



ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΩΝ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΚΟΠΤΕΡΟΠΟΥΛΟΥ, ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΙΔΗ

Επιβλέποντες : Σημίρα Παπαδοπούλου
Χρήστος Υφούλης
Χρύσα Ζιώγου

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ευχαριστούμε θερμά το Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού για την στήριξή του στην εκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας καθώς και την κ.Παπαδοπούλου Σημίρα και τον κ.Υφούλη Χρήστο για την πολύτιμη βοήθειά τους ως επιβλέποντες. Επίσης, ευχαριστούμε την κ.Ζιώγου Χρύσα για την συνεχή στήριξη που μας παρείχε καθ'ολη την διάρκεια της προσπάθειάς μας όπως και το Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης για την φιλοξενία του στις εγκαταστάσεις του.

ABSTRACT

Alternative energy sources have begun to attract attention due to increased oil price and greenhouse gas emissions, especially in the field of transportation. A big amount of researches and experiments, in this area, have been conducted on hybrid electric vehicles and specifically on fuel cell electric vehicles (FCEV). These particular vehicles are based primarily on a fuel cell stack and secondarily on an auxiliary energy storage device, which is usually a battery. Their high efficiency and low emissions make them a fantastic substitute for internal combustion engines. However, in order to maximize their potentials, a well-designed power management, that optimally shares the power demand between the fuel cell and the battery is required. In this study, at first, the performance of an existing simulated FCEV model is presented and analyzed. Then, a power management strategy, that focuses on fuel economy, fuel cell and battery life cycles and overall efficiency, is designed, which also takes into account the limitations of the system. The Model Predictive Control (MPC) method is used, which based on predictions of the dynamics of the model, attempts to optimize the system. The analysis of the simulation results was performed using the environment of Matlab/Simulink in order to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας, οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας έχουν αρχίσει να είναι στο επίκεντρο της έρευνας, και ειδικά στον τομέα των μεταφορών, λόγω του όλου και αυξανόμενου κόστους των ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο, και των ρύπων τους που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ένα μεγάλο μέρος ερευνών και πειραμάτων, σε αυτόν τον τομέα, διεξάγεται με σκοπό την ανάπτυξη οχημάτων που κινούνται με υδρογόνο και ιδιαίτερα σε οχήματα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου υδρογόνου σε συνδυασμό με μία μπαταρία (FCEV-Fuel cell electric vehicles). Αυτά τα οχήματα στηρίζονται, πρωτίστως, σε ένα σύνολο κυψελών καυσίμου και, επιπρόσθετα, σε μία βοηθητική πηγή ενέργειας, που είναι συνήθως μια μπαταρία. Αποτελούν ένα ισχυρό υποκατάστατο στα οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης λόγω της υψηλής τους απόδοσης και των χαμηλών ρύπων τους. Ωστόσο, για να εκμεταλευτούμε στο μέγιστο τις δυνατότητές τους, απαιτείται ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας να ελέγχει κατάλληλα την σωστή κατανομή ενέργειας μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και της μπαταρίας. Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται, αρχικά, ένα υπάρχων μοντέλο συγκεκριμένου οχήματος και αναλύεται. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται μία στρατηγική διαχείρισης ενέργειας που στοχεύει στην εξοικονόμηση καυσίμου, στην επέκταση της ζωής της μπαταρίας και στη γενικότερη απόδοση του συστήματος. Χρησιμοποιείται η μέθοδος του Προβλεπτικού Ελέγχου (Model Predictive Control – MPC), που βάσει προβλέψεων που κάνει για τις δυναμικές του οχήματος, προσπαθεί να βελτιστοποιήσει το σύστημα. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων και η προσωμοίωση έγιναν σε περιβάλλον Matlab/Simulink, με σκοπό να επαληθευτεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης στρατηγικής.

1	Περιεχόμενα	
2	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	1
	ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
	ABSTRACT	3
	ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1	Περίληψη κεφαλαίου.....	7
1.2	Εισαγωγή.....	7
1.3	Κυψέλες Καυσίμου.....	7
1.4	Υβριδικό όχημα κυψέλης καυσίμου και μπαταρίας (FCEV).....	8
2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	9
2.1	Περιγραφή κεφαλαίου	9
2.2	Το μοντέλο της προσομοίωσης.....	9
2.3	Κυψέλη Καυσίμου	11
2.4	Μπαταρία.....	17
2.5	Μηχανή.....	18
2.6	Δομή Οχήματος	21
3	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	24
3.1	Περιγραφή κεφαλαίου	24
3.2	Εισαγωγικά	24
3.3	Ανάλυση υπαρχόντων μελετών	25
3.3.1	Power management for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system.....	25
3.3.2	Optimal control in the power management of fuel cell hybrid vehicles.....	25
3.3.3	Optimal power source sizing of fuel cell hybrid vehicles on Pontryagin's minimum principle.	26
3.3.4	Power management optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles with experimental validation.....	26
3.4	Ανάλυση υποσυστήματος διαχείρισης ενέργειας	27
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	36
4.1	Περιγραφή κεφαλαίου	36
4.2	Εισαγωγή.....	36
4.3	Ανάλυση ευαισθησίας με μεταβολή του αρχικού SOC.....	36
4.3.1	Διαγράμματα για αρχικό SOC = 84%.....	37
4.3.2	Διαγράμματα για αρχικό SOC = 99%.....	40

4.3.3	Διαγράμματα για αρχικό SOC = 79.8%.....	43
4.3.4	Διαγράμματα για αρχικό SOC = 34%.....	46
4.3.5	Διαγράμματα για αρχικό SOC = 54%.....	49
4.3.6	Συμπεράσματα	51
4.4	Ανάλυση ευαισθησίας με μεταβολή των ισχύων μπαταρίας και κυψέλης καυσίμου 52	
4.4.1	Διαγράμματα για μεταβολή του ανώτερου ορίου ισχύος της κυψέλης	52
4.4.2	Διαγράμματα για μεταβολή του κατώτερου ορίου ισχύος της κυψέλης.....	56
4.4.3	Διαγράμματα για μεταβολή του άνωτερου ορίου ισχύος της μπαταρίας	59
4.4.4	Συμπεράσματα	62
5	ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	63
5.1	Περιγραφή κεφαλαίου	63
5.2	Αλλαγή του μπλοκ διαχείρισης ενέργειας	63
5.3	Μέθοδος απλού ελέγχου με ηλεκτρονικά ισχύος	64
5.4	Βελτιστοποίηση	66
5.4.1	Θεωρητική εισαγωγή	66
5.4.2	Περιγραφή Υλοποίησης.....	67
5.4.3	Διαγράμματα.....	68
5.4.4	Συμπεράσματα	69
6	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	70
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	71
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1 Περίληψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τις εισαγωγικές έννοιες και ένα μικρό υπόβαθρο προς κατανόηση της πτυχιακής εργασίας.

2.2 Εισαγωγή

Για την ικανοποίηση των όλο και αυξανόμενων αναγκών των ανθρώπων αλλά και για την γενική πρόοδο του σε όλους τους τομείς, απαιτείται η κατανάλωση όλο και μεγαλύτερων ποσών ενέργειας. Μέχρι και σήμερα, η προέλευση αυτής της ενέργειας προέρχεται κυρίως από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων της γης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ατμοσφαιρικής μόλυνσης και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Έτσι, πολλές χώρες πλέον έχουν στραφει στην ανάπτυξη και εφαρμογή νέων μορφών ενέργειας όπως ηλιακή ενέργεια, πυρηνική ενέργεια, κυψέλες καυσίμων, αιολική ενέργεια, υδροδυναμική ενέργεια, κυματική ενέργεια, γεωθερμία και βιομάζα. Οι περισσότερες από αυτές τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας έχουν και αρκετούς περιορισμούς. Η δυσκολία στην γεωγραφική και περιβαλλοντολογική προσέγγισή τους αλλά και η σχετικά χαμηλή απόδοση μετατροπή τους είναι κάποιοι από αυτούς. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει επικεντρωθεί η προσοχή στην ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας. Αυτό συμβαίνει λόγω της σχετικά υψηλής απόδοσης καυσίμου και των σχεδόν μηδενικών βλαβερών εκπομπών του. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην απ' ευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας του υδρογόνου, σε συνδυασμό με το οξυγόνο, σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς περιβαλλοντολογικούς περιορισμούς.

2.3 Κυψέλες Καυσίμου

Στις κυψέλες ή κελιά ή στοιχεία καυσίμου (fuel cells), το υδρογόνο, το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά με οξυγόνο, παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία τους απαιτεί την συνεχόμενη παροχή υδρογόνου και οξυγόνου πράγμα το οποίο τις καθιστά ως μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Τα αντιδρώντα το μόνο που παράγουν κατά την αντίδραση, εκτός του ηλεκτρισμού, είναι νερό και θερμότητα.



Η πρώτη κυψέλη φτιάχτηκε από τον Sir William Grove το 1839. Ωστόσο, η συστηματική έρευνα πάνω σε αυτές ξεκίνησε τη δεκαετία του '60, όταν η NASA χρησιμοποίησε κυψέλες καυσίμου στα διαστημικά σκάφη των προγραμμάτων Τζέμινι και Απόλλων ως φθηνότερη λύση σε σύγκριση με την ηλιακή ενέργεια. Από τα υπάρχοντα είδη κυψελών καυσίμου, αυτό με τις μεγαλύτερες προσδοκίες στην εφαρμογή σε κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος είναι η κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC). Ανάμεσα στα πλεονεκτήματά τους είναι η υψηλή τους απόδοση, τα χαμηλά επίπεδα θορύβου τους και η μηδενική μόλυνση τους ατμοσφαιρικού αέρα. Η ισχύς τους, που κυμαίνεται μεταξύ 50kW και 250kW, καθώς και η σχετικά γρήγορη προσαρμογή τους σε αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος, τις καθιστούν τις καταλληλότερες για την κίνηση ενός οχήματος. Ένα σύστημα κυψελών καυσίμου απαιτεί από μόνο του αρκετά βοηθητικά εξαρτήματα, όπως πιεστικά αέρα, σύστημα ψύξης νερού, υγραντή, αντλίες και σύστημα ηλεκτρικού ελέγχου.

2.4 Υβριδικό όχημα κυψέλης καυσίμου και μπαταρίας (FCEV)

Τα οχήματα στα οποία έχει επικεντρωθεί η έρευνα και η ανάπτυξη, εκτός από αυτά της εσωτερικής κάυσης, είναι τα υβριδικά με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης σε συνδυασμό με μπαταρία, τα εξ'ολοκλήρου ηλεκτρικά οχήματα και τα υβριδικά με χρήση κυψελών καυσίμου και κάποιου βοηθητικού μέσου αποθήκευσης ενέργειας. Αυτή η δευτερεύουσα πηγή ενέργειας μπορεί να είναι είτε μπαταρία, είτε υπερπυκνωτής ή ακόμα και συνδυασμός των δύο και μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί και κάποιο φωτοβολταϊκό πάνελ ως συμπληρωματική πηγή ενέργειας. Η ενσωμάτωση μιας βοηθητικής πηγής ενέργειας αυξάνει την συνολική απόδοση του οχήματος καθώς και την απόκρισή του σε απότομες αυξομειώσεις. Ωστόσο, ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας απαιτείται για την ομαλή διανομή ενέργειας μεταξύ των δύο πηγών. Κατά την ανάπτυξη αυτής της στρατηγικής ελέγχου, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αύξηση της απόδοσης του συστήματος σε συνδυασμό με την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου εξετάζοντας, επίσης, τους περιορισμούς του συστήματος. Στην δική μας περίπτωση, όπου η μπαταρία συμπληρώνει τις απαιτήσεις σε ισχύ του οχήματος, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ανώτερα και κατώτερα όρια φόρτισης της μπαταρίας έτσι ώστε να είναι σε ασφαλή επίπεδα. Αρκετές βιομηχανίες ασχολούνται ενεργά με την ανάπτυξη τέτοιων οχημάτων, κατασκευάζοντας πρότυπα οχήματα, μερικά από τα οποία έχουν κυκλοφορήσει και στην αγορά σε Ιαπωνία, ΗΠΑ, και σε ορισμένες χώρες της Ευρώπης. Η Honda ήταν από τις πρώτες που κατασκεύασαν και διέθεσαν στην αγορά τέτοιου είδους υβριδικά οχήματα με τα μοντέλα FCX-V4 και Clarity. Εξίσου αξιόλογες προσπάθειες έχουν κάνει και οι Toyota, Hyundai, Ford, Nissan και Mercedes κατασκευάζοντας μοντέλα όλο και καλύτερων χαρακτηριστικών. Αντίστοιχες προσπάθειες γίνονται και σε μοτοσυκλέτες, λεωφορεία, κλαρκ και ακόμη και σε μικρά αεροπλάνα.

3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1 Περιγραφή κεφαλαίου

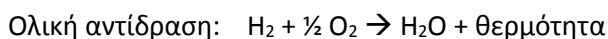
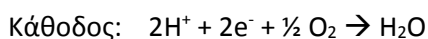
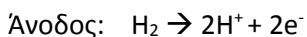
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα υποσυστήματα του μοντέλου και παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίησή τους με την θεωρητική ανάλυσή τους.

3.2 Το μοντέλο της προσομοίωσης

Δυναμικές οχήματος:

1. Το μοντέλο κυψέλης καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων βασισμένο σε θεωρίες ηλεκτροχημείας και φυσικής.
2. Το μοντέλο της μπαταρίας τύπου ιόντων-λιθίου.
3. Το μοντέλο της μηχανής.
4. Το μοντέλο της δομής του οχήματος.

Η παρούσα γενιά των κυψελών καυσίμου, η οποία περιλαμβάνει μια σειρά από φυσικές και χημικές αντιδράσεις, είναι μια διαδικασία που περιέχει πολλά εμπόδια. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η αντίσταση της απορρόφησης όσων αφορά το οξυγόνο που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του καταλύτη, την αντίσταση επαγωγής μεταξύ του πρωτονίου και του ηλεκτρολύτη και την αντίσταση επαγωγής μεταξύ του ηλεκτρονίου, του καταλύτη και του φέροντος. Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια, η κυψέλη καυσίμου πρέπει να καταναλώνει ενέργεια ώστε να διατηρηθεί η αντίδραση στα ηλεκτρόδια. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την αμφίδρομη μετατόπιση των ηλεκτρονίων και ονομάζεται πόλωση. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στην κυψέλη είναι οι εξής:



Οι 4 μηχανισμοί μετάβασης των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων μέσω των οποίων το αντιδρών αέριο (καύσιμο) εφαρμόζεται στην κυψέλη καυσίμου μπορούν να περιληφθούν ως εξής:

1. Το αντιδρών αέριο μετακινείται στην επιφάνειες των ηλεκτροδίων – μεταγωγή και διάχυση

2. Με τη βοήθεια του αντιδρώντος αερίου διαξάγεται η ηλεκτροχημική αντίδραση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου – προσρόφηση, αντίδραση και διάσπαση.
3. Το ιόν/ηλεκτρόνιο οδηγείται στον ηλεκτρολύτη μεταξύ των ηλεκτροδίων.
4. Τα παράγωγα της αντίδρασης απομακρύνονται από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων – μεταγωγή και διάχυση.

Σύμφωνα με τον τύπο του Nerst, όπως τροποποιήθηκε από τον Blomen και τον Myenua, η τάση σε μία κυψέλη καυσίμου προσδιορίζεται ως εξής:

$$E_n = \begin{cases} \frac{\Delta G}{zF} + \frac{\Delta S}{zF} (T_{fc} - T_0) + \frac{RT}{zF} \ln \left(P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) & \text{όταν } T \leq 100^\circ C \\ \frac{\Delta G}{zF} + \frac{\Delta S}{zF} (T_{fc} - T_0) + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) & \text{όταν } T > 100^\circ C \end{cases}$$

, όπου E_n αναστρέψιμη δυνατότητα (=reversible potential) της κυψέλης καυσίμου, ΔG η ελεύθερη ενέργεια του Gibbs, z η σταθερά τύπου ηλεκτρονίων στην οξειδοαναγωγική, F η σταθερά του Faraday, P η μερική πίεση, T η θερμοκρασία λειτουργίας, R η σταθερά του αερίου, P_{H_2} η μερική πίεση του υδρογόνου, P_{O_2} η μερική πίεση του οξυγόνου, P_{H_2O} η μερική πίεση του νερού στο σύνολο των κυψελών καυσίμου.

Η πόλωση μπορεί να χωρισθεί σε 3 κατηγορίες:

1. Πόλωση ενεργοποίησης: όταν το ηλεκτρόδιο ξεκινά την ηλεκτρομαγνητική αντίδραση, η δυσκολία στην απαιτούμενη ενέργεια ξεκινήματος μπορεί να προκαλέσει μία αργού ρυθμού καθυστέρηση και έχει ως αποτέλεσμα μία ενδεχόμενη απώλεια (activation overpotential). Αυτή η απώλεια οφείλεται κυρίως στις δυναμικές της προσρόφησης και διάσπασης στον καταλύτη. Σε μία κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων, η απώλεια ενέργεια κατά την ενεργοποίηση στη κάθοδο είναι πιο σημαντική από ότι στην άνοδο. Βάσει των εμπειρικών κανόνων από το πείραμα του Tafel, αν η επίδραση της μερικής πίεσης του οξυγόνου σ' αυτή την ενδεχόμενη απώλεια ληφθεί υπ' όψη, αυτή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής σύμφωνα με τον Tafel:

$$E_{act} = N b \ln \left(\frac{i_{fc}}{i_0} \right) \quad , \quad b = \frac{RT}{azF}$$

όπου N ο αριθμός των κυψελών, b η σταθερά κλίση του Tafel, i_{fc} η ένταση του ρεύματος κυψέλης και i_0 η ένταση ανταλλαγής του ρεύματος. *****

2. Ωμική πόλωση: Η αντίσταση του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου πρέπει να ακολουθούν τον νόμο του Ohm. Η αντίσταση ανταλλαγής ιόντων στην μεμβράνη του ηλεκτρολύτη και η αντίσταση επαφής του ηλεκτροδίου μπορούν να θεωρηθούν εσωτερική αντίσταση. Αυτό το τμήμα της ενδεχόμενης απώλειας μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$E_{ohm} = i_{fc} (R_e + R_{plate} + R_{proton})$$

, όπου R_e αντίσταση ανόδου/καθόδου, R_{plate} η αντίσταση μετάλλου και R_{proton} η αντίσταση όταν το πρωτόνιο περνά μέσα από τη μεμβράνη.

3. Πόλωση συγκέντρωσης: Όταν η κυψέλη καυσίμου είναι σε κατάσταση υψηλού ρεύματος (κάτω από βαρύ φορτίο), η παροχή του αντιδρώντος αερίου δεν είναι αρκετά γρήγορη για τον καταλύτη στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου με αποτέλεσμα αυτή η επιβαρυσμένη ανταλλαγή να μην μπορεί να διατηρηθεί. Η χαμηλή συγκέντρωση του αντιδρώντος αερίου στο ηλεκτρόδιο προκαλεί την πόλωση συγκέντρωσης και μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$E_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln\left(1 - \frac{i_{fc}}{i_L}\right)$$

Όπου i_L η ένταση του περιορισμένου ρεύματος.

Βάσει αυτών των τριών περιπτώσεων, η καμπύλη πόλωσης της κυψέλης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$E_{cell} = E_n + E_{act} + E_{conc} + E_{ohm}$$

3.3 Κυψέλη Καυσίμου

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα που αντιστοιχεί στη κυψέλη καυσίμου του μοντέλου της προσωμοίωσης. Ο υπολογισμός της χρήσης καυσίμου ως έξοδος από το μπλοκ A υπολογίζεται, αφού χρησιμοποιηθούν ορισμένοι παράμετροι ως έξοδοι στο μπλοκ, ως εξής:

$$U_{f_{H_2}} = \frac{n_{h_2}^r}{n_{h_2}^{in}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{fuel}V_{lpm(fuel)}x\%}$$

$$U_{f_{O_2}} = \frac{n_{O_2}^r}{n_{O_2}^{in}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{air}V_{lpm(air)}y\%}$$

όπου n το γραμμομοριακό κλάσμα, $U_{f_{H_2}}$ η ροή του υδρογόνου προς χρήση, $U_{f_{O_2}}$ η ροή του οξυγόνου προς χρήση, P_{fuel} η απόλυτη πίεση του καυσίμου, P_{air} η απόλυτη πίεση του αέρα, $V_{lpm(fuel)}$ ο ρυθμός ροής του καυσίμου, $V_{lpm(air)}$ ο ρυθμός ροής του αέρα, x το ποσοστό του υδρογόνου στο κάυσιμο, y το ποσοστό του οξυγόνου στο οξειδωτικό.

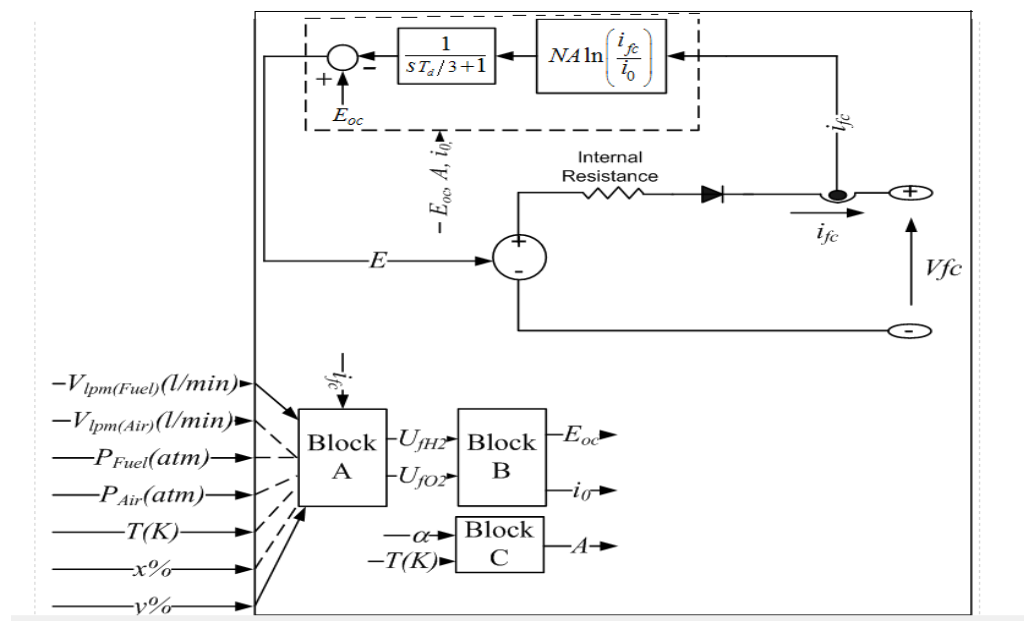
Οι μερικές πιέσεις που προσδιορίζονται από τις παραμέτρους που εισάγονται στο μπλοκ Β υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{H_2} = (1 - U_{f_{H_2}}) x \% P_{fuel}$$

$$P_{H_2O} = (w - 2y \% U_{f_{O_2}}) P_{air}$$

$$P_{O_2} = (1 - U_{f_{O_2}}) y \% P_{air}$$

όπου w το κλάσμα του νερού στο οξειδωτικό και k η σταθερά του Boltzman.



Σχημα 1: Ισοδυναμο κυκλωμα κυψελής υδρογονου

Η τάση του ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα ανταλλαγής μπορούν να υπολογιστούν από την μερική πίεση και την αναστρέψιμη δυνατότητα όπως περιγράφονται στις παρακάτω εξισώσεις (1) και (2):

$$E_{oc} = K_c E_n \quad (1)$$

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} e^{-\left(\frac{\Delta G}{RT}\right)} \quad (2)$$

Οι προκαθορισμένοι δείκτες μετατροπής περιγράφονται στις παρακάτω εξισώσεις (3) και (4):

$$U_{f_{H_2}} = \frac{n_{nom} \Delta h^O(H_2O_{(gas)}) N}{z F V_{nom}} \quad (3)$$

$$U_{f_{O_2}} = \frac{60000 R T_{nom} N I_{nom}}{2 z F P_{airnom} V_{lpm(air)nom} \cdot 0.21} \quad (4)$$

όπου n_{nom} είναι η σταθερά απόδοση της χαμηλής τιμής θερμότητας της κυψέλης καυσίμου, $\Delta h^O(H_2O_{(gas)})$ είναι η ενθαλπία του νερού, V_{nom} είναι η προκαθορισμένη τάση, I_{nom} είναι το προκαθορισμένο ρεύμα, $V_{lpm(air)nom}$ είναι ο προκαθορισμένος ρυθμός ροής αέρα, P_{airnom} είναι η προκαθορισμένη απόλυτη πίεση του αέρα και T_{nom} η προκαθορισμένη θερμοκρασία λειτουργίας.

Η προκαθορισμένη μερική πίεση και η αναστρέψιμη δυνατότητα του αερίου μπορούν να υπολογιστούν με βάση του προκαθορισμένους δείκτες μετατροπής. Υποθέτοντας ότι η κυψέλη λειτουργεί κάτω από κανονικές συνθήκες, που σημαίνει ότι λειτουργεί με σταθερούς δείκτες μετατροπής, και γνωρίζοντας τις τιμές των E_{oc} , i_0 και b , οι τιμές των a , ΔG και K_c μπορούν να υπολογιστούν. Αν υποθέσουμε ότι η κυψέλη δεν δέχεται καμία τροφοδοσία από καύσιμο ή αέρα, αυτό σημαίνει ότι δουλεύει σε σταθερό ρυθμό μετατροπής αερίου (τον προκαθορισμένο ρυθμό). Αυτό σημαίνει ότι η παροχή αερίου προσαρμόζεται βάσει την παρούσα ένταση του ρεύματος. Κάτω από κάθε φορτίο, ελάχιστα μόνο παραπάνω από το απαιτούμενο για το φορτίο τροφοδοτείται. Η μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος στην κυψέλη περιορίζεται στις μέγιστες τιμές των ρυθμών παροχής αέρα και καυσίμου. Εκτός από αυτό, η παραγόμενη τάση στην κυψέλη μειώνεται καθώς η ένταση του ρεύματος μεγαλώνει. Η μέγιστη αξιοποίηση $U_{f_{O_2(peak)}}$ που έχει και σαν αποτέλεσμα την πτώση της τάσης, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η κατανάλωση οξυγόνου σχετικά με το παραγόμενο ρεύμα της κυψέλης. Η αναστρέψιμη δυνατότητα τροποποιείται ως εξής:

$$E_n = \begin{cases} E_n - K(U_{f_{O_2}} - U_{f_{O_2(nom)}}) & \text{όταν } U_{f_{O_2}} > U_{f_{O_2(nom)}} \\ E_n & \text{όταν } U_{f_{O_2}} \leq U_{f_{O_2(nom)}} \end{cases} \quad (5)$$

όπου $U_{f_{O_2(nom)}}$ είναι ο προκαθορισμένος ρυθμός χρήσης οξυγόνου και K είναι η σταθερά πτώσης της τάσης και υπολογίζεται ως εξής:

$$K = \frac{V_u}{K_c(U_{f_{O_2(peak)}} - U_{f_{O_2(nom)}})} \quad (6)$$

Υποθέτουμε ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί κάτω από κανονικές συνθήκες. Αυτό περιλαμβάνει μία σταθερή τιμή θερμοκρασίας λειτουργίας, επαρκή παροχή καυσίμου καθώς

και παροχή ιδανικού αερίου. Χωρίς να ληφθεί υπόψη το υποπροϊόν που δημιουργείται από την ισχύ της χημικής αντίδρασης που οφείλεται στη πίεση μέσα στη κυψέλη, την θερμοκρασία και την υγρασία της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και τις ενδεχόμενες διαρροές αερίου ή νερού, οι παράμετροι της κυψέλης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά έχουν ληφθεί από το πρότυπο μοντέλο Honda FCX.

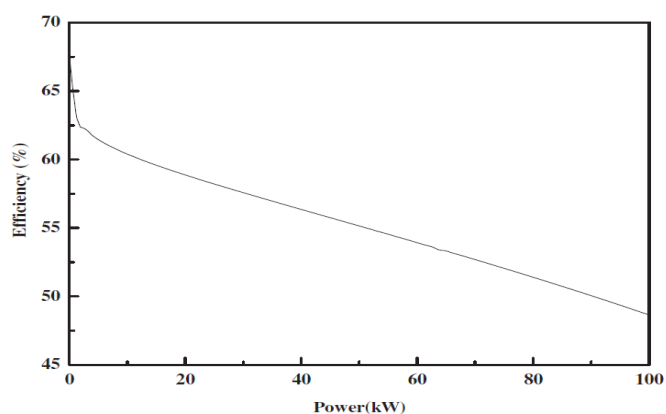
Ο υπολογισμός της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon = \varepsilon_n \times \varepsilon_e = \frac{E_{cell}}{E_h} \times 100\%$$

Όπου ε είναι η απόδοση της κυψέλης καυσίμου, ε_n είναι η θερμοδυναμική απόδοση, ε_e είναι η ηλεκτροχημική απόδοση, E_{cell} είναι η τάση της μίας κυψέλης και E_h η ενυαλπία της αντίδρασης, λαμβάνοντας σαν ιδανική την τάση αυτή των 1.48V.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2 η απόδοση της κυψέλης καυσίμου κυμαίνεται από 48.6% μέχρι 67.5%.

