



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ζ. ΠΑΠΑΖΑΧΑΡΟΠΟΥΛΟΣ**

**Επιβλέπων :** Α. ΚΛΑΔΑΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2012





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ζ. ΠΑΠΑΖΑΧΑΡΟΠΟΥΛΟΣ**

**Επιβλέπων :** Α. ΚΛΑΔΑΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11<sup>η</sup> Μαΐου 2012.

.....  
Σ. ΜΑΝΙΑΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Α. ΚΛΑΔΑΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σ. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2012

.....  
Κωνσταντίνος Ζ. Παπαζαχαρόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Ζ. Παπαζαχαρόπουλος, 2012.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.





## Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

<b>Περίληψη</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Κατάλογος συμβόλων</b>	<b>xv</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Γενική τοποθέτηση του θέματος.....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας .....	1
1.3 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας .....	2
<b>2 Υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα</b>	<b>3</b>
2.1 Είδη και τεχνολογίες υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων .....	3
2.1.1 Γενικά.....	3
2.1.2 Εναλλακτικά καύσιμα .....	3
2.2 Κατηγορίες και τοπολογίες συστημάτων κίνησης .....	6
2.2.1 Κατηγοριοποίηση υβριδικών οχημάτων .....	6
2.2.2 Τοπολογίες υβριδικών οχημάτων .....	9
2.2.3 Κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών οχημάτων.....	12
2.2.4 Η λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης .....	13
<b>3 Σύστημα ηλεκτροκίνησης</b>	<b>15</b>
3.1 Γενικά.....	15
3.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	15
3.2.1 Γενικά.....	15
3.2.2 Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος.....	15
3.2.3 Μπαταρίες Νικελίου-Μετάλλου Υδριδίου .....	16
3.2.4 Μπαταρίες Νικελίου-Ψευδαργύρου.....	17
3.2.5 Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου.....	17
3.2.6 Μπαταρίες Λιθίου-Ιόντων .....	17
3.2.7 Υπερπυκνωτές.....	18
3.3 Ηλεκτρικές μηχανές.....	19
3.3.1 Γενικά.....	19
3.3.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος.....	21
3.3.3 Σύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.....	21
3.3.4 Επαγωγικοί τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.....	23
3.4 Μετατροπείς ισχύος.....	23
3.4.1 Γενικά.....	23
3.4.2 Ημιαγωγοί ηλεκτρονικών ισχύος.....	24
3.4.3 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος.....	25
3.4.4 Ανορθωτές.....	26

3.4.5	Αντιστροφείς .....	29
3.5	Μεθοδολογίες ελέγχου.....	30
3.5.1	Γενικά.....	30
3.5.2	Μεθοδολογίες ελέγχου βασισμένες σε κανόνες.....	31
3.5.3	Μεθοδολογίες ελέγχου βάσει βελτιστοποίησης.....	37
3.6	Στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας.....	46
3.6.1	Γενικά.....	46
3.6.2	Στρατηγική διαχείρισης ενέργειας σειριακών υβριδικών οχημάτων.....	48
3.6.3	Στρατηγική διαχείρισης ενέργειας παράλληλων υβριδικών οχημάτων.....	49
3.6.4	Στρατηγική διαχείρισης ενέργειας σειριακών/παράλληλων υβριδικών οχημάτων.....	50
<b>4</b>	<b>Ανάπτυξη μεθοδολογίας μοντελοποίησης υβριδικού οχήματος και προτεινόμενος έλεγχος</b>	<b>53</b>
4.1	Ανάπτυξη μοντέλου υβριδικού οχήματος .....	53
4.1.1	Γενικά.....	53
4.1.2	Κύκλοι οδήγησης .....	54
4.1.3	Ελεγκτής ταχύτητας.....	55
4.1.4	Μηχανή εσωτερικής καύσης .....	55
4.1.5	Σύστημα διαχωρισμού ισχύος.....	56
4.1.6	Αεροδυναμική .....	57
4.1.7	Μπαταρίες .....	57
4.1.8	Μετατροπέας ισχύος.....	60
4.1.9	Ηλεκτρικός κινητήρας.....	61
4.1.10	Ηλεκτρική γεννήτρια.....	63
4.2	Διαμόρφωση και αλγόριθμος υλοποίησης προτεινόμενου ελεγκτή .....	64
4.2.1	Γενικά.....	64
4.2.2	Mode Logic .....	65
4.2.3	Προτεινόμενος ελεγκτής μηχανής εσωτερικής καύσης .....	70
4.2.4	Προτεινόμενος ελεγκτής ηλεκτρικού κινητήρα .....	71
4.2.5	Προτεινόμενος ελεγκτής φόρτισης μπαταριών .....	72
4.2.6	Προτεινόμενος ελεγκτής ηλεκτρικής γεννήτριας.....	72
4.3	Αποτελέσματα μοντελοποίησης μέσω Simulink.....	73
4.3.1	Γενικά.....	73
4.3.2	Athens Driving Cycle .....	74
4.3.3	Manhattan Driving Cycle .....	78
4.3.4	Urban Dynamometer Driving Schedule.....	82
4.3.5	New European Driving Cycle.....	87
4.3.6	Supplemental Federal Test Procedure – US06 Highway .....	92
4.4	Προσομοίωση με το λογισμικό ADVISOR .....	95
4.4.1	Γενικά.....	95
4.4.2	Παραμετροποίηση και προσομοίωση .....	96
4.5	Αποτελέσματα προσομοίωσης με το λογισμικό ADVISOR .....	100
4.5.1	Athens Driving Cycle .....	100
4.5.2	Manhattan Driving Cycle .....	101



4.5.3	Urban Dynamometer Driving Schedule.....	102
4.5.4	New European Driving Cycle.....	103
4.5.5	Supplemental Federal Test Procedure – US06 Highway .....	104
4.6	Σχολιασμός – σύγκριση .....	105
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>107</b>
5.1	Συμπεράσματα.....	107
5.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	108
5.3	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	108
<b>Παράρτημα :</b>	<b>Μοντελοποίηση σε περιβάλλον Matlab/Simulink®</b>	<b>111</b>
<b>Αναφορές</b>		<b>131</b>



## Περίληψη

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται και εξετάζονται οι σύγχρονες εναλλακτικές τεχνολογίες του κινητηρίου συστήματος των υβριδικών οχημάτων ενώ δίνεται έμφαση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε εξεταζόμενης διαμόρφωσης. Επιπλέον προτείνεται μία νέα μεθοδολογία ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, η οποία αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab®/Simulink® και ενσωματώθηκε σε μοντέλο υβριδικού οχήματος σειριακής / παράλληλης διαμόρφωσης, που εξετάστηκε λεπτομερώς στα πλαίσια της εργασίας. Για την επιβεβαίωση της ορθότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου και του μοντέλου που διαμορφώθηκε, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα του βιομηχανικού λογισμικού προσομοίωσης οχημάτων ADVISOR. Από τη διερεύνηση αυτή, αναδείχθηκε ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου μπορεί να συμβάλει στη μείωση κατανάλωσης καυσίμου σε συνθήκες πυκνής κυκλοφορίας οχημάτων σε αστικό περιβάλλον.

**Λέξεις-κλειδιά:** Λογισμικό προσομοίωσης λειτουργίας οχήματος, σειριακή/παράλληλη διαμόρφωση, τεχνικές ελέγχου συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης, υβριδικά οχήματα.



# Abstract

---

This thesis presents and analyses extensively the modern hybrid vehicle technologies illustrating the advantages and disadvantages of alternative recommended solutions. In addition a new control strategy of hybrid vehicle drive system is proposed and implemented in a series / parallel hybrid electric vehicle model that has been developed by using Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> software. The proposed control strategy and model structure have been validated by comparing the results to the ones obtained by the industrial vehicle simulation software, ADVISOR. This analysis has shown that the proposed control methodology can offer great services in reducing fuel consumption of hybrid vehicles circulating in city center under tough traffic conditions.

**Keywords:** Vehicle operation simulation software, series/parallel configuration, electric drive system control techniques, hybrid vehicles.



# Κατάλογος συμβόλων

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$CO_2$	Διοξείδιο του άνθρακα
$CO$	Μονοξείδιο του άνθρακα
$NO_x$	Οξείδιο του αζώτου
$SO_x$	Οξείδιο του θείου
$HC$	Υδρογονάνθρακας
$\omega_s$	Σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής
$\omega_e$	Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής διανύσματος ρεύματος
$f_e$	Συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας
$P$	Πλήθος των πόλων
$f_{se}$	Συχνότητα ολίσθησης
$f_r$	Συχνότητα περιστροφής δρομέα
$p$	Ζεύγη πόλων
$\Gamma$	Παράμετρος διαφοράς φρεναρίσματος-επιτάχυνσης
$T_{EM\_D}$	Επιθυμητή ροπή ηλεκτροκινητήρα
$\Delta\alpha$	Μεταβολή της επιτάχυνσης
$\bar{e}_{NO_x}, \bar{e}_{HC}, \bar{e}_{CO}$	Κανονικοποιημένες τιμές ρύπων
$w_1, w_2, w_3, w_4$	Συντελεστές βαρύτητας
$J$	Συνάρτηση κόστους
$\bar{n}$	Κανονικοποιημένη τιμή απόδοσης
$P_e$	Ισχύς εξόδου ηλεκτρικής μηχανής
$E$	Ηλεκτρική ενέργεια
$P_s$	Ηλεκτρική ισχύς μπαταριών
$N$	Διάρκεια κύκλου οδήγησης
$L$	Συνάρτηση στιγμιαίου κόστους
$\mu, \nu$	Συντελεστές βαρύτητας
$P_{dem}$	Ζήτηση ισχύος από τον οδηγό
$D$	Στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου
$\Delta$	Χρόνος δειγματοληψίας
$T_{E\_max}, T_{E\_min}$	Άνω και κάτω όριο ροπής ηλεκτροκινητήρα
$P_m$	Απαιτούμενη ισχύς ηλεκτροκινητήρα
$A_{cc}$	Δεκτικότητα φόρτισης μπαταριών
$\lambda, \gamma$	Παράμετροι Lagrange
$F$	Συνάρτηση καταλληλότητας
$G$	Χρωμόσωμα
$g$	Γονίδιο
$SFC_{rech}, SFC_{dis}$	Μέση ειδική κατανάλωση καυσίμου κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση
$\bar{n}_{batt}$	Μέση απόδοση μπαταριών
$\bar{n}_e$	Μέση απόδοση ηλεκτροκινητήρα

$C_{ICE}$	Κατανάλωση καυσίμου μηχανής εσωτερικής καύσης
$C_{Eq}$	Ισοδύναμη κατανάλωση καυσίμου
$N_R$	Πλήθος δοντιών γραναζιού Ring
$N_S$	Πλήθος δοντιών γραναζιού Sun
$R_w$	Ακτίνα τροχού
$\tau_D$	Αντιτιθέμενη ροπή
$\rho$	Πυκνότητα αέρα
$A$	Μετωπική επιφάνεια
$E_{BATT}$	Μη γραμμική τάση μπαταριών
$E_0$	Σταθερή τάση μπαταριών
$Exp$	Εκθετική τάση μπαταριών
$Sel$	Λογική μεταβλητή φόρτισης/εκφόρτισης
$i$	Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος
$i^*$	Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος χαμηλής συχνότητας
$B$	Εκθετική χωρητικότητα μπαταριών
$U_{bus}, U_{ref}$	Τάση ζυγού και τάση αναφοράς
$L_d, L_q$	Αυτεπαγωγή σε άξονα d και q
$R$	Ωμική αντίσταση
$i_d, i_q$	Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος σε άξονα d και q
$v_d, v_q$	Τάση σε άξονα d και q
$m$	Μάζα
$n_{ef}$	Συντελεστής απόδοσης
$\omega_{carrier}, \omega_{ring}, \omega_{sun}$	Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής γραναζιού Carrier, Ring και Sun
$N_{gen}, n_{motor}, n_{ICE}$	Ταχύτητα περιστροφής γεννήτριας, ηλεκτροκινητήρα και μηχανής εσωτερικής καύσης
$v_{inst}$	Στιγμιαία ταχύτητα
$K_{inst}$	Στιγμιαία κινητική ενέργεια
$c_D$	Αεροδυναμικός συντελεστής



## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ICE	Internal Combustion Engine
PM	Particulate Matter
IEC	International Electrotechnical Commission
HEV	Hybrid Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
EV	Electric Vehicle
SHEV	Series Hybrid Electric Vehicle
PHEV	Parallel Hybrid Electric Vehicle
S/PHEV	Series/Parallel Hybrid Electric Vehicle
pHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
AER	All Electric Range
V2G	Vehicle to Grid
PWM	Pulse Width Modulation
SOC	State Of Charge
CVT	Continuously Variable Transmission
ESS	Energy Storage System
UC	Ultra-Capacitor
NiMH	Nickel-Metal Hydride
Ni-Zn	Nickel-Zinc
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
BJT	Bipolar Junction Transistor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
GTO	Gate Turn-Off
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
VSI	Voltage Source Inverter
CSI	Current Source Inverter
GPS	Global Positioning System
RB	Rule-Based
FL	Fuzzy Logic
FLC	Fuzzy Logic Controller
DIP	Driver's Intention Predictor
PBC	Power Balance Controller
DP	Dynamic Programming
FLPC	Fuzzy Logic Predictive Controller
LP	Linear Programming
SDP	Stochastic Dynamic Programming
PI	Proportional Integral
GA	Genetic Algorithm
Li-ion	Lithium-ion
ADC	Athens Driving Cycle
MDC	Manhattan Driving Cycle
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
NEDC	New European Driving Cycle
FTP	Federal Test Procedure
SFTP	Supplemental Federal Test Procedure
MEK	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης



# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Γενική τοποθέτηση του θέματος

Τα συμβατικά οχήματα λειτουργούν με την αποκλειστική χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine – ICE) με αποτέλεσμα να καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες παραγώγων πετρελαίου (βενζίνης ή diesel) ή υγραερίου τα οποία προκύπτουν από τα περιορισμένα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου στη Γη σε συνδυασμό με την επεξεργασία τους σε ειδικές εγκαταστάσεις.

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), οξείδια του θείου ( $\text{SO}_x$ ), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) καθώς και πλήθος άλλων αποβλήτων. Αυτά τα αέρια επιβαρύνουν σημαντικά το φαινόμενο του θερμοκηπίου συνεισφέροντας στη σταδιακή αλλοίωση των κλιματικών συνθηκών παγκοσμίως ενώ βλάπτουν άμεσα την υγεία και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Επακόλουθο αυτού είναι το γεγονός ότι πλέον στα μεγαλύτερα αστικά κέντρα παγκοσμίως θεσπίζονται αυστηροί νόμοι με στόχο τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων των οχημάτων.

Επιπρόσθετα, λόγω της ύπαρξης πεπερασμένου πλήθους κοιτασμάτων πετρελαίου η τιμή του πετρελαίου έχει εκτοξευθεί στα ύψη ακολουθώντας μία σχεδόν γνησίως αύξουσα πορεία τα τελευταία χρόνια, ενώ οι προβλέψεις για το μέλλον δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικές [2].

Οι παραπάνω παράγοντες κυρίως οδήγησαν τους κατασκευαστές παγκοσμίως, στην κατασκευή αποδοτικότερων και φιλικότερων προς το περιβάλλον οχημάτων, των υβριδικών οχημάτων.

Στην εργασία αυτή, περιγράφονται εκτενώς οι σύγχρονες τεχνολογίες υβριδικών οχημάτων ενώ αναπτύσσεται μοντέλο και μελετάται πλήρως ένα υβριδικό όχημα σε περιβάλλον Simulink<sup>®</sup>/Matlab<sup>®</sup> με ιδιαίτερη έμφαση στη στρατηγική που δημιουργήθηκε για τον αποδοτικό έλεγχο του. Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχθηκε με εκείνα του βιομηχανικού λογισμικού ADVISOR<sup>®</sup> (ADvanced VehIcle SimulatOR). Από τη διερεύνηση αυτή, αναδείχθηκε ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου μπορεί να συμβάλει στη μείωση κατανάλωσης καυσίμου σε συνθήκες πυκνής κυκλοφορίας οχημάτων σε αστικό περιβάλλον.

## 1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία αυτή αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει το θέμα και περιγράφει τη δομή ανάλυσης των επιμέρους ενοτήτων της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο επιχειρείται μια επισκόπηση των σύγχρονων τεχνολογιών των υβριδικών οχημάτων και μία κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με την εσωτερική διαμόρφωση των επιμέρους μονάδων τους καθώς και τον βαθμό συνεισφοράς του ηλεκτρικού συστήματος στην πρόωση του οχήματος. Επίσης εξετάζονται οι σύγχρονες λύσεις σε επίπεδο εναλλακτικών καυσίμων με έμφαση στην κυψέλη καυσίμου και ειδικότερα την κυψέλη υδρογόνου. Τέλος επεξηγείται η λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης και αναδεικνύεται η σκοπιμότητά της στην εξοικονόμηση καυσίμου.

Το τρίτο κεφάλαιο διερευνά τις σύγχρονες λύσεις σε επίπεδο ηλεκτροκίνησης. Εξετάζεται κάθε επιμέρους μονάδα η οποία συνθέτει ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης ενώ περιγράφεται και εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας της. Παρουσιάζονται όλες οι σύγχρονες επιλογές που υπάρχουν σε επίπεδο συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, μετατροπών ισχύος και ηλεκτρικών μηχανών με έμφαση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθεμίας. Εξετάζονται οι διαθέσιμες μεθοδολογίες ελέγχου οι οποίες κατηγοριοποιούνται, επεξηγούνται και αναλύονται εκτενώς στα τελευταία εδάφια του τρίτου κεφαλαίου. Επιπρόσθετα περιγράφονται οι σύγχρονες μεθοδολογίες διαχείρισης ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης και υπογραμμίζονται τα οφέλη που αποκομίζονται από καθεμία από αυτές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται ένα μοντέλο υβριδικού οχήματος σε περιβάλλον Simulink®/Matlab® το οποίο περιλαμβάνει ένα νέο προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου. Αναλύονται οι επιμέρους κανόνες που συνθέτουν την λογική ελέγχου και περιγράφονται εκτενώς οι επιμέρους ελεγκτές που πλαισιώνουν την μονάδα ελέγχου. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από πέντε διαφορετικές πρότυπες διαδρομές που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος και επεξηγούνται τα χαρακτηριστικά τους. Χρησιμοποιείται το βιομηχανικό λογισμικό ADVISOR για την επιβεβαίωση της ορθότητας του δυναμικού μοντέλου που διαμορφώθηκε και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας, εντοπίζονται τα σημεία προαγωγής της επιστήμης και αναφέρονται τα σημεία τα οποία κατά την εκπόνηση της εργασίας κρίθηκαν ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

### **1.3 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας**

Τα καινοτομικά στοιχεία που περιλαμβάνει η παρούσα διπλωματική εργασία εντοπίζονται στα παρακάτω σημεία:

- Διαμορφώθηκε νέα μεθοδολογία ελέγχου και ενεργειακής διαχείρισης (ανάπτυξη αλγορίθμου) για υβριδικά οχήματα με σημαντικά πλεονεκτήματα σε επιβαρυμένες κυκλοφοριακές συνθήκες αστικών κέντρων όπως στην Αθήνα.
- Αναπτύχθηκε λεπτομερές μοντέλο υβριδικού οχήματος σειριακής / παράλληλης διαμόρφωσης, τόσο σε ηλεκτρομηχανολογικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο ελέγχου.
- Επιβεβαιώθηκε η ορθότητα του δυναμικού μοντέλου που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υβριδικών οχημάτων συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του με εκείνα του βιομηχανικού λογισμικού ADVISOR.

## 2 Υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα

---

### 2.1 Είδη και τεχνολογίες υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων

#### 2.1.1 Γενικά

Ο όρος “υβριδικό” που συνθέτει την έννοια του υβριδικού οχήματος (Hybrid Electric Vehicle – HEV) προκύπτει σε δυο διαφορετικές περιπτώσεις [1,2]. Κατά την πρώτη περίπτωση δικαιολογείται από τα εναλλακτικά καύσιμα που μπορεί να χρησιμοποιεί μια μηχανή εσωτερικής καύσης (fuel hybridization). Στην δεύτερη περίπτωση, που απασχολεί περισσότερο την παρούσα εργασία, ο όρος “υβριδικό” αναφέρεται στην αρχιτεκτονική του συστήματος μετάδοσης του οχήματος (drivetrain hybridization).

#### 2.1.2 Εναλλακτικά καύσιμα

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων αποτελεί μια μέθοδο μείωσης των αρνητικών επιπτώσεων των ρύπων που εκπέμπουν τα συμβατικά οχήματα. Εναλλακτικά καύσιμα θεωρούνται αυτά που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές, όπως από διάφορες σοδειές ή κυτταρίνη και από βιομάζα που προκύπτει από την σήψη οργανικού υλικού [2]. Τα δημοφιλέστερα παρατίθενται παρακάτω:

##### 1. Αιθανόλη

Το καύσιμο αυτό παράγεται μέσω της ζύμωσης των σακχάρων τα οποία μπορούν να εξαχθούν από σοδειές ή κυτταρίνη. Τα πλεονεκτήματα χρήσης της αιθανόλης είναι η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, του διοξειδίου του αζώτου και των σωματιδίων αιθάλης. Αξίζει να σημειωθεί πως με κατάλληλες μετατροπές, είναι δυνατό μια μηχανή εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιεί ως καύσιμο βενζίνη ή diesel να τροφοδοτείται κατά κάποιο ποσοστό με αιθανόλη.

##### 2. Μεθανόλη

Η μεθανόλη παράγεται κυρίως από φυσικό αέριο, αν και είναι δυνατό να παραχθεί και από βιομάζα. Η χρήση της μεθανόλης επίσης εξασφαλίζει μειωμένες εκπομπές ρύπων.

##### 3. Βιοαέριο

Το συγκεκριμένο εναλλακτικό καύσιμο παράγεται από οργανικά παραπροϊόντα καθώς και από καλλιεργούμενη βιομάζα. Συντίθεται από μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και νερό, ενώ μέχρι και σήμερα θεωρείται το βιοκαύσιμο με τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

##### 4. Υδρογόνο - Κυψέλη Καυσίμου

Το υδρογόνο θεωρείται από πολλούς ως το ενεργειακό μέσο του μέλλοντος που θα αντικαταστήσει τα συμβατικά υγρά και αέρια καύσιμα τόσο σε σταθερές εφαρμογές, όσο και

στον τομέα των μεταφορών (ηλεκτρική κίνηση). Το υδρογόνο, μολονότι βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, εμφανίζεται μόνο σε μορφή χημικών ενώσεων και μιγμάτων και απαιτούνται υψηλά ποσά ενέργειας για την παραγωγή του. Η πληθώρα των πηγών υδρογόνου, όπως το νερό ή οι υδρογονάνθρακες, σε συνδυασμό με την ποικιλία των μεθόδων εξαγωγής του από τις χημικές ενώσεις και τα μίγματα στα οποία εμφανίζεται, αποτελούν τους κύριους λόγους για τους οποίους θεωρείται το απόλυτο καύσιμο. Έχει εκφραστεί η άποψη ότι η εισαγωγή του υδρογόνου στον ενεργειακό χάρτη θα οδηγήσει στην εγκαθίδρυση ενός καθεστώτος «ενεργειακής δημοκρατίας» ανά την υφήλιο.

Τα κύρια *πλεονεκτήματα* του υδρογόνου έναντι των συμβατικών μορφών ενέργειας είναι τα εξής:

- Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, 120,7 kJ/g και περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης.
- Κάνει καθαρή καύση. Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται επίσης μερικά οξειδία του αζώτου σε αμελητέο ωστόσο βαθμό. Επομένως, δε συμβάλλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος.
- Συμβάλλει στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των περιορισμένων φυσικών καυσίμων.
- Μπορεί να παρασκευαστεί με πάρα πολλές μεθόδους σε οποιαδήποτε χώρα και σε οποιοδήποτε μέρος κι επομένως μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη αποκεντροποιημένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας.

Από την άλλη, τα κύρια *μειονεκτήματα* του υδρογόνου έναντι των συμβατικών μορφών ενέργειας είναι:

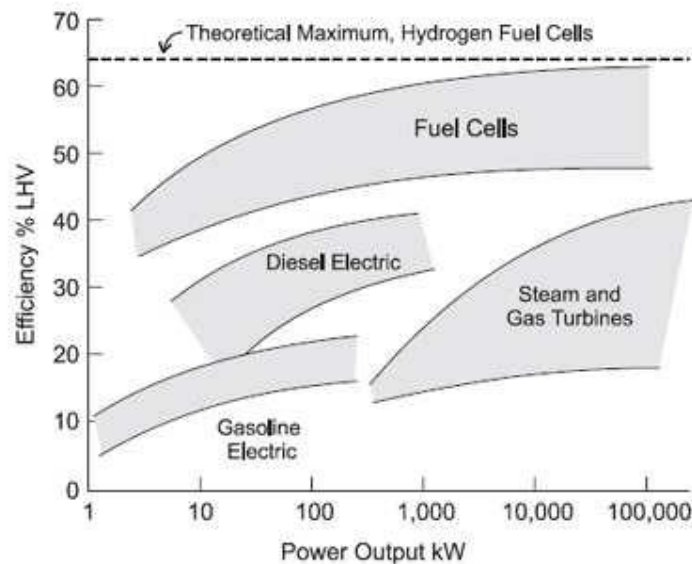
- Προβλήματα αποθήκευσης: δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση.
- Έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής υδρογόνου.
- Σχετικά υψηλή τιμή σε σύγκριση με αυτήν της βενζίνης ή του πετρελαίου.
- Αυξημένο κόστος τεχνολογιών υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου, ηλεκτρολύτες κτλ).

Η τεχνολογία του υδρογόνου εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ένωσης του υδρογόνου με το οξυγόνο για την παραγωγή νερού, δηλαδή την αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Οι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική μέσω αυτής της διαδικασίας ονομάζονται κυψέλες καυσίμου, ενώ οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου από τη διάσπαση μορίων νερού ονομάζονται ηλεκτρολύτες [5].

Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές ηλεκτροχημικής μετατροπής. Ενώνουν ηλεκτροχημικά ένα καύσιμο, που κατά κανόνα είναι υδρογόνο, με ένα οξειδωτικό χωρίς καύση. Η χημική

αντίδραση που πραγματοποιείται μέσα στην κυψέλη οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας και νερού, καθώς προστίθενται το καύσιμο και το οξυγόνο. Η συνεχόμενη εισροή του καυσίμου είναι αναγκαία για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα τα κύρια πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι τα εξής [3]:

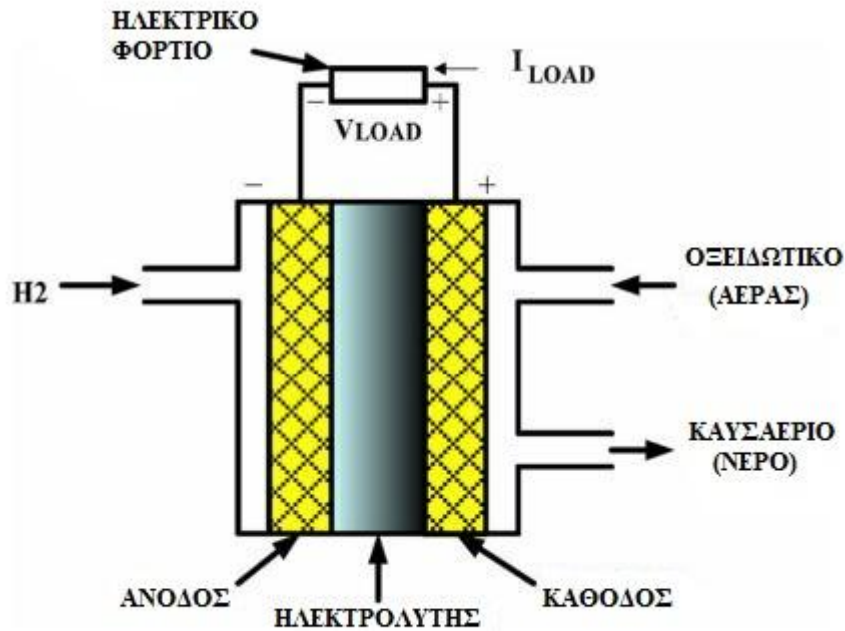
- Αποτελούν πιο καθαρή πηγή ενέργειας.
- Έχουν μεγαλύτερη απόδοση (σχήμα 2.1). Οι κυψέλες καυσίμου δε λειτουργούν σε θερμοδυναμικό κύκλο, επομένως δεν έχουν το αντίστοιχο αυστηρό όριο για την απόδοση, αλλά ισχύει για αυτές το όριο απόδοσης της χημικής αντίδρασης, το οποίο όμως είναι υψηλότερο.
- Είναι πολύ πιο αθόρυβες, καθώς τα κινούμενα μηχανικά μέρη είναι ελάχιστα.
- Είναι πιο αξιόπιστες, για τον ίδιο λόγο.
- Η συντήρησή τους είναι ευκολότερη.
- Λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στις μεταβολές του φορτίου, προτέρημα εξαιρετικά χρήσιμο σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης.



Σχήμα 2.1

Βαθμός απόδοσης διαφόρων πηγών ενέργειας [4]

Ως προς τη δομή, η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια – άνοδο και κάθοδο - τα οποία χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη (σχήμα 2.2). Το στρώμα της ανόδου και της καθόδου αποτελείται από το στρώμα διάχυσης αερίων, που είναι υπεύθυνο για την ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στην επιφάνεια του καταλύτη. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη συμβαίνουν στην επιφάνεια πριν τον ηλεκτρολύτη, η οποία είναι εμπλουτισμένη με έναν καταλύτη – συνήθως λευκόχρυσος ή παλλάδιο.



Σχήμα 2.2

Λειτουργία κυψέλης υδρογόνου [21].

## 2.2 Κατηγορίες και τοπολογίες συστημάτων κίνησης

### 2.2.1 Κατηγοριοποίηση υβριδικών οχημάτων

Σύμφωνα με τον ορισμό που έχει δώσει η διεθνής ηλεκτροτεχνική επιτροπή (International Electrotechnical Commission – IEC), ένα όχημα θεωρείται υβριδικό όταν η ενέργεια πρόωσης προσφέρεται από δύο ή και περισσότερα είδη πηγών, αποθήκευσης ενέργειας ή μετατροπείς, εκ των οποίων τουλάχιστο ένα θα πρέπει να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια [5]. Σύμφωνα με αυτό τον γενικό ορισμό, υπάρχουν πολλά είδη υβριδικών οχημάτων, όπως για παράδειγμα όχημα που να συνδυάζει μηχανή εσωτερικής καύσης και μπαταρίες, μπαταρίες και κυψέλη υδρογόνου, μπαταρίες και υπερπυκνωτές κτλ.

Ωστόσο, ο παραπάνω ορισμός δεν έχει γίνει πλήρως αποδεκτός από το ευρύ κοινωνικό σύνολο. Κατά συνέπεια ακόμα και άνθρωποι της αυτοκινητοβιομηχανίας προτιμούν να θεωρούν ως υβριδικό ένα όχημα το οποίο διαθέτει μηχανή εσωτερικής καύσης καθώς και ηλεκτρικό κινητήρα.

Ανάλογα με το ποσοστό εμπλοκής του ηλεκτρικού συστήματος στο σύστημα πρόωσης του αυτοκινήτου, τα υβριδικά οχήματα κατηγοριοποιούνται σε [6]:

- Πλήρως υβριδικά (Full Hybrid)
- Ελαφρώς υβριδικά (Mild Hybrid)
- Υβριδικής υποβοήθησης (Assist Hybrid)

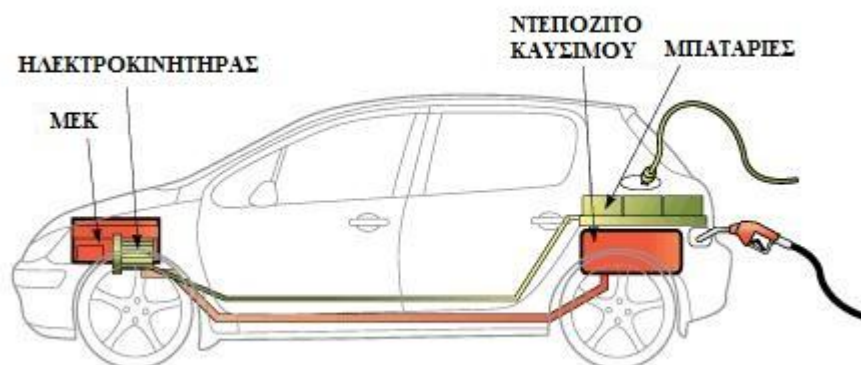


Τα οχήματα της κατηγορίας πλήρως υβριδικά, έχουν μόνιμα το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης σε λειτουργία και συνήθως έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο σύστημα και αποκλειστικά για την κίνηση του οχήματος.

Τα οχήματα της κατηγορίας ελαφρώς υβριδικά χρησιμοποιούν το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης επικουρικά για συνθήκες αυξημένης απαίτησης ροπής και το ποσοστό εμπλοκής του συστήματος ηλεκτροκίνησης κυμαίνεται από 5-20% της ολικής ροπής.

Τα οχήματα υβριδικής υποβοήθησης χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο το θερμικό κινητήρα για την πρόωσή τους με την προσθήκη ενός ηλεκτροκινητήρα στο συμβατικό σύστημα μετάδοσης κίνησης για την αύξηση της συνολικής ροπής. Ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν χρησιμοποιείται μόνο όταν δεν ενδείκνυται η χρήση της ΜΕΚ, αλλά και σε περιπτώσεις έντονης επιτάχυνσης όπου ο οδηγός απαιτεί πρόσθετη ισχύ. Βασική διαφορά αυτών των οχημάτων σε σχέση με τα πλήρως υβριδικά είναι ότι δεν μπορούν να επιτύχουν λειτουργία αμιγώς ηλεκτροκίνητου οχήματος, ωστόσο εφόσον δεν απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα από πλευράς μπαταριών το μέγεθος, το κόστος και το βάρος του συστήματος μειώνονται

Μια ακόμη κατηγορία υβριδικών οχημάτων συνιστούν αυτά τα οποία φορτίζονται συμπληρωματικά και από εξωτερική πηγή ενέργειας. Καλούνται plug-in Hybrid Electric Vehicles ή PHEVs (σχήμα 2.3). Το δίκτυο χαμηλής τάσης αποτελεί την συνηθέστερη πηγή εξωτερικής φόρτισης. Αυτού του τύπου τα οχήματα, συνδυάζουν χαρακτηριστικά των κλασικών υβριδικών οχημάτων – όπως το γεγονός ότι διαθέτουν μηχανή εσωτερικής καύσης και ηλεκτρικό κινητήρα – με χαρακτηριστικά των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicles – EVs), καθώς διαθέτουν και πρίζα για την σύνδεσή τους με το τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υβριδικά οχήματα τύπου plug-in λόγω της προαναφερθείσας δομής τους, καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις με την χρήση μόνο του ηλεκτροκινητήρα τους σε σχέση με τα απλά υβριδικά οχήματα, δηλαδή έχουν μεγαλύτερη αυτονομία ηλεκτροκίνησης (All Electric Range – AER). Πρόσθετα πλεονεκτήματα είναι η άνεση της κατ'οίκον φόρτισης και η χαμηλότερη συχνότητα προμήθειας καυσίμων από τα πρατήρια. Επιπλέον μπορούν να αποτελέσουν ενεργειακή εφεδρεία σε περίπτωση ανάγκης για την τροφοδότηση οικιακών φορτίων και να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές τύπου οχήματος-ηλεκτρικού δικτύου (Vehicle-to-Grid ή V2G) [8,9].

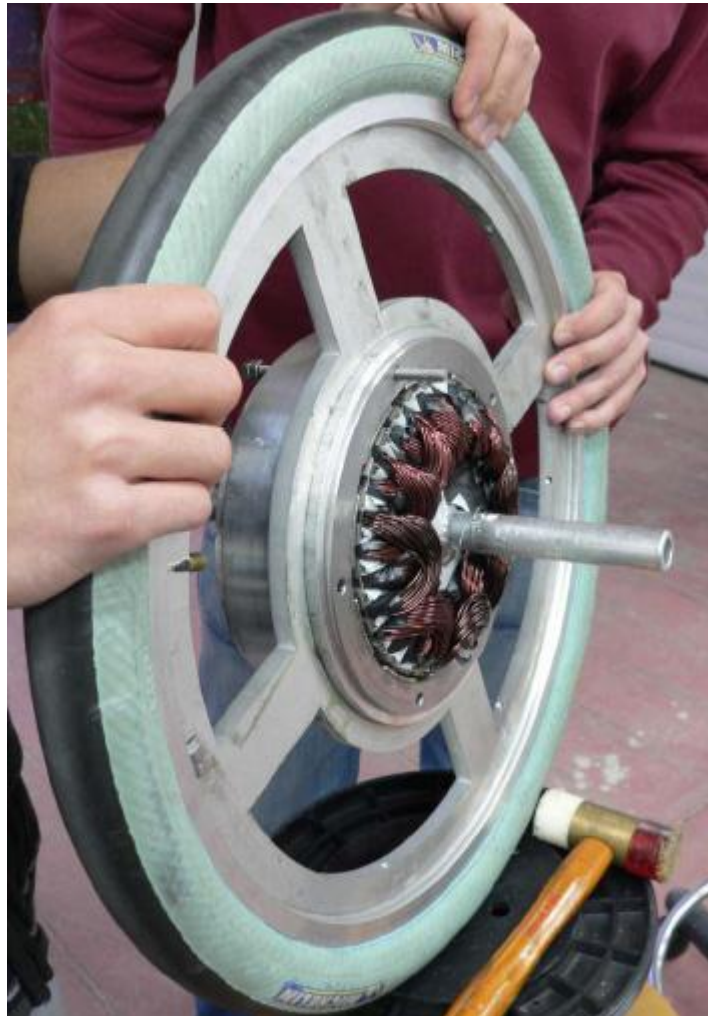


Σχήμα 2.3

Εσωτερική δομή υβριδικού οχήματος τύπου Plug-in [11]

Μια ακόμα ξεχωριστή κατηγορία υβριδικών οχημάτων χρησιμοποιεί ξεχωριστούς ηλεκτρικούς κινητήρες σε καθένα τροχό (in-wheel motor). Η χρήση ξεχωριστού ηλεκτροκινητήρα για την περιστροφή καθενός τροχού προσφέρει την δυνατότητα μεμονωμένης ρύθμισης της ροπής και της πέδησης κάθε τροχού χωρίς την ανάγκη ύπαρξης εξεζητημένου συστήματος μετάδοσης, άξονα μετάδοσης κίνησης και άλλων πολύπλοκων μηχανολογικών εξαρτημάτων [54]. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται ο ηλεκτροκινητήρας τύπου in-wheel motor που χρησιμοποιεί η ομάδα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στον διαγωνισμό Shell Eco Marathon® για τις ανάγκες πρόωσης του πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος “Προμηθέας”. Οι περισσότερες συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές δεν είναι κατάλληλες για χρήση ως in-wheel motor, λόγω χαμηλής πυκνότητας ροπής και κινδύνου υπερφόρτισης [55]. Από έναν ηλεκτροκινητήρα απαιτούνται οι ακόλουθες προδιαγραφές ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί σε τέτοιες εφαρμογές:

- Υψηλή ροπή σε χαμηλή ταχύτητα.
- Χαμηλό βάρος, ώστε να μην επηρεάζει αρνητικά την πρόσφυση του οχήματος στο οδόστρωμα.
- Μεγάλη πυκνότητα ροπής ανά μονάδα μάζας και μεγάλη πυκνότητα ροπής ανά μονάδα όγκου [56].



**Εικόνα 2.1**

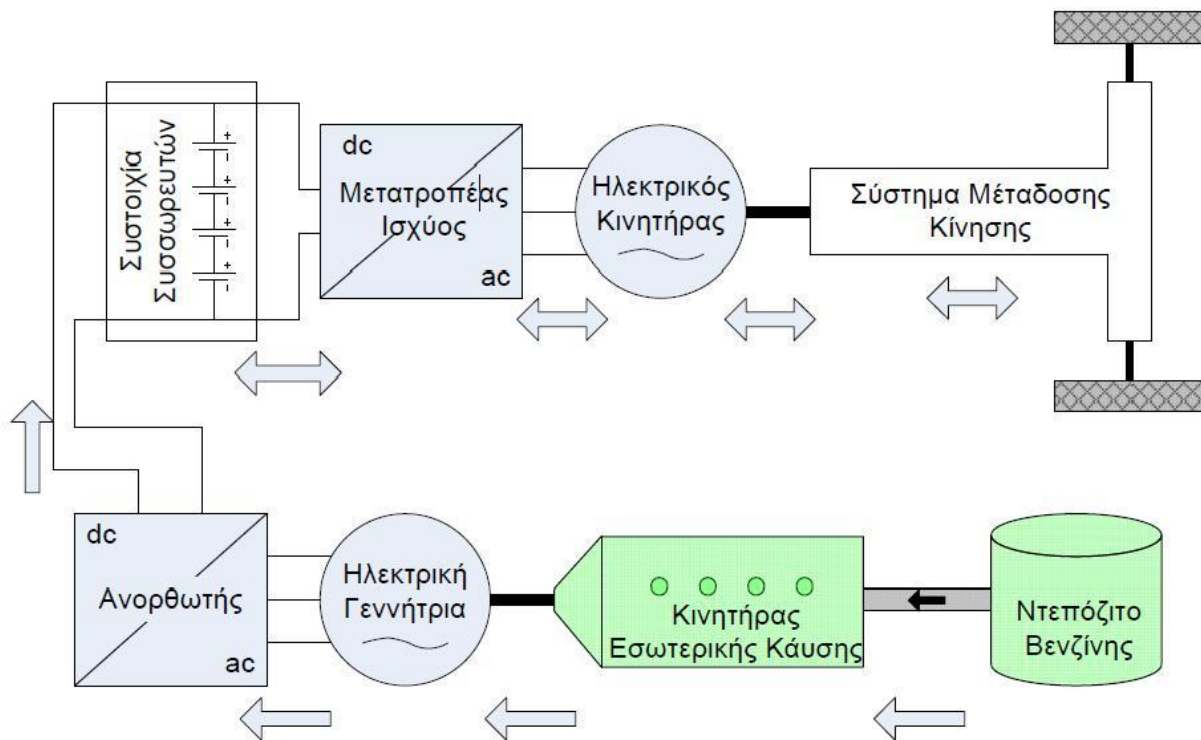
*Δεκαπολική σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών-ενσωματωμένη στον τροχό (in-wheel motor) που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για το ηλεκτρικό όχημα “Προμηθέας” [6].*

## 2.2.2 Τοπολογίες υβριδικών οχημάτων

Τα υβριδικά οχήματα μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο ζεύξης του ηλεκτρικού συστήματος και του συστήματος με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης [7]. Έτσι διακρίνονται οι πιο κάτω κατηγορίες υβριδικών οχημάτων:

- Σειριακό υβριδικό όχημα (Series Hybrid Electric Vehicle - SHEV).
- Παράλληλο υβριδικό όχημα (Parallel Hybrid Electric Vehicle - PHEV).
- Σειριακό/παράλληλο υβριδικό όχημα (Series/Parallel Hybrid Electric Vehicle - S/PHEV).

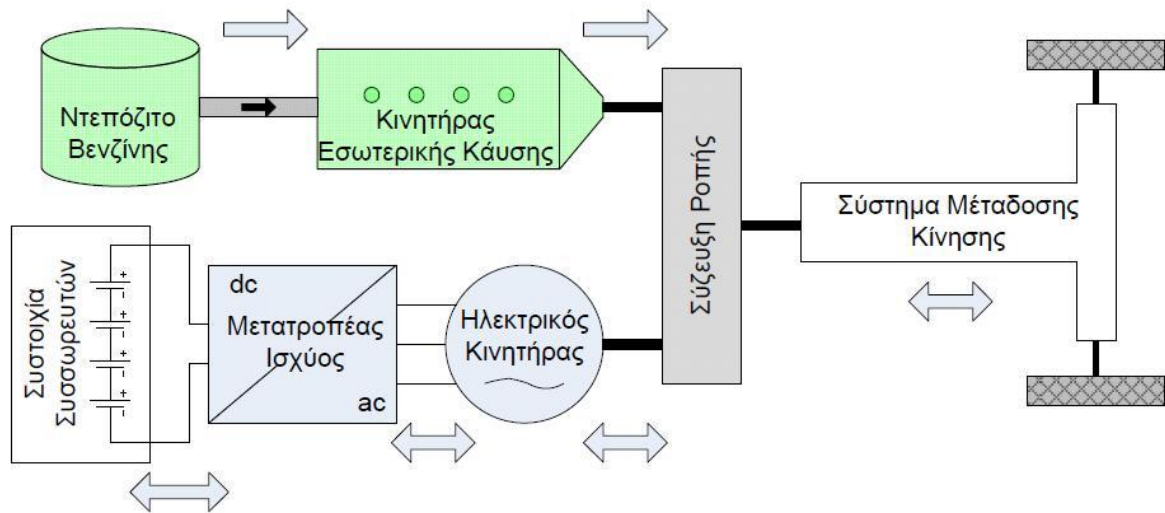
Στο σειριακό υβριδικό όχημα (SHEV) το σύστημα με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης ενώνεται σε σειρά με το ηλεκτρικό σύστημα. Στο SHEV η κίνηση στους τροχούς μεταδίδεται μόνο από τον ηλεκτροκινητήρα. Στην ουσία το SHEV λειτουργεί όπως ένα αποκλειστικά ηλεκτρικό όχημα, στο οποίο όμως η συστοιχία συσσωρευτών φορτίζεται μέσω ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους το οποίο περιστρέφεται από ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης, ενώ η παραγόμενη εναλλασσόμενη ηλεκτρική ισχύς ανορθώνεται από ένα ανορθωτή και περνά στον μετατροπέα ισχύος. Γενικά η μηχανή εσωτερικής καύσης λειτουργεί σε σημείο βέλτιστης απόδοσης οδηγώντας την γεννήτρια και φορτίζοντας τις μπαταρίες [15,16]. Όταν το επίπεδο φόρτισης (State Of Charge – SOC) των μπαταριών πέσει κάτω από μια προαποφασισμένη ελάχιστη τιμή, ο θερμικός κινητήρας τίθεται σε λειτουργία για να φορτίσει τις μπαταρίες. Η μηχανή εσωτερικής καύσης παύει να λειτουργεί όταν τα επίπεδα φόρτισης φτάσουν ένα επιθυμητό μέγιστο. Το ζεύγος μηχανή εσωτερικής καύσης/γεννήτρια συνήθως ρυθμίζεται ώστε να διατηρεί το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών γύρω στο 65-75% [16]. Κρίνεται σκόπιμο να υπογραμμιστεί ότι δεν υπάρχει μηχανική σύνδεση μεταξύ της μηχανής εσωτερικής καύσης και των τροχών. Πλεονέκτημα της εν σειρά διαμόρφωσης αποτελεί το γεγονός ότι στο θερμικό κινητήρα δύναται να επιτευχθεί βέλτιστος συνδυασμός ροπής και ταχύτητας πετυχαίνοντας χαμηλή κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο υπάρχουν δύο στάδια μετατροπής της ενέργειας ανάμεσα στους τροχούς και το θερμικό κινητήρα – από την ΜΕΚ στην γεννήτρια και από την γεννήτρια στον ηλεκτροκινητήρα –και κατά συνέπεια ένα κομμάτι της ενέργειας μετατρέπεται σε απώλειες. Η χρήση των σειριακών υβριδικών οχημάτων κρίνεται πιο κατάλληλο για οδήγηση στην πόλη. Το σχηματικό διάγραμμα του SHEV παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.4

Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας Σειριακού Υβριδικού Ηλεκτρικού Οχήματος (SHEV).

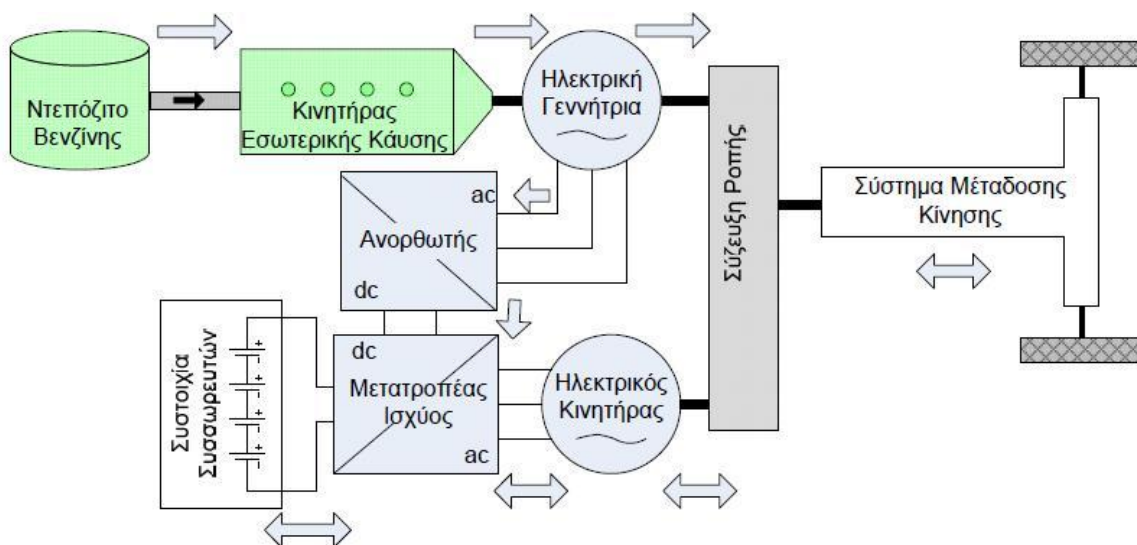
Στο παράλληλο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (PHEV) το σύστημα με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης ενώνεται παράλληλα με το ηλεκτρικό σύστημα. Η κίνηση στους τροχούς μεταδίδεται και από τους δύο κινητήρες. Στο PHEV απαιτείται να γίνει σύζευξη της ροπής του ηλεκτροκινητήρα με την ροπή του κινητήρα εσωτερικής καύσης ούτως ώστε στο σύστημα μετάδοσης κίνηση να μεταφέρεται ροπή και από τις δύο μηχανές όπως φαίνεται στο κάτωθι σχήμα. Υπάρχουν πολλοί τρόποι ώστε να ρυθμιστεί η χρήση του βενζινοκινητήρα και του ηλεκτροκινητήρα. Η πιο συνηθισμένη στρατηγική είναι η αποκλειστική χρήση του ηλεκτρικού κινητήρα στις χαμηλές ταχύτητες, καθώς είναι πιο αποδοτικός από το θερμικό κινητήρα, και στις μεγαλύτερες ταχύτητες η αποκλειστική χρήση της μηχανής εσωτερικής καύσης [12]. Όταν λειτουργεί μόνο η μηχανή εσωτερικής καύσης, ο ηλεκτρικό κινητήρας δύναται να λειτουργήσει ως γεννήτρια για να φορτίσει τις μπαταρίες του οχήματος. Τα παράλληλα υβριδικά οχήματα μπορούν επίσης να ενσωματώνουν κιβώτιο ταχυτήτων συνεχώς μεταβαλλόμενων σχέσεων (Continuously Variable Transmission - CVT), αντί του κλασικό κιβώτιο ταχυτήτων ορισμένου βήματος. Με αυτή την τεχνική γίνεται επιλογή των πλέον αποδοτικών σημείων λειτουργίας για δεδομένη ροπή του θερμικού κινητήρα συνεχώς και με πλήρη ελευθερία [13,14]. Η χρήση κιβωτίου τύπου CVT πετυχαίνει κατά αυτόν τον τρόπο χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου λόγω της εγγενώς αποδοτικότερης λειτουργίας. Ενέργεια μπορεί επίσης να ανακτηθεί μέσω της αναγεννητικής πέδησης (regenerative braking). Το πλεονέκτημα της παράλληλης διαμόρφωσης συγκριτικά με την εν σειρά είναι ότι αποτελείται από λιγότερα στάδια μετατροπής της ενέργειας και έτσι χάνεται μικρότερο ποσοστό ενέργειας κατά την ανάκτηση της μέσω της πέδησης.



Σχήμα 2.5

Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας Παράλληλου Υβριδικού Ηλεκτρικού Οχήματος (PHEV).

Στο σειριακό/παράλληλο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (S/PHEV) το σύστημα με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης ενώνεται τόσο σειριακά όσο και παράλληλα με το ηλεκτρικό σύστημα. Υπάρχει μια επιπλέον μηχανική σύνδεση μεταξύ της γεννήτριας και του ηλεκτροκινητήρα σε σχέση με την σειριακή διαμόρφωση και μια επιπλέον γεννήτρια σε σχέση με το παράλληλο υβριδικό όχημα. Με αυτή την εσωτερική δομή είναι δυνατό να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα τόσο του σειριακού όσο και του παράλληλου υβριδικού οχήματος. Σημειώνεται ωστόσο, ότι το σειριακό/παράλληλο υβριδικό όχημα είναι πιο περίπλοκο και πιο ακριβό σε σχέση με το παράλληλο και το σειριακό. Υπάρχουν πολλοί πιθανοί συνδυασμοί του θερμικού κινητήρα και του ηλεκτροκινητήρα. Οι κυριότεροι είναι δύο, εκ των οποίων ο ένας έχει κυρίως ηλεκτρικό χαρακτήρα (electric-intensive) ενώ ο δεύτερος κάνει πιο εκτεταμένη χρήση της ΜΕΚ (engine intensive). Ένα κοινό χαρακτηριστικό λειτουργίας και για τους δύο προαναφερθέντες συνδυασμούς, είναι ότι κατά την εκκίνηση του οχήματος χρησιμοποιείται μόνο ο ηλεκτροκινητήρας με την ΜΕΚ να παραμένει ανενεργή [17,18].



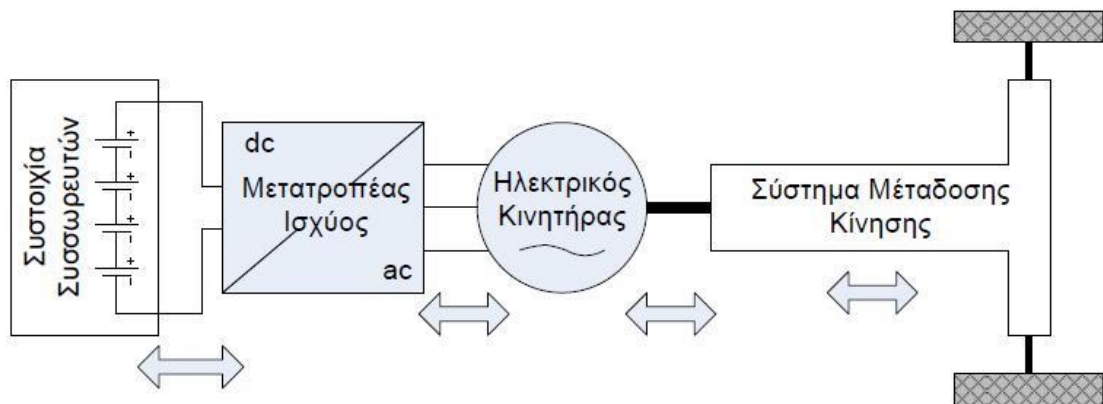
Σχήμα 2.6

Σχηματικό Διάγραμμα λειτουργίας Παράλληλου Υβριδικού Ηλεκτρικού Οχήματος (PHEV).

### 2.2.3 Κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών οχημάτων

Για λόγους πληρότητας και κάλυψης του συνόλου των σύγχρονων λύσεων σε επίπεδο ηλεκτροκίνησης, κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύντομη αναφορά και στα κλασσικά ηλεκτρικά οχήματα (EVs). Τα ηλεκτρικά οχήματα, όπως φαίνεται και στο σχήμα, διαθέτουν μόνο ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος τροφοδοτείται κατάλληλα από το μετατροπέα ισχύος ο οποίος μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ συνεχούς ρεύματος που του παρέχει οι συσσωρευτές ή η κυψέλη υδρογόνου, σε κατάλληλες κυματομορφές τάσης και ρεύματος ώστε να οδηγηθεί επιθυμητά ο ηλεκτρικός κινητήρας. Ανάλογα από την πηγή ηλεκτρικής ισχύος του οχήματος διακρίνονται σε 2 κατηγορίες:

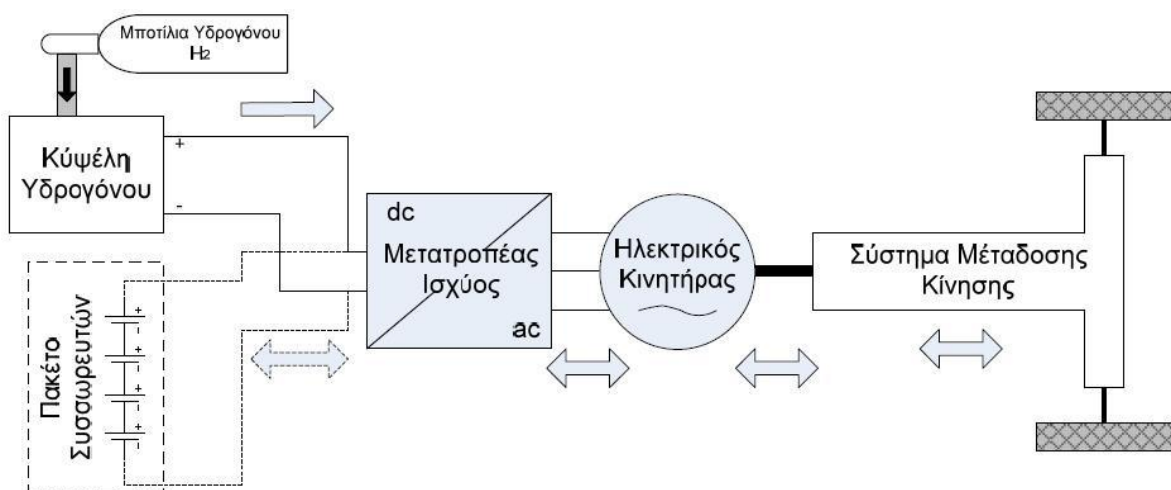
- Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (EVs).
- Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEVs).



Σχήμα 2.7

Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ηλεκτρικού οχήματος με συσσωρευτές.

Στα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη υδρογόνου δύναται να συνυπάρχει και συστοιχία συσσωρευτών [10] όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.

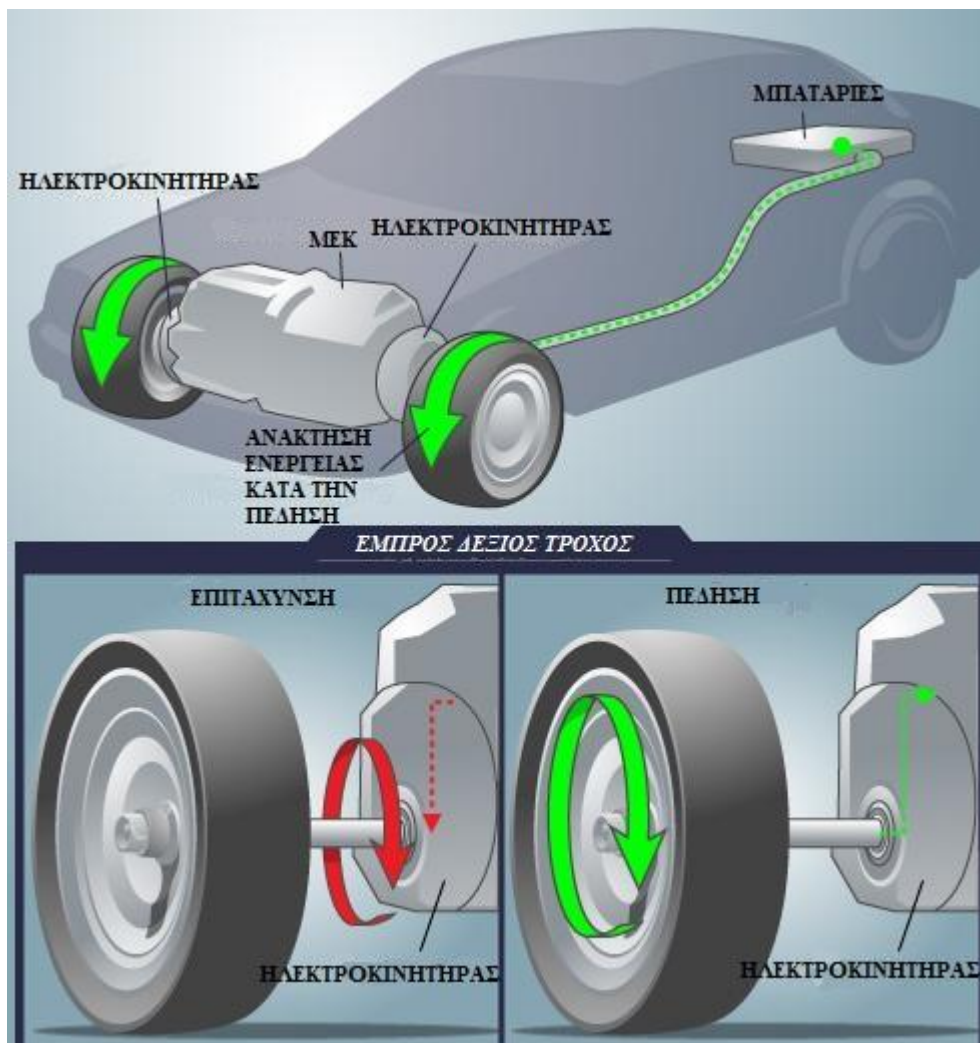


Σχήμα 2.8

Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλη υδρογόνου.

## 2.2.4 Η λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης

Η αναγεννητική πέδηση (regenerative braking) είναι ένας μηχανισμός ανάκτησης ενέργειας ο οποίος επιβραδύνει ένα όχημα, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε κάποια άλλη μορφή που είτε χρησιμοποιείται άμεσα, είτε αποθηκεύεται για μετέπειτα χρήση. Στο συμβατικό σύστημα πέδησης η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω της τριβής των αναλώσιμων μερών των φρένων (τακάκια ή φερμουί) με τους τροχούς, και κατά συνέπεια σπαταλείται και δεν είναι εκμεταλλεύσιμη. Η πλέον διαδεδομένη μορφή αναγεννητικής πέδησης περιλαμβάνει την χρήση ενός ηλεκτροκινητήρα ως γεννήτρια (σχήμα 2.9). Στα υβριδικά και τα ηλεκτρικά οχήματα η ενέργεια που λαμβάνεται μέσω της αναγεννητικής πέδησης αποθηκεύεται στο εκάστοτε σύστημα αποθήκευσης το οποίο γενικά αποτελείται από ένα σύνολο συσσωρευτών. Η ενέργεια δύναται επίσης να αποθηκευτεί, υπό μηχανική μορφή σε υδραυλικές διατάξεις του οχήματος καθώς και σαν κινητική με την χρήση περιστρεφόμενων βολάν[19].



Σχήμα 2.9

Λειτουργία αναγεννητικής πέδησης [19].

Τα υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα εκτός από την αναγεννητική πέδηση, χρησιμοποιούν και την συμβατική πέδηση τριβής για τους εξής λόγους [19]:

- Η αναγεννητική πέδηση εξασθενεί σε μικρότερες ταχύτητες, κατά συνέπεια κρίνεται απαραίτητο να υπάρχει και το συμβατικό σύστημα πέδησης για την πλήρη ακινητοποίηση του οχήματος.
- Το συμβατικό σύστημα πέδησης αποτελεί απαραίτητη εφεδρεία σε περίπτωση βλάβης του συστήματος αναγεννητικής πέδησης.
- Στα περισσότερα οχήματα το σύστημα της αναγεννητικής πέδησης εφαρμόζεται μόνο στο ένα ζεύγος τροχών – μπροστά ή πίσω – ανάλογα με το ποιο ζεύγος τροχών είναι συνδεδεμένο με τον ηλεκτρικό κινητήρα. Για να είναι ελεγχόμενο συνολικά το φρενάρισμα του οχήματος, το άλλο ζεύγος τροχών εφοδιάζεται με το σύστημα της πέδησης μέσω τριβής.
- Σε περίπτωση που το εκάστοτε σύστημα αποθήκευσης είναι πλήρως φορτισμένο χρησιμοποιείται η συμβατική πέδηση για την απορρόφηση της επιπλέον ενέργειας.
- Σε ακραίες περιπτώσεις όπου απαιτείται έντονο φρενάρισμα η χρήση και του συμβατικού συστήματος πέδησης εξασφαλίζει μεγαλύτερη συνολική δύναμη πέδησης και κατ' επέκταση μικρότερο χρόνο ακινητοποίησης.



## 3 Σύστημα ηλεκτροκίνησης

---

### 3.1 Γενικά

### 3.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

#### 3.2.1 Γενικά

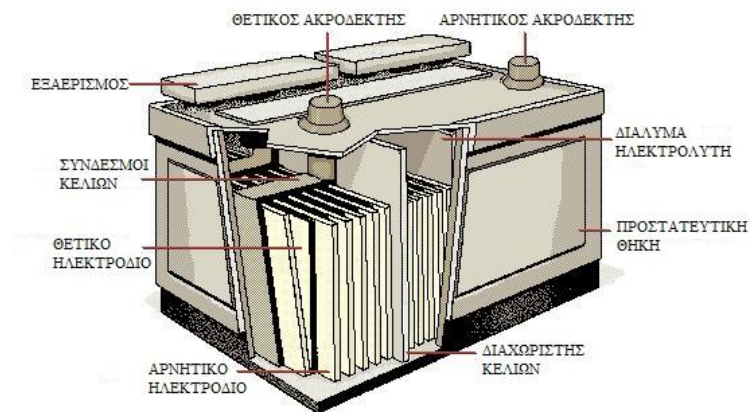
Τα υβριδικά οχήματα δεν εξαρτώνται μόνο από το καύσιμο την μηχανή εσωτερικής καύσης τους και γι' αυτό το λόγω παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα όπως μειωμένους ρύπους και αυξημένη απόδοση. Η απόδοση καθώς και η ηλεκτρική αυτονομία (AER) των υβριδικών οχημάτων επηρεάζονται άμεσα από την ικανότητα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems – ESS) που διαθέτουν., τα οποία δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας αλλά και για την δυνατότητά τους να απελευθερώνουν αυτή την ενέργεια άμεσα ανάλογα με το ζητούμενο φορτίο [20]. Σημαντικές παράμετροι των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας η πυκνότητα ενέργειας, η πυκνότητα ισχύος, η διάρκεια ζωής και το κόστος (κτίσης και συντήρησης) τους. Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτροκίνησης χρησιμοποιούν κυρίως μπαταρίες και υπερπυκνωτές (UltraCapacitors – UCs ή SuperCapacitors – SCs). Οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται ευρέως στην ηλεκτρική κίνηση καθώς προσφέρουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και είναι ιδιαίτερα αξιόπιστες [20]. Οι υπερπυκνωτές γενικά διαθέτουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος, μεγάλο χρόνο ζωής, υψηλή απόδοση και προσφέρουν μικρό χρόνο φόρτισης και εκφόρτισης [22,23].

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι σύγχρονες τεχνολογίες μπαταριών και εξετάζονται οι σύγχρονες λύσεις όσον αφορά στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο ηλεκτρικής κίνησης.

