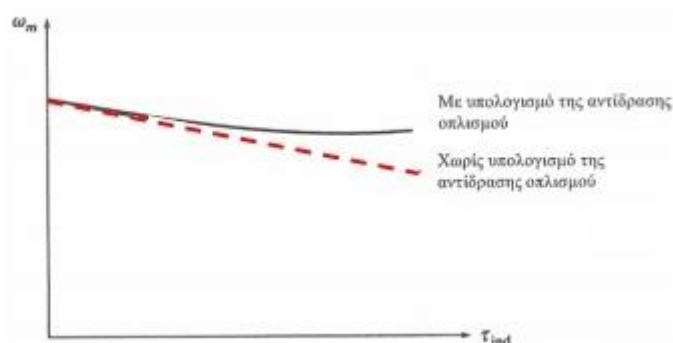
- Ηλεκτρική Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος Ανεξάρτητης Διέγερσης,
- Ηλεκτρική Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος Παράλληλης Διέγερσης,
- Ηλεκτρική Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος με Διέγερση Σειράς,
- Ηλεκτρική Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος Σύνθετης Διέγερσης.

Ο τρόπος παραγωγής της μαγνητικής ροής ενός κινητήρα επηρεάζει τον τρόπο κατά τον οποίο αυτή μεταβάλλεται με το φορτίο, πράγμα που με την σειρά του επηρεάζει τη χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του κινητήρα και τη χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος της γεννήτριας.

Ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης και παράλληλης διέγερσης

Η λειτουργία των δύο κινητήρων θεωρείται όμοια, αν θεωρήσουμε πως η τάση τροφοδοσίας παραμένει σταθερή. Ο κινητήρας ανεξάρτητης διέγερσης, τροφοδοτεί το κύκλωμα διέγερσης από μία ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης, ενώ ο κινητήρας παράλληλης διέγερσης τροφοδοτείται από το κύκλωμα οπλισμού του.

Η ταχύτητα στην χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.9, ενός κινητήρα ανεξάρτητης ή παράλληλης διέγερσης μειώνεται, καθώς η ροπή του αυξάνεται. Η ρύθμιση της ταχύτητας ενός τέτοιου κινητήρα είναι δυνατό να γίνει με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης ή της τάσης στα άκρα του οπλισμού ή τέλος, της αντίστασης οπλισμού.



Σχήμα 2.9. Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας κινητήρα ανεξάρτητης και παράλληλης διέγερσης [12].

Επιπλέον, στο Σχήμα 2.9, παρουσιάζονται δύο καμπύλες φορτίου. Η ευθεία γραμμή αφορά το φαινόμενο της αντίδρασης του οπλισμού, που μπορεί να εμφανίζεται στο εσωτερικό του

κινητήρα και επηρεάζει την καμπύλη ροπής – ταχύτητας. Αυτό παρατηρείται όταν κατά την αύξηση του φορτίου τα φαινόμενα εξασθένησης της μαγνητικής ροής προκαλούν μείωση της ροής στο εσωτερικό του κινητήρα. Η διακεκομμένη γραμμή, όπως αναγράφει, δεν περιλαμβάνει τον παραπάνω υπολογισμό.

Ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες

Ο κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες διαθέτει κύριους πόλους κατασκευασμένους από μόνιμους μαγνήτες. Αυτοί οι κινητήρες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα έναντι των κινητήρων παράλληλης διέγερσης, διότι λειτουργούν χωρίς ρεύμα διέγερσης, δεν παρουσιάζουν απώλειες στο τύλιγμα της διέγερσης και έχουν μικρότερο μέγεθος εξαιτίας της απουσίας του τυλίγματος αυτού. Εμφανίζουν κάποια μειονεκτήματα όπως της μη δυνατότητας παραγωγής μεγάλων μαγνητικών επαγωγών (όσο ένα τύλιγμα διέγερσης) με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μικρότερη επαγόμενη ροπή ανά μονάδα ρεύματος. Επίσης υπάρχει και ο κίνδυνος απομαγνήτισης. Η λειτουργία είναι ίδια με τους κινητήρες παράλληλης ή ανεξάρτητης διέγερσης και η ρύθμιση της ταχύτητας του δεν μπορεί να επιτευχθεί με την μεταβολή της διέγερσής του.

Ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς

Ο κινητήρας διέγερσης σειράς παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης από οποιαδήποτε άλλη κατηγορία αλλά στη λειτουργία χωρίς φορτίο υπάρχει περίπτωση να επιτυγχάνεται ασταμάτητα. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ροπή εκκίνησης και όπου η διακύμανση της ταχύτητας δεν είναι σημαντική, όπως στους εκκινητές των αυτοκινήτων.

Ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης

Ο κινητήρας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης είναι συνδυασμός των κινητήρων διέγερσης σειράς και παράλληλης διέγερσης και σε αυτόν συνυπάρχουν τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω κατηγοριών. Αντίθετα, ο κινητήρας διαφορικής σύνθετης διέγερσης παρουσιάζει αστάθεια και επιταχύνεται ασταμάτητα με την αύξηση του φορτίου του.

Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, δεν εμφανίζουν καμία διαφορά μεταξύ των κινητήρων παρά μόνο στην κατεύθυνση ροής της ισχύος τους. Οι χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος, της κάθε κατηγορίας γεννητριών, διαφέρουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να είναι διαφορετικές οι εφαρμογές της κάθε μίας. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά σπάνιες στα σύγχρονα συστήματα ισχύος. Ακόμα και τα συστήματα ισχύος συνεχούς ρεύματος, όπως εκείνα των αυτοκινήτων χρησιμοποιούν τώρα γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος μαζί με ανορθωτές για να δημιουργήσουν συνεχές ρεύμα.

Στις μέρες μας, οι πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνδυασμό με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος έχουν αντικαταστήσει τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος σε ορισμένες εφαρμογές, όπου κυριαρχούσαν μόνο αυτές. Για παράδειγμα πολλά από τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα έκαναν χρήση κινητήρων συνεχούς ρεύματος, τα οποία έχουν αντικατασταθεί από κινητήρες εναλλασσόμενου στις εκδόσεις των σημερινών μοντέλων.

2.6.3 Ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος

Όπως και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι γεννήτριες που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και κινητήρες, που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, οι σύγχρονες και οι επαγωγικές.

Στις σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές απαραίτητη προϋπόθεση είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα της με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή, το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Τελικά, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής. Η αντίστροφη διαδικασία λαμβάνει χώρα κατά την λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα.

Στις επαγωγικές μηχανές, το κύκλωμα διέγερσης έχει αντικατασταθεί από τυλίγματα απόσβεσης και το ρεύμα παράγεται εξ'επαγωγής. Έτσι για να κινηθεί ένας επαγωγικός κινητήρας δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέγερσης.

2.6.4 Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

Από τους περισσότερους τύπους σύγχρονων μηχανών, οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη είναι οι πιο διαδεδομένες στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας [13]. Ο συγκεκριμένος τύπος ηλεκτρικών μηχανών παρουσιάζει μόνιμους μαγνήτες για την δημιουργία μαγνητικής ροής αέρα – διάκενου. Προφανώς, δεδομένου ότι δεν υπάρχει ανάγκη να διατηρηθεί οποιαδήποτε διέγερση λόγω απουσίας τυλιγμάτων στον δρομέα, δεν υπάρχουν απώλειες χαλκού. Επίσης, η μαγνητεγερτική δύναμη σε μία μηχανή μόνιμου μαγνήτη, είναι αρκετά υψηλότερη από αυτήν που δημιουργούν τα τυλίγματα χαλκού, παρά την μικρή μαγνητική αντίσταση την οποία προβάλλουν. Έτσι το ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο το οποίο παράγεται, αποδίδει καλύτερη αναλογία ροπής ανά μονάδα όγκου και ροπής ανά μονάδα βάρους, από ότι άλλες μηχανές που κάνουν χρήση τυλιγμάτων στον δρομέα.

Η παρουσία μόνιμων μαγνητών στο εσωτερικό του κινητήρα αποδίδουν μεγάλο κόστος στην κατασκευή, μιας και οι ισχυροί μαγνήτες έχουν ακριβό κόστος, αλλά σε σύγκριση με τις μηχανές με χρήση τυλιγμάτων διέγερσης, εμφανίζουν μικρότερο κόστος συντήρησης που ισοσταθμίζει την συνολική δαπάνη παραγωγής [10].

Ανάλογα με την τοποθέτηση των μαγνητών στον δρομέα, οι ηλεκτρικές μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Δρομέας με μαγνήτες συγκολλημένους στην επιφάνεια του,
- Δρομέας με μαγνήτες στο εσωτερικό του,
- Δρομέας με μαγνήτες κάθετα τοποθετημένους στο εσωτερικό του.

Οι ηλεκτρικές μηχανές με μαγνήτες συγκολλημένους συμπεριφέρονται σαν σύγχρονες μηχανές με κυλινδρικούς δρομείς, όπου η δημιουργία ροπής επιτυγχάνεται αποκλειστικά από την αλληλεπίδραση της μαγνητικής ροής του δρομέα με τον στάτη. Οι άλλες δύο κατηγορίες, που περιλαμβάνουν τους μαγνήτες εσωτερικά του δρομέα, εμφανίζουν συμπεριφορά όμοια με αυτή των έκπτωτων πόλων. Επίσης ο δρομέας με μαγνήτες συγκολλημένους στην επιφάνειά του και ο δρομέας με μαγνήτες στο εσωτερικό του, εμφανίζουν υψηλότερη ηλεκτρομαγνητική ροπή καθώς και ηλεκτρομαγνητική δύναμη. Από την άλλη, οι μαγνήτες πρέπει να έχουν συγκεκριμένο σχήμα και μέγεθος το οποίο αυξάνει το κόστος και την καταστροφή των μαγνητών από την φυγόκεντρη δύναμη η οποία ασκείται [14], [15].

2.6.5 Επαγωγικοί κινητήρες

Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούν μια από τις πιο κοινές επιλογές στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, εξαιτίας του μικρού κόστους, της ελάχιστης συντήρησης, της αντοχής και των λειτουργικών χαρακτηριστικών που ταιριάζουν σε μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών φορτίου.

Ενώ ο στάτης ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ίδιος με ενός σύγχρονου, ο δρομέας εμφανίζει διαφορετική δομή. Οι τύποι των δρομέων που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δύο:

- Δρομέας Βραχυκυκλωμένου Κλωβού (squirrel-cage rotor)
- Δακτυλιοφόρος Δρομέας (wound rotor)

Οι διαφορές μεταξύ των δύο κατηγοριών βρίσκεται στον τρόπο εκκίνησης. Για παράδειγμα, στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα η εκκίνηση μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά μικρά ρεύματα εκκίνησης, ενώ στους κινητήρες με δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού το ρεύμα εκκίνησης παίρνει μεγάλο εύρος τιμών και εξαρτάται κυρίως από την ονομαστική ισχύ του κινητήρα και από την ενεργό αντίσταση του δρομέα στις συνθήκες εκκίνησης [10].

Ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα γίνεται μέσω της ρύθμιση της ηλεκτρικής συχνότητας. Δηλαδή μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα, που είναι η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα. Έτσι η ταχύτητα του άξονα παραμένει πάντα κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα (n_{sync}):

$$n_{sync} = \frac{120 f_e}{p} \quad (2.4)$$

όπου:

n_{sync} η σύγχρονη ταχύτητα,

f_e η συχνότητα της ηλεκτρικής μηχανής,

p ο αριθμός των πόλων.

2.7 Μετατροπείς ισχύος

Ηλεκτρονικά ισχύος είναι τα ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία διαχειρίζονται την ηλεκτρική ισχύ και μετατρέπουν την τάση, την ένταση και την κυματομορφή του ρεύματος κατά τρόπο, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί από τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την μεταφορά, την αποθήκευση και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Με την χρήση της κατάλληλης τοπολογίας δίνεται η δυνατότητα να αναπτυχθούν ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος, ώστε να γίνει:

- Μετατροπή του συνεχούς ρεύματος, διαφορετικής τάσης και έντασης (Μετατροπείς DC - DC),
- Μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (Μετατροπείς AC - DC),
- Μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε εναλλασσόμενο διαφορετικού πλάτους (Μετατροπείς AC - AC),
- Μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (Μετατροπείς DC - AC).

Η ανάπτυξη αυτού του κλάδου των ηλεκτρονικών ισχύος βοήθησε στην ακριβή αντιστοίχιση των δυνατοτήτων του συστήματος παραγωγής, στις απαιτήσεις της κατανάλωσης και

αποθήκευσης ισχύος, στοχεύοντας στην διαχείριση της ποσότητας και την αύξηση της ποιότητας κατά τον βέλτιστο τρόπο. Επίσης, αποτελούν σημαντικό και αναπόσπαστο κομμάτι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποτελούν το ενδιάμεσο κομμάτι, ανάμεσα στην παραγωγή και την κατανάλωση.

Στην παρακάτω ενότητα θα αναλυθούν μόνο οι μετατροπείς συνεχούς σε συνεχούς και μετατροπείς συνεχούς σε εναλλασσόμενου, προκειμένου να γίνει μια εισαγωγή στην χρήση αυτών από τα ηλεκτρικά οχήματα.

Δομικά στοιχεία μετατροπέων ισχύος

Η ευκολία ελέγχου και το μειωμένο κόστος των σύγχρονων ημιαγωγών ισχύος, τους έχουν καταστήσει οικονομικά εφικτούς για ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών και έχουν βοηθήσει στην ανάδειξη ενός μεγάλου πλήθους μετατροπέων. Ανάλογα με τον βαθμό ελεγχιμότητας τους, τους χωρίζουμε σε τρεις ομάδες, δίοδοι, thyristors και ελεγχόμενοι διακόπτες. Κάθε ομάδα έχει τον δικό της τρόπο ελέγχου έτσι ανάλογα με την λειτουργία της τοπολογίας, κατέχουν και συγκεκριμένη θέση στο κύκλωμα. Για παράδειγμα, οι δίοδοι έχουν καταστάσεις αγωγιμότητας (κλειστό, on) και αποκοπής (ανοικτό, off) ενώ ελέγχονται από το κύκλωμα ισχύος. Τα thyristors κλείνουν από ένα σήμα ελέγχου, αλλά πρέπει να ανοίξουν από το κύκλωμα ισχύος. Τέλος, οι ελεγχόμενοι διακόπτες κλείνουν και ανοίγουν από σήματα ελέγχου. Στους ελεγχόμενους διακόπτες ανήκουν τα BJT, τα MOSFET, τα GTO, τα MCT και τα IGBT (Πίνακας 2.4) [16].

Πίνακας 2.4. Σχετικές ιδιότητες ελεγχόμενων διακοπών.		
Ημιαγωγικό Στοιχείο	Δυνατότητα Ισχύος	Ταχύτητα Μετάβασης
BJT	Μέση	Μέση
MOSFET	Χαμηλή	Γρήγορη
GTO	Υψηλή	Αργή
IGBT	Μέση	Μέση
MCT	Μέση	Μέση

2.7.1 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC – DC)

Ένας μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (DC - DC), αποτελεί ένα κύκλωμα το οποίο μετασχηματίζει το συνεχές ρεύμα σε συνεχές διαφορετικού πλάτους. Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των ηλεκτρονικών στοιχείων του κυκλώματος μπορεί να επιτευχθεί και διαφορετική μεταβολή στην μετατροπή του συνεχούς ρεύματος. Οι πιο διαδεδομένες τοπολογίες 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 τις παραπάνω τοπολογίες, μόνο ο μετατροπέας ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης ανήκει στις βασικές τοπολογίες. Οι υπόλοιποι αποτελούν συνδυασμούς των παραπάνω και θα αναλυθούν στην συνέχεια [16].

Έλεγχος μετατροπέων

Κάθε τοπολογία κάνει χρήση ενός ή περισσότερων διακοπών προκειμένου να εξασφαλίσουν την επιθυμητή μετατροπή στην έξοδο του κυκλώματος. Για παράδειγμα σε ένα μετατροπέα τάσης, ο μέσος όρος της τάσης εξόδου ελέγχεται από τον χρόνο αγωγής (t_{on}) και μη αγωγής (t_{off}) του διακόπτη. Ένας τρόπος ελέγχου της μέσης τάσης εξόδου, είναι ο έλεγχος του διακόπτη με σταθερή συχνότητα μετάβασης (και συνεπώς σταθερή περίοδο μετάβασης $T_s = t_{on} + t_{off}$). Έπειτα, μεταβάλλοντας τον χρόνο αγωγής του διακόπτη, μπορούμε να φτάσουμε στην μέση επιθυμητή τάση εξόδου. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται Pulse – Width Modulation (PWM), όπου το duty cycle (D) είναι το πηλίκο ανάμεσα στη διάρκεια αγωγής του διακόπτη και την περίοδο (T_s) τροφοδότησης παλμών [16].

Η διαδικασία ελέγχου του μετατροπέα μπορεί να υλοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους οι οποίοι εξαρτώνται από τον σχεδιασμό του συστήματος. Οι πιο διαδεδομένοι είναι είτε μέσω συστημάτων αυτόματου ελέγχου (σύστημα ελέγχου ανοικτού ή κλειστού βρόχου) είτε μέσω αλγορίθμων, όπως MPPT Perturb & Observe ή MPPT Incremental Conductance κλπ. Οι διαφοροποιήσεις αυτών βρίσκονται στον τρόπο λειτουργίας και εξαγωγής του τελικού παλμού τροφοδότησης των διακοπών (duty cycle).

Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost Converter)

Κατά την λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, η τάση εισόδου μετασχηματίζεται σε τάση εξόδου με μεγαλύτερο πλάτος. Στο Σχήμα 2.10, παρουσιάζεται η τοπολογία αυτού του κυκλώματος. Όταν ο διακόπτης (Q2) είναι κλειστός η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και η πηγή τροφοδοτεί το πηνίο με ρεύμα. Με το άνοιγμα του διακόπτη, η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο, καθώς και η ενέργεια της πηγής τροφοδοτεί τον πυκνωτή και την έξοδο του μετατροπέα. Συνεπώς το πηνίο γίνεται πηγή τάσης ίδιας πολικότητας με την πηγή εισόδου, οπότε η συνολική τάση εξόδου προκύπτει μεγαλύτερη από αυτήν της πηγής. Η σχέση μεταξύ τάσεων εισόδου – εξόδου και duty cycle, δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad (2.5)$$

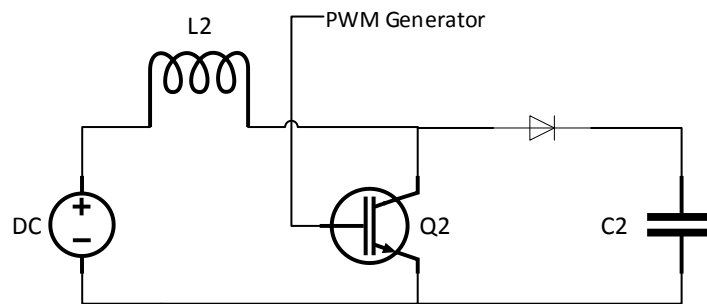
όπου:

V_o η τάση εξόδου του μετατροπέα,

V_d η τάση εισόδου του μετατροπέα,

D τιμή duty cycle.

Η χρήση αυτής της τοπολογίας επιλέγεται, για την ανύψωση τάσης εξόδου σε πηγές ενέργειας, όπως η τροφοδοσία ενός ηλεκτροκινητήρα 500 V, από μια μπαταρία 200 V ή κατά το regenerative braking μια μηχανής συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 2.10. Τοπολογία μετατροπέα ανύψωσης τάσης (Boost Converter).

Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck Converter)

Όπως δηλώνει και το όνομα του, ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης, μετασχηματίζει την τάση εξόδου σε τάση με μικρότερο πλάτος. Στο Σχήμα 2.11, παρουσιάζεται η σχεδίαση αυτού του απλού κυκλώματος. Όταν ο διακόπτης (Q1) είναι ανοικτός, η διόδος πολώνεται ανάστροφα και η πηγή τροφοδοτεί το φορτίο και το πηνίο. Κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου και τροφοδοτεί το φορτίο με την ενέργεια που είχε αποθηκευτεί. Η σχέση μεταξύ τάσεων εισόδου – εξόδου και duty cycle, δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{V_d}{V_o} = \frac{1}{D} \quad (2.6)$$

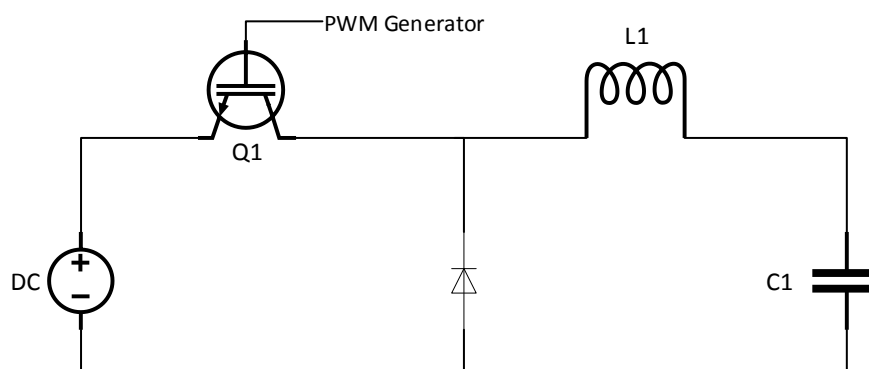
όπου:

V_o η τάση εξόδου του μετατροπέα,

V_d η τάση εισόδου του μετατροπέα,

D τιμή duty cycle.

Οι κύριες χρήσεις αφορούν μετασχηματισμούς τάσεων πηγών σε χαμηλότερες τιμές, όπως για παράδειγμα ο μετασχηματισμός τάσης μιας κυψέλης καυσίμου σε χαμηλότερη προκειμένου να φορτιστεί η μπαταρία. επίσης, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 2.11. Τοπολογία μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (Buck Converter).

Μετατροπέας υποβιβασμού - ανύψωσης τάσης (Buck – Boost Converter)

Η συγκεκριμένη τοπολογία προσφέρει την ανύψωση ή τον υποβιβασμό τάσης εξόδου ως προς την τάση εισόδου και επιπλέον την αντιστροφή της πολικότητας αν το απαιτεί η προδιαγραφή του συστήματος. Η σχεδίαση του κυκλώματος μπορεί να επιτευχθεί με επιμέρους σύνδεση των δύο βασικών μετατροπέων ισχύος: του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Η εξίσωση 2.7, δίνει την σχέση μεταξύ της τάσης εισόδου, τάσης εξόδου και την τιμή του duty cycle, που επιτρέπει είτε την ανύψωση τάσης είτε τον υποβιβασμό της ανάλογα με την τιμή του D:

$$\frac{V_o}{V_d} = D \frac{1}{1-D} \quad (2.7)$$

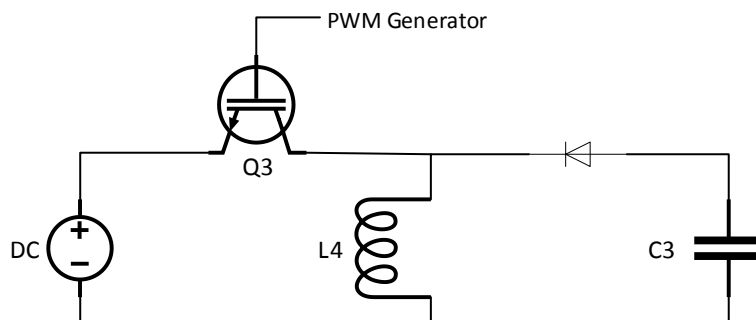
όπου:

V_o η τάση εξόδου του μετατροπέα,

V_d η τάση εισόδου του μετατροπέα,

D τιμή duty cycle.

Στο Σχήμα 2.12, παρουσιάζεται η σύνδεση των ηλεκτρονικών στοιχείων για την σχεδίαση αυτού του τύπου μετατροπέα τάσης. Για τιμές duty cycle $1 > D > 0.5$ μπορεί να επιτευχθεί ανύψωση τάσης, ενώ για τιμές duty cycle $D < 0.5$ υποβιβασμός τάσης. Όταν ο διακόπτης (Q3) είναι κλειστός, η πηγή τροφοδοτεί το πηνίο, ενώ η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη. Από την άλλη όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου μεταφέρεται στην έξοδο του μετατροπέα. Σε αυτό το διάστημα η πηγή αποκόπτεται από τη τροφοδοσία της εξόδου του μετατροπέα.



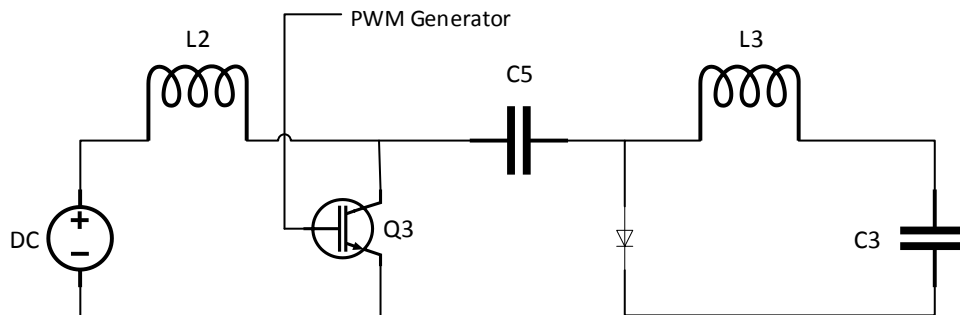
Σχήμα 2.12. Τοπολογία μετατροπέα υποβιβασμού - ανύψωσης τάσης (Buck - Boost Converter).

Μετατροπέας υποβιβασμού - ανύψωσης τάσης (Cuk Converter)

Μια διαφορετική τοπολογία μετατροπέα ισχύος, η οποία πήρε το όνομα της από τον εφευρέτη της, Cuk Slobodan. Εμφανίζει ίδια λειτουργία με τον Buck – Boost Converter, που αναφέρθηκε παραπάνω και παρέχει μια σταθεροποιημένη τάση εξόδου με αρνητική πολικότητα σε σχέση με το κοινό της τάσης εισόδου [16]. Επιπλέον, ο πυκνωτής C5 (Σχήμα 2.13) αποτελεί το μέσο αποθήκευσης και μεταφοράς ενέργειας από την είσοδο στην έξοδο του μετατροπέα.

Κατά το διάστημα που ο διακόπτης Q3 είναι μη αγωγίμος, ρεύμα από τα πηνία L2 και L3, ρέουν μέσω της διόδου. Ο πυκνωτής C5, φορτίζεται μέσω του πηνίου L2 και της πηγής. Η ένταση του ρεύματος στο πηνίο L2 μειώνεται διότι η τάση V_{C5} είναι μεγαλύτερη της τάσης εισόδου. Ενέργεια που ήταν αποθηκευμένη στο πηνίο L3 τροφοδοτεί την έξοδο του μετατροπέα, ενώ το ρεύμα του πηνίου L3 μειώνεται. Όταν ο διακόπτης είναι αγωγίμος, η τάση V_{C5} είναι ανάστροφα πολωμένη, και πολώνει ανάστροφα την διόδο. Ρεύμα από τα πηνία L2 και L3, ρέουν μέσω του διακόπτη. Επομένως, αφού $V_{C5} > V_o$, ο πυκνωτής C5, αποφορτίζεται μέσω του διακόπτη

τροφοδοτώντας με ενέργεια την έξοδο του μετατροπέα και το πηνίο L3. Άρα, προκύπτει αύξηση του ρεύματος στο πηνίο L3. Στο ίδιο διάστημα η πηγή τροφοδοτεί με ενέργεια το πηνίο L2, αυξάνοντας το ρεύμα του. Η εξίσωση 2.7, δίνει την σχέση μεταξύ της τάσης εισόδου, της τάσης εξόδου και της τιμής του duty cycle που επιτρέπει είτε την ανύψωση της τάσης είτε τον υποβιβασμό της ανάλογα με την τιμή του D.



Σχήμα 2.13. Τοπολογία μετατροπέα υποβιβασμού - ανύψωσης τάσης (Cuk Converter).

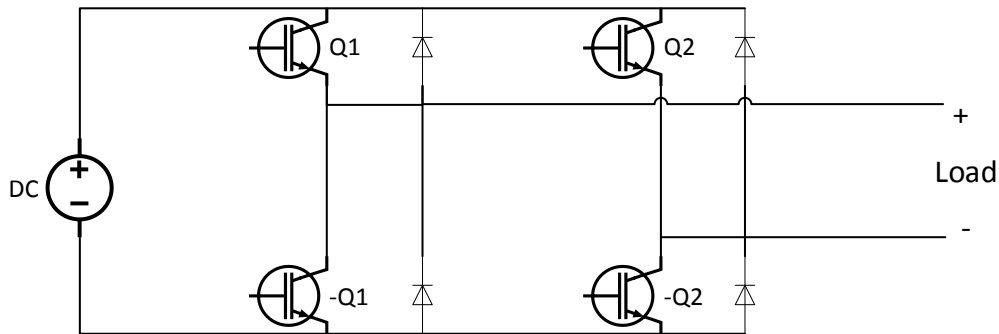
Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (Full – bridge Converter)

Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας χρησιμοποιείται κυρίως από μηχανές συνεχούς ρεύματος ή για την μετατροπή συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Παρ' όλο που η τοπολογία του μετατροπέα αυτού παραμένει ίδια και για τις δύο εφαρμογές, ο τρόπος ελέγχου των παλμών PWM διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14, η τοπολογία της πλήρους γέφυρας περιλαμβάνει τέσσερις διακόπτες (Q1, -Q1, Q2, -Q2) και τις αντιπαράλληλες διόδους τους. Οι δύο διακόπτες (Q1, -Q1) αλλάζουν κατάσταση κατά τέτοιον τρόπο ώστε, όταν ο ένας από αυτούς είναι ανοικτός, ο άλλος διακόπτης είναι κλειστός. Το ίδιο ισχύει και για τους (Q2, -Q2). Με αυτό τον τρόπο το ρεύμα εξόδου ρέει συνεχώς, ελέγχοντας έτσι την τάση εξόδου από την κατάσταση των διακοπών. Ο έλεγχος των διακοπών γίνεται με δύο τρόπους, ενώ γίνεται χρήση τριγωνικής κυματομορφής, για την διαμόρφωση PWM. Οι στρατηγικές μετάβασης είναι:

- Διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου,
- Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου.

Στην πρώτη περίπτωση οι διακόπτες (Q1, -Q2) και (-Q1, Q2) αντιμετωπίζονται σαν ζευγάρια που κλείνουν και ανοίγουν ταυτόχρονα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση οι διακόπτες σε κάθε σκέλος ελέγχονται ανεξάρτητα από το άλλο σκέλος [(Q1, -Q1) και (Q2, -Q2)].



Σχήμα 2.14. Τοπολογία μετατροπέα πλήρους γέφυρας (Full Bridge Converter).

Οι παραπάνω μετατροπείς ισχύος που αναφέρθηκαν έχουν την δυνατότητα της μη αμφίδρομης μετατροπής του πλάτους της τάσεως και του ρεύματος. Μόνο ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας, δίνει αυτή την δυνατότητα, ανάλογα με τον τρόπο ελέγχου των διακοπών του [16].

2.7.2 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (Μετατροπείς DC - AC)

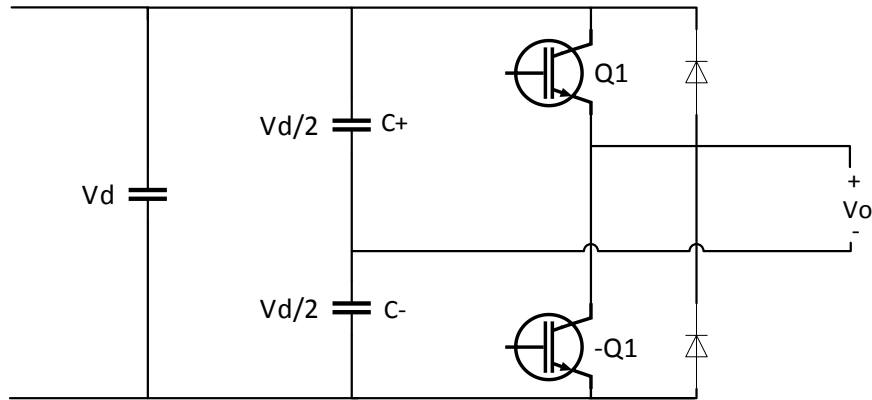
Οι μετατροπείς συνεχούς σε εναλλασσόμενο ή αλλιώς και αντιστροφείς, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μιας ημιτονοειδούς εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, με ελεγχόμενα τόσο το πλάτος της όσο και τη συχνότητά της. Μπορεί να μετασχηματίζει το συνεχές σε εναλλασσόμενο μονής φάσης ή και σε τριφασικό εναλλασσόμενο, ανάλογα με την τοπολογία την οποία επιλέγεται. Επομένως χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μονοφασικοί Αντιστροφείς,
- Τριφασικοί Αντιστροφείς.

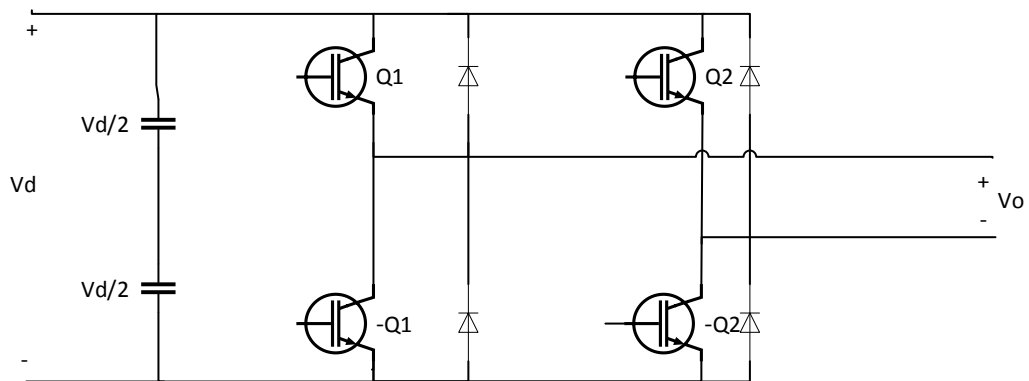
Στα ηλεκτρικά οχήματα γίνεται ευρεία χρήση των μετατροπέων συνεχούς ρεύματος σε τριφασικό εναλλασσόμενο, καθώς γίνεται χρήση τριφασικών ηλεκτροκινητήρων αφού παράγουν μεγαλύτερη ισχύ.

Μονοφασικοί αντιστροφείς

Όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.15 και 2.16, υπάρχουν δύο διαφορετικές τοπολογίες για τους μονοφασικούς αντιστροφείς. Στον μονοφασικό αντιστροφέα χρησιμοποιούνται δύο πυκνωτές ώστε να επιτευχθεί ισομοιρασμός της τάσης εισόδου. Συνεπώς η τάση εξόδου μπορεί να είναι ίση με το μισό της τάσης εισόδου, με την πολικότητα να αλλάζει ανάλογα με το ποιος διακόπτης άγει. Οι αντιστροφείς με πλήρη γέφυρα, προτιμούνται σε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος, αφού με την ίδια τάση εισόδου συνεχούς ρεύματος η μέγιστη τάση εξόδου είναι διπλάσια. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα των διακοπών είναι το μισό εκείνων του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Σε υψηλά επίπεδα ισχύος, αυτό είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα, εφόσον απαιτεί λιγότερους παραλληλισμούς ημιαγωγικών στοιχείων.



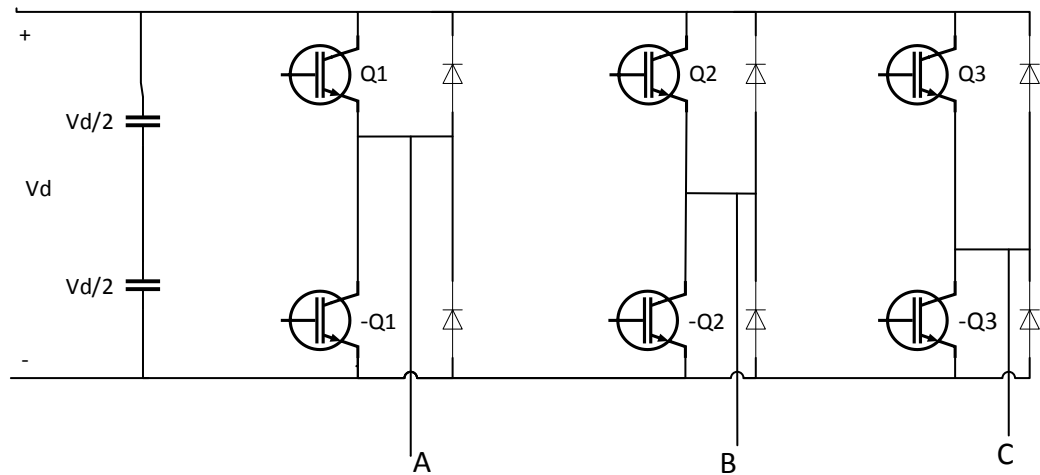
Σχήμα 2.15. Μονοφασικός αντιστροφέας μισής γέφυρας.



Σχήμα 2.16. Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας.

Τριφασικοί αντιστροφέες

Οι τριφασικοί αντιστροφέες είναι αρκετά διαδεδομένοι σε εφαρμογές όπως τα συστήματα αδιάλειπτης λειτουργίας εναλλασσόμενου, τροφοδοσία τριφασικών ηλεκτροκινητήρων κα. Στο Σχήμα 2.17, παρουσιάζεται η τοπολογία ενός τριφασικού αντιστροφέα, όπου κάθε ζεύγος διακοπών αποτελεί και μια φάση. Επομένως η έξοδος του κάθε ζεύγους εξαρτάται από την κατάσταση των διακοπών και την τάση εισόδου (V_d). Η τάση εξόδου είναι ανεξάρτητη του ρεύματος εξόδου, εφόσον σε κάθε χρονική στιγμή ένας από τους δύο διακόπτες σε κάθε ζεύγος είναι πάντα κλειστός. Έτσι η τάση εξόδου του αντιστροφέα είναι ανεξάρτητη της φοράς του ρεύματος φορτίου.



Σχήμα 2.17. Τριφασικός αντιστροφέας.

Οι παραπάνω μετατροπείς ισχύος συνεχούς σε εναλλασσόμενου, υποστηρίζουν αμφίδρομη μετατροπή ισχύος, αποτελώντας ιδανικές επιλογές για τα ηλεκτρικά οχήματα. Έτσι δίνεται η δυνατότητα υλοποίησης λειτουργιών όπως το regenerative braking χωρίς την χρήση επιπλέον κυκλωμάτων. Η ικανότητα αυτή βοηθά αρκετά στην απλούστερη σχεδίαση των κυκλωμάτων επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών εξοικονόμησης της ενέργειας απωλειών.

3.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3. Εισαγωγή

Ο εκσυγχρονισμός των αυτοκινήτων απαιτεί την δημιουργία ευφών συστημάτων για τον έλεγχο της λειτουργίας τους. Τα σημερινά ηλεκτρονικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό των οχημάτων, επιβλέπουν ένα πολύ μεγάλο μέρος του αυτοκινήτου και των εξαρτημάτων του. Τέτοια συστήματα είναι, το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος τροχών, το σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου ευστάθειας, το σύστημα αποφυγής πρόσκρουσης και ανίχνευσης πεζών και δίκυκλων, τα οποία έχουν συμβάλει αρκετά στην μείωση των ατυχημάτων.

Επίσης, η ηλεκτρονική διαχείριση των οχημάτων έχει επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοση των ΜΕΚ, αφού μέσω αυτής επιτρέπεται η βελτιστοποίηση της διαδικασίας καύσης. Επιπλέον προσφέρουν την καινοτομία για την χρήση υβριδικών οχημάτων για την μείωση των ρύπων και την αύξηση της αυτονομίας.

Στα ηλεκτρικά ή υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα είναι αρκετά σημαντικό το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System - EMS) και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της αρχιτεκτονικής του οχήματος. Η εύρυθμη λειτουργία των μπαταριών, των κυψελών καυσίμου, των ηλεκτρονικών ισχύος και των ηλεκτρικών μηχανών απαιτούν την ύπαρξη ενός τέτοιου έξυπνου συστήματος. Με τον τρόπο αυτόν βελτιώνεται αρκετά η απόδοση των συστημάτων του οχήματος και εξασφαλίζεται η μακροβιότητα και λειτουργικότητά τους.

Η στρατηγική ελέγχου των EMS είναι η διαδικασία συλλογής πληροφοριών και εντολών από την θέση του οδηγού (πετάλι επιτάχυνσης και φρένου) και στην συνέχεια η λήψη απόφασης για την σωστή κατανομή της ισχύος και της ροπής στον κινητήρα. Άρα ο κύριος ρόλος της στρατηγικής είναι η ικανοποίηση των απαιτήσεων του οδηγού και ο δευτερεύων η βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης των συστημάτων ισχύος.

Σε ένα BEV η στρατηγική ελέγχου είναι πολύ απλή διότι η υπάρχει μια μονάδα ισχύος για την τροφοδότηση του κινητήρα. Αντιθέτως, σε ένα υβριδικό όχημα η στρατηγική ελέγχου γίνεται πιο περίπλοκη καθώς υπάρχουν παραπάνω από μία μονάδες ισχύος όπως επίσης υπάρχουν και παραπάνω από μια αρχιτεκτονικές σχεδίασης (παράλληλη σχεδίαση, σχεδίαση σε σειρά, συνδυασμός παράλληλης και σχεδίασης σε σειρά). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα της διαίρεση της στρατηγικής ελέγχου σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά την επιλογή του τρόπου λειτουργίας, ώστε να ταιριάζει απόλυτα με την αρχιτεκτονική σχεδίασης και το δεύτερο αφορά την επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής ελέγχου ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του οδηγού ενώ παράλληλα θα εξασφαλίζει την μείωση ρύπων.

Ουσιαστικά, η στρατηγική ελέγχου είναι μια συστάδα διαφορετικών αλγορίθμων, βασισμένων στις χαρακτηριστικές (σταθερής λειτουργίας) του κάθε συστήματος, όπως η χαρακτηριστική ισχύος – ροπής ή ταχύτητας του κινητήρα και η χαρακτηριστική φόρτισης – αποφόρτισης της μπαταρίας. Περιλαμβάνει επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ή ακόμη και τις συντεταγμένες τοποθεσίας του οχήματος αν χρησιμοποιούνται πιο προηγμένες μορφές στρατηγικών ελέγχου. Τα σήματα εισόδου ενός τέτοιου συστήματος είναι οι εντολές του οδηγού (πετάλι επιτάχυνσης και φρένου), ενώ τα σήματα εξόδου είναι μια σειρά εντολών για το κάθε υποσύστημα που συνεισφέρει στην κίνηση του οχήματος προκειμένου να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα βαθμού απόδοσης. Τέτοια σήματα είναι, η ροπή και ισχύς λειτουργίας μιας ΜΕΚ και ενός ηλεκτροκινητήρα, η λειτουργία ή όχι της κυψέλης καυσίμου ή της ΜΕΚ κλπ.

Επιπλέον η στρατηγική ελέγχου μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικά επίπεδα. Το πρώτο σε ιεραρχία επίπεδο είναι ο οδηγός, ο οποίος δίνει τις εντολές επιτάχυνσης ή φρεναρίσματος ανάλογα με συνθήκες οδήγησης. Το τελευταίο επίπεδο είναι τα συστήματα του οχήματος, τα

οποία διαθέτουν επιπρόσθετα συστήματα λειτουργίας για τον συντονισμό των λειτουργιών τους. Το ενδιαμέσο επίπεδο αποτελεί έναν τρόπο σύνδεσης μεταξύ των δύο προηγούμενων επιπέδων. Δηλαδή, δέχεται εντολές από τον οδηγό όπως το πάτημα του πεταλιού επιτάχυνσης ή του φρένου, αν το κλειδί βρίσκεται στην μίζα ή την σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων στην οποία βρίσκεται ο οδηγός. Με την σειρά του, το ενδιαμέσο επίπεδο, μέσω του controller area network (CAN), που αποτελεί το δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ του EMS και των συστημάτων του οχήματος, «επικοινωνεί» με της μονάδες λειτουργίας.

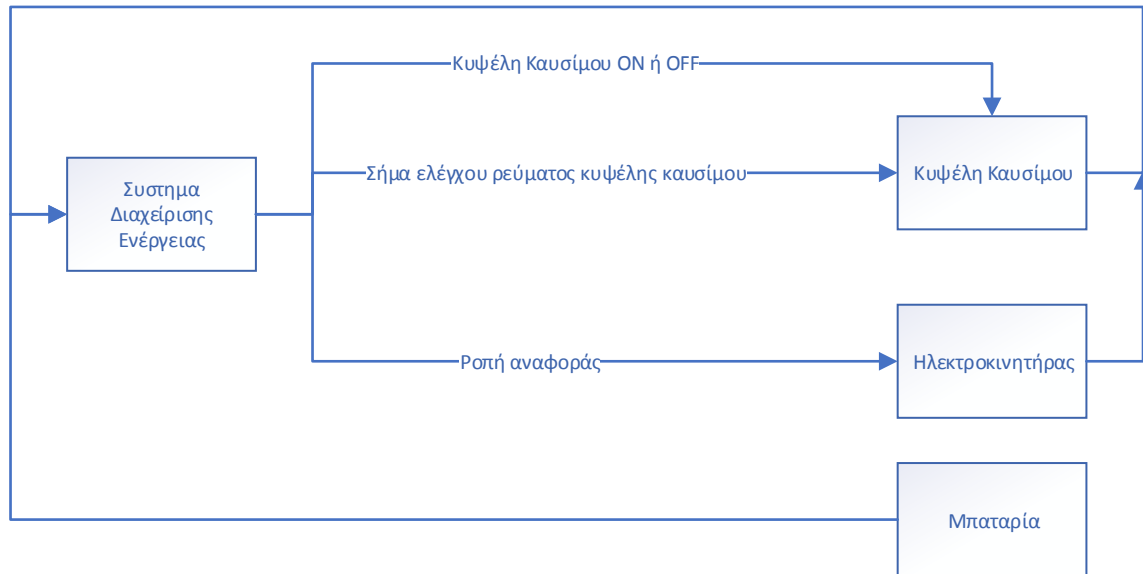
3.1 Υλοποίηση συστήματος διαχείρισης ενέργειας

Δεδομένου ότι το κίνητρο αυτής της εργασίας είναι να σχεδιαστεί ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας για την μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης κυψελών καυσίμου και την επίτευξη εύλογου εύρους αυτονομίας, μια καινοτόμος στρατηγική ελέγχου πρέπει να αναπτυχθεί προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος. Οι μέθοδοι στρατηγικών ελέγχου ποικίλουν ανά την εφαρμογή και εμφανίζουν πολλές παραλλαγές ανάλογα με το είδος και τις απαιτήσεις του οχήματος.

Η κεντρική φιλοσοφία των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας που υλοποιήθηκαν παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας έχει τον συνεχή έλεγχο της κυψέλης καυσίμου, ενώ ταυτόχρονα γίνεται συνεχής καταγραφή τάσης και του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας. Επιπλέον μέσω της συνεχούς παρακολούθησης των εντολών του οδηγού καθώς και των απαιτήσεων του συστήματος (ηλεκτροκινητήρας), το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποφασίζει την αποκλειστική χρήση της μπαταρίας ή την ενεργοποίηση της κυψέλης καυσίμου. Ο τρόπος λειτουργίας του κάθε συστήματος διαχείρισης ενέργειας διαφέρει στο τρόπο κατανομής της ισχύος μεταξύ των υποσυστημάτων του οχήματος. Οι δύο στρατηγικές ελέγχου που υλοποιήθηκαν παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω.

Και οι δύο εκδόσεις του EMS εμφανίζουν κάποια όμοια χαρακτηριστικά. Έχουν σαν κύρια μονάδα ισχύος για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα, την μπαταρία ιόντων λιθίου ενώ η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την φόρτισή της και την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα σε υψηλές τιμές ισχύος. Η περίοδος λειτουργίας της κυψέλης καθορίζεται από την τιμή κατωφλίου του SoC της μπαταρίας. Για παράδειγμα όταν η τιμή του SoC, είναι μικρότερη από την τιμή κατωφλίου η κυψέλη καυσίμου ξεκινά την λειτουργία της προκειμένου να φορτίσει την μπαταρία και να τροφοδοτήσει με ισχύ τον ηλεκτροκινητήρα. Αντιθέτως, αν κατά την διάρκεια της φόρτισης η τιμή του SoC, ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου που έχει οριστεί, τότε η κυψέλη καυσίμου σταματά την λειτουργία της και αναλαμβάνει η μπαταρία την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου. Κάθε φορά που η κυψέλη βρίσκεται εκτός λειτουργίας, η μπαταρία είναι η κύρια μονάδα τροφοδοσίας ισχύος του οχήματος.

Ένα ακόμη κοινό υποσύστημα στα δύο EMS που υλοποιήθηκαν είναι η μετατροπή των εντολών του οδηγού σε απαιτούμενη ροπή οχήματος, μιας και ο κύριος στόχος είναι η ικανοποίηση των απαιτήσεών του. Πιο συγκεκριμένα, διαβάζεται από το οδηγό η τιμή του πεταλιού επιτάχυνσης και του φρένου και μετατρέπεται σε τιμή ροπής αναφοράς για τον ηλεκτροκινητήρα.



Σχήμα 3.1. Κεντρική στρατηγική συστημάτων διαχείρισης ενέργειας που υλοποιήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

3.1.1 Πρώτη έκδοση συστήματος διαχείρισης ενέργειας – EMS_1

Κύριος στόχος της πρώτης έκδοσης του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, είναι η μεγαλύτερη χρήση της μπαταρίας σαν κύρια μονάδα ισχύος ώστε να εξοικονομηθεί περισσότερο καύσιμο και να επιτευχθούν μεγαλύτερες τιμές αυτονομίας. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2, το EMS_1 αποτελείται από δύο διαφορετικές μονάδες, την μονάδα διαχείρισης ενέργειας της μπαταρίας (Battery Management System - BMS) και την μονάδα διαχείρισης ενέργειας της ισχύος (Power Management System - PMS).

Η λειτουργία του BMS, βασίζεται στον διαρκή έλεγχο της τιμής του SoC, ώστε να μην ξεπερνά την τιμή κατωφλίου φόρτισης και αποφόρτισης. Επομένως, ανάλογα με την τιμή την οποία ορίστηκε, το BMS θα στείλει το κατάλληλο σήμα για την φόρτιση ή όχι της μπαταρίας στο PMS. Ακόμα μια λειτουργία του BMS, είναι μέτρηση της ισχύος που παράγει η μπαταρία την δεδομένη στιγμή, η οποία αποστέλλεται και αυτή στο PMS για την επιλογή του σωστού τρόπου κατανομής της ισχύος.

Με την σειρά του, το PMS δέχεται την απαιτούμενη ροπή και ισχύ που πρέπει να φτάσει ο ηλεκτροκινητήρας σύμφωνα με τις εντολές του οδηγού. Στην συνέχεια, ενεργοποιεί ή όχι τη κυψέλη καυσίμου και υπολογίζει την απαιτούμενη ισχύ που πρέπει να παράγει. Η ενεργοποίηση ή απενεργοποίησή της εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

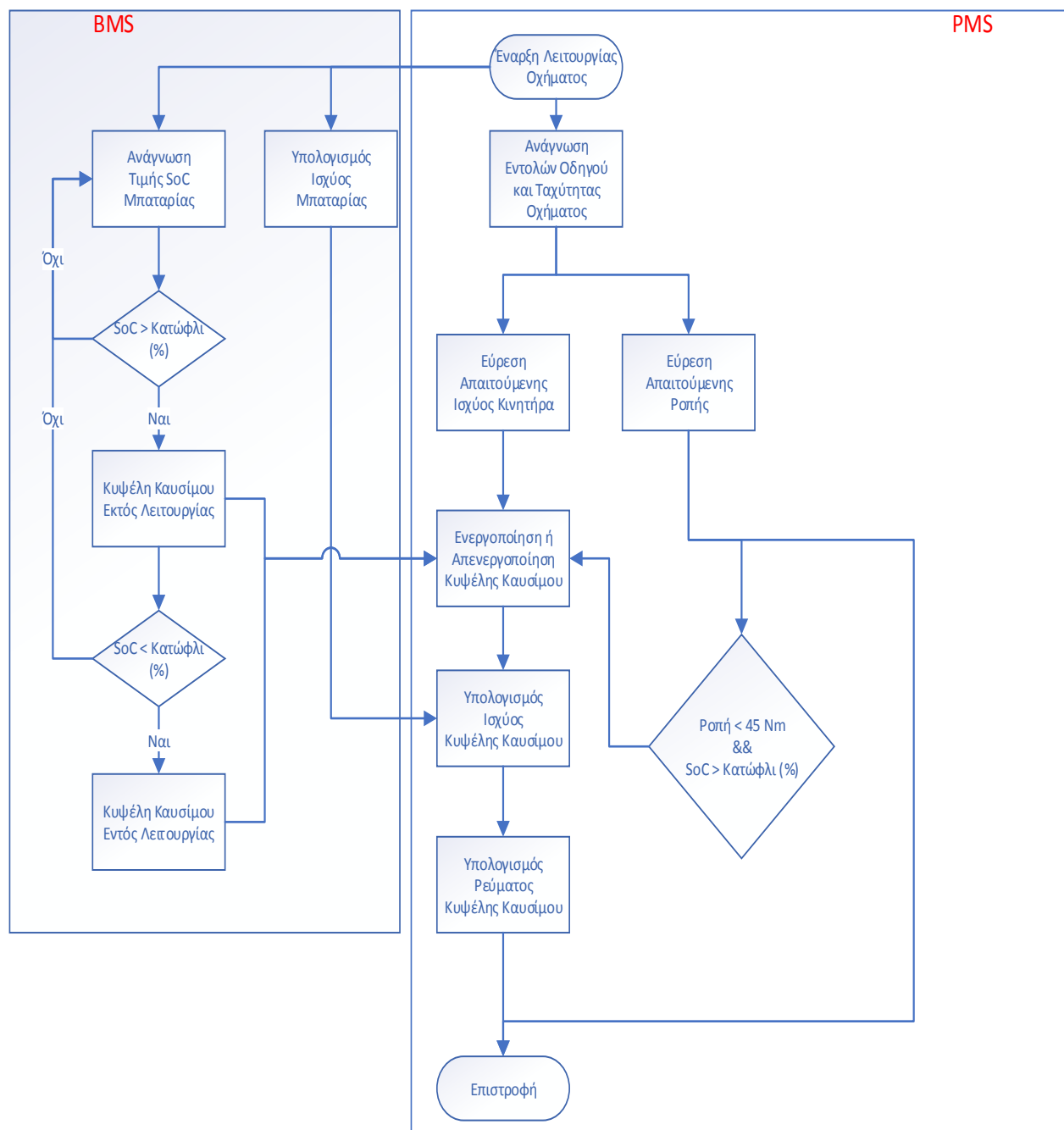
- Την τιμή SoC της μπαταρίας,
- Την απαιτούμενη ισχύ του ηλεκτροκινητήρα σε σύγκριση με την ισχύ της μπαταρίας,
- Την ροπή αναφοράς όταν για τιμή του SoC, η μπαταρία δεν χρήζει φόρτισης.

Αναλυτικότερα, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του οχήματος ελέγχεται η τιμή SoC της μπαταρίας, ώστε να βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα, ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας την κυψέλη καυσίμου. Επειδή όμως η μπαταρία δεν μπορεί να αναλάβει την κάλυψη φορτίου του ηλεκτροκινητήρα σε όλες τις περιπτώσεις, παράλληλα συγκρίνεται η παραγόμενη ισχύς της μπαταρίας με την ισχύ του ηλεκτροκινητήρα. Έτσι σε μεγάλες τιμές ισχύος, η κυψέλη καυσίμου ενεργοποιείται. Το ίδιο συμβαίνει και σε μεγάλες τιμές ροπής αναφοράς. Μεγάλη τιμή ροπής

αναφοράς σημαίνει και υψηλή ισχύ λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα. Δηλαδή η ισχύς της μπαταρίας δεν αρκεί για την κίνηση του οχήματος, με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου.

Τέλος, τρία σήματα εξόδου αποστέλλονται στις μονάδες λειτουργίας. Το ένα αφορά την ροπή αναφοράς του ηλεκτροκινητήρα, η οποία υπολογίστηκε από τις εντολές του οδηγού και τα άλλα δύο σήματα αφορούν την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της κυψέλης καυσίμου και το ρεύμα εξόδου της. Το ρεύμα εξόδου της κυψέλης υπολογίζεται ως εξής:

- Υπολογίζεται η τιμή ισχύος που πρέπει να έχει η κυψέλη καυσίμου. Αν είναι απενεργοποιημένη η τιμή ισχύος είναι μηδέν.
- Έπειτα αντιστοιχίζεται η τιμή ισχύος με αυτή του ρεύματος.
- Η τιμή του ρεύματος, μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται στην παράγραφο 4.1.1, μετατρέπεται σε ροή καυσίμου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή ισχύος.



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα ροής EMS_1.

3.1.2 Δεύτερη έκδοση συστήματος διαχείρισης ενέργειας – EMS_2

Η δεύτερη έκδοση βασίστηκε στον τρόπο ελέγχου του οχήματος μέσα από 6 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας [17]. Για την υλοποίηση αυτή δημιουργήθηκε μια μονάδα ελέγχου Power Management System - PMS, όπου όλα τα σήματα επεξεργάζονται για την σωστή και αποδοτική κατανομή ισχύος. Κύριος σκοπός της συγκεκριμένης έκδοσης συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι η αποδοτικότερη κατανομή ισχύος και η ταχύτερη απόκριση του

συστήματος σε περιπτώσεις κίνησης του οχήματος σε υψηλές ταχύτητες και μεγάλες επιταχύνσεις.

Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής ΕΜΣ_2 (Σχήμα 3.3) ο τρόπος μέτρησης του SoC, της ισχύος της μπαταρίας και της ισχύος της κυψέλης δεν αλλάζουν. Οι διαφορές βρίσκονται στους έξι τρόπους λειτουργίας οι οποίοι προτείνονται στην εργασία [17]. Οι έξι τρόποι λειτουργίας είναι οι εξής:

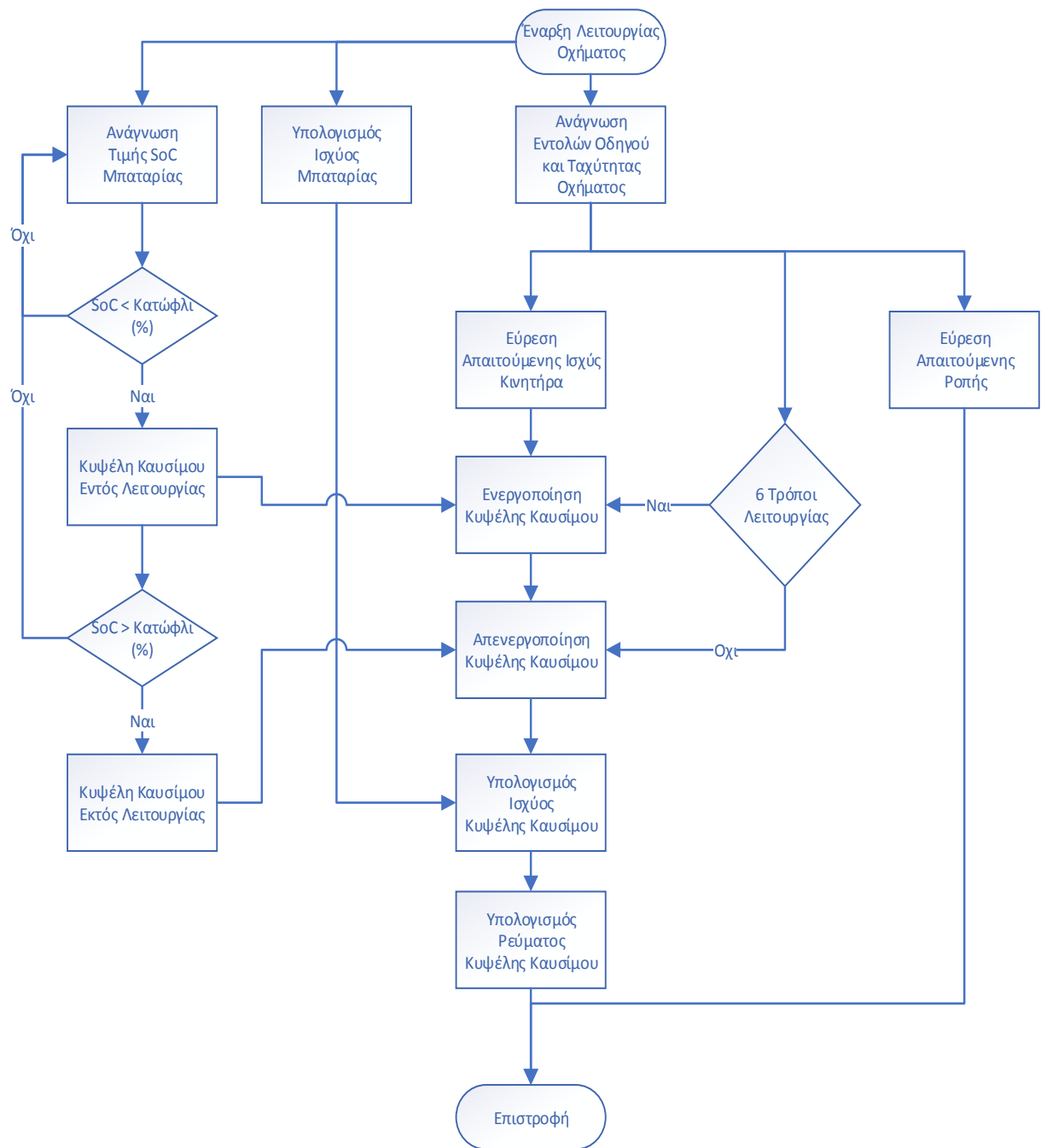
- Εκκίνηση Οχήματος (Start),
- Επιτάχυνση Οχήματος (Accelerate),
- Διάνυση Μεγάλων Αποστάσεων (Cruise),
- Επιβράδυνση Οχήματος (Brake),
- Μέγιστη Ισχύς (Power FC),
- Παύση Κίνησης Οχήματος (Pause).

Κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες, στις οποίες χωρίζεται η κίνηση του οχήματος, επιλέγει την ενεργοποίηση ή όχι της κυψέλης καυσίμου. Η κάθε κατηγορία έχει σαν μέτρο σύγκρισης διαφορετικές παραμέτρους που επηρεάζουν την κατανομή ισχύος του οχήματος.

Στον Πίνακα 3.1 παρατηρείται ότι, κατά την εκκίνηση του οχήματος, για χαμηλές τιμές ισχύος λειτουργεί αποκλειστικά η μπαταρία, δεδομένου ότι η τιμή του SoC είναι μεγαλύτερη της τιμής κατωφλίου που έχει καθοριστεί. Όταν το όχημα καλείται να επιταχύνει αρκετά γρήγορα, επιλέγεται η λειτουργία επιτάχυνση του οχήματος, όπου μπαταρία και κυψέλη λειτουργούν παράλληλα. Αυτό συμβαίνει διότι, για τιμές μεγαλύτερες του 0.2 του πεταλιού επιτάχυνσης, η απαιτούμενη ισχύς αυξάνεται σημαντικά και η ενεργοποίηση της κυψέλης γίνεται αναγκαία. Για ταχύτητες μεγαλύτερες των 80 km/h, λειτουργεί αποκλειστικά η κυψέλη καυσίμου ώστε να έχουμε ομαλότερη απόκριση του συστήματος. Κατά την επιβράδυνση και παύσης λειτουργίας του οχήματος απενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου, ώστε να εξοικονομήσουμε καύσιμο. Τέλος, σε υψηλές τιμές ισχύος η τροφοδοσία του κινητήρα γίνεται αποκλειστικά από την κυψέλη καυσίμου, ώστε να εξασφαλίσουμε την άμεση απόκριση του ηλεκτροκινητήρα.

Πίνακας 3.1. Έξι τρόποι λειτουργίας του οχήματος.

Τρόπος Λειτουργίας	Απαιτούμενη Ισχύς	Πετάλι Επιτάχυνσης (μέγιστη τιμή 1 και ελάχιστη τιμή -1)	Ταχύτητα Οχήματος	SoC	Μονάδα Ισχύος σε Λειτουργία
Εκκίνηση Οχήματος	< Μετρούμενη Ισχύς Μπαταρίας	> 0	< 80 km/h	> Κατώφλι Αποφόρτισης (%)	Μπαταρία
Επιτάχυνση οχήματος	> Μετρούμενη Ισχύς Μπαταρίας	> 0.2	-	> Κατώφλι Αποφόρτισης (%)	Κυψέλη Καυσίμου + Μπαταρία
Διάνυση Αποστάσεων	-	-	> 80 km/h	-	Κυψέλη Καυσίμου
Επιβράδυνση Οχήματος	-	< 0	-	-	Μπαταρία
Μέγιστη Ισχύς	>> Μετρούμενη Ισχύς Μπαταρίας	-	-	-	Κυψέλη Καυσίμου
Παύση Κίνησης Οχήματος	-	= 0	0	-	Καμία



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής EMS_2.

4.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

4. Εισαγωγή

4.1 Μοντελοποίηση οχήματος

Ο πρωταρχικός σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μοντελοποίηση ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος με χρήση κυψελών καυσίμου [18] και η προσομοίωση της κατανάλωσης καυσίμου και της συμπεριφοράς του οχήματος με διάφορους κύκλους οδήγησης και διαφορετικά EMS. Το περιβάλλον της MATLAB/Simulink, χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση και προσομοίωση του οχήματος.

Δομικά μέρη οχήματος

Η επιλογή των χαρακτηριστικών του οχήματος βασίστηκε στο μοντέλο Honda FCX Clarity, που αποτελεί από τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου. Η παραγωγή του ξεκίνησε το Ιούνιο του 2008 και συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Η πρώτη καινοτομία της Honda έγινε το 1999 [18], όπου και παρουσίασε το πρώτο ηλεκτρικό όχημα με κυψέλες υδρογόνου, ενώ την χρονιά του 2000, σε συνεργασία με την CaFCP (California Fuel Cell Partnership), ανέπτυξε της πρώτες κυψέλες υδρογόνου για ηλεκτρικά οχήματα. Με την πάροδο ακόμη δύο χρόνων και την συνεχή εξέλιξη μέσω των δοκιμών, η Honda έφτασε στην δημιουργία ενός πρωτοποριακού ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο εμφάνιζε υψηλές επιδόσεις και μπορούσε να συγκριθεί με αρκετά οχήματα της κατηγορίας του. Παρ' όλα αυτά υπήρχαν αρκετά προβλήματα τα οποία έπρεπε να βελτιωθούν πριν ξεκινήσει η μαζική παραγωγή.

Το 2004 [19], κατάφερε να δημιουργήσει ένα όχημα με κυψέλη υδρογόνου, ικανό να λειτουργεί στους -20°C , χρήζοντας το ιδανικό για ψυχρά κλίματα, όμως χρειαζόταν ένα όχημα το οποίο θα ήταν διαθέσιμο σε μεγαλύτερο εύρος καταναλωτών. Έτσι το 2008, παρουσιάστηκε το FCX Clarity, ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα με κυψέλες υδρογόνου. Τα κύρια χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Κύρια χαρακτηριστικά του οχήματος Honda FCX Clarity.	
Length/Width/Height	4845 x 1845 x 1470 mm
Wheel Base	2800 mm
Vehicle Weight	1625 kg
Number Of Passengers	4
Maximum Speed	160 km/h
Range (EPA combined label)	450 km (280 mile)
Maximum Motor Power	100 kW [136 PS]
Maximum Motor Torque	256 Nm [26.1 kgm]
Fuel Cell Stack	PEMFC
Power Assist	Li-ion Battery
Hydrogen Supply System	High-Pressure Hydrogen Tank
Hydrogen Pressure	35 MPa
Hydrogen Storage Volume	171 L

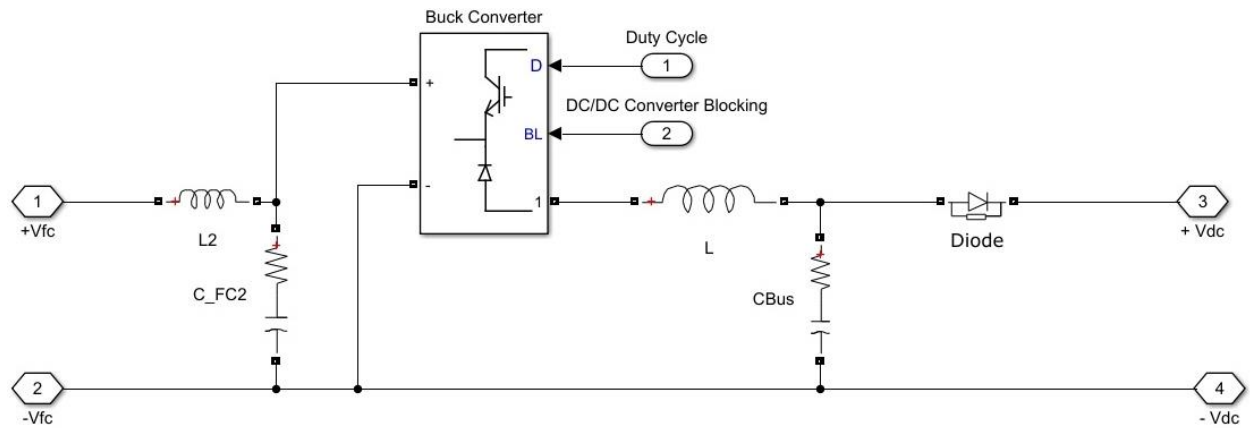
Παρακάτω παρουσιάζονται λεπτομερώς όλα τα μέρη του οχήματος τα οποία μοντελοποιήθηκαν.

4.1.1 Κυψέλη υδρογόνου και DC-DC Converter

Εφόσον η εργασία βασίστηκε στο μοντέλο της Honda, η κυψέλη υδρογόνου δεν θα μπορούσε να είναι άλλη από αυτήν που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Μέσω του περιβάλλοντος της MATLAB/Simulink, επιλέχθηκε ένα έτοιμο μπλοκ κυψέλης καυσίμου, και μοντελοποιήθηκε [20] με βάση την κυψέλη υδρογόνου του οχήματος FCX Clarity (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2. Χαρακτηριστικά κυψέλης υδρογόνου.	
Number of Cells	400
Nominal Stack Efficiency	57 %
Nominal Operating Point [I(A), V(V)]	[285 A, 300 V]
Operating Temperature (°C)	95
Nominal Air Flow Rate (lpm)	1698
Maximum Power	100 kW
Maximum Operating Point [I(A), V(V)]	[347.3 A, 288 V]

Προκειμένου η κυψέλη υδρογόνου να τροφοδοτεί με σταθερή τάση τον ηλεκτροκινητήρα και την μπαταρία (DC Bus), προστέθηκε μεταξύ τους ένας μετατροπέας ισχύος υποβιβασμού τάσης (Buck DC/DC Converter), όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 (Σχήμα 2.11). Στο Σχήμα 4.1, παρουσιάζεται η υλοποίηση του converter σε περιβάλλον Simulink. Πρέπει να αναφερθεί πως για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ταχύτητα προσομοίωσης, επιλέχθηκε ένα έτοιμο block buck converter από την βιβλιοθήκης Simscape του Simulink, διότι δίνεται η δυνατότητα να παραλειφθεί το κομμάτι της PWM Generator η οποία λόγω της μεγάλης συχνότητας, περίπου 20 kHz – 35 kHz, δημιουργούσε προβλήματα στην ταχύτητα εκτέλεσης της προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον στο τμήμα μεταξύ του μετατροπέα και της κυψέλης τοποθετήθηκε ένα φίλτρο LC (L2, C_FC2), ώστε να μειωθεί η κυμάτωση του ρεύματος εξόδου της κυψέλης. Η διόδος με την σειρά της δεν επιτρέπει την ροή ρεύματος από το DC Bus προς την κυψέλη.



Σχήμα 4.1. Μετατροπέας υποβιβασμού σε περιβάλλον Simulink.

Επιπλέον, ο παραπάνω μετατροπέας εμφανίζει δύο σήματα ελέγχου. Το πρώτο αφορά την διακοπτική λειτουργία (switching frequency) του τρανζίστορ (duty cycle - D), ενώ το δεύτερο σήμα ελέγχου σταματά την λειτουργία του μετατροπέα όταν η κυψέλη υδρογόνου είναι απενεργοποιημένη (BL).

Προκειμένου να εκμεταλλευτεί στο έπακρο την παραγόμενη ισχύ της, η κυψέλη υδρογόνου, απαιτείται η σωστή επιλογή του ελεγκτή του μετατροπέα ισχύος. Η πρόκληση είναι ότι το σημείο μέγιστης ισχύος και απόδοσης μεταβάλλεται όταν οι συνθήκες της κυψέλης υδρογόνου ποικίλουν. Επομένως, υπάρχουν αρκετοί τρόποι ελέγχου που στοχεύουν στη μεγιστοποίηση διαφορετικού σημείου λειτουργίας. Δηλαδή, η μέθοδος ελέγχου θα μπορούσε να είναι είτε ένας αλγόριθμος για την μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης, είτε ένα σύστημα κλειστού βρόχου (PI controller) ρύθμισης του ρεύματος ή της τάσεως εξόδου της κυψέλης στην επιθυμητή τιμή λειτουργίας [21].

Για τον έλεγχο του converter, χρησιμοποιήθηκε controller τύπου Maximum Power Point Tracking - Perturb & Observe (MPPT – P&O), του οποίου το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Η λειτουργία του αλγορίθμου, είναι πολύ απλή και βασίζεται διαδικασία perturb and observe. Ουσιαστικά μετράται η τιμή τάσης και ρεύματος εξόδου της κυψέλης υδρογόνου και υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς:

$$P = V * I \quad (4.1)$$

Έπειτα, συγκρίνεται με την προηγούμενη τιμή ισχύος και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για την τάση εξόδου της κυψέλης, ώστε να διαπιστωθεί αν η ισχύς έχει ανοδική ή καθοδική πορεία σε σύγκριση με το σημείο μέγιστης ισχύος. Από εκείνο το σημείο και μετά, μειώνεται ή αυξάνεται η τάση της κυψέλης με σκοπό την επίτευξη του σημείου μέγιστης ισχύος. Η παραπάνω διαδικασία γίνεται δυνατή, με την ρύθμιση του duty cycle του IGBT τρανζίστορ. Αύξηση duty cycle, σημαίνει μείωση της τάσης εξόδου της κυψέλης και αντίστοιχα μείωση duty cycle, σημαίνει αύξηση της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου.

Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου ορίζεται ως εξής [22]:

$$n = \frac{P_{fc_out}}{LHV * g} \quad (4.2)$$

όπου,

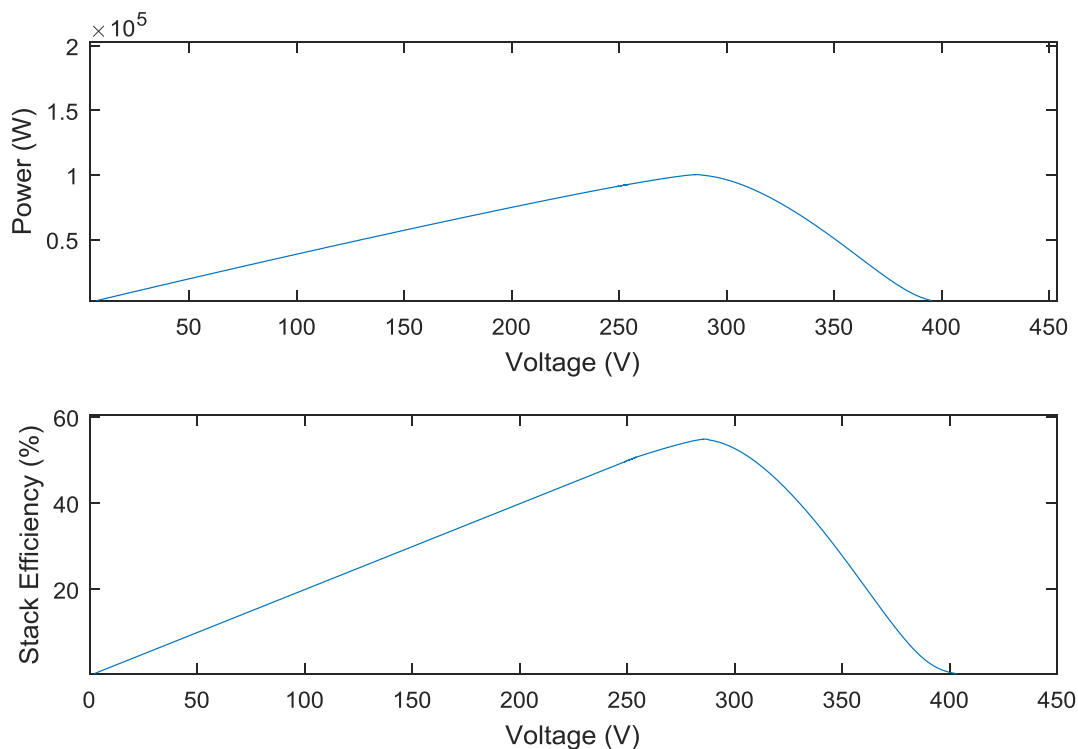
P_{fc_out} ισχύς εξόδου κυψέλης υδρογόνου (W),

LHV low heating point of hydrogen, ίσο με $212.8 \text{ (W lpm}^{-1}\text{)}$,

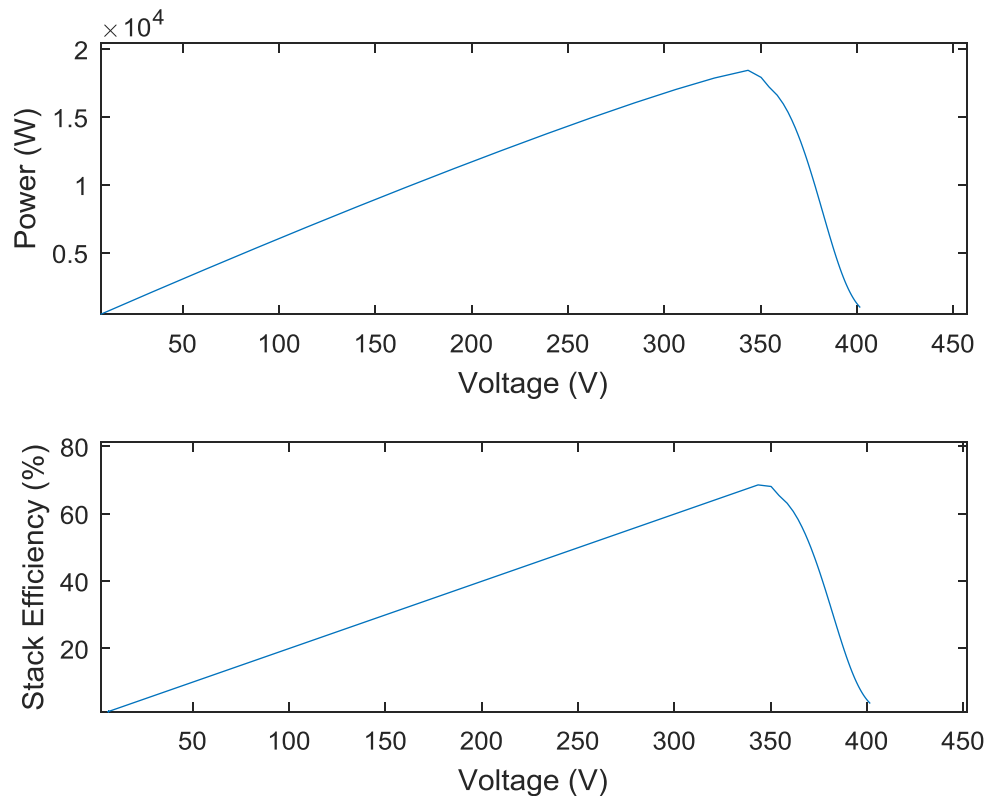
g ροή υδρογόνου η οποία καθορίζει το ρεύμα εξόδου της κυψέλης καυσίμου (lpm).

Προκειμένου να αποδειχθεί ότι παράλληλα με το σημείο μέγιστης ισχύος επιτυγχάνεται και το σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης θα πρέπει να παρουσιαστεί πως μεταβάλλεται η απόδοση (Εξίσωση 4.3) και η ισχύς εξόδου της κυψέλης σε σχέση με την τάση εξόδου της, για μία σταθερή τιμή ροής υδρογόνου.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος - τάσης και η χαρακτηριστική καμπύλη απόδοσης - τάσης, για δεδομένη τιμή ροής υδρογόνου της κυψέλης. Παρατηρείται ότι μεταβάλλοντας την τάση εξόδου της κυψέλης υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί το σημείο μέγιστης ισχύος, ενώ ταυτόχρονα, για την ίδια τιμή τάσης εξόδου, επιτυγχάνεται και το σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης. Ομοίως και στο Σχήμα 4.3, για μια διαφορετική τιμή ροής υδρογόνου παρατηρείται ότι, για την ίδια τιμή τάσης εξόδου της κυψέλης, επιτυγχάνεται και το σημείο μέγιστης ισχύος καθώς και το σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης. Επομένως, το σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης της κυψέλης υδρογόνου επιτυγχάνεται μέσω της μεγιστοποίησης της ισχύος για κάθε τιμή ροής υδρογόνου.

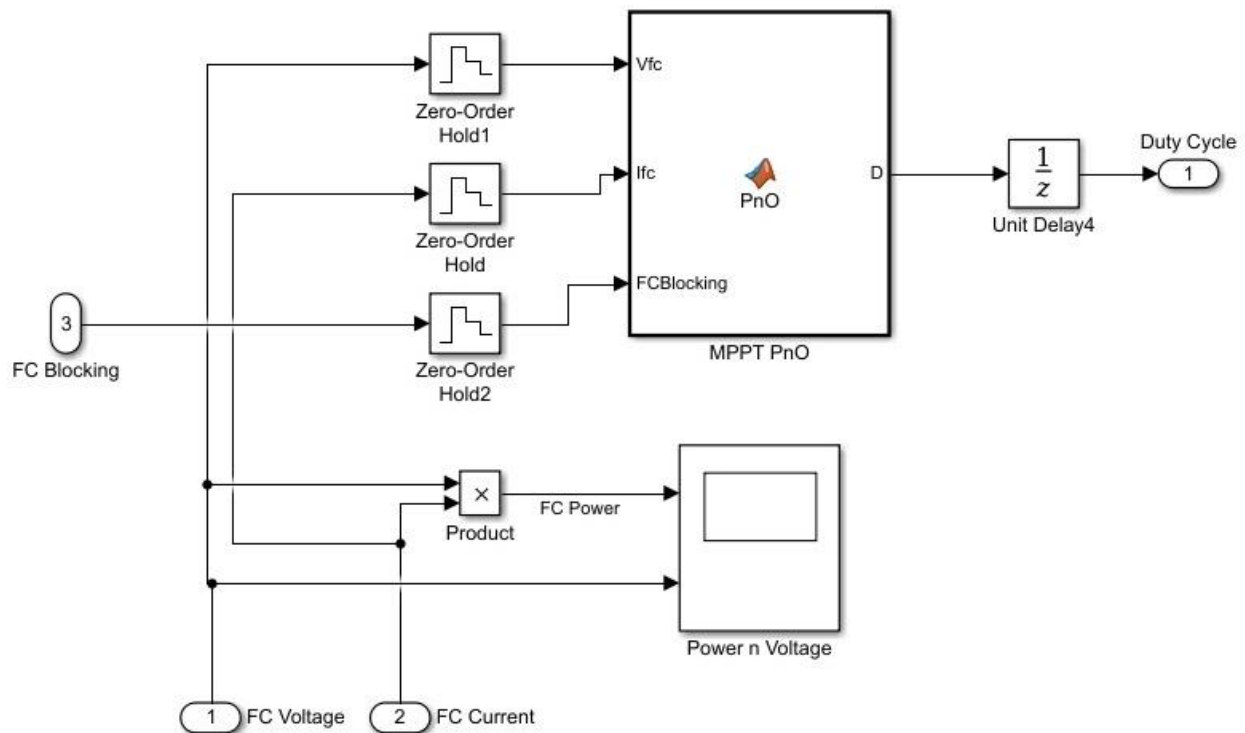


Σχήμα 4.2. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – τάσης και απόδοσης – τάσης της κυψέλης για ροή υδρογόνου 347.3 lpm .

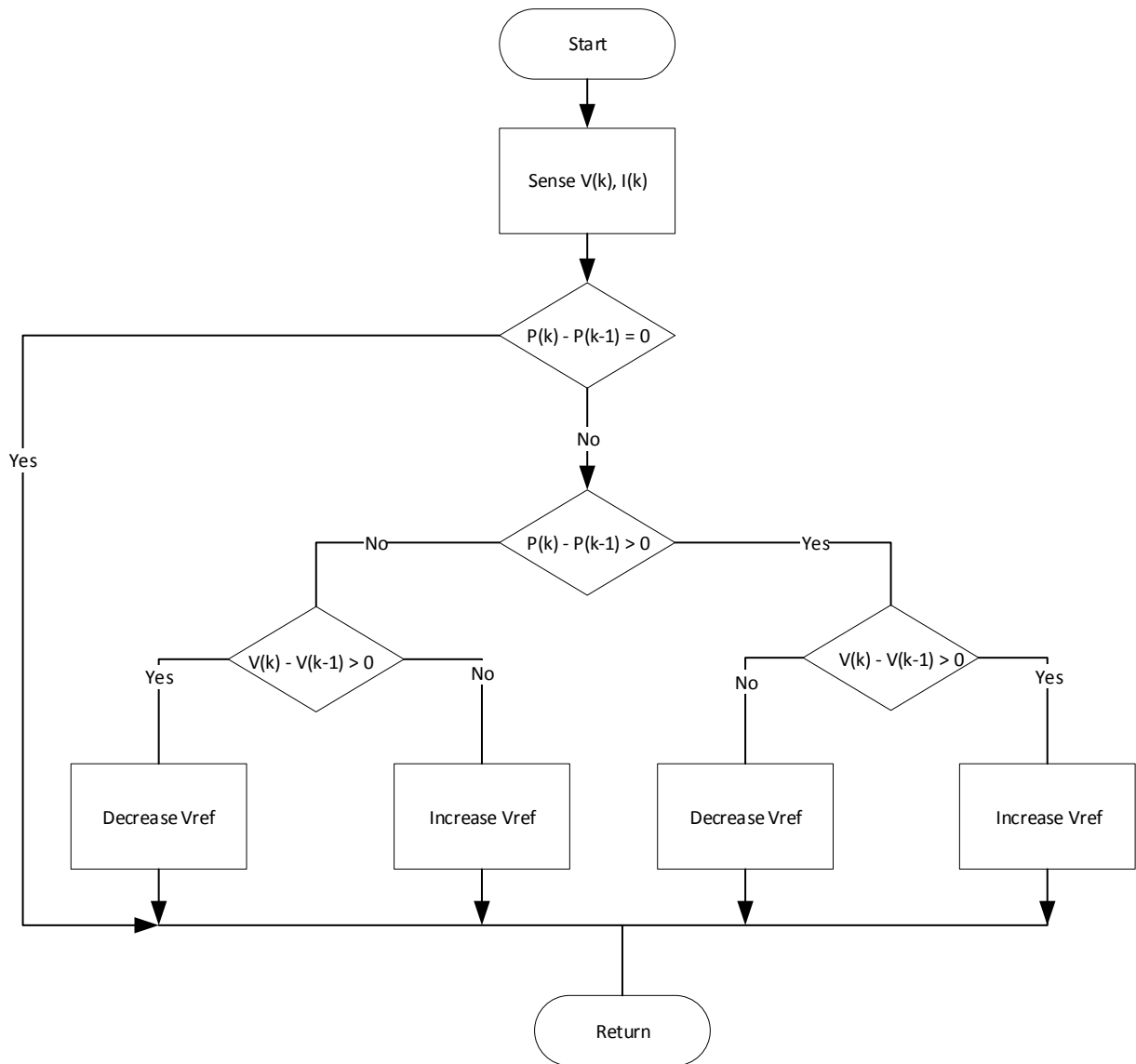


Σχήμα 4.3. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – τάσης και απόδοσης – τάσης της κυψέλης για ροή υδρογόνου 50 lpm.

Για την υλοποίηση της λειτουργικότητας του συνολικού συστήματος προστέθηκε και ένα ακόμα σήμα εισόδου στον αλγόριθμο MPPT – P&O, εκτός της τάσης και του ρεύματος της κυψέλης υδρογόνου. Το FC Blocking, το οποίο διατηρεί σταθερή την τιμή duty cycle σε περιπτώσεις που η κυψέλη καυσίμου έχει απενεργοποιηθεί. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η αρχικοποίηση του αλγορίθμου κάθε φορά που ενεργοποιείται η κυψέλη. Στο Σχήμα 4.4, παρουσιάζεται ο controller, σε περιβάλλον Simulink.



Σχήμα 4.4. Controller MPPT- P&O.



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου MPPT - P&O.

Προκειμένου να υπάρχει συνεχής έλεγχος της κυψέλης υδρογόνου από το εκάστοτε EMS, απαιτείται συνεχής ρύθμιση της ροής καυσίμου (fuel flow rate). Έτσι για να παραμένει σταθερή η τιμή του ρεύματος εξόδου της κυψέλης πρέπει η ροή υδρογόνου να είναι ανάλογη του ρεύματος εξόδου της. Δηλαδή να είναι επαρκής η ποσότητα καυσίμου για την παραγωγή του ρεύματος. Επομένως, μέσω της ακόλουθης εξίσωσης μετατρέπεται η επιθυμητή τιμή του ρεύματος, η οποία έχει υπολογιστεί από το EMS, σε ροή καυσίμου για την τροφοδότηση της κυψέλης και την επίτευξη της επιθυμητής ισχύος:

$$V_{(lpm)fuel} = \frac{6000RTn_{fc}}{zFP_{fuel}U_{fH_2}x\%} \quad (4.3)$$

όπου:

6000 είναι η σταθερά που προκύπτει από την μετατροπή lpm σε m³/s (1 lt/min = 1/60000 m³/s)

R = 8.3145 J/(mol k),

- T Θερμοκρασία κυψέλης (K), η οποία τίθεται ίση με 368 K,
 N αριθμός κελιών (cells) κυψέλης, ίσος με 400,
 i_{fc} ρεύμα εξόδου κυψέλης (A),
 z αριθμός κινούμενων ηλεκτρονίων, ο οποίος είναι ίσος με 96485,
 F 96485 s/mol,
 P_{fuel} Πίεση Καυσίμου (Atm), ίση με 3 Atm,
 U_{FH_2} Utilization of Hydrogen, ίσο με 95.24%,
 x% ποσοστό του υδρογόνου στο καύσιμο, ίσο με 99.95%.

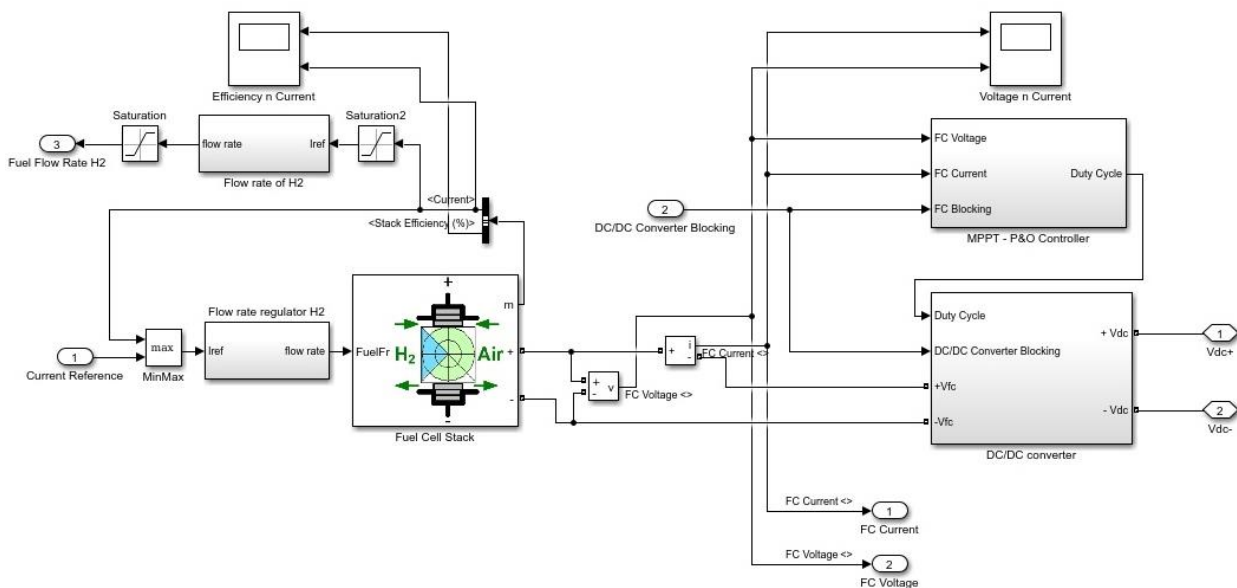
Το τελικό κομμάτι το οποίο υλοποιήθηκε αφορά τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου. Ουσιαστικά επαναλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμού τη ροής καυσίμου από το ρεύμα εξόδου της κυψέλης και με την βοήθεια ενός αλγορίθμου υπολογίζεται η συνολική ροή καυσίμου κατά την λειτουργία του οχήματος. Έπειτα με την χρήση της ακόλουθης εξίσωσης [23], υπολογίζεται η συνολική κατανάλωση υδρογόνου :

$$Wg = \frac{\sum_i V_i}{22.414} \times m \quad (4.4)$$

όπου:

- Wg Consumption of hydrogen (g),
 V_i Fuel Flow Rate στο χρονικό διάστημα i (lt/sec),
 m Molecular weight of hydrogen, ίσο με 2.016 (g/mol).

Στο Σχήμα 4.6, παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο κυψέλης υδρογόνου και του μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 4.6. Συνολικό μοντέλο κυψέλης υδρογόνου και μετατροπέα ισχύος.

4.1.2 Ηλεκτροκινητήρας (Permanent Magnet Synchronous Machine - PMSM)

Η μοντελοποίηση του ηλεκτροκινητήρα βασίστηκε σε στοιχείο της βιβλιοθήκης της MATLAB. Στο Σχήμα 4.7, διακρίνονται τα τέσσερα δομικά στοιχεία του συγκεκριμένου μοντέλου ηλεκτροκινητήρα, τα οποία είναι τα εξής:

- Ο κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Machine),
- Ο VECT controller,
- Ο Speed controller,
- Three-phase Inverter.

Κάθε ένα επιτελεί και μία διαφορετική λειτουργία για την ομαλή λειτουργία του συνολικού συστήματος του ηλεκτροκινητήρα.

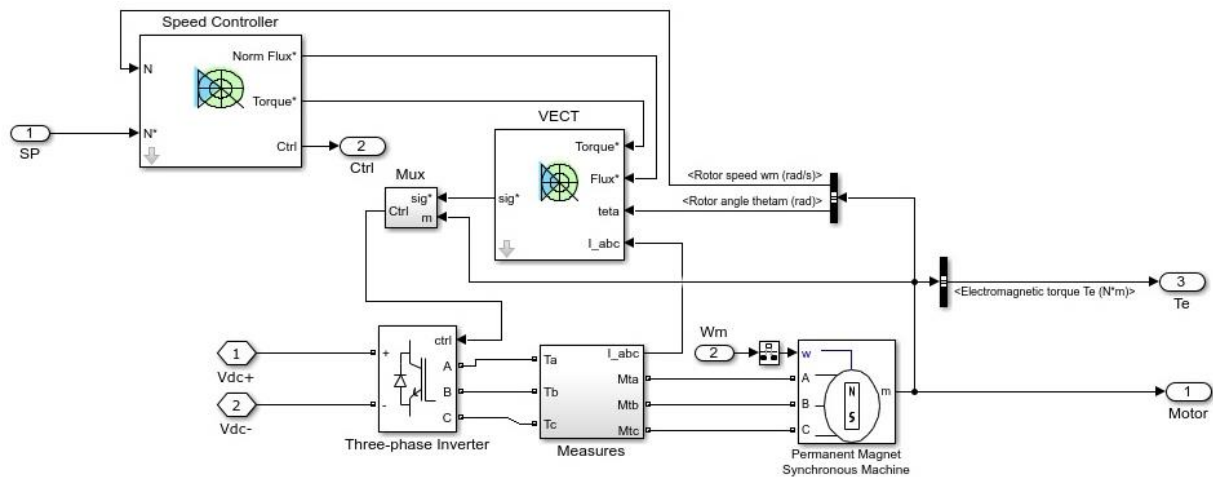
Αρχικά η επιλογή αυτού του τύπου ηλεκτρικής μηχανής, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.6.4, είναι ιδανική διότι δεν είναι αναγκαία η τροφοδοσία του δρομέα με ρεύμα για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου και παρουσιάζει μεγαλύτερη αναλογία ροπής ανά μονάδα όγκου και ροπής ανά μονάδα βάρους σε σύγκριση με άλλους κινητήρες. Σαν τιμή εισόδου (WM), δέχεται την ταχύτητα περιστροφής του κεντρικού άξονα του οχήματος η οποία καθορίζει την λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής. Αν είναι θετική, τότε η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, ενώ αν είναι αρνητική λειτουργεί ως γεννήτρια. Τα κύρια χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 [24].

Ο Speed Controller, αναπαριστά έναν PI ελεγκτή ταχύτητας. Δέχεται σαν όρισμα την ροπή αναφοράς (ροπή η οποία υπολογίζεται από τις εντολές του οδηγού στο EMS), και την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Στη συνέχεια υπολογίζει την ροπή και την μαγνητική ροή (flux) στην οποία πρέπει να φτάσει η ηλεκτρική μηχανή.

Ο VECT Controller, με την σειρά του, υπολογίζει τα τριφασικά ρεύματα της ηλεκτρικής μηχανής με βάση τη ροπή αναφοράς και την τιμή της μαγνητικής ροής (flux) του Speed Controller. Έτσι δημιουργείται ένα PWM σήμα, χρησιμοποιώντας έναν τριφασικό ρυθμιστή ρεύματος για την δημιουργία τριφασικού ρεύματος από τον αντιστροφέα τάσης.

Ο three-phase inverter αποτελεί ένα τριφασικό αντιστροφέα, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.17. Αποτελεί έτοιμο block από τις βιβλιοθήκες του Simulink, και μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου μαζί με την μπαταρία σε τριφασικό, για την τροφοδοσία του κινητήρα μόνιμου μαγνήτη. Το σήμα ελέγχου των διακοπών παρέχεται από τον VECT controller.

Πίνακας 4.3. Κύρια χαρακτηριστικά ηλεκτρικής μηχανής μόνιμου μαγνήτη.	
Number of poles	8
Maximum Power	100 kW
Maximum Torque	256 Nm
Maximum Speed	12500 min ⁻¹
Maximum Efficiency	97%



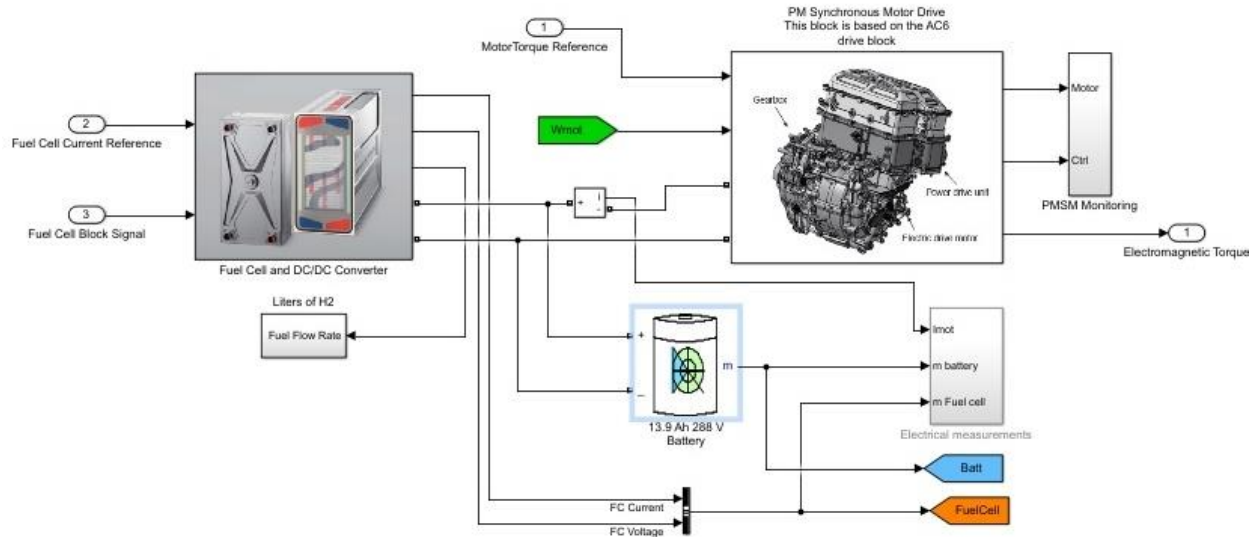
Σχήμα 4.7. Μοντελοποίηση ηλεκτροκινητήρα σε περιβάλλον Simulink.

4.1.3 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας του συγκεκριμένου οχήματος. Η μπαταρία ιόντων λιθίου που επιλέχτηκε θα αυξήσει τις επιδόσεις επιτάχυνσης λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος, ενώ λόγω της αυξημένης ενεργειακής πυκνότητας θα μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου, [25].

Πίνακας 4.4. Χαρακτηριστικά συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.	
Nominal Voltage	288 Vdc
Rated Capacity	13.9 Ah
Battery Power	25 kW
Τύπος Μπαταρίας	Lithium-ion

Η μπαταρία συνδέεται απευθείας με το DC Bus και συγκεκριμένα ανάμεσα στην κυψέλη καυσίμου και τον ηλεκτροκινητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και λοιπά συστήματα του οχήματος.

4.1.4 Vehicle dynamics

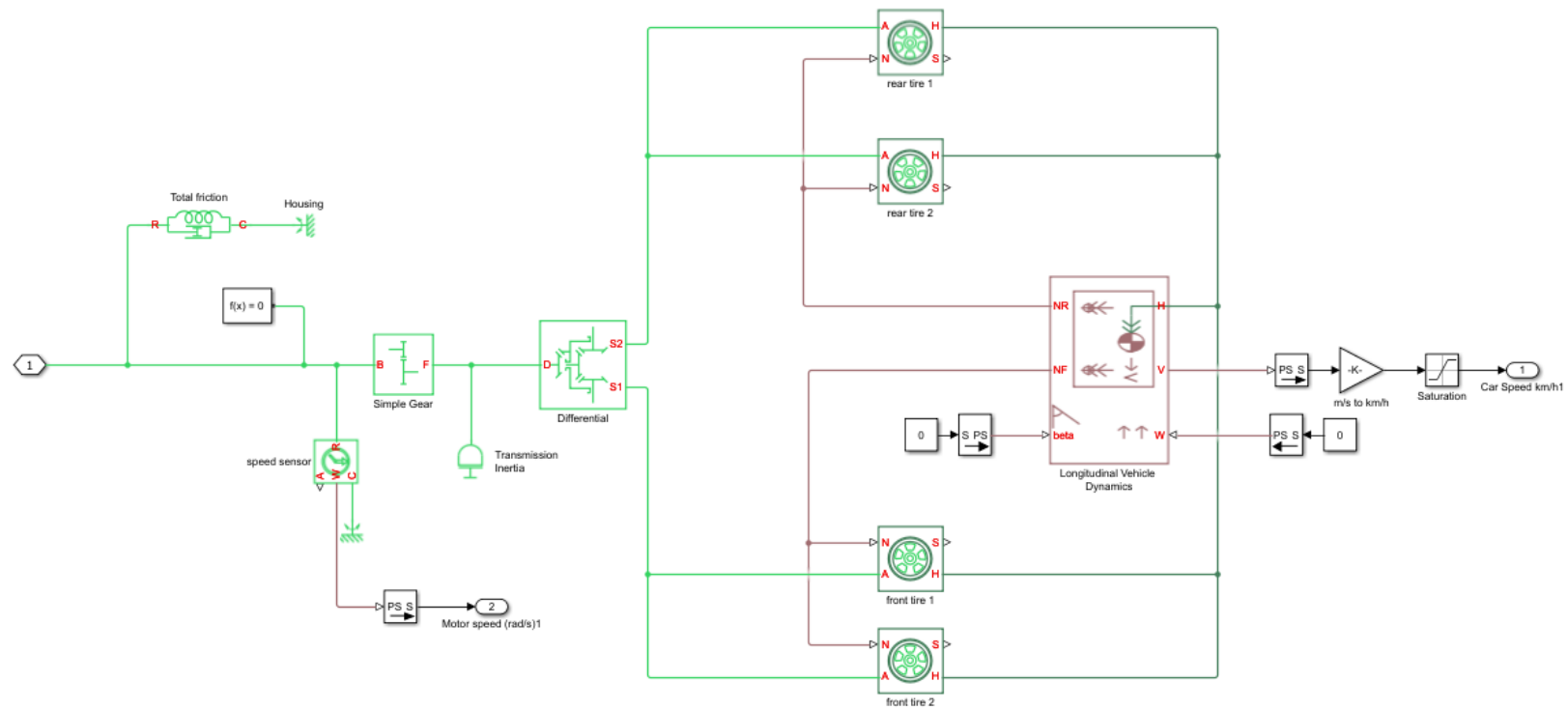
Στο κομμάτι του vehicle dynamics, μοντελοποιήθηκαν όλα τα μηχανικά μέρη του οχήματος. Δηλαδή, το κομμάτι αυτό του ηλεκτρικού οχήματος που περιέχει όλα τα μηχανικά μέρη του αυτοκινήτου, όπως άξονες, διαφορικά, ελαστικά κλπ.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η αντίστοιχη συνδεσμολογία. Αρχικά τοποθετήθηκε ένας άξονας μεταξύ ηλεκτρικής μηχανής και κιβωτίου ταχυτήτων. Ως κιβώτιο ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκε ένα απλό κιβώτιο μίας ταχύτητας (Simple Gear). Η σχέση μετάδοσης μεταξύ του άξονα της ηλεκτρικής μηχανής (base - B) και της εξόδου του κιβωτίου (follower - F) είναι 7.2, δηλαδή η γωνιακή ταχύτητα του F είναι 7.2 φορές μικρότερη από την γωνιακή ταχύτητα του B. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής και αυξάνεται η ροπή που μεταδίδεται στο διαφορικό και τους τροχούς.

Επιπλέον, για την μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του κεντρικού άξονα (που αποτελεί και σήμα εισόδου για την ηλεκτρική μηχανή μόνιμου μαγνήτη), χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας ταχύτητας, ο οποίος μετατρέπει την μετρούμενη μηχανική περιστροφή του άξονα σε σήμα (Speed Sensor).

Στην συνέχεια, προστέθηκε διαφορικό (differential) ώστε να χωρίσει την ροπή της μηχανής σε δύο ισόποσες ροπές, οι οποίες θα συνδεθούν με τους τροχούς του οχήματος. Για την μοντελοποίηση των τροχών του οχήματος και της συμπεριφοράς τους με το έδαφος, έγινε χρήση έτοιμου block του Simulink (Tire – Magic Formula). Δέχονται ως είσοδο την ροπή από το διαφορικό η οποία μετατρέπεται σε σήμα οριζόντιας κίνησης.

Τέλος, το αμάξωμα - σασί του οχήματος (longitudinal vehicle dynamics), μοντελοποιήθηκε με την βοήθεια έτοιμου block του Simulink, στο οποίο δίνεται η δυνατότητα επιλογής αρκετών παραμέτρων που επηρεάζουν την κίνηση και συμπεριφορά του οχήματος, δημιουργώντας πιο ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης. Οι παράμετροι οι οποίοι επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5. Επίσης, με πράσινο χρώμα διακρίνονται οι είσοδοι οριζόντιας κίνησης, ενώ με κόκκινο οι δυνάμεις που επιδρούν σε κάθε άξονα, ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης στους τροχούς (κίνηση σε δύο τροχούς ή τέσσερις τροχούς).



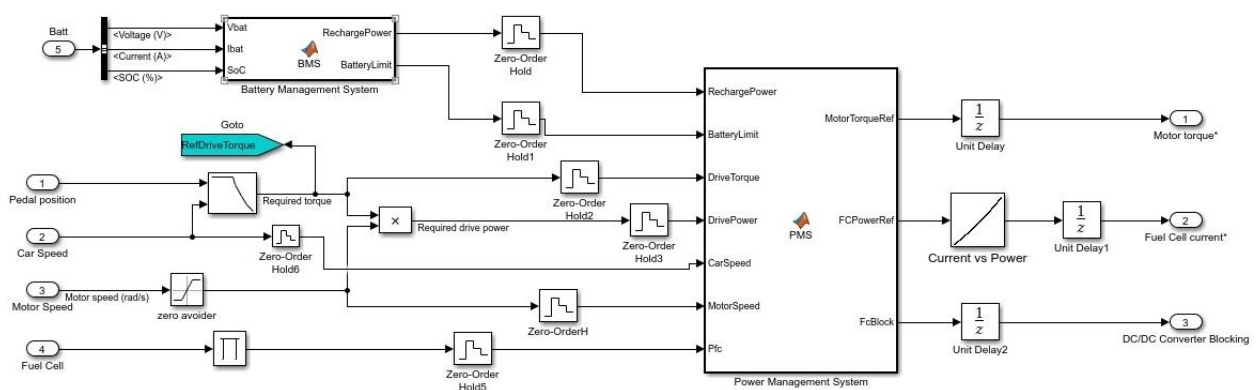
Σχήμα 4.9. Προσομοίωση των vehicle dynamics σε περιβάλλον Simulink.

Πίνακα 4.5. Παράμετροι Αμαξώματος.	
Mass	1650 kg
Number of wheels per axle	2
Air density	1.18 kg/m ³ (default)
Horizontal distance from CG to rear and front axle*	1.4 m
CG height above ground**	0.5 m (default)
Κίνηση τροχών	FWD – Κίνηση στους δύο μπροστινούς τροχούς
Aerodynamic Drag Coefficient	0.26

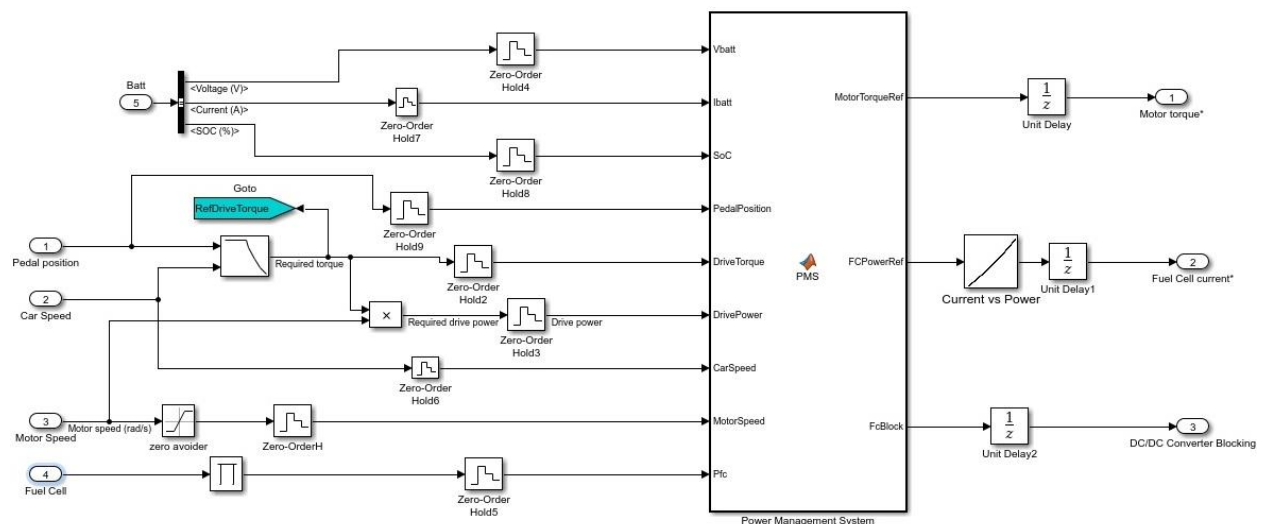
*απόσταση μπροστινού και πίσω άξονα από το κέντρο μάζας, **απόσταση του κέντρου μάζας από το έδαφος.

4.1.5 Συστήματα διαχείρισης ενέργειας EMS_1, EMS_2

Στο Σχήμα 4.10 και 4.11, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας τα οποία παρουσιάστηκαν λεπτομερώς στο 3^ο Κεφάλαιο.



Σχήμα 4.10. Μοντελοποίηση EMS_1 σε περιβάλλον Matlab/Simulink.



Σχήμα 4.11. Μοντελοποίηση EMS_2 σε περιβάλλον Matlab/Simulink.

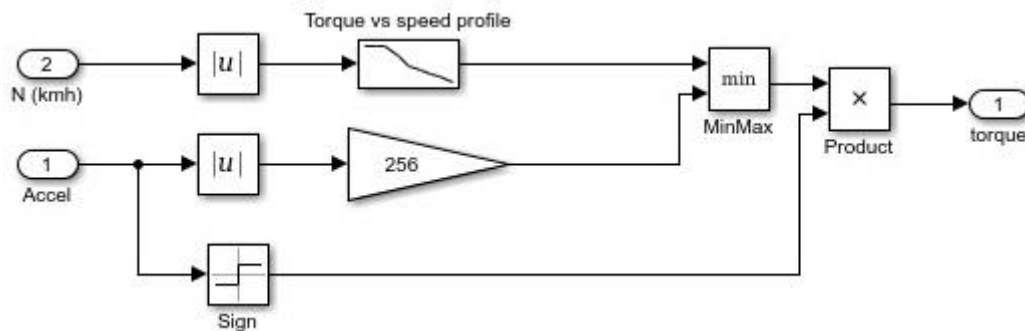
Το τμήμα της μετατροπής της ισχύος της κυψέλης καυσίμου σε ρεύμα για το υπολογισμό της απαιτούμενης ροής καυσίμου γίνεται με την βοήθεια του block look-up table του Simulink που περιέχει για κάθε τιμή ισχύος την αντίστοιχη τιμή ρεύματος (χαρακτηριστική ισχύος - ρεύματος) (Σχήματα 4.10 και 4.11).

Ένα επιπλέον κομμάτι το οποίο δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3, είναι η μετατροπή των εντολών του οδηγού σε ροπή αναφοράς. Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται το μοντέλο μετατροπής σε περιβάλλον Simulink. Ο τρόπος λειτουργίας βασίζεται στην συνεχή καταγραφή των εντολών πεταλιού επιτάχυνσης και φρένου όπως και της ταχύτητας του οχήματος.

Αρχικά πολλαπλασιάζεται η απόλυτη τιμή του πεταλιού (από 0 έως 1 τιμές πεταλιού επιτάχυνσης, από 0 έως -1 τιμές πεταλιού φρένου), με την μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει η ηλεκτρική μηχανή. Έτσι εάν πατηθεί το πετάλι στο 1, χρειάζεται ροπή 256 Nm, δηλαδή η μέγιστη δυνατή.

Σε περίπτωση που η μηχανή προσεγγίζει το μέγιστο όριο ταχύτητας περιστροφής (12500 rpm), η τιμή της ροπής παραμένει σταθερή στα 256 Nm, το οποίο οδηγεί στη περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας περιστροφής (άνω του μέγιστου ορίου των 12500 rpm). Έτσι συγκρίνουμε την ταχύτητα του οχήματος και σε περιπτώσεις που προσεγγίζει την μέγιστη ταχύτητα των 160 km/h, μειώνεται σταδιακά στην σωστή ροπή αναφοράς, ώστε το όριο των 12500 rpm, να μην ξεπερνιέται.

Τέλος, αφού από τις δύο ροπές αναφοράς επιλεγεί η μικρότερη ώστε να αποφευχθεί το λάθος υπερβάσης του ορίου των μέγιστων στροφών της μηχανής, πολλαπλασιάζεται με το πρόσημο του πεταλιού ώστε να αναγνωριστεί αν θα επιταχύνει το όχημα ή θα επιβραδύνει. Το αποτέλεσμα (torque) του μοντέλου αυτού είναι η ροπή στην οποία πρέπει να φτάσει το όχημα σύμφωνα με τις εντολές του οδηγού και του περιορισμού των στροφών της μηχανής.



Σχήμα 4.12. Μοντέλο Μετατροπής Εντολών Οδηγού σε Ροπή Αναφοράς για την Ηλεκτρική Μηχανή.

4.1.6 Μοντέλο οδηγού και κύκλοι οδήγησης

Καθώς διαφορετικές αρχιτεκτονικές οχημάτων μπορούν να σχεδιαστούν με διαφορετικές τεχνολογίες είναι δύσκολο να συγκριθούν μεταξύ τους χωρίς την χρήση ενός προτύπου. Η χρησιμότητα των κύκλων οδήγησης είναι να δημιουργηθεί ένα διεθνές πρότυπο, κοινό για όλους τους κατασκευαστές, ώστε να μπορέσουν να συγκρίνουν την συμπεριφορά και τις επιδόσεις οχημάτων. Ουσιαστικά ένας κύκλος οδήγησης είναι ένα γράφημα το οποίο δείχνει την μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο.

Υπάρχουν διαφορετικοί κύκλοι οδήγησης, ο οποίοι έχουν υιοθετηθεί από διαφορετικές χώρες και οργανισμούς, ανάλογα με τις συνθήκες κυκλοφορίας (μέσος όρος ταχύτητας, κυκλοφοριακή κίνηση κα.) που επικρατούν σε αυτές. Για την προσομοίωση της κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλη υδρογόνου, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω κύκλοι οδήγησης:

- New European Driving Cycle (NEDC).
- EPA Federal Test Procedure (FTP-75)
- World Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP class 3)
- Artemis Motorway Cycle, 150 km/h (ArtMW 150)

Κάθε ένας από τους παραπάνω κύκλους οδήγησης, εμφανίζει διαφορές ως προς την ταχύτητα κίνησης του οχήματος, τον χρόνο το οποίο διατηρείται σταθερή όπως και το μέγιστο όριο το οποίο αγγίζει. Περισσότερες λεπτομέρειες θα αναφερθούν παρακάτω.

Ο NEDC κύκλος οδήγησης αναπαριστά την κίνηση ενός οχήματος στους δρόμους της Ευρώπης. Αποτελείται από τέσσερις διαδοχικούς κύκλους οδήγησης ECE-15 (urban driving cycles - UDC) και έναν EUDC (Extra – Urban Driving Cycle - EUDC) κύκλο οδήγησης. Μαζί δίνουν συνολικό χρόνο προσομοίωσης 1180 δευτερόλεπτα, από τα οποία τα πρώτα 780 δευτερόλεπτα αφορούν τον ECE-15 και τα 780-1180 δευτερόλεπτα τον EUDC. Η χρήση του βοηθά στην μέτρηση της συνολικής οικονομίας του καυσίμου καθώς και στην μέτρηση των ρύπων του οχήματος, όπως και στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρ' όλα αυτά, έχει χαρακτηριστεί πως οι παραπάνω μετρήσεις είναι ιδανικές και δεν μπορούν να ανταποκριθούν στην πραγματικότητα.

Ο FTP-75 κύκλος οδήγησης, αναπαριστά την κίνηση ενός οχήματος στα όρια της πόλεως. Υιοθετήθηκε από τον Οργανισμό Περιβαλλοντικής Προστασίας των ΗΠΑ, και βοηθά στην μέτρηση των ρύπων και της κατανάλωσης καυσίμου των επιβατικών οχημάτων. Η συνολική

διάρκεια του ανέρχεται στα 1874 δευτερόλεπτα και χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό της μέγιστης απόστασης που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο σε μια πλήρη φόρτιση.

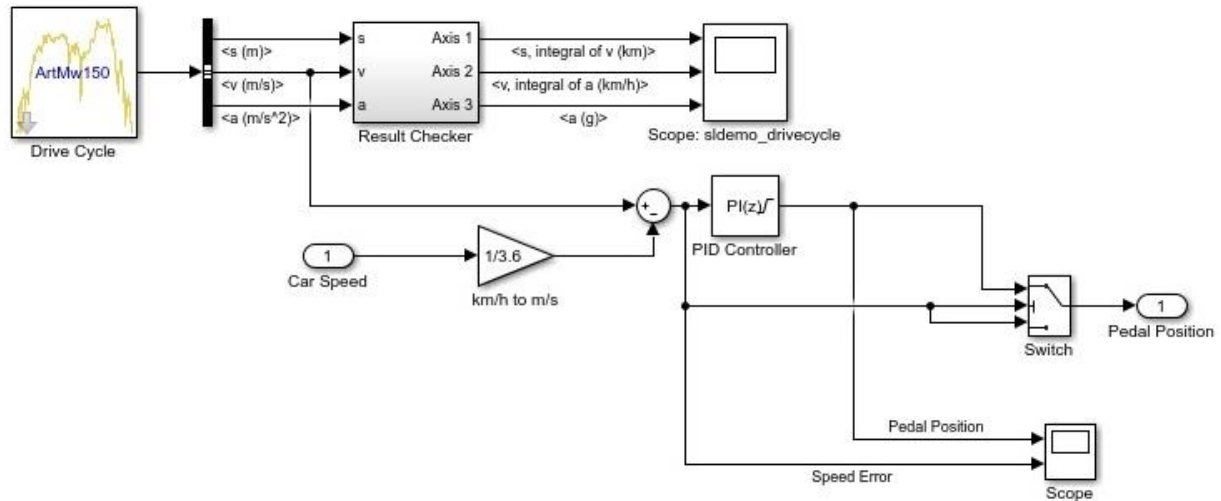
Ο WLTP class 3 κύκλος οδήγησης, δημιουργήθηκε σε μια προσπάθεια αντικατάστασης του NEDC, λόγω των ιδανικών αποτελεσμάτων που παρουσίαζε. Έκανε την πρώτη του εμφάνιση το 2015 και έχει υιοθετηθεί από χώρες όπως Ινδία, Νότια Κορέα, Ιαπωνία και στοχεύει στην καθιέρωσή του σαν ένα παγκόσμιο πρότυπο σύγκρισης κατανάλωσης και εκπομπής ρύπων. Συναντάται σε τρεις διαφορετικές ομάδες ή κλάσεις (class 1, class 2, class 3) και κάθε όχημα αντιστοιχίζεται σε κάθε μια κατηγορία ανάλογα με το λόγο ισχύος – βάρους (PWr, kW/Tonne). Χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στην μέτρηση της κατανάλωσης των υβριδικών αμαξιών καθώς και την μέτρηση της μέγιστης απόστασης που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο σε μια πλήρη φόρτιση. Η συνολική διάρκεια του κύκλου οδήγησης ανέρχεται στα 1800 δευτερόλεπτα, ενώ χωρίζεται σε τέσσερα διαφορετικά τμήματα:

- ένα αργό τμήμα μέχρι τα 56.6km/h.
- ένα μεσαίο τμήμα μέχρι τα 76.6 km/h.
- ένα γρήγορο τμήμα μέχρι τα 97.4 km/h.
- ένα αρκετά υψηλό τμήμα ταχύτητας μέχρι τα 131.3 km/h.