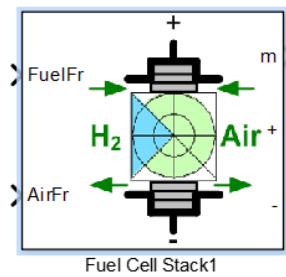
Για να ρυθμιστεί αυτή η πτώση τάσης της κυψέλης όταν αλλάζει το παραγώμενο ρεύμα, ένας DC/DC Converter είναι απαραίτητος για να διατηρείται μία σταθερή και συνεχόμενη τάση από την κυψέλη. Αυτή η προσθήκη έχει ως αποτέλεσμα μία πτώση απόδοσης λόγω μετατροπής και εκτιμάται ότι ο DC/DC Converter έχει δείκτη απόδοσης 90%.



Σχήμα 2: απόδοση κυψέλης καυσίμου

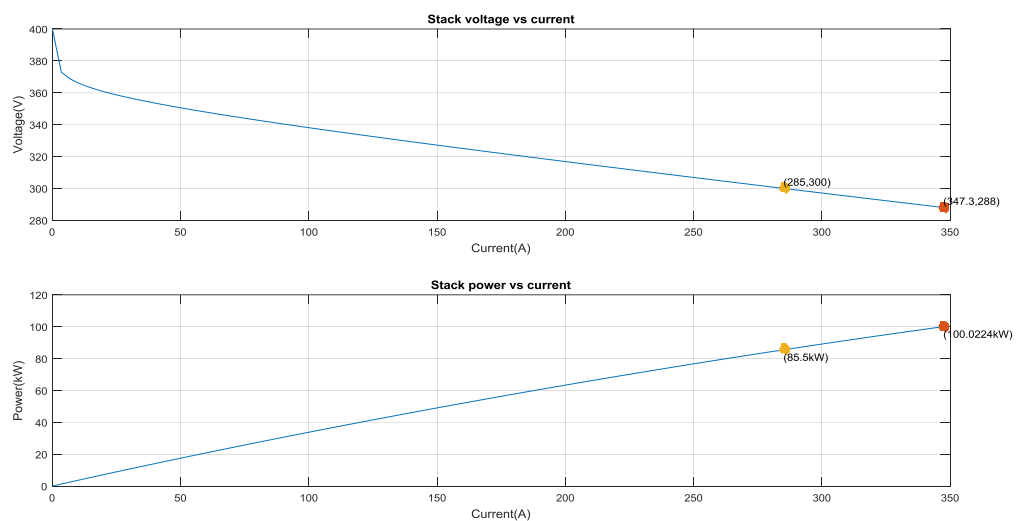
Στο περιβάλλον του Simulink, η κυψέλη καυσίμου έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 3. Δέχεται ως εισόδους στο μπλοκ, τους ρυθμούς παροχής οξυγόνου και καυσίμου και ως

εξόδους την παραγώμενη τάση και ορισμένες πληροφορίες της κυψέλης που επιλέγει ο χρήστης.



Σχήμα 3: Μπλοκ κυψέλης καυσίμου στο περιβάλλον Simulink

Στα παρακάτω διαγράμματα (σχήμα 4) φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες της κυψέλης όπου φαίνονται οι περιοχές λειτουργίας της με βάση το ρεύμα της σε σύγκριση με την τάση και την ισχύ της. Έπειτα, παρουσιάζονται όλοι οι παράμετροι λειτουργίας της κυψέλης σε πίνακα (σχήμα 5).



Σχήμα 4: Χαρακτηριστικές καμπύλες της κυψέλης καυσίμου

PEMFC parameters			
Stack power:	Nominal	85.5	kW
	Maximum	100	kW
Fuel cell resistance:		0.17572	Ω
Nernst voltage:		1.1729	V/cell
Nominal utilization:	Hydrogen	95.24	%
	Oxidant	50.03	%
Nominal consumption:	Fuel	794.4	slpm
	Air	1891	slpm
Exchange current:		0.024152	A
Exchange coefficient:		1.1912	
Fuel composition:		99.95	%
Oxidant composition:		21	%
Fuel flow rate at nominal hydrogen utilization:	Nominal	374.8	lpm
	Maximum	456.7	lpm
Air flow rate at nominal oxidant utilization:	Nominal	1698	lpm
	Maximum	2069	lpm
System temperature:		368	K
Fuel supply pressure:		3	bar
Air supply pressure:		3	bar

Σχήμα 5: Πίνακας παραμέτρων λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.

3.4 Μπαταρία

Όταν η μπαταρία ιόντων-λιθίου φορτίζει, το ηλεκτρόνιο μετακινείται από την πηγή φόρτισης στην ανθρακούχα περιοχή της καθόδου όσω τα ιόντα λιθίου φεύγουν από την άνοδο περνώντας από το διάλυμα ηλεκτρολύτη πριν εισέλθουν στην κάθοδο. Αντιθέτως, όταν η μπαταρία εκφορτίζει, τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα λιθίου ακολουθούν την αντίθετη κατεύθυνση.

Μοντέλο εκφόρτισης ($i^* > 0$):

$$f_1 = (it, i^*, i) = E_0 - K_b \frac{Q}{Q - it} i^* - K_b \frac{Q}{Q - it} it + Ae^{(-B \cdot it)}$$

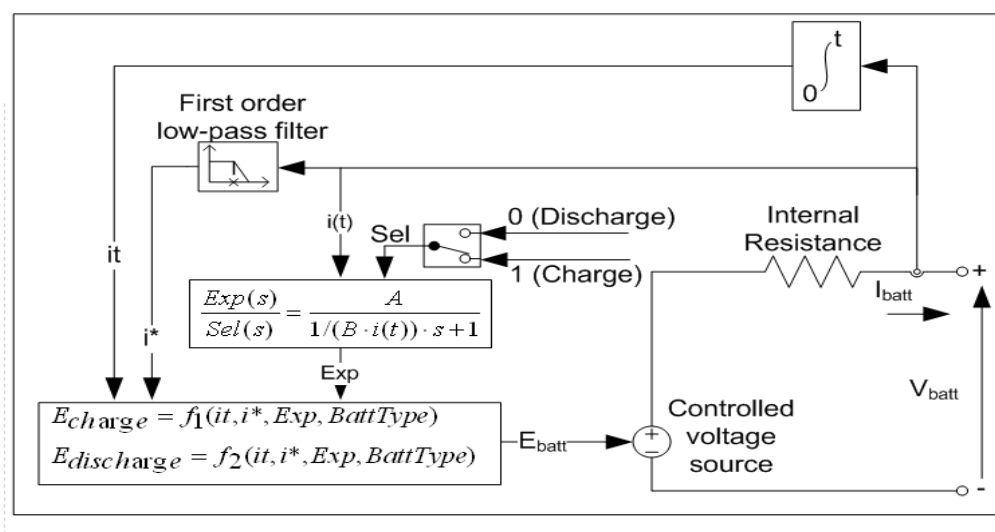
Μοντέλο φόρτισης ($i^* < 0$):

$$f_1 = (it, i^*, i) = E_0 - K_b \frac{Q}{0.1Q - it} i^* - K_b \frac{Q}{Q - it} it + Ae^{(-B \cdot it)}$$

όπου E_{batt} ονομαστική τάση (V), E_0 η καθορισμένη τάση, $Exp(s)$, η εκθετική δύναμη της τάσης, $Sel(s)$ η κατάσταση της μπαταρίας ($Sel(s)=1$ όταν φορτίζει, $Sel(s)=0$ όταν εκφορτίζει), K η σταθερά πόλωσης (Ah^{-1}) ή αντίσταση πόλωσης (Ω), i^* η ένταση του ρεύματος σε χαμηλής συχνότητας δυναμικές, it η διαθέσιμη χωρητικότητα (Ah), Q η μέγιστη χωρητικότητα (Ah), A η εκθετική τάση (V) και B η εκθετική χωρητικότητα (Ah)⁻¹.

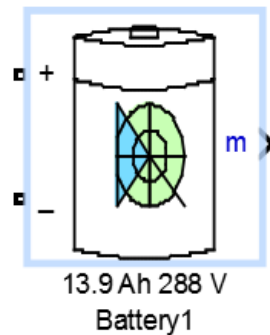
Η σχέση για τον υπολογισμό του SOC είναι η εξής:

$$SOC = 100(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt)$$



Σχήμα 6: Ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας

Ο ρόλος της μπαταρίας στο υπάρχον μοντέλο είναι βοηθητικός σε περιπτώσεις που η κυψέλη καυσίμου δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του οδηγού. Αυτές οι περιπτώσεις είναι κυρίως σε απότομες μεταβολές σε επιτάχυνση όπου και η κυψέλη καυσίμου δεν μπορεί να αποδώσει άμεσα όλη της την ισχύ. Η μπαταρία που χρησιμοποιείται στο αρχικό μοντέλο είναι ισχύος 25 kW, χωρητικότητας 13.9 Ah και ονομαστικής τάσης 288V.



Σχήμα 7: Μπλοκ μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink

3.5 Μηχανή

Οι δυναμικές ενός σύγχρονου τριφασικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM) χρησιμοποιήθηκαν στην προσωμοίωση του μοντέλου (με ημιτονοειδές back-EMF). Η μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια αναλόγως τη μηχανική ροπή. Αν η ροπή είναι θετική, χρησιμοποιείται ως κινητήρας, ενώ αν είναι αρνητική χρησιμοποιείται ως γεννήτρια.

Οι παρακάτω εξισώσεις σχετίζονται με τις συντεταγμένες του ρότορα για μοντελοποίηση ημιτονοειδούς ηλεκτρικού συστήματος (q και d άξονες). Όλες οι ποσότητες στις συντεταγμένες του ρότορα σχετίζονται με τον στάτη.

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}u_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}u_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_q - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q}$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$$

Όπου L_d και L_q οι επαγωγές των q και d αξόνων, R η αντίσταση των περιελίξεων του στάτη, i_q και i_d οι εντάσεις των ρευμάτων των q και d αξόνων, u_q και u_d οι τάσεις των q και d αξόνων, ω_r η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, λ το μέγεθος της ροής που προκαλείται από τον ρότορα του μόνιμου μαγνήτη στις φάσεις του στάτη, p ο αριθμός των ζευγών των πόλων και T_e είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Οι επαγωγές L_d και L_q αντιπροσωπεύουν την σχέση μεταξύ την επαγωγή φάσης και την θέση του ρότορα λόγω των χαρακτηριστικών του ρότορα. Για παράδειγμα, η μετρούμενη επαγωγή μεταξύ της A και της B φάσης περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$L_{ab} = L_q + L_d + (L_q - L_d)\cos(2\theta_e + \frac{\pi}{3})$$

Όπου θ_e η γωνία ηλεκτρικής φάσης.

Για έναν κυκλικό ρότορα δεν υπάρχει καμία αλλαγή στην φάση αυτεπαγωγής και άρα ισχύει ο εξής τύπος:

$$L_d = L_q = \frac{L_{ab}}{2}$$

Για έναν κυκλικό ρότορα με γωνία που προεξέχει οι επαγωγές των q και d αξόνων δίνονται από τις εξής τύπους:

$$L_d = \frac{\max(L_{ab})}{2}$$

$$L_q = \frac{\min(L_{ab})}{2}$$

Οι παρακάτω εξισώσεις σχετίζονται με τις συντεταγμένες του ρότορα για μοντελοποίηση ημιτονοειδούς ηλεκτρικού συστήματος (a,b και c άξονες). Η αυτεπαγωγή της φάσης L_s θεωρείται σταθερή και δεν μεταβάλλεται με την θέση του ρότορα.

$$\frac{d}{dt}i_a = \frac{1}{3L_s}(2u_{ab} + u_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_r (-2\Phi'_a + \Phi'_b + \Phi'_c))$$

$$\frac{d}{dt}i_b = \frac{1}{3L_s}(-u_{ab} + u_{bc} - 3R_s i_b + \lambda p \omega_r (\Phi'_a - 2\Phi'_b + \Phi'_c))$$

$$\frac{d}{dt} = -\left(\frac{d}{dt}i_a + \frac{d}{dt}\right)$$

$$T_e = p\lambda(\Phi'_a \cdot i_a + \Phi'_b \cdot i_b + \Phi'_c \cdot i_c)$$

Όπου L_s η επαγωγή των περιελίξεων του στάτη, R η αντίσταση των περιελίξεων του στάτη, i_a , i_b και i_c οι εντάσεις των ρευμάτων των a, b και c αξόνων, Φ'_a , Φ'_b και Φ'_c οι φάσεις των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων των a, b και c αξόνων, u_{ab} και u_{bc} οι διαφορές τάσεις μεταξύ φάσεων ab και bc αντίστοιχα, ω_r η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, λ το μέγεθος της ροής που προκαλείται από τον ρότορα του μόνιμου μαγνήτη στις φάσεις του στάτη, p ο αριθμός των ζευγών των πόλων και T_e είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή.

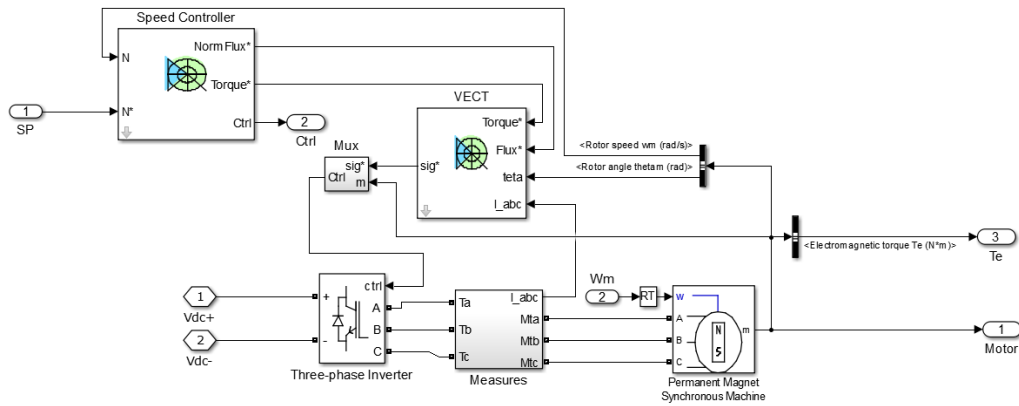
Συνδυάζοντας αυτά τα δύο μοντέλα, το σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{J}(T_e - F\omega_r - T_m)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r$$

, όπου J η συνδυασμένη αδράνεια του ρότορα και του φορτίου, F η συνδυασμένη τριβή ιξώδους του ρότορα και του φορτίου, θ η γωνία στη θέση του ρότορα και T_m η ροπή του μηχανικού άξονα.

Στο μοντέλο χρησιμοποιείται ένας τριφασικός σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη και 100kW ισχύος. Παρακάτω φαίνεται το υποσύστημα μέσα στο οποίο γίνεται ο έλεγχος του κινητήρα και περιλαμβάνει ένα ελεγκτή ταχύτητας, ένα FOC Controller (field-oriented control) και έναν τριφασικό inverter.



Σχήμα 8: Υποσύστημα ελέγχου κινητήρα στο περιβάλλον Simulink

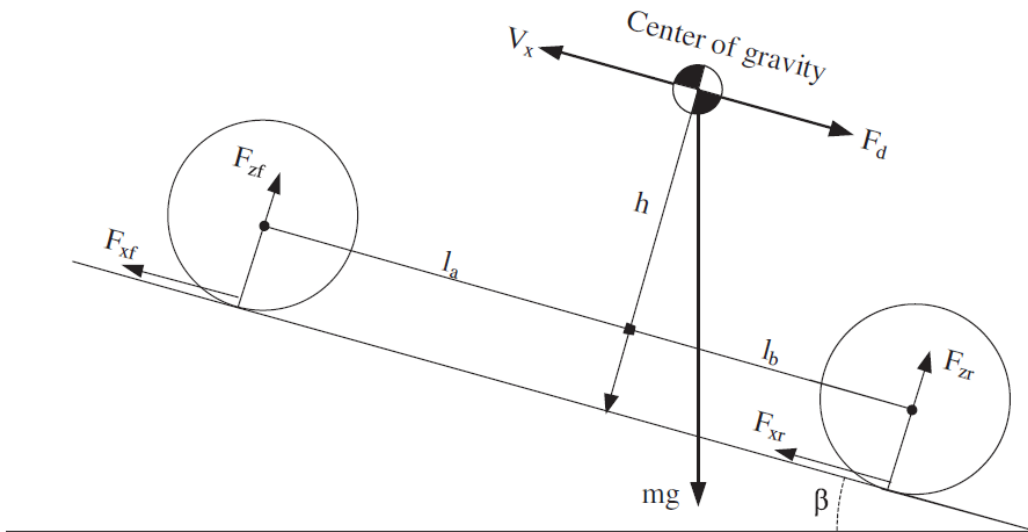
3.6 Δομή Οχήματος

Οι μηχανικές μετάδοσης και το μοντέλο του οχήματος βασίζονται στον 2^ο νόμο του Νεύτωνα. Σε απλουστευμένη μορφή, το μοντέλο δυναμικών του οχήματος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$m \frac{dV_x}{dt} = F_{traction} - F_{brk} - F_r$$

όπου m η μάζα του οχήματος (kg), V_x η ταχύτητα του οχήματος (m/s), $F_{traction}$ η δύναμη που απαιτεί ένα όχημα κυψελών καυσίμου να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ενός κύκλου οδήγησης, F_{brk} η δύναμη πέδησης και F_r διάφορες άλλες αντιστάσεις.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα).



Σχήμα 9: Σχήμα δυναμικών οχήματος

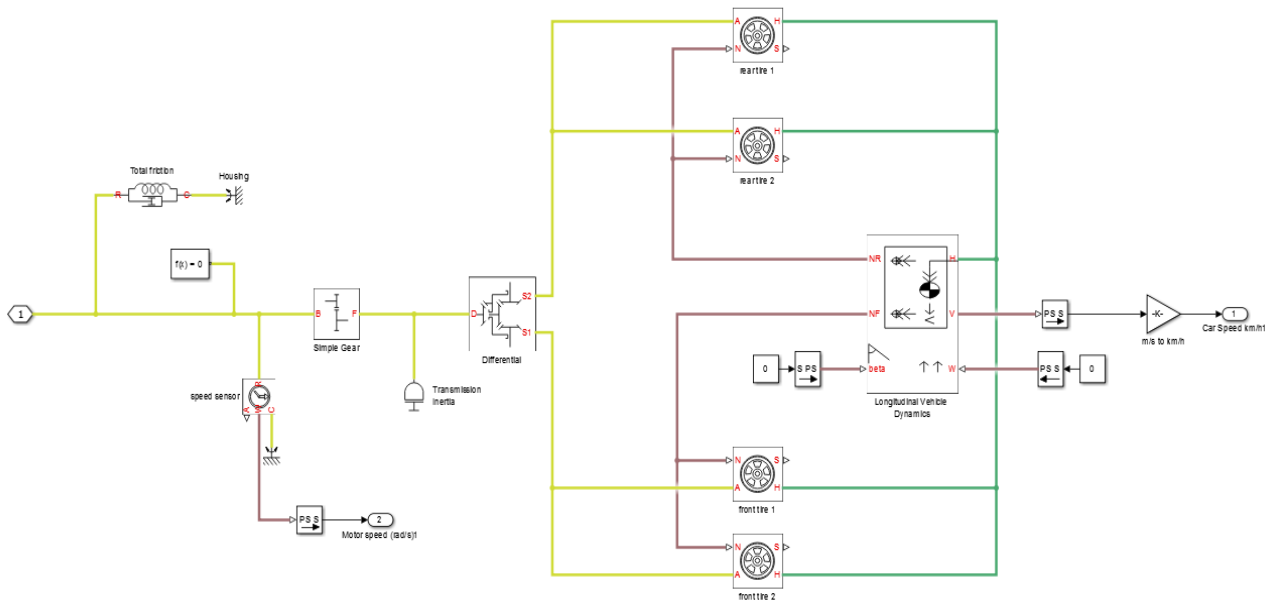
Υποθέτοντας ότι οι δύο άξονες του οχήματος είναι παράλληλοι μεταξύ τους και τοποθετούνται οι άξονες σε μία επιφάνεια παράλληλη με το έδαφος. Η διεύθυνση x είναι κάθετη με τους άξονες. Οι αποστάσεις από το κέντρο βάρους έως τον μπροστινό και οπίσθιο άξονα είναι l_a και l_b αντίστοιχα. Το όχημα κινείται σε ράμπα με κλίση β . Η κάθετη απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους και του κέντρου των τροχών είναι h . Οι δυνάμεις στους τροχούς F_{zf} και F_{zr} είναι κάθετες στην διεύθυνση z , αλλά όχι παράλληλες του κέντρου βάρους. F_{xf} είναι η κάθετη δύναμη μεταξύ του μπροστινού τροχού στην επαφή του με το έδαφος και F_{xr} η κάθετη δύναμη μεταξύ του οπίσθιου τροχού στην επαφή του με το έδαφος. Η δύναμη F_r περιλαμβάνει την αντίσταση κύλισης R , την αντίσταση απομάκρυνσης F_d και την αντίσταση κύλισης G_r και μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$F_r = \mu_r mg + \frac{1}{2} C_d \rho_{air} A_s (V_x - V_w)^2 + mg \sin \beta$$

όπου μ_r ο δείκτης τριβής του οδοστρώματος, C_d η αντίσταση του αέρα, A_s η ενεργός περιοχή της πρόσοψης του οχήματος, ρ_{air} η πυκνότητα του αέρα που ισούται με 1.2 kg/m^3 , και β η κλίση του εδάφους (ράμπα). Υποθέτοντας ότι η ταχύτητα του αέρα ισούται με 0 και ότι το όχημα κινείται σε επίπεδη επιφάνεια η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

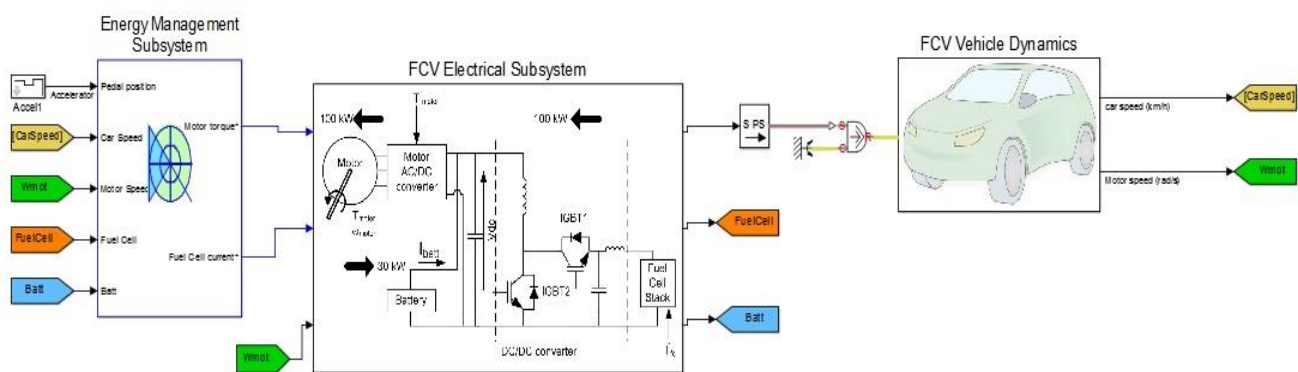
$$F_r = \mu_r mg + \frac{1}{2} C_d \rho_{air} A_s V_x^2$$

Το υποσύστημα που περιλαμβάνει τις δυναμικές του οχήματος στο Simulink φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Σε αυτό φαίνεται το μπλοκ που περιλαμβάνει τις σταθερές δυναμικές του οχήματος (μάζα κλπ), οι δυναμικές των τροχών, του διαφορικού, του κιβωτίου ταχυτήτων, τους συντελεστές τριβής και την αδράνεια μετάδοσης.



Σχήμα 10: Υποσύστημα δυναμικών στο περιβάλλον Simulink

Συνολικά, το μοντέλο στο περιβάλλον του Simulink, με όλα του τα υποσυστήματα, έχει την παρακάτω μορφή. Στα αριστερά φαίνεται το σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Στην μέση είναι το ηλεκτρικό σύστημα που περιλαμβάνει την μπαταρία, το σύνολο των κυψελών καυσίμου και τον κινητήρα με τα βοηθητικά τους υποσυστήματα. Και στα δεξιά είναι οι δυναμικές του οχήματος.



Σχήμα 11: Μοντέλο οχήματος στο περιβάλλον Simulink

4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Περιγραφή κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο εισάγεται το ζήτημα της ανάγκης ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας ως προς την σωστή κατανομή της. Στη συνέχεια αναλύονται ορισμένες υπάρχουσες μελέτες πάνω σε αυτό το θέμα και έπειτα, περιγράφεται και αναλύεται το υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας του αρχικού μοντέλου.

4.2 Εισαγωγικά

Ενώ η προσθήκη μιας βοηθητικής πηγής ενέργειας σε οχήματα κυψελών καυσίμου βοηθάει σε πολύ μεγάλο βαθμό την αύξηση της απόδοσης και της άμεσης απόκρισης τους οχήματος, προσθέτει, επίσης, μία ακόμα σημαντική συνιστώσα στη διαδικασία σχεδιασμού. Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας απαιτείται πλέον το οποίο, με τη σωστή κατανομή ενέργειας στις δύο πηγές, θα βελτιστοποιεί τη συμπεριφορά του συστήματος. Πολλά είδη στρατηγικών ελέγχου έχουν ήδη προταθεί και εξεταστεί σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Σε γενικές γραμμές, αυτές οι στρατηγικές βασίζονται είτε στη προσέγγιση που βασίζεται στην ακολουθία λογικών κανόνων είτε στη προσέγγιση της μαθηματικής βελτιστοποίησης. Η κυριότερη μέθοδος από αυτές που βασίζονται στους λογικούς κανόνες είναι η χρήση ελεγκτή ασαφούς λογικής. Από τη σκοπία της μαθηματικής βελτιστοποίησης, οι έρευνες εστιάζονται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης που αφορά τις περισσότερες φορές τη κατανάλωση καυσίμου. Και οι δύο αυτές στρατηγικές έχουν τα μειονεκτήματά τους. Η βασική δυσκολία όσων αφορά την ασαφή λογική, είναι ότι οι ελεγκτές απαιτούν δεδομένα εκπαίδευσης έτσι ώστε να κατασκευάσουν σωστά την συνάρτηση συμμετοχής και ένα σύνολο κανόνων που να καθορίζουν την έξοδο του ελεγκτή. Από την άλλη, η δυσκολία της μεθόδου της μαθηματικής βελτιστοποίησης έχει να κάνει με την απαίτηση εκ των προτέρων της γνώσης του επιθημητού κύκλου οδήγησης του οχήματος, πράγμα που από μόνο του είναι αρκετά πολύπλοκο. Παρ'όλα αυτά, έχουν αναπτυχθεί και άλλες στρατηγικές ελέγχου που μπορεί να βασίζονται στις δύο προηγούμενες ή και στο συνδυασμό αυτών αλλά και σε διαφορετικούς τύπους ελεγκτών.

4.3 Ανάλυση υπαρχόντων μελετών

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν περιληπτικά μερικά από τα κυριότερα project που αφορούν στην έρευνα και ανάπτυξη του συγκεκριμένου μέρους.

4.3.1 Power management for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται μια μέθοδος που βασίζεται στη χρήση ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής για τον ενεργειακό έλεγχο της κυψέλης καυσίμου και της μπαταρίας. Ως είσοδοι στον ελεγκτή χρησιμοποιούνται το SOC της μπαταρίας, η απαιτούμενη ισχύς του κινητήρα αλλά και μια μεταβλητή που έχει ως σκοπό να αντιμετωπίσει το σφάλμα εκτίμησης του SOC της μπαταρίας. Με τη χρήση αυτής της μεταβλητής εισάγονται στον ελεγκτή τα άκρως ανώτατα και κατώτατα όρια του SOC της μπαταρίας με σκοπό την αποφυγή της μείωσης της ζωής της ή ακόμα και της καταστροφής της. Οι λογικού κανόνες του ελεγκτή έχουν υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνεται υπ'όψη και κάποια ενδεχόμενη μη ικανοποίησης της απαιτούμενης ισχύος λόγω γήρανσης της κυψέλης ή και ορισμένων διαφορετικών συνθηκών που μπορεί να ισχύουν σε πραγματικούς κύκλους οδήγησης. Επίσης, έχουν ορισθεί και όρια για την ισχύ της κυψέλης έτσι ώστε να κυμαίνονται σε καλά, ως προς την συνολική απόδοση, επίπεδα. Μέσα από προσομοιώσεις για διαφορετικές καταστάσεις αλλά και από δοκιμή στο δρόμο σε πραγματικό όχημα, αποδεικνύεται ότι ο συγκεκριμένος ελεγκτής μπορεί να εξασφαλίσει σταθερότητα στην κατανομή ισχύος διατηρώντας παράλληλα το σύστημα ανάμεσα στα επιθυμητά όρια.