#### 3.2.2 Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος

Ο μολύβδος συμπεριφέρεται σαν το ηλεκτραρνητικό υλικό της μπαταρίας, το οξείδιο του μολύβδου σαν το ηλεκτροθετικό και το διάλυμα θειικού οξέος αποτελεί τον ηλεκτρολύτη σε αυτού του τύπου την μπαταρία (σχήμα 3.1). Κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας, το ηλεκτραρνητικό και το ηλεκτροθετικό υλικό μετατρέπονται σε θειούχο μολύβδο [24].

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος (Lead-Acid batteries), παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές ηλεκτρική κίνησης. Είναι διαθέσιμες σε μεγάλες ποσότητες και κατ' επέκταση αποτελούν μια πηγή ενέργειας χαμηλού κόστους. Επίσης πρόκειται για μια ώριμη πλέον τεχνολογία καθώς χρησιμοποιείται εκτεταμένα εδώ και 50 χρόνια [25]. Ωστόσο οι εν λόγω μπαταρίες δεν είναι κατάλληλες για αποφορτίσεις κάτω του 20% της ονομαστικής τους χωρητικότητας, όταν λειτουργούν σε συνθήκες βαθιάς εκφόρτισης έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής. Ακόμα, οι πυκνότητες ισχύος και ενέργειας τους είναι χαμηλές λόγω του βάρους των συλλεκτών μολύβδου που διαθέτουν [26,27], ωστόσο έρευνες έχουν δείξει ότι η πυκνότητα ενέργειας δύναται να βελτιωθεί με την χρήση ελαφρύτερων, μη-διαβρωτικών συλλεκτών [28].



Σχήμα 3.1

Δομή μπαταρίας Μολύβδου-Οξέος [11].

### 3.2.3 Μπαταρίες Νικελίου-Μετάλλου Υδριδίου

Οι μπαταρίες Νικελίου-Μετάλλου Υδριδίου (Nickel-Metal Hydride ή NiMH) χρησιμοποιούν σαν ηλεκτρολύτη ένα αλκαλικό διάλυμα. Το θετικό ηλεκτρόδιο συνίσταται από υδροξείδιο του νικελίου ενώ το αρνητικό από μια επεξεργασμένη αλόη από βανάδιο, τιτάνιο, νικέλιο και άλλα μέταλλα.

Η πυκνότητα ενέργειας τους είναι διπλάσια σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ενώ είναι ακίνδυνες για το περιβάλλον και ανακυκλώσιμες [29]. Η λειτουργία τους είναι ασφαλής ακόμα και σε υψηλή τάση, ενώ κάποια ακόμα πλεονεκτήματά τους αποτελούν η μεγάλη διάρκεια ζωής, το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών κάτω από τις οποίες λειτουργούν χωρίς πρόβλημα καθώς και η αντοχή σε φορτίσεις/εκφορτίσεις [30]. Ωστόσο, εάν υποστούν διαδοχικές εκφορτίσεις με μεγάλο ρεύμα εκφόρτισης, ο χρόνος ζωής τους μειώνεται στους 200-300 κύκλους φόρτισης. Η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται με αποφορτίσεις μέχρι το 20-50% της ονομαστικής τους χωρητικότητας [31]. Το φαινόμενο μνήμης (memory effect) στις μπαταρίες νικελίου-μετάλλου υδριδίου μειώνει την διαθέσιμη προς το όχημα ισχύ καθώς μειώνει το συνολικό διαθέσιμο επίπεδο φόρτισης κάτω από το 100%.



Εικόνα 3.1

Οι μπαταρίες NiMH που χρησιμοποιεί το Toyota Prius® [32].

### 3.2.4 Μπαταρίες Νικελίου-Ψευδαργύρου

Οι μπαταρίες Νικελίου-Ψευδαργύρου (Nickel-Zinc ή Ni-Zn) παρουσιάζουν υψηλές πυκνότητες ισχύος και ενέργειας, κατασκευάζονται από υλικά χαμηλού κόστους, είναι φιλικές προς το περιβάλλον και δύνανται να υφίστανται βαθιές εκφορτίσεις χωρίς μεγάλες επιπτώσεις στην διάρκεια ζωής τους. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από τους  $-10^{\circ}\text{C}$  έως και τους  $50^{\circ}\text{C}$ , κατά συνέπεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς πρόβλημα υπό δύσκολες συνθήκες. Ωστόσο η διάρκεια ζωής τους είναι πολύ περιορισμένη λόγω της γρήγορης ανάπτυξης δενδριτών, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης [37].

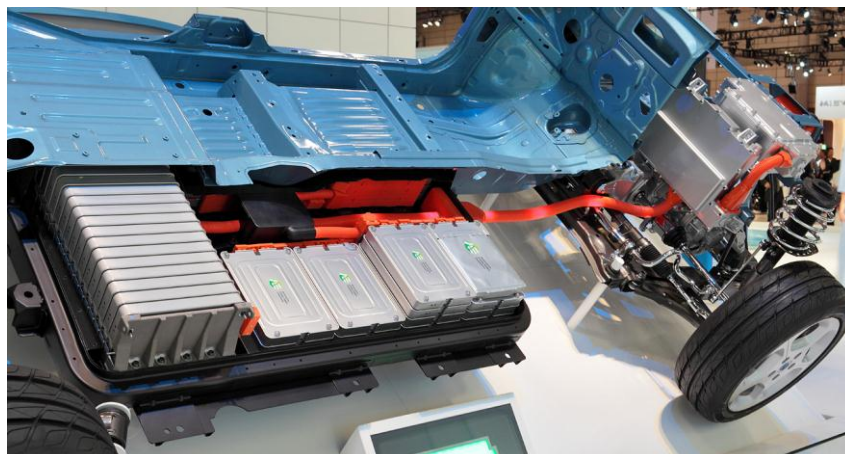
### 3.2.5 Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου

Οι μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (Nickel-Cadmium ή Ni-Cd) έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και δύνανται να εκφορτιστούν πλήρως δίχως να υποστούν κάποια βλάβη. Η πυκνότητα ενέργειας τους κυμαίνεται στις 55 Wh/kg. Είναι ανακυκλώσιμες, ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι εφόσον το κάδμιο ανήκει στην κατηγορία των βαρέων μετάλλων, επιβάλλεται να απορριφθεί με σωστό τρόπο ώστε να μην αποτελέσει πηγή μόλυνσης του περιβάλλοντος. Ένα ακόμη μειονέκτημα των μπαταριών Ni-Cd είναι το κόστος τους, το οποίο τις καθιστά ασύμφορες για εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης. Ενδεικτικά, το κόστος εγκατάστασης τέτοιων μπαταριών σε ένα τυπικό ηλεκτρικό όχημα ανέρχεται στα 15000€ [38,39].

### 3.2.6 Μπαταρίες Λιθίου-Ιόντων

Το θετικό ηλεκτρόδιο των μπαταριών Λιθίου-ιόντων (Lithium-ion ή Li-ion) είναι κατασκευασμένο από οξειδωμένο κοβάλτιο ενώ το αρνητικό ηλεκτρόδιο κατασκευάζεται από άνθρακα. Σαν ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται άλας λιθίου μέσα σε οργανικό διαλύτη.

Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων έχουν επιδείξει υψηλές επιδόσεις στον τομέα των φορητών ηλεκτρονικών καθώς και ιατρικών συσκευών [33]. Αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα των μπαταριών λιθίου-ιόντων αποτελούν το όχι τόσο έντονο φαινόμενο μνήμης (memory effect), η υψηλή πυκνότητα ισχύος της τάξης των 300W/kg, η υψηλή πυκνότητα ενέργειας της τάξης των 100Wh/kg και η μεγάλη διάρκεια ζωής που κυμαίνεται περίπου στους 1000 κύκλους φόρτισης [34]. Τα παραπάνω εξαιρετικά χαρακτηριστικά καθιστούν δυνατή την σταδιακή αντικατάσταση των μπαταριών νικελίου-μετάλλου υδριδίου από τις μπαταρίες λιθίου ιόντων σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης. Σε αυτό συνεισφέρει και το υψηλότερο κόστος των μπαταριών NiMH (~1100€/kWh) σε σχέση με τις μπαταρίες Li-ion (~650€/kWh), το οποίο αναμένεται να παραμείνει σε υψηλά επίπεδα καθώς η τιμή του νικελίου αναμένεται να έχει ανοδική πορεία τα επόμενα χρόνια [35].

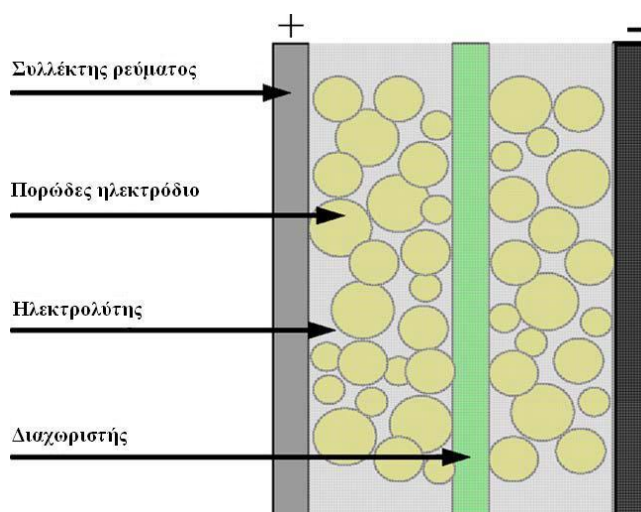


**Εικόνα 3.2**

*Οι μπαταρίες Li-ion που χρησιμοποιεί το Nissan Leaf® [36].*

### 3.2.7 Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές αποθηκεύουν ενέργεια διαχωρίζοντας θετικά και αρνητικά φορτία. Τα φορτία αποθηκεύονται σε δύο παράλληλες πλάκες που βρίσκονται εκατέρωθεν ενός μονωτή. Δεν υπάρχουν χημικές προσμίξεις στα ηλεκτρόδια και κατά συνέπεια οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής αλλά χαμηλή πυκνότητα ενέργειας. Ερευνητές εξετάζουν την επιφάνεια των ηλεκτροδίων ώστε να βελτιωθούν τα επίπεδα πυκνότητας ενέργειάς τους [43]. Η δομή ενός υπερπυκνωτή φαίνεται στο σχήμα 3.2 [40]. Το εφαρμοζόμενο δυναμικό στο θετικό ηλεκτρόδιο ελκύει τα αρνητικά ιόντα στον ηλεκτρολύτη, ενώ το δυναμικό στο αρνητικό ηλεκτρόδιο ελκύει τα θετικά ιόντα.



**Σχήμα 3.2**

*Εσωτερική δομή υπερπυκνωτή [21].*

Η πυκνότητα ισχύος των υπερπυκνωτών είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή των μπαταριών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα φορτία αποθηκεύονται φυσικώς στα ηλεκτρόδια. Επιπλέον, η χαμηλή εσωτερική τους αντίσταση προσφέρει υψηλή απόδοση αλλά δύναται επίσης να έχει σαν αποτέλεσμα υπερβολικά μεγάλα ρεύματα εξόδου όταν τα επίπεδα φόρτισης τους είναι πολύ χαμηλά [41,42]. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των υπερπυκνωτών είναι ότι η θερμοκρασία τους είναι

ανάλογη του επιπέδου φόρτισης τους και συνεπώς η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών διεπαφής (interface electronics) επιτρέπει στους υπερπυκνωτές να λειτουργούν μέσα σε ένα μεγάλο εύρος τιμών τάσης. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν βοηθητική αποθήκευση ενέργειας στα υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα. Κατά την οδήγηση στην πόλη όπου πραγματοποιούνται πολλές στάσεις και εκκινήσεις η συνολική απαιτούμενη ισχύς είναι σχετικά χαμηλή. Οι υπερπυκνωτές είναι κατάλληλοι για την απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας από την αναγεννητική πέδηση και δύνανται να απελευθερώνουν άμεσα ενέργεια ανάλογα με την ζήτηση λόγω των γρήγορων ρυθμών φόρτισης και εκφόρτισης που προσφέρουν.

Στον πίνακα 3.1 γίνεται μια ενδεικτική σύγκριση ενός πακέτου μπαταριών με ένα πακέτο υπερπυκνωτών, και τα δύο είναι αρκετά δημοφιλή στην αγορά ηλεκτροκίνησης. Οι μπαταρίες τύπου ZEBRA είναι κατασκευασμένες από άλατα, κεραμικά υλικά και νικέλιο ενώ οι υπερπυκνωτές τύπου Thunderpack χρησιμοποιούν την σειρά προϊόντων της Maxwell, BOOSTCAP [44]. Διαπιστώνεται πρωτίστως το γεγονός ότι οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος και οι μπαταρίες μεγάλη πυκνότητα ενέργειας. Επίσης διαθέτουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και έχουν μικρό κόστος συντήρησης που μακροπρόθεσμα συνθέτουν μια οικονομικά αποδοτική λύση. Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, ο συνδυασμός μπαταριών και υπερπυκνωτών εξασφαλίζει στα οχήματα τα πλεονεκτήματα και των δύο μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

	ZEBRA Battery pack	Thunderpack II UC pack
Διαθέσιμη ενέργεια (kWh)	23,5	0,3
Μέγιστο Ρεύμα εκφόρτισης (A)	224	400
Πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg)	113	4
Πυκνότητα ισχύος (W/kg)	174	1500
Διάρκεια ζωής (έτη)	2,5-5	10-12
Κόστος συστήματος (€/kW)	400	100
Κόστος διάρκειας ζωής (€/kW)	1200	100

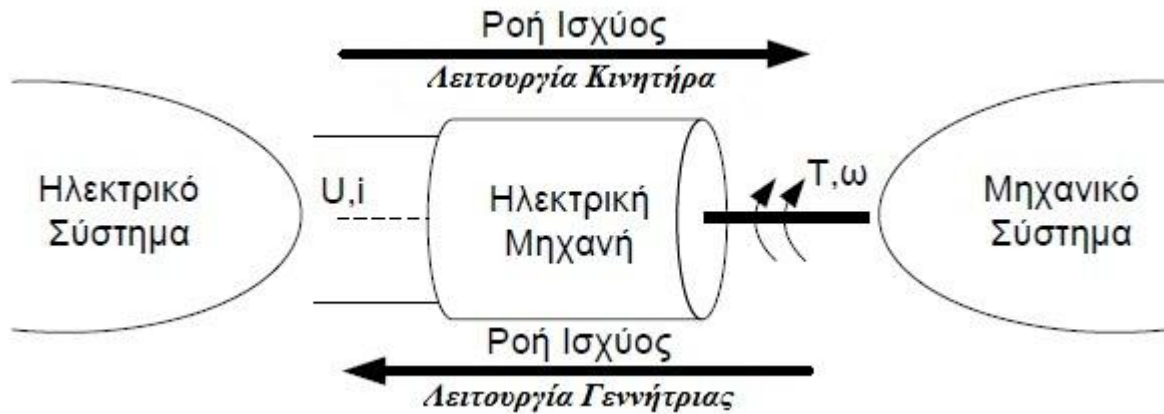
Πίνακας 3.1

*Σύγκριση εμπορικών πακέτων μπαταριών και υπερπυκνωτών [44].*

### 3.3 Ηλεκτρικές μηχανές

#### 3.3.1 Γενικά

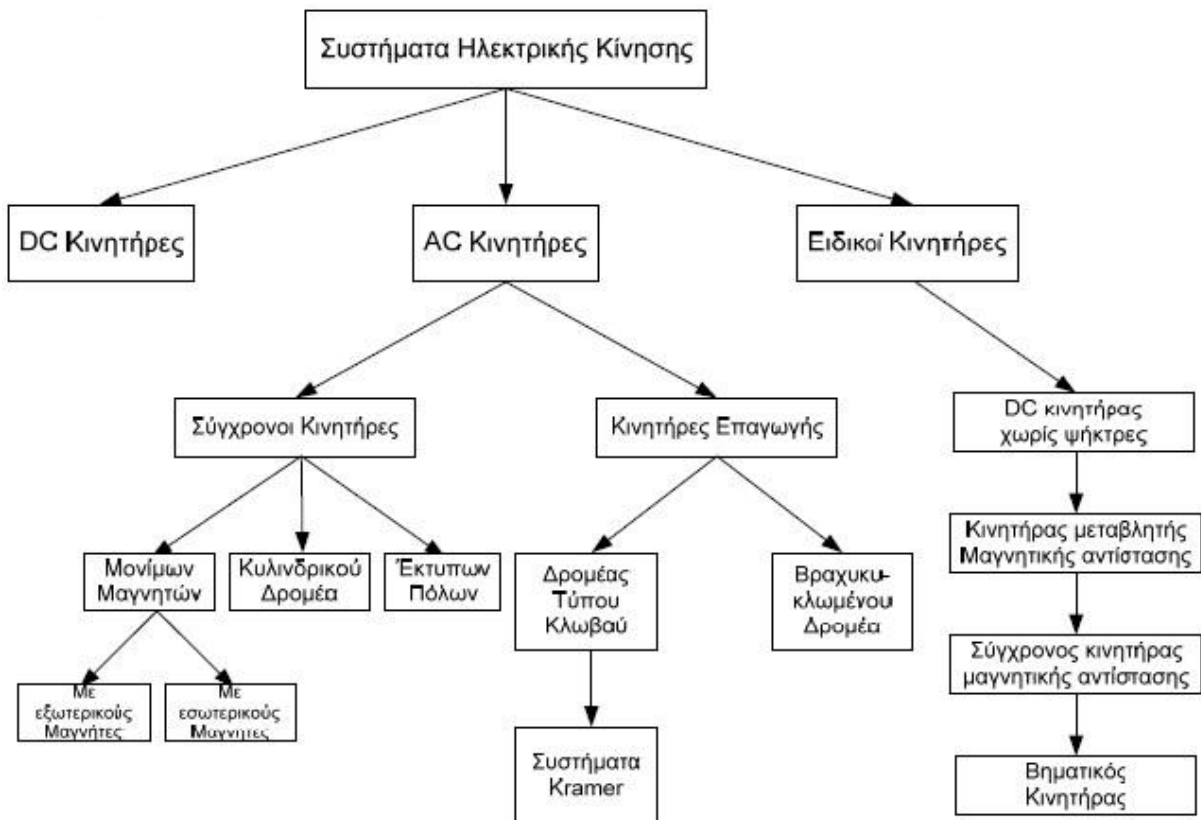
Η ηλεκτρική μηχανή είναι η διάταξη η οποία αναλαμβάνει η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και αντίστροφα (σχήμα 3.3). Σε περίπτωση λειτουργίας γεννήτριας έχουμε μετατροπή μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική ενώ σε περίπτωση κινητήρα έχουμε μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική [6]. Στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης η ηλεκτρική μηχανή επιτελεί συνήθως ρόλο κινητήρα, εκτός από την περίπτωση της αναγεννητικής πέδησης οπότε και λειτουργεί ως γεννήτρια επιστρέφοντας ενέργεια στο εκάστοτε σύστημα αποθήκευσης.



Σχήμα 3.3

Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ισχύος.

Υπάρχουν πολλά είδη ηλεκτρικών κινητήρων τα οποία χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, τα συνηθέστερα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4. Η επιλογή του κατάλληλου κινητήρα γίνεται βάση της πηγής ισχύος που διατίθεται, του μετατροπέα ισχύος, του φορτίου που θα τροφοδοτηθεί καθώς και άλλων οικονομοτεχνικών παραγόντων.



Σχήμα 3.4

Είδη ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα ηλεκτρική κίνησης

Στην συνέχεια γίνεται μια περιγραφή των βασικότερων ειδών ηλεκτρικών μηχανών.

### 3.3.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Ο DC κινητήρας βασίζει την λειτουργία του στην αλληλεπίδραση δύο μαγνητικών πεδίων, αυτό της διέγερσης και αυτό του τυμπάνου. Το πεδίο του τυμπάνου παράγεται από το τύλιγμα τυμπάνου που είναι κατανομημένο στο δρομέα ενώ το πεδίο της διέγερσης μπορεί να παραχθεί είτε από μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους στο στάτη είτε από το τύλιγμα διεγέρσεως του στάτη. Στη περίπτωση τυλίγματος διεγέρσεως, και ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας του, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες DC κινητήρων [80]:

- *Ξένης διέγερσης* – Το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται από ανεξάρτητη πηγή, προσφέροντας την δυνατότητα εύκολου ελέγχου του πεδίου διεγέρσεως.
- *Διέγερσης σειράς* – Το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου, προσφέροντας στον κινητήρα υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες.
- *Παράλληλης διέγερσης* – Το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου, προσφέροντας στον κινητήρα σχεδόν σταθερή ροπή για μεγάλο εύρος ταχυτήτων.
- *Σύνθετης Διέγερσης* – Το τύλιγμα διέγερσης εν μέρει σε σειρά και εν μέρει παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου, προσφέροντας στον κινητήρα τα πλεονεκτήματα της εν σειρά διέγερσης χωρίς όμως να παρουσιάζονται υψηλές ταχύτητες σε μικρά φορτία.

Σημαντικό ρόλο στην λειτουργία της DC μηχανής έχει ο συλλέκτης, ο οποίος αναλαμβάνει να κάνει μηχανική ανόρθωση της εναλλασσόμενης παραγόμενης τάσης από το τύλιγμα του τυμπάνου. Η εναλλασσόμενη αυτή τάση ανορθώνεται μηχανικά στον συλλέκτη κατά την απαγωγή της στις ψήκτρες.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον και για πολλά χρόνια στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης λόγω του βασικού πλεονεκτήματός τους της ευκολίας μεταβολής του πεδίου διέγερσης, παρέχοντας έτσι έναν εύκολο τρόπο ρύθμισης της ταχύτητας και της ροπής. Τα τελευταία είκοσι περίπου χρόνια και με την σημαντική εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος έγινε προσιτός ο έλεγχος των AC κινητήρων επαγωγής. Κατά συνέπεια προτιμάται η χρήση κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος επαγωγής, λόγω των παρακάτω μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι DC κινητήρες:

- Ανάγκη τακτικής συντήρησης του συλλέκτη.
- Σχετικά μεγάλο βάρος δρομέα.
- Σχετικά χαμηλή ταχύτητα λόγω μηχανική καταπόνησης του συλλέκτη.
- Υψηλό κατασκευαστικό κόστος.

### 3.3.3 Σύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος

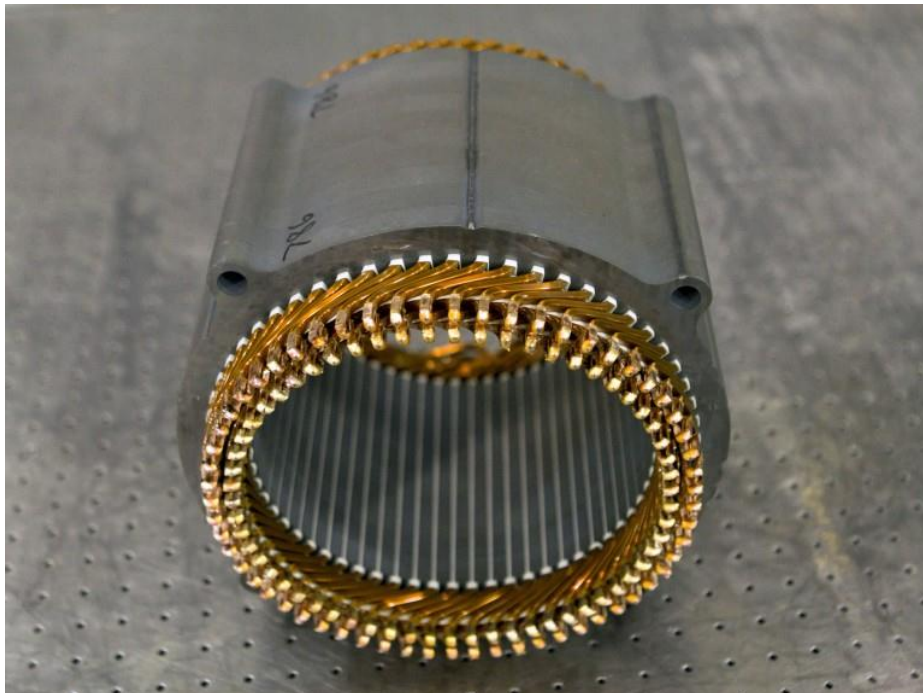
Ο σύγχρονος κινητήρας οφείλει την ονομασία του στο γεγονός ότι περιστρέφεται πάντα με την σύγχρονη ταχύτητα.

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{P/2} = \frac{2\pi f_e}{P/2} \quad (3.1)$$

Όπου  $f_e$  η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας του τριφασικού κινητήρα. Η αρχή λειτουργίας του οφείλεται στην αλληλεπίδραση του πεδίου του τυμπάνου με το πεδίο διέγερσης. Το τύλιγμα τύμπανου αποτελείται από 3 τυλίγματα ένα για κάθε φάση τα οποία είναι χωρικά κατανομημένα στο στάση και με χωρική μετατόπιση 120 και 240 ηλεκτρικών μοιρών [78]. Το πεδίο του τυμπάνου παράγεται από το τριφασικό ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα τυμπάνου και στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα στο χώρο. Από την άλλη το πεδίο διέγερσης δύναται να παραχθεί είτε από μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους εξωτερικά ή εσωτερικά στο δρομέα είτε από συνεχές ρεύμα τροφοδοτούμενο στο τύλιγμα διεγέρσεως το οποίο μπορεί να είναι είτε τυλιγμένο στο κυλινδρικό δρομέα είτε τυλιγμένο στους έκτυπους πόλους (σε περίπτωση δρομέα έκτυπων πόλων) [6].

Στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης συνήθως προτιμώνται σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών (εικόνα 3.3), ειδικότερα μετά την πρόοδο που σημειώνει η τεχνολογία υλικών, όπου πλέον έχουμε μόνιμους μαγνήτες (με κράματα νεοδημίου σιδήρου και βορίου) τα οποία μας δίνουν παραμένονσα μαγνήτιση της τάξης των 1.2T και υψηλή συνεχούσα δύναμη στα 1000kA/m, καθώς και μόνιμους μαγνήτες φερρίτη με παραμένονσα μαγνήτιση της τάξης των 0.35T με συνεχούσα δύναμη στα 150kA/m. Οι μόνιμοι μαγνήτες νεοδημίου-σιδήρου-βορίου είναι κατάλληλοι για επιφανειακή τοποθέτηση, ενώ οι μόνιμοι μαγνήτες φερρίτη είναι κατάλληλοι για εγκάρσια τοποθέτηση [6].

Έτσι οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών αποτελούν μια ελκυστική επιλογή για τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, καθώς είναι απλοί στην κατασκευή, αξιόπιστοι στη λειτουργία και διαθέτουν πολύ καλό βαθμό απόδοσης.



**Εικόνα 3.3**

*Σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών ισχύος 85kW της General Motors® για το ηλεκτρικό όχημα Chevrolet Spark® [76].*



### 3.3.4 Επαγωγικοί τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος

Οι επαγωγικοί κινητήρες ονομάζονται και ασύγχρονοι γιατί στρέφονται με διαφορετική από την σύγχρονη ταχύτητα λειτουργίας. Στην ασύγχρονη μηχανή το πεδίο τυμπάνου παράγεται από το τύλιγμα τυμπάνου όταν αυτό διαρρέεται από συμμετρικά τριφασικά ρεύματα. Το τύλιγμα τυμπάνου είναι ανάλογο με αυτό των σύγχρονων κινητήρων. Βασικό πλεονέκτημα της ασύγχρονης μηχανής είναι ότι δεν απαιτείται κάποιο συγκεκριμένο σύστημα διέγερσης στο δρομέα για την παραγωγή του πεδίου διεγέρσεως [77]. Έτσι η μηχανή επαγωγής δύναται να είναι είτε τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού είτε τύπου τυλιγμένου δρομέα όπου φέρει τύλιγμα στο δρομέα αντίστοιχο με αυτό του στάτη. Συνήθως έχουμε τύπο κλωβού λόγω μικρότερης κατασκευαστικής πολυπλοκότητας. Έτσι το πεδίο διέγερσης παράγεται από ρεύματα που αναπτύσσονται στο δρομέα εξ επαγωγής, λόγω των τριφασικών ρευμάτων που ρέουν στο τύλιγμα του στάτη. Το επαγόμενο πεδίο στο δρομέα στρέφεται με μια συγκεκριμένη συχνότητα, την συχνότητα ολίσθησης  $f_{sl}$ , για την οποία ισχύει

$$f_{sl} = s \cdot f_e \quad (3.2)$$

Όπου  $s$  η εκάστοτε τιμή ολίσθησης (κυμαίνεται στο 1-5%), και  $f_e$  η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας. Έτσι ενώ το πεδίο του τυμπάνου στέφεται με την σύγχρονη συχνότητα  $f_s$ , ο δρομέας περιστρέφεται με συχνότητα ίση με

$$f_r = (1-s) \cdot f_s \quad (3.3)$$

ούτως ώστε η γωνία μεταξύ των δύο πεδίων να παραμένει σταθερή.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες αποτελούν ιδανική επιλογή για πολλά συστήματα ηλεκτρικής κίνησης λόγω της κατασκευαστικής τους απλότητας, του πολύ καλού βαθμού απόδοσης, της αξιοπιστίας τους, της ελάχιστης συντήρησης που απαιτούν, του μεγάλου χρόνου ζωής και βεβαίως του μικρού βάρους και όγκου που απαιτούν.

Από την άλλη μεριά τόσο οι σύγχρονοι κινητήρες όσο και οι ασύγχρονοι απαιτούν περιπλοκότερους μετατροπείς και αλγορίθμους ελέγχου, όμως με την ραγδαία πρόοδο των ηλεκτρονικών ισχύων γίνεται επικτός ο αποτελεσματικός έλεγχός τους και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης [79].

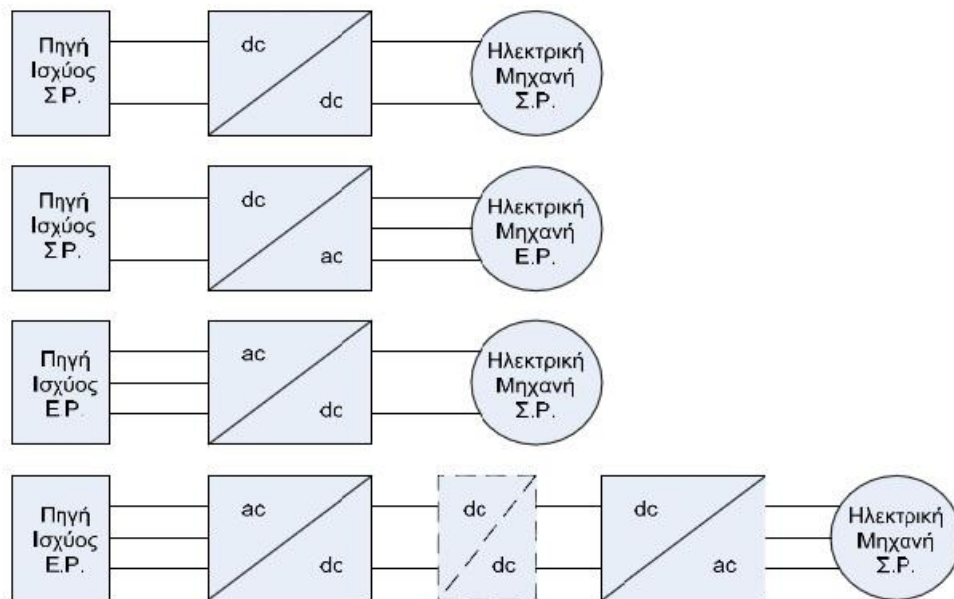
## 3.4 Μετατροπείς ισχύος

### 3.4.1 Γενικά

Ο μετατροπέας ισχύος ή οι μετατροπείς ισχύος είναι η βαθμίδα που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην πηγή ισχύος και την ηλεκτρική μηχανή. Οι μετατροπείς ισχύος αναλαμβάνουν την μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος της πηγής σε τάση και ρεύμα κατάλληλο ώστε να οδηγηθεί επιθυμητά η ηλεκτρική μηχανή. Το είδος του μετατροπέα ισχύος που απαιτείται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από το είδος της πηγής ισχύος (συνεχούς ρεύματος ή εναλλασσόμενου) και το είδος της ηλεκτρικής μηχανής (συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος) που χρησιμοποιείται. Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζονται οι συνηθέστερες περιπτώσεις [6].

Σε περίπτωση τροφοδοσίας μηχανής συνεχούς ρεύματος μέσω πηγής συνεχούς ρεύματος, απαιτείται ένας ελεγχόμενος DC-DC μετατροπέας ο οποίος μεταβάλει το πλάτος της συνεχούς τάσης ώστε να

μεταβληθούν ακολούθως οι στροφές του κινητήρα. Στην περίπτωση πηγής συνεχούς ρεύματος και μηχανής εναλλασσομένου ρεύματος τότε απαιτείται ένας ελεγχόμενος DC-AC αντιστροφέας. Ο ελεγχόμενος αντιστροφέας μετατρέπει το συνεχές ρεύμα εισόδου σε εναλλασσόμενο ρεύμα κατάλληλου πλάτους και συχνότητας ώστε να οδηγείται ορθά ο κινητήρας. Αντίθετα, όταν απαιτείται τροφοδοσία μηχανής συνεχούς ρεύματος μέσω πηγής εναλλασσομένου, παρεμβάλλεται ένας ελεγχόμενος AC-DC ανορθωτής ο οποίος λαμβάνει στην είσοδο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και προσφέρει στην έξοδο συνεχή τάση μεταβλητού πλάτους. Τέλος, στην περίπτωση πηγής εναλλασσομένου ρεύματος και μηχανής εναλλασσομένου ρεύματος απαιτείται αρχικά ένας (συνήθως μη ελεγχόμενος αν δεν απαιτείται αναγέννηση ισχύος) ανορθωτής, στην συνέχεια πιθανόν να χρησιμοποιηθεί ένας DC-DC chopper και εν τέλη ένας ελεγχόμενος αντιστροφέας DC-AC. Έτσι επιτυγχάνεται η μεταβολή τόσο της συχνότητας όσο και του πλάτους της τάσης στην έξοδο ώστε να τροφοδοτείται κατάλληλα η μηχανή εναλλασσομένου ρεύματος.



Σχήμα 3.5

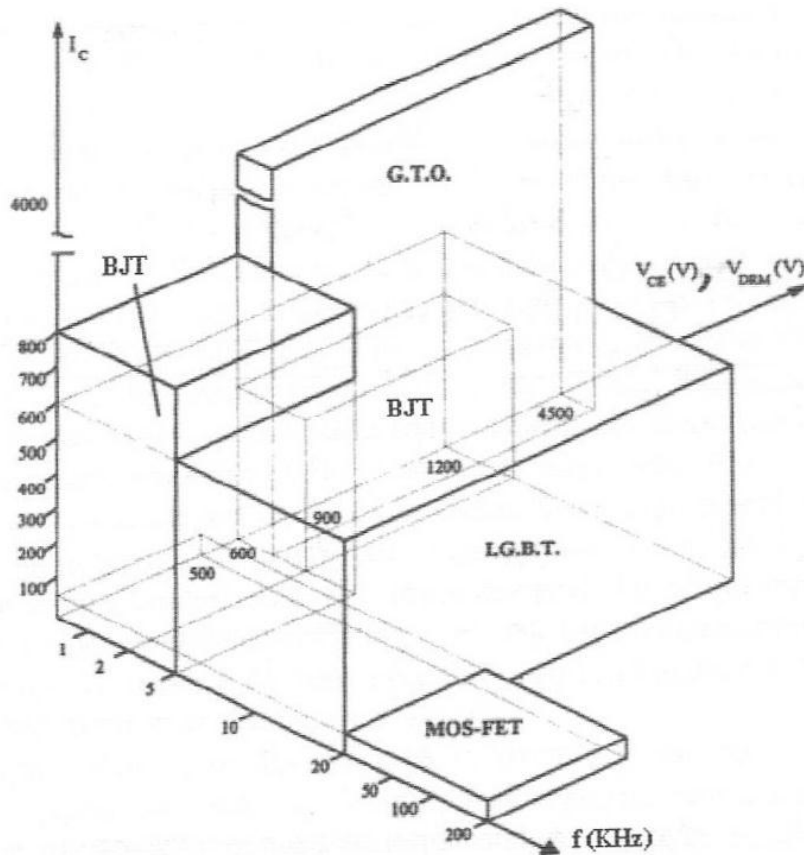
Μετατροπείς που απαιτούνται ανάλογα με το είδος της πηγής ισχύος και της ηλεκτρικής μηχανής [6].

### 3.4.2 Ημιαγωγοί ηλεκτρονικών ισχύος

Βασικό χαρακτηριστικό των μετατροπέων ισχύος είναι η χρήση ελεγχόμενων και μη ημιαγωγικών διακοπών οι οποίοι επιτρέπουν ή διακόπτουν την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Ανάλογα με το βαθμό κατά τον οποίο ελέγχονται, οι ημιαγωγοί ισχύος δύνανται να ταξινομηθούν στις εξής τρεις κατηγορίες:

- *Δίοδοι* - Οι καταστάσεις αγωγιμότητας και μη (ON και OFF) ελέγχονται μονάχα από το κύκλωμα ισχύος. Στην ουσία είναι μη ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες.
- *Θυρίστωρ* – Κλείνουν (κατάσταση ON) από ένα σήμα ελέγχου και δύνανται να ανοίξουν από το κύκλωμα ισχύος.
- *Ελεγχόμενοι διακόπτες* - Κλείνουν και ανοίγουν από σήματα ελέγχου. Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor - BJT), τα τρανζίστορ τύπου MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), τα θυρίστωρ

με έλεγχο της σβέσης από την πύλη (Gate Turn Off – GTO) και τα διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistor - IGBT). Οι δυνατότητες ισχύος καθώς και οι διακοπτικές ταχύτητες αυτών των στοιχείων ποικίλουν και παρουσιάζονται σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6

*Δυνατότητες ισχύος και διακοπτικές συχνότητες ημιαγωγικών διακοπών [75].*

### 3.4.3 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος

Στους μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC-DC) η μέση DC τάση εξόδου ελέγχεται και διατηρείται στο επιθυμητό επίπεδο ανεξάρτητα από το αν η τάση εισόδου ή το φορτίο αυξομειώνονται. Στους DC-DC μετατροπείς ένας κατάλληλος ημιαγωγικός διακόπτης (κατάλληλης ισχύος και διακοπτικής συχνότητας) ανοιγοκλείνει τεμαχίζοντας την συνεχή τάση εισόδου σε παλμούς πολύ μικρής διάρκειας. Οι παλμοί αυτοί εφαρμόζονται σε ένα επαγωγικό στοιχείο (πηνίο) το οποίο λόγω της μεταβολής της τάσης στα άκρα του διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday και του Lenz. Έτσι κατά την μία κατάσταση του ημιαγωγικού στοιχείου εμφανίζεται θετική τάση στα άκρα του πηνίου το οποίο με την σειρά του αποθηκεύει μαγνητική ενέργεια στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα να αυξάνει και το ρεύμα που το διαρρέει. Αντίστοιχα στην άλλη κατάσταση του ημιαγωγικού στοιχείου η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου είναι αρνητική, επομένως η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια του πηνίου αποδίδεται στο κύκλωμα με αποτέλεσμα να μειώνεται το ρεύμα που το διαρρέει. Έτσι ελέγχοντας τον χρόνο αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου σε κάθε περίοδο πετυχαίνουμε έλεγχο της μέσης τιμής της τάσης εξόδου.

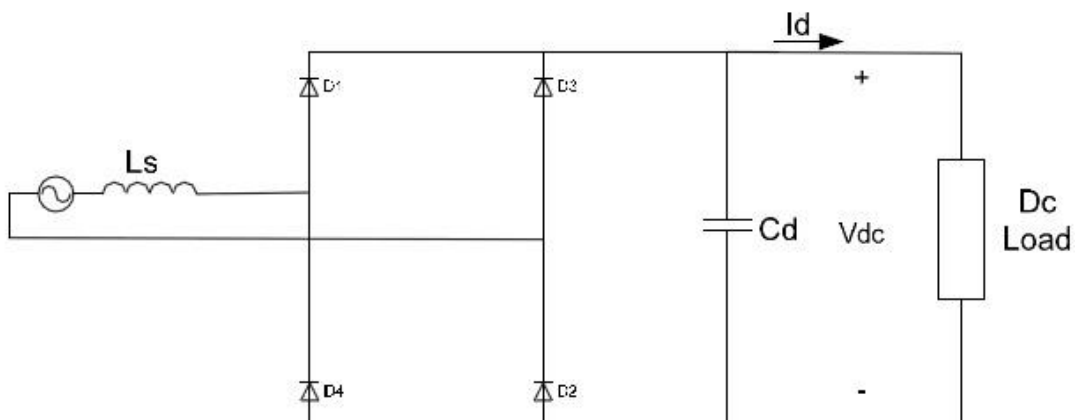
Οι συνηθέστεροι μετατροπείς που συναντώνται στην πράξη είναι οι εξής:

- Τεμαχιστής – DC Chopper.
- Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης – Step down ή buck DC-DC.
- Μετατροπέας ανύψωσης τάσης – Step up ή boost DC-DC.
- Μικτός μετατροπέας – Step down/up ή buck/boost.
- Μετατροπέας του Cuk (υποβιβασμού και ανύψωσης).
- Μετατροπέας τύπου push/pull.
- Μετατροπέας τύπου Flyback (διαθέτει δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής διαφορετικών επιπέδων τάσης

### 3.4.4 Ανορθωτές

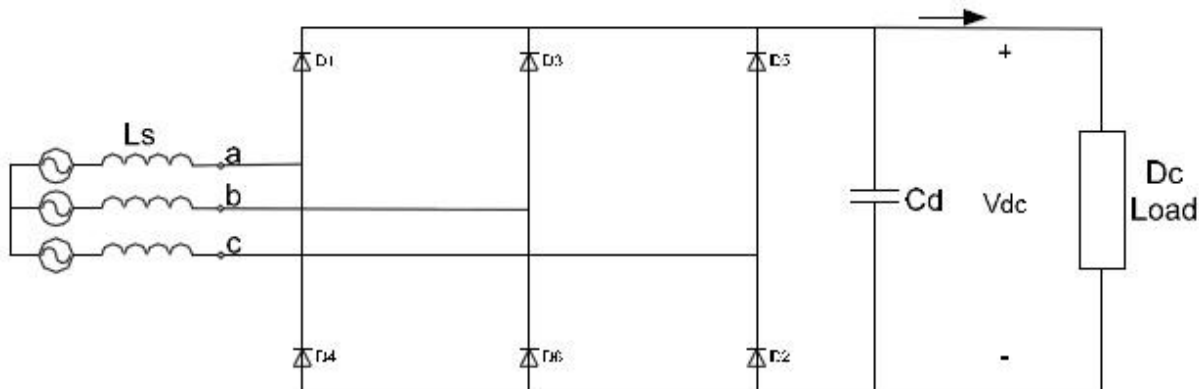
Οι ανορθωτές είναι μετατροπείς οι οποίοι λαμβάνουν ως είσοδο εναλλασσόμενη τάση (μονοφασική ή τριφασική) και την μετατρέπουν σε συνεχή στην έξοδο τους. Η διάταξη μπορεί να είναι μονοφασική όταν η ισχύς που απαιτείται είναι μικρή (μικρότερη από 15kW), ενώ για αυξημένη ζήτηση ισχύος απαιτείται τριφασική ανορθωτική διάταξη. Επίσης οι ανορθωτές διακρίνονται σε ελεγχόμενους και μη.

Οι μη ελεγχόμενοι ανορθωτές χρησιμοποιούν διόδους. Συνολικά η διάταξη ανόρθωσης αποτελείται από έξι διόδους (στους τριφασικούς) ή τέσσερις διόδους (στους μονοφασικούς) σε συνδεσμολογία γέφυρας. Οι μη ελεγχόμενοι ανορθωτές προσφέρουν την δυνατότητα μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή χωρίς όμως την δυνατότητα ελέγχου τόσο του επιπέδου της συνεχούς τάσης εξόδου όσο και του επιπέδου του ρεύματος εισόδου. Η γενική αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην ορθή πόλωση δύο διαδοχικών διόδων που δεν ανήκουν στον ίδιο κλάδο, λόγω της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου. Κατά αυτόν τον τρόπο οι διόδοι άγουν αυθόρμητα (μη ελέγξιμα), με αποτέλεσμα στην έξοδο να παίρνουμε ανορθωμένη τάση. Στο μονοφασικό ανορθωτή η ανορθωμένη τάση εξόδου συντίθεται από τέσσερις παλμούς, ενώ στο τριφασικό από έξι. Για σκοπούς εξομάλυνσης της τάσης εξόδου τοποθετούμε ένα πυκνωτή παράλληλα στην έξοδο. Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ο μονοφασικός μη ελεγχόμενος ανορθωτής και στο σχήμα 3.8 ο τριφασικός μη ελεγχόμενος ανορθωτής.



Σχήμα 3.7

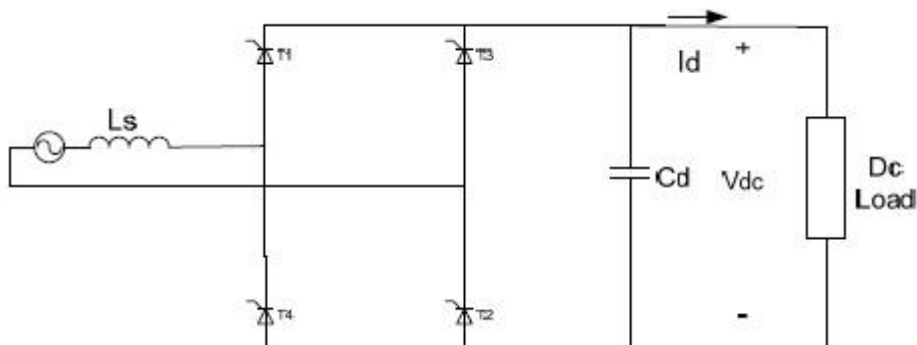
Μονοφασικός μη ελεγχόμενος ανορθωτής.



**Σχήμα 3.8**

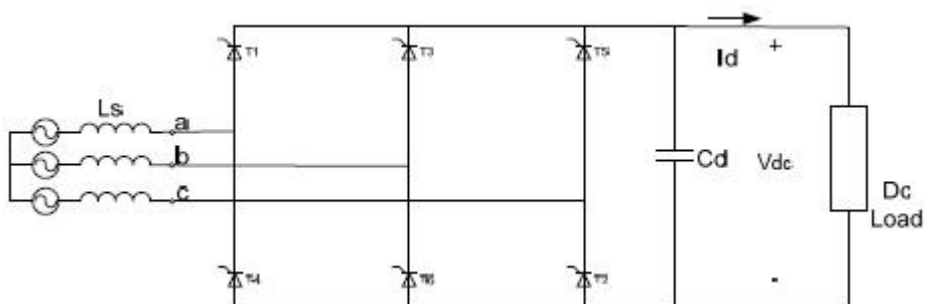
*Τριφασικός μη ελεγχόμενος ανορθωτής.*

Σε περίπτωση που επιθυμείται έλεγχος στο επίπεδο της συνεχής τάσης εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελεγχόμενος ανορθωτής με thyristor. Η διάταξη τότε είναι η ίδια με την μη ελεγχόμενη ανόρθωση με μόνη διαφορά την αντικατάσταση των διόδων με thyristor. Ελέγχοντας τώρα με παλμούς την γωνία έναυσης των thyristor μπορεί να ελεγχθεί η συνεχής τάση εξόδου. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει δυνατότητα έλεγχου του ρεύματος εισόδου στην διάταξη αυτή. Στα σχήματα 3.9 και 3.10 παρουσιάζονται ο μονοφασικός και ο τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.9**

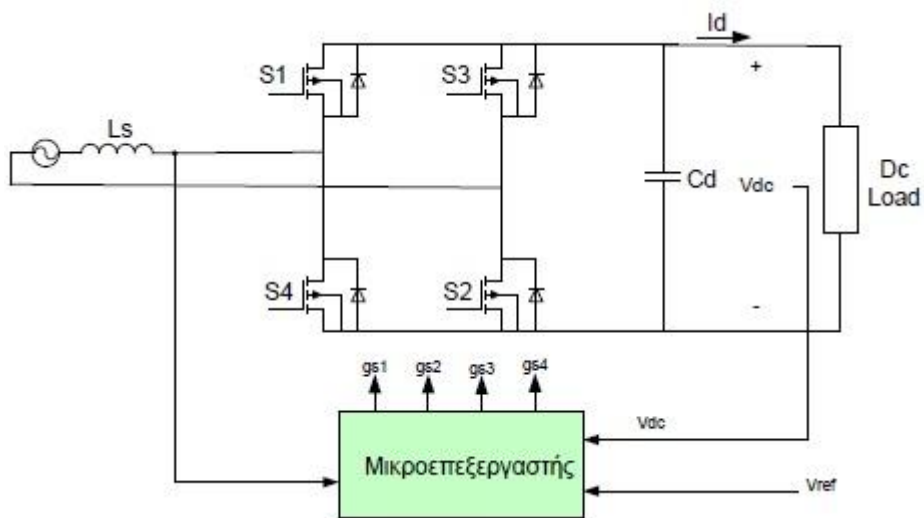
*Μονοφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής με thyristor.*



**Σχήμα 3.10**

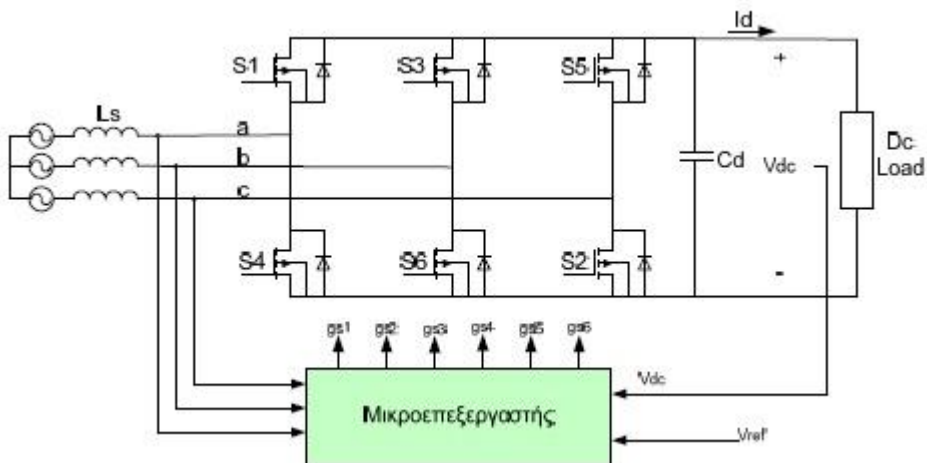
*Τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής με thyristor.*

Τέλος αν επιθυμείται έλεγχος και του ρεύματος εισόδου πέραν του ελέγχου της τάσης εξόδου, κρίνεται απαραίτητο να γίνει χρήση ελεγχόμενου ανορθωτή με ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες. Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζονται στα σχήματα 3.11 και 3.12. Στην περίπτωση αυτή στην θέση της διόδου τοποθετείται ένας ημιαγωγικός ελεγχόμενος διακόπτης (IGBT, MOSFET κτλ.) και μία αντιπαράλληλη διόδος. Η δυνατότητα που προσφέρει ο συγκεκριμένος ανορθωτής για έλεγχο του ρεύματος εισόδου είναι πολύ σημαντική αφού ελέγχοντας το ρεύμα εισόδου δύνανται να μειωθούν στο ελάχιστο οι αρμονικές ρεύματος εισόδου. Στις προαναφερθείσες ανορθωτικές διατάξεις χωρίς έλεγχο ρεύματος εισόδου, το ρεύμα εισόδου τους παρουσιάζει εντονότατη αρμονική παραμόρφωση. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα του ελεγχόμενου ανορθωτή με ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες είναι η δυνατότητα αμφίδρομης λειτουργίας, αφού παρατηρείται ότι πρόκειται για την ίδια διάταξη που συναντάται και στον αντιστροφέα.



Σχήμα 3.11

Μονοφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής με ημιαγωγικούς διακόπτες.



Σχήμα 3.12

Τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής με ημιαγωγικούς διακόπτες.

### 3.4.5 Αντιστροφείς

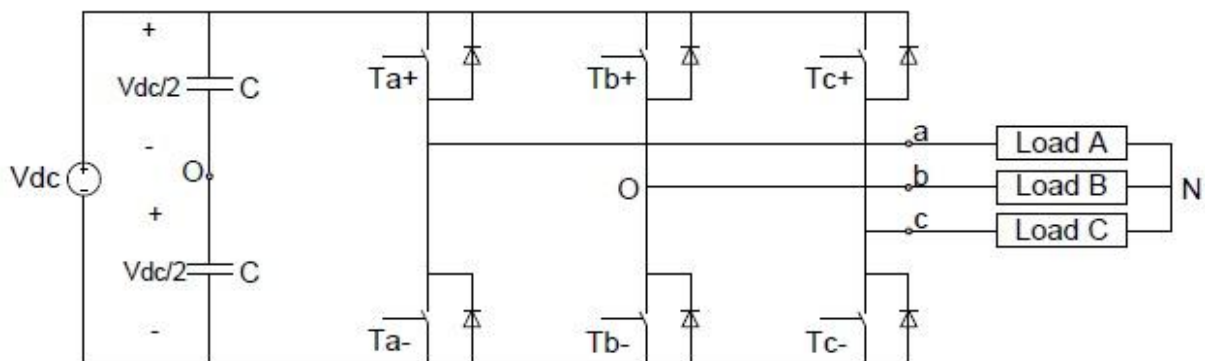
Ο αντιστροφέας είναι η διάταξη η οποία επιτρέπει την μετατροπή της συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη τάση ή ρεύμα μεταβλητού πλάτους και συχνότητας. Οι βασικές τοπολογίες είναι οι εξής:

- Αντιστροφέας με πηγή τάσης (Voltage Source Inverter – VSI).
- Αντιστροφέας με πηγή ρεύματος (Current Source Inverter – CSI)

Στην ουσία ο αντιστροφέας τύπου CSI είναι το δυαδικό αντίστοιχο του αντιστροφέα τύπου VSI, οπότε για λόγους συντομίας θα περιγραφεί μόνο ο VSI που χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην διάταξη αντιστροφέα VSI είναι ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες (BJT, MOSFET ή IGBT ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ και τις διακοπτικές συχνότητες). Μια δίοδος συνδέεται αντιπαράλληλα σε κάθε ελεγχόμενο διακόπτη.

Κάθε αντιστροφέας απαιτεί επίσης την ύπαρξη συγκεκριμένου αλγορίθμου παραγωγής παλμών για τα διακοπτικά στοιχεία του. Ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει ως εισόδους τις επιθυμητές τιμές τάσης ή ρεύματος και παράγει τους κατάλληλους παλμούς προς τα διακοπτικά στοιχεία ώστε η έξοδος του αντιστροφέα να προσεγγίζει το επιθυμητό αποτέλεσμα [81].

Η αναγκαία χρήση διακοπτικών στοιχείων στον αντιστροφέα, περιορίζει την όλη διάταξη, ώστε να παράγει ένα περιορισμένο αριθμό διανυσμάτων τάσεως εξόδου. Ο αριθμός  $n$  των επιπέδων τάσεων που δύναται να παράγει στην έξοδο του ο αντιστροφέας, τον χαρακτηρίζει σαν αντιστροφέα  $n$ -επιπέδων. Υπογραμμίζεται επίσης ότι τα διακοπτικά στοιχεία που ανήκουν στον ίδιο κλάδο δύναται να έχουν μόνο συμπληρωματικές καταστάσεις αγωγής, παραδείγματος χάριν όταν το διακοπτικό στοιχείο  $T_a^+$  είναι σε κατάσταση ON τότε το διακοπτικό στοιχείο  $T_a^-$  πρέπει να είναι σε κατάσταση OFF. Απαγορεύεται να άγουν ταυτόχρονα δυο διακόπτες που ανήκουν στον ίδιο κλάδο διότι εν τωιαύτη περιπτώσει θα έχουμε βραχυκύκλωση της πηγής εισόδου. Ο αντιστροφέας δύναται να λειτουργεί είτε ως φυσική πηγή τάσης είτε ως φυσική πηγή ρεύματος. Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η διάταξη ενός αντιστροφέα VSI τριών επιπέδων.



Σχήμα 3.13

Τριφασικός αντιστροφέας τύπου VSI

## 3.5 Μεθοδολογίες ελέγχου

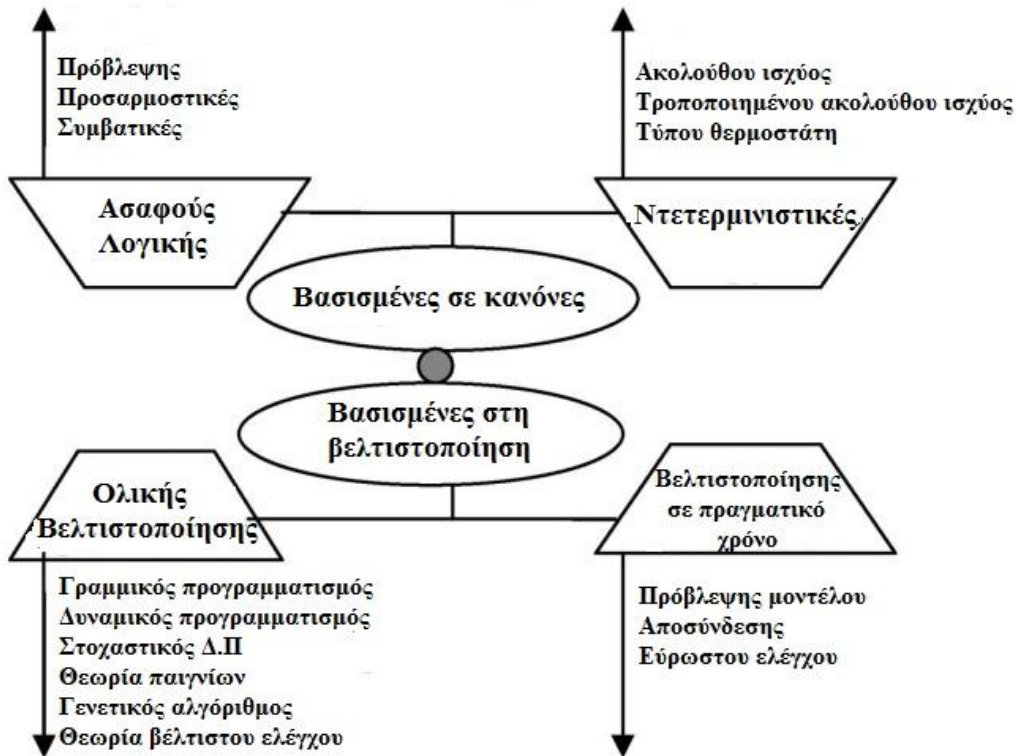
### 3.5.1 Γενικά

Η αποδοτική συνεργασία διαφόρων πηγών ενέργειας και μετατροπέων καθώς επίσης και η διαχείριση της ροής μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος στα πλαίσια της λειτουργίας ενός υβριδικού οχήματος συνιστούν ένα παράγοντα ύψιστης σημασίας για την περαιτέρω ανάπτυξη την βιομηχανίας των υβριδικών οχημάτων. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων κρίνεται απαραίτητη η χρησιμοποίηση μιας μεθοδολογίας ελέγχου. Αυτή υλοποιείται μέσω του κεντρικού ελεγκτή του οχήματος και συνίσταται σε έναν αλγόριθμο ο οποίος ρυθμίζει την λειτουργία των επιμέρους μονάδων που απαρτίζουν ένα υβριδικό όχημα [48].

Γενικά ένα ελεγκτής λαμβάνει σαν είσοδο μεταβλητές που αφορούν τις συνθήκες λειτουργίας του οχήματος, όπως ταχύτητα ή επιτάχυνση, ζητούμενη ροπή από τον οδηγό ή ακόμα και πληροφορίες για την ποιότητα του οδοστρώματος ή την κίνηση στους δρόμους οι οποίες παρέχονται μέσω συσκευών προσδιορισμού θέσης (GPS - Global Positioning System) [49]. Σαν έξοδοι από τον ελεγκτή λαμβάνονται αποφάσεις για την λειτουργία ή μη ορισμένων μονάδων καθώς και για την τροποποίηση της περιοχής λειτουργίας τους. Για παράδειγμα δύναται να ελεγχθεί μια μηχανή εσωτερικής καύσης ώστε να λειτουργεί στην περιοχή της βέλτιστης απόδοσης με την χρησιμοποίηση και ενός ηλεκτροκινητήρα ώστε να εξυπηρετείται πλήρως το φορτίο. Στόχοι των διαφόρων μεθοδολογιών ελέγχου είναι η ικανοποίηση του ζητούμενου φορτίου, η διατήρηση του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών σε επιθυμητά επίπεδα, η βελτιστοποίηση της απόδοσης, η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου καθώς και η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Επιπρόσθετα σύγχρονες μέθοδοι ελέγχου βελτιστοποιούν την αλλαγή των μηχανικών σχέσεων των οχημάτων (shifting) και στοχεύουν στην βελτίωση της ποιότητας οδήγησης (drivability). Αξίζει να σημειωθεί ότι κάποιοι από τους προηγούμενους παράγοντες είναι αλληλοεξαρτώμενοι οπότε μια σωστή μεθοδολογία ελέγχου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη μια πιθανή μεταξύ τους σχέση. Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζονται και κατηγοριοποιούνται οι σύγχρονες μεθοδολογίες ελέγχου.



## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ



Σχήμα 3.14

*Κατηγοριοποίηση των μεθοδολογιών ελέγχου υβριδικών οχημάτων [50].*

Μέχρι και σήμερα οι υπάρχουσες λύσεις σε επίπεδο ελέγχου χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές περιλαμβάνουν τις μεθόδους που βασίζονται σε κανόνες (rule-based methods) και τις μεθόδους που βασίζονται στην βελτιστοποίηση (optimization-based methods)

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι επιμέρους στρατηγικές ελέγχου, γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθεμίας από αυτές και τέλος εντοπίζονται προβλήματα τα οποία συνίσταται να αντιμετωπιστούν μελλοντικά.

### 3.5.2 Μεθοδολογίες ελέγχου βασισμένες σε κανόνες

Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου αποτελεί η αποτελεσματικότητά της στο κομμάτι της εποπτείας και του ελέγχου της ροής ισχύος ενός υβριδικού οχήματος. Οι κανόνες σχεδιάζονται βάσει ανθρώπινης εμπειρίας και διαίσθησης ή ακόμα και σε μαθηματικά μοντέλα χωρίς ωστόσο να είναι προκαθορισμένη η διαδρομή (driving cycle) την οποία θα καλύψει το όχημα. Αυτές οι μεθοδολογίες διακρίνονται σε ντετερμινιστικές και ασαφούς λογικής (fuzzy logic), με τις δεύτερες να έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλείς τα τελευταία χρόνια.

Οι Rule-Based (RB) στρατηγικές βασίζονται κατά κύριο λόγο στην στρατηγική της ισοπέδωσης φορτίου (load leveling) [51,52]. Η στρατηγική αυτή συνίσταται στην μετατόπιση του σημείου λειτουργίας της μηχανής εσωτερικής καύσης ώστε να λειτουργεί σε περιοχή βέλτιστης απόδοσης,

οικονομίας καυσίμου ή ελαχιστοποίησης εκπεμπόμενων ρύπων, ανάλογα με την δεδομένη ταχύτητα περιστροφής της. Γενικά η καλύτερη οικονομία καυσίμου για ένα υβριδικό όχημα επιτυγχάνεται σε χαμηλότερα επίπεδα ροπής και ταχύτητας περιστροφής του θερμικού κινητήρα σε σχέση με το αποδοτικότερο σημείο λειτουργίας. Ισοδύναμα, η καλύτερη οικονομία καυσίμου επιτυγχάνεται όταν υπάρχει μικρή σχετικά ζήτηση επιτάχυνσης [53]. Η διαφορά μεταξύ της ζητούμενης από τον οδηγό ισχύος και της ισχύος που παράγει η MEK αντισταθμίζεται από τον ηλεκτροκινητήρα ο οποίος λειτουργώντας ως γεννήτρια αυξάνει τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών. Είναι προφανές πως με την αλλαγή του σημείου λειτουργίας στο διάγραμμα ροπής-στροφών-απόδοσης της μηχανής εσωτερικής καύσης, θα μεταβληθεί τόσο η ταχύτητα περιστροφής όσο και η ροπή της (σχήμα 3.4). Η ταχύτητα περιστροφής καθορίζεται από τις σχέσεις μετάδοσης του οχήματος (gear ratio) και την ταχύτητα του οχήματος. Επίσης η ποσότητα του καυσίμου που εισέρχεται στους κυλίνδρους της MEK και η ροπή που παράγει, ρυθμίζονται από την μονάδα ελέγχου της.

*Ντετερμινιστικές μέθοδοι βασισμένες σε κανόνες* – Οι εμπειρικές γνώσεις σχετικά με την ροή ισχύος από και προς τις επιμέρους μονάδες ενός υβριδικού οχήματος, την απόδοση, κατανάλωση καυσίμου και τους εκπεμπόμενους ρύπους από μια μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση κανόνων - οι οποίοι εισάγονται συνήθως στην διαδικασία μοντελοποίησης υπό την μορφή πινάκων - ώστε να διαχωρίζουν την ανά πάσα στιγμή ζητούμενη ισχύ στους επιμέρους μετατροπείς ισχύος (lookup tables).

#### 1. Στρατηγική ελέγχου τύπου θερμοστάτη (ON/OFF).

Στα πλαίσια αυτής της αρκετά απλοϊκής στρατηγικής ελέγχου, το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών διατηρείται συνεχώς πάνω από ένα προκαθορισμένο κάτω φράγμα και κάτω από ένα προκαθορισμένο άνω φράγμα μέσω έναρξης και τερματισμού (ON/OFF) της λειτουργίας της μηχανής εσωτερικής καύσης. Τονίζεται πως αυτή η μέθοδος δεν δύναται να ικανοποιήσει το ζητούμενο φορτίο κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες, ωστόσο θα μπορούσε για παράδειγμα να εφαρμοστεί με επιτυχία σε ένα σειριακό υβριδικό λεωφορείο με προκαθορισμένα δρομολόγια [57].

#### 2. Στρατηγική ελέγχου τύπου ακολούθου ισχύος .

Αυτή η στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιεί σαν πρωτεύουσα πηγή ισχύος την μηχανή εσωτερικής καύσης, ενώ ο ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται για την παραγωγή επιπρόσθετης ισχύος όταν το όχημα την απαιτεί διατηρώντας παράλληλα το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών σε επιθυμητά επίπεδα. Οι κανόνες αυτής της μεθόδου διαμορφώνονται ως εξής:

- i. Όταν το όχημα κινείται με ταχύτητα μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κάτω φράγμα, γίνεται χρήση μόνο του ηλεκτροκινητήρα για την πρόωση του.
- ii. Αν η ζητούμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη από την MEK ισχύ στην ταχύτητα την οποία λειτουργεί, χρησιμοποιείται και ο ηλεκτροκινητήρας ώστε να καλυφθεί πλήρως η ζήτηση.
- iii. Ο ηλεκτροκινητήρα φορτίζει τις μπαταρίες μέσω της αναγεννητικής πέδησης.
- iv. Η λειτουργία του θερμικού κινητήρα διακόπτεται όταν η ζήτηση ισχύος πέφτει κάτω από ένα όριο, ώστε να αποφευχθεί η χρησιμοποίησή του σε μία μη αποδοτική περιοχή λειτουργίας.