Ο ArtMW 150 κύκλος οδήγησης, αναπαριστά την κίνηση ενός οχήματος σε αυτοκινητόδρομο. Έχει συνολική διάρκεια 1068 δευτερόλεπτα, διανύει μια απόσταση 29.457 χιλιόμετρα και διατηρεί μια μέση ταχύτητα 99.6 km/h, ενώ η μέγιστη ταχύτητα αξίζει τα 150 km/h.

Ο τρόπος μοντελοποίησης του ηλεκτρικού οχήματος με χρήση κυψελών καυσίμου, το οποίο παρουσιάστηκε λεπτομερώς παραπάνω, περιλαμβάνει την ύπαρξη οδηγού για την δημιουργία εντολών που επηρεάζουν την συμπεριφορά του συνολικού συστήματος. Επομένως, σε συνδυασμό με την χρήση των κύκλων οδήγησης, δημιουργήθηκε ένα σύστημα PI ελεγκτή με σκοπό την δημιουργία εντολών οδηγού.

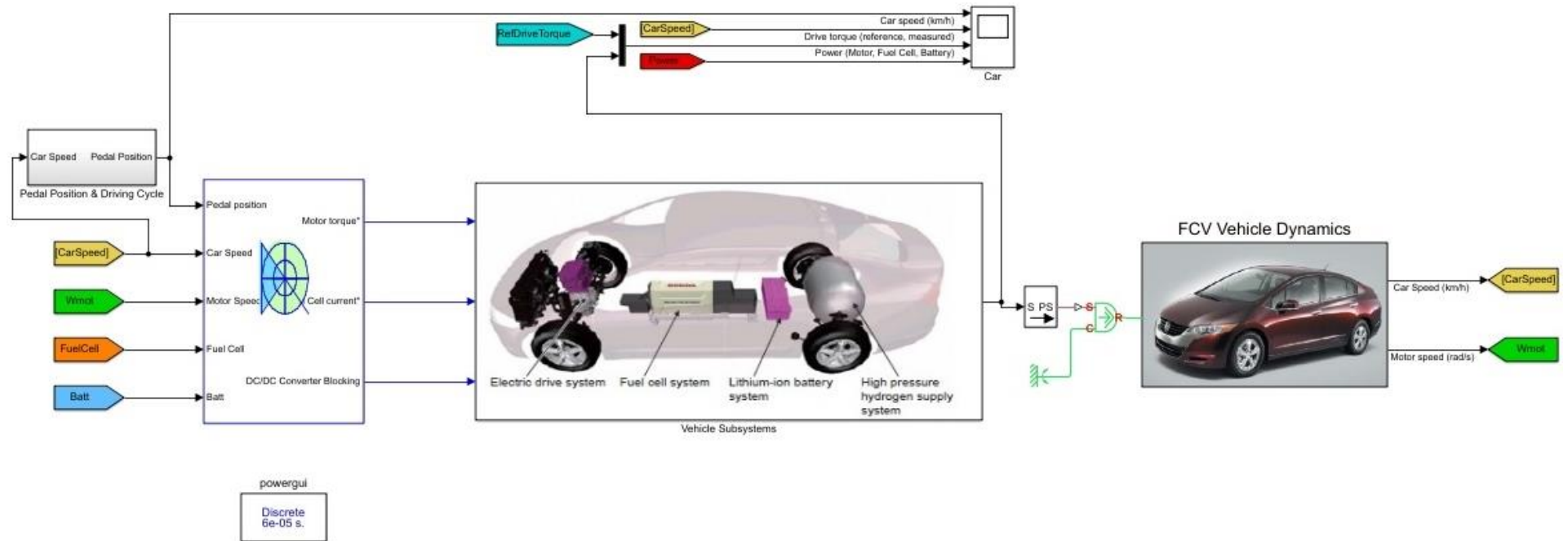
Αρχικά, θα πρέπει να συγκριθεί η ταχύτητα του κύκλου οδήγησης και η ταχύτητα που αναπτύσσει το όχημα. Το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης είναι το σφάλμα ταχύτητας (πόσο απέχει από την ταχύτητα αναφοράς – κύκλου οδήγησης), το οποίο είναι η είσοδος του PI ελεγκτή. Με την σειρά του ο ελεγκτής και με τις σωστές τιμές του proportional gain ($K_p = 0.145$) και integral gain ($K_i = 0.015$), οι οποίες υπολογίστηκαν έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι όσο πιο κοντά στην ταχύτητα αναφοράς γίνεται, εξάγεται η τιμή του πεταλιού επιτάχυνσης και του φρένου που απαιτείται. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένας εικονικός οδηγός με ίδιες οδηγικές συμπεριφορές με αυτές του εκάστοτε κύκλου οδήγησης. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η υλοποίηση του συστήματος σε περιβάλλον Simulink.



Σχήμα 4.13. Εικονικός Οδηγός σε Περιβάλλον Simulink.

4.1.7 Συνολικό όχημα

Το συνολικό όχημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14 και αφορά το τελικό στάδιο της μοντελοποίησης του ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλη καυσίμου.



Σχήμα 4.14. Το συνολικό μοντέλο του οχήματος σε περιβάλλον Matlab/Simulink.

5.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5. Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων

Τα δύο συστήματα διαχείρισης ενέργειας προσομοιώθηκαν με την χρήση διαφορετικών κύκλων οδήγησης και οι συγκρίσεις βασίστηκαν στην κατανάλωση του καυσίμου που παρουσίασε το κάθε όχημα. Όλα τα αποτελέσματα προσομοιώθηκαν σε περιβάλλον MATLAB/Simulink. Ένα επιπλέον μέτρο σύγκρισης, αποτελεί το διαφορετικό ποσοστό στο οποίο χρησιμοποιείται η μπαταρία. Δηλαδή, ο κάθε κύκλος οδήγησης προσομοιώθηκε για διαφορετική τιμή ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης της κυψέλης καυσίμου. Αναλυτικότερα, οι τιμές SoC που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

- SoC 60 % μέχρι 90 %, χρήση του 30 % της μπαταρίας,
- SoC 40 % μέχρι 80 %, χρήση του 40 % της μπαταρίας,
- SoC 35 % μέχρι 85 %, χρήση του 50 % της μπαταρίας.

5.1.1 Προσομοίωση κυψέλης καυσίμου και MPPT – P&O controller

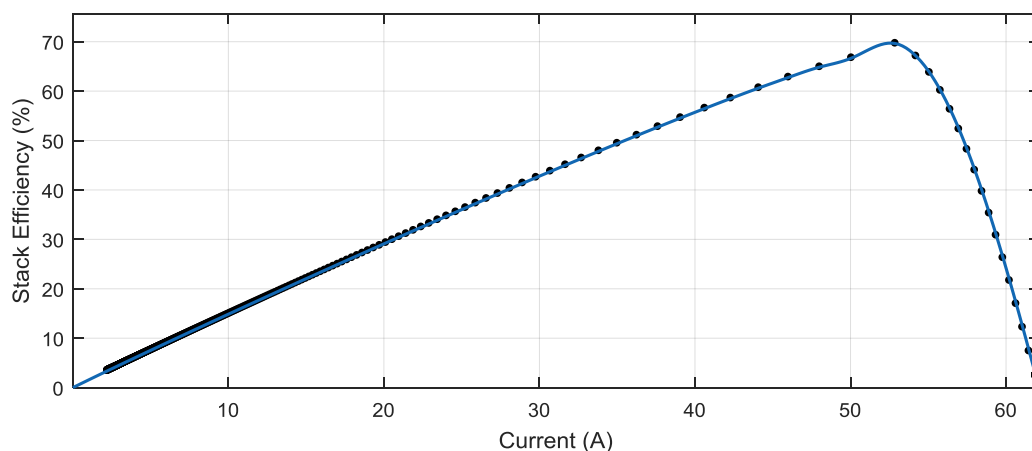
Προκειμένου η κυψέλη καυσίμου να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος και παράλληλα στο σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης, όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 4.1.1, προσομοιώθηκε η λειτουργία του αλγορίθμου MPPT – P&O. Για την υλοποίηση των δοκιμών υλοποιήθηκε ένα κύκλωμα εύρεσης της χαρακτηριστικής αναφοράς ισχύος - τάσης και απόδοσης – ρεύματος, για δεδομένη τιμή ροής υδρογόνου της κυψέλης. Έπειτα, σε ένα κύκλωμα όπου η κυψέλη υδρογόνου συνδέεται με τον μετατροπέα και τον ελεγκτή MPPT – P&O, για την ίδια τιμή ροής υδρογόνου, προσομοιώνεται η λειτουργία της ώστε να διαπιστωθεί εάν συγκλίνει στο σημείο μέγιστης ισχύος και ταυτόχρονα στο σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης.

Οι παράγοντες που επηρέασαν την παραπάνω προσομοίωση είναι η συχνότητα δειγματοληψίας των τιμών τάσης και ρεύματος καθώς και το βήμα αύξησης ή μείωσης της τάσης αναφοράς στον αλγόριθμο MPPT – P&O. Η συχνότητα δειγματοληψίας επηρεάζει την ταχύτητα του αλγορίθμου, διότι θα πρέπει σε κάθε μέτρηση να έχει σταθεροποιηθεί η ισχύς στο ανάλογο σημείο που αντιστοιχεί η κάθε τιμή του duty cycle. Έτσι μετρώντας την απόκριση της κυψέλης υδρογόνου σε μια μεταβολή της ισχύος βρέθηκε πως η συχνότητα δειγματοληψίας που είναι ιδανική για αυτήν την προσομοίωση είναι 10 Hz. Από την άλλη, το βήμα του αλγορίθμου επηρεάζει το μέγιστο σημείο στο οποίο σταθεροποιείται η ισχύς και η απόδοση της κυψέλης. Αν χρησιμοποιηθεί ένα αρκετά μεγάλο βήμα, θα παρουσιαστεί γρηγορότερη απόκριση στο μέγιστο σημείο αλλά θα εμφανίζει μεγαλύτερη ταλάντωση γύρω από αυτό. Το αντίστροφο συμβαίνει εάν χρησιμοποιηθεί μικρό βήμα. Ύστερα από διάφορες δοκιμές το βήμα που χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω προσομοίωση είναι $\Delta d = 0.001$.

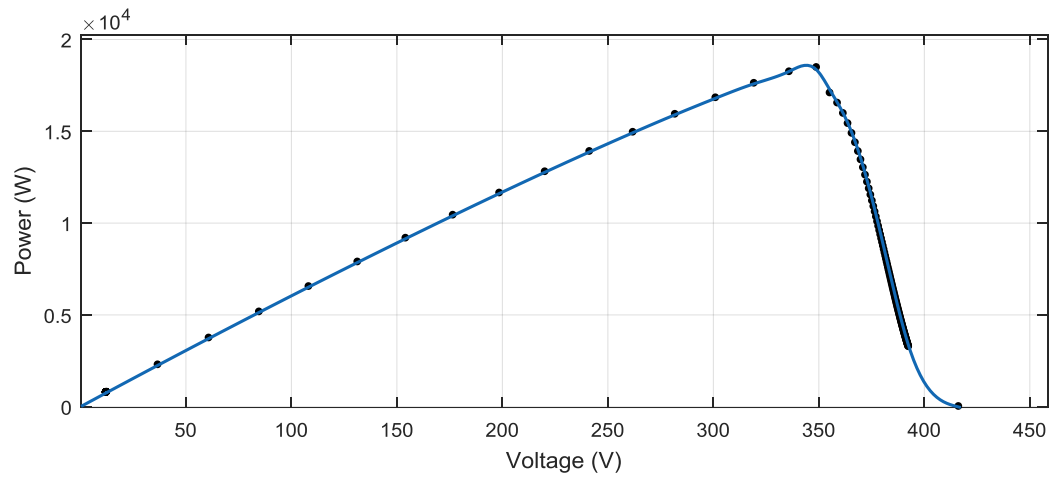
Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται η ομαδοποίηση που έγινε για κάθε σχήμα το οποίο παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3.1. Στην δεύτερη στήλη αναφέρεται η ροή υδρογόνου για την οποία πραγματοποιήθηκε η μέτρηση και στις επόμενες τέσσερις στήλες αναφέρονται η ισχύς, η απόδοση, η τάση και το ρεύμα της κυψέλης για καθεμία από αυτές. Επίσης σε κάθε ομάδα σχημάτων τα πρώτα δύο αναφέρονται στην καμπύλη αναφοράς, δηλαδή περιέχουν το μέγιστο σημείο βαθμού απόδοσης για την αντίστοιχη τιμή ρεύματος και το μέγιστο σημείο ισχύος για την αντίστοιχη τιμή τάσης. Ακολουθούν τα γραφήματα της ισχύος, της τάσης, της απόδοσης και του ρεύματος της κυψέλης η οποία προσομοιώθηκε με την χρήση του MPPT – P&O controller. Σε κάθε μια δοκιμή που πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένη τιμή ροής υδρογόνου, ο αλγόριθμος συγκλίνει στο σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης και ισχύος (οι τιμές της τρίτης και τέταρτης στήλης του Πίνακα 5.1 ταυτίζονται).

Σε κάθε σχήμα που περιλαμβάνει την τάση της κυψέλης με την χρήση του MPPT – P&O controller (Σχήματα 5.4, 5.10, 5.16, 5.22, 5.28, 5.34 και 5.40) δεν παρατηρείται σταθερή γραμμή τάσης. Αυτό οφείλεται στην συνεχή αλλαγή του duty cycle από τον αλγόριθμο προκειμένου να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.2.1, ο αλγόριθμος ουσιαστικά αλλάζει την τιμή τάσης της κυψέλης ώστε να μπορεί να παράγει σταθερή ισχύ για την τροφοδότηση του φορτίου. Επομένως, είναι αναμενόμενη η ταλάντωση που παρουσιάζει η τάση, η οποία ταλαντώνεται «γύρω» από το αντίστοιχο σημείο τάσεως για το οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς (πέμπτη στήλη Πίνακας 5.1).

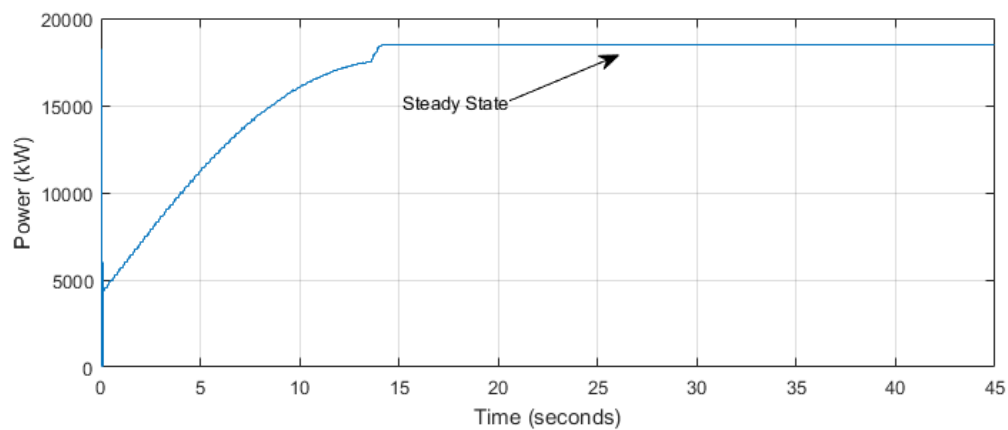
Πίνακας 5.1. Ομαδοποίηση Χαρακτηριστικών και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.					
Γραφήματα	Ροή Υδρογόνου (lpm)	Μέγιστη Ισχύς (W)	Μέγιστη Απόδοση (%)	Τάση Κυψέλης (V)	Ρεύμα Κυψέλης (A)
Σχήμα 5.1 – Σχήμα 5.6	65.76	18485	69.71	347.87	52.55
Σχήμα 5.7 – Σχήμα 5.12	131.5	35583	67.1	334.9	105.4
Σχήμα 5.13 – Σχήμα 5.18	197.3	51537	64.9	322.8	157.8
Σχήμα 5.19 – Σχήμα 5.24	263	66411	62.75	312.3	210.6
Σχήμα 5.25 – Σχήμα 5.30	328.8	80230	60.6	303.4	263
Σχήμα 5.31 – Σχήμα 5.36	374.8	89288	59.27	295.63	299.1
Σχήμα 5.37 – Σχήμα 5.42	456.7	100000	54.9	285	349.8



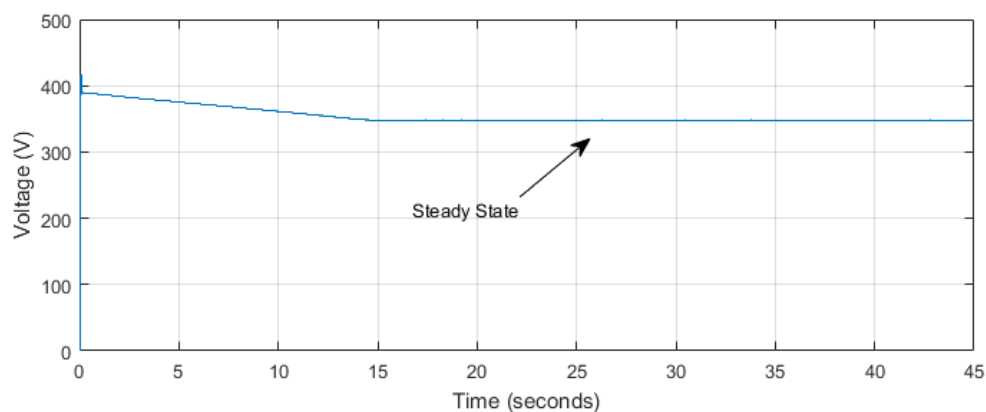
Σχήμα 5.1. Χαρακτηριστική βαθμού απόδοσης – ρεύματος εξόδου της κυψέλης καυσίμου για 65.76 lpm ροής υδρογόνου.



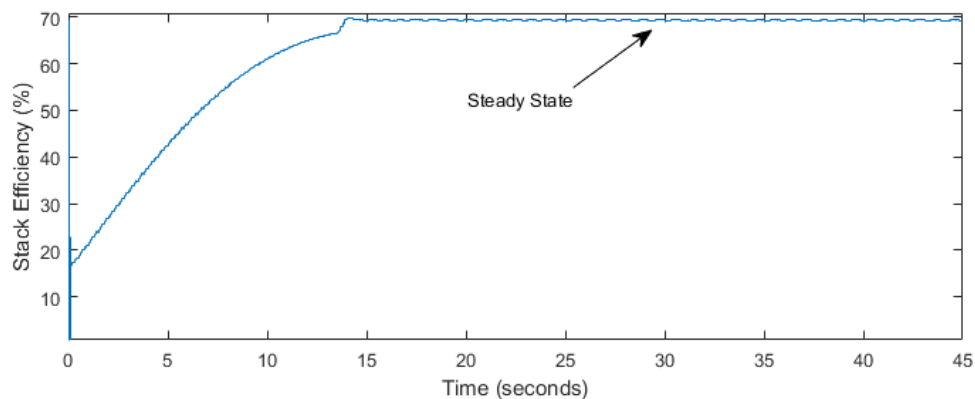
Σχήμα 5.2. Χαρακτηριστική ισχύος – τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου για 65.76 lpm ροής υδρογόνου.



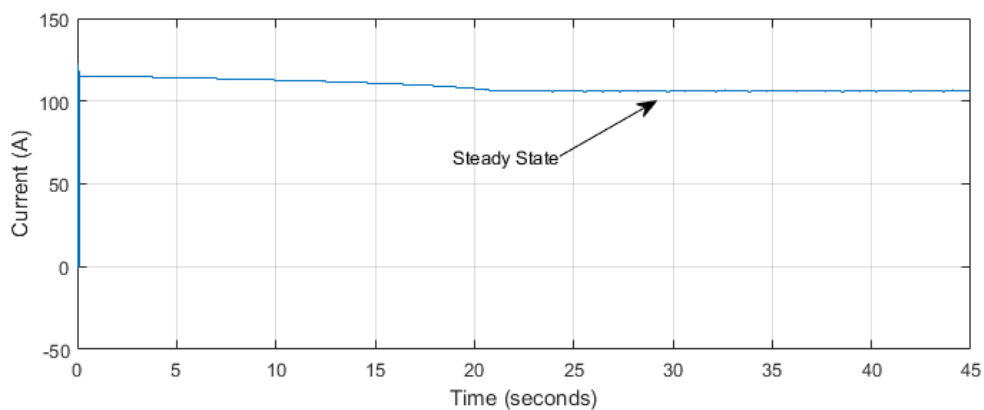
Σχήμα 5.3. Ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 65.76 lpm ροής υδρογόνου.



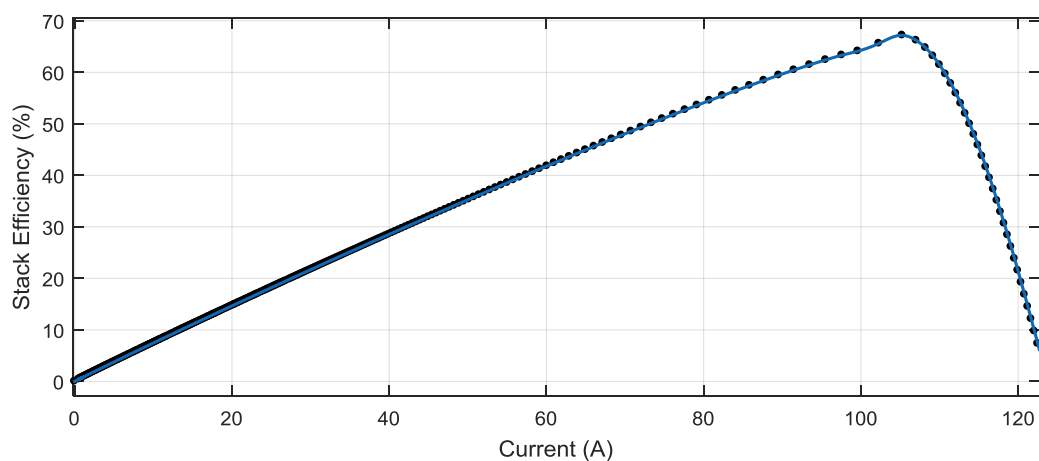
Σχήμα 5.4. Τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 65.76 lpm ροής υδρογόνου.



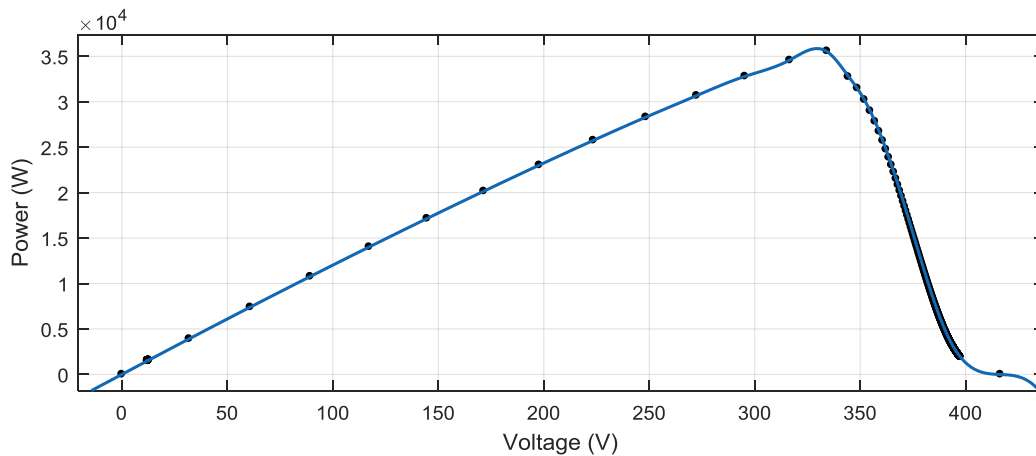
Σχήμα 5.5. Βαθμός απόδοση της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 65.76 lpm ροής υδρογόνου.



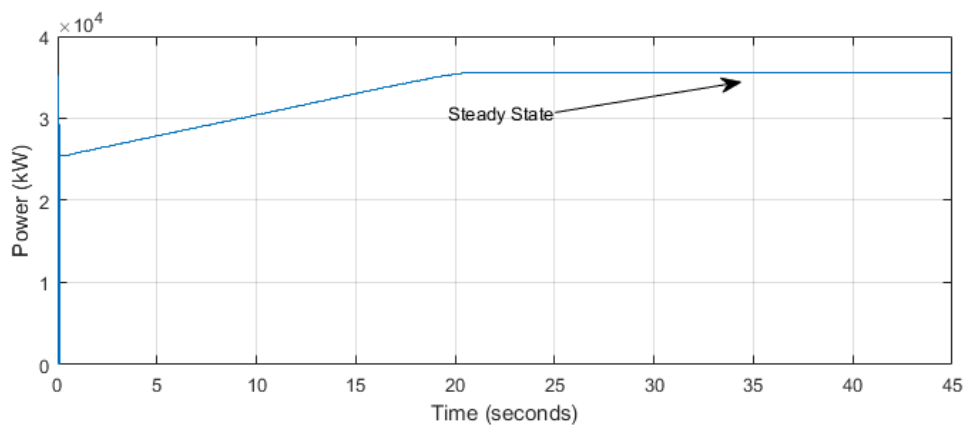
Σχήμα 5.6. Ρεύμα κυψέλης με MPPT – P&O για 65.76 lpm ροής υδρογόνου.



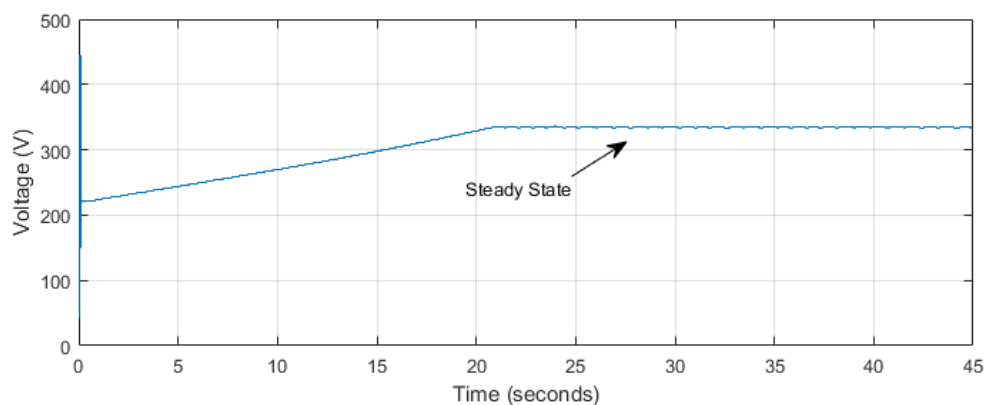
Σχήμα 5.7. Χαρακτηριστική απόδοσης – ρεύματος για 131.5 lpm ροής υδρογόνου.



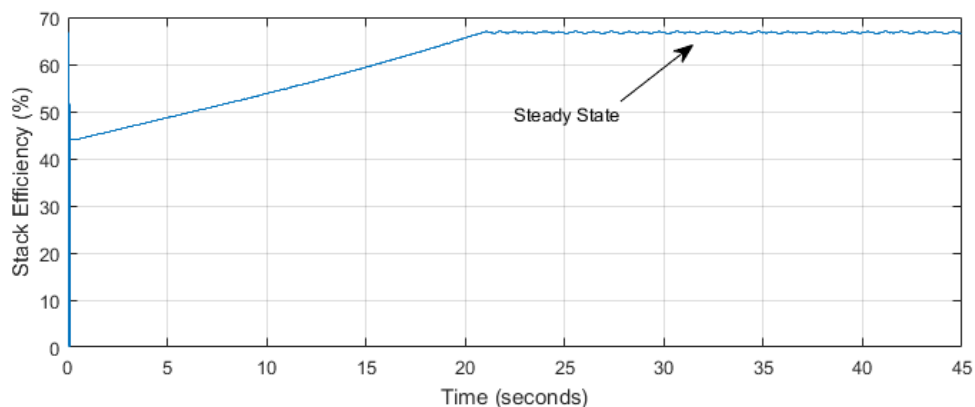
Σχήμα 5.8. Χαρακτηριστική ισχύος – τάσης για 131.5 lpm ροής υδρογόνου.



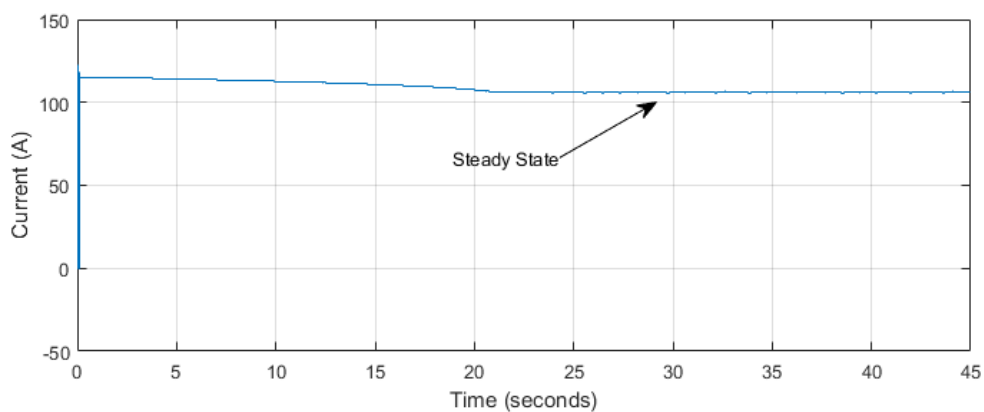
Σχήμα 5.9. Ισχύς κυψέλης με MPPT – P&O για 131.5 lpm ροής υδρογόνου.



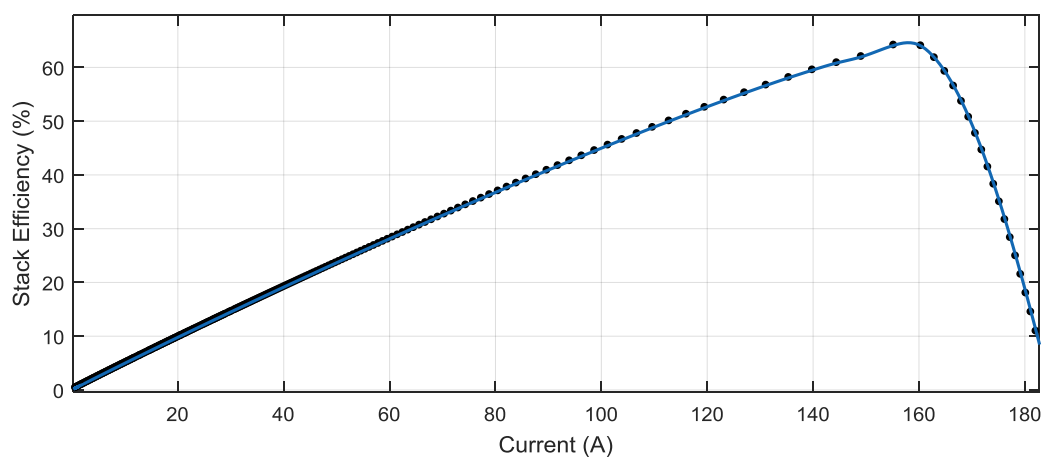
Σχήμα 5.10. Τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 131.5 lpm ροής υδρογόνου.



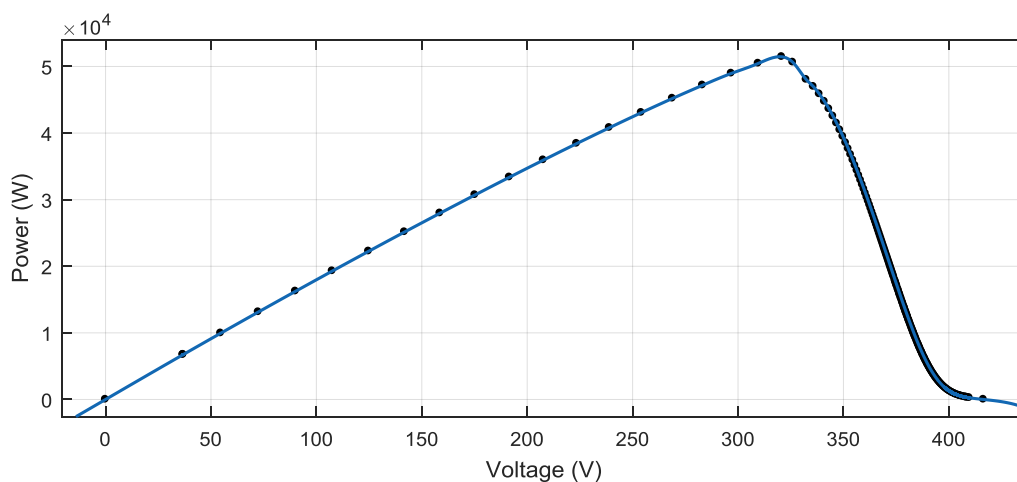
Σχήμα 5.11. Απόδοση κυψέλης με MPPT – P&O για 131.5 lpm ροής υδρογόνου.



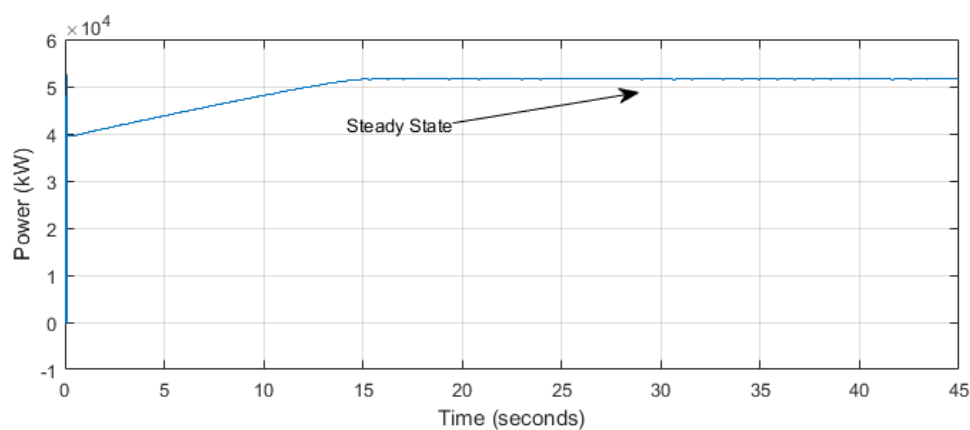
Σχήμα 5.12. Ρεύμα κυψέλης με MPPT – P&O για 131.5 lpm ροής υδρογόνου.



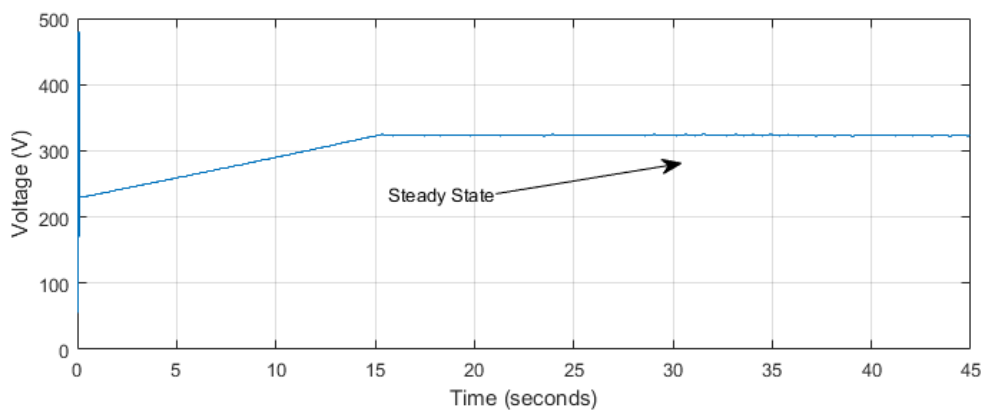
Σχήμα 5.13. Χαρακτηριστική απόδοσης – ρεύματος για 197.3 lpm ροής υδρογόνου.



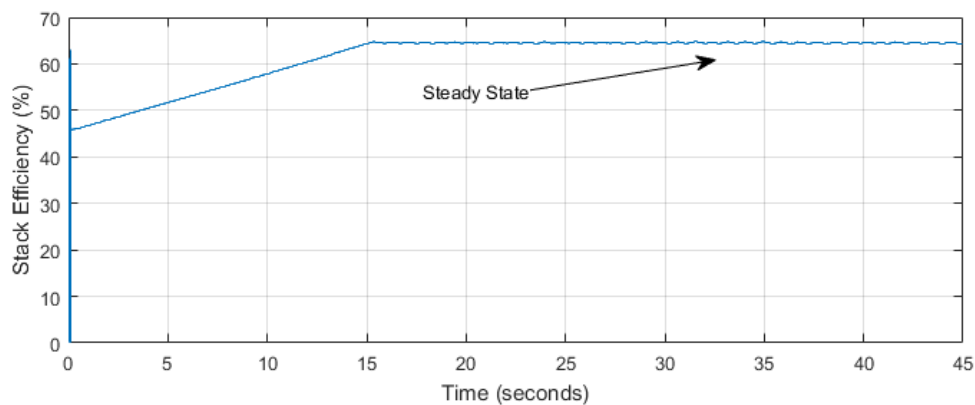
Σχήμα 5.14. Χαρακτηριστική ισχύος – τάσης για 197.3 lpm ροής υδρογόνου.



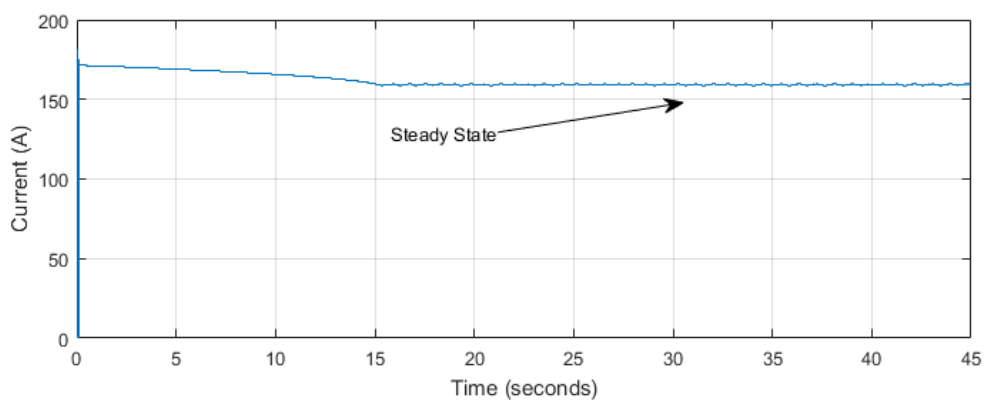
Σχήμα 5.15. Ισχύς κυψέλης με MPPT – P&O για 197.3 lpm ροής υδρογόνου.



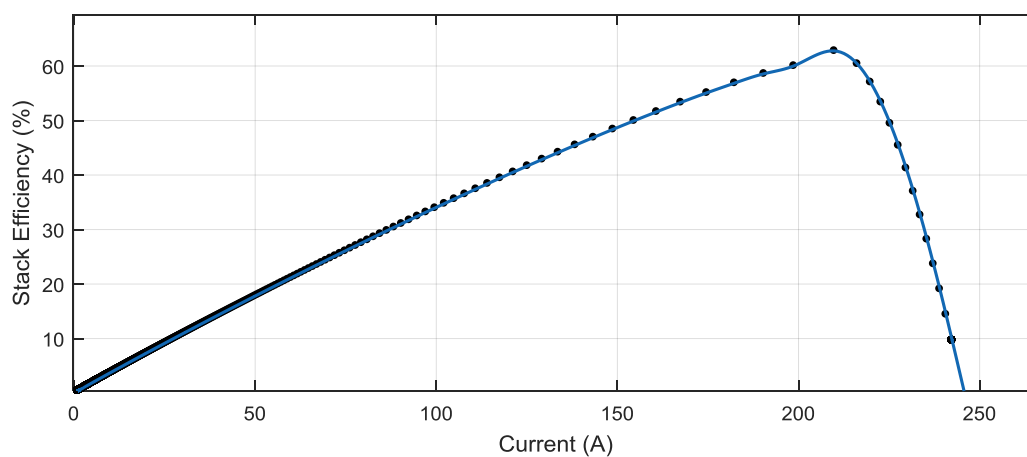
Σχήμα 5.16. Τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 197.3 lpm ροής υδρογόνου.



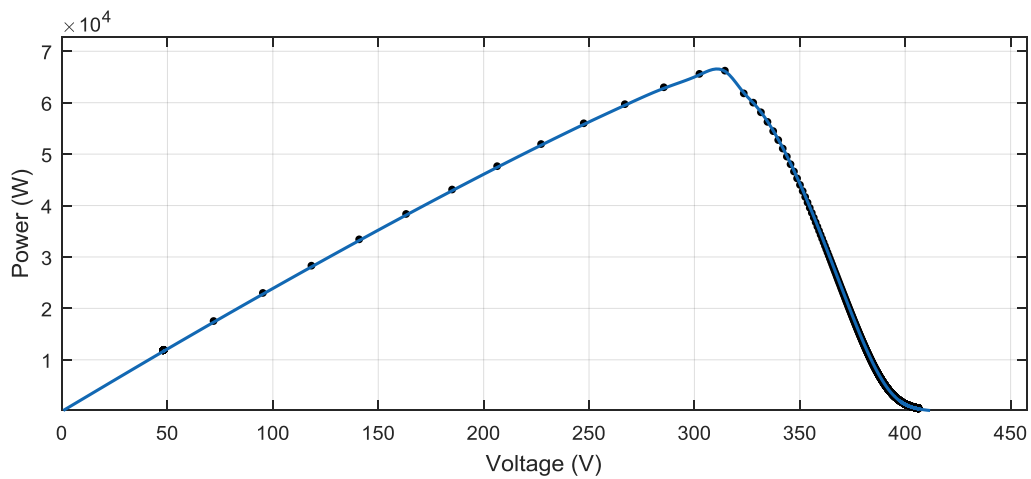
Σχήμα 5.17. Απόδοση κυψέλης με MPPT – P&O για 197.3 lpm ροής υδρογόνου.



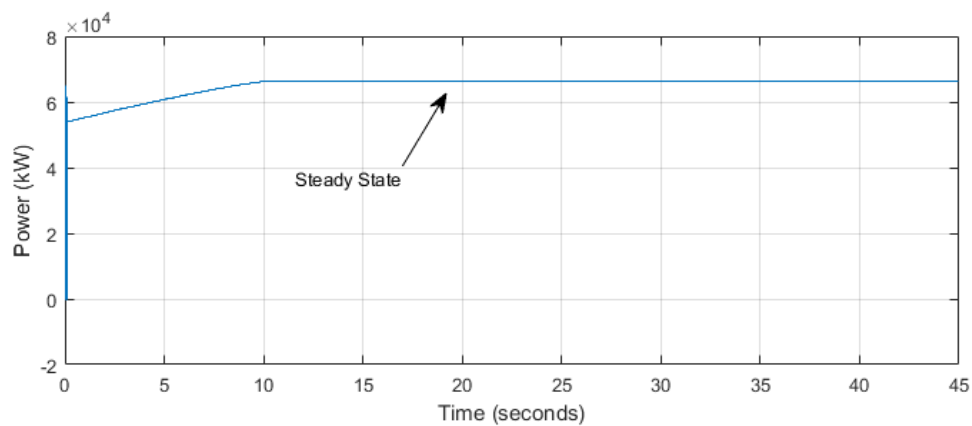
Σχήμα 5.18. Ρεύμα κυψέλης με MPPT – P&O για 197.3 lpm ροής υδρογόνου.



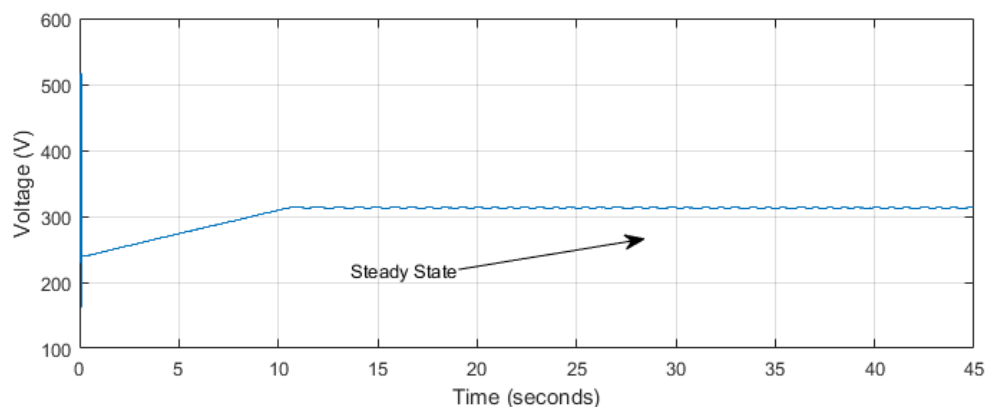
Σχήμα 5.19. Χαρακτηριστική απόδοσης – ρεύματος για 263 lpm ροής υδρογόνου.



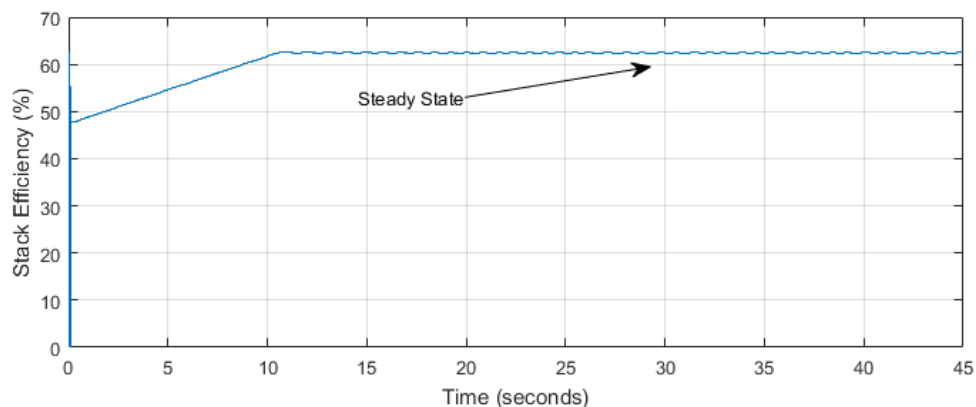
Σχήμα 5.20. Χαρακτηριστική ισχύος – τάσης για 263 lpm ροής υδρογόνου.



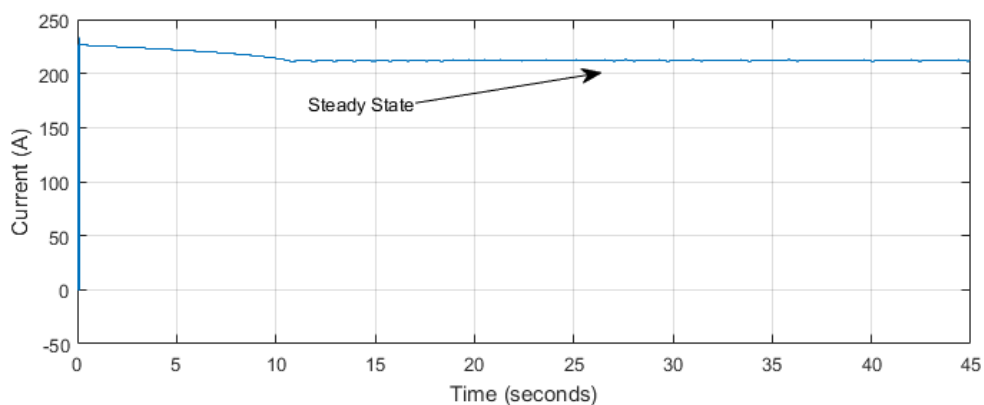
Σχήμα 5.21. Ισχύς κυψέλης με MPPT – P&O, για 263 lpm ροής υδρογόνου.



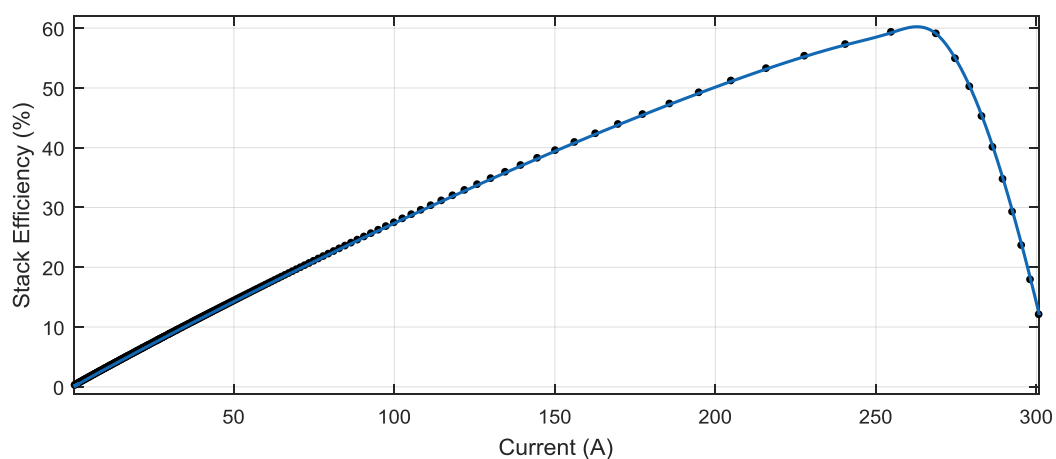
Σχήμα 5.22. Τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 263 lpm ροής υδρογόνου.



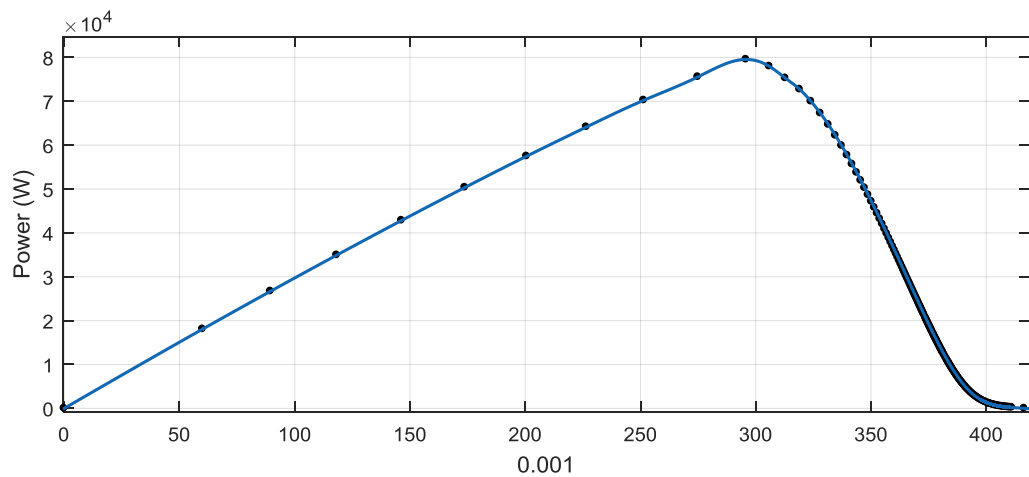
Σχήμα 5.23. Απόδοση κυψέλης με MPPT – P&O για 263 lpm ροής υδρογόνου.



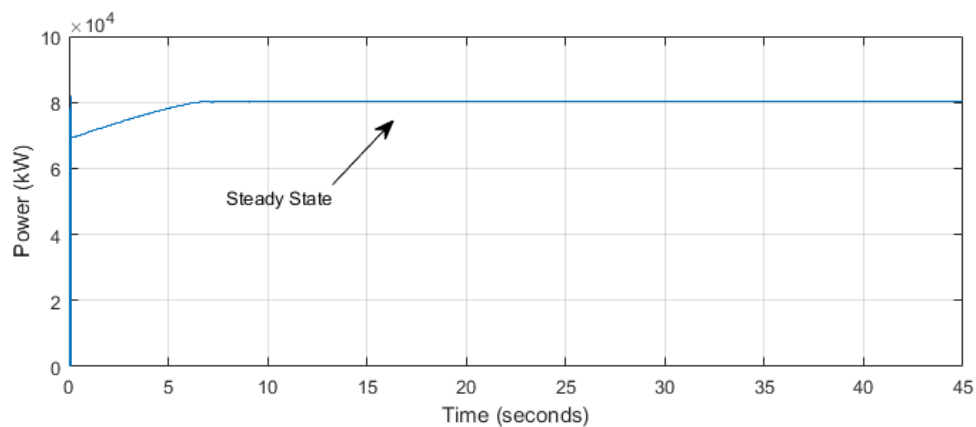
Σχήμα 5.24. Ρεύμα κυψέλης με MPPT – P&O για 263 lpm ροής υδρογόνου.



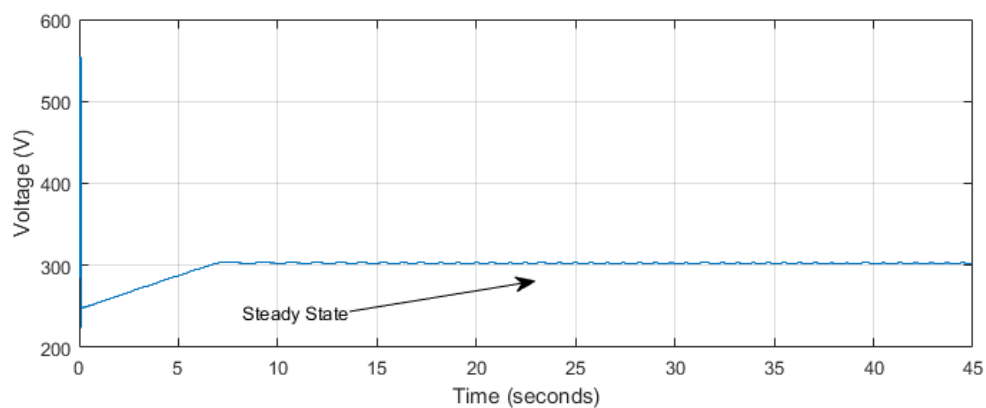
Σχήμα 5.25. Χαρακτηριστική απόδοσης – ρεύματος για 328.8 lpm ροής υδρογόνου.



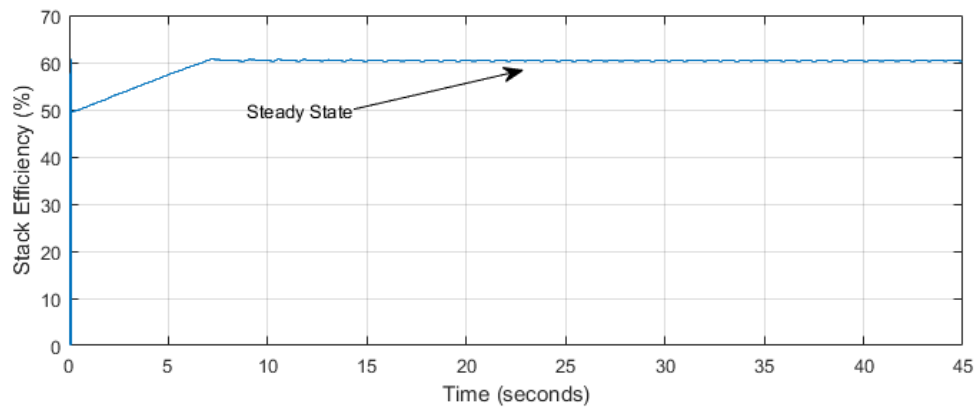
Σχήμα 5.26. Χαρακτηριστική ισχύος – τάσης για 328.8 lpm ροής υδρογόνου.



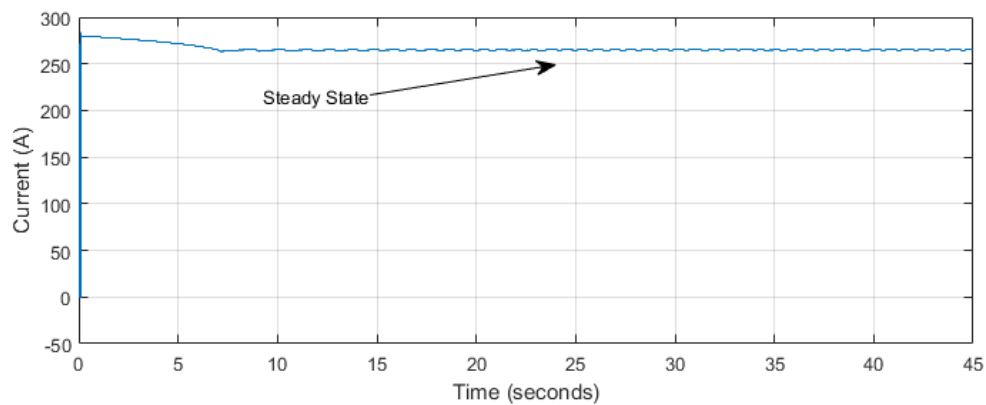
Σχήμα 5.27. Ισχύς κυψέλης με MPPT – P&O για 328.8 lpm ροής υδρογόνου.



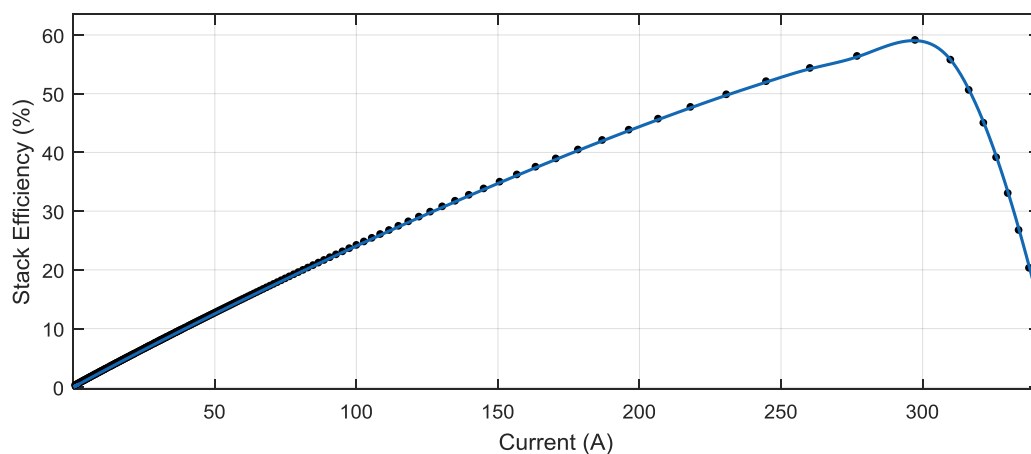
Σχήμα 5.28. Τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 328.8 lpm ροής υδρογόνου.



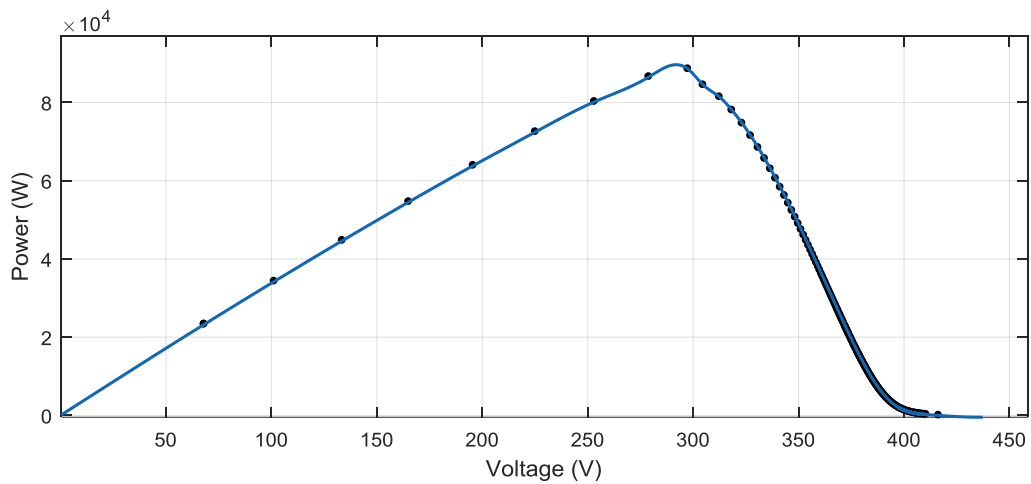
Σχήμα 5.29. Απόδοση κυψέλης με MPPT – P&O για 328.8 lpm ροής υδρογόνου.



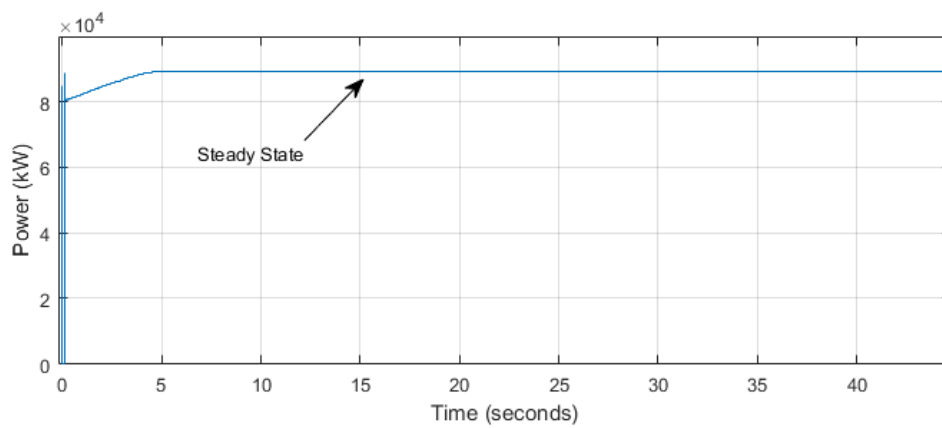
Σχήμα 5.30. Ρεύμα κυψέλης με MPPT – P&O για 328.8 lpm ροής υδρογόνου.



