



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

**Προβλεπτικός Έλεγχος βάσει Μοντέλου
εφαρμοσμένος σε Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα
Μικτής Συνδεσμολογίας**

Διπλωματική Εργασία

της

Λουκίας Χρυσούλα

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

Αθήνα, Μάιος 2013



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών & Ηλεκτρονικών Ισχύος

**Προβλεπτικός Έλεγχος βάσει Μοντέλου
εφαρμοσμένος σε Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα
Μικτής Συνδεσμολογίας**

Διπλωματική Εργασία

της

Λουκίας Χρυσούλα

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 13^η Μαΐου, 2013.

Αντώνιος Κλαδάς

Στέφανος Μανιάς

Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2013

Λουκία Χρυσούλα

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

Copyright © – All rights reserved Λουκία Χρυσούλα, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο για την ανάλυση της διαχείρισης ενέργειας σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα που βασίζεται σε κατάλληλη τεχνική προβλεπτικού ελέγχου, η οποία επιτρέπει ολική βελτιστοποίηση σε συνδυασμό με επιμέρους ηλεκτρικά μοντέλα των συνιστωσών του συστήματος. Σε ένα πρώτο βήμα μελετήθηκε η σύγχρονη δομή και τεχνολογία των υβριδικών οχημάτων και επιχειρήθηκε κατηγοριοποίησή τους. Αναδείχθηκαν τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα των εναλλακτικών τοπολογιών διαμόρφωσης ηλεκτρικών υβριδικών οχημάτων και η καταλληλότητά τους σε τυπικές διαφορετικές συνθήκες οδήγησης. Εξετάστηκε η εφαρμογή του προτεινόμενου προβλεπτικού ελέγχου και συγκρίθηκε με τον συμβατικό ντετερμινιστικό έλεγχο. Το μοντέλο αναφοράς προσομοίωσε ένα τυπικό υβριδικό ηλεκτρικό όχημα σειριακής/εν παραλλήλω τοπολογίας και αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab®/Simulink®. Η εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου αποσκοπεί στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου τηρώντας πάντα τον επιβαλλόμενο κύκλο οδήγησης και τους περιορισμούς που υποβάλλονται από την επιθυμητή λειτουργία του οχήματος. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου πραγματοποιήθηκε με εκείνα που προέκυψαν από τον συμβατικό ντετερμινιστικό έλεγχο στις ίδιες συνθήκες οδήγησης σε περιπτώσεις τριών κύκλων πόλης. Η σύγκριση αυτή ανέδειξε ότι ο προβλεπτικός έλεγχος είναι δυνατόν να συμβάλει στην εξοικονόμηση καυσίμου σε ορισμένες περιπτώσεις οδήγησης.

Λέξεις Κλειδιά

Λογισμικό προσομοίωσης λειτουργίας οχήματος, προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου, σειριακή/εν παραλλήλω τοπολογία κινητηρίου συστήματος, τεχνικές ελέγχου συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα

Abstract

In this thesis, a new model has been developed aiming at the analysis of power management in hybrid electric vehicles which is based on predictive control technique for global optimization in conjunction with individual electric models of all system components. In a first step was studied the modern structure and technology of hybrid vehicles and a categorization was proposed. The advantages and disadvantages of alternative topologies were highlighted in order to illustrate the specific electric hybrid vehicles configuration suitability for typical driving conditions. The application of predictive control has been compared to conventional deterministic control. The reference model simulates a typical hybrid electric vehicle series/parallel topology which is developed in Matlab®/Simulink® software. The application of model-based predictive control aims at reducing fuel consumption while respecting the imposed driving cycle and constraints of the considered operation of the vehicle. The results of the proposed methodology were compared systematically to those of the conventional deterministic control under the same driving conditions. This comparison illustrated that the proposed predictive control technique can offer important services to fuel consumption savings under specific driving conditions.

Keywords

Vehicle operation simulation software, model based predictive control, series/parallel configuration, electric drive system control techniques, hybrid electric vehicles

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν με τον δικό τους τρόπο στην εκπόνηση και ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος και τις πολύτιμες συμβουλές του. Ακόμη, ευχαριστώ τον διδάκτορα κ. Χαράλαμπο Πάτσιο για τη συνεχή καθοδήγηση και την πρόθυμη συνδρομή του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου για τη βοήθεια και την ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και για την κατανόησή τους.

Ειδικότερα, για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας είμαι ευγνώμων στην Κατερίνα, τον Χρήστο και τον Βαγγέλη, οι οποίοι με στήριξαν έμπρακτα με τον δικό τους τρόπο.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου και ιδιαίτερος στους γονείς μου, οι οποίοι βρίσκονταν πάντα στο πλάι μου σε κάθε βήμα της ζωής μου, σεβόμενοι τους στόχους και τις επιθυμίες μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	12
1.1. Γενική τοποθέτηση του θέματος.....	12
1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	12
2. Υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα	14
2.1. Ιστορική αναδρομή	14
2.2. Γενικά.....	16
2.3. Κατηγοριοποίηση οχημάτων	17
2.4. Αξιολόγηση των υβριδικών - ηλεκτρικών οχημάτων	30
3. Συνήθεις τύποι ηλεκτρικών μηχανών στα υβριδικά οχήματα	33
3.1. Επαγωγικός τριφασικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος.....	34
3.2. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη	35
3.3. Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη	37
3.4. Αξιολόγηση.....	38
4. Τεχνολογία μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος	39
4.1. Μετατροπείς ισχύος	40
4.2. Ημιαγωγοί ηλεκτρονικών ισχύος.....	44
5. Όχημα και περιβάλλον	47
5.1. Περιβαλλοντικός αντίκτυπος.....	47
5.2. Τεχνικές εξοικονόμησης καυσίμου	50
6. Συστήματα αποθήκευσης και μετατροπής ενέργειας	54
6.1. Αποθήκευση ενέργειας	54
6.2. Μετατροπή ενέργειας.....	60
7. Στρατηγικές ελέγχου	63
7.1. Στρατηγικές ελέγχου βάσει κανόνων	63
7.1.1. Ασαφής λογική βασισμένη σε κανόνες	64
7.1.2. Ντετερμινιστικές μέθοδοι βασισμένες σε κανόνες	65

7.2.	Στρατηγικές ελέγχου βασισμένες στη βελτιστοποίηση.....	66
7.2.1.	Ολική βελτιστοποίηση	67
7.2.2.	Βελτιστοποίηση πραγματικού χρόνου.....	68
8.	Προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου	70
8.1.	Θεμελίωση	70
8.2.	Τρόποι μοντελοποίησης συστήματος οχήματος.....	73
8.3.	Μοντέλο κατάστασης – χώρου	74
8.4.	Προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου σε περιβάλλον Simulink®	80
8.5.	Αξιολόγηση προβλεπτικού ελέγχου	92
9.	Ανάπτυξη μοντέλου υβριδικού οχήματος.....	94
9.1.	Παρουσίαση των υποσυστημάτων	94
9.2.	Ντετερμινιστικός έλεγχος.....	103
9.3.	Εφαρμογή προβλεπτικού ελέγχου στο μοντέλο	104
9.4.	Γραμμικοποίηση μοντέλου	105
10.	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	107
10.1.	Τρόπος σύγκρισης αποτελεσμάτων	107
10.2.	Αστικός κύκλος οδήγησης στις ΗΠΑ	108
10.3.	Αστικός κύκλος οδήγησης Ευρώπης.....	125
10.4.	Μικτός κύκλος οδήγησης.....	141
11.	Συμπεράσματα	155
11.1.	Κύρια συμπεράσματα.....	156
11.2.	Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας	157
11.3.	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	157
	Κατάλογος ακρωνυμίων	158
	Βιβλιογραφία.....	160

1. Εισαγωγή

1.1. Γενική τοποθέτηση του θέματος

Μείζον ζήτημα της εποχής που διανύουμε αποτελεί η αντιμετώπιση των οικολογικών προβλημάτων, τα οποία κατά κύριο λόγο οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα και λιγότερο σε τυχαία αίτια. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η τρύπα του όζοντος, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η μείωση της βιοποικιλότητας είναι τα σημαντικότερα οικολογικά προβλήματα που εντείνονται στην εποχή μας.

Ο άνθρωπος επιβαρύνει το περιβάλλον με ποικίλες λειτουργίες της καθημερινής δραστηριότητας είτε εκουσίως είτε ακουσίως. Ο τομέας των μεταφορών φέρει βαρύτερη ευθύνη για την επιδείνωση του οικολογικού προβλήματος, με αποτέλεσμα οι προσπάθειες των μηχανικών των αυτοκινητοβιομηχανιών να έχουν στραφεί στην κατασκευή ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων και σε άλλες διατάξεις εξομάλυνσης του περιβαλλοντικού αντίκτυπου.

Στην εργασία αυτή, στα πλαίσια μείωσης των ρύπων από τον τομέα των μεταφορών, αναλύεται η τεχνολογία των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων και εξετάζονται οι επιπτώσεις διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου του συστήματός τους. Πιο συγκεκριμένα αναπτύσσεται μοντέλο με βάση τον προβλεπτικό έλεγχο, το οποίο αναδεικνύεται κατάλληλο για εξοικονόμηση καυσίμου σε σύγκριση με τον συμβατικό ντετερμινιστικό έλεγχο.

1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική αυτή εργασία αναπτύσσεται σε έντεκα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, μετά από τη γενική εισαγωγή του θέματος, αναλύονται οι ενότητες της διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η τεχνολογία των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων και στο τρίτο αναφέρονται οι σημαντικότεροι τύποι των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται στα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι μετατροπείς ισχύος που εφαρμόζονται συνήθως στην υβριδική τεχνολογία οχημάτων. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι σύγχρονες τεχνικές εξοικονόμησης καυσίμου που χρησιμοποιούνται στα υβριδικά

οχήματα, ενώ στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται οι μονάδες αποθήκευσης και μετατροπής ενέργειας με έμφαση στις μπαταρίες.

Στο έβδομο κεφάλαιο επιχειρείται μία επισκόπηση των συνηθέστερων στρατηγικών ελέγχου του συστήματος λειτουργίας του οχήματος και παρατίθεται κατηγοριοποίησή τους. Στο όγδοο κεφάλαιο αναλύονται η λογική, ο αλγόριθμος και οι βασικές αρχές του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου. Ακόμη, παρουσιάζονται τα εναλλακτικά μοντέλα του εν λόγω ελέγχου. Επίσης, περιγράφεται η λειτουργία της εργαλειοθήκης του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου σε περιβάλλον Simulink[®]/Matlab[®].

Το ένατο κεφάλαιο αναλύει το μοντέλο του υβριδικού οχήματος σειριακής/εν παραλλήλω τοπολογίας σε περιβάλλον Simulink[®]/Matlab[®] με εστίαση στα κομβικά σημεία λειτουργίας και ενεργειακής κατανομής του οχήματος. Επιπλέον, εξετάζονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά, τα μεγέθη και οι παράμετροί του. Τέλος, αναλύεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε βασισμένη σε προβλεπτικό έλεγχο για την ενσωμάτωση στο συνολικό μοντέλο του οχήματος.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τρεις κύκλους οδήγησης που αναφέρονται σε τυπική ομαλή κίνηση του οχήματος σε πόλεις και δύο εναλλακτικές διαδρομές με ανομοιόμορφες, πυκνότερες και αραιότερες στάσεις αντίστοιχα. Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το ενδέκατο κεφάλαιο, όπου ανακεφαλαιώνονται τα συμπεράσματα και αναφέρονται τα κύρια σημεία συνεισφοράς της εργασίας, αλλά και ζητήματα που αναδείχθηκαν για περαιτέρω διερεύνηση.

2. Υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε στην εξέλιξη της τεχνολογίας των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων και επιχειρείται η κατηγοριοποίησή τους βάσει ορισμένων κριτηρίων.

2.1. Ιστορική αναδρομή

Το χρονικό διάστημα 1890 - 1905 τα ηλεκτρικά οχήματα, τα εσωτερικής καύσης και τα οχήματα ατμού διατίθεντο και πωλούνταν σε ανταγωνιστικές τιμές στις Ηνωμένες Πολιτείες. Τα ηλεκτρικά οχήματα είχαν από νωρίς το προβάδισμα της ανάπτυξης στις ΗΠΑ χάρη στο έργο πρωτοπόρων της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ο T. Edison, ο N. Tesla και ο G. Westinghouse [3].

Στα τέλη του 19^{ου} και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, η περιορισμένη αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν επαρκής για τις μικρές πόλεις των ΗΠΑ, καθώς στις μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των πόλεων οι δρόμοι ήταν ακατάλληλοι για ταξίδι. Ωστόσο, ήταν εμφανές εξαρχής ότι οι μπαταρίες περιόριζαν σημαντικά το εύρος και τη χρησιμότητα των ηλεκτρικών οχημάτων.

Αν και οι περισσότεροι σχεδιαστές κατευθύνθηκαν αμέσως στην κατασκευή οχημάτων εσωτερικής καύσης, μερικοί προσπάθησαν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα του ηλεκτρικού και του συμβατικού - μηχανής εσωτερικής καύσης - αυτοκινήτου.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970 η ανησυχία για την ατμοσφαιρική ρύπανση ανανέωσε το ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα. Εκείνη την εποχή, ήταν διαδεδομένη η άποψη ότι η μηχανή εσωτερικής καύσης ήταν εκ φύσεως εξαιρετικά ρυπογόνα και επιβαλλόταν η αντικατάστασή της για την εξάλειψη των καυσαερίων.

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles - BEV) ήταν εύλογα μία εναλλακτική λύση, καθώς είχαν μηδενικές εκπομπές εν λειτουργία. Ωστόσο, το μικρό εύρος και το υψηλό κόστος των μπαταριών εξακολούθησε να είναι ανυπέρβλητο πρόβλημα.

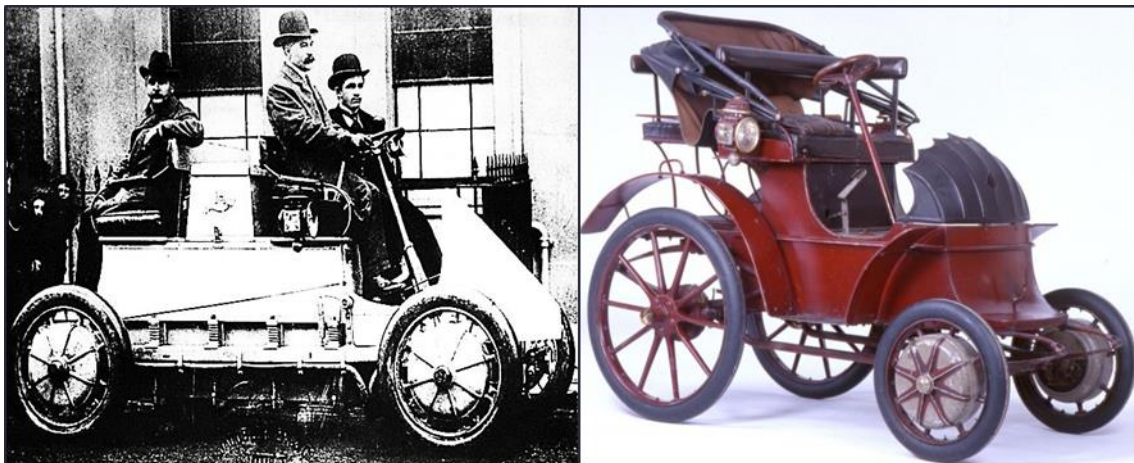
Οι πετρελαϊκές κρίσεις του 1973 και του 1979 έκανε την αυτοκινητοβιομηχανία να αλλάξει γραμμή πλεύσης. Οι ελλείψεις βενζίνης και η εκτίναξη των τιμών των

καυσίμων έκαναν το κοινό να απαιτήσει ξαφνικά οχήματα υψηλότερης απόδοσης, εκτός από φιλικά προς το περιβάλλον.

Καθώς οι τιμές των καυσίμων μειώθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και παρέμειναν χαμηλές κατά τη διάρκεια της δεκαετίας, το αγοραστικό κοινό σταδιακά αμέλησε το ζήτημα της οικονομίας καυσίμου. Μέχρι το 1990, το αγοραστικό κοινό διεκδικούσε υψηλές αποδόσεις όχι στην οικονομία καυσίμου, αλλά στην πολυτέλεια, τις επιδόσεις και τη χρησιμότητα.

Η μέση οικονομία καυσίμου των νέων αυτοκινήτων και ελαφρών φορτηγών κορυφώθηκε το 1987 και σταδιακά μειώνεται από τότε. Αντιθέτως, η υπερθέρμανση του πλανήτη, ως οικολογικό πρόβλημα οφειλόμενο και στα μέσα μεταφοράς, έγινε ιδιαίτερος έντονο [4].

Το πρώτο υβριδικό όχημα ονόματι «Mixte» (Εικόνα 1) ήταν έμπνευση του Ferdinand Porsche και παρήχθη από την αυστριακή εταιρεία Jacob Lohner & Co το 1899 [5]. Το πλαίσιο και το αμάξωμα ήταν κατασκευασμένα από ξύλο. Σε κάθε τροχό ήταν τοποθετημένος ένας κινητήρας ισχύος 2,5 – 3,5 hp. Το όχημα διέθετε, επίσης, μπαταρία 80 V αποτελούμενη από 44 κυψέλες. Το σύστημα μετάδοσης ήταν σειριακό, με μία γεννήτρια να παρέχει ηλεκτρισμό για να οδηγεί τους τέσσερις ηλεκτρικούς κινητήρες. Το συνολικό βάρος ήταν 1500 kg [6].



Εικόνα 1: Όχημα Lohner-Porsche Mixte Voiturette

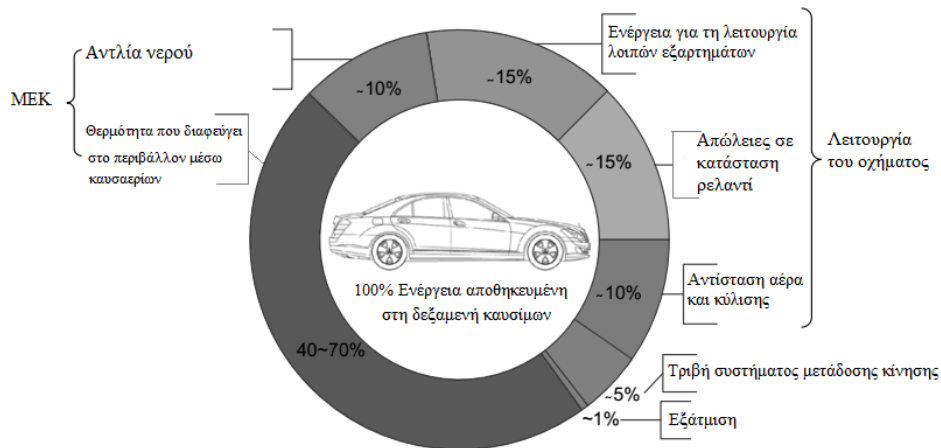
2.2. Γενικά

Συμβατικό όχημα εσωτερικής καύσης

Τα συμβατικά οχήματα, τα οποία φέρουν μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) παρέχουν καλή επίδοση και μεγάλο εύρος λειτουργίας χάρη στα πλεονεκτήματα της βενζίνης. Εντούτοις, συμβάλλουν σημαντικά στην ατμοσφαιρική ρύπανση και απαιτούν συχνό ανεφοδιασμό καυσίμου, άρα και οικονομική σπατάλη [7]. Η χαμηλή τους απόδοση στην οικονομία καυσίμου οφείλεται κατά κύριο λόγο:

- στις απώλειες της κινητικής ενέργειας κατά την πέδηση ιδίως εντός πόλης,
- στη μικρή απόδοση του υδραυλικού συστήματος μετάδοσης σε μοτίβα σταματήματος - εκκίνησης
- στη χαμηλή απόκριση της μηχανής εσωτερικής καύσης στις απαιτήσεις του οδηγού.

Στην Εικόνα 2 φαίνεται μία ενδεικτική κατανομή της θερμογόνου δύναμης που εμπεριέχεται στην καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου. Παρατηρούμε πως το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμογόνου δύναμης διοχετεύεται στο περιβάλλον ως θερμική ενέργεια [23].



Εικόνα 2: Η τυπική ενεργειακή ροή ενός συμβατικού οχήματος εσωτερικής καύσης

Ηλεκτρικό όχημα

Τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, εκείνα δηλαδή που τροφοδοτούνται μόνο από μπαταρίες (Electric Vehicles - EV), εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών οχημάτων, όπως υψηλή ενεργειακή απόδοση και μηδενική περιβαλλοντική επιβάρυνση [7]. Παρ'όλα αυτά, η οδηγική επίδοση του οχήματος και ιδιαίτερα το εύρος λειτουργίας ανά φόρτιση μπαταριών είναι λιγότερο ανταγωνιστικά σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα.

Το κύριο συμπέρασμα είναι πως το μεν συμβατικό όχημα, αν και αρκετά ρυπογόνο, ικανοποιεί τις απαιτήσεις του οδηγού, το δε ηλεκτρικό, αν και εκπέμπει μηδενικούς ρύπους, καλύπτει τις ανάγκες του οδηγού εν μέρει.

Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα

Το όχημα που γεφυρώνει τα πλεονεκτήματα των δύο προαναφερθέντων οχημάτων και εξαλείφει τα μειονεκτήματά τους είναι το υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (HEV), το οποίο χρησιμοποιεί δύο κινητήριες πηγές, έναν ηλεκτρικό κινητήρα και μία μηχανή εσωτερικής καύσης.

Σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν περισσότερο ηλεκτρικό εξοπλισμό, όπως ηλεκτρικές μηχανές, ηλεκτρονικά ισχύος, ηλεκτρονική συνεχώς μεταβαλλόμενη μετάδοση (CVT), ενσωματωμένους ελεγκτές μετάδοσης, προηγμένες διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης και εξελιγμένους μετατροπείς ενέργειας.

Συνεπώς, το υβριδικό ηλεκτρικό όχημα συνδυάζει την ταχεία επιτάχυνση που προσφέρει ο ηλεκτρικός κινητήρας με την ορθή λειτουργία σε σταθερές ταχύτητες που προσφέρει η μηχανή εσωτερικής καύσης, επιβαρύνοντας κατά το ελάχιστο το περιβάλλον.

2.3. Κατηγοριοποίηση οχημάτων

Τα οχήματα μπορούν να χαρακτηριστούν ως «υβριδικά» βάσει των εξής κριτηρίων:

- του είδους της ενέργειας που χρησιμοποιούν
- του βαθμού υβριδοποίησής τους
- της διάταξης του κινητήριου συστήματός τους

- του είδους καυσίμου που καταναλώνουν

Κατηγοριοποίηση ως προς το είδος της ενέργειας

Βάσει της ενέργειας που χρησιμοποιούν και των μετατροπών της, τα οχήματα κατατάσσονται σε:

- Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα
- Υβριδικά μηχανικά οχήματα
- Υβριδικά υδραυλικά οχήματα
- Υβριδικά θερμικά οχήματα

Κατηγοριοποίηση ως προς τον βαθμό υβριδοποίησης

Ορίζουμε ως *βαθμό υβριδοποίησης* τον λόγο της ισχύος του ηλεκτροκινητήρα (ή των ηλεκτροκινητήρων) προς τη συνολική ισχύ του οχήματος (άθροισμα της ισχύος του θερμικού κινητήρα και του ηλεκτροκινητήρα ή των ηλεκτροκινητήρων).

Ο βαθμός υβριδοποίησης περιγράφει τον διαμοιρασμό της ισχύος που παρέχεται από τον ηλεκτρικό κινητήρα ή της ενέργειας που παρέχεται από την αποθήκη ενέργειας σε έναν κύκλο οδήγησης. Είναι ένα ποσοστό εντός του διαστήματος 0% – 100%.

Ο μηδενικός βαθμός υβριδοποίησης χαρακτηρίζει ένα κοινό όχημα με μηχανή εσωτερικής καύσης χωρίς ηλεκτρικό κινητήρα. Βαθμός ίσος με 100% αναπαριστά ένα καθαρά ηλεκτρικό όχημα χωρίς καμία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας και μονάδα ενεργειακής μετατροπής. Όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός υβριδοποίησης, τόσο μεγαλύτερα οφέλη προκύπτουν ως προς την κατανάλωση καυσίμου, τον θόρυβο και τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων και η Διεθνής Ομοσπονδία Αυτοκινήτου είναι σύμφωνοι με την παρακάτω κατηγοριοποίηση των υβριδικών:

Μικροϋβριδικά (Micro Hybrid)

Τα μικροϋβριδικά οχήματα διαθέτουν τη λειτουργία της αυτόματης κράτησης (διακοπής λειτουργίας) και επανεκκίνησης του κινητήρα (stop and start) και φέρουν ηλεκτροκινητήρα ισχύος 4kW – 6kW, ενώ αναμένεται μία εκτιμώμενη βελτίωση της κατανάλωσης ίση με 5% – 7%. Το ηλεκτρικό σύστημα δεν προορίζεται για συμμετοχή στην πρόωση [7].

→ Συντελεστής υβριδοποίησης $\cong 5\%$

Ήπια Υβριδικά (Mild Hybrid)

Συνήθως αυτό το είδος οχήματος διαθέτει παράλληλη συνδεσμολογία [8]. Εκτός της λειτουργίας αυτόματης κράτησης και επανεκκίνησης διαθέτουν επιπρόσθετα τη συμμετοχή του ηλεκτροκινητήρα στην πρόωση και την ανάκτηση ενέργειας. Ο κινητήρας είναι ισχύος $10kW - 15kW$.

Σε πολύ μικρές αποστάσεις και ταχύτητες (λ.χ. κυκλοφοριακή συμφόρηση) υπάρχει η δυνατότητα του οχήματος να κινείται αμιγώς ηλεκτρικά. Ενδείκνυται για οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο, ενώ αναμένεται μία εκτιμώμενη βελτίωση κατανάλωσης ίση με $12\% - 18\%$.

→ Συντελεστής υβριδοποίησης $\cong 10\%$.

Πλήρως Υβριδικά (Full Hybrid)

Χαρακτηριστικός εκπρόσωπος πλήρους υβριδικού οχήματος είναι το Toyota Prius. Τα πλήρως υβριδικά οχήματα διαθέτουν όλες τις λειτουργίες των προαναφερθέντων με την επιπλέον δυνατότητα να κινούνται ως αμιγώς ηλεκτρικά στις χαμηλές ταχύτητες και στα χαμηλά φορτία (EV Mode). Φέρουν ηλεκτροκινητήρα (ή ηλεκτροκινητήρες) ισχύος $30kW - 50kW$, ενώ αναμένεται μία εκτιμώμενη βελτίωση της κατανάλωσης ίση με $20\% - 25\%$. Ο διαμοιρασμός της ισχύος επιτυγχάνεται μέσω πλανητικών μειωτήρων.

→ Συντελεστής υβριδοποίησης $\cong 25\%$.

Κατηγοριοποίηση ως προς τη διάταξη του κινητήριου συστήματος

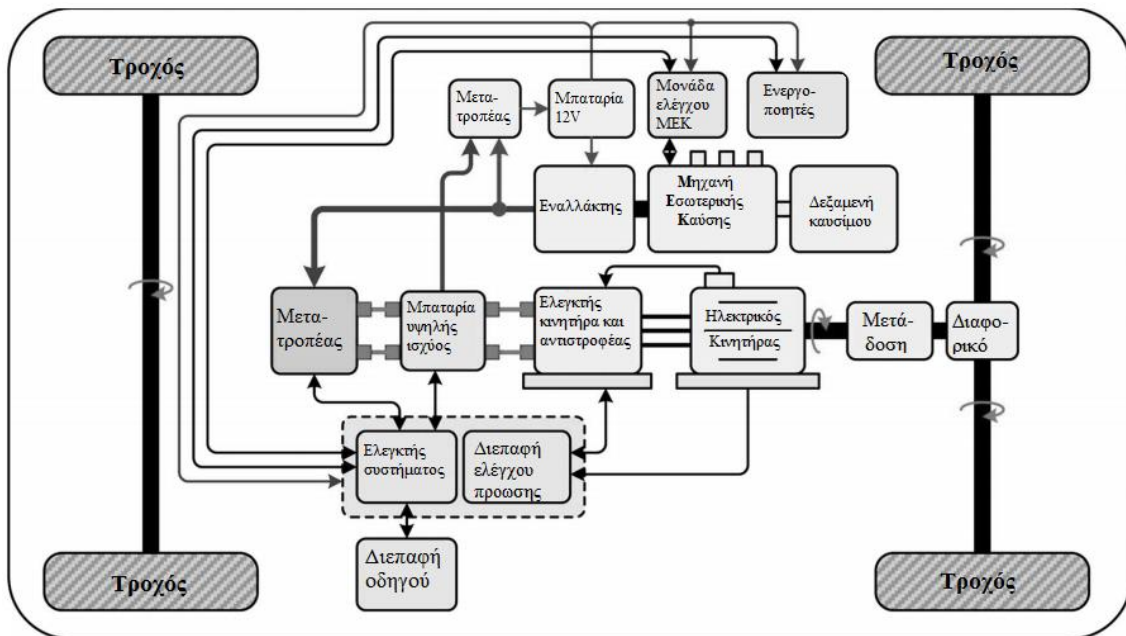
Ο κύριος στόχος σχεδίασης ενός υβριδικού οχήματος είναι η μεταφορά ενέργειας από τις πηγές προς τα φορτία με τις ελάχιστες απώλειες, οι οποίες εξαρτώνται από τους κύκλους οδήγησης [9]. Υπάρχουν τρεις κύριες τοπολογίες υβριδικών οχημάτων:

- Σειριακό υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (Series Hybrid Electric Vehicle - SHEV)
- Εν παραλλήλω υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (Parallel Hybrid Electric Vehicle - PHEV)
- Εν παραλλήλω/σειριακό υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (Parallel/Series Hybrid Electric Vehicle - PSHEV)

Σειριακό υβριδικό ηλεκτρικό όχημα

Το όχημα σειριακής τοπολογίας δε συνδέει μηχανικά τη μηχανή εσωτερικής καύσης με τους τροχούς, καθώς μόνο ο ηλεκτρικός κινητήρας συνδέεται άμεσα στον άξονα μετάδοσης και χρησιμοποιείται για την πρόωση του οχήματος [3]. Η δεύτερη μονάδα μετατροπής ενέργειας (π.χ. μία μηχανή εσωτερικής καύσης) χρησιμοποιείται για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Η μηχανή εσωτερικής καύσης συνδέεται στη γεννήτρια, η οποία με τη σειρά της χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει τον κινητήρα ή/και να φορτίσει τις μπαταρίες. Η μπαταρία φορτίζεται από τη σειρά της μηχανής εσωτερικής καύσης και της γεννήτριας και στην περίπτωση της αναγεννητικής πέδησης μέσω του ηλεκτρικού κινητήρα [7,8]. Η ακριβής συνδεσμολογία απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 3 [15].



Εικόνα 3: Σειριακό υβριδικό όχημα

Τα ηλεκτρονικά ισχύος που συμπεριλαμβάνονται στην τοπολογία είναι: ένας μετατροπέας της εξόδου της γεννήτριας («alternator» στην Εικόνα 3) σε dc για τη φόρτιση των μπαταριών και ένας αντιστροφέας για τη μετατροπή της dc ισχύος σε ac για την πρόωση του κινητήρα σε περίπτωση που είναι επαγωγικός.

Συμπληρωματικά προς τις μπαταρίες μπορούν να προστεθούν στο όχημα υπερπυκνωτές (προαιρετικά) για την επιμήκυνση του κύκλου ζωής και τη βελτίωση της απόδοσης των μπαταριών.

Φάσεις λειτουργίας [7,47]

1. Αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία

Η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι απενεργοποιημένη και το όχημα κινείται καταναλώνοντας ενέργεια από τις μπαταρίες.

2. Αποκλειστική λειτουργία της μηχανής εσωτερικής καύσης

Η ισχύς για την κίνηση του οχήματος προέρχεται από το σύμπλεγμα μηχανής εσωτερικής καύσης-γεννήτριας, ενώ οι μπαταρίες ούτε παρέχουν ούτε απορροφούν ισχύ από τον άξονα μετάδοσης κίνησης. Οι ηλεκτρικές μηχανές λειτουργούν ως ηλεκτρική μετάδοση από τη μηχανή εσωτερικής καύσης στους τροχούς.

3. Υβριδική λειτουργία

Η ισχύς για την κίνηση απορροφάται και από τις μπαταρίες (και τους υπερπυκνωτές) και από τη μηχανή εσωτερικής καύσης αν η απαιτούμενη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα είναι μεγαλύτερη από την ισχύ εξόδου της γεννήτριας.

4. Φόρτιση μπαταριών και κίνηση από τη μηχανή εσωτερικής καύσης (Μικρό φορτίο)

Το σύμπλεγμα μηχανής εσωτερικής καύσης - γεννήτριας παρέχει ισχύ για τη φόρτιση των μπαταριών (και των υπερπυκνωτών) και την πρόωση του οχήματος αν η απαιτούμενη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα είναι μικρότερη από την ισχύ εξόδου της γεννήτριας.

5. Λειτουργία αναγεννητικής πέδησης

Ο ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια. Η ισχύς που παράγεται χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των μπαταριών.

6. Λειτουργία φόρτισης μπαταριών

Ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν απορροφά ισχύ και το σύμπλεγμα μηχανής εσωτερικής καύσης - γεννήτριας φορτίζει τις μπαταρίες.

7. Υβριδική λειτουργία φόρτισης μπαταριών

Το σύμπλεγμα μηχανής εσωτερικής καύσης-γεννήτριας και ο ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργούν ως γεννήτριες για τη φόρτιση των μπαταριών.

Πλεονεκτήματα

1. Λιγότεροι μηχανικοί σύνδεσμοι και απλός σχεδιασμός κατά ενότητες.
2. Η λειτουργία της μηχανής εσωτερικής καύσης μπορεί να εξομαλυνθεί ή να περιοριστεί στο βέλτιστο σημείο.
3. Ο θόρυβος και οι δονήσεις της μηχανής εσωτερικής καύσης μπορούν εύκολα να ελαχιστοποιηθούν.

4. Το μέγεθος της μηχανής εσωτερικής καύσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί για να ικανοποιήσει τη μέση ισχύ που είναι απαραίτητη.
5. Η μηχανή εσωτερικής καύσης απενεργοποιείται, όταν δεν είναι απαραίτητη.
6. Βελτιώνεται η οικονομία καυσίμου και μειώνονται οι εκπομπές ρύπων.

Μειονεκτήματα [10]

1. Χρειάζονται τρεις συνιστώσες πρόωσης: η μηχανή εσωτερικής καύσης, η γεννήτρια και ο κινητήρας.
2. Και οι τρεις συνιστώσες πρόωσης θα πρέπει να είναι διαστασιολογημένες για τη μέγιστη ισχύ για μακρινές διαδρομές αδιάλειπτης και υψηλής ταχύτητας οδήγησης. Αυτό είναι αναγκαίο, καθώς διαφορετικά οι συσσωρευτές θα εκφορτιστούν με ραγδαίο ρυθμό αφήνοντας τη μηχανή εσωτερικής καύσης να παρέχει όλη την ισχύ μέσω γεννήτριας.
3. Η ανάγκη μετατροπής της εξόδου της μηχανής εσωτερικής καύσης σε ηλεκτρισμό πριν το στάδιο του κινητήρα δημιουργεί ανεπάρκειες αν ως πρωτεύουσα πηγή ισχύος χρησιμοποιείται η μηχανή εσωτερικής καύσης.
4. Απαιτούνται μεγάλες συστοιχίες μπαταριών, οι οποίες αυξάνουν το κόστος και μειώνουν την απόδοση του αυτοκινήτου.
5. Απώλειες μετατροπής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική εντός της μηχανής εσωτερικής καύσης και στη συχνή διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας αν οι απαιτήσεις μέσης ισχύος είναι υψηλές, δηλαδή στη γρήγορη οδήγηση.
6. Ο κινητήρας πρέπει να είναι σχεδιασμένος για να αποδώσει τη μέγιστη συνεχή ισχύ που το όχημα πιθανόν απαιτήσει, όπως για παράδειγμα κατά την ανάβαση σε μεγάλη κλίση. Ωστόσο, το όχημα λειτουργεί σε σημείο χαμηλότερο της μέγιστης ισχύος τον περισσότερο χρόνο.

Συμπέρασμα

Το σειριακό υβριδικό ηλεκτρικό όχημα είναι μία ακριβή λύση και όχι ιδιαίτερα αποδοτική. Είναι, όμως, κατάλληλο για την πόλη και για αυτοκίνητα και λεωφορεία σύντομων διαδρομών συμπεριλαμβανομένων και των στρατιωτικών, καθώς η μηχανή εσωτερικής καύσης λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο της κατά το σταμάτημα και την εκκίνηση.

5. Φόρτιση μπαταριών από τη μηχανή εσωτερικής καύσης (Μικρό φορτίο)

Αν η απαιτούμενη ισχύς από τη μετάδοση είναι μικρότερη από την έξοδο της μηχανής εσωτερικής καύσης, η εναπομείνουσα ισχύς χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των μπαταριών. Τότε, ο ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια και απορροφά ενέργεια από τη μηχανή εσωτερικής καύσης.

Πλεονεκτήματα

1. Χρειάζονται μόνο δύο συνιστώσες πρόωσης: η μηχανή εσωτερικής καύσης και η ηλεκτρική μηχανή.
2. Ακόμα και με μικρή μπαταρία επιτυγχάνονται μεγάλες αποδόσεις, με αποτέλεσμα το όχημα να απαλλάσσεται από το επιπλέον κόστος της μπαταρίας και την επιβάρυνση της απόδοσης εξαιτίας του βάρους της.
3. Η μηχανή εσωτερικής καύσης μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα το αυτοκίνητο.
4. Δεν απαιτούνται εκτεταμένες αλυσίδες μετατροπής ενέργειας με τις συνακόλουθες απώλειες.
5. Ο κινητήρας και η γεννήτρια μπορούν να είναι μικρότεροι και λιγότερο δαπανηροί.
6. Μία μικρότερη μηχανή εσωτερικής καύσης και ένας μικρότερος κινητήρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη της ίδιας απόδοσης, έως ότου εξαντληθούν οι μπαταρίες.

Μειονεκτήματα

1. Η πολυπλοκότητα ελέγχου αυξάνεται σημαντικά, καθώς η ροή ισχύος πρέπει να ρυθμιστεί και να συνδυαστεί από τις δύο παράλληλες πηγές.
2. Ο συνδυασμός ισχύος από την μηχανή εσωτερικής καύσης και τον κινητήρα απαιτεί μία σύνθετη μηχανική διάταξη.

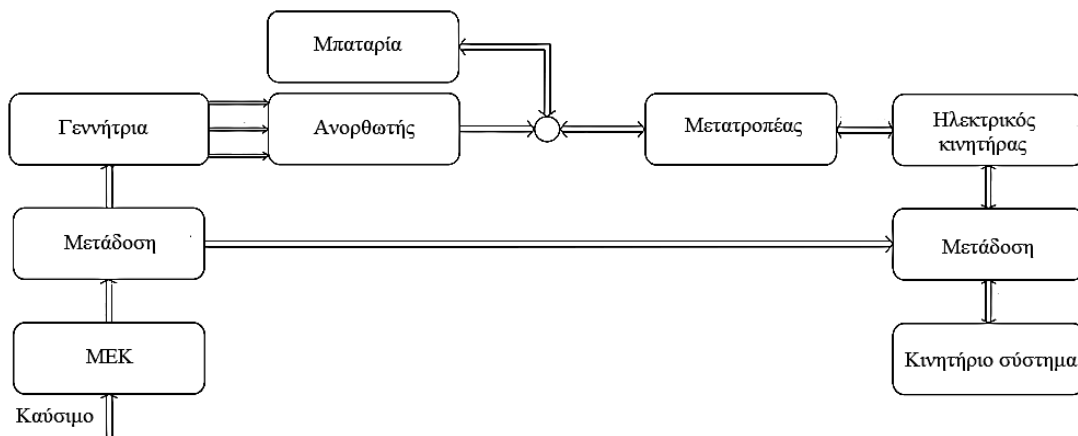
Συμπέρασμα

Το εν παραλλήλω υβριδικό ηλεκτρικό όχημα ενδείκνυται για την οδήγηση σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους, όπου δεν απαιτούνται απότομες και μεγάλες διακυμάνσεις ταχύτητας, καθώς η μηχανή εσωτερικής καύσης λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο της σε σταθερή ταχύτητα του οχήματος. Εκπρόσωπος του συγκεκριμένου είδους είναι το Honda Insight, το Ford Escape Hybrid SUV και το Lexus Hybrid SUV.