- v. Αν το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών είναι χαμηλότερο από μια ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή, η MEK παρέχει την ισχύ ώστε να φορτιστούν μέσω του ηλεκτροκινητήρα ή της γεννήτριας.

Η μέθοδος του ακολούθου ισχύος συνιστά μια ιδιαίτερα δημοφιλή στρατηγική ελέγχου υβριδικών οχημάτων. Ωστόσο, βασικό της μειονέκτημα είναι ότι η συνολική απόδοση της διάταξης δεν βελτιστοποιείται, ενώ δεν περιλαμβάνει κανόνες που στοχεύουν στην μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Σημειώνεται ότι σύγχρονα υβριδικά οχήματα όπως το Toyota Prius® και το Honda Insight® ενσωματώνουν στρατηγικές ελέγχου τους βασισμένες στην μέθοδο ακολούθου ισχύος [58].

### 3. Τροποποιημένη στρατηγική ελέγχου τύπου ακολούθου ισχύος.

Πρόκειται για μια μετεξέλιξη της αρχικής μεθόδου σε μια προσαρμοστική στρατηγική διαχείρισης ενέργειας [59]. Στόχος της είναι η βελτιστοποίηση τόσο της χρήσης ενέργειας του οχήματος όσο και τους εκπεμπόμενους ρύπους μέσω της ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης κόστους που περιέχει αυτά τα μεγέθη. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μέσες τιμές ταχύτητας για τον υπολογισμό της στιγμιαίας κατανάλωσης ενέργειας και θέτει όρια για το επίπεδο των εκπεμπόμενων ρύπων. Συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

- i. Προσδιορισμός του εύρους των υποψήφιων σημείων λειτουργίας MEK και ηλεκτροκινητήρα (σημεία ροπής).

Έπειτα για καθένα από τα υποψήφια σημεία λειτουργίας υπολογίζονται παράγοντες βελτιστοποίησης με τον εξής αλγόριθμο:

- ii. Υπολογίζεται η ενέργεια καυσίμου που θα καταναλωθεί από την MEK.
- iii. Προσδιορίζονται οι ενεργειακές απώλειες κατά την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας.
- iv. Υπολογίζεται η συνολική ενέργεια που θα καταναλωθεί από το όχημα.
- v. Υπολογίζονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι του θερμικού κινητήρα.
- vi. Προσδιορίζονται οι τιμές των παραγόντων βελτιστοποίησης και εφαρμόζονται σε αυτούς βάρη  $K_{user}$  των οποίων οι τιμές καθορίζονται ανάλογα με ανάγκες της βελτιστοποίησης.
- vii. Εφαρμόζεται ακόμα μια τιμή βάρους στα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος που αφορά την επίδοση του οχήματος.
- viii. Προσδιορίζεται ο παράγοντας επίδρασης κάθε σημείου λαμβάνοντας υπόψη όλα τα υποψήφια σημεία μέσω του τύπου

$$\text{Impact} = \frac{\sum (K_{user}^* K_{target}^* \text{normalized\_variables})}{\sum (K_{user}^* K_{target}^*)} \quad (3.4)$$

- ix. Το τελικό σημείο λειτουργίας είναι αυτό με τον μικρότερο παράγοντα επίδρασης.

Αρνητικό στοιχείο της τροποποιημένης αυτής στρατηγικής αποτελεί το ότι ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόζεται για πολλά σημεία λειτουργίας και κατ' επέκταση δυσχεραίνει την εφαρμογή του σε πραγματικό χρόνο [50].

*Μεθοδολογίες ελέγχου ασαφούς λογικής βασισμένες σε κανόνες* - Ο έλεγχος ενός υβριδικού οχήματος συνιστά ένα μη γραμμικό, χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα πολλών παραμέτρων κατά συνέπεια η χρήση ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic – FL) για την επίλυσή του είναι λογική. Η χρήση ασαφούς λογικής αντί των ντετερμινιστικών κανόνων για την λήψη αποφάσεων μπορεί επίσης να προσφέρει μοίρασμα της ισχύος στις επιμέρους μονάδες του οχήματος σε πραγματικό χρόνο, κατά συνέπεια ο ελεγκτής ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Controller – FLC) αποτελεί μια επέκταση του συμβατικού RB ελεγκτή. Τα κύρια πλεονεκτήματα των μεθοδολογιών ελέγχου ασαφούς λογικής βασισμένων σε κανόνες έναντι των συμβατικών rule-based είναι τα εξής:

- Είναι εύρωστοι επιδεικνύοντας μεγάλη ανοχή σε ανακριβείς μετρήσεις και τροποποιήσεις των επιμέρους εξαρτημάτων
- Προσαρμόζονται εύκολα καθώς η ρύθμιση τους είναι απλή.

#### 1. Συμβατικές στρατηγικές ασαφούς λογικής.

Με την χρήση συμβατικού ελεγκτή ασαφούς λογικής δύναται να υλοποιηθεί στρατηγική που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των εκπεμπόμενων ρύπων (για παράδειγμα των οξειδίων του αζώτου – NO<sub>x</sub>) από ένα παράλληλο υβριδικό όχημα, διατηρώντας την ίδια στιγμή το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών σε επιθυμητά επίπεδα και προσφέροντας στον οδηγό ανά πάσα στιγμή στην επιθυμητή ροπή [60].

Ως είσοδο στον FLC λαμβάνονται το πάτημα του πεντάλ του γκαζιού (Acc) και η ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα (ωrpm). Η μηχανή επαγωγής συνδέεται με τον άξονα της MEK και κατά συνέπεια η ταχύτητα περιστροφής του θερμικού κινητήρα ταυτίζεται με την ταχύτητα του δρομέα του ηλεκτροκινητήρα. Σαν έξοδος του ελεγκτή λαμβάνεται μια κοινωνικοποιημένη αναλογία  $K$  που ισούται με την ζητούμενη από τον ηλεκτροκινητήρα ροπή προς την ροπή που μπορεί να προσδώσει σύμφωνα με την ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται, σε δεδομένη χρονική στιγμή. Κατά τον σχεδιασμό του ελεγκτή γίνεται δυναμομέτρηση του οχήματος και μετρώνται οι εκπομπές NO<sub>x</sub> του. Διαπιστώνεται ότι σε χαμηλές ταχύτητες η MEK είναι ιδιαίτερα ρυπογόνα χωρίς να προσφέρει υψηλή ροπή. Κατά συνέπεια επιλέγεται η αποκλειστική χρήση του ηλεκτροκινητήρα στις χαμηλές ταχύτητες καθώς προσφέρει αρκετή ροπή η οποία είναι και ανάλογη της βύθισης του πεντάλ του γκαζιού. Στις υψηλές ταχύτητες η εικόνα για την MEK αντιστρέφεται αφού προσφέρει υψηλή σχετικά ροπή χωρίς να εκπέμπει μεγάλη ποσότητα ρύπων, οπότε τότε ο ηλεκτροκινητήρας δρα επικουρικά στην εξυπηρέτηση του φορτίου ή ως γεννήτρια για την φόρτιση των μπαταριών. Ένας κανόνας ασαφούς λογικής σύμφωνα με τις μεταβλητές που έχουν τεθεί και τις παραπάνω θεωρήσεις έχει την εξής μορφή : “Αν ο Acc έχει μεγάλη τιμή, και ο ωrpm έχει μέτρια τιμή, τότε ο  $K$  είναι θετικός με μικρή τιμή.” Σημειώνεται ότι η χρήση του περιγραφέντος FLC αποδεδειγμένα πετυχαίνει μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων (σε σχέση με την συμβατική έκδοση του οχήματος) της τάξης του 20% [60].

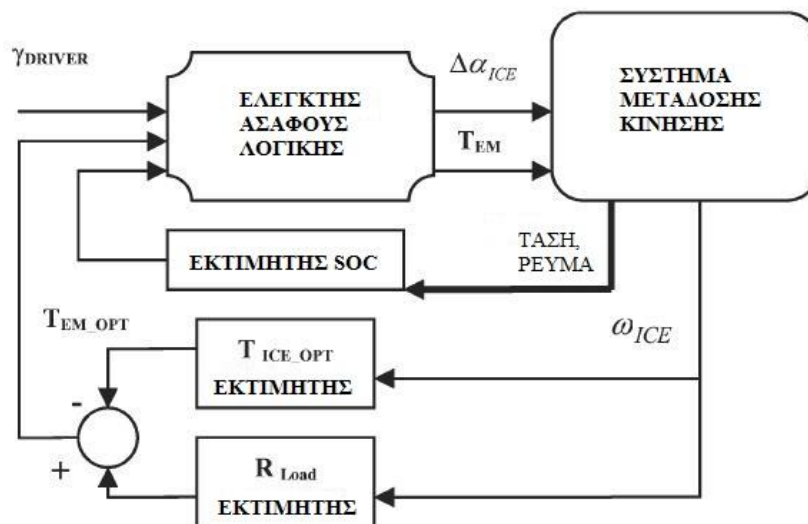
Σημαντικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθοδολογίας ελέγχου αποτελεί το ότι δεν εγγυάται την διάρκεια ζωής των μπαταριών. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος δύνανται να χρησιμοποιηθούν δύο ελεγκτές ασαφούς λογικής [61], ένας υπεύθυνος για την πρόβλεψη των κινήσεων του οδηγού (Driver’s Intention Predictor – DIP) και ένας υπεύθυνος για εξισορρόπηση της ισχύος (Power Balance Controller - PBC). Οι είσοδοι του DIP είναι το πάτημα του πεντάλ του γκαζιού και ο ρυθμός μεταβολής του ΔAcc ενώ ο PBC λαμβάνει σαν είσοδο την ταχύτητα του οχήματος και την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής εσωτερικής καύσης. Ο πρώτος ελεγκτής παράγει μια ροπή αναφοράς αντιδρώντας στην απότομη επιτάχυνση/επιβράδυνση του οχήματος

δίχως να λαμβάνει υπόψη το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, ενώ ο δεύτερος παράγει μια ροπή αναφοράς υπεύθυνη για την διατήρηση του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών σε επιθυμητά επίπεδα. Τελικά η επαλληλία των δύο εξόδων των ελεγκτών πετυχαίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα αφού λαμβάνεται υπόψη η διάρκεια ζωής των μπαταριών.

Η τεχνική της ισοπέδωσης φορτίου (load leveling) δύναται να υλοποιηθεί με επιτυχία και μέσω ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής ούτως ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη οικονομία καυσίμου από θερμικό κινητήρα ανά πάσα χρονική στιγμή. Το σύστημα που υλοποιεί αυτή την στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιεί τρεις εκτιμητές (estimators) και έναν FLC και παρουσιάζεται στο μπλοκ διάγραμμα του σχήματος 3.15. Ο εκτιμητής βέλτιστου της MEK  $T_{ICE\_OPT}$  καθορίζει το σημείο βέλτιστης λειτουργίας του θερμικού κινητήρα δεδομένης της ταχύτητας και της ροπής του. Το φορτίο του οχήματος προσδιορίζεται από τον εκτιμητή φορτίου χρησιμοποιώντας πληροφορίες όπως την μετωπική επιφάνεια του οχήματος, τον αεροδυναμικό συντελεστή του, την ακτίνα των τροχών του, τις σχέσεις μετάδοσης του και την συνολική του μάζα. Ο ηλεκτροκινητήρας αντισταθμίζει την διαφορά μεταξύ της απαιτούμενης ροπής για την ικανοποίηση του φορτίου του οχήματος και της επιθυμητής ροπής της MEK. Αν υπάρχει πλεόνασμα ισχύος ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια και φορτίζει τις μπαταρίες μέχρι ένα προκαθορισμένο επίπεδο, αλλιώς παράγει και αυτός ροπή για την ικανοποίηση του συνολικού φορτίου. Οι είσοδοι του FLC είναι οι εξής :

- Μια παράμετρος  $\gamma$  η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς μεταξύ των εντολών φρεναρίσματος και επιτάχυνσης.
- Η επιθυμητή ροπή από τον ηλεκτροκινητήρα  $T_{EM,D}$ .
- Το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών (SOC).

Οι έξοδοι που λαμβάνονται από τον ελεγκτή είναι η μεταβολή της εντολής επιτάχυνσης προς την MEK  $\Delta\alpha$  και η πραγματική ροπή του ηλεκτροκινητήρα.



Σχήμα 3.15

Υλοποίηση στρατηγικής ισοπέδωσης φορτίου (load leveling) μέσω ελεγκτή ασαφούς λογικής [50].

Ένας ενδεικτικός τυπικός κανόνας του FLC που υλοποιεί την στρατηγική ισοπέδωσης φορτίου είναι ο εξής : “Αν ο  $\gamma$  είναι θετικός με μικρή τιμή, ο SOC είναι θετικός με μέτρια τιμή και ο  $T_{EM,D}$  είναι θετικός με μικρή τιμή, τότε ο  $\Delta\alpha$  είναι θετικός με μικρή τιμή και ο  $T_{EM}$  είναι αρνητικός με μικρή τιμή”. Η εντολή αυτή δείχνει πως αν ζητηθεί ελαφριά επιτάχυνση ενώ η επιθυμητή ροπή του ηλεκτροκινητήρα είναι αρνητική και το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών είναι κάτω από ένα άνω φράγμα, τότε ο FLC θα προσθέσει μια θετική μεταβολή στον επιταχυντή και θα προσφέρει αρνητική ροπή μέσω του ηλεκτροκινητήρα για να φορτίσει τις μπαταρίες.

Συνολικά αυτή η μεθοδολογία ελέγχου είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε επίπεδο οικονομίας καυσίμου με μόνο ουσιαστικό μειονέκτημά της την δυσκολία ταυτόχρονης επίτευξης υψηλής απόδοσης και ελάχιστων ρύπων.

## 2. Προσαρμοστική στρατηγική ασαφούς λογικής.

Η βελτιστοποίηση της οικονομίας καυσίμου ενός υβριδικού οχήματος και η ελαχιστοποίηση των εκπεμπόμενων από αυτό ρύπων αποτελούν δύο στόχους αμοιβαίως αποκλειόμενους. Κάθε βέλτιστη λύση εμπεριέχει κάποιο συμβιβασμό ως προς τον ένα από τους δύο στόχους. Δύναται να προσδιοριστεί ένα ιδανικό σημείο λειτουργίας εφαρμόζοντας βάρη και σταθμίζοντας τις δύο αυτές παραμέτρους [62]. Τα βάρη αυτά εν συνεχεία τροποποιούνται ανάλογα με τις διάφορες συνθήκες οδήγησης. Για παράδειγμα σε αστικές περιοχές όπου είναι σημαντικότερος ο περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων δίνεται μεγαλύτερο βάρος στην παράμετρο αυτή ή εναλλακτικά θα μπορούσε να δοθεί μεγαλύτερο βάρος στην παράμετρο της οικονομίας καυσίμου σε κάποια φάση που ο οδηγός απαιτεί υψηλή ροπή από το όχημα καθώς υψηλή απόδοση επιτυγχάνεται σε περιοχές υψηλής ροπής. Αν ληφθούν υπόψη οι τρεις σημαντικοί εκπεμπόμενοι  $NO_x$ , CO και HC καθώς και η απόδοση του οχήματος δύναται να δημιουργεί μια συνάρτηση κόστους της μορφής:

$$J = w_1(1 - \bar{n}) + w_2\bar{e}_{NO_x} + w_3\bar{e}_{CO} + w_4\bar{e}_{HC} \quad (3.5)$$

Όπου  $\bar{e}_{NO_x}$ ,  $\bar{e}_{CO}$  και  $\bar{e}_{HC}$  είναι οι κανονικοποιημένες τιμές των εκπεμπόμενων ρύπων,  $\bar{n}$  είναι η κανονικοποιημένη τιμή απόδοσης του οχήματος και  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  και  $w_4$  είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές βαρύτητας.

Σημαντικό πλεονέκτημα της προσαρμοστικής στρατηγικής ασαφούς λογικής (Fuzzy Adaptive Strategy), αποτελεί η δυνατότητα ελέγχου καθεμίας από τις παραμέτρους που έχουν τεθεί στην συνάρτηση κόστους με μια απλή ρύθμιση των αντίστοιχων συντελεστών βάρους.

## 3. Στρατηγική πρόβλεψης ασαφούς λογικής.

Όπως έγινε φανερό και από την περιγραφή της προσαρμοστικής στρατηγικής ασαφούς λογικής είναι δυνατό να προσδιοριστεί μια ολικά βέλτιστη λύση μέσω της ελαχιστοποίησης μίας συνάρτησης κόστους. Ωστόσο η βελτιστοποίηση αυτή επιτυγχάνεται στα πλαίσια ενός προκαθορισμένου κύκλου οδήγησης (drive cycle), του οποίου τα στοιχεία είναι γνωστά a priori. Κατά συνέπεια, παρουσιάζεται πρόβλημα όταν η διαδρομή και οι συνθήκες που την διέπουν δεν είναι γνωστές από πριν. Η χρήση συσκευής GPS δύναται να δώσει κάποια λύση σε αυτό πρόβλημα καθώς προσφέρει πληροφορίες για πιθανά εμπόδια στο κοντινό μέλλον, απότομη μεταβολή της κλίσης του οδοστρώματος, μποτιλιάρισμα κτλ. [63]. Κατά συνέπεια δύναται να

αναπτυχθεί ελεγκτής πρόβλεψης ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Predictive Controller – FLPC) [64], ο οποίος να προσαρμόζει τις στιγμιαίες παραμέτρους του με βάση και μελλοντικές προβλέψεις (για παράδειγμα της ταχύτητας αν υπάρχει πληροφόρηση για έντονο μποτιλιάρισμα στο κοντινό μέλλον). Σαν εισόδους ο ελεγκτής λαμβάνει την μεταβολή της ταχύτητας του οχήματος συναρτήσει των πρόσφατων ταχυτήτων του, την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη για την ταχύτητα του οχήματος καθώς και πρόβλεψη της κλίσης της διαδρομής που ακολουθείται. Άρα λαμβάνονται αποφάσεις που αφορούν το παρόν του οχήματος λαμβάνοντας υπόψη το πρόσφατο παρελθόν και το κοντινό μέλλον. Στην έξοδο λαμβάνεται ένα κανονικοποιημένο σήμα από το GPS που ανήκει στο διάστημα  $(-1, 1)$  το οποίο δίνει εντολή στον κύριο ελεγκτή του οχήματος να φορτίσει ή να εκφορτίσει τις μπαταρίες ανάλογα με την μελλοντική κατάσταση στην οποία θα βρεθεί το όχημα (σχήμα 3.16). Για παράδειγμα αν παρέχεται από το σύστημα πλοήγησης η πληροφορία ότι έπεται κατηφόρα και δεν υπάρχει μποτιλιάρισμα, δίνεται εντολή στον κεντρικό ελεγκτή για άμεση εκφόρτιση των μπαταριών.



Σχήμα 3.16

*Λειτουργία ελεγκτή πρόβλεψης ασαφούς λογικής [64].*

### 3.5.3 Μεθοδολογίες ελέγχου βάσει βελτιστοποίησης

Σε αυτές τις στρατηγικές ελέγχου, οι βέλτιστες τιμές ροπής για τους μετατροπείς ισχύος, καθώς και οι βέλτιστες αναλογίες στις σχέσεις μετάδοσης προσδιορίζονται μέσω της ελαχιστοποίησης μια συνάρτησης κόστους η οποία γενικά περιέχει σαν παραμέτρους την κατανάλωση καυσίμου και τους εκπεμπόμενους ρύπους. Αν αυτή η βελτιστοποίηση εφαρμοστεί σε έναν προκαθορισμένο κύκλο οδήγησης δύναται να βρεθεί μια καθολικά βέλτιστη λύση. Επίσης με την δημιουργία μιας στιγμιαίας συνάρτησης κόστους δύναται να βρεθεί μια στρατηγική βελτιστοποίησης πραγματικού χρόνου (real-time optimization strategy). Ωστόσο μια τέτοια λύση σε ένα πρόβλημα ελέγχου δεν είναι καθολικά βέλτιστη (globally optimal) αλλά μπορεί να χρησιμεύσει στην βελτίωση των παραμέτρων και της συμπεριφοράς του οχήματος σε πραγματικό χρόνο. Πρόσφατα η επίτευξη ομαλών αλλαγών στις σχέσεις μετάδοσης του οχήματος καθώς και η ελαχιστοποίηση των κραδασμών κατά την οδήγηση συνέθεσε μια νέα παράμετρο για βελτιστοποίηση πραγματικού χρόνου, γνωστή και ως ποιότητα οδήγησης (drivability) [65].

*Καθολική βελτιστοποίηση συστήματος –* Υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι να βελτιστοποιηθεί μια συνάρτηση κόστους και να προσδιοριστούν τα σημεία βέλτιστης λειτουργίας ενός συστήματος κίνησης. Κάποιοι από αυτούς δεν είναι πάντα εφαρμόσιμοι κυρίως λόγω τις πολυπλοκότητας των υπολογισμών που απαιτούνται, ωστόσο σε κάθε περίπτωση αποτελούν ένα καλό εργαλείο για τον σχεδιασμό, την ανάλυση και την αξιολόγηση άλλων μεθοδολογιών ελέγχου [66]. Οι κυριότερες εξ αυτών εξετάζονται στην συνέχεια

## 1. Γραμμικός προγραμματισμός.

Η βελτιστοποίηση της οικονομίας καυσίμου ενός υβριδικού οχήματος συνιστά ένα μη γραμμικό πρόβλημα. Μέσω παραδοχών, γίνεται μια γραμμικοποίηση και δύναται τελικά η λύση του να προσεγγιστεί μέσω ενός μεγαλύτερου γραμμικού προγράμματος [67]. Αν υποθεθεί σειριακό υβριδικό όχημα, η στιγμιαία του κατανάλωση συμβολίζεται με  $f(t)$  και θεωρείται σαν παραγωγίσιμη συνάρτηση της ισχύος εξόδου του ηλεκτρικής μηχανής  $P_e(t)$ , άρα

$$f(t) = f_e(P_e(t)) \quad (3.6)$$

Έστω  $E(t)$  η ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στην μπαταρία την χρονική στιγμή  $t$  και  $P_s(t)$  η ηλεκτρική ισχύς που ρέει από και προς αυτήν. Θα ισχύει η εξής σχέση:

$$\frac{dE(t)}{dt} = f_s(P_s(t)) \quad (3.7)$$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου η ενέργεια κατά την αρχή μιας δοκιμής θα ισούται με την ενέργεια στο τέλος της, ισοδύναμα:

$$E(t_0) = E(t_f) \quad (3.8)$$

Το πρόβλημα έγκειται στον προσδιορισμό της ηλεκτρικής ισχύος  $P_e(t)$  ώστε να ελαχιστοποιείται το  $\int_{t=t_0}^{t=t_f} \dot{f}(t) dt$  λαμβάνοντας υπόψη και ένα σύνολο περιορισμών που αφορούν τον ηλεκτροκινητήρα, την γεννήτρια, την μπαταρία, τα επίπεδα φρεναρίσματος του οχήματος κτλ. Μετά από κάποιες παραδοχές και γραμμικοποιήσεις των συναρτήσεων  $f_s$  και  $f_e$  το πρόβλημα παίρνει την μορφή ενός τυπικού προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού, ήτοι:

$$\min \sum_{j=k_0}^{j=k_f} (f(k)) \quad (3.9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς :

$$f(k) \geq a_i \cdot P_e(k) + b_i \quad (3.10)$$

Επίσης λαμβάνονται υπόψη λειτουργικοί περιορισμοί της μορφής

$$E(k_0) = E(k_f) \quad (3.11)$$

Υπογραμμίζεται, πως η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming – LP) απλοποιεί την εξεύρεση μιας βέλτιστης λύσης, ωστόσο οι παραδοχές και οι απλοποιήσεις που γίνονται κατά την κατάστροψη του προβλήματος ίσως να μην είναι εφικτές για προβλήματα που περιλαμβάνουν πολυπλοκότερες τοπολογίες.



## 2. Δυναμικός προγραμματισμός.

Ο δυναμικός προγραμματισμός (Dynamic Programming – DP) θεωρείται μια λογική προσέγγιση για το πρόβλημα του βέλτιστου διαχωρισμού ισχύος στα υβριδικά οχήματα καθώς πρόκειται για ένα ισχυρό εργαλείο επίλυσης προβλημάτων δυναμικής βελτιστοποίησης το οποίο χειρίζεται με ευκολία τους περιορισμούς και την μη γραμμικότητα του προβλήματος προσφέροντας μια ολικά βέλτιστη λύση [68]. Για το πρόβλημα την βέλτιστης διαχείρισης της ενέργειας ενός ηλεκτρικού οχήματος λαμβάνεται μια συνάρτηση κόστους προς ελαχιστοποίηση στα πλαίσια μιας συγκεκριμένης διαδρομής. Έπειτα τα αποτελέσματα δύναται να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία ενός αλγορίθμου.

Για την μείωση της πολυπλοκότητας του δυναμικού προγραμματισμού, επιλέγονται τρεις μεταβλητές κατάστασης. Αυτές είναι η ταχύτητα του οχήματος, το πλήθος των ταχυτήτων μετάδοσης και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Έπειτα ενσωματώνονται σε ένα διάνυσμα κατάστασης  $x$  για την διαμόρφωση ενός δυναμικού μοντέλου της μορφής

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (3.12)$$

Το διάνυσμα  $u(k)$  περιλαμβάνει τις μεταβλητές ελέγχου, όπως την επιθυμητή ροπή εξόδου θερμικού και ηλεκτρικού κινητήρα και την εντολή αλλαγής σχέσης μετάδοσης. Η συνάρτηση κόστους έχει την μορφή

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=0}^{N-1} [L(x(k), u(k))] + G(x(N)) \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} [fuel(k) + \mu NO_x(k) + \nu CO_2(k)] + a(SOC(N) - SOC_f)^2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Όπου  $N$  είναι η διάρκεια του κύκλου οδήγησης και  $L$  είναι η στιγμιαία συνάρτηση κόστους που περιλαμβάνει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα.  $SOC_f$  είναι η τελική επιθυμητή τιμή του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών και οι παράμετροι  $a$ ,  $\mu$  και  $\nu$  είναι συντελεστές βαρύτητας. Λαμβάνονται περιορισμοί για την ταχύτητα ηλεκτρικού, θερμικού κινητήρα καθώς και του οχήματος αλλά και για το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών.

Το γενικότερα πρόβλημα δυναμικής βελτιστοποίησης δύναται να σπάσει σε μια ακολουθία απλούστερων προβλημάτων ελαχιστοποίησης ως εξής [68]:

Βήμα  $N-1$

$$J_{N-1}^*(x(N-1)) = \min_{u(N-1)} [L(x(N-1), u(N-1)) + G(x(N))] \quad (3.14)$$

Βήμα  $k$ , για  $k$  από 0 έως  $N-1$

$$J_k^*(x(k)) = \min_{u(k)} [L(x(k), u(k)) + J_{k+1}^*(x(k+1))] \quad (3.15)$$

Όπου  $J_k^*(x(k))$  είναι η βέλτιστη τιμή της συνάρτησης κόστους, στην κατάσταση  $x(k)$  κατά το χρονικό στάδιο  $k$ . Το σύστημα εκκινεί από την κατάσταση  $x(k)$  και ακολουθώντας τους κανόνες βέλτιστου ελέγχου φτάνει μέχρι και το τελευταίο. Η παραπάνω αναδρομική εξίσωση λύνεται προς τα πίσω ώστε να βρεθεί η βέλτιστη μεθοδολογία ελέγχου.

Κύριο μειονέκτημα του δυναμικού προγραμματισμού θεωρείται η μεγάλη υπολογιστική του πολυπλοκότητα.

### 3. Στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός.

Ο στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός (Stochastic DP) εφαρμόζεται στα πλαίσια ενός συνόλου τυχαίων κύκλων οδήγησης. Η ζήτηση ισχύος του οδηγού  $P_{dem}$  διαμορφώνεται μέσω μιας στατικής αλυσίδας Markov και λαμβάνει έναν πεπερασμένο αριθμό τιμών  $P_{dem} \in \{P_{dem}^1, P_{dem}^2, \dots, P_{dem}^{N_p}\}$ . Επίσης η ταχύτητα του τροχού του οχήματος λαμβάνει μια διακριτή μορφή  $\omega_{wh} \in \{\omega_{wh}^1, \omega_{wh}^2, \dots, \omega_{wh}^{N_w}\}$ . Τα μεταβατικά φαινόμενα σε επίπεδο ζήτησης ισχύος έχουν την μορφή  $P_{dem,k+1} = w_k$  με την κατανομή πιθανότητας  $w_k$  να προκύπτει ως εξής :

$$\Pr \left\{ w = \frac{P_{dem}^j}{P_{dem}} = P_{dem}^i, \omega_{wh} = \omega_{wh}^l \right\} = p_{ij} \quad (3.16)$$

$i, j = 1, 2, \dots, N_p$  και  $l = 1, 2, \dots, N_w$

Όπου  $\sum_{j=1}^{N_p} p_{ij} = 1$ , και  $p_{ij}$  είναι η πιθανότητα μετάβασης στην κατάσταση  $P_{dem}^j$  την χρονική στιγμή  $k+1$ , δεδομένου ότι στην στιγμή  $k$  βρίσκεται στην  $P_{dem}^i$  και έχει ταχύτητα  $\omega_{wh}^l$ . Μία φυσική μέθοδος προσδιορισμού των πιθανοτήτων μετάβασης είναι μέσω παρατηρήσεων, περασμένων στοιχείων οδήγησης κτλ. Ο στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό μιας βέλτιστης μεθοδολογίας ελέγχου ώστε να ελαχιστοποιηθεί το αναμενόμενο ολικό κόστος της μορφής

$$J_\pi(x_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \gamma^k g(x_k, \pi(x_k)) \right\} \quad (3.17)$$

Όπου  $g$  είναι η συνάρτηση στιγμιαίου κόστους (αντίστοιχη της συνάρτησης  $L$  της σχέσης ),  $\gamma$  είναι ένας συντελεστής μείωσης που παίρνει τιμές στο  $(0,1)$  και  $J_\pi(x_0)$  είναι το κόστος όταν το σύστημα ξεκινάει από την κατάσταση  $x_0$  και ακολουθεί την διαδικασία  $\pi$ .

Σημειώνεται πως παρά την στοχαστική φύση του SDP, δύναται να χρησιμοποιηθεί και για έλεγχο πραγματικού χρόνου (real-time) [68].

### 4. Θεωρία βέλτιστου ελέγχου.

Η μέθοδος της θεωρίας βέλτιστου ελέγχου (optimal control theory), δύναται να εφαρμοστεί άμεσα για τον προσδιορισμό καθολικά βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα διαχείρισης ενέργειας ενός υβριδικού οχήματος παράλληλης διαμόρφωσης [72]. Αρκούν δύο μεταβλητές απόφασης για τον προσδιορισμό του σημείου βέλτιστης λειτουργίας του οχήματος, η ροπή του θερμικού κινητήρα  $T_e(t)$  και ο αριθμός της σχέσης του κιβωτίου ταχυτήτων  $k(t)$  που έχει επιλεγεί μια δεδομένη στιγμή  $t$ . Σύμφωνα με τα παραπάνω το πρόβλημα διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min_{T_e(t), k(t)} J = \sum_{t=0}^{N-1} D(k(t), T_e(t)) \cdot \Delta \quad (3.18)$$

Η συνάρτηση  $D(k(t), T_e(t))$  αποδίδει την στιγμιαία κατανάλωση του οχήματος και  $\Delta$  είναι ο χρόνος δειγματοληψίας. Οι περιορισμοί που εφαρμόζονται είναι οι ακόλουθοι:

$$\begin{aligned} k(t) &\in K(t) \\ T_{e\_min}^t(k(t), t) &\leq T_e(t) \leq T_{e\_max}^t(k(t), t) \\ x(N) - x(0) &= \Delta Soc \end{aligned} \quad (3.19)$$

Όπου  $k(t)$  είναι ο αντιπροσωπευτικός αριθμός της σχέσης του κιβωτίου ταχυτήτων και  $K(t)$  το σύνολο των αποδεκτών σχέσεων του κιβωτίου ανά πάσα στιγμή. Το  $\Delta Soc$  είναι η μεταβολή του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών στα πλαίσια ενός κύκλου.  $T_{e\_max}^t$  και  $T_{e\_min}^t$  είναι το άνω και κάτω φράγμα αντίστοιχα για τις αποδεκτές τιμές ροπής της μηχανής εσωτερικής καύσης, ενώ η συνάρτηση  $x(t)$  αντιπροσωπεύει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας σύμφωνα με το εξής δυναμικό μοντέλο:

$$x(t+1) = x(t) + \Delta \cdot P_m^t(\omega_m(t), T_m(t)) \cdot A_{cc}(x(t), T_m(t)) \quad (3.20)$$

$P_m^t(\omega_m(t), T_m(t))$  είναι η απαιτούμενη ισχύς από τον ηλεκτροκινητήρα ώστε να παραχθεί ροπή  $T_m(t)$  σε ταχύτητα  $\omega_m(t)$  και  $A_{cc}(x(t), T_m(t))$  είναι η δεκτικότητα φόρτισης των μπαταριών.

Η σχέση που αφορά τον μηχανολογικό περιορισμό για τις ροπές της ΜΕΚ γράφεται και σε μορφή ισότητας με την εισαγωγή της παραμέτρου  $\Gamma(t)$

$$T_e^2(t) + A(k(t), t) \cdot T_e(t) + B(k(t), t) + \Gamma^2(t) = 0 \quad (3.21)$$

Οι συναρτήσεις  $A(k(t), t)$  και  $B(k(t), t)$  είναι ίσες με

$$\begin{aligned} A(k(t), t) &= T_{e\_min}^t(k(t), t) - T_{e\_max}^t(k(t), t) \\ B(k(t), t) &= T_{e\_min}^t(k(t), t) \cdot T_{e\_max}^t(k(t), t) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Ενσωματώνοντας τους περιορισμούς στην αντικειμενική συνάρτηση, εισάγονται και οι παράμετροι Lagrange  $\lambda(t)$  και  $\gamma(t)$ . Οι βέλτιστες συνθήκες βρίσκονται από τις πρώτες και δεύτερες παραγώγους της νέας αντικειμενικής συνάρτησης ως προς καθεμία από τις παραμέτρους Lagrange.

$$J_n = \sum_{t=0}^{N-1} \left\{ D(k(t), T_e(t)) \cdot \Delta - \lambda(t) \cdot \left[ x(t+1) - x(t) - \Delta \cdot P_m^t(\omega_m(t), T_m(t)) \cdot A_{cc}(x(t), T_m(t)) \right] \right. \\ \left. + \gamma(t) \cdot \left[ T_e^2(t) + A(k(t), t) \cdot T_e(t) + B(k(t), t) + \Gamma^2(t) \right] \right\} \quad (3.23)$$

Η αναλυτική φύση της μεθόδου της θεωρίας βέλτιστου ελέγχου την καθιστά ανώτερη σε σχέση με άλλες μεθόδους καθολικής βελτιστοποίησης. Ωστόσο η διαφοροποίηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος μετάδοσης του οχήματος καθιστά κοπιαστικότερη και πιο πολύπλοκη την εύρεση μιας αναλυτικής λύσης, συγκριτικά με άλλες αριθμητικές και επαναληπτικές μεθόδους.

### 5. Γενετικοί αλγόριθμοι.

Η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων (Genetic Algorithms – GA) χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος μη γραμμικού προγραμματισμού υπό περιορισμούς, το οποίο περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \min F(G) \\ G \in \Omega \\ g(G) > 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

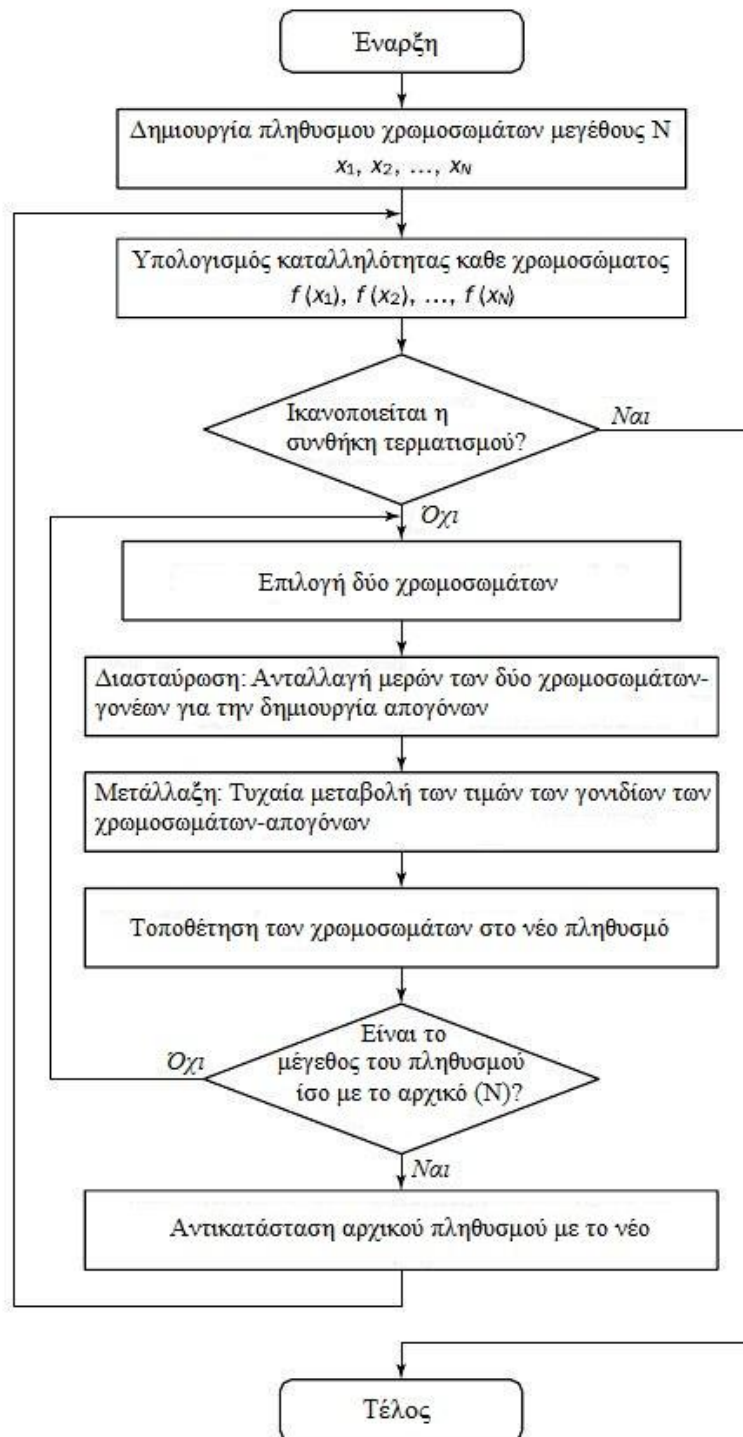
Το  $G$  αναπαριστά το χρωμόσωμα (chromosome) που αποτελείται από τα επιμέρους γονίδια (genes) τα οποία είναι κάποια σταθερά άνω και κάτω φράγματα, όπως το μέγιστο και ελάχιστο επιθυμητό επίπεδο φόρτισης των μπαταριών, η ταχύτητα του οχήματος κάτω από την οποία απενεργοποιείται η μηχανή εσωτερικής καύσης κτλ. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα διάνυσμα το οποίο δομείται από τις τιμές που λαμβάνουν οι επιμέρους συνιστώσες του. Η αντικειμενική συνάρτηση  $F$  περιλαμβάνει την κατανάλωση καυσίμου καθώς και διάφορους τύπους εκπεμπόμενων ρύπων. Η καταλληλότητα (fitness) του κάθε χρωμοσώματος αξιολογείται μέσω του πηλίκου  $\frac{K}{F}$ , όπου  $K$  είναι ένας πολύ μεγάλος αριθμός που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση

της αξίας της συνάρτησης  $\frac{1}{F}$  ώστε η τιμή της καταλληλότητας (fitness value) να κινείται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών. Άλλα χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων εκτός της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function), είναι ο μηχανισμός επιλογής (selection mechanism) και οι γενετικοί τελεστές (genetic operators) [69].

Ο μηχανισμός επιλογής συνίσταται σε μια συνάρτηση επιλογής τύπου τουρνουά η οποία λαμβάνει ζεύγη χρωμοσωμάτων (γονέων). Οι γενετικοί τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι η ευριστική διασταύρωση (heuristic crossover) και η μη ομοιόμορφη μετάλλαξη (non-uniform mutation). Η ευριστική διασταύρωση λαμβάνει κάθε φορά δύο γονείς – δηλαδή δύο χρωμοσώματα - και πραγματοποιεί μια προέκταση (extrapolation) στο μέλλον των γενεών που θα προκύψουν από την διασταύρωση αν αυτή γίνει προς την κατεύθυνση του καλύτερου γονέα. Η μη ομοιόμορφη μετάλλαξη αλλάζει μια εκ των παραμέτρων ενός γονέα σύμφωνα με μια μη ομοιόμορφη κατανομή πιθανότητας [69]. Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του γενετικού αλγορίθμου.

Η χρήση γενετικού αλγορίθμου ενδείκνυται σε προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης καθώς προσφέρει μια πιο ακριβή διερεύνηση του χώρου των πιθανών λύσεων σε σχέση με τις

συμβατικές μεθόδους που χρησιμοποιούν διαφορίσεις (gradient methods). Ωστόσο δεν προσφέρει τόσο καλή εποπτεία του φυσικού προβλήματος σε σχέση με μια αναλυτική επίλυση.



Σχήμα 3.17

Διάγραμμα ροής γενετικού αλγόριθμου

Μέσω του σχήματος 3.18 πραγματοποιείται μια άμεση και συνοπτική σύγκριση όλων των προαναφερθέντων μεθοδολογιών καθολικής βελτιστοποίησης. Το πλήθος το προσήμων λειτουργεί σφραγιστικά για την καταλληλότητα (+) ή μη (-) κάποιας μεθόδου στον εκάστοτε τομέα.

	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΥΣΚΟΛΙΑ	ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ	ΠΡΑΓΜ. ΧΡΟΝΟΥ	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ	ΠΟΛΥΠΛΟΚΗ ΔΟΜΗ
Γραμμικός Προγραμματισμός	++	-	--	-	-
Θεωρία Βελτιστού Ελέγχου	--	--	-	+	-
Δυναμικός Προγραμματισμός	-	-	-	-	+
Στοχαστικός Δ.Π.	--	-	+	-	+
Γενετικός Αλγόριθμος	-	+	-	-	++

Σχήμα 3.18

Σύγκριση μεθοδολογιών ελέγχου καθολικής βελτιστοποίησης [50].

*Βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο* – Οι μέθοδοι καθολικής βελτιστοποίησης δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμες σε προβλήματα που απαιτούν προσαρμογή των λύσεων σε πραγματικό χρόνο. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης πραγματικού χρόνου προσφέρουν αυτή την δυνατότητα. Κατά την ανάπτυξη της συνάρτησης κόστους για στιγμιαία βελτιστοποίηση μιας τέτοιας μεθόδου, εκτός από την μέτρηση της στιγμιαίας κατανάλωσης καυσίμου λαμβάνεται υπόψη και η αποθηκευόμενη ηλεκτρική ενέργεια στα διάφορα συστήματα αποθήκευσης (μπαταρίες, υπερπυκνωτές κτλ.) ώστε να διασφαλίζεται η αυτοβιωσιμότητα του συστήματος.

#### 1. Έλεγχος βάσει ισοδύναμης κατανάλωσης καυσίμου.

Η εδραίωση της έννοιας της ισοδύναμης κατανάλωσης καυσίμου [70]-[73] διευκόλυνε την χρήση της θεωρίας βέλτιστου ελέγχου (optimal control theory) σε εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας υβριδικών οχημάτων πραγματικού χρόνου. Η ισοδύναμη κατανάλωση καυσίμου ορίζεται ως η επιπρόσθετη κατανάλωση καυσίμου η οποία θα απαιτηθεί στο κοντινό μέλλον για την φόρτιση των μπαταριών. Ένας τρόπος υπολογισμού της ισοδύναμης κατανάλωσης καυσίμου, είναι με την χρήση συντελεστών μέσης απόδοσης για τις επιμέρους μονάδες που απαρτίζουν το όχημα, ως εξής:

$$C_{E_q}(k(t), T_e(t)) = \frac{SFC_{rech} \cdot P_e(\omega_e, T_e)}{c \cdot \bar{n}_e \cdot \bar{n}_{batt}}, \text{ για } T_e < 0 \quad (3.25)$$

και

$$C_{E_q}(k(t), T_e(t)) = \frac{SFC_{dis} \cdot P_e(\omega_e, T_e) \cdot \bar{n}_e \cdot \sqrt{a^2 + b^2}}{c}, \text{ για } T_e \geq 0 \quad (3.26)$$

Στις παραπάνω σχέσεις οι  $SFC_{rech}$  και  $SFC_{dis}$  αντιπροσωπεύουν την μέση ειδική κατανάλωση καυσίμου κατά την φόρτιση και εκφόρτιση αντίστοιχα. Ο συντελεστής  $\bar{n}_{batt}$  αφορά την μέση απόδοση των μπαταριών ενώ ο  $\bar{n}_e$  την μέση απόδοση του ηλεκτροκινητήρα. Η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για την παραγωγή ροπής  $T_e$  σε ταχύτητα  $\omega_e$  είναι ίση με  $P_e$ . Η συνολική ισοδύναμη κατανάλωση καυσίμου  $C_{TOT}(k(t), T_e(t))$  είναι το άθροισμα της πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου από την μηχανή εσωτερικής καύσης  $C_{ICE}(k(t), T_e(t))$  και της ισοδύναμης κατανάλωσης καυσίμου του ηλεκτροκινητήρα  $C_{Eg}(k(t), T_e(t))$ . Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την ενοποιημένη παρουσίαση της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τις μπαταρίες και της συμβατικής κατανάλωσης καυσίμου. Κατά συνέπεια το πρόβλημα στιγμιαίου ελέγχου διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min_{T_e(t), k(t)} J = C_{TOT}(k(t), T_e(t)) \cdot \Delta \quad (3.27)$$

Όπου  $\Delta$  είναι ο χρόνος δειγματοληψίας. Οι περιορισμοί για το παραπάνω πρόβλημα διαμορφώνονται ομοίως με τους αντίστοιχους της μεθόδου της θεωρίας βέλτιστου ελέγχου για καθολική και όχι σε πραγματικό χρόνο βελτιστοποίηση (σχέση )

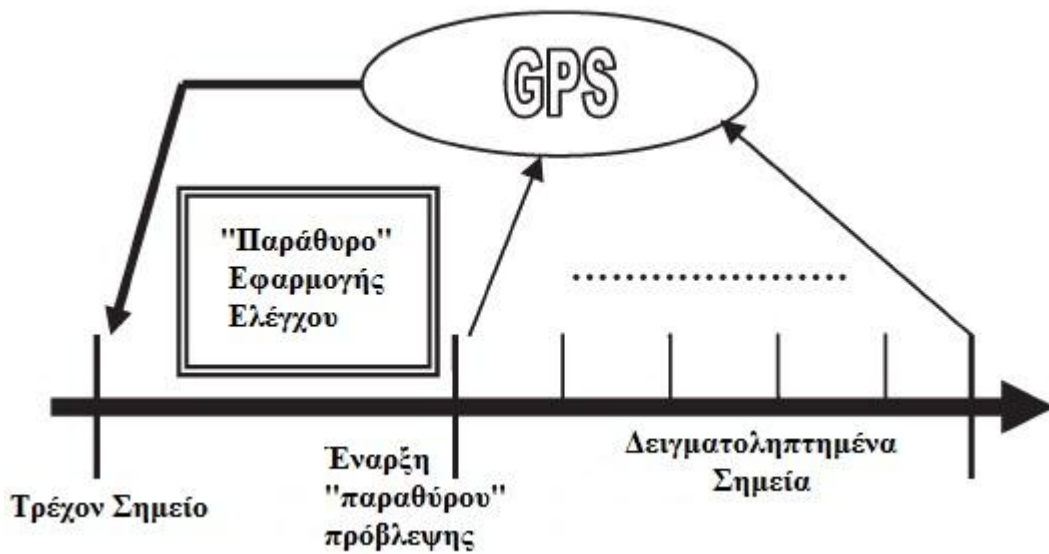
Κύριο μειονέκτημα της στρατηγικής ελαχιστοποίησης ισοδύναμης κατανάλωσης (Equivalent Consumption Minimization Strategy – ECMS) είναι ότι δεν λαμβάνει άμεσα υπόψη την βιωσιμότητα των μπαταριών.

## 2. Έλεγχος αποσύνδεσης.

Αυτή η μεθοδολογία ελέγχου πετυχαίνει εκτός από την ικανοποίηση της ζήτησης ισχύος του οδηγού και την διατήρηση του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών σε επιθυμητά επίπεδα, την επίτευξη ποιοτικής εμπειρίας οδήγησης (drivability) [50]. Ο τελευταίος από τους τρεις στόχους επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της ομαλής εναλλαγής των σχέσεων του κιβωτίου ταχυτήτων και της ελαχιστοποίησης των κραδασμών [74]. Χρησιμοποιείται ένας ηλεκτροκινητήρας για την άμεση οδήγηση των πίσω τροχών, καθώς και ένας ενσωματωμένος εναλλάκτης εκκίνησης (Integrated Starter Alternator – ISA) πάνω σε ένα θερμικό κινητήρα για την οδήγηση των μπροστινών τροχών. Ανάμεσα στην MEK και τον εναλλάκτη εκκίνησης παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας ροπής και ένα αυτόματο κιβώτιο ταχυτήτων. Η έξοδος του ελεγκτή αποτελείται από τρεις συνιστώσες καθεμία από τις οποίες πετυχαίνει έναν από τους τρεις στόχους που τέθηκαν αρχικά. Αξιοσημείωτο μειονέκτημα της στρατηγικής ελέγχου αποσύνδεσης (decoupling control) αποτελεί το πολύ αρχικό στάδιο στο οποίο βρίσκεται.

## 3. Βέλτιστος έλεγχος εν μέσω πρόβλεψης.

Η στρατηγική του βέλτιστου ελέγχου εν μέσω πρόβλεψης (optimal predictive control) πραγματοποιείται μέσω μιας συνάρτησης κόστους που πραγματοποιεί μια προεπισκόπηση της ισοδύναμης κατανάλωσης καυσίμου του οχήματος σε ένα παράθυρο στο κοντινό μέλλον [50]. Χρησιμοποιείται η θεωρία βέλτιστου ελέγχου για την επίλυση ενώ οι πληροφορίες για την διαδρομή, την κίνηση κτλ. που παρέχονται από την συσκευή GPS έχουν σαν αποτέλεσμα την επίτευξη χαμηλότερων τιμών κατανάλωσης σε σχέση με την απλή ECMS. Το “παράθυρο” πρόβλεψης του ελεγκτή και η φιλοσοφία λειτουργίας του παρουσιάζεται στο σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19

Το 'παραθύρο' πρόβλεψης του ελεγκτή πρόβλεψης [50].

## 3.6 Στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας

### 3.6.1 Γενικά

Λόγω του μεγάλου πλήθους τοπολογιών υβριδικών οχημάτων κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη διαφόρων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας, ώστε να ρυθμίζεται αποδοτικά η ροή ισχύος από και προς τις επιμέρους μονάδες του οχήματος [45,46]. Αυτές οι στρατηγικές έχουν σαν σκοπό την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων, οι τέσσερις κυριότεροι είναι οι εξής:

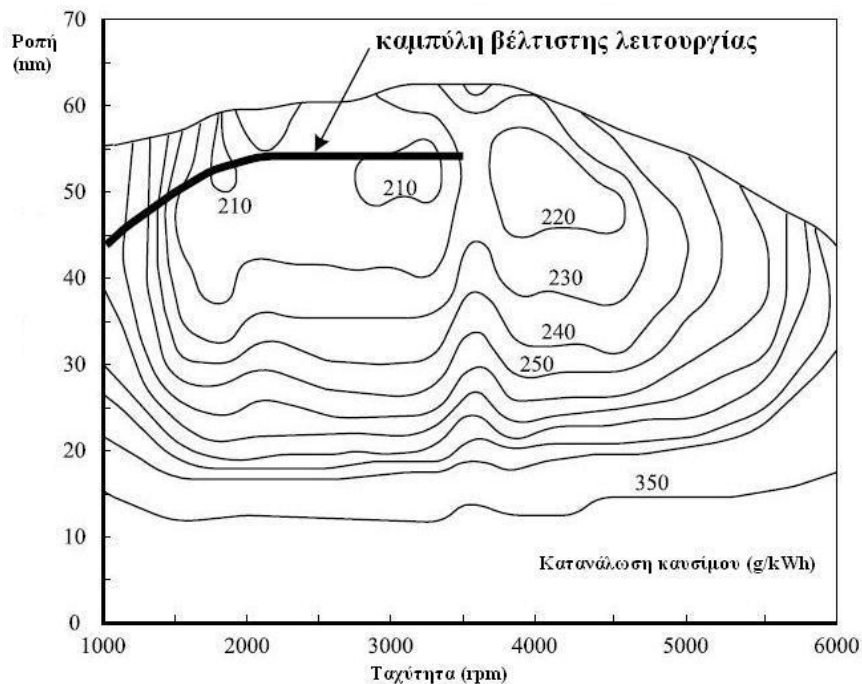
- Μέγιστη οικονομία καυσίμου.
- Ελαχιστοποίηση εκπεμπόμενων ρύπων.
- Ελαχιστοποίηση λειτουργικών εξόδων.
- Αξιόλογες επιδόσεις στον τομέα της οδήγησης.

Ο σχεδιασμός στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας περιλαμβάνει διάφορες θεωρήσεις, οι βασικότερες εξ αυτών είναι οι ακόλουθες:

- *Βέλτιστο σημείο λειτουργίας μηχανής εσωτερικής καύσης* – Ο προσδιορισμός του βέλτιστου σημείου λειτουργίας του θερμικού κινητήρα προσδιορίζεται από το διάγραμμα ροπής-στροφών του και μέσω αυτού μπορεί να επιτευχθεί μεγιστοποίηση της οικονομίας καυσίμου, ελαχιστοποίηση των ρύπων ή και ένας συνδυασμός αυτών των δύο.
- *Βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας μηχανής εσωτερικής καύσης* – Στην περίπτωση κατά την οποία απαιτείται από το θερμικό κινητήρα να ικανοποιήσει διάφορες ζητήσεις ισχύος, τα αντίστοιχα σημεία βέλτιστης λειτουργίας συνθέτουν μια καμπύλη βέλτιστης λειτουργίας. Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη βέλτιστης ισχύος για κάποια μηχανή εσωτερικής καύσης.



Εφόσον ακολουθείται αυτή η καμπύλη εξασφαλίζεται ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου.



Σχήμα 3.20

Καμπύλη βέλτιστης λειτουργίας σε διάγραμμα ροπής/στροφών ΜΕΚ [47].

- *Βέλτιστη περιοχή λειτουργίας μηχανής εσωτερικής καύσης* – Στο διάγραμμα ροπής/ταχύτητας του θερμικού κινητήρα υπάρχει μια περιοχή στην οποία βελτιστοποιείται η οικονομία καυσίμου.
- *Ελαχιστοποίηση μεταβατικών φαινομένων μηχανής εσωτερικής καύσης* – Πραγματοποιείται κατάλληλη ρύθμιση της ταχύτητας λειτουργίας του θερμικού κινητήρα ώστε να αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες απότομες μεταβολές.
- *Ελάχιστη ταχύτητα λειτουργίας μηχανής εσωτερικής καύσης* – Όταν η ΜΕΚ λειτουργεί σε χαμηλές ταχύτητες παρουσιάζει χαμηλή απόδοση. Συνεπώς απενεργοποιείται όταν η ταχύτητα περιστροφής του γίνεται μικρότερη από κάποιο συγκεκριμένο κάτω φράγμα.
- *Ελαχιστοποίηση συχνότητας ενεργοποίησης/απενεργοποίησης μηχανής εσωτερικής καύσης* – Η συχνή έναρξη/λήξη της λειτουργίας του θερμικού κινητήρα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπεμπόμενων ρύπων. Συνεπώς ορίζεται ένα ελάχιστο πλήθος φορών έναρξης της λειτουργίας του, ώστε να αποφεύγονται οι παραπάνω συνέπειες.
- *Διατήρηση κατάλληλου επιπέδου φόρτισης μπαταριών* – Το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών διατηρείται σε κατάλληλο επίπεδο ώστε ανά πάσα στιγμή να μπορεί να παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την επιτάχυνση του οχήματος ενώ παράλληλα να μπορεί να απορροφήσει ενέργεια μέσω της αναγεννητικής πέδησης ή της κίνησης σε κατηφόρα. Όταν το επίπεδο φόρτισης είναι πολύ υψηλό, η ΜΕΚ είτε απενεργοποιείται, είτε λειτουργεί σε κατάσταση αδράνειας (ρελαντί).

Όταν το επίπεδο φόρτισης είναι πολύ χαμηλό ο θερμικό κινητήρας λειτουργεί πιο εντατικά ώστε να φορτίσει τις μπαταρίες.

- *Διατήρηση σταθερής τάσης στα άκρα των μπαταριών* – Η τάση στα άκρα του πακέτου των μπαταριών δύναται να μεταβληθεί σημαντικά κατά την διάρκεια εκφόρτισης ή φόρτισης (είτε μέσω της γεννήτριας είτε μέσω της αναγεννητικής πέδησης του ηλεκτροκινητήρα). Διατηρείται σταθερή ώστε να αποφευχθεί κάποια μόνιμη βλάβη στις μπαταρίες.
- *Κατάλληλη κατανομή φορτίου στους κινητήρες* – Η κάλυψη της ζήτησης ισχύος πραγματοποιείται από την αποδοτική συνεργασία του θερμικού κινητήρα και του ζεύγους ηλεκτροκινητήρα-μπαταριών.
- *Κατάλληλη λειτουργία ανάλογα με την γεωγραφική τοποθεσία* – Σε ορισμένες περιοχές και αστικά κέντρα το υβριδικό όχημα λειτουργεί ως αμιγώς ηλεκτρικό. Αυτή η μεταβολή του τρόπου λειτουργίας γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα.

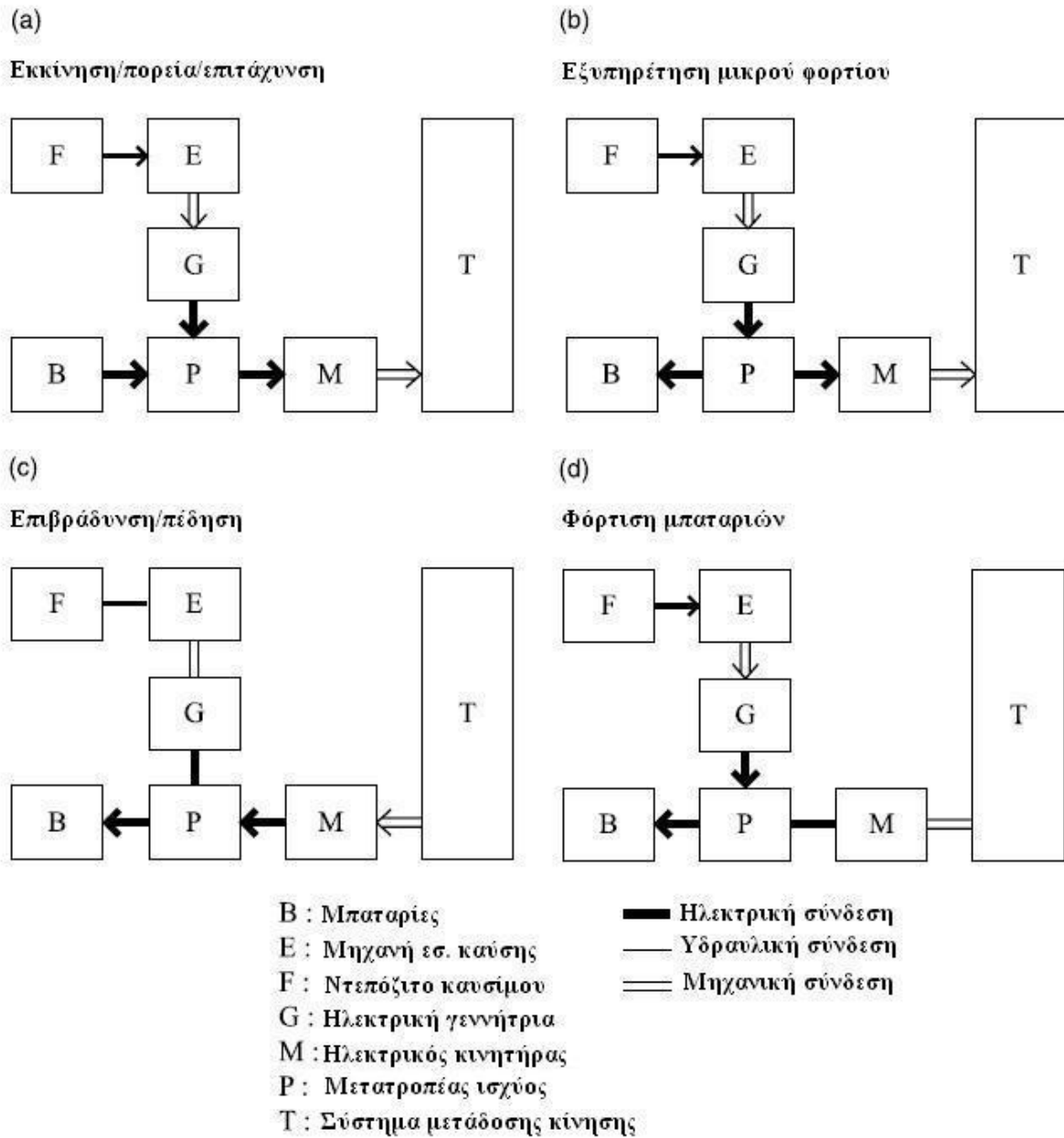
### **3.6.2 Στρατηγική διαχείρισης ενέργειας σειριακών υβριδικών οχημάτων**

Στα σειριακά υβριδικά οχήματα, η ροή ισχύος ανάλογα με τον εκάστοτε τρόπο λειτουργίας περιγράφεται στο σχήμα 3.21 [47].

Κατά την εκκίνηση, πορεία και επιτάχυνση του οχήματος τόσο η μηχανή εσωτερικής καύσης (μέσω της γεννήτριας), όσο και οι μπαταρίες προσδίδουν ηλεκτρική ενέργεια στον μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας έπειτα οδηγεί τον ηλεκτροκινητήρα που με την σειρά του κινεί τους τροχούς μέσω του συστήματος μετάδοσης κίνησης.

Κατά την εξυπηρέτηση μικρών φορτίων, η παραγόμενη από το θερμικό κινητήρα ενέργεια είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την κίνηση των τροχών. Κατά συνέπεια η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών, μέχρι το επίπεδο φόρτισής τους να φτάσει μια επιθυμητή τιμή.

Κατά την πέδηση ή την επιβράδυνση του οχήματος, ο ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια μετατρέποντας την κινητική ενέργεια των τροχών σε ηλεκτρική ενέργεια φορτίζοντας τις μπαταρίες μέσω του μετατροπέα ισχύος. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες δύναται να φορτιστούν ακόμα και αν το όχημα είναι πλήρως ακινητοποιημένο από την ΜΕΚ μέσω της γεννήτριας.



Σχήμα 3.21

Η ροή ισχύος σε κάθε φάση λειτουργίας του σειριακού υβριδικού οχήματος.

### 3.6.3 Στρατηγική διαχείρισης ενέργειας παράλληλων υβριδικών οχημάτων

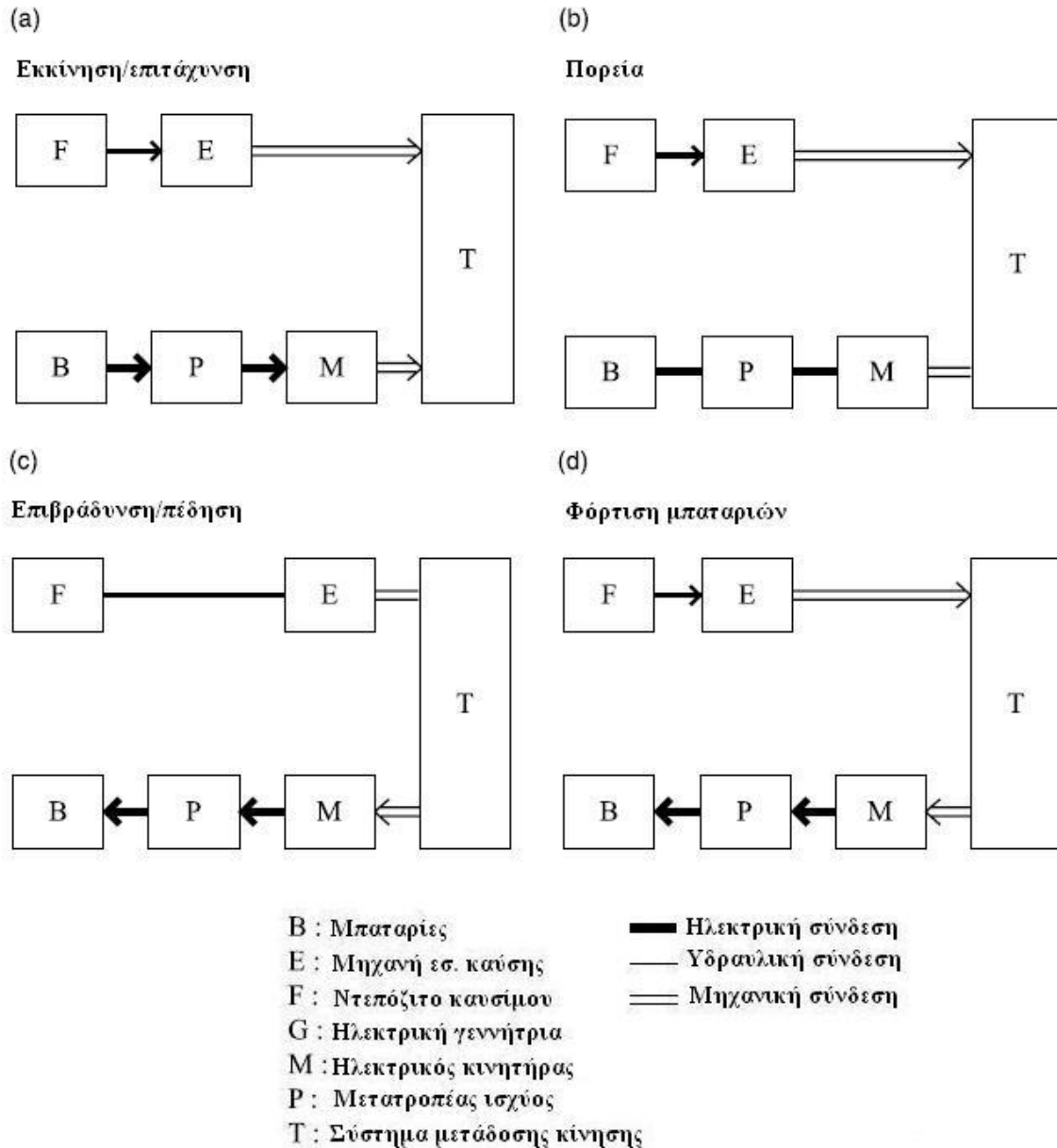
Το σχήμα 3.22 δείχνει την ροή ισχύος ανάλογα με τον εκάστοτε τρόπο λειτουργίας ενός παράλληλου υβριδικού οχήματος

Κατά την εκκίνηση ή την απότομη επιτάχυνση η μηχανή εσωτερικής καύσης σε συνεργασία με τον ηλεκτροκινητήρα αναλαμβάνουν την πρόωση του οχήματος. Συνήθως η κατανομή του φορτίου ανάμεσα σε ηλεκτροκινητήρα και θερμικό κινητήρα είναι 80% και 20% αντίστοιχα.