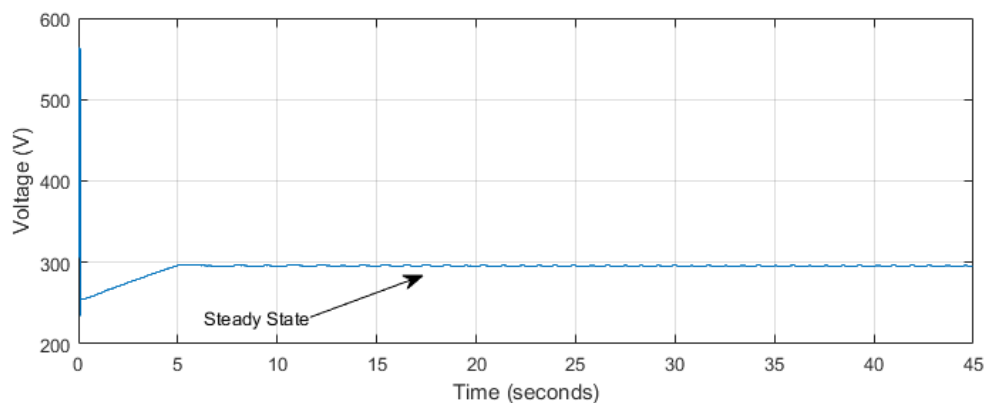
Σχήμα 5.31. Χαρακτηριστική απόδοσης – ρεύματος για 374.8 lpm ροής υδρογόνου.



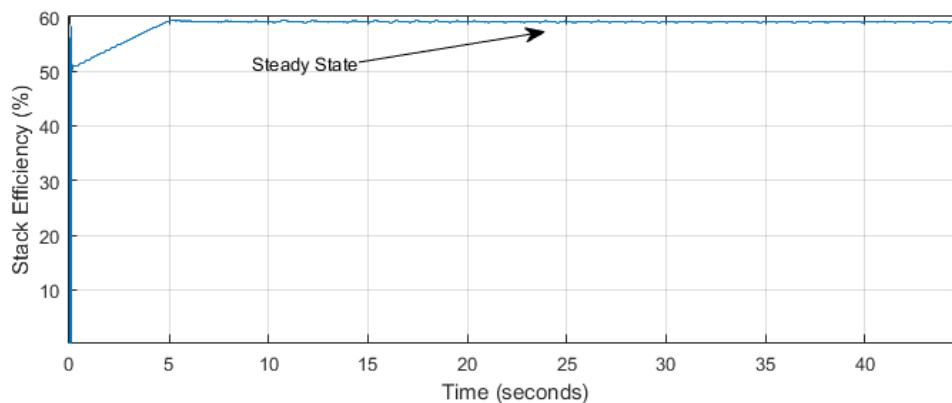
Σχήμα 5.32. Χαρακτηριστική ισχύος – τάσης για 374.8 lpm ροής υδρογόνου.



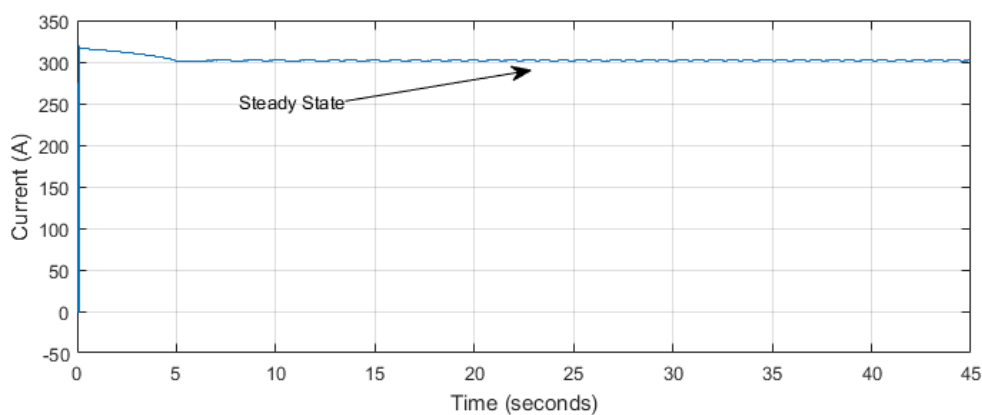
Σχήμα 5.33. Ισχύς κυψέλης με MPPT – P&O για 374.8 lpm ροής υδρογόνου.



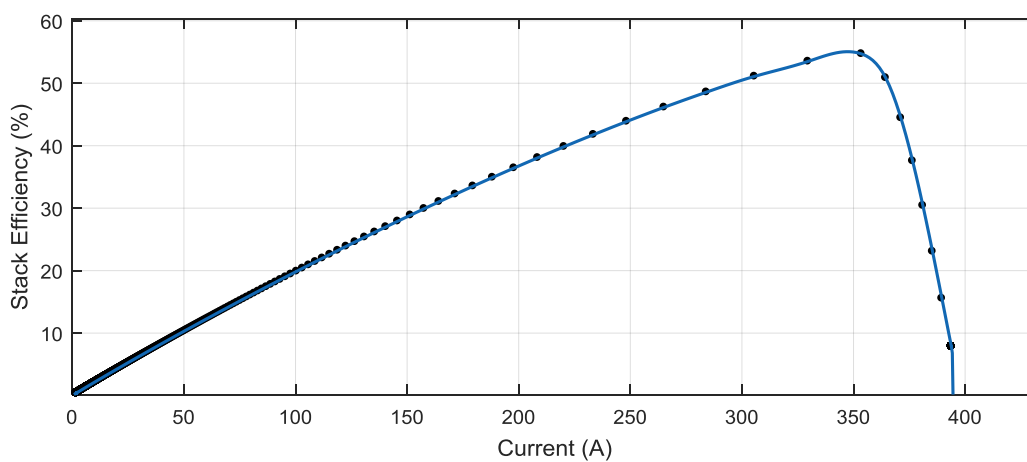
Σχήμα 5.34. Τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 374.8 lpm ροής υδρογόνου.



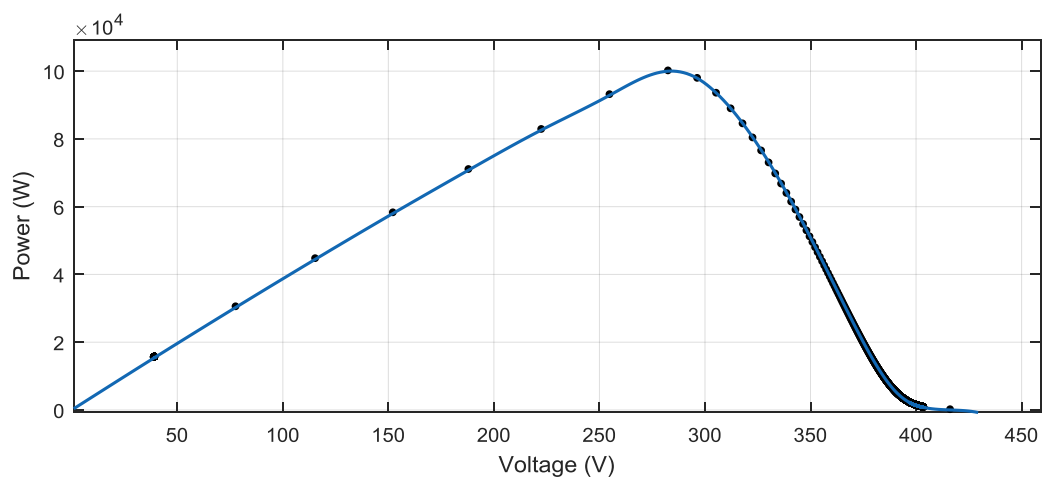
Σχήμα 5.35. Απόδοση κυψέλης με MPPT – P&O για 374.8 lpm ροής υδρογόνου.



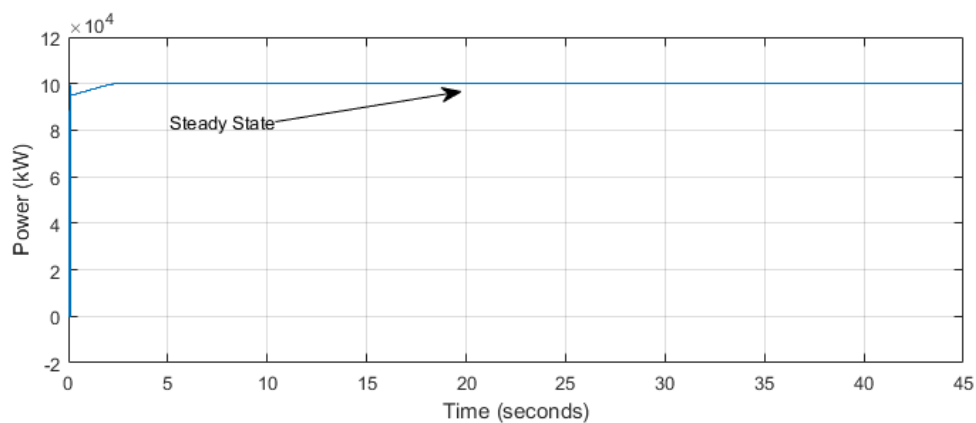
Σχήμα 5.36. Ρεύμα κυψέλης με MPPT – P&O για 374.8 lpm ροής υδρογόνου.



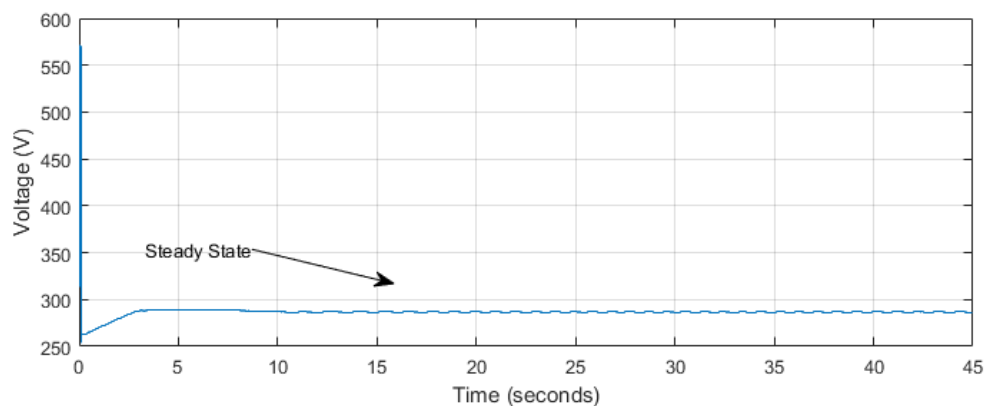
Σχήμα 5.37. Χαρακτηριστική απόδοσης – ρεύματος για 456.7 lpm ροής υδρογόνου.



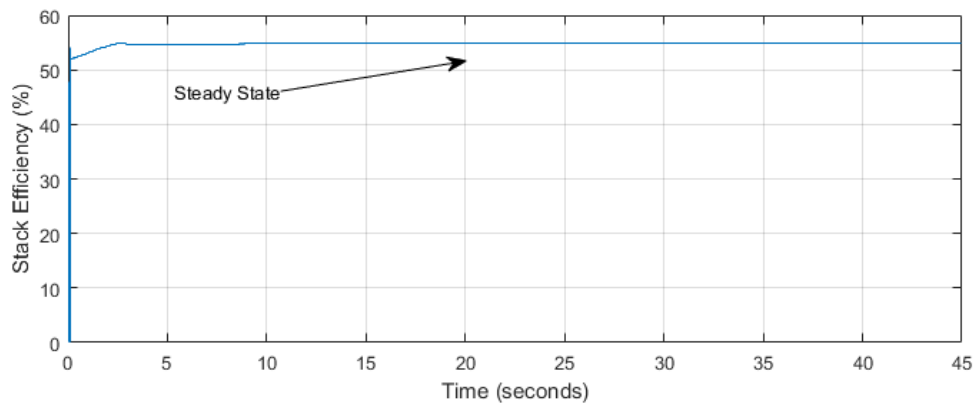
Σχήμα 5.38. Χαρακτηριστική ισχύος – τάσης για 456.7 lpm ροής υδρογόνου.



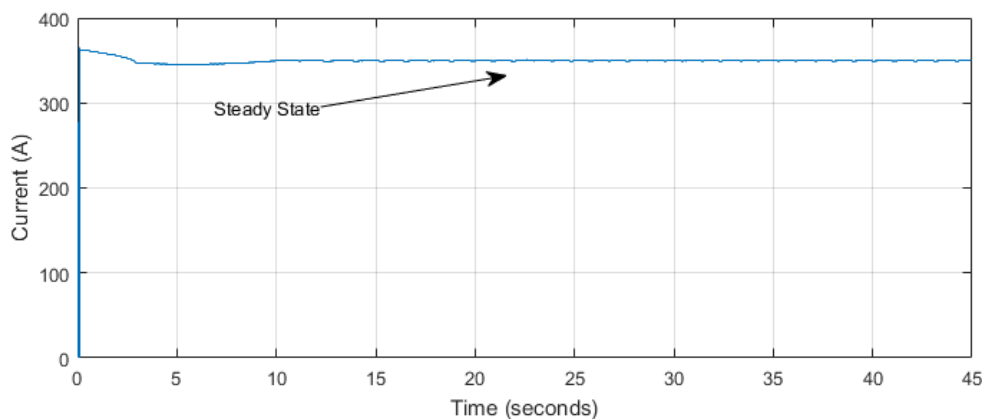
Σχήμα 5.39. Ισχύς κυψέλης με MPPT – P&O για 456.7 lpm ροής υδρογόνου.



Σχήμα 5.40. Τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου με MPPT – P&O για 456.7 lpm ροής υδρογόνου.



Σχήμα 5.41. Απόδοση κυψέλης με MPPT – P&O για 456.7 lpm ροής υδρογόνου.



Σχήμα 5.42. Ρεύμα κυψέλης με MPPT – P&O για 456.7 lpm ροής υδρογόνου.

5.1.2 Προσομοίωση κίνησης οχήματος

Και τα δύο συστήματα διαχείρισης ενέργειας προσομοιώθηκαν με ίδια ακριβώς συστήματα τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι μόνες αλλαγές βρίσκονται στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας του καθ' ενός. Επιπλέον κάθε κύκλος οδήγησης προσομοιώθηκε για διαφορετική τιμή SoC φόρτισης και αποφόρτισης μπαταρίας. Σε όλες τις προσομοιώσεις η τιμή SoC της μπαταρίας κατά την εκκίνηση του οχήματος είναι πάντα χαμηλότερη της τιμής κατωφλίου φόρτισης. Με τον τρόπο αυτόν δίνεται η δυνατότητα σε όλους τους κύκλους οδήγησης να πραγματοποιηθεί μια πλήρης φόρτιση της μπαταρίας, καθώς μερικοί κύκλοι οδήγησης έχουν μικρό χρόνο προσομοίωσης..

Παρακάτω θα αναλυθούν όλες οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον κύκλο οδήγησης NEDC, έπειτα με FTP, WLTP class 3 και τέλος με ArtMW 150. Επίσης θα παρουσιαστούν με αύξουσα σειρά ποσοστού χρήσης μπαταρίας. Δηλαδή πρώτα θα σχολιαστεί η τιμή κατωφλίου 60 % - 90%, μετά η 40 % - 80 % και τέλος 35 % - 85 %.

Πρέπει να αναφερθεί ότι τα γραφήματα της ταχύτητα του οχήματος, του πεταλιού του οδηγού και της ροπής αναφοράς της ηλεκτρικής μηχανής ταυτίζονται για κάθε προσομοίωση όμοιου κύκλου οδήγησης και για αυτό και παραθέτονται μια φορά.

EMS_1

Κύκλος Οδήγησης: NEDC

- SoC 60 % – 90 %

Αρχικά παρατηρείται πως η ταχύτητα του οχήματος (Σχήμα 5.44) εμφανίζει μια μικρή απόκλιση σε σύγκριση με αυτή του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.43). Αυτό οφείλεται στην χαμηλή ταχύτητα απόκρισης του PI controller (εικονικός οδηγός, παράγραφος 4.1.6) στις μεταβολές της ταχύτητας του κύκλου οδήγησης NEDC. Επιπλέον ο κύκλος οδήγησης εκτελείται δύο φορές στην διάρκεια της προσομοίωσης, ώστε ο όγκος των δεδομένων σύγκρισης να είναι επαρκής.

Κατά την εκκίνηση του οχήματος η τιμή του SoC, είναι χαμηλότερη της τιμή κατωφλίου (< 60%), το οποίο σηματοδοτεί την έναρξη λειτουργίας της κυψέλης υδρογόνου (Σχήμα 5.49). Η κυψέλη υδρογόνου ξεκινά την λειτουργία της με σκοπό την κάλυψη φορτίου για την τροφοδότηση της ηλεκτρικής μηχανής και την παραγωγή ρεύματος για την φόρτιση της μπαταρίας. Στα πρώτα 280 sec (Σχήμα 5.47) η ισχύς που παράγει η κυψέλη αγγίζει τα 2.5 kW ενώ οι αυξήσεις ισχύος που παρατηρούνται οφείλονται στην αύξηση ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής. Αντίθετα οι μειώσεις της ισχύος κατά διαστήματα οφείλονται στην ικανότητα της ηλεκτρικής μηχανής να λειτουργεί και ως γεννήτρια, δηλαδή το regenerative braking. Η λειτουργία της κυψέλης σταματά την λειτουργία της όταν η τιμή του SoC αγγίζει την τιμή κατωφλίου (90 %). Από τα 280 sec και μετά η κυψέλη υδρογόνου απενεργοποιείται και την κίνηση του οχήματος αναλαμβάνει η μπαταρία.

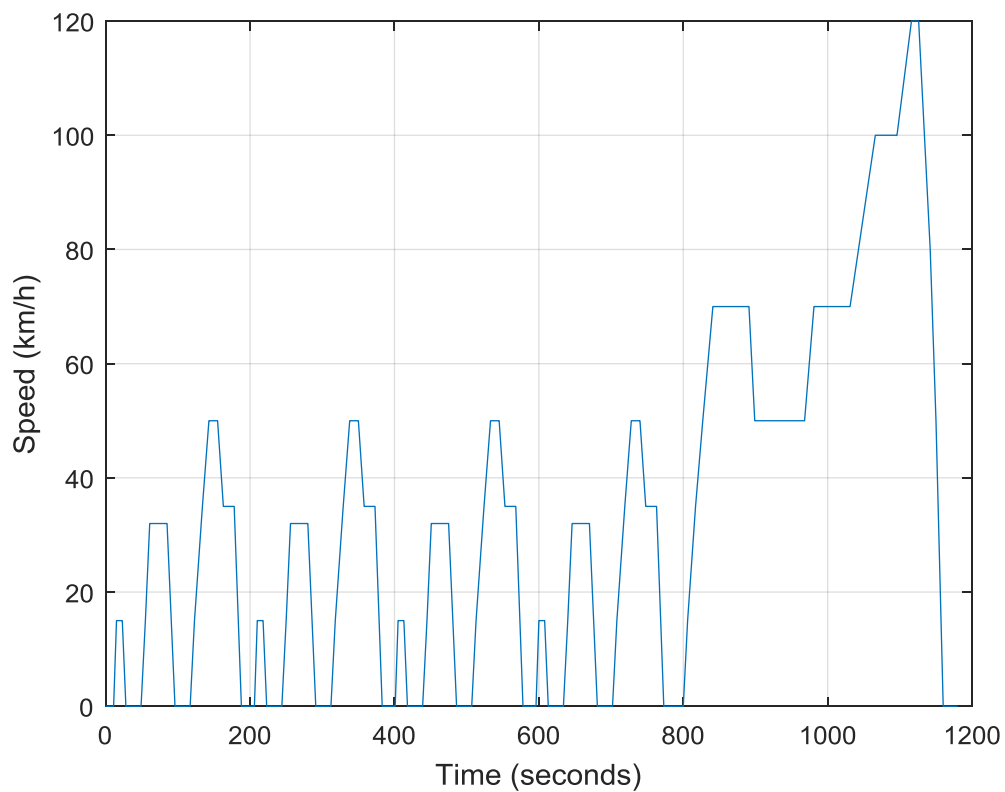
Μετά την πάροδο των 1000 sec, και ενώ η τιμή του SoC είναι αρκετά υψηλή (μεγαλύτερη της τιμής κατωφλίου 60%), η ισχύς που παράγει η μπαταρία δεν αρκεί για την κίνηση του οχήματος με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται η κυψέλη υδρογόνου. Στην συνέχεια, στα 1500 sec η τιμή SoC της μπαταρίας μειώνεται ξανά, ενεργοποιώντας την κυψέλη και επαναλαμβάνεται ο κύκλος φόρτισης και τροφοδότησης της ηλεκτρικής μηχανής (Σχήμα 5.48).

Επιπλέον, η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας γίνεται αντιληπτή στο Σχήμα 5.51, όπου στο πρώτο διάστημα των 500 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη καυσίμου με το ρεύμα να ξεκινά από τα -70 A και σταδιακά να μειώνεται μέχρι την παύση της φόρτισης. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking, στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

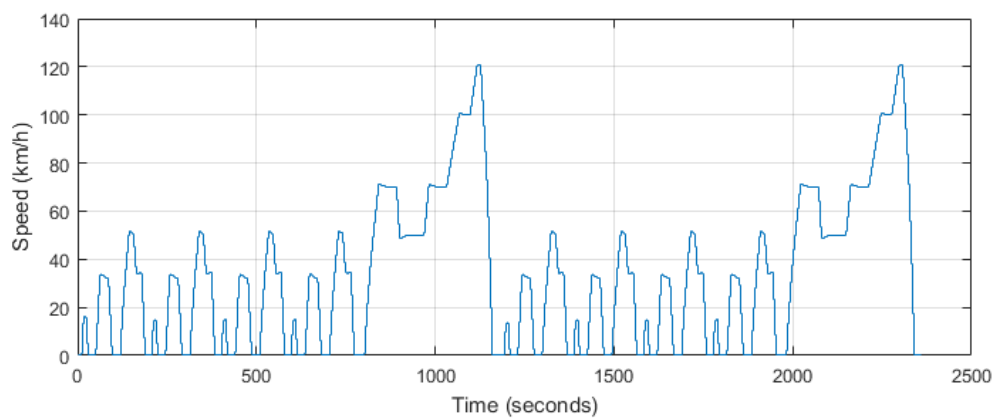
Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.50. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 280 sec και 1550 sec έως 1770 sec) παρατηρείται αύξηση της τάσης από τα 344 V έως τα 364 V.

Στο Σχήμα 5.45 είναι εμφανείς οι εντολές από το πετάλι του οδηγού, ενώ στο Σχήμα 5.46, παρουσιάζεται η ροπή αναφοράς της ηλεκτρικής μηχανής. Τα δύο γραφήματα είναι όμοια αφού η ηλεκτρική μηχανή ανταποκρίνεται στις εντολές του οδηγού.

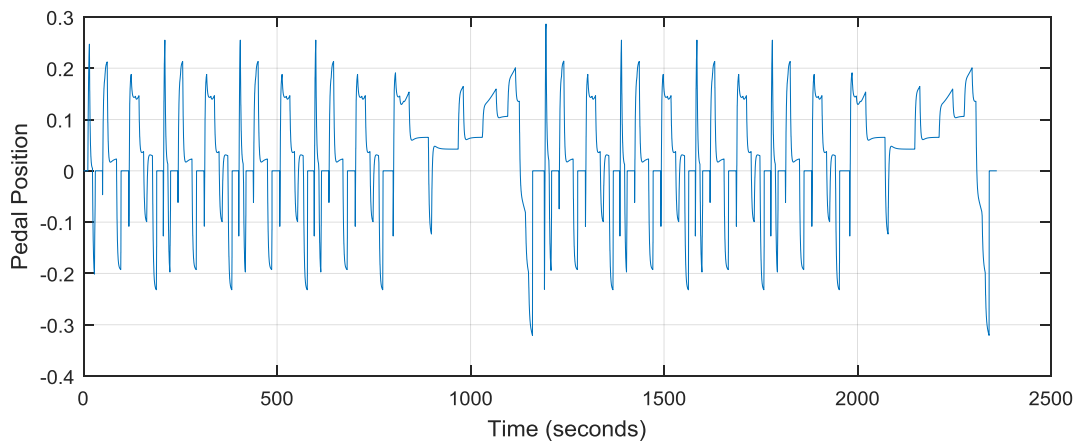
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 81.529$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.22) και της εξίσωσης 4.3.



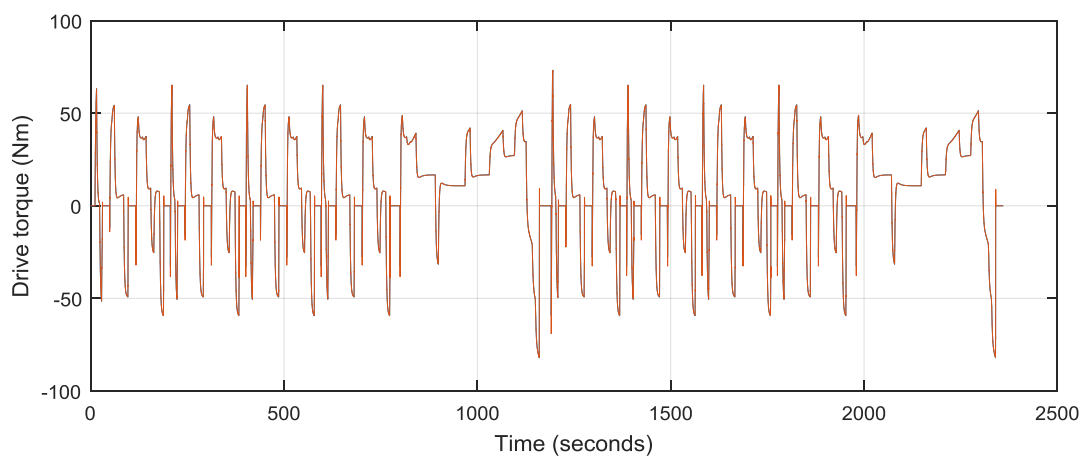
Σχήμα 5.43. Ταχύτητα κύκλου οδήγησης NEDC.



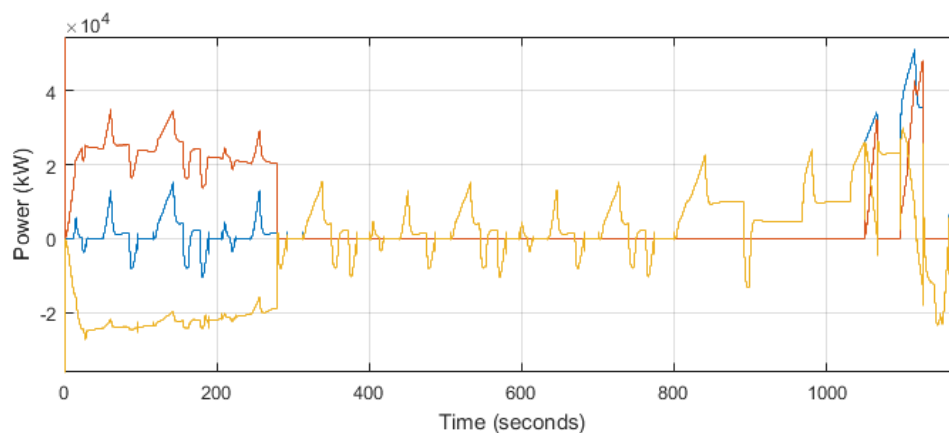
Σχήμα 5.44. Ταχύτητα οχήματος στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



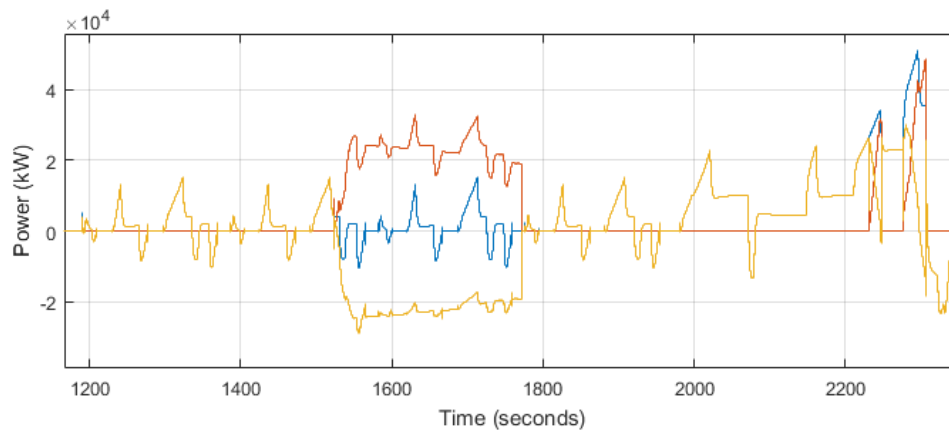
Σχήμα 5.45. Το σήμα που αντιστοιχεί στη θέση του πεταλιού του οδηγού.



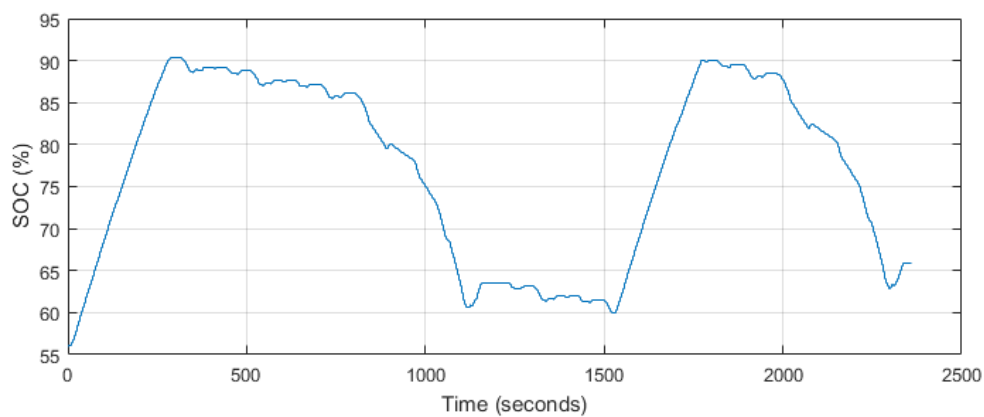
Σχήμα 5.46. Ροπή αναφοράς ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



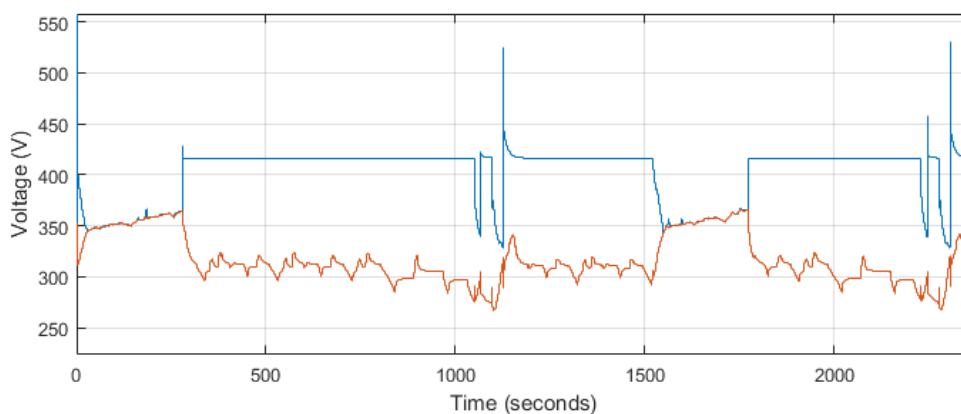
Σχήμα 5.47. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



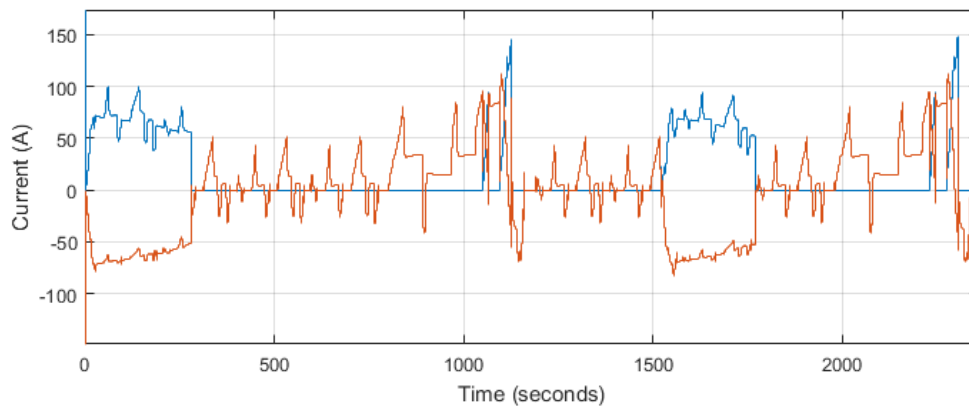
Σχήμα 5.48. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – πορτοκαλί, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



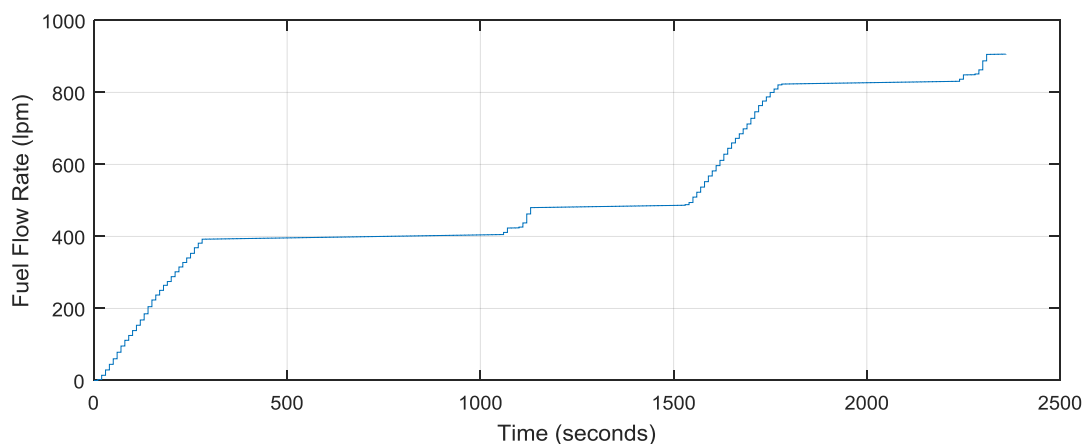
Σχήμα 5.49. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.50. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.51. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.52. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

- SoC 40 % – 80 %

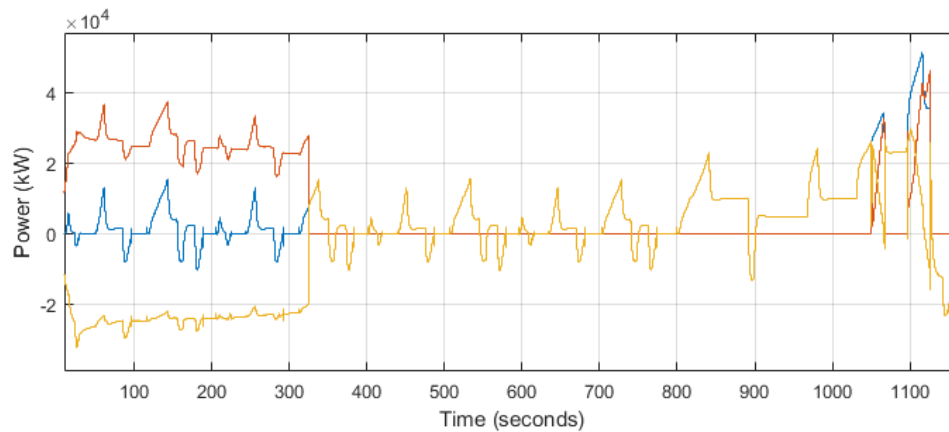
Στην συγκεκριμένη προσομοίωση η αλλαγή η οποία έγινε στο σύστημα είναι η τιμή κατωφλίου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Το σύστημα αναλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι μικρότερη του 40 %, ενώ σταμάτα και ξεκινά τη αποφόρτισή της όταν η τιμή του SoC αγγίζει το 80 % (Σχήμα 5.55). Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει ίδια με τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος, απλά το διάστημα χρήσης και φόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο. Δηλαδή οι κύκλοι φόρτισης της μπαταρίας πραγματοποιούνται στην αρχή και στο τέλος του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.53 και 5.44) επιτρέποντας την κίνηση του οχήματος για μεγαλύτερο διάστημα με μπαταρία.

Επίσης το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας παραμένει το ίδιο με του προηγούμενου συστήματος, ξεκινά από τα -70 A και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC (Σχήμα 5.57). Επιπλέον είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking, στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

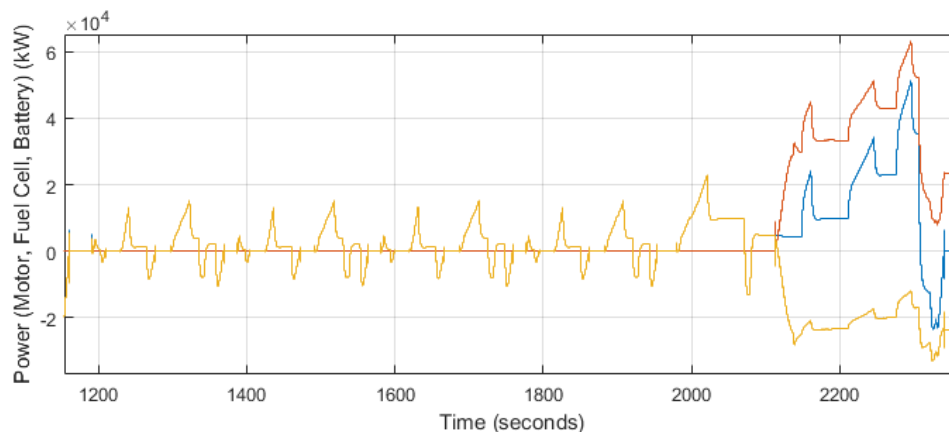
Κατά τα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (Σχήμα 5.56) η τάση κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Δηλαδή η τάση της μπαταρίας κατά την έναρξη φόρτισής της (0 sec), ξεκινά από 342 V

και στο πέρας της φόρτισης (320 sec) αγγίζει τα 355 V. Το ίδιο συμβαίνει και στο τέλος του κύκλου οδήγησης που ξεκινά εκ νέου η φόρτιση της μπαταρίας.

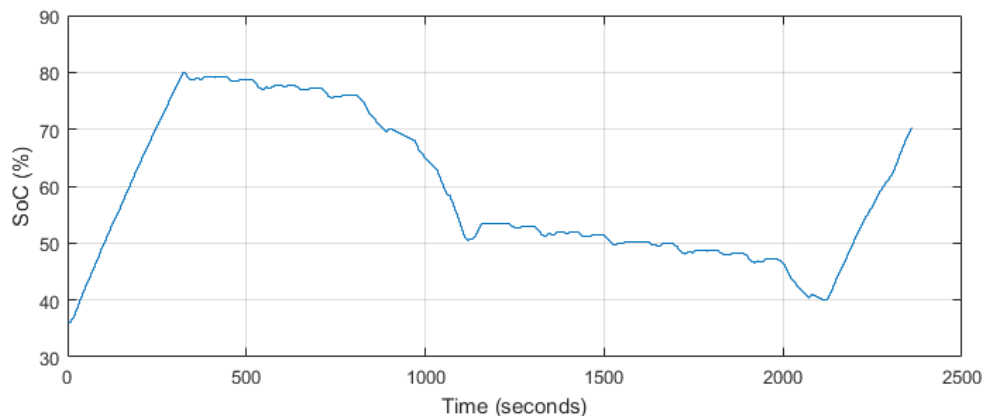
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 103.6$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.58) και της εξίσωσης 4.3.



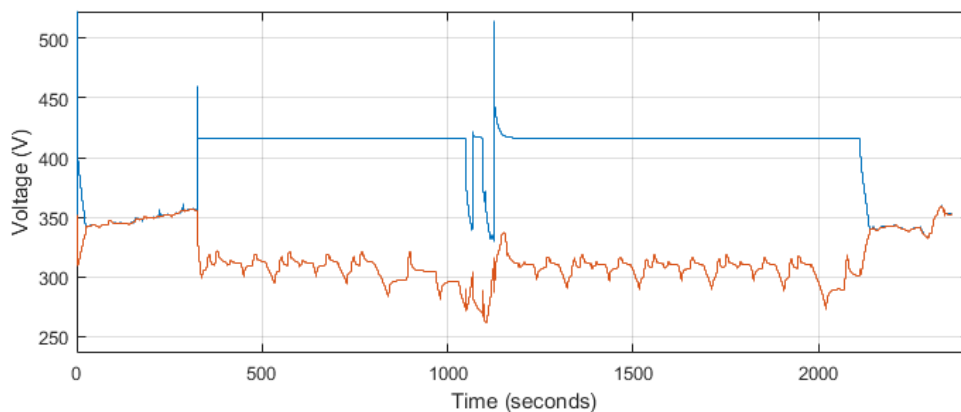
Σχήμα 5.53. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



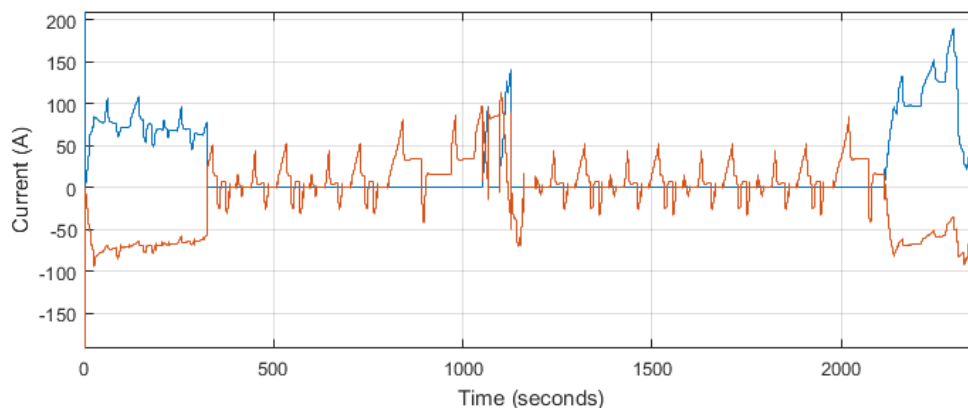
Σχήμα 5.54. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



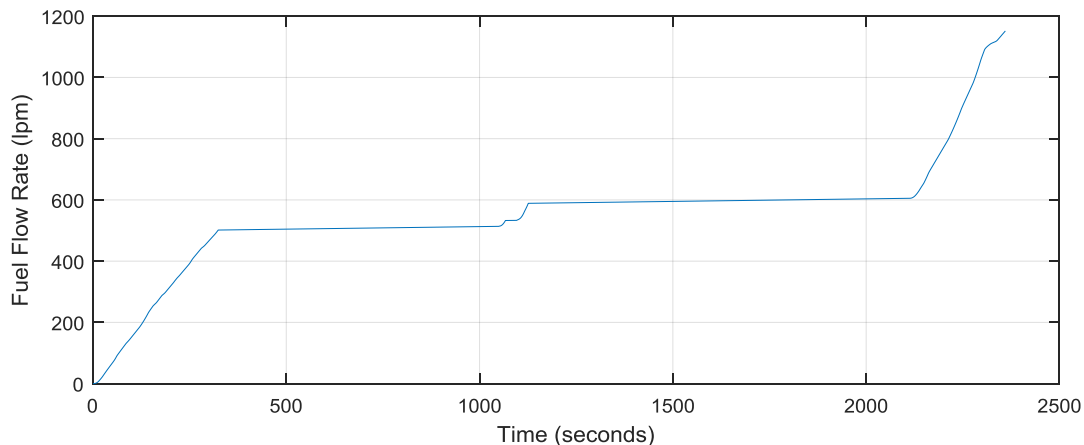
Σχήμα 5.55. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.56. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.57. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.58. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

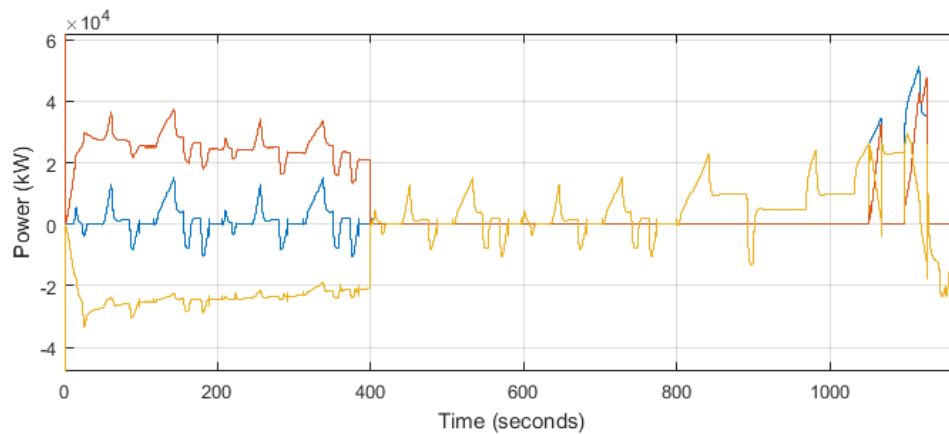
- SoC 35 % – 85 %

Το όχημα στην παρούσα προσομοίωση διατηρεί τα ίδια χαρακτηριστικά με τις προηγούμενες, απλά η χρήση της μπαταρίας γίνεται σε ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό.

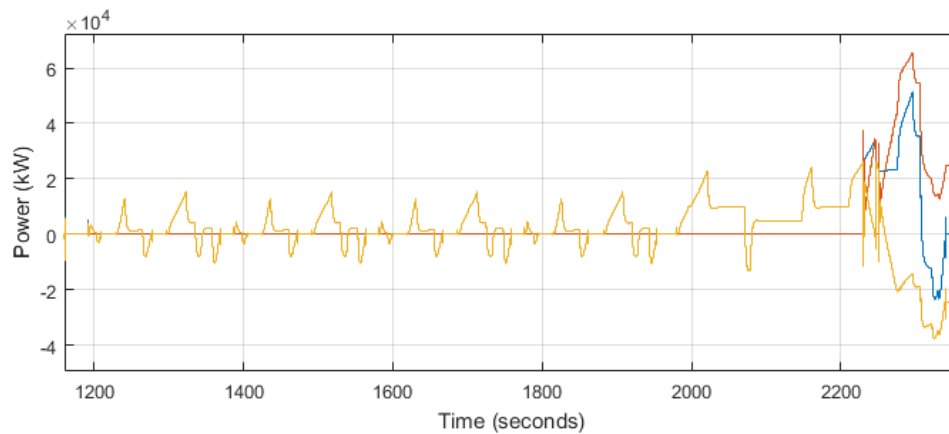
Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει αναλλοίωτη (Σχήμα 5.59 και 5.60). Οι μόνες διαφορές που παρατηρούνται βρίσκονται στο χρόνο φόρτισης της μπαταρίας ο οποίος διαρκεί περισσότερο, όπως επίσης διαρκεί περισσότερο και ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας ως κινητήρια μονάδα ισχύος. Στο Σχήμα 5.61, είναι περισσότερο ορατός ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας, ο οποίος ξεκινά από τα 400 sec και σταματά στα 2260 sec.

Επιπλέον, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας αυξάνεται κατά την εκκίνηση του οχήματος. Αναλυτικότερα ξεκινά από τα -100 A και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC (Σχήμα 5.63) ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές. Η τάση της μπαταρίας εμφανίζει εξίσου διαφορετικές τιμές από τις προηγούμενες δοκιμές. Κατά την έναρξη της φόρτισης βρίσκεται στα 341 V, ενώ κατά το διάστημα φόρτισης στο 85 % του SoC, αγγίζει τα 361 V (Σχήμα 5.62).

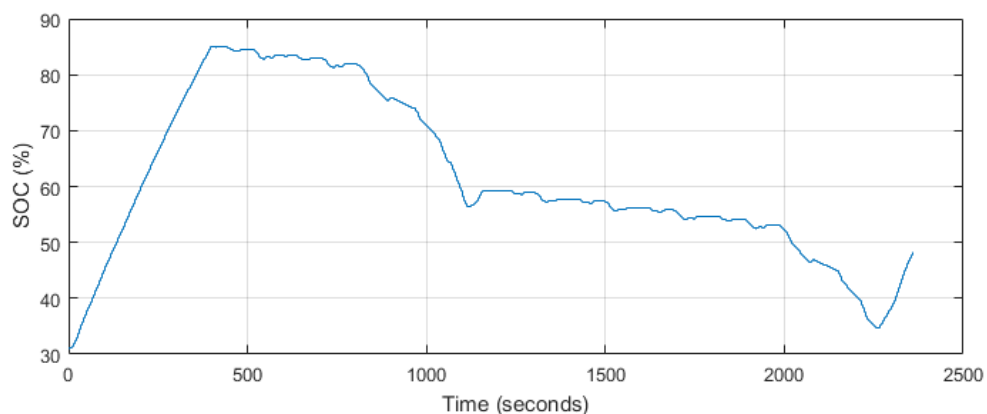
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 88.47$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.64) και της εξίσωσης 4.3.



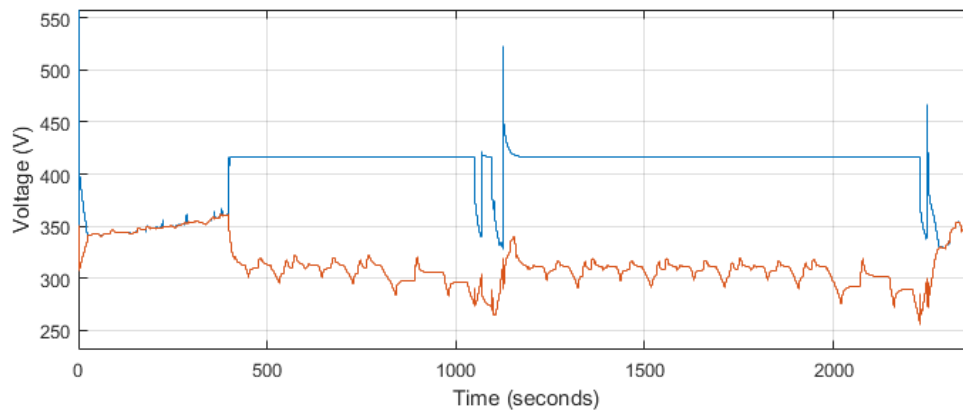
Σχήμα 5.59. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



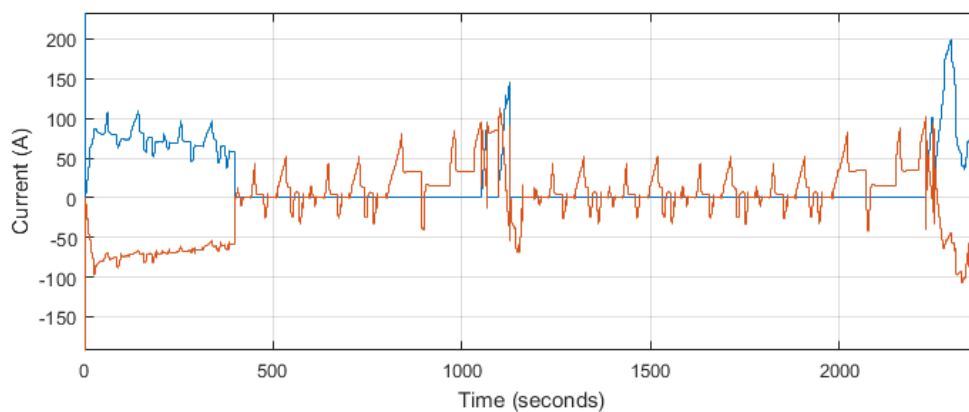
Σχήμα 5.60. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



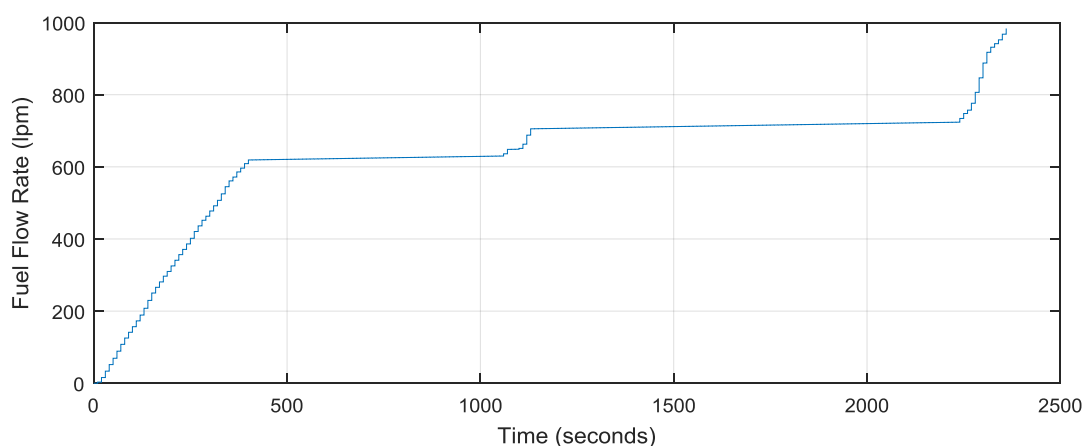
Σχήμα 5.61. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.62. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.63. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.64. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

Κύκλος Οδήγησης: FTP

- SoC 60 % – 90 %

Η ταχύτητα του οχήματος (Σχήμα 5.66) είναι όμοια με την ταχύτητα του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.65), το οποίο αποδεικνύει την σωστή λειτουργία του εικονικού οδηγού. Επίσης, ο κύκλος οδήγησης εκτελείται δύο φορές στην διάρκεια της προσομοίωσης, ώστε ο όγκος δεδομένων σύγκρισης να είναι επαρκής.

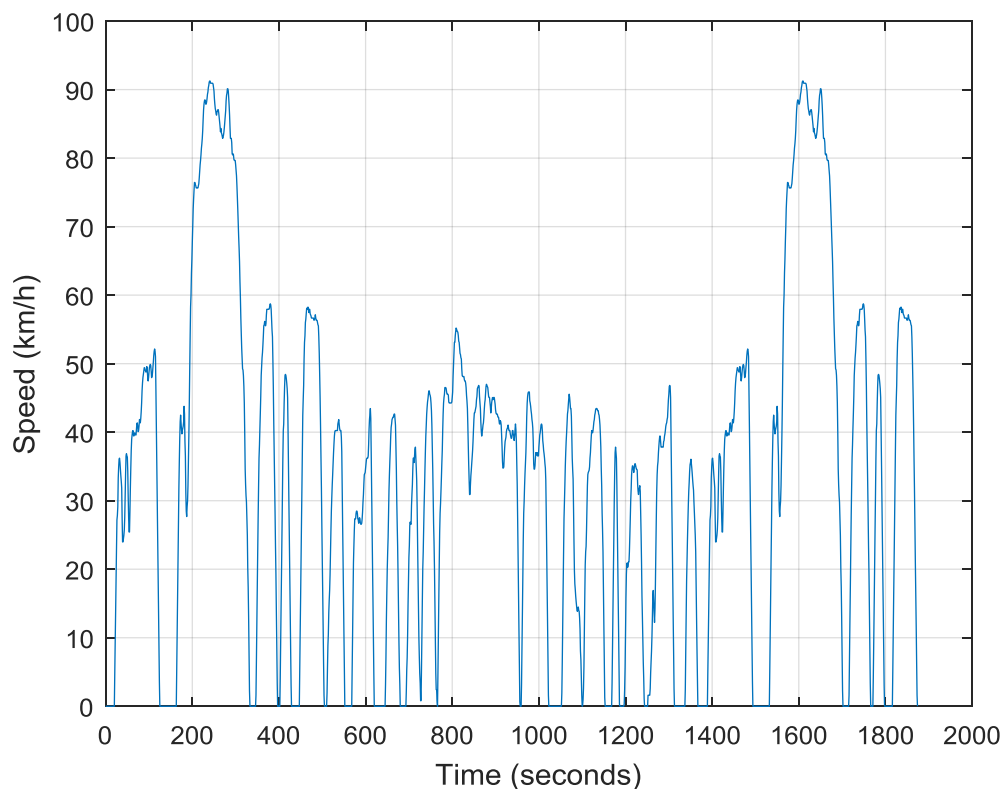
Κατά την εκκίνηση του οχήματος παρατηρείται πως η τιμή του SoC είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου (Σχήμα 5.71), με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της κυψέλης υδρογόνου. Έτσι αυξάνεται η ισχύς που παράγει η κυψέλη (Σχήμα 5.69). Στα πρώτα 300 sec η κίνηση του οχήματος γίνεται εξ' ολοκλήρου από την κυψέλη υδρογόνου ενώ παράλληλα φορτίζεται η μπαταρία. Μετά το πέρας του κύκλου φόρτισης η μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μονάδα παραγωγής ισχύος για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής (300 sec έως 1750 sec). Κατά τη διάρκεια του διαστήματος αυτού και πιο εμφανώς στο 1500 sec και στο 2100 sec, η ισχύς που παράγει η μπαταρία δεν αρκεί για την κίνηση του οχήματος με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται η κυψέλη υδρογόνου για μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό αποδεικνύεται και στο Σχήμα 5.72, όπου η τάση της κυψέλης ενώ φαίνεται σταθερή (ευθεία γραμμή) εμφανίζει μικρές πτώσεις τάσης κατά διαστήματα. Στην συνέχεια, κάθε φορά που η τιμή του SoC είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου ενεργοποιείται η κυψέλη (Σχήμα 5.70). Η φόρτιση της μπαταρίας γίνεται 3 φορές κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.70).

Το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας φαίνεται στο Σχήμα 5.73, όπου στο πρώτο διάστημα των 500 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να ξεκινά από τα -70 A και σταδιακά να μειώνεται μέχρι την παύση της φόρτισης. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking, στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

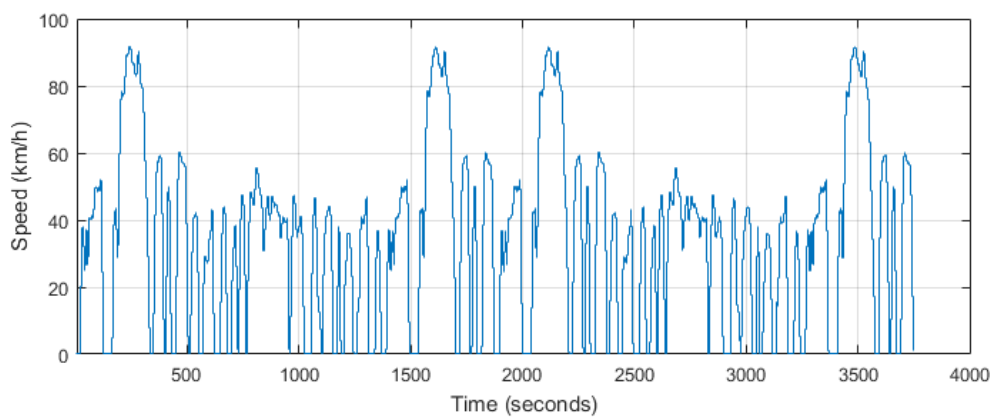
Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.72. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 280 sec, 1750 sec έως 2000 sec και 3450 sec έως 3700 sec) παρατηρείται αύξηση της τάσης από τα 341 V έως τα 360 V.

Στο Σχήμα 5. 67 είναι εμφανείς οι εντολές από το πετάλι του οδηγού, ενώ στο Σχήμα 5. 68, παρουσιάζεται η ροπή αναφοράς της ηλεκτρικής μηχανής. Τα δύο γραφήματα είναι όμοια αφού η ηλεκτρική μηχανή ανταποκρίνεται στις εντολές του οδηγού.

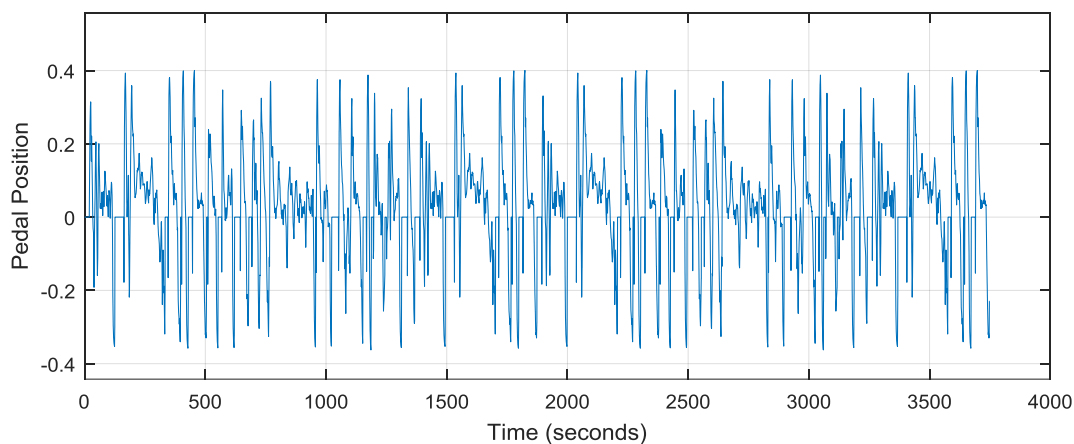
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 126.4$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.74) και της εξίσωσης 4.3.



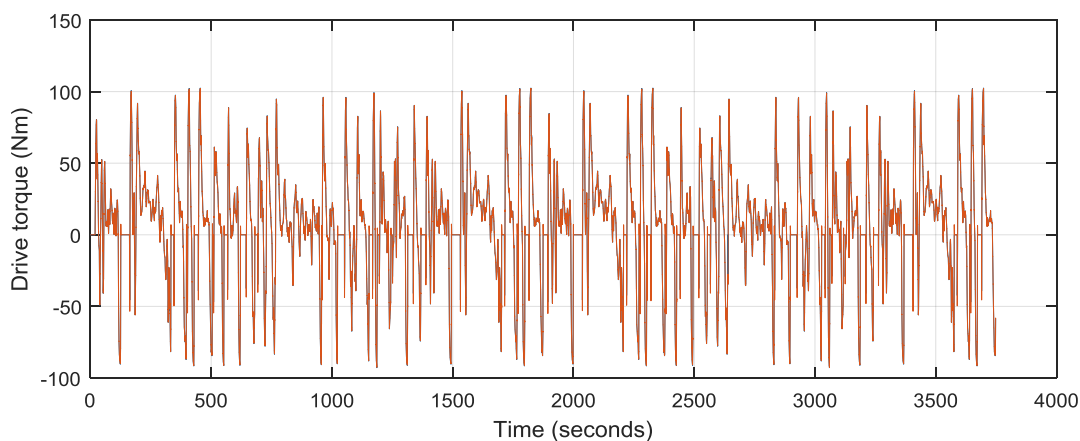
Σχήμα 5.65. Ταχύτητα Κύκλου Οδήγησης FTP.