Εν παραλλήλω/σειριακό υβριδικό ηλεκτρικό όχημα

Εναλλακτικά, η τοπολογία αυτή ονομάζεται «τοπολογία διαμοιρασμού ισχύος» (Power Split Vehicle), καθώς μέσω ενός πλανητικού συστήματος γρاناζιών διαμοιράζεται η ισχύς της μηχανής εσωτερικής καύσης στη γεννήτρια ή στους τροχούς. Πρόκειται για ένα πολύ ευφύες, αλλά εξαιρετικά πολύπλοκης λειτουργίας σύστημα.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας και η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι συζευγμένοι με το πλανητικό σύστημα γρاناζιών, ούτως ώστε το όχημα να μπορεί να κινηθεί αμιγώς ηλεκτρικά. Η συνδεσμολογία των υποσυστημάτων περιγράφεται από το διάγραμμα της Εικόνας 5.

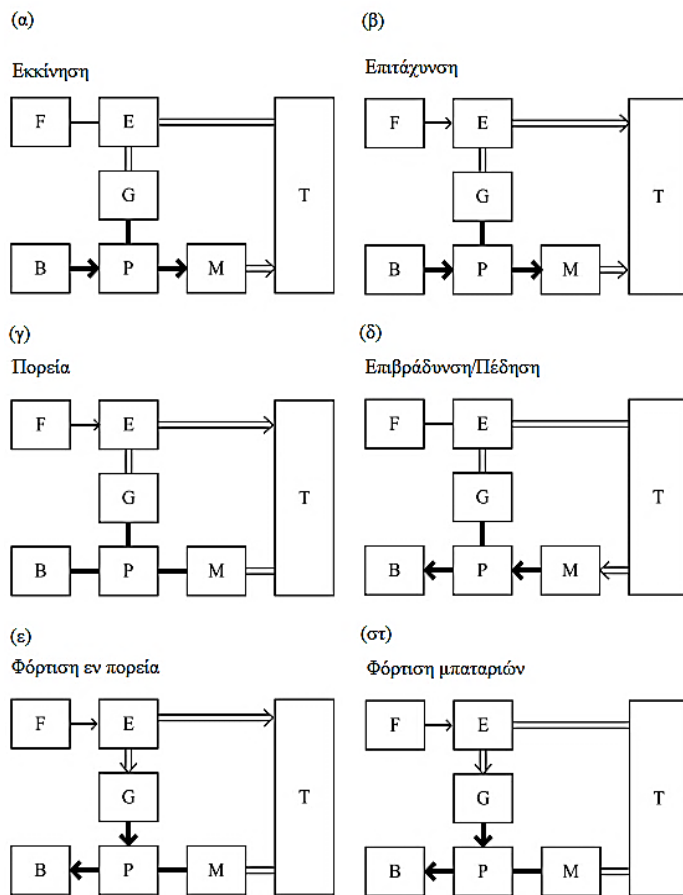


Εικόνα 5: Υβριδικό όχημα διαμοιρασμού ισχύος

Καθώς η γεννήτρια ελέγχει τη ροπή στη μηχανή εσωτερικής καύσης, της δίνει τη δυνατότητα λειτουργίας στο σημείο μέγιστης απόδοσης σε κάθε ταχύτητα λειτουργίας. Υπάρχουν πολλές πιθανές καταστάσεις λειτουργίας για να διεξαχθεί ο έλεγχος της ροής ισχύος [16], οι οποίες κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: σε εκείνες όπου συμβαίνει έντονη χρήση της μηχανής εσωτερικής καύσης (engine-heavy) και σε εκείνες όπου συμβαίνει έντονη χρήση του ηλεκτρικού κινητήρα (electric-heavy).

Κατάσταση έντονης χρήσης μηχανής εσωτερικής καύσης

Η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι πιο ενεργή από τον ηλεκτρικό κινητήρα για την πρόωση του οχήματος. Οι φάσεις λειτουργίας της κατάστασης αυτής παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 6.



Εικόνα 6: Κατάσταση έντονης χρήσης MEK

(α)

Μόνο η μπαταρία παρέχει ισχύ, ενώ η MEK είναι ανενεργή.

(β)

Η MEK και η μπαταρία παρέχουν αναλογικά την απαιτούμενη ισχύ.

(γ)

Μόνο η MEK κινεί το όχημα, ενώ ο κινητήρας παραμένει ανενεργός.

(δ)

Ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια και φορτίζει την μπαταρία.

(ε)

Η MEK παρέχει ισχύ τόσο για την πρόωση του οχήματος, όσο και για τη φόρτιση των μπαταριών μέσω της γεννήτριας.

(στ)

Ακόμη και εν στάσει, η MEK οδηγεί τη γεννήτρια για τη φόρτιση της μπαταρίας.

B: Μπαταρία

F: Αποθήκη καυσίμου

M: Κινητήρας

G: Γεννήτρια

E: Μηχανή εσωτερικής καύσης

P: Μετατροπέας ισχύος

T: Μετάδοση (σύστημα πέδησης, συμπλέκτες, γρανάζια)

— : Ηλεκτρική

Ηλεκτρική

σύνδεση

— : Υδραυλική

Υδραυλική

σύνδεση

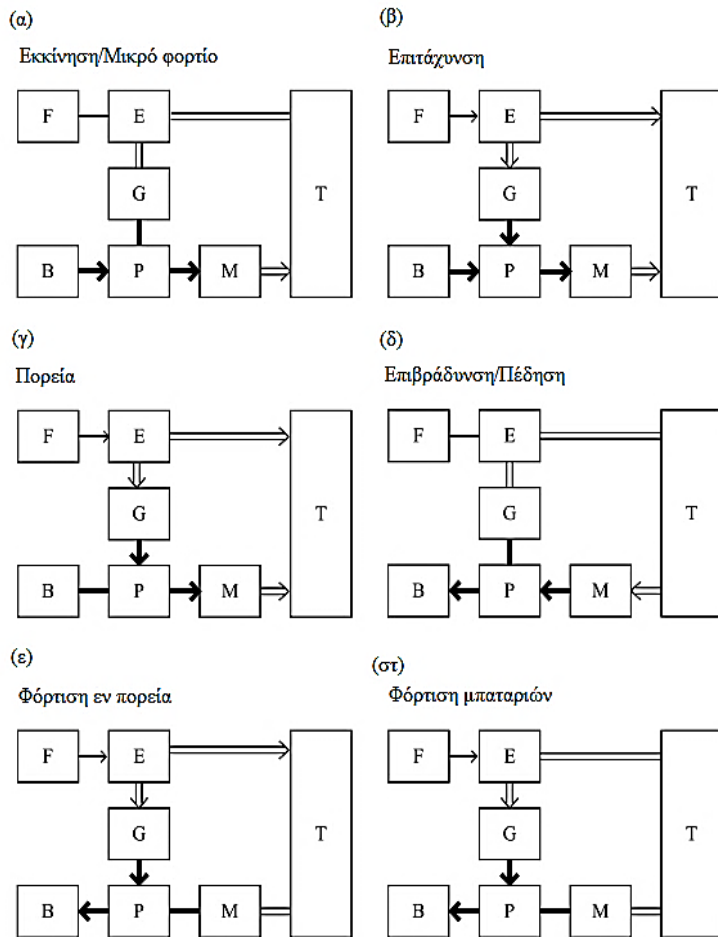
== : Μηχανική

Μηχανική

σύνδεση

Κατάσταση έντονης χρήσης ηλεκτρικού κινητήρα

Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει πρωταγωνιστικό ρόλο στην πρόωση του οχήματος. Αναλυτική παρουσίαση ακολουθεί στην Εικόνα 7.



(α)

Μόνο η μπαταρία παρέχει ισχύ. Η MEK είναι ανενεργή.

(β)

Η MEK και ο ηλεκτροκινητήρας παρέχουν την απαιτούμενη ισχύ. Η ηλεκτρική ισχύς προέρχεται από την μπαταρία και τη γεννήτρια.

(γ)

Η MEK και ο ηλεκτροκινητήρας παρέχουν την απαιτούμενη ισχύ. Η ηλεκτρική ισχύς προέρχεται μόνο από τη γεννήτρια.

(δ)

Ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια και φορτίζει την μπαταρία.

(ε)

Η MEK παρέχει ισχύ για την πρόωση του οχήματος και για τη φόρτιση των μπαταριών μέσω της γεννήτριας.

(στ)

Εν στάσει, η MEK οδηγεί τη γεννήτρια για τη φόρτιση.

Εικόνα 7: Κατάσταση έντονης χρήσης ηλεκτρικού κινητήρα

B: Μπαταρία

F: Αποθήκη καυσίμου

M: Κινητήρας

G: Γεννήτρια

E: Μηχανή εσωτερικής καύσης

P: Μετατροπέας ισχύος

T: Μετάδοση (σύστημα πέδησης, συμπλέκτες, γρανάζια)

— : Ηλεκτρική σύνδεση

— : Υδραυλική σύνδεση

== : Μηχανική σύνδεση

Πλεονεκτήματα υβριδικού οχήματος διαμοιρασμού οχήματος

Η διάταξη διαμοιρασμού ισχύος συνδυάζει μερικά πλεονεκτήματα και των δύο προαναφερθέντων τύπων.

1. Η μηχανή εσωτερικής καύσης δε χρειάζεται να ακολουθήσει την ταχύτητα του οχήματος (ομαλή λειτουργία).
2. Η μηχανή εσωτερικής καύσης μπορεί άμεσα να παράσχει πρόωση στο όχημα.
3. Δεν απαιτείται εκτεταμένη αλυσίδα ενεργειακών μετατροπών.
4. Πλήρως αυτόματο σύστημα μετάδοσης κίνησης
5. Η ύπαρξη σταθερού λόγου γραναζιών συμβάλλει στον περιορισμό των μεταβατικών φαινομένων της μηχανής εσωτερικής καύσης συγκριτικά με το εν παραλλήλω υβριδικό όχημα.

Κατηγοριοποίηση ως προς το είδος καυσίμου

Το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο είναι ορυκτά καύσιμα, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ενέργειας [8]. Η καύση ορυκτών καυσίμων και οξυγόνου (O_2) παράγει ενέργεια με ταυτόχρονη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Τα ανανεώσιμα καύσιμα υπερσχύουν των ορυκτών στα εξής σημεία:

- Τα ορυκτά καύσιμα θα εξαντληθούν στο εγγύς μέλλον, ενώ τα ανανεώσιμα διαρκούν για πάντα.
- Η καύση των ανανεώσιμων καυσίμων δεν παράγει CO_2 . Η κατανάλωση CO_2 για να σχηματιστούν τα ανανεώσιμα καύσιμα βρίσκεται σε ισορροπία με την παραγωγή CO_2 . Επομένως, το καθαρό ισοζύγιο CO_2 είναι μηδενικό.

Τα σημαντικότερα ανανεώσιμα καύσιμα είναι τα εξής: 1) αιθανόλη (αιθυλική αλκοόλη), 2) βιοντίζελ, 3) βιοαέριο, 4) ξύλο και 5) Υδρογόνο.

Η αιθανόλη και το βιοντίζελ παράγονται από ζαχαροκάλαμο ή γογγύλια και επειδή είναι υγρά είναι εύκολο να χρησιμοποιηθούν στην υπάρχουσα τεχνολογία καύσης. Ήδη στη Βραζιλία περίπου 3,5 εκατομμύρια οχήματα κινούνται με μίγμα βενζίνης και αιθανόλης.

Το βιοαέριο και το ξύλο χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε εργοστασιακές μονάδες και όχι για την κίνηση οχημάτων. Η καύση του υδρογόνου αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια στην περίπτωση των οχημάτων κυψελών καυσίμου.

Επομένως, τα ανανεώσιμα καύσιμα αποτελούν μία λύση σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου ή μπαταρίες, όπως στο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα.

Σύγκριση κύριων ειδών ηλεκτρικών οχημάτων

Ηλεκτρικά οχήματα	Μπαταρίας	Υβριδικά οχήματα	Κυψελών καυσίμου υδρογόνου
Πρόωση	<ul style="list-style-type: none"> • Κινητήρας 	<ul style="list-style-type: none"> • Κινητήρας • ΜΕΚ 	<ul style="list-style-type: none"> • Κινητήρας
Ενεργειακό Σύστημα	<ul style="list-style-type: none"> • Μπαταρίες • Υπερπυκνωτές 	<ul style="list-style-type: none"> • Μπαταρίες • Υπερπυκνωτές • Ολοκληρωμένος συνδυασμός εκκινητή-γεννήτριας (ISG) 	<ul style="list-style-type: none"> • Κυψέλες καυσίμου • Μπαταρίες / Υπερπυκνωτές για την εκκίνηση
Πηγές ενέργειας και υποδομή	<ul style="list-style-type: none"> • Ηλεκτρικό δίκτυο 	<ul style="list-style-type: none"> • Πρατήρια βενζίνης • Ηλεκτρικό δίκτυο (για τα plug-in) 	<ul style="list-style-type: none"> • Υδρογόνο
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Μηδενικές εκπομπές • Απεξάρτηση από ακατέργαστα έλαια • Υψηλή ενεργειακή απόδοση 	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ χαμηλές εκπομπές • Μεγάλο εύρος οδήγησης • Μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα 	<ul style="list-style-type: none"> • Μηδενικές ή εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές • Απεξάρτηση από ακατέργαστα έλαια • Υψηλή ενεργειακή απόδοση
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό αρχικό κόστος • Σχετικά μικρό εύρος οδήγησης 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξάρτηση από ακατέργαστα έλαια • Πολυπλοκότητα 	<ul style="list-style-type: none"> • Ικανοποιητικό εύρος οδήγησης • Υψηλό κόστος • Υπό ανάπτυξη
Σημαντικά θέματα	<ul style="list-style-type: none"> • Μπαταρίες και διαχείριση μπαταριών • Πρόωση υψηλής απόδοσης • Εγκαταστάσεις φόρτισης 	<ul style="list-style-type: none"> • Διαχείριση πολλαπλών πηγών ενέργειας • Εξάρτηση από τον κύκλο οδήγησης • Διαστασιολόγηση μπαταριών και διαχείριση 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κυψελών καυσίμου • Υποδομές υδρογόνου • Σύστημα καυσίμων

2.4. Αξιολόγηση των υβριδικών - ηλεκτρικών οχημάτων

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός υβριδικού οχήματος σημαίνει και τη διαμόρφωση μίας λογικής με σκοπό την αντιστάθμιση των λειτουργιών των διαφόρων υποσυστημάτων, ώστε να λειτουργούν εναρμονισμένα και συμπληρωματικά μεταξύ τους [3].

Οι σχετικά μεγάλοι ηλεκτρικοί κινητήρες και οι σχετικά μεγάλες συστοιχίες μπαταριών διευκολύνουν τη φάση της επιτάχυνσης. Ακόμη, οι μικρότερες μηχανές εσωτερικής καύσης αιχμαλωτίζουν περισσότερη ενέργεια από την πέδηση και στηρίζουν την αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία φορτίζοντας τις μπαταρίες. Επίσης, οι ηλεκτρικοί κινητήρες εξαιρετικά υψηλής ισχύος και οι πολύ μεγάλες συστοιχίες μπαταριών επιτρέπουν τη φόρτιση από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Παρ'όλα αυτά, οι συστοιχίες μπαταριών είναι αρκετά δαπανηρές και επιβαρύνουν την απόδοση εξαιτίας του βάρους τους. Επομένως, είναι επιτακτική η ανάγκη να περιοριστεί το μέγεθός τους.

Τέλος, ο σχεδιασμός και η πολυπλοκότητα του υβριδικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των επιμέρους υποσυστημάτων και του πώς είναι ενσωματωμένα, μπορεί να έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην αποδοτικότητα των καυσίμων από την απλή ένταξη των επιμέρους υβριδικών δυνατοτήτων. Ο κάθε κατασκευαστής υποστηρίζει μία διαφορετική άποψη για το πώς να εξισορροπήσει το υβριδικό σύστημα και η αγορά μπορεί να τον δικαιώσει ή όχι.

Από την πλευρά της αγοράς, ισχύει ότι:

- Το κόστος απόκτησης ενός υβριδικού οχήματος τελευταίας γενιάς είναι υψηλότερο εκείνου για την απόκτηση ενός συμβατικού οχήματος. Παρότι είναι γνωστή η φιλικότητα των υβριδικών οχημάτων προς το περιβάλλον, ο μέσος καταναλωτής δε διατίθεται να δαπανήσει περισσότερα χρήματα γι' αυτόν τον λόγο. Με την πάροδο του χρόνου, όμως, το κόστος τους καθίσταται όλο και πιο προσιτό.
- Υπάρχει έντονη δυσπιστία για την αξιοπιστία των υβριδικών οχημάτων λόγω του καινοτόμου σχεδιασμού τους. Ωστόσο, υπάρχει η ελπίδα να καμφθούν οι αμφιβολίες του αγοραστικού κοινού ενώπιον των σπουδαίων οφελών που προσφέρουν τα υβριδικά οχήματα.

Πλεονεκτήματα

Τα υβριδικά οχήματα διέπονται από πλήθος θετικών χαρακτηριστικών που ικανοποιούν τον οδηγό καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού [3]. Μερικά αναφέρονται στο εξής:

- Τα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν ευρέως διαθέσιμα καύσιμα, κι έτσι δεν υπάρχει ανησυχία για τη δημιουργία νέων υποδομών επαναφόρτισης ή ανατροφοδότησης καυσίμου.
- Η έως έναν βαθμό ηλεκτρική αυτονομία μειώνει τις επισκέψεις σε πρατήρια υγρών καυσίμων.
- Ο θόρυβος στο εσωτερικό του οχήματος είναι εξαιρετικά μικρότερος στις επιταχύνσεις, όπου υπάρχει υποβοήθηση από τον ηλεκτρικό κινητήρα, αλλά και στο ρελαντί (<γαλλική *ralenti*), όπου η μηχανή εσωτερικής καύσης συνήθως απενεργοποιείται.
- Οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν με διάφορους τρόπους:
 - i. Με τη μείωση της παραγωγής και τη διανομής των καυσίμων, οι εκπομπές μειώνονται ευθέως ανάλογα προς τις μειώσεις της κατανάλωσης καυσίμου.
 - ii. Η αυξημένη αυτονομία μειώνει τις εκπομπές εξάτμισης κατά τον ανεφοδιασμό στα πρατήρια υγρών καυσίμων.
 - iii. Τα υβριδικά συστήματα περιορίζουν τις εκπομπές υδρογονανθράκων και οξειδίων του αζώτου (NO_x).
- Η διαφορά λειτουργίας για τον οδηγό ενός υβριδικού από ένα συμβατικό όχημα είναι αμελητέα.
- Η διάρκεια ζωής του συστήματος πέδησης επιμηκύνεται, καθώς ο ηλεκτρικός κινητήρας αποσπά μέρος της ενέργειας που θα γινόταν θερμότητα στα φρένα. (Αναγεννητική πέδηση)
- Ο κινητήρας μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια για σκοπούς που επιθυμεί ο οδηγός, όπως είναι τα θερμαινόμενα καθίσματα και παράθυρα, η πέδηση, τα στοιχεία πολυμέσων, ραντάρ και κάμερες ασφαλείας/προειδοποίησης.

Μειονεκτήματα

Τα σπουδαιότερα μειονεκτήματα δε συναντώνται κατά τη λειτουργία του υβριδικού οχήματος, αλλά κατά τη διαδικασία σχεδιασμού τους [3]. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι:

- Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, αν και εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους, απαιτούν μεγάλο χώρο και κόστος, καθώς, επίσης, και βελτίωση της αντοχής τους. Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, όμως, μπορούν να καλύψουν το κενό της αγοράς.
- Κρίσιμο παραμένει το ζήτημα του χώρου. Οι ηλεκτρικές μηχανές, η μπαταρία και τα ηλεκτρονικά ισχύος απαιτούν χώρο. Στα μεγάλα οχήματα ο διατιθέμενος χώρος είναι αρκετός, όμως στα μικρότερα η πρόκληση παραμένει.
- Το σημαντικότερο μειονέκτημα των υβριδικών οχημάτων αποτελεί η στάσιμη εξέλιξη της τεχνολογίας των μπαταριών. Είναι αναγκαίο να διαρκούν για περισσότερο χρονικό διάστημα, ώστε να απαιτούνται λιγότερες αντικαταστάσεις, καθώς η μπαταρία είναι ένα από τα πιο δαπανηρά συστήματα που φέρει ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα. Οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου διαρκούν περισσότερο από τις μολύβδου-οξέος, αλλά τελικά η αντικατάστασή τους κοστίζει περισσότερο.

3. Συνήθεις τύποι ηλεκτρικών μηχανών στα υβριδικά οχήματα

Η ηλεκτρική μηχανή που προορίζεται να λειτουργήσει ως κινητήρας, δηλαδή τόσο για επιτάχυνση όσο και για την αναγεννητική πέδηση, χρειάζεται να διαθέτει υψηλή απόδοση και να αποδίδει μεγάλη ροπή. Αν ο κινητήρας είναι τοποθετημένος ανάμεσα στη μηχανή εσωτερικής καύσης και στον άξονα μετάδοσης, τότε απαιτείται συμπαγής σχεδιασμός υψηλής θερμοαντοχής [3].

Τα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός κινητήρα για να ενταχθεί σε ένα υβριδικό ή ηλεκτρικό όχημα είναι τα εξής [11,14]:

1. Ανοχή σφαλμάτων
2. Ευέλικτος έλεγχος οδήγησης
3. Χαμηλός ακουστικός θόρυβος
4. Αποδεκτό κόστος μαζικής παραγωγής
5. Υψηλή απόδοση για ευρύ φάσμα ταχυτήτων

Οι απαιτήσεις από έναν κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος συνοπτικά είναι:

1. Χαμηλό κόστος συντήρησης
2. Ανθεκτικότητα και αξιοπιστία
3. Λειτουργία σε υψηλή ταχύτητα
4. Υψηλός λόγος ισχύος προς βάρος
5. Εκτεταμένη περιοχή σταθερής ισχύος λειτουργίας
6. Υψηλή ικανότητα υπερφόρτισης για τη φάση της προσπέρασης
7. Χαμηλό επίπεδο ακουστικού θορύβου & ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών
8. Ικανότητα ροπής κορυφής περίπου 200% – 300% της ονομαστικής συνεχούς ροπής
9. Υψηλός λόγος ροπής προς αδράνεια. Όσο πιο υψηλός ο λόγος, τόσο μεγαλύτερη ικανότητα επιτάχυνσης διαθέτει το όχημα.

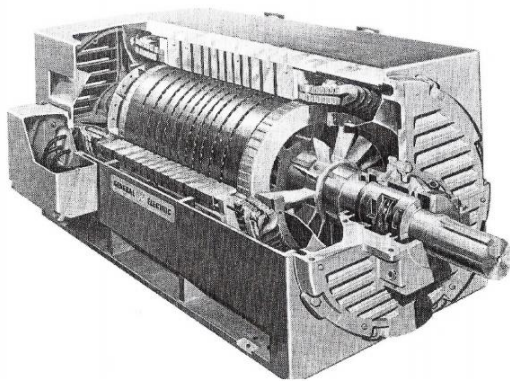
Οι τύποι των ηλεκτρικών κινητήρων που τοποθετούνται στα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα εξετάζονται στα ακόλουθα τρία εδάφια.

3.1. Επαγωγικός τριφασικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος

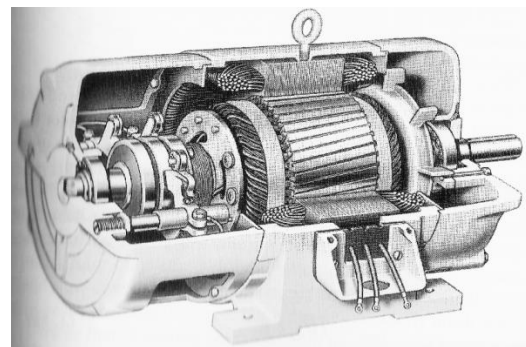
Ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα δε χρησιμοποιεί κύκλωμα διέγερσης, καθώς κατασκευάζεται με τυλίγματα απόσβεσης [12]. Το ρεύμα διέγερσης παράγεται στον δρομέα, η τάση του οποίου επάγεται στα τυλίγματά του αντί να του προσφέρεται με κάποια εξωτερική ηλεκτρική σύνδεση. Επομένως, δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέγερσης. Κατ' ουσίαν, ο επαγωγικός κινητήρας είναι ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής, καθώς ακολουθεί την αρχή λειτουργίας του.

Εντός του στάτη οι επαγωγικοί κινητήρες φέρουν δρομείς δύο τύπων, είτε δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού (Εικόνα 8) είτε δακτυλιοφόρο δρομέα (Εικόνα 9). Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, οι επαγωγικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται είναι οι βραχυκυκλωμένου κλωβού. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η ανθεκτική κατασκευή, το χαμηλό κόστος και η υψηλή αξιοπιστία τους.

Για τη λειτουργία τους χρειάζεται ένας αντιστροφέας dc/ac ο οποίος τους συνδέει με μία πηγή συνεχούς ρεύματος, όπως είναι οι κυψέλες καυσίμου, οι μπαταρίες, κ.ά.. Προηγμένες μεθοδολογίες ελέγχου, όπως ο διανυσματικός έλεγχος, ο άμεσος έλεγχος ροπής και ο έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου, είναι ευρέως γνωστοί για τον έλεγχο του επαγωγικού κινητήρα [17].



Εικόνα 8
Επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού μεγάλου μεγέθους σε τομή



Εικόνα 9
Επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα σε τομή

3.2. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη

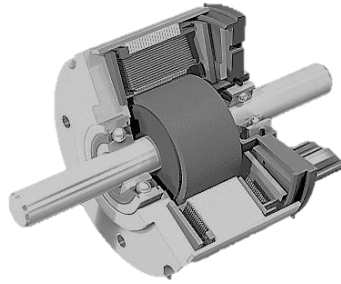
Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό στα επιβατικά αυτοκίνητα, λεωφορεία και αεροπλάνα [12]. Εξυπηρετούν περιπτώσεις όπου το σύστημα ισχύος τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και απαιτούνται συχνές και μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής. Χρησιμοποιεί τριφασικά τυλίγματα στον στάτη και διακοπτικά στοιχεία για να ελέγχει τη ροή της ηλεκτρικής ισχύος διαδοχικά για κάθε φάση. Ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα (Εικόνα 10) είναι ευρέως διαδεδομένος στην κατασκευή υβριδικών οχημάτων και μπορεί να αναλάβει και ρόλο γεννήτριας.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη άνευ ψηκτρών (BLDC) είναι οι πιο αποδοτικοί, οι πιο συμπαγείς και οι ελαφρύτεροι [10]. Ο χαρακτηρισμός αυτός (BLDC) οφείλεται στο γεγονός ότι ο συγκεκριμένος κινητήρας προσεγγίζει τη συμπεριφορά ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες με τη διαφορά όμως ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος αντικαθιστούν τις ψήκτρες. Οι πόλοι του είναι κατασκευασμένοι από μαγνήτες. Ο πιο αποδοτικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες διαθέτει μαγνήτες κατασκευασμένους από σπάνιες γαίες, όπως το νεοδύμιο.

Εκτός από τη λειτουργία σε υψηλές ροπές, ακόμη ένας αξιοσημείωτος παράγοντας σχεδιασμού είναι η τάση ενός υβριδικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο κινητήρας δύναται να επιτύχει υψηλότερη απόδοση ισχύος σε υψηλότερες τάσεις. Επομένως, αφού το ρεύμα είναι μικρότερης κλίμακας, χρησιμοποιούνται μικρότερα καλώδια και ως εκ τούτου ενισχύεται η απόδοση του κινητήρα και των μετατροπέων.

Επιπλέον, το επίπεδο της τάσης λειτουργίας επηρεάζει την επιλογή της μπαταρίας και των ηλεκτρονικών ισχύος, συστήματα εξαιρετικά δαπανηρά για τον σχεδιασμό του οχήματος. Αν ο ηλεκτρικός κινητήρας βρίσκεται μεταξύ του σφονδύλου και του συμπλέκτη μετάδοσης, είναι σημαντικό ο κινητήρας να σχεδιαστεί όσο το δυνατόν λεπτότερος, ώστε να μην αυξηθεί το μήκος του άξονα μετάδοσης.

Τέλος, οι μόνιμοι μαγνήτες παρουσιάζουν σταθερή μαγνητική ροή και κατά συνέπεια δεν μπορεί να ρυθμιστεί η ταχύτητα του κινητήρα μέσω ρύθμισης της ροής. Οι μόνιμοι τρόποι ελέγχου της ταχύτητας του κινητήρα είναι ο έλεγχος μέσω τάσης ή της αντίστασης οπλισμού.



Εικόνα 10: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη

Πλεονεκτήματα

1. Υψηλή απόδοση

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος άνευ ψηκτρών διαθέτουν την υψηλότερη απόδοση συγκριτικά με τους υπόλοιπους κινητήρες χάρη στην παρουσία των μόνιμων μαγνητών, οι οποίοι δεν παρουσιάζουν απώλειες χαλκού και εμφανίζουν ελάχιστες μηχανικές απώλειες τριβής [12].

2. Ιδιότητα συμπαγούς

Η ενσωμάτωση μαγνητών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (μαγνήτες σπάνιων γαιών) επιτυγχάνει πυκνότητα υψηλής ροής στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος άνευ ψηκτρών. Κατά συνέπεια, επιτυγχάνονται υψηλές ροπές.

3. Ευχέρεια στη διαμόρφωση ελέγχου

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος άνευ ψηκτρών μπορεί να ελεγχθεί το ίδιο εύκολα, όσο ένας συμβατικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος.

4. Εύκολη ψύξη

Δεν υπάρχει ροή ρεύματος στον κινητήρα. Επομένως, ο δρομέας δε θερμαίνεται. Η μόνη παραγόμενη θερμότητα εντοπίζεται στον στάτη, ο οποίος είναι πιο εύκολο να ψυχθεί απ' ό,τι ο δρομέας, αφού είναι σταθερός και βρίσκεται στην περιφέρεια του κινητήρα.

5. Χαμηλό κόστος συντήρησης, μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία

Η απουσία ψηκτρών και μηχανικών μεταγωγέων καταστέλλει την ανάγκη για τακτική συντήρηση. Η μακροζωία του κινητήρα, επομένως, εξαρτάται μόνο από τη μόνωση των τυλιγμάτων και τη διάρκεια ζωής του μαγνήτη.

6. Μικρότερο μέγεθος

Η απουσία τυλιγμάτων διέγερσης τους καθιστά μικρότερους σε σχέση με εκείνους της παράλληλης διέγερσης.

Μειονεκτήματα

1. Κόστος

Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών κοστίζουν περισσότερο από τα υπόλοιπα μαγνητικά υλικά.

2. Περιορισμένο εύρος σταθερής ισχύος

Ένα μεγάλο εύρος σταθερής ισχύος είναι κρίσιμο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης.

3. Κίνδυνος απομαγνήτισης

Οι μαγνήτες μπορεί να απομαγνητιστούν εξαιτίας μεγάλων θερμοκρασιών και του μεγάλου ρεύματος οπλισμού. Οπότε απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή του συστήματος ψύξης τους και στη συχνότητα παρατεταμένων υπερφορτίσεων.

4. Περιορισμένη επαγόμενη ροπή

Επειδή οι μόνιμοι μαγνήτες δεν μπορούν να παράγουν τόσο μεγάλη μαγνητική επαγωγή όσο ένα ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, η επαγόμενη ροπή τ_{ind} ανά μονάδα ρεύματος οπλισμού του κινητήρα μόνιμου μαγνήτη είναι μικρότερη από ό,τι ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης ίδιου μεγέθους και δομής.

3.3. Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

Ομοίως με το εδάφιο 3.2. οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν τη διέγερση πεδίου. Ο δρομέας λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη [10]. Οι μόνιμοι μαγνήτες παράγουν δικό τους μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τα τυλίγματα του στάτη.

Η κύρια διαφορά μεταξύ του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη και του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (Εικόνα 11) εντοπίζεται στην κυματομορφή των ρευμάτων του στάτη, η οποία είναι ορθογώνια στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και ημιτονοειδής στους σύγχρονους.



Εικόνα 11: Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη 30-70 kW [13]

3.4. Αξιολόγηση

Το μέγεθος του κινητήρα εξαρτάται έντονα από τη ροπή και την ισχύ που μπορεί να αποδώσει [43]. Ο επαγωγικός κινητήρας είναι πιο ελαφρύς, μικρότερου όγκου και οικονομικότερος από τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος [7]. Είναι κατάλληλος να λειτουργεί ως γεννήτρια/εκκινητής [22].

Ωστόσο, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη έχουν μεγαλύτερη απόδοση και πυκνότητα ροπής και ισχύος από τους επαγωγικούς κινητήρες. Ακόμη, μπορούν να προσφέρουν υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες και είναι εύχρηστοι στη φάση της αναγεννητικής πέδησης. Τέλος, αντίθετα προς τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος, οι σύγχρονοι κινητήρες δε λειτουργούν εξίσου αποδοτικά ως ηλεκτρικές γεννήτριες.

4. Τεχνολογία μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται συνοπτικά οι μετατροπείς ισχύος που συναντώνται σε εφαρμογές υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων.

Το σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος ενός υβριδικού ή ηλεκτρικού οχήματος θα πρέπει να είναι αρκετά αποδοτικό, ώστε να βελτιώνει το εύρος ηλεκτρικής λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων και την εξοικονόμηση καυσίμου στα υβριδικά. Η επιλογή των διατάξεων ημιαγωγών ισχύος, των μετατροπών, των αντιστροφών, των στρατηγικών ελέγχου, η διευθέτηση των επιμέρους μονάδων και η ενσωμάτωση του συστήματος στο όχημα είναι ιδιαίτερος κρίσιμοι παράγοντες για την ανάπτυξη οχημάτων υψηλής επίδοσης [15].

Τα κύρια σημεία σχεδιασμού του συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος για ένα υβριδικό όχημα είναι τα εξής [17]:

- **Ηλεκτρικός σχεδιασμός** Περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του κύριου διακοπτικού κυκλώματος, του ελεγκτή των κυκλωμάτων, τη βελτιστοποίηση της διακοπτικής συχνότητας και τους υπολογισμούς απωλειών.
- **Σχεδιασμός αλγορίθμου ελέγχου** Περιλαμβάνει την ανάπτυξη του αλγορίθμου ελέγχου για την επίτευξη των επιθυμητών τιμών τάσης, ρεύματος και συχνότητας της εξόδου και για την πραγματοποίηση αμφίδρομης ροής ισχύος όπου χρειάζεται.
- **Μαγνητικός σχεδιασμός** Περιλαμβάνει τον σχεδιασμό των επαγωγών, των μετασχηματιστών και άλλων διατάξεων, όπως είναι οι πυκνωτές ως φίλτρα, οι διακόπτες και οι μονάδες οδήγησης πυλών.
- **Σχεδιασμός ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας** Περιλαμβάνει την κατανόηση θεμάτων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, την ανάλυση των μεταβατικών φαινομένων και την υλοποίηση του κυκλώματος ελαχιστοποίησης παρασιτικών επαγωγών και χωρητικότητας.
- **Μηχανικός και θερμικός σχεδιασμός** Περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση των απωλειών των διατάξεων ισχύος και των μαγνητικών εξαρτημάτων.

4.1. Μετατροπείς ισχύος

Οι μετατροπείς ισχύος κατηγοριοποιούνται συνήθως βάσει της εισόδου και της εξόδου τους. Εφόσον η είσοδος ή η έξοδος ενός μετατροπέα μπορεί να είναι είτε συνεχές (dc) είτε εναλλασσόμενο ρεύμα (ac), υφίστανται τέσσερις τύποι μετατροπέων ισχύος:

1. Μετατροπέας dc/dc
2. Αντιστροφέας dc/ac
3. Ανορθωτής ac/dc
4. Κυκλομετατροπέας ac/ac

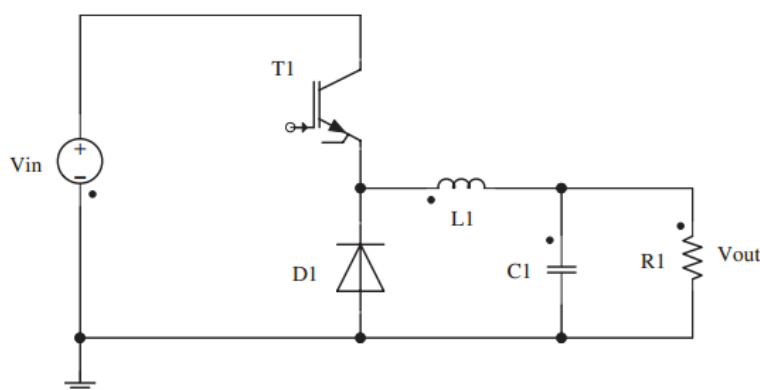
Οι τρεις πρώτοι τύποι μετατροπέων βρίσκουν εφαρμογή στα υβριδικά οχήματα. Ο τέταρτος τύπος εφαρμόζεται μόνο σε συστήματα ac/ac υψηλής ισχύος για τον έλεγχο του μέτρου της τάσης και της συχνότητας μεγάλων κινητήρων.

Μετατροπέας dc/dc

Οι μετατροπείς dc/dc χρησιμοποιούνται ευρέως στον εφοδιασμό ισχύος συνεχούς ρεύματος και σε εφαρμογές οδήγησης κινητήρων [34]. Συχνά η είσοδος είναι μία μη ρυθμιζόμενη συνεχής τάση, η οποία διαμορφώνεται από την ανόρθωση της τάσης γραμμής. Οι κύριες κατηγορίες dc/dc μετατροπέων που εφαρμόζονται στα υβριδικά οχήματα είναι οι ακόλουθες.

Μετατροπέας υποβιβασμού dc/dc

Ο μετατροπέας υποβιβασμού μειώνει το υψηλό επίπεδο dc τάσης εισόδου σε ένα χαμηλότερο στην dc τάση εξόδου [17].



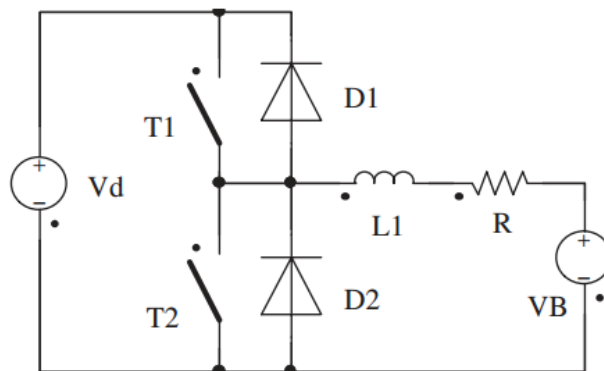
Εικόνα 12: Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Η τυπική εφαρμογή ενός μετατροπέα υποβιβασμού στα υβριδικά οχήματα είναι να υποβιβάσει τη συνεχή τάση του ζυγού ($200V - 500V$) για τη φόρτιση της μπαταρίας ($12V - 14V$). Στην Εικόνα 12 φαίνεται το βασικό κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού, ο οποίος αποτελείται από έναν διακόπτη, μία δίοδο και ένα φίλτρο LC.

Η δυσκολία εμφανίζεται στη μεγάλη διαφορά τάσης εισόδου και εξόδου και στον μικρό κύκλο λειτουργίας (3,5%) που απαιτείται για τον έλεγχο των διακοπών. Ο μικρός κύκλος λειτουργίας επηρεάζει, επίσης, τις κυματώσεις ρεύματος και τάσης.

Μετατροπέας ανύψωσης

Ο μετατροπέας ανύψωσης συναντάται ακόμα και ως «αμφίδρομος dc/dc μετατροπέας» ή ως «μετατροπέας διαχείρισης ενέργειας» όσον αφορά στις εφαρμογές υβριδικών οχημάτων [17]. Πρόκειται για έναν μετατροπέα υψηλής ισχύος, ο οποίος συνδέει την μπαταρία χαμηλής τάσης με τον dc ζυγό του οχήματος μεγαλύτερης τάσης. Επομένως, χρησιμοποιείται για την επικοινωνία της μπαταρίας με τον ηλεκτρικό κινητήρα.



Εικόνα 13: Αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης

Άλλες λειτουργίες του μετατροπέα ανύψωσης (Εικόνα 13) είναι η εξάλειψη των κυματώσεων ρεύματος στην μπαταρία και η διατήρηση της τάσης της dc σύνδεσης, ούτως ώστε το όχημα να λειτουργεί σε υψηλή ισχύ.

Τέλος, εκτός των προαναφερθέντων, ως μετατροπείς dc/dc χαρακτηρίζονται και οι:

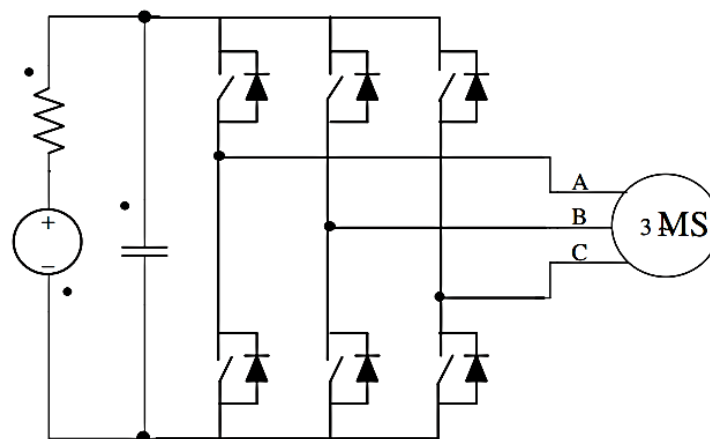
- Μετατροπείς αντίθετης πολικότητας (Cúk converter)
- Μετατροπείς πλήρους γέφυρας (Full-bridge converter)

Αντιστροφέας dc/ac

Οι αντιστροφείς κατατάσσονται βάσει της εισόδου τους σε αντιστροφείς πηγής τάσης και σε αντιστροφείς πηγής ρεύματος. Η λειτουργία τους παρουσιάζεται περιληπτικά στη συνέχεια [34].