Κατά την διάρκεια της κανονικής πορείας η MEK είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για την κίνηση του οχήματος ενώ ο ηλεκτρικός κινητήρας παραμένει ανενεργός.

Κατά την πέδηση ή την επιβράδυνση, ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια φορτίζοντας τις μπαταρίες μέσω του μετατροπέα ισχύος.

Επιπρόσθετα, εφόσον τόσο η ΜΕΚ όσο και ο ηλεκτροκινητήρας είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο άξονα κίνησης, δύνανται και οι δύο να φορτίσουν τους μπαταρίες όταν εξυπηρετείται μικρό φορτίο.



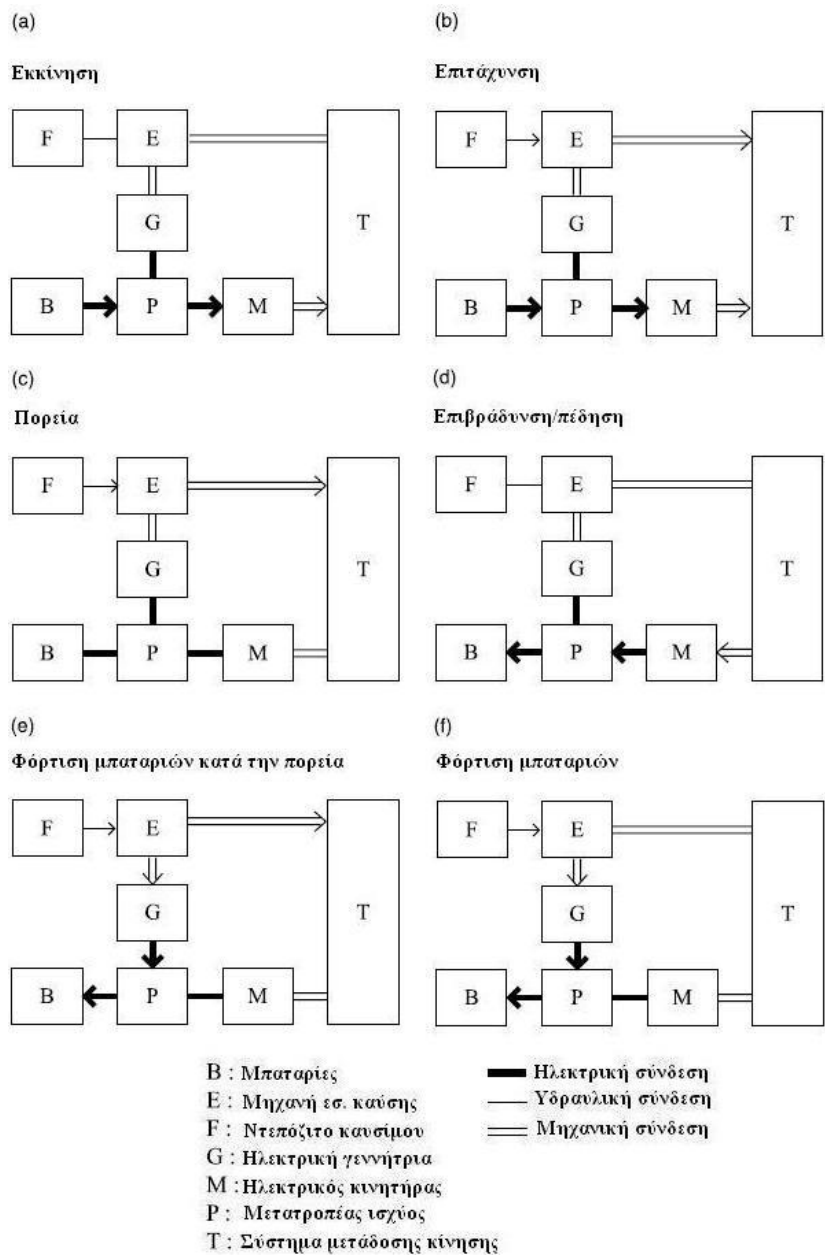
Σχήμα 3.22

*Η ροή ισχύος σε κάθε φάση λειτουργίας του παράλληλου υβριδικού οχήματος.*

### 3.6.4 Στρατηγική διαχείρισης ενέργειας σειριακών/παράλληλων υβριδικών οχημάτων

Η σειριακή/παράλληλη τοπολογία υβριδικών οχημάτων περιλαμβάνει χαρακτηριστικά τόσο της σειριακής όσο και της παράλληλης τοπολογίας. Κατά συνέπεια υπάρχουν πολλοί πιθανοί τρόποι λειτουργίας και ροής της ισχύος. Δύνανται να γίνει μια γενική κατηγοριοποίηση των στρατηγικών

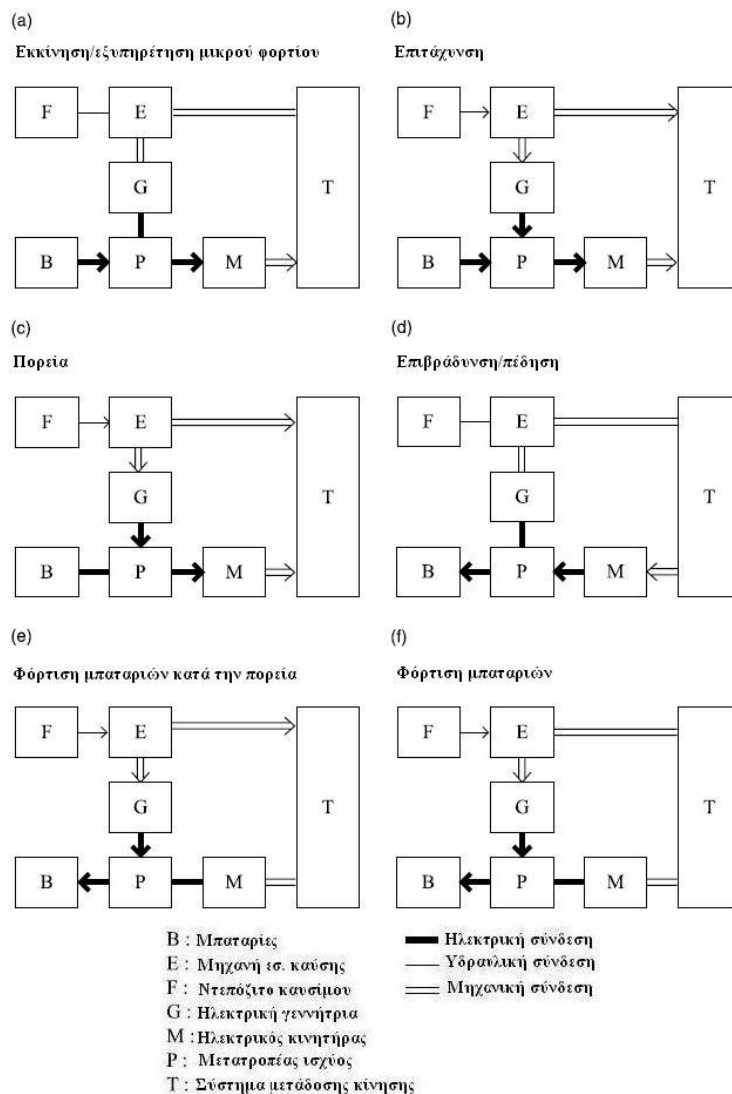
διαχείρισης ενέργειας η οποία περιλαμβάνει εντονότερη χρήση του θερμικού κινητήρα ή εντονότερη χρήση του ηλεκτροκινητήρα. Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζεται η στρατηγική που κάνει έντονη χρήση της μηχανής εσωτερικής καύσης η οποία διαθέτει έξι πιθανές φάσεις λειτουργίας. Κατά την εκκίνηση η ενέργεια για την πρόωση του οχήματος παρέχεται αποκλειστικά από την μπαταρία ενώ η MEK είναι απενεργοποιημένη. Στην περίπτωση της έντονης επιτάχυνσης του οχήματος ηλεκτρικός και θερμικός κινητήρας συνεργάζονται ώστε να ικανοποιήσουν την ζήτηση σε ενέργεια, ενώ όταν το όχημα εκτελεί κανονική πορεία χρησιμοποιεί αποκλειστικά και μόνο την μηχανή εσωτερικής καύσης. Σε περιπτώσεις πέδησης ή επιβράδυνσης ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια και φορτίζει τις μπαταρίες μέσω του μετατροπέα ισχύος. Οι μπαταρίες επίσης φορτίζονται και κατά την διάρκεια της πορείας από την MEK και μέσω της γεννήτριας, ενώ η MEK παράλληλα αναλαμβάνει και την πρόωση του οχήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως όταν το όχημα είναι ακινητοποιημένο, η μηχανή εσωτερικής καύσης δεν σταματά την φόρτιση των μπαταριών.



Σχήμα 3.23

Η ροή ισχύος σε κάθε φάση λειτουργίας του σ/π υβριδικού οχήματος με έντονη χρήση της MEK.

Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η στρατηγική που κάνει έντονη χρήση του ηλεκτροκινητήρα, η οποία διαθέτει έξι πιθανές φάσεις λειτουργίας. Κατά την εκκίνηση και την εξυπηρέτηση μικρών φορτίων το όχημα κινείται αποκλειστικά και μόνο με την χρήση του ηλεκτρικού κινητήρα διατηρώντας την μηχανή εσωτερικής καύσης ανενεργή. Κατά την έντονη επιτάχυνση και την πορεία θερμικός και ηλεκτρικός κινητήρας αναλαμβάνουν από κοινού την πρόωση του οχήματος. Η ουσιαστική διαφορά σε σχέση με την προαναφερθείσα στρατηγική διαχείρισης ενέργειας έγκειται στο γεγονός ότι η ενέργεια που δαπανάται κατά την διάρκεια έντονων επιταχύνσεων προέρχεται τόσο από την γεννήτρια όσο και από τις μπαταρίες, ενώ η απαιτούμενη ενέργεια κατά την πορεία του οχήματος προέρχεται αποκλειστικά από το θερμικό κινητήρα μέσω της γεννήτριας. Σημειώνεται πως συνήθως χρησιμοποιείται πλανητικό σύστημα (planetary gear) για τον διαμοιρασμό της ισχύος εξόδου της μηχανής εσωτερικής καύσης ανάμεσα στην γεννήτρια και το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Κατά την πέδηση ή την επιβράδυνση του οχήματος, ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια φορτίζοντας τις μπαταρίες μέσω του μετατροπέα ισχύος. Οι μπαταρίες επίσης φορτίζονται και κατά την διάρκεια της πορείας από την ΜΕΚ και μέσω της γεννήτριας, ενώ η ΜΕΚ παράλληλα αναλαμβάνει και την πρόωση του οχήματος. Όταν το όχημα είναι ακινητοποιημένο, η μηχανή εσωτερικής καύσης δεν διακόπτει την φόρτιση των μπαταριών.



Σχήμα 3.24

Η ροή ισχύος σε κάθε φάση λειτουργίας του σ/π υβριδικού οχήματος με έντονη χρήση ηλεκτροκινητήρα.

## 4 Ανάπτυξη μεθοδολογίας μοντελοποίησης υβριδικού οχήματος και προτεινόμενος έλεγχος

---

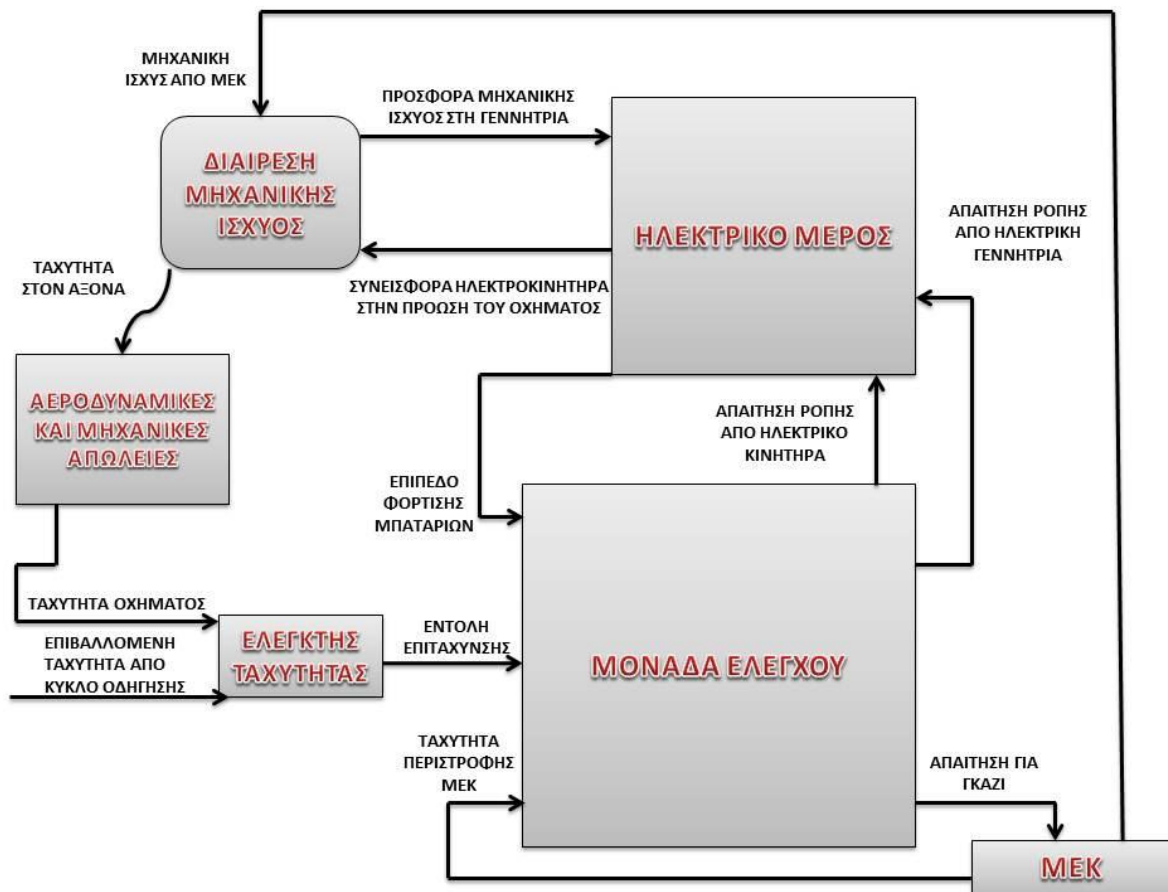
### 4.1 Ανάπτυξη μοντέλου υβριδικού οχήματος

#### 4.1.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το δυναμικό μοντέλο υβριδικού οχήματος που υλοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink® R2011b. Επιλέχθηκε η σειριακή/παράλληλη αρχιτεκτονική η οποία αν και αυξάνει την πολυπλοκότητα κατά την υλοποίηση, δύναται να επιτύχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με την αντίστοιχη παράλληλη ή σειριακή διαμόρφωση. Η συμπεριφορά του μοντέλου δοκιμάζεται στα πλαίσια μιας επίσημης αθηναϊκής διαδρομής (Athens Driving Cycle – ADC) [82], καθώς και σε άλλες τυπικές διαδρομές που χρησιμοποιούνται για δοκιμές συστημάτων ηλεκτροκίνησης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην στρατηγική ελέγχου και ενεργειακής διαχείρισης που υλοποιήθηκε με γνώμονα την βελτιστοποιημένη λειτουργία, από άποψης οικονομίας καυσίμου, του υβριδικού οχήματος στα πλαίσια της πιθανής χρήσης του στην περιοχή της Αθήνας. Μέσω του μοντέλου και των πολλαπλών εξόδων που παρέχει, λαμβάνονται χρήσιμα συμπεράσματα για την λειτουργία ενός υβριδικού οχήματος στα πλαίσια ενός αστικού κέντρου.

Οι επιμέρους μονάδες που συνθέτουν το δυναμικό μοντέλο παρουσιάζονται στο δομικό διάγραμμα του σχήματος 4.1



Σχήμα 4.1

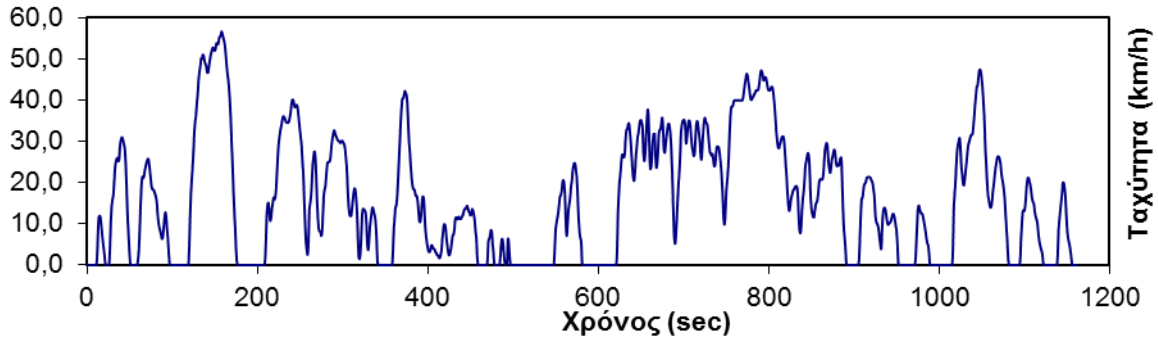
Το δομικό διάγραμμα του δυναμικού μοντέλου υβριδικού οχήματος.

#### 4.1.2 Κύκλοι οδήγησης

Κύκλος οδήγησης (driving cycle) ονομάζεται ένα σύνολο από σημεία ταχύτητας (speed points) συναρτήσει του χρόνου. Αυτό το σύνολο σημείων συνθέτει ένα διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου και υπαγορεύει την επιθυμητή ταχύτητα του εκάστοτε οχήματος κάθε χρονική στιγμή. Τυποποιημένοι κύκλοι χρησιμοποιούνται ευρέως για τον προσδιορισμό της λειτουργικής συμπεριφοράς των οχημάτων (κατανάλωση καυσίμου, εκπομπές ρύπων κτλ.) σε επίπεδο μοντελοποίησης. Μέσω των κύκλων οδήγησης δύνανται να προσομοιωθούν ποικίλες συνθήκες οδήγησης όπως κίνηση οχήματος σε αστικό κέντρο, επαρχία και αυτοκινητόδρομο. Η δημιουργία τους γίνεται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και η χρηματοδότηση για την δημιουργία αυτών προέρχεται είτε από εταιρείες είτε από αρμόδια υπουργεία κρατών.

Δημοφιλείς και χρησιμοποιούμενοι από την βιομηχανία κύκλοι οδήγησης είναι ο UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), NEDC (New European Driving Cycle), ο αμερικάνικος FTP-75 (Federal Test Procedure) κ.α. Για της ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιείται ένα σύνολο πρότυπων κύκλων οδήγησης, μεταξύ αυτών και ο Αθηναϊκός Κύκλος Οδήγησης (Athens Driving Cycle - ADC) ο οποίος συνιστά μια επίσημη και αντιπροσωπευτική διαδρομή στην Αθήνα [82]. Η γραφική παράσταση του ADC φαίνεται στο σχήμα 4.2



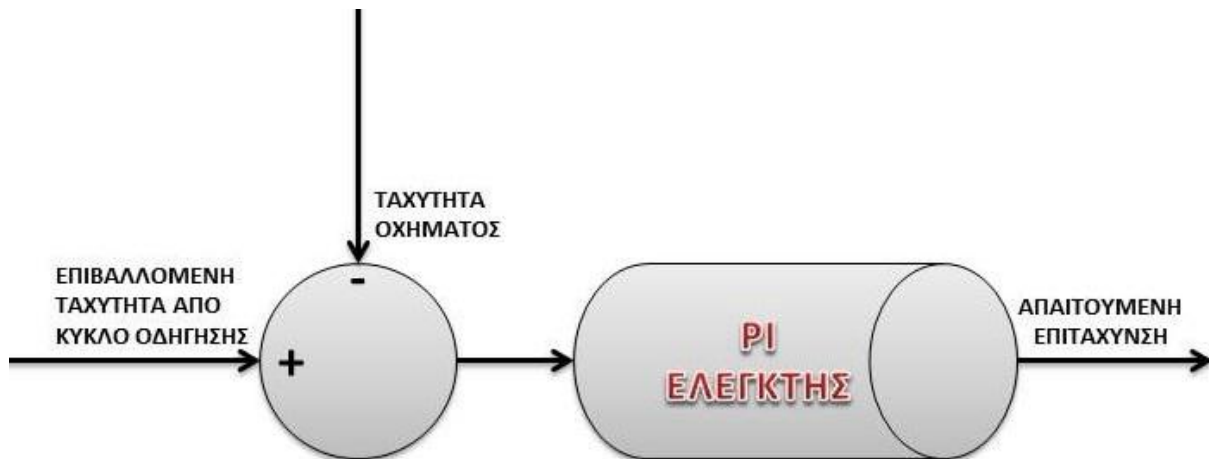


Σχήμα 4.2

Ο αθηναϊκός κύκλος οδήγησης (Athens Driving Cycle) [82].

#### 4.1.3 Ελεγκτής ταχύτητας

Η εσωτερική διαμόρφωση του ελεγκτή ταχύτητας παρουσιάζεται στο δομικό διάγραμμα του σχήματος 4.3.



Σχήμα 4.3

Δομικό διάγραμμα ελεγκτή ταχύτητας.

Στόχος του ελεγκτή ταχύτητας είναι να προσαρμόζει την ταχύτητα του οχήματος στην ταχύτητα αναφοράς του εκάστοτε κύκλου οδήγησης. Για αυτό τον σκοπό υπολογίζεται η απόκλιση που υπάρχει ανά πάσα στιγμή από την ταχύτητα αναφοράς και εν μέσω ενός PI ελεγκτή δίνεται εντολή επιτάχυνση του οχήματος ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση μεταξύ ταχύτητας οχήματος και ταχύτητας αναφοράς.

#### 4.1.4 Μηχανή εσωτερικής καύσης

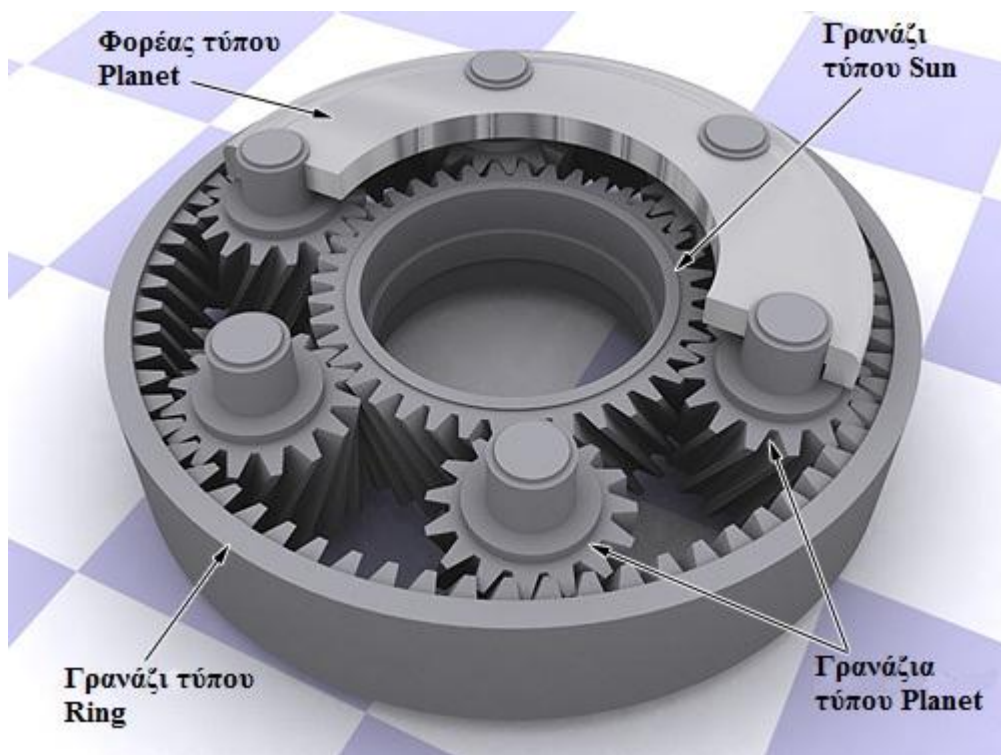
Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε μοντέλο βενζινοκινητήρα από την βιβλιοθήκη SimDriveline του Simulink. Η ονομαστική ισχύς του είναι 45kW ενώ το διάγραμμα ροπής-στροφών-κατανάλωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.21. Λήφθηκαν υπόψη απώλειες λόγω αδράνειας και τριβών στον άξονα. Στο παράρτημα πραγματοποιείται εκτενής περιγραφή της δομής του χρησιμοποιηθέντος μοντέλου.

#### 4.1.5 Σύστημα διαχωρισμού ισχύος

Χρησιμοποιείται πλανητικό σύστημα (planetary gear), αντίστοιχο της εικόνας 4.2, για τον διαμοιρασμό της ισχύος εξόδου της μηχανής εσωτερικής καύσης ανάμεσα στην γεννήτρια και το σύστημα μετάδοσης κίνησης [83]. Ο λόγος του πλήθους των δοντιών του γραναζιού ring (σύστημα μετάδοσης κίνησης) προς το αντίστοιχο του γραναζιού sun (γεννήτρια) λαμβάνεται ίσος με 2,6 ισχύει δηλαδή η εξής σχέση:

$$\frac{N_R}{N_S} = 2,6 \quad (4.1)$$

Η ροπή, η γωνιακή ταχύτητα και κατά συνέπεια η προσφερόμενη από τον βενζινοκινητήρα ισχύς μοιράζεται σε σύστημα μετάδοσης κίνησης και γεννήτρια με αναλογία 2,6:1



Εικόνα 4.2

Πλανητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης [83].

Η σχέση που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες περιστροφής των γραναζιών και το πλήθος των δοντιών είναι η εξής

$$\frac{N_{sun}}{N_{ring}} = \frac{\omega_{carrier} - \omega_{ring}}{\omega_{sun} - \omega_{carrier}} \quad (4.2)$$

Ισοδύναμα ισχύει:

$$N_{sun} \cdot \omega_{sun} + N_{ring} \cdot \omega_{ring} = (N_{ring} + N_{sun}) \cdot \omega_{carrier} \quad (4.3)$$

Με διαίρεση της σχέσης 4.3 με την ποσότητα  $N_{sun}$  και αντικατάσταση των δεικτών ώστε να παραπέμπουν στην αντίστοιχη μηχανή, προκύπτει η εξής σχέση :

$$\omega_{gen.} + 2,6 \cdot \omega_{motor} = 3,6 \cdot \omega_{ICE} \Rightarrow n_{gen} = -2,6 \cdot n_{motor} + 3,6 \cdot n_{ICE} \quad (4.4)$$

Χρησιμοποιήθηκε το πλανητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης της βιβλιοθήκης Simscape® στο οποίο λήφθηκαν υπόψη απώλειες λόγω τριβής. Η διαμόρφωση του μοντέλου περιγράφεται στο παράρτημα.

#### 4.1.6 Αεροδυναμική

Διαμορφώθηκε ένα αεροδυναμικό προφίλ για το όχημα, το οποίο περιέχει και τις μηχανικές απώλειες του κιβωτίου ταχυτήτων. Συνολικά οι αεροδυναμικές και μηχανικές απώλειες προκαλούν μείωση στην ταχύτητα του οχήματος. Χρησιμοποιήθηκε ένα απλό κιβώτιο σταθερής αναλογίας (gear ratio) και ίσης με 5. Η ταχύτητα στην έξοδο του υποπενταπλασιάζεται και η απόλυτη τιμή της ροπής πενταπλασιάζεται (σχέση 4.5) . Σημειώνεται επίσης πως λαμβάνονται υπόψη απώλειες υπό μορφή τριβών.

$$\begin{aligned} |\tau_O| &= n_{gear\_ratio} \cdot |\tau_S| \\ \omega_S &= n_{gear\_ratio} \cdot \omega_O \end{aligned} \quad (4.5)$$

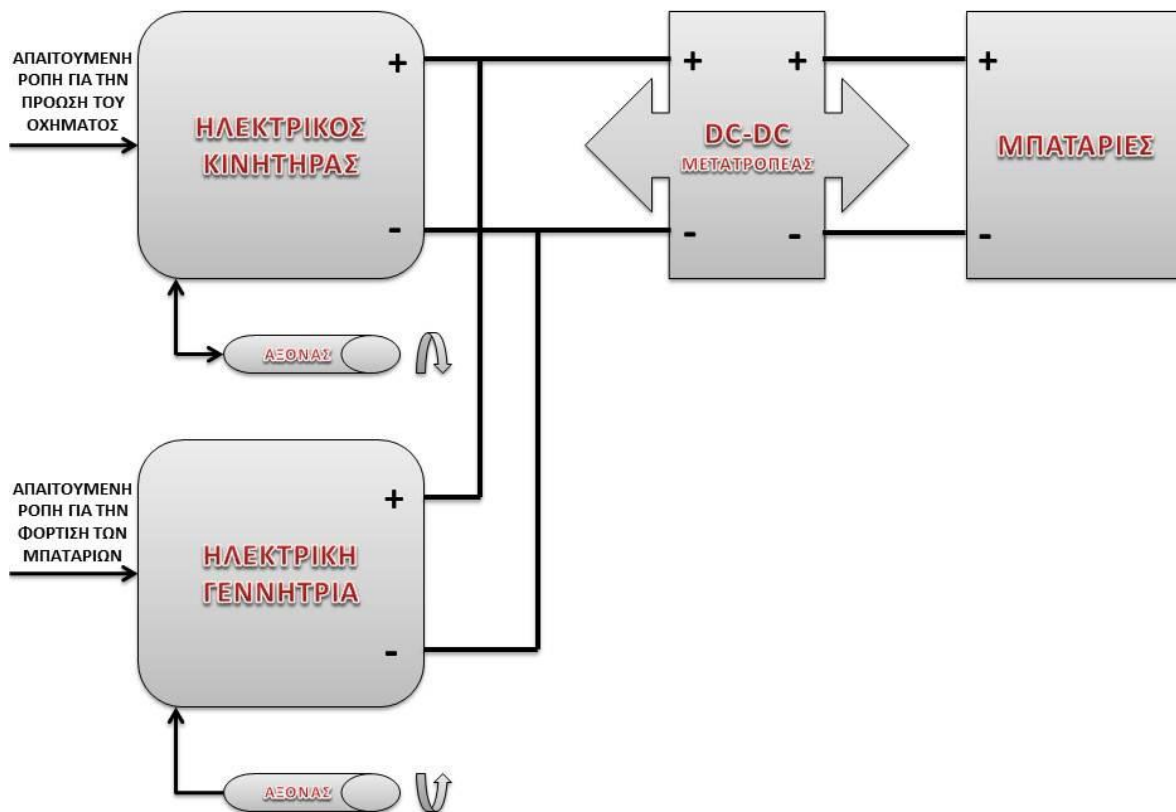
Η δύναμη που οφείλεται στις αεροδυναμικές απώλειες έχει αντίθετη φορά προς την κίνηση του οχήματος και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση

$$F_D = -\frac{1}{2} c_D \rho u^2 A \quad (4.6)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα η οποία ελήφθη ίση με  $1,025 \frac{kg}{m^3}$ , και  $A$  η μετωπική επιφάνεια του οχήματος που λήφθηκε ίση με  $2,16m^2$ ,  $u$  η ταχύτητα του οχήματος και  $c_D$  ο αεροδυναμικός συντελεστής του ο οποίος θεωρήθηκε ίσος με 0,3. Η μάζα του οχήματος θεωρήθηκε 1200kg, ενώ λήφθηκαν υπόψη και απώλειες λόγω αδράνειας. Στο παράρτημα περιγράφεται ενδελεχώς η διαμόρφωση του μοντέλου.

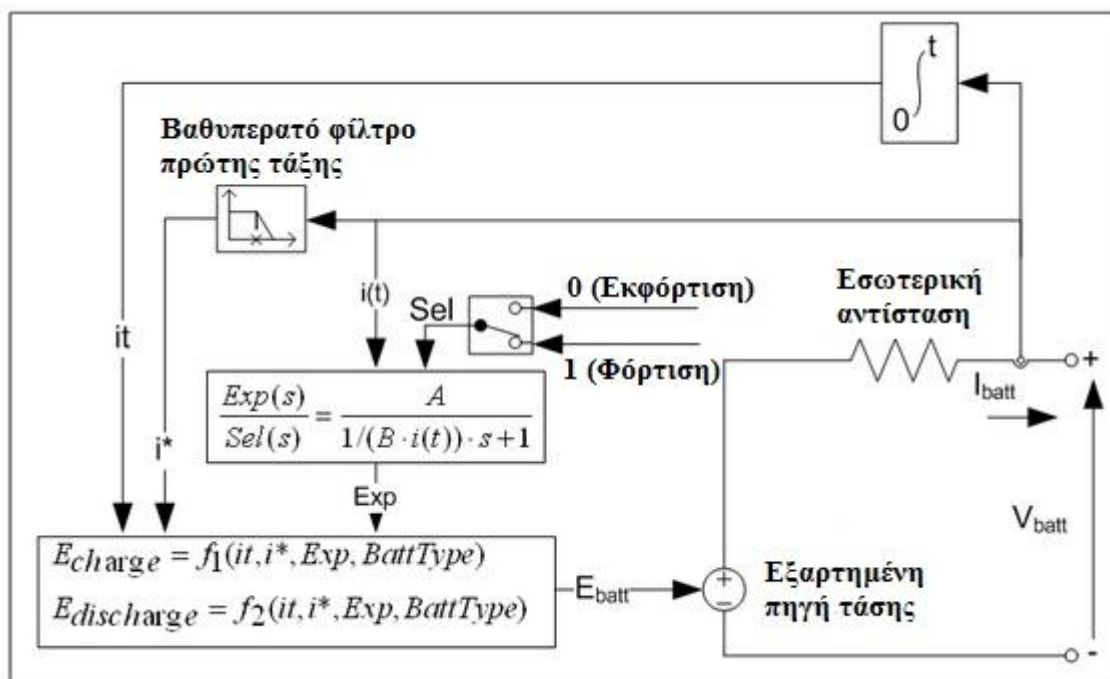
#### 4.1.7 Μπαταρίες

Στο δεξί μέρος του δομικού διαγράμματος του ηλεκτρικού μέρους (σχήμα 4.4), βρίσκονται οι μπαταρίες οι οποίες συνιστούν το μοναδικό μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του υβριδικού οχήματος. Το δυναμικό μοντέλο από το οποίο προέκυψαν οι εξισώσεις φόρτισης και εκφόρτισης τους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.4

Το δομικό διάγραμμα του ηλεκτρικού μέρους του οχήματος.



Σχήμα 4.5

Το δυναμικό μοντέλο των μπαταριών [84].

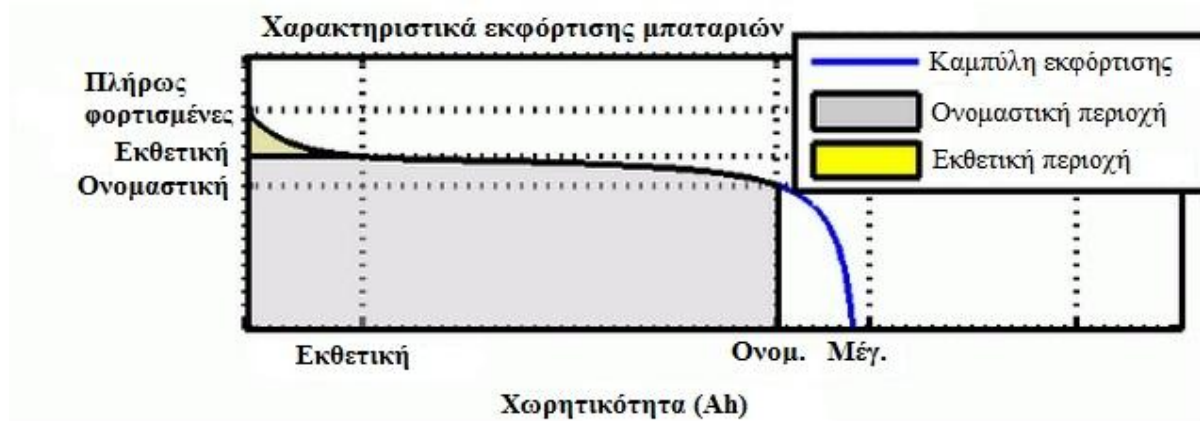
Ο τύπος των μπαταριών που επιλέχθηκε είναι NiMH και προκύπτουν οι εξής εξισώσεις που περιγράφουν την φόρτιση και εκφόρτιση τους.

$$\text{Εκφόρτιση (για } i^* > 0): f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (4.7)$$

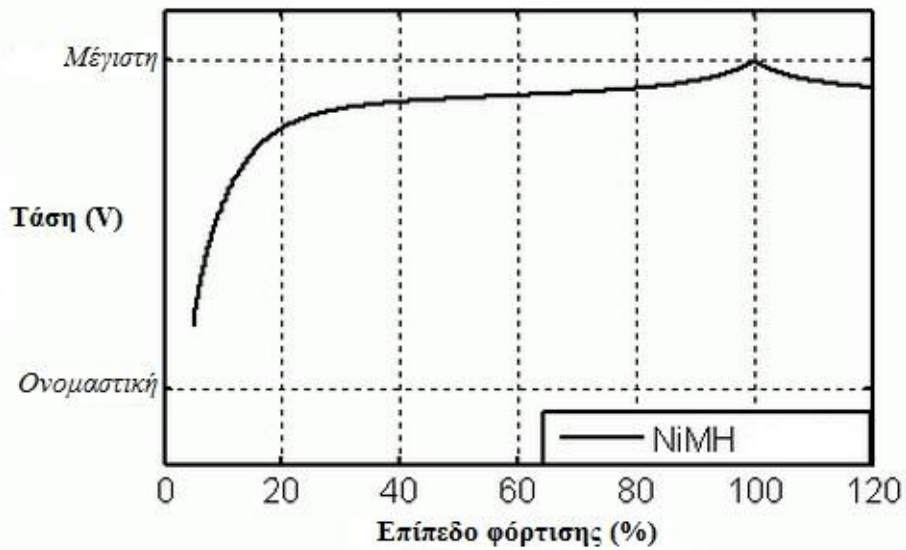
$$\text{Φόρτιση (για } i^* < 0): f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (4.8)$$

Επεξηγούνται οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στο σχήμα 4.6 καθώς και στις παραπάνω σχέσεις.  $E_{BATT}$  είναι η μη γραμμική τάση της μπαταρίας,  $E_0$  η σταθερή τάση,  $Exp(s)$  είναι η τάση στην εκθετική ζώνη της μπαταρίας, η μεταβλητή  $Sel(s)$  λαμβάνει τιμές 0 ή 1 ανάλογα με τον εκφορτίζεται ή αν φορτίζεται και  $K$  η αντίσταση πόλωσης (σε  $\Omega$ ). Με  $i^*$  συμβολίζονται τα ρεύματα χαμηλών συχνοτήτων που υφίστανται, με  $i$  το ρεύμα της μπαταρίας,  $it$  είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah,  $B$  η εκθετική χωρητικότητα (Ah) και  $A$  η εκθετική τάση. Όλες οι προαναφερθείσες τάσεις είναι σε Volts και τα ρεύματα σε Amperes. Τα παραπάνω μεγέθη προσδιορίζονται ποιοτικά από την καμπύλη μπαταριών εκφόρτισης του σχήματος 4.14, ενώ στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται και η καμπύλη φόρτισης των μπαταριών NiMH.

Η ονομαστική τάση εξόδου των μπαταριών επιλέχθηκε στα 200V ενώ η ονομαστική χωρητικότητά τους στα 8,1Ah. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη των μπαταριών που λήφθηκαν υπόψη κατά την μοντελοποίησή τους παρουσιάζονται στο παράρτημα.



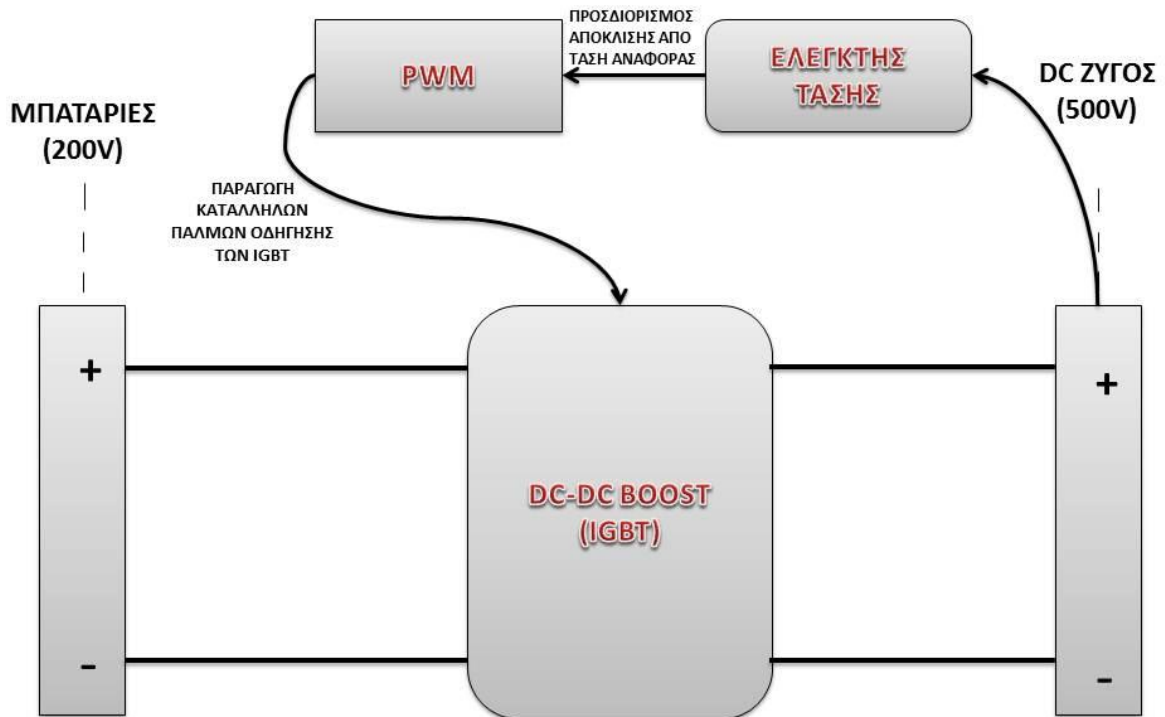
Σχήμα 4.14: Καμπύλη εκφόρτισης μπαταριών [84].



Σχήμα 4.15: Καμπύλη φόρτισης μπαταριών NiMH [84].

#### 4.1.8 Μετατροπέας ισχύος

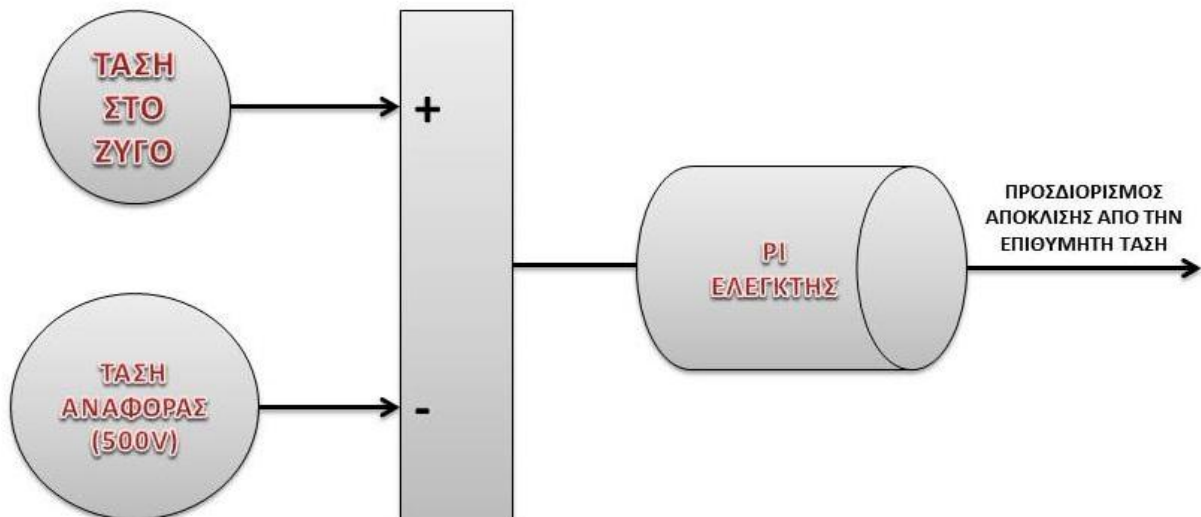
Το δομικό διάγραμμα του δυναμικού μοντέλου που διαμορφώθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 4.16



Σχήμα 4.16

Το δομικό διάγραμμα του DC-DC μετατροπέα.

Ο μετατροπέας απαιτείται για την ανύψωση της τάσης των μπαταριών από τα 200V στα 500V με σκοπό την τροφοδότηση του ηλεκτροκινητήρα. Επιπρόσθετα μέσω αυτού του μετατροπέα δίνεται η δυνατότητα φόρτισης των μπαταριών μέσω της αναγεννητικής πέδησης, κατά την οποία ο η ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια, αλλά και μέσω της ηλεκτρικής γεννήτριας του οχήματος. Πρόκειται δηλαδή για έναν μετατροπέα ισχύος αμφίδρομης λειτουργίας (bidirectional). Το ημιαγωγικό στοιχείο που επιλέχθηκε είναι το IGBT (παράλληλα με δίοδο ελεύθερης διέλευσης) και χρησιμοποιήθηκε λόγω των αναγκών σε ισχύ και διακοπτικές συχνότητες της εφαρμογής. Χρησιμοποιήθηκαν κυκλώματα snubber για την προστασία των διόδων, μη πολωμένα σειράς R-C με αντίσταση σειράς  $R_s = 5k\Omega$  και πολύ μεγάλες χωρητικότητες για τον περιορισμό της μέγιστης τάσης καθώς και του ρυθμού  $\frac{dV}{dt}$  κατά την ανάστροφη αποκατάσταση [85]. Το δομικό διάγραμμα του ελεγκτή τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17. Ο ελεγκτής τάσης με την χρήση ενός κατάλληλα ρυθμισμένου PI ελεγκτή προσδιορίζει την απόκλιση από την επιθυμητή τάση και στη συνέχεια μέσω διαμόρφωσης εύρους παλμών, πραγματοποιείται οδήγηση των IGBT του DC-DC μετατροπέα. Το μοντέλο DC-DC μετατροπέα που διαμορφώθηκε σε περιβάλλον Simulink®, περιγράφεται στο παράρτημα.



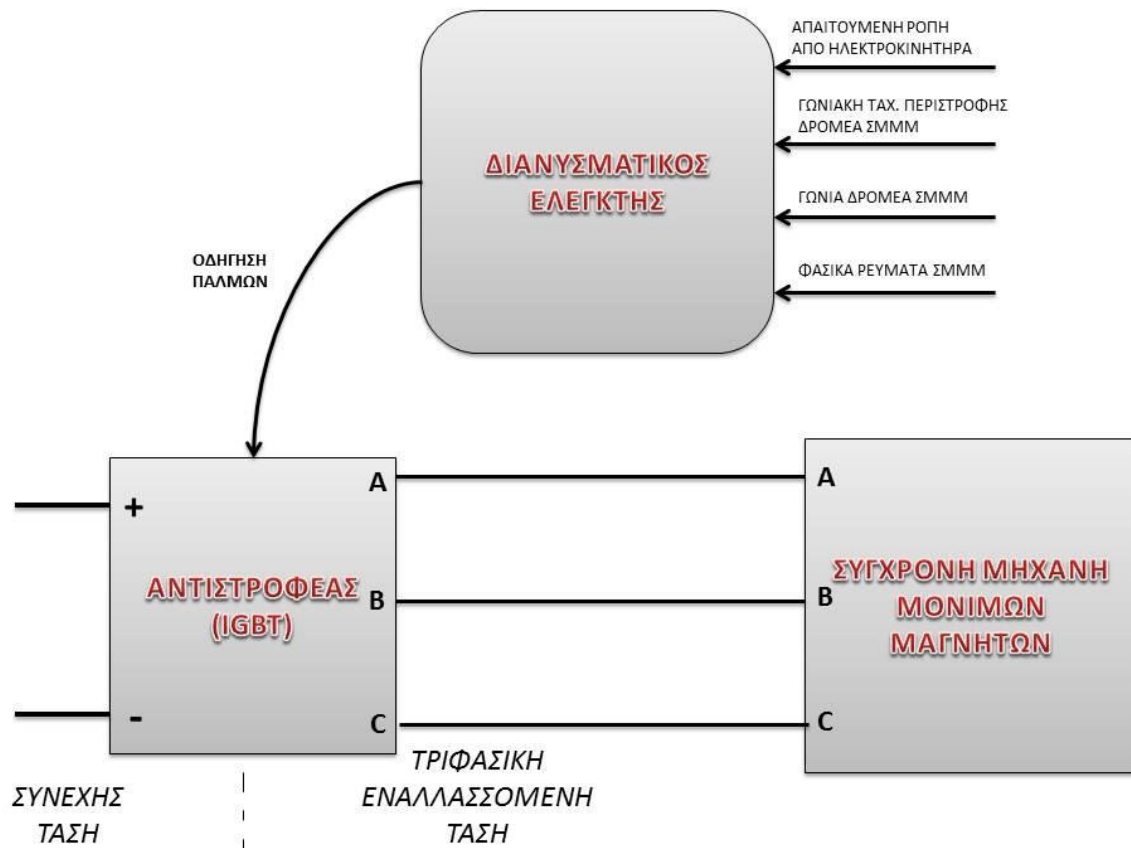
Σχήμα 4.17

Το δομικό διάγραμμα του ελεγκτή τάσης.

#### 4.1.9 Ηλεκτρικός κινητήρας

Για τις ανάγκες ηλεκτροκίνησης του οχήματος χρησιμοποιήθηκε σύγχρονος 8-πολικός κινητήρας μονίμων μαγνητών με έκτυπους πόλους ισχύος 35 kW στον οποίο εφαρμόστηκε διανυσματικός έλεγχος (vector control) για την κατάλληλη ρύθμιση των παλμών προς τον αντιστροφέα (σχήμα 4.18).

Ο διανυσματικός ελεγκτής λαμβάνει στην είσοδό του την απαιτούμενη ροπή από τον ηλεκτροκινητήρα, την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της σύγχρονης μηχανής, την γωνία του δρομέα της μηχανής και τα φασικά ρεύματα της σύγχρονης μηχανής. Στην έξοδο του παράγει κατάλληλους παλμούς για την οδήγηση των IGBT του αντιστροφέα.



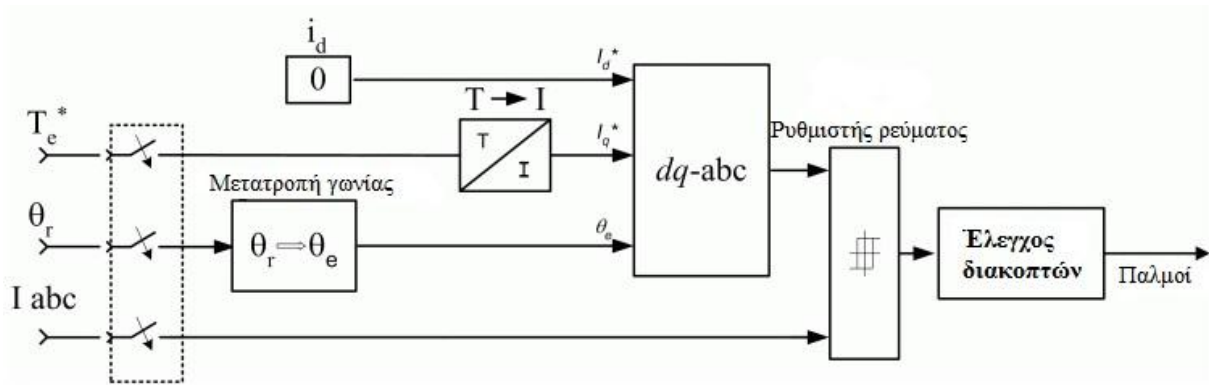
Σχήμα 4.18

Δομικό διάγραμμα διαδικασίας οδήγησης Σύγχρονου κινητήρα

Το δυναμικό μοντέλο που συνθέτει τον ελεγκτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.19. Επεξηγούνται οι επιμέρους δομικές του μονάδες:

- $dq-abc$  – Μετατρέπει την συνιστώσα  $dq$  του ρεύματος σε μορφή  $abc$ .
- Ρυθμιστής ρεύματος – Πρόκειται για έναν ελεγκτή τύπου ON-OFF με ρυθμιζόμενο εύρος υστέρησης.
- Μετατροπή γωνίας – Υπολογίζει την ηλεκτρική γωνία δρομέα μέσω της μηχανικής γωνίας.
- Έλεγχος διακοπών – Περιορίζει την συχνότητα μεταγωγής του αντιστροφέα μέχρι μια μέγιστη τιμή κατόπιν ρύθμισης.





Σχήμα 4.19

Δυναμικό μοντέλο διανυσματικού ελεγκτή (VECT Controller).

® περιγράφεται από τις εξής εξισώσεις:

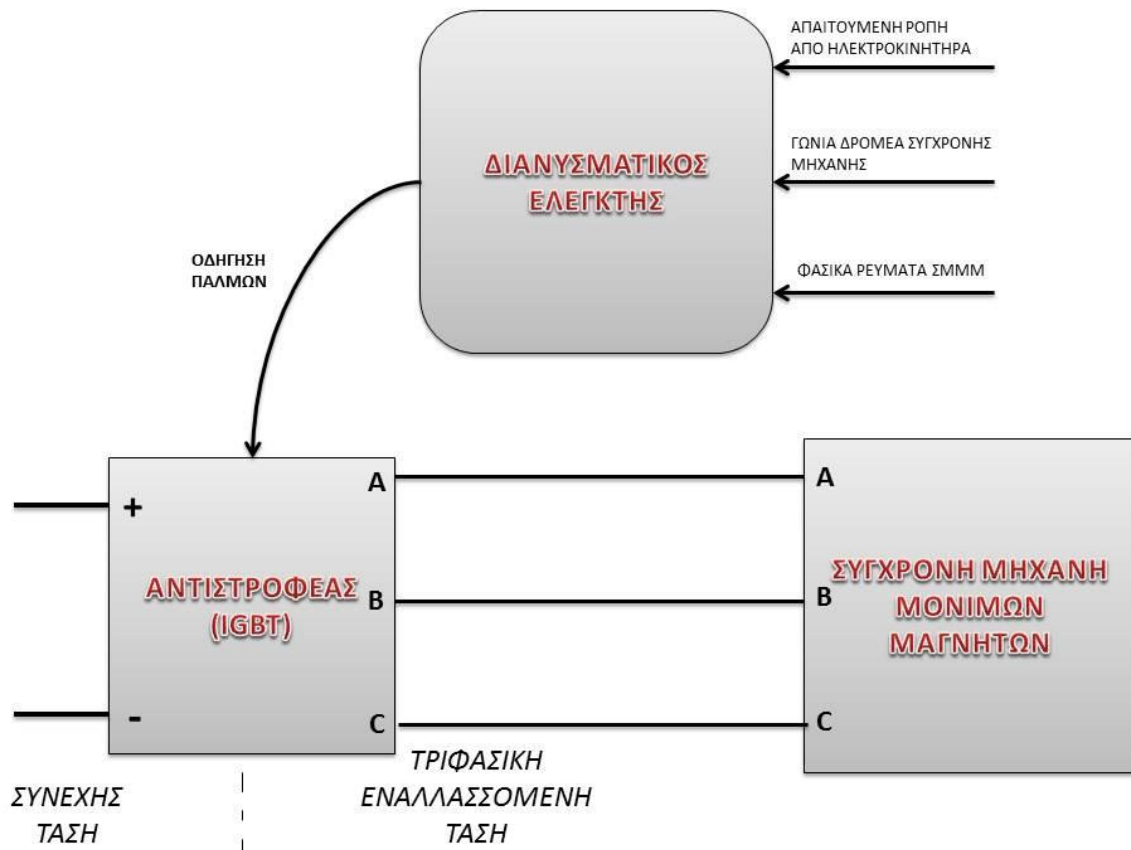
$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} i_d &= \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q \\
 \frac{d}{dt} i_q &= \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q} \\
 T_e &= 1,5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Όπου  $L_d$  και  $L_q$  είναι οι αυτεπαγωγές σε άξονα d και q αντίστοιχα οι οποίες εκφράζουν την εκτυπότητα της μηχανής,  $R$  η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη,  $i_d, i_q$  και  $v_d, v_q$  τα ρεύματα και οι τάσεις στους άξονες d και q και  $\omega_r$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Με  $\lambda$  συμβολίζεται το πλάτος της μαγνητικής ροής των μονίμων μαγνητών του δρομέα που επάγεται στα τυλίγματα του στάτη,  $p$  είναι τα ζεύγη των πόλων και  $T_e$  η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή.

#### 4.1.10 Ηλεκτρική γεννήτρια

Το μοντέλο λόγω σειριακής/παράλληλης διαμόρφωσης διαθέτει και ηλεκτρική γεννήτρια. Χρησιμοποιήθηκε σύγχρονη διπολική γεννήτρια μονίμων μαγνητών με έκτυπους πόλους ισχύος 15kW. Ο έλεγχός της πραγματοποιείται μέσω ενός διανυσματικού ελεγκτή (VECT Controller) αντίστοιχου με αυτού του ηλεκτροκινητήρα καθώς και ενός ανάλογου τριφασικού αντιστροφέα. Η διαδικασία ελέγχου της ηλεκτρικής γεννήτριας περιγράφεται μέσω του δομικού διαγράμματος στο σχήμα 4.20.

Τα μοντέλα και των δύο ηλεκτρικών μηχανών που διαμορφώθηκαν, περιγράφονται ενδελεχώς στο παράρτημα.



Σχήμα 4.20

Δομικό διάγραμμα διαδικασίας οδήγησης της σύγχρονη γεννήτριας.

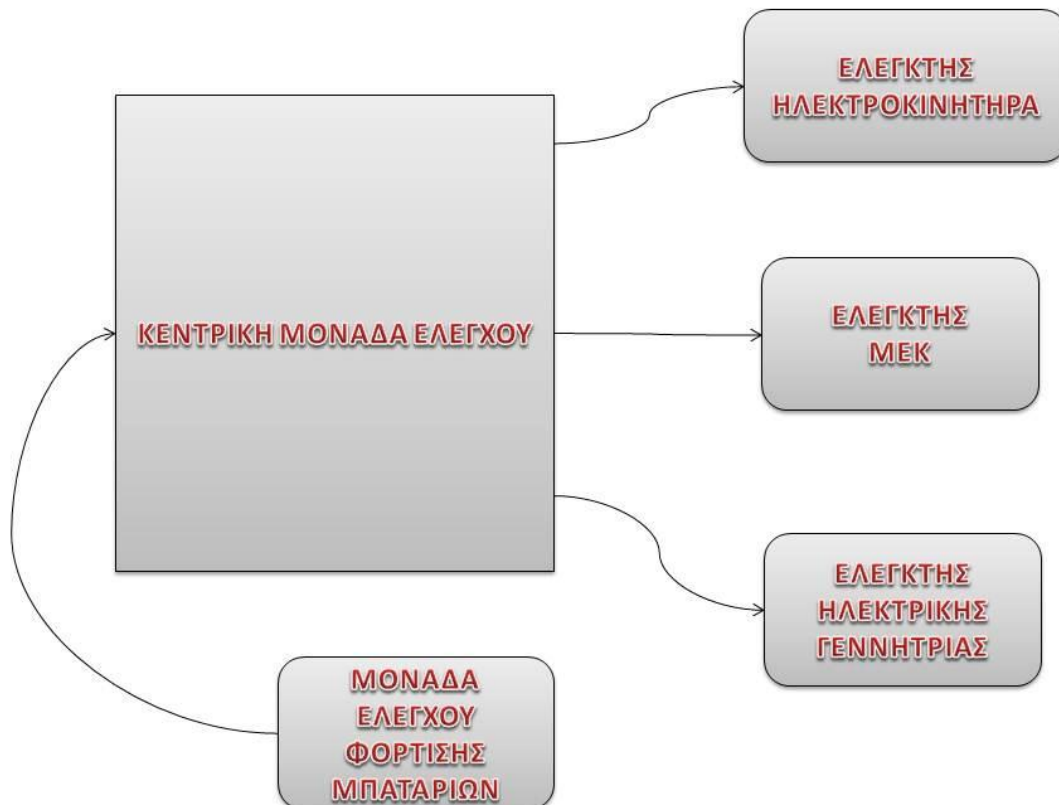
## 4.2 Διαμόρφωση και αλγόριθμος υλοποίησης προτεινόμενου ελεγκτή

### 4.2.1 Γενικά

Αναπτύχθηκε σύστημα ελέγχου λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της αθηναϊκής διαδρομής (ADC) και γενικότερα των αστικών διαδρομών. Διαμορφώθηκε μια ντετερμινιστική μέθοδος ελέγχου βασισμένη σε κανόνες (Rule Based) η οποία συνδυάζει χαρακτηριστικά της μεθόδου ακολούθου ισχύος και της μεθόδου τύπου θερμοστάτη (ON/OFF) (εδάφιο 3.5.2, σελίδες 30-31). Η παραπάνω στρατηγική ελέγχου προσαρμόστηκε στην φιλοσοφία ενεργειακής διαχείρισης σειριακών/παράλληλων οχημάτων που κάνει έντονη χρήση του θερμικού κινητήρα (εδάφιο 3.6.4, σελίδες 48-49) αλλά σε περιοχές λειτουργίες που αυτή είναι αποδοτική.

Χαρακτηριστικό της διαμορφωθείσας μεθόδου ελέγχου που είναι γνώριμο από την στρατηγική ελέγχου τύπου ON/OFF είναι το γεγονός ότι σύμφωνα με κάποιους υπολογισμούς, οι οποίοι θα περιγραφούν εκτενώς στα επόμενα εδάφια, δίνεται εντολή στην έξοδο μιας κεντρικής ελεγκτικής μονάδας να θέσει εντός ή εκτός λειτουργίας κάποια μονάδα. Ενώ η επιρροή της στρατηγικής ακολούθου ισχύος κατά τον διαμόρφωση της μεθοδολογίας ελέγχου γίνεται φανερή στα σημεία όπου στόχος είναι η λειτουργία του θερμικού κινητήρα σε περιοχή αυξημένης απόδοσης.

Ο ελεγκτής αποτελείται από μια κεντρική μονάδα ελέγχου (Mode Logic), που συνιστά τον “εγκέφαλο” του οχήματος και χειρίζεται επιμέρους μονάδες ελέγχου που είναι υπεύθυνες για την ταχύτητα περιστροφής του θερμικού κινητήρα (Engine Speed Controller), τον ηλεκτροκινητήρα (Motor Controller), την ηλεκτρική γεννήτρια (Generator Controller), ενώ λαμβάνει υπόψη στην είσοδό του το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών μέσω του αντίστοιχου ελεγκτή (Battery Charge Controller). Η διάταξη παρουσιάζεται στο δομικό διάγραμμα του σχήματος 4.21.

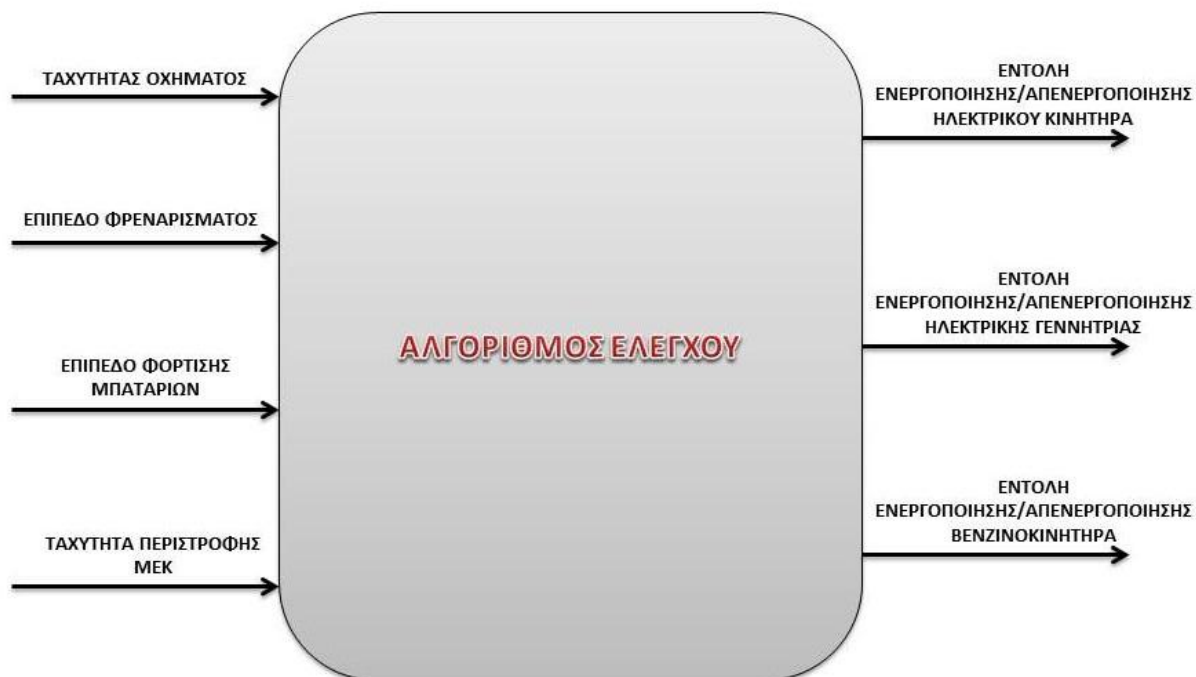


Σχήμα 4.21

*Δομικό διάγραμμα συνεργασίας των μονάδων ελέγχου.*

#### 4.2.2 Mode Logic

Η κεντρική μονάδα ελέγχου (σχήμα 4.22) υλοποιεί τον προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου του συστήματος κίνησης. Οι είσοδοί της είναι η ταχύτητα του οχήματος, ένα ειδικά διαμορφωμένο σήμα πέδησης, το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών και η ταχύτητα περιστροφής. Με αυτά τα δεδομένα ο ελεγκτής δίνει σήματα έναρξης λειτουργίας (ON) και διακοπής λειτουργίας (OFF) του βενζινοκινητήρα και των ηλεκτρικών μηχανών.