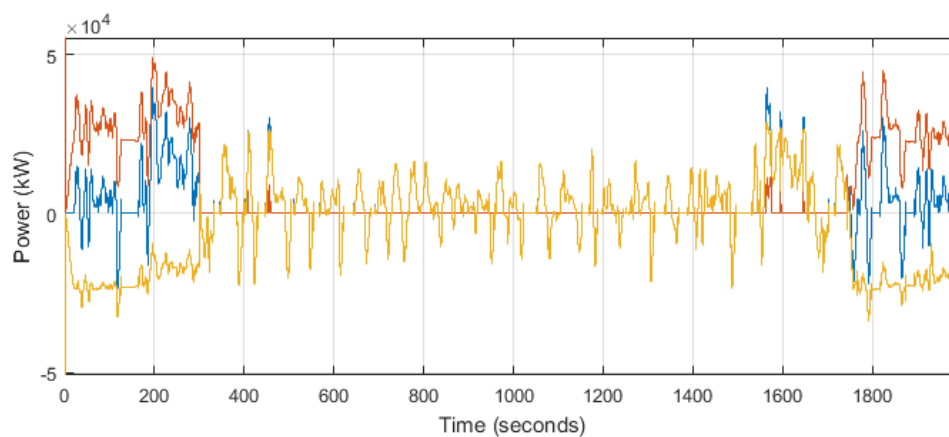
Σχήμα 5.66. Ταχύτητα οχήματος στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



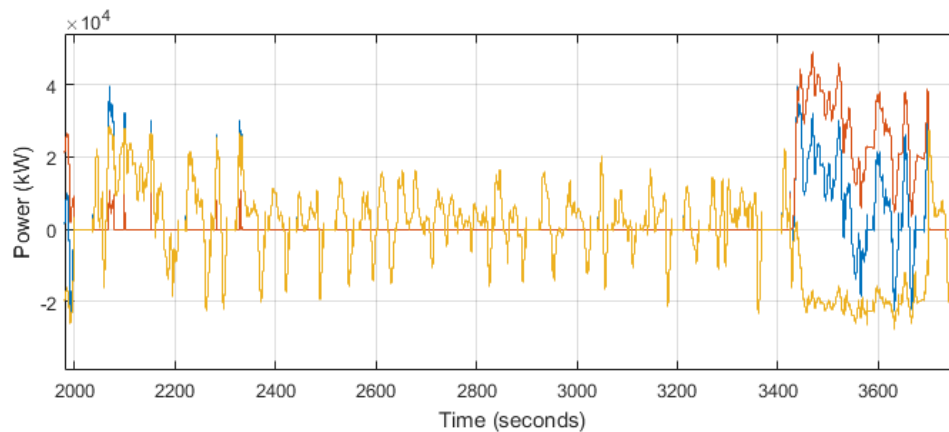
Σχήμα 5.67. Πετάλι οδηγού.



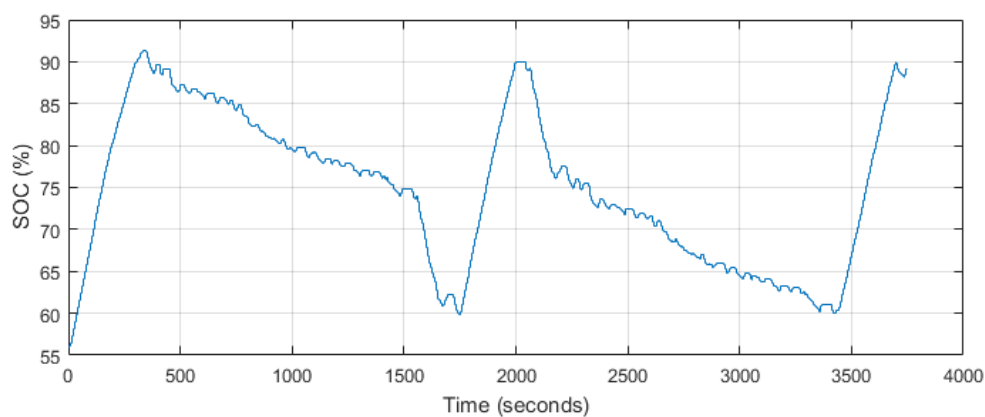
Σχήμα 5.68. Ροπή αναφοράς ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



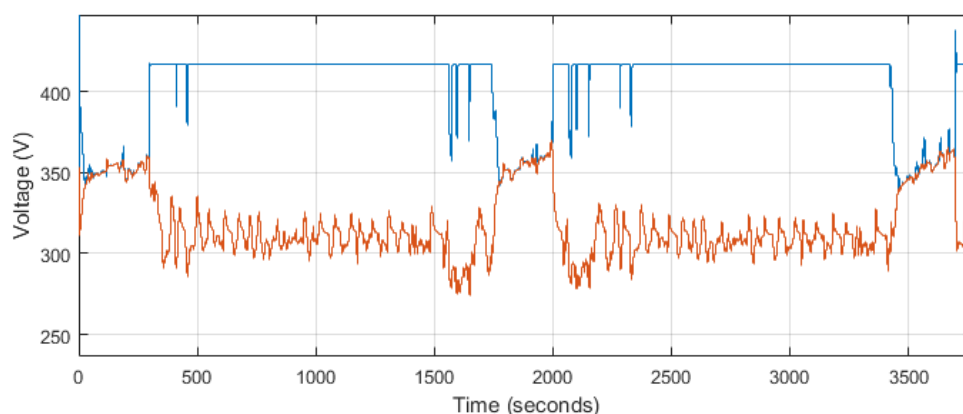
Σχήμα 5.69. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



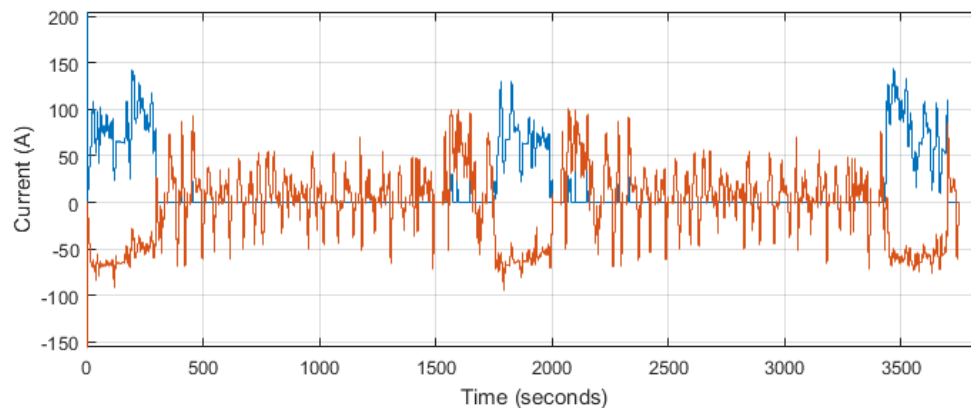
Σχήμα 5.70. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



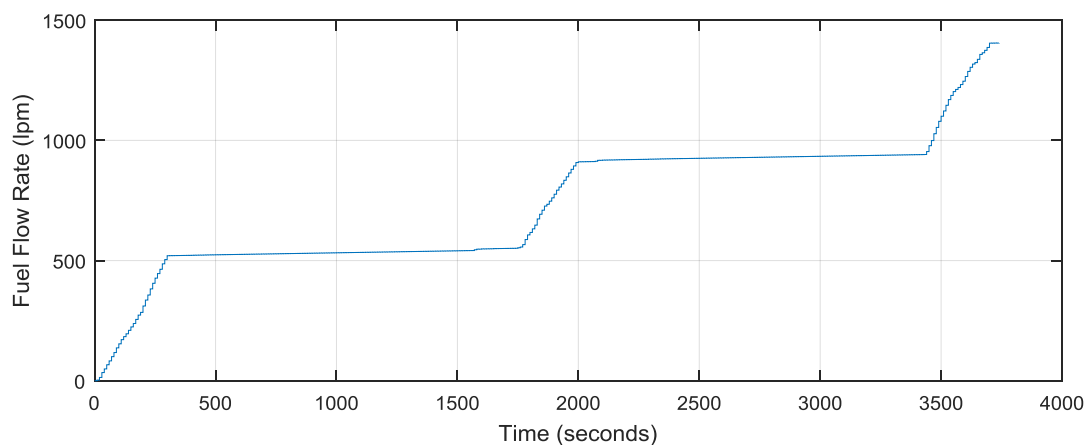
Σχήμα 5.71. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.72. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.73. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.74. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

- SoC 40 % – 80 %

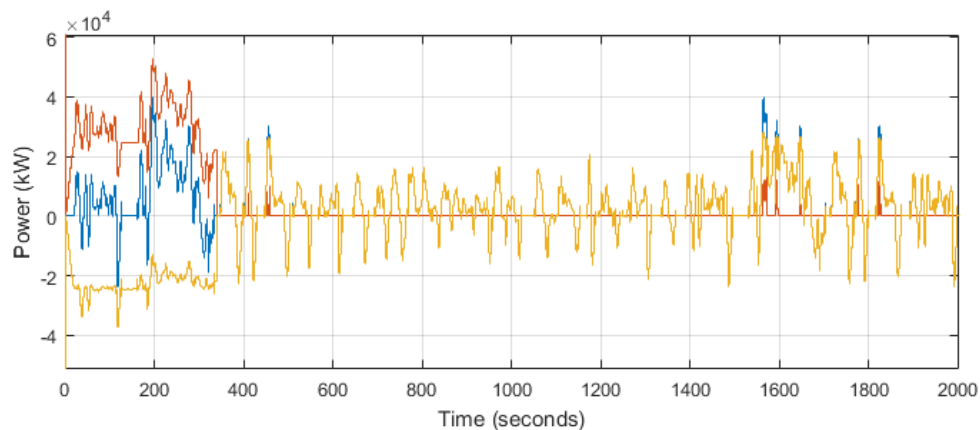
Κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης προσομοίωσης, η αλλαγή της τιμής κατωφλίου δεν επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο την συμπεριφορά του οχήματος. Το σύστημα αναλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι μικρότερη του 40 %, ενώ σταμάτα και ξεκινά τη αποφόρτισή της όταν η τιμή του SoC αγγίζει το 80 % (Σχήμα 5.77). Η λειτουργία των συστημάτων δεν παρουσιάζει διαφορές με τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος, απλά το διάστημα χρήσης και φόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο. Δηλαδή οι κύκλοι φόρτισης της μπαταρίας πραγματοποιούνται στην αρχή και τη μέση του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.75 και 5.76) επιτρέποντας την κίνηση του οχήματος για μεγαλύτερο διάστημα με μπαταρία.

Το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας διακρίνεται στο Σχήμα 5.79. Κατά την φόρτιση (0 sec έως 330 sec, 2100 sec έως 2400 sec) ξεκινά από τα -70 A ενώ μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC (Σχήμα 5.79). Επιπλέον κατά την διαδικασία εκφόρτισης της μπαταρίας είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking, στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

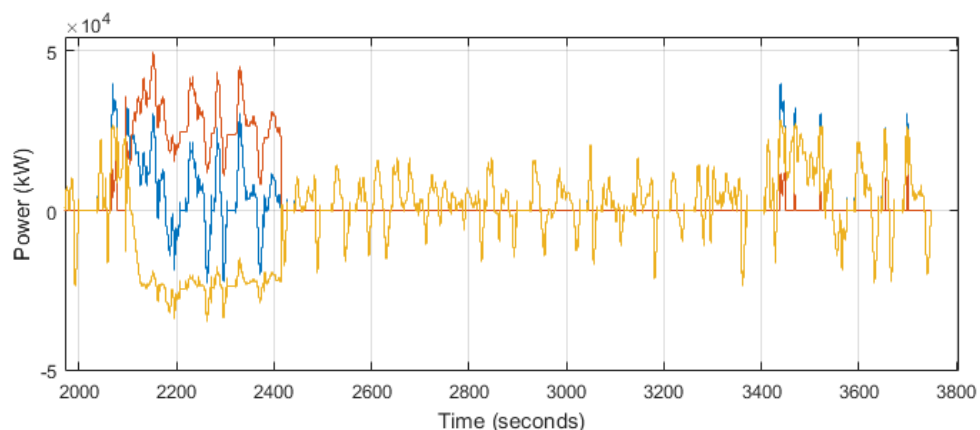
Ακόμη, κατά τα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (Σχήμα 5.78) η τάση κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Δηλαδή η τάση της μπαταρίας κατά την έναρξη φόρτισής της (0 sec),

ξεκινά από 336 V και στο πέρας της φόρτισης (330 sec) αγγίζει τα 358 V. Το ίδιο συμβαίνει και στη μέση του κύκλου οδήγησης που ξεκινά εκ νέου η φόρτιση της μπαταρίας.

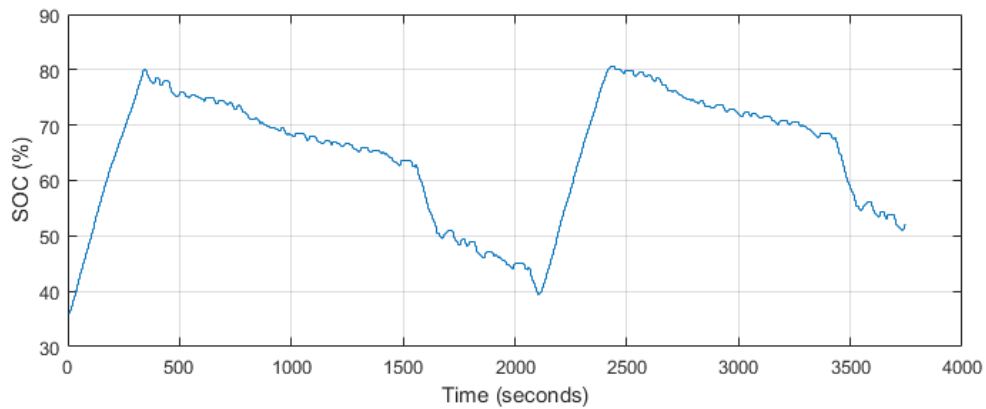
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 112.13$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.80) και της εξίσωσης 4.3.



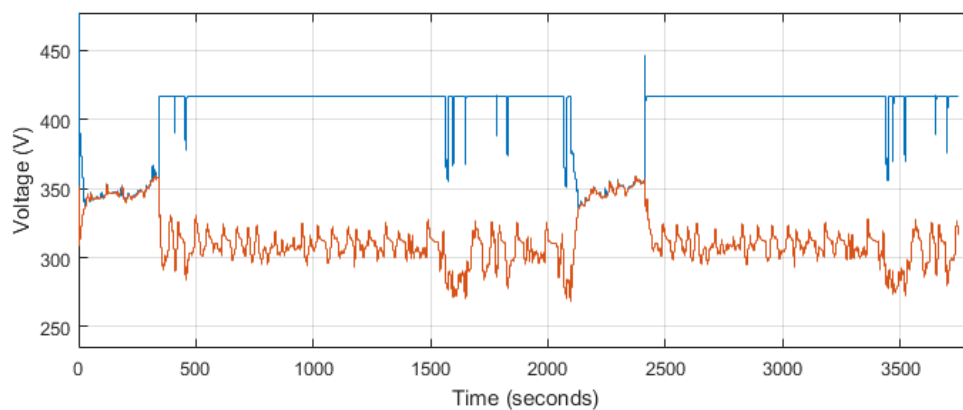
Σχήμα 5.75. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



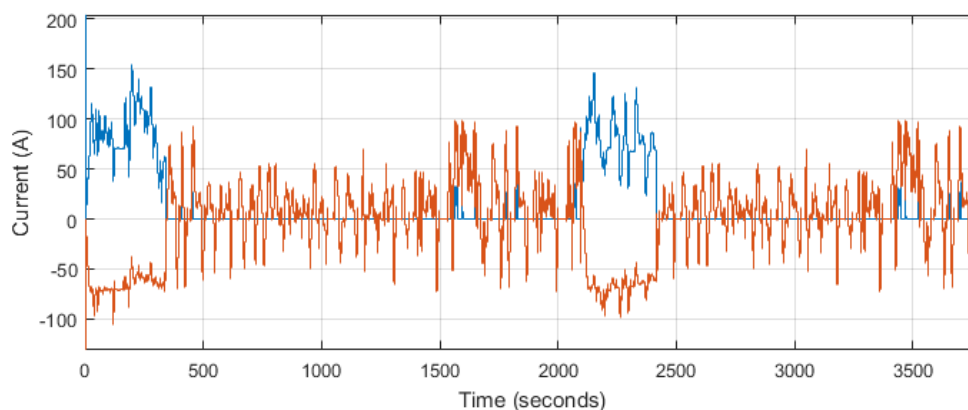
Σχήμα 5.76. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



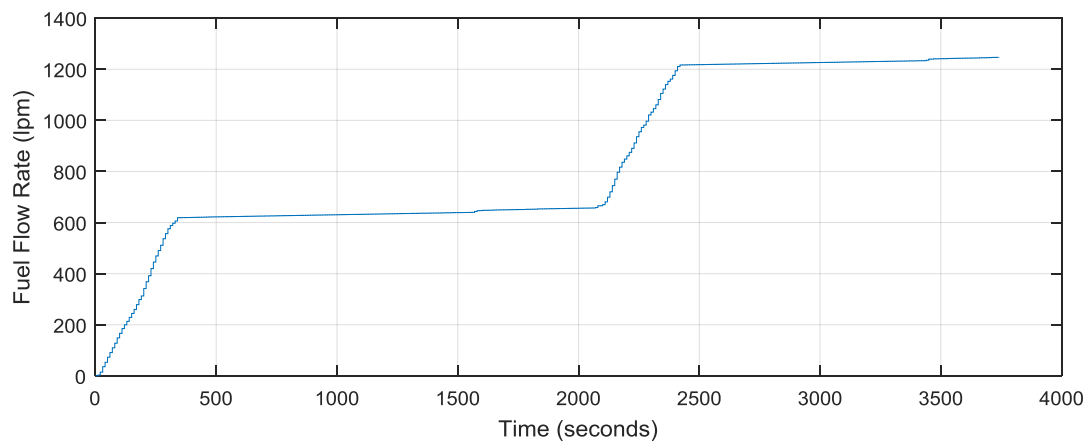
Σχήμα 5.77. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.78. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.79. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.80. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

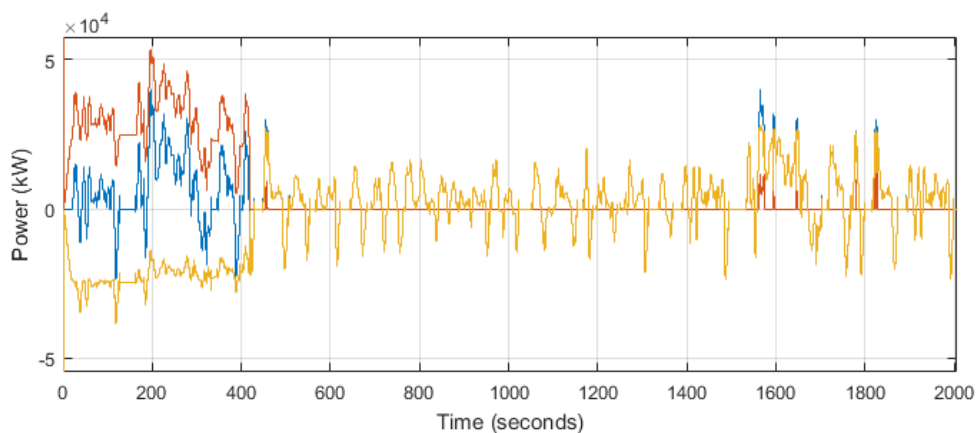
- SoC 35 % – 85 %

Λόγω της αλλαγής των τιμών κατωφλίου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας, η συμπεριφορά του οχήματος, στην παρούσα προσομοίωση, δεν παρουσιάζει διαφορές με τις προηγούμενες, απλά η χρήση της μπαταρίας γίνεται σε ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό.

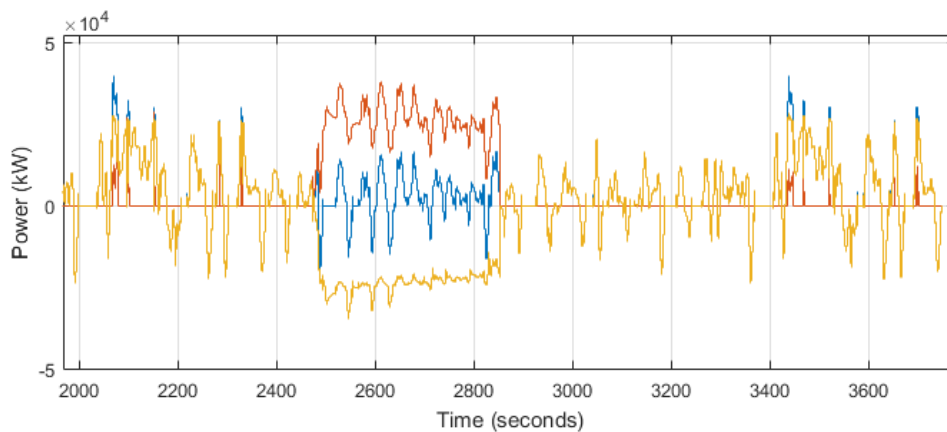
Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει αναλλοίωτη (Σχήμα 5.81 και 5.82). Παρατηρούνται αλλαγές στον χρόνο φόρτισης της μπαταρίας ο οποίος διαρκεί περισσότερο, όπως επίσης διαρκεί περισσότερο και ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας ως κινητήρια μονάδα ισχύος. Στο Σχήμα 5.83, είναι περισσότερο ορατός ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας, από τα 410 sec έως τα 2500 sec και από τα 2850 sec έως το τέλος του κύκλου οδήγησης.

Επίσης, το ρεύμα κατά την διάρκεια φόρτισης της μπαταρίας σημειώνει αύξηση κατά την εκκίνηση του οχήματος. Αναλυτικότερα ξεκινά από τα -100 A και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC (Σχήμα 5.85) ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking, στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές. Η τάση της μπαταρία εμφανίζει εξίσου διαφορετικές τιμές από τις προηγούμενες δοκιμές. Κατά την έναρξη της φόρτισης βρίσκεται στα 336 V, ενώ κατά το διάστημα φόρτισης στο 85 % του SoC αγγίζει τα 362 V (Σχήμα 5.84).

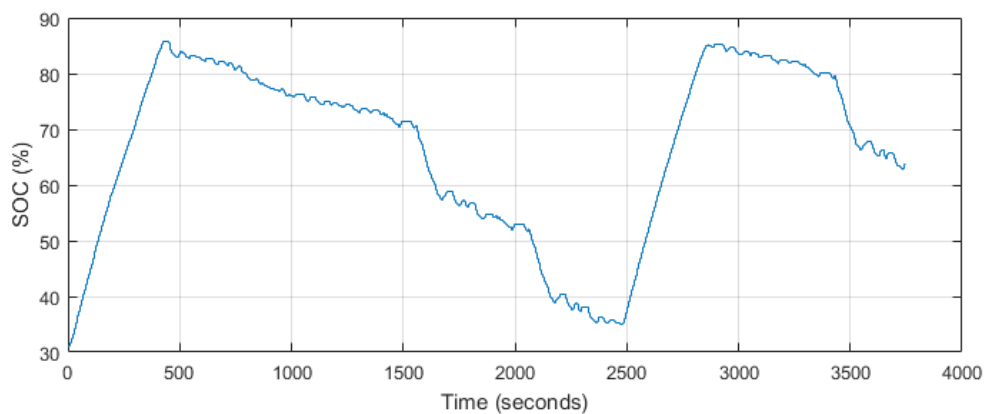
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 129.18 \text{ g}$. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.86) και της εξίσωσης 4.3.



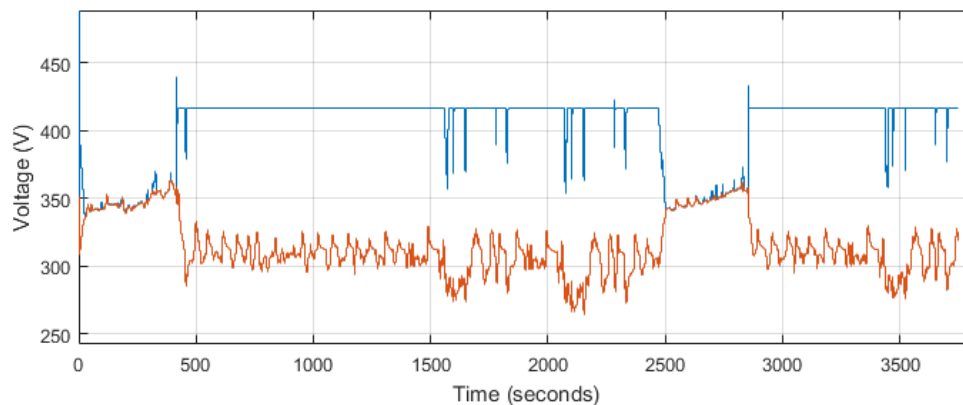
Σχήμα 5.81. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



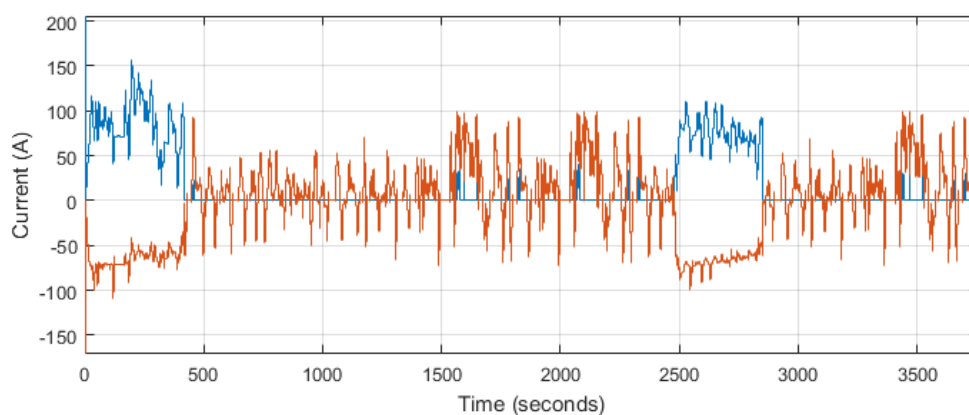
Σχήμα 5.82. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



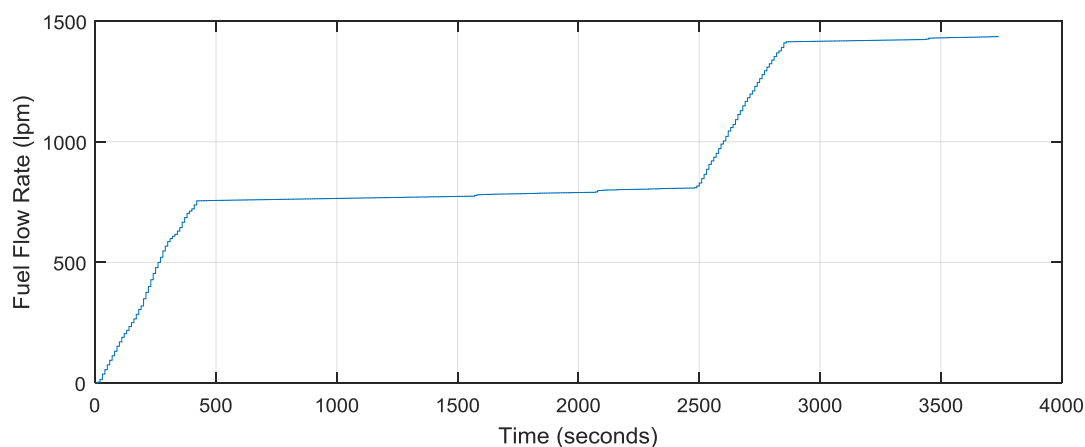
Σχήμα 5.83. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.84. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.85. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.86. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

Κύκλος Οδήγησης: WLTP class 3

- SoC 60 % – 90 %

Η σωστή λειτουργία του εικονικού οδηγού αποδεικνύεται από την ομοιότητα της ταχύτητας του οχήματος (Σχήμα 5.88) με την ταχύτητα του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.87). Παράλληλα ο κύκλος οδήγησης εκτελείται δύο φορές, στην διάρκεια της προσομοίωσης, ώστε ο όγκος δεδομένων σύγκρισης να είναι επαρκής.

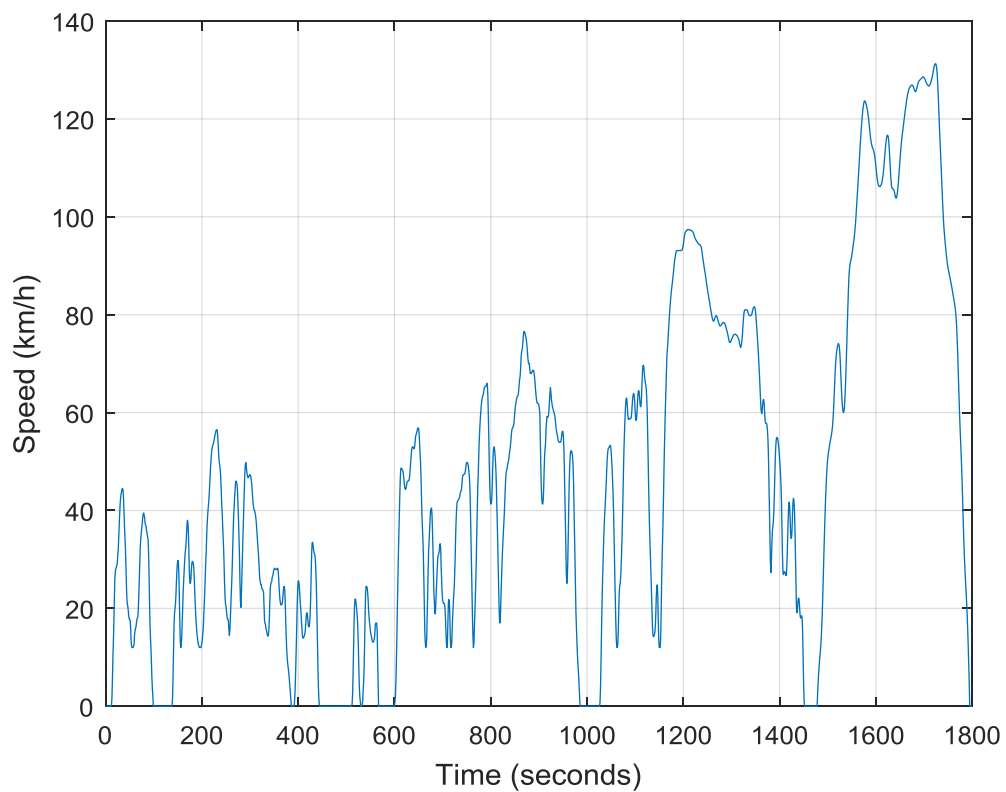
Στο Σχήμα 5.91 παρατηρείται αύξηση ισχύος της κυψέλης υδρογόνου κατά την εκκίνηση του οχήματος. Αυτό συμβαίνει διότι η τιμή του SoC είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου (Σχήμα 5.93). Στα πρώτα 300 δευτερόλεπτα (Σχήμα 5.91) η κίνηση του οχήματος γίνεται εξ' ολοκλήρου από την κυψέλη υδρογόνου ενώ παράλληλα φορτίζεται η μπαταρία. Μετά το πέρας του κύκλου φόρτισης η μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μονάδα παραγωγής ισχύος για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος αυτού και πιο εμφανώς στο διάστημα μεταξύ 1000 sec και 1200 sec, ισχύς που παράγει η μπαταρία δεν αρκεί για την κίνηση του οχήματος με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου για μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό αποδεικνύεται και στο Σχήμα 5.94, όπου η τάση της κυψέλης ενώ φαίνεται σταθερή (ευθεία γραμμή) εμφανίζει μικρές πτώσεις τάσης κατά διαστήματα. Στην συνέχεια κάθε φορά που η τιμή του SoC είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου ενεργοποιείται η κυψέλη υδρογόνου (Σχήμα 5.92). Η φόρτιση της μπαταρίας γίνεται 3.5 φορές κατά της διάρκεια του κύκλου οδήγησης.

Στο Σχήμα 5.95 παρουσιάζεται το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια του κύκλου οδήγησης. Στο πρώτο διάστημα των 500 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να ξεκινά από τα -70 A και σταδιακά να μειώνεται μέχρι την παύση της φόρτισης. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

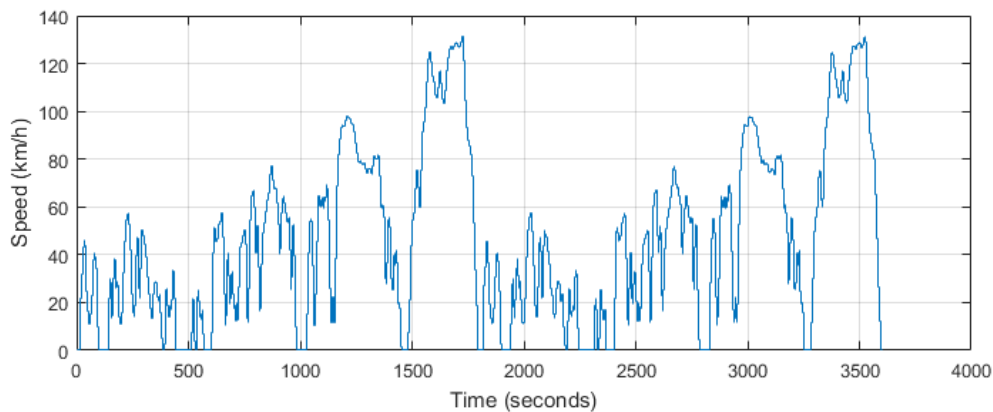
Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.94. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 300 sec, 1200 sec έως 1500 sec και 2600 sec έως 2900 sec) παρατηρείται αύξηση της τάσης από τα 342V έως τα 369 V.

Στο Σχήμα 5. 89 είναι εμφανείς οι εντολές από το πετάλι του οδηγού, ενώ στο Σχήμα 5. 90 παρουσιάζεται η ροπή αναφοράς της ηλεκτρικής μηχανής. Τα δύο γραφήματα είναι όμοια αφού η ηλεκτρική μηχανή ανταποκρίνεται στις εντολές του οδηγού.

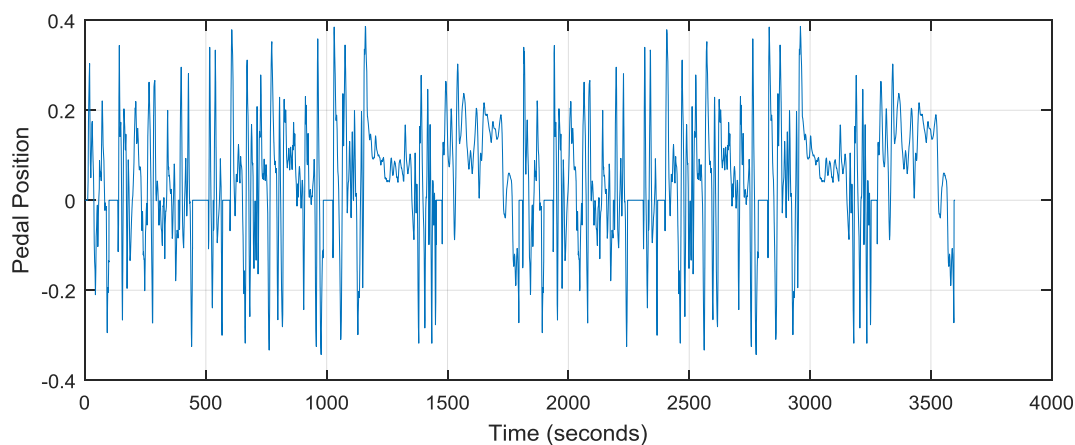
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $Wg = 203.99$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.96) και της εξίσωσης 4.3.



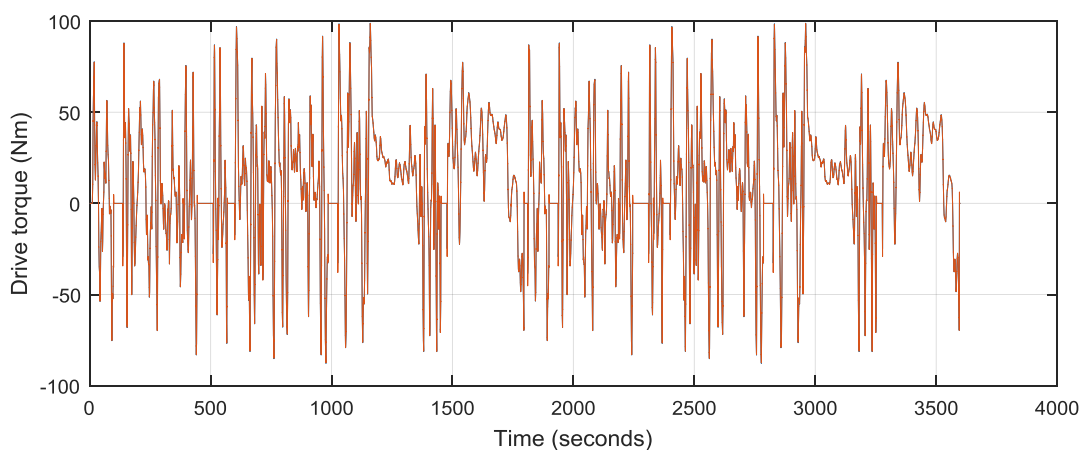
Σχήμα 5.87. Ταχύτητα Κύκλου Οδήγησης WLTP class 3.



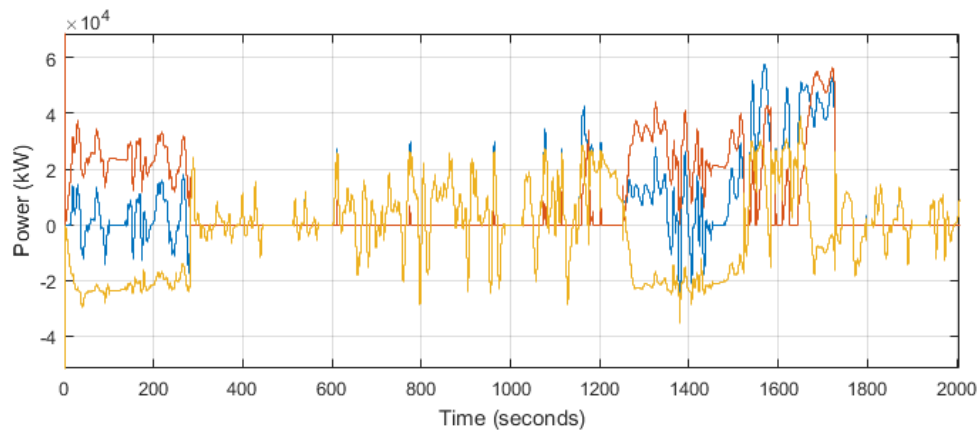
Σχήμα 5.88. Ταχύτητα οχήματος στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



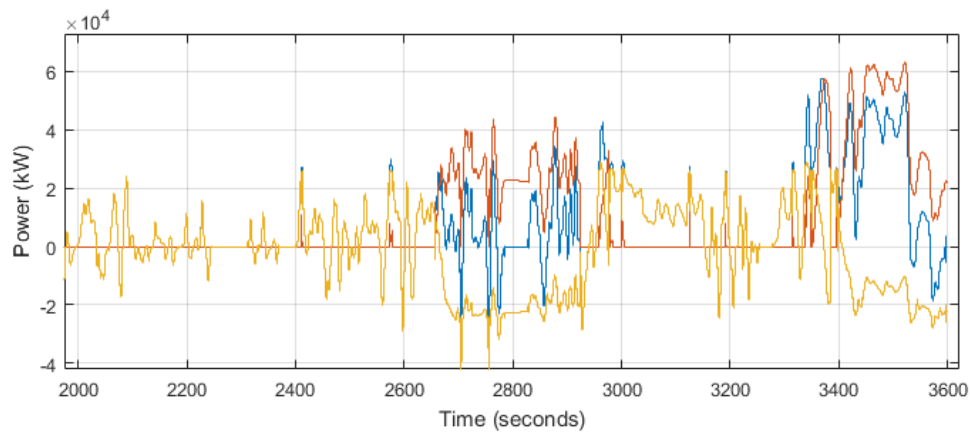
Σχήμα 5.89. Πετάλι οδηγού.



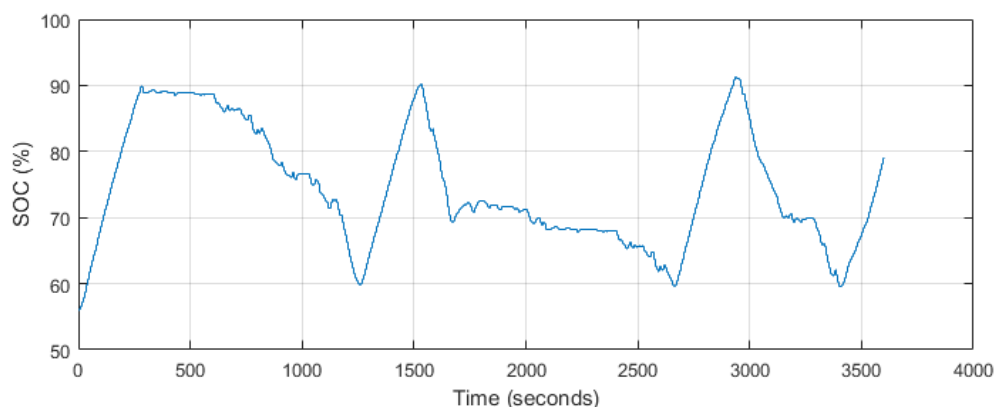
Σχήμα 5.90. Ροπή αναφοράς ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



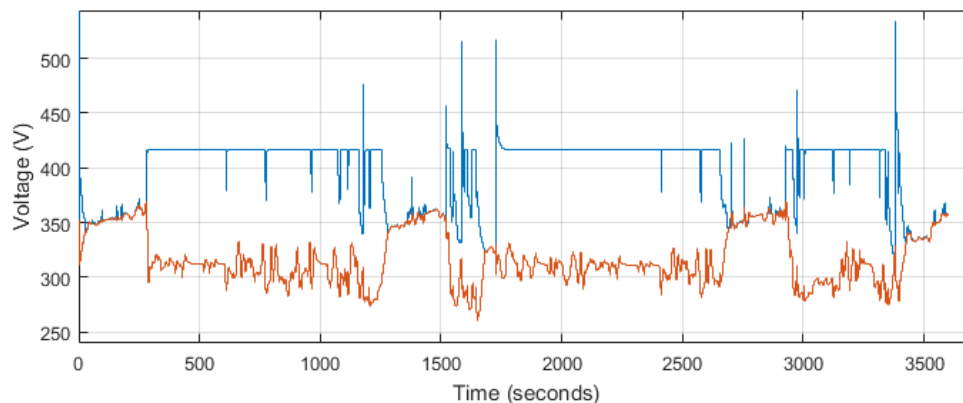
Σχήμα 5.91. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



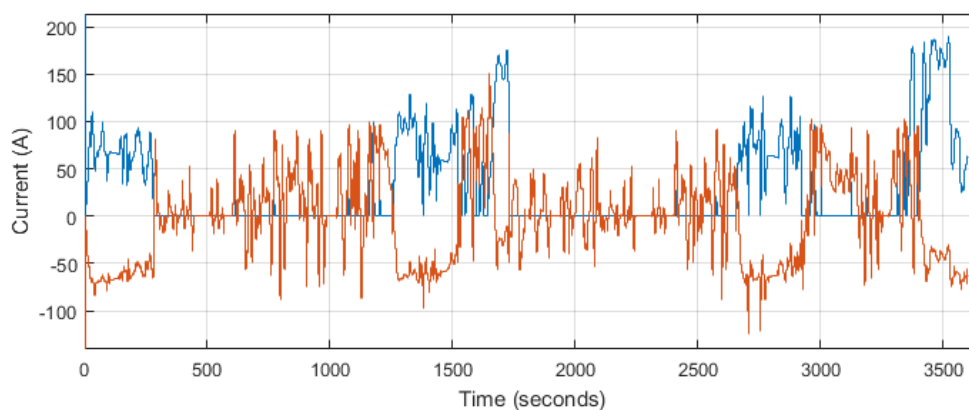
Σχήμα 5.92. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



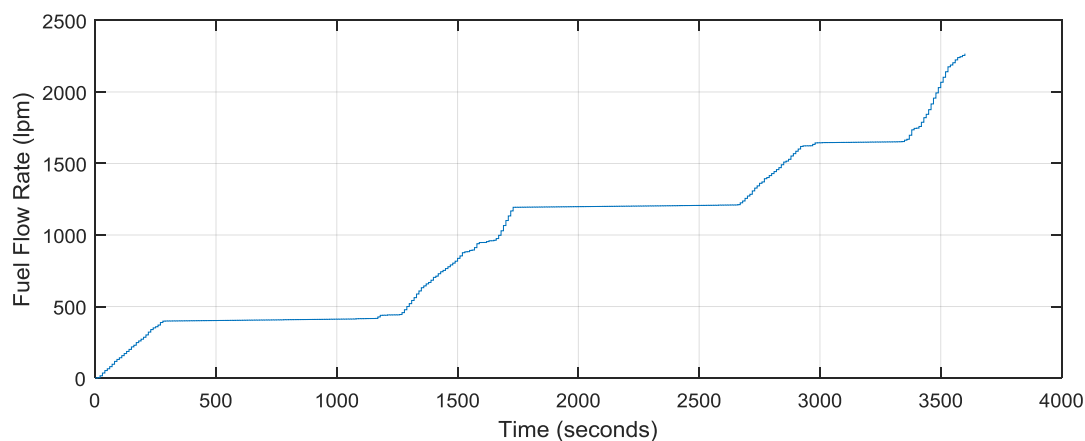
Σχήμα 5.93. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.94. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.95. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1..



Σχήμα 5.96. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

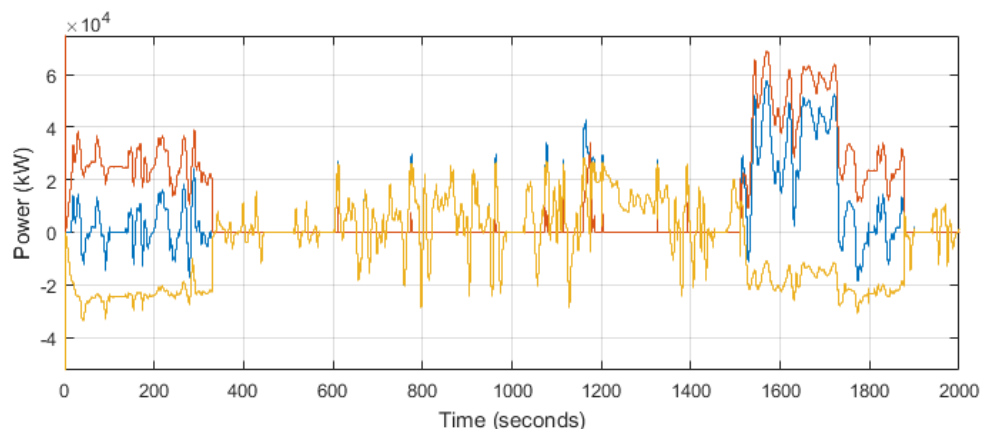
- SoC 40 % – 80 %

Η αλλαγή στην τιμή κατωφλίου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας δεν άλλαξε καθόλου την συμπεριφορά του οχήματος, απλά το διάστημα χρήσης και φόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο. Το σύστημα αναλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι μικρότερη του 40 %, ενώ σταμάτα και ξεκινά την αποφόρτισή της όταν η τιμή του SoC αγγίζει το 80 % (Σχήμα 5.99). Δηλαδή οι κύκλοι φόρτισης της μπαταρίας πραγματοποιούνται στην αρχή, στην μέση και στο τέλος του κύκλου οδήγησης, επιτρέποντας την κίνηση του οχήματος για μεγαλύτερο διάστημα με μπαταρία (Σχήμα 5.97 και 5.98).

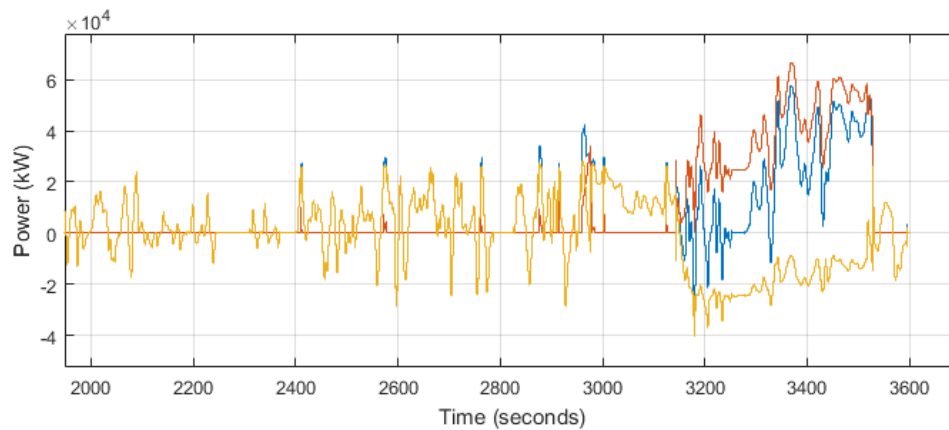
Στο Σχήμα 5.101 διακρίνεται το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Κατά την φόρτιση (0 sec έως 330 sec) ξεκινά από τα -100 A ενώ μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC. Στο διάστημα (1500 sec έως 1700 sec) ξεκινά από τα -60 A και μειώνεται σταδιακά, ενώ στην μέση του διαστήματος αγγίζει τα -80 A. Τέλος στο διάστημα (3200 sec έως 3500 sec), ξεκινά από τα -110 A και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC. Επιπλέον κατά την διαδικασία εκφόρτισης της μπαταρίας είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking, στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Ακόμη, κατά τα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (Σχήμα 5.100) η τάση κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Δηλαδή η τάση της μπαταρίας κατά την έναρξη φόρτισής της (0 sec), ξεκινά από 345 V και το πέρας της φόρτισης (320 sec) αγγίζει τα 358 V. Το ίδιο συμβαίνει στη μέση και στο τέλος του κύκλου οδήγησης που ξεκινά εκ νέου η φόρτισης της μπαταρίας.

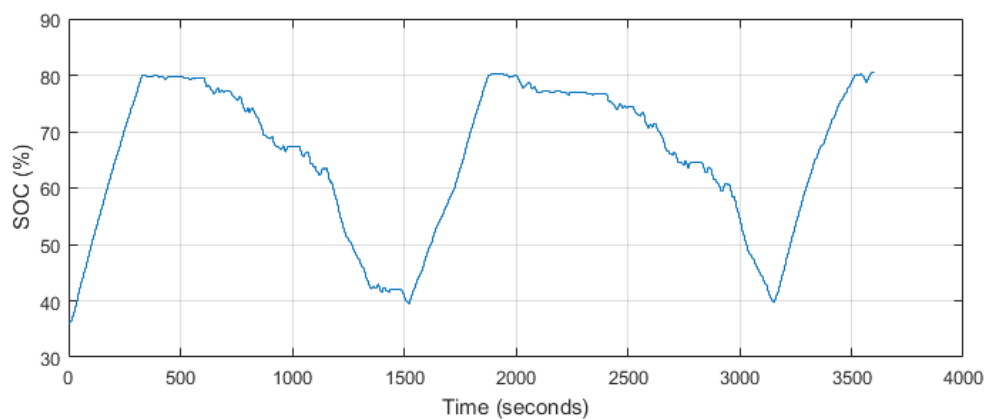
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 24.31$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.102) και της εξίσωσης 4.3.



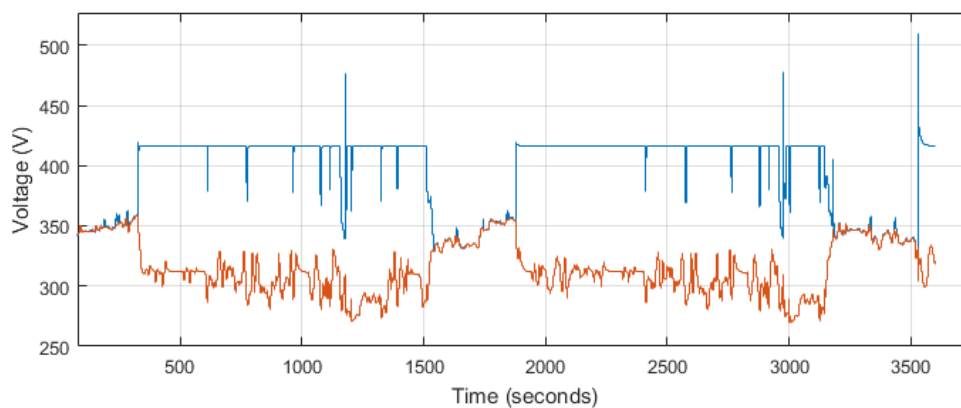
Σχήμα 5.97. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



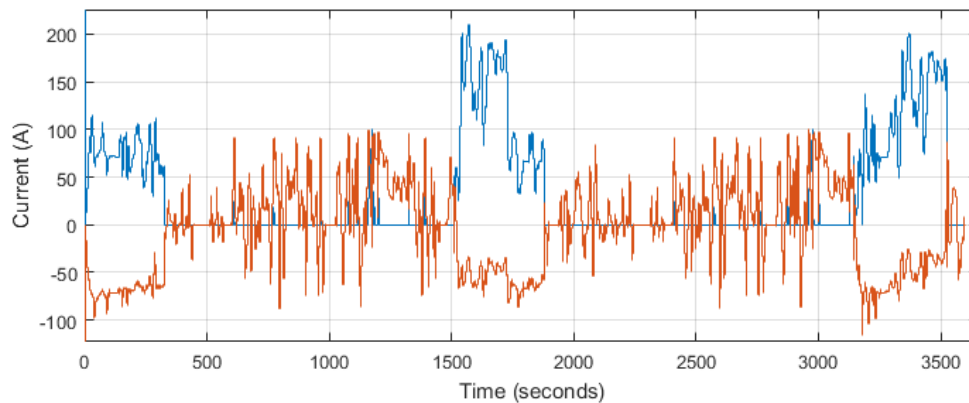
Σχήμα 5.98. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



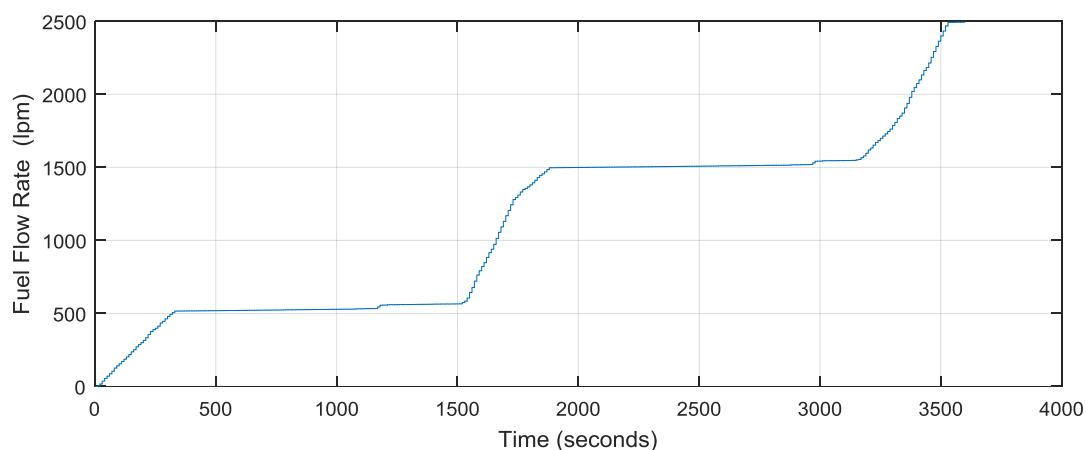
Σχήμα 5.99. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.100. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.101. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



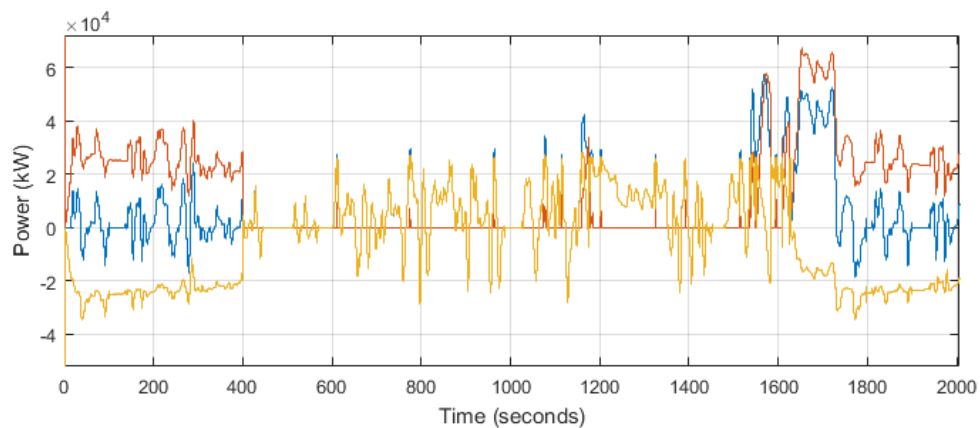
Σχήμα 5.102. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

- SoC 35 % – 85 %

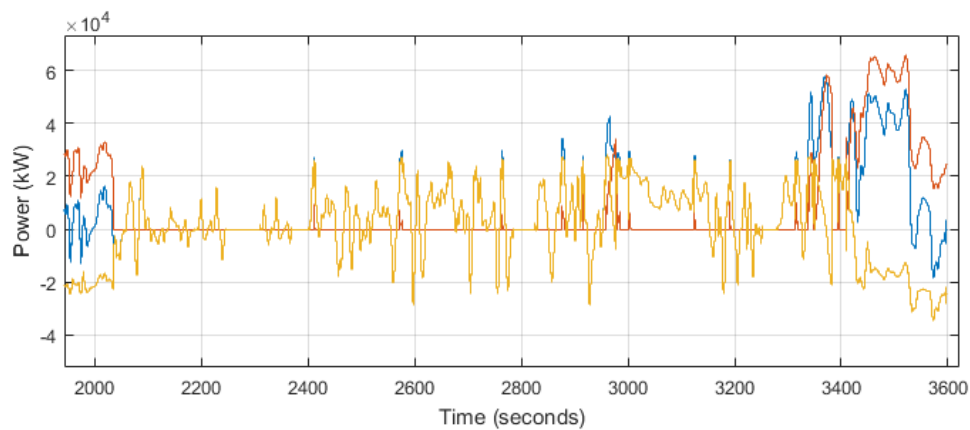
Η αλλαγή των τιμών κατωφλίου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας σε 35 % και 85 %, αντίστοιχα επέφερε αλλαγές στον χρόνο φόρτισης της μπαταρίας ο οποίος διαρκεί περισσότερο, όπως επίσης διαρκεί περισσότερο και ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας ως κινητήριας μονάδας ισχύος. Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει αναλλοίωτη (Σχήμα 5.103 και 5.104). Στο Σχήμα 5.105 είναι περισσότερο ορατός ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας.

Το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας αυξάνεται κατά την εκκίνηση του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα ξεκινά από τα -100 A και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC (Σχήμα 5.107) ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές. Η τάση της μπαταρία εμφανίζει εξίσου διαφορετικές τιμές από τις προηγούμενες δοκιμές. Κατά την έναρξη της φόρτισης βρίσκεται στα 335 V, ενώ κατά το διάστημα φόρτισης στο 85 % του SoC αγγίζει τα 360 V, (Σχήμα 5.106).

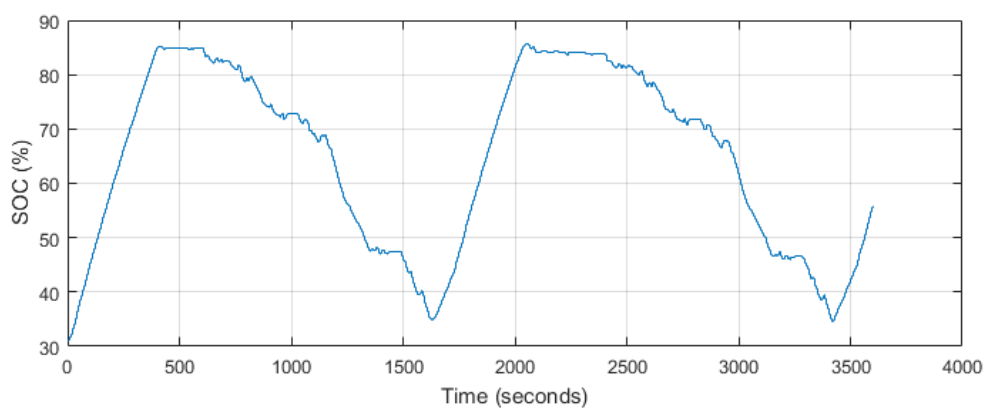
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 208.7$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.108) και της εξίσωσης 4.3.