4.3.2 Optimal control in the power management of fuel cell hybrid vehicles

Στο συγκεκριμένο άρθρο παρουσιάζεται μια στρατηγική ελέγχου η οποία βασίζεται στην βασική αρχή ελαχίστου. Η θεωρία βέλτιστου ελέγχου εφαρμόζεται για δύο περιπτώσεις, μία χωρίς περιορισμούς στο SOC της μπαταρίας και μία άλλη με χρήση των περιορισμών με την καθιέρωση ανώτατου και κατώτατου επιπέδου του SOC. Ο σκοπός του συγκεκριμένου ελέγχου είναι να βρει μία σωστή κατανομή ισχύος μεταξύ των πηγών ενέργειας ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση υδρογόνου. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μίας συνάρτησης κόστους στην οποία συμπεριλαμβάνονται η ροή υδρογόνου, η ισχύς της κυψέλης και το SOC της μπαταρίας η οποία ελαχιστοποιείται με τη βοήθεια μίας Χαμιλτονιανής συνάρτησης και των κατάλληλων εξισώσεων. Η περίπτωση με χρήση περιορισμών υλοποιείται εισάγοντας μιας περαιτέρω μεταβλητής κατάστασης στο πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί πλέον να επιτυγχάνει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί του SOC παρατηρώντας την κατάσταση αυτή της μεταβλητής κατάστασης. Επίσης, προτείνεται και η αντικατάσταση ενός μεταβλητού όρου της συνάρτησης κόστους σε σταθερό εξαιτίας μιας παρατήρησης

της τάσης σε σχέση με την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας για την απλούστευση του προβλήματος και τη μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου προσωμοίωσης. Η προτεινόμενη μέθοδος, παρέχοντας τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, ελαχιστοποιεί την κατανάλωση καυσίμου και βελτιστοποιεί την διανομή ισχύος. Οι δοκιμές γίνονται σε περιβάλλον προσωμοίωσης και χρησιμοποιούνται διεθνείς κύκλοι οδήγησης για τις δοκιμές.

4.3.3 Optimal power source sizing of fuel cell hybrid vehicles on Pontryagin's minimum principle.

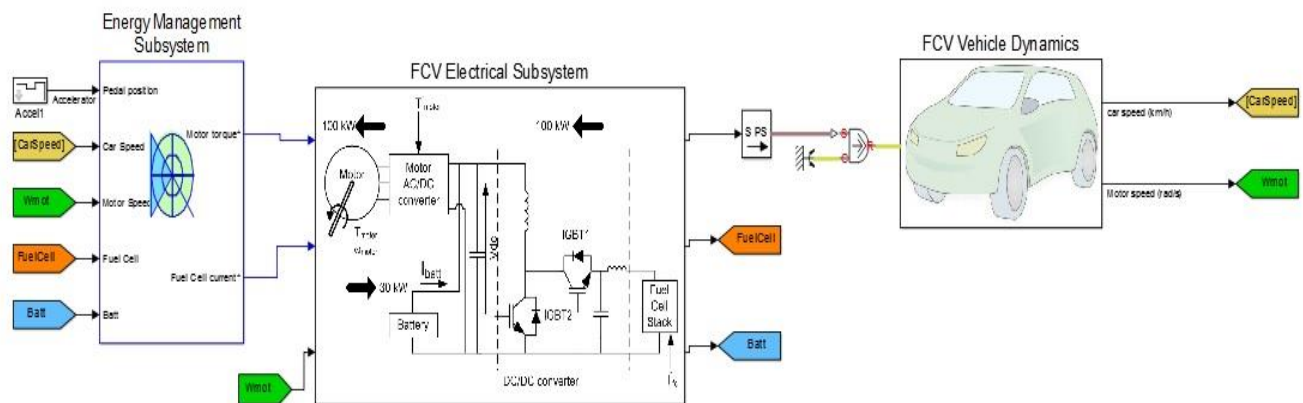
Σε αυτό το άρθρο αναπτύσσεται μία μέθοδος που χρησιμοποιεί την αρχή ελαχίστου του Pontryagin (Pontryagin's Minimum Principle – PMP) ως στρατηγική για την διαχείριση ενέργειας του οχήματος. Στη συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου λαμβάνεται υπόψη η κατανάλωση καυσίμου, το SOC της μπαταρίας αλλά και η ένταση του ρεύματος της μπαταρίας. Ως μεταβλητή ελέγχου ορίζεται η απαιτούμενη ισχύς της κυψέλης. Στη συνέχεια, σχηματίζεται μία χαμιλτονιανή συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση που καταστρώνεται με βάση το SOC της μπαταρίας και το ρυθμό κατανάλωσης υδρογόνου με την πρόσθεση δύο όρων ως περιορισμούς για το SOC και το ρεύμα της μπαταρίας. Το βελτιστοποιημένο μοντέλο δοκιμάζεται στον διεθνή αστικό κύκλο οδήγησης FTP-72 με και χωρίς τον περιορισμό του ρεύματος της μπαταρίας και παρατηρείται αύξηση στην εκτιμώμενη ζωή της μπαταρίας αλλά και μικρότερη απώλεια ενέργειας από αυτή.

4.3.4 Power management optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles with experimental validation

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται μια καινούρια προσέγγιση στο πρόβλημα της ενεργειακής βελτιστοποίησης υβριδικών οχημάτων με κυψέλες καυσίμου. Αυτή η καινοτομία αφορά στην ιδέα ότι η βελτιστοποίηση σε έναν ελεγκτή πραγματικού χρόνου ενός οχήματος μπορεί να εφαρμοστεί με βάση όχι έναν συγκεκριμένο κύκλο οδήγησης, αλλά με βάση ένα σύνολο κύκλων οδήγησης ταυτόχρονα έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη αποτελεσματικότητα και ευρωστία του συστήματος. Έπειτα, με βάση αυτήν την ιδέα, αναπτύσσονται δύο τύποι ελεγκτών, ένας PI ελεγκτής που βασίζεται στη Αρχή Ελαχίστου του Pontryagin (PMP) με 3 παραμέτρους και ένα ελεγκτής ασαφούς λογικής με 10 παραμέτρους. Οι ελεγκτές εξετάστηκαν και σε περιβάλλον προσωμοίωσης και πειραματικά κυρίως ως προς την κατανάλωση υδρογόνου και τη διατήρηση φόρτισης της μπαταρίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ενώ και οι δύο ελεγκτές είναι εξίσου ικανοποιητικοί ως προς τη διατήρηση φόρτισης της μπαταρίας, ο PI ελεγκτής έχει καλύτερες επιδόσεις ως προς τη κατανάλωση υδρογόνου παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιεί λιγότερες παραμέτρους.

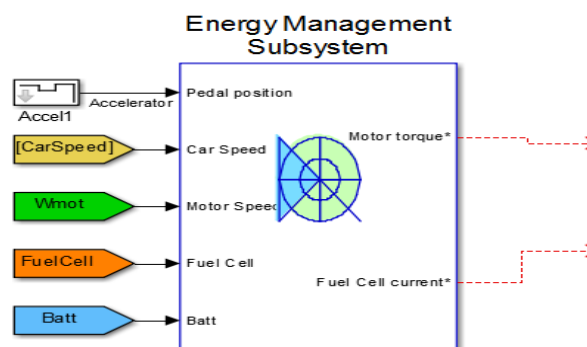
4.4 Ανάλυση υποσυστήματος διαχείρισης ενέργειας

Το μοντέλο του Simulink που χρησιμοποιείται διακρίνεται σε 3 βασικά υποσυστήματα που όλα μαζί αποτελούν το σύστημα με το οποίο εκτελούμε τις προσομοιώσεις μας. Τα 3 αυτά υποσυστήματα επιγραμματικά είναι το Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management Subsystem), το Υποσύστημα Ηλεκτρικών Υβριδικού Οχήματος (FCV Electrical Subsystem) και το Υποσύστημα Δυναμικών Υβριδικού Οχήματος (FC Vehicle Dynamics).



Σχήμα 1: Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, Υποσύστημα Ηλεκτρικών Υβριδικού Οχήματος και Υποσύστημα Δυναμικών Υβριδικού Οχήματος

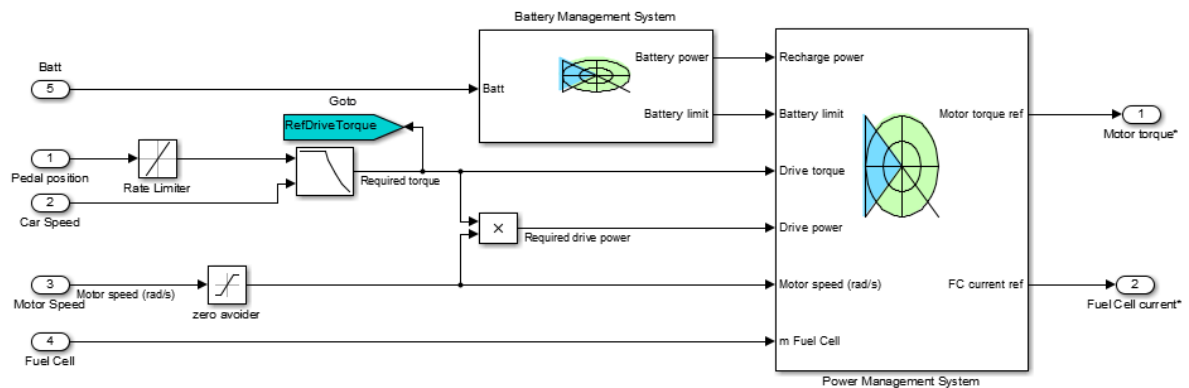
Ζητούμενο της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας είναι η Ανάπτυξη Στρατηγικής για την Βελτιστοποίηση της Διαχείρισης Ενέργειας του συνολικού συστήματος, κάτι που καθιστά το υποσύστημα Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System) πρώτη προτεραιότητα ως προς την κατανόηση και διαχείριση του.



Σχήμα 2: Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας

Απαραίτητο βήμα για την εξέλιξη της εργασίας είναι η μετατροπή του (Energy Management System) από Block διάγραμμα του Simulink σε πλήρη λειτουργικό κώδικα της μορφής Interpreted MATLAB Fcn που θα χρησιμοποιείται στο μοντέλο για τη βελτιστοποίηση του. Έτσι αναγκαία προϋπόθεση για την εκπόνηση της εργασίας είναι η κατανόηση και η ανάλυση του προαναφερθέντος υποσυστήματος .

Παρακάτω ακολουθεί η Ανάλυση του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ενέργειας που μας βοηθάει στην κατανόηση του και χρησιμοποιείται ως σκελετός για την δημιουργία του απαιτούμενου κώδικα.



Σχήμα 3:Το εσωτερικό του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ενέργειας

Όπως φαίνεται και παραπάνω το Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας έχει 5 εισόδους και 2 εξόδους.

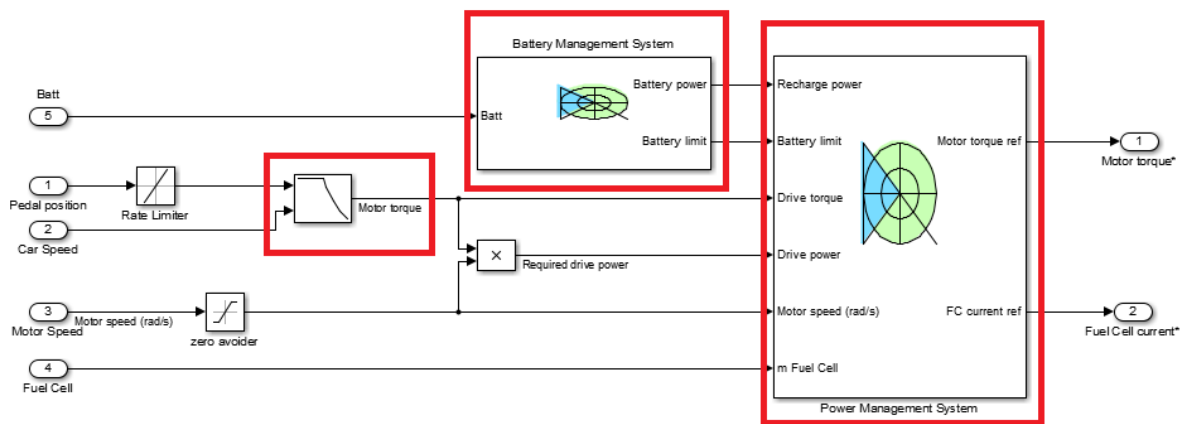
Αναλυτικότερα οι 5 εισοδοι του συστήματος είναι οι:

- *Accelerator* - Θέση του πεντάλ (-1 έως 1)
- *Car Speed* - Ταχύτητα του Οχήματος, km/h
- *Motor Speed* - Περιστροφική Ταχύτητα του Κινητήρα, rad/s
- *Fuel Cell* - Ρεύμα και Τάση της Κυψέλης Καυσίμων, Volt και Ampere αντίστοιχα
- *Battery* - Τάση και SOC(Κατάσταση Φόρτισης), Volt και εκατοστιαίο ποσοστό %

Ενώ οι 2 έξοδοι του υποσυστήματος (χειραγωγούμενες μεταβλητές) είναι οι :

- *Motor Torque*-Ροπή του Κινητήρα, Nm
- *Fuel Cell Current*-Ρεύμα της Κυψέλης Καυσίμου ,Ampere

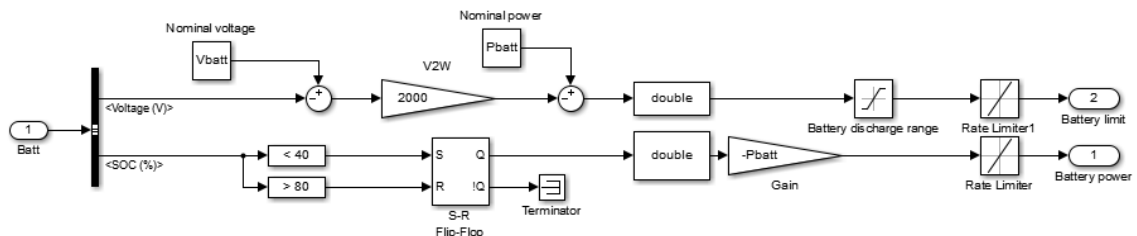
Αναλύοντας περαιτέρω το μοντέλο και όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 4, το υποσύστημα μας αποτελείται από 3 μικρότερα υποσυστήματα. Τα 3 υποσυστήματα αυτά είναι το Battery Management System , το Power Management System και Motor Torque Subsystem.



Σχήμα 4: Τα διακριτά υποσυστήματα του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ενέργειας

Παρακάτω ακολουθεί ξεχωριστή ανάλυση για το καθένα από αυτά.

Παρακάτω αναλύεται το σύστημα Διαχείρισης της Μπαταρίας (Battery Management System).



Σχήμα 5: Σύστημα Διαχείρισης της Μπαταρίας

Το υποσύστημα αυτό έχει ως είσοδο του την κατάσταση της μπαταρίας, αναλυτικότερα οι είσοδοι του είναι:

- Voltage – Τάση της μπαταρίας, Volt
- SOC - Κατάσταση Φόρτισης της Μπαταρία, (%)

Σκοπός του υποσυστήματος αυτού είναι ο υπολογισμός των 2 εξόδων του :

- Battery limit – Όρια της Μπαταρίας, Watt
- Battery power – Ισχύς της Μπαταρίας, Watt

Ο υπολογισμός του Ορίου της Μπαταρίας απαιτεί 2 επιπλέον τιμές. Αυτές καλούνται από το μοντέλο κατά την εκκίνηση της εκτέλεσης του (*Model Properties/Callbacks/InitFcn*). Οι τιμές αυτές είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας της μπαταρίας (*Nominal Voltage*) και η ονομαστική Ισχύ της μπαταρίας (*Nominal Power*). Ο υπολογισμός του Ορίου της Μπαταρίας εκφράζεται σε Ισχύ, Watts.

Η τιμή του υπόκειται σε 2 περιορισμούς πριν χρησιμοποιηθεί ως έξοδος του υποσυστήματος. Πρώτον το εύρος εκφόρτισης της μπαταρίας (*battery discharge range*) δεν μπορεί να είναι μικρότερο από 0 και μεγαλύτερο από την Ονομαστική Ισχύ της Μπαταρίας (*Nominal Power*). Δεύτερον ο ρυθμός μεταβολής (*slew rate*) της υπολογιζόμενης ισχύος δεν επιτρέπεται να ξεπερνάει το γινόμενο $10 \times \text{Nominal Power}$.

Το Όριο της Μπαταρίας (*Battery limit*) είναι η πρώτη από τις 2 εξόδους του υποσυστήματος αυτού και χρησιμοποιείται ως είσοδο στο υποσύστημα Διαχείρισης Ισχύος.

Ο υπολογισμός της Ισχύς της Μπαταρίας χρησιμοποιεί ως είσοδο το SOC-Κατάσταση Φόρτισης της μπαταρίας (*StateOfCharge*) και απαιτείται για τον υπολογισμό του η κλήση από το μοντέλο (*Model Properties/Callbacks/InitFcn*), της τιμής Ονομαστικής Ισχύος της Μπαταρίας *Nominal Power*. Στο σημείο αυτό μέσω ενός flip-flop δίνεται η εντολή για την φόρτιση η όχι της μπαταρίας.

Συγκεκριμένα γίνεται έλεγχος της τιμής του SOC και αν η τιμή του είναι μικρότερη του 40% η έξοδος του flip flop ενεργοποιείται (*SET Q=1*). Εάν η τιμή του SOC είναι μεγαλύτερη από 80% τότε η έξοδος του απενεργοποιείται, επανέρχεται δηλαδή στην αρχική της κατάσταση (*RESET Q=0*). Για όλες τις ενδιάμεσες τιμές του SOC η έξοδος του flip-flop παραμένει αμετάβλητη.

Όταν η έξοδος του flip-flop βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση (*Q=1*), τότε δίνεται εντολή φόρτισης της μπαταρίας και το *Battery Power* υπολογίζεται ως εξής:

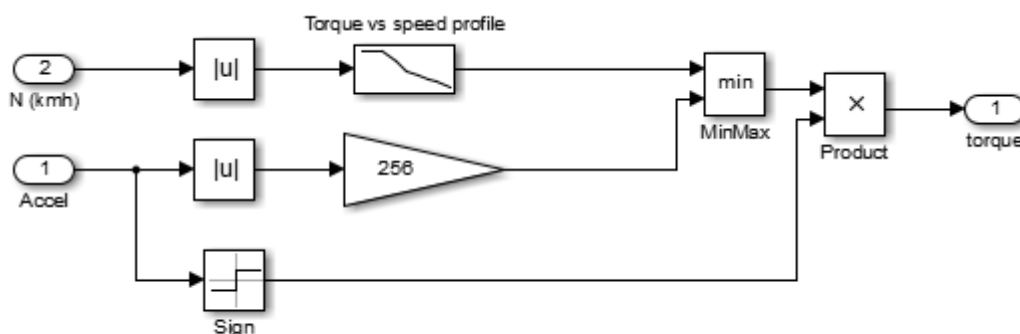
$$\text{Battery Power} = -1 \times (\text{Nominal Power})$$

Όταν η έξοδος του flip-flop βρίσκεται σε ανενεργή κατάσταση (*Q=0*), τότε η μπαταρία δεν φορτίζει και έχουμε:

Ο ρυθμός μεταβολής (*slew rate*) του *Battery Power* περιορίζεται σε $1 \times \text{Nominal Power}$ για αύξουσα μεταβολή ή $-1 \times \text{Nominal Power}$ για φθίνουσα.

Η τιμή της εξόδου Ισχύς της Μπαταρίας (*Battery Power*) εισέρχεται ως είσοδος στο υποσύστημα Διαχείρισης Ισχύος.

Ακολουθεί η ανάλυση για το Υποσύστημα υπολογισμού Απαιτούμενης Ροπής (*Motor Torque Subsystem*)



Σχήμα 5: Υποσύστημα υπολογισμού Απαιτούμενης Ροπής

Το Υποσύστημα υπολογισμού Απαιτούμενης Ροπής (Motor Torque Subsystem) είναι το μικρότερο από τα 3 υποσυστήματα που ανήκουν στο Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας . Το υποσύστημα αυτό έχει 2 εισόδους και 1 μοναδική έξοδο. Σκοπός του υποσυστήματος αυτού είναι ο υπολογισμός της Απαιτούμενης μηχανικής Ροπής από τον κινητήρα.

Οι 2 εισόδοι του:

- *Accelerator* - Θέση του πεντάλ (-1 έως 1)
- *Car Speed* - Ταχύτητα του Οχήματος, km/h

Η έξοδος του:

- *Required Torque* – Η ροπή που απαιτεί ο κινητήρας, Nm

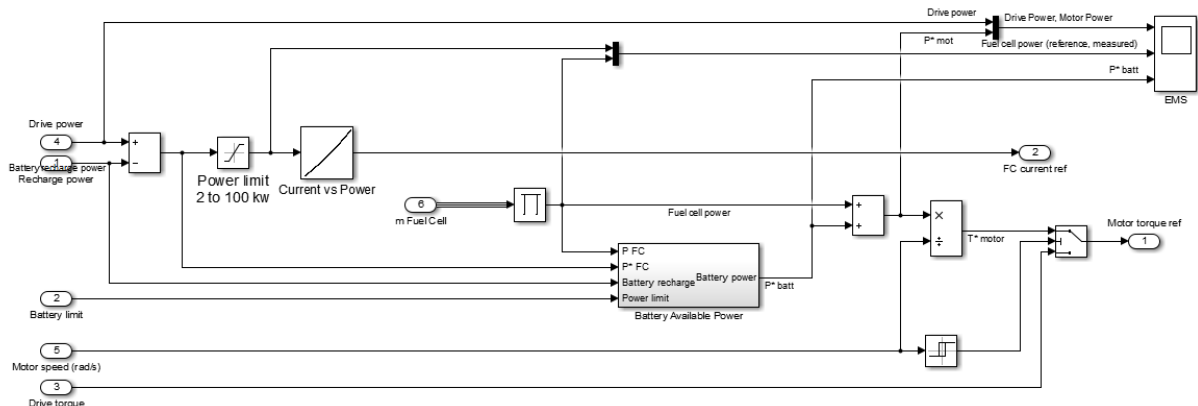
Η είσοδος Accelerator υπόκειται σε περιορισμό του ρυθμού μεταβολής του (*slew rate*) πριν εισέλθει στο υποσύστημα.

Το υποσύστημα εργάζεται ως εξής:

Η απόλυτη τιμή της μετρούμενης ταχύτητα του οχήματος Car Speed σε km/h εισέρχεται σε πίνακα αντιστοίχισης τιμών και μέσω εμπειρικού κανόνα αντιστοιχίζεται σε μια τιμή ροπής. Η τιμή αυτή εισέρχεται στον συγκριτή min. Η απόλυτη τιμή της θέσης του πεντάλ ,Accelerator πολλαπλασιάζεται με το 256 και εισέρχεται κι αυτή στο συγκριτή min. Η έξοδος του συγκριτή min, η μικρότερη δηλαδή τιμή από τις 2 εισόδους του συγκριτή min πολλαπλασιάζεται με το αρχικό πρόσημο του Accelerator και μας δίνει την έξοδο του υποσυστήματος, δηλαδή την Απαιτούμενη Ροπή- Required Torque.

Η έξοδος αυτή εισέρχεται στο Υποσύστημα Διαχείρισης Ισχύος.

Σε αυτό το σημείο περιγράφεται το Σύστημα Διαχείρισης Ισχύος (Power Management System)



Σχήμα 6: Υποσύστημα Διαχείρισης Ισχύος

Το Υποσύστημα Διαχείρισης Ισχύος (Power Management System) όπως φαίνεται και στο

παραπάνω Σχήμα 6 έχει 6 διαφορετικές εισόδους και παράγει 2 εξόδους. Στόχος του υποσυστήματος αυτού είναι η Διαχείριση της Ισχύος του συνολικού μας συστήματος. Επεξεργάζεται τα στοιχεία των εισόδων του, στις οποίες θα αναφερθούμε αναλυτικά και μας δίνει μέσω των εξόδων του την απαιτούμενη από το σύστημα ροπή του κινητήρα και το ρεύμα της Κυψέλης Καυσίμου μέσω του οποίου ρυθμίζεται η λειτουργία του συστήματος.

Οι 6 είσοδοι του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος (Power Management System) :

- *Recharge Power – Η Ισχύς που απαιτεί η μπαταρία για τη φόρτιση της , Watts*
- *Battery Limit – Τα όρια Ισχύος της μπαταρίας , Watts*
- *Drive Torque – Η απαιτούμενη από το σύστημα Ροπή , Nm*
- *Drive Power – Η απαιτούμενη από σύστημα Ισχύ, Watt*
- *Motor Speed – Η περιστροφική ταχύτητα του κινητήρα, rad/s*
- *Fuel Cell- Ρεύμα και Τάση της Κυψέλης Καυσίμων, Volt και Ampere αντίστοιχα*

Οι 2 εξοδοι του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος(Power Management System) :

- *Motor Torque – Η απαιτούμενη από το σύστημα Ροπή του Κινητήρα, Nm*
- *Fuel Cell Current Ref – Το απαιτούμενο από το σύστημα ρεύμα για την Κυψέλη Καυσίμου, Ampere*

Πριν την αναλυτική αναφορά στην λειτουργία του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος θα πρέπει να αναφερθούμε πιο συγκεκριμένα σε καθεμία από τις εισόδους του, που προέρχονται από το Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα6, υπάρχει μια επεξεργασία των εισόδων του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ενέργειας πριν αυτές εισέλθουν στο Υποσύστημα Διαχείρισης Ισχύος.

Ακολουθεί μια μικρή ανάλυση της προεπεξεργασίας των εισόδων του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος. .

Πιο συγκεκριμένα, οι πρώτες 2 εισοδοι Recharge Power και Battery limit του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ενέργειας προέρχονται ως εξόδοι του Υποσυστήματος Διαχείρισης της Μπαταρίας με τη διαφορά ότι η έξοδος Battery Power μετονομάζεται σε Recharge Power κατά την εισαγωγή της στο Υποσύστημα Διαχείρισης Ισχύος.

Η επόμενη είσοδος του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος, Drive Torque , η απαιτούμενη δηλαδή ροπή υπολογίζεται μέσω του βοηθητικού υποσυστήματος Motor Torque ως Required Torque στο επίπεδο Energy Management System και μετονομάζεται σε Drive Torque κατά την εισαγωγή της στο Υποσύστημα Διαχείρισης Ισχύος.

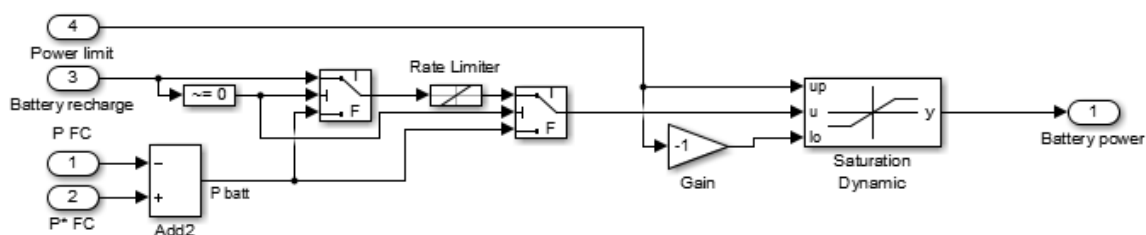
Η τέταρτη είσοδος Απαιτούμενη Ισχύς (Drive Power)(Watt) υπολογίζεται ως το γινόμενο της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα (Motorspeed)(rad/s) με την Απαιτούμενη Ροπή(Required Torque)(Nm).

$Drive\ Power = Motorspeed \times Required\ Torque$.

Οι 2 τελευταίες εισοδοι του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος, Motorspeed (περιστροφική ταχύτητα) και m Fuel Cell(ρεύμα A και τάση V εξόδου του Fuel Cell) εισέρχονται σε αυτό αυτούσιες προερχόμενες από το Υποσυστήματος Διαχείρισης Ενέργειας.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση της λειτουργίας του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος και σύμφωνα με το Σχήμα6 διακρίνουμε το υποσύστημα Battery Available Power εμφωλευμένο στο επίπεδο Power Management System. Η λειτουργία του υποσυστήματος αυτού περιγράφεται αναλυτικότερα πιο κάτω.

Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση για το Υποσύστημα Υπολογισμού Διαθέσιμης Ισχύς της Μπαταρίας(Battery Available Power)



Σχήμα 7: Υποσύστημα Υπολογισμού Διαθέσιμης Ισχύς της Μπαταρίας

Το υποσύστημα Υποσύστημα Υπολογισμού Διαθέσιμης Ισχύς της Μπαταρίας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7 έχει 4 εισόδους των οποίων τα στοιχεία επεξεργάζεται και μας δίνει μια έξοδο. Σκοπός του υποσυστήματος αυτού είναι να υπολογίζει την διαθέσιμη από την μπαταρία ισχύ για το σύστημα μας.

Οι 4 είσοδοι του:

- *Power limit*-Το *Battery limit* του *Power Management System* εισέρχεται στο υποσύστημα ως *Power limit*. Τα όρια Ισχύος της μπαταρίας ,Watts
- *Battery Recharge* (Επαναφόρτισης Μπαταρίας)- Εισέρχεται στο υποσύστημα *Power Management System* ως *Recharge Power*. Η Ισχύς που απαιτεί η μπαταρία για τη φόρτιση της , Watts
- *PFC* (Ισχύς του *Fuel Cell*) -Ο υπολογισμός του περιγράφεται παρακάτω στη λειτουργία του *Power Management System*,Watts
- *P*FC*(Ισχύς του *Fuel Cell*) -Ο υπολογισμός του περιγράφεται παρακάτω στη λειτουργία του *Power Management System*,Watts

Η έξοδος του υποσυστήματος:

- *Battery Power*(Διαθέσιμη Ισχύς Μπαταρίας)-Η ισχύς που μπορεί η Μπαταρία να διαθέσει στο σύστημα μας ,Watts

Η λειτουργία του Υποσυστήματος Υπολογισμού Διαθέσιμης Ισχύς της Μπαταρίας(Battery Available Power):

Το *Battery limit* του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος εισέρχεται στο υποσύστημα ως *Power limit* και χρησιμοποιείται ως άνω όριο για την τιμή της εξόδου *Battery Power*, ενώ το κάτω όριο ορίζεται ως το γινόμενο $-1 \times (\text{Power limit})$ (δυναμικός περιορισμός).