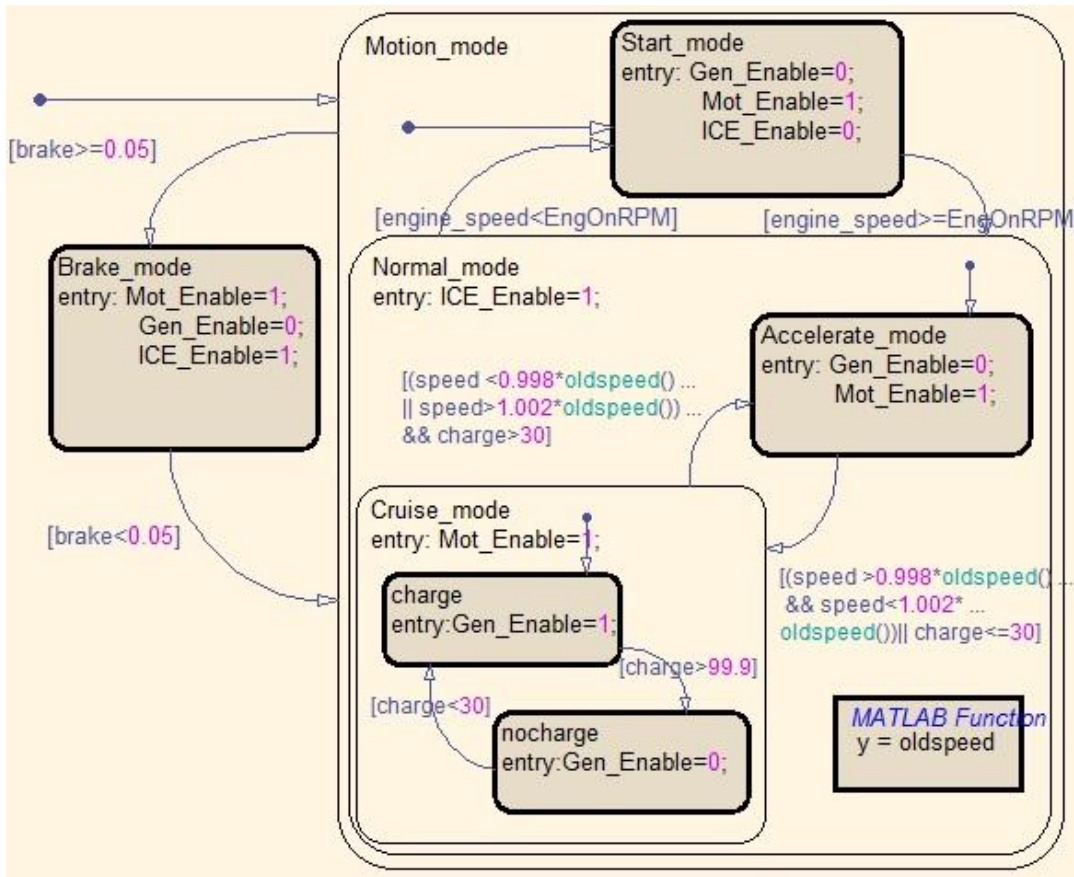


Σχήμα 4.22

Κεντρική μονάδα ελέγχου.

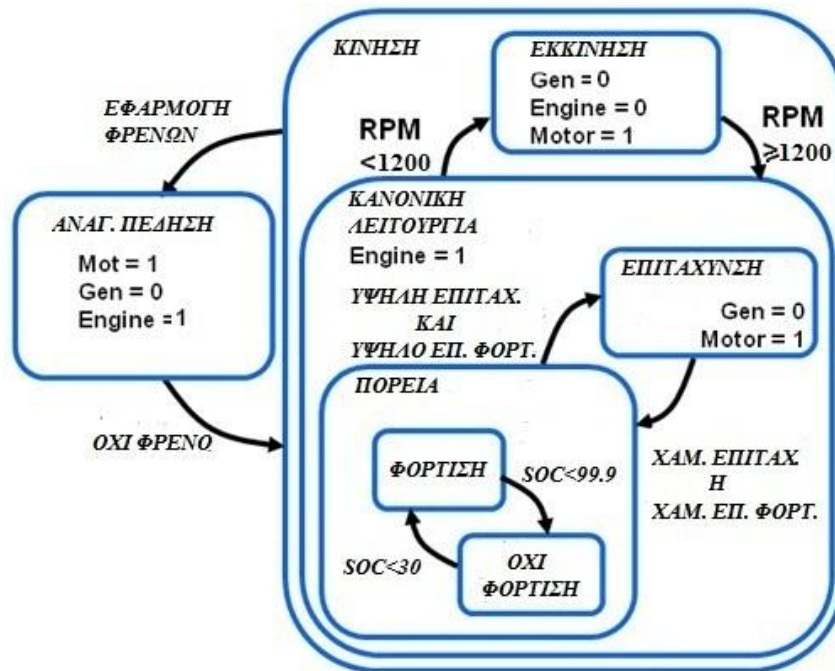
Οι προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου που περιέχει τους κανόνες λειτουργίας του συστήματος αποτυπώθηκε σε τυπική μορφή με την βοήθεια του λογισμικού Stateflow<sup>®</sup> του Matlab/Simulink και χρήση της γλώσσας Matlab. Προτιμήθηκε η χρήση του Stateflow<sup>®</sup> σε συνδυασμό με κώδικα σε Matlab αντί της υλοποίησης ενός αλγορίθμου εξ ολοκλήρου σε Matlab λόγω της αποτελεσματικότητας, της ευκολίας παραμετροποίησης και της εποπτικής δυνατότητας που προσφέρει. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.23.

Δίνονται τιμές 0 και 1 στις τρεις εξόδους του ελεγκτή για την απενεργοποίηση και την ενεργοποίηση των αντίστοιχων μονάδων ανάλογα με την φάση λειτουργίας στην οποία βρίσκεται το όχημα. Τα εμφωλευμένα πλαίσια καταστάσεων δηλώνουν τις καταστάσεις που αποτελούν υποσύνολο κάποιων άλλων. Υπάρχουν επίσης βέλη τα οποία δηλώνουν την μετάβαση από μια κατάσταση σε άλλη. Καθένα βέλος συνοδεύεται από μια συνθήκη μετάβασης και μόνο όταν αυτή ικανοποιείται, πραγματοποιείται η μετάβαση. Ακολουθεί επεξήγηση του αλγορίθμου υλοποιήθηκε, με την βοήθεια διαγράμματος ροής (σχήμα 4.24).



Σχήμα 4.23

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου.



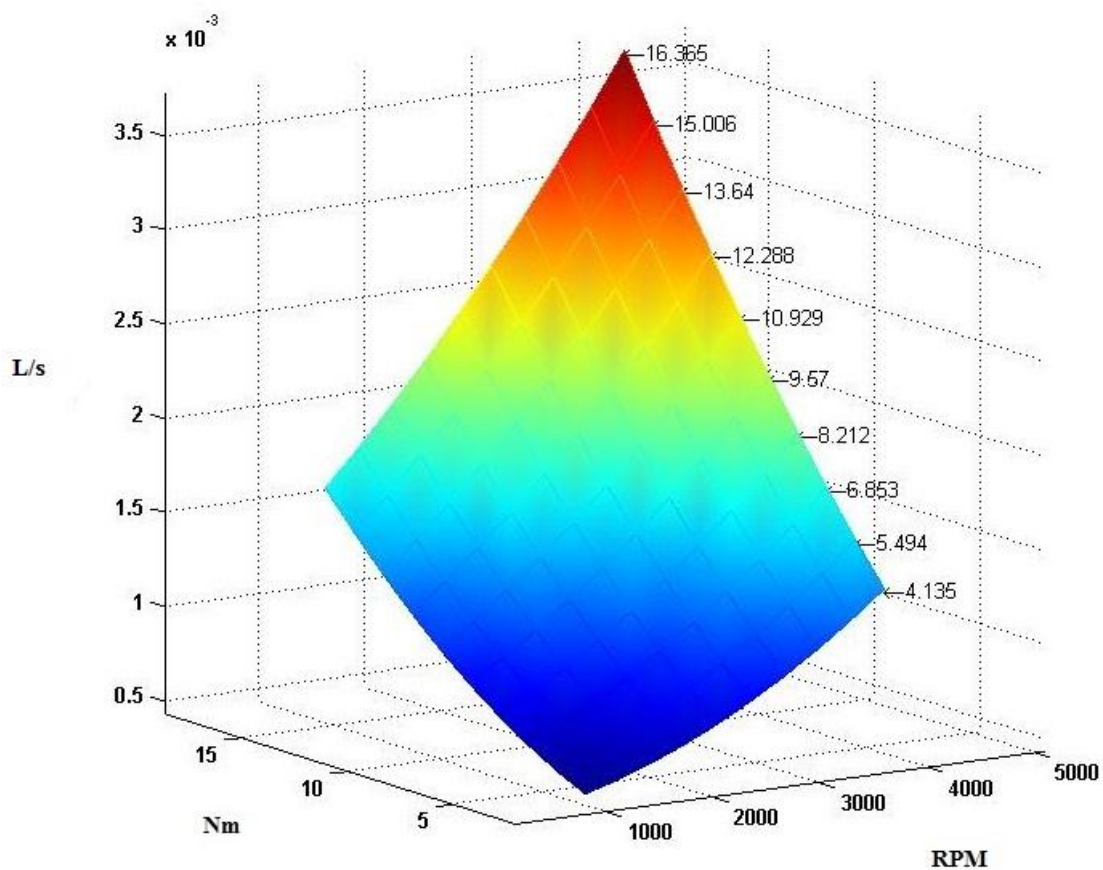
Σχήμα 4.24

Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου ελέγχου.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος περιγράφει εκτενώς τις διάφορες καταστάσεις κίνησης που δύναται να βρεθεί το όχημα (Motion\_mode – Κίνηση). Επίσης υλοποιείται και η λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης (Brake\_mode – Αναγεννητική πέδηση).

Καθώς το όχημα κινείται, είτε θα βρίσκεται σε φάση εκκίνησης (Start\_mode – Εκκίνηση) είτε θα βρίσκεται στην φάση κανονικής λειτουργίας (Normal\_mode – Κανονική λειτουργία). Αυτό εξαρτάται αποκλειστικά από την ταχύτητα περιστροφής του θερμικού κινητήρα καθώς η γενικότερη στρατηγική διαχείρισης ισχύος που χρησιμοποιείται στοχεύει στην αποδοτική λειτουργία του βενζινοκινητήρα.

Εφόσον κατά τις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής ο βενζινοκινητήρας προσφέρει χαμηλή ροπή, υψηλή κατανάλωση και μεγάλες εκπομπές ρύπων, την εκκίνηση του οχήματος αναλαμβάνει ο ηλεκτροκινητήρας ο οποίος εν αντιθέσει προσφέρει υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (σχήμα Π.15 - Παράρτημα) και δεν εκπέμπει καθόλου ρύπους καταναλώνοντας την αποθηκευμένη στις μπαταρίες ηλεκτρική ενέργεια. Κατά συνέπεια στην εκκίνηση και μέχρι τις 1200 ΣΑΛ την πρόωση του οχήματος αναλαμβάνει εξ ολοκλήρου ο ηλεκτρικό κινητήρας, ενώ ο βενζινοκινητήρας τίθεται σε λειτουργία από τις 1200 ΣΑΛ και πάνω όπου πλέον το όχημα εισέρχεται στην φάση κανονικής λειτουργίας. Σημειώνεται πως το όριο των 1200 ΣΑΛ επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπόψη τόσο την κατανάλωση καυσίμου τη θερμικού κινητήρα (σχήμα 4.25) όσο και την καμπύλη ροπής ισχύος του ηλεκτρικού κινητήρα.



Σχήμα 4.25

*Κατανάλωση καυσίμου θερμικού κινητήρα συναρτήσει ταχύτητας περιστροφής και ροπής.*

Όταν το όχημα βρίσκεται σε φάση κανονικής λειτουργίας, τότε είτε θα είναι σε μια κατάσταση επιτάχυνσης είτε σε μία κατάσταση σταθερής πορείας. Οι δύο μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται η μετάπτωση σε οποιαδήποτε εκ των δύο παραπάνω υποπεριπτώσεων είναι η επιτάχυνση του οχήματος καθώς και το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών ανά πάσα στιγμή.

Όσον αφορά την επιτάχυνση του οχήματος, υπολογίζεται με την βοήθεια μιας συνάρτησης γραμμένης σε γλώσσα Matlab® και της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας του οχήματος που αποτελεί την μία είσοδο της κεντρικής μονάδας ελέγχου. Η συνάρτηση αυτή είναι η *oldspeed* η οποία επιστρέφει μια πρόσφατη τιμή της ταχύτητας. Ο κώδικας της φαίνεται στην εικόνα 4.3 και επεξηγείται ακολούθως.

```
1 function y = oldspeed
2 - speed_buffer(2:end) = speed_buffer(1:end-1);
3 - speed_buffer(1) = speed;
4 - y = mean(speed_buffer);
```

Εικόνα 4.3

*Η συνάρτηση oldspeed.*

Η μεταβλητή *speed\_buffer* είναι ένα διάνυσμα μεγέθους 21 θέσεων (ή ένας πίνακας 1x21), στο οποίο αποθηκεύονται σε κάθε δευτερόλεπτο προσομοίωσης 21 τιμές για την γραμμικοποιημένη εκδοχή της στιγμιαίας ταχύτητα του οχήματος. Στην πρώτη θέση του διανύσματος αποθηκεύεται η πιο πρόσφατη τιμή ενώ στην τελευταία η πιο παλιά. Προσφέρει κοινώς την δυνατότητα να εξεταστεί η τιμή της στιγμιαίας ταχύτητας σε πιο στενή κλίμακα σε σχέση με το 1s (της τάξης του 1/21s). Έτσι σαν στιγμιαία τιμή της ταχύτητας (*speed*) λαμβάνεται κανονικά η αντίστοιχη είσοδος του ελεγκτή, ενώ σαν αμέσως προηγούμενη τιμή της ταχύτητας (*oldspeed*) λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών των του διανύσματος *speed\_buffer*.

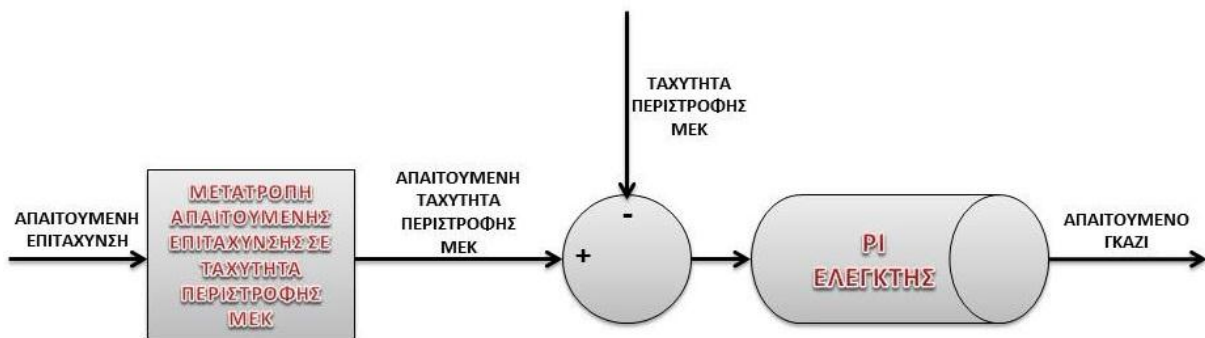
Σύμφωνα με τα παραπάνω, όταν το όχημα εμφανίζει επιτάχυνση (ανάλογη του 2% σε 0,5s ή ισοδύναμα του 20% σε 5s) ενώ ταυτόχρονα το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών βρίσκεται πάνω από το 30% εισέρχεται στην κατάσταση επιτάχυνσης. Ενώ όταν δεν εμφανίζονται τα παραπάνω επίπεδα επιτάχυνσης ή οι μπαταρίες έχουν αδειάσει αρκετά και διαθέτουν από το 30% και κάτω του επιπέδου φόρτισής τους, το όχημα εισέρχεται στην κατάσταση πορείας. Το όριο του 30% επιλέχθηκε με γνώμονα την μη καταπόνηση των μπαταριών NiMH που χρησιμοποιούνται καθώς, ζημιώνεται ιδιαίτερα η διάρκεια ζωής τους κατά τις βαθιές εκφορτίσεις.

Στην κατάσταση επιτάχυνσης ενεργοποιείται ο ηλεκτροκινητήρας ώστε να ικανοποιήσει σε συνεργασία με το θερμικό κινητήρα την ζήτηση ισχύος του οδηγού. Από την άλλη πλευρά, στην κατάσταση πορείας γίνεται έλεγχος αν είναι γεμάτες οι μπαταρίες ή όχι και στην συνέχεια δίνεται εντολή στην γεννήτρια να ενεργοποιηθεί ώστε να τις φορτίσει εάν δεν είναι γεμάτες. Ο θερμικός κινητήρας αναλαμβάνει την περιστροφή της γεννήτριας με σκοπό την φόρτιση των μπαταριών.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του εδαφίου ο προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου υλοποιεί την λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης. Η μεταβλητή *brake* που εμφανίζεται στον αλγόριθμο συνίσταται στο ποσοστό μεταβολής της ταχύτητας του οχήματος μέσα σε 1,5s. Όταν αυτό το ποσοστό υπερβαίνει το 5% δίνεται εντολή για την ενεργοποίηση του ηλεκτροκινητήρα με σκοπό να λειτουργήσει σαν γεννήτρια και να ανακτηθεί ενέργεια μέσω της πέδησης. Η ενέργεια που θα μπορούσε να ανακτηθεί από την αναγεννητική πέδηση προσδιορίζεται μέσω κατάλληλου μοντέλου στο παράρτημα της εργασίας

### 4.2.3 Προτεινόμενος ελεγκτής μηχανής εσωτερικής καύσης

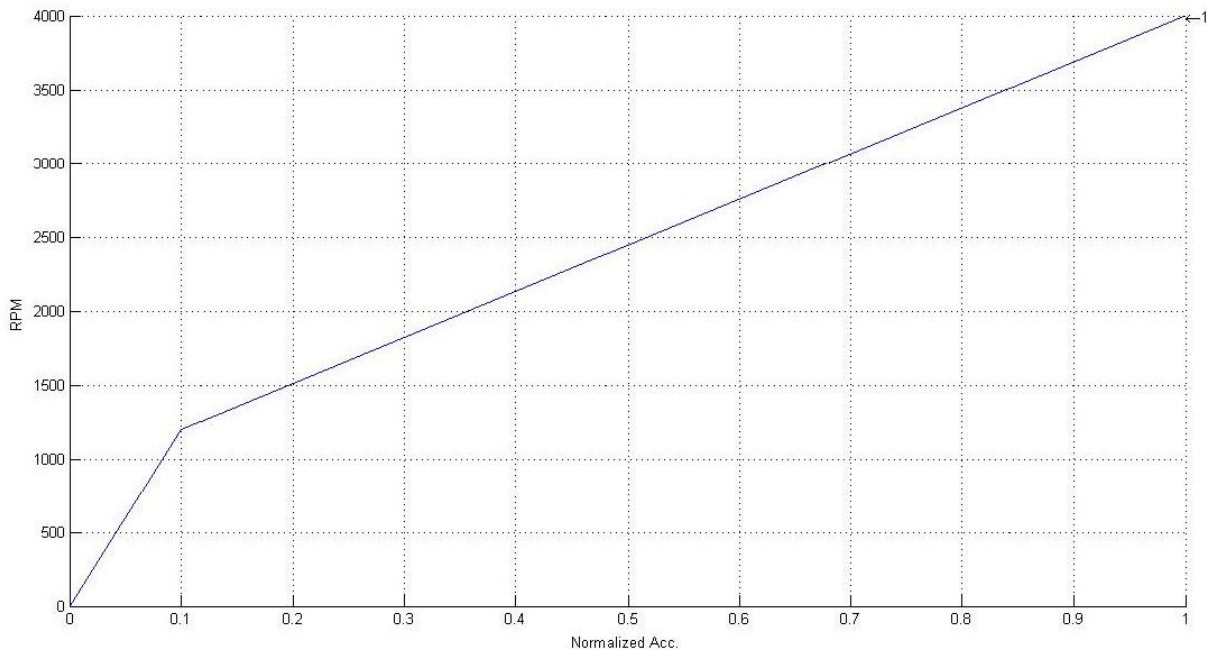
Ο προτεινόμενος ελεγκτής για τη ΜΕΚ παρουσιάζεται στο δομικό διάγραμμα του σχήματος 4.26.



Σχήμα 4.26

Το δομικό διάγραμμα του ελεγκτή της μηχανής εσωτερικής καύσης.

Η τιμή της απαιτούμενης επιτάχυνσης για την πρόωση του οχήματος, μετατρέπεται σε απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής του βενζινοκινητήρα μέσω του διαγράμματος του σχήματος 4.27. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η απόκλιση μεταξύ απαιτούμενης και τρέχουσας ταχύτητας και εν μέσω ενός κατάλληλα ρυθμισμένου PI ελεγκτή υπολογίζεται η απαιτούμενη τιμή γκαζιού ανά πάσα χρονική στιγμή.



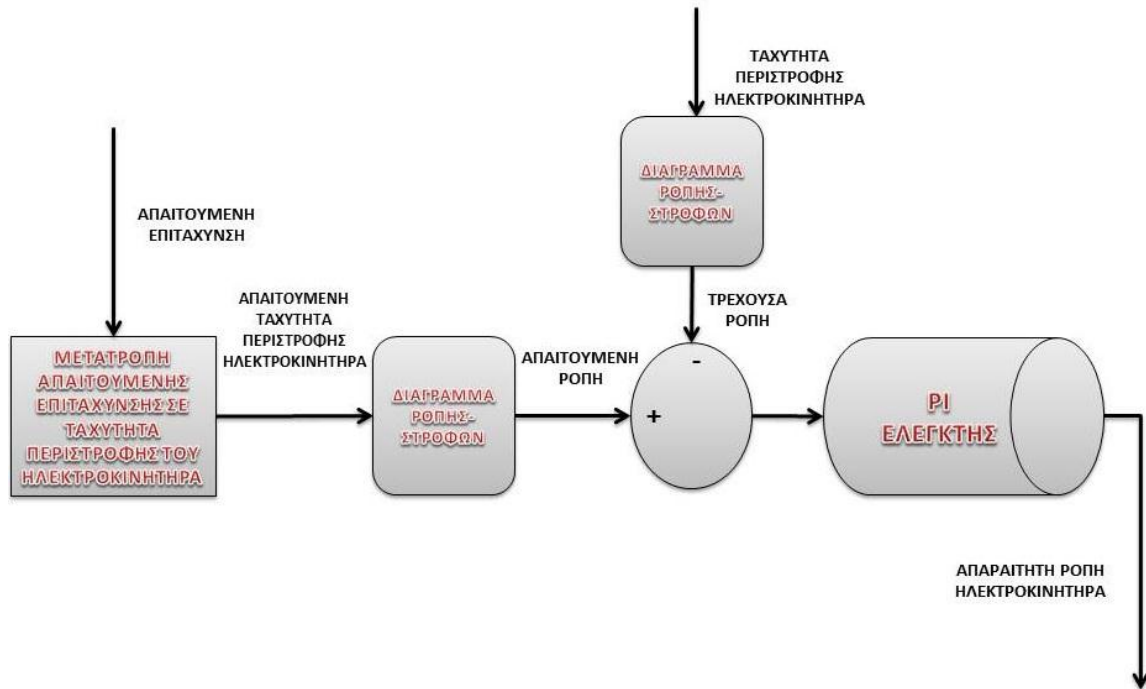
Σχήμα 4.27

Αντιστοίχιση απαιτούμενης κανονικοποιημένης επιτάχυνσης με απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής του θερμικού κινητήρα.



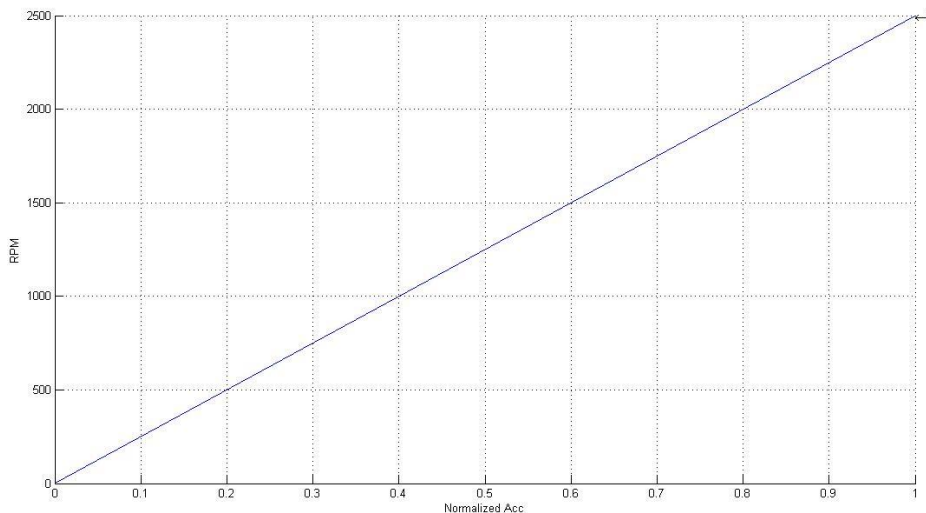
#### 4.2.4 Προτεινόμενος ελεγκτής ηλεκτρικού κινητήρα

Για τον έλεγχο του ηλεκτροκινητήρα διαμορφώθηκε ελεγκτής παρόμοια φιλοσοφίας με τον ελεγκτή της ΜΕΚ. Η απαίτηση επιτάχυνσης του οχήματος μέσω lookup table μεταφράζεται σε ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα. Η γραμμική αυτή σχέση που εκφράζει την μετατροπή της κανονικοποιημένης απαίτησης για επιτάχυνση σε απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής παρουσιάζεται στο σχήμα 4.29.



Σχήμα 4.28\

Δομικό διάγραμμα προτεινόμενου ελεγκτή ηλεκτροκινητήρα.



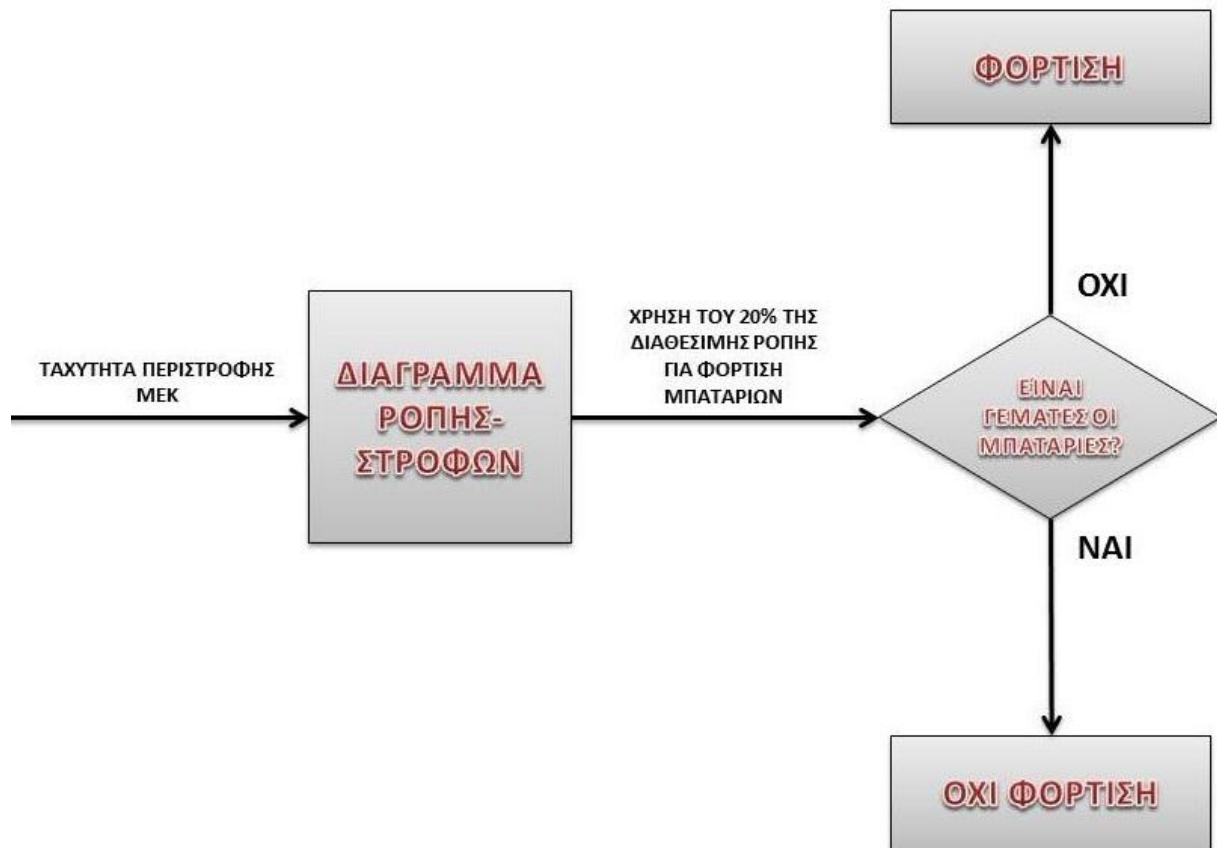
Σχήμα 4.28

Αντιστοίχιση απαιτούμενης κανονικοποιημένης επιτάχυνσης με απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα.

Έπειτα χρησιμοποιώντας το διάγραμμα ροπής-στροφών του ηλεκτροκινητήρα προσδιορίζεται η απαιτούμενη και η τρέχουσα ροπή μέσω των αντίστοιχων ταχυτήτων περιστροφής. Τέλος, ένας κατάλληλα ρυθμισμένος PI ελεγκτής στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης των δύο ροπών.

#### 4.2.5 Προτεινόμενος ελεγκτής φόρτισης μπαταριών

Η ταχύτητα περιστροφής της ΜΕΚ μέσω του διαγράμματος ροπής-στροφών μετατρέπεται σε ροπή. Στην συνέχεια το 20% της διαθέσιμης ροπής χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών, μόνο εάν αυτές δεν είναι ήδη πλήρεις φόρτισης.

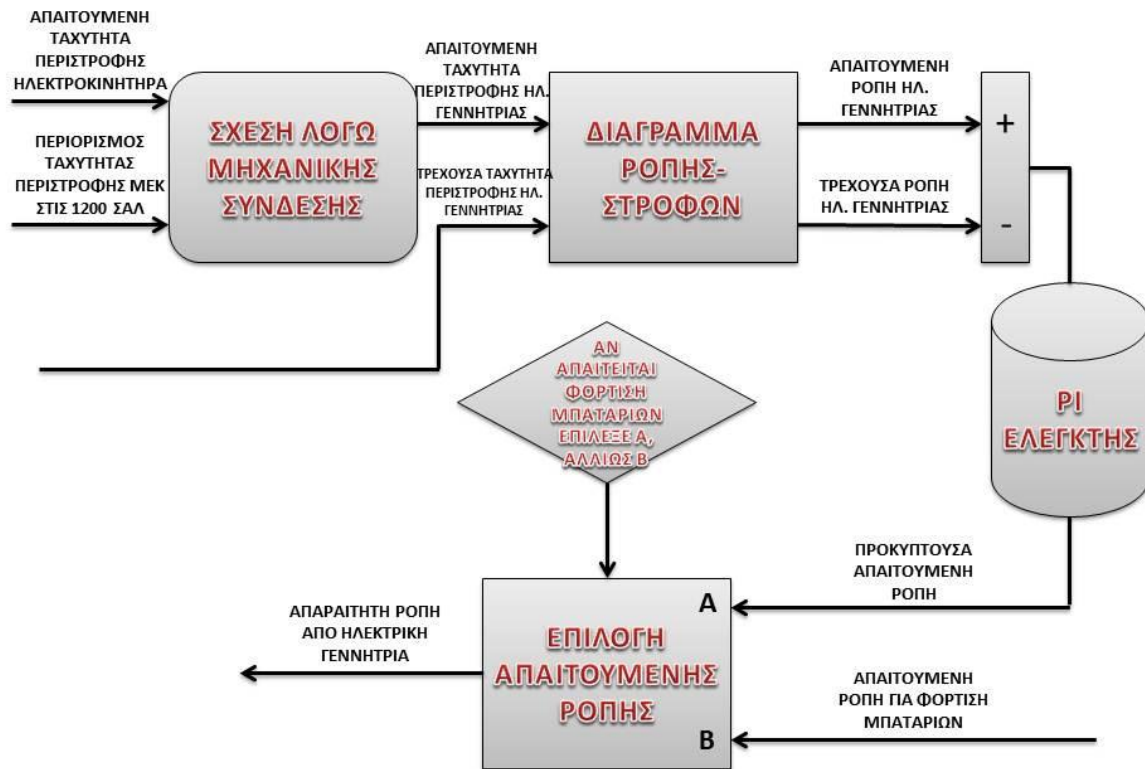


Σχήμα 4.29

*Το δομικό διάγραμμα του προτεινόμενου ελεγκτή φόρτισης μπαταριών.*

#### 4.2.6 Προτεινόμενος ελεγκτής ηλεκτρικής γεννήτριας

Στο σχήμα 4.30 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του προτεινόμενου ελεγκτή της ηλεκτρικής γεννήτριας.



Σχήμα 4.30

Δομικό διάγραμμα προτεινόμενου ελεγκτή ηλεκτρικής γεννήτριας.

Αρχικά προσδιορίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας μέσω των αντιστοίχων ταχυτήτων του ηλεκτρικού και θερμικού κινητήρα. Χρησιμοποιείται η σχέση 4.4, με την ταχύτητα της ΜΕΚ σταθεροποιημένη στις 1200 ΣΑΛ. Αφού προσδιοριστεί η απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής, λαμβάνεται η αντίστοιχη τιμή ροπής μέσω του διαγράμματος ροπής στρωφών (σχήμα Π.29 – Παράρτημα). Όμοια, η τρέχουσα ταχύτητα περιστροφής μετατρέπεται σε ροπή. Ακολούθως, εξυπηρετείται η προκύπτουσα απαιτούμενη ροπή ως η διαφορά των δύο ροπών εν μέσω ενός PI ελεγκτή, μόνο εάν δεν υπάρχει ανάγκη φόρτισης των μπαταριών.

## 4.3 Αποτελέσματα μοντελοποίησης μέσω Simulink

### 4.3.1 Γενικά

Για τις ανάγκες των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι εξής επίσημοι κύκλοι οδήγησης (χρονοσειρές ταχύτητας), οι οποίοι αποτέλεσαν σε καθεμία προσομοίωση την κύρια είσοδο του μοντέλου (Ref Spd):

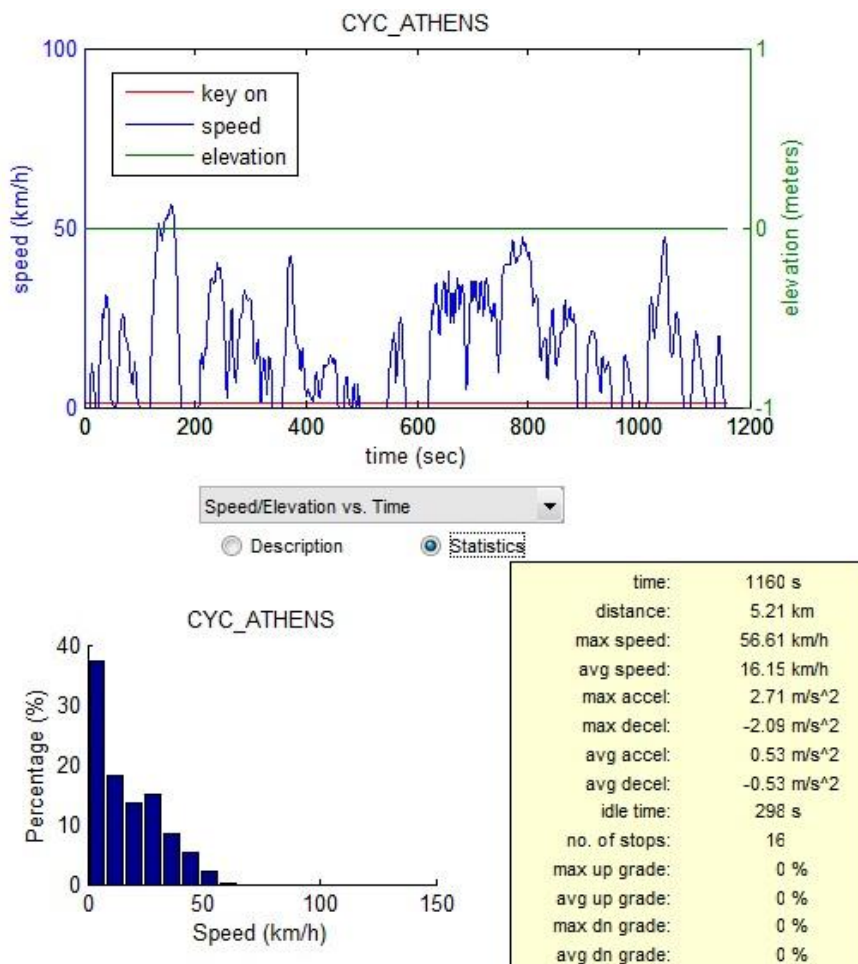
- Athens Driving Cycle (ADC).
- Manhattan Driving Cycle (MDC).

- Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS).
- New European Driving Cycle (NEDC).
- Supplemental Federal Test Procedure (SFTP) – US06 Highway.

Στα επόμενα εδάφια παρουσιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στα πλαίσια των παραπάνω διαδρομών.

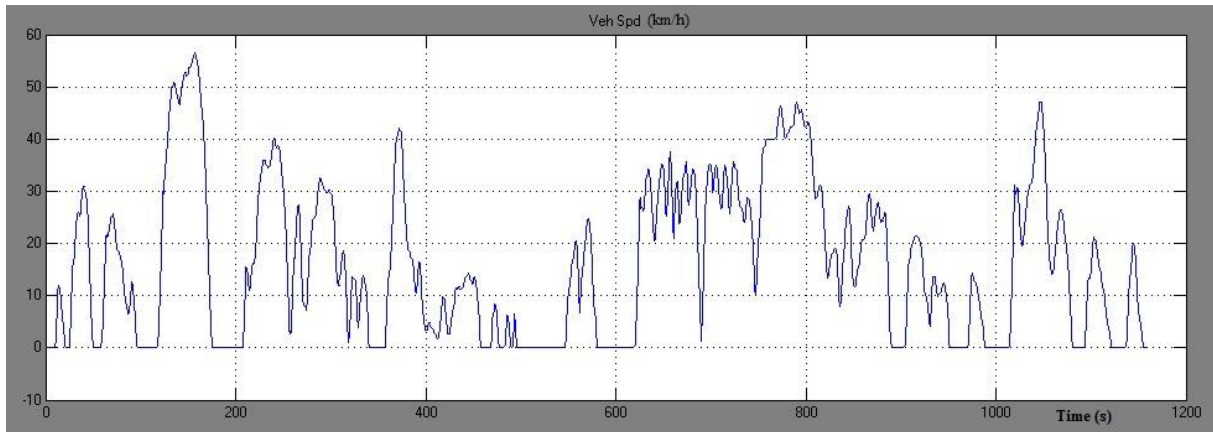
### 4.3.2 Athens Driving Cycle

Στην εικόνα 4.3 παρουσιάζεται μια συνοπτική ανάλυση του αθηναϊκού κύκλου οδήγησης. Όπως φαίνεται και στο γράφημα της ταχύτητας (εικόνα 4.4) που κατείχε το μοντελοποιημένο υβριδικό όχημα ανά πάσα χρονική στιγμή, κατέστη δυνατό να ακολουθηθεί επακριβώς η χρονοσειρά ταχύτητας αναφοράς.



Εικόνα 4.3

Συνοπτική περιγραφή του Athens Driving Cycle.



**Εικόνα 4.4**

*Η στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος καθ' όλη την διάρκεια του ADC.*

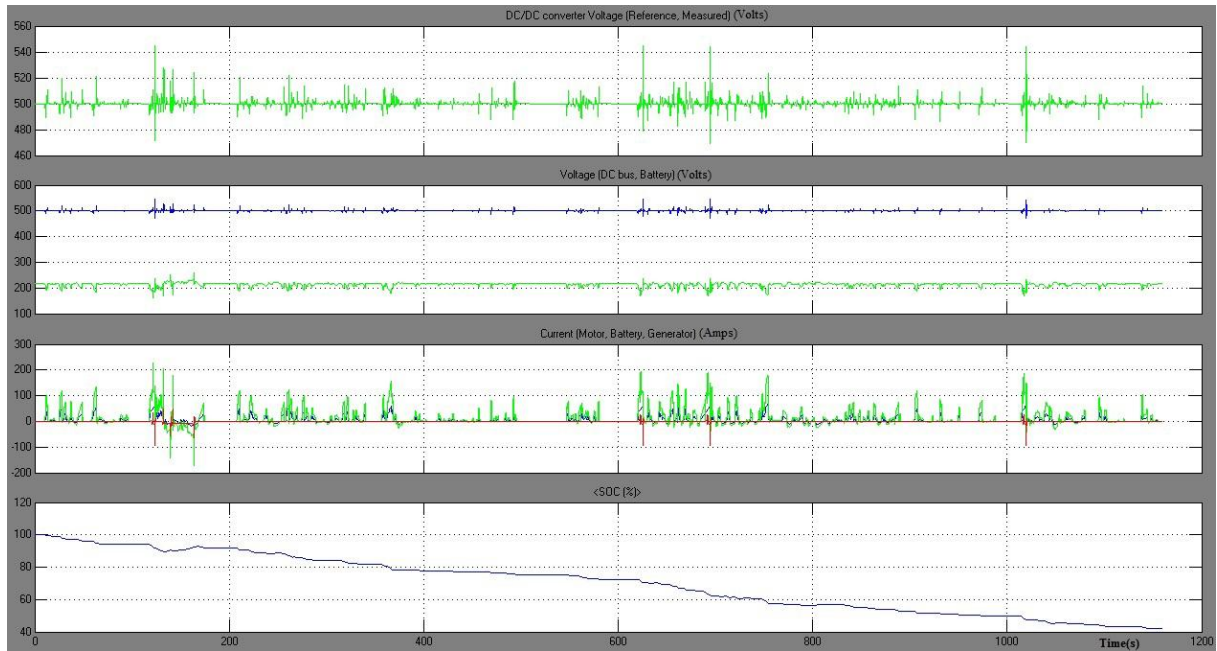
Στην συνέχεια παρουσιάζονται κάποια γραφήματα που αφορούν το ηλεκτρικό μέρος του οχήματος (εικόνα4.5).

Παρατηρείται πως η μετρούμενη τάση του DC-DC μετατροπέα (πρώτο γράφημα – πράσινο χρώμα) δεν εμφάνισε ιδιαίτερα μεγάλη διακύμανση σε σχέση με την επιθυμητή τάση αναφοράς των 500V. Οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια έντονων μεταβατικών φαινομένων (κυρίως επιταχύνσεων) και ήταν μικρής διάρκειας και της τάξης του έως και 9% σε σχέση με την επιθυμητή τάση.

Η τάση στο ζυγό DC (δεύτερο γράφημα – μπλε χρώμα) διατηρήθηκε σταθερή στα 500V με μικρές και σύντομες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια του κύκλου οδήγησης ενώ εξίσου σταθερή ήταν και η τάση των μπαταριών (δεύτερο γράφημα – πράσινο χρώμα)

Στο τρίτο γράφημα φαίνεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που απορρόφησε ο ηλεκτροκινητήρας (μπλε χρώμα), οι μπαταρίες (πράσινο χρώμα) και η ηλεκτρική γεννήτρια (κόκκινο χρώμα). Παρατηρείται ροή ρεύματος μεγάλης έντασης κατά την διάρκεια έντονων επιταχύνσεων κυρίως από τις μπαταρίες.

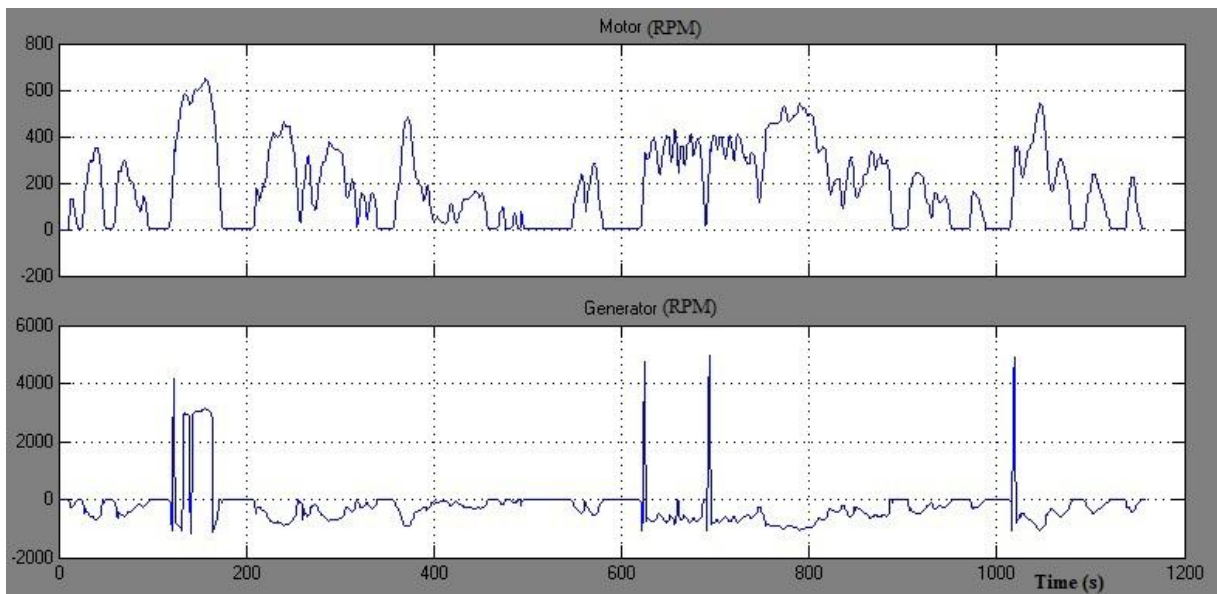
Τέλος στο τέταρτο γράφημα παρουσιάζεται η μεταβολή του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών συναρτήσει του χρόνου.



**Εικόνα 4.5**

*Γραφική απεικόνιση ηλεκτρικών μεγεθών συναρτήσει του χρόνου.*

Οι ταχύτητες περιστροφής των δύο σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών παρουσιάζονται στην εικόνα 4.6.



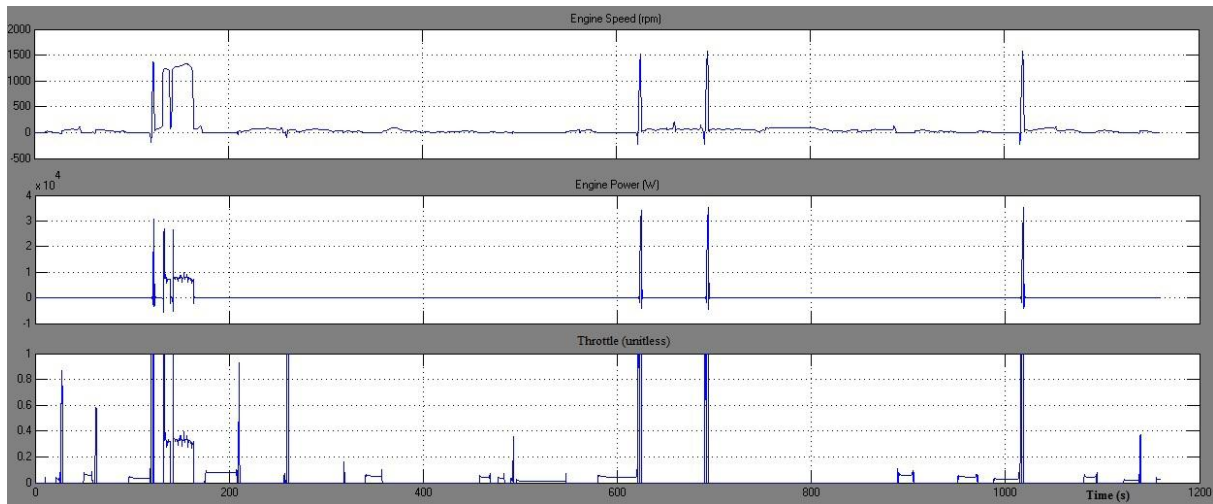
**Εικόνα 4.6**

*Ταχύτητα περιστροφής ηλεκτροκινητήρα και ηλεκτρικής γεννήτριας.*

Παρατηρείται η επικουρική χρήση του ηλεκτροκινητήρα για την πρόωση του οχήματος καθώς η ταχύτητα περιστροφής του κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα προσφέροντας υψηλή ροπή κατά τις έντονες επιταχύνσεις.

Η σύγχρονη γεννήτρια στρέφεται κατά την θετική φορά (κατά σύμβαση) όταν η λαμβανόμενη μηχανική ροπή από την ΜΕΚ μετατρέπεται σε τάση στα άκρα των μπαταριών ώστε να φορτιστούν. Κατά την αρνητική φορά στρέψης, η ηλεκτρογεννήτρια λειτουργεί σαν πέδη.

Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζεται η ταχύτητα περιστροφής, η ισχύς και η κανονικοποιημένη τιμή του γκαζιού του βενζινοκινητήρα καθ' όλη την διάρκεια του αθηναϊκού κύκλου οδήγησης.

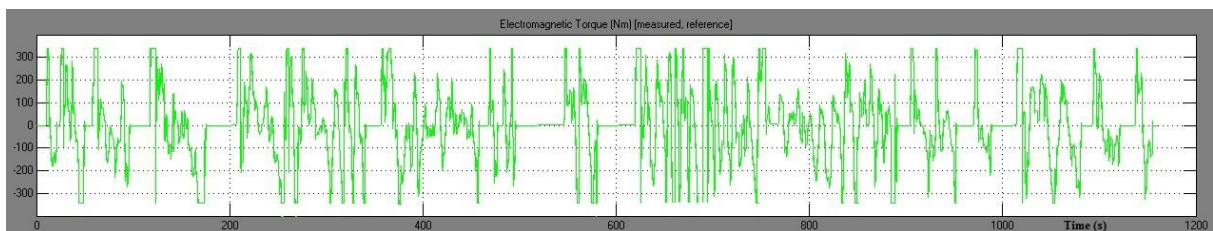


**Εικόνα 4.7**

*Ταχύτητα περιστροφής, ισχύς και κανονικοποιημένη τιμή γκαζιού της ΜΕΚ.*

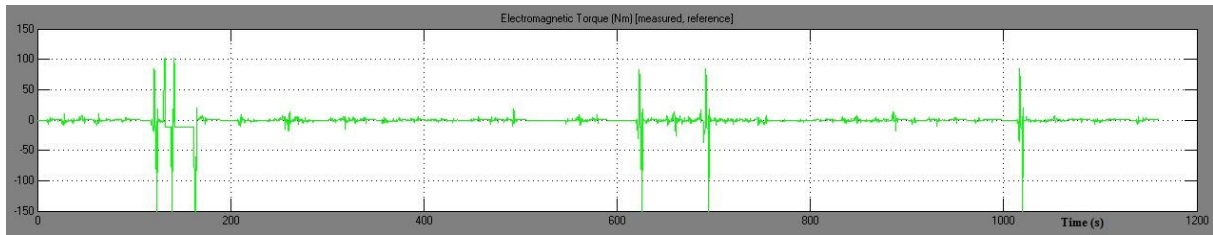
Η χρήση του βενζινοκινητήρα ήταν περιορισμένη με την ταχύτητα περιστροφής του να μην ξεπερνάει σε καμία στιγμή τις 2000 ΣΑΛ.

Στις εικόνες 4.8 και 4.9 παρουσιάζεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή συναρτήσει του χρόνου των δύο ηλεκτρικών μηχανών του οχήματος. Η ροπή που προσφέρει ο ηλεκτροκινητήρας για την πρόωση του οχήματος αγγίζει σε πολλές περιπτώσεις το άνω φράγμα της (320 Nm), καθώς η διαδρομή της Αθήνας περιλαμβάνει πολυάριθμες εκκινήσεις και επιταχύνσεις. Επίσης οι αρνητικές τιμές ροπές αναγκάζουν τον ηλεκτροκινητήρα να λειτουργεί σαν γεννήτρια (αναγεννητική πέδηση). Η χρήση της ηλεκτρικής γεννήτριας δεν ήταν ιδιαίτερα εκτεταμένη καθώς όπως φαίνεται και από τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών, δεν πραγματοποιήθηκαν πολλές φορτίσεις.



**Εικόνα 4.8**

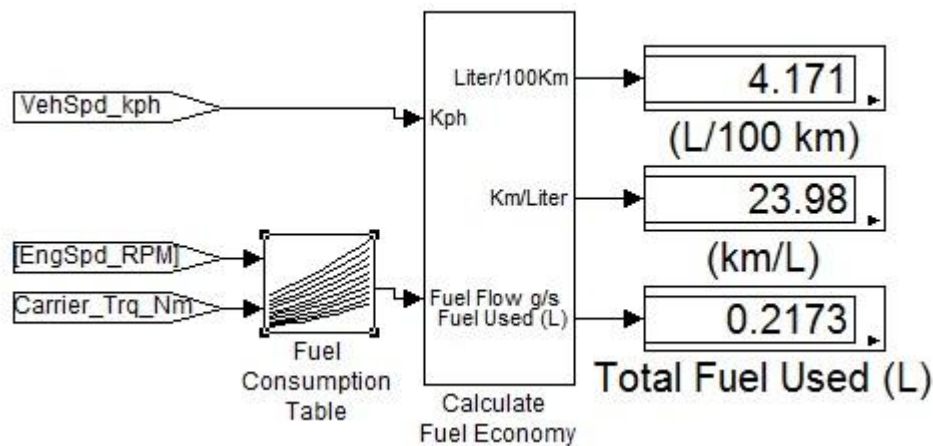
*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα.*



**Εικόνα 4.9**

*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της ηλεκτρικής γεννήτριας.*

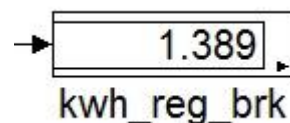
Η κατανάλωση καυσίμου του οχήματος υπολογίστηκε με την παρακάτω διαμόρφωση.



**Σχήμα 4.32**

*Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου βενζινοκινητήρα.*

Επιπρόσθετα υπολογίστηκε η ενέργεια που θα μπορούσε να αποκομίσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης. Υπολογίστηκε μέσω του μπλοκ brake\_sig (εδάφιο 4.2.1 – σελίδα 71), ίση με 1,389kWh (εικόνα 4.10).



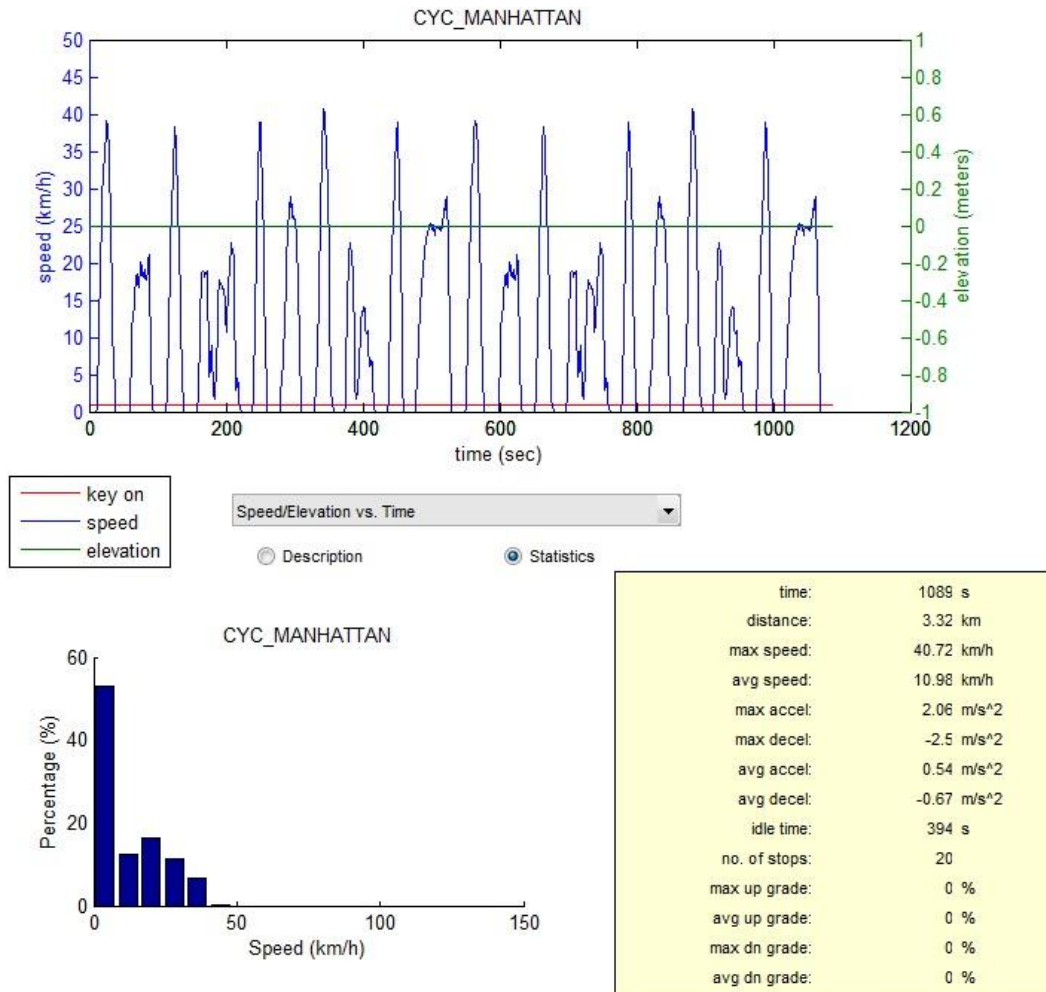
**Εικόνα 4.10**

*Ποσότητα ενέργειας (σε kWh) που θα μπορούσε να αποκομίσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης.*

### 4.3.3 Manhattan Driving Cycle

Ο κύκλος οδήγησης του Μανχάταν δημιουργήθηκε από δεδομένα που αφορούν δρομολόγια που εκτελούν αστικά λεωφορεία στο κέντρο του Μανχάταν της Ν. Υόρκης. Αυτή η πρότυπη διαδρομή χαρακτηρίζεται από συχνές στάσεις και εκκινήσεις καθώς επίσης και σχετικά χαμηλές ταχύτητες. Λεπτομέρειες που αφορούν τον εν λόγω κύκλο οδήγησης παρουσιάζονται στην εικόνα 4.11.

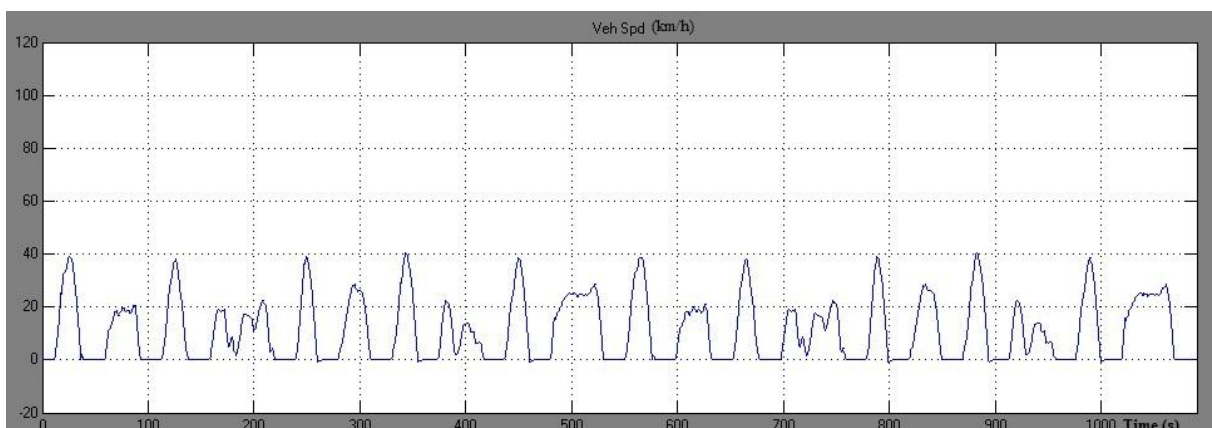




**Εικόνα 4.11**

*Συνοπτική περιγραφή του Manhattan Driving Cycle*

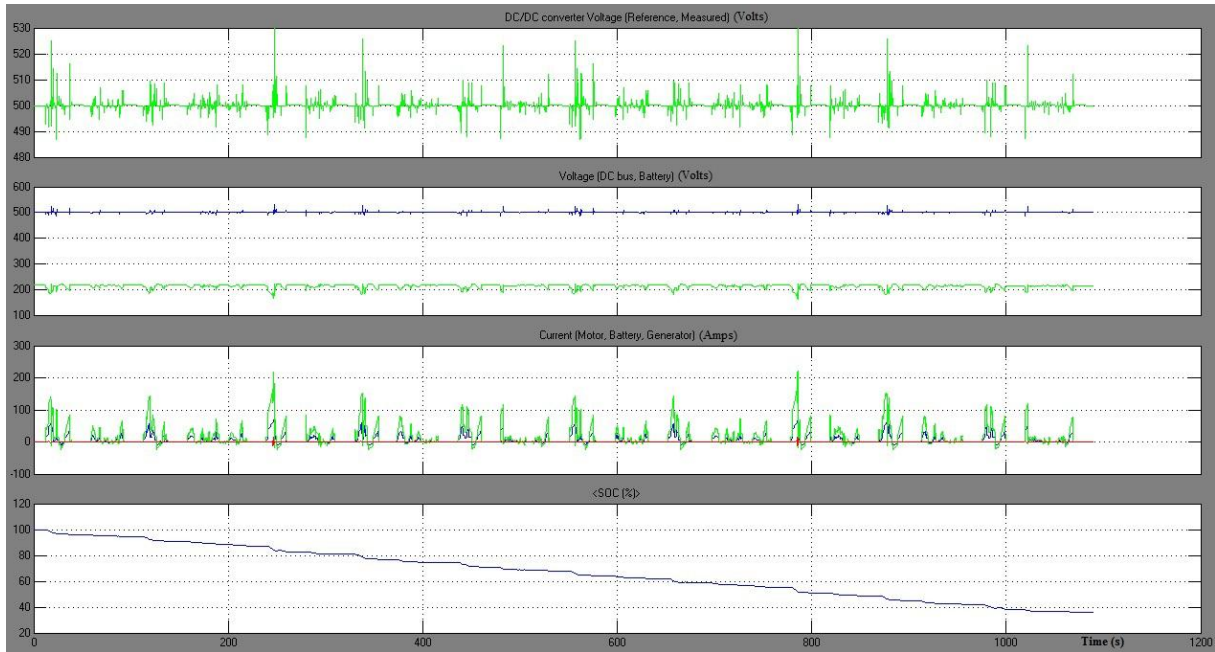
Κατά την προσομοίωση δεν παρατηρήθηκε κάποια απόκλιση από την χρονοσειρά ταχύτητας αναφοράς όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.12.



**Εικόνα 4.12**

*Η στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος καθ' όλη την διάρκεια του MDC.*

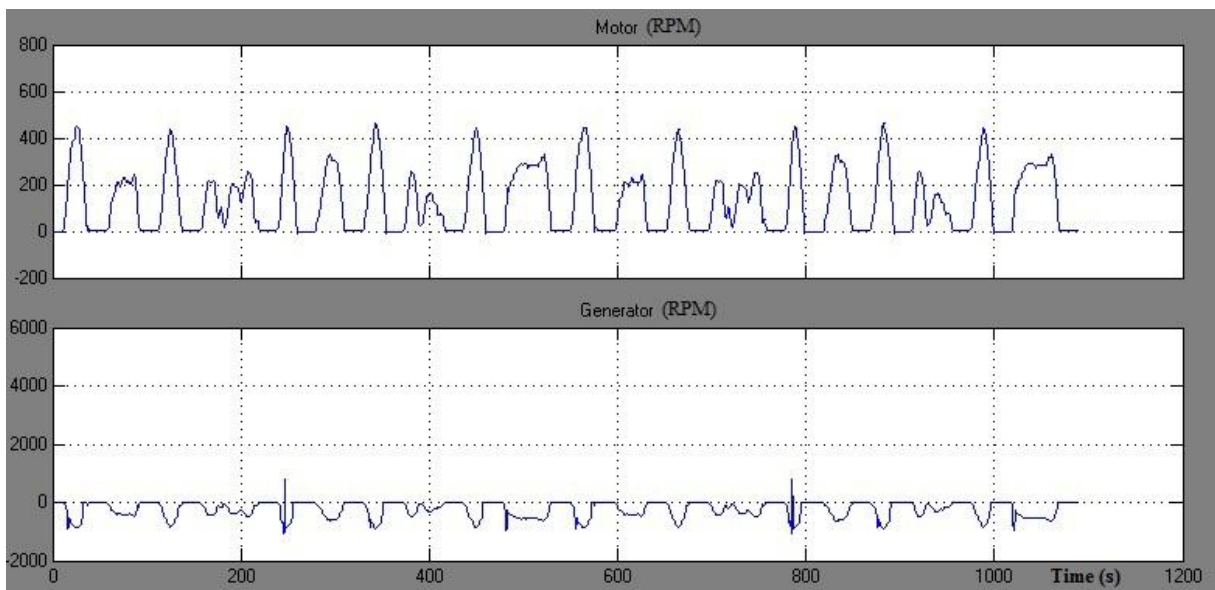
Τόσο στο DC ζυγό όσο και στα άκρα των μπαταριών η τάση δεν παρουσίασε αξιοσημείωτες διακυμάνσεις ενώ μεγάλες εντάσεις ρεύματος παρατηρήθηκαν μόνο κατά την εκφόρτιση των μπαταριών για την ενεργειακή κάλυψη των έντονων επιταχύνσεων. Παρατηρείται πως η δεν απαιτήθηκε φόρτιση των αρχικά γεμάτων μπαταριών κατά την διάρκεια της διαδρομής για αυτό και η ηλεκτρική γεννήτρια παρέμεινε αμέτοχη κατά την διάρκεια αυτής της προσομοίωσης.



**Εικόνα 4.13**

*Γραφική απεικόνιση ηλεκτρικών μεγεθών συναρτήσει του χρόνου.*

Οι ταχύτητες περιστροφής των δύο σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών του οχήματος παρουσιάζονται στην εικόνα 4.14.