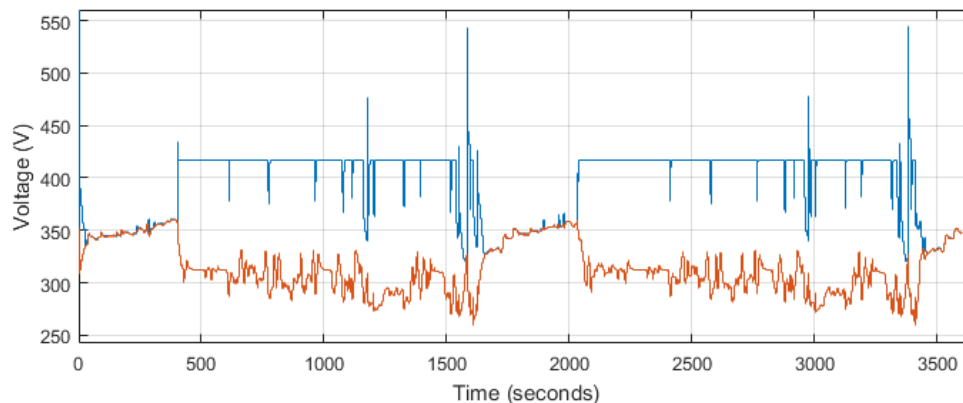
Σχήμα 5.103. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



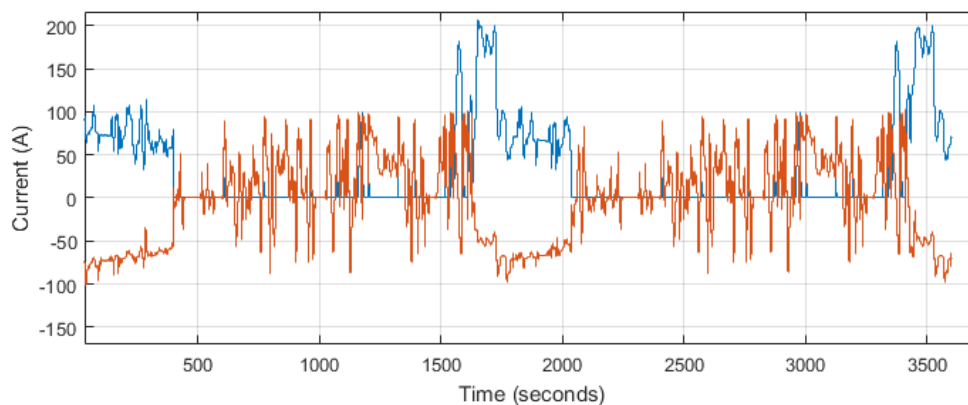
Σχήμα 5.104. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



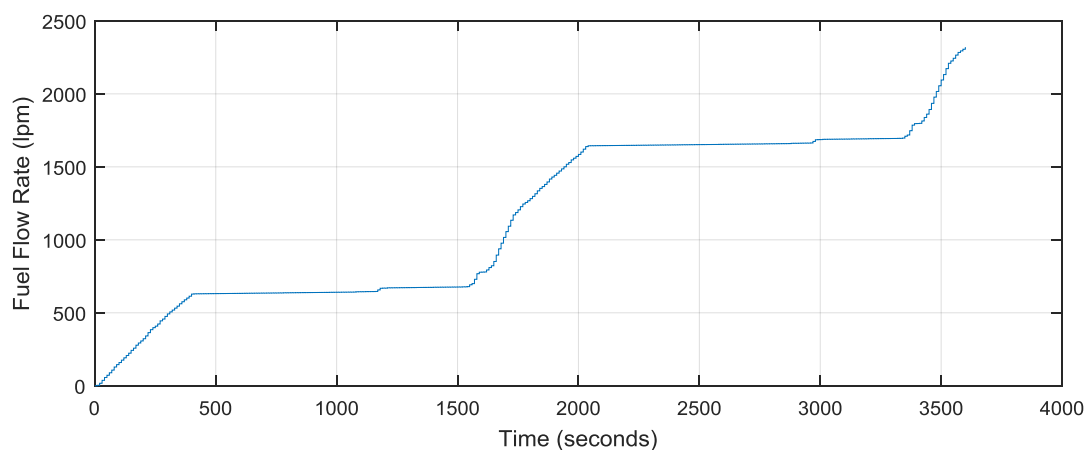
Σχήμα 5.105. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.106. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.107. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.108. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

Κύκλος Οδήγησης: ArtMW 150

- SoC 60 % – 90 %

Η ταχύτητα του οχήματος (Σχήμα 5.88) είναι όμοια με την ταχύτητα του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.87) το οποίο αποδεικνύει την σωστή λειτουργία του εικονικού οδηγού. Επίσης, ο κύκλος οδήγησης εκτελείται δύο φορές στην διάρκεια της προσομοίωσης, ώστε ο όγκος δεδομένων σύγκρισης να είναι επαρκής.

Επειδή το μεγαλύτερο μέρος αυτού του κύκλου περιλαμβάνει κίνηση οχήματος σε υψηλές ταχύτητες είναι αναμενόμενη η χρήση της κυψέλης καυσίμου σε μεγαλύτερο βαθμό.

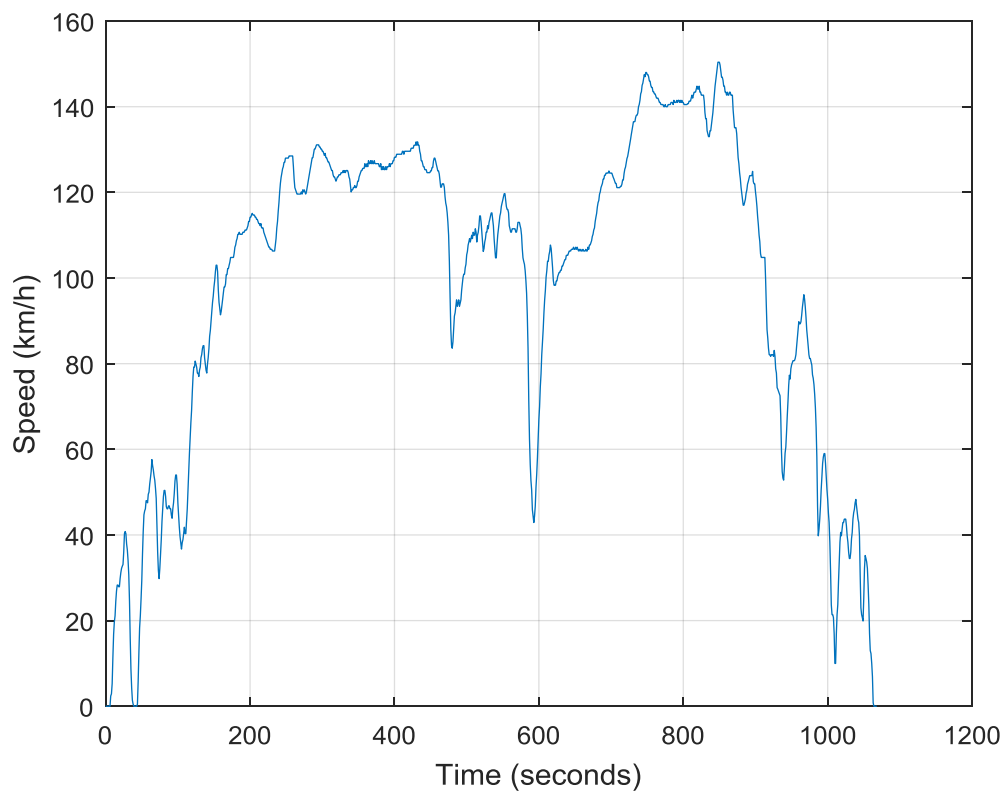
Κατά την εκκίνηση του οχήματος ενεργοποιείται η κυψέλη υδρογόνου, διότι η τιμή του SoC είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου (Σχήμα 5.115). Στα πρώτα 450 sec, η κίνηση του οχήματος γίνεται εξ' ολοκλήρου από την κυψέλη υδρογόνου ενώ παράλληλα φορτίζεται η μπαταρία. Μετά το πέρας του κύκλου φόρτισης και για ένα μικρό διάστημα (από 450 sec έως 650 sec) χρησιμοποιείται η μπαταρία σε συνδυασμό με την κυψέλη υδρογόνου σαν μονάδα παραγωγής ισχύος για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής, μέχρι να αποφορτιστεί σε ποσοστό μικρότερο του 60%. Έπειτα η κυψέλη υδρογόνου αναλαμβάνει ξανά την κίνηση του οχήματος και την εκ νέου φόρτιση της μπαταρίας (Σχήμα 5.113 και 5.144). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι τον τερματισμό του κύκλου οδήγησης.

Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας γίνεται αντιληπτή στο Σχήμα 5.117, όπου στο πρώτο διάστημα των 420 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να ξεκινά από τα -100 A και σταδιακά να μειώνεται μέχρι την παύση της φόρτισης. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking, στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

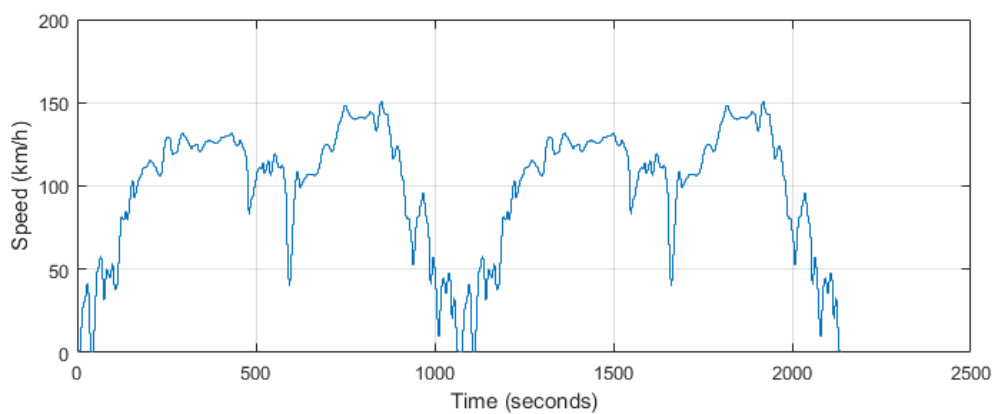
Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.116. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 420 sec, 780 sec έως 920 sec και 1690 sec έως 1950 sec) παρατηρείται μείωση της τάσης από τα 340V έως τα 360 V.

Στο Σχήμα 5.111 είναι εμφανείς οι εντολές από το πετάλι του οδηγού, ενώ στο Σχήμα 5.112, παρουσιάζεται η ροπή αναφοράς της ηλεκτρικής μηχανής. Τα δύο γραφήματα είναι όμοια αφού η ηλεκτρική μηχανή ανταποκρίνεται στις εντολές του οδηγού.

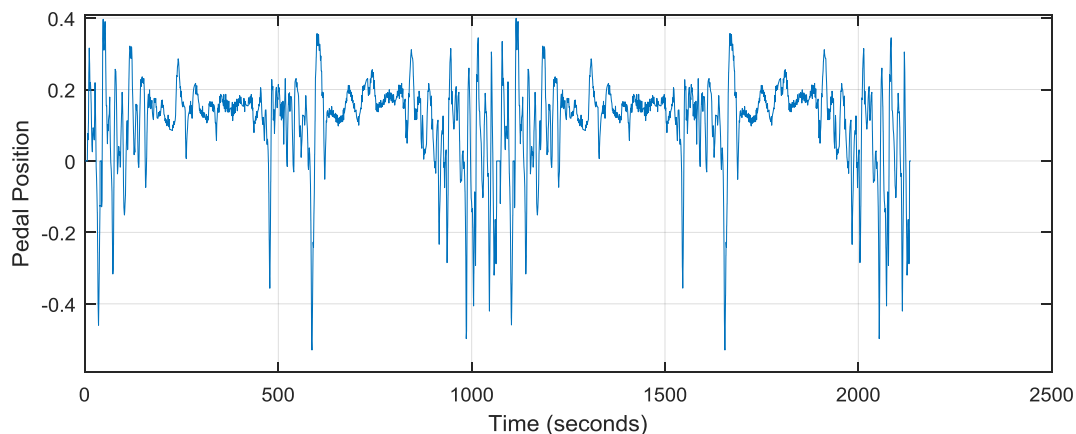
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 401.66$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.118) και της εξίσωσης 4.3.



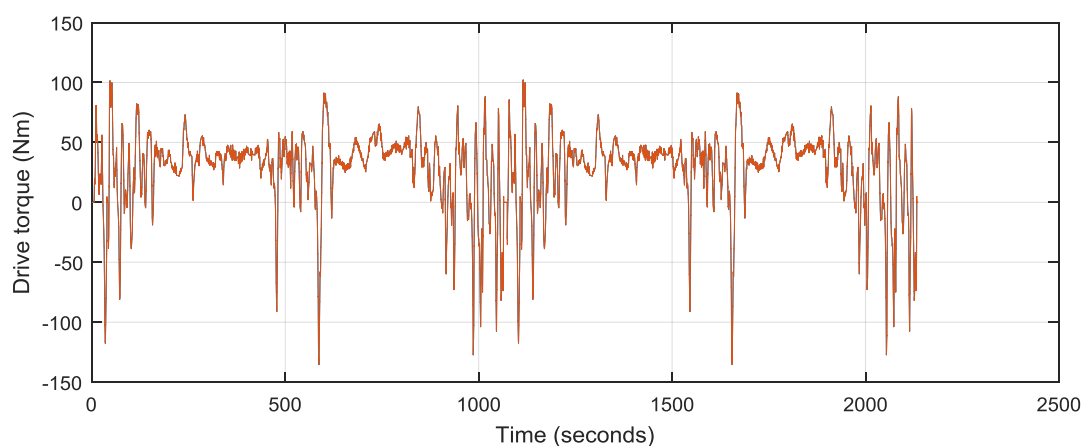
Σχήμα 5.109. Ταχύτητα Κύκλου Οδήγησης ArtMW 150.



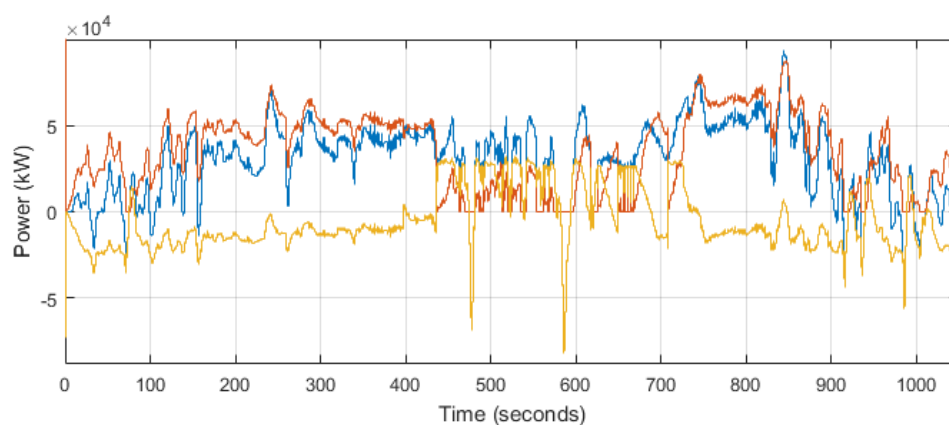
Σχήμα 5.110. Ταχύτητα οχήματος στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



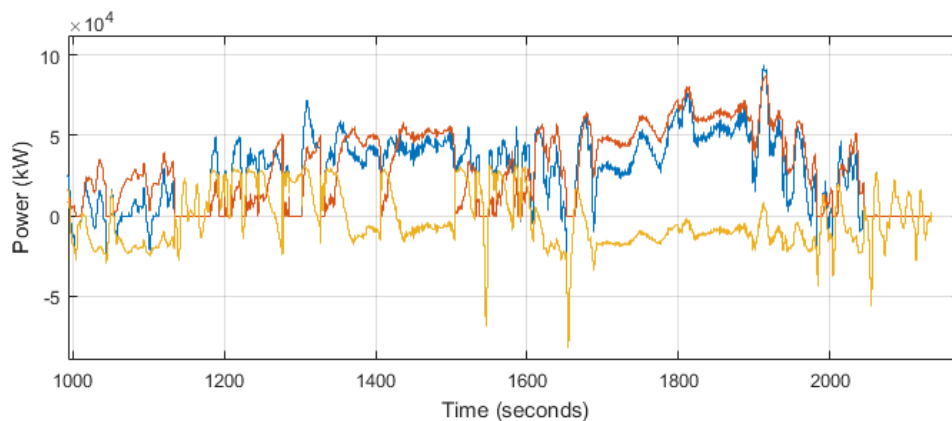
Σχήμα 5.111. Πετάλι οδηγού.



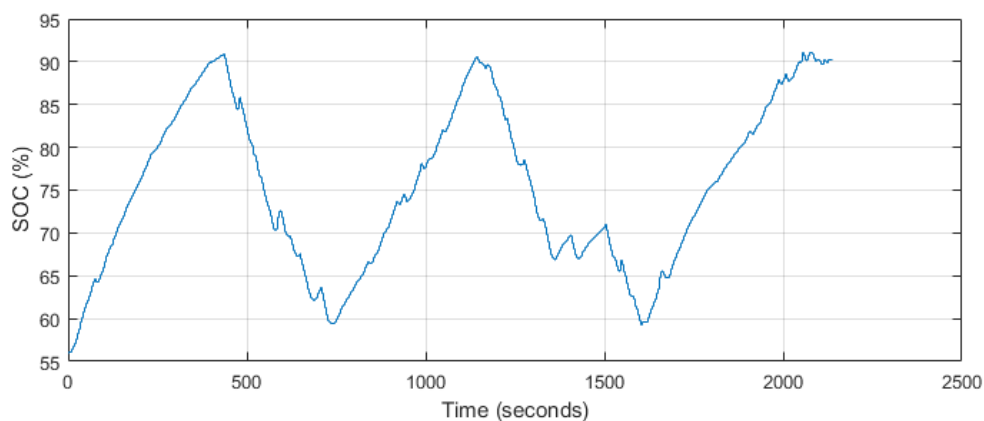
Σχήμα 5.112. Ροπή αναφοράς ηλεκτρικής μηχανής στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1



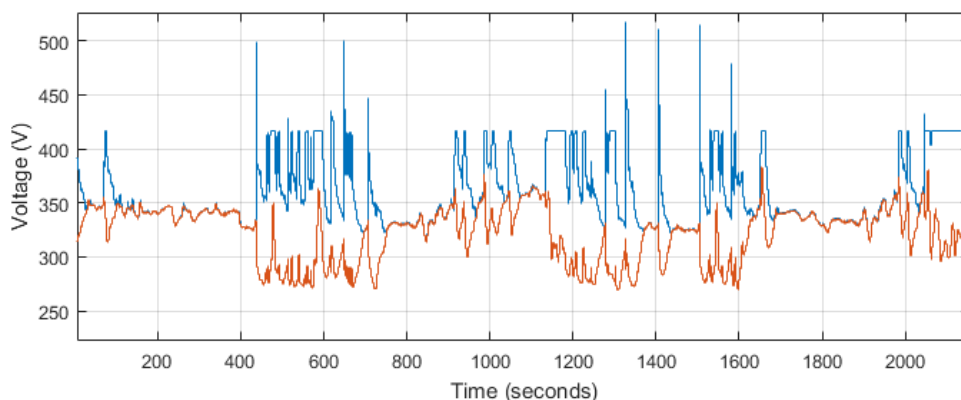
Σχήμα 5.113. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



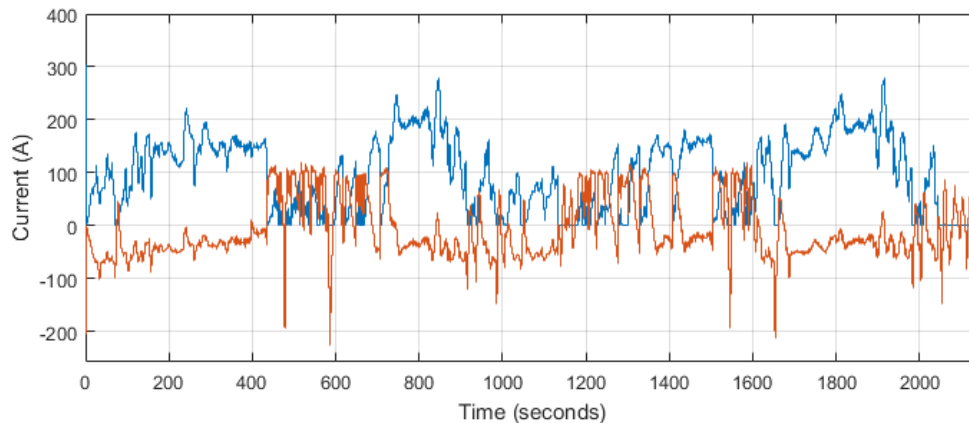
Σχήμα 5.114. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



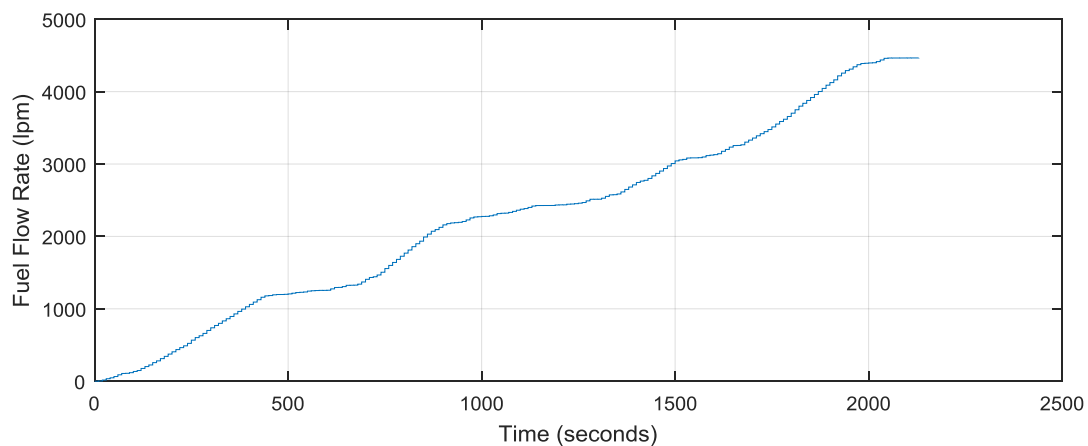
Σχήμα 5.115. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.116. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.117. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.118. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

- SoC 40 % – 80 %

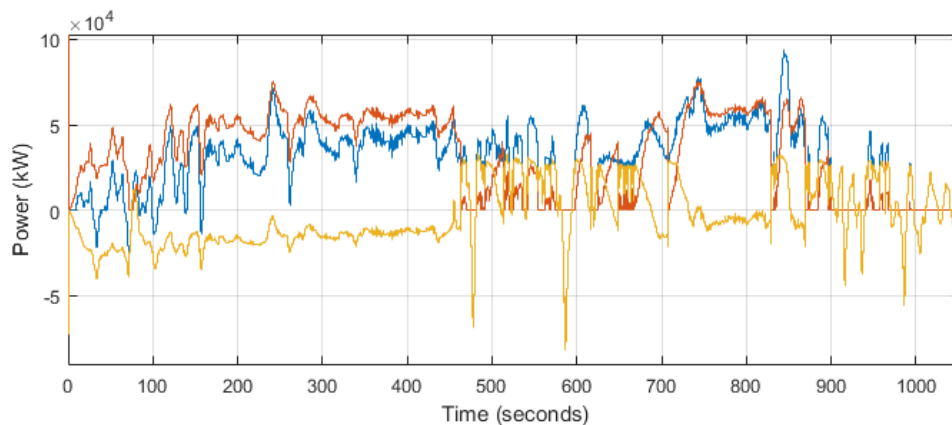
Η αλλαγή των τιμών κατωφλίου (SoC 40 % - 80 %) σηματοδοτεί την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι μικρότερη του 40 %, ενώ σταμάτα και ξεκινά την αποφόρτισή της όταν η τιμή του SoC αγγίζει το 80 % (Σχήμα 5.121). Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει ίδια με τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος. Όμως στο διάστημα (950 sec έως 1190 sec) (Σχήμα 5.119 και 5.120) σε συνδυασμό με το ότι η τιμή SoC είναι μεγαλύτερη της τιμής κατωφλίου, η κυψέλη καυσίμου απενεργοποιείται και η μπαταρία αναλαμβάνει την κίνηση του οχήματος μιας και η ισχύς της μπαταρίας επαρκεί για κάλυψη φορτίου της ηλεκτρικής μηχανής. Από το σημείο εκείνο και μετά η κυψέλη εκκινεί ξανά για την κάλυψη φορτίου της ηλεκτρικής μηχανής και την φόρτιση της μπαταρίας. Στο τελευταίο κομμάτι του κύκλου οδήγησης, μετά τα 2050 sec, η κυψέλη σταματά για ακόμη μια φορά την λειτουργίας της μέχρι το τέλος του κύκλου οδήγησης.

Το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας διακρίνεται στο Σχήμα 5.123. Κατά την φόρτιση (0 sec έως 420 sec) ξεκινά από τα -70 A, ενώ στο διάστημα (1220 sec έως 1570 sec) ξεκινά από τα -100 A και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC. Επιπλέον κατά την

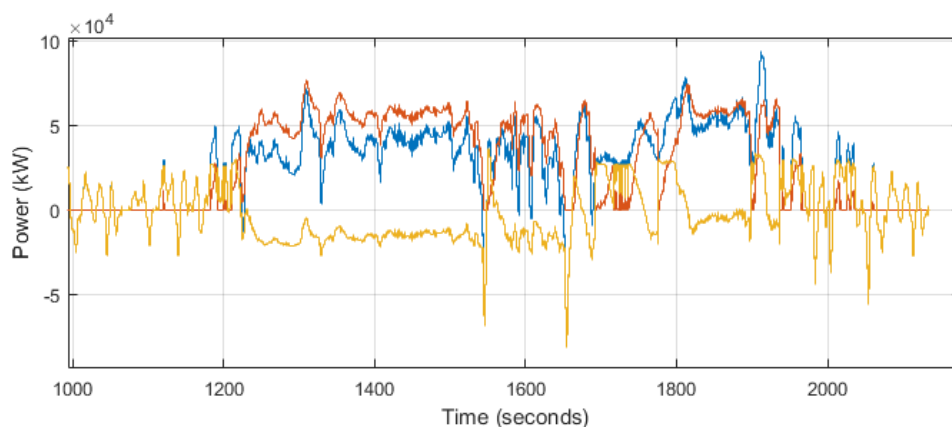
διαδικασία εκφόρτισης της μπαταρίας είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Ακόμη, κατά τα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (Σχήμα 5.122) η τάση κυμαίνεται σε ίδια επίπεδα. Δηλαδή η τάση της μπαταρίας κατά την έναρξη φόρτισής της (0 sec) ξεκινά από 340 V και το πέρας της φόρτισης (420 sec) αγγίζει τα 360 V. Το ίδιο συμβαίνει στη μέση και στο τέλος του κύκλου οδήγησης που ξεκινά εκ νέου η φόρτισης της μπαταρίας.

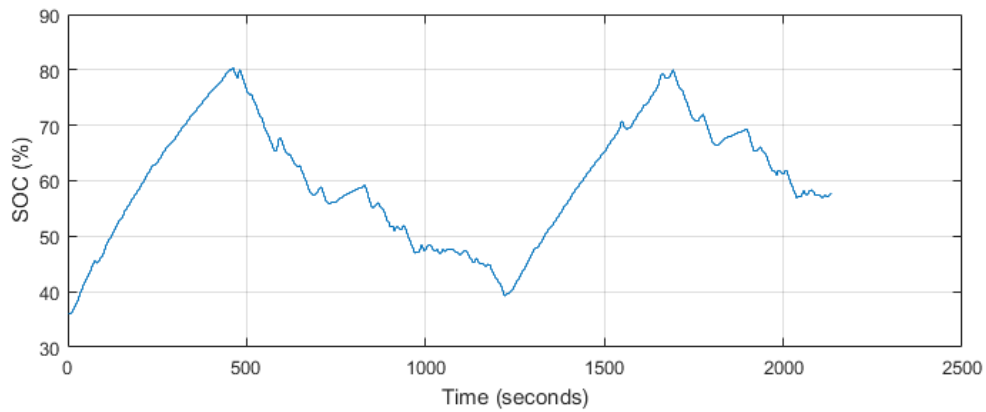
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 393.5$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.124) και της εξίσωσης 4.3.



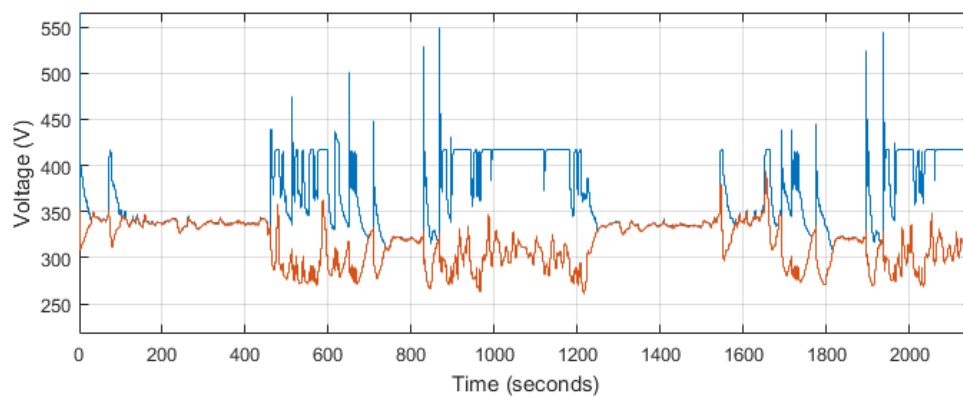
Σχήμα 5.119. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



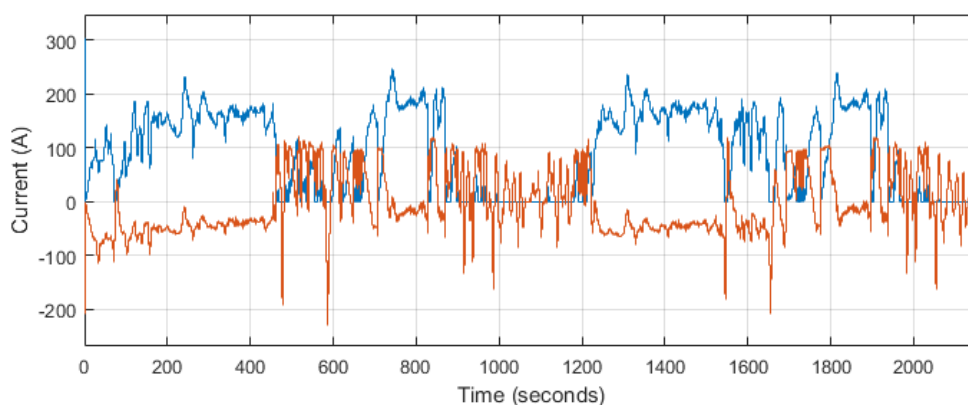
Σχήμα 5.120. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



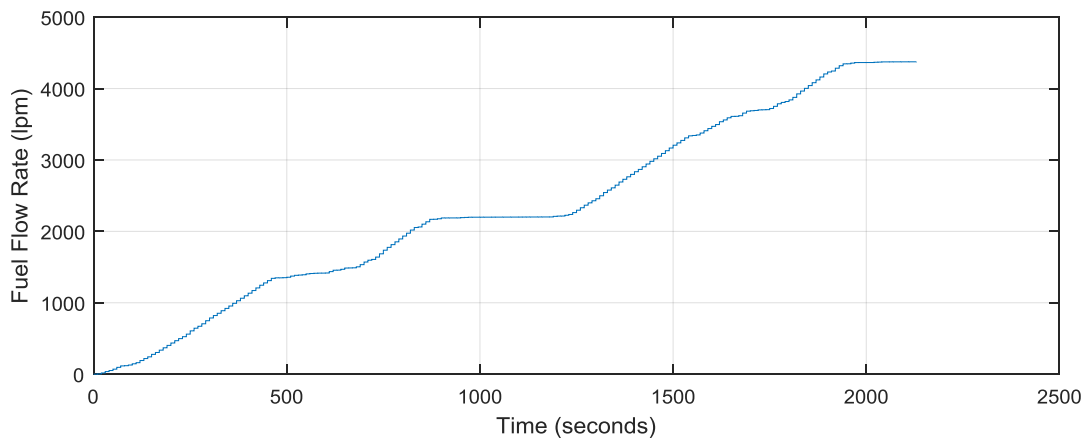
Σχήμα 5.121. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.122. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.123. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



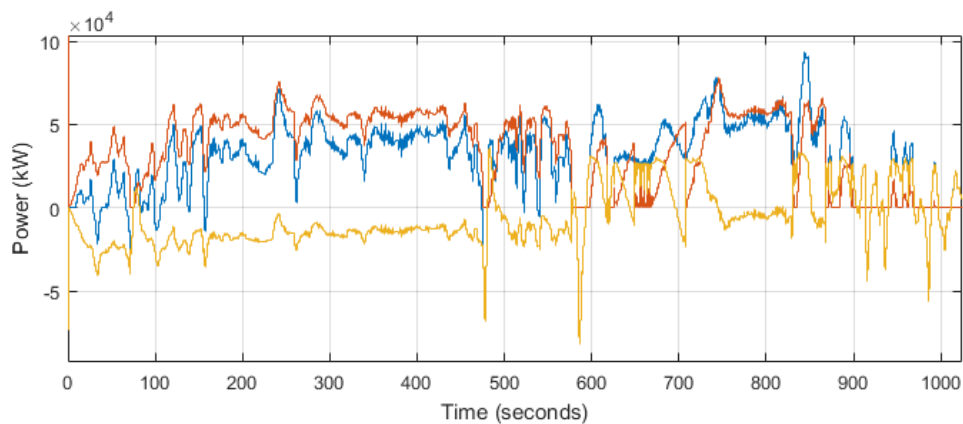
Σχήμα 5.124. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

- SoC 35 % – 85 %

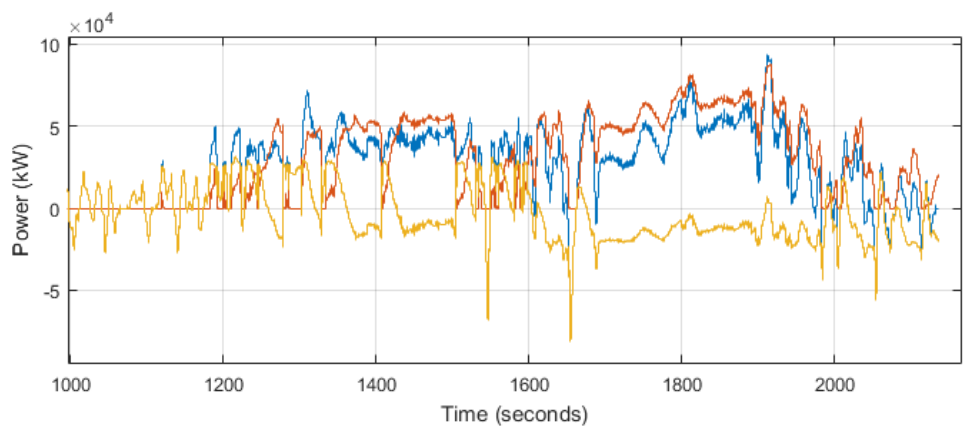
Η λειτουργία των συστημάτων και η συμπεριφορά του οχήματος παραμένει αναλλοίωτη (Σχήμα 5.125 και 5.126). Ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας και ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας ως κινητήριας μονάδας ισχύος διαρκεί περισσότερο,. Όμως στο διάστημα (900 sec έως 1190 sec) (Σχήμα 5.125 και 5.126) σε συνδυασμό με το ότι η τιμή SoC είναι μεγαλύτερη της τιμής κατωφλίου, η κυψέλη υδρογόνου απενεργοποιείται και η μπαταρία αναλαμβάνει την κίνηση του οχήματος. Από το σημείο εκείνο και μετά η κυψέλη εκκινεί ξανά για την κάλυψη φορτίου της ηλεκτρικής μηχανής και την φόρτιση της μπαταρίας. Στο Σχήμα 5.105 είναι περισσότερο ορατός ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας.

Επιπλέον, το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας αυξάνεται κατά την εκκίνηση του οχήματος. Αναλυτικότερα ξεκινά από τα -110 A και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SoC (Σχήμα 5.129) ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές. Η τάση της μπαταρίας δεν εμφανίζει διαφορετικές τιμές από τις προηγούμενες δοκιμές. Κατά την έναρξη της φόρτισης βρίσκεται στα 340 V, ενώ κατά το διάστημα φόρτισης στο 85 % του SoC αγγίζει τα 360 V (Σχήμα 5.128).

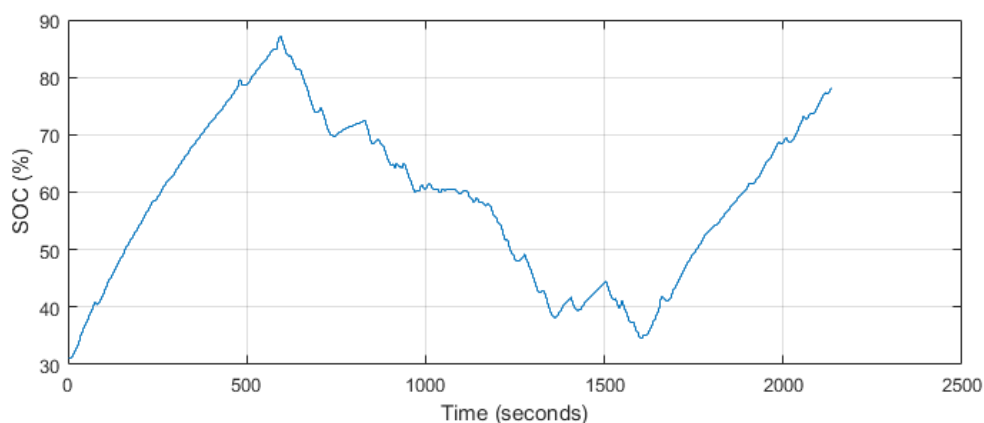
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 416.14$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.130) και της εξίσωσης 4.3.



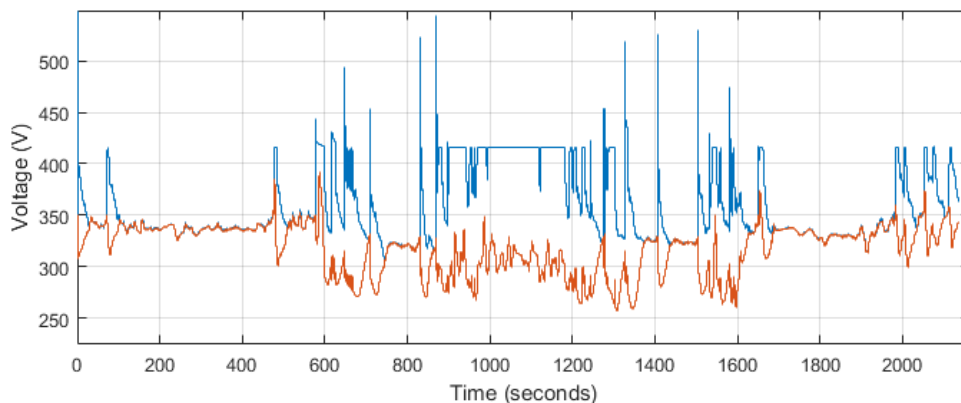
Σχήμα 5.125. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



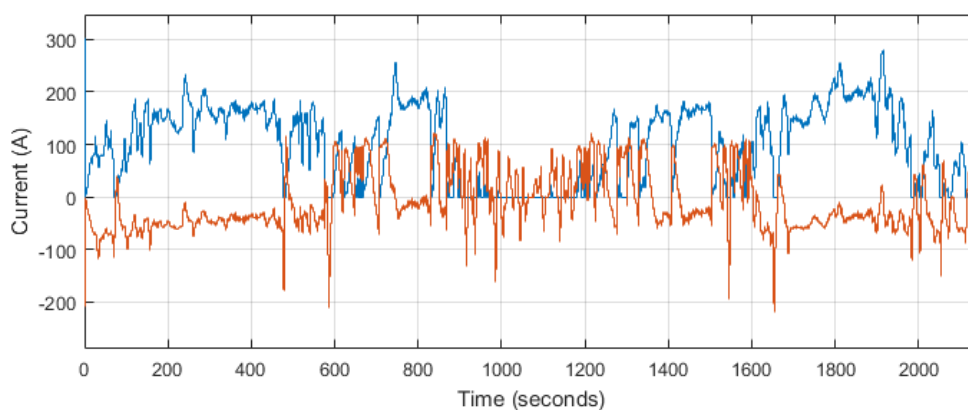
Σχήμα 5.126. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



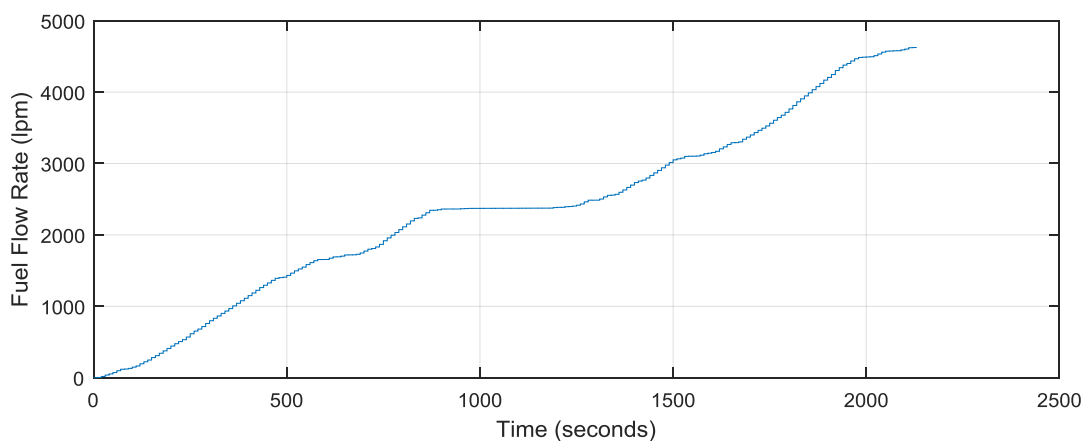
Σχήμα 5.127. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.128. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.129. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.



Σχήμα 5.130. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_1.

EMS_2

Τα σχήματα που αφορούσαν το πετάλι του οδηγού και την ροπή αναφοράς του κάθε κύκλου οδήγησης ταυτίζονται με τα σχήματα του EMS_1 και δεν προστέθηκαν. Επίσης πρέπει να αναφερθεί πως στο EMS_2, κάθε φορά που το όχημα σταματά την κίνησή του απενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου, ενώ ενεργοποιείται κάθε φορά που η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη των 80 km/h.

Κύκλος Οδήγησης: NEDC

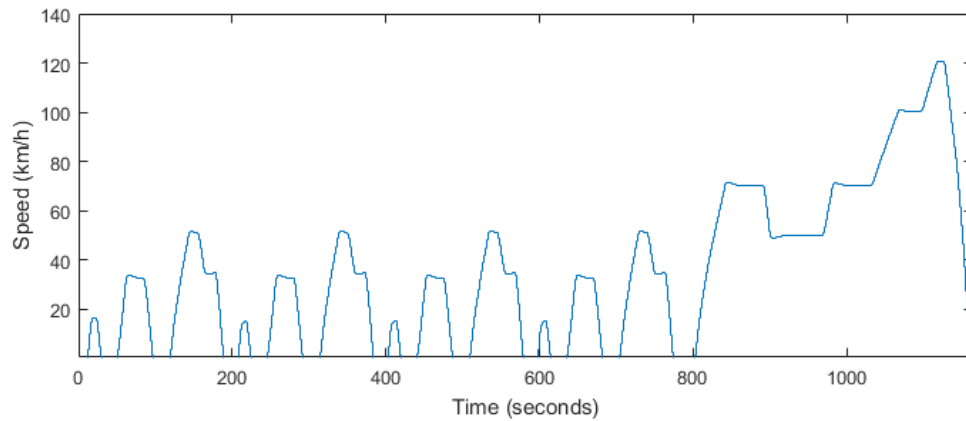
- SoC 60 % – 90 %

Η εκκίνηση του οχήματος ξεκινά με την χρήση της κυψέλης υδρογόνου ως κινητήριας μονάδας, διότι η τιμή του SoC είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου (Σχήμα 5.134). Έτσι αυξάνεται η ισχύς που παράγει η κυψέλη υδρογόνου (Σχήμα 5.132). Στα πρώτα 950 sec η κίνηση του οχήματος γίνεται εξ' ολοκλήρου από την κυψέλη υδρογόνου, ενώ παράλληλα φορτίζεται η μπαταρία. Κάθε φορά που το όχημα σταματά την κίνησή του απενεργοποιείται και η κυψέλη υδρογόνου. Για αυτό και δεν παρατηρείται συνεχής λειτουργία της κυψέλης κοντά στα 2.5 kW, όπως παρατηρήθηκε κατά την διάρκεια προσομοίωσης του EMS_1. Έτσι κάθε φορά που εκκινεί το όχημα η ισχύς της κυψέλης σταδιακά αυξάνεται, μέχρι να σταματήσει την κίνηση του το όχημα. Μετά το πέρας των 950 sec επειδή η ταχύτητα του οχήματος αυξάνεται αρκετά (> 80 km/h), η κυψέλη υδρογόνου ενεργοποιείται. Στο διάστημα 1100 sec έως 1150 sec, η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την κάλυψη φορτίου της ηλεκτρικής μηχανής. Από το σημείο αυτό και μετά η μπαταρία χρησιμοποιείται για την κίνηση του οχήματος μέχρι τα 2300 sec, όπου η ταχύτητα του οχήματος αυξάνεται εκ νέου, αγγίζοντας τα 120 km/h, ενεργοποιώντας την κυψέλη καυσίμου (Σχήμα 5.133).

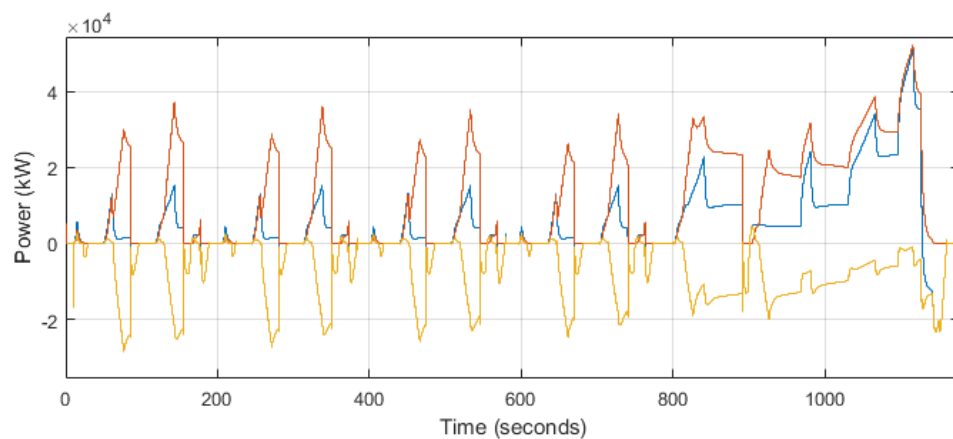
Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας γίνεται αντιληπτή στο Σχήμα 5.136, όπου στο πρώτο διάστημα των 950 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου κατά διαστήματα με το ρεύμα να ξεκινά από τα -70 A. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία εκ νέου ενεργοποίησης της κυψέλης λόγω υψηλής ταχύτητας του οχήματος. Από το 1150 sec και μετά ξεκινά η αποφόρτισή της, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.135. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 950 sec) παρατηρείται μια συνεχής αύξηση της τάσης της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

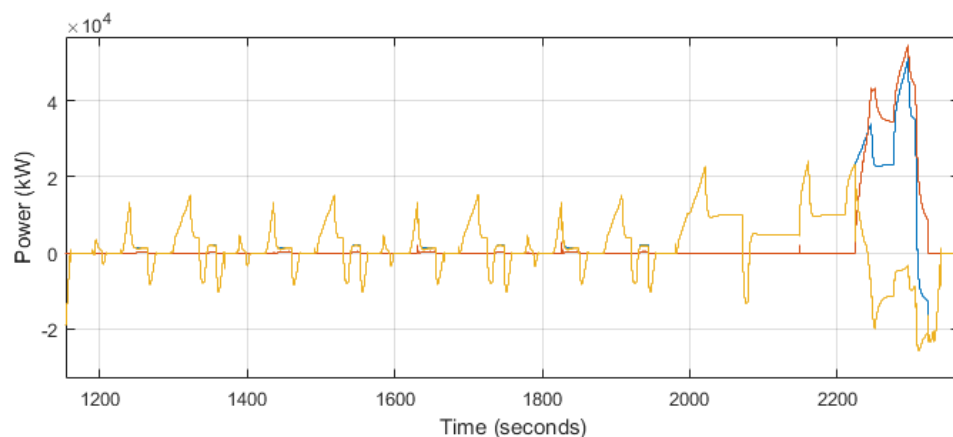
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 92.22$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.137) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.137 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



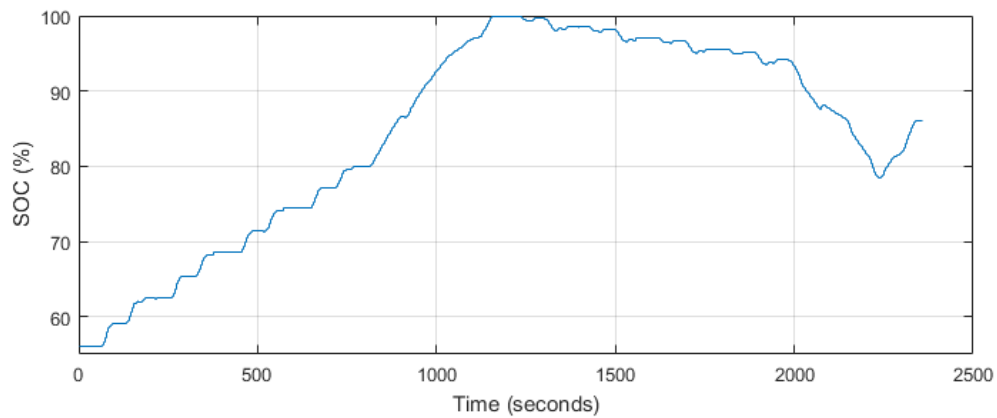
Σχήμα 5.131. Ταχύτητα οχήματος στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



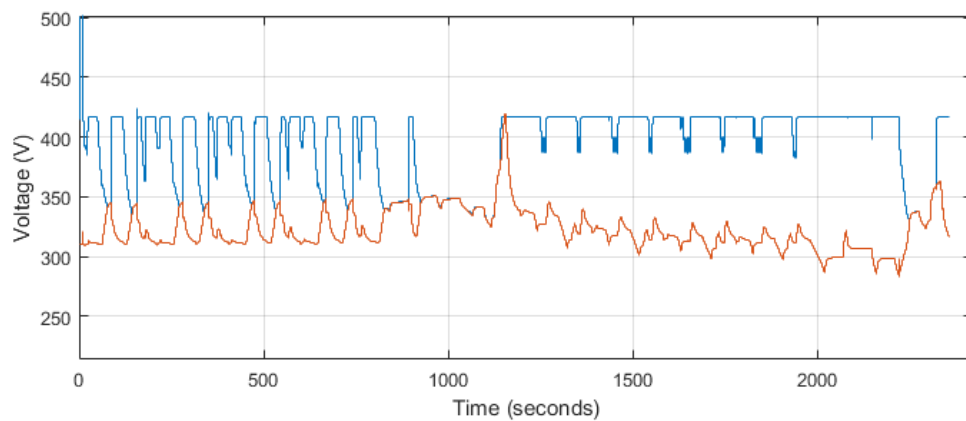
Σχήμα 5.132. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



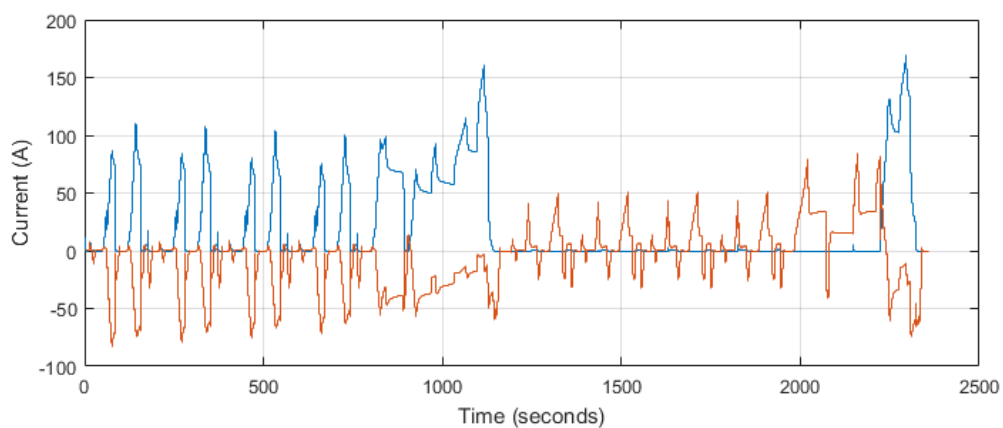
Σχήμα 5.133. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



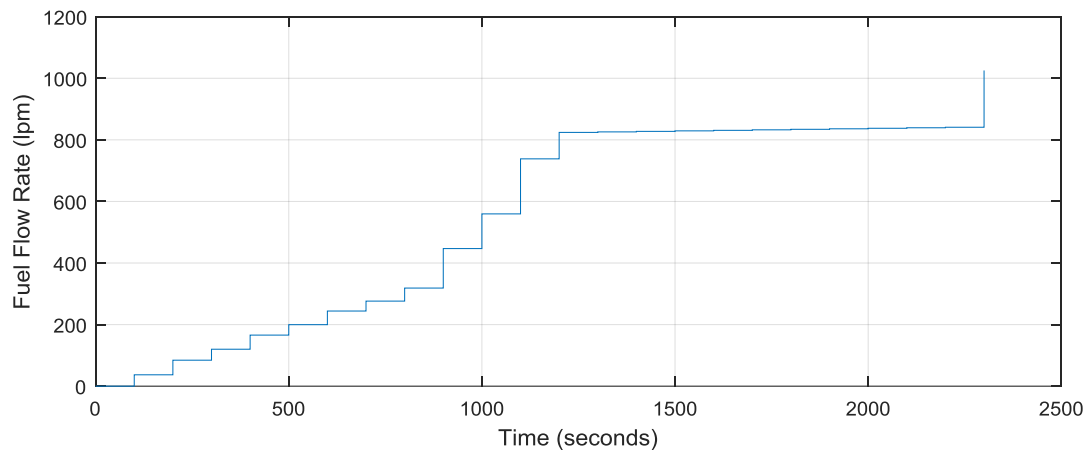
Σχήμα 5.134. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.135. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.136. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.137. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

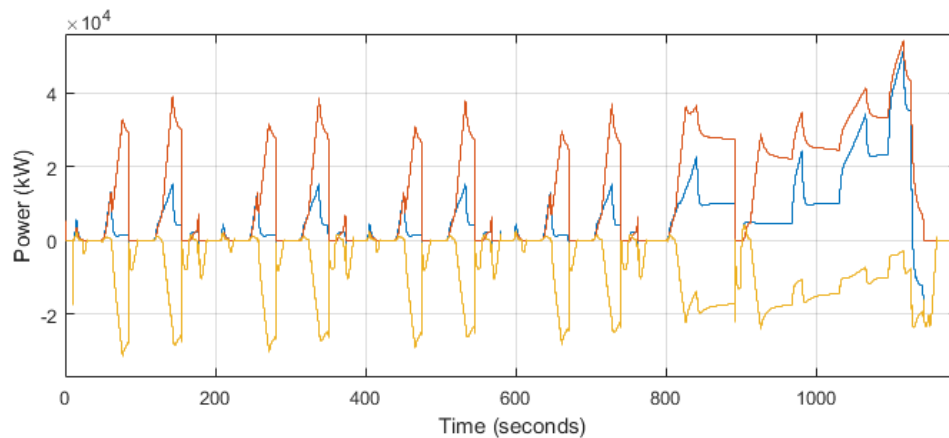
- SoC 40 % – 80 %

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση η αλλαγή η οποία έγινε στο σύστημα είναι η τιμή κατωφλίου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Το σύστημα αναλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι μικρότερη του 40 %, ενώ σταμάτα και ξεκινά τη αποφόρτισή της όταν η τιμή του SoC αγγίζει το 80 % (Σχήμα 5.140). Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει ίδια με τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος, απλά το διάστημα χρήσης και φόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο. Δηλαδή ο κύκλος φόρτισης της μπαταρίας πραγματοποιείται στην αρχή του κύκλου οδήγησης, επιτρέποντας την κίνηση του οχήματος για μεγαλύτερο διάστημα με μπαταρία (Σχήμα 5.138 και 5.139).

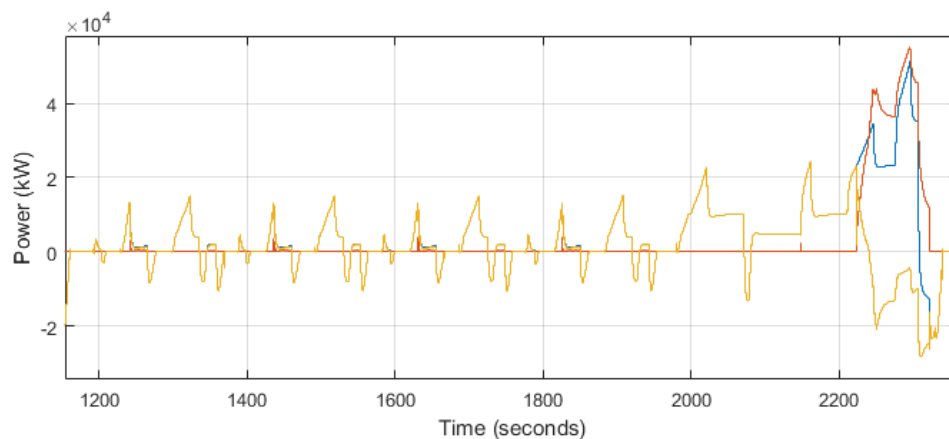
Επίσης, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας διακρίνεται στο Σχήμα 5.142. Κατά την φόρτιση (0 sec έως 1150 sec) παρατηρείται κατά διαστήματα σταδιακή αύξηση του ρεύματος έως τα -80 A. Από το 1150 sec και μετά ξεκινά η αποφόρτισή της, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Στο Σχήμα 5.141 παρουσιάζεται η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 1150 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσης της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

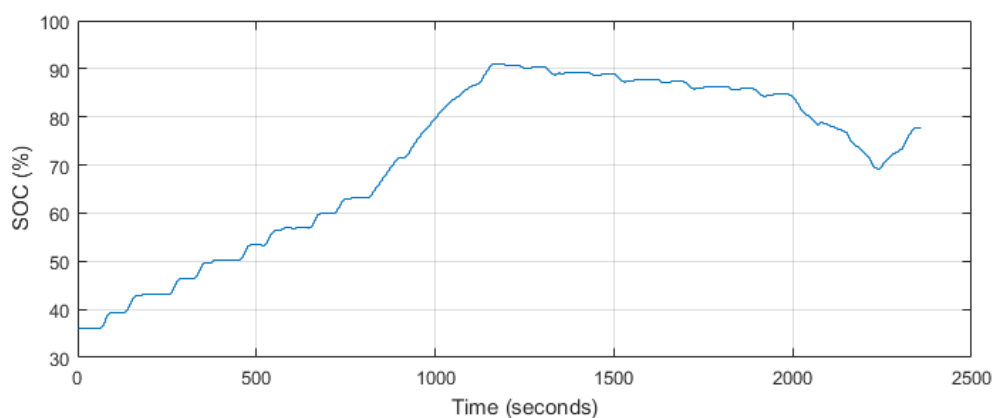
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 103.14$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.143) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.143 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



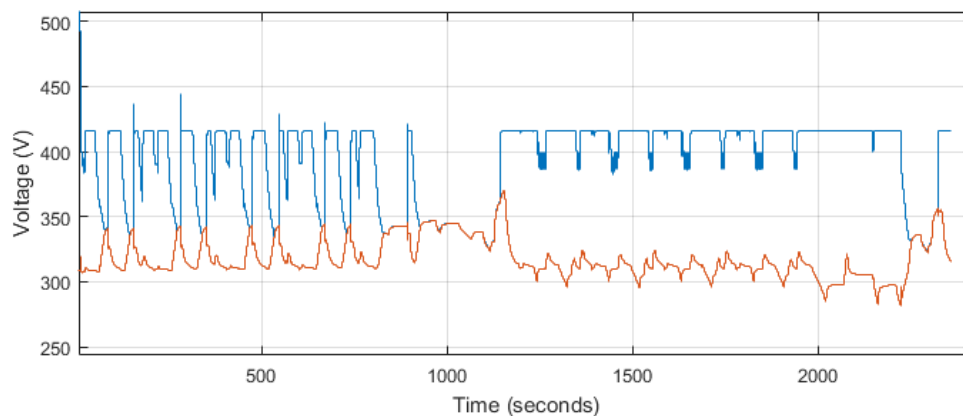
Σχήμα 5.138. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



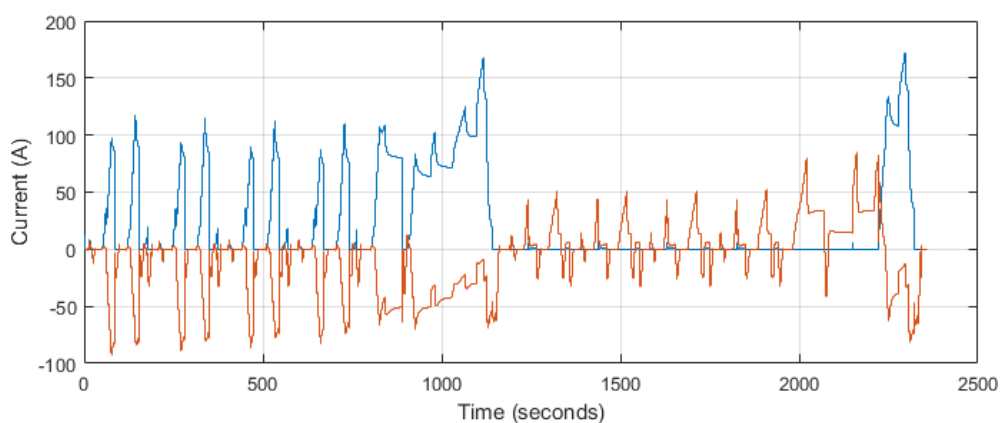
Σχήμα 5.139. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



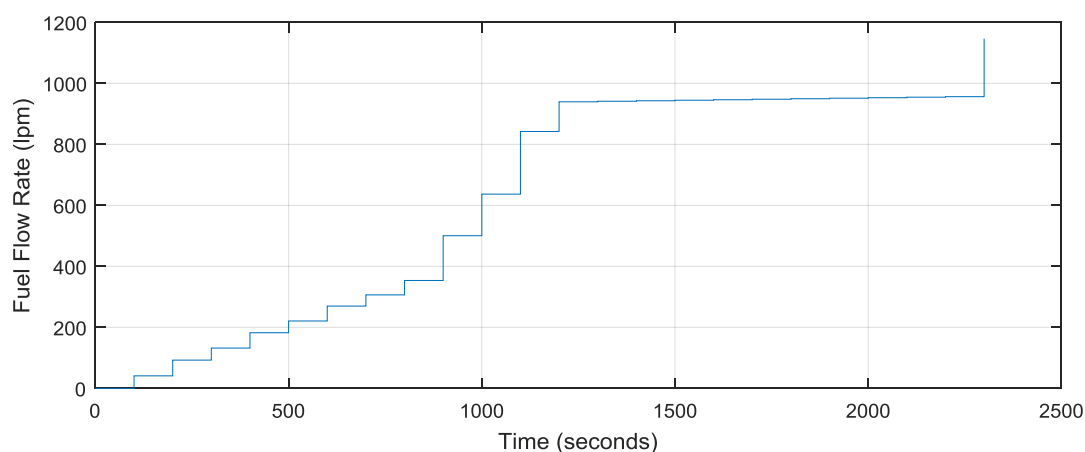
Σχήμα 5.140. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.141. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.142. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.143. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

- SoC 35 % – 85 %

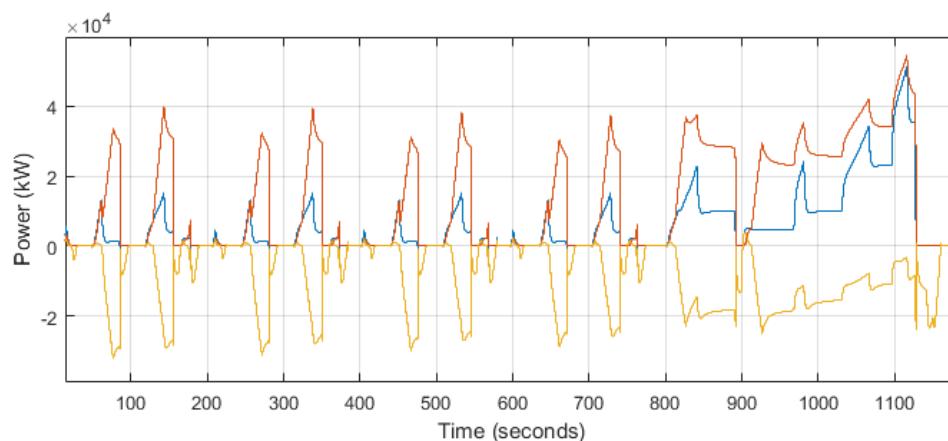
Το όχημα στην παρούσα προσομοίωση διατηρεί τα ίδια χαρακτηριστικά με τις προηγούμενες, απλά η χρήση της μπαταρίας γίνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό.

Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει αναλλοίωτη (Σχήμα 5.144 και 5.145). Οι μόνες διαφορές βρίσκονται στο χρόνο φόρτισης της μπαταρίας ο οποίος διαρκεί περισσότερο, όπως επίσης διαρκεί περισσότερο και ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας ως κινητήρια μονάδα ισχύος. Στο Σχήμα 5.146, είναι περισσότερο ορατός ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας.

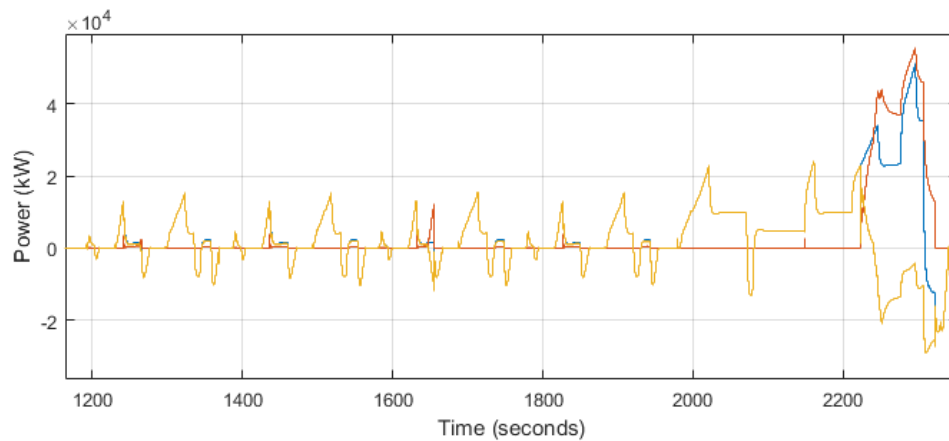
Επιπλέον το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας διακρίνεται στο Σχήμα 5.148. Κατά την φόρτιση (0 sec έως 1150 sec) παρατηρείται κατά διαστήματα σταδιακή αύξηση του ρεύματος έως τα -80 A. Η τάση της μπαταρία εμφανίζει εξίσου διαφορετικές τιμές από τις προηγούμενες δοκιμές.

Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.147. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 1150 sec) παρατηρείται μια συνεχής αύξηση της τάσης της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

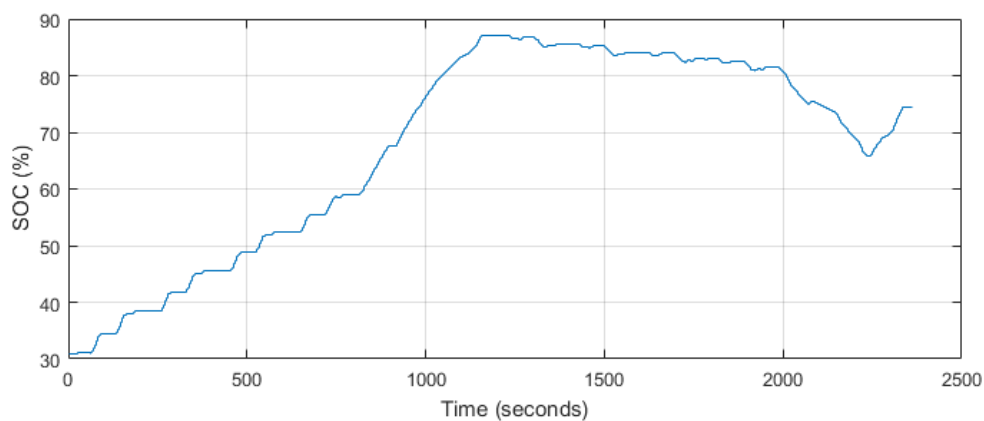
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 104.82$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.149) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.149 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



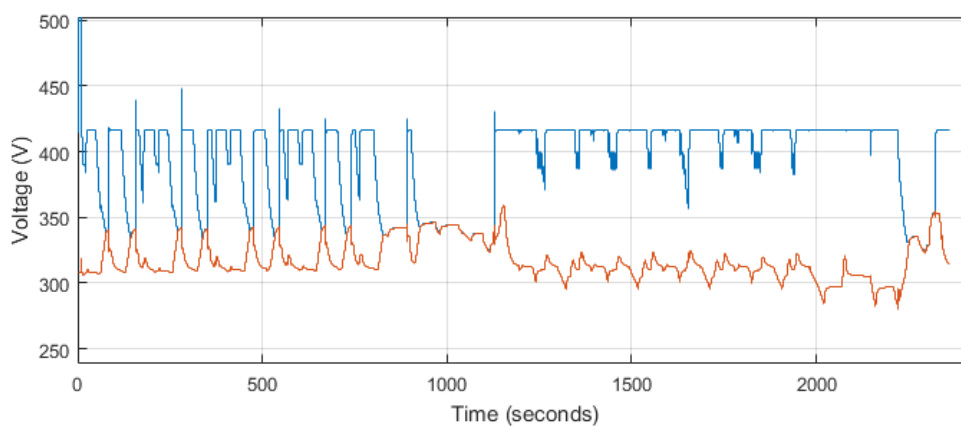
Σχήμα 5.144. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



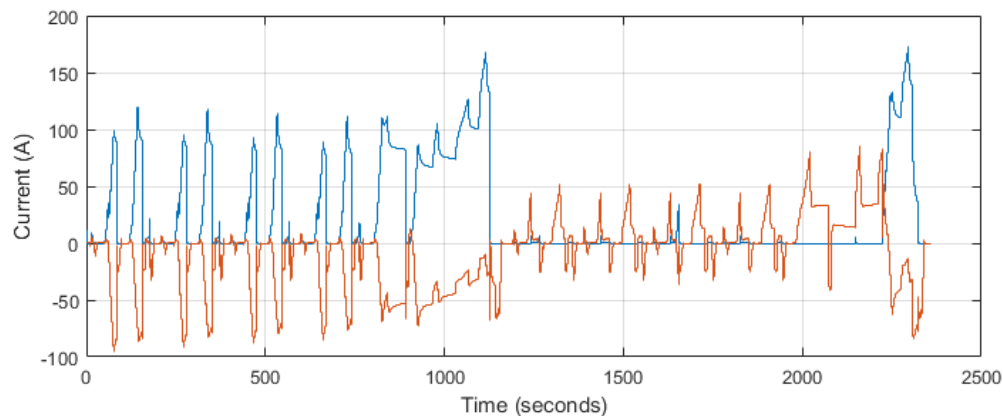
Σχήμα 5.145. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



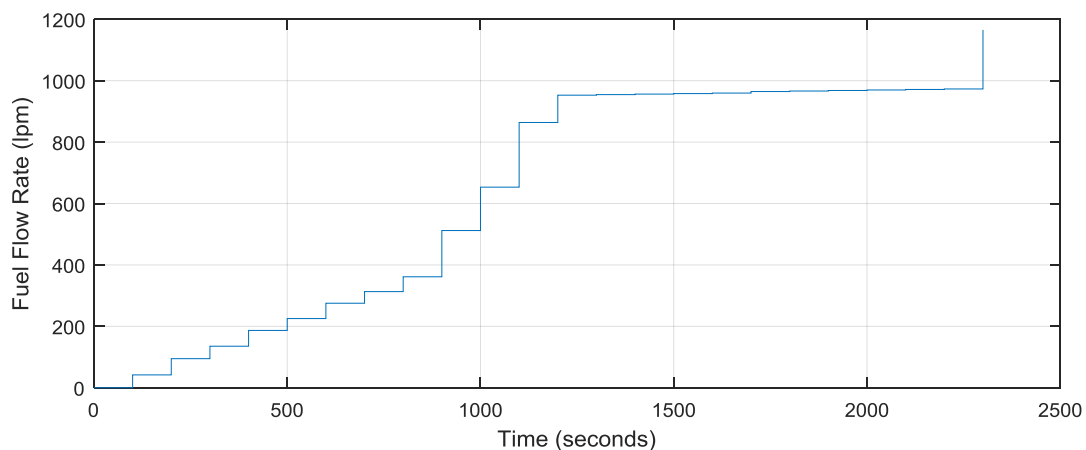
Σχήμα 5.146. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.147. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.148. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.149. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης NEDC με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

Κύκλος Οδήγησης: FTP

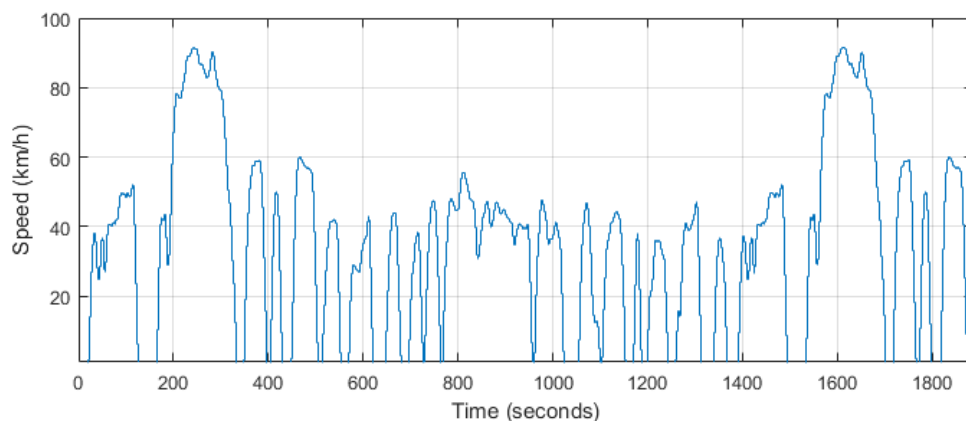
- SoC 60 % – 90 %

Η έναρξη του κύκλου οδήγησης ενεργοποιεί την κυψέλη υδρογόνου, διότι η τιμή του SoC είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου (Σχήμα 5.153). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος που παράγει η κυψέλη υδρογόνου (Σχήμα 5.151). Στα πρώτα 1700 sec η κίνηση του οχήματος γίνεται εξ' ολοκλήρου από την κυψέλη υδρογόνου ενώ παράλληλα φορτίζεται η μπαταρία. Η κυψέλη υδρογόνου ενεργοποιείται στα διαστήματα στα οποία κινείται το όχημα, ενώ απενεργοποιείται όταν η ταχύτητα του οχήματος είναι μηδέν. Μετά το πέρας του κύκλου φόρτισης, δηλαδή των 1700 sec, η μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μονάδα παραγωγής ισχύος για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής (1700 sec έως το τέλος κύκλου οδήγησης). Κατά τη διάρκεια του διαστήματος αυτού και πιο συγκεκριμένα στο διάστημα (2150 sec έως 2200 sec και 3450 sec έως 3550 sec), η ταχύτητα του οχήματος, ξεπερνά τα 80 km/h (Σχήμα 5.150) με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου για αυτό το χρονικό διάστημα.

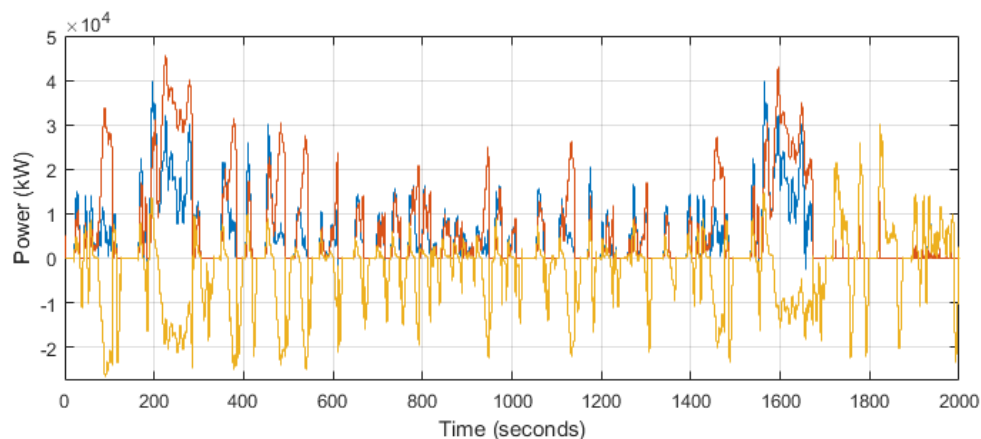
Στο Σχήμα 5.155 παρουσιάζεται η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας καθ' όλη την διάρκεια κίνησης του οχήματος. Στο πρώτο διάστημα των 1700 sec παρατηρείται η φόρτισή

της από την κυψέλη καυσίμου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -60 A. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές. Επιπλέον, στο Σχήμα 5.154 διακρίνεται η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 1700 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσης της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

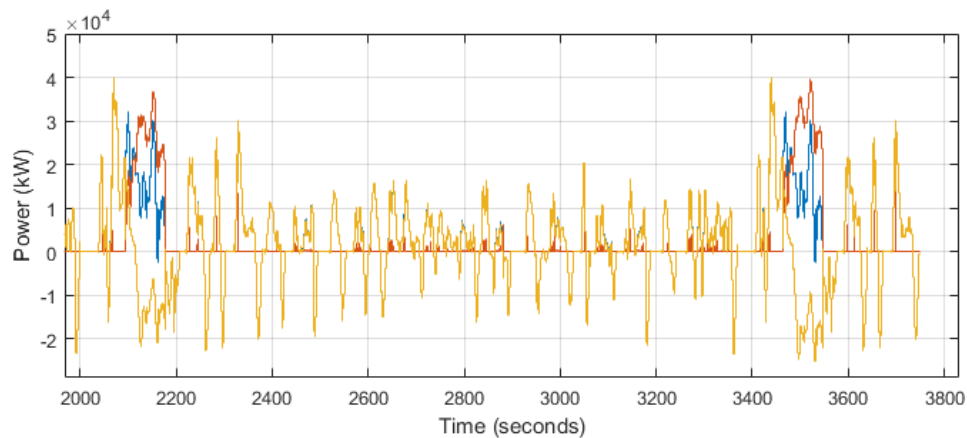
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 100.19$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.156) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.156 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



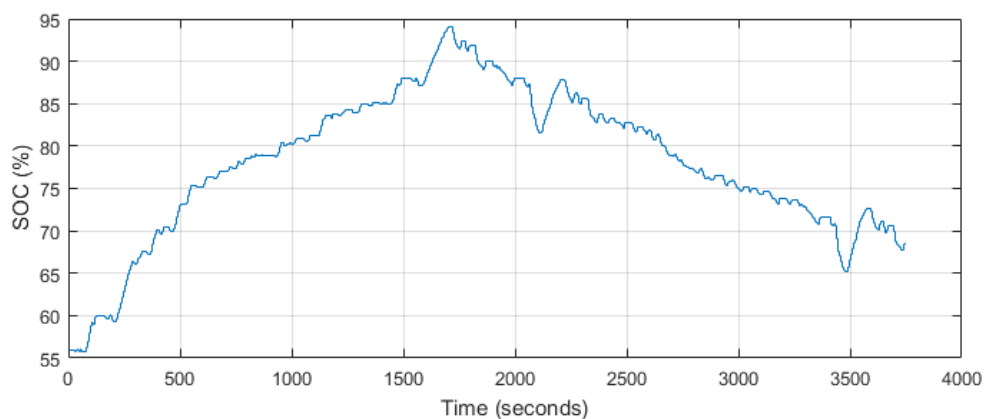
Σχήμα 5.150. Ταχύτητα οχήματος στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2



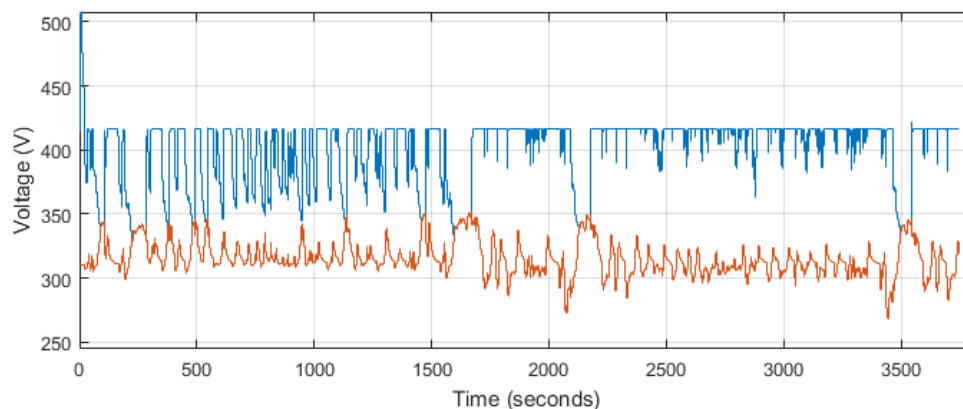
Σχήμα 5.151. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



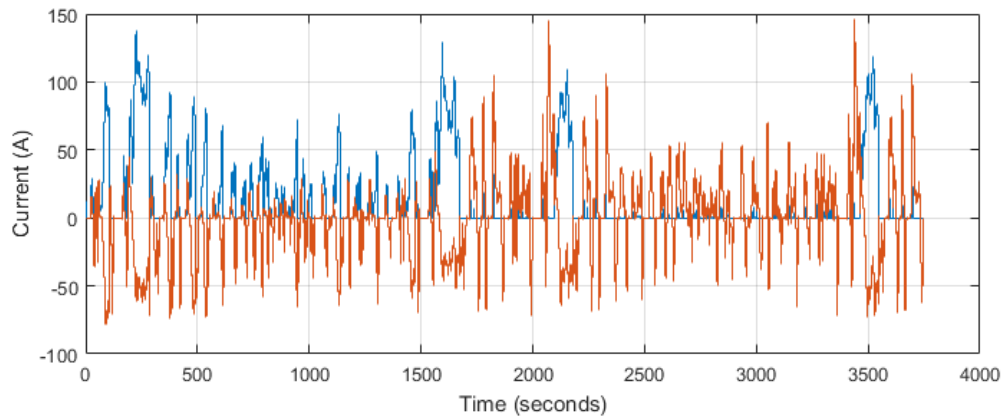
Σχήμα 5.152. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



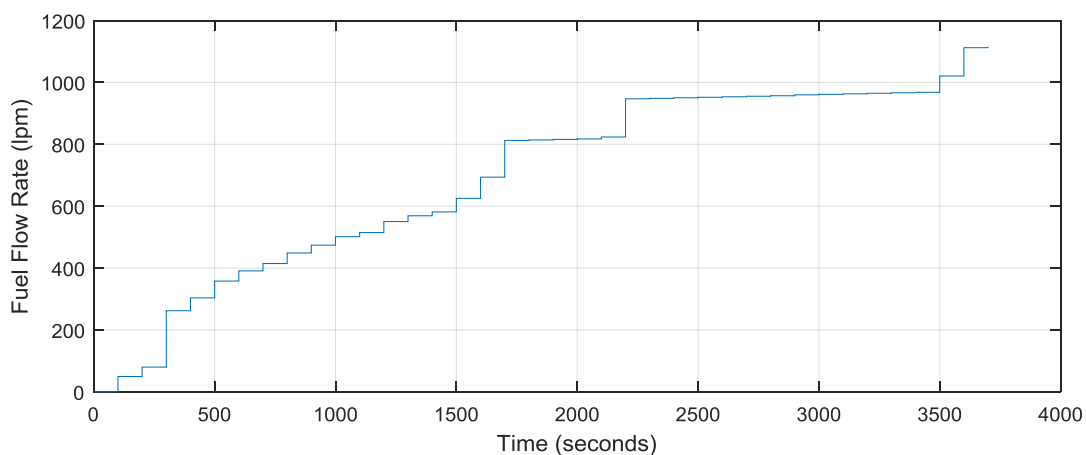
Σχήμα 5.153. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.154. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.155. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.156. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

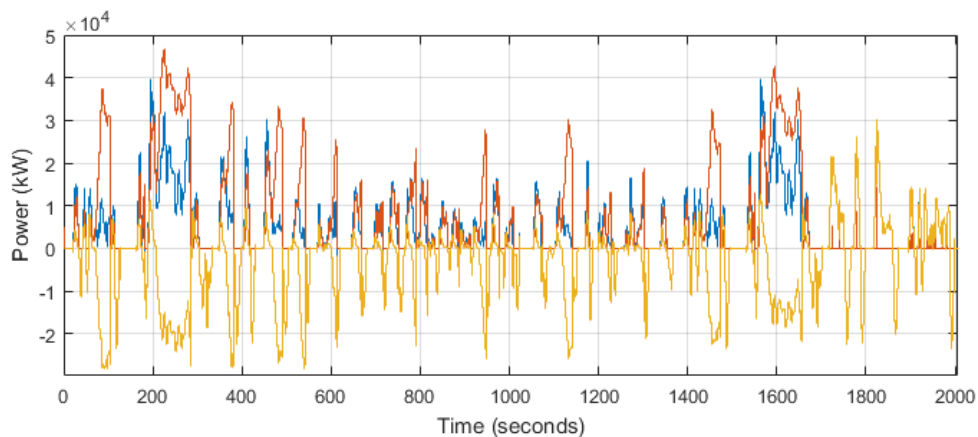
- SoC 40 % – 80 %

Στην παρούσα προσομοίωση η αλλαγή των τιμών κατωφλίου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας δεν επηρέασαν με διαφορετικό τρόπο την συμπεριφορά του οχήματος. Το σύστημα αναλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι μικρότερη του 40 %, ενώ σταμάτα και ξεκινά τη αποφόρτισή της όταν η τιμή του SoC αγγίζει το 80 % (Σχήμα 5.159). Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει ίδια με τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος, απλά το διάστημα χρήσης και φόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο. Δηλαδή οι κύκλοι φόρτισης της μπαταρίας πραγματοποιούνται στην αρχή του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.157 και 5.158) επιτρέποντας την κίνηση του οχήματος για μεγαλύτερο διάστημα με μπαταρία.

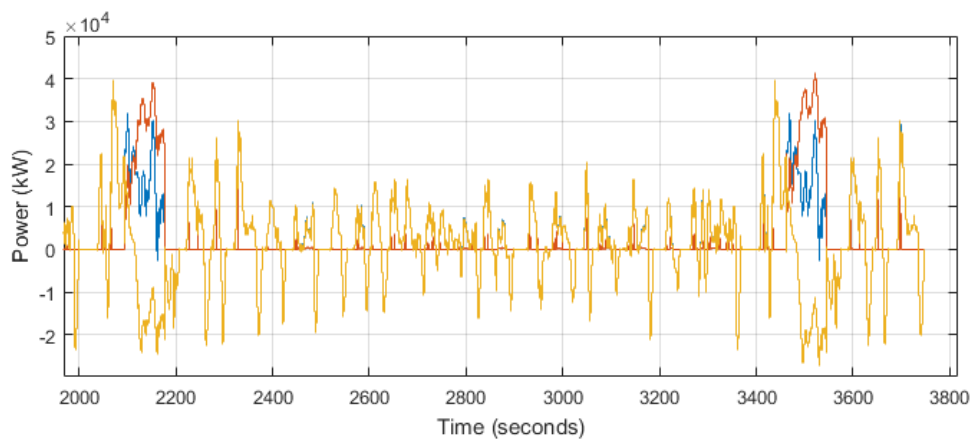
Το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας γίνεται παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.161. Στο πρώτο διάστημα των 1700 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -70 A. Έπειτα ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking, στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Στο Σχήμα 5.160 παρουσιάζεται η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου κατά την κίνηση του οχήματος. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 1700 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσης της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

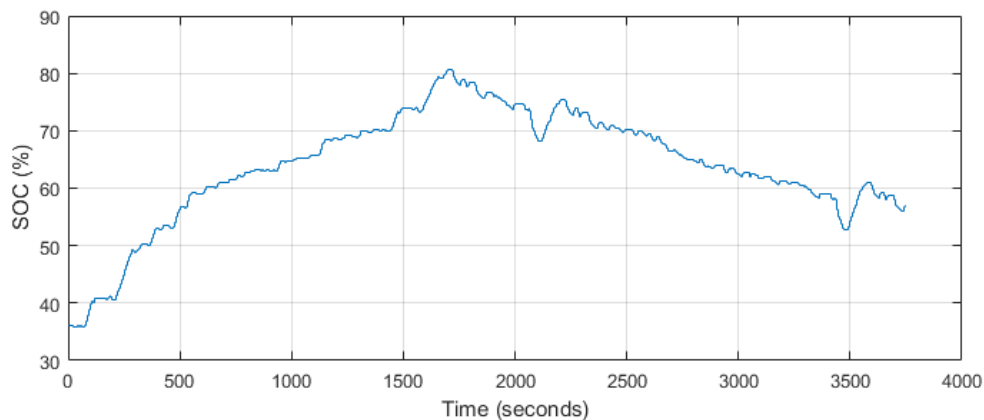
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 108.15$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.162) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.162 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



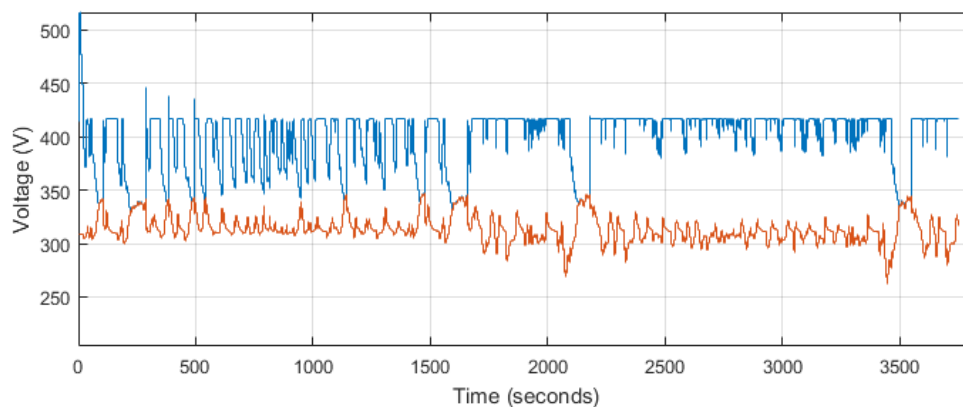
Σχήμα 5.157. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



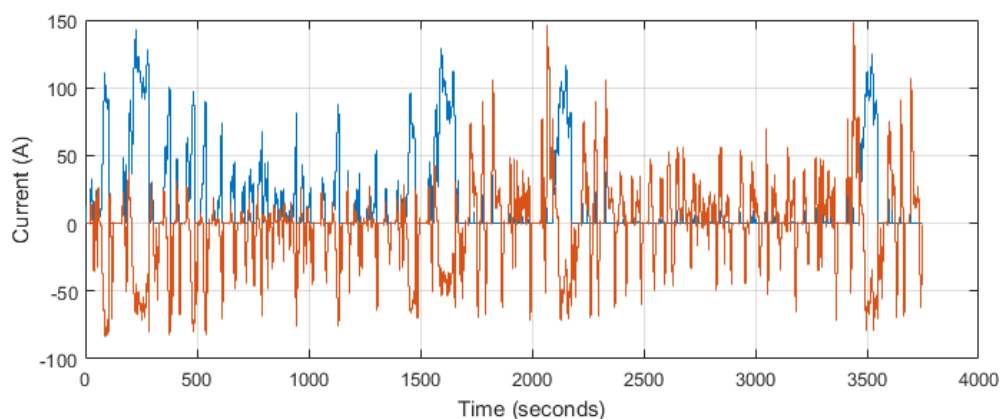
Σχήμα 5.158. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



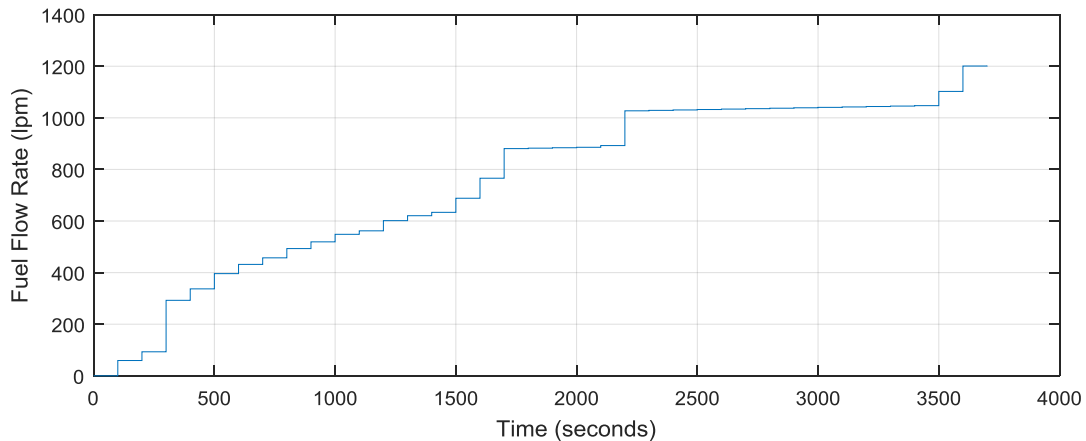
Σχήμα 5.159. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.160. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.161. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



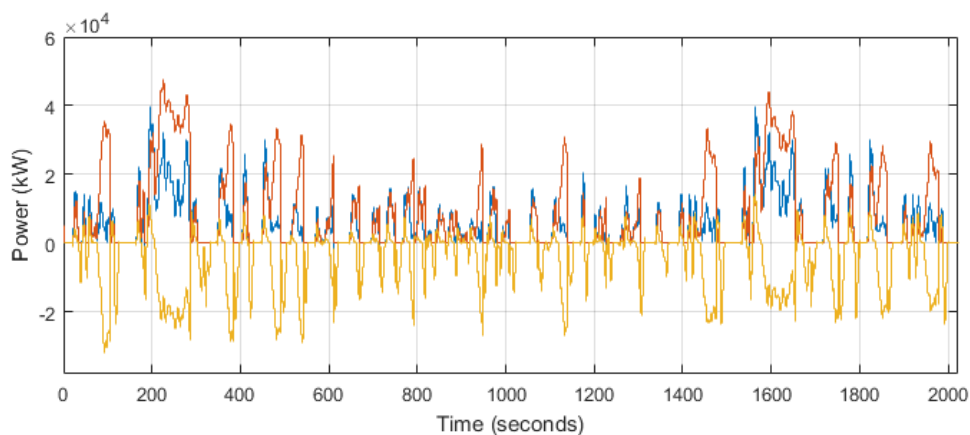
Σχήμα 5.162. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

- SoC 35 % – 85 %

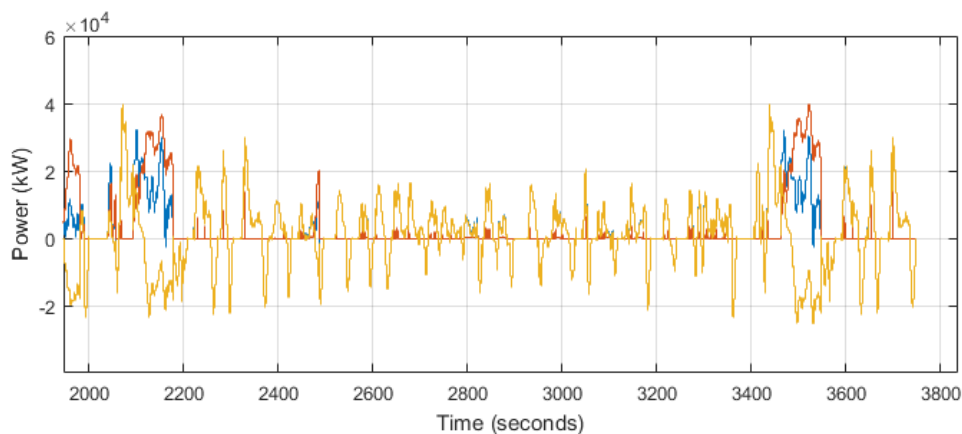
Η αλλαγή των τιμών κατωφλίου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας σε 35 % και 85 %, επέφεραν αλλαγές μόνο στον χρόνο φόρτισης της μπαταρίας ο οποίος διαρκεί περισσότερο (0 sec έως 1990 sec), όπως επίσης διαρκεί περισσότερο και ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας ως κινητήριας μονάδας ισχύος. Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει αναλλοίωτη (Σχήμα 5.163 και 5.164). Στο Σχήμα 5.165, είναι περισσότερο ορατός ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας.

Στο Σχήμα 5.167 παρουσιάζεται το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Στο πρώτο διάστημα των 1990 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -90 A. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές. Επιπλέον, στο Σχήμα 5.166 παρουσιάζεται η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 1990 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσης της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

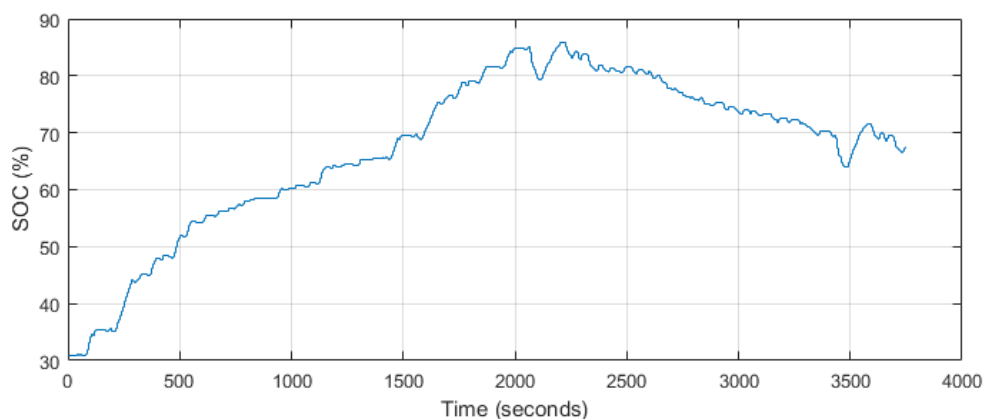
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 121.28$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.168) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.168 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



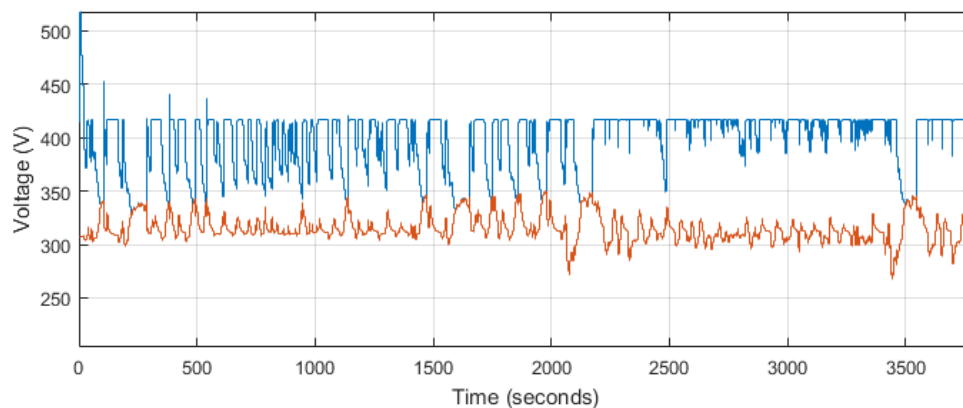
Σχήμα 5.163. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



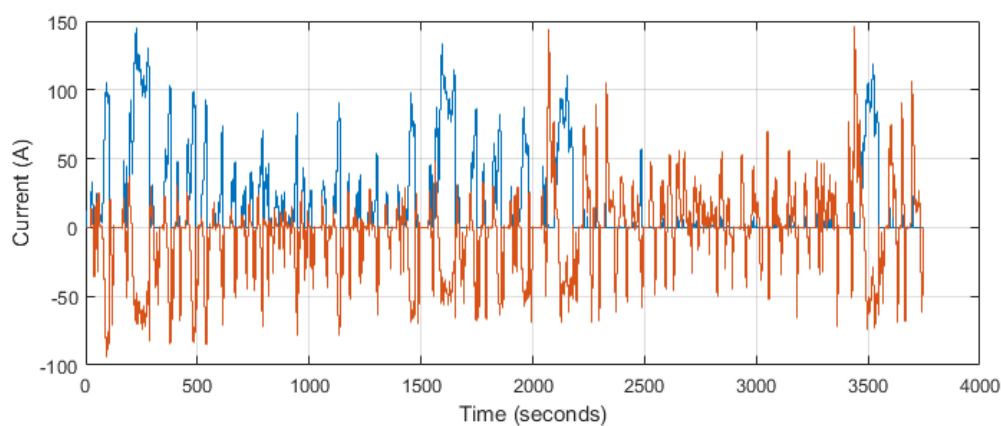
Σχήμα 5.164. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



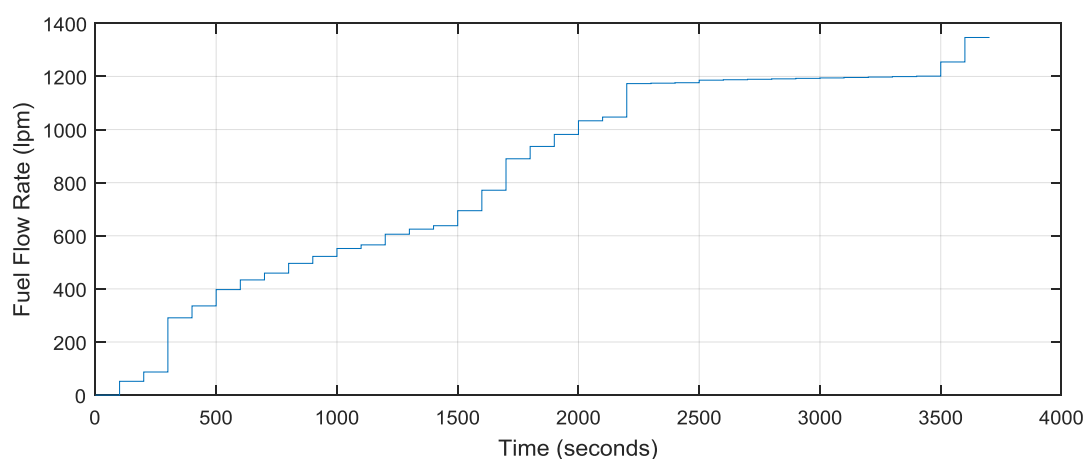
Σχήμα 5.165. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.166. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.167. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.168. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης FTP με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

Κύκλος Οδήγησης: WLTP class 3

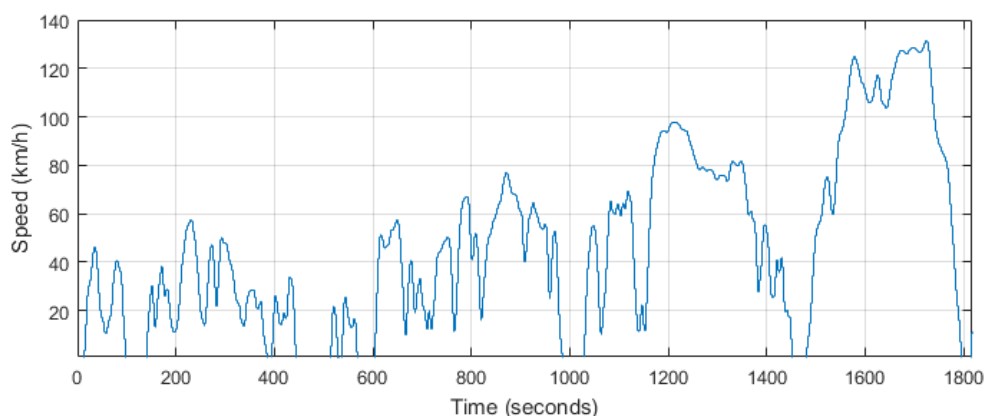
- SoC 60 % – 90 %

Στο Σχήμα 5.170 παρατηρείται αύξηση ισχύος της κυψέλης υδρογόνου κατά την εκκίνηση του οχήματος. Η αύξηση αυτή οφείλεται στη χαμηλή τιμή του SoC, η οποία είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου (Σχήμα 5.172). Στα πρώτα 1790 sec η κίνηση του οχήματος γίνεται εξ' ολοκλήρου από την κυψέλη υδρογόνου, ενώ παράλληλα φορτίζεται η μπαταρία. Η κυψέλη ενεργοποιείται στα διαστήματα στα οποία κινείται το όχημα, ενώ απενεργοποιείται όταν η ταχύτητα του οχήματος είναι μηδέν. Μετά το πέρας του κύκλου φόρτισης, δηλαδή των 1790 sec, η μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μονάδα παραγωγής ισχύος για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής (1790 sec έως το τέλος κύκλου οδήγησης). Κατά τη διάρκεια του διαστήματος αυτού και πιο συγκεκριμένα στο διάστημα (2950 sec έως 3150 sec και 3300 sec έως 3550 sec), η ταχύτητα του οχήματος ξεπερνά τα 80 km/h (Σχήμα 5.169) με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου για αυτό το χρονικό διάστημα.

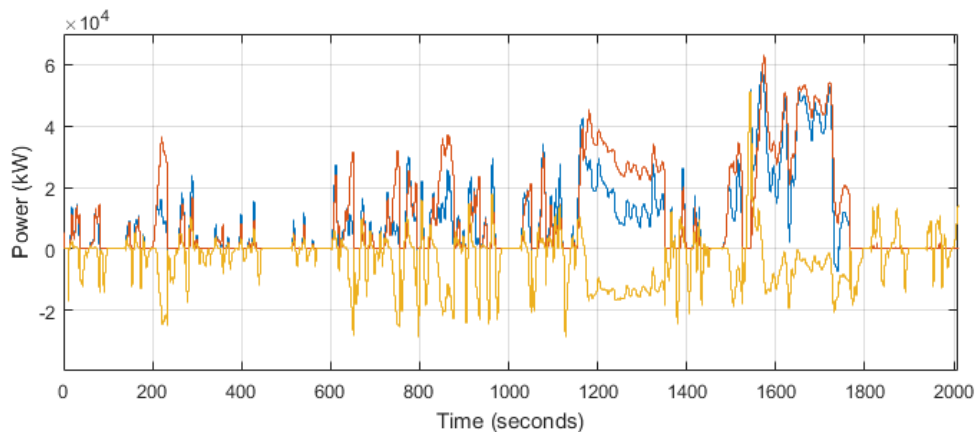
Στο Σχήμα 5.174 παρουσιάζεται η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας κατά την κίνηση του οχήματος. Στο πρώτο διάστημα των 1790 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -70 A. Έπειτα ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.173. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 1950 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσεως της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

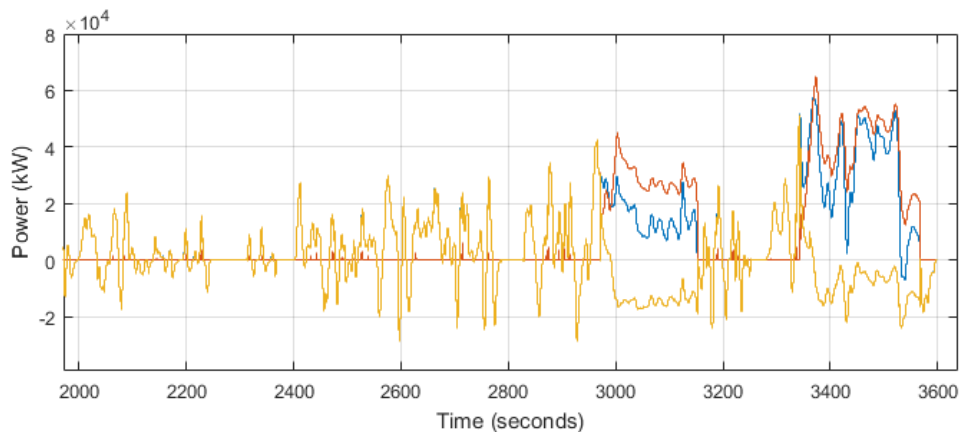
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 206.4$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.175) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.175 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



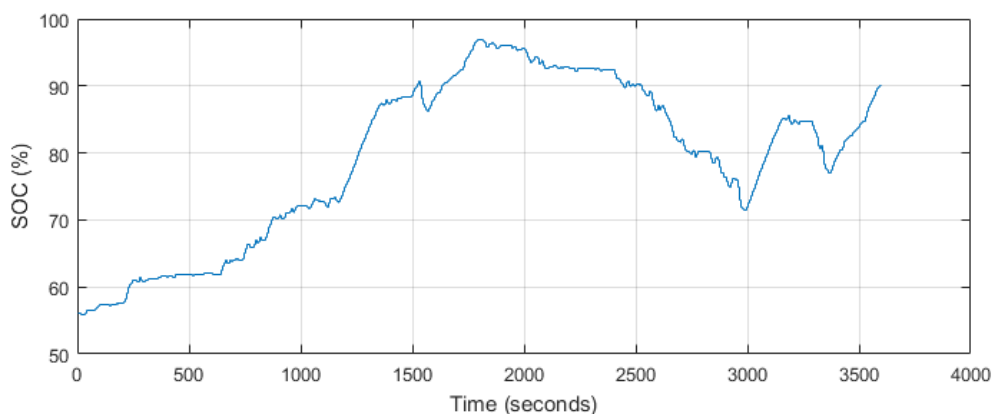
Σχήμα 5.169. Ταχύτητα οχήματος στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS₂.



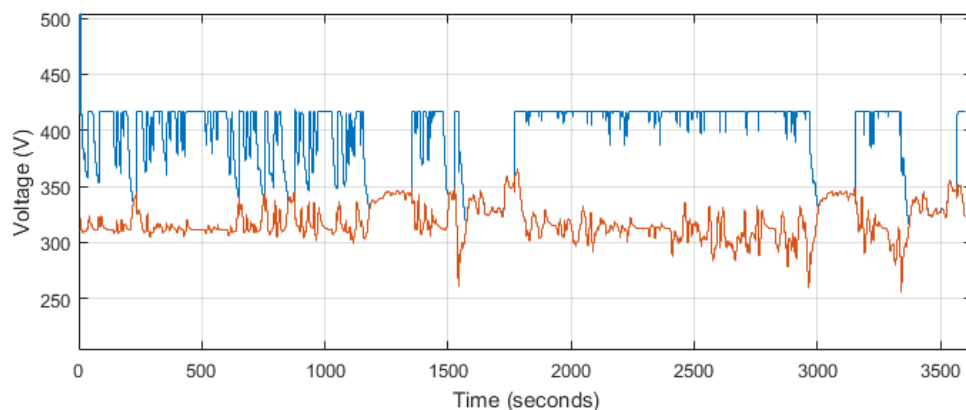
Σχήμα 5.170. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



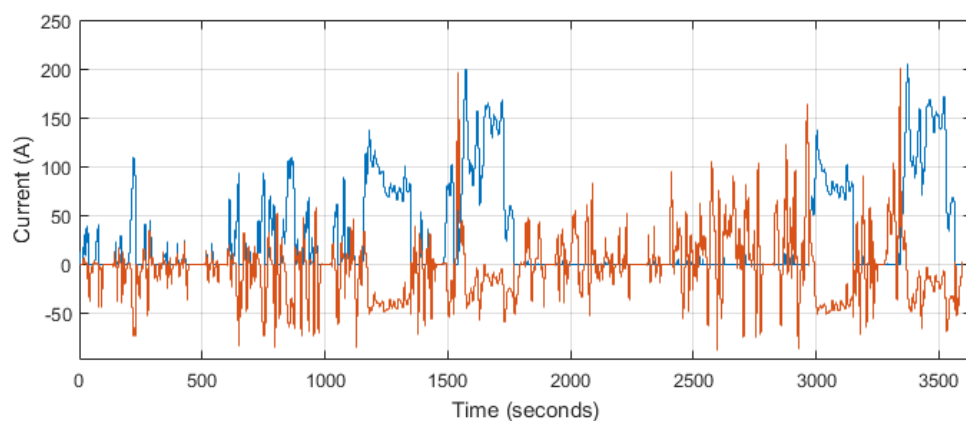
Σχήμα 5.171. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



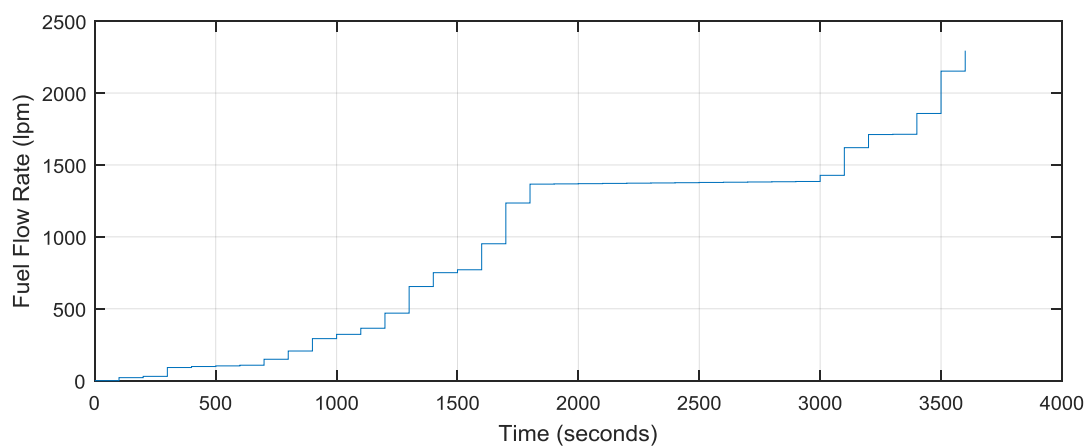
Σχήμα 5.172. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.173. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.174. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



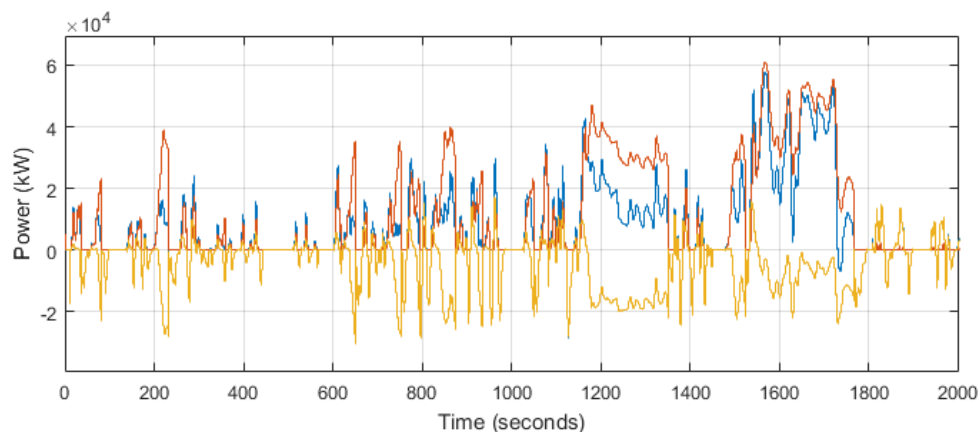
Σχήμα 5.175. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

- SoC 40 % – 80 %

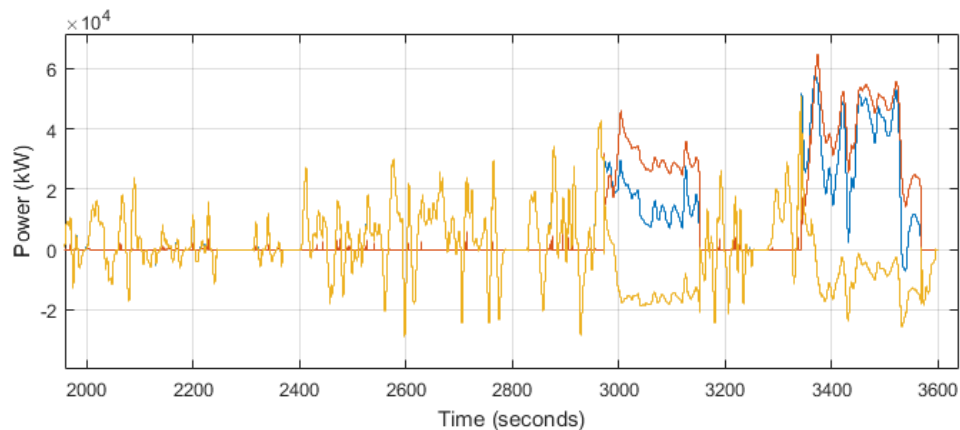
Στην συγκεκριμένη προσομοίωση το σύστημα αναλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι μικρότερη του 40 %, ενώ σταμάτα και ξεκινά τη αποφόρτισή της όταν η τιμή του SoC αγγίζει το 80 % (Σχήμα 5.178). Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει ίδια με τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος, απλά το διάστημα χρήσης και φόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο. Δηλαδή οι κύκλοι φόρτισης της μπαταρίας πραγματοποιούνται στην αρχή και το τέλος του κύκλου οδήγησης (Σχήμα 5.177 και 5.176) επιτρέποντας την κίνηση του οχήματος για μεγαλύτερο διάστημα με μπαταρία

Το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.180. Στο πρώτο διάστημα των 1790 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -70 A. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές. Ακόμη, η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.179. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 1790 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσεως της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

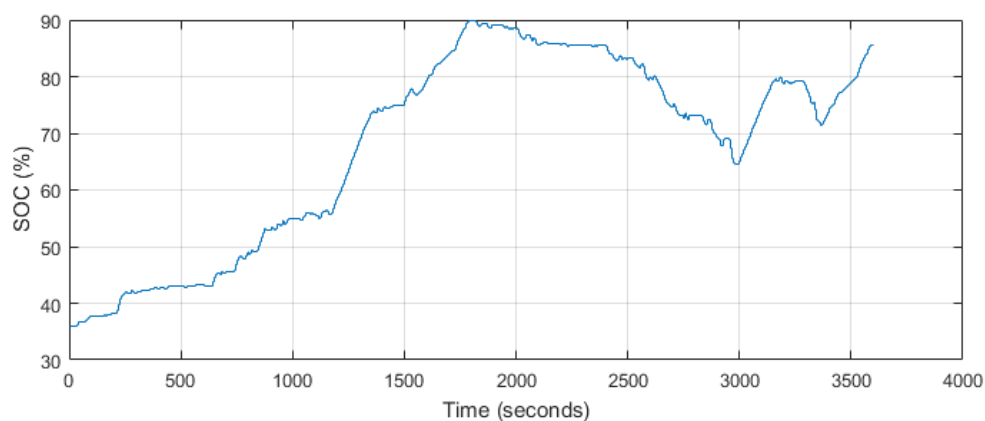
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 221.24$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.181) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.181 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



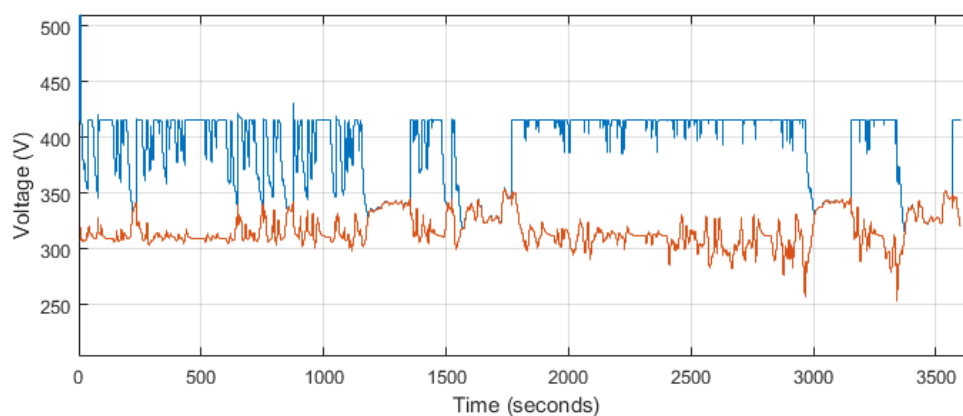
Σχήμα 5.176. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



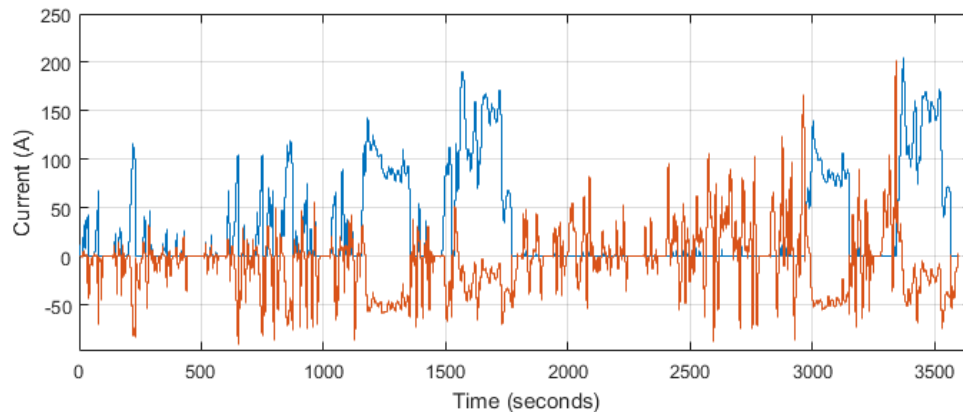
Σχήμα 5.177. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



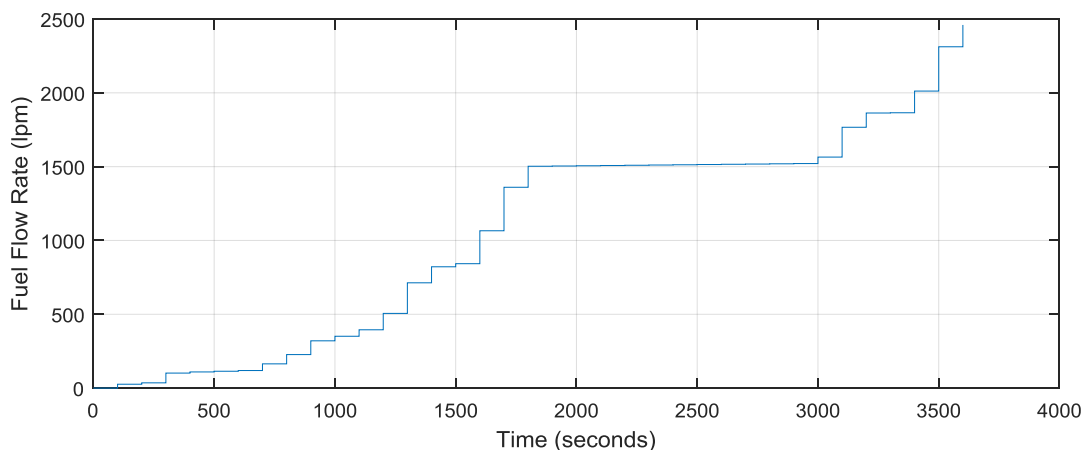
Σχήμα 5.178. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.179. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.180. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.181. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

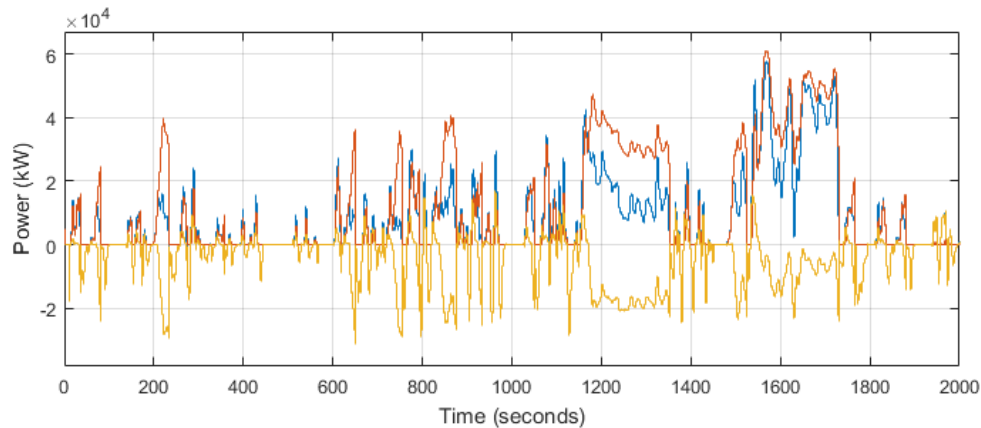
- SoC 35 % – 85 %

Στην παρούσα προσομοίωση η λειτουργία των συστημάτων παραμένει αναλλοίωτη (Σχήμα 5.182 και 5.183). Οι μόνες διαφορές βρίσκονται στο χρόνο φόρτισης της μπαταρίας ο οποίος διαρκεί περισσότερο, όπως επίσης διαρκεί περισσότερο και ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας ως κινητήρια μονάδα ισχύος. Στο Σχήμα 5.184, είναι περισσότερο ορατός ο χρόνος χρήσης της μπαταρίας. Η αύξηση αυτή της διάρκειας φόρτισης και χρήσης της μπαταρίας οφείλεται στην αλλαγή των τιμών κατωφλίου σε 35 % και 85 %.