Η τιμή του Battery Recharge εισέρχεται στο Switch1(διακόπτης επιλογής 1) στη θύρα 1, ελέγχεται αν είναι ίση με 0(όταν ισούται με 0 δίνει αποτέλεσμα 1 αλλιώς δίνει αποτέλεσμα 0) και το αποτέλεσμα αυτό εκχωρείται στη θύρα 2 του Switch 1 και τέλος εισέρχεται στην θύρα 2 του Switch2(διακόπτης επιλογής 2). Οι είσοδοι PFC και PF*C χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό $P_{batt}=P*FC - PFC$. Το αποτέλεσμα P_{batt} εισέρχεται στην θύρα 3 του Switch1 και στη θύρα 3 του Switch2. Όταν το Battery Recharge είναι ίσο με 0 τότε στο Switch1 και Switch2 επιλέγεται ως έξοδος η πρώτη θύρα1, διαφορετικά επιλέγεται η δεύτερη θύρα2. Η έξοδος του Switch1 εισέρχεται στο Switch2 στη θύρα1. Η τελική έξοδος του Switch 2 περιορίζεται δυναμικά όπως περιγράψαμε παραπάνω και μας δίνει την τελική έξοδο του υποσυστήματος Battery Power.

Η λειτουργία του Υποσυστήματος Διαχείρισης Ισχύος:

Οι είσοδοι του υποσυστήματος Drive Power και Recharge Power χρησιμοποιούνται στη παρακάτω διαφορά ως εξής $P*FC=Drive Power - Recharge Power$. Το αποτέλεσμα αυτό χρησιμοποιείται ως είσοδος στο υποσύστημα Battery Available Power ,μετά περιορίζεται ως εξής $2KWatt < P*FC < 100KWatt$ και στη συνέχεια μέσω του εμπειρικού πίνακα αντιστοίχισης CurrentVsPower υπολογίζεται μια τιμή ρεύματος για την αντίστοιχη ισχύ. Έχουμε μετατροπή δηλαδή από Watt σε A. Η τιμή αυτή του ρεύματος για την κυψέλη καυσίμων ορίζεται ως η πρώτη έξοδος του υποσυστήματος μας, Fuel Cell Current Ref δηλαδή το απαιτούμενο από το σύστημα ρεύμα για την Κυψέλη Καυσίμου, Ampere.

Οι τιμές FC Current και FC Volt (τάση και ρεύμα της κυψέλης καυσίμου) εισέρχονται στο υποσύστημα και το εσωτερικό τους γινόμενο μας δίνει την ισχύ του Fuel Cell, δηλαδή $PFC=FC Current * FC Voltage$. Το αποτέλεσμα PFC χρησιμοποιείται ως είσοδος στο Υποσύστημα Υπολογισμού Διαθέσιμης Ισχύς της Μπαταρίας.

Η τιμή της εισόδου MotorSpeed(περιστροφική ταχύτητα του κινητήρα rad/s) χρησιμοποιείται σε ένα συγκριτή που κάνει τον εξής έλεγχο και καθορίζει την έξοδο του παρακάτω ρελέ. Εάν MotorSpeed $\geq 300/30\chi\pi$ τότε το ρελέ δίνει έξοδο 1.

Εάν MotorSpeed $\leq 200/30\chi\pi$ τότε το ρελέ δίνει έξοδο 0.

Από το σημείο αυτό επιλέγεται η θέση του Switch3. Όταν η έξοδος του ρελέ δίνει 0 στο Switch3 επιλέγεται η θέση 1, διαφορετικά για έξοδο του ρελέ ίση με 1, στο Switch3 επιλέγεται η θέση 2.

Η τιμή της εισόδου Drive Torque εισέρχεται στη θέση 2 του Switch3.

Η έξοδος του P_{batt} του Battery Available Power και η τιμή του PFC αθροίζονται ως εξής.

$P_{motor}=PFC+P_{batt}$

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για την λειτουργία και τον σχεδιασμό ελέγχου του εξεταζόμενου μοντέλου .Αρχικά, μέσω ενός εμπειρικού πίνακα, η θέση του πεντάλ με την ταχύτητα του οχήματος μεταφράζονται σε επιθυμητή ροπή και ,σε συνδυασμό με τις στροφές του κινητήρα, σε επιθυμητή ισχύ. Αυτές οι τιμές μαζί με το ρεύμα και την τάση της κυψέλης και τη ενδεχόμενη επιθυμητή ισχύ της μπαταρίας, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η απαιτούμενη ισχύ του κινητήρα καθώς και το ρεύμα της κυψέλης. Αυτές οι δύο τιμές είναι και οι χειραγωγούμενες μεταβλητές του συστήματος και είναι απαραίτητες έτσι ώστε να υπάρχει κατανομή ενέργειας μεταξύ κυψέλης και μπαταρίας. Στο αρχικό μοντέλο, έχει οριστεί κατώτερο και ανώτερο όριο μπαταρίας (SOC) 40% και 80% αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση που το SOC της μπαταρίας πέσει κάτω από το κατώτατο όριο 40%, το σύστημα καλείται να το αυξήσει άμεσα καθώς θεωρείται ότι η μπαταρία έχει αποφορτιστεί και είναι σε επικίνδυνη περιοχή. Με την ίδια λογική, όταν η μπαταρία ξεπεράσει το ανώτατο όριο 80%, το υποσύστημα δίνει εντολή να σταματήσει η φόρτιση της μπαταρίας. Όταν το SOC της μπαταρίας είναι μεταξύ 40% και 80%, η μπαταρία

δίνει ενέργεια όπου χρειαστεί και φορτίζεται μόνο μέσω της αναγεννητικής πέδησης και σε στάση του οχήματος.

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

5.1 Περιγραφή κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο το μοντέλο προσομοιώνεται στο περιβάλλον του Simulink και δοκιμάζεται για διαφορετικές αρχικές παραμέτρους τους συστήματος. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ανάλυσης ευαισθησίας και εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα ως προς τα πλεονεκτήματά του και τα περιθώρια βελτίωσής του.

5.2 Εισαγωγή

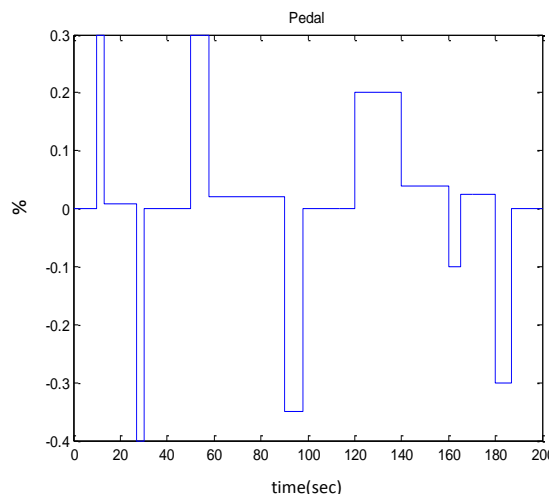
Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο θα πρέπει να ακολουθεί κάποια φυσικά όρια και περιορισμούς έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή και έυρυθμη λειτουργία του αφ'ενός αλλά και η απόδοσή του σε υψηλές τιμές. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι δοκιμές που γίνανε στο υπάρχον μοντέλο με διαφορετικές αρχικές τιμές στις παραμέτρους του και για διαφορετικές συνθήκες με σκοπό να αξιολογηθεί η λειτουργία του, να καταγραφούν τα μειονεκτήματά του και τα περιθώρια που χρήζουν βελτίωσης. Οι δοκιμές γίνανε με χρήση του διεθνούς αστικού κύκλου οδήγησης ECE-40 αλλά και τυχαίων κύκλων οδήγησης για την δοκιμή του μοντέλου σε ακραίες συνθήκες.

5.3 Ανάλυση ευαισθησίας με μεταβολή του αρχικού SOC

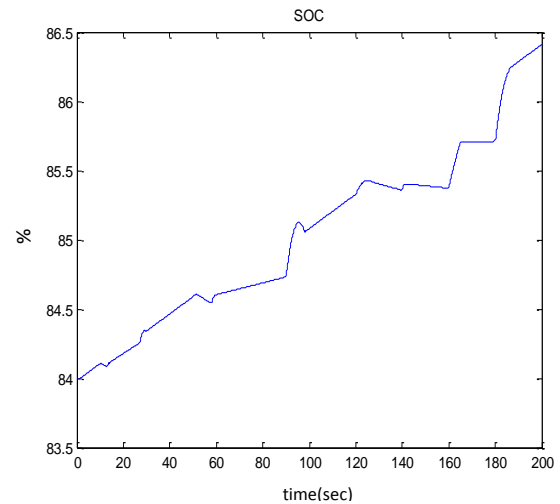
Αρχικά, το μοντέλο δοκιμάστηκε για διαφορετικές αρχικές τιμές του SOC της μπαταρίας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των προσομοιώσεων.

5.3.1 Διαγράμματα για αρχικό SOC = 84%

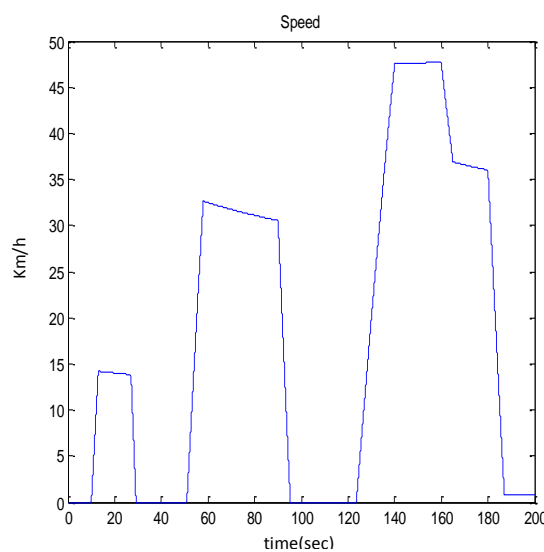
Σε αυτό το σημείο εκτελείται προσομοίωση 200 δευτερολέπτων για τον κύκλο οδήγησης ECE-40 και για αρχικό SOC μπαταρίας ίσο με 84%.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1: Διάγραμμα θέσης πεντάλ (α), SOC μπαταρίας (β), και ταχύτητας (γ)

Οι παρακάτω τιμές που υπολογίστηκαν μετέπειτα, είναι μόνο για επίδειξη, επειδή η μπαταρία σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα δεν παρουσίασε μεγάλες αλλαγές στην κατάστασή της. Σε κανονική μέτρηση, τόσο μικρές τιμές του DOD και των κύκλων φόρτισης δεν θα λαμβάνονταν υπόψη.

Depth of Discharge:

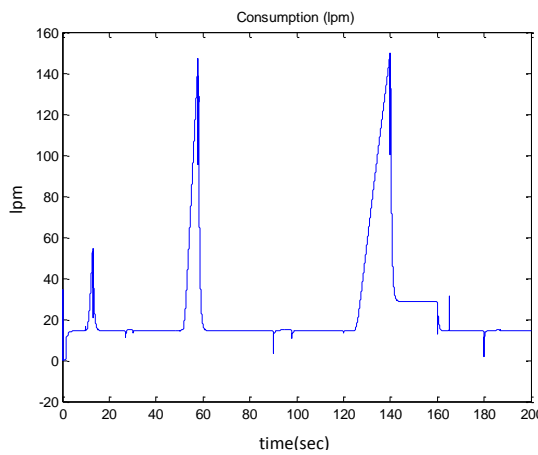
dod =

0.0223 0.0062 0.0647 0.0705 0.0705 0.0296

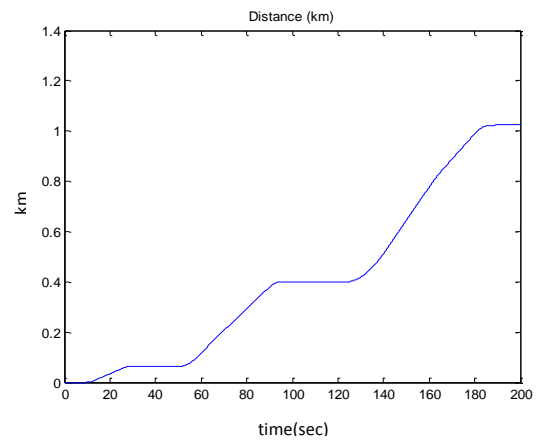
Κύκλοι φόρτισης:

cycles =

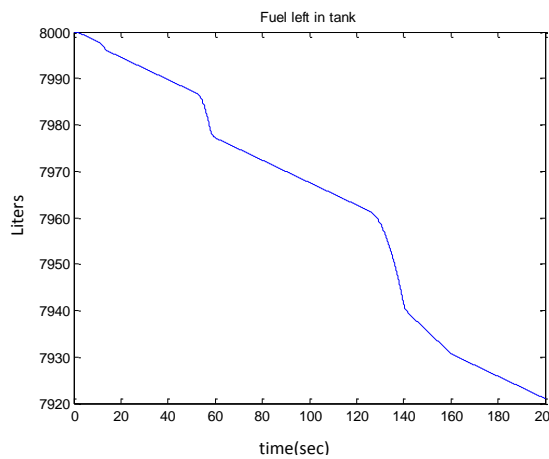
0.1061 0.2618 0.2667 0.5843 0.3725 0.0453 1.03



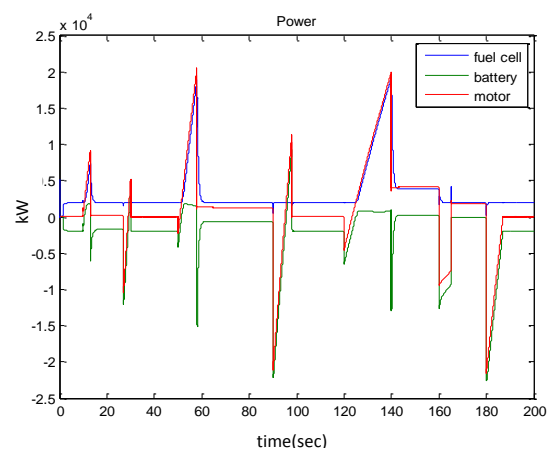
(α)



(β)

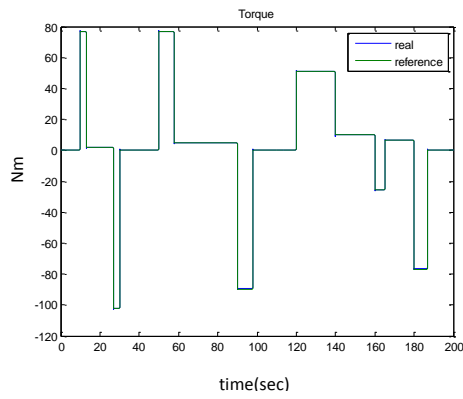


(γ)

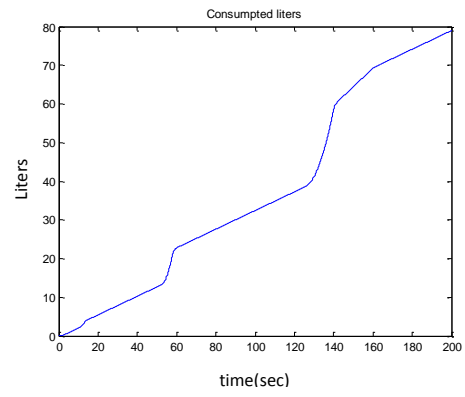


(δ)

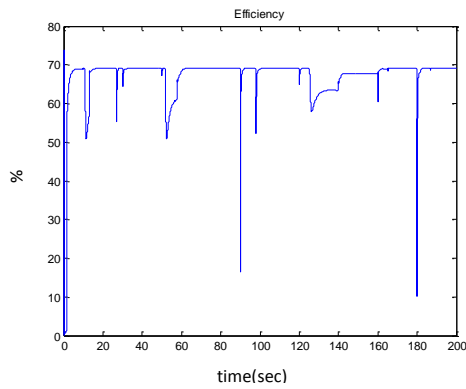
Σχήμα 2: Διαγράμματα στιγμιαίας κατανάλωσης (α), διανυθείσας απόστασης (β), εναπομένοντων λίτρων υδρογόνου στην δεξαμενή (γ) και ισχύος μπαταρίας-κυψέλης-μηχανής(δ)



(α)



(β)



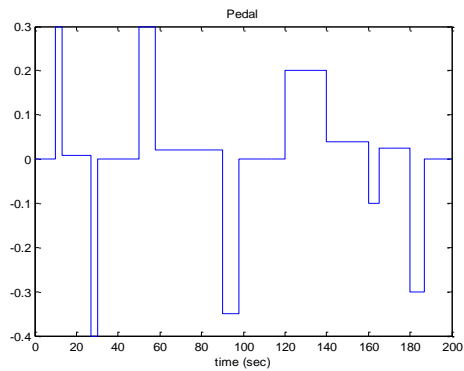
(γ)

Σχήμα 3: Διαγράμματα επιθυμητής-πραγματικής ροπής (α), καταναλωθέντων λίτρων υδρογόνου (β) και απόδοσης κυψέλης (γ).

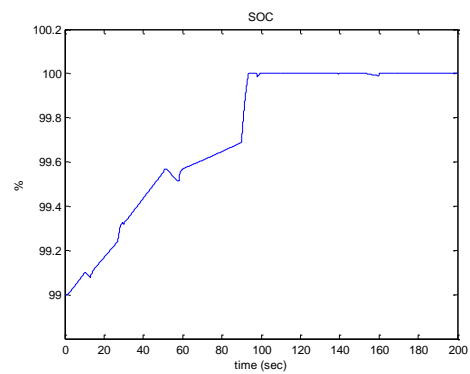
Από την παραπάνω προσομοίωση, παρατηρείται ότι, ενώ το αρχικό SOC της μπαταρίας βρίσκεται πάνω από το ανώτερο προκαθορισμένο όριο που είναι 80%, στο διάγραμμα του SOC, η τιμή συνεχίζει να ανεβαίνει. Αυτό σημαίνει ότι η μπαταρία συνεχίζει να φορτίζει με κίνδυνο να πλησιάσει στις ανώτερες τιμές της και να κινδυνεύει η ζωή της από υπερφόρτιση.

5.3.2 Διαγράμματα για αρχικό SOC = 99%

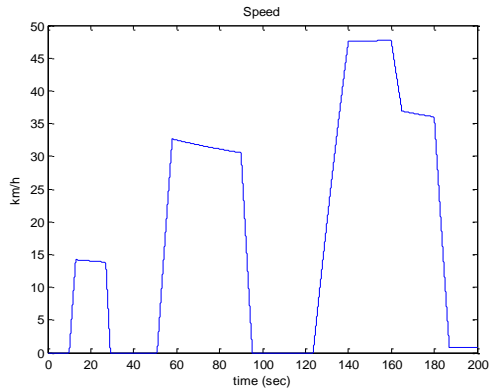
Σε αυτό το σημείο εκτελείται προσομοίωση 200 δευτερολέπτων για τον κύκλο οδήγησης ECE-40 και για αρχικό SOC μπαταρίας ίσο με 99%.



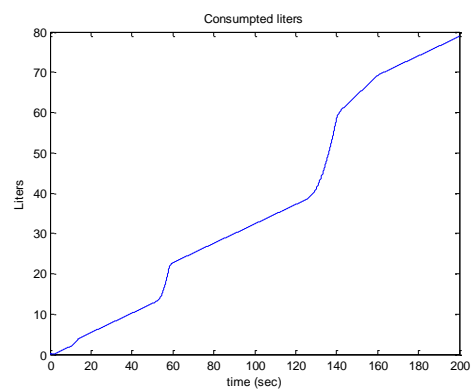
(α)



(β)

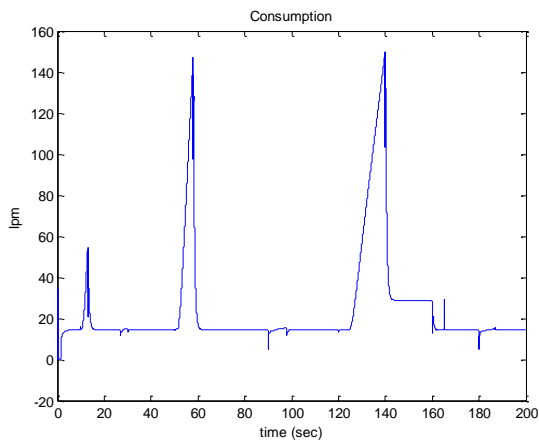


(γ)

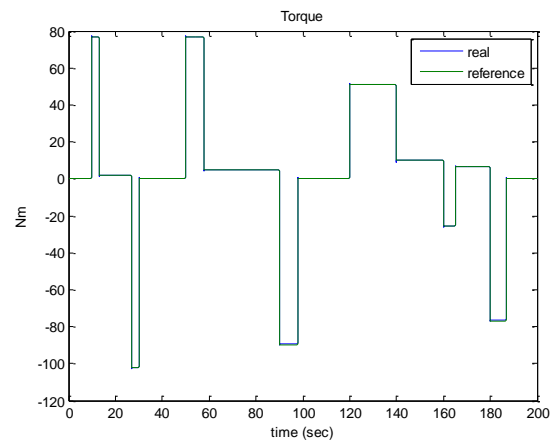


(δ)

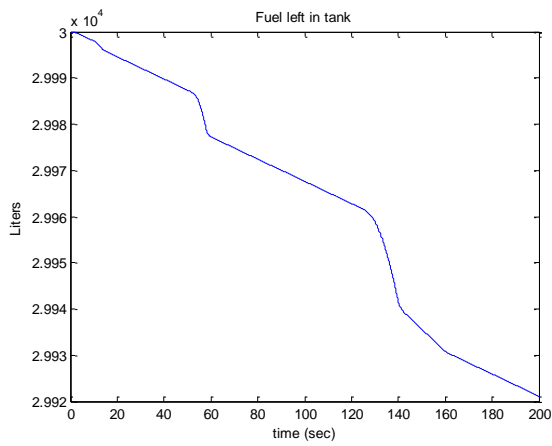
Σχήμα 4: Διάγραμμα θέσης πεντάλ (α), SOC μπαταρίας (β), ταχύτητας (γ) και καταναλωθέντων λίτρων υδρογόνου (δ).



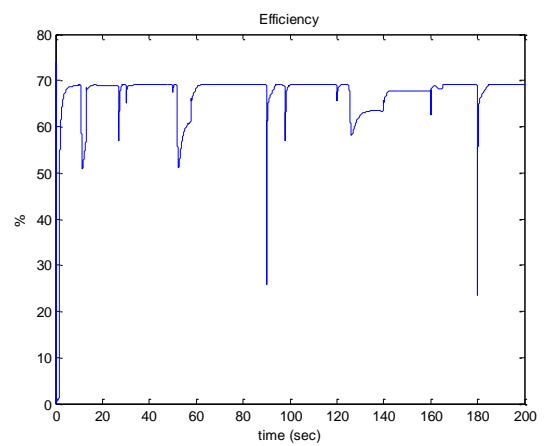
(α)



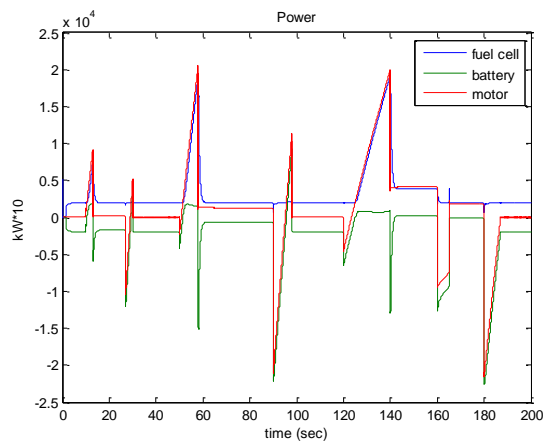
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 5: Διαγράμμα στιγμιαίας κατανάλωσης (α), επιθυμητής-πραγματικής ροπής (β), εναπομείναντων λίτρων υδρογόνου (γ), απόδοσης κυψέλης (δ), ισχύος μπαταρίας-κυψέλης-μηχανής (ε).

Υπολογίστηκαν και οι παρακάτω τιμές ως προς την περαιτέρω ανάλυση και κατανόηση των διαγραμμάτων:

Χρήση της κυψέλης καυσίμου: 175.0766 kWh

Χρήση μπαταρίας: 11.3936 kWh

Φόρτιση μπαταρίας από κυψέλη καυσίμου: 75.6%

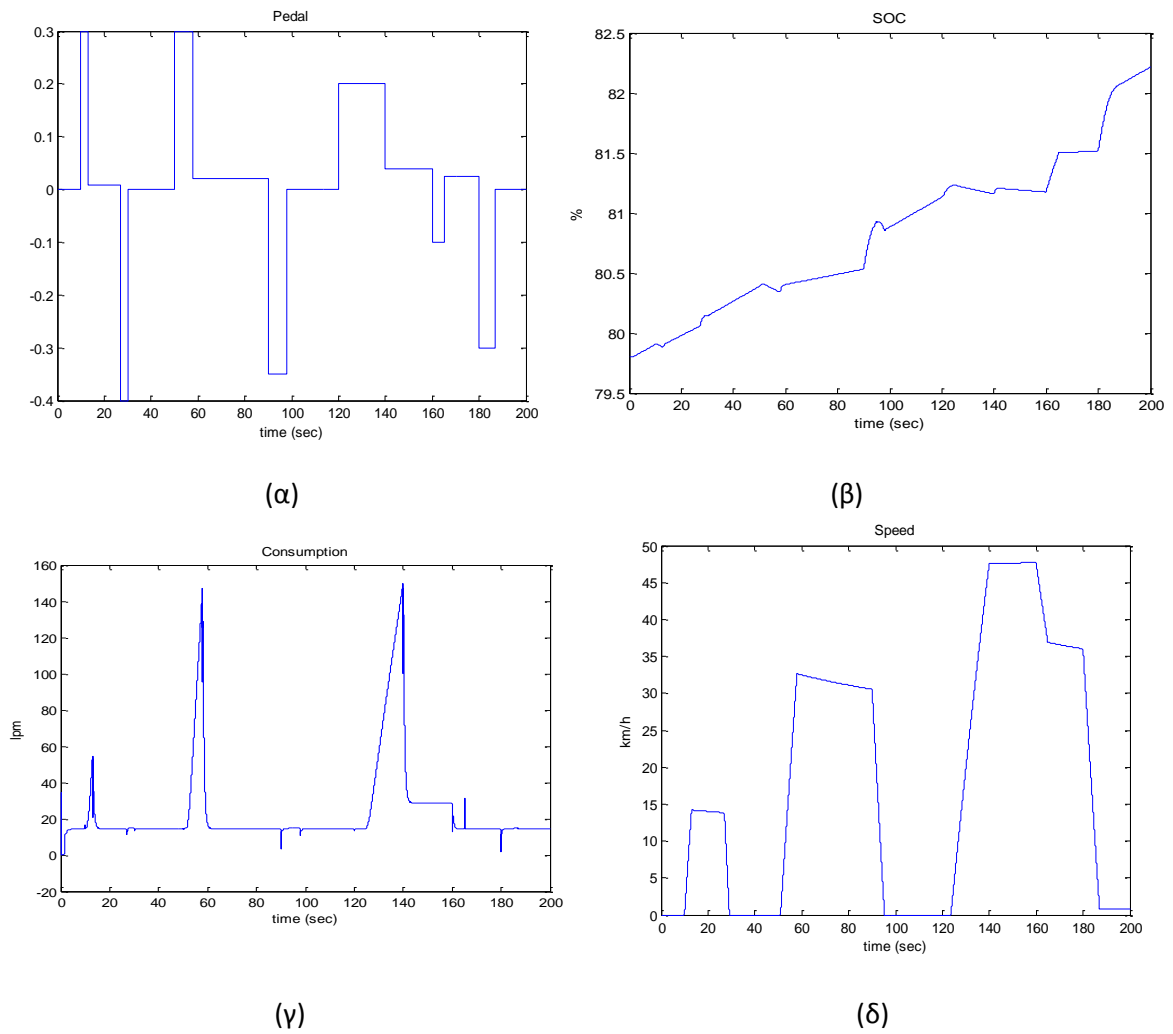
Φόρτιση μπαταρίας από φρενάρισμα: 24.4%

Διανυθέντα χιλιόμετρα: 1.0257

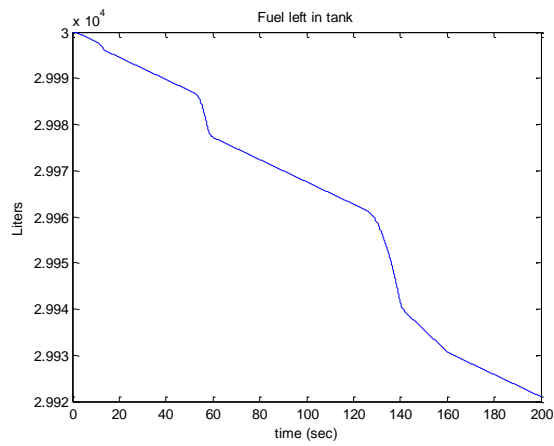
Στην παραπάνω προσομοίωση επιλέγεται ως αρχικό SOC η τιμή 99% για να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος σε αυτήν την ακραία περίπτωση. Παρατηρείται ότι, ενώ θα έπρεπε κανονικά η μπαταρία να μην φορτιστεί άλλο σε καμία περίπτωση, αυτή συνεχίζει να φορτίζει και φτάνει σε κάποια χρονική στιγμή στη τιμή 100% όπου και την διατηρεί μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

5.3.3 Διαγράμματα για αρχικό SOC = 79.8%

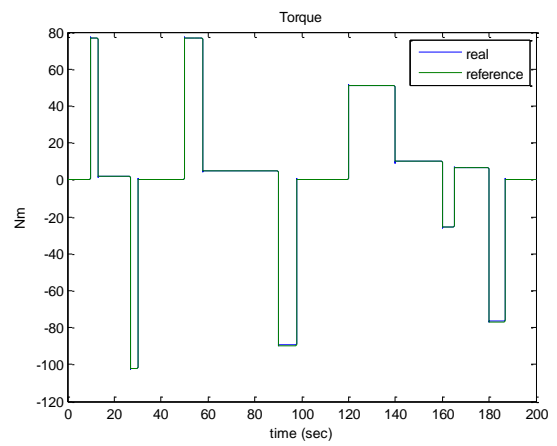
Σε αυτό το σημείο εκτελείται προσομοίωση 200 δευτερολέπτων για τον κύκλο οδήγησης ECE-40 και για αρχικό SOC μπαταρίας ίσο με 79.8%.