Αντιστροφέας πηγής τάσης

Οι αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) χρησιμοποιούνται στα υβριδικά οχήματα για τον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων και γεννητριών, δηλαδή επαγωγικών κινητήρων, σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και κινητήρων άνευ ψηκτρών μόνιμου μαγνήτη [17]. Το κύκλωμα του αντιστροφέα πηγής τάσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 14. Οι διακόπτες συνήθως είναι IGBTs για την υψηλή τάση και διατάξεις υψηλής ισχύος ή MOSFETs για σχεδιασμούς χαμηλής τάσης.

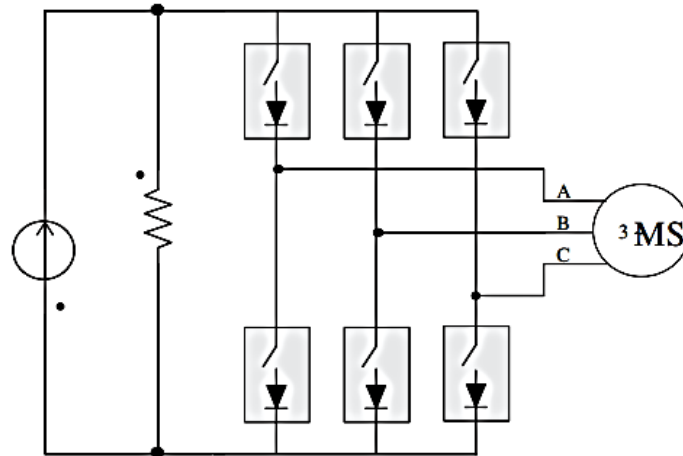


Εικόνα 14: Αντιστροφέας πηγής τάσης

Η έξοδος του αντιστροφέα πηγής τάσης ελέγχεται με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) για την παραγωγή ημιτονοειδών κυματομορφών. Για την εξάλειψη των αρμονικών της θεμελιώδους συχνότητας χρησιμοποιείται υψηλή διακοπτική συχνότητα.

Αντιστροφέας πηγής ρεύματος

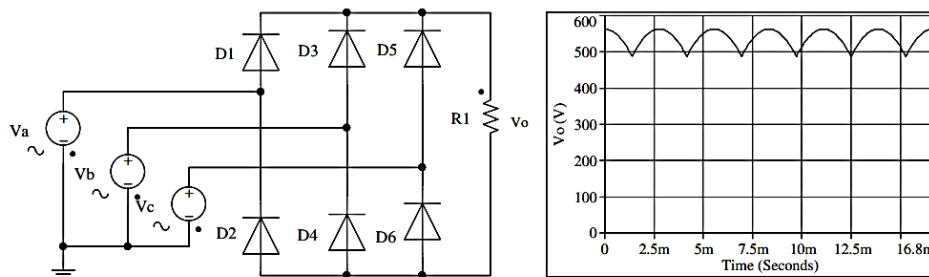
Ο αντιστροφέας πηγής ρεύματος (CSI) λειτουργεί ομοίως με τον αντιστροφέα πηγής τάσης με την εξαίρεση ότι η είσοδος είναι πηγή ρεύματος και όχι τάσης [17]. Στην ac πλευρά (Εικόνα 15) πιθανόν να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση τριών πυκνωτών ως φίλτρων. Το κύκλωμά του έχει ως εξής:



Εικόνα 15: Αντιστροφέας πηγής ρεύματος

Ανορθωτής ac/dc

Οι ανορθωτές χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή μίας εισόδου ac σε μία έξοδο dc [34].

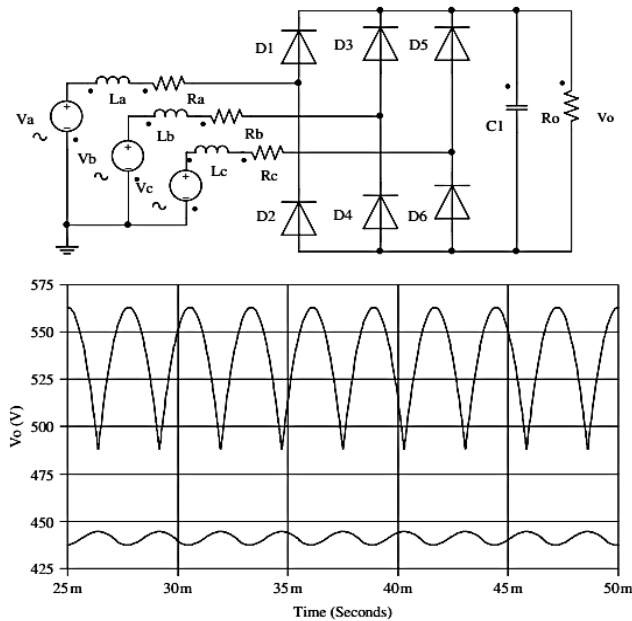


Εικόνα 16: Κύκλωμα ιδανικού τριφασικού ανορθωτή. Κυματομορφή τάσης εξόδου.

Αν V_{LL} είναι η ενεργός τιμή της τάσης γραμμής, η έξοδος ενός ιδανικού τριφασικού ανορθωτή όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 16 είναι ίση με:

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} (V_a - V_b) dt = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} V_{LL} \cos(\omega t) dt = 1,35 V_{LL}$$

Σε ένα υβριδικό όχημα, η είσοδος του ανορθωτή είναι συνήθως η έξοδος μίας σύγχρονης γεννήτριας ή ένας εναλλάκτης [17]. Επομένως, υπάρχει διαφοροποίηση του κυκλώματος από έναν ιδανικό ανορθωτή. Το κύκλωμα και η κυματομορφή τάσης εξόδου ενός πραγματικού ανορθωτή υβριδικού οχήματος παρατίθενται στην Εικόνα 17. Η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας είναι σε σειρά με την πηγή τάσης.



Εικόνα 17: Κύκλωμα. Κυματομορφή ιδανικής (επάνω) και πραγματικής (κάτω) τάσης εξόδου

Από τη σύγκριση των κυματομορφών συμπεραίνουμε πως στον πραγματικό ανορθωτή η πτώση τάσης είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στον ιδανικό ανορθωτή. Η πτώση τάσης προκαλείται από τη σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας, η οποία γενικά δεν είναι αμελητέα. Επομένως, η τάση εξόδου μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική στις περιπτώσεις χωρίς και με φορτίο.

4.2. Ημιαγωγοί ηλεκτρονικών ισχύος

Το κύριο κύκλωμα σε ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος αποτελείται από διατάξεις ημιαγωγών (διακόπτες και διόδους) και περιφερειακά κυκλώματα [17]. Οι ημιαγωγοί διακόπτες ελέγχονται, με σκοπό να ανοίγουν και να κλείνουν σε μία συχνότητα εύρους από λίγα kHz έως μερικές δεκάδες kHz για εφαρμογές υβριδικών οχημάτων.

Ανάλογα με το επίπεδο της τάσης των συστημάτων, χρησιμοποιούνται MOSFETs και IGBTs στους μετατροπείς ισχύος. Ένας ιδανικός ημιαγωγικός διακόπτης ισχύος θα πρέπει να διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Χαμηλό κόστος
2. Ευκολία ελέγχου
3. Ανθεκτικότητα
4. Αξιοπιστία
5. Αγωγή μεγάλων ρευμάτων σε λειτουργία

6. Χαμηλές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κατά τη διάρκεια της μεταγωγής
7. Δυνατότητα στιγμιαίας μεταγωγής δίχως απώλειες

MOSFETs Ισχύος

Το MOSFET (τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου - οξειδίου - ημιαγωγού είναι μία διάταξη τριών ακροδεκτών, όπου η πύλη ελέγχει το ρεύμα που ρέει ανάμεσα στους δύο άλλους ακροδέκτες: την υποδοχή και την πηγή.

Για τις εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος με ονομαστική τάση κάτω από 200 V, τα MOSFETs ισχύος είναι η ιδανική επιλογή λόγω της υψηλής διακοπτικής συχνότητας, της ευκολίας ελέγχου, της ανώτερης περιοχής ασφαλούς λειτουργίας και της ανθεκτικότητάς τους [18]. Τα MOSFETs προτιμώνται σε εφαρμογές των 200 – 600V, οι οποίες ναι μεν απαιτούν υψηλή διακοπτική συχνότητα, αλλά μόνο ένα μέτριο επίπεδο ισχύος.

Στον τομέα της αυτοκίνησης συναντώνται οι παρακάτω εφαρμογές των MOSFETs:

- Αυτόματος πιλότος
- Ηλεκτρονικός έλεγχος του γκαζιού
- Ενσωματωμένη γεννήτρια εκκίνησης ελέγχου κινητήρα

IGBTs

Το IGBT (διπολικό τρανζίστορ με μονωμένη πύλη) είναι μία διάταξη φορέων μειονότητας με υψηλή αντίσταση εισόδου. Πρόκειται για τη γεφύρωση των χαρακτηριστικών του MOSFET ισχύος και του τρανζίστορ ισχύος [19]. Εν αντιθέσει προς τα MOSFETs ισχύος, συναντώνται σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, καθώς μπορούν να διαχειρίζονται υψηλές τάσεις (400 – 1200 V) και μέτρια έως μεγάλα ρεύματα (10 – 1000 A). Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ικανότητα αγωγιμότητας του ρεύματος συγκριτικά με τα MOSFETs υψηλής τάσης [18].

Πλεονεκτήματα [20]

1. Σε εφαρμογές υψηλής τάσης και μεγάλου ρεύματος μπορούν να ελέγχονται πιο εύκολα από ό,τι οι ελεγχόμενες από το ρεύμα διατάξεις (λ.χ. θυρίστορ, BJT).
2. Έχει ανώτερη δυνατότητα αγωγιμότητας του ρεύματος σε σύγκριση με το διπολικό τρανζίστορ.

Μειονεκτήματα [20]

Η ταχύτητα μεταγωγής είναι μικρότερη από εκείνη του MOSFET ισχύος και μεγαλύτερη εκείνης του BJT.

5. Όχημα και περιβάλλον

5.1. Περιβαλλοντικός αντίκτυπος

Όσο οι κλιματικές αλλαγές καθίστανται εντονότερες και εμφανέστερες, τόσο ενισχύονται οι φόβοι για την ολοκληρωτική καταστροφή του περιβάλλοντος [9]. Οι επιστήμονες προειδοποιούν πως κάτι τέτοιο μπορεί να αποτραπεί μόνο εάν έως το 2050 μειωθούν οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στο 60% των επιπέδων του 2010. Η δραστική αυτή μείωση, όμως, αντιτίθεται στις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη, καθώς τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν το 85% της πρωτογενούς πηγής ενέργειας όντας λιγότερο δαπανηρά.

Με σκοπό τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη καταβάλλεται αξιόλογη προσπάθεια για τη μείωση των εκπομπών και την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Είναι γεγονός πως το μεγαλύτερο ποσοστό ευθύνης για την ατμοσφαιρική ρύπανση φέρουν τα μέσα μεταφοράς. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες εδώ και μερικά χρόνια έχουν στρέψει το βλέμμα τους στην αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού φαινομένου κατασκευάζοντας ηλεκτρικά οχήματα (EV) που αποσυμπλέκονται εν μέρει ή εξ ολοκλήρου από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων.

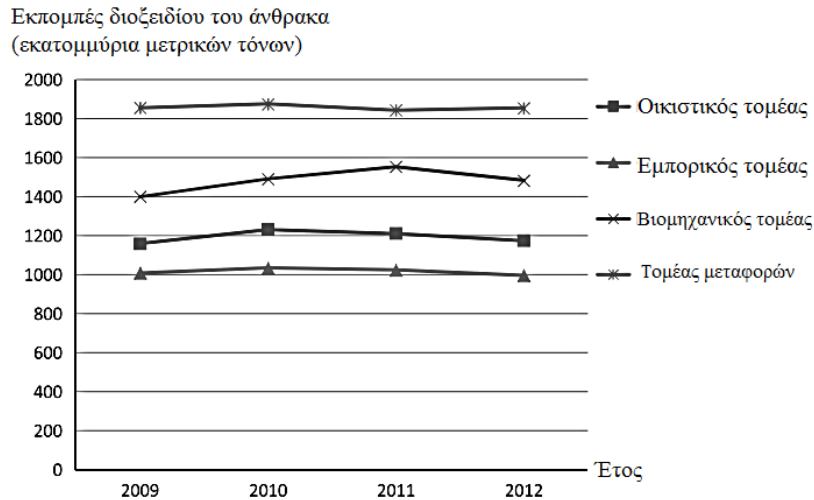
Ατμοσφαιρική ρύπανση

Τα οχήματα στη συντριπτική πλειοψηφία τους φέρουν μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία εκτελεί καύση υδρογονανθράκων για την εξαγωγή της ενέργειας που χρειάζεται για την κίνησή τους [7]. Η καύση είναι μία αντίδραση μεταξύ του καυσίμου και του αέρα, η οποία απελευθερώνει θερμότητα και προϊόντα καύσης.

Η θερμότητα αυτή μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ από τη μηχανή εσωτερικής καύσης και τα προϊόντα της καύσης απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Ιδανικά, η καύση υδρογονανθράκων αποδίδει μόνο διοξείδιο του άνθρακα και νερό, τα οποία δεν βλάπτουν το περιβάλλον [23]. Πράγματι, τα φυτά αφομοιώνουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) μέσω της φωτοσύνθεσης. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα απαραίτητο συστατικό στη φυτική ζωή.

Ωστόσο, οι μεταφορές επιβαρύνουν το μηδενικό ισοζύγιο CO₂ της φύσης, το οποίο επιβεβαιώνεται από το ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 18). Η παρατεταμένη έκθεση σε μέτριες συγκεντρώσεις CO₂ δύναται να προκαλέσει οξέωση και να έχει αρνητικές

συνέπειες στον μεταβολισμό του ασβεστίου και του φωσφόρου. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι τοξικό για την καρδιά και προκαλεί αρρυθμίες. Αποτελεί το κύριο αέριο του θερμοκηπίου που κατηγορείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Πράγματι, κάθε λίτρο της βενζίνης που καίγεται παράγει περίπου 2,35 kg CO₂ και κάθε λίτρο πετρελαίου εκλύει 2,68 kg CO₂ [4].



Εικόνα 18: Εκπομπές CO₂ (εκατ. μετρικών τόνων) συναρτήσει διαφορετικών δραστηριοτήτων

Παρατηρούμε πως την περίοδο 2009-2012 ο τομέας των μεταφορών παράγγαγε την περισσότερη ποσότητα CO₂. Ακολούθησε ο βιομηχανικός τομέας, ο οικιστικός και τέλος ο εμπορικός.

Στην πραγματικότητα, η καύση του υδρογονάνθρακα στις μηχανές εσωτερικής καύσης δεν είναι ποτέ ιδανική. Εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό, τα προϊόντα καύσης περιέχουν ποσότητα οξειδίων του αζώτου (NO_x), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άκαυστων υδρογονανθράκων (HC), τα οποία είναι τοξικά για την υγεία του ανθρώπου.

• Οξείδια του αζώτου

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) προκύπτουν από την αντίδραση μεταξύ αζώτου στον αέρα και οξυγόνου. Θεωρητικά, το άζωτο είναι ένα αδρανές αέριο. Ωστόσο, οι υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις στις μηχανές εσωτερικής καύσης δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για τη σύνθεση των οξειδίων του αζώτου.

Η θερμοκρασία είναι η πιο σημαντική παράμετρος στον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου. Η πιο συχνά εμφανιζόμενη μορφή οξειδίου του αζώτου είναι το νιτρικό

οξειδίο (NO), αν και μικρές ποσότητες διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και ίχνη οξειδίου του αζώτου (N₂O) εμφανίζονται επίσης.

Το διοξειδίο του αζώτου είναι εν μέρει υπεύθυνο για το νέφος. Αντιδρώντας με το νερό της ατμόσφαιρας το NO₂ σχηματίζει το νιτρικό οξύ (HNO₃), το οποίο διαλύεται στη βροχή. Το φαινόμενο αυτό καλείται "όξινη βροχή" και είναι υπεύθυνο για την καταστροφή των δασών στις βιομηχανικές χώρες.

- **Μονοξειδίο του άνθρακα**

Το μονοξειδίο του άνθρακα προέρχεται από την ατελή καύση των υδρογονανθράκων εξαιτίας της έλλειψης οξυγόνου. Είναι ένα δηλητήριο για τα ανθρώπινα και ζωικά όντα, όταν το εισπνέουν. Το μονοξειδίο του άνθρακα φθάνει στα κύτταρα του αίματος κι έπειτα από εσωτερικές διεργασίες μειώνει την ποσότητα του οξυγόνου που καταλήγει στα όργανα και μειώνει τις φυσικές και πνευματικές ικανότητες των επηρεαζόμενων όντων.

- **Άκαυστοι υδρογονάνθρακες**

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες είναι, επίσης, αποτέλεσμα της ατελούς καύσης των υδρογονανθράκων. Ανάλογα με τη φύση τους, δύναται να είναι επιβλαβείς για τα έμβια όντα. Αρκετοί από αυτούς πιθανόν να είναι καρκινογόνες χημικές ουσίες.

Ακόμη, οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες είναι υπεύθυνοι για την αιθαλομίχλη: οι υπεριώδεις ακτινοβολίες του ήλιου αλληλεπιδρούν με τους άκαυστους υδρογονάνθρακες και το νιτρικό οξύ στην ατμόσφαιρα για να σχηματίσουν το όζον και άλλα προϊόντα.

Το όζον είναι ένα μόριο που σχηματίζεται από τρία άτομα οξυγόνου. Μπορεί να προσβάλλει τις μεμβράνες των ζωντανών κυττάρων, προκαλώντας την πρόωρη γήρανση ή και τον θάνατο.

- **Λοιποί ρύποι**

Οι προσμίξεις στα καύσιμα οδηγούν στην εκπομπή ρύπων. Η κυρία πρόσμιξη είναι το θείο, το οποίο βρίσκεται κυρίως στα καύσιμα ντίζελ, τη βενζίνη και το φυσικό αέριο.

Η καύση του θείου με το οξυγόνο απελευθερώνει οξείδια του θείου (SO_x). Το διοξειδίο του θείου (SO₂) είναι το κύριο προϊόν της παρούσας καύσης. Κατά την επαφή με τον αέρα, σχηματίζει τριοξειδίο του θείου, το οποίο αργότερα αντιδρά με το

νερό για να σχηματίσει θειικό οξύ, μια σημαντική συνιστώσα της όξινης βροχής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκπομπές οξειδίων του θείου προέρχονται από πηγές μεταφοράς, αλλά επίσης σε μεγάλο βαθμό από την καύση του άνθρακα σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εργοστάσια χάλυβα.

Υπερθέρμανση του πλανήτη

Η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι αποτέλεσμα του "φαινομένου του θερμοκηπίου", που προκαλείται από την παρουσία του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων στην ατμόσφαιρα. Αυτά τα αέρια παγιδεύουν την υπέρυθη ακτινοβολία του ήλιου που αντανακλάται από το έδαφος, διατηρώντας έτσι την ενέργεια στην ατμόσφαιρα και αυξάνοντας τη θερμοκρασία. Μια αύξηση της θερμοκρασίας στη Γη οδηγεί σε μεγάλες καταστροφές των οικοσυστημάτων.

5.2. Τεχνικές εξοικονόμησης καυσίμου

Τα υβριδικά οχήματα μπορούν να ενσωματώνουν πολλές διαφορετικές τεχνικές εξοικονόμησης καυσίμου. Οι κυριότερες αναφέρονται παρακάτω.

Αναγεννητική πέδηση

Οι επιδόσεις πέδησης του οχήματος είναι αναμφισβήτητα ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια των οχημάτων [3,7]. Ένα επιτυχώς σχεδιασμένο σύστημα πέδησης πρέπει να πληροί πάντα δύο απαιτήσεις. Πρώτον, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης πέδησης, το σύστημα να ακινητοποιεί το όχημα στη μικρότερη δυνατή απόσταση. Δεύτερον, θα πρέπει να διατηρεί τον έλεγχο της κατεύθυνσης του οχήματος. Η πρώτη απαιτεί το σύστημα πέδησης να είναι σε θέση να παράσχει επαρκή ροπή πέδησης σε όλους τους τροχούς, ενώ η δεύτερη απαιτεί να διανεμηθεί η δύναμη πέδησης σε όλους τους τροχούς εξίσου.

Γενικά, η ροπή πέδησης που απαιτείται είναι πολύ μεγαλύτερη από τη ροπή που μπορεί να παράγει ένας ηλεκτρικός κινητήρας. Στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα το μηχανικό σύστημα πέδησης συνυπάρχει με το αναγεννητικό. Επομένως, είναι απαραίτητος ο σωστός σχεδιασμός και των δύο συστημάτων πέδησης.

Στα συμβατικά οχήματα κατά τη διάρκεια της πέδησης ή της επιβράδυνσης χάνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η ενέργεια αυτή πρωταρχικά καταναλώνεται σε τριβές των φρένων και τη μηχανής εσωτερικής καύσης. Στην περίπτωση των υβριδικών

οχημάτων, ο ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια για να αιχμαλωτίσει αυτή την ενέργεια. Όταν το όχημα επιβραδύνει ή φρενάρει, ο ηλεκτρικός κινητήρας αναγεννά την ηλεκτρική ενέργεια από την ορμή προς την κατεύθυνση πορείας, που διαφορετικά θα χανόταν στα συμβατικά οχήματα. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στη συστοιχία μπαταριών, έως ότου επαναχρησιμοποιηθεί στην επιτάχυνση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται «αναγεννητική πέδηση».

Αξίζει να σημειωθεί πως ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν μπορεί να ανακτήσει όλη την ενέργεια που διατίθεται κατά την πέδηση του οχήματος, ειδικά όταν συμβαίνουν απότομα σταματήματα [11]. Η διατιθέμενη ενέργεια κατά την πέδηση είναι η κινητική ενέργεια που αποκτήθηκε κατά τις επιταχύνσεις του οχήματος.

Ως εκ τούτου, το σύστημα αναγεννητικής πέδησης θα πρέπει να συνυπάρχει με το κλασικό σύστημα πέδησης. Η αναγεννητική πέδηση δίνει τη δυνατότητα στο όχημα να αυξήσει το εύρος ηλεκτροκίνησης του οχήματος έως και 15%.

Idle-off (ρελαντί)

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν αναπτύξει υβριδικά οχήματα, στα οποία η ηλεκτρική γεννήτρια συνδέεται απευθείας στον στροφαλοφόρο άξονα της μηχανής εσωτερικής καύσης (ολοκληρωμένος συνδυασμός εκκινητή – γεννήτριας, ISG), αντικαθιστώντας τον συμβατικό εκκινητή, το δυναμό και τον σφόνδυλο [15]. Η διάταξη αυτή παρέχει τη δυνατότητα μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου, καθώς η μηχανή εσωτερικής καύσης απενεργοποιείται στο ρελαντί (*<γαλλική ralenti*), ή και στην επιβράδυνση περιορίζοντας δραστικά την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων και θορύβου.

Επιπλέον, το σύστημα ολοκληρωμένου συνδυασμού εκκινητή - γεννήτριας (ISG) παρέχει τη δυνατότητα για την παραγωγή υψηλότερης ισχύος από τους εναλλάκτες των τωρινών συμβατικών οχημάτων. Επιπλέον, μία ισχυρή ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να επανεκκινήσει τη μηχανή εσωτερικής καύσης πολύ ταχύτερα από ό,τι ο απλός εκκινητής του συμβατικού οχήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ηλεκτρική γεννήτρια είναι αρκετά ισχυρή για να θέσει σε κανονική λειτουργία τη μηχανή εσωτερικής καύσης σε διάστημα μόλις 0,2 του δευτερολέπτου. Αυτό επιτρέπει την ομαλή, γρήγορη επανεκκίνηση που είναι αποδεκτή από τον οδηγό [3].

Επιπροσθέτως, στα υβριδικά οχήματα ο ψεκασμός καυσίμου συνήθως ξεκινά, αφού η μηχανή εσωτερικής καύσης λειτουργήσει σε κανονική ταχύτητα, κάτι το οποίο ουσιαστικά εξαλείφει τα άκαυστα καύσιμα και τις παρελκόμενες εκπομπές CO₂. Το μέσο όχημα βρίσκεται σε λειτουργία «ρελαντί» περίπου 20% της συνολικής του λειτουργίας. Ως εκ τούτου, με την τεχνική Idle-off επιτυγχάνεται μείωση κατανάλωσης καυσίμου περίπου κατά 5% – 10%.

Υποδιαστασιολόγηση της μηχανής εσωτερικής καύσης

Γενική αρχή για όλα τα οχήματα είναι πως η μέγιστη απαίτηση σε ιπποδύναμη και ροπή αυξάνεται κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης και σε οδήγηση σε ανηφορικές κλίσεις. Αντίθετα, αρκεί η ελάχιστη ισχύς για να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα του οχήματος κατά την πορεία σε ευθεία κλίση [3].

Επομένως, η μηχανή εσωτερικής καύσης μπορεί να είναι μικρότερων ονομαστικών μεγεθών χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρικό κινητήρα για την ενίσχυση της ισχύος της, όταν αυτό είναι απαραίτητο. Με σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους, μία μικρότερη μηχανή εσωτερικής καύσης είναι αποδοτικότερη για ένα συγκεκριμένο φορτίο, καθώς έχει λιγότερες απώλειες τριβής και λιγότερες απώλειες θερμότητας στο εσωτερικό της και στους κυλίνδρους.

Αποκλειστική λειτουργία κινητήρα

Μία ακόμα τεχνική που προάγει την εξοικονόμηση καυσίμου είναι η λειτουργία του οχήματος οδηγούμενο αμιγώς από τον ηλεκτρικό κινητήρα (Motor-only Operation) [3]. Τα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν τον ηλεκτροκινητήρα για την πρόωση του οχήματος σε χαμηλές ταχύτητες και φορτία, ελαχιστοποιώντας τη συνεισφορά της μηχανής εσωτερικής καύσης στις μη αποδοτικές φάσεις οδήγησης.

Επιπλέον, η μακράς περιόδου εφαρμογή της αποκλειστικής λειτουργίας κινητήρα απαιτεί μεγαλύτερες μπαταρίες, εκτοξεύοντας το κόστος και το βάρος τους. Επομένως, η περιορισμένη χρήση της λειτουργίας motor-only σε χαμηλές ταχύτητες μπορεί να επιτύχει βελτίωση της αποδοτικότητας σε λογικό κόστος, αλλά το συνολικό όφελος είναι σχετικά μικρό.

Επαναφόρτιση εκτός οχήματος

Τέλος, τα υβριδικά οχήματα χαρακτηρίζονται ως Plug-in (εξωτερικής φόρτισης) αν διαθέτουν τη δυνατότητα φόρτισης από το ηλεκτρικό δίκτυο εκτός από τη φόρτιση εντός του οχήματος. Ένα Plug-in όχημα μπορεί να είναι είτε παράλληλης είτε σειριακής συνδεσμολογίας. Με τον τρόπο αυτόν αυξάνεται το εύρος της αμιγούς ηλεκτρικής λειτουργίας [15].

6. Συστήματα αποθήκευσης και μετατροπής ενέργειας

6.1. Αποθήκευση ενέργειας

Μπαταρία

Οι μπαταρίες είναι το κύριο είδος αποθήκευσης ενέργειας για τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα [3,10]. Οι αποθήκες ενέργειας χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις επιτάχυνσης, αναγεννητικής πέδησης και στη λειτουργία χαμηλής ταχύτητας και χαμηλής ισχύος.

Σε υψηλότερα φορτία, είναι πιο αποδοτικό από πλευράς κόστους να χρησιμοποιείται η μηχανή εσωτερικής καύσης για την πρόωση του οχήματος από το να αυξηθεί το μέγεθος της μπαταρίας. Επομένως, οι απαιτήσεις ισχύος από την μπαταρία των υβριδικών οχημάτων είναι είτε σύντομες είτε σε χαμηλό φορτίο.

Από την άλλη πλευρά, οι απαιτήσεις ισχύος κατέχουν σπουδαίο ρόλο και οι σχεδιαστές οχημάτων δίνουν προτεραιότητα στην πλήρωση των απαιτήσεων αυτών. Ακόμη και για ένα μικρό αυτοκίνητο, ο ηλεκτρικός κινητήρας χρειάζεται να έχει ονομαστική ισχύ τουλάχιστον 10 kW (περίπου 13 hp). Οι απαιτήσεις ισχύος του κινητήρα αυξάνονται με το μέγεθος του οχήματος και με τη χρήση της καθαρής ηλεκτρικής λειτουργίας.

Άρα, οι μπαταρίες για τα υβριδικά οχήματα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν ή να απορροφούν ισχύ σε μεγάλο ρυθμό, κατά τη διάρκεια των επιταχύνσεων ή των σύντομων πεδησεων. Οι μπαταρίες που είναι σχεδιασμένες για τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι κατάλληλες για τα υβριδικά.

Οι κατάλληλες μπαταρίες για τα υβριδικά οχήματα πρέπει να διαθέτουν:

- Υψηλή ευρωστία
- Υψηλή αξιοπιστία
- Υψηλή ειδική ισχύ
- Μεγάλο κύκλο ζωής
- Υψηλή ειδική ενέργεια

- Χαμηλό αρχικό κόστος
- Χαμηλό κόστος αντικατάστασης

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Χωρητικότητα Πρόκειται για το ολοκλήρωμα του ρεύματος το οποίο μπορεί να διανεμηθεί υπό ορισμένες συνθήκες. Εκφράζεται σε Ah .

Στάθμη Φόρτισης Αποτελεί μία αδιάστατη παράμετρο, η οποία περιγράφει την ποσότητα του φορτίου που απομένει στην μπαταρία και εκφράζεται ως το ποσοστό επί της ονομαστικής χωρητικότητας.

Ειδική Ενέργεια Ειδική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί στην μπαταρία ανά μονάδα μάζας. Τυπικά εκφράζεται σε Wh/kg . Η ειδική ενέργεια επηρεάζει τη μάζα των μπαταριών που πρόκειται να τοποθετηθούν στο όχημα, άρα και το εύρος λειτουργίας του οχήματος ως αμιγώς ηλεκτρικού.

Ειδική Ισχύς Για τα υβριδικά οχήματα είναι το μέγεθος που κατέχει τη μέγιστη σημασία. Η ειδική ισχύς σχετίζεται με την επιτάχυνση και τα επίπεδα απόδοσης που μπορεί να επιτύχει το όχημα. Εκφράζεται σε W/kg .

Δομή μπαταριών

Οι μπαταρίες χρησιμοποιούν μία χημική διαδικασία για να αποθηκεύουν ενέργεια. Διαφορετικοί τύποι μπαταριών είναι διαθέσιμοι και η ηλεκτροχημική σειρά ορίζει την τάση της μίας κυψέλης: η τάση ανά κυψέλη (VPC) κυμαίνεται στο διάστημα $1V - 4V$ [8]. Το σύστημα μετάδοσης ενός ηλεκτρικά τροφοδοτούμενου οχήματος απαιτεί υψηλές τάσεις, ώστε να διατηρείται το ρεύμα σε χαμηλές τιμές για ορισμένη ποσότητα ισχύος. Για τον λόγο αυτόν, οι κυψέλες συνδέονται εν σειρά. Οι περισσότερες μπαταρίες χαρακτηρίζονται από τη χωρητικότητα φορτίου σε Ah .

Από την οπτική των ηλεκτρονικών ισχύος και των ηλεκτρικών κινητήρων, οι μπαταρίες θα έπρεπε να είχαν υψηλότερη τάση. Οι υψηλότερες τάσεις οδηγούν σε χαμηλότερα ρεύματα για την ίδια ισχύ, τα οποία είναι πιο εύκολο να τα χειριστεί κανείς και προκαλούν μικρότερες απώλειες.

Από την οπτική των μπαταριών, είναι πιο εύκολο να αυξηθεί η περιεχόμενη ενέργεια αυξάνοντας τη χωρητικότητα μέσω της αύξησης των κυψελών. Το κύριο μειονέκτημα,

όμως, σε αυτή τη λογική είναι πως περισσότερες κυψέλες σημαίνουν περισσότερες συνδέσεις και προβλήματα αστάθειας.

Είδη μπαταριών

1. Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (Lead-Acid Battery)

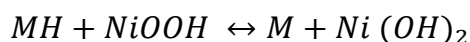
Το κύριο πλεονέκτημα των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι το χαμηλό κόστος [7]. Για τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα σχεδιάστηκαν μπαταρίες μολύβδου-οξέος υψηλότερης ισχύος, όπως η μπαταρία μολύβδου-οξέος με βαλβίδα ρύθμισης (VRLA).

Ωστόσο, ακόμη και οι μπαταρίες VRLA έχουν σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και σύντομο κύκλο ζωής, καθώς η περιοδική αντικατάσταση αυξάνει σημαντικά το πραγματικό κόστος του συστήματος. Βασικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα εξαιτίας του υψηλού μοριακού βάρους του μολύβδου.

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος εφαρμόζονται σε κάποια σχετικά χαμηλής ισχύος υβριδικά οχήματα λόγω του χαμηλού κόστους τους.

2. Μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH)

Το νικέλιο είναι πιο ελαφρύ μέταλλο από τον μόλυβδο και διαθέτει πολύ καλές ηλεκτροχημικές ιδιότητες [7]. Λόγω της ανώτερης ειδικής ενέργειας ως προς την μπαταρία νικελίου – καδμίου (NiCd) και της μη τοξικότητας ή καρκινογενετικότητάς του, η μπαταρία νικελίου-υδριδίου μετάλλου αντικαθιστά την μπαταρία νικελίου-καδμίου. Η ολική αντίδραση σε μία μπαταρία νικελίου-υδριδίου μετάλλου είναι:



Όταν η μπαταρία εκφορτίζεται, το υδρίδιο του μετάλλου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο οξειδώνεται για να σχηματίσει κράμα μετάλλου και το οξυ-υδροξείδιο του νικελίου στο θετικό ηλεκτρόδιο ανάγεται σε υδροξείδιο νικελίου. Κατά τη φόρτιση, λαμβάνει χώρα η αντίστροφη αντίδραση.

Εν συγκρίσει με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Επίσης, είναι απολύτως ασφαλείς και η ισχύς εξόδου τους δεν επηρεάζεται από την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου χρησιμοποιούνται σε υβριδικά οχήματα υψηλής ισχύος, όπως το Toyota Prius, το Honda Insight και το Civic Hybrid.

Χαρακτηριστικά μεγέθη της Μπαταρίας NiMH

Στάθμη φόρτισης των μπαταριών	$SoC = -\frac{I_{batt}}{C_{batt}}$
Προσφερόμενη ισχύς	$P_{batt} = V_{oc} I_{batt} - I_{batt}^2 R_{batt}$
Ρεύμα εξόδου	$I_{batt} = \frac{P_{batt}}{C_{batt}}$
Τάση εξόδου	$V_{batt} = V_{oc} - \frac{P_{batt}}{V_{batt}} R_{batt}$
Εσωτερική αντίσταση	$R_{batt} = f(SoC, T)$
Θερμοκρασία	T

Πλεονεκτήματα [31]

- Έχει την υψηλότερη ειδική ενέργεια (65 έως 95 Wh/kg) και την υψηλότερη ειδική ισχύ (200 έως 300 W/kg) ως προς τις μπαταρίες που βασίζονται στο νικέλιο.
- Είναι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν περιέχει κάδμιο.
- Αντιστοιχίζεται σε επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης (μικρότερη πτώση τάσης).
- Έχει ικανότητα ταχείας επαναφόρτισης.

Μειονεκτήματα

- Μεγάλο κόστος
- Υψηλοί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης
- Λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Απαιτήσεις για ψύξη

3. Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Ion)

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου διαθέτουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος από τις μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου. Έχουν, επίσης, καλή απόδοση και σε χαμηλές θερμοκρασίες, και ο ρυθμός αυτοεκφόρτισής τους είναι χαμηλός.

Εντούτοις, χρειάζονται βελτιώσεις στη διάρκεια ζωής τους και το κόστος, ώστε να καταστούν βιώσιμες για τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα [11].

Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές (UC) αποτελούν μία ανταγωνιστική εναλλακτική λύση για την αποθήκευση της ενέργειας [7]. Η λειτουργία συχνής εκκίνησης και ακινητοποίησης των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων απαιτεί πολύ χαμηλότερη μέση ισχύ από την ισχύ κορυφής στις επιταχύνσεις και στις αναβάσεις [3]. Ο λόγος ισχύος κορυφής προς μέση ισχύ μπορεί να υπερβεί το 10:1. Κατά τον σχεδιασμό των ηλεκτρικών υβριδικών οχημάτων, η ικανότητα ισχύος κορυφής της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας είναι πιο σημαντική από την ικανότητα ενέργειας.

Η πρόκληση στον σχεδιασμό των ηλεκτρικών υβριδικών οχημάτων είναι η ταυτόχρονη παροχή υψηλών τιμών ειδικής ενέργειας, ειδικής ισχύος και κύκλου ζωής. Η λύση δίνεται από την υβριδοποίηση μίας πηγής ενέργειας και μίας πηγής ισχύος. Η πηγή ενέργειας μπορεί να αποτελείται από μπαταρίες και κυψέλες καυσίμων και παρέχει υψηλή ειδική ενέργεια.

Οι υπερπυκνωτές λειτουργούν ως πηγή ισχύος, διαθέτουν υψηλή ειδική ισχύ και μπορούν να ανατροφοδοτούνται από την πηγή ενέργειας σε λειτουργία χαμηλών οδηγικών απαιτήσεων ή μέσω αναγεννητικής πέδησης. Επιπροσθέτως, υπερέχουν σε ταχεία μεταφορά ισχύος και προσφέρουν τη δυνατότητα για μεγαλύτερη διάρκεια με τις ελάχιστες απαιτήσεις ψύξης. Είναι ιδανικοί για την υποβοήθηση της επιτάχυνσης και την εκμετάλλευση της αναγεννητικής πέδησης.

Ωστόσο, χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και δεν μπορούν να αποθηκεύσουν αρκετή ενέργεια για να καλύψουν τις απαιτήσεις υψηλών φορτίων, όπως οδήγηση σε ανωφέρεια.

Οι υπερπυκνωτές κατατάσσονται στις εξής δυο κατηγορίες με κριτήριο τον μηχανισμό αποθήκευσης φορτίου:

1. **Πυκνωτές διπλού ηλεκτροχημικού στρώματος (EDLCs)** Μία καθαρή ηλεκτροστατική έλξη λαμβάνει χώρα μεταξύ των ιόντων που συσσωρεύονται στη διεπαφή ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη. Το ηλεκτρόδιο είναι συνήθως κατασκευασμένο από ενεργό άνθρακα.

2. **Ψευδοπυκνωτές** Τα ηλεκτρόνια εμπλέκονται σε ταχείες Φαραδικές αντιδράσεις και μεταφέρονται προς ή από τις ζώνες σθένους του αντιδραστηρίου της οξειδοαναγωγικής καθόδου και ανόδου όταν, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται αγώγιμα πολυμερή.

Η ενεργειακή πυκνότητα είναι τόσο χαμηλή που σπάνια οι κατασκευαστές τους εντάσσουν στα υβριδικά οχήματα. Εντούτοις, βρίσκουν συχνή εφαρμογή στα οχήματα κυψελών καυσίμου για την παροχή σύντομης υποβοήθησης.

Εντούτοις, η ενσωμάτωση του υλικού του γραφενίου στους πυκνωτές διπλού ηλεκτροχημικού στρώματος (EDLC) για τα ηλεκτρικά οχήματα προοιωνίζει μια σημαντική ανακάλυψη στην τεχνολογική πρόοδο των στον τομέα των μεταφορών [26,27]. Οι υπερπυκνωτές αυτοί θα έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν και να εκφορτίζουν σε λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά για απεριόριστους κύκλους φόρτισης.

Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας				
Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας	Ειδική ενέργεια (Wh/kg)	Ειδική ισχύς (W/kg)	Ενεργειακή απόδοση (%)	Κύκλος ζωής
Μολύβδου - Οξέος	30 – 50	150 – 400	50 – 92	500 – 800
Νικελίου-υδριδίου μετάλλου	30 – 80	200 – 1000	66 – 70	500 – 1000
Ιόντων λιθίου	150 – 250	300 – 1500	80 – 90	400 – 1200
Υπερπυκνωτές	0,5 – 30	1000 – 9000	90	1000000

Σφόνδυλος

Ο σφόνδυλος είναι είδος μονάδας παροχής ενέργειας, η οποία αποθηκεύει ενέργεια σε μηχανική μορφή [11]. Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν κινητική ενέργεια μέσω ενός στρεφόμενου τροχού, σαν δρομέα ή δίσκου. Εξομαλύνουν την ισχύ που παρέχεται από τους απότομους παλμούς της μηχανής εσωτερικής καύσης.

Ωστόσο, η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας που ζητείται από τον σφόνδυλο των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι μικρή και περιορίζεται από την ανάγκη του οχήματος να επιταχύνει γρήγορα.

Οι σφόνδυλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα ως σύστημα υποβοήθησης ισχύος της μηχανής εσωτερικής καύσης. Εναλλακτικά, μπορούν να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες στα ηλεκτρικά οχήματα ως πρωτεύουσα πηγή ενέργειας ή να λειτουργήσουν σε συνδυασμό με αυτές.

Η αποθηκευμένη στον σφόνδυλο ενέργεια είναι ίση με: $U = 1/2 J\omega^2$.

Συμπεράσματα

Μία πιθανή μακροπρόθεσμη λύση θα μπορούσε να είναι ο συνδυασμός υπερπυκνωτή και μπαταρίας [3]. Θεωρητικά, ο υπερπυκνωτής μπορεί να παρέχει τη μέγιστη ισχύ για σύντομες επιταχύνσεις και πεδήσεις και στη συνέχεια η μικρότερου μεγέθους συστοιχία μπαταριών θα μπορούσε να τον επαναφορτίζει. Σημειώνουμε πως οι υπερπυκνωτές μπορούν να αποθηκεύουν μικρή ποσότητα ενέργειας.

Στην ουσία ο υπερπυκνωτής λειτουργεί ως χώρος προσωρινής αποθήκευσης (buffer) για τη συστοιχία. Με τον τρόπο αυτόν, εξοικονομείται χώρος αποθήκευσης ενέργειας και κόστος.

6.2. Μετατροπή ενέργειας

Η μετατροπή της ενέργειας σε ένα υβριδικό όχημα μπορεί να επιτευχθεί με τη συμβολή πλήθους τεχνολογιών, όπως οι κυψέλες καυσίμου, οι φωτοβολταϊκές κυψέλες, η θερμοηλεκτρική γεννήτρια και η αναγεννητική πέδηση, η οποία περιγράφηκε στο εδάφιο 5.2.1.

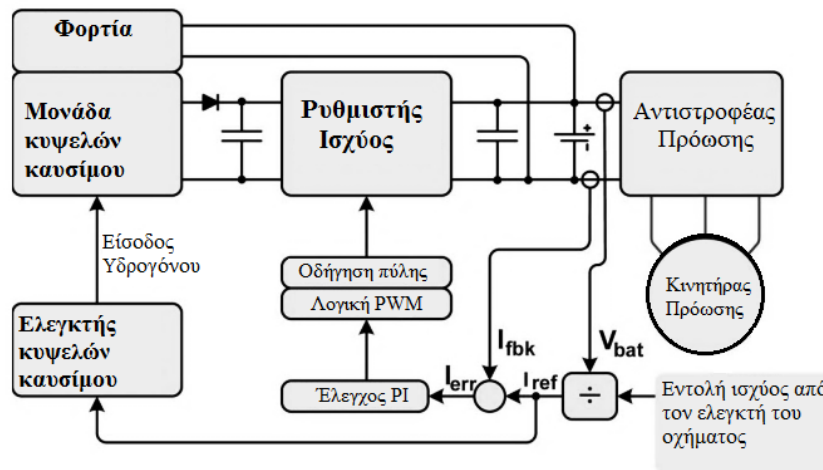
Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν χημική ενέργεια απευθείας σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια [8,10]. Κύρια καύσιμα για τις κυψέλες καυσίμου είναι το υδρογόνο, η μεθανόλη ή ακόμα και η βενζίνη.

Χρησιμοποιώντας υδρογόνο ως καύσιμο το μόνο προϊόν της αντίδρασης θα είναι νερό. Οι κυψέλες καυσίμου υπερέχουν στο θέμα της ενεργειακής κατανάλωσης, του θορύβου και της μόλυνσης.

Θεωρητικά η απόδοση των κυψελών καυσίμου ανέρχεται στο 90%. Μεταξύ των διαφόρων τύπων των κυψελών καυσίμου, οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) έχουν την υψηλότερη πυκνότητα ισχύος (>

1kW/lt). Έτσι, οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι το προτιμώμενο είδος για τα οχήματα (Εικόνα 19). Η πρακτική απόδοση αυτού του συστήματος κυψελών καυσίμου είναι περίπου 40%.



Εικόνα 19: Σύστημα οχήματος κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου δεν είναι λύση ως μοναδική πηγή καυσίμου για το εγγύς μέλλον, διότι δεν υπάρχει διαθέσιμη τεχνολογία για να συνδυάσει όλα τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου σε ένα σύστημα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά.

Πλεονεκτήματα συστήματος κυψελών καυσίμου [15]

- Εκτελεί άμεση μετατροπή ενέργειας και όχι παραγωγή ενέργειας μέσω καύσης.
- Δεν περιέχει κινητά μέρη και δεν παράγει θόρυβο.
- Διαθέτει ευελιξία ως προς τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων.
- Η απόδοσή του δε μεταβάλλεται αισθητά από τη μεταβολή του εκάστοτε φορτίου.
- Μειώνει τις εκπομπές CO₂ κατά 75% και περιορίζει την παραγωγή τοξικών ουσιών.

Φωτοβολταϊκές κυψέλες

Τα ηλιακά κινούμενα οχήματα, όπως αυτοκίνητα, σκάφη, ποδήλατα, ακόμα και αεροπλάνα, χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια είτε για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού κινητήρα είτε για τη φόρτιση της μπαταρίας [18].

Χρησιμοποιούν μια σειρά από φωτοβολταϊκές κυψέλες που μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Δημοφιλέστερες τεχνολογίες αποτελούν τα φωτοβολταϊκά

κρυσταλλικού πυριτίου και λεπτού υμενίου [23]. Η ηλεκτρική ενέργεια καταλήγει απευθείας σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα που παρέχει ισχύ στο όχημα ή σε μια μπαταρία.

Ουσιαστικά ένα ηλιακό όχημα είναι ένα είδος ηλεκτρικού οχήματος, αλλά η κύρια διαφορά τους έγκειται στο ότι οι μπαταρίες του ηλιακού φορτίζονται μέσω ηλιακών συλλεκτών, οι οποίοι τοποθετούνται στην επιφάνεια του αυτοκινήτου.

Τα ηλιακά οχήματα διαφέρουν από τα συμβατικά οχήματα ως προς το μέγεθος, το βάρος, τη μέγιστη ταχύτητα και το κόστος. Η πρακτικότητα των ηλιακών οχημάτων είναι περιορισμένη, καθώς παραγωγή ενέργειας συμβαίνει μόνο όταν ο ήλιος ακτινοβολεί.

Θερμοηλεκτρική γεννήτρια

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική [23]. Επομένως, μπορεί να καταστήσει πλεονέκτημα τις εξαιρετικά μεγάλες θερμικές απώλειες που προκύπτουν από τη μηχανή εσωτερικής καύσης. Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια βρίσκεται υπό εξέταση για την εφαρμογή της σε οχήματα της Nissan και της BMW.

7. Στρατηγικές ελέγχου

Οι στρατηγικές ελέγχου της ενεργειακής διαχείρισης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες [9,10]:

- Στρατηγικές ελέγχου βάσει κανόνων
- Στρατηγικές βελτιστοποίησης

Μία ακόμη κατηγοριοποίηση των στρατηγικών ελέγχου βασίζεται στην αιτιατότητα. Συνεπώς υπάρχουν:

- Μη αιτιατοί ελεγκτές, οι οποίοι απαιτούν τη λεπτομερή γνώση των μελλοντικών οδηγικών καταστάσεων.
- Αιτιατοί ελεγκτές, οι οποίοι εφαρμόζονται σε περιπτώσεις που ο κύκλος οδήγησης δεν είναι εκ των προτέρων γνωστός ούτε η συνάρτηση της ταχύτητας προς τον χρόνο.

Στόχος των στρατηγικών ελέγχου ενός υβριδικού οχήματος είναι κατ' αρχάς η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου και συνάμα η μείωση των εκπομπών ρύπων [35]. Συν τοις άλλοις, κρίσιμη θεωρείται η οδηγική ικανότητα που προσφέρει το όχημα με τον κάθε έλεγχο, καθώς πρώτιστο κριτήριο για την αγορά ενός οχήματος είναι η κάλυψη των απαιτήσεων ισχύος του οδηγού. Τέλος, καθοριστικής σημασίας είναι η τήρηση συγκεκριμένων ορίων στάθμης φόρτισης της μπαταρίας.

7.1. Στρατηγικές ελέγχου βάσει κανόνων

Οι στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται σε κανόνες (rule-based control) έχουν ως κύριο γνώρισμα την αποτελεσματικότητα σε εποπτικό έλεγχο πραγματικού χρόνου για ένα υβριδικό σύστημα κίνησης. Οι κανόνες διατυπώνονται με τη βοήθεια της ευρετικής μεθόδου, της διαίσθησης και της εμπειρίας χωρίς την εκ των προτέρων γνώση του επερχόμενου κύκλου οδήγησης.

Για ένα υβριδικό όχημα που φέρει ως κύρια πηγή πρόωσης τη μηχανή εσωτερικής καύσης, ο έλεγχος μεταθέτει το σημείο λειτουργίας της μηχανής εσωτερικής καύσης όσο το δυνατόν πλησιέστερα σε κάποια προκαθορισμένη τιμή για κάθε στιγμή της περιόδου λειτουργίας του οχήματος.

Εάν απαιτείται βέλτιστη απόδοση, τα σημεία λειτουργίας του οχήματος θα πλησιάσουν στην περιοχή του βέλτιστου σημείου απόδοσης για μία ορισμένη ταχύτητα της μηχανής εσωτερικής καύσης.

Εάν, όμως, απαιτείται η βέλτιστη οικονομία καυσίμου, τα σημεία λειτουργίας του οχήματος θα πλησιάσουν το σημείο λειτουργίας της μηχανής εσωτερικής καύσης που αντιστοιχίζεται σε αυτή την κατανάλωση.

Τέλος, το κύριο πλεονέκτημα του ελέγχου βάσει κανόνων είναι ότι προσαρμόζεται κι εφαρμόζεται εύκολα. Αν συντονιστεί σωστά, μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και της βιωσιμότητας του φορτίου.

Ωστόσο, η συμπεριφορά του ελέγχου αυτού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των κατωφλίων, τα οποία στην πραγματικότητα πιθανόν να ποικίλλουν σημαντικά ανά κύκλο οδήγησης.

Η περιορισμένη ευρωστία του ελέγχου βάσει κανόνων και η προσπάθεια που απαιτείται για τη ρύθμισή του, προωθούν την ανάπτυξη ελεγκτών βασισμένων στο μοντέλο για τη βελτιστοποίηση της ροής ισχύος.

Υποκατηγορίες της βάσει κανόνων στρατηγικής αποτελούν:

- Η ασαφής λογική
- Η ντετερμινιστική μέθοδος

7.1.1. Ασαφής λογική βασισμένη σε κανόνες

Για ένα υβριδικό σύστημα κίνησης, πολυδιάστατο, μη γραμμικό και χρονικά μεταβαλλόμενο η ασαφής λογική φαίνεται να είναι η πιο λογική προσέγγιση του προβλήματος. Πράγματι, η ιδιότητα λήψης αποφάσεων της ασαφούς λογικής μπορεί να υιοθετηθεί για την υλοποίηση ενός μοντέλου πραγματικού χρόνου και υποβέλτιστης κατανομής ισχύος.

Πλεονεκτήματα

- **Ευρωστία** Πρόκειται για έλεγχο ανεκτικό σε ανακριβείς μετρήσεις και σε μεταβολές των συνιστωσών.

- **Προσαρμοστικότητα** Οι ασαφείς κανόνες μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν, εάν είναι απαραίτητο.

Οι ασαφείς μέθοδοι παρουσιάζονται στη συνέχεια [23].

Συμβατική ασαφής στρατηγική

Στη στρατηγική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξελιγμένος ελεγκτής που αποτελείται από δύο ελεγκτές ασαφούς λογικής, για παράδειγμα έναν προγνωστικό δείκτη για την πρόθεση του οδηγού (DIP) και έναν ελεγκτή ισορροπίας ισχύος (PBC). Μία άλλη μέθοδος είναι ο σχεδιασμός ελεγκτή μέσω κλιμάκωσης φορτίου.

Ασαφής προσαρμοστική στρατηγική

Η στρατηγική αυτή βασίζεται στα βάρη των εξισώσεων, τα οποία προσδιορίζουν τη σημασία των παραμέτρων. Ως εκ τούτου, δεν είναι σε θέση να ελέγχει κάθε παράμετρο αποφασιστικά. Συνίσταται στην εξαγωγή πληροφοριών οδήγησης, στην αναγνώριση οδηγικής κατάστασης (DSI), στον ασαφή διανομέα ροπής (FTD) και στην αντιστάθμιση της στάθμης φόρτισης. Η τεχνική αυτή παραβλέπει τις αποδόσεις μετάδοσης της κίνησης. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές καθιστά την ασαφή λογική πιο επιτυχημένη.

Ασαφής στρατηγική πρόβλεψης

Ασαφής προγνωστική στρατηγική βασίζεται στο ιστορικό οδήγησης για να αποφασιστεί η μελλοντική οδηγική κατάσταση μέσω ενός παραθύρου πρόβλεψης και μίας προγραμματισμένης διαδρομής. Το μειονέκτημα είναι ότι αδυνατεί στην εκτέλεση ελέγχου σε πραγματικό χρόνο.

7.1.2. Ντετερμινιστικές μέθοδοι βασισμένες σε κανόνες

Για τον σχεδιασμό ντετερμινιστικών κανόνων χρησιμοποιούνται η ευρετική μέθοδος βάσει της ανάλυσης της ενεργειακής ροής στο υβριδικό σύστημα κίνησης, οι χάρτες εκπομπών καυσίμου ή απόδοσης και η ανθρώπινη εμπειρία. Σκοπός της ντετερμινιστικής μεθόδου είναι η κατανομή της απαιτούμενης ισχύος ανάμεσα στους μετατροπείς ισχύος. Οι ντετερμινιστικές μέθοδοι περιγράφονται περιληπτικά ακολούθως [23].

Στρατηγική του θερμοστάτη (on / off)

Πρόκειται για μία εύρωστη, απλή και εύκολη στρατηγική ελέγχου. Αφορά στη συχνή φόρτιση και εκφόρτιση των πηγών, κάτι που δε συνιστάται για την μπαταρία.

Στρατηγική ελέγχου ακόλουθου ισχύος

Όμοια στρατηγική με εκείνη του θερμοστάτη με τη διαφορά ότι η στρατηγική ελέγχου ακόλουθου ισχύος είναι κατάλληλη για την μπαταρία και η λογική του βασίζεται στη ζήτηση ισχύος από τα οχήματα και τη στάθμη φόρτισης των πηγών.

Τροποποιημένη στρατηγική ακόλουθου ισχύος

Η στρατηγική αυτή βασίζεται στην ενεργειακή χρήση και τις εκπομπές.

Στρατηγική βασισμένη στις μηχανές καταστάσεων

Η στρατηγική αυτή βασίζεται στην απαίτηση του οδηγού. Οι καταστάσεις λειτουργίας αναπαρίστανται ως μηχανές καταστάσεων. Ωστόσο, δεν προτείνεται ως μοναδική στρατηγική ελέγχου.

7.2. Στρατηγικές ελέγχου βασισμένες στη βελτιστοποίηση

Αυτές οι στρατηγικές ελέγχου μεγιστοποιούν την αποτελεσματικότητα του συστήματος κίνησης ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις απώλειες. Οι βέλτιστες ροπές αναφοράς για τους μετατροπείς ισχύος και οι βέλτιστες σχέσεις μετάδοσης υπολογίζονται από την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους που αντιπροσωπεύει γενικά την κατανάλωση καυσίμου ή τις εκπομπές.

Εάν η βελτιστοποίηση αυτή επιχειρείται σε έναν σταθερό κύκλο οδήγησης, μπορεί να βρεθεί μια ολική βέλτιστη λύση. Στην πραγματικότητα, αυτή η λύση είναι μη αιτιατή, καθώς βρίσκει την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου χρησιμοποιώντας γνώση όχι μόνο των παρελθοντικών, αλλά και των μελλοντικών απαιτήσεων ισχύος. Φυσικά, στόχος είναι η μείωση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου και όχι της στιγμιαίας.

Προφανώς, αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για πραγματικό χρόνο διαχείρισης της ενέργειας. Ωστόσο, θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για τον σχεδιασμό κανόνων για απευθείας εφαρμογή ή σύγκριση με σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας των άλλων στρατηγικών ελέγχου.

7.2.1. Ολική βελτιστοποίηση

Έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος ολικής βελτιστοποίησης για τις ροές του συστήματος κίνησης με βάση την αρχή της βελτιστοποίησης Bellman και εφαρμόζεται στα υβριδικά οχήματα κυψελών καυσίμου. Η ολική βελτιστοποίηση αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της συνολικής ενεργειακής απώλειας καθ'όλη τη διάρκεια του κύκλου.

Οι στρατηγικές ελέγχου ολικής βελτιστοποίησης μπορούν να διακριθούν στις ακόλουθες [23, 30].

Γραμμικός προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός (LP) χρησιμοποιεί πολλές τμηματικά γραμμικές προσεγγίσεις για να μετατρέψει το υβριδικό σύστημα κίνησης και την αποδοτικότητα των καυσίμων σε γραμμικό πρόγραμμα. Ένα μειονέκτημα του ελέγχου αυτού είναι ότι η προσέγγιση δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύπλοκο σύστημα μετάδοσης κίνησης.

Προσέγγιση θεωρίας ελέγχου

Η προσέγγιση της θεωρίας ελέγχου στηρίζεται σε δύο παράγοντες (ροπή και πλήθος γραναζιών) για να βρεθεί η βέλτιστη λύση σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτός ο έλεγχος είναι ανώτερος λόγω των χαρακτηριστικών αναλυτικής φύσης, αλλά παρουσιάζει δυσκολίες στην εξεύρεση μία αναλυτικής λύσης για μία πιο περίπλοκη δομή μετάδοσης κίνησης.

Δυναμικός προγραμματισμός

Ο δυναμικός προγραμματισμός (DP) είναι ένα εργαλείο δυναμικής βελτιστοποίησης που βασίζεται στη συνάρτηση κόστους, το οποίο είναι διαμορφωμένο από την εκ των προτέρων γνώση των μελλοντικών συνθηκών οδήγησης [23].

Ο δυναμικός προγραμματισμός είναι μη αιτιατός, καθώς εξαρτάται από την άγνωστη μελλοντική απαίτηση ισχύος [24,25]. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη ενός μεγάλου χρονικού ορίζοντα, αλλά συνάμα προκύπτει εξαιρετικά μεγάλος υπολογιστικός φόρτος. Η τεχνική αυτή είναι στην πραγματικότητα κατάλληλη για διεργασίες πολλών σταδίων που απαιτούν μια ακολουθία αλληλένδετων αποφάσεων.

Παρ'όλα αυτά, ο δυναμικός προγραμματισμός χωλαίνει στο ότι ο επιθυμητός κύκλος οδήγησης πρέπει να είναι γνωστός από την αρχή της προσομοίωσης, με αποτέλεσμα να

μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο. Οι λύσεις μέσω δυναμικού προγραμματισμού έχουν αποτελέσει πρότυπες τιμές για τη βέλτιστη οικονομία καυσίμου. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς για τη βελτίωση των άλλων στρατηγικών ελέγχου.

Στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός

Ο στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός (SDP) είναι κατάλληλος για εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο. Συνίσταται σε μια συνάρτηση κόστους, η οποία βασίζεται στον βέλτιστο αλγόριθμο.

Γενετικός αλγόριθμος

Πρόκειται για έναν εύκολο στη χρήση αλγόριθμο σε σύνθετο πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού/βελτιστοποίησης (GA). Το μειονέκτημά του είναι η αδυναμία του σχεδιαστή να έχει άποψη των υπολογισμών του συστήματος ισχύος σε αντίθεση με αναλυτική προσέγγιση.

Προσαρμοστικός ασαφής κανόνας

Βασίζεται στον συνδυασμό της ασαφούς λογικής και μίας μεθόδου βελτιστοποίησης.

Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι συλλογές από μικρές ατομικά διασυνδεδεμένες μονάδες επεξεργασίας [45]. Η πληροφορία διέρχεται διαμέσου αυτών των μονάδων κατά μήκος των διασυνδέσεων. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση ελεγκτών βασισμένων στη βελτιστοποίηση, οι οποίοι ελαχιστοποιούν την κατανάλωση καυσίμου του οχήματος ανεξάρτητα από το μοτίβο οδήγησης [44].

Το κύριο πλεονέκτημα χρήσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι ότι ο ελεγκτής δεν αντιστοιχίζεται σε έναν συγκεκριμένο κύκλο οδήγησης ή οδηγό. Διαθέτουν, δηλαδή, τη δυνατότητα να αναγνωρίζουν αυτόματα τα μοτίβα δεδομένων από πραγματικά συστήματα ή φυσικά μοντέλα. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν εγγυάται πάντα τη βέλτιστη λύση για ολόκληρο το εύρος λειτουργίας.

7.2.2. Βελτιστοποίηση πραγματικού χρόνου

Οι τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης δεν εφαρμόζονται άμεσα σε πραγματικού χρόνου μοντελοποιήσεις, θεωρώντας δεδομένο ότι προσφέρουν μόνο αιτιατές λύσεις, αφού εξαρτώνται μόνο από παροντικές και παρελθοντικές τιμές.

Για να αναπτυχθεί μια συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιείται στη στιγμιαία βελτιστοποίηση, εκτός από τη μέτρηση της οικονομίας καυσίμου, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και οι μεταβολές της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας για την εξασφάλιση της ηλεκτρικής βιωσιμότητας.

Οι στρατηγικές ελέγχου βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο μπορούν να διαχωριστούν στις εξής κατηγορίες.

Ελαχιστοποίηση ισοδύναμης κατανάλωσης καυσίμου (ECMS)

Η στρατηγική αυτή βασίζεται στο κόστος λειτουργίας, το οποίο αντικαθιστά την ολική συνάρτηση κόστους στην τοπική [23]. Ελαχιστοποιεί την ισοδύναμη κατανάλωση καυσίμου στη διανομή ισχύος μεταξύ των πηγών ενέργειας κάθε στιγμή. Αυτός ο έλεγχος είναι εύρωστος και κατάλληλος για πολύπλοκες δομές. Η στρατηγική ελαχιστοποίησης ισοδύναμης κατανάλωσης καυσίμου είναι σε θέση να επιτύχει σχεδόν βέλτιστη απόδοση, αλλά χωρίς να λαμβάνει υπ' όψιν το πρόβλημα διατήρησης του φορτίου στους υπολογισμούς.

Έλεγχος αποσύζευξης

Πρόκειται για μία στρατηγική ελέγχου βελτιστοποίησης πραγματικού χρόνου, η οποία εξασφαλίζει οδική συμπεριφορά, ζήτηση ενέργειας της μπαταρίας και στάθμη φόρτισης εντός ενός αποδεκτού εύρους τιμών.

Προσέγγιση εύρωστου ελέγχου

Ο εύρωστος έλεγχος χρησιμοποιεί τα προφίλ ροπής και ισχύος που επιλύουν το πρόβλημα διαμοιρασμού ισχύος στο όχημα μικτής συνδεσμολογίας για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου.

Βέλτιστος προβλεπτικός έλεγχος

Ο βέλτιστος προβλεπτικός έλεγχος χρησιμοποιεί το μοτίβο και πληροφορίες του κύκλου οδήγησης για να επιτευχθεί η βέλτιστη οικονομία καυσίμου. Ο έλεγχος αυτός διαθέτει ένα παράθυρο πρόβλεψης που μπορεί να διέπεται από τον βέλτιστο νόμο ελέγχου σε πραγματικό χρόνο πρόβλεψης. Το 2009 διεξήχθη έρευνα σχετική με την εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου σε όχημα μικτής συνδεσμολογίας (split power hybrid electric vehicle) [1].

8. Προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου

8.1. Θεμελίωση

Ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου αντικατοπτρίζει την ανθρώπινη συμπεριφορά με την οποία επιλέγουμε τις δράσεις ελέγχου που κατά την αντίληψή μας θα οδηγήσουν στο καλύτερο προβλεπόμενο αποτέλεσμα για έναν ορισμένο χρονικό ορίζοντα [33]. Ανανεώνουμε τις αποφάσεις μας κάθε φορά που διατίθενται νέες παρατηρήσεις.

Τη λογική του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου διέπουν οι ακόλουθες αρχές:

- Ο νόμος ελέγχου εξαρτάται από την προβλεπόμενη συμπεριφορά.
- Οι προβλεφθείσες εξόδοι υπολογίζονται μέσω ενός μοντέλου.
- Ο μετατιθέμενος ορίζοντας αναγκάζει την είσοδο ελέγχου να ενημερώνεται κάθε στιγμή της δειγματοληψίας.

Το μοντέλο περιέχει πληροφορίες για την εξάρτηση της εξόδου από την παρούσα μετρηθείσα μεταβλητή και τις μελλοντικές/παρούσες εισόδους. Μπορεί να είναι είτε γραμμικό είτε μη γραμμικό.

Στο *γραμμικό μοντέλο* η εξάρτηση της πρόβλεψης από τον μελλοντικό έλεγχο είναι γραμμική διευκολύνοντας τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Αντιθέτως, το *μη γραμμικό μοντέλο* προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια με το μειονέκτημα του πιθανού υπολογιστικού φόρτου. Για να αποδώσει το μοντέλο αξιόπιστη πρόβλεψη ίσως δεν είναι αναγκαία η μοντελοποίηση της πλήρους φυσικής, χημικής και εσωτερικής συμπεριφοράς του.

Σε γενικές γραμμές, ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου συνίσταται σε έναν πολυμεταβλητό αλγόριθμο ελέγχου και χρησιμοποιεί:

- Εσωτερικό δυναμικό μοντέλο
- Ιστορικό παρελθόντων δράσεων ελέγχου
- Μια συνάρτηση κόστους βελτιστοποίησης για έναν *μετατιθέμενο ορίζοντα* με στόχο τον υπολογισμό των βέλτιστων δράσεων ελέγχου.

Στόχος του ελεγκτή

Για τη λήψη σωστών αποφάσεων απαιτείται ένα κριτήριο που να αντανακλά τον στόχο [32,33]. Ο στόχος σχετίζεται με μία συνάρτηση σφάλματος, η οποία βασίζεται στη διαφορά της επιθυμητής από την πραγματική απόκριση.

Η συνάρτηση στόχου καλείται *συνάρτηση κόστους* και η δράση βέλτιστου ελέγχου βρίσκεται στην ελαχιστοποίησή της μέσα στο παράθυρο βελτιστοποίησης. Οι χαμηλές τιμές της συνάρτησης κόστους συνεπάγονται καλή απόδοση κλειστού βρόχου.

Μετατιθέμενος ορίζοντας

Για την κατανόηση του υπό μελέτη ελέγχου αναφέρουμε ένα παράδειγμα της καθημερινής ζωής στο οποίο εφαρμόζουμε τον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου ακουσίως. Πρόκειται για τη διαδικασία νυχτερινής οδήγησης. Ο οδηγός μπορεί να δει περίπου 100 m μπροστά, τα οποία υποχωρούν με την ταχύτητα του οχήματος. Άρα, συλλέγει διαρκώς νέες πληροφορίες από τον μακρινό ορίζοντα και τις χρησιμοποιεί για την ανανέωση των δράσεων ελέγχου.

Ο ορίζοντας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο απόκρισης του συστήματος. Ειδάλλως, αγνοούμε ένα μέρος της συμπεριφοράς του μοντέλου. Στο παράδειγμά μας, ένας ορίζοντας μικρότερος του χρόνου απόκρισης παρομοιάζεται με το να βλέπει ο οδηγός σε μικρότερη απόσταση από την απόσταση πέδησης.

Η έννοια της πρόβλεψης

Ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου εξετάζει την προβλεπόμενη συμπεριφορά για έναν ορισμένο χρονικό ορίζοντα και σε διαδοχικές στιγμές δειγματοληψίας προβλέπει ένα ακόμη δείγμα στο μέλλον. Όσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο, τόσο ακριβής θα είναι και ο έλεγχος. Τονίζεται ότι ακόμα και με ένα λιγότερο λεπτομερές, αλλά πάντα ακριβές μοντέλο, ο έλεγχος είναι επίσης αξιόπιστος.

Συμβατά μοντέλα με τον προβλεπτικό έλεγχο

- **Μοντέλο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR model)**

Οι αλγόριθμοι σχεδίασης που βασίζονται μοντέλο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης περιλαμβάνουν δυναμικό έλεγχο μήτρας (Dynamic Matrix Control - DMC) (Cutler & Ramaker, 1979) και την τετραγωνική διατύπωση του DMC των Garcia και Morshedi (1986) [33]. Το μοντέλο αυτό δίνει την περιγραφή της χρονικής καθυστέρησης, του χρόνου απόκρισης και του κέρδους της διαδικασίας. Ωστόσο, το μοντέλο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης δεν είναι κατάλληλο για σταθερά συστήματα, καθώς αυτά συχνά απαιτούν μοντέλο υψηλής τάξης.

- **Μοντέλα συνάρτησης μεταφοράς**

Τα μοντέλα αυτά δίνουν μια πιο φειδωλή περιγραφή της δυναμικής ενός συστήματος και εφαρμόζονται σε ευσταθή και ασταθή συστήματα. Στην κατηγορία αυτή εφαρμόζεται ο αλγόριθμος προβλεπτικού ελέγχου του Peterka (1984) και ο αλγόριθμος γενικευμένου προβλεπτικού ελέγχου (Generalized Predictive Control - GPC) του Clarke και των συνεργατών του (1987). Το κύριο μειονέκτημα των μοντέλων συνάρτησης μεταφοράς είναι η δυσχρηστία τους κατά τον χειρισμό πολυμεταβλητών συστημάτων.

- **Μοντέλο κατάστασης - χώρου**

Τα μοντέλα κατάστασης – χώρου είναι μοντέλα που χρησιμοποιούν μεταβλητές κατάστασης για να περιγραφεί ένα σύστημα από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξεως, και όχι από μία ή περισσότερες διαφορικές εξισώσεις νιοστής τάξης.

Οι μεταβλητές κατάστασης $x(t)$ μπορούν να ανακατασκευασθούν από τα μετρηθέντα δεδομένα εισόδου-εξόδου, αλλά δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας κατά τη διάρκεια ενός πειράματος. Η πρώτη διατύπωση αυτού του μοντέλου παρουσιάστηκε το 1993 από τους Ordys και Clarke [33].

Το μοντέλο κατάστασης – χώρου καθίσταται το καταλληλότερο για τη σχεδίαση προβλεπτικού ελέγχου, καθώς εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων δύο μοντέλων. Τα σημαντικότερα είναι:

- Καταλληλότητα για σχεδίαση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Πλήρης απεικόνιση του συστήματος

8.2. Τρόποι μοντελοποίησης συστήματος οχήματος

Ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου εξαρτάται από την ποιότητα του μοντέλου βάσει του οποίου λειτουργεί [36]. Αν οι πληροφορίες για το μοντέλο είναι ασαφείς, καλύτερα να μη χρησιμοποιηθεί καθόλου, καθώς αυτό θα οδηγούσε μόνο στην αποτυχία του μοντέλου.

Το πρόβλημα με τις περισσότερες εφαρμογές αυτοκίνησης έγκειται στο ότι είναι εκ φύσεως ανοιχτού βρόχου. Επομένως, είναι αναγκαίο να διαμορφώνεται ένα όσο πιο ακριβές και αντιπροσωπευτικό μοντέλο του οχήματος που πρόκειται να ελεγχθεί. Ακολουθούν δύο τρόποι μοντελοποίησης του οχήματος.

Μοντέλα βασικών αρχών

Τα μοντέλα βασικών αρχών ήταν πάντα η πρώτη επιλογή για τους σχεδιαστές, καθώς επέτρεπαν τη φυσική αποτύπωση του συστήματος και επιχειρούσαν σχεδιαστικές αλλαγές. Βασικό γνώρισμα αυτών των μοντέλων είναι η εκ των προτέρων γνώση πληροφοριών, οτιδήποτε δηλαδή γνωρίζει ο σχεδιαστής κατά την έναρξη του σχεδιασμού.

Το μειονέκτημα της μοντελοποίησης αυτής είναι ότι, ενώ μπορεί να επιτύχει ένα ακριβές μοντέλο για τα μηχανικά υποσυστήματα ενός οχήματος, υπάρχει το ενδεχόμενο το μοντέλο, λ.χ. της μηχανής εσωτερικής καύσης, να μην είναι κατάλληλο. Επομένως, το ολικό μοντέλο θα είναι και αυτό ατελές και μη ευνοϊκό για την επιτυχία του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου.

Μοντέλα βάσει δεδομένων

Η εναλλακτική λύση για τα μοντέλα βασικών αρχών είναι τα μοντέλα βάσει δεδομένων, τα οποία καθορίζουν, συνήθως, ένα παραμετροποιημένο μοντέλο χωρίς αναφορά στις φυσικές ιδιότητες του πραγματικού οχήματος. Το κύριο μειονέκτημα είναι η απαίτηση για σημαντική ποσότητα δεδομένων, προκειμένου να υπολογιστεί η βέλτιστη εκτίμηση των παραμέτρων.

Ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας είναι η επιλογή σημείου λειτουργίας για τον προσδιορισμό του μοντέλου γύρω από αυτό, καθώς όλα τα σημεία μπορούν να θεωρηθούν κρίσιμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το μοντέλο ενός συστήματος, όπως

εκείνο των εκπομπών ρύπων, το οποίο δεν περιέχει ρεαλιστικές πληροφορίες, είναι καθαρά προσεγγιστικό.

8.3. Μοντέλο κατάστασης – χώρου

Σύστημα μονής εισόδου – μονής εξόδου

Το σύστημα μονής εισόδου και μονής εξόδου περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$\mathbf{x}_m(k+1) = A_m \mathbf{x}_m(k) + B_m \mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = C_m \mathbf{x}_m(k),$$

Όπου \mathbf{x}_m το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης με μέγεθος μήτρας n

\mathbf{y} οι εξοδοί προς έλεγχο με μέγεθος μήτρας l

\mathbf{u} οι εισοδοί της διαδικασίας (έξοδος ελεγκτή) με μέγεθος μήτρας m .

Μη τετραγωνικά συστήματα ($l \neq m$)

Όταν το μοντέλο αναπαρίσταται από ένα μη τετραγωνικό σύστημα, τότε τετραγωνοποιείται [32]. Διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- $l < m$: Πολλές εισοδοί είναι κατάλληλες για μία ορισμένη έξοδο. Η βελτιστοποίηση ρυθμίζεται, με σκοπό τη βέλτιστη χρήση των βαθμών ελευθερίας.
- $l > m$: Υπάρχουν πολλοί λίγοι βαθμοί ελευθερίας και δεχόμαστε αντιστάθμιση σε κάποιους βρόχους εξόδου.

Η γενικευμένη διατύπωση ενός μοντέλου κατάστασης – χώρου έχει έναν άμεσο όρο από το σήμα εισόδου $\mathbf{u}(k)$ στο σήμα εξόδου $\mathbf{y}(k)$ ως εξής:

$$\mathbf{y}(k) = C_m \mathbf{x}_m(k) + D_m \mathbf{u}(k).$$

Εντούτοις, εξαιτίας της αρχής ελέγχου υποχωρούντος ορίζοντα, όπου για την πρόβλεψη και τον έλεγχο απαιτούνται οι τωρινές πληροφορίες του μοντέλου, έχουμε υποθέσει ρητά ότι η είσοδος $\mathbf{u}(k)$ δεν μπορεί να επηρεάσει την έξοδο $\mathbf{y}(k)$ την ίδια χρονική στιγμή. Άρα, $D_m = 0$ στο μοντέλο του συστήματος.

Εξισώσεις μεταβολών

Η μεταβολή της μεταβλητής κατάστασης συμβολίζεται με:

$$\Delta \mathbf{x}_m(k+1) = \mathbf{x}_m(k+1) - \mathbf{x}_m(k) \text{ και } \Delta \mathbf{x}_m(k) = \mathbf{x}_m(k) - \mathbf{x}_m(k-1)$$

και η μεταβολή της μεταβλητής ελέγχου με:

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1).$$

Κατά συνέπεια, η μεταβολή στην εξίσωση κατάστασης – χώρου είναι ίση με:

$$\Delta \mathbf{x}_m(k+1) = A_m \Delta \mathbf{x}_m(k) + B_m \Delta \mathbf{u}(k)$$

Και το μοντέλο κατάστασης – χώρου διαμορφώνεται ως εξής:

$$\overbrace{\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_m(k+1) \\ \mathbf{y}(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} = \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_m(k) \\ \mathbf{y}(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta \mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} o_m & 1 \end{bmatrix}}^c \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_m(k) \\ \mathbf{y}(k) \end{bmatrix},$$

$$\text{όπου } o_m = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}}^{n_1}.$$

Η τριάδα (A, B, C) καλείται επαυξημένο μοντέλο και χρησιμοποιείται στη σχεδίαση του προβλεπτικού ελέγχου.

Μοντέλο διαταραχών

Διαταραχή εξόδου

Ως διαταραχή εξόδου εννοούμε τον λευκό θόρυβο και αναπαρίσταται ως εξής:

$$\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{d}_k + v_k,$$

όπου v_k άγνωστο και $\bar{v}_k = 0$. Τότε, η έξοδος του μοντέλου θα είναι:

$$\mathbf{y}_k = C \mathbf{x}_k + D \mathbf{u}_k + \mathbf{d}_k.$$

Συνεπώς, $\mathbf{z}_{k+1} = \tilde{A} \mathbf{z}_k + \tilde{B} \mathbf{u}_k$ και $\mathbf{y}_k = \tilde{C} \mathbf{z}_k + D \mathbf{u}_k + v_k$,

$$\text{όπου: } \mathbf{z}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{d}_{k+1} \end{bmatrix} \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{C} = [C \quad I]$$

Διαταραχή κατάστασης

Η εξίσωση της κατάστασης είναι η εξής συμπεριλαμβανομένης και της διαταραχής της:

$$\mathbf{x}_{k+1} = A \mathbf{x}_k + B \mathbf{u}_k + F \mathbf{d}_k$$

$$\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{d}_k + v_k$$

$$\mathbf{y}_k = C \mathbf{x}_k + D \mathbf{u}_k$$

Συνεπώς, $\mathbf{z}_{k+1} = \tilde{A} \mathbf{z}_k + \tilde{B} \mathbf{u}_k$ και $\mathbf{y}_k = \tilde{C} \mathbf{z}_k + D \mathbf{u}_k + v_k$,

$$\text{όπου: } \mathbf{z}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{d}_{k+1} \end{bmatrix} \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & F \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{C} = [C \quad 0]$$

Πρόβλεψη κατάστασης και μεταβλητές εξόδου

Υποθέτοντας ότι τη στιγμή δειγματοληψίας k_i , $k_i > 0$, το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης $\mathbf{x}(k_i)$ είναι διαθέσιμο μέσω μετρήσεων, η κατάσταση $\mathbf{x}(k_i)$ παρέχει τις τωρινές πληροφορίες του μοντέλου. Η τροχιά μελλοντικού ελέγχου δηλώνεται ως εξής:

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \dots, \Delta u(k_i + M - 1),$$

Όπου M ο ορίζοντας ελέγχου που υπαγορεύει το πλήθος των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην τροχιά μελλοντικού ελέγχου. Με δεδομένη την πληροφορία $\mathbf{x}(k_i)$, οι μεταβλητές μελλοντικής κατάστασης προβλέπονται για P δείγματα, όπου P ο ορίζοντας πρόβλεψης. Συμβολίζουμε τις μεταβλητές μελλοντικής κατάστασης με:

$$\mathbf{x}(k_i + 1|k_i), \mathbf{x}(k_i + 2|k_i), \dots, \mathbf{x}(k_i + m|k_i), \dots, \mathbf{x}(k_i + N_P|k_i),$$

Όπου $\mathbf{x}(k_i + m|k_i)$ η προβλεφθείσα μεταβλητή κατάσταση τη στιγμή $k_i + m$ με δεδομένη την πληροφορία $\mathbf{x}(k_i)$. Ο ορίζοντας ελέγχου M επιλέγεται μικρότερος ή ίσος του ορίζοντα πρόβλεψης P .