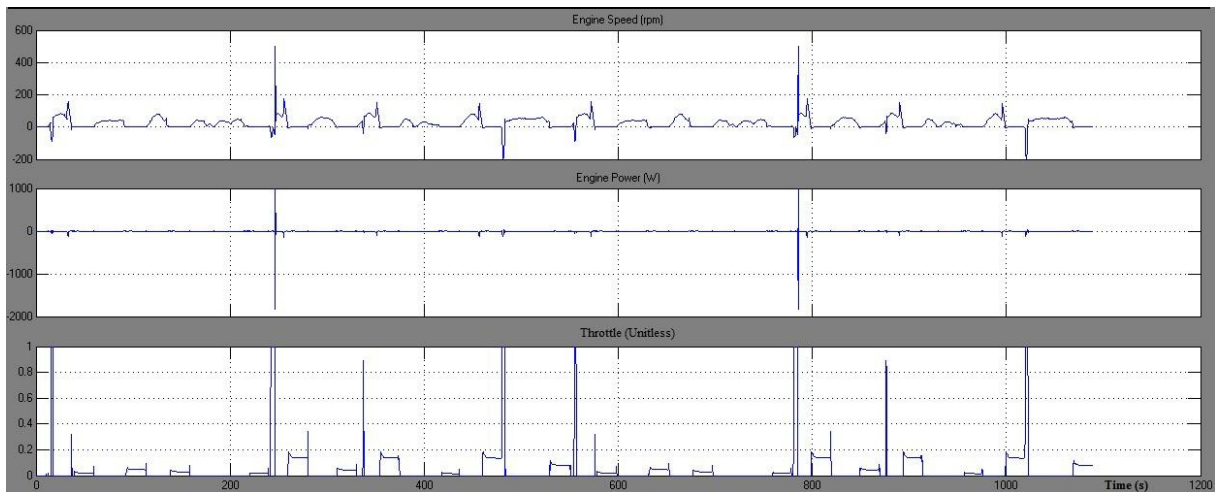


**Εικόνα 4.14**

*Ταχύτητα περιστροφής ηλεκτροκινητήρα και ηλεκτρικής γεννήτριας.*

Η ηλεκτρική γεννήτρια λειτούργησε κυρίως σαν πέδη (αρνητική κατά σύμβαση ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της) ενώ ο ηλεκτροκινητήρας λειτούργησε σε χαμηλές σχετικά στροφές προσφέροντας υψηλή ροπή κατά τις εκκινήσεις του οχήματος.

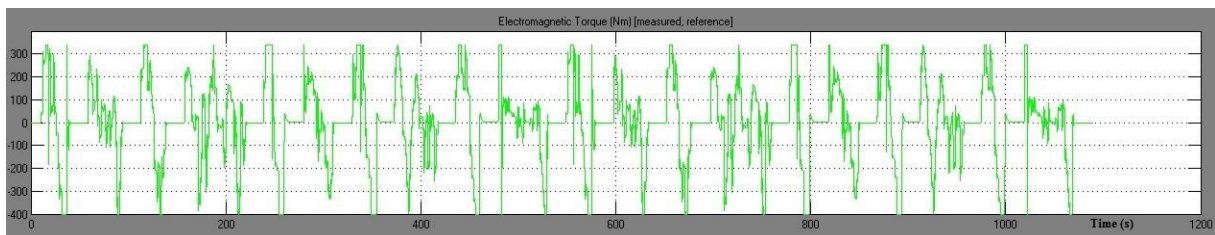
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα περιστροφής, η ισχύς και η κανονικοποιημένη τιμή του γκαζιού του θερμικού κινητήρα. Γίνεται φανερή η περιορισμένη χρήση της MEK, καθώς η διαδρομή επιβάλλει πολλές εκκινήσεις οι οποίες κάνουν χρήση του ηλεκτροκινητήρα.



**Εικόνα 4.15**

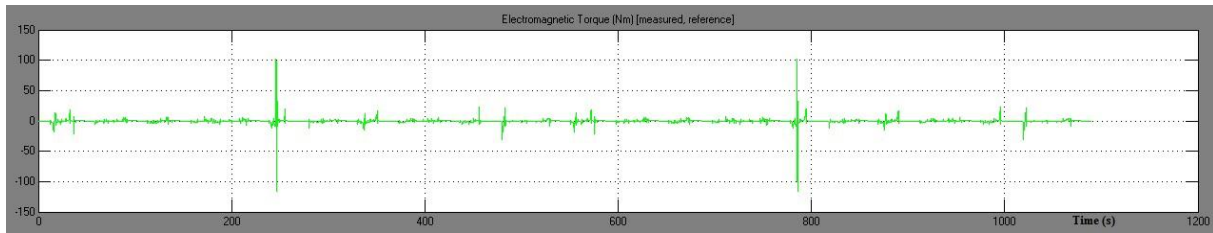
*Ταχύτητα περιστροφής, ισχύς και κανονικοποιημένη τιμή γκαζιού της MEK.*

Στις εικόνες 4.16 και 4.17 παρουσιάζεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή των δύο ηλεκτρικών μηχανών. Παρατηρείται πως ο ηλεκτροκινητήρας αρκετές φορές χρειάστηκε να αποδώσει την μέγιστη ροπή του (320 Nm) ώστε να ικανοποιηθεί το ζητούμενο φορτίο, ενώ η λειτουργία της γεννήτριας ήταν πολύ περιορισμένη όπως φάνηκε και παραπάνω από τη φθίνουσα πορεία του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών καθ' όλη την διάρκεια της διαδρομής.



**Εικόνα 4.16**

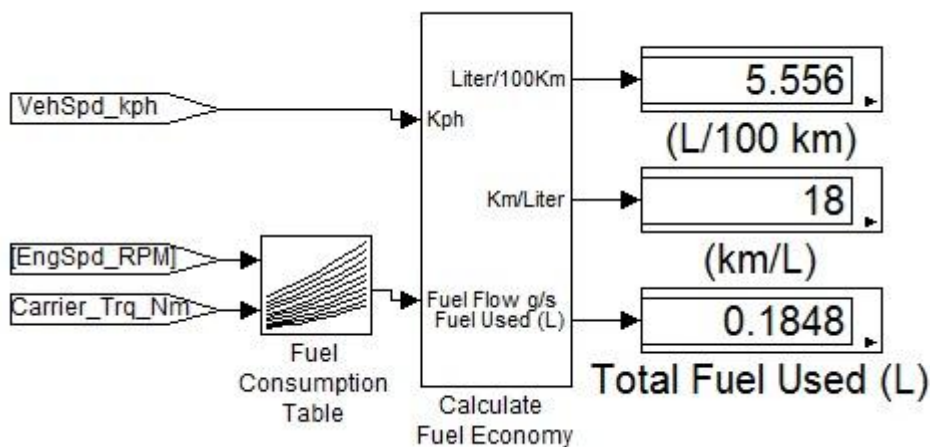
*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα.*



**Εικόνα 4.17**

*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της ηλεκτρικής γεννήτριας.*

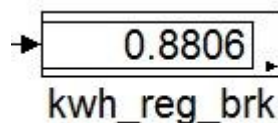
Η μέση κατανάλωση του οχήματος κυμάνθηκε στα 5,556L/100km (σχήμα 4.34). Κρίνεται αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη που σημειώθηκε στην διαδρομή της Αθήνας. Ωστόσο αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η διαδρομή του Μανχάταν ανάγκασε την ΜΕΚ να λειτουργήσει περισσότερο σε χαμηλές στροφές όπου η κατανάλωση καυσίμου είναι μεγαλύτερη.



**Σχήμα 4.34**

*Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου βενζινοκινητήρα.*

Στην εικόνα 4.18 φαίνεται η ενέργεια που θα μπορούσε να αποκομίσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης.

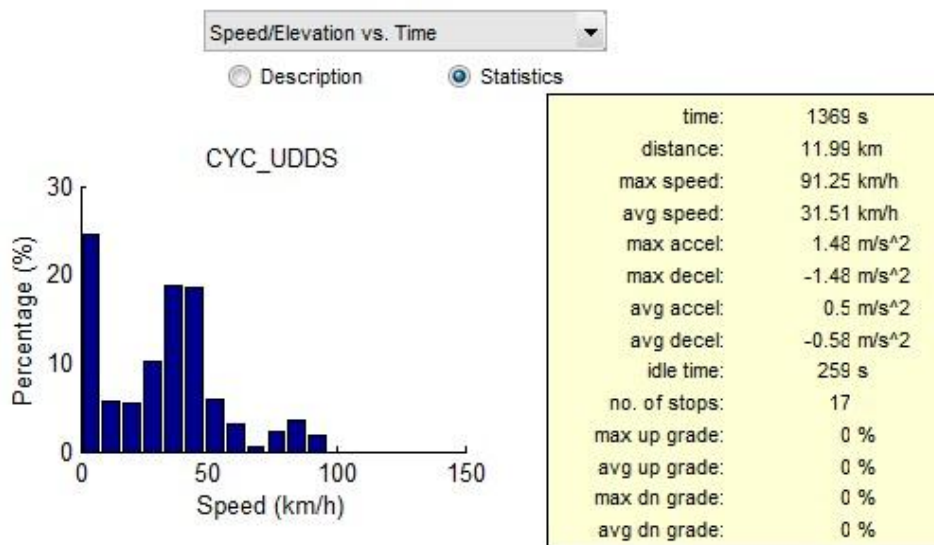
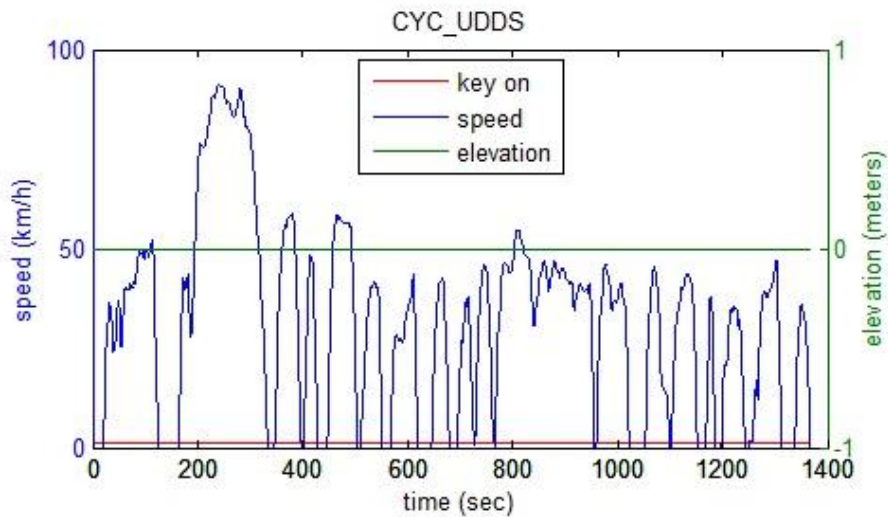


**Εικόνα 4.18**

*Ποσότητα ενέργειας (σε kWh) που θα μπορούσε να αποκομίσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης.*

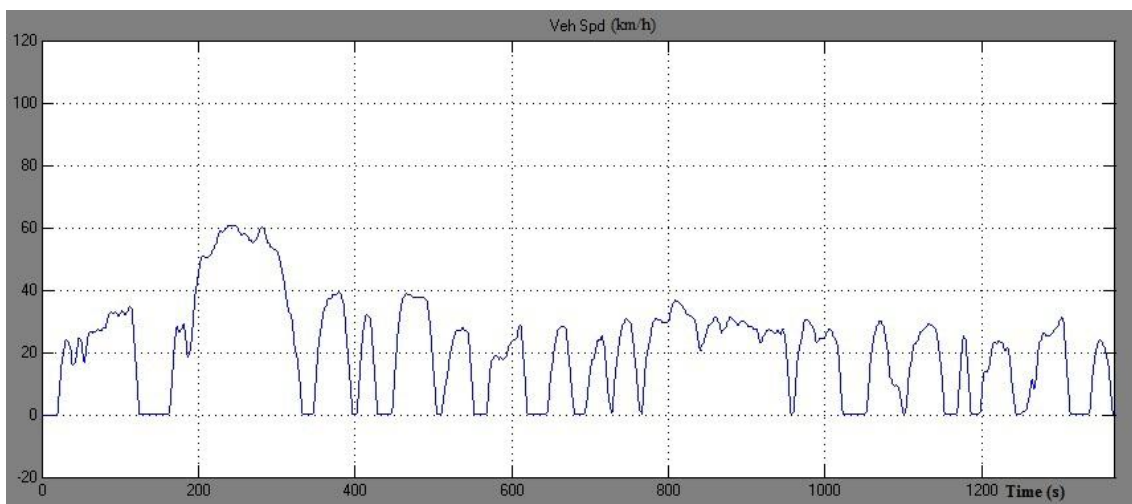
#### 4.3.4 Urban Dynamometer Driving Schedule

Ο συγκεκριμένος κύκλος οδήγησης είναι γνωστός και ως U.S. FTP-72 (Federal Test Procedure). Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατανάλωσης και των εκπεμπόμενων ρύπων, μη-βαρέων οχημάτων, στα πλαίσια ενός αστικού περιβάλλοντος οδήγησης. Στην εικόνα 4.19 παρουσιάζεται μια συνοπτική ανάλυση του UDDS.



**Εικόνα 4.19**

*Συνοπτική περιγραφή του Urban Dynamometer Driving Schedule.*

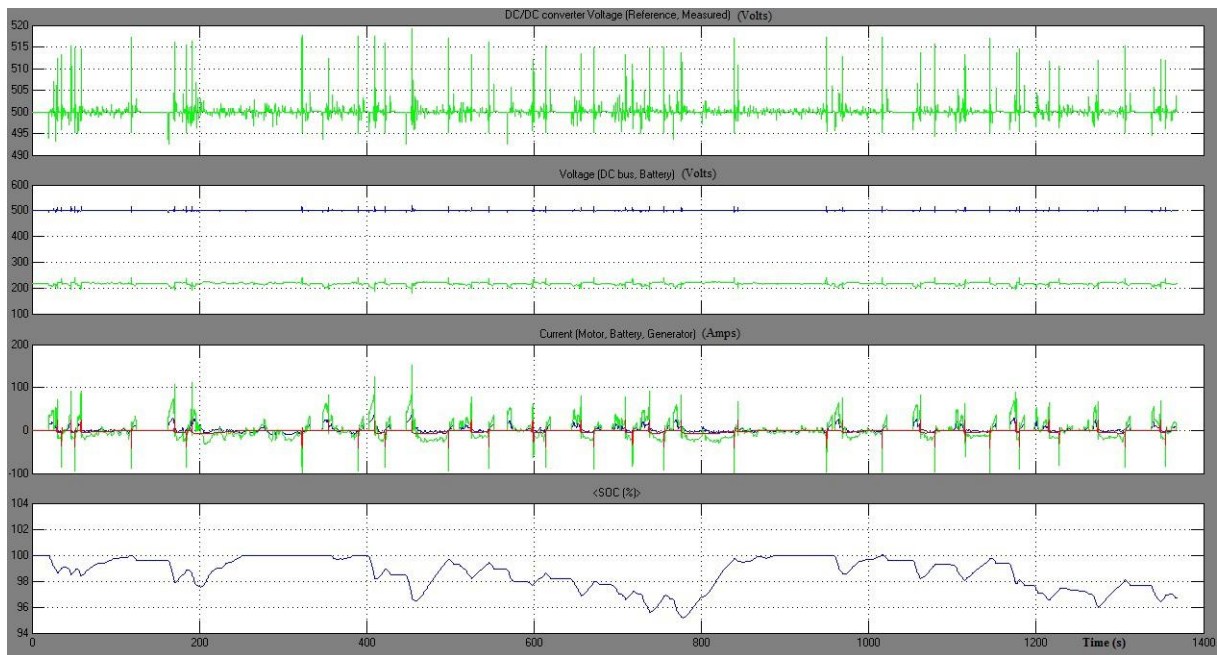


**Εικόνα 4.20**

*Η στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος καθ' όλη την διάρκεια του UDDS.*

Το όχημα ανταποκρίθηκε με επιτυχία στις απαιτήσεις της διαδρομής, καθώς η στιγμιαία ταχύτητά του (εικόνα 4.20) ταυτίζεται με την στιγμιαία ταχύτητα αναφοράς (UDDS).

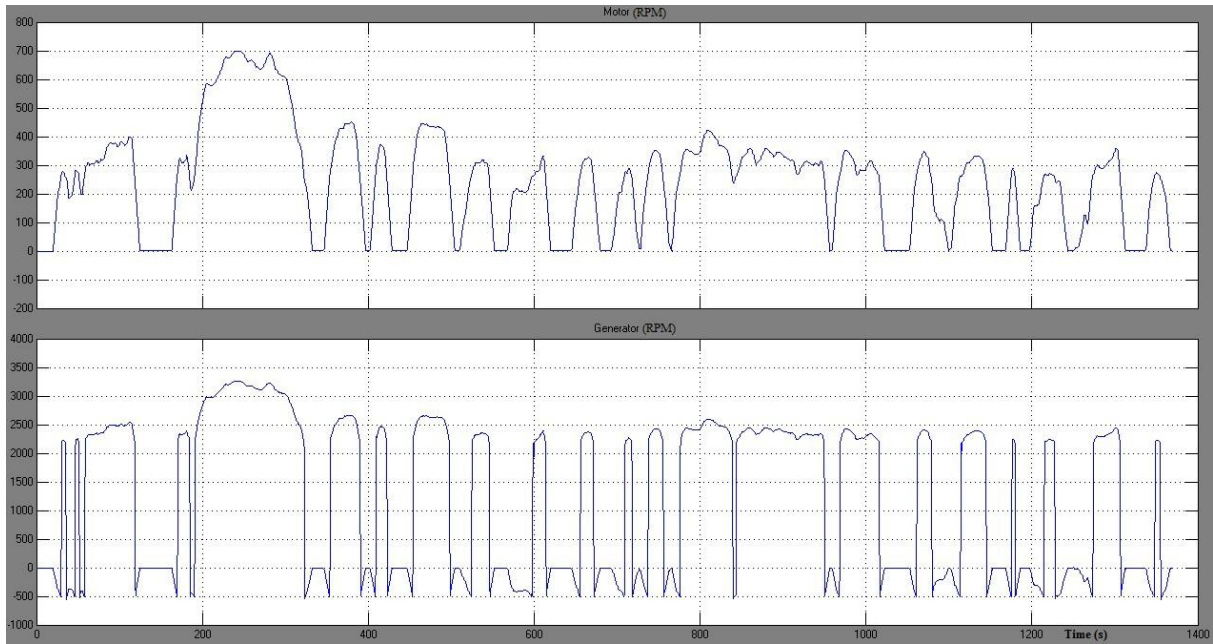
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.21 η τάση εξόδου του DC-DC μετατροπέα τύπου boost παρουσίασε ορισμένες διακυμάνσεις από την επιθυμητή τιμή των 500V οι οποίες ήταν πιο αισθητές κατά τις έντονες επιταχύνσεις. Η τάση τόσο στον DC ζυγό όσο και στις μπαταρίες δεν παρουσίασε κάποια έντονη διακύμανση που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί βλαπτική ενώ μεγάλες εντάσεις ρεύματος παρατηρήθηκαν κατά τις στιγμιαίες εκφορτίσεις τις μπαταρίες για να εξυπηρετήσει το φορτίο. Παρατηρείται ακόμη πως τα επίπεδα φόρτισης της μπαταρίας διατηρήθηκαν κοντά στην πλήρη φόρτιση



**Εικόνα 4.21**

*Γραφική απεικόνιση ηλεκτρικών μεγεθών συναρτήσει του χρόνου.*

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι ταχύτητες περιστροφής των δύο σύγχρονων μηχανών του οχήματος.

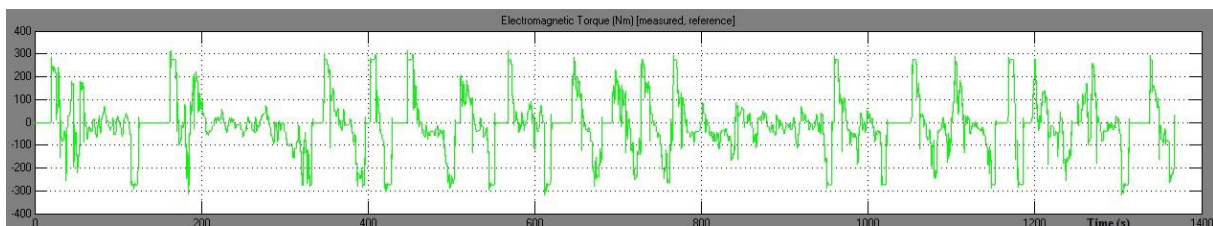


**Εικόνα 4.22**

*Ταχύτητα περιστροφής ηλεκτροκινητήρα και ηλεκτρικής γεννήτριας.*

Οι χαμηλές ταχύτητες περιστροφής στον ηλεκτροκινητήρα είχαν σαν αποτέλεσμα την προσφορά υψηλής ροπής στο όχημα κατά τις εκκινήσεις, ενώ η περιστροφή του δρομέα της ηλεκτρογεννήτριας κατά την θετική φορά ισοδυναμεί με την προσφορά ηλεκτρικής ισχύος στις μπαταρίες. Γίνεται φανερό πως η γραφική απεικόνιση της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας συναρτήσκει του χρόνου καταδεικνύει τις συχνές φορτίσεις των μπαταριών που είχε σαν αποτέλεσμα την διατήρηση υψηλού επιπέδου φόρτισης κατά την διάρκεια της διαδρομής.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα, συναρτήσκει του χρόνου, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.23.

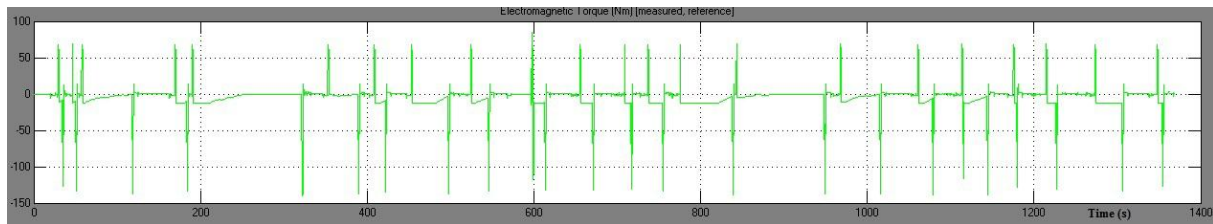


**Εικόνα 4.23**

*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα.*

Η θετική ηλεκτρομαγνητική ροπή ισοδυναμεί με ροπή που κατευθύνεται στον άξονα του οχήματος με σκοπό την πρόωση του, ενώ η αρνητική ισοδυναμεί με αντίστροφη λειτουργία του ηλεκτρικού κινητήρα δηλαδή αυτή της ηλεκτρογεννήτριας (αναγεννητική πέδηση).

Στην εικόνα 4.24 παρουσιάζεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή της σύγχρονης γεννήτριας σε συνάρτηση με τον χρόνο.

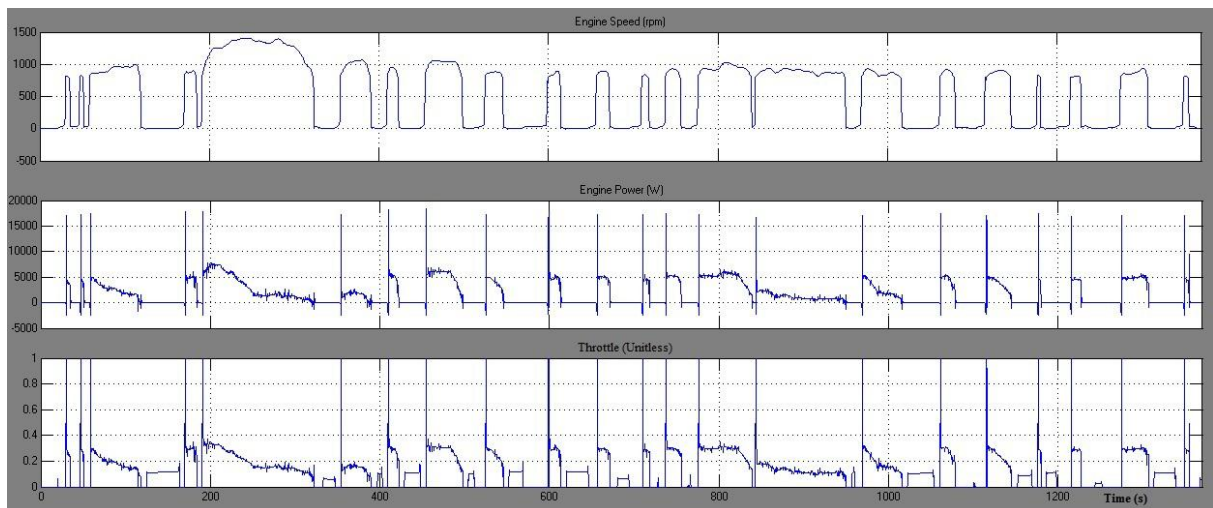


**Εικόνα 4.24**

*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της ηλεκτρικής γεννήτριας.*

Μέσω της θετικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής προσφέρεται ηλεκτρική ισχύς στις μπαταρίες ενώ όταν παρατηρείται αρνητική ηλεκτρομαγνητική ροπή, η σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί σαν πέδη.

Στην εικόνα 4.25 παρουσιάζεται η ταχύτητα περιστροφής, η ισχύς και η κανονικοποιημένη τιμή του γκαζιού (0 - καθόλου γκάζι, 1 – πλήρες γκάζι) του θερμικού κινητήρα ανά πάσα χρονική στιγμή.



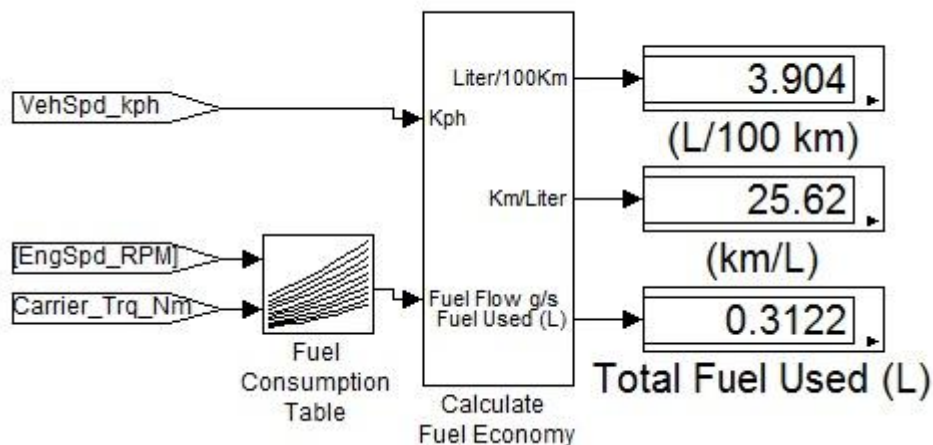
**Εικόνα 4.25**

*Ταχύτητα περιστροφής, ισχύς και κανονικοποιημένη τιμή γκαζιού της ΜΕΚ.*

Παρατηρείται πως η τιμή του γκαζιού και η ισχύς του βενζινοκινητήρα είναι ευθέως ανάλογα μεγέθη μεταξύ τους, ενώ μέσω της ταχύτητα περιστροφής του βενζινοκινητήρα κατανοείται η μετάβαση του οχήματος από και προς τις διάφορες φάσεις λειτουργίας του σύμφωνα με το κατώφλι των 1200 ΣΑΛ που έχει τεθεί.

Στο σχήμα 4.35 παρουσιάζεται η μέση και η συνολική κατανάλωση του οχήματος μετά την ολοκλήρωση του κύκλου οδήγησης. Η μέση κατανάλωση καυσίμου προσδιορίστηκε στα 3,904L/100km καθώς ο θερμικός κινητήρας; κατανάλωσε 0,3122L καυσίμου διανύοντας συνολικά μια απόσταση 11,99km

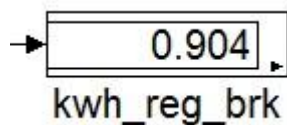




Σχήμα 4.35

Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου βενζινοκινητήρα.

Στην εικόνα 4.20 φαίνεται η ενέργεια που θα μπορούσε να αποκομίσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης.



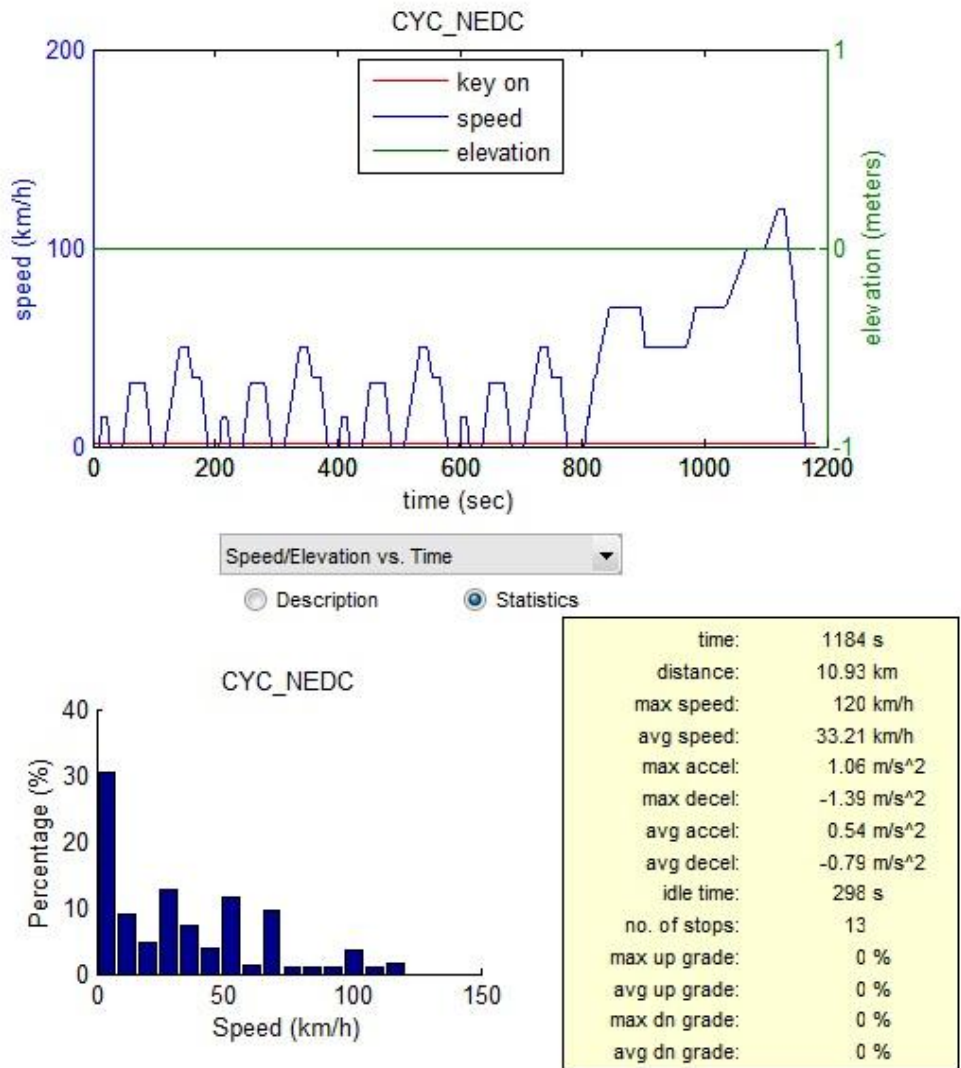
Εικόνα 4.26

Ποσότητα ενέργειας (σε kWh) που θα μπορούσε να αποκομίσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης.

### 4.3.5 New European Driving Cycle

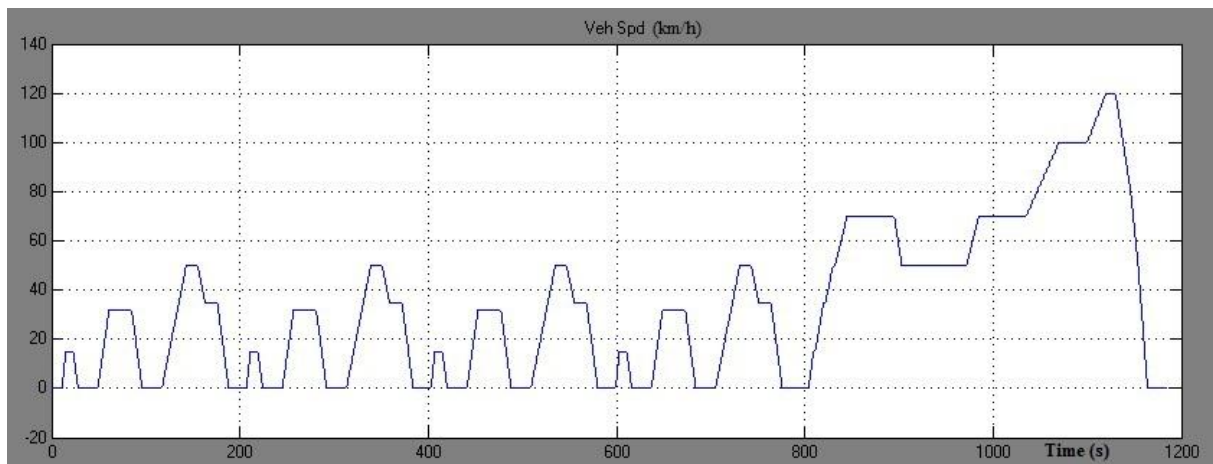
Ο νέος ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης συντίθεται από τέσσερις διαδοχικούς κύκλους ECE-15 και από έναν κύκλο Extra-Urban driving cycle (EUDC). Αντιπροσωπεύει την τυπική χρήση ενός οχήματος στην Ευρώπη και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπεμπόμενων ρύπων των υπό ανάπτυξη οχημάτων. Επίσης ο NEDC συχνά αποκαλείται και κύκλος MVEG (Motor Vehicle Emissions Group). Ωστόσο έχει αναφερθεί πως λόγω της αλματώδους ανόδου της ισχύος των οχημάτων τα τελευταία χρόνια, κρίνεται αναγκαία η τροποποίησή του ώστε να εξυπηρετεί καλύτερα τις σύγχρονες ανάγκες [87].

Στην συνέχεια ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή του NEDC (εικόνα 4.27).



Εικόνα 4.27

Συνοπτική περιγραφή του New European Driving Cycle.

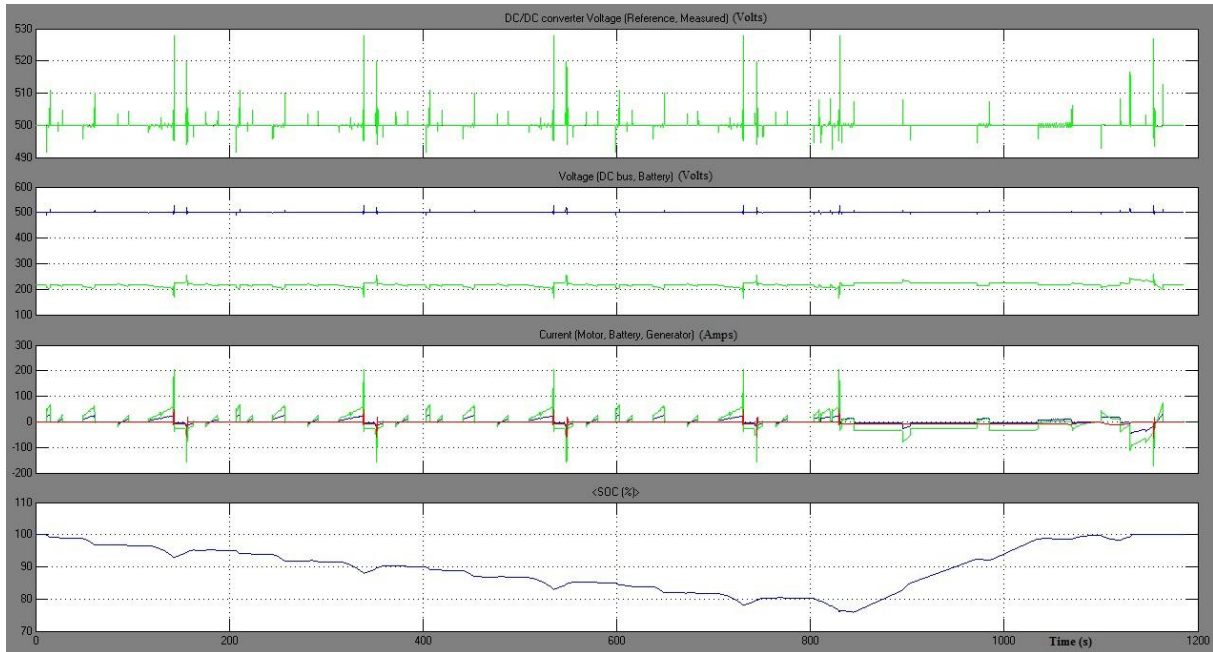


Εικόνα 4.28

Η στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος καθ' όλη την διάρκεια του NEDC.

Το όχημα ακολούθησε με επιτυχία χωρίς αποκλίσεις την χρονοσειρά ταχύτητας αναφοράς του NEDC όπως φαίνεται και από την κυματομορφή της εικόνας 4.28.

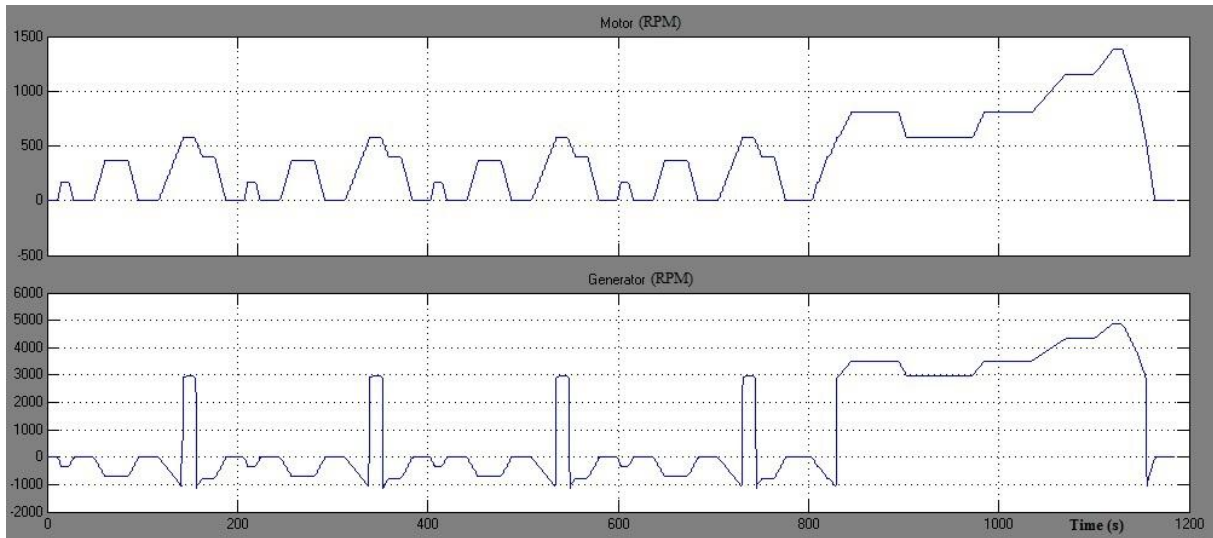
Στην εικόνα 4.29 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ορισμένων ηλεκτρικών μεγεθών συναρτήσει του χρόνου.



**Εικόνα 4.29**

*Γραφική απεικόνιση ηλεκτρικών μεγεθών συναρτήσει του χρόνου.*

Οι τάσεις σε DC ζυγό και μπαταρίες δεν επέδειξαν ιδιαίτερες αποκλίσεις από τα 500V και τα 200V αντίστοιχα, ενώ μεγάλα ρεύματα εκφόρτισης από τις μπαταρίες, παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια των έντονων μεταβατικών φαινομένων (επιταχύνσεων). Μετά το πέρας των τεσσάρων ECE-15 κύκλων που απαρτίζουν τον NEDC και κάνουν έντονη χρήση του ηλεκτροκινητήρα, το SOC των μπαταριών ακολουθεί αύξουσα πορεία καταλήγοντας στο 100% στο τέλος της διαδρομής. Οι κυματομορφές των ταχυτήτων περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα και της ηλεκτρικής γεννήτριας, παρουσιάζονται στην εικόνα 4.30

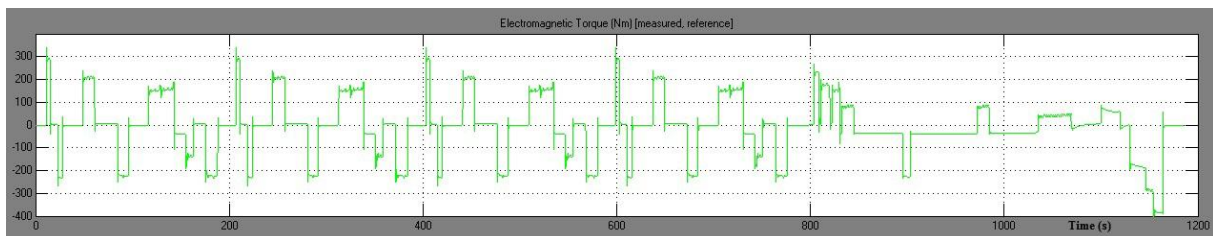


**Εικόνα 4.30**

*Ταχύτητα περιστροφής ηλεκτροκινητήρα και ηλεκτρικής γεννήτριας.*

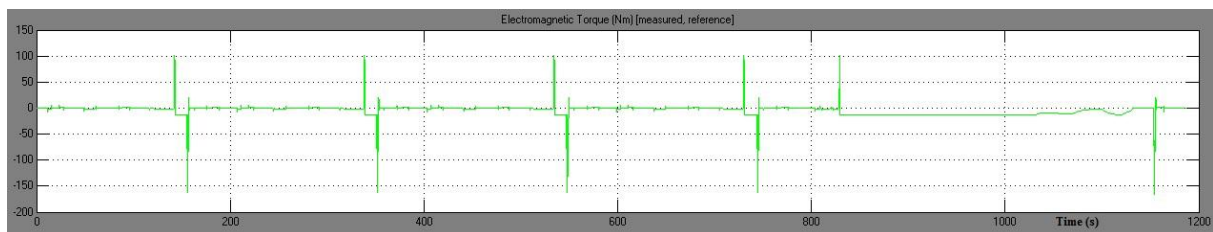
Στην κυματομορφή της ταχύτητας της ηλεκτρικής γεννήτριας διακρίνονται οι περιπτώσεις όπου προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια στις μπαταρίες (θετική κατά σύμβαση ταχύτητα περιστροφής), καθώς επίσης και οι περιπτώσεις που λειτουργεί σαν πέδη. Ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σε χαμηλό φάσμα στροφών προσφέροντας υψηλή ροπή στο όχημα.

Στις εικόνες 4.31 και 4.32 παρουσιάζεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα και της ηλεκτρικής γεννήτριας αντίστοιχα. Στην 4.33 φαίνονται κυματομορφές που αφορούν την ΜΕΚ.



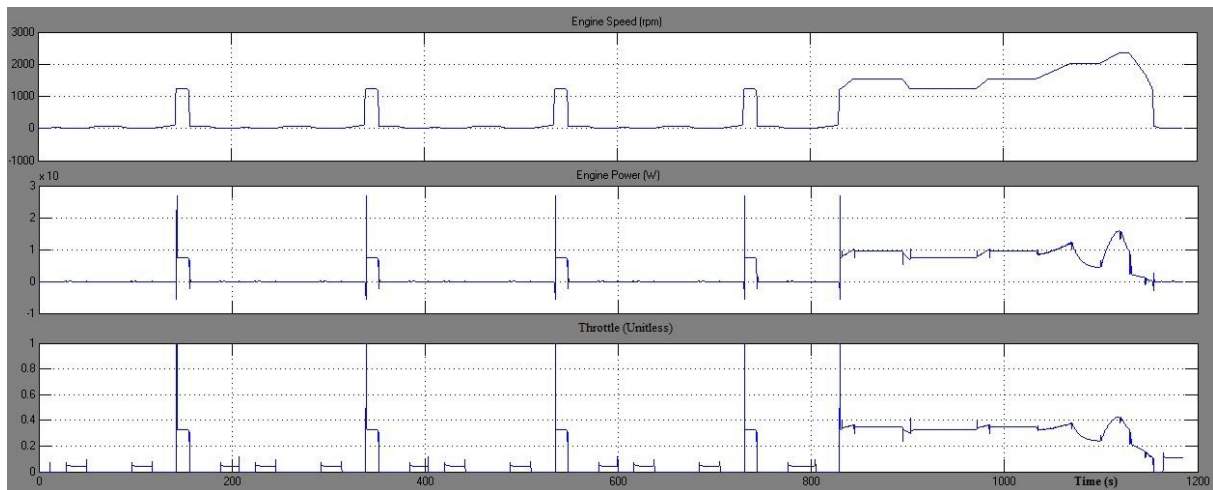
**Εικόνα 4.31**

*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα.*



**Εικόνα 4.32**

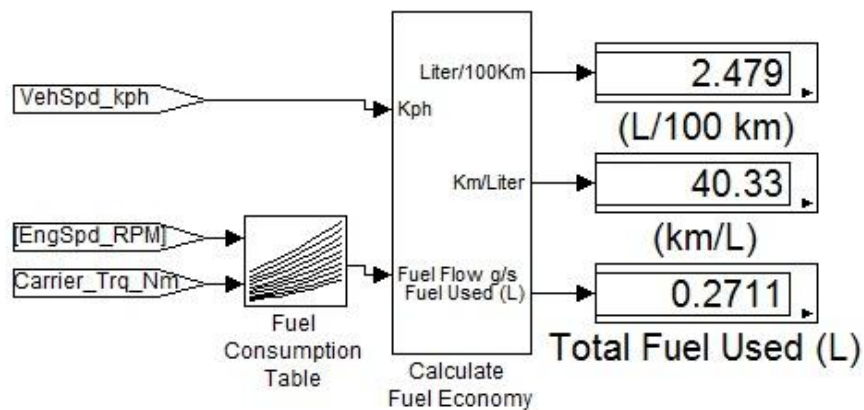
*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της ηλεκτρικής γεννήτριας.*



**Εικόνα 4.33**

*Ταχύτητα περιστροφής, ισχύς και κανονικοποιημένη τιμή γκαζιού της ΜΕΚ.*

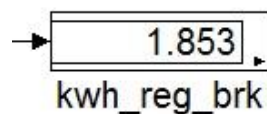
Παρατηρείται πως δεν γίνεται εκτεταμένη χρήση του θερμικού κινητήρα στα πλαίσια αυτού του κύκλου οδήγησης, καθώς ο βενζινοκινητήρας χρησιμοποιείται κυρίως στο τελευταίο (EUDC) κομμάτι της διαδρομής. Τα παραπάνω επαληθεύονται και μέσω του σχήματος 4.36 όπου παρουσιάζονται τα δεδομένα της προσομοίωσης όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου του οχήματος.



**Σχήμα 4.36**

*Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου βενζινοκινητήρα.*

Η μέση κατανάλωση βενζίνης ήταν 2,479 L/100km, ενώ χρησιμοποιήθηκαν 0,2711 L για την ολοκλήρωση της διαδρομής. Τέλος, η ενέργεια που θα μπορούσε να ανακτηθεί μέσω της αναγεννητικής πέδησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.34).



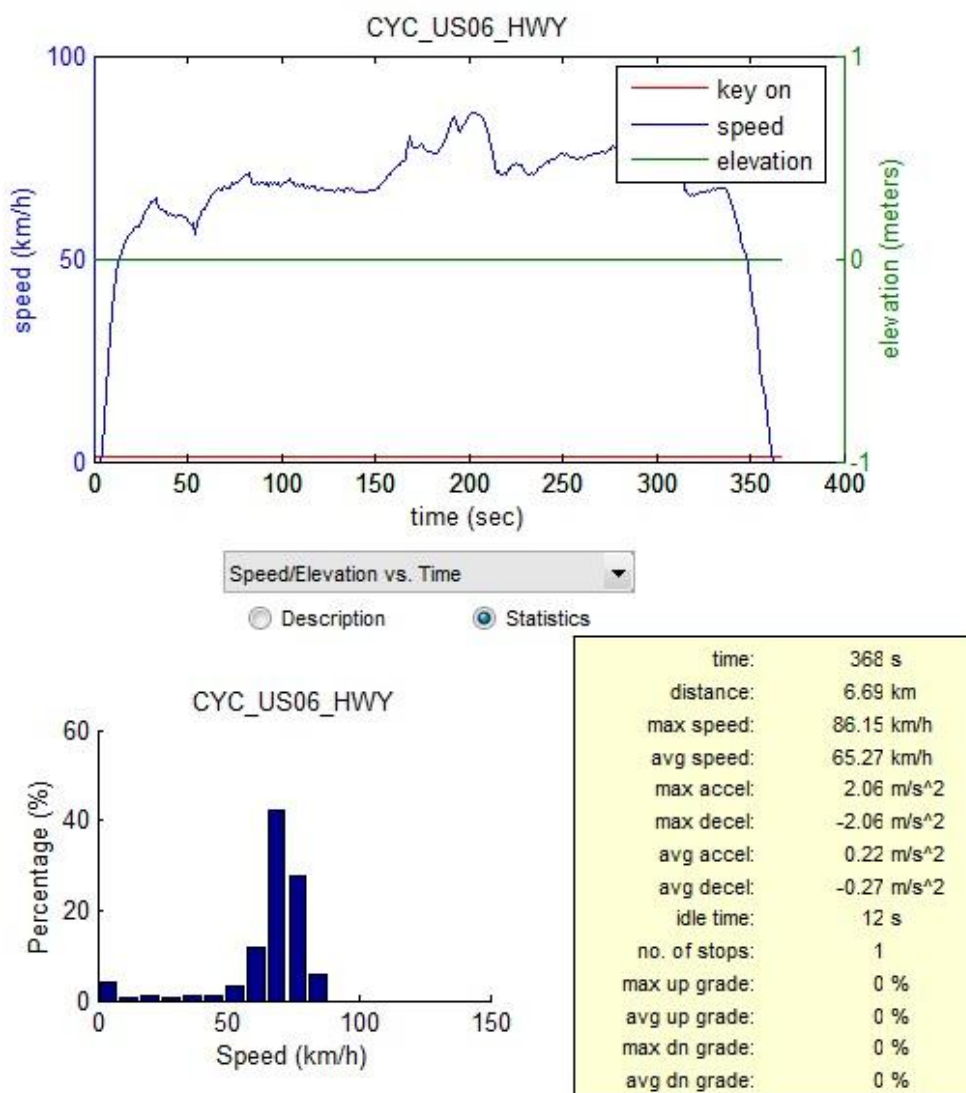
**Εικόνα 4.34**

*Ποσότητα ενέργειας (σε kWh) που θα μπορούσε να αποκομίσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης.*

### 4.3.6 Supplemental Federal Test Procedure – US06 Highway

Ο κύκλος οδήγησης Supplemental Federal Test Procedure (SFTP) διαμορφώθηκε από το υπουργείο περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency – EPA) των ΗΠΑ, ώστε να συμπληρώσει τον κύκλο UDDS, ο οποίος περιλάμβανε μικρότερες ταχύτητες και εντονότερες επιταχύνσεις [88]. Στο παρόν εδάφιο χρησιμοποιείται το κομμάτι του SFTP που προσομοιώνει κίνηση σε ανοιχτό δρόμο και όχι αστικό κέντρο, ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου υβριδικού οχήματος και να αξιολογηθεί η προτεινόμενη μέθοδος διαχείρισης ενέργειας στα πλαίσια συνθηκών αυτοκινητόδρομου.

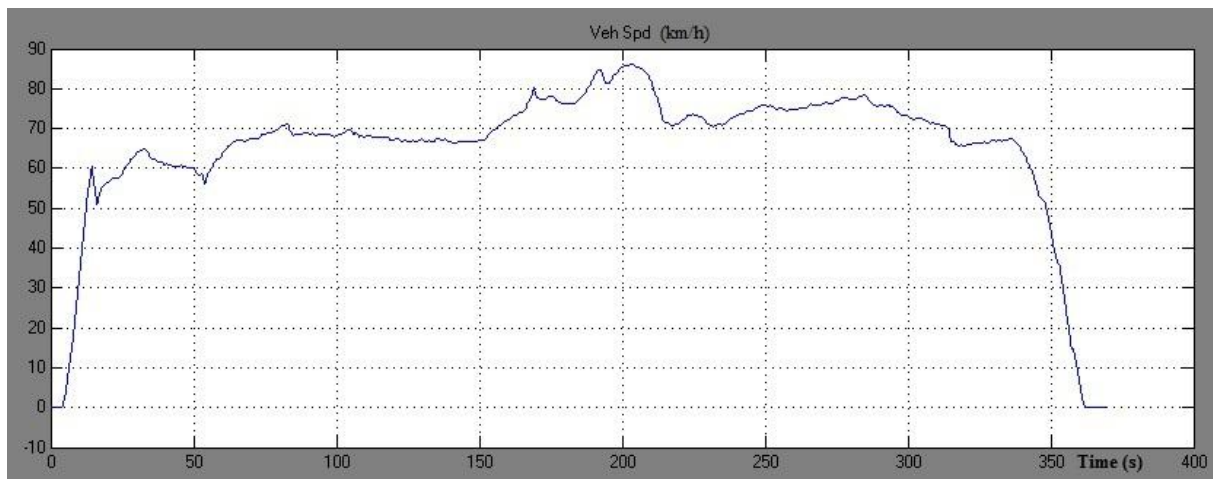
Στην εικόνα 4.35 πραγματοποιείται μια συνοπτική ανάλυση της διαδρομής. Πρόκειται για μία σύντομη διαδρομή η οποία ουσιαστικά διαθέτει ένα έντονο μεταβατικό φαινόμενο επιτάχυνσης και ένα επιβράδυνσης. Στο μεσοδιάστημα των δύο αυτών μεταβατικών διατηρείται μια μέση ταχύτητα γύρω στα 70 km/h χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις.



Εικόνα 4.35

Συνοπτική περιγραφή του Supplemental Federal Test Procedure – US06 Highway.

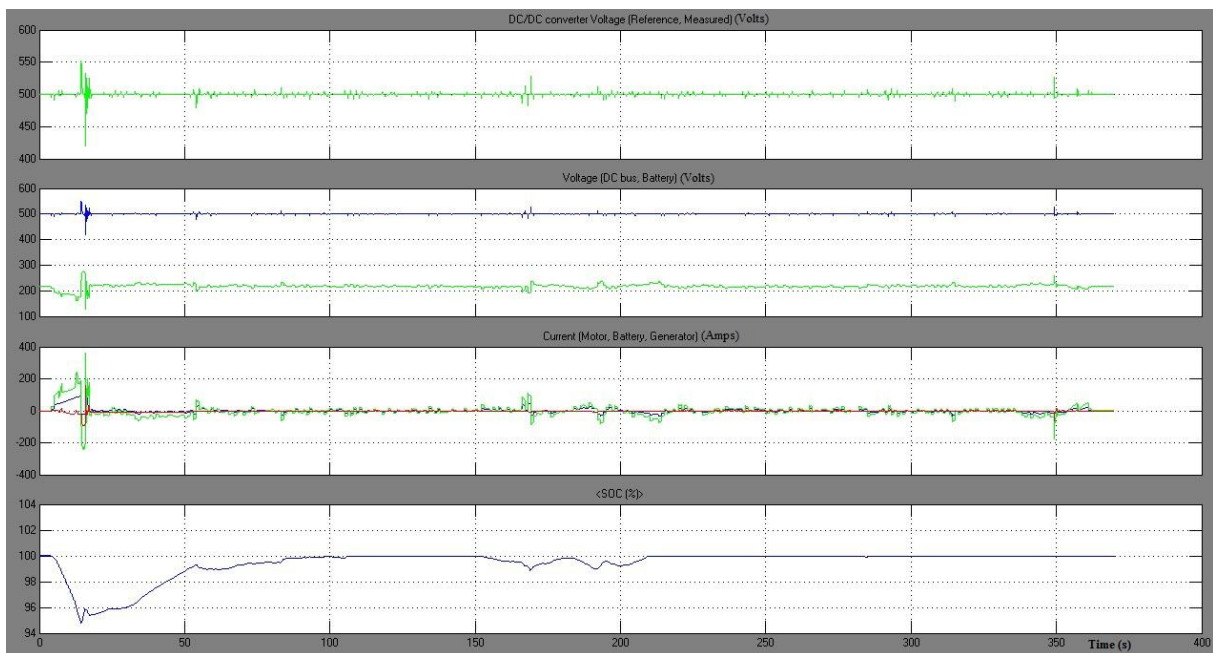
Το όχημα διατήρησε την ταχύτητα αναφοράς κατά την διάρκεια της διαδρομής (εικόνα 4.36).



**Εικόνα 4.36**

*Η στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος καθ' όλη την διάρκεια του SFTP - Highway.*

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τάσεις στον ζυγό DC, στις μπαταρίες και τον μετατροπέα DC-DC, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος των ηλεκτρικών μηχανών και κατά την εκφόρτιση των μπαταριών και τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών κατά την διάρκεια της διαδρομής (εικόνα 4.37).



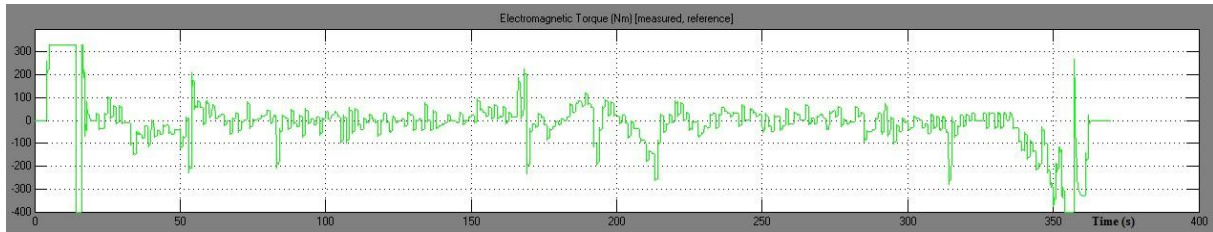
**Εικόνα 4.37**

*Γραφική απεικόνιση ηλεκτρικών μεγεθών συναρτήσει του χρόνου.*

Είναι φανερό πως η μόνη στιγμιαία αστάθεια σε επίπεδο τάσης πραγματοποιείται κατά την πρώτη έντονη επιτάχυνση που σημειώνεται περίπου στο 20<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο της διαδρομής. Αυτή η αστάθεια γίνεται αντιληπτή στην τάση των μπαταριών, του DC ζυγού και του μετατροπέα ισχύος. Κατά τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές παρατηρείται μεγάλη ένταση ρεύματος κατά την εκφόρτιση του πακέτου

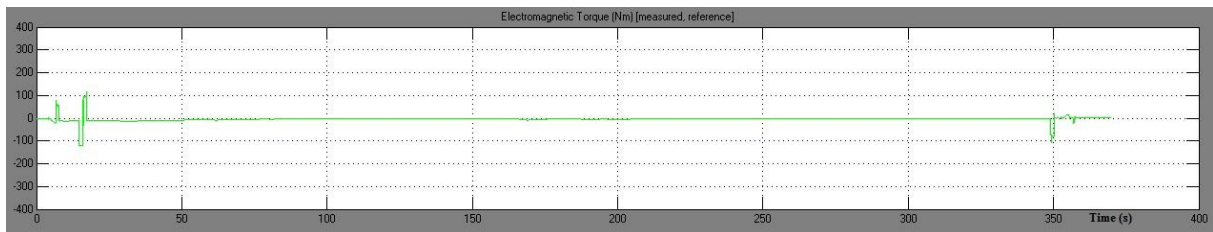
των μπαταριών και απότομη μείωση του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών. Στην υπόλοιπη διαδρομή παρατηρείται ήπια λειτουργία του οχήματος σε όλα τα επίπεδα (τάσης και ρεύματος).

Στην εικόνα 4.38 φαίνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα σε συνάρτηση με τον χρόνο, ενώ στην εικόνα 4.39 παρουσιάζεται η αντίστοιχη ροπή της ηλεκτρικής γεννήτριας.



**Εικόνα 4.38**

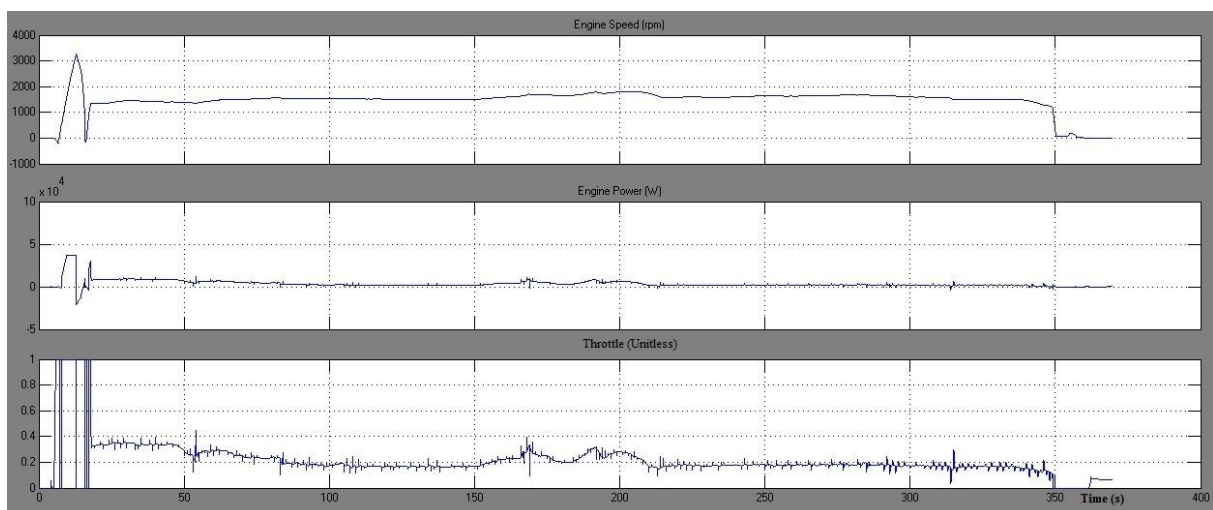
*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα.*



**Εικόνα 4.39**

*Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της ηλεκτρικής γεννήτριας.*

Και στις δύο τελευταίες κυματομορφές γίνεται αντιληπτή η έντονη επιτάχυνση που σημειώνεται στην αρχή της διαδρομής με τον ηλεκτροκινητήρα να προσφέρει την μέγιστη δυνατή ροπή σε ελάχιστο χρόνο. Έπειτα στην εικόνα 4.40 παρατίθενται οι κυματομορφές των μεγεθών του θερμικού κινητήρα.



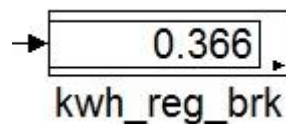
**Εικόνα 4.40**

*Ταχύτητα περιστροφής, ισχύς και κανονικοποιημένη τιμή γκαζιού της ΜΕΚ.*



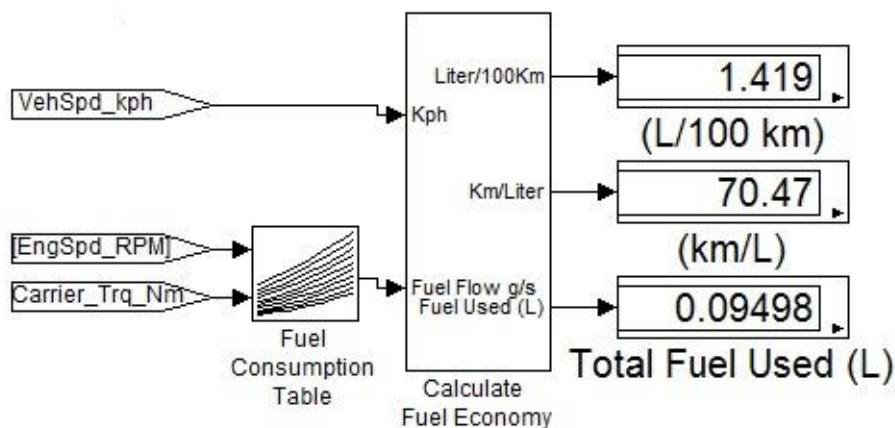
Ομοίως με τον ηλεκτροκινητήρα, και ο βενζινοκινητήρας λειτουργεί στιγμιαία έντονα ώστε να επιτευχθεί η απότομη επιτάχυνση στην αρχή της διαδρομής.

Η μέση κατανάλωση του οχήματος είναι ιδιαίτερα χαμηλή καθώς ουσιαστικά μόνο η απότομη επιτάχυνση στην αρχή αναγκάζει την ΜΕΚ να λειτουργήσει σε εντατικούς ρυθμούς. Η υπόλοιπη διαδρομή είναι ιδιαίτερα οικονομική από άποψη κατανάλωσης καυσίμου καθώς η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του οχήματος είναι περιορισμένη. Στο σχήμα 4.37 παρουσιάζεται η μέση και η συνολική κατανάλωση του υβριδικού οχήματος, ενώ στην εικόνα 4.41 φαίνεται η ενέργεια που θα μπορούσε να ανακτήσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης.



Εικόνα 4.41

Ποσότητα ενέργειας (σε kWh) που θα μπορούσε να αποκομίσει το όχημα μέσω της αναγεννητικής πέδησης.



Σχήμα 4.37

Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου βενζινοκινητήρα.

## 4.4 Προσομοίωση με το λογισμικό ADVISOR

### 4.4.1 Γενικά

Το τμήμα ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (U.S Department Of Energy – DOE) σε συνεργασία με το αμερικανικό εθνικό κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory – NREL ) καθώς και εταιρους του χώρου της βιομηχανίας ανέπτυξαν ένα εξελιγμένο εργαλείο ανάλυσης οχημάτων και των επιμέρους μονάδων τους, το ADVISOR<sup>®</sup> (Advanced Vehicle Simulator). Τα τελευταία χρόνια η ιδιωτική εταιρεία AVL εξαγόρασε τα δικαιώματα ανάπτυξης του λογισμικού ADVISOR<sup>®</sup>.

Το ADVISOR<sup>®</sup> είναι λογισμικό γραμμένο στο ευρέως διαδεδομένο περιβάλλον του MATLAB/Simulink<sup>®</sup> και χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και ανάλυση τόσο συμβατικών όσο

και υβριδικών οχημάτων. Το ADVISOR<sup>®</sup> δύναται να προσδιορίσει την επίπτωση αλλαγών στις επιμέρους μονάδες ενός οχήματος (όπως στις μπαταρίες, τον κινητήρα, τον μετατροπέα ισχύος κ.α) στην συνολική απόδοση και επίδοση του. Κατά την προσομοίωση μέσω του ADVISOR<sup>®</sup> προσδιορίζονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι από το όχημα καθώς και η συνολική του μέση κατανάλωση [89].

Η κυκλοφορία του ADVISOR<sup>®</sup> έγινε επίσημα το 1998 και ήταν διαθέσιμο μόνο σε ηλεκτρονική μορφή μέσω του Internet. Πλέον χρησιμοποιείται από πάνω από 12.500 χρήστες εκ των οποίων το 68% ανήκει στον τομέα της βιομηχανίας, το 29% είναι μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας και το εναπομείναν 3% είναι κυβερνητικές οντότητες [89].

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ADVISOR 2002.