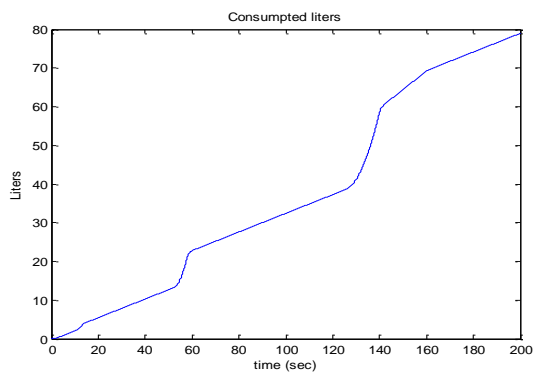
Σχήμα 6: Διάγραμμα θέσης πεντάλ (α), SOC μπαταρίας (β), στιγμιαίας κατανάλωσης (γ) και ταχύτητας οχήματος (δ).



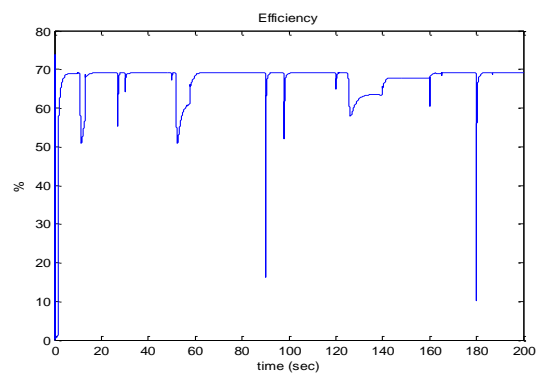
(α)



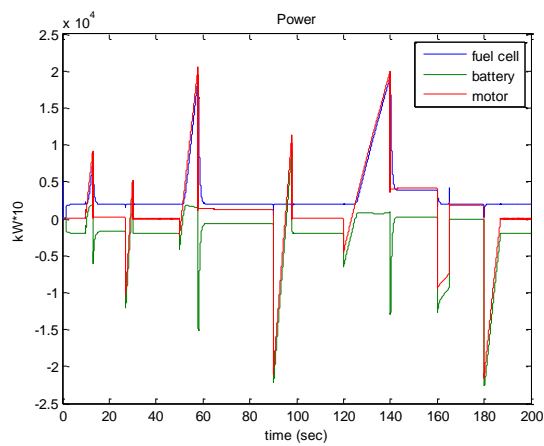
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 7: Διάγραμμα εναπομείναντος υδρογόνου (α), επιθυμητής-πραγματικής ροπής (β), καταναλωθέντων λίτρων υδρογόνου (γ), απόδοσης κυψέλης (δ) και ισχύος μπαταρίας-κυψέλης-μηχανής (ε).

Υπολογίστηκαν και οι παρακάτω τιμές ως προς την περαιτέρω ανάλυση και κατανόηση των διαγραμμάτων:

Χρήση της κυψέλης καυσίμου: 175.2275 kWh

Χρήση μπαταρίας: 11.4661 kWh

Φόρτιση μπαταρίας από κυψέλη καυσίμου: 75.6%

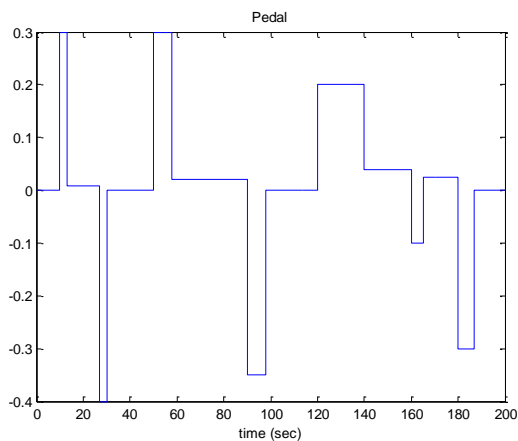
Φόρτιση μπαταρίας από φρενάρισμα: 24.4%

Διανυθέντα χιλιόμετρα: 1.0257

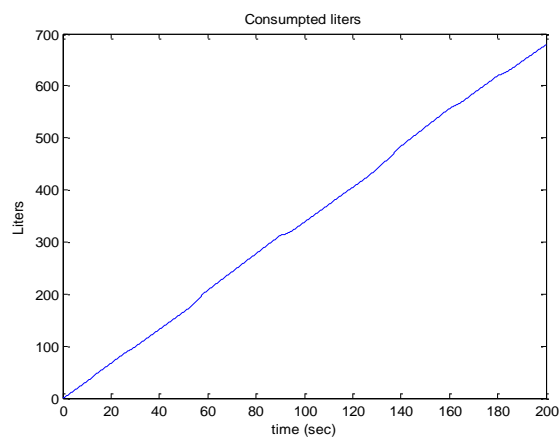
Στην παραπάνω προσομοίωση, ξεκινώντας την μπαταρία από αρχικό SOC ίσο με 79.8%, που είναι και οριακά χαμηλότερα από το ανώτερο προκαθορισμένο όριο, ελέγχεται η λειτουργία του συστήματος διαχείρισης ενέργειας ως προς την σωστή λειτουργία του. Διαπιστώνεται ότι και πάνω στην αλλαγή από ενδιάμεση συνθήκη λειτουργίας της μπαταρίας στην υψηλή συνθήκη λειτουργίας της, δεν πραγματοποιείται το σταμάτημα της φόρτισης της μπαταρίας. Στο διάγραμμα του SOC της μπαταρίας φαίνεται ότι η τιμή συνεχίζει να μεγαλώνει και αφού περάσει την ανώτερη προκαθορισμένη τιμή που έχει τεθεί, που είναι 80%.

5.3.4 Διαγράμματα για αρχικό SOC = 34%

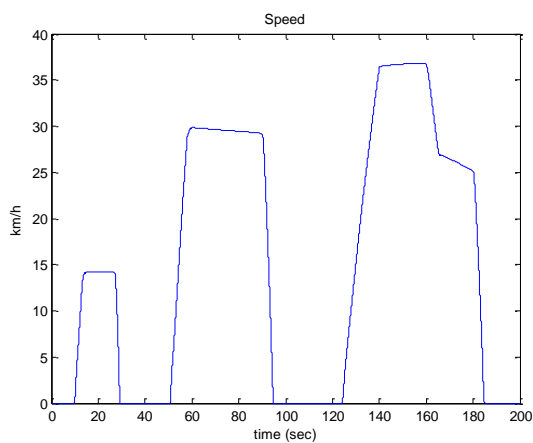
Σε αυτό το σημείο εκτελείται προσομοίωση 200 δευτερολέπτων για τον κύκλο οδήγησης ECE-40 και για αρχικό SOC μπαταρίας ίσο με 34%



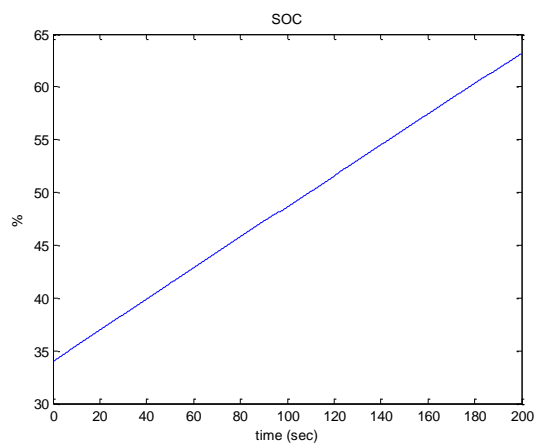
(α)



(β)

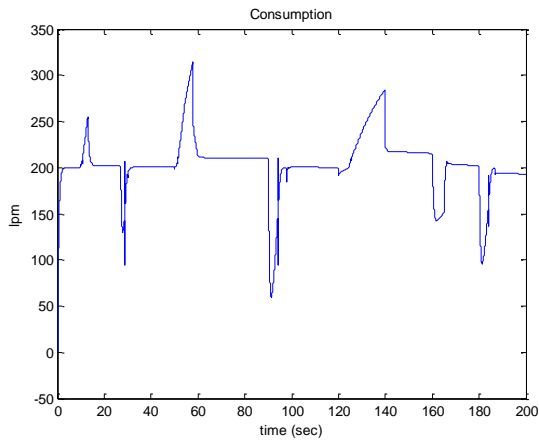


(γ)

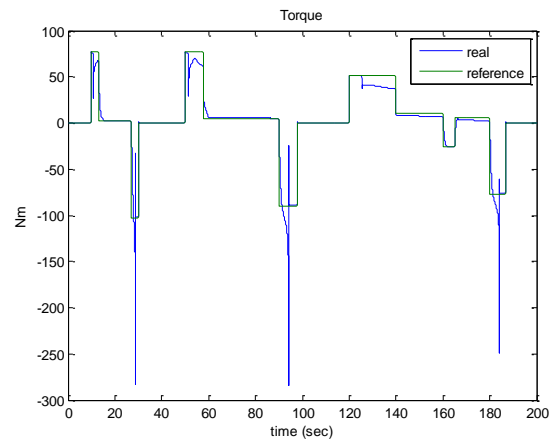


(δ)

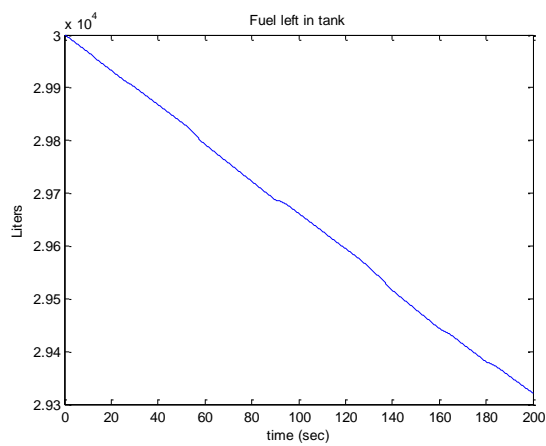
Σχήμα 8: Διάγραμμα θέσης πεντάλ (α), καταναλωθέντων λίτρων υδρογόνου (β), ταχύτητας οχήματος (γ) και SOC της μπαταρίας.



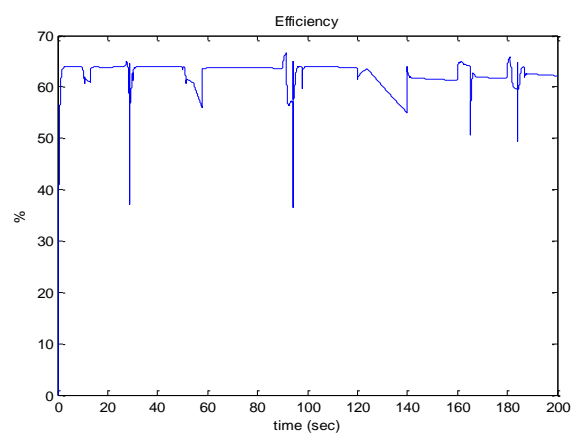
(α)



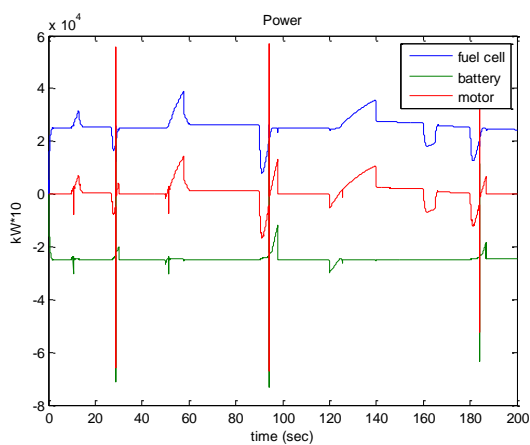
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 9: Διάγραμμα στιγμιαίας κατανάλωσης (α), επιθυμητής-πραγματικής ροπής (β), εναπομείναντων λίτρων υδρογόνου στην δεξαμενή (γ), απόδοσης κυψέλης (δ) και ισχύος μπαταρίας-κυψέλης-μηχανής.

Υπολογίστηκαν και οι παρακάτω τιμές ως προς την περαιτέρω ανάλυση και κατανόηση των διαγραμμάτων:

Χρήση της κυψέλης καυσίμου: 1419.3 kWh

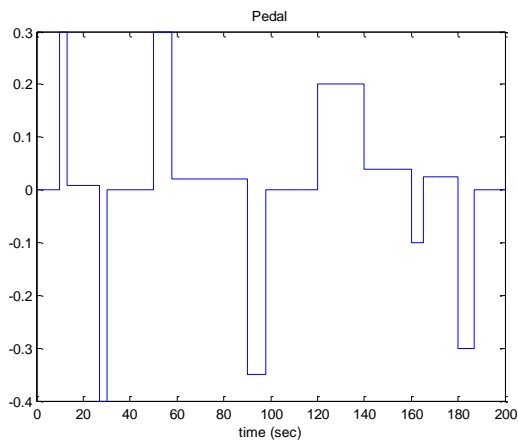
Χρήση μπαταρίας: 0.0404 kWh

Διανυθέντα χιλιόμετρα: 0.8424

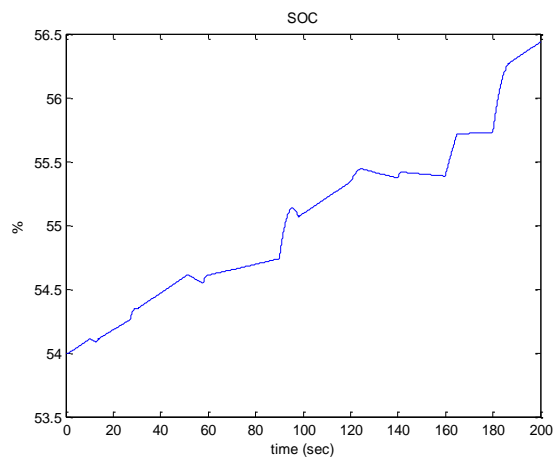
Στην παραπάνω προσομοίωση παρατηρείται μια μεγάλη απόκλιση στο διάγραμμα ροπής μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής ροπής. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα ταχύτητας σε εστίαση όπου και παρατηρείται μία ασυνήθιστη καμπύλη στην επιτάγχνυση του οχήματος στο ξεκίνημα της προσομοίωσης.

5.3.5 Διαγράμματα για αρχικό SOC = 54%

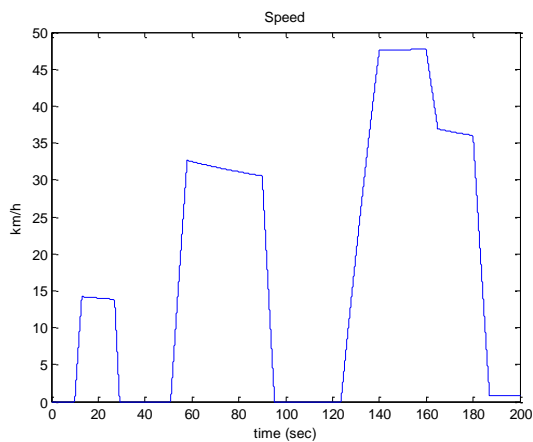
Σε αυτό το σημείο εκτελείται προσομοίωση 200 δευτερολέπτων για τον κύκλο οδήγησης ECE-40 και για αρχικό SOC μπαταρίας ίσο με 54%



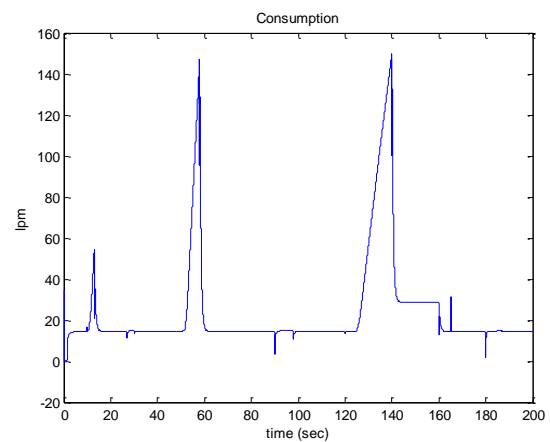
(α)



(β)

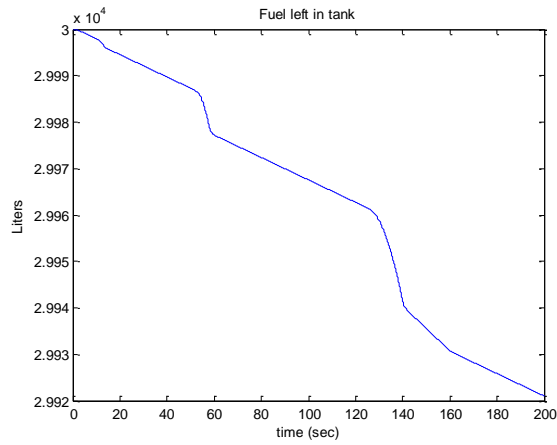


(γ)

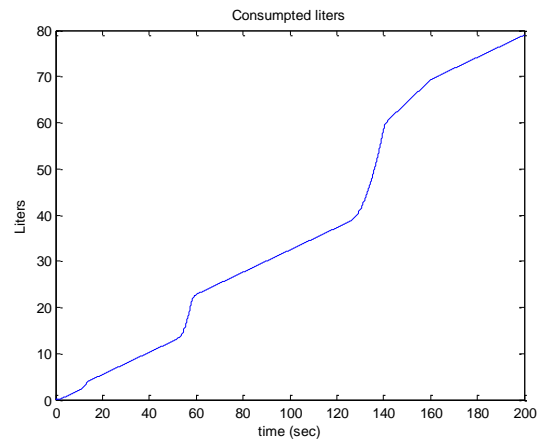


(δ)

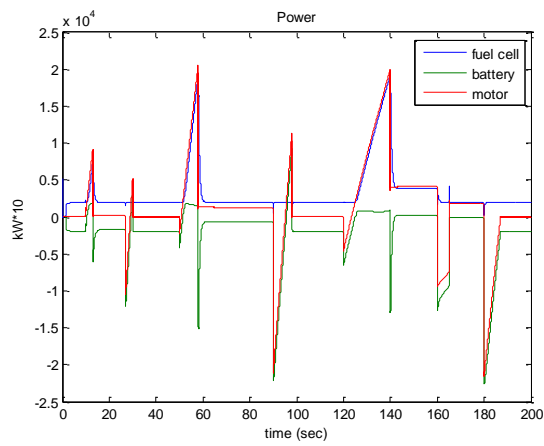
Σχήμα 10: Διάγραμμα θέσης πεντάλ (α), SOC μπαταρίας (β), ταχύτητας οχήματος (γ) και στιγμιαίας κατανάλωσης (δ).



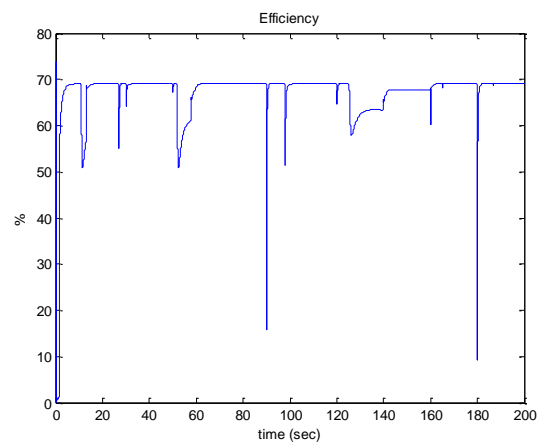
(α)



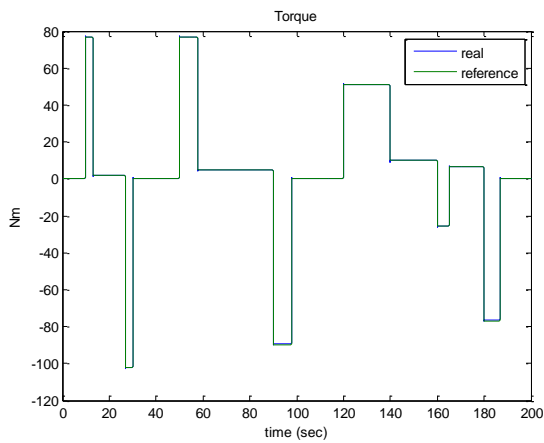
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 11: Διάγραμμα εναπομείναντων λίτρων υδρογόνου στην δεξαμενή (α), καταναλωθέντων λίτρων υδρογόνου (β), ισχύος μπαταρίας-κυψέλης-μηχανής (γ), απόδοσης κυψέλης (δ) και επιθυμητής-πραγματικής ροπής.

Υπολογίστηκαν και οι παρακάτω τιμές ως προς την περαιτέρω ανάλυση και κατανόηση των διαγραμμάτων:

Χρήση της κυψέλης καυσίμου: 175.2404 kWh

Χρήση μπαταρίας: 11.4871 kWh

Φόρτιση μπαταρίας από κυψέλη καυσίμου: 75.6%

Φόρτιση μπαταρίας από φρενάρισμα: 24.4%

Διανυθέντα χιλιόμετρα: 1.0257

Από την παραπάνω προσομοίωση παρατηρείται ότι θέτοντας στην μπαταρία αρχικό SOC ίσο με 54%, δηλαδή στο ενδιάμεσο διάστημα λειτουργίας της μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου ορίου της, η απόκριση του συστήματος είναι πολύ καλή. Στο διάγραμμα του SOC της μπαταρίας φαίνεται ότι η μπαταρία συνεχίζει να φορτίζει κανονικά, όπως και πρέπει. Στο διάγραμμα επιθυμητής-πραγματικής ροπής το σφάλμα που παρατηρείται είναι πολύ μικρό της τάξης του 0.05Nm κατά μέσο όρο.

5.3.6 Συμπεράσματα

Από την παραπάνω ανάλυση ευαισθησίας, που έχει να κάνει με δοκιμές αρχικού SOC της μπαταρίας, φαίνεται ότι το αρχικό σύστημα έχει κάποια μειονεκτήματα ως προς την απόκρισή του.

Αρχικά, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις στο διάγραμμα επιθυμητής-πραγματικής ροπής το σφάλμα ροπής είναι μικρό σε λογικά πλαίσια, στην περίπτωση όπου το αρχικό SOC είναι ίσο με 34, δηλαδή κάτω από το κατώτατο όριο που έχει τεθεί, το σφάλμα ροπής γίνεται πολύ μεγάλο. Επίσης, στην ίδια περίπτωση, στο διάγραμμα της ταχύτητας, παρατηρείται μία αισθητή πτώση της τιμής της στην αρχική εκκίνηση, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα διαγράμματα ταχύτητας.

Επίσης, στην περίπτωση του αρχικού SOC ίσου με 79.8, παρατηρείται ότι, στο διάγραμμα του SOC, η τιμή του συνεχίζει να αυξάνεται και αφού περάσει το ανώτατο όριο φόρτισης της μπαταρίας, που είναι το 80, και συνεχίζει να φορτίζει. Και με ακόμα χειρότερες συνέπειες, στη περίπτωση που το αρχικό SOC είναι ίσο με 99, παρατηρείται ότι, στο διάγραμμα του SOC, η τιμή φτάνει το 100%. Προκύπτει, δηλαδή, το φαινόμενο της υπερφόρτισης που μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα για την ζωή της μπαταρίας.

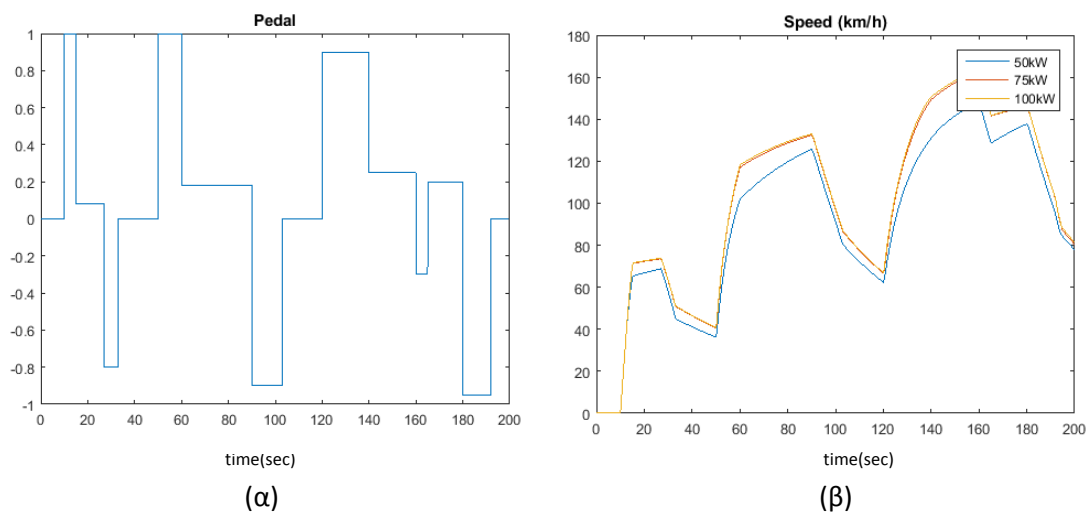
5.4 Ανάλυση ευαισθησίας με μεταβολή των ισχύων μπαταρίας και κυψέλης καυσίμου

Στη συνέχεια, το μοντέλο δοκιμάζεται για διαφορετική μέγιστη και έπειτα ελάχιστη ισχύ της κυψέλης καυσίμου. Για τη μέγιστη ισχύ χρησιμοποιούνται οι τιμές των 50, 75 και 100kW ενώ για την ελάχιστη (ρελαντί) οι τιμές των 2, 5 και 8kW.

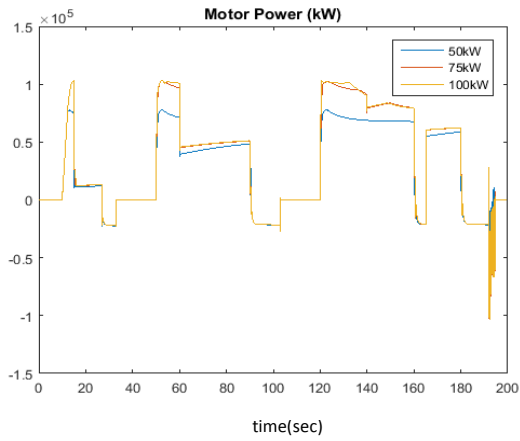
Χρησιμοποιείται ένας πιο απαιτητικός κύκλος οδήγησης έτσι ώστε το μοντέλο να αξιοποιηθεί αποτελεσματικότερα.

5.4.1 Διαγράμματα για μεταβολή του ανώτερου ορίου ισχύος της κυψέλης

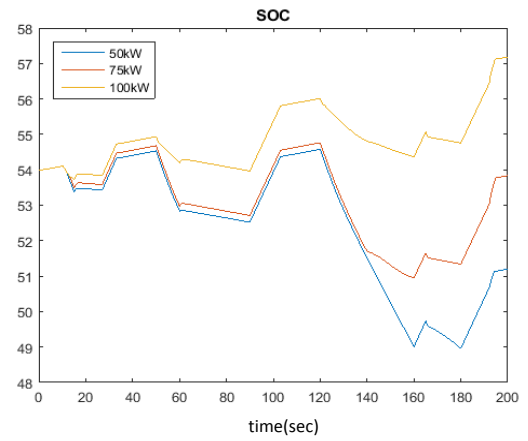
Σε αυτό το σημείο, προσομοιώθηκε το μοντέλο χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά ανώτερα όρια ισχύος της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιώντας τον διαθνή κύκλο οδήγησης ECE-40. Τα αποτελέσματα για τις τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις παρουσιάζονται στα ίδια διαγράμματα για να παρατηρηθούν οι διαφορές τους.



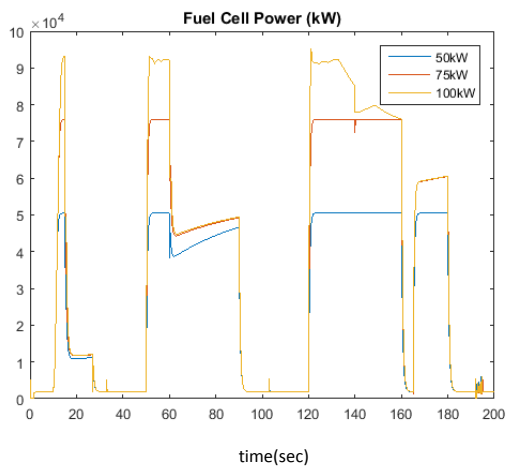
Σχήμα 12: Διάγραμμα θέσης πεντάλ (α) και ταχύτητας οχήματος (β).