Βασιζόμενοι στο μοντέλο κατάστασης – χώρου (A, B, C) οι μεταβλητές μελλοντικής κατάστασης υπολογίζονται ως εξής:

$$\mathbf{x}(k_i + P|k_i) = A^P \mathbf{x}(k_i) + A^{P-1} B \Delta u(k_i) + A^{P-2} B \Delta u(k_i + 1) + \dots$$

$$+ A^{P-M} B \Delta u(k_i + M - 1).$$

Από τις προβλεφθείσες μεταβλητές κατάστασης, οι προβλεφθείσες μεταβλητές εξόδου είναι:

$$y(k_i + P|k_i) = C A^P x(k_i) + C A^{P-1} B \Delta u(k_i) + C A^{P-2} B \Delta u(k_i + 1) + \dots \\ + C A^{P-M} B \Delta u(k_i + M - 1).$$

Έστω τα διανύσματα:

$$Y = [y(k_i + 1|k_i) \quad y(k_i + 2|k_i) \quad y(k_i + 3|k_i) \quad \dots \quad y(k_i + P|k_i)]^T$$

$$\Delta U = [\Delta U(k_i) \quad \Delta U(k_i + 1) \quad \Delta U(k_i + 2) \quad \dots \quad \Delta U(k_i + M - 1)]^T,$$

Όπου για ένα σύστημα μονής εισόδου - μονής εξόδου, η διάσταση του Y είναι P και η διάσταση του ΔU είναι M .

Από τις παραπάνω σχέσεις εξάγεται η μήτρα:

$$Y = F x(k_i) + \Phi \Delta U,$$

όπου

$$F = \begin{bmatrix} C A \\ C A^2 \\ C A^3 \\ \vdots \\ C A^P \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} C B & 0 & 0 & \dots & 0 \\ C A B & C B & 0 & \dots & 0 \\ C A^2 B & C A B & C B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C A^{P-1} B & C A^{P-2} B & C A^{P-3} B & \dots & C A^{P-M} B \end{bmatrix}$$

Βελτιστοποίηση

Για ένα δεδομένο σήμα αναφοράς $r(k_i)$ τη στιγμή δείγματος k_i , ο στόχος εντός του ορίζοντα πρόβλεψης είναι να προσαρμόσουμε την έξοδο όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σήμα αναφοράς. Υποθέτουμε ότι το σήμα αναφοράς παραμένει σταθερό εντός του παραθύρου βελτιστοποίησης. Ο στόχος αυτό μεταφράζεται στην ανάγκη προσδιορισμού του ιδανικότερου διανύσματος ελέγχου ΔU , ώστε μία συνάρτηση σφάλματος ανάμεσα στην αναφορά και στην προβλεφθείσα έξοδο να ελαχιστοποιείται.

Έστω ότι το διάνυσμα που περιέχει την πληροφορία αναφοράς είναι:

$$R_s^T = \overbrace{[1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]}^P r(k_i),$$

Τότε ορίζουμε τη συνάρτηση κόστους J , η οποία αντικατοπτρίζει τον στόχο ελέγχου μας ως:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U,$$

στην οποία ο πρώτος όρος αφορά στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων ανάμεσα στην προβλεφθείσα έξοδο και το σήμα αναφοράς, ενώ ο δεύτερος όρος αντικατοπτρίζει τη βαρύτητα που δίνεται στο μέγεθος ΔU , όταν η συνάρτηση στόχου J καθίσταται όσο το δυνατόν μικρότερη.

Η \bar{R} είναι μία διαγώνια μήτρα υπό τη μορφή $\bar{R} = r_w I_{N_c \times N_c}$ ($r_w \geq 0$), όπου το r_w αποτελεί μία παράμετρο ρύθμισης για την επιθυμητή απόδοση κλειστού βρόχου. Για την περίπτωση $r_w = 0$, η συνάρτηση κόστους ερμηνεύεται ως η κατάσταση στην οποία δε θα ήταν άξιο προσοχής το πόσο μεγάλο θα μπορούσε να είναι το ΔU και ο στόχος μας θα ήταν αποκλειστικά και μόνο η ελαχιστοποίηση του σφάλματος $(R_s - Y)^T (R_s - Y)$.

Για την περίπτωση μεγάλου r_w , η συνάρτηση κόστους ερμηνεύεται ως η κατάσταση, κατά την οποία θα εξετάζαμε προσεκτικά το πόσο μεγάλο θα μπορούσε να είναι το ΔU και θα μειώναμε το σφάλμα $(R_s - Y)^T (R_s - Y)$.

Για να προσδιορίσουμε το βέλτιστο ΔU που θα ελαχιστοποιήσει την J , η J εκφράζεται ως εξής:

$$J = (R_s - F x(k_i))^T (R_s - F x(k_i)) - 2 \Delta U^T \Phi^T (R_s - F x(k_i)) + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U$$

Από την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης κόστους J :

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = -2 \Phi^T (R_s - F x(k_i)) + 2 (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U$$

και την απαραίτητη συνθήκη για την ελάχιστη J :

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0$$

προκύπτει ότι η βέλτιστη λύση για το σήμα ελέγχου είναι:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - F x(k_i))$$

με την υπόθεση ότι η μήτρα $(\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1}$ υπάρχει. Η $(\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1}$ ονομάζεται Εσσιανή μήτρα. Το R_s είναι ένα διάνυσμα δεδομένων που περιέχει πληροφορίες αναφοράς και είναι ίσο με:

$$R_s = \overbrace{[1 \quad 1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T}^P r(k_i) = \bar{R}_s r(k_i)$$

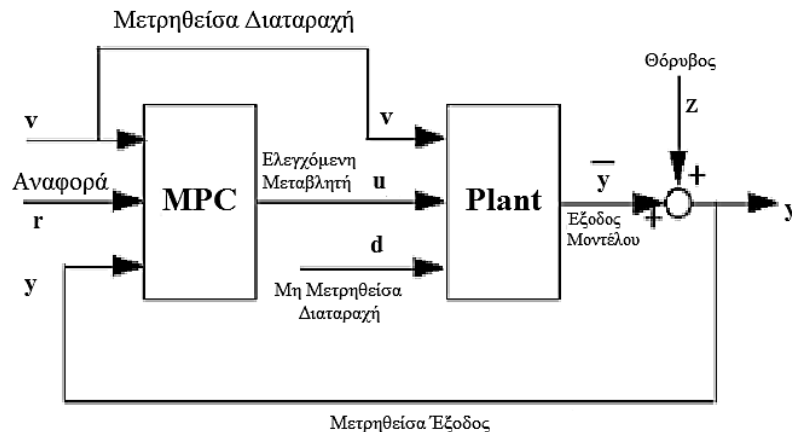
Η βέλτιστη λύση του σήματος ελέγχου συνδέεται με το σήμα αναφοράς $r(k_i)$ και τη μεταβλητή κατάστασης $x(k_i)$ μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\Delta U = (\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - F x(k_i))$$

8.4. Προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου σε περιβάλλον Simulink®

Επεξήγηση όρων εργαλειοθήκης

Η τυπική εργαλειοθήκη προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου (MPC Toolbox™) μπορεί να διαχειριστεί μία μονάδα με πολλαπλές εισόδους και εξόδους [37]. Έστω, η απλούστερη εφαρμογή μονής εισόδου και μονής εξόδου της Εικόνας 20:



Εικόνα 20: Διάγραμμα εφαρμογής MPC σε SISO μονάδα

Ο κύριος στόχος είναι να διατηρηθεί η έξοδος \bar{y} στην τιμή αναφοράς r προσαρμόζοντας μία ελεγχόμενη μεταβλητή u (ενεργοποιητής).

Σύμβολο	Περιγραφή
d	Μη μετρηθείσα διαταραχή Το σήμα αυτό επηρεάζει μόνο την έξοδο της μονάδας. Ο ελεγκτής παρέχει αντιστάθμιση ανάδρασης (feedback compensation) για τέτοιες διαταραχές.
r	Σημείο αναφοράς Η τιμή στόχου για την έξοδο.
u	Ελεγχόμενη μεταβλητή (ή ενεργοποιητής) Το σήμα που ο ελεγκτής προσαρμόζει ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι.
v	Μετρηθείσα διαταραχή Ο ελεγκτής παρέχει πρόσω-αντιστάθμιση για τέτοιες διαταραχές, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση στην έξοδο.
\bar{y}	Έξοδος (ή ελεγχόμενη μεταβλητή) Το σήμα που πρέπει να διατηρηθεί στη τιμή αναφοράς. Αυτή είναι η πραγματική τιμή, αναλλοίωτη από τον θόρυβο της μέτρησης.
y	Μετρηθείσα έξοδος

	Το σήμα χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η αληθινή τιμή \bar{y} .
z	Μέτρηση του θορύβου Το σήμα αντιπροσωπεύει τον ηλεκτρικό θόρυβο, τα σφάλματα δειγματοληψίας και άλλα φαινόμενα που επιδεινώνουν την ακρίβεια και την ορθότητα των μετρήσεων.

Αν το μοντέλο της μονάδας είναι ακριβές, η μονάδα ανταποκρίνεται γρήγορα σε προσαρμογές του u , και δεν συναντώνται περιορισμοί. Στην πραγματικότητα, η απόκλιση του y από την τιμή αναφοράς του οφείλονται σε ατέλειες του μοντέλου, φυσικούς περιορισμούς και μη μετρηθείσες διαταραχές.

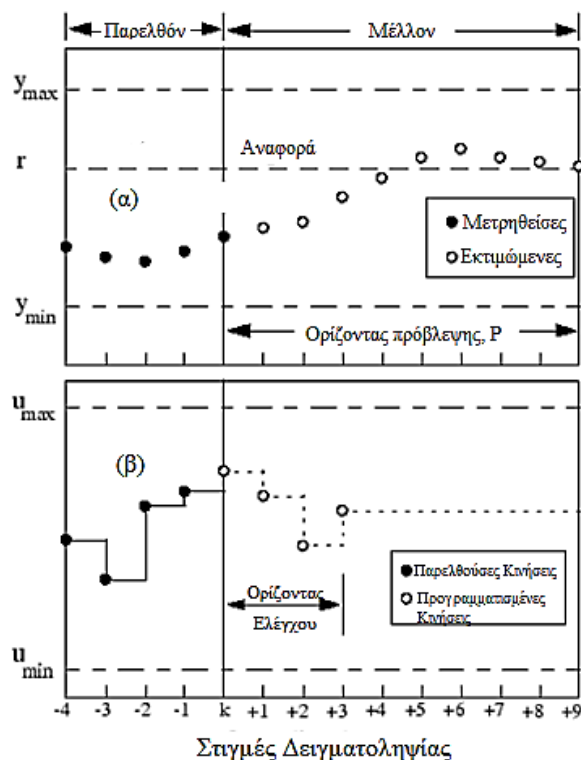
Ως εκ τούτου, η εργαλειοθήκη του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου περιλαμβάνει ένα μοντέλο διαταραχών ($d \rightarrow \bar{y}$) για την εκτίμηση του d και την πρόβλεψη της επίδρασής του στο \bar{y} . Στη συνέχεια, χρησιμοποιεί το μοντέλο ($u \rightarrow \bar{y}$), ώστε να υπολογιστούν οι απαραίτητες προσαρμογές (ανατροφοδότηση). Η εν λόγω εργαλειοθήκη χρησιμοποιεί ένα μοντέλο $z \rightarrow y$ σε συνδυασμό με το μοντέλο $d \rightarrow \bar{y}$, με σκοπό την αφαίρεση της εκτιμώμενης συνιστώσας θορύβου (φιλτράρισμα).

Λογική ελεγκτή

Η εργαλειοθήκη προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου παράγει έναν ελεγκτή διακριτού χρόνου, που αναλαμβάνει δράση σε τακτά διαστήματα διακριτών χρονικών στιγμών. Οι στιγμές δειγματοληψίας είναι οι στιγμές, στις οποίες ο ελεγκτής ενεργεί. Το διάστημα μεταξύ των διαδοχικών στιγμών δειγματοληψίας είναι η περίοδος δειγματοληψίας Δt , το οποίο ταυτίζεται με το *διάστημα ελέγχου*.

Το σχήμα της Εικόνας 21 δείχνει την κατάσταση ενός υποθετικού συστήματος μονής εισόδου-μονής εξόδου, στο οποίο εφαρμόζεται ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου. Ο ακέραιος k αντιπροσωπεύει την εκάστοτε στιγμή δειγματοληψίας. Η τελευταία μετρηθείσα έξοδος y_k και οι προηγούμενες μετρήσεις y_{k-1}, y_{k-2}, \dots είναι γνωστές και αναπαρίστανται με μαύρους κύκλους στο σχήμα. Αν υπάρχει μία μετρηθείσα διαταραχή, η τωρινή και οι παρελθούσες τιμές της θα είναι γνωστές.

Το σχήμα στην k^{η} στιγμή δειγματοληψίας δείχνει τις προηγούμενες κινήσεις του ελεγκτή ως μαύρους κύκλους: u_{k-4}, \dots, u_{k-1} . Ένας συγκρατητής μηδενικής τάξης λαμβάνει κάθε κίνηση από τον ελεγκτή και την κρατά μέχρι την επόμενη χρονική στιγμή.



Εικόνα 21: Αποτύπωση λειτουργίας του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου

Για να υπολογιστεί η επόμενη κίνηση u_k , ο ελεγκτής λειτουργεί σε δύο φάσεις:

I. Εκτίμηση

Για εκτελέσει ο ελεγκτής μία έξυπνη κίνηση, χρειάζεται να γνωρίζει την τρέχουσα κατάσταση. Αυτή περιλαμβάνει την πραγματική τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής \bar{y}_k και οποιεσδήποτε εσωτερικές μεταβλητές που επηρεάζουν τη μελλοντική ακολουθία $\bar{y}_{k+1}, \dots, \bar{y}_{k+P}$. Για να επιτευχθεί αυτό, ο ελεγκτής χρησιμοποιεί όλες τις παρελθούσες και τρέχουσες μετρήσεις και τα μοντέλα: $u \rightarrow \bar{y}, d \rightarrow \bar{y}, v \rightarrow \bar{y}$ και $z \rightarrow y$.

II. Βελτιστοποίηση

Οι τιμές των σημείων αναφοράς, των μετρηθεισών διαταραχών και των περιορισμών προσδιορίζονται σε έναν πεπερασμένο ορίζοντα από μελλοντικές στιγμές δειγματοληψίας $k + 1, k + 2, \dots, k + P$, όπου P (ένας πεπερασμένος ακέραιος ≥ 1) είναι ο **ορίζοντας πρόβλεψης**. Ο ελεγκτής υπολογίζει M κινήσεις $u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+M-1}$, όπου M ($\geq 1, \leq P$) είναι ο **ορίζοντας ελέγχου**.

Στο υποθετικό παράδειγμα του σχήματος φαίνεται ότι $P = 9$ και $M = 4$. Οι κινήσεις είναι η λύση ενός περιορισμένου προβλήματος βελτιστοποίησης. Στο παράδειγμα, οι βέλτιστες κινήσεις είναι οι τέσσερις κύκλοι του σχήματος. Ο ελεγκτής προβλέπει πως οι

προκύπτουσες τιμές εξόδου θα είναι οι 9 ανοιχτοί κύκλοι του σχήματος. Ισχύει ότι $u_{min} \leq u_{k+j} \leq u_{max}$ και $y_{min} \leq y_{k+j} \leq y_{max}$.

Όταν ολοκληρώνονται οι υπολογισμοί, ο ελεγκτής στέλνει την κίνηση u_k στη μονάδα. Η μονάδα λειτουργεί με αυτή τη σταθερή είσοδο μέχρι την επόμενη στιγμή δειγματοληψίας, Δt χρόνο αργότερα. Ο ελεγκτής τότε αποκτά νέες μετρήσεις και αναθεωρεί εξ ολοκλήρου το πλάνο πρόβλεψης. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται επ' αόριστον.

Η επαναδιατύπωση σε κάθε στιγμή δειγματοληψίας είναι απαραίτητη για τον καλό έλεγχο. Η περιοδική ανατροφοδότηση μετρήσεων επιτρέπει στον ελεγκτή να διορθώσει τις ατέλειες αυτές και τις απροσδόκητες διαταραχές.

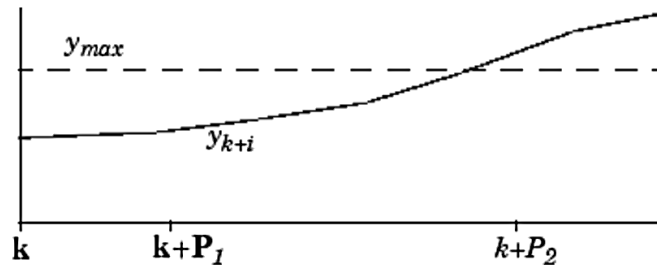
Ορίζοντας πρόβλεψης και ορίζοντας ελέγχου

Υπό ορισμένες συνθήκες ένας ελεγκτής με $P = M = 1$ θα ήταν ταυτόσημος με έναν ελεγκτή με $P = M = \infty$. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση του ορίζοντα ελέγχου M καθιστά τον ελεγκτή πιο επιθετικό και επιβαρύνει τον υπολογιστικό φόρτο [28]. Αντιθέτως, η αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης P οδηγεί σε ηπιότερες δράσεις ελέγχου. Συνήθως, επιλέγονται τέτοια P και M , ώστε η επίδοση του ελεγκτή να είναι ανεπηρέαστη από μικρές προσαρμογές στους ορίζοντες αυτούς. Είναι γενικά επιθυμητό ο ορίζοντας ελέγχου να είναι σχετικά μικρός, λ.χ. $5 \leq M \leq 20$.

Η επιλογή των οριζόντων είναι εξαιρετικά κρίσιμη, όπως αποδεικνύεται από τα εξής παραδείγματα:

Περιορισμοί

Δεδομένου ενός αρκετά μεγάλου ορίζοντα, ο ελεγκτής μπορεί να "δει" έναν δυνητικό περιορισμό και να τον αποφύγει ή τουλάχιστον να ελαχιστοποιήσει τις αρνητικές επιπτώσεις του. Για παράδειγμα, έστω η κατάσταση που απεικονίζεται στην Εικόνα 22 στην οποία ένας από τους στόχους του ελεγκτή είναι να κρατήσει την έξοδο y μίας μονάδας κάτω από ένα άνω όριο y_{max} . Η παρούσα στιγμή δειγματοληψίας είναι η k και το μοντέλο προβλέπει την ανοδική τάση y_{k+i} .



Εικόνα 22: Ρόλος οριζόντων

Αν ο ελεγκτής έψαχνε P_1 βήματα μπροστά, δεν θα «έβλεπε» τον περιορισμό έως ότου έφτανε η κατάλληλη στιγμή δειγματοληψίας. Αντίθετα, αν ο ορίζοντας πρόβλεψης ήταν ο P_2 , το άνω όριο y_{max} θα συμπεριλαμβανόταν στον σχηματισμό της ακολουθίας u_k .

Καθυστερήσεις μονάδας

Έστω ότι η μονάδα χαρακτηρίζεται από έναν καθαρό χρόνο καθυστέρησης ίσο με D στιγμές δειγματοληψίας. Η τωρινή κίνηση του ελεγκτή, δηλαδή, u_k δεν έχει καμία επίδραση μέχρι την έξοδο y_{k+D+1} . Επομένως, θα πρέπει $P \gg D$ και $M \ll P - D$ ώστε ο ελεγκτής να λάβει υπ' όψιν του τις συνολικές συνέπειες της κάθε κίνησης.

Βελτιστοποίηση και περιορισμοί

Ο ελεγκτής της εργαλειοθήκης του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου επιλύει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο περιλαμβάνει ρητούς περιορισμούς για τα u και y και βελτιστοποιεί την ακολουθία τους πάνω σε έναν πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα.

Παρακολούθηση επιθυμητής τιμής

Σε μία περίπτωση δίχως περιορισμούς ο πρωτεύων στόχος ελέγχου είναι να εξαναγκάσουμε τις εξόδους του μοντέλου να ακολουθήσουν τις επιθυμητές τιμές. Ο ελεγκτής προβλέπει πόσο θα αποκλίνει κάθε έξοδος από την επιθυμητή τιμή εντός του ορίζοντα πρόβλεψης και πολλαπλασιάζει κάθε απόκλιση με το βάρος της εξόδου. Εν συνεχεία, υπολογίζει το σταθμισμένο άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων $S_y(k)$ ως εξής:

$$S_y(k) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{n_y} \{w_j^y [r_j(k+i) - y_j(k+i)]\}^2,$$

όπου k	:	Το τωρινό διάστημα δειγματοληψίας
$k+1$:	Ένα μελλοντικό διάστημα δειγματοληψίας (εντός του ορίζοντα πρόβλεψης)

P	: Ο ορίζοντας πρόβλεψης
n_y	: Το πλήθος των εξόδων της μονάδας
w_j^y	: Το βάρος για την έξοδο j
$[r_j(k+i) - y_j(k+i)]$: Η προβλεπόμενη απόκλιση στη μελλοντική στιγμή $k+i$

Αν $w_j^y = w_{i \neq j}^y$, ο ελεγκτής προσπαθεί να παρακολουθήσει το r_j , θυσιάζοντας την παρακολούθηση του r_i αν είναι απαραίτητο. Αντιθέτως, αν $w_j^y = 0$, ο ελεγκτής αγνοεί εντελώς τις αποκλίσεις $r_j - y_j$.

Καταστολή κινήσεων

Αν ο ελεγκτής εστίαζε αποκλειστικά στην παρακολούθηση της επιθυμητής τιμής, τότε θα έπρεπε να επιλέγει μεγάλες προσαρμογές της ελεγχόμενης μεταβλητής u . Επειδή αυτή η διαδικασία θα επέφερε σύντομα την αστάθεια του συστήματος, ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου παρακολουθεί το σταθμισμένο άθροισμα των προσαρμογών του ελεγκτή

$$\text{ως ακολούθως: } S_{\Delta u}(k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{n_{mv}} \{w_j^{\Delta u} \Delta u_j(k+i-1)\}^2,$$

Όπου M	: Ο ορίζοντας ελέγχου
n_{mv}	: Το πλήθος των ελεγχόμενων μεταβλητών
$\Delta u_j(k+i-1)$: Η προβλεπόμενη κίνηση/προσαρμογή στην ελεγχόμενη μεταβλητή j στο μελλοντικό διάστημα δειγματοληψίας $k+i-1$
$w_j^{\Delta u}$: Βάρος, το οποίο πρέπει να είναι μηδενικό ή θετικό

Αυξάνοντας το $w_j^{\Delta u}$ ο ελεγκτής εξαναγκάζεται στο να εκτελέσει μικρότερες και περισσότερο προσεκτικές προσαρμογές Δu_j . Συνήθως αυτό επιφέρει τις ακόλουθες επιπτώσεις:

- Η παρακολούθηση τη αναφοράς εξόδου υποβαθμίζεται
- Ο ελεγκτής δεν είναι ευαίσθητος σε ανακρίβειες της πρόβλεψης, άρα είναι πιο εύρωστος.

Επιθυμητές τιμές για τις ελεγχόμενες μεταβλητές

Στις περισσότερες εφαρμογές, οι ελεγχόμενες μεταβλητές του ελεγκτή θα έπρεπε να κινούνται ελεύθερα (εντός μίας περιορισμένης περιοχής) για να αντισταθμίζουν τις διαταραχές και τις αλλαγές στις επιθυμητές τιμές. Στην προσπάθεια να κρατήσουμε μία ελεγχόμενη μεταβλητή σε ένα σημείο εντός της επιθυμητής περιοχής θα υποβάθμιζε την ποιότητα του ελέγχου.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν μονάδες που ελέγχονται από περισσότερες ελεγχόμενες μεταβλητές από τις επιθυμητές τιμές εξόδου. Σε μία τέτοια μονάδα, αν όλες οι ελεγχόμενες μεταβλητές επιτρεπόταν να κινούνται ελεύθερα, οι τιμές τους για την προσέγγιση μίας επιθυμητής τιμής ή την απόρριψη μίας διαταραχής δε θα ήταν μοναδικές. Συνεπώς, οι ελεγχόμενες μεταβλητές θα ολίσθαιναν εντός ενός διαστήματος λειτουργίας.

Το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση βαρών και η σχεδίαση της εργαλειοθήκης του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου περιλαμβάνει μία ακόμα συνάρτηση ελέγχου:

$$S_u(k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{n_{mv}} \{w_j^u [\bar{u}_j - u_j(k+i-1)]\}^2,$$

Όπου	\bar{u}_j	: Η επιθυμητή τιμή, δηλαδή η ονομαστική τιμή, για την ελεγχόμενη μεταβλητή j^{th}
	w_j^u	: Το αντίστοιχο βάρος
	n_{mv}	: Το πλήθος των ελεγχόμενων μεταβλητών
	M	: Ο ορίζοντας ελέγχου

Περιορισμοί

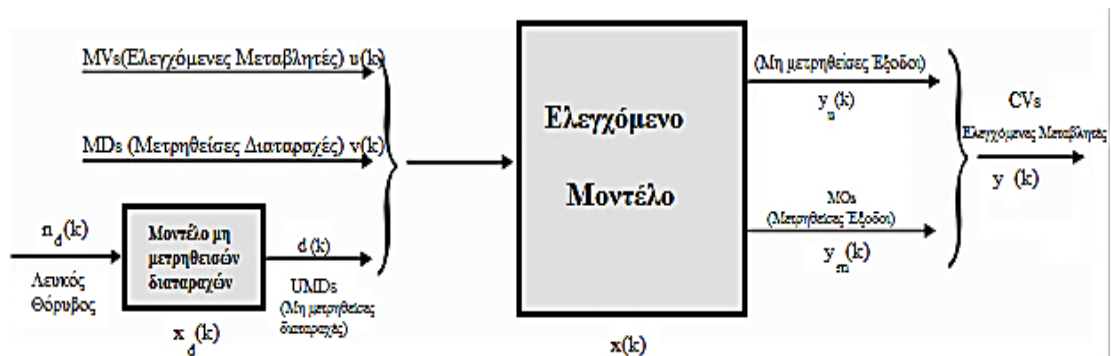
Οι περιορισμοί μπορεί να είναι αυστηροί (hard) ή εύκαμπτοι (soft). Ένας αυστηρός περιορισμός απαγορεύεται να παραβιαστεί. Δυστυχώς, υπό κάποιες συνθήκες η παραβίαση ενός περιορισμού είναι αναπόφευκτη (λ.χ. μία απροσδόκητη και μεγάλη διαταραχή) και θα επιβάλλεται να επιτρέπεται από έναν ρεαλιστικό ελεγκτή.

Η εργαλειοθήκη του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου επιτυγχάνει την εξομάλυνση κάποιων περιορισμών κατά την κρίση του σχεδιαστή, με αποτέλεσμα να διαμορφώνονται περιορισμοί πιο ευάλωτοι από άλλους. Εντούτοις, η παραβίαση των ορίων καθορίζεται από τη σχέση μεταξύ τους.

Διατύπωση προβλήματος προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου

Μοντέλο πρόβλεψης

Το γραμμικό μοντέλο που χρησιμοποιείται από την εργαλειοθήκη του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου για την πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση παρουσιάζεται στην Εικόνα 23 [37]:



Εικόνα 23: Γραμμικό μοντέλο ελεγχόμενο με MPC

Το μοντέλο πρόβλεψης αποτελείται από:

1. Το μοντέλο της μονάδας $x(k)$, που πρόκειται να ελεγχθεί, της οποίας οι είσοδοι είναι οι ελεγχόμενες μεταβλητές, οι μετρηθείσες και μη μετρηθείσες διαταραχές.
2. Ένα μοντέλο που παράγει τις μη μετρηθείσες διαταραχές, το $x_d(k)$.

Σημειώνουμε ότι κατά τον προσδιορισμό ενός ελεγκτή πρόβλεψης, πρέπει να προσδιοριστεί μόνο το μοντέλο της μονάδας. Δε χρειάζεται να προσδιορίσουμε το μοντέλο διαταραχών, καθώς ο ελεγκτής υποθέτει ότι οι μη μετρηθείσες διαταραχές προέρχονται από τον λευκό θόρυβο.

Το μοντέλο της μονάδας είναι ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο σύστημα (Γ.Χ.Α.) και περιγράφεται από τις εξής εξισώσεις:

$$x(k+1) = A x(k) + B_u u(k) + B_v v(k) + B_d d(k)$$

$$y_m(k) = C_m x(k) + D_{vm} v(k) + D_{dm} d(k)$$

$$y_u(k) = C_u x(k) + D_{vu} v(k) + D_{du} d(k)$$

Ο όρος $d(k)$ συλλέγει τις διαταραχές καταστάσεων ($B_d \neq 0$) και τις διαταραχές εξόδου ($D_d \neq 0$). Σε ένα ορθό μοντέλο μονάδας υπό επεξεργασία της εργαλειοθήκης του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου, η έξοδος $y(k)$ δε θα πρέπει να έχει άμεση τροφοδότηση από την ελεγχόμενη μεταβλητή $u(k)$.

Η μη μετρηθείσα διαταραχή $d(k)$ μοντελοποιείται ως έξοδος του γραμμικού χρονικά αμετάβλητου συστήματος:

$$x_d(k+1) = \bar{A} x_d(k) + \bar{B} n_d(k)$$

$$d(k) = \bar{C} x_d(k) + \bar{D} n_d(k)$$

Το σύστημα που περιγράφεται με τις παραπάνω εξισώσεις οδηγείται από τον τυχαίο Γκαουσιανό θόρυβο $n_d(k)$, έχοντας μηδενικό μέσο όρο και μοναδιαία μήτρα συνδιακύμανσης.

Πρόβλημα βελτιστοποίησης

Ας υποθέσουμε ότι οι εκτιμήσεις των $x(k)$ και $x_d(k)$ είναι διαθέσιμες τη στιγμή k . Η δράση του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου που θα πρέπει να αναληφθεί τη στιγμή k διαμορφώνεται επιλύοντας το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\min_{\Delta u(k|k), \dots, \Delta u(m-1+k|k), \varepsilon} \left\{ \sum_{i=0}^{p-1} \left(\sum_{j=1}^{n_y} |w_{i+1,j}^y (y_j(k+i+1|k) - r_j(k+i+1))|^2 + \sum_{j=1}^{n_u} |w_{i,j}^{Au} \Delta u_j(k+i|k)|^2 + \sum_{j=1}^{n_u} |w_{i,j}^u (u_j(k+i|k) - u_{target}(k+i))|^2 \right) + \rho_\varepsilon \varepsilon^2 \right\}$$

Όπου	" $(\cdot)_j$ "	:	Το j^o στοιχείο ενός διανύσματος
	" $(k+i k)$ "	:	Η προβλεπόμενη τιμή για τη στιγμή $k+i$, η οποία βασίζεται σε διαθέσιμες πληροφορίες για τη στιγμή k .
	$r(k)$:	Το παρόν δείγμα της αναφοράς εξόδου
		:	Μη αρνητικά βάρη για τις αντίστοιχες μεταβλητές.
	$w_{i,j}^{Au}, w_{i,j}^u, w_{i,j}^y$:	Όσο μικρότερο είναι το βάρος, τόσο λιγότερο σημαντική είναι η συμπεριφορά της αντίστοιχης μεταβλητής στη συνολική απόδοση του συστήματος.

$u_{jmin}, u_{jmax},$

$\Delta u_{j,min}, \Delta u_{j,max}, :$ Άνω και κάτω όρια για τις αντίστοιχες μεταβλητές

$y_{j,min}, y_{j,max}$

Ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

- $u_{j,min}(i) - \varepsilon V_{jmin}^u(i) \leq u_j(k+i|k) \leq u_{j,max}(i) + \varepsilon V_{jmax}^u(i)$
- $\Delta u_{j,min}(i) - \varepsilon V_{jmin}^{\Delta u}(i) \leq \Delta u_j(k+i|k) \leq \Delta u_{j,max}(i) + \varepsilon V_{jmax}^{\Delta u}(i)$
- $y_{j,min}(i) - \varepsilon V_{jmin}^y(i) \leq y_j(k+i+1|k) \leq y_{j,max}(i) + \varepsilon V_{jmax}^y(i)$
- $\varepsilon \geq 0$

Όπου $i = 0, \dots, p-1$ και $h = m, \dots, p-1$, όσον αφορά στην ακολουθία των διαστημάτων εισόδου $\{\Delta u(k|k), \dots, \Delta u(m-1+k|k)\}$ και τη μεταβλητή περιθωρίου ε .

Η δράση ελέγχου που αποστέλλεται στη μονάδα είναι η εξής:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k|k)^*$$

Στην περίπτωση αυτή, το $\Delta u(k|k)^*$ είναι το πρώτο στοιχείο της βέλτιστης ακολουθίας.

Σημειώνουμε πως μόνο το μετρηθέν διάνυσμα $y_m(k)$ ανατροφοδοτείται στον ελεγκτή πρόβλεψης. Ωστόσο, το $r(k)$ είναι η αναφορά για όλες τις εξόδους (μετρηθείσες και μη).

Όταν η αναφορά r δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, η τρέχουσα αναφορά $r(k)$ χρησιμοποιείται σε όλο τον ορίζοντα πρόβλεψης, και άρα $r(k+i+1) = r(k)$ στην προηγούμενη εξίσωση.

Στην παραπάνω εξίσωση, οι περιορισμοί στα $u, \Delta u, y$ εξομαλύνονται εισάγοντας την μεταβλητή περιθωρίου (slack variable) $\varepsilon \geq 0$. Το βάρος ρ_ε τιμωρεί την παραβίαση των ορίων και είναι εξ'ορισμού ίσο με: $\rho_\varepsilon = 10^5 \max \{w_{ij}^{\Delta u}, w_{ij}^u, w_{ij}^y\}$. Καθώς το ρ_ε αυξάνεται σε σχέση με τα βάρη εισόδου και εξόδου, ο ελεγκτής δίνει προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση των παραβιάσεων των περιορισμών.

Τα διανύσματα ίσης μέριμνας για χαλάρωση (ECR) $V_{min}^u, V_{max}^u, V_{min}^{\Delta u}, V_{max}^{\Delta u}, V_{min}^y, V_{max}^y$ έχουν μη αρνητικές τιμές και προσδιορίζουν τη μέριμνα για χαλάρωση του αντίστοιχου περιορισμού. Όσο μεγαλύτερο είναι το V , τόσο πιο ομαλός ο περιορισμός. $V = 0$ σημαίνει πως ο περιορισμός είναι αυστηρός και δεν μπορεί να παραβιαστεί. Εξ'ορισμού, όλοι οι

περιορισμοί των εισόδων είναι αυστηροί ($V_{min}^u = V_{max}^u = V_{min}^{\Delta u} = V_{max}^{\Delta u} = 0$) και όλοι οι περιορισμοί των εξόδων εύκαμπτοι ($V_{min}^y = V_{max}^y = 1$).

Το διάνυσμα $u_{target}(k+i)$ είναι η αναφορά για το διάνυσμα εισόδου και χρησιμοποιείται, όταν το πλήθος των εισόδων είναι μεγαλύτερο από το πλήθος των εξόδων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διακύμανση της εισόδου εντός των επιθυμητών ορίων, αφού πρώτα έχει εξασφαλιστεί η ικανοποίηση των αρχικών στόχων.

Όπως αναφέρθηκε και προτύτερα, μόνο το $\Delta u(k|k)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του $u(k)$. Τα εναπομείναντα $\Delta u(k+i|k)$ απορρίπτονται και ένα νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης βασισμένο στο $y_m(k+1)$ επιλύεται στην επόμενη χρονική στιγμή $k+1$.

Λειτουργία εργαλειοθήκης προβλεπτικού ελέγχου

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας της εργαλειοθήκης του προβλεπτικού ελέγχου ανάλογα με το αν λαμβάνονται υπ' όψιν περιορισμοί μεγεθών ή όχι.

Προβλεπτικός έλεγχος χωρίς περιορισμούς

Η βέλτιστη επίλυση υπολογίζεται αναλυτικά από την εξίσωση:

$$z^* = -K_{\Delta u}^{-1} \left(\begin{bmatrix} r(1) \\ \dots \\ r(p) \end{bmatrix}^T K_r + \begin{bmatrix} v(0) \\ \dots \\ v(p) \end{bmatrix}^T K_v + u(-1)^T K_u + \begin{bmatrix} u_{target}(0) \\ \dots \\ u_{target}(p-1) \end{bmatrix}^T K_{ut} + x(0)^T K_x \right)^T$$

Και ο ελεγκτής θέτει $\Delta u(k) = z_0^*$, $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$.

Προβλεπτικός έλεγχος με περιορισμούς

Για την εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου με περιορισμούς, ο ελεγκτής υπολογίζει τη βέλτιστη λύση z^* και ε^* επιλύοντας το τετραγωνικό πρόγραμμα (QP), όπως περιγράφεται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$J(z, \varepsilon) = \rho_\varepsilon \varepsilon^2 + z^T K_{\Delta u} z + 2 \left(\begin{bmatrix} r(1) \\ \dots \\ r(p) \end{bmatrix}^T K_r + \begin{bmatrix} v(0) \\ \dots \\ v(p) \end{bmatrix}^T K_v + u(-1)^T K_u + \begin{bmatrix} u_{target}(0) \\ \dots \\ u_{target}(p-1) \end{bmatrix}^T K_{ut} + x(0)^T K_x \right) z + \text{constant}$$

$$M_z z + M_\varepsilon \varepsilon \leq M_{lim} + M_v \begin{bmatrix} v(0) \\ \dots \\ v(p) \end{bmatrix} + M_u u(-1) + M_x x(0).$$

Ο τετραγωνικός προγραμματισμός συνίσταται στην ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση μίας συνάρτησης κόστους που υπόκειται σε κάποιους γραμμικούς περιορισμούς: όρια, ισότητες και ανισότητες [29]. Ο επιλύτης QP του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου μετατρέπει το πρόβλημα βελτιστοποίησης στην QP διατύπωση:

$$\underset{x}{Min} \left(\frac{1}{2} x^T H x + f^T x \right), \text{ ώστε } A \cdot x \leq b,$$

όπου $x^T = [z^T \ \varepsilon]$: Οι αποφάσεις
H	: Η εσσιανή μήτρα
A	: Μία μήτρα συντελεστών γραμμικών περιορισμών
b, f	: Διανύσματα

Ο ελεγκτής υπολογίζει τα προαναφερθέντα μεγέθη κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης και τα ανακτά από τη μνήμη του υπολογιστή, όταν χρειαστούν. Υπολογίζει τα χρονικά μεταβαλλόμενα διανύσματα b και f στην αρχή κάθε διαστήματος δειγματοληψίας.

Η εργαλειοθήκη χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο KWIK για την επίλυση του QP προβλήματος, το οποίο απαιτεί την εσσιανή μήτρα (εδάφιο 8.3.4) να είναι θετικά ορισμένη [38]. Στο πρώτο βήμα ελέγχου, ο KWIK χρησιμοποιεί «ψυχρή εκκίνηση», στην οποία η αρχική υπόθεση είναι η χωρίς περιορισμούς επίλυση όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα (8.6.1). Αν το x ικανοποιεί τους περιορισμούς, τότε είναι η βέλτιστη επίλυση QP, x^* και ο αλγόριθμος τερματίζει.

Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει τουλάχιστον ένας περιορισμός ανισότητας να θεωρηθεί ως περιορισμός ισότητας. Τότε, ο αλγόριθμος KWIK χρησιμοποιεί μία αποδοτική, αριθμητικά εύρωστη στρατηγική για να προσδιορίσει τους ενεργούς περιορισμούς που ικανοποιούν τα πρότυπα βέλτιστης κατάστασης.

Στα επόμενα βήματα ελέγχου, ο KWIK χρησιμοποιεί «θερμή εκκίνηση». Σε αυτή την περίπτωση, οι ενεργοί περιορισμοί που καθορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα αποτελούν και την αρχική υπόθεση για τα επόμενα βήματα.

Αν και ο αλγόριθμος KWIK είναι εύρωστος, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν τα εξής:

- Ένας ή περισσότεροι γραμμικοί περιορισμοί πρέπει να παραβιαστούν ελαφρά εξαιτίας σφαλμάτων στρογγυλοποίησης. Η εργαλειοθήκη χρησιμοποιεί μία σχετική ανοχή που δεν μπορεί να τροποποιηθεί. Η ανοχή αυτή επιτρέπει την παραβίαση ενός περιορισμού έως και 10^{-6} φορές το μέγεθος του κάθε όρου. Τέτοιες παραβιάσεις θεωρούνται φυσιολογικές.
- Η αναζήτηση για το ενεργό σύνολο περιορισμών είναι μια επαναληπτική διαδικασία. Εάν οι επαναλήψεις αγγίζουν ένα μέγιστο πλήθος για το πρόβλημα, ο αλγόριθμος τερματίζει.
- Αν το πρόβλημα περιλαμβάνει αυστηρούς περιορισμούς, οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να είναι ανέφικτο να τηρηθούν. Αν ο αλγόριθμος ανιχνεύσει τέτοια περίπτωση, τερματίζει αμέσως.