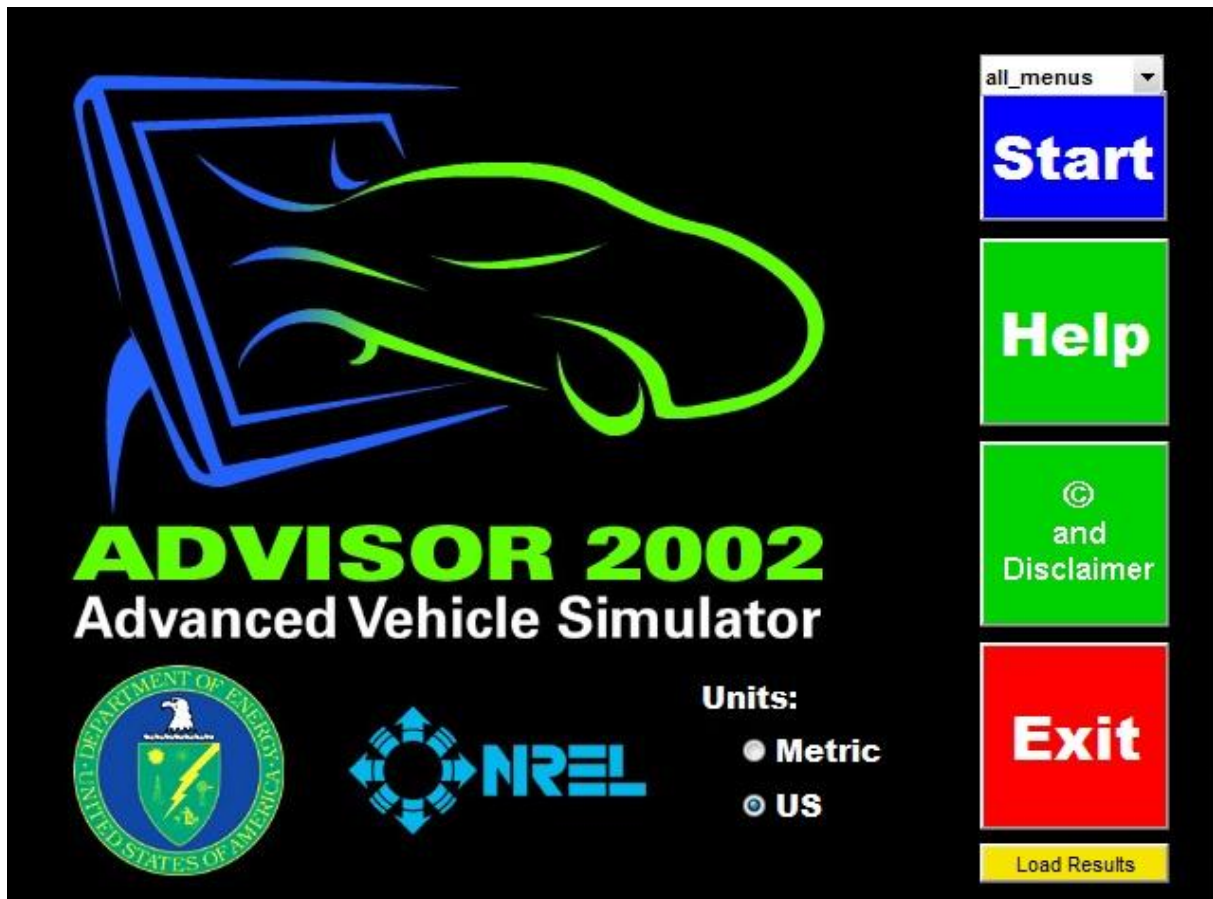


**Εικόνα 4.42**

*Το λογότυπο του λογισμικού ADVISOR<sup>®</sup> 2002.*

#### **4.4.2 Παραμετροποίηση και προσομοίωση**

Αφότου εγκατασταθεί το ADVISOR<sup>®</sup> δίνεται εντολή εκκίνησής του μέσω του MATLAB/Simulink<sup>®</sup>. Έπειτα φορτώνεται το γραφικό περιβάλλον διεπαφής του λογισμικού και εμφανίζεται η παρακάτω αρχική οθόνη (εικόνα 4.43).



Εικόνα 4.43

*Η αρχική οθόνη του ADVISOR® 2002.*

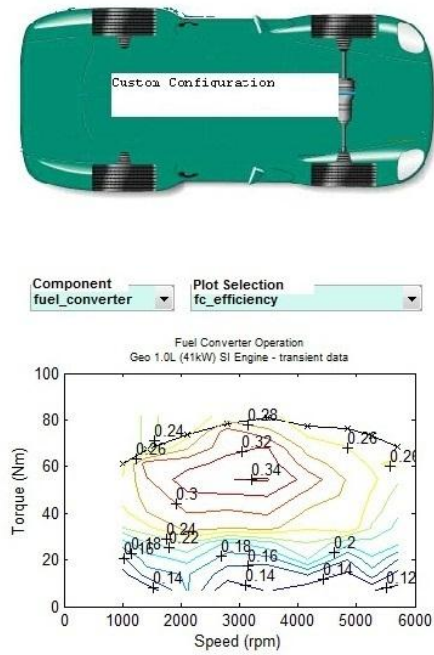
Δίνεται η δυνατότητα εκκίνησης του προγράμματος, επιλογής του συστήματος μονάδων, ανάγνωσης του αρχείου βοήθειας και των όρων χρήσης ενώ επιπλέον προσφέρεται η δυνατότητα φόρτωσης παλαιότερου αρχείου αποτελεσμάτων.

Επιλέγεται η εκκίνηση του προγράμματος ώστε να πραγματοποιηθεί η μετάβαση στην οθόνη διαμόρφωσης οχήματος (εικόνα 4.44). Όπως γίνεται φανερό δίνεται η δυνατότητα μιας πολύ ευρείας παραμετροποίησης όλων των επιμέρους μονάδων και χαρακτηριστικών αυτών σε ηλεκτρομηχανολογικό επίπεδο.

Στην συνέχεια εισάγονται όλοι οι παράμετροι του μοντέλου του υβριδικού οχήματος που διαμορφώθηκε και περιγράφηκε εκτενώς στα τρία πρώτα υποκεφάλαια αυτού του κεφαλαίου, εκτός της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου καθώς διατηρήθηκε η συμβατική Rule-Based μεθοδολογία που διαθέτει το ADVISOR®

Στην εικόνα 4.45 παρουσιάζεται το σύμφωνα με τα παραπάνω διαμορφωμένο μοντέλο.

### Vehicle Input



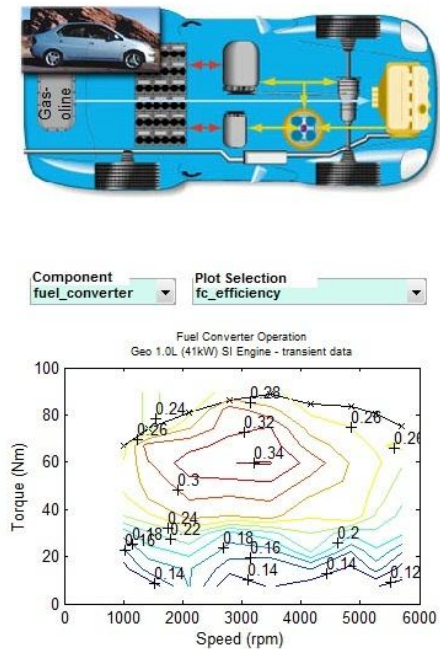
Scale Components		max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
Vehicle	VEH_SMCAR			592
Fuel Converter	FC_SI41_emis	41	0.34	131
Exhaust Aftertreat	EX_SI			11
Transmission	TX_5SPD			114
Wheel/Axle	WH_SMCAR			0
Accessory	ACC_CONV			
Powertrain Control	PTC_CONV			

Calculated. Mass: 984

Εικόνα 4.44

Οθόνη διαμόρφωσης νέου οχήματος.

### Vehicle Input



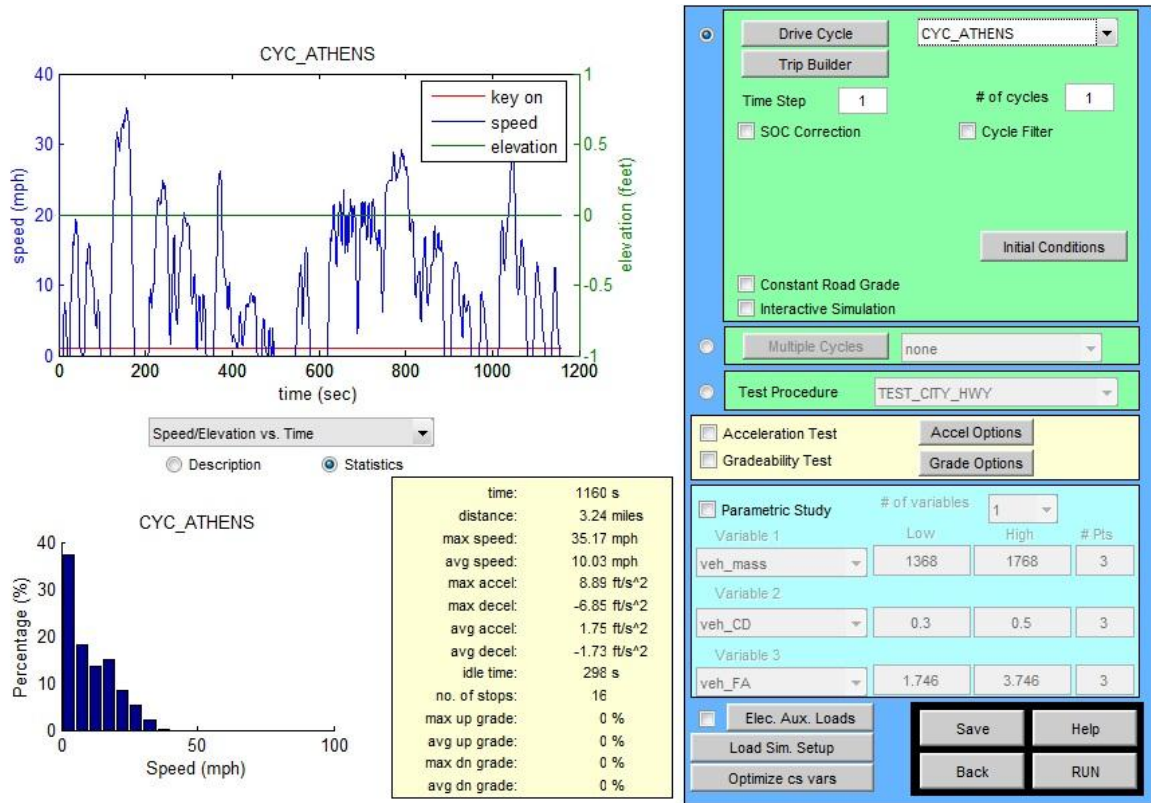
Scale Components		max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
Vehicle	VEH_SMCAR			592
Fuel Converter	FC_SI41_emis	45	0.34	142
Exhaust Aftertreat	EX_SI			12
Energy Storage	ESS_AnnexVII_SHEV_N...	30	201	108
Motor	MC_AC75	35	0.91	43
Generator	GC_ETA95	15	0.95	17
Transmission	TX_1SPD			50
Wheel/Axle	WH_SMCAR			0
Accessory	ACC_HYBRID			
Powertrain Control	PTC_SER			

Calculated. Mass: 1100

Εικόνα 4.45

Διαμόρφωση οχήματος σύμφωνα με τις προδιαγραφές του μοντέλου που διαμορφώθηκε στο MATLAB/Simulink®

Στην συνέχεια, εφόσον το όχημα έχει διαμορφωθεί, το επόμενο βήμα του προγράμματος συνίσταται στην επιλογή κύκλου οδήγησης. Η οθόνη επιλογής κύκλου οδήγησης παρουσιάζεται στην εικόνα 4.46. Για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν οι ίδιοι κύκλοι οδήγησης με αυτούς των εδαφίων 4.3.2-4.3.6.



**Εικόνα 4.46**

*Η οθόνη επιλογής κύκλου οδήγησης.*

Δίνεται η δυνατότητα πραγματοποίησης δοκιμής επιτάχυνσης καθώς και ενσωμάτωσης κλίσης στην διαδρομή. Επιπλέον δύναται να υλοποιηθεί παραμετρική μελέτη των αποτελεσμάτων, εισάγοντας μέχρι και τρεις από τις παραμέτρους που εμφανίζονται στην οθόνη διαμόρφωσης οχήματος.

Τέλος για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης αφού έχει επιλεγεί και κύκλος οδήγησης, επιλέγεται το κουμπί “RUN”. Στο επόμενο υποκεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Σε κάθε περίπτωση εμφανίζεται η ταχύτητα αναφοράς της αντίστοιχης χρονοσειράς και η ταχύτητα που είχε το όχημα, το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών του οχήματος και ροπή εξόδου του ηλεκτροκινητήρα και της ηλεκτρικής γεννήτριας. Επίσης παρουσιάζονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι (HC, CO, NO<sub>x</sub>, PM)

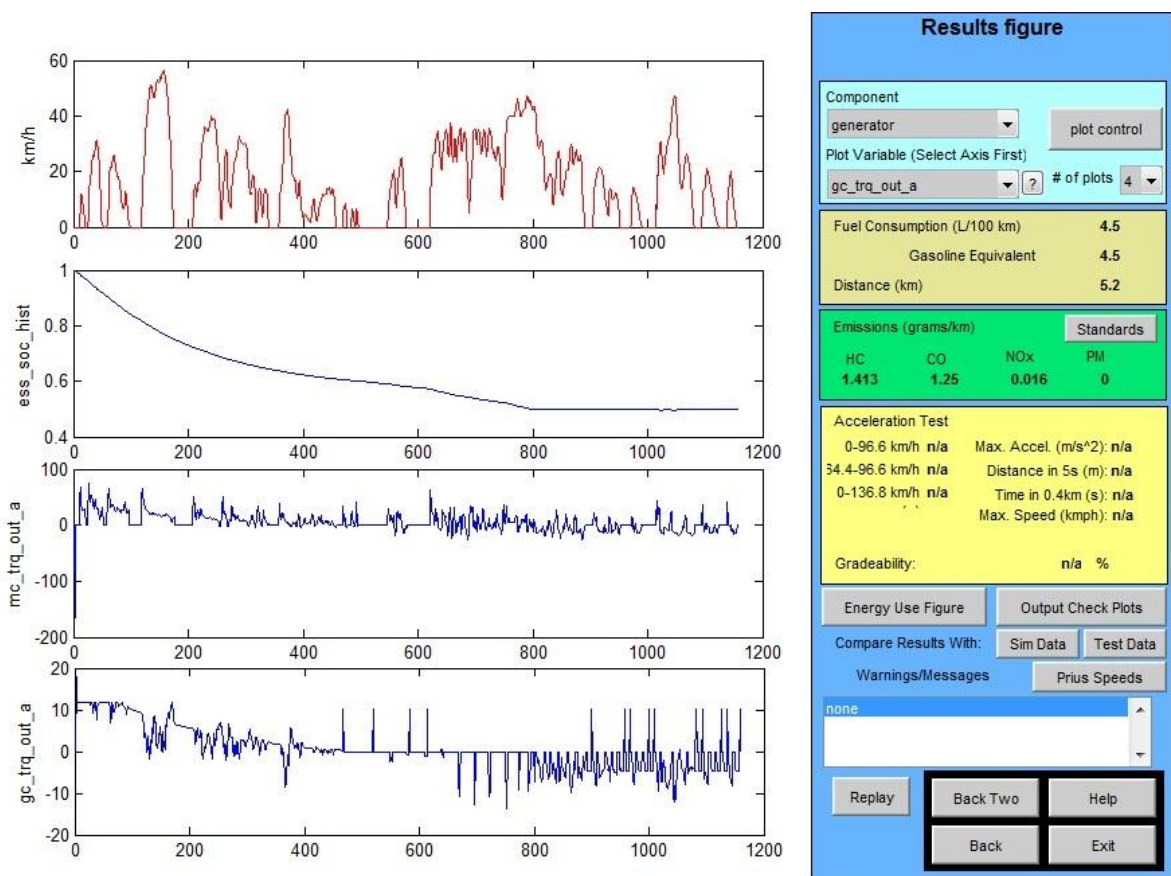
## 4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης με το λογισμικό ADVISOR

### 4.5.1 Athens Driving Cycle

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ADVISOR στα πλαίσια του Athens Driving Cycle παρατίθενται στην εικόνα 4.47

Στο αριστερό μέρος της οθόνης παρουσιάζονται ορισμένες κυματομορφές. Πιο συγκεκριμένα, με σειρά εμφάνισης από πάνω προς τα κάτω παρουσιάζονται η ταχύτητα αναφοράς μαζί με την ταχύτητα του οχήματος (παρατηρείται ότι ταυτίζονται απόλυτα), τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών καθ' όλη την διάρκεια της διαδρομής και τέλος η ροπή εξόδου τόσο του ηλεκτροκινητήρα όσο και της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Στο δεξί μέρος της οθόνης των αποτελεσμάτων, αναγράφεται η μέση κατανάλωση και η συνολική απόσταση που διήνυσε το όχημα. Κάτω από τα προηγούμενα αποτελέσματα βρίσκονται οι συνολικές εκπομπές ρύπων από το υβριδικό όχημα κατά την διάρκεια της διαδρομής.



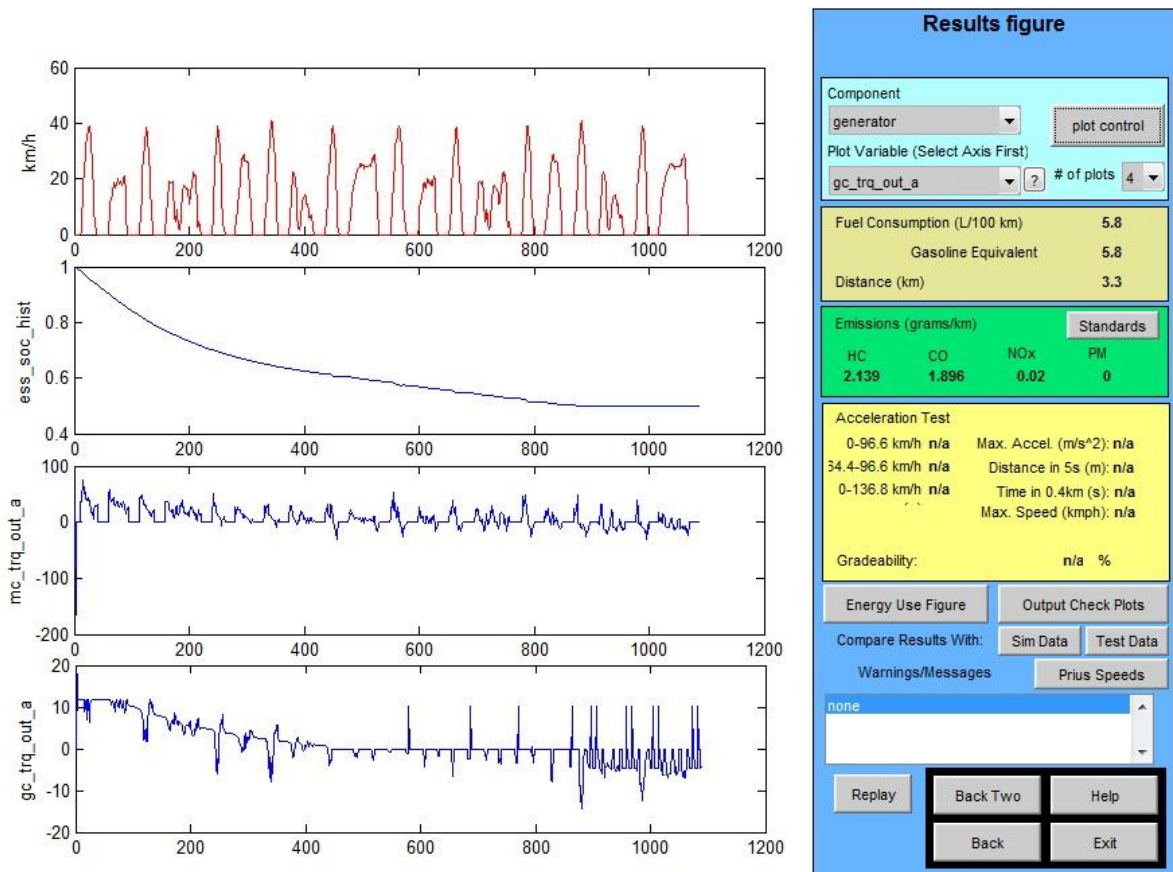
Εικόνα 4.47

Αποτελέσματα προσομοίωσης στην διαδρομή Athens Driving Cycle.

## 4.5.2 Manhattan Driving Cycle

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του λογισμικού για τον κύκλο οδήγησης του Manhattan παρουσιάζονται στην εικόνα 4.47

Στο αριστερό μέρος παρουσιάζονται οι κυματομορφές ταχύτητας, SOC, και ροπών εξόδου ενώ στα δεξιά της οθόνης των αποτελεσμάτων παρατίθεται η μέση κατανάλωση του οχήματος και οι εκπεμπόμενοι ρύποι.



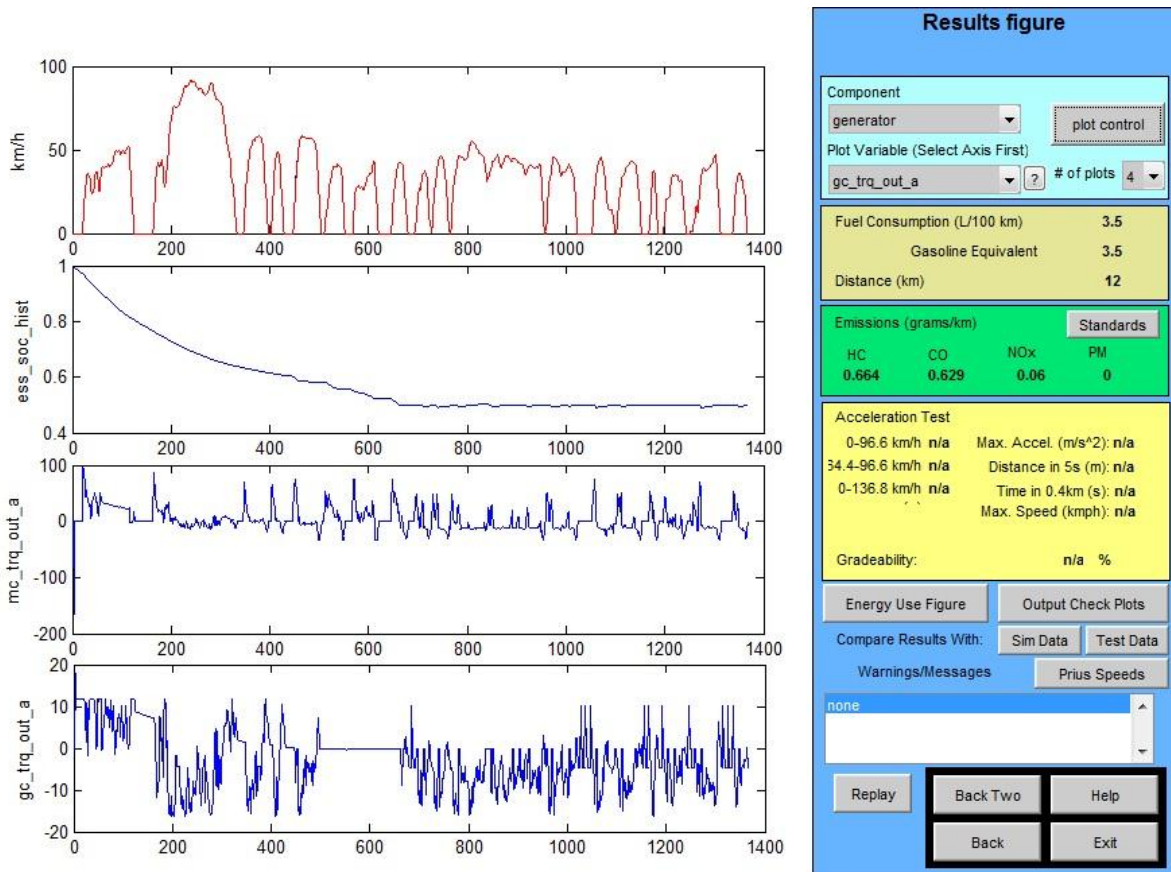
Εικόνα 4.47

Αποτελέσματα προσομοίωσης στην διαδρομή Manhattan Driving Cycle.

### 4.5.3 Urban Dynamometer Driving Schedule

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την διαδρομή UDDS συνοψίζονται στην εικόνα 4.48.

Ομοίως με τις προσομοιώσεις στα πλαίσια προηγούμενων διαδρομών, παρουσιάζονται στα αριστερά οι κυματομορφές ροπής, ταχύτητα και επιπέδου φόρτισης των μπαταριών, ενώ στα δεξιά φαίνεται η μέση κατανάλωση καυσίμου του βενζινοκινητήρα και οι ροπές εξόδου των δύο ηλεκτρικών μηχανών.



Εικόνα 4.48

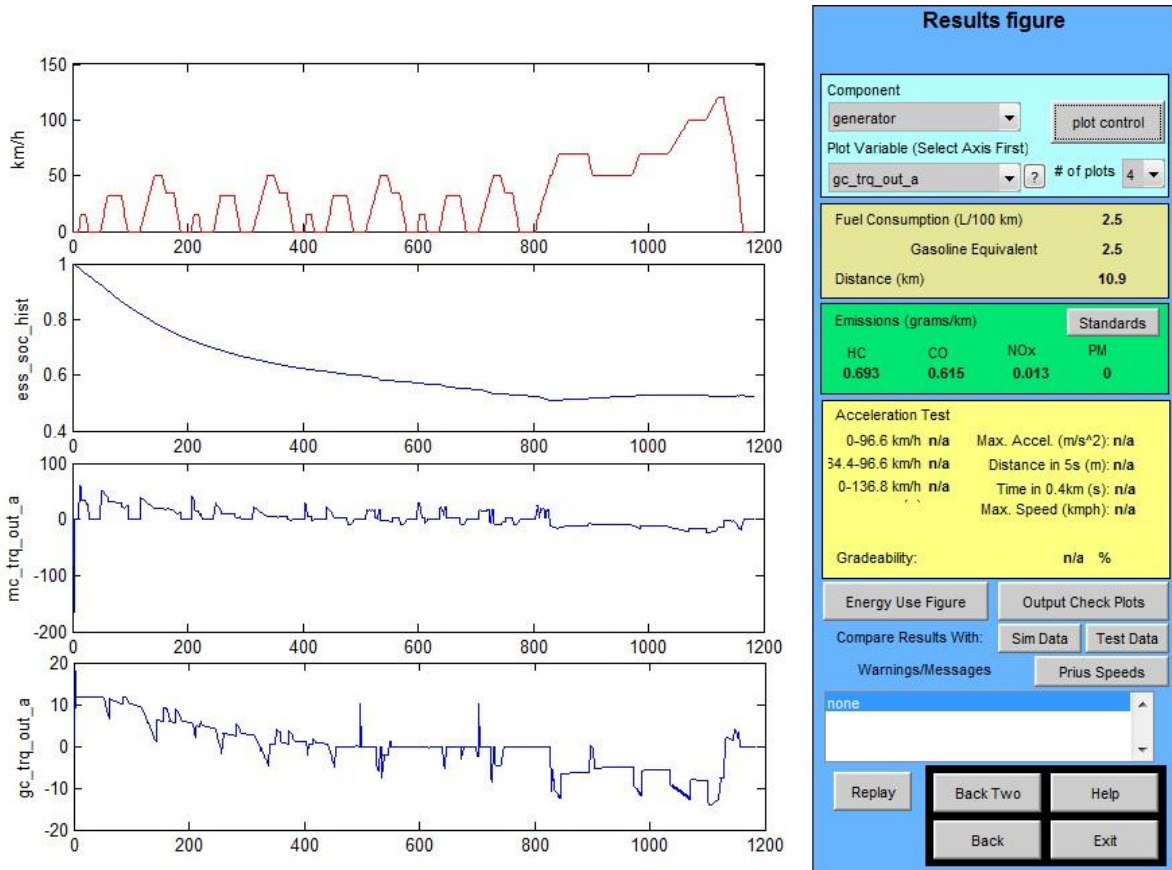
Αποτελέσματα προσομοίωσης στην διαδρομή Urban Dynamometer Driving Schedule.



#### 4.5.4 New European Driving Cycle

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την διαδρομή NEDC συνοψίζονται στην εικόνα 4.49.

Δεξιά παρατηρείται η μέση κατανάλωση που σημείωσε το όχημα μετά το πέρας της διαδρομής και οι ρύποι που απελευθερώθηκαν συνολικά μετά την περαίωση της διαδρομής. Στο αριστερό μέρος παρουσιάζονται κυματομορφές για την ροπή εξόδου των ηλεκτρικών μηχανών, τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών και την ταχύτητα του οχήματος.



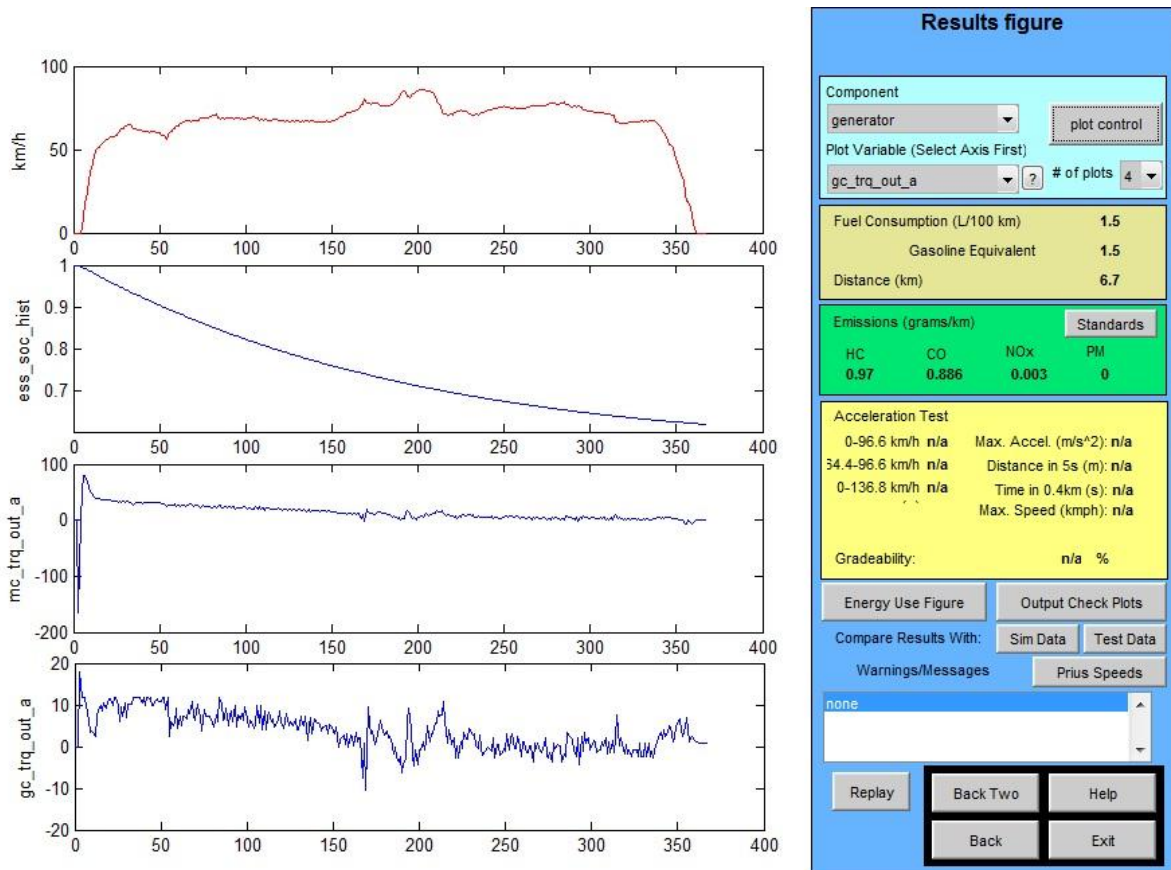
Εικόνα 4.49

Αποτελέσματα προσομοίωσης στην διαδρομή New European Driving Cycle.

#### 4.5.5 Supplemental Federal Test Procedure – US06 Highway

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ADVISOR στα πλαίσια του Supplemental Federal Test Procedure - Highway παρατίθενται στην εικόνα 4.50.

Αριστερά παρουσιάζεται, κατά αντιστοιχία με πριν, μια σειρά από κυματομορφές για την ταχύτητα, την ροπή εξόδου των ηλεκτρικών μηχανών και τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών, ενώ δεξιά φαίνεται η μέση κατανάλωση και οι ρύποι που απελευθερώθηκαν συνολικά κατά την ολοκλήρωση της διαδρομής.



Εικόνα 4.50

Αποτελέσματα προσομοίωσης στην διαδρομή Supplemental Federal Test Procedure - Highway.

## 4.6 Σχολιασμός – σύγκριση

Στον πίνακα 4.1 συνοψίζονται οι μέσες καταναλώσεις που παρουσίασαν τα δύο μοντέλα (σε Simulink® και ADVISOR) στα πλαίσια καθενός από τους πέντε κύκλους οδήγησης που χρησιμοποιήθηκαν για της ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	ADC	MDC	UDDS	NEDC	SFTP Highway
Μοντέλο Simulink®	4,171	5,556	3,904	2,479	1,419
ADVISOR®	4,5	5,8	3,5	2,5	1,5
Διαφορά %	-7,887	-4,391	+10,348	-0,847	-5,708

Πίνακας 4.1

*Συγκεντρωτικός πίνακας μέσης κατανάλωσης καυσίμου (σε L/100km), ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία προσομοίωσης και την επιλεχθείσα διαδρομή.*

Παρατηρείται πως εμφανίζονται κάποιες μικρές και δικαιολογημένες αποκλίσεις μεταξύ των καταναλώσεων των δύο μοντέλων. Ωστόσο, η ορθότητα του μοντέλου καθώς και της μεθοδολογίας ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας που αναπτύχθηκε επαληθεύεται μέσω των παραπάνω αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Simulink παρατηρείται πως εκτός της διαδρομής UDDS, έδωσε γενικά καλύτερα αποτελέσματα σε επίπεδο κατανάλωσης σε σχέση με το ADVISOR. Το γεγονός αυτό οφείλεται εν μέρει στην αποδοτική μεθοδολογία ελέγχου που αναπτύχθηκε, η οποία γενικά έκανε ήπια και αποδοτική χρήση του θερμικού κινητήρα χρησιμοποιώντας τον ηλεκτροκινητήρα στις περιπτώσεις απότομων επιταχύνσεων και μεταβατικών φαινομένων, καταστάσεις όπου ο βενζινοκινητήρας προσφέρει χαμηλή ροπή και καταναλώνει στιγμιαία μεγάλες ποσότητες καυσίμου απελευθερώνοντας μεγάλες ποσότητες ρύπων. Σύμφωνα με τον συγκεντρωτικό πίνακα 4.1 το μοντέλο που διαμορφώθηκε στο Simulink προσφέρει μειωμένη κατανάλωση από 4,4-7,9% σε αστικό κέντρο όπως αυτό της Αθήνας ή του Manhattan.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση της Διαδρομής UDDS όπου γίνεται έντονη χρήση του θερμικού κινητήρα, σημειώθηκε κατανάλωση υψηλότερη κατά 10,3% από το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Simulink καθώς πραγματοποιήθηκε ανορθολογική φόρτιση των μπαταριών. Αναφορά σε αυτό το θέμα γίνεται στο υποκεφάλαιο των προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση.

Ένας λόγος ακόμα που συνεισφέρει στις παραπάνω διαφοροποιημένες τιμές καταναλώσεων συνίσταται στην μεγαλύτερη λεπτομέρεια του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Simulink κυρίως σε ηλεκτρικό επίπεδο, καθώς το ADVISOR χρησιμοποιεί μοντέλα μέσης τιμής [89] και δεν πραγματοποιείται εκτενής μοντελοποίηση του εσωτερικού των ηλεκτρικών μονάδων που απαρτίζουν το υβριδικό όχημα.



## 5 Συμπεράσματα

---

### 5.1 Συμπεράσματα

Κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε αλγόριθμος ελέγχου και ενεργειακής διαχείρισης, ο οποίος ενσωματώθηκε στην μονάδα ελέγχου του μοντέλου υβριδικού οχήματος που διαμορφώθηκε σε περιβάλλον Simulink®. Η ορθότητα της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και γενικότερα του διαμορφωθέντος μοντέλου επιβεβαιώθηκε τόσο μέσω προσομοιώσεων με την χρήση πρότυπων κύκλων οδήγησης όσο και με την χρήση του βιομηχανικού λογισμικού ADVISOR. Σημειώνεται πώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος που στοχεύει στην αποδοτική λειτουργία του θερμικού κινητήρα, απεδείχθη ιδιαίτερα αποτελεσματικός στα πλαίσια της χρήσης υβριδικού οχήματος σε αστικό περιβάλλον με πολυάριθμες στάσεις και εκκινήσεις όπου εμφάνισε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου.

Ιδιαίτερα κατά την αξιοποίηση του μοντέλου που αναπτύχθηκε προέκυψαν τα παρακάτω στοιχεία:

- Ακόμα και σε περιπτώσεις διαδρομών που περιλαμβάνουν έντονα μεταβατικά φαινόμενα η τάση τόσο στις μπαταρίες όσο και στον DC ζυγό επέδειξε σταθερότητα.
- Σε καθεμία από τις διαδρομές που χρησιμοποιήθηκαν το όχημα δεν αντιμετώπισε κάποια δυσκολία στο να ακολουθήσει με ακρίβεια την ταχύτητα αναφοράς.
- Έγινε αποδοτική χρήση του ηλεκτροκινητήρα, καθώς χρησιμοποιήθηκε κατ' αποκλειστικότητα στις εκκινήσεις του οχήματος προσφέροντας υψηλή ροπή, μηδενική κατανάλωση καυσίμου και μηδενικές εκπομπές ρύπων. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου σε αστικό περιβάλλον οδήγησης.
- Σε περιπτώσεις αστικών διαδρομών πραγματοποιήθηκε περιορισμένη χρήση της μηχανής εσωτερικής καύσης, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων σε περιβάλλοντα πόλεις όπου οι κανονισμοί σχετικά με τους εκπεμπόμενους ρύπους των οχημάτων.
- Η παραμετροποίηση του αλγορίθμου ελέγχου είναι εύκολη κατά συνέπεια, δύναται να προσαρμοστεί στα μέτρα ενός άλλου οχήματος με την απλή αλλαγή των τιμών ορισμένων μεταβλητών.
- Στην ειδική διαδρομή της Αθήνας ο προτεινόμενος αλγόριθμος εμφάνισε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου κατά 7,9% σε σχέση με το βιομηχανικό λογισμικό, ενώ στην αντίστοιχη διαδρομή του Manhattan η εξοικονόμηση καυσίμου άγγιξε το 4,3%. Μείωση στην κατανάλωση καυσίμου κατά 5,7% παρατηρήθηκε ωστόσο και στην ειδική διαδρομή που προσομοιώνει συνθήκες οδήγησης σε αυτοκινητόδρομο.
- Παρατηρήθηκε ότι το όχημα δύναται να διανύσει μια διαδρομή 24km στην Αθήνα, καταναλώνοντας μόλις ένα λίτρο καυσίμου και ανακτώντας περίπου 250Wh/km μέσω

της αναγεννητικής πέδησης, διατηρώντας παράλληλα το πλήθος των φορτίσεων των μπαταριών σε χαμηλά επίπεδα (περίπου 1 φόρτιση/2km) και κατ' επέκταση διαφυλάσσοντας την διάρκεια ζωής των μπαταριών.

- Η μεγαλύτερη διακύμανση στην τάση των μπαταριών άγγιξε το 11% της ονομαστικής τους τάσης και δεν διήρκησε παραπάνω από 2s. Ομοίως και η τάση στον DC ζυγό, στην απαιτητική διαδρομή του Manhattan, δεν εμφάνισε παραπάνω από 8 αισθητές διακυμάνσεις της τάξης του 9% της ονομαστικής τάσης και διάρκειας 1,5-2s, στο σύνολο των 3,3km που διανύθηκαν.
- Στην τυπική αστική διαδρομή UDDS παρατηρήθηκε στιγμιαία έντονη χρήση του θερμικού κινητήρα μόλις 1 φορά/500m διαδρομής, ενώ ο ηλεκτροκινητήρας καθ' όλη την διάρκεια της διαδρομής προσέφερε την μέγιστη ροπή του των 320Nm.

## 5.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Τα σημεία καινοτόμου συνεισφοράς της διπλωματικής εργασίας εντοπίζονται στα παρακάτω θέματα:

- Διαμορφώθηκε **νέα μεθοδολογία ελέγχου και ενεργειακής διαχείρισης** (ανάπτυξη αλγορίθμου) υβριδικού οχήματος κατάλληλου για χρήση σε αστικό κέντρο όπως την Αθήνα, η οποία μέσω προσομοιώσεων σε πρότυπες διαδρομές πόλης προσέφερε έως και 7,9% μειωμένη κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με βιομηχανικό λογισμικό.
- Αναπτύχθηκε **λεπτομερές μοντέλο υβριδικού οχήματος σειριακής/παράλληλης διαμόρφωσης**, τόσο σε ηλεκτρομηχανολογικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο ελέγχου, σε περιβάλλον Simulink<sup>®</sup>/Matlab<sup>®</sup>. Το μοντέλο είναι γρήγορο καθώς μια προσομοίωση διάρκειας 1200s εκτελείται σε περίπου 3min σε συμβατικό τετραπύρηνο προσωπικό υπολογιστή, ενώ προσφέρει αποτελέσματα που αφορούν την ηλεκτρομαγνητική ροπή και την ταχύτητα περιστροφής των ηλεκτρικών μηχανών, τις εντάσεις ηλεκτρικών ρευμάτων του ηλεκτροκινητήρα και της ηλεκτρικής γεννήτριας, το ρεύμα εκφόρτισης των μπαταριών, τις τάσεις στα άκρα των μπαταριών, τον μετατροπέα ισχύος και στον DC ζυγό την μέση και συνολική κατανάλωση καυσίμου κτλ.
- Η ορθότητα του μοντέλου και της προτεινομένης μεθοδολογίας ελέγχου **επιβεβαιώθηκαν** με τη χρήση του **βιομηχανικού λογισμικού ADVISOR**. Το μοντέλο προσφέρει αποτελέσματα όπως την τάση στο ζυγό ΣΡ, τις μπαταρίες και την έξοδο του μετατροπέα, την τιμή του γκαζιού που του θερμικού κινητήρα καθώς και το ρεύμα εκφόρτισης των μπαταριών που το βιομηχανικό λογισμικό αδυνατεί να προσφέρει.

## 5.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Κρίνεται σκόπιμο να επιχειρηθεί **εξέλιξη του προτεινόμενου αλγορίθμου ελέγχου**, ώστε να πραγματοποιεί πιο αποδοτική χρήση των μπαταριών σε μη αστικό περιβάλλον **ελαχιστοποιώντας των αριθμό φορτίσεων/εκφορτίσεων**. Παρατηρήθηκε ότι σε πρότυπη διαδρομή που πραγματοποιήθηκε έντονη χρήση του θερμικού κινητήρα, έγιναν 20 φορτίσεις μέσα σε μια διαδρομή περίπου 10' με αποτέλεσμα το κατάσταση φόρτισης (SOC) των μπαταριών να μην πέσει κάτω από το 96%, ενώ το βιομηχανικό λογισμικό έκανε ομαλή εκφόρτιση των μπαταριών μέχρι και το 55% της χωρητικότητάς τους όπου και τελείωσε η πρότυπη διαδρομή.
- Εκτός από τον ελεγκτή θα μπορούσε να αναπτυχθεί **επικουρικό σύστημα αποθήκευσης** που να περιλαμβάνει συστοιχία **υπερπυκνωτών**. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να βελτιωθεί συνολικά η απόδοση του οχήματος, η ηλεκτρική αυτονομία του (AER) και το κόστος χρήσης του. Η συστοιχία υπερπυκνωτών θα μπορούσε να ελεγχθεί ώστε να διαχειρίζεται τα έντονα μεταβατικά φαινόμενα εκμεταλλευόμενη την μεγάλη πυκνότητα ισχύος της ενώ οι μπαταρίες θα μπορούσαν να περιοριστούν στην κάλυψη λιγότερο έντονων φορτίων ώστε να ελαχιστοποιηθεί το πλήθος φορτίσεων/εκφορτίσεων και κατ' επέκταση το κόστος χρήσης τους.

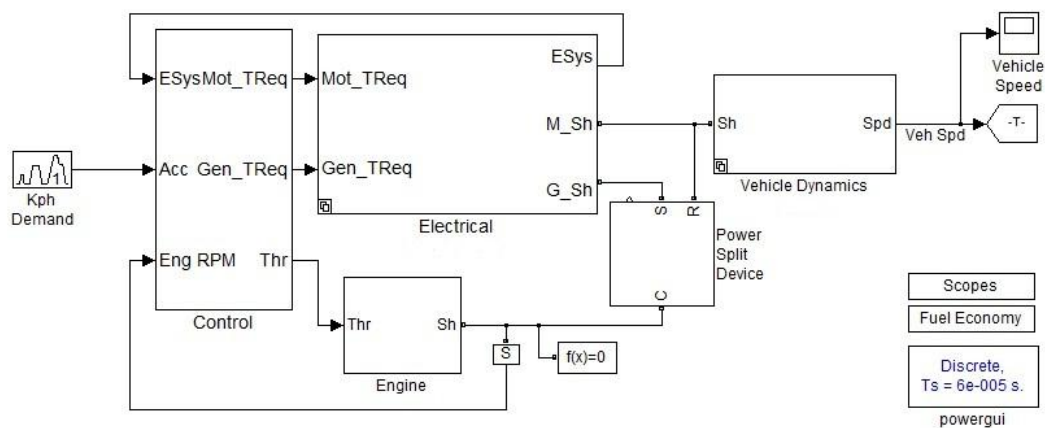




# Παράρτημα : Μοντελοποίηση σε περιβάλλον Matlab/Simulink<sup>®</sup>

## ➤ Γενικά

Το σύνολο των επιμέρους μονάδων που συνθέτουν το μοντέλο που διαμορφώθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα Π.1.



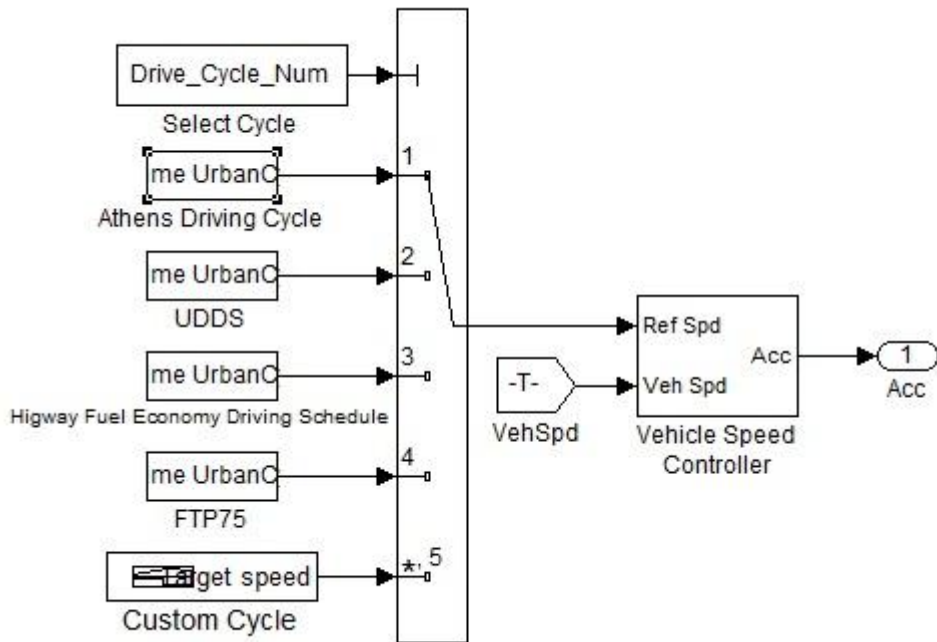
Σχήμα Π.1

Το μοντέλο του υβριδικού οχήματος που διαμορφώθηκε σε περιβάλλον Simulink/Matlab<sup>®</sup>

## ➤ Προσαρμογές ταχύτητας

Η αριστερότερη βαθμίδα του μοντέλου είναι ο προσαρμογές ταχύτητας. Σε αυτόν εισάγεται ο κύκλος οδήγησης που απαιτείται να ακολουθήσει το όχημα. Η εσωτερική του δομή παρουσιάζεται στο σχήμα Π.2.

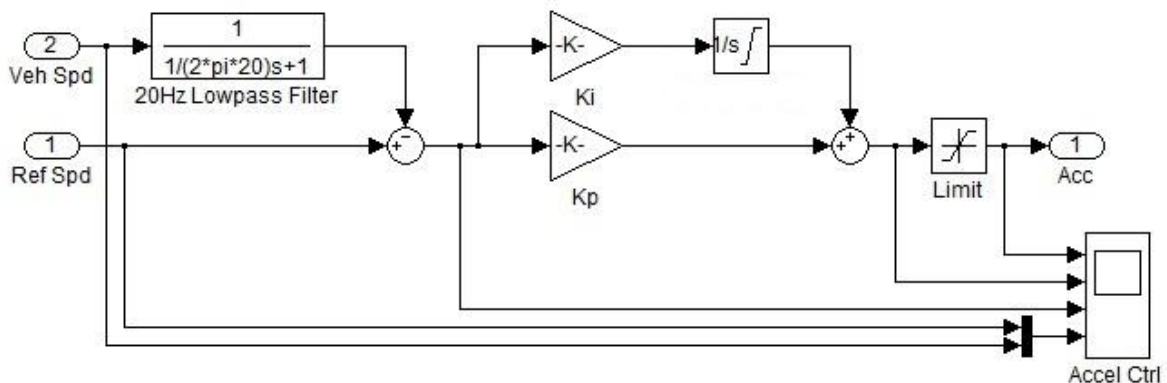
Χρησιμοποιήθηκε ένας πενταθέσιος επιλογέας τύπου multiport switch από την βιβλιοθήκη του Simulink, ώστε να γίνεται άμεσα και εύκολα η επιλογή ανάμεσα σε a priori εισηγμένους κύκλους οδήγησης. Επιπρόσθετα επιλέγοντας το τελευταίο block του multiport switch που αντιστοιχεί στον κατασκευαστή σήματος (signal builder) δίνεται η δυνατότητα άμεσης κατασκευής ενός απλού κύκλου οδήγησης. Τα σημεία ταχύτητας αυτού καθώς και η ανά πάσα στιγμή ταχύτητα του οχήματος αποτελούν τις εισόδους του ελεγκτή ταχύτητας του οποίου η εσωτερική δομή φαίνεται στο σχήμα Π.3.



Σχήμα Π.2

Ο προσαρμογέας ταχύτητας του υβριδικού οχήματος

Η ταχύτητα που λαμβάνεται από τον κύκλο οδήγησης συνιστά την ταχύτητα αναφοράς (Ref Spd) και η ταχύτητα που κατέχει το όχημα (Veh Spd) είναι η πραγματική ταχύτητα. Πραγματοποιείται σύγκριση των δύο αυτών ταχυτήτων του οχήματος και εν μέσω ενός κατάλληλα ρυθμισμένου PI ελεγκτή δίνεται εντολή για επιτάχυνση (Acc) η τιμή της οποίας είναι κανονικοποιημένη στο [0,1] με 0 την ελάχιστη και 1 την μέγιστη τιμή. Έτσι επιτυγχάνεται έγκαιρη προσαρμογή της πραγματικής ταχύτητας του οχήματος στην επιθυμητή (ταχύτητα αναφοράς). Σημειώνεται πως προ της σύγκρισης των δύο ταχυτήτων, προηγείται μια εξομάλυνση της τιμής της πραγματικής ταχύτητας μέσω ενός βαθυπερατού φίλτρου.

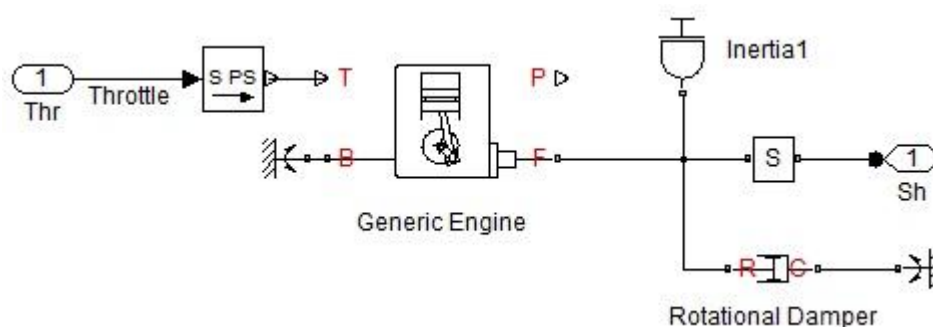


Σχήμα Π.3

Εσωτερική δομή του ελεγκτή ταχύτητας του οχήματος.

➤ Μηχανή εσωτερικής καύσης

Το μοντέλο της μηχανής εσωτερικής καύσης που διαμορφώθηκε, παρουσιάζεται στο σχήμα Π.4



Σχήμα Π.4

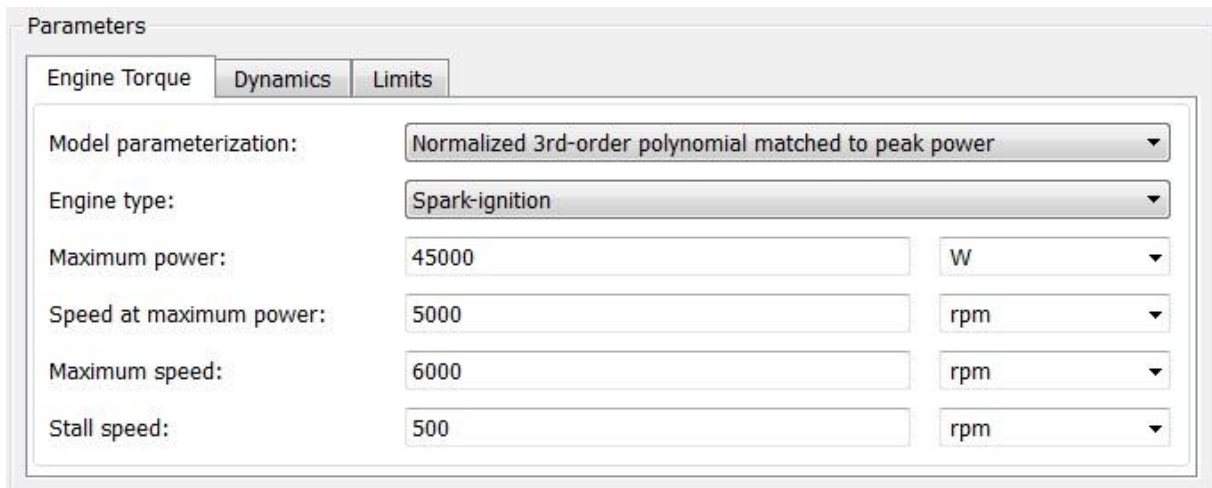
Το μοντέλο της μηχανής εσωτερικής καύσης

Το block της MEK λαμβάνει σαν είσοδο την εντολή για γκάζι (throttle) από την μονάδα ελέγχου. Το απαιτούμενο γκάζι εξέρχεται από την μονάδα ελέγχου κανονικοποιημένο, σαν ένας καθαρός αριθμός που ανήκει στο διάστημα  $[0,1]$ . Η τιμή 1 αντιστοιχεί σε πλήρες γκάζι ενώ η τιμή 0 σε μηδενικό γκάζι. Στην συνέχεια η τιμή αυτή εισέρχεται σε έναν μετατροπέα Simulink to Physical System (σχήμα 4.5) ώστε να δομηθεί το εναπομείναν κομμάτι του μοντέλου με την χρήση φυσικών συστημάτων, στην περίπτωση αυτή μέσω μηχανολογικών εξαρτημάτων.

Έπειτα χρησιμοποιείται το γενικευμένο μοντέλο μηχανής εσωτερικής καύσης από την βιβλιοθήκη SimDriveline<sup>®</sup> του Simulink<sup>®</sup> το οποίο παραμετροποιείται σύμφωνα με τις ανάγκες του υβριδικού οχήματος. Ο τύπος της MEK που επιλέχθηκε είναι βενζινοκινητήρας ισχύος 45kW με τις υπόλοιπες παραμέτρους του να παρουσιάζονται στην εικόνα 4.1

Η είσοδος T της MEK προσδιορίζει την απαιτούμενη από αυτήν ροπή ως ποσοστό της μέγιστης ροπής της (η τιμή 1 αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή). Στην έξοδο P δύναται να μετρηθεί η αποδιδόμενη ισχύς εξόδου της MEK ενώ οι συνδέσεις B και F αφορούν το μπλοκ του κινητήρα και τον άξονα του αντίστοιχα. Η κίνηση μεταφέρεται προς τον άξονα της MEK και η σύνδεση B σταθεροποιείται (πακτώνεται), γειώνεται δηλαδή μηχανολογικά μέσω του block mechanical rotational reference της βιβλιοθήκης Simscape<sup>®</sup>. Κατά την απόδοση ισχύος στον άξονα υπάρχουν μηχανολογικές απώλειες λόγω της αδράνειας του άξονα (Inertia1) που έχουν ληφθεί ίσες με  $0,25kg.m^2$  και τριβής κατά την περιστροφή (Rotational Damper – από βιβλιοθήκη Simscape<sup>®</sup>) που ελήφθησαν ίσες με  $0,21 \frac{Nm}{rad/s}$ .

Σημειώνεται πως εάν η ταχύτητα περιστροφής πέσει κάτω από την τιμή του ρελαντί των 500rpm (stall speed) ή αν περάσει την μέγιστη ταχύτητα των 6000rpm (maximum speed), τότε σταματάει να προσφέρεται ροπή στον άξονα. Προτού εξέλθει η ισχύς από τον βενζινοκινητήρα πραγματοποιείται μετατροπή των μηχανολογικών μεγεθών σε μαθηματικές σχέσεις μέσα στο S block για την λήψη ορισμένων μετρήσεων (σχήμα 4.4).

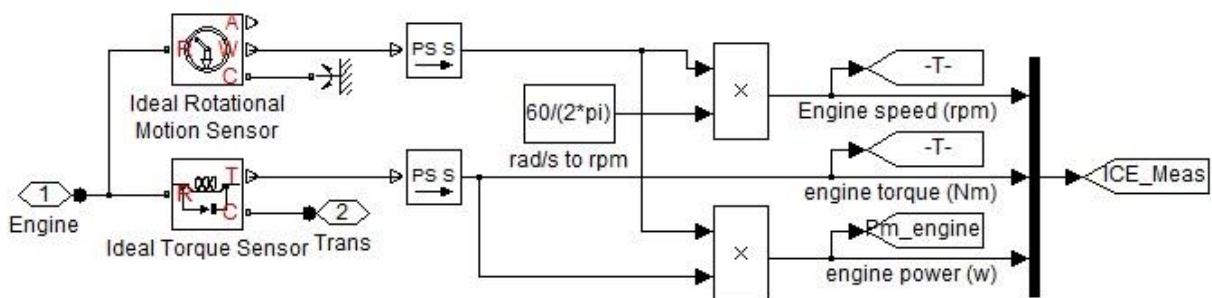


**Εικόνα 4.1**

*Οι παράμετροι του βενζινοκινητήρα*

Το φυσικό σήμα από την ΜΕΚ από δύο αισθητήρια όργανα (Simscape<sup>®</sup>). Από το ένα λαμβάνεται η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του θερμικού κινητήρα σε rad/s και από το άλλο λαμβάνεται η ροπή σε Nm. Μέσα από blocks Physical System to Simulink ( $PS \rightarrow S$ ) συνεχίζεται η δόμηση του μοντέλου σαν συμβατικό μαθηματικό μοντέλο Simulink και όχι φυσικό σύστημα. Η ισχύς υπολογίζεται από το γινόμενο γωνιακής ταχύτητας (rad/s) και ροπής καθώς ισχύει  $P = \tau\omega$ , ενώ η ταχύτητα περιστροφής μετατρέπεται σε ΣΑΛ από rad/s πολλαπλασιάζοντας με το  $\frac{60}{2\pi}$ .

Υπογραμμίζεται πως μετάβαση από φυσικό σύστημα σε Simulink<sup>®</sup> έγινε μόνο για την λήψη ορισμένων μετρήσεων από το θερμικό κινητήρα, καθώς το σήμα εξακολουθεί να βρίσκεται υπό φυσική μορφή ώστε να συνεχίσει την πορεία του προς το σύστημα διαίρεσης ισχύος (power split device) το οποίο αναλύεται στο επόμενο εδάφιο.



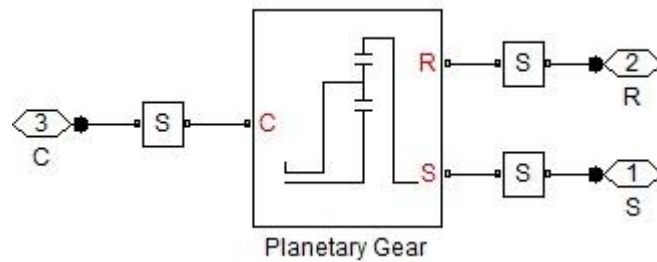
**Σχήμα 4.4**

*Εσωτερική δομή του S block για την λήψη μετρήσεων ροπής ταχύτητας και ισχύος*

➤ Σύστημα διαχωρισμού ισχύος

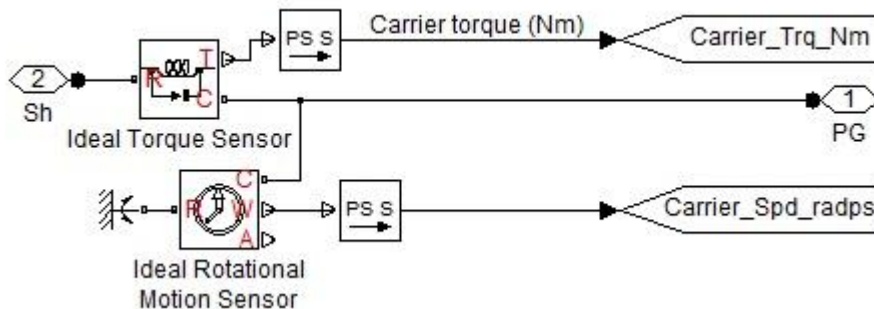
Η διαμόρφωση της βαθμίδας διαίρεσης ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα Π.5.

Με την χρήση αισθητήρων ροπής και γωνιακής ταχύτητας τοποθετημένους στα S blocks (το εσωτερικό τους φαίνεται στα σχήματα Π.6, Π.7 και Π.8) λαμβάνονται μετρήσεις ροπής και ταχύτητας τόσο στην είσοδο (προσφερόμενη ροπή και ταχύτητα από MEK προ απωλειών πλανητικού συστήματος) όσο και στις εξόδους R και S της βαθμίδας (αποδιδόμενη ροπή και ταχύτητα στο σύστημα μετάδοσης κίνησης και γεννήτρια). Η μορφή τους είναι αντίστοιχη του σχήματος Π.4



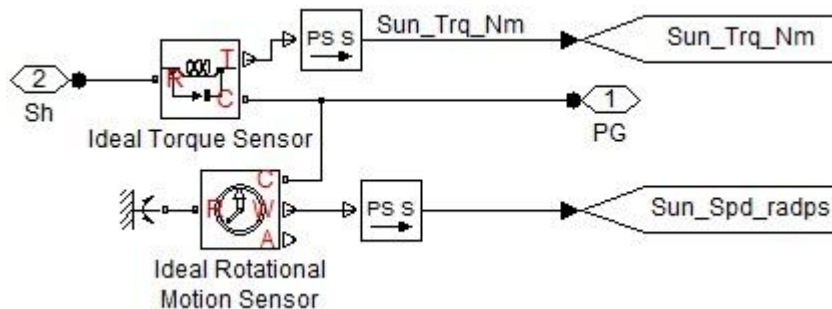
Σχήμα Π.5

Εσωτερική δομή της βαθμίδας διαίρεσης ισχύος (Power Split Device).



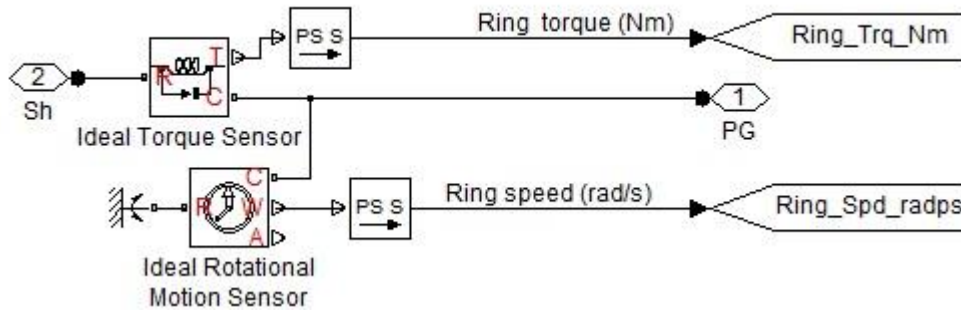
Σχήμα Π.6

Μετρήσεις ροπής και γωνιακής ταχύτητας στην είσοδο C του πλανητικού συστήματος.



Σχήμα Π.7

Μετρήσεις ροπής και γωνιακής ταχύτητας στην έξοδο S του πλανητικού συστήματος.



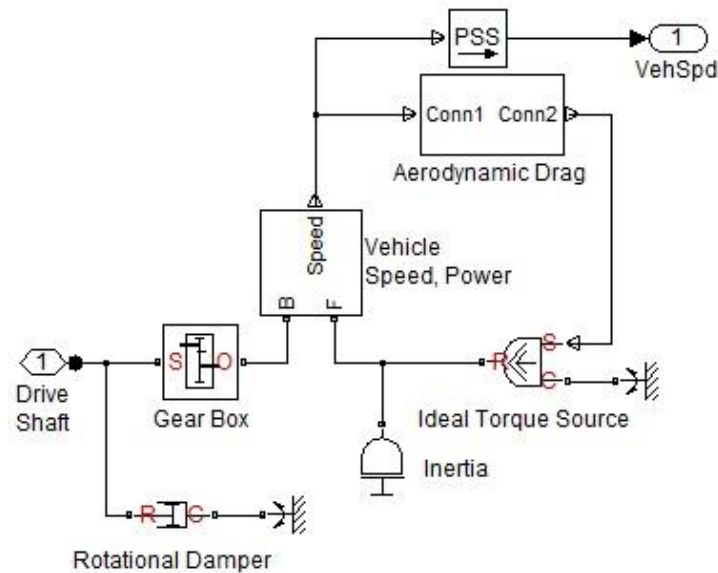
**Σχήμα Π.8**

*Μετρήσεις ροπής και γωνιακής ταχύτητας στην έξοδο R του πλανητικού συστήματος.*

Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο planetary gear της βιβλιοθήκης Simscape® που φαίνεται και στο σχήμα Π.5 και σε αυτό συμπεριλήφθησαν απώλειες στην μεταφερόμενη ροπή και ταχύτητα υπό μορφή τριβών, μεταξύ γραναζιών Sun-Planet και Ring-Planet της τάξης του 4% και 2% αντίστοιχα.

➤ *Αεροδυναμική*

Στο σχήμα Π.9 παρουσιάζεται το εσωτερικό το block που περιέχει το σύνολο των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του οχήματος.