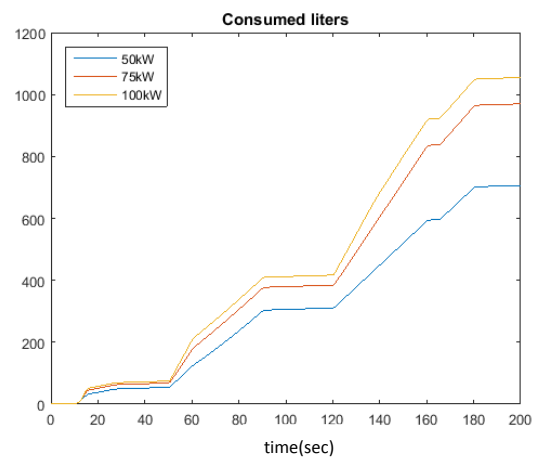
(α)



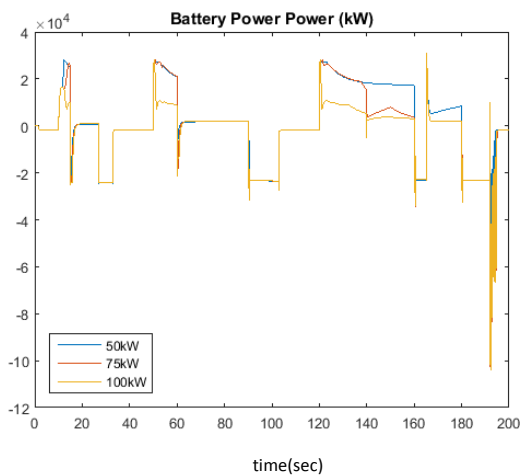
(β)



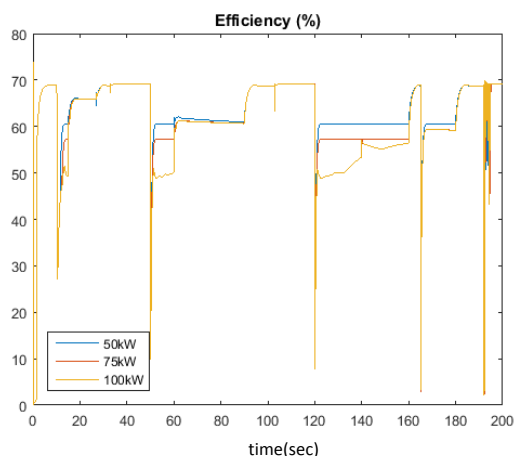
(γ)



(δ)

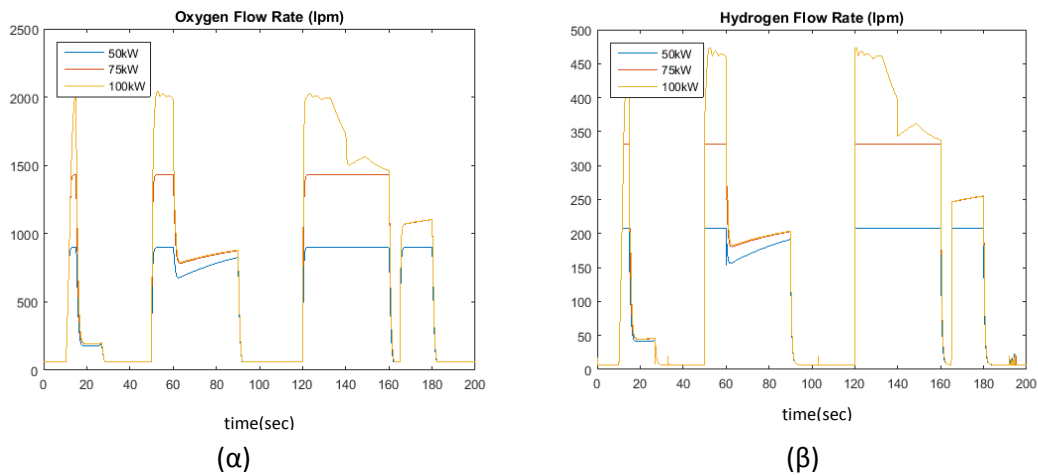


(ε)



(σ)

Σχήμα 13: Διάγραμμα ισχύος μηχανής (α), SOC μπαταρίας (β), ισχύος κυψέλης (γ), καταναλωθέντων λίτρων υδρογόνου (δ), ισχύος μπαταρίας (ε) και απόδοσης κυψέλης (σ).



Σχήμα 14: Διάγραμμα ροής οξυγόνου (α) και ροής υδρογόνου (β).

Επίσης, συμπληρωματικά υπολογίστηκαν οι παρακάτω τιμές. Αυτές αφορούν την μέση απόδοση της κυψέλης, το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας από το φρενάρισμα και την κυψέλη, το DOD (Depth Of Discharge) της μπαταρίας, την διανυθείσα απόσταση και την μέση ταχύτητα και για τις τρεις περιπτώσεις.

Average Efficiency (%)

50kw: 63.3

75kw: 62.2

100kw: 61

Battery charge from breaking and fuel cell (%)

50kw: 67.73 32.27

75kw: 63.08 36.92

100kw: 60.41 39.59

Depth of Discharge (%)

50kw: 9.16

75kw: 6.85

100kw: 3.47

Distance Meter (km)

50kw: 5.13

75kw: 5.61

100kw: 5.64

Average Speed (km/h)

50kw: 92.4

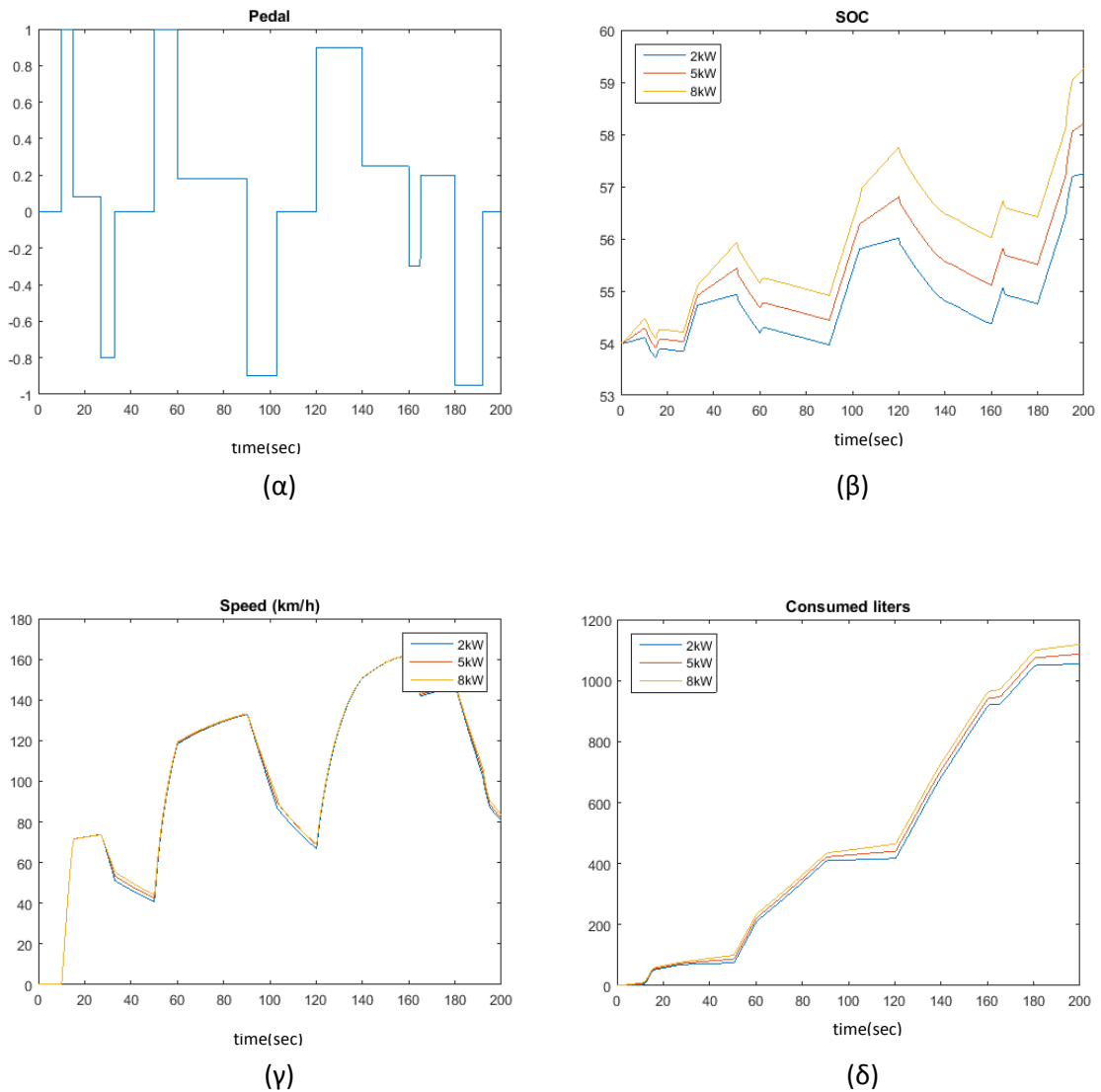
75kw: 101

100kw: 101.5

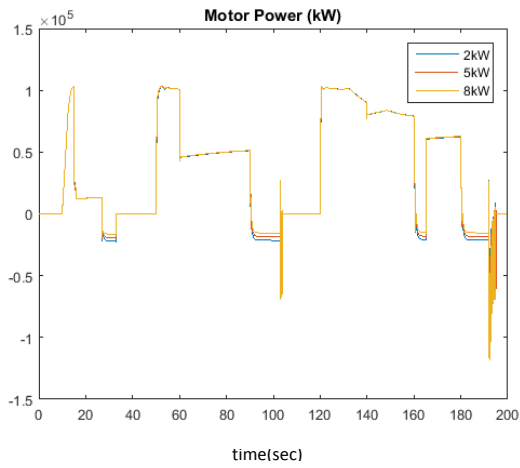
Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση έγιναν σημαντικές παρατηρήσεις σε αρκετά διαγράμματα του μοντέλου. Αρχικά, όπως είναι προφανές, στο διάγραμμα του SOC της μπαταρίας, επειδή όσο χαμηλότερη είναι η ανώτερη ισχύς της κυψέλης τόσο περισσότερη ισχύς απαιτείται από την μπαταρία, παρατηρείται ότι στις προσομοιώσεις των 50kW και 75kW, η τιμή του SOC είναι αισθητά χαμηλότερα από αυτήν της προσομοίωσης των 100kW. Αντίστοιχα, η τιμή του DOD της μπαταρίας, δηλαδή του μεγέθους της εκφόρτισής της, είναι υψηλότερη για χαμηλότερη ισχύ της κυψέλης. Επίσης, η μέση απόδοση της κυψέλης είναι ελαφρώς καλύτερη όταν η ισχύς της κυψέλης έχει την χαμηλότερη τιμή. Ωστόσο, και οι τρεις τιμές της απόδοσης είναι εξίσου ικανοποιητικές (63.3, 62.2, 61). Στην προσομοίωση των 50kW ως κατώτερη ισχύ, παρατηρείται σημαντική πτώση των τιμών της μέσης ταχύτητας και των διανυθέντων χιλιομέτρων. Επίσης, όπως είναι λογικό, όταν λειτουργούμε την κυψέλη σε χαμηλότερη τιμή ισχύος, η κατανάλωση καυσίμου της είναι μικρότερη, κάτι το οποίο φαίνεται ξεκάθαρα στο διάγραμμα κατανάλωσης υδρογόνου.

5.4.2 Διαγράμματα για μεταβολή του κατώτερου ορίου ισχύος της κυψέλης

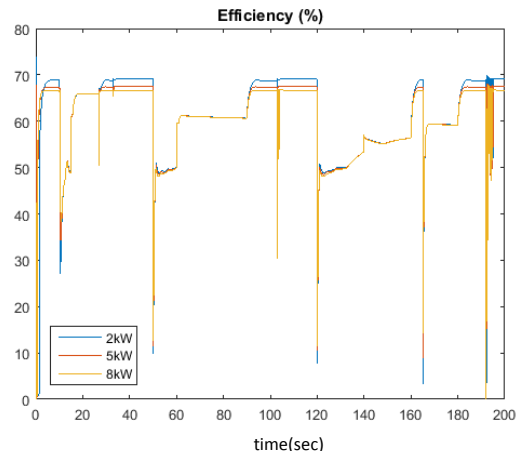
Σε αυτό το σημείο, προσομοιώθηκε το μοντέλο χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά κατώτερα όρια ισχύος της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιώντας τον διαθνή κύκλο οδήγησης ECE-40. Τα αποτελέσματα για τις τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις παρουσιάζονται στα ίδια διαγράμματα για να παρατηρηθούν οι διαφορές τους.



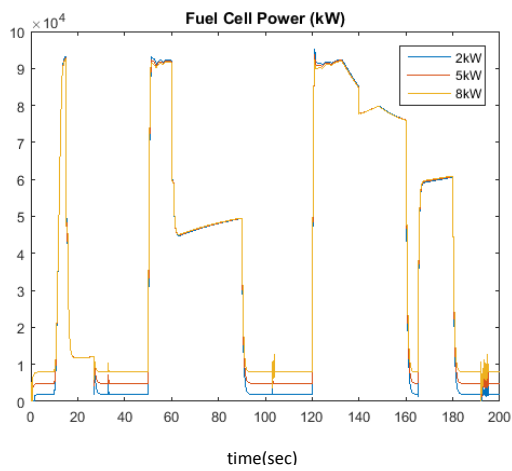
Σχήμα 15: Διάγραμμα θέσης πεντάλ (α), SOC μπαταρίας (β), ταχύτητας οχήματος (γ) και καταναλωθέντων λίτρων υδρογόνου (δ).



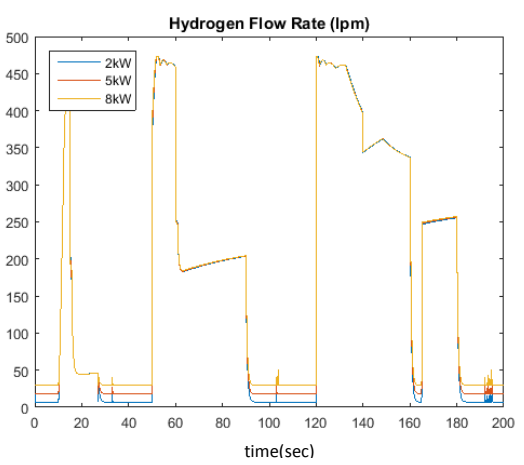
(α)



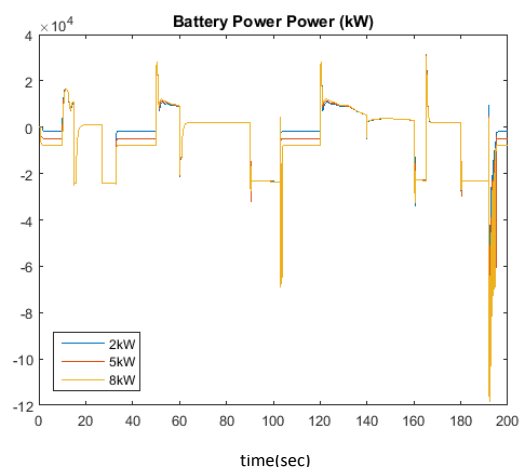
(β)



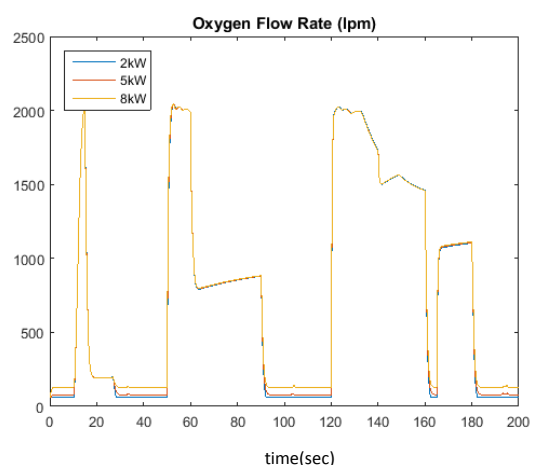
(γ)



(δ)



(ε)



(σ)

Σχήμα 16: Διάγραμμα ισχύος μηχανής (α), απόδοσης κυψέλης (β), ισχύος κυψέλης (γ), ρυθμού ροής υδρογόνου (δ), ισχύος μπαταρίας (ε), ρυθμού ροής οξυγόνου (στ).

Επίσης, συμπληρωματικά υπολογίστηκαν οι παρακάτω τιμές. Αυτές αφορούν την μέση απόδοση της κυψέλης, το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας από το φρενάρισμα και την κυψέλη, το DOD (Depth Of Discharge) της μπαταρίας, την διανυθείσα απόσταση και την μέση ταχύτητα και για τις τρεις περιπτώσεις.

Average Efficiency (%)

2kW: 61

5kW: 60.6

8kW: 60.3

Battery charge from braking and fuel cell (%)

2kW: 60.83 39.17

5kW: 46.28 53.72

8kW: 35.98 64.02

Depth of Discharge (%)

2kW: 3.47

5kW: 3.52

8kW: 3.58

Distance Meter (km)

2kW: 5.64

5kW: 5.68

8kW: 5.72

Average Speed (km/h)

2kW: 101.5

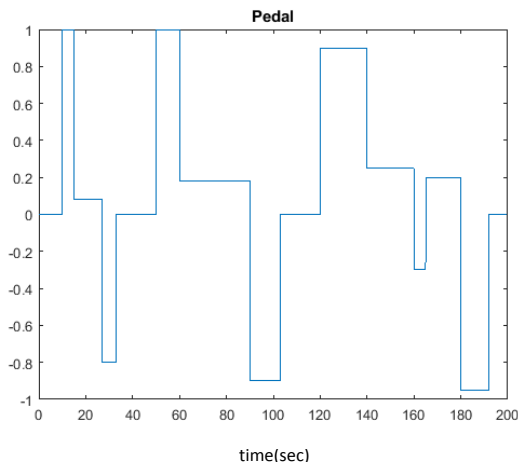
5kW: 102.3

8kW: 102.9

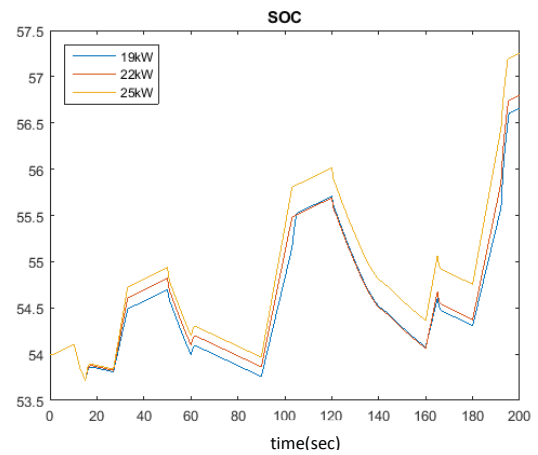
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα των προσομοιώσεων, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταβάλλοντας το κατώτατο όριο ισχύος της κυψέλης. Η κυριότερη διαφορά φαίνεται στο διάγραμμα του SOC της μπαταρίας όπου και προκύπτει ότι η μπαταρία φορτίζει περισσότερο όταν έχει τεθεί μεγαλύτερο όριο κατώτερης ισχύος στην κυψέλη. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την διάρκεια που το όχημα εκτελεί στάση (ρελαντί), η κυψέλη δουλεύει σε μεγαλύτερη ισχύ και επομένως τροφοδοτεί την μπαταρία με περισσότερη ενέργεια. Αυτό φαίνεται και στο ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας από το φρενάρισμα και την κυψέλη όπου και παρατηρείται μία μεγάλη άυξηση από 39.17% σε 64.02% του ποσοστού φόρτισης της μπαταρίας από την κυψέλη.

5.4.3 Διαγράμματα για μεταβολή του άνωτερου ορίου ισχύος της μπαταρίας

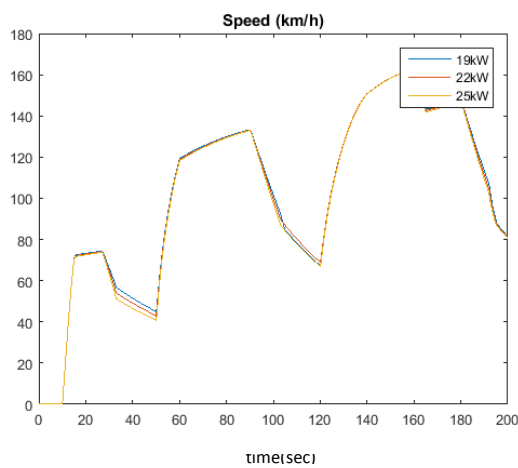
Σε αυτό το σημείο, προσομοιώθηκε το μοντέλο χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά ανώτερα όρια ισχύος της μπαταρίας χρησιμοποιώντας τον διαθνή κύκλο οδήγησης ECE-40. Τα αποτελέσματα για τις τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις παρουσιάζονται στα ίδια διαγράμματα για να παρατηρηθούν οι διαφορές τους.



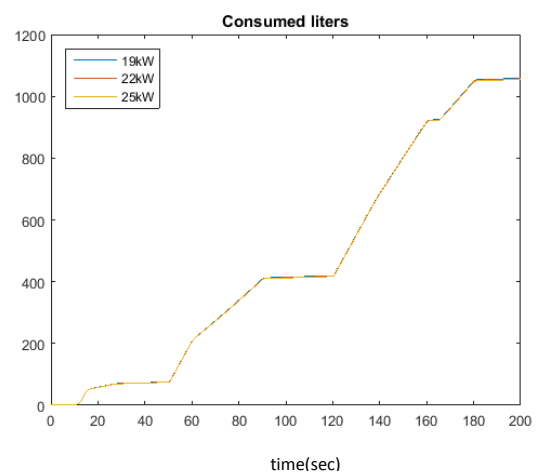
(α)



(β)

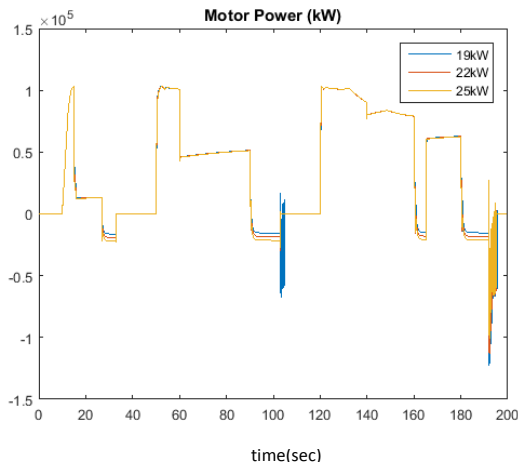


(γ)

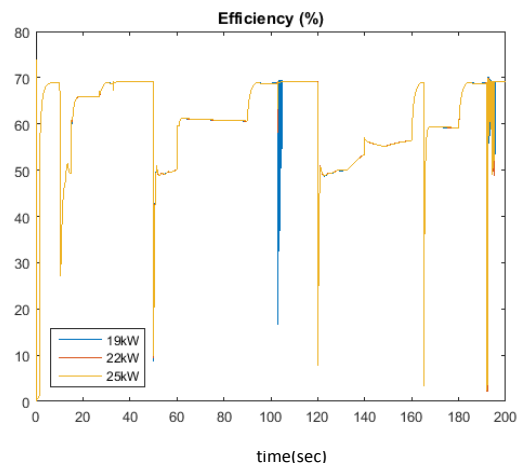


(δ)

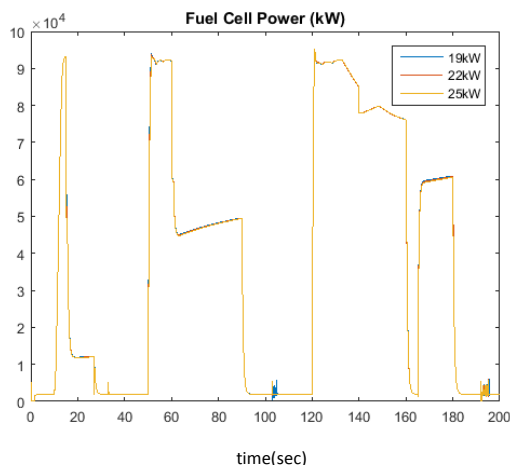
Σχήμα 17: Διάγραμμα θέσης πεντάλ (α), SOC μπαταρίας (β), ταχύτητας οχήματος (γ) και καταναλωθέντων λίτρων υδρογόνου (δ).



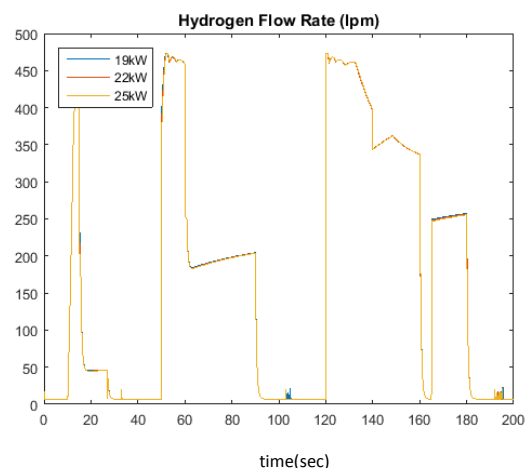
(α)



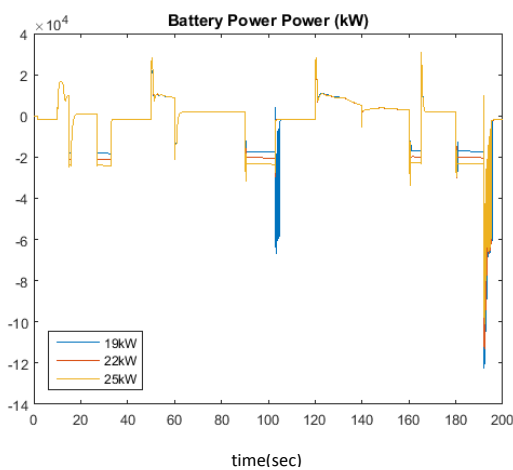
(β)



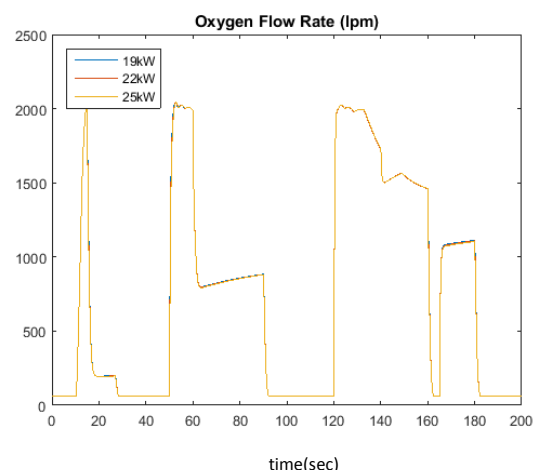
(γ)



(δ)



(ε)



(σ)

Σχήμα 17: Διάγραμμα ισχύος μηχανής (α), απόδοσης κυψέλης (β), ισχύος κυψέλης (γ), ρυθμού ροής υδρογόνου (δ), ισχύος μπαταρίας (ε) και ρυθμού ροής οξυγόνου.

Επίσης, συμπληρωματικά υπολογίστηκαν οι παρακάτω τιμές. Αυτές αφορούν την μέση απόδοση της κυψέλης, το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας από το φρενάρισμα και την κυψέλη, το DOD (Depth Of Discharge) της μπαταρίας, την διανυθείσα απόσταση και την μέση ταχύτητα και για τις τρεις περιπτώσεις.

Average Efficiency (%)

19kw: 60.9

22kw: 61

25kw: 61

Battery charge from braking and fuel cell (%)

19kw: 55.96 44.04

22kw: 57.33 42.67

25kw: 60.83 39.17

Depth of Discharge (%)

19kw: 3.41

22kw: 3.43

25kw: 3.47

Distance Meter (km)

19kw: 5.71

22kw: 5.69

25kw: 5.64

Average Speed (km/h)

19kw: 102.8

22kw: 102.4

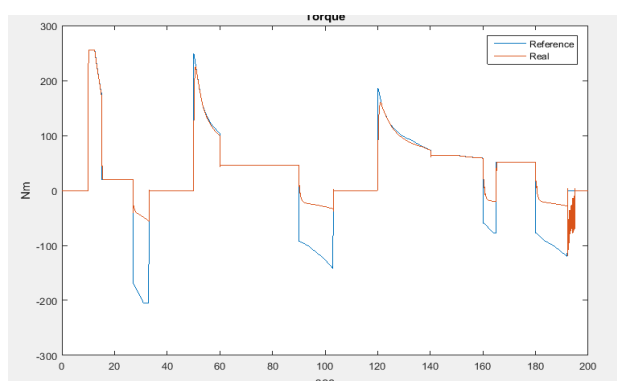
25kw: 101.5

Από την παραπάνω ανάλυση, που περιλαμβάνει την μεταβολή του ανώτερου ορίου της μπαταρίας, δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στα διαγράμματα και στην γενική απόκριση του μοντέλου.