Γενικά, ο αλγόριθμος KWIK είναι κατάλληλος για την ενίσχυση της αποδοτικότητας ενός συστήματος. Έχει τη δυνατότητα να καθορίζει την κατεύθυνση αναζήτησης των βέλτιστων λύσεων, όταν η επίλυση QP προβλημάτων καθίσταται ανέφικτη, κάμπτοντας τους περιορισμούς ισότητας δίχως να παραβιάζει τα απλά όρια των μεταβλητών.

8.5. Αξιολόγηση προβλεπτικού ελέγχου

Πλεονεκτήματα

Το γεγονός ότι ο αλγόριθμος του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου χρησιμοποιεί ένα απλοποιημένο σύστημα μοντέλου ευνοεί την εφαρμογή του σε ένα μοτίβο μεταβλητής ταχύτητας και σε λειτουργία πραγματικού χρόνου [39].

Ο λειτουργία του PID ελέγχου περιγράφεται ως εξής [33]: Αν ο ελεγκτής απαιτεί μία δράση ελέγχου που υπερβαίνει τους περιορισμούς, τότε η δράση ελέγχου εφαρμόζεται ακριβώς πάνω σε αυτούς. Αντιθέτως, ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου ενσωματώνει τους περιορισμούς στη διαδικασία βελτιστοποίησης, ιδιότητα που τον καθιστά ευφυή μέθοδο ελέγχου.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα της εργαλειοθήκης του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας σε μονάδες με πολλαπλές εισόδους και εξόδους. Η κύρια πρόκληση είναι να συντονιστεί ο ελεγκτής, ώστε να επιτύχει πολλαπλούς στόχους.

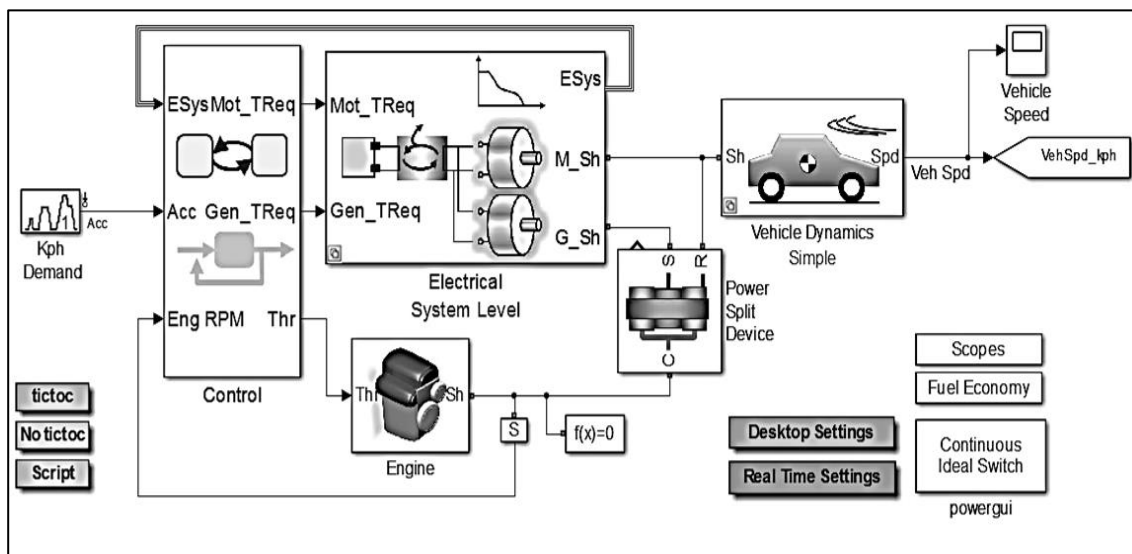
Πιο συγκεκριμένα, εάν υπάρχουν αρκετές έξοδοι προς έλεγχο, θα ήταν απαραίτητο να ιεραρχηθούν, ώστε ο ελεγκτής να παρέχει ακριβή παρακολούθηση της επιθυμητής τιμής για την πιο σημαντική έξοδο, θυσιάζοντας άλλες όταν είναι απαραίτητο, λ.χ. όταν προκύψουν περιορισμοί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη σωστή ρύθμιση των βαρών.

Μειονεκτήματα

Η δυναμική περιγραφή του συστήματος, στο οποίο εφαρμόζεται ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου, εξαρτάται από εξωγενή στοιχεία, όπως λ.χ. οι συνθήκες οδήγησης, οι οποίες ίσως να μην είναι γνωστές για μακρύ χρονικό ορίζοντα με επαρκή ακρίβεια [46].

9. Ανάπτυξη μοντέλου υβριδικού οχήματος

Το μοντέλο (Εικόνα 23) που μελετάται σε αυτή την εργασία έχει εξεταστεί στο παρελθόν ως προς την οικονομία καυσίμου με την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου βασισμένου σε κανόνες (rule-based control) [40]. Πρόκειται για ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα τοπολογίας σειράς/εν παραλλήλω [2].



Εικόνα 24: Μοντέλο υβριδικού οχήματος διαμοιρασμού ισχύος

9.1. Παρουσίαση των υποσυστημάτων

Όχημα

Το όχημα διαθέτει πίσω κίνηση και στην αποτύπωσή του συμπεριλαμβάνονται χαρακτηριστικά στοιχεία και συντελεστές απωλειών κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Η ενότητα «Vehicle Dynamics» περιλαμβάνει πληροφορίες για το φορτίο του κύκλου οδήγησης.

Φορτίο οχήματος Οι δυνάμεις που πρέπει να υπερνικηθούν, προκειμένου να επιτευχθεί η επιτάχυνση του οχήματος ή να διατηρηθεί η ταχύτητα πορείας. Αυτές είναι η δύναμη οπισθέλκουσας, η τριβή των ελαστικών, η αντίσταση κύλισης, οι μηχανικές αντιστάσεις στο σύστημα μετάδοσης, η αντίσταση της μάζας του οχήματος στην επιτάχυνση και φορτία από λοιπά εξαρτήματα και συστήματα του οχήματος [3].

Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που εμπεριέχονται στην ενότητα του οχήματος είναι:

Ο συντελεστής κύλισης Ο συντελεστής κύλισης στους τροχούς αφορά στην αντίσταση που προβάλλουν οι τροχοί κατά την περιστροφή τους σε σκληρές επιφάνειες και προκαλείται από υστέρηση στο υλικό των ελαστικών [11]. Η υστέρηση δημιουργεί μία ασύμμετρη κατανομή των δυνάμεων αντίδρασης από το έδαφος.

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας Ένα όχημα κινούμενο με μία συγκεκριμένη ταχύτητα δέχεται μία δύναμη από τον αέρα που αντιτίθεται στην κίνησή του, τη δύναμη οπισθέλκουσας. Εξαρτάται από δύο παράγοντες: το σχήμα του οχήματος και την τριβή.

Χαρακτηριστικά Μεγέθη

Μάζα οχήματος (kg)	1200
Εμβαδόν οχήματος (m^2)	2,16
Συντελεστής οπισθέλκουσας (αδιάστατο)	0,26
Ακτίνα τροχού (m)	0,3
Συνολική αδράνεια των τροχών ($kg \cdot m^2$)	0,1
Λόγος γραναζιών μηχανής εσωτερικής καύσης προς το όχημα	1,3
Συντελεστής κύλισης	0,003

Είσοδος	Έξοδος	Σχόλια
Η μηχανική ισχύς στον άξονα κίνησης	Η πραγματική ταχύτητα του οχήματος σε km/h και η μηχανική ισχύς στους τροχούς	Υπάρχουν απώλειες εξαιτίας της αντίστασης του αέρα και του εδάφους.

Πλανητικό σύστημα γραναζιών

Στο πλανητικό σύστημα γραναζιών υπάρχει ένα κεντρικό γρανάτζι, ο «ήλιος», γύρω από το οποίο κινούνται μικρότερα γρανάτζια, οι «πλανήτες» και συνδέονται μ' έναν κοινό φορέα, τον «πλανητικό φορέα» [42]. Γύρω απ' αυτά υπάρχει ο «δακτύλιος», ο οποίος διαθέτει εσωτερική οδόντωση, ούτως ώστε να εξασφαλίζει τη συνεχή εμπλοκή μεταξύ αυτών των τριών διαφορετικών τύπων γραναζιών.

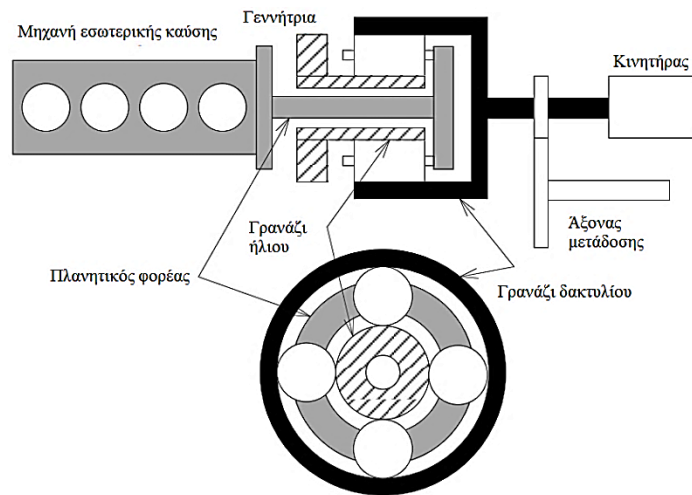
Τα μεγέθη των γραναζιών είναι διαφορετικά μεταξύ τους. Κατά συνέπεια η μετάδοση ενός αριθμού στροφών στο ένα απ' αυτά, συνεπάγεται την περιστροφή των άλλων με μικρότερο ή μεγαλύτερο αριθμό στροφών. Το πλανητικό σύστημα γραναζιών αποτελεί την ουσία της συγκεκριμένης διάταξης, καθώς είναι υπεύθυνο για τον διαμερισμό της

ισχύος μεταξύ των δύο ηλεκτρικών μηχανών, της μηχανής εσωτερικής καύσης και του οχήματος [41].

Τα γρανάζια που βρίσκονται σε χρήση είναι:

- ο ήλιος (Sun-S) στον οποίο συνδέεται ο άξονας της γεννήτριας
- ο φορέας (Carrier-C) όπου συνδέεται η μηχανή εσωτερικής καύσης
- ο δακτύλιος (Ring-R) με τον οποίο ενώνεται ο κεντρικός άξονας κίνησης που συνδέει τους τροχούς με τον κινητήρα.

Στην Εικόνα 25 φαίνεται η διάταξη των γραναζιών στο πλανητικό σύστημα και ο τρόπος διασύνδεσής τους με τις ηλεκτρικές μηχανές.



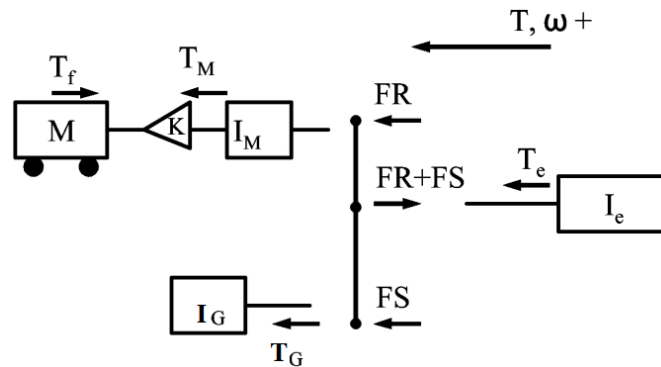
Εικόνα 25: Πλανητικό σύστημα γραναζιών και σύνδεση με μηχανές

Είσοδοι		Έξοδος	Σχόλια
Η μηχανική ισχύς στον φορέα (C) από τη μηχανή εσωτερικής καύσης	Η μηχανική ισχύς στον ήλιο (S)	Η μηχανική ισχύς στον δακτύλιο (R)	Πορεία & Επιτάχυνση (Θετική κλίση δρόμου)
	Η μηχανική ισχύς στον δακτύλιο (R)	Η μηχανική ισχύς στον ήλιο (S)	Επιβράδυνση (Αρνητική κλίση δρόμου) Αναγεννητική Πέδηση

Ο λόγος μετασχηματισμού είναι ίσος με $N_R/N_S = 2,6$.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σύνδεση των γραναζιών με τις ηλεκτρικές μηχανές και τη μηχανή εσωτερικής καύσης. Η σύνδεση του ηλεκτρικού κινητήρα

απευθείας στον δακτύλιο εξυπηρετεί στην άμεση πρόωση του οχήματος από τον κινητήρα και την αποδοτική αναγεννητική πέδηση.



Η ισχύς που παράγεται από τη μηχανή εσωτερικής καύσης διαιρείται σε δύο μονοπάτια: ένα μηχανικό και ένα ηλεκτρικό. Τα μηχανικό μονοπάτι αποτελείται από την ισχύ που μεταφέρεται από τον φορέα άμεσα στον δακτύλιο, ο οποίος συνδέεται στον άξονα κίνησης του οχήματος. Το ηλεκτρικό μονοπάτι μετατρέπει την εναπομείνουσα ισχύ της μηχανής εσωτερικής καύσης σε ηλεκτρισμό μέσω της ηλεκτρικής γεννήτριας. Η ισχύς αυτή είτε φορτίζει την μπαταρία είτε τροφοδοτεί τον ηλεκτρικό κινητήρα.

Η σχέση μεταξύ των ταχυτήτων είναι: $\omega_s S + \omega_r R = \omega_c (R + S)$.

Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του πλανητικού συστήματος γραναζιών είναι:

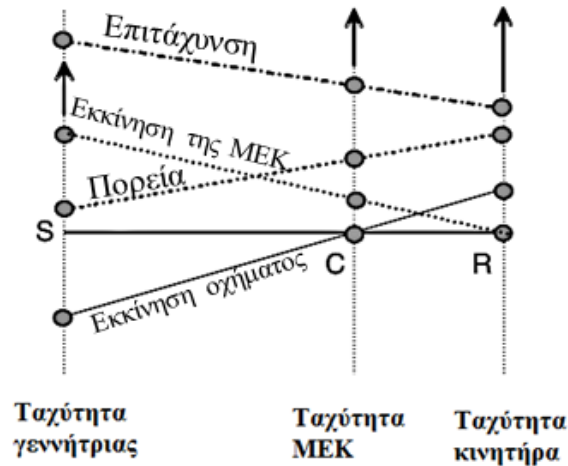
$$\dot{\omega}_G (I_G + I_S) = F \cdot S - T_G$$

$$\dot{\omega}_e (I_e + I_c) = T_e - F \cdot R - F \cdot S$$

$$\dot{\omega}_r \left(\frac{R_{tire}^2}{K} m + I_M K + I_r K \right) = (T_M + F \cdot R) K - T_f - m g f_r R_{tire} - 0.5 \rho A C_d \left(\frac{\omega_r}{K} \right)^2 R_{tire}^3$$

Όπου T_M, T_G και T_e είναι οι ροπές του κινητήρα, της γεννήτριας και της μηχανής εσωτερικής καύσης, I_c, I_s, I_r, I_M, I_G και I_e η ροπή αδράνειας του φορέα, του ήλιου, του δακτυλίου, του κινητήρα, της γεννήτριας και της μηχανής εσωτερικής καύσης. Το F αναπαριστά την εσωτερική δύναμη στο οδοντωτό των γραναζιών, το m τη μάζα του οχήματος και το T_f τη ροπή πέδησης. K είναι ο τελικός λόγος μετάδοσης κίνησης, R_{tire} είναι η ακτίνα των τροχών, f_r ο συντελεστής αντίστασης κύλισης και ο όρος $0.5 \rho A C_d$ εκφράζει την αντίσταση οπισθέλκουσας (αντίσταση αέρα).

Στο διάγραμμα της Εικόνας 26 που ακολουθεί αποκτάμε μία εποπτική εικόνα της λειτουργίας του πλανητικού συστήματος γραναζιών. Για τις τέσσερις λειτουργίες που αναγράφονται, αναπαρίσταται η σχέση μεταξύ των ταχυτήτων των τριών μηχανών [18]. Η γεννήτρια αναλαμβάνει την εκκίνηση της μηχανής εσωτερικής καύσης και την παραγωγή ενέργειας από αυτή.



Εικόνα 26: Βασικές αρχές πρόωσης διαμοιρασμού ισχύος

1^η Λειτουργία: Εκκίνηση της μηχανής εσωτερικής καύσης (Engine Cranking)

Πρόκειται για τη λειτουργία των μηχανών κατά το γύρισμα της μίζας. Οι τροχοί είναι σταθεροί, με αποτέλεσμα ο άξονας μετάδοσης να μην περιστρέφεται και η ταχύτητα του δακτυλίου να είναι μηδενική. Ως εκ τούτου, το γρανάζι που στρέφεται είναι εκείνο του ήλιου, στο οποίο συνδέεται η γεννήτρια, απαραίτητη για την εκκίνηση της μηχανής εσωτερικής καύσης. Το γρανάζι του ήλιου στρέφεται ενάντια στο στατικό γρανάζι του δακτυλίου. Στο όχημα διαμοιρασμού ισχύος, δε χρειάζεται να στρέφεται η μηχανή εσωτερικής καύσης για να ξεκινήσει το όχημα. Εξάλλου, η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι λιγότερο αποδοτική, όταν λειτουργεί σε χαμηλά φορτία [3].

2^η Λειτουργία: Ξεκίνημα οχήματος (Vehicle launch)

Ας υποθέσουμε ότι η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι ανενεργή, δηλαδή, η ταχύτητα του φορέα είναι μηδενική. Σε αυτή τη λειτουργία, ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να δράσει μόνος του, ώστε το όχημα να ξεκινήσει σε οριζόντιο ή κεκλιμένο επίπεδο. Η μηχανή εσωτερικής καύσης αρχίζει να στρέφεται, όταν η απαιτούμενη από αυτή ροπή ξεπεράσει ένα όριο, λ.χ. τα 800 Nm.

3^η Λειτουργία: Πορεία (Cruising)

Κατά τη διάρκεια της πορείας, η μηχανή εσωτερικής καύσης διανέμει μηχανική ισχύ άμεσα στους τροχούς. Η ισχύς της κατευθύνεται, επίσης, και προς τη γεννήτρια, η οποία με τη σειρά της, προωθεί την ηλεκτρική της έξοδο στον κινητήρα με σκοπό την άθροιση των ισχύων.

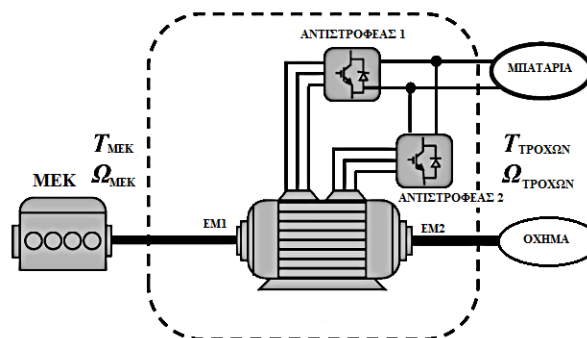
4^η Λειτουργία: Επιτάχυνση (Acceleration)

Ο στόχος του σχεδιασμού ενός οχήματος διαμοιρασμού ισχύος είναι η ελαχιστοποίηση του φάσματος της ταχύτητας λειτουργίας και ο περιορισμός του σε ένα σύνολο αποδοτικότερων, ως προς το καύσιμο, σημείων ροπής-ταχύτητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταχύτερη περιστροφή της γεννήτριας, ούτως ώστε η έξοδός της, όταν διανέμεται στον κινητήρα μαζί με την έξοδο της μηχανής εσωτερικής καύσης να είναι επαρκής για την υποστήριξη του φορτίου κίνησης του οχήματος.

→ Εναλλακτικό σύστημα διαμοιρασμού: Ηλεκτρικά μεταβαλλόμενη μετάδοση

Για τον διαμοιρασμό της ισχύος έχει προταθεί μία διάταξη ηλεκτρομηχανικής φύσης, η ηλεκτρικά μεταβαλλόμενη μετάδοση μόνιμου μαγνήτη (PM – EVT) [21]. Στην περίπτωση αυτή διατελείται, επίσης, διαμοιρασμός ισχύος με ηλεκτρομηχανικό τρόπο παρά με μηχανικό, όπως στο πλανητικό σύστημα γραναζιών.

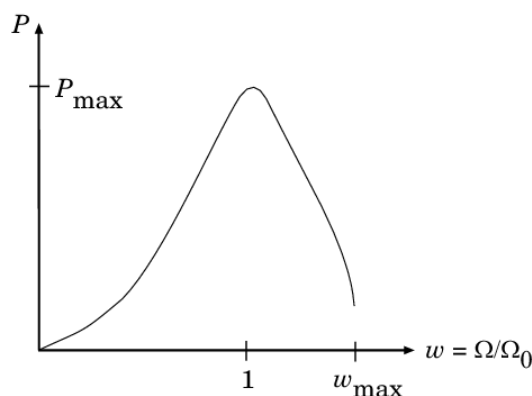
Σύμφωνα με το σχήμα της Εικόνας 27, πρόκειται για έναν ενσωματωμένο ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από δύο ομοκεντρικά διατεταγμένες ηλεκτρικές μηχανές (EM1, EM2). Δύο ομάδες τριφασικών τυλιγμάτων τροφοδοτούνται από δύο μετατροπείς ισχύος (ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ 1, ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ 2) με κοινό dc ζυγό.



Εικόνα 27: Σύστημα ηλεκτρικά μεταβαλλόμενης μετάδοσης

Μηχανή εσωτερικής καύσης

Η μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε θερμότητα και κινητική ενέργεια για την πρόωση του οχήματος. Στην παρακάτω καμπύλη (Εικόνα 28) ισχύουν οι σχέσεις: $\omega = \Omega/\Omega_0$ και $p = P(\Omega)/P_0$, $\omega_{min} = \Omega_{min}/\Omega_0$ και $\omega_{max} = \Omega_{max}/\Omega_0$. Η ταχύτητα της μηχανής παίρνει μόνο θετικές τιμές με τον περιορισμό: $0 \leq \omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max}$.



Εικόνα 28: Καμπύλη ισχύος-ταχύτητας της μηχανής εσωτερικής καύσης

Ω_0 είναι η ταχύτητα, στην οποία η μηχανή εσωτερικής καύσης αποδίδει τη μέγιστη ισχύ.

Χαρακτηριστικά Μεγέθη

Μέγιστη Ισχύς (kW)	57
Ταχύτητα στη μέγιστη ισχύ (ΣΑΛ)	5000
Μέγιστη ταχύτητα(ΣΑΛ)	6000
Ταχύτητα απώλειας στήριξης (ΣΑΛ)	500
Τύπος μηχανής	Σπινθήρα ανάφλεξης

Είσοδος	Έξοδος
Η απαιτούμενη ροπή T ως ποσοστό επί της μέγιστης πιθανής ροπής	Ροπή, ταχύτητα και ισχύς στον στροφαλοφόρο άξονα

Η μηχανή εσωτερικής καύσης απενεργοποιείται, όταν η απαιτούμενη ροπή είναι μικρότερη των 800 Nm, προκειμένου να επιτυγχάνεται οικονομία καυσίμου.

Γενικές πληροφορίες

Τα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης τεσσάρων χρόνων, δύο χρόνων, περιστροφικές ή Stirling [47]. Η υποβοήθηση από τον ηλεκτρικό κινητήρα ευνοεί, επίσης, τη χρήση καινοτόμων σχεδιασμών μηχανής εσωτερικής καύσης, όπως της μηχανής εσωτερικής καύσης κύκλου Atkinson [3]. Θεωρητικά ο κύκλος Atkinson επιτρέπει σε έναν κύκλο Otto να ολοκληρωθούν όλοι οι χρόνοι σε μία περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα.

Επίσης, χαρακτηρίζεται από μειωμένη συμπίεση και αυξημένη εκτόνωση εις βάρος της ισχύος, αλλά προς όφελος της κατανάλωσης καυσίμου. Οι μηχανές κύκλου Atkinson χαρακτηρίζονται από ροπή και ιπποδύναμη μικρότερων επιπέδων, αδυναμία που αντισταθμίζεται από τον ηλεκτρικό κινητήρα στα υβριδικά οχήματα [31]. Μερικά από τα υβριδικά αυτοκίνητα που φέρουν μηχανή εσωτερικής καύσης κύκλου Atkinson είναι το Toyota Prius – το οποίο μελετάμε - το Ford Escape, το Chevrolet Tahoe και το Lexus RX.

Ηλεκτρικά υποσυστήματα

Οι ηλεκτρικές μηχανές – γεννήτρια και κινητήρας – μοντελοποιούνται με μία μηχανή συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες που διέπεται από τη λογική ελέγχου ροπής κλειστού βρόχου.

Ηλεκτρική γεννήτρια

Η ηλεκτρική γεννήτρια κατέχει τον ρόλο του εκκινητή για τη μηχανή εσωτερικής καύσης. Αν η μηχανή εσωτερικής καύσης λειτουργεί, τότε ο ελεγκτής της γεννήτριας επικεντρώνεται στη φόρτιση των μπαταριών χρησιμοποιώντας τη λογική ελέγχου της ροπής. Ειδικά, ο ελεγκτής της γεννήτριας ελέγχει την ταχύτητα της γεννήτριας. Η γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει και ως κινητήρας, όταν συμβεί επιτάχυνση από την κατάσταση ηρεμίας.

Είσοδος	Έξοδος
Η προσφερόμενη από τη ΜΕΚ ροπή	Τάση στα άκρα της για τη φόρτιση των μπαταριών

Ηλεκτρικός κινητήρας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας δρα συνεπικουρικά με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για την πρόωση του οχήματος. Σε περιπτώσεις πέδησης, λειτουργεί ως γεννήτρια

αιχμαλωτίζοντας την ενέργεια που θα μετατρέπεται σε θερμότητα και προσφέροντάς τη στην μπαταρία.

Είσοδος	Έξοδος
Τάση από τη γεννήτρια ή/και την μπαταρία	Μηχανική ισχύς στον κεντρικό άξονα κίνησης

Ηλεκτρονικά ισχύος

Για τον υποβιβασμό ή την ανύψωση του επιπέδου της τάσης μεταξύ των ηλεκτρικών μηχανών και της μπαταρίας παρεμβάλλεται ένας dc-dc μετατροπέας με λόγο μετασχηματισμού $\lambda = 500/200$.

Μπαταρία

Χρησιμοποιείται μπαταρία νικελίου – υδριδίου του μετάλλου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

Χαρακτηριστικά Μεγέθη

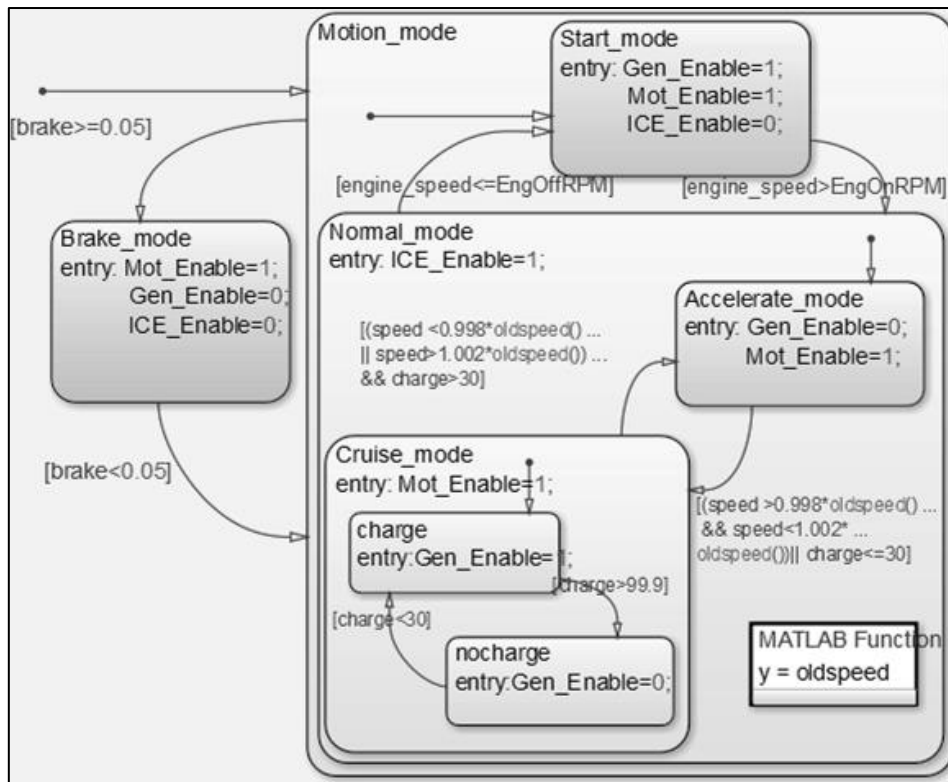
Ονομαστική τάση (V)	200
Ονομαστική χωρητικότητα (Ah)	8,1
Αρχική στάθμη φόρτισης(%)	75,75
Μέγιστη χωρητικότητα (Ah)	8,7231
Τάση πλήρους φόρτισης (V)	235,5932
Ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης (A)	1,62
Εσωτερική αντίσταση(R)	0,24691
Χωρητικότητα ονομαστικής τάσης(Ah)	7,7885

9.2. Ντετερμινιστικός έλεγχος

Στο ακόλουθο σχήμα της Εικόνας 29 φαίνεται ο αλγόριθμος που ρυθμίζει τη λειτουργία και τις εξαρτήσεις μεταξύ των μηχανών. Ως εισόδους λαμβάνει:

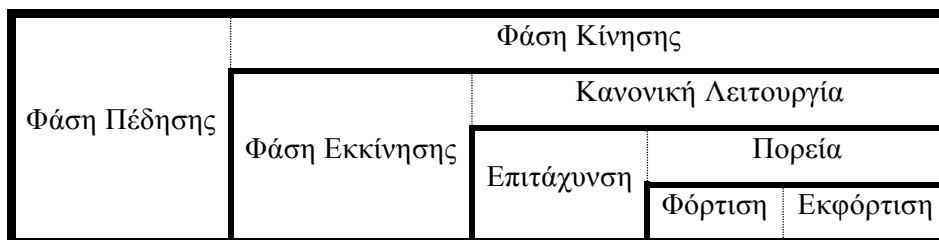
- τον κύκλο οδήγησης
- τον συντελεστή πέδησης
- την τρέχουσα στάθμη φόρτισης
- την τρέχουσα ταχύτητα της μηχανής εσωτερικής καύσης.

Οι έξοδοι του αλγορίθμου είναι τρεις εντολές ενεργοποίησης, μία για κάθε μηχανή.



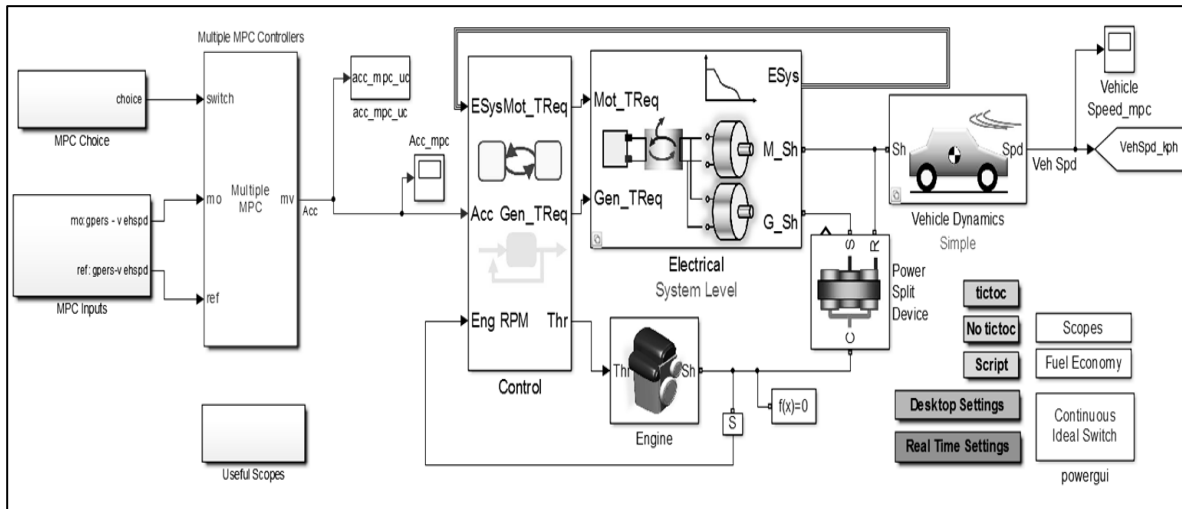
Εικόνα 29: Αλγόριθμος του ντετερμινιστικού ελέγχου

Σημειώνουμε πως υπάρχουν οκτώ (8) φάσεις λειτουργίας και είναι οι εξής:



9.3. Εφαρμογή προβλεπτικού ελέγχου στο μοντέλο

Με την ενσωμάτωση του προβλεπτικού ελεγκτή το μοντέλο έχει ως εξής:



Εικόνα 30: Μοντέλο υβριδικού οχήματος με εφαρμοσμένο MPC

Προσετέθησαν τρεις επιπλέον ενότητες, των οποίων τη χρησιμότητα θα εξηγήσουμε στη συνέχεια. Από όσα προαναφέρθηκαν στην εργασία, συμπεραίνουμε άμεσα ότι η μεταβλητή ελέγχου (ενεργοποιητής) είναι η «**Acc**». Είναι εκείνη η μεταβλητή που με τη συμπεριφορά της θα καθορίσει την απόδοση του νέου μοντέλου.

Ουσιαστικά το μοντέλο του οχήματος και ο έλεγχός του έχουν παραμείνει αναλλοίωτα με τη διαφορά ότι αντικατεστάθη ο PI ελεγκτής της μεταβλητής *Acc* με την ενότητα «*Multiple MPC Controllers*», όπως φαίνεται στην Εικόνα 30. Η ενότητα αυτή ανατροφοδοτείται από τις εξόδους του οχήματος, κατανάλωση καυσίμου και ταχύτητα οχήματος, οι οποίες ανήκουν στην ενότητα «*MPC Inputs*». Ανάλογα με τον κύκλο οδήγησης τίθενται η ανάγκη για περισσότερους από έναν ελεγκτές. Η επιλογή τους καθορίζεται στην ενότητα «*MPC Choice*».

Το *Acc* πρέπει να βρίσκεται εντός του διαστήματος $[0,1]$, καθώς υπάρχουν προκαθορισμένοι Πίνακες Αναζήτησης (Lookup Tables) που αντιστοιχίζουν τιμές του *Acc* ($\in [0,1]$) στην απαιτούμενη ταχύτητα του ηλεκτρικού κινητήρα και της μηχανής εσωτερικής καύσης. Το διάστημα ορίων για την κατανάλωση καυσίμου προκύπτει από τον πίνακα αναζήτησης που χρησιμοποιείται για στην προσομοίωση.

Οι ρυθμοί μεταβολής του *Acc* επιλέχθηκαν αποσκοπώντας στην ομαλότερη προσαρμογή στις επιθυμητές τιμές κυρίως του κύκλου οδήγησης. Δηλαδή, και η οι

απότομες επιβραδύνσεις και οι απότομες επιταχύνσεις να επιτυγχάνονται χωρίς αισθητές από τον οδηγό διακυμάνσεις.

9.4. Γραμμικοποίηση μοντέλου

Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει ο υπό μελέτη ελεγκτής είναι να εξαχθεί πρωτύτερα το γραμμικοποιημένο σύστημα κατάστασης – χώρου σε ένα σημείο ισορροπίας. Για τη γραμμικοποίηση ενός μη γραμμικού συστήματος υπό μορφή .mdl το περιβάλλον Matlab[®]/Simulink[®] διαθέτει το Control Design[™] μέσω του οποίου εξήχθη το αντιπροσωπευτικό μοντέλο κατάστασης – χώρου, όπως ορίστηκε στο εδάφιο 8.3.

Υπογραμμίζεται ότι η διαδικασία της γραμμικοποίησης του είναι εξαιρετικά απαιτητική εξαιτίας της πολυπλοκότητας του μοντέλου. Αποτέλεσε τροχοπέδη για την ακριβή εφαρμογή των ρυθμίσεων του ελεγκτή, όπως προτάθηκαν στο ερευνητικό δοκίμιο [1].

Πιο συγκεκριμένα, το σημείο ισορροπίας καθορίζει τις ονομαστικές συνθήκες, στις οποίες θα πραγματοποιηθεί η γραμμικοποίηση και είναι συνήθως μια σταθερή κατάσταση. Για τον κάθε κύκλο, ως σημείο ισορροπίας επιλέχθηκε μία χρονική στιγμή, στην οποία το όχημα διατηρεί σταθερή ταχύτητα, ίση με τη μέση τιμή του εύρους ταχυτήτων που επιβάλλει ο εκάστοτε κύκλος οδήγησης.

Στη συνέχεια, επιλέγουμε από το περιβάλλον Simulink[®] τα μεγέθη εισόδου και εξόδου του συστήματος. Ως είσοδος χαρακτηρίζεται η μεταβλητή *Acc*, η οποία αποτελεί τη μεταβλητή ελέγχου. Ως έξοδοι χαρακτηρίζονται η μεταβλητή *fcons*, που εκφράζει τη στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου και η μεταβλητή *VehSpeed*, δηλαδή η τρέχουσα ταχύτητα του οχήματος.

Με τη βοήθεια του εργαλείου Control Design[™] διαμορφώθηκε ένα μοντέλο κατάστασης-χώρου για κάθε ελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε στους κύκλους οδήγησης. Ενδεικτικά, παρατίθενται το μοντέλο κατάστασης χώρου για τον αστικό κύκλο οδήγησης Ευρώπης.

Υπενθυμίζουμε ότι το μοντέλο κατάστασης-χώρου διέπεται από τις εξής εξισώσεις:

$$\mathbf{x}_m(k+1) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(k) + \mathbf{B}_m \mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m(k) + \mathbf{D}_m \mathbf{u}(k)$$

Οι μήτρες $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ του ενδεικτικού μοντέλου έχουν ως εξής:

A =								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
x_1	-0.078	0.001	0.003	$-5.36 \cdot 10^{-7}$	$3.53e \cdot 10^{-6}$	$-1.381 \cdot 10^{-9}$	$3.67 \cdot 10^{-5}$	$-3.28 \cdot 10^{-5}$
x_2	-0.834	0.991	-0.096	$8.77 \cdot 10^{-6}$	0	$6.74 \cdot 10^{-8}$	-0.003	0.003
x_3	$7.84 \cdot 10^{-5}$	$-6.94 \cdot 10^{-7}$	-0.030	$4.34 \cdot 10^{-6}$	$-3.38 \cdot 10^{-9}$	$1.89 \cdot 10^{-8}$	$1.03 \cdot 10^{-7}$	$5.52 \cdot 10^{-5}$
x_4	-0.241	0.001	-225.2	0.994	$1.31 \cdot 10^{-5}$	$-5.45 \cdot 10^{-5}$	0	-0.231
x_5	4613	37.42	-285.3	0.033	-0.267	0	-7.191	6.651
x_6	-425.8	2.47	$6.52 \cdot 10^4$	63.23	0.021	-0.069	-0.343	-312.5
x_7	-529.1	4.99	-361.9	0.057	0.023	0	0.194	0.510
x_8	0.947	-0.010	-402.9	0.065	$-3.91 \cdot 10^{-5}$	0	0.002	0.719

B =	
	Acc
x_1	-0.016
x_2	-0.504
x_3	0.004
x_4	51.43
x_5	-933.1
x_6	$6.39 \cdot 10^4$
x_7	-70.53
x_8	64.38

C =								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
fcons	0	0	0	0	$-4.99 \cdot 10^{-4}$	$-4.04 \cdot 10^{-6}$	$-1.42 \cdot 10^{-4}$	$-2.42 \cdot 10^{-5}$
VehSpeed	0	0	0	0	0	0	0	1.08

D =	
	Acc
fcons	0
VehSpeed	0

Παρατηρήσεις

- Όπως έχει αναφερθεί στο εδάφιο 8.3, η είσοδος $\mathbf{u}(k)$ δεν επηρεάζει την έξοδο $\mathbf{y}(k)$ την ίδια χρονική στιγμή. Συνεπώς, ισχύει η ισότητα $\mathbf{D} = \mathbf{0}$.
- Το πλήθος των καταστάσεων είναι $n = 8$. Οι καταστάσεις επιλέγονται αυτόματα κατά τη διαδικασία της γραμμικοποίησης από την εργαλειοθήκη Control Design™ και μπορεί να είναι οποιοδήποτε μέγεθος από το εσωτερικό του μοντέλου, λ.χ. όρια ελεγκτών, έξοδοι βαθυπερατών φίλτρων, στοιχεία μηχανών κ.ά..

10. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και για την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για την ωφελιμότητα του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου απαιτείται η διαμόρφωση ενός αξιόπιστου κριτηρίου. Η αποκλειστική μείωση του καταναλωθέντος καυσίμου δεν αποτελεί φερέγγυο κριτήριο της υπεροχής του προβλεπτικού ελέγχου. Για παράδειγμα, αν μια μείωση της κατανάλωσης καυσίμου συνυπάρχει με τη δραματική εκφόρτιση της μπαταρίας, τότε η εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου θα ήταν μάλλον επιζήμια.