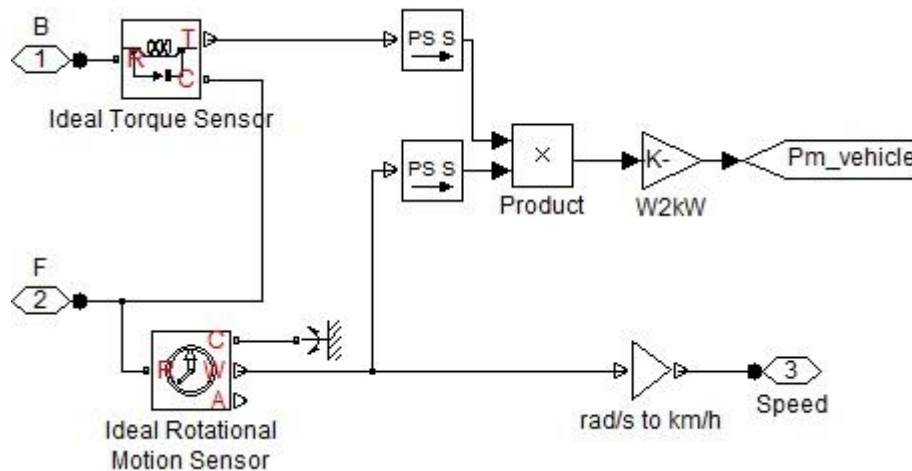


**Σχήμα Π.9**

*Μοντελοποίηση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του οχήματος.*

Η προσφερόμενη ροπή και ταχύτητα προς το σύστημα μετάδοσης κίνησης μεταβιβάζονται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων, οι απώλειες τριβών του οποίου ελήφθησαν ίσες με  $0,001 \frac{Nm}{rad/s}$ . Πρόκειται για ένα απλό κιβώτιο σταθερής αναλογίας (gear ratio) και ίσης με 5. Κατά συνέπεια η ταχύτητα στην έξοδο του υποπενταπλασιάζεται και η απόλυτη τιμή της ροπής πενταπλασιάζεται.

$$\begin{aligned} |\tau_O| &= n_{gear\_ratio} \cdot |\tau_S| \\ \omega_S &= n_{gear\_ratio} \cdot \omega_O \end{aligned} \quad (4.2)$$



Σχήμα Π.10

Υπολογισμός ταχύτητας και ισχύος.

Λαμβάνεται η ροπή και η γωνιακή ταχύτητα από τους αντίστοιχους αισθητήρες και εν συνεχεία μετατρέπονται σε μορφή Simulink® εν μέσω μετατροπέα. Το γινόμενο ροπής και γωνιακής ταχύτητας αποδίδει την μηχανική ισχύ του οχήματος η οποία εκφράζεται σε kW μέσω ενός πολλαπλασιαστή με κέρδος 1/1000. Επίσης δεδομένης ακτίνας του τροχού ίσης με  $r_w = 0,3m$ , η μετατροπή της γωνιακής ταχύτητας σε γραμμική εκφρασμένη σε km/h γίνεται μέσω του πολλαπλασιασμού της με τον παράγοντα

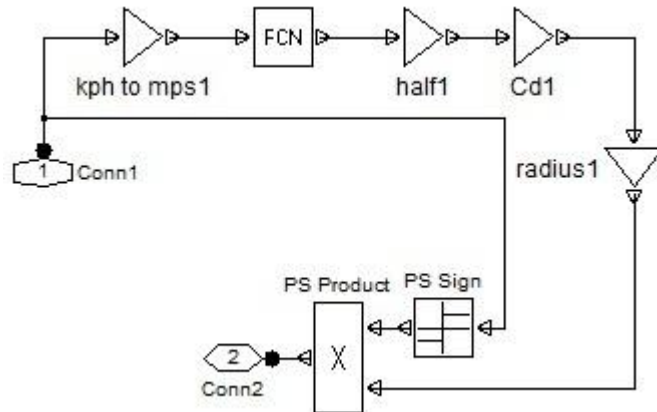
$$\frac{0,3m/rad}{1000m/km} = 0,3 \cdot 3,6 \frac{s}{rad} \cdot \frac{km}{h} = 1,08 \frac{s}{rad} \cdot \frac{km}{h} \quad (\Sigma.1)$$

$$3600 \frac{s}{h}$$

Στην συνέχεια λαμβάνεται υπόψη ο αεροδυναμικός συντελεστής  $c_D$ . Η αντιτιθέμενη ροπή στην κίνηση του οχήματος λόγω αεροδυναμικού συντελεστή προσδιορίζεται μέσω της σχέσης

$$\tau_D = -\frac{1}{2} c_D \rho u^2 r_w A \quad (\Sigma.2)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα η οποία ελήφθη ίση με  $1,125 \frac{kg}{m^3}$ , και  $A$  η μετωπική επιφάνεια του οχήματος ίση με  $2,16m^2$ . Ο  $c_D$  θεωρήθηκε ίσος με 0,3, ενώ στο μοντέλο το γινόμενο  $c_D\rho A$  υπολογίστηκε σαν κέρδος του πολλαπλασιαστή Cd1.



**Σχήμα Π.11**

*Αεροδυναμικές απώλειες.*

Μετά το block υπολογισμού ταχύτητας και ισχύος δημιουργείται μια ανάδραση η οποία ανά πάσα στιγμή μειώνει την ταχύτητα του οχήματος λόγω αεροδυναμικών απωλειών και της αδράνειας του οχήματος (Inertia). Η τελευταία ισούται με το άθροισμα της αδράνειας του κάθε τροχού συν την αδράνεια της υπόλοιπης μάζας του οχήματος. Η αδράνεια του κάθε τροχού έχει ληφθεί ίση με  $i_w = 0,1kg.m^2$  και η μάζα του οχήματος θεωρήθηκε ίση με 1200kg.

#### ➤ Μπαταρίες

Επιλέχθηκε και παραμετροποιήθηκε κατάλληλα μοντέλο μπαταριών που περιλαμβάνεται στην βιβλιοθήκη SimPowerSystems® του Simulink®. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την φόρτιση και την εκφόρτισή τους καθώς και το δυναμικό μοντέλο παρουσιάζονται στο εδάφιο 4.1.7. Τα πρόσθετα χαρακτηριστικά των μπαταριών που λήφθηκαν υπόψη κατά την μοντελοποίηση παρουσιάζονται στην εικόνα Π.1



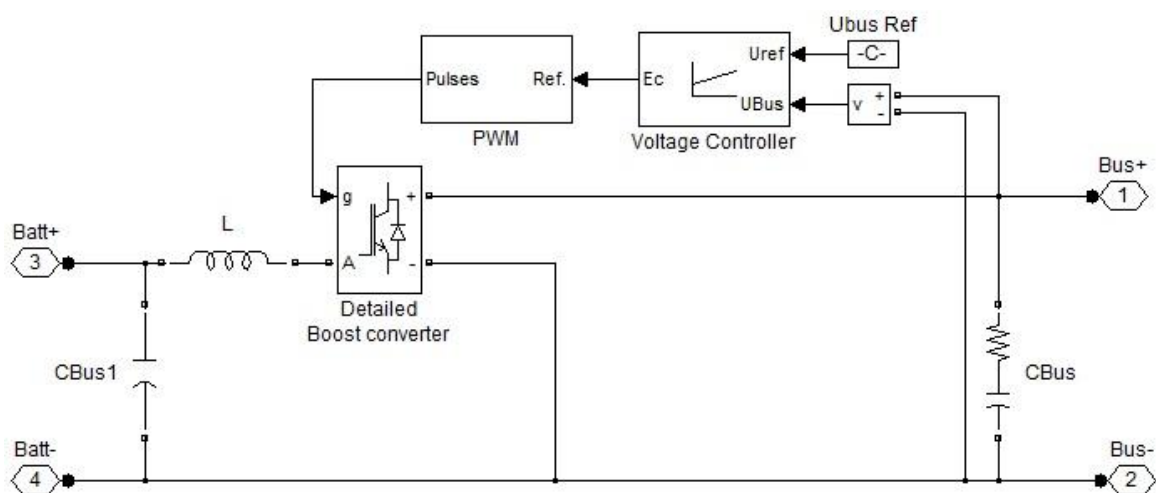
Parameters	View Discharge Characteristics	Battery Dynamics
Battery type	Nickel-Metal-Hydride	
Nominal Voltage (V)	200	
Rated Capacity (Ah)	8.1	
Initial State-Of-Charge (%)	100	
<input checked="" type="checkbox"/> Use parameters based on Battery type and nominal values		
Maximum Capacity (Ah)	8.7231	
Fully Charged Voltage (V)	235.5932	
Nominal Discharge Current (A)	1.62	
Internal Resistance (Ohms)	0.24691	
Capacity (Ah) @ Nominal Voltage	7.7885	
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[216.9492 1.62]	

**Εικόνα Π.1**

*Τα χαρακτηριστικά των μπαταριών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση.*

➤ *DC-DC μετατροπέας*

Το εσωτερικό του block του DC/DC converter παρουσιάζεται στο σχήμα Π.12

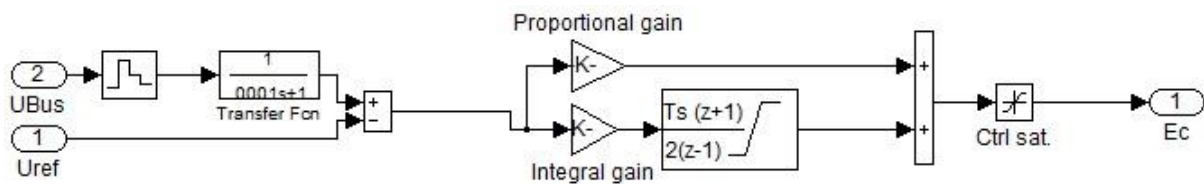


**Σχήμα Π.12**

*Το μοντέλο του μετατροπέα ισχύος.*

Ο πυκνωτής εισόδου έχει χωρητικότητα  $0,28mF$  ενώ το πηνίο ανύψωσης έχει αυτεπαγωγή  $0,37mH$ . Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Detailed Boost converter της βιβλιοθήκης SimPowerSystems®.

Στην πύλη των IGBT πραγματοποιείται ροή παλμών για την οδήγησή τους, οι οποίοι προκύπτουν έπειτα από διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation). Στις εισόδους του Voltage Controller εισέρχεται η ανά πάσα στιγμή ανυψωμένη τάση εξόδου και η επιθυμητή τάση εξόδου των 500V. Ο Voltage Controller συνίσταται σε έναν PI ελεγκτή κατάλληλα ρυθμισμένο ώστε η έξοδος του να ρυθμίζει τους παραγόμενους από το PWM παλμούς οδήγησης με σκοπό την ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ τάσης εξόδου ( $U_{bus}$ ) και της τάσης αναφοράς ( $U_{ref}$ ) των 500V (σχήμα Π.13).

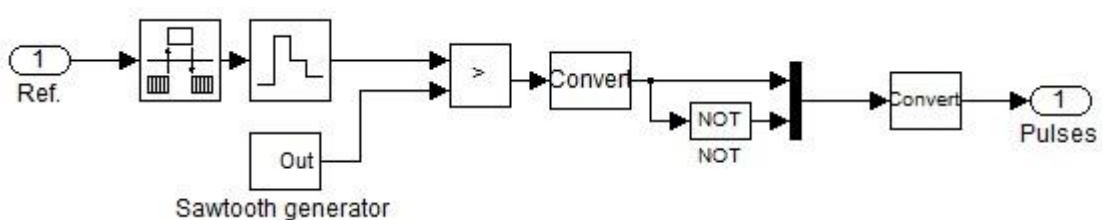


Σχήμα Π.13

Ο ελεγκτής τάσης του μετατροπέα ισχύος.

Στην έξοδο του ελεγκτή παράγεται ανά πάσα στιγμή η απόκλιση από την επιθυμητή τιμή και φιλτράρεται (Ctrl sat.) ώστε η μέγιστη δυνατή τιμή και η ελάχιστη να είναι το 1 και το -1 αντίστοιχα.

Στο block PWM παράγονται διαμορφωμένοι κατά πλάτος παλμοί για την οδήγηση των ηλεκτρονικών ισχύος (σχήμα Π.14)



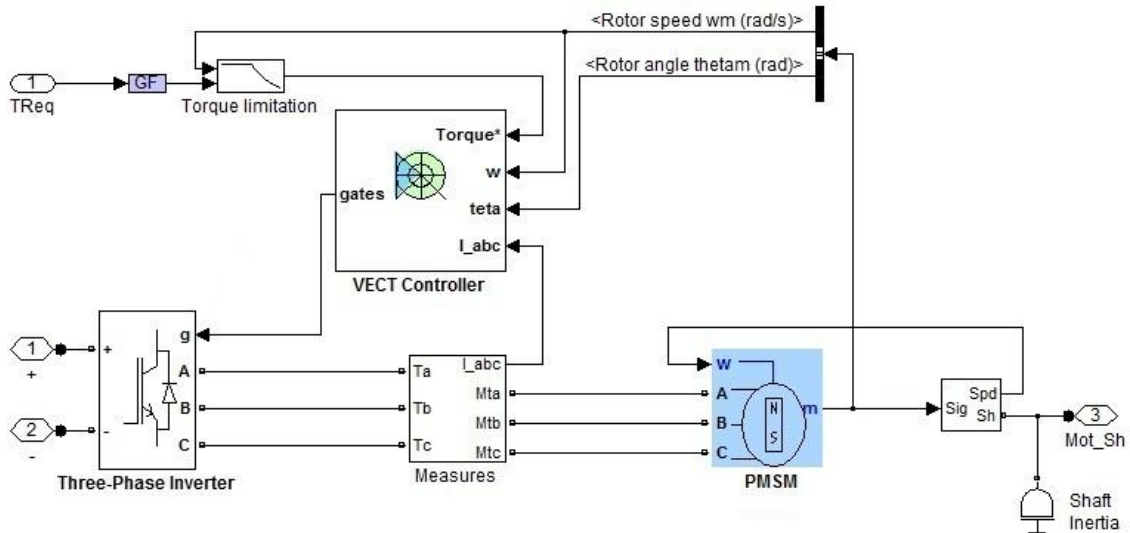
Σχήμα Π.14

Διαμόρφωση εύρους παλμών για την οδήγηση των IGBT

Το σήμα αναφοράς που εξέρχεται από τον ελεγκτή τάσης συγκρίνεται με μια τριγωνική κυματομορφή (sawtooth) και όπου το σήμα αναφοράς έχει μεγαλύτερη τιμή από την τριγωνική κυματομορφή δημιουργείται ένας τετραγωνικός παλμός (εντολή αγωγής IGBT). Έτσι η τετραγωνική παλμοσειρά που παράγεται οδηγεί τα IGBT κατάλληλα ώστε η τάση στην έξοδο να διατηρείται στα 500V.

➤ Ηλεκτρικός κινητήρας

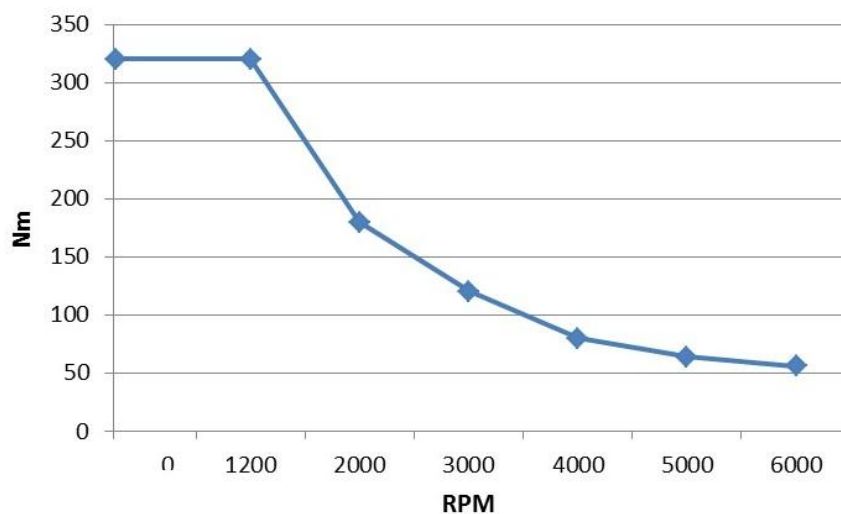
Η απαιτούμενη από τον ηλεκτροκινητήρα ροπή ( $T_{Req}$ ) μετράται στο block GF και στην συνέχεια καταλήγει στον περιοριστή ροπής (Torque limitation) μαζί με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της σύγχρονης μηχανής



Σχήμα Π.15

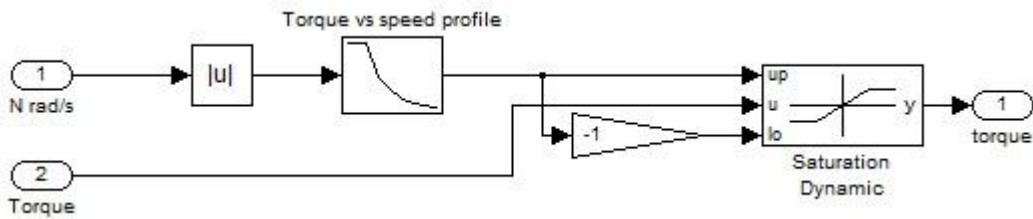
Το σύστημα ελέγχου/οδήγησης του ηλεκτροκινητήρα.

Η απαιτούμενη από τον ηλεκτροκινητήρα ροπή ( $T_{Req}$ ) μετράται στο block GF και στην συνέχεια καταλήγει στον περιοριστή ροπής (Torque limitation) μαζί με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της σύγχρονης μηχανής. Ο περιοριστής ροπής λαμβάνει την απαιτούμενη ροπή και ταχύτητα και σύμφωνα με το εισηγμένο σε αυτόν διάγραμμα ροπής-στροφών (σχήμα Π.16) του ηλεκτροκινητήρα δίνει στην έξοδο την μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει η μηχανή την δεδομένη στιγμή (σχήμα Π.17).



Σχήμα Π.16

Το διάγραμμα ροπής-στροφών του ηλεκτροκινητήρα.



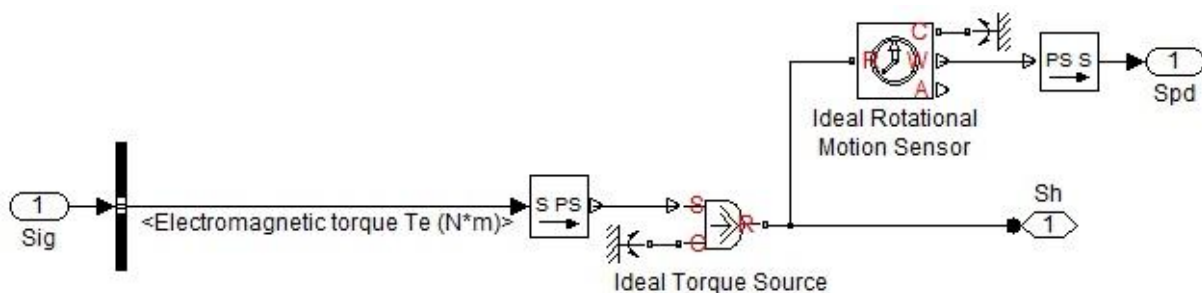
Σχήμα Π.17

Περιορισμός ροπής σύμφωνα με το διάγραμμα ροπής στροφών του ηλεκτροκινητήρα.

Στην συνέχεια η ροπή που μπορεί να προσφέρει τον ηλεκτρικό κινητήρα, μαζί με την ταχύτητα περιστροφής και την γωνία του δρομέα και τις τρεις φάσεις των ρευμάτων, αποτελούν τις εισόδους του ελεγκτή που υλοποιεί τον διανυσματικό έλεγχο. Χρησιμοποιήθηκε το block VECT Controller της βιβλιοθήκης SimPowerSystems® του Simulink® με κατάλληλη παραμετροποίηση. Το δυναμικό μοντέλο του διανυσματικού ελεγκτή περιγράφεται στο εδάφιο 4.1.9. Σημειώνεται ότι η μέγιστη διακοπτική συχνότητα του ελεγκτή είναι τα 20kHz. Οι παλμοί από τον ελεγκτή ρυθμίζουν κατάλληλα την λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα (SimPowerSystems) ο οποίος χρησιμοποιεί IGBT (και παράλληλες διόδους ελεύθερης διέλευσης) καθώς και πανομοιότυπα snubber με τον μετατροπέα DC-DC boost για την προστασία των διακοπών. Τα εναλλασσόμενα ρεύματα κάθε φάσης που παράγει ο αντιστροφέας μετρώνται στο block Measures και στην συνέχεια οδηγούνται σε κάθε φάση της σύγχρονης μηχανής. Ο χρησιμοποιούμενος ηλεκτροκινητήρας της βιβλιοθήκης SimPowerSystems

Οι αυτεπαγωγές  $L_d$  και  $L_q$  ελήφθησαν ίσες με 1,6 και 2,1mH αντιστοίχως. Η αντίσταση σειράς του στάτη ανά φάση είναι ίση με 0,09Ω.

Από την έξοδο του ηλεκτροκινητήρα λαμβάνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η ταχύτητα περιστροφής του μέσω των γνωστών αισθητήρων ροπής και περιστροφικής κίνησης αντίστοιχα (σχήμα Π.18). Τέλος η ροπή της μηχανής μεταβιβάζεται στον άξονα του οχήματος εν μέσω απωλειών λόγω αδράνειας άξονα (Shaft inertia) της τάξης των  $0,2\text{kg}\cdot\text{m}^2$ .

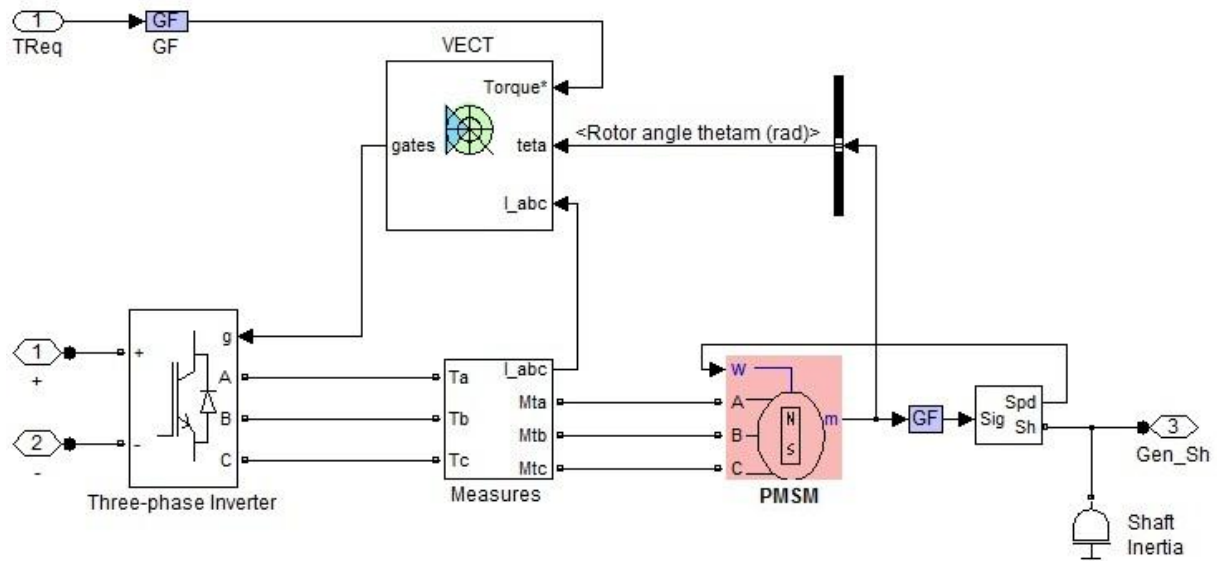


Σχήμα Π.18

Λήψη ηλεκτρομαγνητικής ροπής και ταχύτητας περιστροφής από τον ηλεκτροκινητήρα.

➤ Ηλεκτρική γεννήτρια

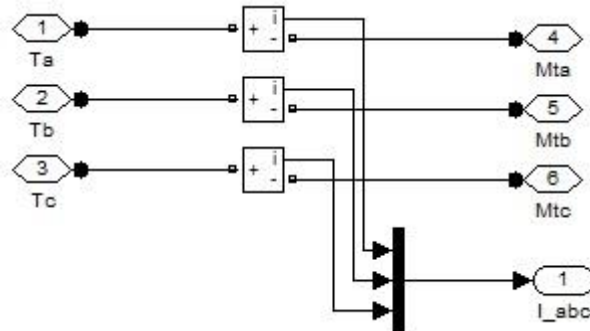
Το σύστημα οδήγησης της ηλεκτρικής γεννήτριας παρουσιάζεται στο σχήμα Π.19



Σχήμα Π.19

Το σύστημα οδήγησης της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Η απαιτούμενη ροπή (αφού μετρηθεί στο block GF) εισέρχεται στον ελεγκτή μαζί με την γωνία του δρομέα και τις τρεις φάσεις των ρευμάτων που προκύπτουν από τον αντιστροφέα. Σημειώνεται πως εδώ δεν τίθεται θέμα περιορισμού της απαιτούμενης ροπής μέσω της καμπύλης ροπής-στροφών της μηχανής. Η μέγιστη διακοπτική συχνότητα του VECT Controller είναι τα 20kHz Το δυναμικό μοντέλο του ελεγκτή αναλύεται στο εδάφιο 4.1.9. Ο αντιστροφέας λαμβάνει την DC τάση από τον ζυγό και παλμούς από τον διανυσματικό ελεγκτή. Τα εναλλασσόμενα ρεύματα κάθε φάσης αφού μετρηθούν οδηγούνται σε κάθε φάση της σύγχρονης μηχανής και όλα μαζί ανατροφοδοτούν την είσοδο του ελεγκτή (σχήμα Π.20).



Σχήμα Π.20

Στο block Measures το ρεύμα κάθε φάσης μετράται και οι μετρήσεις αποστέλλονται στον ελεγκτή σαν ανατροφοδότηση .

Η σύγχρονη γεννήτρια περιγράφεται από τις ίδιες εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν και για τον ηλεκτροκινητήρα, με αυτεπαγωγές στους άξονες d και q  $L_d = L_q = 0,64mH$  και αντίσταση σειράς τυλιγμάτων στάτη ανά φάση ίση με  $R_s = 0,0048\Omega$ . Από την έξοδό της λαμβάνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της. Προτού διοχετευτεί η ροπή στον άξονα λαμβάνονται υπόψη απώλειες υπό την μορφή αδράνειας (Shaft Inertia) ίσες με  $0,2kg.m^2$ .

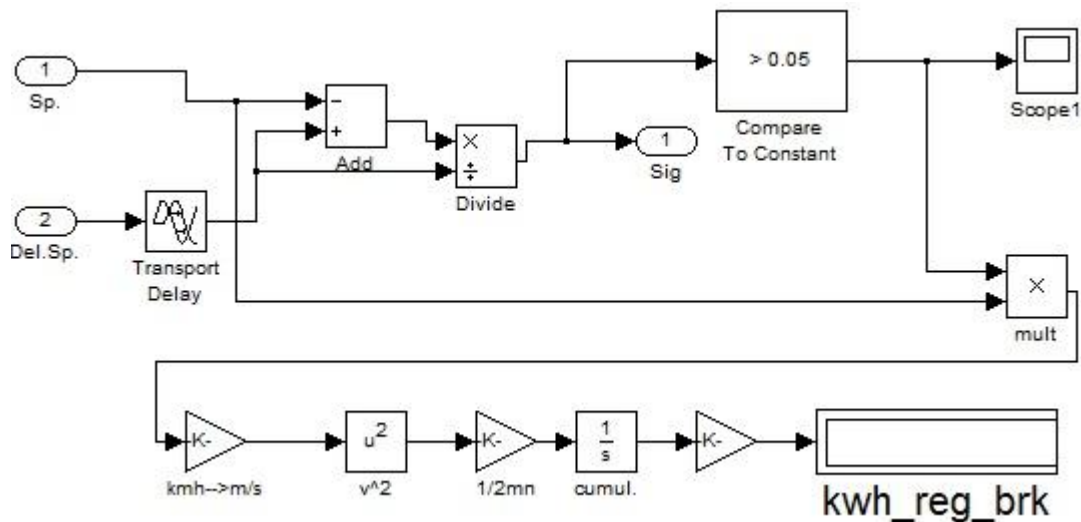
➤ Αναγεννητική πέδηση

Το μπλοκ brake\_sig (σχήμα Π.21) λαμβάνει την ταχύτητα του οχήματος και στις δύο εισόδους του. Στην μία εκ των δύο εφαρμόζεται μια χρονοκαθυστέρηση της τάξεως του 1,5s που είναι ένας τυπικός χρόνος αντίδρασης ενός μέσου οδηγού. Στην συνέχεια υπολογίζεται η ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας η οποία μεταβιβάζεται μέσω του reg\_br\_sgn στην κεντρική μονάδα ελέγχου ενώ επιπλέον γίνεται μια καλή εκτίμηση της ενέργειας που κερδίζεται μέσω της αναγεννητικής πέδησης.

Το μπλοκ της σύγκρισης με τον συντελεστή 0,05 δίνει στην έξοδο του το λογικό 1 για όλα τα σήματα που λαμβάνει και υπακούουν στην ανισωτική σχέση που περιέχει. Κατά συνέπεια δύναται να προσδιοριστεί η ταχύτητα του οχήματος μόνο τις στιγμές που λειτουργεί η αναγεννητική πέδηση και κατά συνέπεια προσδιορίζεται η στιγμιαία κινητική ενέργεια που ανακτά ο ηλεκτροκινητήρας μέσω της σχέσης

$$K_{inst.} = \frac{1}{2} m n_{ef} v_{inst.}^2 \quad (\Sigma.3)$$

Όπου  $m$  η μάζα του οχήματος,  $v_{inst.}$  η στιγμιαία ταχύτητα (σε  $m/s$ ) του οχήματος και  $n_{ef}$  ένας συντελεστής απόδοσης ο οποίος περιλαμβάνει την απόδοση του ηλεκτροκινητήρα και όλες τις ηλεκτρικές και μηχανικές απώλειες που εμφανίζονται κατά την ανάκτηση ενέργειας. Ο συντελεστής απόδοσης λαμβάνεται ίσος με 90%, και στην συνέχεια για να υπολογιστεί το σύνολο της ενέργειας στα πλαίσια μιας διαδρομής αυτή η στιγμιαία τιμή της ενέργειας λαμβάνεται σωρευτικά (cumul.). Τέλος, γίνεται μετατροπή του συστήματος μονάδων της ενέργειας από Joules σε kWh και χρησιμοποιείται μια οθόνη για την εμφάνιση του τελικού αποτελέσματος.



Σχήμα Π.21

Η εσωτερική διαμόρφωση του brake\_sig.

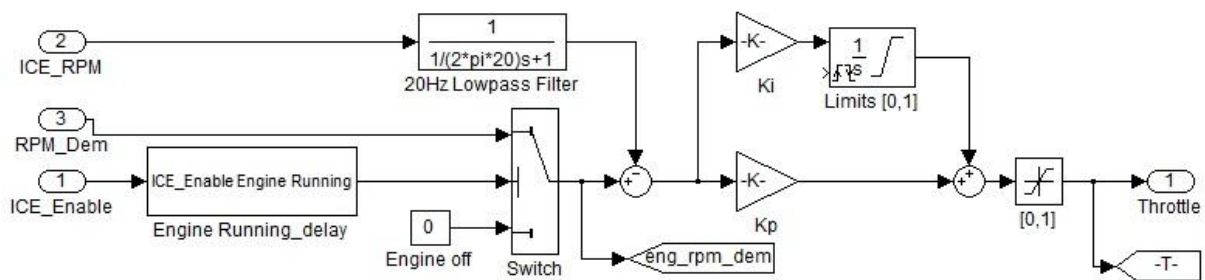
➤ Προτεινόμενος Ελεγκτής MEK

Το εσωτερικό του προτεινόμενου ελεγκτή της MEK παρουσιάζεται στο σχήμα Π.22. Στην είσοδο του δέχεται το σήμα για την λειτουργία του ή μη λειτουργία του (η μεταβλητή ICE\_Enable λαμβάνει τις

τιμές 1 και 0 αντίστοιχα), την ταχύτητα περιστροφής του θερμικού κινητήρα ανά πάσα στιγμή (ICE\_RPM) καθώς και την ανά πάσα στιγμή απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής του (RPM\_Dem). Η απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής προσδιορίζεται με την αντιστοίχιση τιμών ταχύτητας περιστροφής και κανονικοποιημένης επιτάχυνσης (Acc). Υπενθυμίζεται πως ο ελεγκτής ταχύτητας, συγκρίνει την ταχύτητα του οχήματος με την αντίστοιχη επιθυμητή ταχύτητα που προκύπτει από τον εκάστοτε κύκλο οδήγησης και δίνει στην έξοδο μια κανονικοποιημένη εντολή επιτάχυνσης η οποία παίρνει τιμές από 0 έως και 1. Χρησιμοποιήθηκε lookup table για την αντιστοίχιση τιμών, λαμβάνοντας υπόψη πως η MEK σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου λειτουργεί από τις 1200 ΣΑΛ και έχει γραμμικό χαρακτήρα με την τιμή 1 να αντιστοιχίζεται στις στροφές όπου η MEK αποδίδει την μέγιστη ισχύ του (4000 ΣΑΛ). Η αντιστοίχιση τιμών φαίνεται στο σχήμα 4.26.

Λαμβάνοντας τις περιγραφείσες εισόδους ο ελεγκτής του βενζινοκινητήρα παρέχει στην έξοδο του την απαιτούμενη τιμή γκαζιού για την ικανοποίηση του φορτίου του.

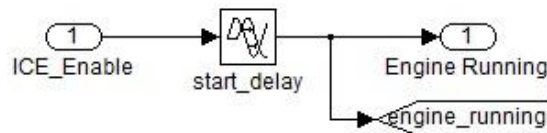
Στο σχήμα 4.24 παρουσιάζεται η εσωτερική διαμόρφωση του προτεινόμενου ελεγκτή και στην συνέχεια εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας του.



Σχήμα Π.22

Η εσωτερική διαμόρφωση του προτεινόμενου ελεγκτή του βενζινοκινητήρα.

Το σήμα της ενεργοποίησης του θερμικού κινητήρα εισέρχεται στο μπλοκ Engine Running\_delay όπου υφίσταται μια καθυστέρηση της τάξης του ενός δευτερολέπτου ώστε να ληφθεί υπόψη η πραγματική, μη άμεση ενεργοποίηση της MEK (σχήμα Π.23).



Σχήμα Π.23

Καθυστέρηση εκκίνησης θερμικού κινητήρα.

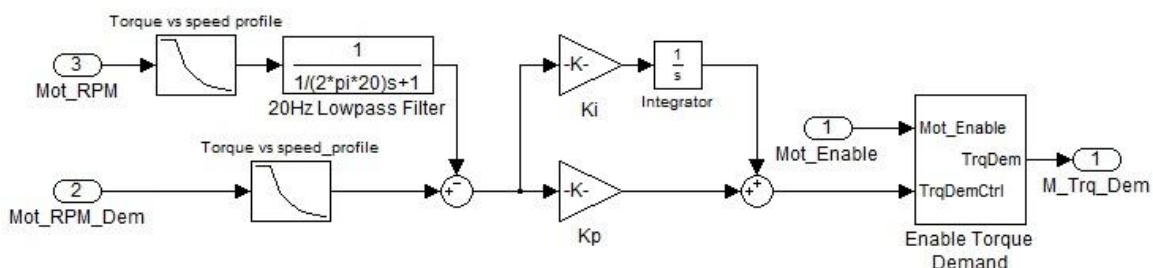
Έπειτα το σήμα κατευθύνεται στον διακόπτη. Εάν η τιμή του είναι μεγαλύτερη του 0,5 (δηλαδή 1 – MEK σε λειτουργία), τότε επιλέγεται η πάνω είσοδος του διακόπτη (RPM\_Dem), εάν πάλι είναι μικρότερη του 0,5 (δηλαδή 0 – MEK εκτός λειτουργίας) επιλέγεται η κάτω είσοδος του διακόπτη και ο θερμικός κινητήρας παραμένει εκτός λειτουργίας. Στην περίπτωση κατά την οποία η MEK τίθεται σε λειτουργία, προσδιορίζεται η διαφορά που υπάρχει μεταξύ απαιτούμενων στροφών και

πραγματικών στροφών. Στην συνέχεια με την χρήση ενός κατάλληλα ρυθμισμένου ελεγκτή PI δίνεται κανονικοποιημένη εντολή (από 0 έως και 1) για γκάζί ώστε η διαφορά (RPM\_Dem) – (ICE\_RPM) να τείνει στο 0.

➤ *Προτεινόμενος ελεγκτής Ηλεκτρικού κινητήρα*

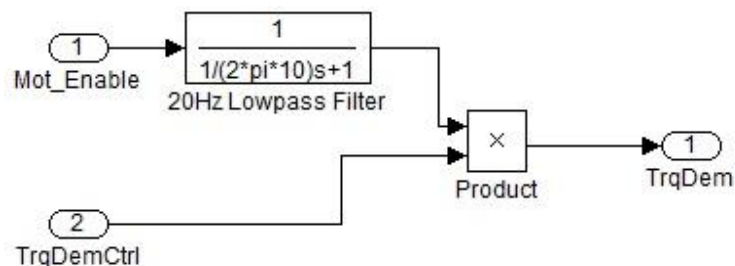
Ο προτεινόμενος ελεγκτής λαμβάνει σαν εισόδους, κατ' αντιστοιχία με τον ελεγκτή του θερμικού κινητήρα, το σήμα ενεργοποίησής του ή μη (Mot\_Enable), την απαιτούμενη από αυτόν ταχύτητα περιστροφής (Mot\_RPM\_Dem) καθώς και την πραγματική ταχύτητα περιστροφής του (Mot\_RPM). Η μόνη έξοδος του είναι η ροπή που θα πρέπει να προσφέρει ο ηλεκτροκινητήρας ανά πάσα στιγμή ώστε να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά η πρόωση του οχήματος. Στο σχήμα Π.24 παρουσιάζεται η εσωτερική διαμόρφωση του ελεγκτή η οποία επεξηγείται ακολούθως.

Τόσο η πραγματική όσο και η απαιτούμενη ταχύτητα μετατρέπονται αντίστοιχα σε πραγματικές και απαιτούμενες ροπές μέσω της καμπύλης ροπής στροφών του ηλεκτρικού κινητήρα (σχήμα 4.20). Η τρέχουσα τιμή ροπής εξομαλύνεται μέσω ενός βαθυπερατού φίλτρου και στην συνέχεια υπολογίζεται η απόκλιση τους. Έπειτα ο κατάλληλα ρυθμισμένος PI ελεγκτής δίνει εντολή για καλυφθεί το έλλειμμα ροπής και να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση μεταξύ απαιτούμενης και τρέχουσας ταχύτητας περιστροφής. Το μπλοκ Enable Torque Demand αναλαμβάνει να λάβει υπόψη του αν σύμφωνα με εντολές της μονάδας ελέγχου ο ηλεκτροκινητήρας οφείλει να λειτουργεί ανά πάσα στιγμή. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ενός απλού πολλαπλασιαστή και ενός ακόμα βαθυπερατού φίλτρου για λόγους εξομάλυνσης (σχήμα Π.25), καθώς σε περίπτωση που απαιτείται η λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα ο ελεγκτής επιστρέφει την τιμή 1 η οποία έχει σαν αποτέλεσμα το "πέρασμα" της τιμής της ροπής που υπολογίστηκε, ενώ με τιμή μηδέν (ηλεκτροκινητήρας εκτός λειτουργίας), το γινόμενο δίνει στην έξοδο μηδενική ροπή.



Σχήμα Π.24

*Εσωτερική διαμόρφωση του προτεινόμενου ελεγκτή του ηλεκτροκινητήρα.*



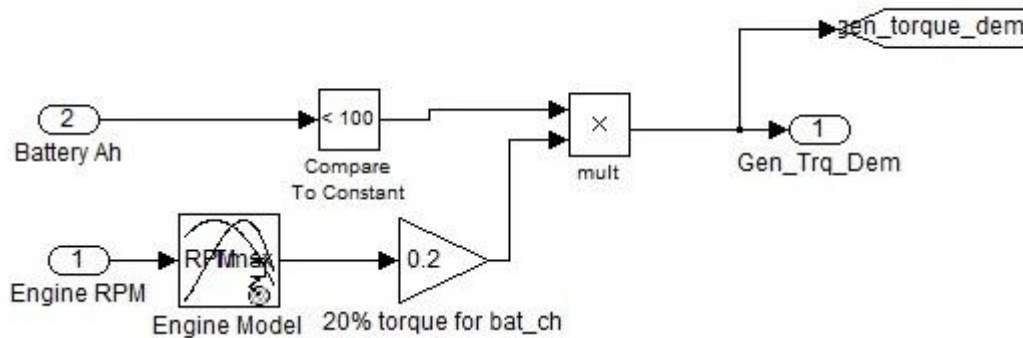
Σχήμα Π.25

*Το μπλοκ Enable Torque Demand λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα πριν η ροπή οδηγηθεί στην έξοδο του ελεγκτή.*



➤ Προτεινόμενος ελεγκτής φόρτισης μπαταριών

Η εσωτερική διαμόρφωση του προτεινόμενου ελεγκτή φόρτισης μπαταριών παρουσιάζεται στο σχήμα Π.26. Λαμβάνονται σαν εισόδοι το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών (Battery Ah) και η ταχύτητα περιστροφής του θερμικού κινητήρα (Engine RPM) το οποίο έμμεσα είναι υπεύθυνο για την φόρτιση των μπαταριών καθώς παρέχει την απαραίτητη μηχανική ροπή στην σύγχρονη γεννήτρια η οποία τροφοδοτεί τις μπαταρίες με ηλεκτρική ισχύ. Ελέγχεται αν οι μπαταρίες δύνανται να φορτιστούν περαιτέρω μέσω της σύγκριση του επιπέδου φόρτισής τους με τον αριθμό 100 και την εκπομπή σήματος 1 ή 0 αντίστοιχα αν ισχύει η λογική πρόταση ή όχι. Η ταχύτητα περιστροφής του βενζινοκινητήρα μετατρέπεται σε ροπή μέσω του διαγράμματος ροπής στροφών του (lookup table), και χρησιμοποιείται μόνο το 20% της ανά πάσα στιγμή διαθέσιμης ροπής του θερμικού κινητήρα για να τροφοδοτήσει την γεννήτρια με μηχανική ισχύ. Το υπόλοιπο ποσοστό χρησιμοποιείται προφανώς για την πρόωση του οχήματος. Κατά συνέπεια, η ροπή που απαιτείται από την γεννήτρια για λόγους φόρτισης των μπαταριών προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του σήματος της σύγκρισης του SOC με το 100, με την διαθέσιμη ροπή από πλευράς θερμικού κινητήρα για αυτό τον σκοπό.

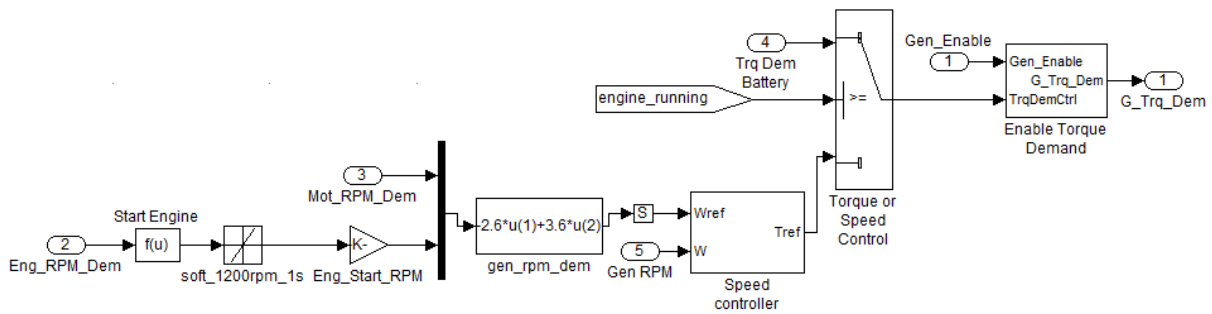


Σχήμα Π.26

Εσωτερική διαμόρφωση προτεινόμενου φορτιστή μπαταριών.

➤ Προτεινόμενος ελεγκτής ηλεκτρικής γεννήτριας

Η διάταξη που αναπτύχθηκε και στοχεύει στον έλεγχο της συμπεριφοράς της ηλεκτρικής γεννήτριας παρουσιάζεται στο σχήμα Π.27. Λαμβάνει σαν εισόδους την απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα (MOT\_RPM\_Dem), του βενζινοκινητήρα (Eng\_RPM\_Dem), το σήμα ενεργοποίησης της ηλεκτρικής γεννήτριας (Gen\_Enable), την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας (Gen\_RPM) και την απαιτούμενη από την γεννήτρια ροπή για την φόρτιση των μπαταριών (Trq Dem Battery). Η μόνη έξοδος του ελεγκτή είναι η απαιτούμενη από την γεννήτρια ροπή.

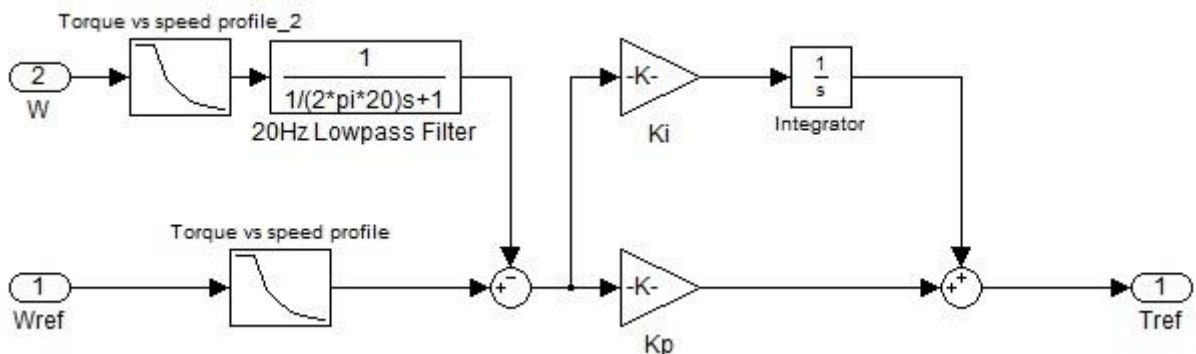


**Σχήμα Π.27**

*Η εσωτερική διαμόρφωση του ελεγκτή της ηλεκτρικής γεννήτριας.*

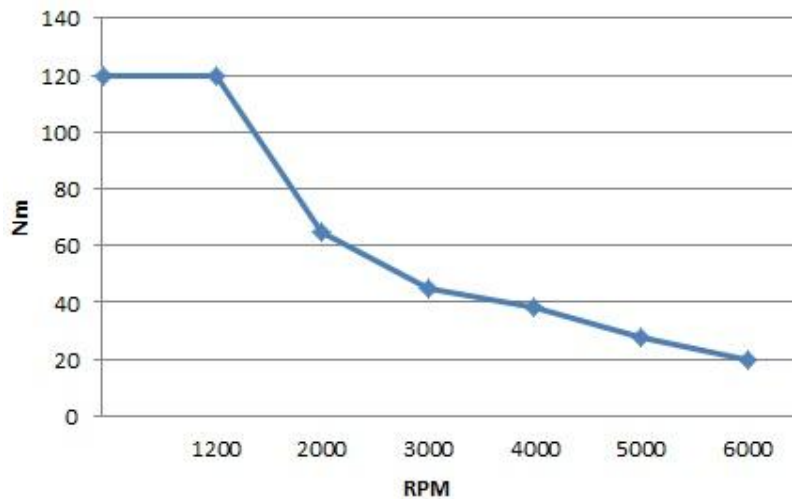
Δίνεται εντολή εκκίνησης του βενζινοκινητήρα μέσω του μπλοκ Start Engine το οποίο δίνει στην έξοδο 1 όταν οι στροφές του θερμικού κινητήρα είναι ίσες ή υπερβαίνουν τις 1200 ΣΑΛ. Έπειτα η ταχύτητα περιστροφής μέσα σε ένα δευτερόλεπτο σταθεροποιείται στην ελάχιστη δυνατή (1200 ΣΑΛ) ώστε να περιοριστεί η κατανάλωση καυσίμου του θερμικού κινητήρα, καθώς όπως θα περιγραφεί και στην συνέχεια ο κάτω κλάδος του μοντέλου τίθεται σε λειτουργία μέσω διακόπτη τις στιγμές που η ηλεκτρική γεννήτρια δεν προσφέρει ηλεκτρική ισχύ στις μπαταρίες και λειτουργεί σαν πέδη. Εν συνεχεία η σταθερή αυτή ταχύτητα περιστροφής της MEK εισάγεται σε ένα ζυγό. Στον ίδιο ζυγό εισάγεται και η απαιτούμενη ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα. Στην συνέχεια υλοποιείται η σχέση \_\_\_ ώστε να προσδιοριστεί η απαιτούμενη ταχύτητα της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Ακολούθως η απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής της ηλεκτρικής γεννήτριας εισέρχεται στον ελεγκτή ταχύτητας (Speed controller -σχήμα Π.28). Η ταχύτητα περιστροφής αναφοράς (απαιτούμενη) και η τρέχουσα ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας αποτελούν τις εισόδους του ελεγκτή. Οι τιμές ταχύτητας μετατρέπονται τιμές ροπής μέσω του διαγράμματος ροπής στροφών της σύγχρονης μηχανής (σχήμα Π.29). Έπειτα, μέσω ενός κατάλληλα ρυθμισμένου PI ελεγκτή, προσδιορίζεται ανά πάσα στιγμή η απόκλιση τους, ελαχιστοποιείται και οδηγείται στην έξοδο.



**Σχήμα Π.28**

*Εσωτερική διαμόρφωση του Speed controller της προτεινόμενης μονάδας ελέγχου της σύγχρονης γεννήτριας.*



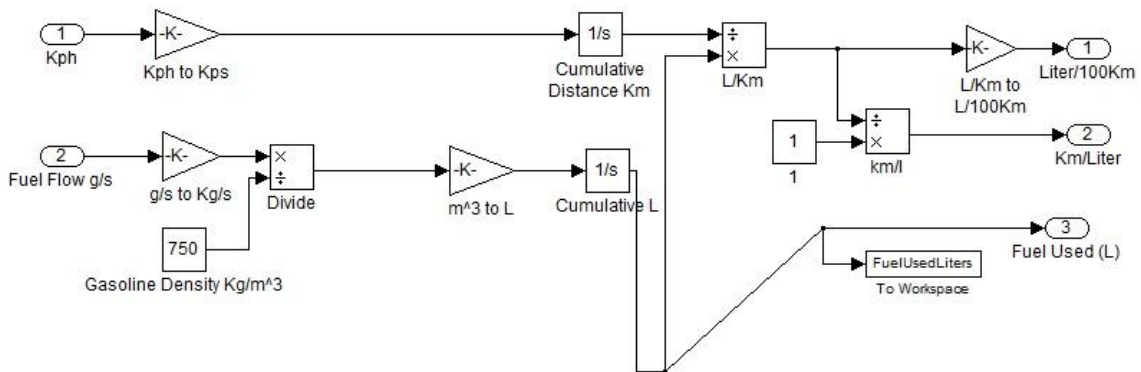
**Σχήμα Π.29**

*Διάγραμμα ροπής-στροφών σύγχρονης γεννήτριας.*

Στην συνέχεια ένας διακόπτης δρομολογεί την απαιτούμενη ροπή από την ηλεκτρική γεννήτρια ανάλογα με την περίπτωση. Εάν υπάρχει ανάγκη φόρτισης των μπαταριών και η ΜΕΚ βρίσκεται σε λειτουργία a priori , τότε επιλέγεται από τον διακόπτη η πάνω είσοδος που αντιστοιχεί στην απαιτούμενη ροπή από την γεννήτρια ώστε να φορτιστούν οι μπαταρίες. Εάν δεν υπάρχει ανάγκη φόρτισης των μπαταριών, ο δρομέας της γεννήτριας στρέφεται όπως ορίζεται από το πλανητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα και την σταθερή ταχύτητα περιστροφής (1200 ΣΑΛ) της ΜΕΚ. Τις χρονικές στιγμές που ο δρομέας της γεννήτριας στρέφεται κατά την αντίθετη φορά – ή με κατά σύμβαση αρνητική ταχύτητα – η σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί σαν ηλεκτρομαγνητική πέδη.

➤ *Οικονομία καυσίμου*

Μέσω του πίνακα κατανάλωσης καυσίμου, της ροπής και των στροφών του βενζινοκινητήρα, υπολογίστηκε η στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου του και μέσω απλών υπολογισμών εντός του μπλοκ Calculate Fuel Economy (σχήμα Π.30), υπολογίστηκε η τελική κατανάλωση καυσίμου σε L και η μέση κατανάλωση σε L/100km και km/L.



**Σχήμα Π.30**

*Υπολογισμός μέσης και συνολικής κατανάλωσης καυσίμου.*



## Αναφορές

---

- [1] Chan CC. An Overview of Electric Vehicle Technology. Proc of IEEE 1993;81(9)1202-13.
- [2] Omonowo D. Momoh, Michael O. Omoigui. An overview of Hybrid Electric Vehicle technology. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE 1286 – 1292.
- [3] Η. Γκούγκας, “Ανάλυση λειτουργίας και ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2009.
- [4] Μ. Αντωνακόπουλος, “Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Τεχνολογίες Υδρογόνου”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010
- [5] K. T. Chau, Y. S. Wong. Overview of power management in hybrid electric vehicles. Energy Conversion and Management, Volume 43, Issue 15, October 2002, Pages 1953-1968
- [6] Λένος Κ. Χατζηδημητρίου, “Σχεδίαση, κατασκευή και πειραματική επιβεβαίωση αντιστροφέα στο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης πρότυπου ηλεκτρικού οχήματος ” Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010.
- [7] Ali Emadi, Kauskik Rajashekara, Sheldon Wiliamson and Srdjan Lukic. “Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 3, May 2005
- [8] Simpson, A Cost-Benefit Analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Technology National Renewable Energy Laboratory conference report CP-540-40485 - (2006)
- [9] Eberle, Ulrich von Helmholt, Rittmar "Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: a brief overview". Royal Society of Chemistry. 14/5/2010
- [10] K. T. Chau and C.C. Chan. “Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles” Proceedings of the IEEE, April, 2007.
- [11] Ontario Ministry of Transportation, Electric Vehicles – A plan for a greener Ontario. mto.gov.on.ca
- [12] Ali Emadi, Yimin Gao, Mehrdad Ehsani “ Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition, 2009, CRC Press
- [13] F. A. Wyczalek, “Hybrid electric vehicles—Year 2000,” in Proc. 35th IEEE Intersoc. Energy Conversion Eng. Conf., vol. 1, Las Vegas, NV, July 2000, pp. 349–355

- [14] A. Sciarretta, M. Back, and L. Guzzella, "Optimal control of parallel hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 12, no.3, pp. 352–363, May 2004
- [15] A. Emadi, B. Fahimi, M. Ehsani, and J. M. Miller, "On the suitability of low-voltage (42 V) electrical power systems for traction applications in parallel hybrid electric vehicles," in *Soc. Automotive Eng. (SAE) J.*, Apr.2000. Paper 2000–01-1558.
- [16] V. Wouk, "Hybrids: Then and now," *IEEE Spectrum*, vol. 32, no. 7, pp.16–21, Jul. 1995.
- [17] A. Emadi, M. Ehsani, and J. M. Miller, *Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles*. New York: Marcel Dekker, Dec. 2003.
- [18] C. C. Lin, H. Peng, J. W. Grizzle, and J. M. Kang, "Power management strategy for a parallel hybrid electric truck," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 839–849, Nov. 2003
- [19] Straun Jno, T Robertson, John Markham "The Regenerative Braking Story: February 2007
- [20] S. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, Jun. 2008.
- [21] Alireza Khaligh, Zhihao Li " Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art ", *IEEE Transactions on VehicularTtechnology*, Vol. 59, NO. 6, July 2010
- [22] Y. Zhang, L. Wu, X. Hu, and H. Liang, "Model and control for supercapacitor-based energy storage system for metro vehicles," in *Proc. Int. Conf. Elect. Mach. Syst.*, Oct. 2008, pp. 2695–2697.
- [23] Y. Lu, H. Hess, and D. Edwards, "Adaptive control of an Ultracapacitor energy storage system for hybrid electric vehicles," in *Proc. IEEE Elect. Mach. Drives Conf.*, May 2007, vol. 1, pp. 129–133.
- [24] O. Caumont, P. Le Moigne, C. Rombaut, X. Muneret, and P. Lenain, "Energy gauge for lead–acid batteries in electric vehicles," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 15, no. 3, pp. 354–360, Sep. 2000.
- [25] J. B. Olson and E. D. Sexton, "Operation of lead–acid batteries for HEV applications," in *Proc. 15th Battery Conf. Appl. Adv.*, Jan. 2000, pp. 205–210.
- [26] D. B. Edwards and C. Kinney, "Advanced lead acid battery designs for hybrid electric vehicles," in *Proc. 16th Battery Conf. Appl. Adv.*, Jan. 2001, pp. 207–212.
- [27] A. Cooper and P. Moseley, "Progress in the development of lead–acid batteries for hybrid electric vehicles," in *Proc. IEEE Vehicle Power Propulsion Conf.*, Sep. 2006, pp. 1–6.

- [28] M. Saakes, R. Woortmeijer, and D. Schmal, "Bipolar lead–acid battery for hybrid vehicles," *J. Power Sources*, vol. 144, no. 2, pp. 536–545, Jun. 2005.
- [29] M. A. Fetcenko, S. R. Ovshinsky, B. Reichman, K. Young, C. Fierro, J. Koch, A. Zallen, W. Mays, and T. Ouchi, "Recent advances in NiMH battery technology," *J. Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 544–551, Mar. 2007.
- [30] H. Li, C. Liao, and L. Wang, "Research on state-of-charge estimation of battery pack used on hybrid electric vehicle," in *Proc. Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, Mar. 2009, pp. 1–4.
- [31] M. C. Wehrey, "What's new with hybrid electric vehicles," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 2, no. 6, pp. 34–39, Nov./Dec. 2004.
- [32] "2008 Toyota Prius" (Press release), *Hybridcar.com*. Oct. 2007
- [33] H. V. Venkatesetty and Y. U. Jeong, "Recent advances in lithium-ion and lithium-polymer batteries," in *Proc. 17th Annu. Battery Conf. Appl. Adv.*, Jan. 2002, pp. 173–178.
- [34] S. G. Chalk and J. F. Miller, "Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems," *J. Power Sources*, vol. 159, no. 1, pp. 73–80, Sep. 2006.
- [35] A. F. Burke, "Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles," in *Proc. IEEE*, Apr. 2007, vol. 95, no. 4, pp. 806–820.
- [36] "2011 Nissan Leaf Features & Specs". *Edmunds.com*.
- [37] R. C. Balch, A. Burke, and A. A. Frank, "The affect of battery pack technology and size choices on hybrid electric vehicle performance and fuel economy," in *Proc. 16th IEEE Annu. Battery Conf. Appl. Adv.*, Jan. 2001, pp. 31–36.
- [38] J. C. Viera, M. Gonzalez, J. C. Anton, J. C. Campo, F. J. Ferrero, and M. Valledor, "NiMH vs NiCd batteries under high charging rates," in *Proc. 28th Annu. Telecommun. Energy Conf.*, Sep. 2006, pp. 1–6.
- [39] Y. Gao and M. Ehsani, "Investigation of battery technologies for the army's hybrid vehicle application," in *Proc. 56th IEEE Veh. Technol. Conf.*, Sep. 2002, pp. 1505–1509.
- [40] Ultracapacitors, Nat. Renewable Energy Lab., Golden, CO - <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/ultracapacitors.html>
- [41] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications," in *Proc. IEEE*, Dec. 2001, vol. 89, no. 12, pp. 1744–1756.
- [42] T. Bartley, "Ultracapacitors and batteries for energy storage in heavy-duty hybrid-electric vehicles," presented at the 22nd Int. Battery Seminar Exh., ar. 2005.

- [43] L. T. Lam and R. Louey, "Development of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications," *J. Power Sources*, vol. 158, no. 2, pp. 1140–1148, Aug. 2006
- [44] AltenEnergy magazine, "Ultracapacitors" article, 06/4/2001 - [http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue\\_number=06.04.01&article=ultracapacitors](http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue_number=06.04.01&article=ultracapacitors)
- [45] Van Mierlo J. Views on hybrid drivetrain power management. Proceedings of the 17th International Electric Vehicle Symposium, 2000
- [46] Beretta J. "New tools for energy efficiency evaluation on hybrid system architecture." Proceedings of the 17th International Electric Vehicle Symposium, 2000
- [47] K.T. Chau, Y.S. Wong "Overview of power management in hybrid electric vehicles", *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 1953–1968.
- [48] F. R. Salmasi, "Designing control strategies for hybrid electric vehicles," in Proc. Tutorial Presentation EuroPes, Benalmadena, Spain, Jun. 15–17, 2005.
- [49] Chirag Desai and Sheldon S. Williamson "Comparative Study of Hybrid Electric Vehicle Control Strategies for Improved Drivetrain Efficiency Analysis" 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference.
- [50] Farzad Rajaei Salmasi "Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 56, No. 5, September 2007
- [51] C. G. Hochgraph, M. J. Ryan, and H. L. Wiegman, "Engine control strategy for a series hybrid electric vehicle incorporating load leveling and computer controlled energy management," *SAE J. SAE/SP-96/1156*, pp. 11–24, 2000.
- [52] L. Guzzella, A. Amstutz, and F. Grob, "Optimal operation strategies for hybrid powertrains," in Proc. 1st Int. Fed. Autom. Control Workshop, Mar. 1995.
- [53] B. M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn, and G. Rizzoni, "Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 58–71, Mar. 2000.
- [54] Mitsubishi Motors to Drive Forward Development of Next – Generation EV - [www.Mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/corporate/detail1269.html](http://www.Mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/corporate/detail1269.html)
- [55] F. Caricchi, F. Crescimbeni, F. Mezzetti, and E. Santini, "Multistage axial – flux PM machine for wheel drive", *IEEE Trans. Industrial Application*, Vol. 32, No. 4, July 1996, pp. 882-888.
- [56] L. Tutelea, E. Richtie, and I. Boldea, "Permanent Magnet I –Wheel Synchronous Motor for Electric Vehicle", Proceedings of the 5 th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2001, Vol. 2, 18 – 20 Aug. 2001, pp831 – 834.



- [57] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. Boca Raton, FL: CRC, 2004.
- [58] S. Burch, M. Cuddy, and T. Markel, *ADVISOR 2.1 Documentation*. Nat. Renewable Lab., 1999
- [59] V. H. Johnson, K. B. Wipke, and D. J. Rausen, HEV control strategy for realtime optimization of fuel economy and emissions, 2000. SAE paper 2000-01-1543.
- [60] H.-D. Lee and S.-K. Sul, "Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 4, pp. 625–632, Aug. 1998
- [61] H.-D. Lee, E.-S. Koo, S.-K. Sul, and J.-S. Kim, "Torque control strategy for a parallel-hybrid vehicle using fuzzy logic," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 6, no. 6, pp. 33–38, Nov./Dec. 2000.
- [62] A. Rajagopalan, G. Washington, G. Rizzoni, and Y. Guezennec, "Development of fuzzy logic control and advanced emissions modeling for parallel hybrid vehicles," NREL Tech. Rep., NREL/SR-540-32919, Dec. 2003.
- [63] S. Ichikawa, Y. Yokoi, S. Doki, S. Okuma, T. Naitou, T. Shiimado, and N. Miki, "Novel energy management system for hybrid electric vehicles utilizing car navigation over a commuting route," in *Proc. IEEE Intell. Veh. Symp.*, Jun. 14–17, 2004, pp. 161–166
- [64] A. Rajagopalan, G. Washington, G. Rizzoni, and Y. Guezennec, "Development of fuzzy logic control and advanced emissions modeling for parallel hybrid vehicles," NREL Tech. Rep., NREL/SR-540-32919, Dec. 2003.
- [65] P. Pisu, K. Koprubasi, and G. Rizzoni, "Energy management and drivability control problems for hybrid electric vehicles," in *Proc. 44th IEEE Conf. Decision Control*, Dec. 12–15, 2005, pp. 1824–1830.
- [66] Y. Zhu, Y. Chen, G. Tian, H. Wu, and Q. Chen, "A four-step method to design an energy management strategy for hybrid vehicles," in *Proc. Amer. Control Conf.*, Jun./Jul. 2004, pp. 156–161.
- [67] E. D. Tate and S. P. Boyd, *Finding ultimate limits of performance for hybrid electric vehicles*, 1998. SAE Paper 00FTT-50.
- [68] C.-C. Lin, H. Peng, J. W. Grizzle, and J.-M. Kang, "Power management strategy for a parallel hybrid electric truck," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 839–848, Nov. 2003.
- [69] A. Piccolo, L. Ippolito, V. Galdi, and A. Vaccaro, "Optimization of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms," in *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatron.*, Corno, Italy, Jul. 8–12, 2001, pp. 434–439.

- [70] G. Paganelli, G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, “General supervisory control policy for the energy optimization of charge sustaining hybrid electric vehicles,” *J. Soc. Autom. Eng. Jpn.*, vol. 22, no. 4, pp. 511–518, Oct. 2001.
- [71] G. Paganelli, S. Delpart, T. M. Guerra, J. Rimoux, and J. J. Santin, “Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains,” in *Proc. IEEE/VTS Fall VTC Conf. Sponsored*, Birmingham, AL, May 2002, pp. 2076–2080.
- [72] S. Delpart, T. M. Guerra, and J. Rimoux, “Optimal control of a parallel powertrain: From global optimization to real time control strategy,” in *Proc. IEEE/VTS Spring VTC Conf.*, Birmingham, AL, May 2002, pp. 2082–2087.
- [73] A. Sciarretta, M. Back, and L. Guzzella, “Optimal control of parallel hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 352–363, May 2004.
- [74] P. Pisu, K. Koprubasi, and G. Rizzoni, “Energy management and drivability control problems for hybrid electric vehicles,” in *Proc. 44th IEEE Conf. Decision Control*, Dec. 12–15, 2005, pp. 1824–1830.
- [75] Σ.Ν. ΜΑΝΙΑΣ, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμμεών, 2007.
- [76] EcoAutoNinja webzine, “GM to manufacture electric motors”, article - <http://www.ecoautoninja.com/eco-electric-vehicles/gm-to-manufacture-electric-motors-18171>
- [77] Stephen J. Chapman “Electric Machinery Fundamentals” McGraw-Hill, 1991
- [78] M.G. Say “Alternating Current Machines” Longman Scientific & Technical, Fifth Edition, 1983
- [79] P.C. Sen “Principle of Electric Machines and Power Electronics” John Wiley & Sons, Second edition, 1997
- [80] Π. Γιαννοπούλου Λασκαράτου “Θεωρία και Ασκήσεις στις Ηλεκτρικές Μηχανές ΙΙ” Έκδοση ΕΜΠ
- [81] Παντελής Β. Μαλατέστας, Στέφανος Ν. Μανιάς “Συστήματα Οδήγησης Ηλεκτρικών Κινητήρων” Συμμεών, 1997
- [82] Ευάγγελος Τζιράκης “ Συσχετισμός εκπομπών οχημάτων με φυσικοχημικές ιδιότητες των καυσίμων και με δεδομένα από την κίνηση των οχημάτων στο λεκανοπέδιο”, Διδακτορική διατριβή, 2007
- [83] CSA Illumina Database - [www.csa.com](http://www.csa.com)
- [84] Mathworks website, SimPowerSystems blocks database, Electrical Sources - Electric Drives/Extra - <http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/powersys/ref/battery.html>

[85] Ned Mohan, Tore A. Undeland, William P. Robbins ‘‘ POWER ELECTRONICS Converters, Applications and Design’’ 1996.

[86] Online information service on clean diesel engines and diesel emissions - <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/manhattan.php>

[87] International transport forum discussion papers - <http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/DiscussionPapers/Discussion.pdf>

[88] United States Environmental protection agency official website - <http://www.epa.gov/oms/sftp.htm>

[89] T. Markel\*, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly B. Kramer, M. O’Keefe, S. Sprik, K. Wip, Journal of Power Sources 110 (2002) 255–266 ‘‘ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling’’, Mathworks website, SimPowerSystems blocks database, Electrical Sources - Electric Drives/Extra

[90] Mathworks website, SimPowerSystems blocks database - Electric Drives/AC drives <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/pmsynchronousmotordrive.html>