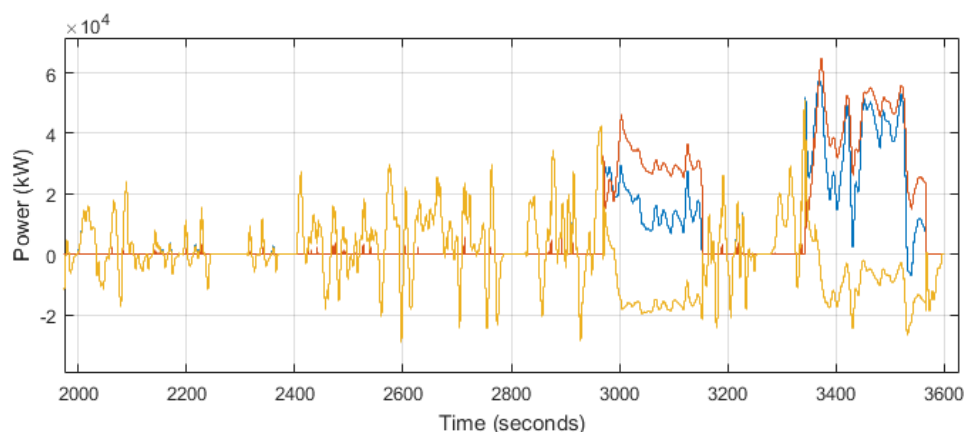
Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας γίνεται αντιληπτή στο Σχήμα 5.186, όπου στο πρώτο διάστημα των 1790 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -80 A. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.185. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 1790 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσεως της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

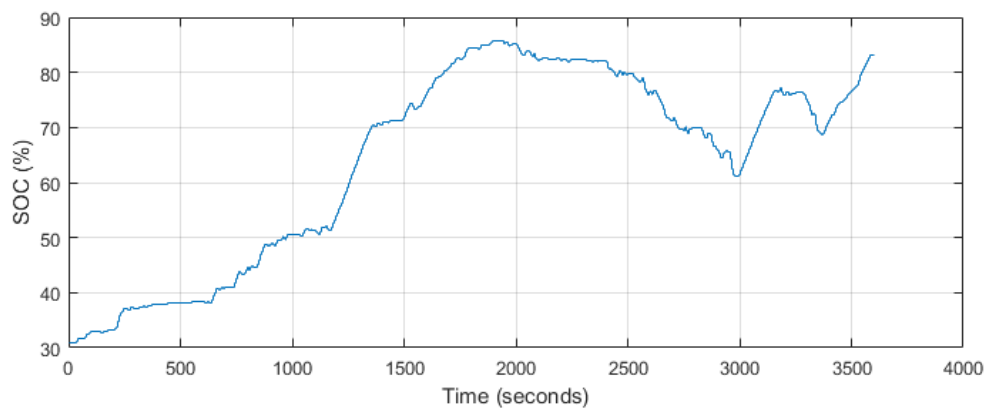
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 223.44$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.187) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.187 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



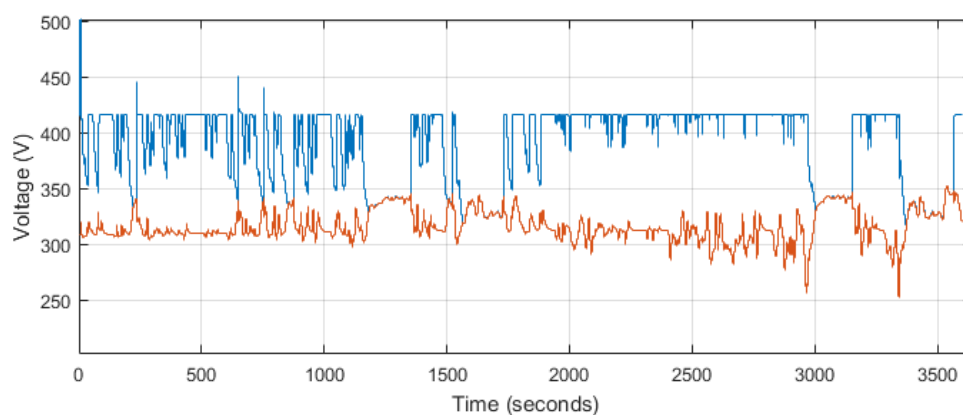
Σχήμα 5.182. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



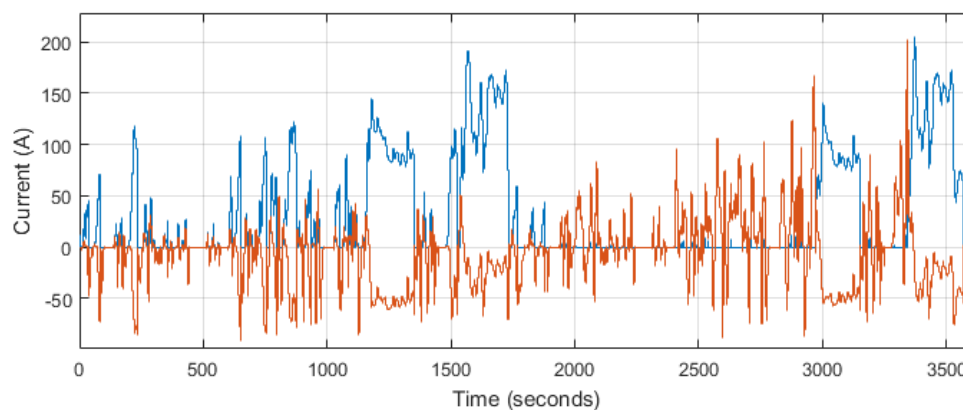
Σχήμα 5.183. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



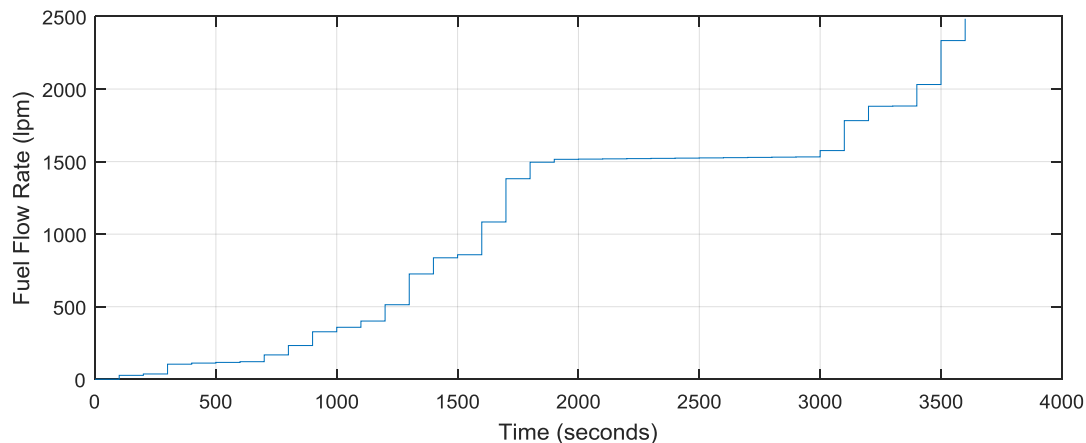
Σχήμα 5.184. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.185. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.186. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.187. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης WLTP class 3 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

Κύκλος Οδήγησης: ArtMW 150

- SoC 60 % – 90 %

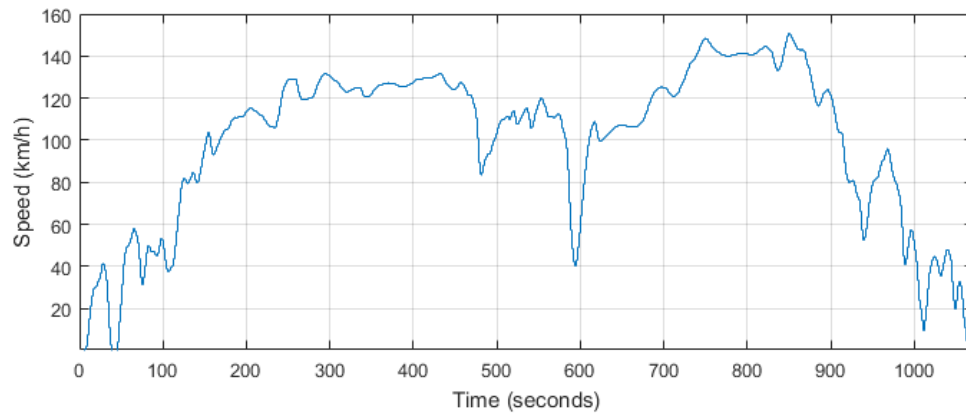
Επειδή το μεγαλύτερο μέρος αυτού του κύκλου περιλαμβάνει κίνηση οχήματος σε υψηλές ταχύτητες (Σχήμα 5.188) είναι αναμενόμενη η χρήση της κυψέλης υδρογόνου σε μεγαλύτερο βαθμό.

Η εκκίνηση του οχήματος ξεκινά με την χρήση της κυψέλης υδρογόνου ως κινητήριας μονάδας, διότι η τιμή του SoC είναι μικρότερη της τιμής κατωφλίου (Σχήμα 5.191). Κατά την διάρκεια των πρώτων 1520 sec η κίνηση του οχήματος γίνεται εξ' ολοκλήρου από την κυψέλη ενώ παράλληλα φορτίζεται η μπαταρία. Μετά το πέρας του κύκλου φόρτισης, δηλαδή των 1520 sec, και ενώ η τιμή του SoC είναι μεγαλύτερη της τιμής κατωφλίου, η κυψέλη δεν απενεργοποιείται αφού η ταχύτητα του οχήματος είναι μεγαλύτερη των 80 km/h (Σχήμα 5.113 και 5.144). Για αυτό και η τιμή του SoC δεν σταματά στο 90 % και συνεχίζει να αυξάνεται, (Σχήμα 5.191). Στο τέλος του κύκλου οδήγησης και για ένα μικρό διάστημα (από τα 2020 sec έως το τέλος κύκλου οδήγησης) η μπαταρία αναλαμβάνει την κίνηση του οχήματος.

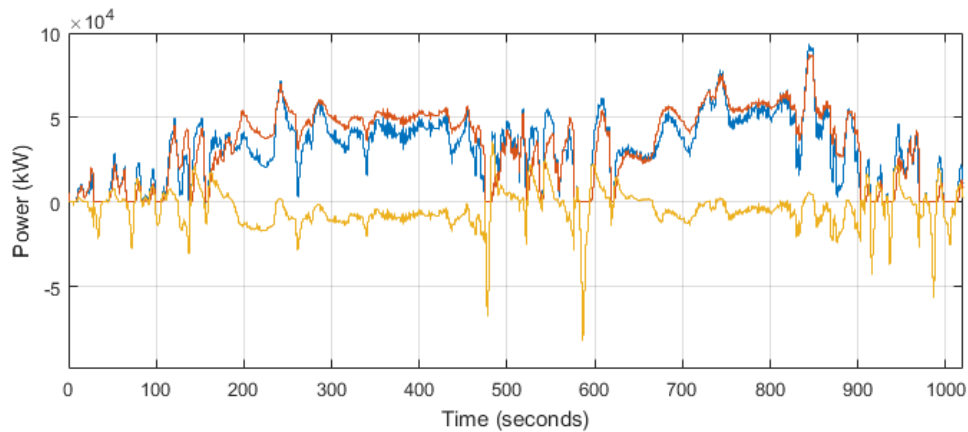
Στο Σχήμα 5.193 παρουσιάζεται η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Στο πρώτο διάστημα των 2020 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -80 A, ενώ σε μερικά σημεία αγγίζει τα -200 A. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Επίσης, η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.192. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 2020 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσης της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

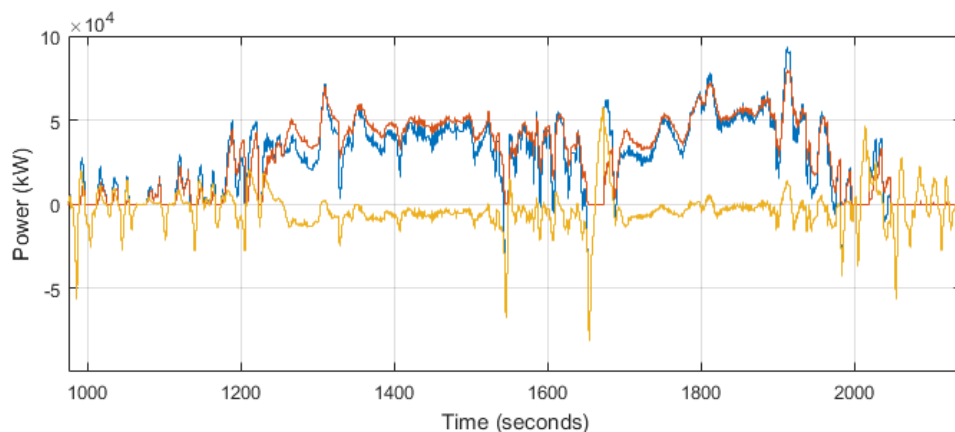
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 406.65$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.194) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.194 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



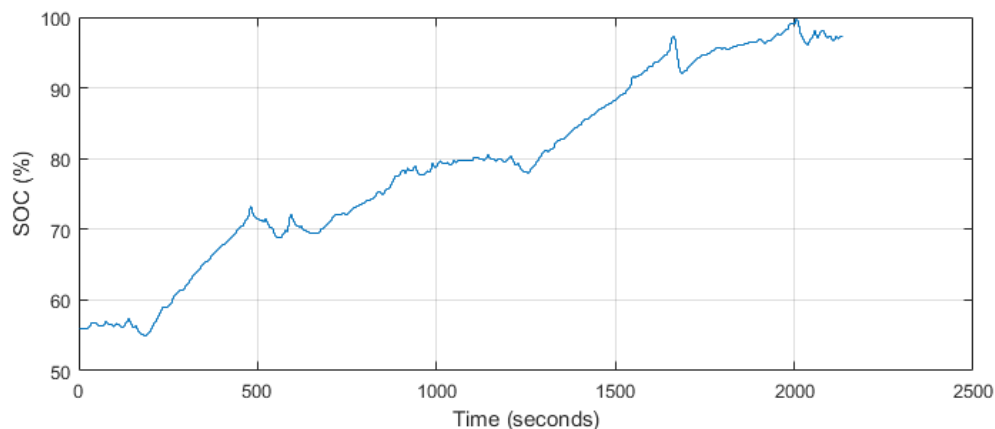
Σχήμα 5.188. Ταχύτητα οχήματος στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



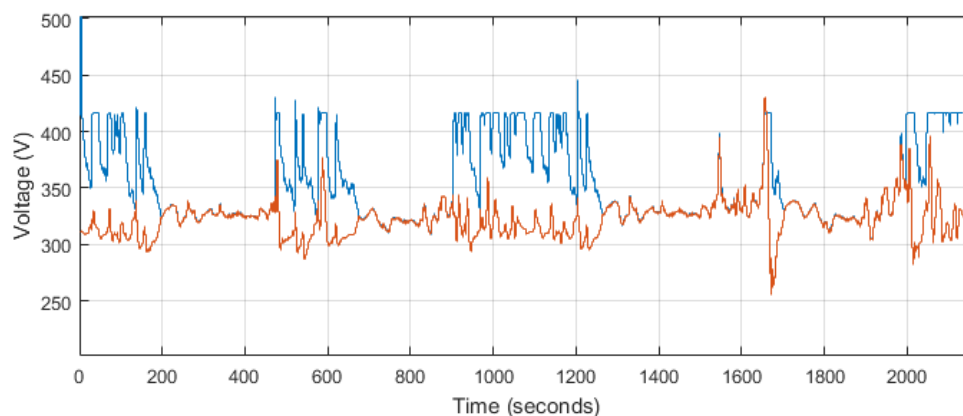
Σχήμα 5.189. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



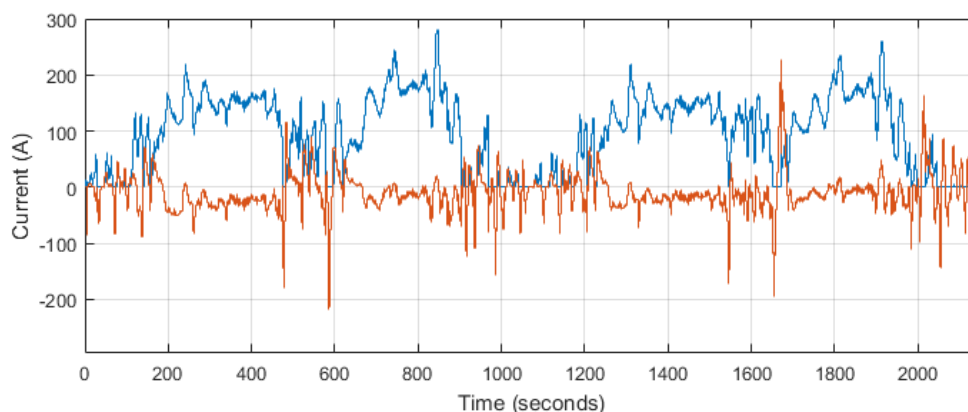
Σχήμα 5.190. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



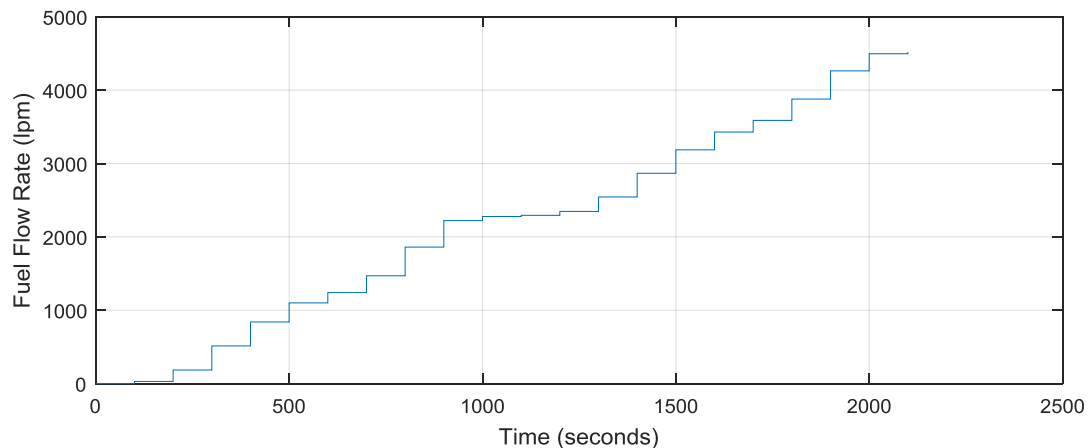
Σχήμα 5.191. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.192. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.193. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.194. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

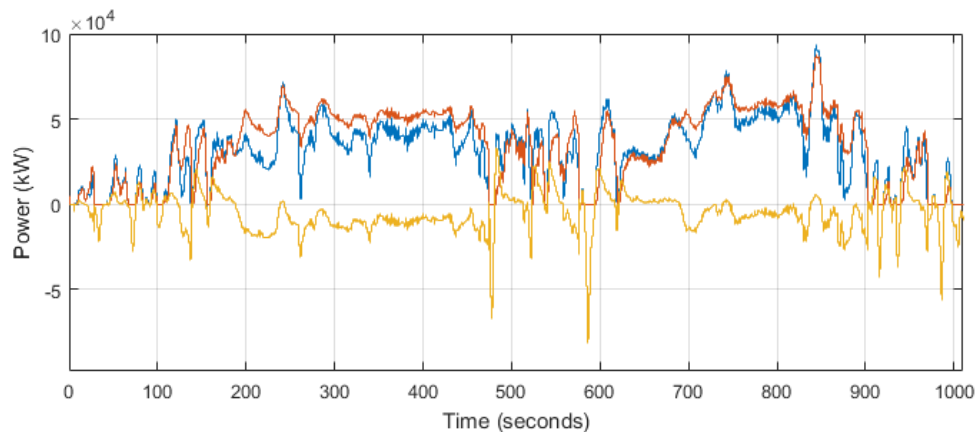
- SoC 40 % – 80 %

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση το σύστημα αναλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας όταν η τιμή του SoC είναι μικρότερη του 40 %, ενώ σταμάτα και ξεκινά τη αποφόρτισή της όταν η τιμή του SoC αγγίζει το 80 % (Σχήμα 5.197). Η λειτουργία των συστημάτων παραμένει ίδια με τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος (Σχήμα 5.195 και 5.196). Η συμπεριφορά του οχήματος παραμένει ίδια με αυτή της προηγούμενης προσομοίωσης.

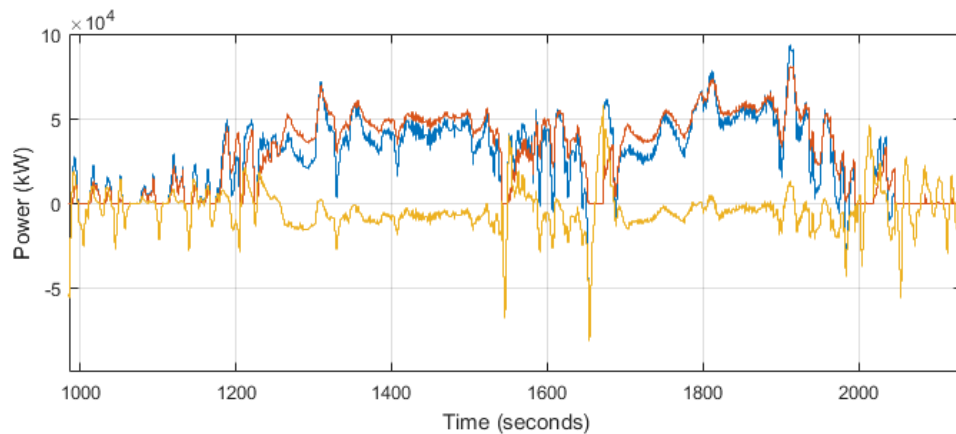
Το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας γίνεται αντιληπτό στο Σχήμα 5.199. Στο πρώτο διάστημα των 2020 sec παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη υδρογόνου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -80 A, ενώ σε ένα σημείο αγγίζει τα -210 A. Από το σημείο εκείνο και μετά ξεκινά η διαδικασία αποφόρτισης, ενώ είναι εμφανής η λειτουργία του regenerative braking στις περιπτώσεις που το ρεύμα παίρνει αρνητικές τιμές.

Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.198. Στα διαστήματα φόρτισης της μπαταρίας (0 sec έως 2020 sec) παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσεως της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

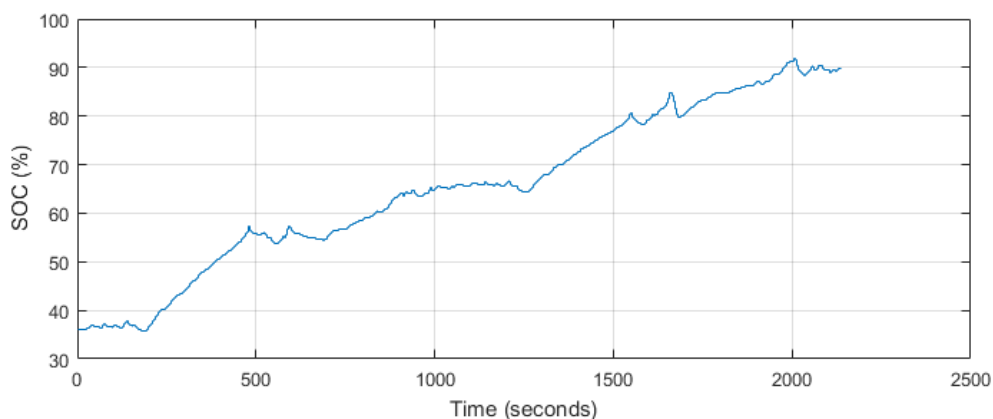
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 419.36$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.200) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.200 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



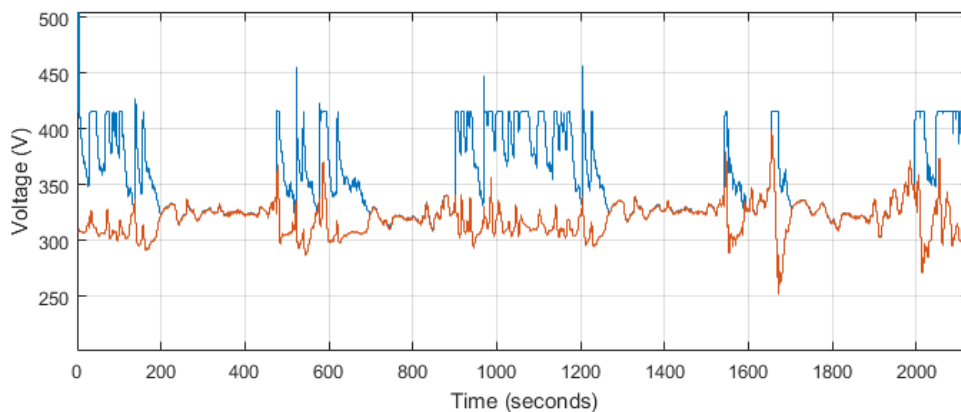
Σχήμα 5.195. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



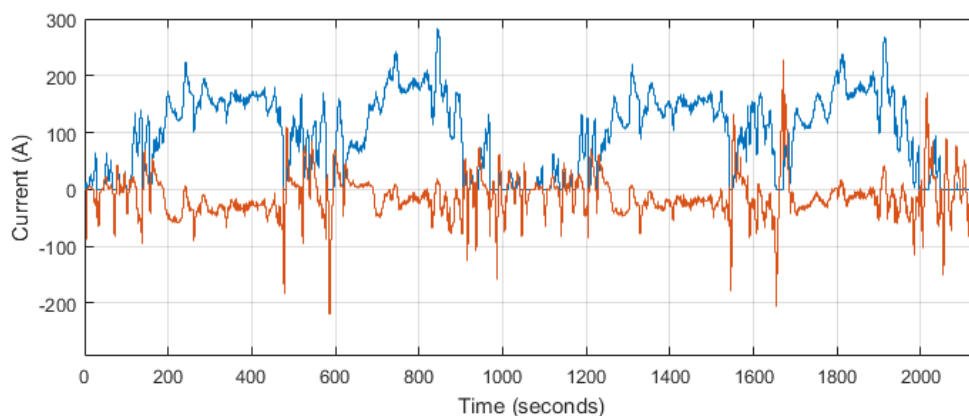
Σχήμα 5.196. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



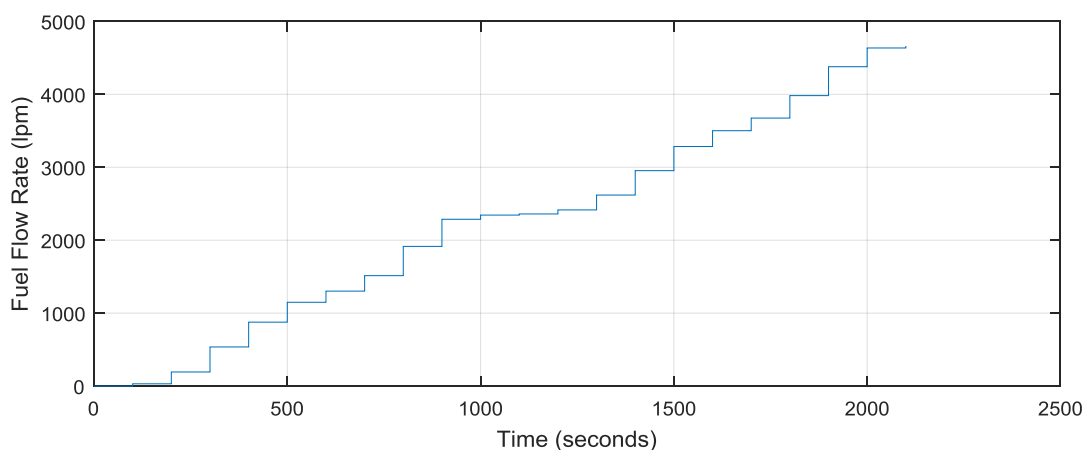
Σχήμα 5.197. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.198. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.199. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.200. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

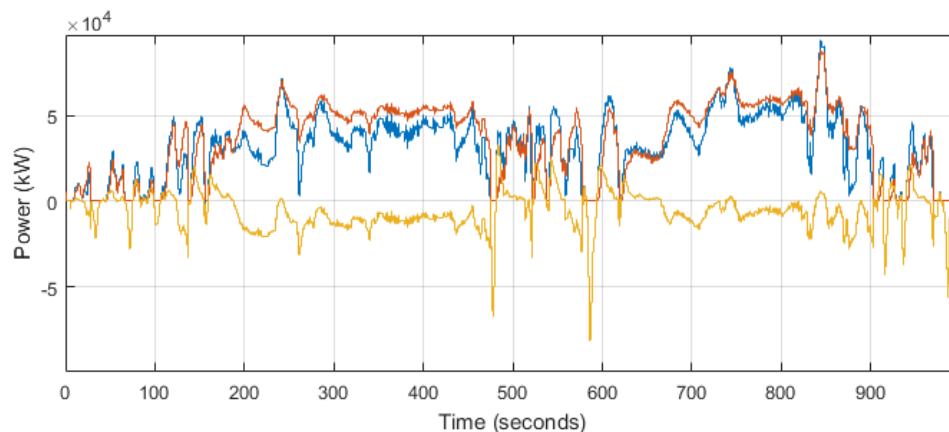
- SoC 35 % – 85 %

Η λειτουργία των συστημάτων δεν εμφανίζει διαφορές με την προσομοίωση που έχει περιγραφεί παραπάνω (SoC 60 % - 90 %) (Σχήμα 5.201 και 5.202). Η μόνη διαφορά βρίσκεται στο ότι η φόρτιση της μπαταρίας γίνεται καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου οδήγησης. Στο Σχήμα 5.203, είναι περισσότερο ορατός ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας.

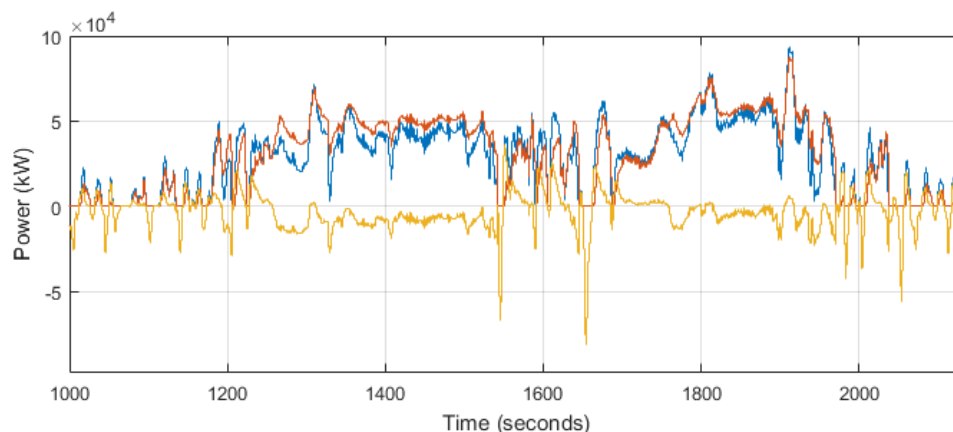
Η διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας γίνεται αντιληπτή στο Σχήμα 5.205, όπου στο διάστημα του κύκλου οδήγησης παρατηρείται η φόρτισή της από την κυψέλη καυσίμου με το ρεύμα να αυξάνεται σταδιακά στα -80 A, ενώ σε μερικά σημεία αγγίζει τα -210 A.

Η τάση λειτουργίας της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι εμφανής στο Σχήμα 5.204. Παρατηρείται μια συνεχή αύξηση της τάσεως της μπαταρίας από τα 310 V έως τα 345 V.

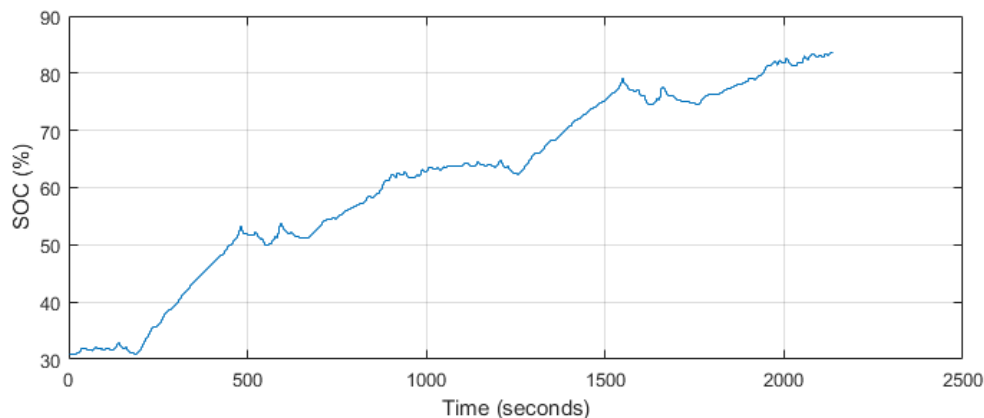
Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα $W_g = 415.95$ g. Ο υπολογισμός της έγινε μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5.206) και της εξίσωσης 4.3. Τα σκαλάκια τα οποία είναι εμφανή στο Σχήμα 5.206 της συνολικής ροής υδρογόνου οφείλονται στην απενεργοποίηση της κυψέλης όταν το όχημα δεν κινείται.



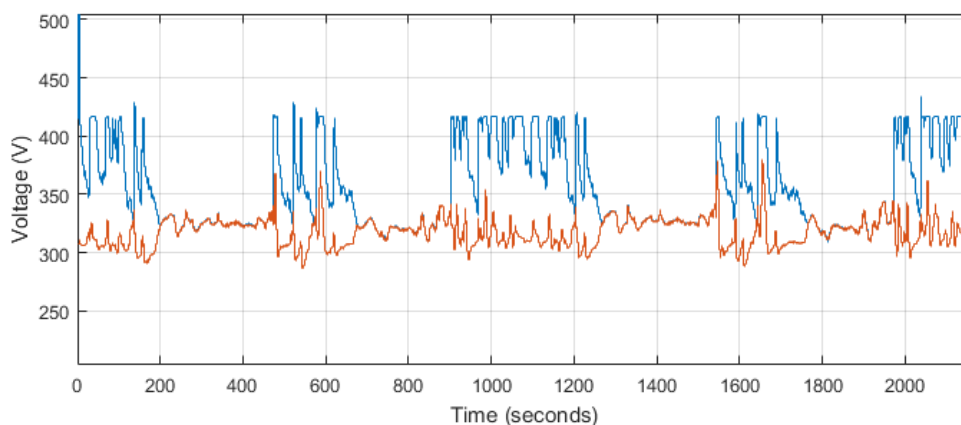
Σχήμα 5.201. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



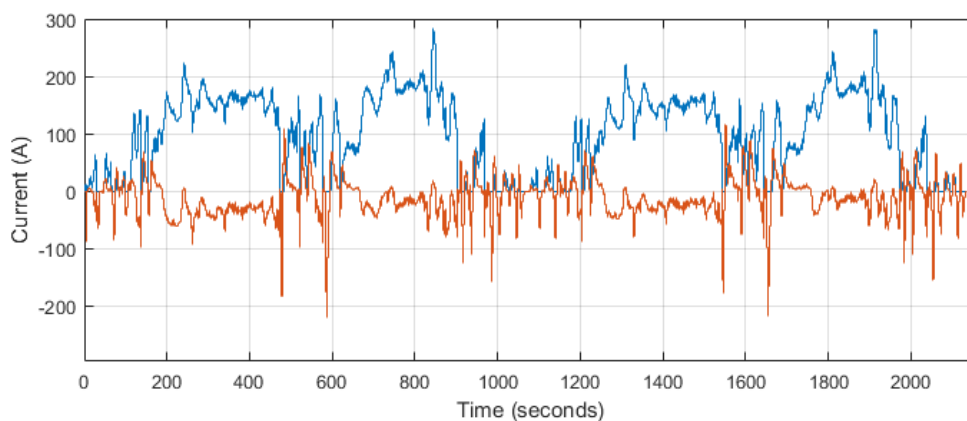
Σχήμα 5.202. Ισχύς (ηλεκτρικής μηχανής – μπλε, κυψέλης – κόκκινο, μπαταρίας - κίτρινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



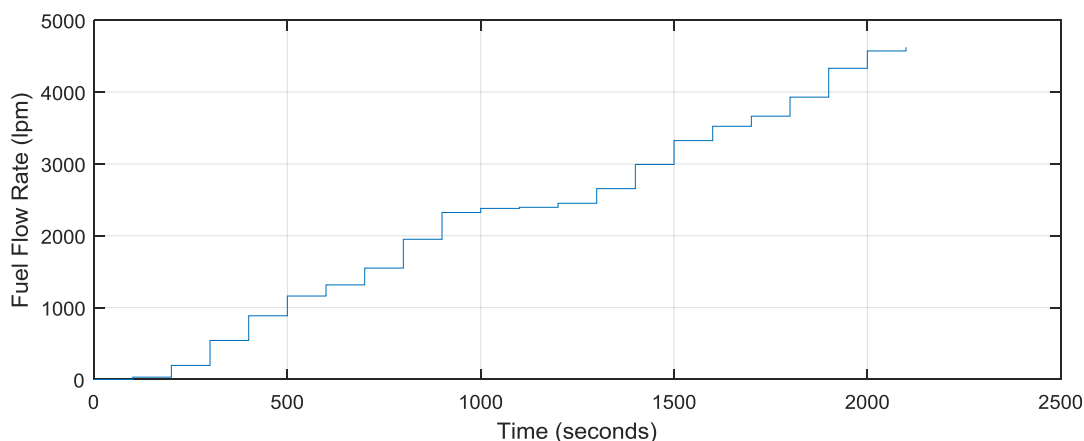
Σχήμα 5.203. SoC μπαταρίας στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.204. Τάση (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.205. Ένταση ρεύματος (κυψέλης – μπλε, μπαταρία - κόκκινο) στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.



Σχήμα 5.206. Συνολική ροή υδρογόνου στον κύκλο οδήγησης ArtMW 150 με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας EMS_2.

5.2 Σύγκριση κατανάλωσης καυσίμου

Η αυτονομία του ηλεκτρικού οχήματος με χρήση κυψελών καυσίμου σχετίζεται με το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, την κατανάλωση ενέργειας κάτω από διαφορετικούς κύκλους οδήγησης και τις διάφορες οδηγικές συμπεριφορές. Η διάρκεια λειτουργίας του οχήματος μέχρι την εξάντληση της ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να μεταβληθεί ελέγχοντας το ποσοστό φόρτισης (SoC) στο οποίο θα πραγματοποιείται η φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος.

Κατά την δοκιμή του οχήματος χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Κάθε ένα από αυτά προσομοιώθηκε σε τέσσερις διαφορετικούς κύκλους οδήγησης με χρήση κάθε φορά διαφορετικού ποσοστού φόρτισης (SoC). Κάθε ποσοστό φόρτισης παρουσίασε διαφορετική κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 5.207).

Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει την ποσότητα υδρογόνου η οποία καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια προσομοίωσης του κύκλου οδήγησης NEDC. Το EMS_1 παρουσιάζει καλύτερη αυτονομία έναντι του EMS_2, καθώς γίνεται μεγαλύτερη χρήση της μπαταρίας ως κινητήριας μονάδας για την κίνηση του οχήματος. Ακόμη, το ποσοστό 60 % - 90 % κατέχει την μικρότερη κατανάλωση υδρογόνου μεταξύ των υπολοίπων.

Πίνακας 5.2. Κατανάλωση NEDC κύκλου οδήγησης.			
Ποσοστό Φόρτισης (SoC)	60 % - 90 %	40 % - 80 %	35 % - 85 %
EMS_1	81.529 g	103.6 g	88.47 g
EMS_2	92.22 g	103.14 g	104.82 g

Για τον FTP κύκλο οδήγησης, ο Πίνακας 5.3, αποδεικνύει ότι το EMS_2, υπερτερεί έναντι του EMS_1 για κίνηση του οχήματος μέσα στα όρια της πόλης. Το ποσοστό 60 % - 90 %, με την μεγαλύτερη αυτονομία δεν είναι ιδανικό μιας και το SoC ξεπερνά τα όρια του 90 % αφού συμπίπτει με την κίνηση του οχήματος σε υψηλή ταχύτητα όπου η κυψέλη υδρογόνου

ενεργοποιείται (Σχήμα 5.153). Το ιδανικό ποσοστό είναι αυτό του 40 % - 80 % διότι παρουσιάζει την μικρότερη κατανάλωση και γίνεται σωστή λειτουργία της μπαταρίας μέσα σε αυτό το ποσοστό.

Πίνακας 5.3. Κατανάλωση FTP κύκλου οδήγησης.			
Ποσοστό Φόρτισης (SoC)	60 % - 90 %	40 % - 80 %	35 % - 85 %
EMS_1	126.4 g	112.13g	129.18 g
EMS_2	100.19 g	108.15 g	121.28 g

Για τον WLTP class 3 κύκλο οδήγησης, ο Πίνακας 5.4, αποδεικνύει ότι το EMS_1 υπερτερεί έναντι του EMS_2. Το ποσοστό, 60 % - 90 %, κατέχει την μέγιστη δυνατή αυτονομία μεταξύ των τριών, ενώ στα Σχήματα 5.93, 5.99 και 5.105 παρατηρείται η πλήρης φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Πίνακας 5.4. Κατανάλωση WLTP class 3 κύκλου οδήγησης.			
Ποσοστό Φόρτισης (SoC)	60 % - 90 %	40 % - 80 %	35 % - 85 %
EMS_1	203.99 g	224.31 g	208.7 g
EMS_2	206.4 g	221.24 g	223.44 g

Για τον ArtMW 150 κύκλο οδήγησης, ο Πίνακας 5.5, αποδεικνύει ότι το EMS_1 υπερτερεί έναντι του EMS_2 για κίνηση του οχήματος σε αυτοκινητόδρομο. Το ποσοστό 40 % - 80 %, εμφανίζει την μεγαλύτερη αυτονομία, ενώ στα Σχήματα 5.115, 5.121 και 5.127 παρατηρείται η πλήρη φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας κατά την διάρκεια της κίνησης του οχήματος.

Πίνακας 5.5. Κατανάλωση ArtMW 150 κύκλου οδήγησης.			
Ποσοστό Φόρτισης (SoC)	60 % - 90 %	40 % - 80 %	35 % - 85 %
EMS_1	401.66 g	393.5 g	416.14 g
EMS_2	406.65 g	419.36 g	415.95 g

Ανακεφαλαιώνοντας, το EMS_1, υπερτερεί στους τρεις από τους τέσσερις κύκλους οδήγησης για αυτό και επιλέγεται έναντι του EMS_2. Αναλυτικότερα, ο Πίνακας 5.6 δείχνει την επιλογή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας με την μικρότερη κατανάλωση υδρογόνου για κάθε κύκλο οδήγησης.

Το EMS_1, εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα αυτονομίας στους κύκλους οδήγησης NEDC και WLTP class 3 οι οποίοι περιλαμβάνουν έναν μικτό κύκλο οδήγησης. Δηλαδή ένα τμήμα περιλαμβάνει ταχύτητες οδήγησης στο όριο της πόλεως και ένα μικρό κομμάτι ταχυτήτων οδήγησης σε υψηλές ταχύτητες (αγγίζουν τα 120 km/h και 130 km/h αντίστοιχα). Αντιθέτως ο FTP κύκλος οδήγησης περιλαμβάνει ταχύτητες οδήγησης στα όρια της πόλεως, ενώ ο ArtMW 150 περιλαμβάνει αποκλειστικά υψηλές ταχύτητες οδήγησης σε αυτοκινητόδρομο (έως και 150 km/h).

Πίνακας 5.6. Σύστημα διαχείρισης ενέργειας με την μικρότερη κατανάλωση υδρογόνου ανά κύκλο οδήγησης.

Κύκλος Οδήγησης	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας	Ποσοστό Φόρτισης (SoC)
NEDC	EMS_1	60 % - 90 %
FTP	EMS_2	60 % - 90 %
WLTP class 3	EMS_1	60 % - 90 %
ArtMW 150	EMS_1	40 % - 80 %

Η επιλογή του ιδανικού ποσοστού φόρτισης αποτελεί σημαντικό κομμάτι στην εξοικονόμηση καυσίμου και συνάμα στην επίτευξη μεγαλύτερης αυτονομίας του οχήματος.

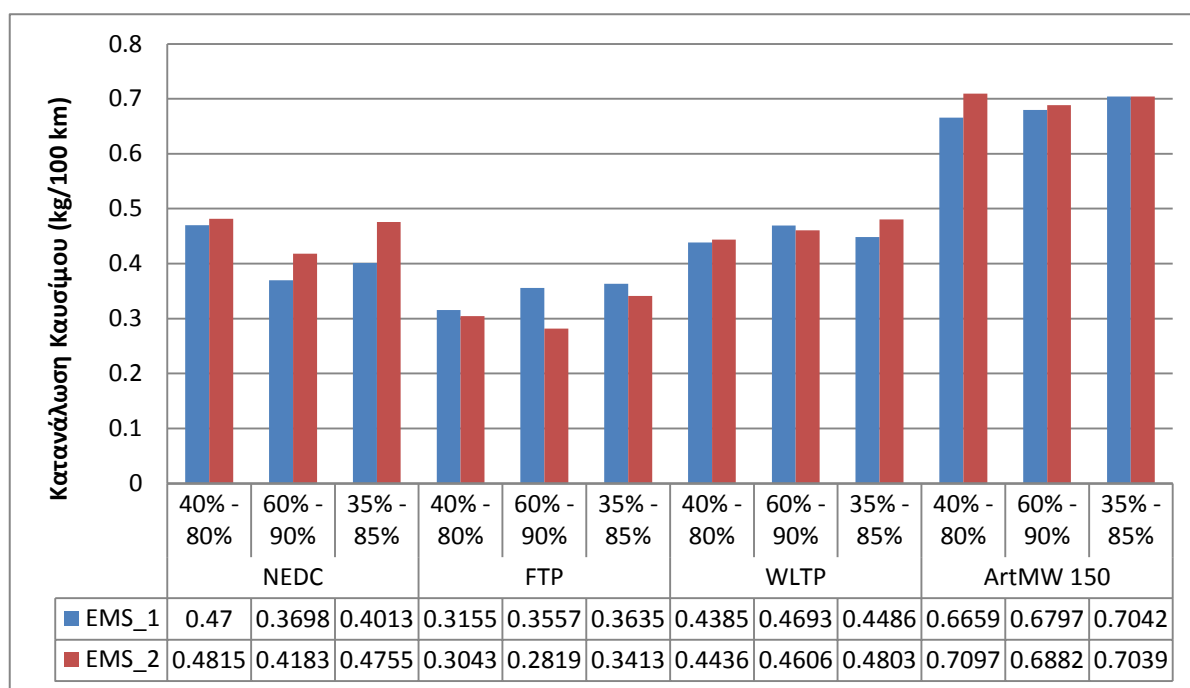
Αρχικά, το ποσοστό φόρτισης 35 % - 85 %, εμφανίζει την μεγαλύτερη κατανάλωση υδρογόνου συγκριτικά με τα υπόλοιπα ποσοστά και επομένως δεν αποτελεί την ιδανική λύση για κανένα από το δύο συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Από την άλλη το ποσοστό φόρτισης 40 % - 80 % υπερτερεί σε ένα μόνο κύκλο οδήγησης. Όμως, για τον κύκλο FTP, το ποσοστό φόρτισης με την μικρότερη κατανάλωση για το EMS_1 αποτελεί το 40 % - 80 % με κατανάλωση υδρογόνου $W_g = 112.13 \text{ g}$ (Πίνακας 5.3). Επομένως τα επικρατέστερα ποσοστά φόρτισης είναι το:

- 60 % - 90 % για τους μικτούς κύκλους οδήγησης (NEDC, WLTP class 3)
- 40 % - 80 % για τους αποκλειστικούς κύκλους οδήγησης (FTP, ArtMW 150)

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.7, στους κύκλους οδήγησης NEDC και WLTP class 3, το ποσοστό φόρτισης 60 % - 90 % εμφανίζει μεγαλύτερη οικονομία υδρογόνου κατά 27 % και 10 % αντίστοιχα. Αντιθέτως, στους κύκλους οδήγησης FTP και ArtMW 150, το ποσοστό φόρτισης 40 % - 80 % εμφανίζει μικρότερη κατανάλωση υδρογόνου κατά 11.3 % και 2%, αντίστοιχα. Τέλος, δεδομένου ότι η κατανάλωση στο ποσοστό φόρτισης 60 % - 90 % ήταν μικρότερη, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας – EMS_1 σε συνδυασμό με το ποσοστό φόρτισης 60 % - 90 % είναι η ιδανικότερη επιλογή για ηλεκτρικό όχημα με χρήση κυψελών καυσίμου το οποίο υλοποιήθηκε.

Πίνακας 5.7. Οικονομικότερο ποσοστό φόρτισης.

Κύκλος Οδήγησης	Κατανάλωση Υδρογόνου			
	Ποσοστό Φόρτισης (SoC)		Διαφορά Κατανάλωσης	Μεταβολή κατανάλωσης υδρογόνου σε σχέση με το ποσοστό 60 % - 90 % (%)
	60 % - 90 %	40 % - 80 %		
NEDC	81.529 g	103.6 g	22.071 g	27 %
FTP	126.4 g	112.13 g	14.27 g	-11.3%
WLTP class 3	203.99 g	224.31	20.32 g	10 %
ArtMW 150	401.66 g	393.5 g	8.16 g	-2%

*Σχήμα 5.207. Κατανάλωση καυσίμου οχήματος για κάθε κύκλο οδήγησης (σε kg/100 km).*

6.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η δημιουργία ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας για την αποδοτικότερη διαχείριση της κυψέλης καυσίμου ενός ηλεκτρικού οχήματος, καθώς και την επίτευξη μεγαλύτερης αυτονομίας. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός οχήματος σε περιβάλλον MATLAB/Simulink με διαφορετικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας προκειμένου να υπάρξει ένα μέτρο σύγκρισης.

Τα χαρακτηριστικά των συστημάτων του οχήματος βασίστηκαν στο μοντέλο FCX Clarity της Honda, με σκοπό να γίνει όσο δυνατόν περισσότερο ρεαλιστικό το αποτέλεσμα αυτής της εργασίας. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης λειτουργικότητα μεταξύ της κυψέλης καυσίμου, του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και της ηλεκτρικής μηχανής επιλέχθηκε ένας ελεγκτής MPPT – P&O. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου στο σημείο μέγιστης ισχύος και παράλληλα στο σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης. Έτσι, ο αλγόριθμος MPPT – P&O μεταβάλλει την τάση εξόδου της κυψέλης με σκοπό την επίτευξη του σημείου μέγιστης ισχύος, ενώ ταυτόχρονα για την ίδια τιμή τάσης εξόδου, η απόδοση της κυψέλης συγκλίνει στο σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης, για κάθε τιμή ροής καυσίμου.

Τα δύο σύστημα διαχείρισης ενέργειας που αναπτύχθηκαν βοήθησαν στην καλύτερη διαχείριση των συστημάτων του οχήματος. Το πρώτο (EMS_1) αναπτύχθηκε με στόχο τον συνεχή έλεγχο της ισχύος της μπαταρίας αυξάνοντας το διάστημα χρήσης της ως κινητήριας μονάδας, εξασφαλίζοντας έτσι οικονομία καυσίμου. Από την άλλη το δεύτερο (EMS_2) βασίστηκε σε ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας που έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία και το οποίο είχε σκοπό την καλύτερη συμπεριφορά του οχήματος στις υψηλές ταχύτητες κίνησης και στις μεγάλες επιταχύνσεις.

Ένα ακόμη στοιχείο στην εργασία, το οποίο έκανε περισσότερο ρεαλιστικά τα αποτελέσματα της κατανάλωσης υδρογόνου ήταν η χρήση των κύκλων οδήγησης. Με τον τρόπο αυτόν, η λειτουργία του οχήματος με τα δύο εναλλακτικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας προσομοιώθηκε με βάση τα διεθνή πρότυπα, μιας και έγινε χρήση τεσσάρων διαφορετικών κύκλων οδήγησης. Κάθε ένας από αυτούς παρουσίασε ουσιώδη αποτελέσματα που οδήγησαν στην ορθή σύγκριση τόσο των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας μεταξύ τους, όσο και στο ιδανικό ποσοστό φόρτισης (SoC) που θα επιλεγεί από το κάθε ένα.

Το τελικό συμπέρασμα της μοντελοποίησης και των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, υπέδειξε την ιδανική επιλογή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας σύμφωνα με την κατανάλωση καυσίμου της κυψέλης. Το πρώτο σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασίστηκε στην συνεχή παρακολούθηση της ισχύος της μπαταρίας, ώστε να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια η χρήση της. Αντιθέτως, το δεύτερο σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασίστηκε στην παρακολούθηση των εντολών του οδηγού, ώστε σε περιπτώσεις απότομης επιτάχυνσης και μεγάλων ταχυτήτων κίνησης του οχήματος να ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου. Με αυτόν τον τρόπο το όχημα θα εμφανίζει καλύτερο χρόνο απόκρισης στις απότομες μεταβολές της ταχύτητας, ενώ η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων για την κίνηση του οχήματος είναι ταχύτερη. Επίσης, κάθε φορά που το όχημα σταματά την κίνησή του, η κυψέλη καυσίμου απενεργοποιείται προκειμένου να μειωθεί η κατανάλωση υδρογόνου.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο η επιλογή του ποσοστού φόρτισης σε συνδυασμό με τη χρήση διαφορετικού κύκλου οδήγησης, επηρεάζει την κατανάλωση υδρογόνου. Το πρώτο σύστημα διαχείρισης ενέργειας εμφάνισε μεγαλύτερη οικονομία υδρογόνου έναντι του δεύτερου. Παράλληλα το ποσοστό φόρτισης 60 % - 90 % παρουσίασε εξοικονόμηση υδρογόνου 27 % και 10 %, έναντι του ποσοστού φόρτισης 40 % - 80 % στους κύκλους οδήγησης NEDC και WLTP class 3 αντίστοιχα. Αντιθέτως, στους κύκλους οδήγησης FTP και ArtMW 150 το ποσοστό φόρτισης 40 % - 80 % παρουσίασε μικρότερη κατανάλωση κατά 11.3 % και 2 %. Ανακεφαλαιώνοντας, το πρώτο σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε

συνδυασμό με το ποσοστό φόρτισης 60 % - 90 % αποτελεί την ιδανικότερη επιλογή για την λειτουργία του οχήματος.

Τέλος, μια πρόταση που σχετίζεται με την εργασία και θα μπορούσε να αναπτυχθεί προκειμένου να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η λειτουργικότητα των συστημάτων του οχήματος, είναι πως η ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου επηρεάζει την συνολική διάρκεια ζωής της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Με λιγότερη χρήση της μπαταρίας ιόντων λιθίου, χωρίς να αφήνεται να αποφορτιστεί σε μεγάλο ποσοστό, επεκτείνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μετά από κάθε κύκλο αποφόρτισης. Ωστόσο η επίδραση που επιφέρει η συνεχής φόρτιση και αποφόρτιση της από την κυψέλη καυσίμου στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι αβέβαιη. Έτσι θα ήταν ενδιαφέρον να αναπτυχθεί μια στρατηγική ελέγχου ώστε αυτά τα δύο υποσυστήματα του οχήματος να λειτουργούν αποδοτικά προκειμένου να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους και η αξιοπιστία τους.

7.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] E. Tate, M. O. Harpster, P.Savagian: The electrification of the automobile: From conventional hybrid, to plug-in hybrids, to extended-range electric vehicles, SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems, Pages 156-166, January 2009.
- [2] International Energy Agency (IEA): Global EV Outlook 2018: 3 million and counting, Clean Energy Ministerial and Electric Vehicles Initiative (EVI), IEA Publications, May 2018.
- [3] U. Eberle, R. Helmolt: Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: A brief overview, Energy & Environmental Science, Vol. 3, Pages 677-856, June 2010..
- [4] W. Enang, C. Bannister: Modelling and control of hybrid electric vehicles (A comprehensive review), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 74, Pages 1210-1239, 2017.
- [5] Σοφοκλής Σ. Μακρίδης: Τεχνολογίες υδρογόνου, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Πάτρας, 2006-2007.
- [6] K. T. Chau, Y. S. Wong: Overview of power management in hybrid electric vehicles, Energy Conversion and Management, Vol. 43, Issue 15, Pages 1953-1968, October 2002.
- [7] David Linden, Thomas B. Reddy: Handbook of batteries, 3rd ed., McGraw-Hill, 2002, ISBN 978-0-07-135978-8.
- [8] X. Huang, Z. Zhang, J. Jiang: Fuel cell technology for distributed generation: An overview, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Pages 1613-1618, 2006.
- [9] I. P. Sahu, G. Krishna, M. Biswas, M. Kumar Das: Performance study of PEM fuel cell under different loading conditions, Vol. 54, Energy Procedia, Pages 468-478, 2014.
- [10] Stephen J. Chapman: Ηλεκτρικές μηχανές, 4^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010, ISBN 978-960-418-192-6.
- [11] Γαντζούδης Σωτήρης, Λαγουδάκος Μιχαήλ, Μπινιάρης Αθανάσιος: Ηλεκτρικές μηχανές, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων – Αθήνα, ISBN 960-06-0948-9.
- [12] Θεμελής Δημήτριος: Κινητήρες συνεχούς ρεύματος, Διαλέξεις μαθήματος: Ηλεκτρικές μηχανές Ι (TMA 112), Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ, ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας.
- [13] S. B .Shah, B. Silwal, A. Lehikoinen: Efficiency of an electrical machine in electric vehicle application, Journal of the Institute of Engineering, Pages 20-29, 2015.
- [14] S. Jagasics, I. Vajda: Comparison of different PMSM rotor configurations, IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Pages 1-5, 2014.
- [15] P. Sekerak, V. Hrabovcova, P. Rafajdus, L. Kalamen, M. Onufer: Effect of permanent magnet rotor design on PMSM properties, Transactions on Electrical Engineering, Vol. 1 No. 3, Pages 98-103, 2012
- [16] Ned Mohan, Tore A. Undeland, Williams P. Robbins: Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος: μετατροπείς, εφαρμογές, σχεδίαση, 3^η Έκδοση , Εκδόσεις Τζιόλα, 2010, ISBN 978-960-418-250-3.
- [17] Q. Ning, D. Xuan, Y. Nan, Y. Kim: Modeling and simulation for fuel cell-battery hybrid electric vehicle, International Conference on Computer Modeling and Simulation, Pages 53-57, 2009.
- [18] S. Kawasaki, M. Ogura, T. Ono, Y. Kami: Development of the Honda FCX fuel cell vehicle, Honda R&D Technical Review, Vol. 15 No 1, Pages 1-6, April 2003.

- [19] M. Matsunaga, T. Fukushima, K. Ojima, T. Ogawa, K. Kimura: Fuel cell powertrain for FCX Clarity, Honda R&D Technical Review, Vol. 21 No. 1, Pages 7-15, April 2009.
- [20] N. Saito, H. Kikuchi, Y. Nakao: New fuel cell for FCX Clarity, Vol. 21 No. 1, Pages 16-23, April 2009.
- [21] K. Ettihir, L. Boulon, K. Agbossou: Energy management strategy for a fuel cell hybrid vehicle based on maximum efficiency and maximum power identification, IET Electrical Systems in Transportation, Vol. 6 No. 4, Pages 261-268, 2016.
- [22] D. Herrera Vega, N. Marx, L. Boulon, A. Hernandez: Maximum efficiency point tracking for hydrogen fuel cells, IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Pages 1-6, 2014.
- [23] S. Aoyagi, T. Shirasaka, N. Yoshizawa, O. Sukagawa: Development of fuel economy measurement method for fuel cell vehicle, Honda R&D Technical Review, Vol. 15 No. 1, Pages 13-18, April 2003.
- [24] T. Fukushima, A. Iwai, N. Yamaguchi, H. Shinoki: Electric drive motor for fuel cell vehicle FCX Clarity, Honda R&D Technical Review, Vol. 21 No. 1, Pages 63-70, April 2009.
- [25] K. Yamamoto, A. Anekawa: Development of lithium ion battery system for fuel cell vehicle, Honda R&D Technical Review, Vol. 21 No. 1, Pages 43-48, April 2009.