10.1. Τρόπος σύγκρισης αποτελεσμάτων

Θεωρούμε το μελετώμενο μοντέλο του υβριδικού οχήματος ως ένα σύστημα μετατροπής ενέργειας με ορισμένες εισόδους και εξόδους. Δεδομένου ότι εξετάζουμε την απόκριση της ταχύτητας και την οικονομία καυσίμου και όχι την απόδοση εσωτερικών δομών, υποθέτουμε πως είσοδος είναι η εισερχόμενη ροή καυσίμου και έξοδος η ταχύτητα του οχήματος. Ο ρόλος της μπαταρίας θα εξεταστεί στη συνέχεια.

Αρχή Διατήρησης Ενέργειας

«Σύμφωνα με την Αρχή Διατήρησης Ενέργειας, το αλγεβρικό άθροισμα όλων των μορφών ενέργειας που εμφανίζονται σε ένα (απομονωμένο) σύστημα διατηρείται σταθερό με την πάροδο του χρόνου.»

Έστω E_f η απορροφώμενη ενέργεια από την καύση της βενζίνης, E_{bat} η αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία και E_{veh} η μηχανική (δυναμική και κινητική) ενέργεια του οχήματος. Βάσει, λοιπόν, της ενέργειας της μπαταρίας στο τέλος του κύκλου οδήγησης, ο ολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος διαμορφώνεται ως εξής:

- Αν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας (θετικό πρόσημο), τότε η ενέργεια της μπαταρίας θεωρείται είσοδος του συστήματος και ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι:

$$\eta_{ελ} = \frac{E_{veh}}{E_f + E_{bat}} \cdot 100\%.$$

- Αν υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας (αρνητικό πρόσημο), τότε η ενέργεια της μπαταρίας θεωρείται έξοδος του συστήματος και ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι:

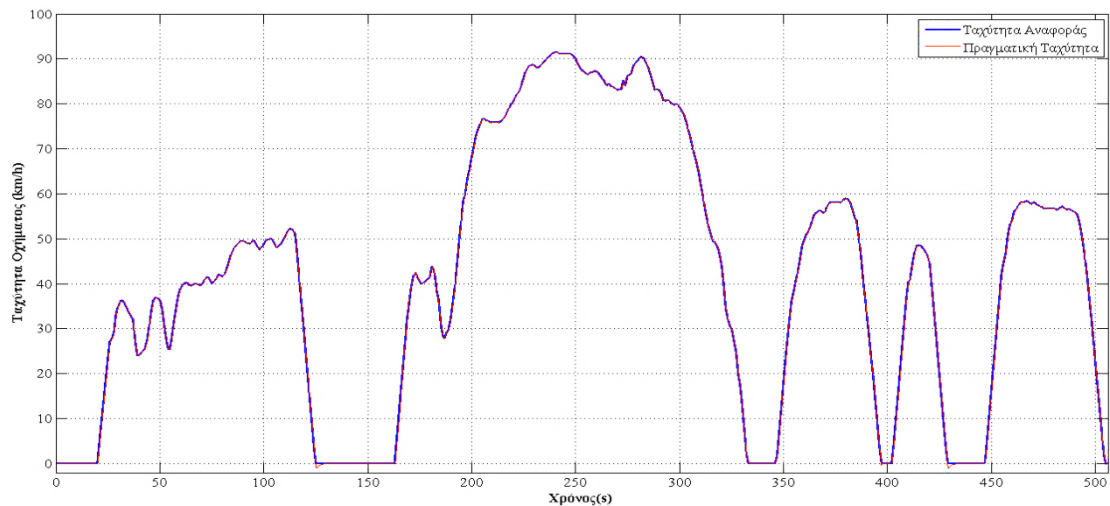
$$\eta_{πλ} = \frac{E_{veh} + |E_{bat}|}{E_f} \cdot 100\%.$$

10.2. Αστικός κύκλος οδήγησης στις ΗΠΑ

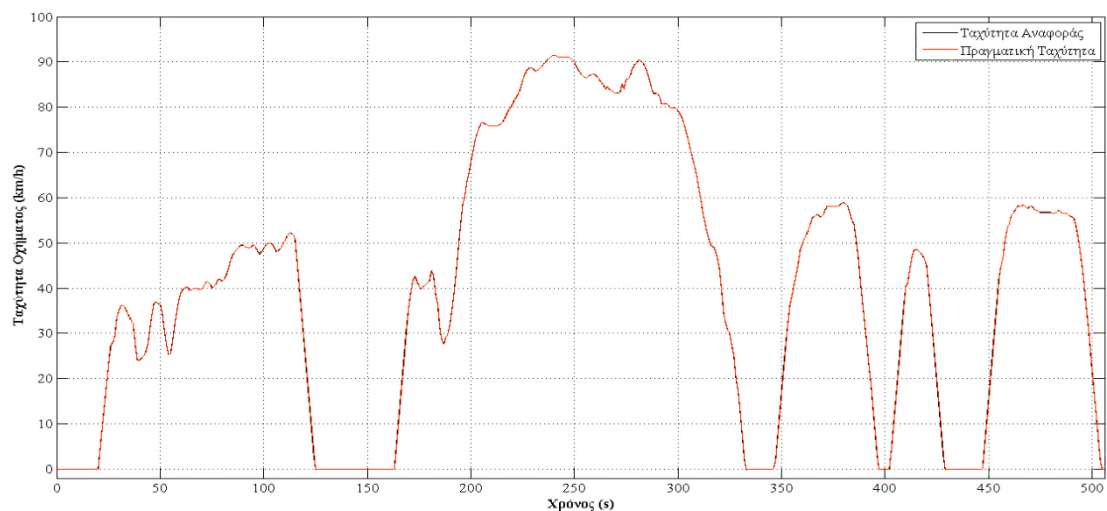
Παρακολούθηση κύκλου οδήγησης

Ο εν λόγω κύκλος περιλαμβάνει αρκετές απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, ενώ η μέγιστη ταχύτητα που απαιτεί είναι τα $91,45 \text{ km/h}$. Τονίζεται ότι κατά την εξέλιξη του επιβάλλονται χρονικά διαστήματα στάσης του οχήματος.

Στα Σχήματα [31,32] παρατηρούμε πως τόσο στον έλεγχο βάσει κανόνων, όσο και στον προβλεπτικό έλεγχο, η ταχύτητα του οχήματος ακολουθεί τον επιβαλλόμενο κύκλο οδήγησης με μη αξιόλογες αποκλίσεις. Ωστόσο, η χρήση του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου χαρίζει μεγαλύτερη ακρίβεια στην παρακολούθηση της ταχύτητας αναφοράς ως προς τον έλεγχο βάσει κανόνων.

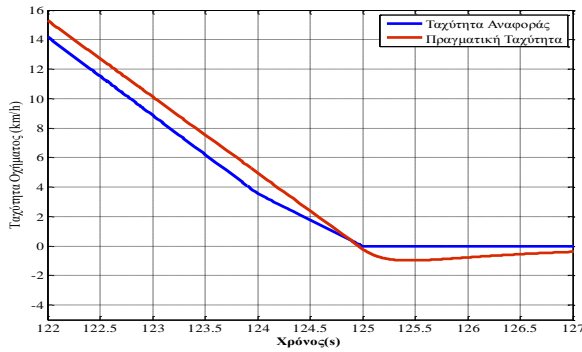


Σχήμα 31: Έλεγχος βάσει κανόνων

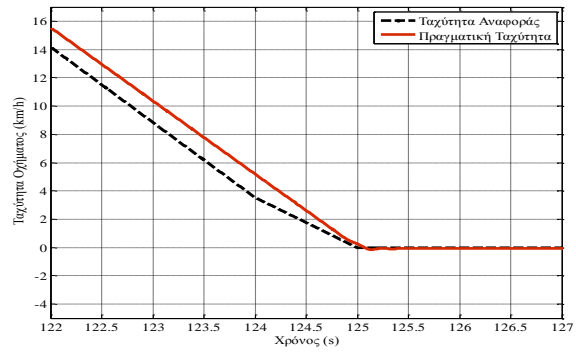


Σχήμα 32: Προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου

Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει σημαντική διαφορά στη συμπεριφορά των δύο ελέγχων κάθε φορά που η ταχύτητα του οχήματος μηδενίζεται έπειτα από επιβράδυνση, δηλαδή τις στιγμές $t_0 = 125 s, t_1 = 333 s, t_2 = 397 s, t_3 = 429 s$. Ενδεικτικά, παρατίθενται τα ακόλουθα γραφήματα (Σχήματα 33,34) για το χρονικό διάστημα [122,127]:

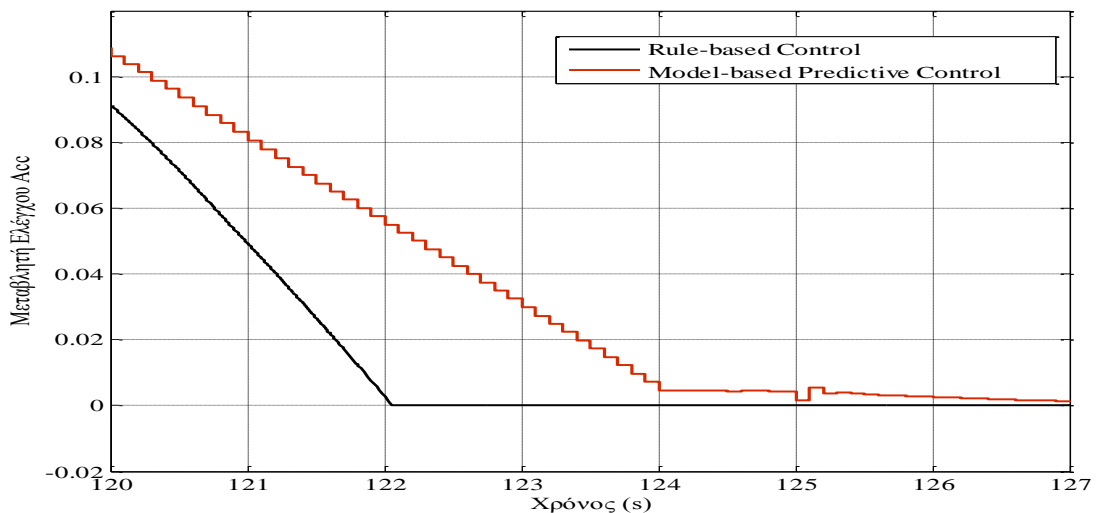


Σχήμα 33: Έλεγχος βάσει κανόνων



Σχήμα 34: Προβλεπτικός έλεγχος

Συγκρίνοντας τα δύο γραφήματα, συμπεραίνουμε πως στην περιοχή της χρονικής στιγμής $t = 125 s$, το σύστημα που χρησιμοποιεί τον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου ακολουθεί ακριβέστερα τον επιθυμητή αλλαγή της ταχύτητας, καθώς ο έλεγχος βάσει κανόνων καθυστερεί να προσαρμόσει την ταχύτητα στην επιθυμητή. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη συμπεριφορά της εντολής ελέγχου Acc στο διάστημα [120s,127s], όπως αποτυπώνεται στο γράφημα του Σχήματος 35.



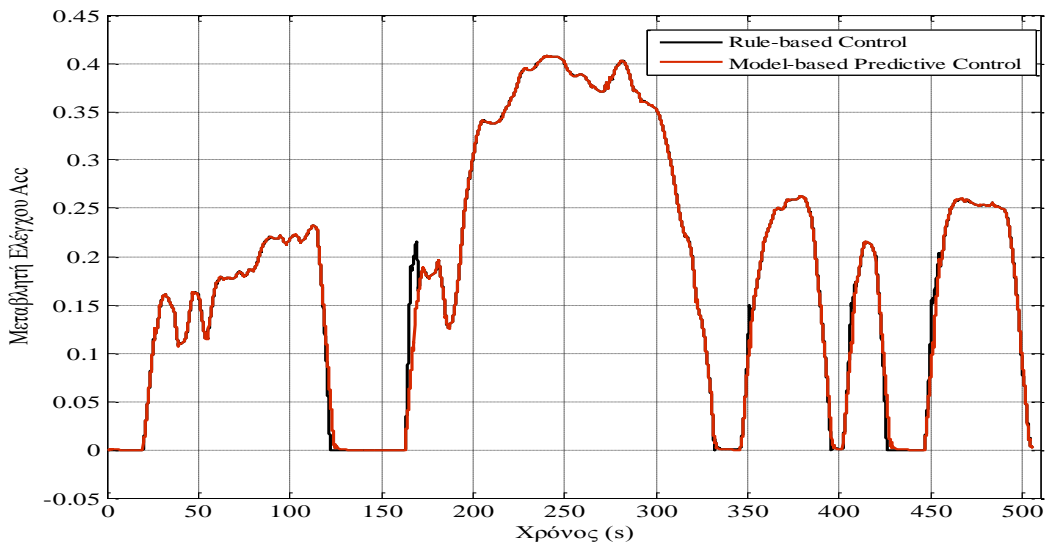
Σχήμα 35: Μεταβλητή ελέγχου Acc

Όπως παρατηρούμε, η προσαρμογή της εντολής Acc στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου προσέφερε περισσότερη ομαλότητα στην παρακολούθηση του κύκλου οδήγησης κατά την επιβράδυνση απ' ό,τι στον έλεγχο βάσει κανόνων.

Επομένως, είναι εμφανές το πλεονέκτημα της πρόβλεψης έναντι του συμβατικού ντετερμινιστικού ελέγχου, καθώς ο ελεγκτής διαβλέπει κάποια μελλοντικά βήματα του κύκλου οδήγησης και προβλέπει μία ακολουθία τιμών της μεταβλητής ελέγχου.

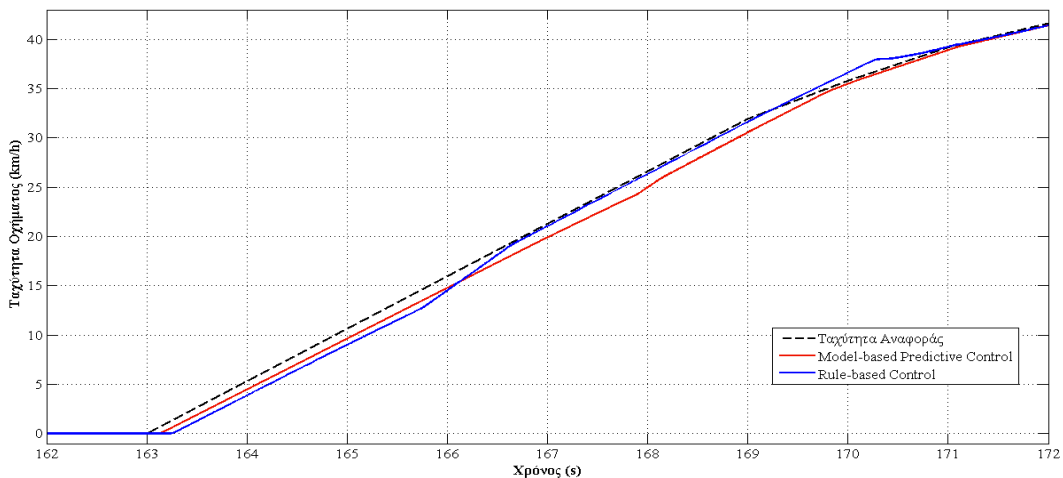
Εντολή ελέγχου

Είναι εμφανές πως μορφολογικά το γράφημα της εντολής ελέγχου (Σχήμα 36) είναι παρόμοιο εκείνου του κύκλου οδήγησης. Ωστόσο, διαπιστώνουμε πως οι μεταβλητές Acc των δύο ελέγχων διαφέρουν σε αρκετά διαστήματα, τα οποία είναι εμφανή.

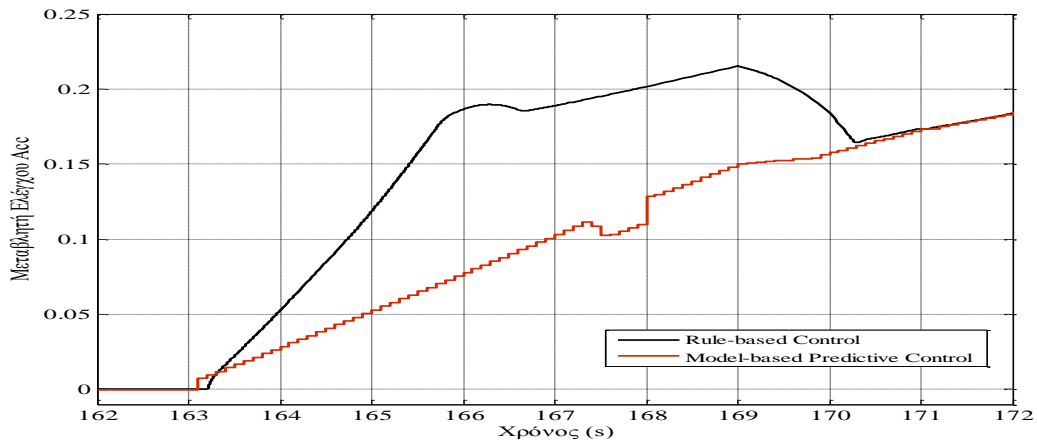


Σχήμα 36: Μεταβλητή ελέγχου Acc

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η συμπεριφορά τη μεταβλητής εντολής Acc και της ταχύτητας για τα δύο είδη ελέγχου στο διάστημα [162s,172s] στα Σχήματα [37,38].



Σχήμα 37: Ταχύτητα οχήματος στο χρονικό διάστημα [162s,172s]



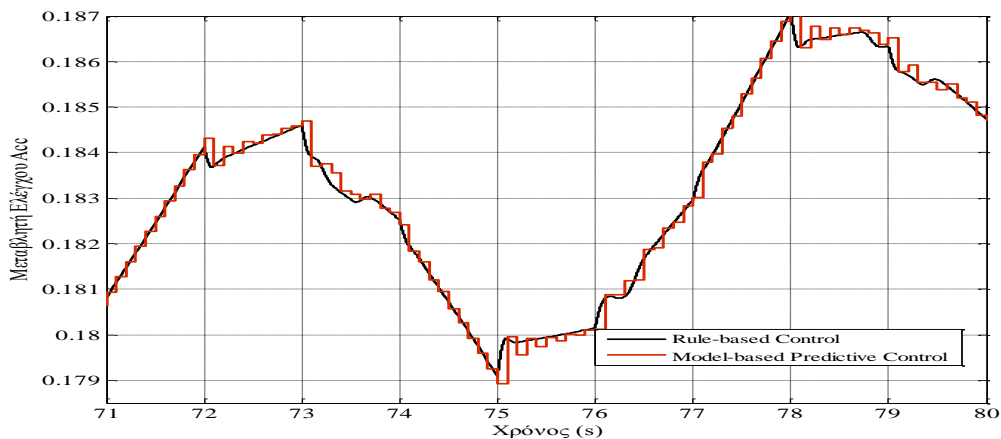
Σχήμα 38: Μεταβλητή ελέγχου **Acc** στο χρονικό διάστημα [162s,172s]

Παρατηρούμε πως η μεταβλητή ελέγχου **Acc** των δύο ελέγχων εμφανίζει μεγάλη απόκλιση. Το αποτέλεσμα φαίνεται τελικά στην ταχύτητα που αναπτύσσει το όχημα. Αρχικά το μοντέλο του προβλεπτικού ελέγχου προσεγγίζει περισσότερο τον κύκλο οδήγησης απ' ό,τι το μοντέλο που υφίσταται έλεγχο βάσει κανόνων.

Στη συνέχεια, ενώ η καμπύλη του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου κρατά σταθερή απόκλιση από την επιθυμητή ταχύτητα, η καμπύλη του ελέγχου βάσει κανόνων σχεδόν ταυτίζεται μαζί της. Τελικά, όμως, η καμπύλη του προβλεπτικού ελέγχου προσεγγίζει πιο ομαλά το επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς μεμονωμένες διακυμάνσεις όπως αυτή που σημειώνεται στο διάστημα [170s,170.5s] του Σχήματος από τον έλεγχο βάσει κανόνων.

Γενική παρατήρηση

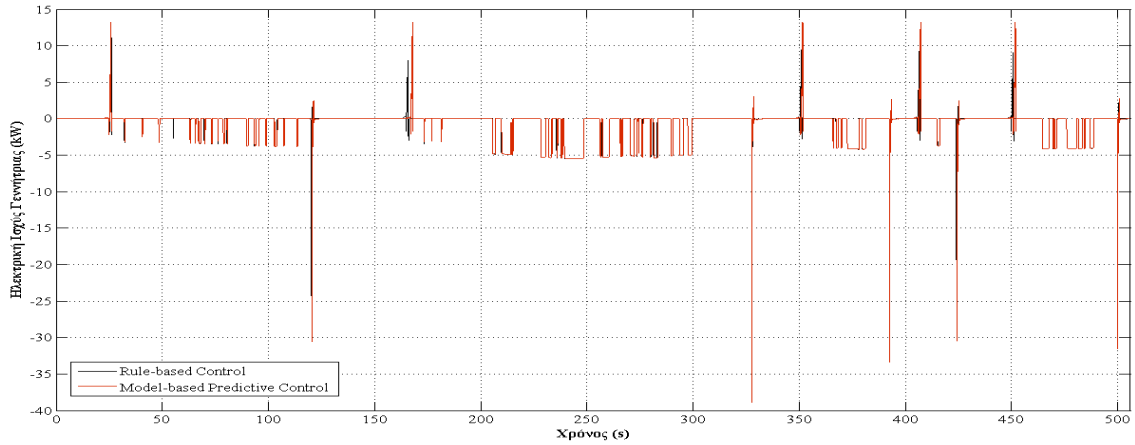
Η εντολή ελέγχου **Acc** του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου είναι βηματική εξαιτίας του βήματος δειγματοληψίας που έχει εισαχθεί. Αυτός είναι και ο λόγος δημιουργίας θορύβου σε αρκετά μεγέθη που παρουσιάζονται ακολούθως.



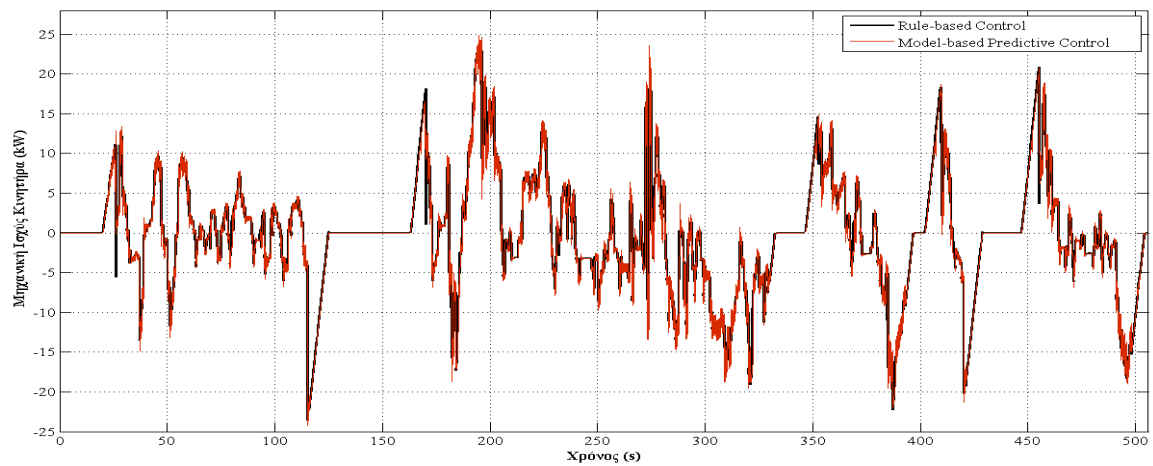
Σχήμα 39: Βηματικός χαρακτήρας μεταβλητής ελέγχου **Acc**

Ισχείς

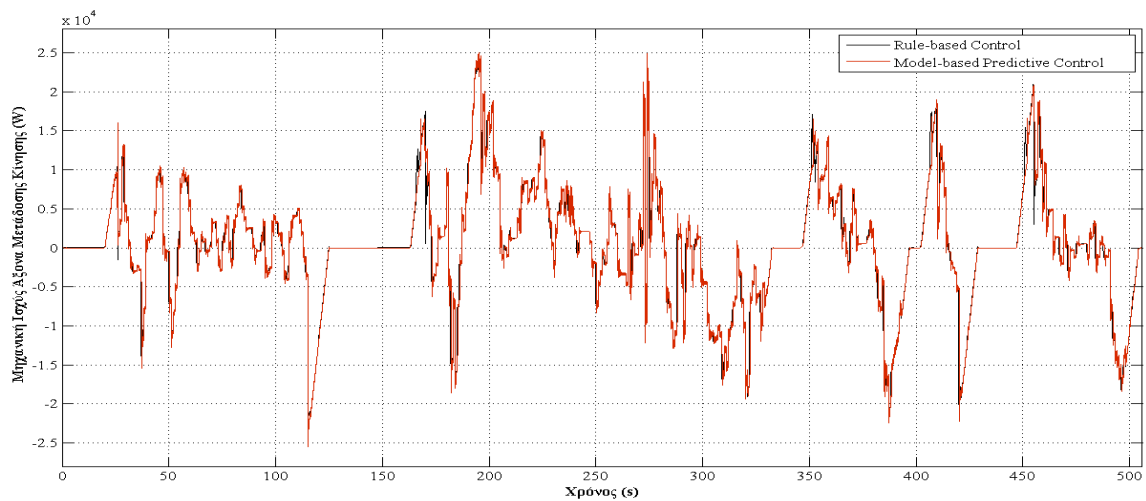
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα γραφήματα της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας, της μηχανικής ισχύος του κινητήρα και της μηχανικής ισχύος στον άξονα μετάδοσης κίνησης (Σχήματα [40,42]).



Σχήμα 40: Ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας

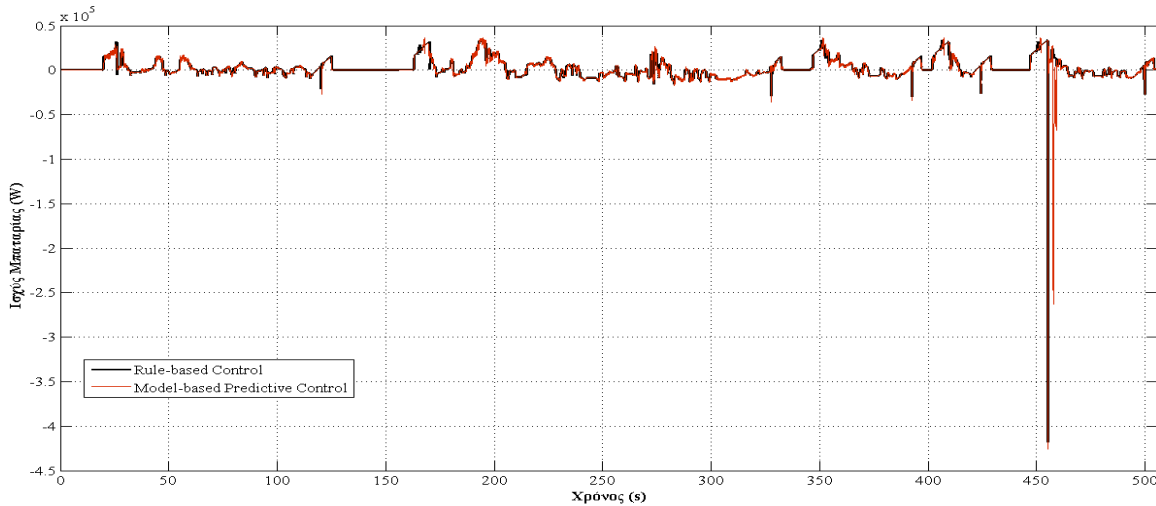


Σχήμα 41: Μηχανική ισχύς κινητήρα



Σχήμα 42: Μηχανική ισχύς άξονα μετάδοσης κίνησης

Παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές δεν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου από τον έλεγχο βάσει κανόνων. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτη η διαφορά των γραφημάτων της ισχύος της μπαταρίας των δύο ελέγχων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 43.

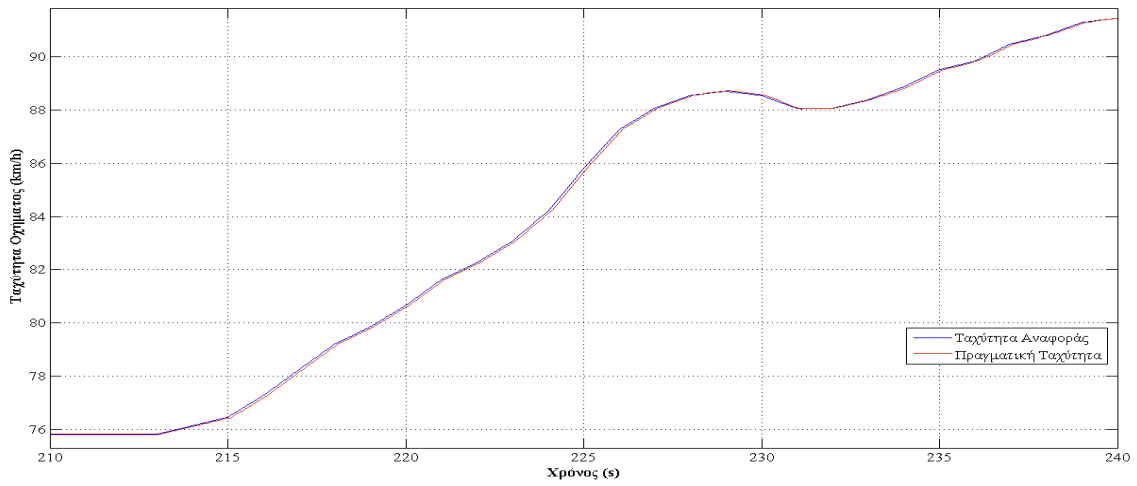


Σχήμα 43: Ισχύς μπαταρίας

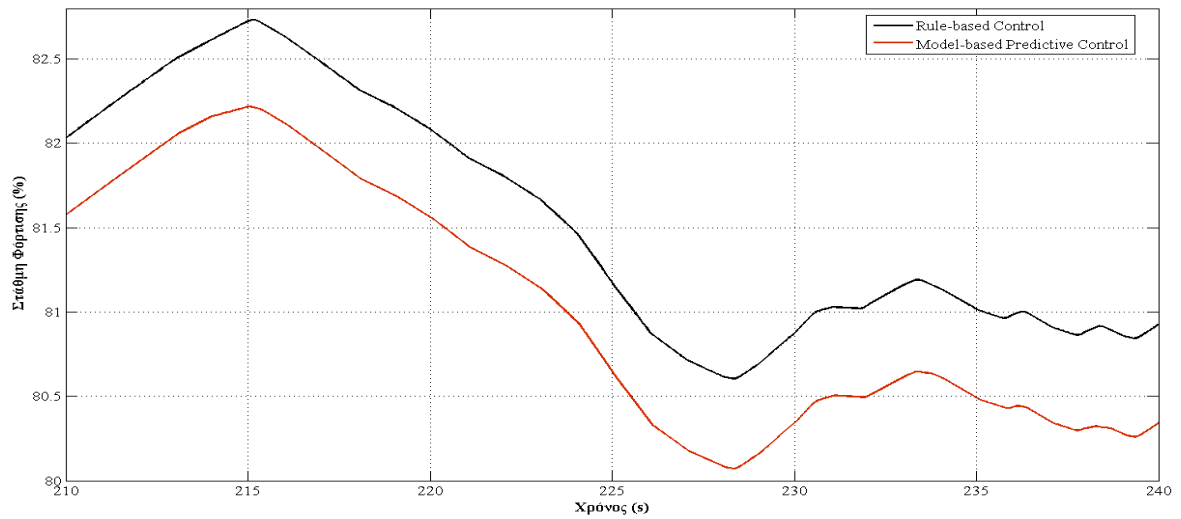
Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση της λειτουργίας της μπαταρίας για το χρονικό διάστημα [210s,240s], στο οποίο επιβάλλεται γενική επιτάχυνση και κατά τμήματα επιβράδυνση σύμφωνα με το Σχήμα 44.

Όπως ήταν φυσικό, οι δύο έλεγχοι διαφέρουν ως προς το σκέλος της μπαταρίας, καθώς αφού με τον προβλεπτικό έλεγχο εξοικονομείται ποσότητα καυσίμου, η χρήση της μπαταρίας είναι επαυξημένη. Παρατηρώντας, λοιπόν, το Σχήμα 45, συμπεραίνουμε ότι στα διαστήματα [213,215] και [236,239] ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου απαιτεί εμφανώς μεγαλύτερη συνεισφορά από την μπαταρία.

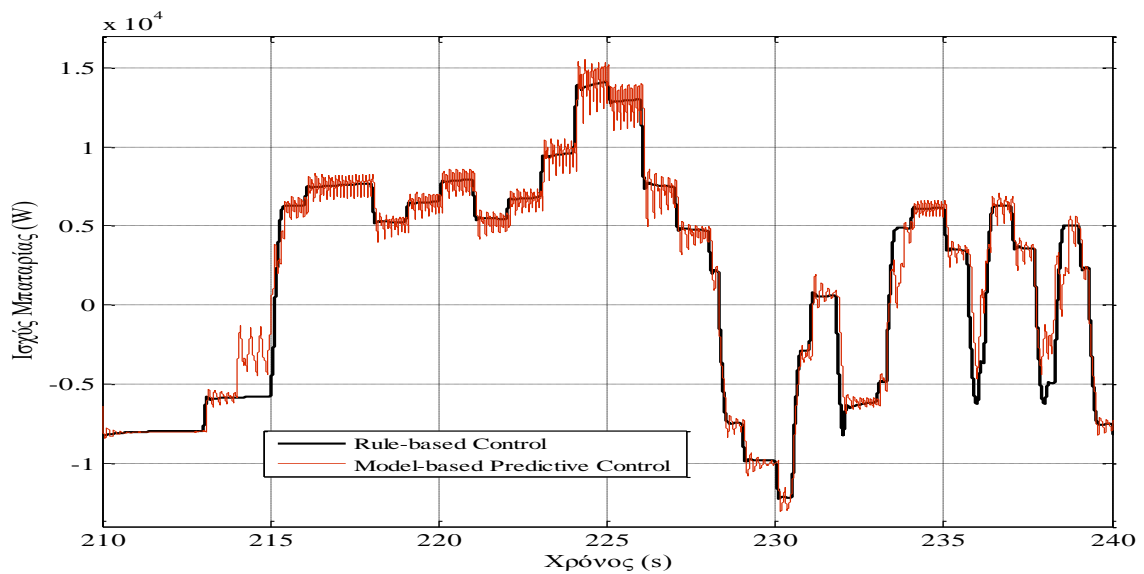
Αντίθετα, στα διαστήματα [233,235] και [238,239] ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου απαιτεί μικρότερη ισχύ από την μπαταρία σύμφωνα με το Σχήμα 46. Γενικότερα, όμως, τα διαστήματα μεγαλύτερης συνεισφοράς της μπαταρίας υπερέχουν εκείνων όπου εξοικονομείται η ενέργειά της, με αποτέλεσμα στο τέλος της προσομοίωσης με τον προβλεπτικό έλεγχο η μπαταρία να εμφανίζεται με μικρότερη αποθηκευμένη ενέργεια απ' ό,τι εφαρμόζοντας τον έλεγχο βάσει κανόνων.



Σχήμα 44: Ταχύτητα οχήματος στο χρονικό διάστημα-Προβλεπτικός έλεγχος [210s,240s]



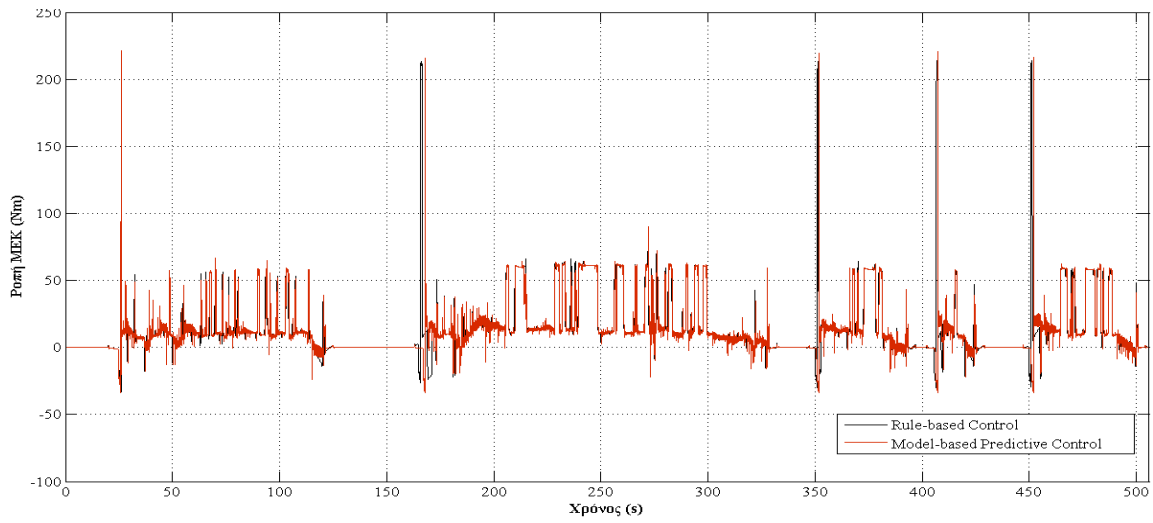
Σχήμα 45:Στάθμη φόρτισης στο χρονικό διάστημα [210s,240s]



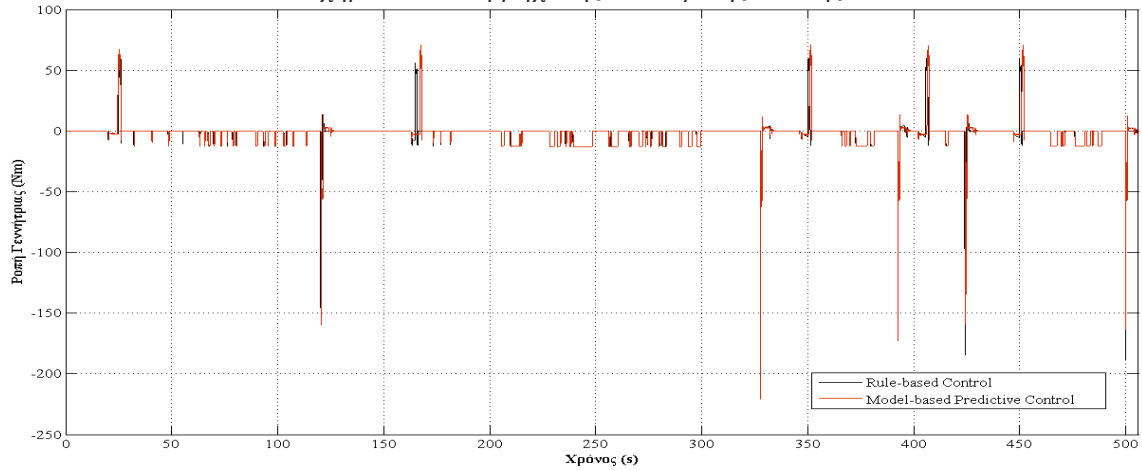
Σχήμα 46:Ισχύς μπαταρίας στο χρονικό διάστημα [210s,240s]

Ροπές

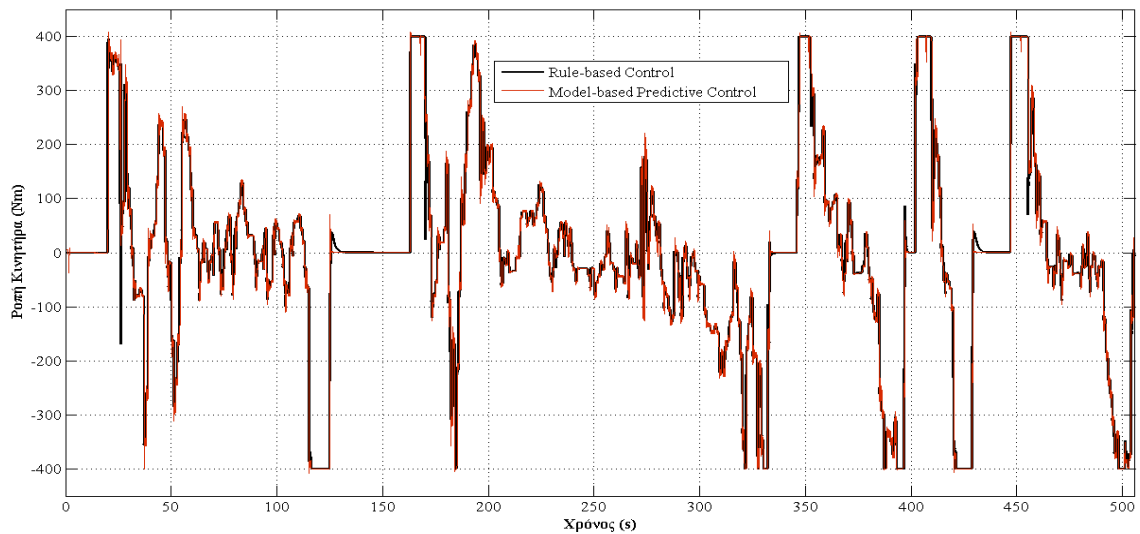
Στη συνέχεια παρατίθενται τα γραφήματα ροπής των μηχανών του οχήματος.