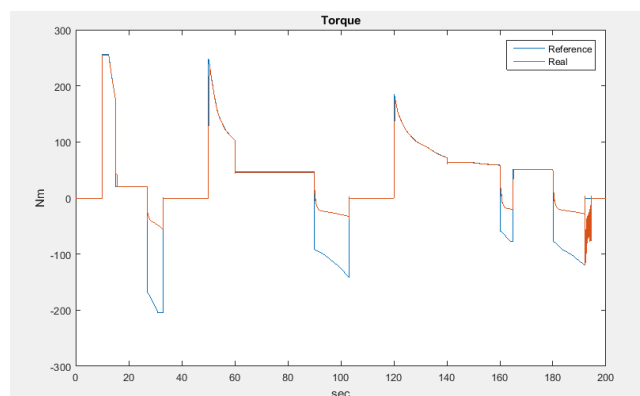
5.4.4 Συμπεράσματα

Από την παραπάνω ανάλυση ευαισθησίας οσων αφορά την μέγιστη και ελάχιστη ισχύ της κυψέλης και την μέγιστη ισχύ της μπαταρίας, η μόνη διαφορά ως προς τη βελτίωση του συστήματος παρατηρήθηκε στην μεταβολή της μέγιστης ισχύος της κυψέλης. Θέτοντας στην κυψέλη το ανώτατο όριο των 75kW σε σύγκριση με αυτό των 100kW, παρατηρήθηκε μείωση της κατανάλωσης υδρογόνου κατά 8% με τις ίδες τιμές της μέσης απόδοσης και της μέσης ταχύτητας και διατηρώντας σχεδόν ίδιο το σφάλμα ροπής. Φυσικά, η μπαταρία αναλαμβάνει να καλύψει αυτή τη διαφορά σε ισχύ και το καταφέρνει επαρκώς με αύξηση της ισχύος της. Επιπλέον, η μπαταρία φορτίζει σε πολλές περιπτώσεις λόγω αναγεννητικής πέδησης και στάσης του οχήματος και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αυτόν τον τρόπο, σε πιο έντονο βαθμό.

Βέβαια, σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι για να αντληθεί περισσότερη ενέργεια από την μπαταρία, εκφορτίζεται, αυξάνοντας το DOD (Depth of Discharge) της και τους κύκλους φόρτισης της, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ζωή της. Ωστόσο, είναι προτιμότερο, οικονομικά, αφού παρατηρείται μεγάλη μείωση καυσίμου.



Επιθυμητή-πραγματική ροπή (75kW)



Επιθυμητή-πραγματική ροπή (100kW)

Στην περίπτωση της ανώτατης ισχύος της κυψέλης των 50kW, υπάρχει μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου αλλά με μεγάλη απόκλιση ως προς τις απαιτήσεις του οδηγού. Παρατηρείται μεγάλο σφάλμα ροπής καθώς μειώνεται και αισθητά η μέση ταχύτητα του οχήματος και η απόσταση που έχει διανύσει.

Στην περίπτωση της αύξησης της κατώτατης ισχύος της κυψέλης, το σύστημα δεν έχει κάποια πρακτικά χρήσιμη διαφορά. Παρατηρείται μεγαλύτερη κατανάλωση, που έχει και σαν αποτέλεσμα την ελάχιστα καλύτερη απόκριση στις απότομες επιταγές, με το σφάλμα ροπής να έχει αμελητέες διαφορές.

Το ίδιο ισχύει και για την αύξηση του ανώτατου επιπέδου ισχύος της μπαταρίας, όπου οι μεταβολές στην απόκριση δεν είναι σημαντικές.

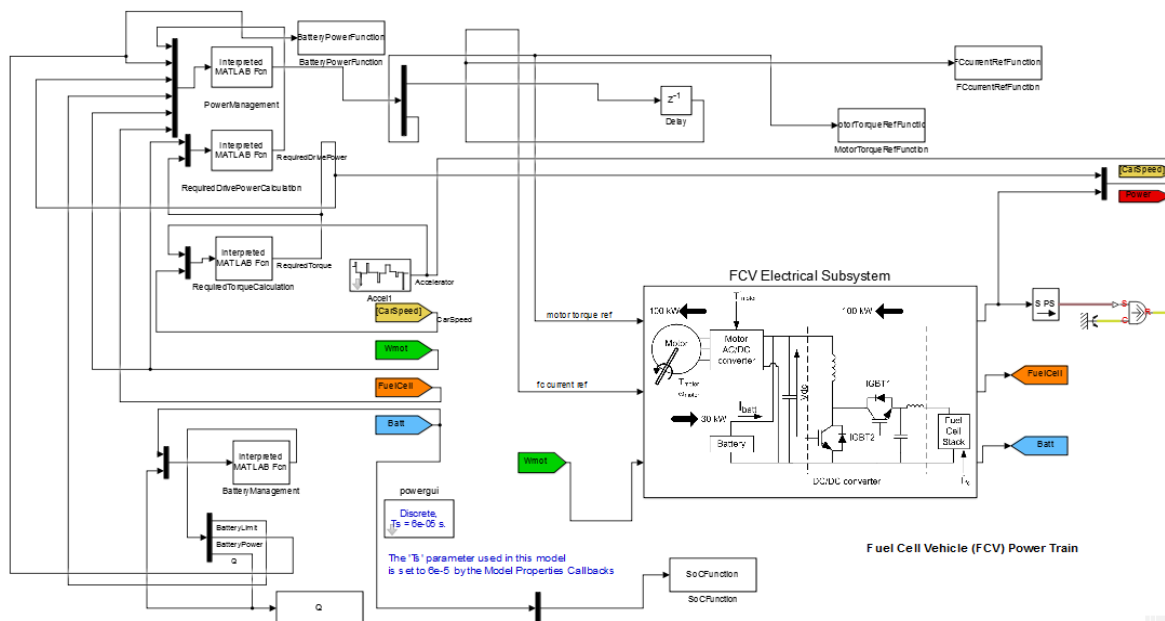
6 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 Περιγραφή κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάστηκαν και εφαρμόστηκαν τρεις στρατηγικές ελέγχου διαχείρισης ενέργειας ως προς την βελτίωση της συμπεριφοράς του μοντέλου. Αρχικά, αντικαταστάθηκε όλο το υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας με ένα καινούριο. Έπειτα, αναλύθηκε ένας απλός τρόπος ελέγχου της απόκρισης της μπαταρίας με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Και, τέλος, αναπτύχθηκε στρατηγική βελτίστου ελέγχου και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματά της.

6.2 Αλλαγή του μπλοκ διαχείρισης ενέργειας

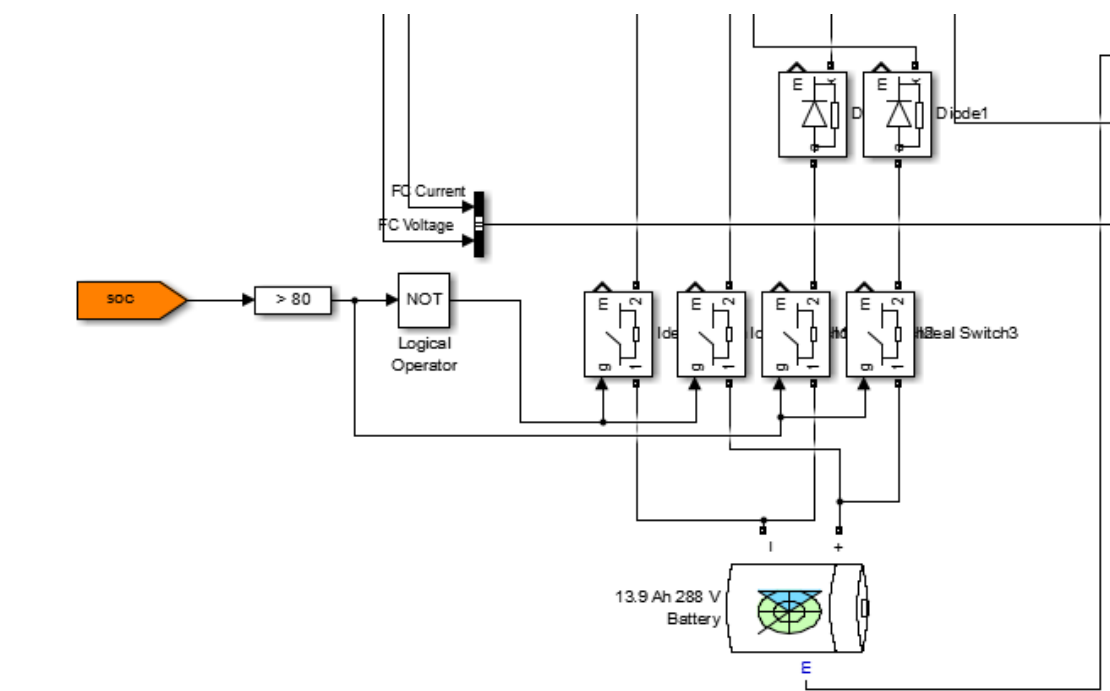
Εδώ αντικαταστάθηκε όλο το υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας του αρχικού μοντέλου με μερικά Function μπλοκ, στα οποία μπορεί να γραφεί κώδικας. Αυτή η αντικατάσταση έγινε για βαθύτερη κατανόηση των απαραίτητων δεδομένων που ασχολούνται με το κομμάτι της διαχείρισης των χειραγωγούμενων μεταβλητών. Επίσης, με την μετατροπή αυτή επιτεύχθηκε η ευκολότερη πρόσβαση και επεξεργασία των παραμέτρων ως προς την διαχείριση ενέργειας μέσω, πλέον, του workspace του Matlab. Παρακάτω φαίνεται η αλλαγή που πραγματοποιήθηκε στο αρχικό μοντέλο, που έχει αφαιρεθεί εξ'ολοκλήρου το αρχικό υποσύστημα και έχει αντικατασταθεί από 5 μπλοκ τύπου function block.



Σχήμα 1: Μοντέλο με χρήση κώδικα στο υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας.

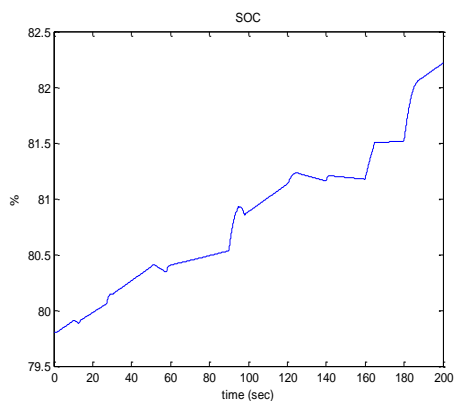
6.3 Μέθοδος απλού ελέγχου με ηλεκτρονικά ισχύος

Επίσης, εξετάστηκε η βελτίωση στο κομμάτι του ενεργειακού ελέγχου που αφορά στην υπερφόρτωση της μπαταρίας που μπορεί να επιφέρει σε μείωση του χρόνου ζωής της ή ακόμα και σε καταστροφή της. Αυτό δοκιμάστηκε αρχικά με μια απλή μέθοδο ελέγχου που αποτελείται από ένα σύνολο διόδων και διακοπών ισχύος στο ηλεκτρικό κύκλωμα που αφορά στη μπαταρία. Με ένα απλό βοηθητικό κύκλωμα, γίνεται ένας έλεγχος του SOC της μπαταρίας, και όταν αυτό είναι πάνω από μια προκαθορισμένη τιμή, που στην περίπτωση μας είναι το 80, με χρήση διακοπών (switches), η ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ μπαταρίας, κυψέλης καυσίμου και μηχανής γίνεται έτσι ώστε να μην επιστρέφει ενέργεια στην μπαταρία κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης ή της στάσης του οχήματος (ρελαντί).

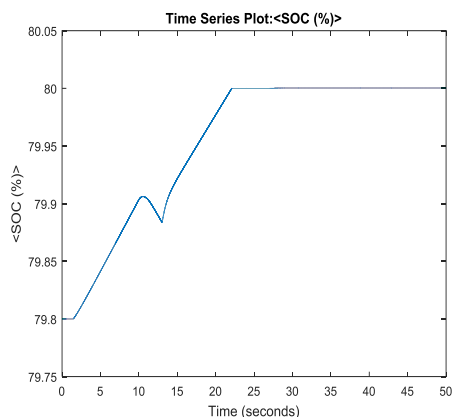


Σχήμα 2: Βοηθητικό κύκλωμα για την προστασία της μπαταρίας.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται ότι πλέον, με αυτόν τον τρόπο, η τιμή του SOC της μπαταρίας δεν ξεπερνάει το ανώτατο όριο που θέσαμε σε αντίθεση με το αρχικό μοντέλο που η μπαταρία συνέχιζε να φορτίζει. Με χρήση του ίδιου κύκλου οδήγησης και για αρχικό SOC ίσο με 79.8, στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η προσωμοίωση χωρίς τον έλεγχο και στη δεύτερο παρουσιάζεται αυτή με τη χρήση ελέγχου.



(α)



(β)

Σχήμα 3: Διάγραμμα SOC με αρχικό έλεγχο (α) και με τον προτεινόμενο παραπάνω έλεγχο (β).

Αυτός είναι ένας απλός τρόπος, σε πρώτο στάδιο, να ελεγχθεί η περίσσεια ενέργειας που αναπτύσσεται αναγκαστικά στο σύστημα και που δεν μπορεί να μεταφερθεί κάπου όταν η μπαταρία έχει ξεπεράσει το ανώτατο όριό της. Επιτυγχάνεται, έτσι και η ένας τρόπος προστασίας της μπαταρίας σε περίπτωση κάποιου σφάλματος του ηλεκτρικού κυκλώματος. Εναλλακτικά, η ενέργεια αυτή θα μπορούσε να τροφοδοτεί άμεσα κάποιες ηλεκτρικές μικροσυσκευές του χρήστη μέσα στο όχημα.

6.4 Βελτιστοποίηση

6.4.1 Θεωρητική εισαγωγή

Στη συνέχεια, γίνεται πλήρης αντικατάσταση του αρχικού κομματιού διαχείρισης ενέργειας με ένα καινούριο που χρησιμοποιεί ως μέθοδο ελέγχου τον προβλεπτικό έλεγχο (Model Predictive Control). Ο προβλεπτικός έλεγχος (MPC) είναι μια προηγμένη μέθοδος ελέγχου της διαδικασίας που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες μεταποίησης σε χημικά εργοστάσια και διυλιστήρια πετρελαίου από τη δεκαετία του 1980. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται και σε μοντέλα εξισορρόπησης ισχύος . Τα μοντέλα προβλεπτικών ελεγκτών βασίζονται σε δυναμικά μοντέλα της διαδικασίας, τα οποία συνήθως είναι γραμμικά εμπειρικά μοντέλα που εξάγονται με την αναγνώριση του συστήματος . Το κύριο πλεονέκτημα των ελεγκτων MPC είναι το γεγονός ότι επιτρέπουν την βελτιστοποίηση του τρέχοντος χρονικού περιθωρίου, λαμβάνοντας υπ'όψη παράλληλα τα μελλοντικά χρονικά περιθώρια. Αυτό επιτυγχάνεται βελτιστοποιώντας ένα πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα, αλλά μόνο εφαρμόζοντας το τρέχον χρονοδιάγραμμα και στη συνέχεια βελτιστοποιώντας ξανά, επανειλημμένα. Επίσης, ένας ελεγκτής MPC έχει τη δυνατότητα να προβλέψει μελλοντικά γεγονότα και να αναλάβει ανάλογες ενέργειες ελέγχου.

Αυτός ο τύπος ελεγκτή χρησιμοποιεί τις τρέχουσες μετρήσεις εγκατάστασης, την τρέχουσα δυναμική κατάσταση της διαδικασίας, τα μοντέλα προβλεπτικού ελέγχου και τους μεταβλητούς στόχους και όρια μεταβλητών για τον υπολογισμό των μελλοντικών αλλαγών στις εξαρτώμενες μεταβλητές. Αυτές οι αλλαγές υπολογίζονται ώστε να συγκρατούν τις εξαρτώμενες μεταβλητές κοντά στο στόχο, ενώ τηρούν περιορισμούς τόσο στις ανεξάρτητες όσο και στις εξαρτώμενες μεταβλητές. Ο έλεγχος αυτός, τυπικά, στέλνει μόνο την πρώτη αλλαγή σε κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή που πρόκειται να εφαρμοστεί και επαναλαμβάνει τον υπολογισμό όταν απαιτείται η επόμενη αλλαγή.

Το Model Predictive Control είναι ένας αλγόριθμος ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών που χρησιμοποιεί:

- ένα εσωτερικό δυναμικό μοντέλο της διαδικασίας
- ένα ιστορικό παρελθόντων ελέγχων κινείται και
- μια συνάρτηση κόστους βελτιστοποίησης J στον ορίζοντα πρόβλεψης, για τον υπολογισμό των βέλτιστων κινήσεων ελέγχου.

Ένα παράδειγμα μιας μη γραμμικής συνάρτησης κόστους για βελτιστοποίηση δίνεται από:

$$J = \sum_{i=1}^N w_{x_i} (r_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^N w_{u_i} \Delta u_i^2$$

χωρίς να παραβιάζονται περιορισμοί (χαμηλά / υψηλά όρια) με:

- x_i : ελεγχόμενη μεταβλητή
- r_i : μεταβλητή αναφοράς
- u_i : μεταβλητή χειρισμού
- w_{x_i} : συντελεστής στάθμισης που αντικατοπτρίζει τη σχετική σημασία του x_i
- w_{u_i} : συντελεστής στάθμισης που τιμωρεί τις σχετικές μεγάλες αλλαγές στο u_i

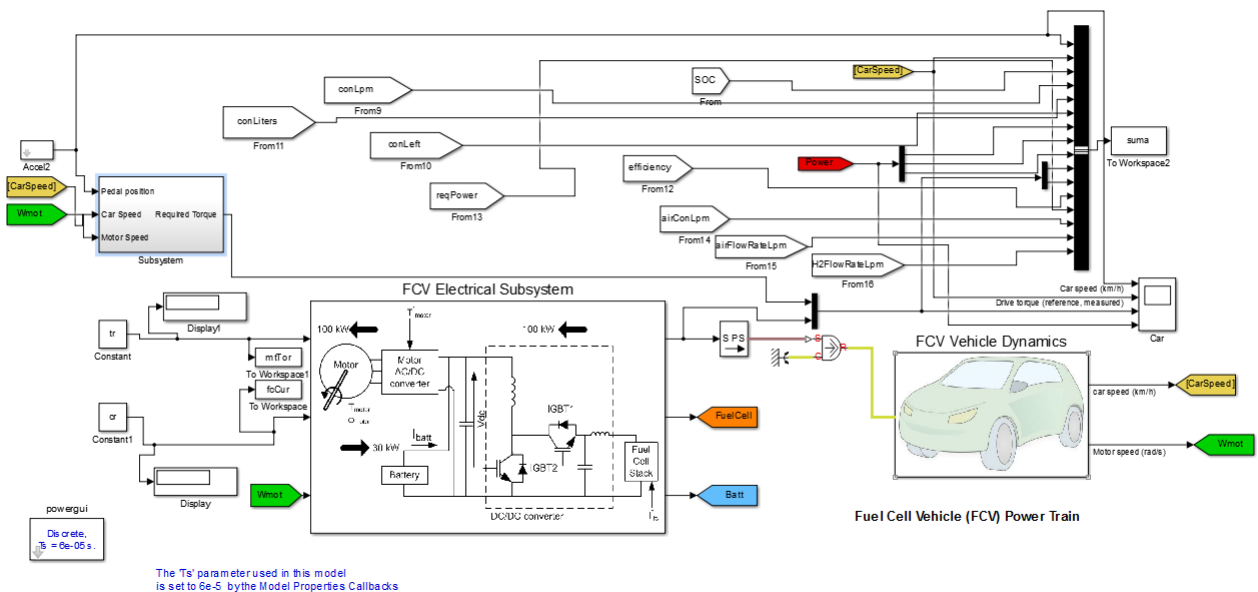
6.4.2 Περιγραφή Υλοποίησης

Διατηρήθηκε, αρχικά, το function μπλοκ από το παραπάνω προτεινόμενο μοντέλο που δημιουργήθηκε, για τον υπολογισμό της επιθυμητής ροπής. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε αυτή η ροπή έτσι ώστε να δημιουργηθεί η αντικειμενική συνάρτηση με στόχο να ελαχιστοποιηθεί. Η αντικειμενική συνάρτηση που επιλέχθηκε είναι η διαφορά της επιθυμητής με την πραγματική ροπή και φαίνεται παρακάτω:

$$\text{Αντικειμενική Συνάρτηση} = |\text{επιθυμητή ροπή} - \text{πραγματική ροπή}|$$

Μέσα στο περιβάλλον του Matlab πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση με την χρήση της εντολής fmincon. Αυτή η εντολή επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει μία δοθείσα συνάρτηση στην οποία μπορεί ο χρήστης να εισάγει επιπροσθέτως και περιορισμούς. Η υπολογισμένη επιθυμητή ροπή από το Simulink εισάγεται στο workspace του Matlab με συχνότητα χρόνου που έχουμε επιλέξει εμείς και αφού υπολογιστούν οι χειραγωγούμενες μεταβλητές, εισάγονται στο Simulink έτσι ώστε να ελέγξουν βέλτιστα πλέον το σύστημα.

Το ανανεωμένο μοντέλο έχει την εξής μορφή:

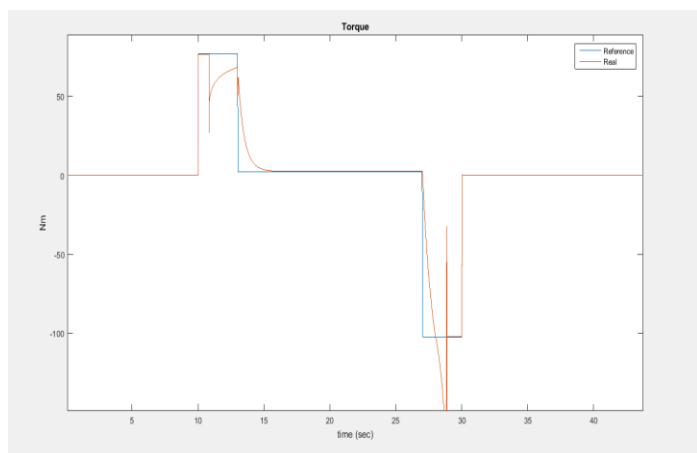


Σχήμα 4: Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον βέλτιστο έλεγχο.

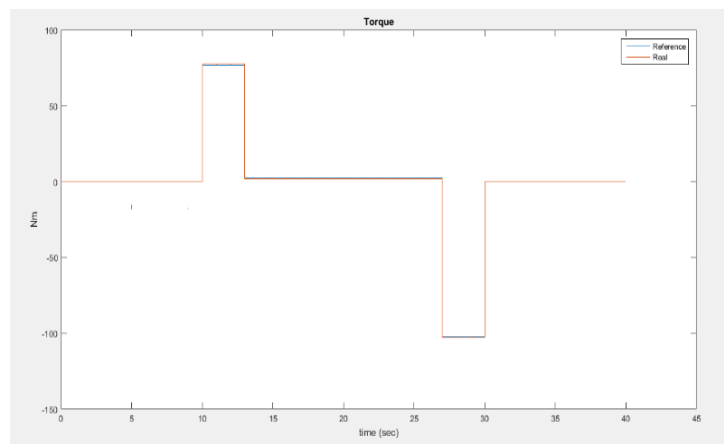
Αρχικά, στο πάνω αριστερό μέρος φαίνεται το function μπλοκ το οποίο παίρνει σαν εισόδους την ταχύτητα του οχήματος, την τιμή του πεντάλ και την περιστροφική ταχύτητα του κινητήρα. Με αυτές τις τιμές σαν εισόδους υπολογίζεται η επιθυμητή ροπή και η επιθυμητή ισχύς. Με την χρήση της επιθυμητής ροπής δημιουργείται η αντικειμενική συνάρτηση στο workspace του Matlab. Αφού υπολογιστεί εκεί η βέλτιστη τιμή της ροπής του κινητήρα και του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου, εισάγεται στο περιβάλλον του Simulink ως μπλοκ σταθερών τιμών με τα ονόματα tr και cr αντίστοιχα.

6.4.3 Διαγράμματα

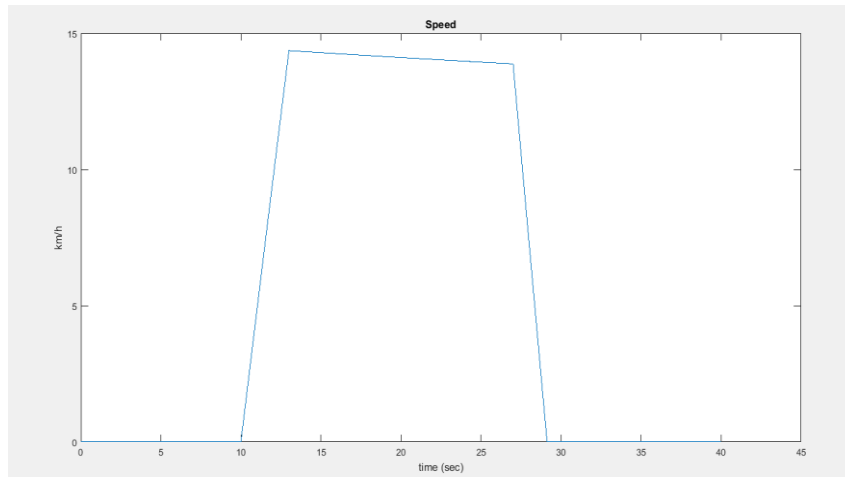
Τα διαγράμματα που ακολουθούν υλοποιούνται με την βοήθεια ενός μέρους του διεθνούς κύκλου οδήγησης ECE-40 και παραγματοποιούνται με αρχικό SOC ίσον με 34% (δηλαδή κάτω από το κατώτατο όριο των 40), όπου και παρατηρήθηκαν τα περισσότερα σφάλματα στο αρχικό μοντέλο.



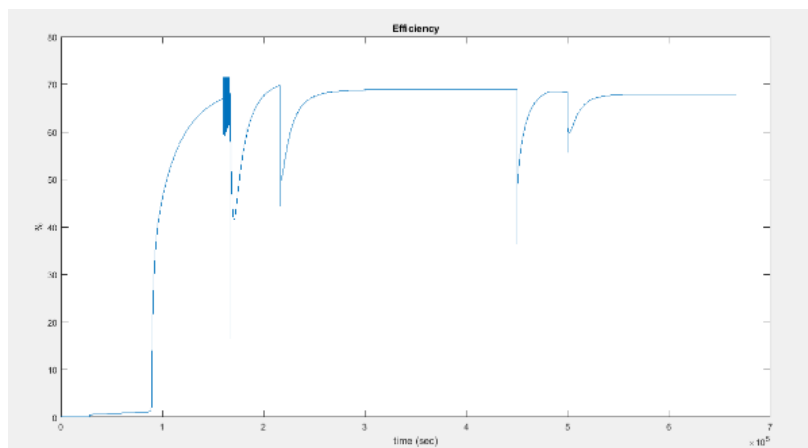
Σχήμα 4: Διάγραμμα ροπής αρχικού μοντέλου



Σχήμα 5: Διάγραμμα ροπής βελτιστοποιημένου μοντέλου



Σχήμα 6: Διάγραμμα ταχύτητας βελτιστοποιημένου μοντέλου



Σχήμα 7: Διάγραμμα απόδοσης κυψέλης καυσίμου

6.4.4 Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται μία εμφανής βελτίωση στο σφάλμα επιθυμητής-πραγματικής ροπής με την εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου με την χρήση της εντολής `fmincon` του Matlab. Η πραγματική ροπή, πλέον, είναι πολύ κοντά στη επιθυμητή. Επίσης, από τα διαγράμματα ταχύτητας και απόδοσης της κυψέλης του μοντέλου συμπαίρνεται ότι η συμπεριφορά του μοντέλου και η απόκρισή του στις απαιτήσεις είναι πολύ ικανοποιητική με επιδόσεις που πλησιάζουν το αρχικό μοντέλο.

7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η έρευνα και η ανάπτυξη των οχημάτων που κινούνται με υδρογόνο στην περίοδο που ζούμε είναι πολύ εκτενής και μέρα με την μέρα παρουσιάζονται όλο και περισσότερες δημοσιεύσεις πάνω στο θέμα. Είναι, επομένως, προφανές ότι η τεχνολογία σε αυτόν τον τομέα εξελίσσεται διαρκώς και υπάρχουν πολλά περιθώρια εξέλιξης των υπάρχοντων μελετών. Έγινε ανάλυση και βελτίωση ενός υπάρχοντος αρχικού ελέγχου διαχείρισης ενέργειας πάνω σε ένα συγκεκριμένο όχημα. Παρατηρήθηκε η απόκρισή του κάτω από διαφορετικές συνθήκες και μελετήθηκε η ολική συμπεριφορά του έτσι ώστε να εντοπιστούν τα αδύναμα σημεία του με σκοπό την ανάπτυξη νέων στρατηγικών ελέγχου στο κομμάτι της διαχείρισης της ενέργειάς του.

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας σε σενάρια διαφορετικού αρχικού SOC της μπαταρίας και με διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος, παρατηρώντας τις αποδοτικότερες περιοχές λειτουργίας του, και σχεδίαση, με βάση αυτήν, ορισμένων σεναρίων ελέγχου ως προς την αποδοτικότερη λειτουργία του. Στο τελευταίο κεφάλαιο, αναπτύχθηκε ένας βέλτιστος ελεγκτής που ελαχιστοποιεί το σφάλμα ροπής του συστήματος και βελτιώνει την διανομή ενέργειας μεταξύ των πηγών ενέργειας. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε υπάρχουν, φυσικά, πολλά μελλοντικά περιθώρια βελτίωσης ως προς πολλές λειτουργίες του.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Script για τον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που έχει χρησιμοποιηθεί από την κυψέλη, την μπαταρία και τον κινητήρα

```
fcPower = 0;
btPower = 0;
mtrPower = 0;

for i=1:length(simTimeA{1})

    if (motorPowerA{1}(i) > 0)

        mtrPower = mtrPower + motorPowerA{1}(i);
    end

    fcPower = fcPower + stackPowerA{1}(i);

    if (battPowerA{1}(i) > 0)

        btPower = btPower + battPowerA{1}(i);
    end

end

fcPower = fcPower*0.00006/3600;
btPower = btPower*0.00006/3600;
mtrPower = mtrPower*0.00006/3600;
```

Script για τον υπολογισμό του ποσοστού που η μπαταρία φορτίζει από την κυψέλη και την αναγεννητική πέδηση

```
battSum = zeros(loop,1);
stackSum = zeros(loop,1);
breakSum = zeros(loop,1);
breakSum100 = zeros(loop,1);
stackSum100 = zeros(loop,1);

for j=1:loop
    for i=1:length(simTimeA{j})
        if (battPowerA{j}(i) < 0)

            battSum(j) = battSum(j) + abs(battPowerA{j}(i));

            stackSum(j) = stackSum(j) + stackPowerA{j}(i);

        end
    end
end
```



```

end
end

for j=1:loop
    breakSum(j) = battSum(j) - stackSum(j);

    breakSum(j) = breakSum(j)*0.00006/3600;
    battSum(j) = battSum(j)*0.00006/3600;
    stackSum(j) = stackSum(j)*0.00006/3600;

    breakSum100(j) = breakSum(j)/battSum(j)*100;
    stackSum100(j) = stackSum(j)/battSum(j)*100;
end

```

Script για τον υπολογισμό του DOD της μπαταρίας

```

q = 1; %epilogi cell tou SOCA

temp1 = zeros(length(SOCA{q}),1);
temp2 = zeros(length(SOCA{q}),1);

for j=1:loop
    temp1(1,1) = SOCA{q}(1); temp2(1,1) = SOCA{q}(1);
    tempCount = 2;

    tempTime1 = zeros(length(SOCA{q}),1);
    tempTime2 = zeros(length(SOCA{q}),1);
    tempTime1(1,1) = 3e-5; tempTime2(1,1) = simTimeA{q}(1);

    for i=2:length(SOCA{q})

        if (roundToDP(SOCA{q}(i),4) == roundToDP(SOCA{q}(i-1),4))
            continue;
        else
            temp1(tempCount,1) = roundToDP(SOCA{q}(i),4);
            temp2(i,1) = roundToDP(SOCA{q}(i),4);

            tempTime1(tempCount,1) = simTimeA{q}(i);
            tempTime2(i,1) = simTimeA{q}(i);

            tempCount = tempCount + 1;

        end

    end

    temp1(temp1==0) = [];
    tempTime1(tempTime1==0) = [];

```

```

%% ypologismos dod
warning off

imin=0;
imax=0;
dod=zeros(1,length(temp1));
min=zeros(1,length(temp1)); minpos=zeros(1,length(temp1));
max=zeros(1,length(temp1)); maxpos=zeros(1,length(temp1));

if temp1(1)>temp1(2)
    imax=imax+1;
    max(imax)=temp1(1);
    maxpos(imax)=1;
    bl = 0;
else
    imin=imin+1;
    min(imin)=temp1(1);
    minpos(imin)=1;
    bl = 1;
end

for i=2:length(temp1)-1
    if temp1(i)<temp1(i-1) && temp1(i)<temp1(i+1)
        imin=imin+1;
        min(imin)=temp1(i);
        minpos(imin)=i;
    end

    if temp1(i)>temp1(i-1) && temp1(i)>temp1(i+1)
        imax=imax+1;
        max(imax)=temp1(i);
        maxpos(imax)=i;
    end
end

if temp1(length(temp1))<temp1(length(temp1)-1)
    imin=imin+1;
    min(imin)=temp1(length(temp1));
    minpos(imin)=length(temp1);
else
    imax=imax+1;
    max(imax)=temp1(length(temp1));
    maxpos(imax)=length(temp1);
end

for j=1:length(temp1)/2
    if (bl == 0)
        dod(j)=max(j)-min(j);
    else
        dod(j) = max(j) - min(j+1);
    end
    if max(j)-min(j)==0
        break;
    end
end
end

```

```

dod(dod==0) = [];
dodSum = sum(dod)-dod(end);
min(min==0) = [];
max(max==0) = [];
minpos(minpos==0) = [];
maxpos(maxpos==0) = [];

function x = roundToDP( x,n )
% Round the matrix x to n decimal places

    x = round(x * 10^n)/ 10^n;

end

```

Script για τον υπολογισμό των κύκλων φόρτισης της μπαταρίας

```

imin=0;
imax=0;
cycles=zeros(1,length(temp1));
min=zeros(1,length(temp1)); minpos=zeros(1,length(temp1));
max=zeros(1,length(temp1)); maxpos=zeros(1,length(temp1));

if temp1(1)>temp1(2)
    imax=imax+1;
    max(imax)=temp1(1);
    maxpos(imax)=1;
    b1 = 0;
else
    imin=imin+1;
    min(imin)=temp1(1);
    minpos(imin)=1;
    b1 = 1;
end

for i=2:length(temp1)-1
    if temp1(i)<temp1(i-1) && temp1(i)<temp1(i+1)
        imin=imin+1;
        min(imin)=temp1(i);
        minpos(imin)=i;
    end

    if temp1(i)>temp1(i-1) && temp1(i)>temp1(i+1)
        imax=imax+1;
        max(imax)=temp1(i);
        maxpos(imax)=i;
    end
end

if temp1(length(temp1))<temp1(length(temp1)-1)
    imin=imin+1;

```

```

        min(imin)=temp1(length(temp1));
        minpos(imin)=length(temp1);
    else
        imax=imax+1;
        max(imax)=temp1(length(temp1));
        maxpos(imax)=length(temp1);
    end

    for j=1:length(temp1)/2
        if (b1 == 0)
            cycles(j)=max(j+1)-min(j);
        else
            cycles(j) = max(j) - min(j);
        end
        if max(j)-min(j)==0
            break;
        end
    end
end

cycles(cycles==0) = [];
min(min==0) = [];
max(max==0) = [];
minpos(minpos==0) = [];
maxpos(maxpos==0) = [];

```

Script για υπολογισμό διανυθείσας απόστασης

```

kmMeter = zeros(length(simTimeA{1}),loop);
kmDone = zeros(loop,1);

for j=1:loop
    for i=1:length(simTimeA{j})

        kmDone(j) = kmDone(j) + (speedA{j}(i)/3600/16666.666);
        kmMeter(i,j) = kmDone(j);

    end
end

```

Scripts για το μοντέλο που το υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας αντικαταστάθηκε με function μπλοκς

```

% RequiredDrivePowerCalculation
function y = RequiredDrivePowerCalculation(u)
%Inputs
MotorSpeed=u(1); %rad/s
RequiredTorque=u(2); % pairnume os eisodo tin eksodo tou prohgomouenou
sub
%Limits (Zero Avoid for MotorSpeed)
if MotorSpeed<1

```

```

    MotorSpeed=1;
end
%Calculation
DrivePower=MotorSpeed*RequiredTorque;
%Output
y(1)=DrivePower;

```

```

% RequiredTorqueCalculation
function y = RequiredTorqueCalc(u)
%Inputs
Accelerator=u(1);
CarSpeed=u(2);
%Interpolation table
xv=[0 20 38 60 80 100 120 135 160];
yv=[256 256 256 203 152 122 101 90.5 61];
%The loume na kanoume interpolation-extrapolation tou carspeed
%CarSpeedInterpolation

```

```

IntCarSpeed = interp1(xv,yv,CarSpeed);
%Calculation
p1=min(IntCarSpeed,abs(Accelerator)*256);
p2=sign(Accelerator);
Torque=p1*p2;
%Output
y(1)=Torque;

```

```

%PowerManagementSub
function y=PowerManagementtest(u)
%Inputs
DrivePower=u(1);%RequiredPower tou EnergyManagement=DrivePower sto
P.M.S
RechargePower=u(2); %Erxetai os eksodos apo BatteryManagement me to
onoma BatteryPower
DriveTorque=u(3); % RequiriedTorque tou RequiredTorqueCalc =
DriveTorque sto P.M.S
BatteryLimit=u(4);
MotorSpeed=u(5);
if MotorSpeed<1 %zero avoider
    MotorSpeed=1;
end
FCcurrent=u(6);
FCvoltage=u(7);
%FCCurrentRef Calculation H proth eksodos tou PowerManagement
%Calculations
Power=DrivePower-RechargePower;
LPower=Power;

```

```

%Limits 2KW-100KW
if Power<2000
    LPower=2000;
end
if Power>100000
    LPower=100000;
end
%Interpolation tables
xd=[0,159.95,479.63,795.54,1098.9,1397.7,1691.6,1982,2269.3,2554.2,28
37,3117.8,3396.8,3674.2,3950.2,4224.8,4498.1,4770.1,5041,5310.8,5579.
6,5847.4,6114.2,6380,6645,6909.1,7172.4,7434.9,7696.5,7957.4,8217.6,8
477,8735.7,8993.8,9251.1,9507.8,9763.8,10019,10274,10528,10782,11034,
11287,11538,11790,12040,12290,12540,12789,13037,13285,13533,13779,140
26,14272,14517,14762,15006,15250,15494,15737,15979,16221,16463,16704,
16945,17185,17425,17664,17903,18141,18379,18617,18854,19091,19327,195
63,19799,20034,20269,20503,20737,20970,21204,21436,21669,21901,22132,
22363,22594,22825,23055,23284,23514,23743,23971,24199,24427,24655,248
82,25108,25335,25561,25786,26012,26237,26461,26686,26909,27133,27356,
27579,27802,28024,28246,28467,28688,28909,29130,29350,29570,29789,300
08,30227,30446,30664,30882,31099,31317,31534,31750,31967,32182,32398,
32613,32828,33043,33258,33472,33685,33899,34112,34325,34537,34750,349
62,35173,35385,35596,35806,36017,36227,36437,36646,36855,37064,37273,
37481,37689,37897,38105,38312,38519,38725,38932,39138,39343,39549,397
54,39959,40163,40368,40572,40775,40979,41182,41385,41588,41790,41992,
42194,42395,42596,42797,42998,43198,43399,43598,43798,43997,44196,443
95,44594,44792,44990,45188,45385,45582,45779,45976,46172,46368,46564,
46760,46955,47150,47345,47539,47733,47927,48121,48315,48508,48701,488
94,49086,49278,49470,49662,49853,50044,50235,50426,50616,50807,50996,
51186,51375,51565,51754,51942,52131,52319,52507,52694,52882,53069,532
56,53442,53629,53815,54001,54187,54372,54557,54742,54927,55111,55296,
55480,55663,55847,56030,56213,56396,56578,56761,56943,57125,57306,574
87,57669,57849,58030,58210,58391,58571,58750,58930,59109,59288,59467,
59645,59824,60002,60179,60357,60534,60712,60888,61065,61242,61418,615
94,61770,61945,62120,62296,62470,62645,62819,62994,63168,63341,63515,
63688,63861,64034,64207,64379,64551,64723,64895,65066,65238,65409,655
80,65750,65921,66091,66261,66430,66600,66769,66938,67107,67276,67444,
67612,67780,67948,68116,68283,68450,68617,68784,68950,69117,69283,694
49,69614,69780,69945,70110,70275,70439,70604,70768,70932,71095,71259,
71422,71585,71748,71911,72073,72236,72398,72560,72721,72883,73044,732
05,73366,73526,73687,73847,74007,74167,74326,74486,74645,74804,74963,
75121,75280,75438,75596,75753,75911,76068,76225,76382,76539,76696,768
52,77008,77164,77320,77475,77631,77786,77941,78096,78250,78404,78559,
78713,78866,79020,79173,79326,79479,79632,79785,79937,80089,80241,803
93,80545,80696,80847,80998,81149,81300,81450,81600,81751,81900,82050,
82200,82349,82498,82647,82796,82944,83092,83241,83389,83536,83684,838
31,83978,84125,84272,84419,84565,84712,84858,85004,85149,85295,85440,
85585,85730,85875,86020,86164,86308,86452,86596,86740,86883,87026,871
69,87312,87455,87598,87740,87882,88024,88166,88308,88449,88590,88731,
88872,89013,89154,89294,89434,89574,89714,89854,89993,90132,90271,904
10,90549,90688,90826,90964,91102,91240,91378,91515,91653,91790,91927,
92064,92200,92337,92473,92609,92745,92881,93016,93152,93287,93422,935
57,93691,93826,93960,94094,94228,94362,94496,94629,94763,94896,95029,
95162,95294,95427,95559,95691,95823,95955,96086,96218,96349,96480,966
11,96742,96872,97003,97133,97263,97393,97523,97652,97782,97911,98040,
98169,98297,98426,98554,98683,98811,98939,99066,99194,99321,99448,995
75,99702,99829,99956,1.0002e+005];
yd=[0,0.39993,1.1997,1.9991,2.7965,3.5871,4.3694,5.1459,5.9178,6.6861
,7.4512,8.2135,8.9735,9.7311,10.487,11.241,11.993,12.743,13.492,14.23
9,14.985,15.73,16.474,17.216,17.957,18.697,19.436,20.174,20.911,21.64
7,22.382,23.116,23.849,24.581,25.313,26.043,26.773,27.502,28.23,28.95
8,29.684,30.41,31.136,31.86,32.584,33.307,34.029,34.751,35.472,36.193

```

```

, 36.912, 37.632, 38.35, 39.068, 39.785, 40.502, 41.218, 41.934, 42.649, 43.363
, 44.077, 44.79, 45.503, 46.215, 46.926, 47.637, 48.348, 49.058, 49.767, 50.476
, 51.184, 51.892, 52.599, 53.306, 54.013, 54.718, 55.424, 56.129, 56.833, 57.53
7, 58.24, 58.943, 59.646, 60.348, 61.049, 61.75, 62.451, 63.151, 63.85, 64.55, 6
5.248, 65.947, 66.645, 67.342, 68.039, 68.735, 69.432, 70.127, 70.822, 71.517,
72.212, 72.906, 73.599, 74.292, 74.985, 75.677, 76.369, 77.06, 77.751, 78.442,
79.132, 79.822, 80.511, 81.2, 81.889, 82.577, 83.265, 83.952, 84.639, 85.326, 8
6.012, 86.698, 87.383, 88.068, 88.753, 89.437, 90.121, 90.805, 91.488, 92.17, 9
2.853, 93.535, 94.216, 94.898, 95.578, 96.259, 96.939, 97.619, 98.298, 98.977,
99.656, 100.33, 101.01, 101.69, 102.37, 103.04, 103.72, 104.4, 105.07, 105.75,
106.42, 107.1, 107.77, 108.45, 109.12, 109.79, 110.47, 111.14, 111.81, 112.48,
113.15, 113.82, 114.5, 115.17, 115.84, 116.51, 117.18, 117.84, 118.51, 119.18,
119.85, 120.52, 121.18, 121.85, 122.52, 123.19, 123.85, 124.52, 125.18, 125.85
, 126.51, 127.18, 127.84, 128.5, 129.17, 129.83, 130.49, 131.16, 131.82, 132.48
, 133.14, 133.8, 134.46, 135.12, 135.78, 136.44, 137.1, 137.76, 138.42, 139.08,
139.74, 140.4, 141.05, 141.71, 142.37, 143.03, 143.68, 144.34, 144.99, 145.65,
146.3, 146.96, 147.61, 148.27, 148.92, 149.58, 150.23, 150.88, 151.53, 152.19,
152.84, 153.49, 154.14, 154.79, 155.44, 156.09, 156.74, 157.39, 158.04, 158.69
, 159.34, 159.99, 160.64, 161.29, 161.94, 162.58, 163.23, 163.88, 164.52, 165.1
7, 165.82, 166.46, 167.11, 167.75, 168.4, 169.04, 169.69, 170.33, 170.97, 171.6
2, 172.26, 172.9, 173.55, 174.19, 174.83, 175.47, 176.11, 176.75, 177.39, 178.0
3, 178.67, 179.31, 179.95, 180.59, 181.23, 181.87, 182.51, 183.15, 183.78, 184.
42, 185.06, 185.7, 186.33, 186.97, 187.61, 188.24, 188.88, 189.51, 190.15, 190.
78, 191.42, 192.05, 192.68, 193.32, 193.95, 194.58, 195.22, 195.85, 196.48, 197
.11, 197.75, 198.38, 199.01, 199.64, 200.27, 200.9, 201.53, 202.16, 202.79, 203
.42, 204.05, 204.67, 205.3, 205.93, 206.56, 207.19, 207.81, 208.44, 209.07, 209
.69, 210.32, 210.94, 211.57, 212.2, 212.82, 213.45, 214.07, 214.69, 215.32, 215
.94, 216.56, 217.19, 217.81, 218.43, 219.06, 219.68, 220.3, 220.92, 221.54, 222
.16, 222.78, 223.4, 224.02, 224.64, 225.26, 225.88, 226.5, 227.12, 227.74, 228.
36, 228.98, 229.59, 230.21, 230.83, 231.45, 232.06, 232.68, 233.29, 233.91, 234
.53, 235.14, 235.76, 236.37, 236.99, 237.6, 238.21, 238.83, 239.44, 240.06, 240
.67, 241.28, 241.89, 242.51, 243.12, 243.73, 244.34, 244.95, 245.56, 246.17, 24
6.78, 247.39, 248, 248.61, 249.22, 249.83, 250.44, 251.05, 251.66, 252.27, 252.
87, 253.48, 254.09, 254.7, 255.3, 255.91, 256.52, 257.12, 257.73, 258.33, 258.9
4, 259.54, 260.15, 260.75, 261.36, 261.96, 262.57, 263.17, 263.77, 264.38, 264.
98, 265.58, 266.18, 266.79, 267.39, 267.99, 268.59, 269.19, 269.79, 270.39, 270
.99, 271.59, 272.19, 272.79, 273.39, 273.99, 274.59, 275.19, 275.79, 276.38, 27
6.98, 277.58, 278.18, 278.77, 279.37, 279.97, 280.56, 281.16, 281.76, 282.35, 2
82.95, 283.54, 284.14, 284.73, 285.33, 285.92, 286.51, 287.11, 287.7, 288.29, 2
88.89, 289.48, 290.07, 290.66, 291.26, 291.85, 292.44, 293.03, 293.62, 294.21,
294.8, 295.39, 295.98, 296.57, 297.16, 297.75, 298.34, 298.93, 299.52, 300.11,
300.69, 301.28, 301.87, 302.46, 303.04, 303.63, 304.22, 304.8, 305.39, 305.98,
306.56, 307.15, 307.73, 308.32, 308.9, 309.49, 310.07, 310.65, 311.24, 311.82,
312.41, 312.99, 313.57, 314.15, 314.74, 315.32, 315.9, 316.48, 317.06, 317.64,
318.23, 318.81, 319.39, 319.97, 320.55, 321.13, 321.71, 322.29, 322.86, 323.44
, 324.02, 324.6, 325.18, 325.76, 326.33, 326.91, 327.49, 328.07, 328.64, 329.22
, 329.79, 330.37, 330.95, 331.52, 332.1, 332.67, 333.25, 333.82, 334.4, 334.97,
335.54, 336.12, 336.69, 337.26, 337.84, 338.41, 338.98, 339.56, 340.13, 340.7,
341.27, 341.84, 342.41, 342.98, 343.56, 344.13, 344.7, 345.27, 345.84, 346.41,
346.98, 347.54];
%Interpolation
FCcurrentRef=interp1(xd,yd,LPower);
%Output 1
y(1)=FCcurrentRef;
%FCPower Calculation
FCPower=dot(FCcurrent,FCvoltage);
%BatteryAvailableSub
%Inputs
    %P FC,FCPower = to ginomeno V*I tou fc
    %P*FC,Power = h diafora DrivePower-RechargePower prin limit kai
interp

```

```

    %Battery recharge,RechargePower autousio os eisodo sto PMS
    %Power Limit ,BatteryLimit os erxetai sto PMS
%Calculations
Pbatt=Power-FCPower;
DynSatup=BatteryLimit;
DynSatlo=-1*BatteryLimit;
%Switch1
Switch1p1=RechargePower;
Switch1p3=Pbatt;
persistent Switch1Out;
if isempty(Switch1Out)
    Switch1Out=Switch1p1;
end
if RechargePower~=0
    Switch1Out=Switch1p1;
else
    Switch1Out=Switch1p3;
end
%Switch2 edo mesa theli rate limiter kanonika
Switch2p1=Switch1Out; %edo mpainei to limiter
Switch2p3=Pbatt;
persistent Switch2Out;
if isempty(Switch2Out)
    Switch2Out=Switch2p1;
end
if RechargePower~=0
    Switch2Out=Switch2p1;
else
    Switch2Out=Switch2p3;
end
%DynamicSaturation
if Switch2Out>DynSatup
    Switch2Out=DynSatup;
end
if Switch2Out<DynSatlo
    Switch2Out=DynSatlo;
end
%Output tou Battery Available Power
BatteryPower=Switch2Out;
%Motor torque ref calculation
%Calculations
Athroisma=BatteryPower+FCPower;
Tmotor=Athroisma/MotorSpeed;
%relay ylopohsh me if mproei na thelei arxikopihsh to relayout
persistent relayout;
if isempty(relayout)
    relayout=0;
end
if MotorSpeed>300/30*pi
    relayout=1;
end
if MotorSpeed<200/30*pi
    relayout=0;
end
%Switch3
Switch3p1=Tmotor;
Switch3p3=DriveTorque;
if relayout~=0
    MotorTorqueRef=Switch3p1;
else
    MotorTorqueRef=Switch3p3;
end

```



```

end
%Output2
y(2)=MotorTorqueRef;

% BatteryManagement
function y = BatteryManagementtest1(u)
%BatteryLimit
%Inputs
VoltageBatt=u(3);
%Constants and Variables
Pbatt=25000;
Vbatt=288;
% Battery Limit Calculation
Batterylimit=Pbatt-2000*(Vbatt-VoltageBatt);
if Batterylimit>Pbatt
    Batterylimit=Pbatt;
end
if Batterylimit<0
    Batterylimit=0;
end
%Output
y(1)=Batterylimit;
%BatteryPower
%Inputs
SOC=u(1);
%Constants and Variables

%Battery Power Calculation
Q=u(4);
if SOC<40
    Q=1;
end
if SOC>80
    Q=0;
end
BatteryPower=-Pbatt*Q;
%Output
y(2)=BatteryPower;
y(3)=Q;

```

Scripts για βελτιστοποίηση με την χρήση της fmincon

```
% Main optimizer
optInit2v7
tic
global stime;
stime=0;
global lim;
lim=0.1;
    sopt
simset('solver','ode3','SrcWorkspace','base','DstWorkspace','base'...
      , 'SaveFormat','Structure');
global xo;
xo(1)=0;
xo(2)=0;

% ----- run initial optimization
global cr;
global tr;
cr=xo(1)
tr=xo(2)

steps=2;
while stime<steps      %Simulations/Optimizations to run after first

    accAmp1=accAmp11(stime+1);

    display((stime), '-----Optimization time -----')
        xo(1)=cr;

        xo(2)=tr

        [~,~,yo]= sim('optBLOCKv2t2ratelimiter.slx',[0 1], sopt);
        arxikes=telikes;
        stime=stime+1;
cr
tr
%----- run optimization
    global cr;
    global tr;
    [cr,tr]=optimizerc(cr,tr); %pairnei ta beltista cr tr
    optimal_I_sp=cr
    optimal_Torque_sp=tr
%-----

speed=[speed; (suma.signals.values(:,6))];
torqueRef=[torqueRef; (suma.signals.values(:,7))];
torqueReal=[torqueReal; (suma.signals.values(:,8))];
pedal=[pedal; (suma.signals.values(:,5))];
soc = [soc; (suma.signals.values(:,1))];
motorPower = [motorPower; (suma.signals.values(:,2))];
stackPower = [stackPower; (suma.signals.values(:,3))];
battPower = [battPower; (suma.signals.values(:,4))];
efficiency = [efficiency; (suma.signals.values(:,9))];
flowRateAir = [flowRateAir; (suma.signals.values(:,10))];
flowRateFuel = [flowRateFuel; (suma.signals.values(:,11))];
```

```

airConLpm = [airConLpm; (suma.signals.values(:,12))];
conLpm = [conLpm; (suma.signals.values(:,13))];
conLiters = [conLiters; (suma.signals.values(:,14))];
conLeft = [conLeft; (suma.signals.values(:,15))];

end
toc

function [cur,tor] = optimizerc (c,t)
    global tr;          %Torque Ref
    global lim;
    global cr;         %Current Ref
    global xo;
    xmin(1)=0;        %Current min
    xmin(2)=-250;     %Torque min
    xmax(1)=350;     %Current max
    xmax(2)=250;     %Torque max

    A=[];
    B=[];

    options=optimset('Display','iter','Algorithm','interior-
point','Hessian','lbfgs','objectivelimit',lim);
    x=fmincon(@obj,xo,A,B,[],[],xmin,xmax,[],options);
    cur=cr;
    tor=tr;

end
function q = obj(x)
    global yo;
    global cr;
    cr=x(1);
    global tr;
    tr=x(2);
    sopt
    simset('solver','ode3','SrcWorkspace','base','DstWorkspace','base'...
        , 'SaveFormat','Array');
    [~,~,yo]= sim('optBLOCKv2t2ratelimiter.slx',[0 1], sopt);
    q=abs(yo(end,1)-yo(end,2));    %Torque
    error_from_desired_torque=q;
    str = sprintf('error %0.3f, Iopt - Topt %0.3f -- \n',
error_from_desired_torque,x);
    disp(str)

end

```

```

global InSOC stime Ts;
InSOC=34;
Ts=6.0000e-05;
stime=1;
accTime=1;
accAmpl1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.3 0.3 0.3 0.008 0.008 0.008 0.008
0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 -0.4 -0.4
-0.4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3
0.3 0.3 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02
0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02
0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 -0.35 -0.35 -0.35 -0.35 -0.35 -0.35 -
0.35 -0.35 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.2 0.2 0.2 0.2
0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.04
0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04
0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 -0.1 -0.1 -0.1 -0.1 -0.1 0.025 0.025 0.025
0.025 0.025 0.025 0.025 0.025 0.025 0.025 0.025 0.025 0.025 0.025 0.025
-0.3 -0.3 -0.3 -0.3 -0.3 -0.3 -0.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
global arxikes telikes;
arxikes=[];
telikes=[];
speed2=[];
speed=[];
torqueRef=[];
torqueReal=[];
pedal=[];
soc = [];
efficiency = [];
flowRateAir = [];
flowRateFuel = [];
airConLpm = [];
conLpm = [];
conLiters = [];
conLeft = [];
motorPower = [];
stackPower = [];
battPower = [];

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

“Βέλτιστος έλεγχος ενεργειακής διαχείρισης υβριδικού οχήματος με κυψέλη καυσίμου”, Καλανδαρίδης Στέφανος, Πτυχιακή εργασία

“The study on the power management system in a fuel cell hybrid vehicle”, Jenn-Jiang Hwang, Yu-Jie Chen, Jenn-Kun Kuo, Department of Greenergy, National University of Tainan, 33 Sec. 2, Shu-Lin St., Tainan 70005, Taiwan

“A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges”, N. Sulaiman a,n, M.A.Hannan b,nn, A.Mohamed b, E.H.Majlan a, W.R.WanDaud Fuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia b Department of Electrical, Electronics & System Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

“Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle”, P. Rodatz*, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella, Department of Measurement and Control Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology

“An experimental and analytical comparison study of power management methodologies of fuel cell–battery hybrid vehicles”, Ahmad Fadel, Biao Zhou, Department of Mechanical, Automotive & Materials Engineering, University of Windsor, 401 Sunset Ave., Windsor,,ON, Canada N9B 3P4

“Electric powertrain modeling of a fuel cell hybrid electric vehicle and development of a power distribution algorithm based on driving mode recognition”, Junghwan Ryu, Yeongseop Park, MyoungHo Sunwoo, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Republic of Korea

“Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles”, Chun-Yan Li a, Guo-Ping Liub, *Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 95 Zhongguancun East Road, Beijing 100190, China, Faculty of Advanced Technology, University of Glamorgan, UK, Center for Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, China*

“Power management strategy for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system”, Xiangjun Li *, Liangfei Xu, Jianfeng Hua, Xinfan Lin, Jianqiu Li, Minggao Ouyang, *State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

“Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles”

Min-Joong Kim, Huei Peng, *Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125, United States*

“Optimal power source sizing of fuel cell hybrid vehicles based on Pontryagin's minimum principle”, Changhong Liu, Lin Liu, Department of Mechanical Engineering, The University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA

“The study on the power management system in a fuel cell hybrid vehicle”

Jenn-Jiang Hwang, Yu-Jie Chen, Jenn-Kun Kuo, Department of Greenergy, National University of Tainan, 33 Sec. 2, Shu-Lin St., Tainan 70005, Taiwan

“Prediction-based optimal power management in a fuel cell/battery plug-in hybrid vehicle”

Piyush Bubna, Doug Brunner, Suresh G. Advani, Ajay K. Prasad, Center for Fuel Cell Research, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716, United States

<https://www.mathworks.com/>