Σχήμα 47: Ροπή μηχανής εσωτερικής καύσης



Σχήμα 48: Ροπή γεννήτριας

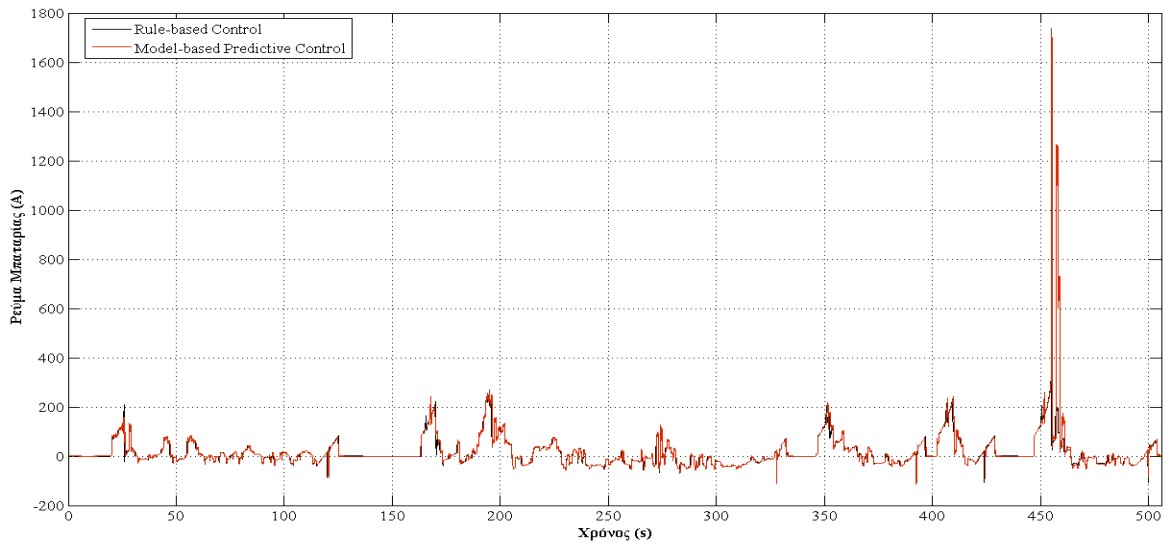


Σχήμα 49: Ροπή κινητήρα

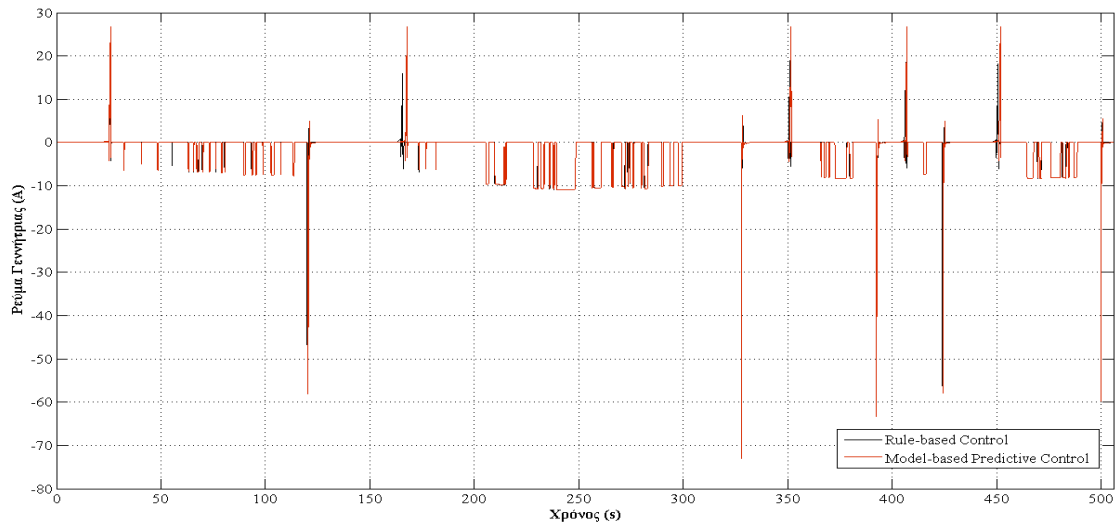
Από την παρατήρηση των γραφημάτων στα Σχήματα [47,49] συμπεραίνεται ότι τα γραφήματα ροπής των δύο ελέγχων είναι σχεδόν ταυτόσημα. Εξαιρέση αποτελεί εκείνο της γεννήτριας (Σχήμα 48), στο οποίο φαίνεται πως η ροπή στον προβλεπτικό έλεγχο είναι σε περισσότερα σημεία αρνητικότερη απ' ό,τι στον έλεγχο βάσει κανόνων, καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται εντονότερα.

Ρεύματα

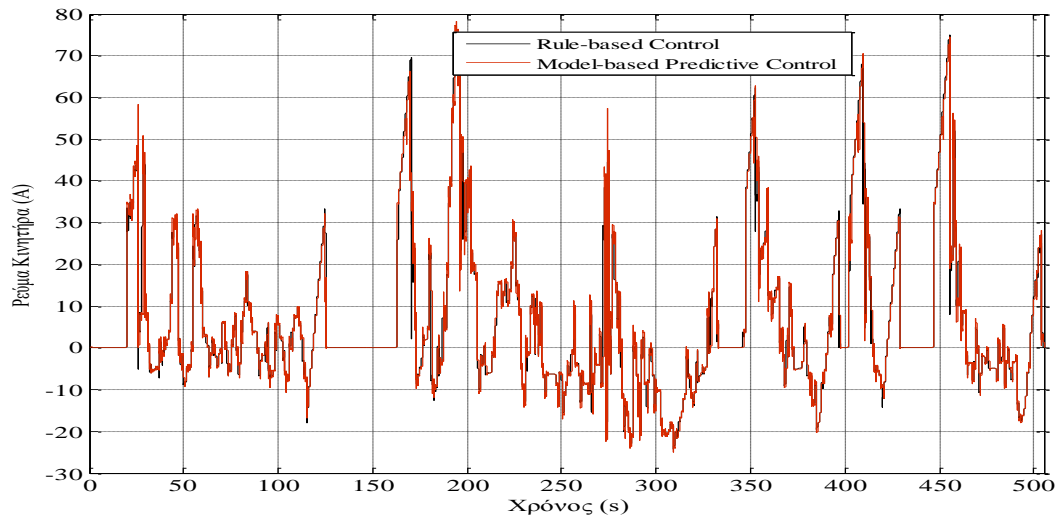
Εποπτικά, υπάρχει ταύτιση μεταξύ των γραφημάτων των δύο ελέγχων, όπως φαίνεται και στα γραφήματα των Σχημάτων [50,52].



Σχήμα 50: Ρεύμα μπαταρίας

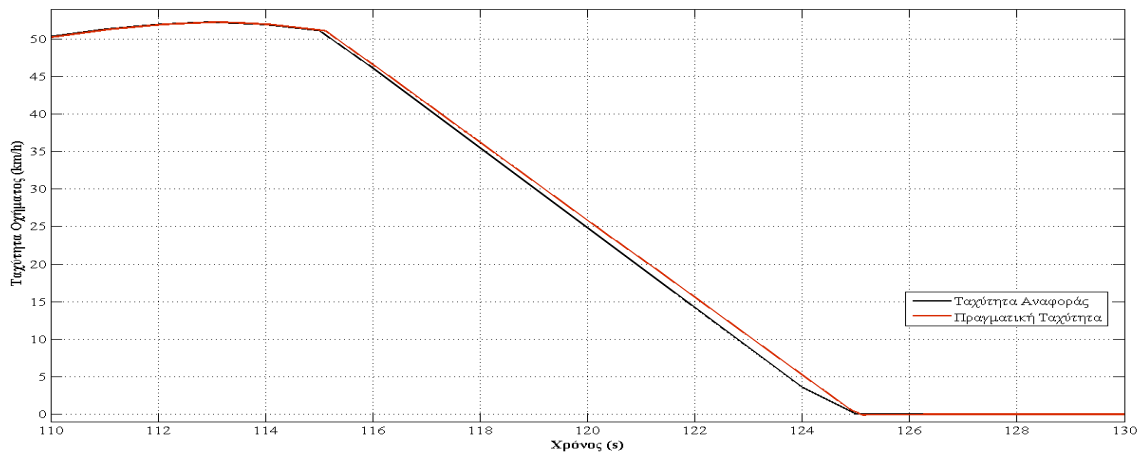


Σχήμα 51: Ρεύμα γεννήτριας

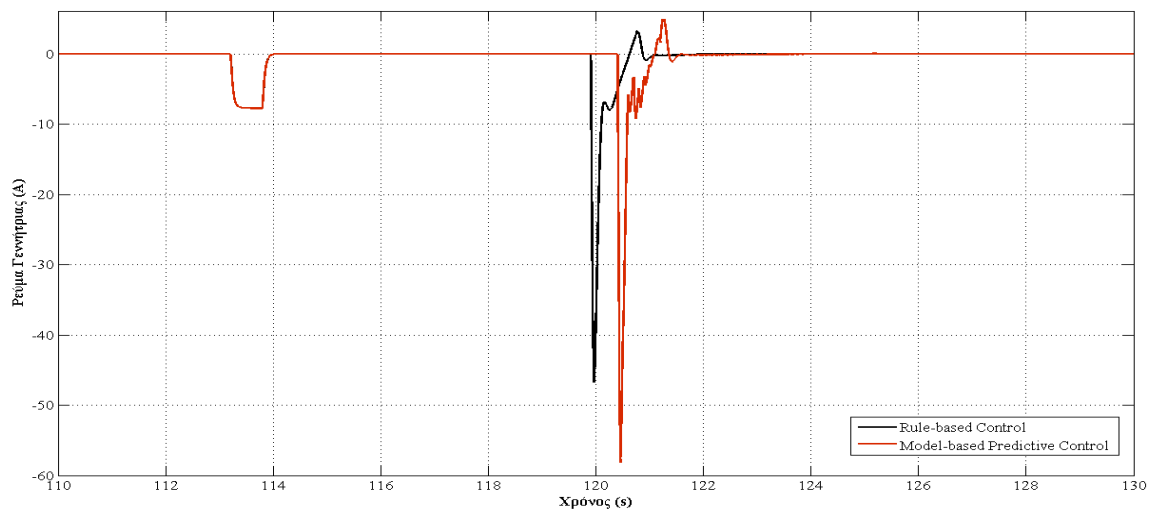


Σχήμα 52: Ρεύμα κινητήρα

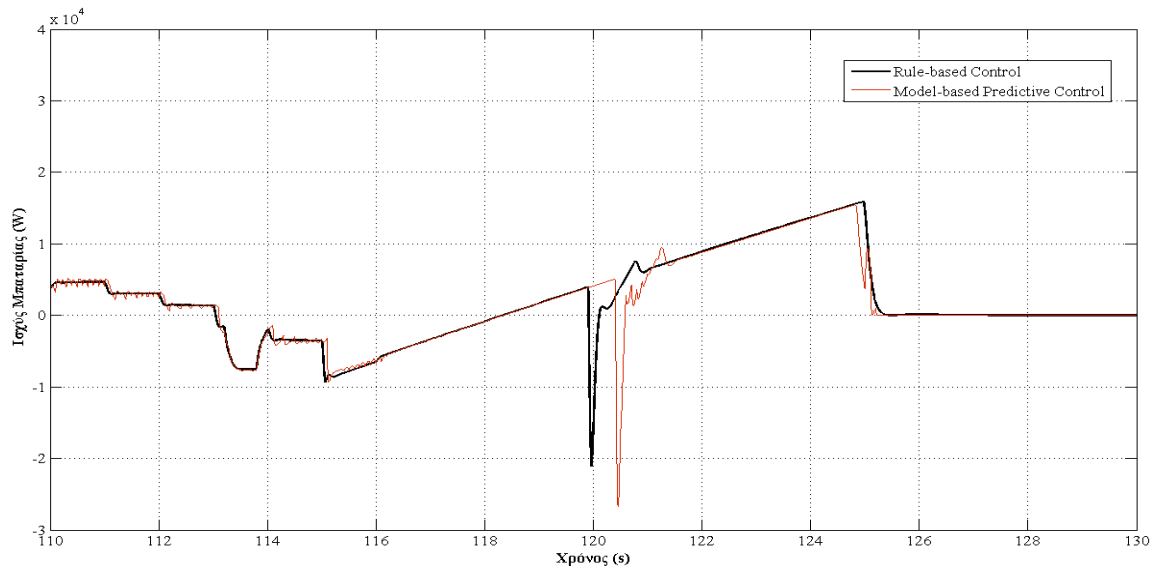
Πιο συγκεκριμένα, σε σημεία έντονης επιβράδυνσης (Σχήμα 53), η συμπεριφορά των δύο ελέγχων διαφέρει, όπως αποδεικνύεται ακολούθως για το διάστημα [110s,130s].



Σχήμα 53: Ταχύτητα οχήματος στο χρονικό διάστημα [110s,130s]



Σχήμα 54: Ρεύμα γεννήτριας στο χρονικό διάστημα [110s,130s]

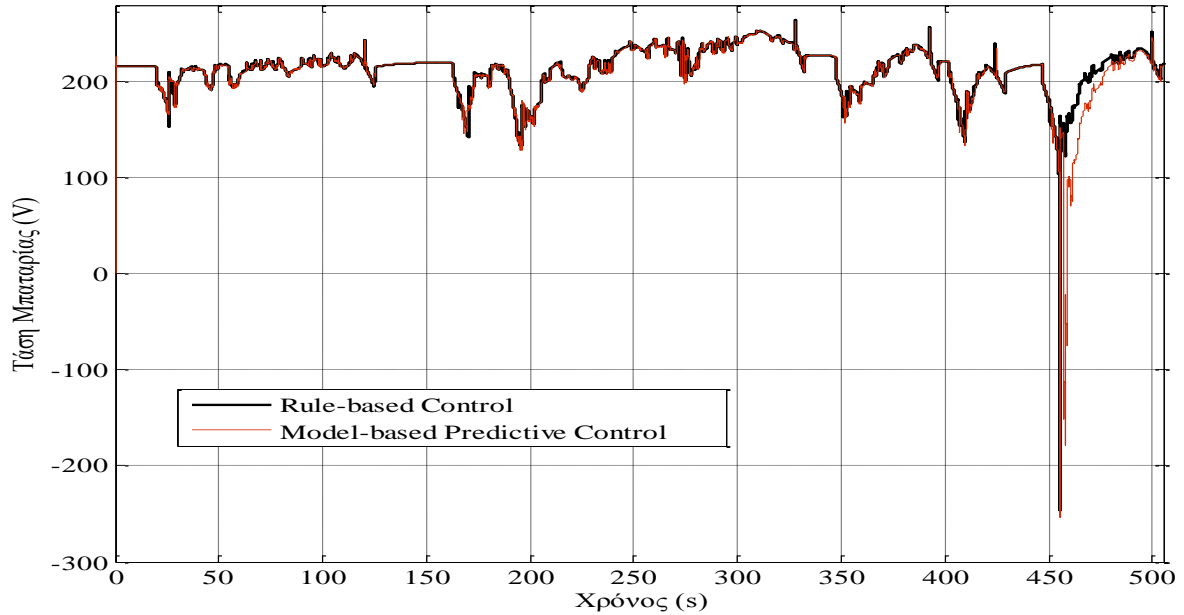


Σχήμα 55: Ισχύς μπαταρίας στο χρονικό διάστημα [110s, 130s]

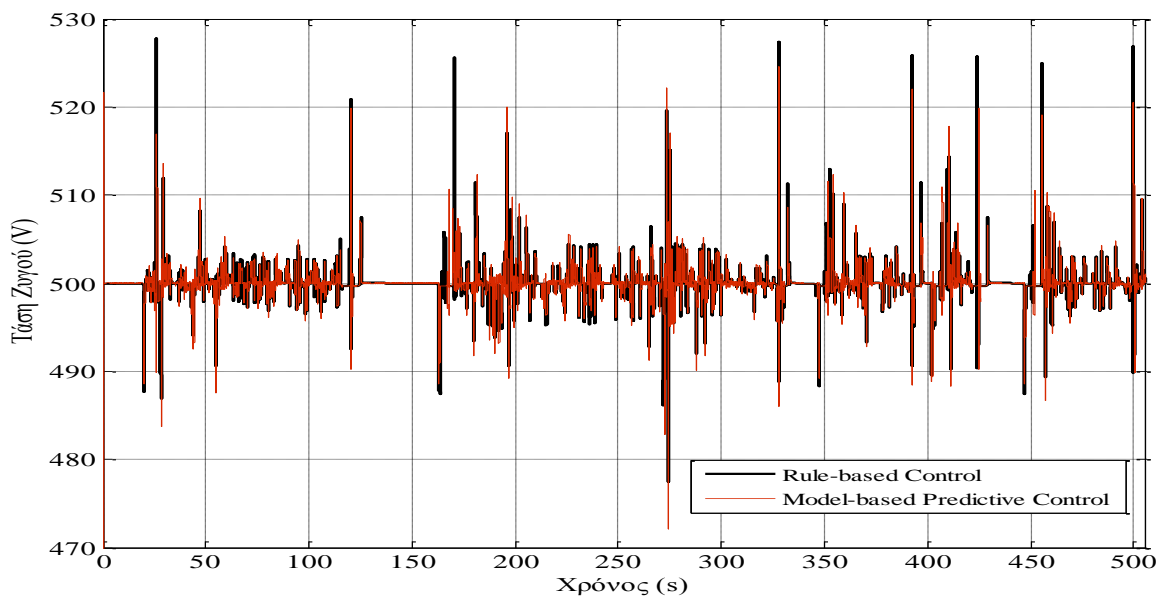
Από το γράφημα του Σχήματος 54 παρατηρούμε πως η ισχύς της μπαταρίας με προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου είναι αρνητικότερη του ελέγχου βάσει κανόνων, δηλαδή η φόρτιση είναι εντονότερη. Το χαρακτηριστικό αυτό της έντονης φόρτισης επιβεβαιώνεται και από το ρεύμα της γεννήτριας εκείνη τη στιγμή (Σχήμα 55).

Τάσεις

Παρατηρούμε πως παρά τη γενικότερη ταύτιση στα γραφήματα των τάσεων (Σχήματα 56,57), στο διάστημα [450s,465s] η τάση της μπαταρίας με τον προβλεπτικό έλεγχο είναι μικρότερη απ' ό,τι με τον έλεγχο βάσει κανόνων.



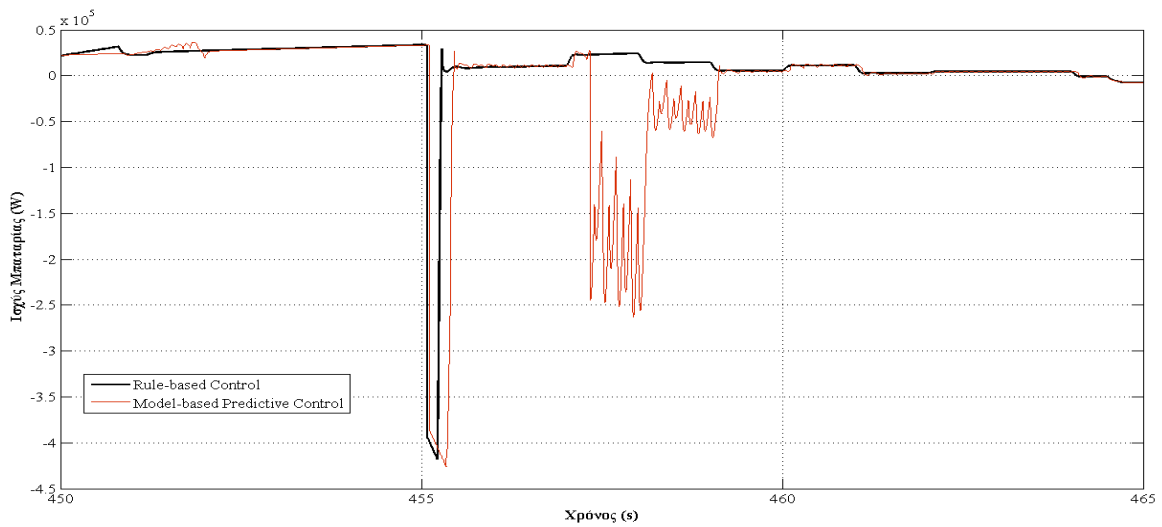
Σχήμα 56: Τάση μπαταρίας



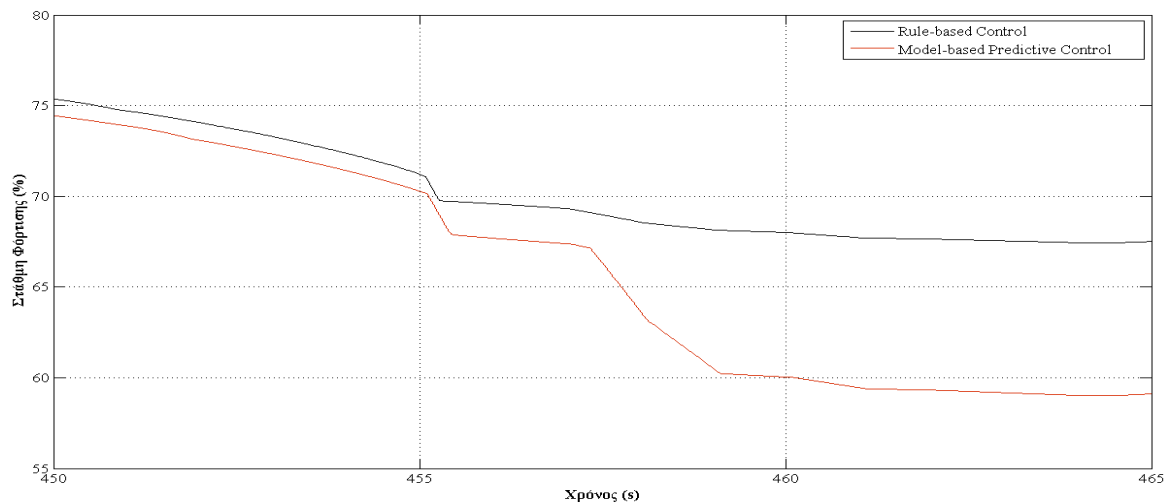
Σχήμα 57: Τάση ζυγού

Ακολουθώς αναλύεται η λειτουργία της μπαταρίας στο χρονικό διάστημα [450s,465s]. Σύμφωνα με το γράφημα του Σχήματος 58, η ισχύς της μπαταρίας στον προβλεπτικό έλεγχο σημειώνει σημαντικές αποκλίσεις από εκείνη του ελέγχου βάσει κανόνων στο διάστημα [456s,460s].

Ως εκ τούτου, για το ίδιο χρονικό διάστημα η εκφόρτιση είναι πιο βαθιά στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου, καθώς η στάθμη φόρτισης μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό απ' ό,τι στον έλεγχο βάσει κανόνων. Η διαφορά του ρυθμού εκφόρτισης των δύο ελέγχων είναι ευδιάκριτη στο Σχήμα 59.

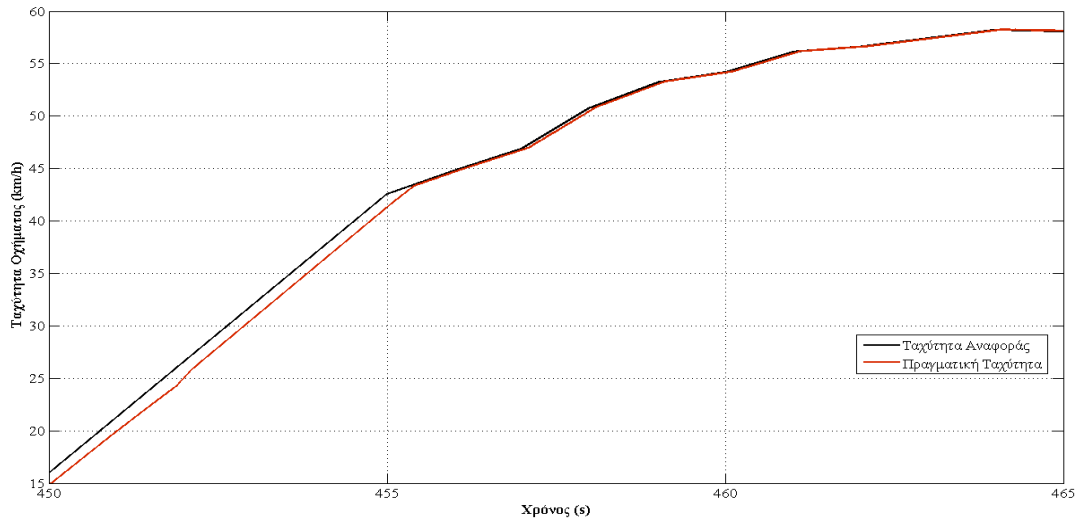


Σχήμα 58: Ισχύς μπαταρίας στο χρονικό διάστημα [450s,465s]



Σχήμα 59: Στάθμη φόρτισης στο χρονικό διάστημα [450s,465s]

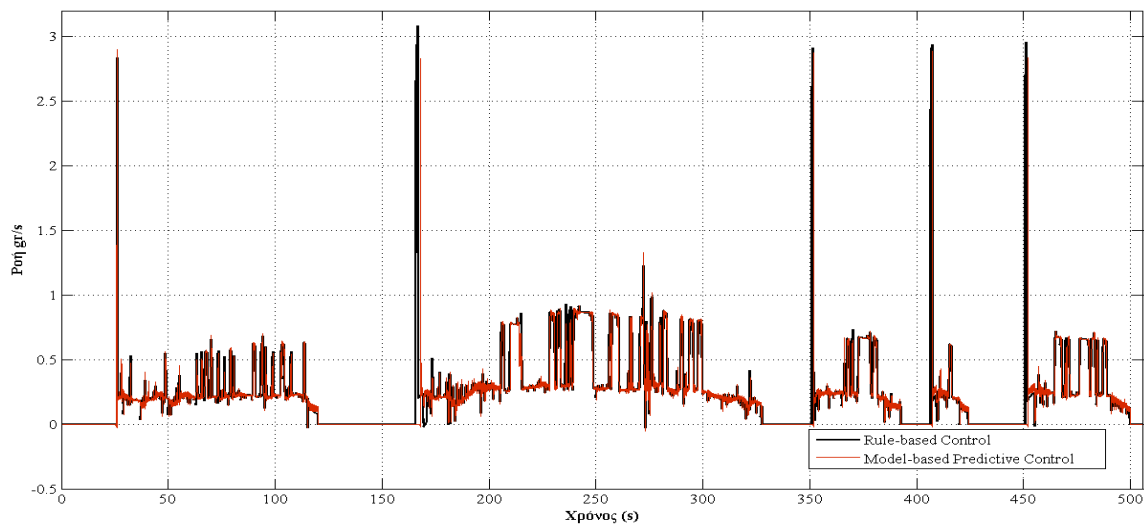
Αυτή η διαφορά πιθανόν να οφείλεται στην απότομη επιτάχυνση του οχήματος στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 60.



Σχήμα 60: Ταχύτητα οχήματος στο χρονικό διάστημα [450s,465s]

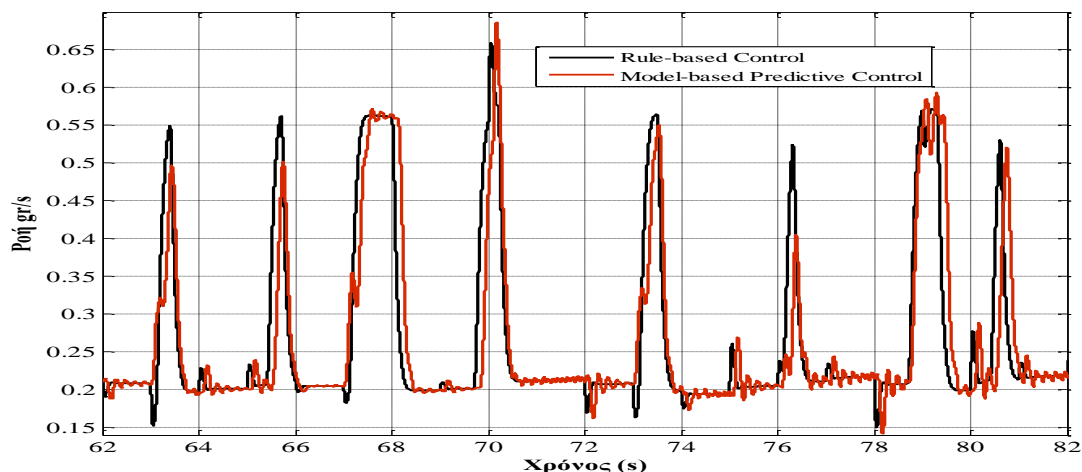
Στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου

Όπως φαίνεται από το ακόλουθο γράφημα του Σχήματος 61 η κατανάλωση καυσίμου (gr/s) στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου διαφοροποιείται από τον έλεγχο βάσει κανόνων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου.



Σχήμα 61: Στιγμιαία ροή καυσίμου (gr/s)

Εστιάζοντας ενδεικτικά στο χρονικό διάστημα [62,82] του Σχήματος 62 παρατηρούμε πως η καμπύλη του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου είναι αισθητά μετατοπισμένη προς τα κάτω σε αρκετά σημεία. Αυτή είναι άλλωστε και η ειδοποιός διαφορά των δύο ελέγχων, καθώς και ο στόχος εφαρμογής του εναλλακτικού ελέγχου.



Σχήμα 62: Στιγμαία ροή καυσίμου (gr/s) στο χρονικό διάστημα [62,82]

Ρύθμιση ελεγκτή

Στη συνέχεια παρατίθενται οι τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι του ελεγκτή αυτού του κύκλου οδήγησης.

Μοντέλο και ορίζοντες

Το διάστημα ελέγχου ορίστηκε, ώστε ούτε σημαντικό θόρυβο να εισάγει ούτε να καθυστερεί την απόκριση του ελεγκτή. Οι ορίζοντες ορίστηκαν δοκιμαστικά έχοντας υπ' όψιν ότι ο ορίζοντας ελέγχου πρέπει να είναι μικρότερος εκείνου της πρόβλεψης.

Διάστημα Ελέγχου (s)	0,1
Ορίζοντας Πρόβλεψης (διαστήματα)	10
Ορίζοντας Ελέγχου (διαστήματα)	3

Περιορισμοί και βάρη

Το βάρος της μεταβλητής ελέγχου πρέπει να είναι μηδέν, καθώς δεν απαιτείται να ακολουθήσει κάποια αναφορά. Στην περίπτωση, όμως, που θα υπήρχαν τουλάχιστον δύο μεταβλητές ελέγχου, τότε θα εισάγαμε ορισμένο βάρος με σκοπό να δοθεί προτεραιότητα στη σημαντικότερη μεταβλητή.

Ο ρυθμός βάρους επηρεάζει τους βηματισμούς της μεταβλητής ελέγχου με σκοπό να εκτελούνται μικρές, αλλά ορθές προσαρμογές. Επομένως, παίζει βασικό ρόλο στην ευρωστία του ελεγκτή. Με τα βάρη αυτά υποδηλώνουμε ότι η κατανάλωση καυσίμου είναι σχεδόν διπλάσιας σημασίας από την ταχύτητα. Η τιμή τους προσδιορίζεται με τη βοήθεια της αυτοματοποιημένης διαδικασίας της εργαλειοθήκης, Tuning Advisor [37].

Μεταβλητή Ελέγχου	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέγιστος Ρυθμός		Βάρος	Ρυθμός Βάρους
			Καθόδου	Ανόδου		
<i>Acc</i>	0	1	-1	1	0	0,000670

Τα όρια των μεταβλητών εξόδου αποφασίστηκαν βάσει του πίνακα αναζήτησης για την κατανάλωση καυσίμου και του επιβαλλόμενου κύκλου οδήγησης για την ταχύτητα του οχήματος.

Μεταβλητές Εξόδου	Ελάχιστο	Μέγιστο	Βάρος
<i>fcons (g/s)</i>	0,01	2,5	2,98
<i>VehSpeed (km/h)</i>	0	91,5	1,49

Όσον αφορά στο ολικό βάρος, κοντά στη μονάδα ο ελεγκτής καθίσταται πιο εύρωστος, αν και βραδύτερος. Επομένως, επιλέξαμε μία μέση τιμή στοχεύοντας σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ολικό Βάρος
0,8

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση του αστικού κύκλου οδήγησης Ηνωμένων Πολιτειών εξήγαγε τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Έλεγχος	Ενέργεια Μπαταρίας (kJ)	Θερμογόνος Ενέργεια (kJ)	Ενέργεια Άξονα Μετάδοσης Κίνησης (kJ)	Καύσιμο (L)	Τελική Στάθμη Φόρτισης (%)	Βαθμός Απόδοσης (%)
Βάσει κανόνων	941,38	5.050,00	1.348,90	0,161	69,3	22,5
Προβλεπτικός βάσει μοντέλου	954,76	4.859,00	1.361,00	0,155	66,3	23,4
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	+1,42	-3,78	+0,89	-3,73	-4,33	+4,00

Έλεγχος	Απαιτούμενη ενέργεια από τον κύκλο οδήγησης (kJ)	
Βάσει κανόνων	5.991,38	$E_1 = E_f + E_{bat}$
Προβλεπτικός βάσει μοντέλου	5.814,36	
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-2,96	

Συμπέρασμα

Είναι προφανές πως ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου επιτυγχάνει μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου κατά 3,73% σε σχέση προς τον έλεγχο βάσει κανόνων. Αξιοσημείωτη είναι, επίσης, η αύξηση του βαθμού απόδοσης, η οποία αυξήθηκε κατά 4,00%.

Όπως ήταν επόμενο, η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας βρέθηκε κατά 4,33% πιο άδεια στο τέλος του κύκλου και ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου απαίτησε 1,42% περισσότερη ενέργεια από την μπαταρία, ενώ κατανάλωσε 2,96% λιγότερη ενέργεια από τον έλεγχο βάσει κανόνων.

Τέλος, ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου επέδειξε αρκετά καλή απόδοση πιθανόν για δύο λόγους:

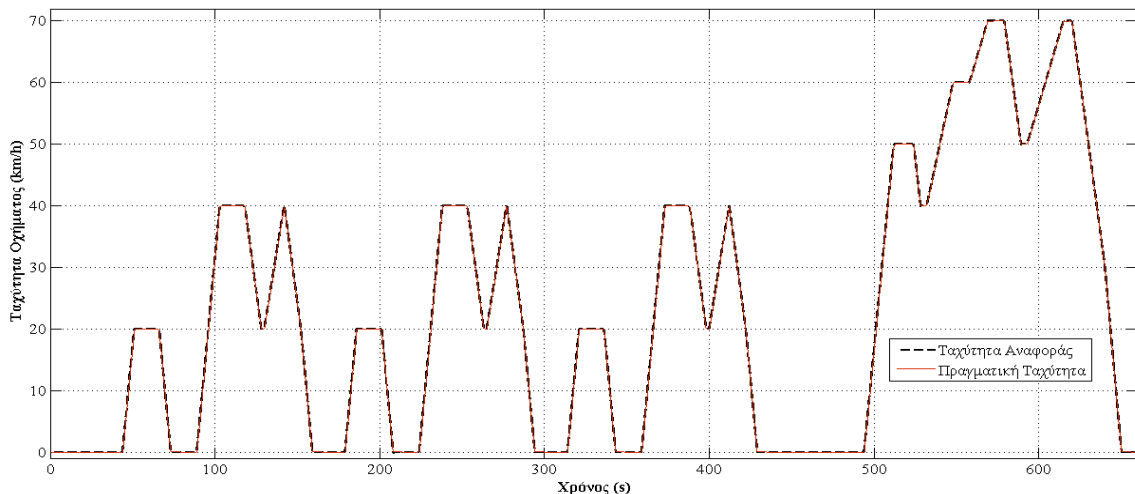
1. Ο προϋπάρχων ελεγκτής PI δεν είναι κατάλληλος για τον συγκεκριμένο κύκλο οδήγησης και δεν είναι ρυθμισμένος βέλτιστα.
2. Ο ελεγκτής του προβλεπτικού ελέγχου είναι κατάλληλος για κύκλους με συχνές μεταβολές της επιθυμητής ταχύτητας.

10.3. Αστικός κύκλος οδήγησης Ευρώπης

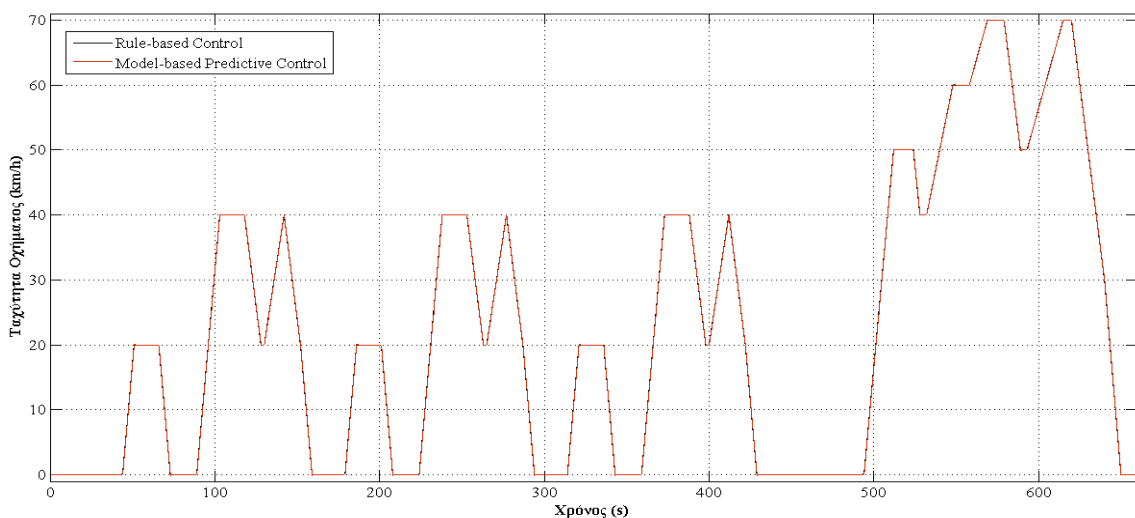
Παρακολούθηση κύκλου οδήγησης

Ο συγκεκριμένος κύκλος περιλαμβάνει την επανάληψη ενός ορισμένου μοτίβου οδήγησης με διαδοχικές επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις και στάσεις. Στο τέλος του κύκλου μετά από στάση επιβάλλεται απότομη επιτάχυνση και κίνηση του οχήματος έως και τα 70 km/h.

Παρατηρούμε πως τόσο στον έλεγχο βάσει κανόνων (Σχήμα 63) όσο και στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου (Σχήμα 64), η ταχύτητα του οχήματος ακολουθεί πιστά τον επιβαλλόμενο κύκλο οδήγησης. Δε διακρίνεται καμία απόκλιση από την επιθυμητή ταχύτητα και στους δύο ελέγχους. Επομένως, θα ακολουθήσει διερεύνηση σε συγκεκριμένα τμήματα του κύκλου οδήγησης.

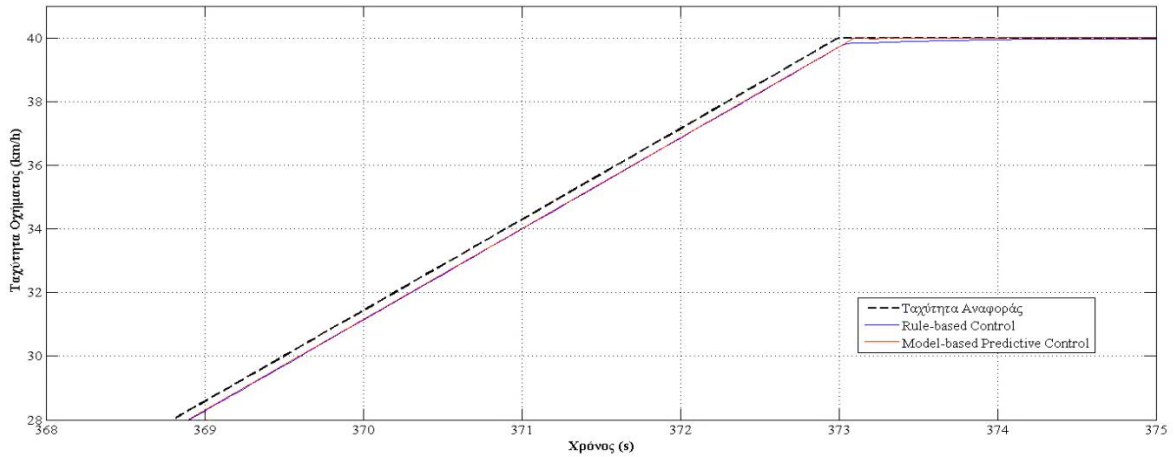


Σχήμα 63: Έλεγχος βάσει κανόνων



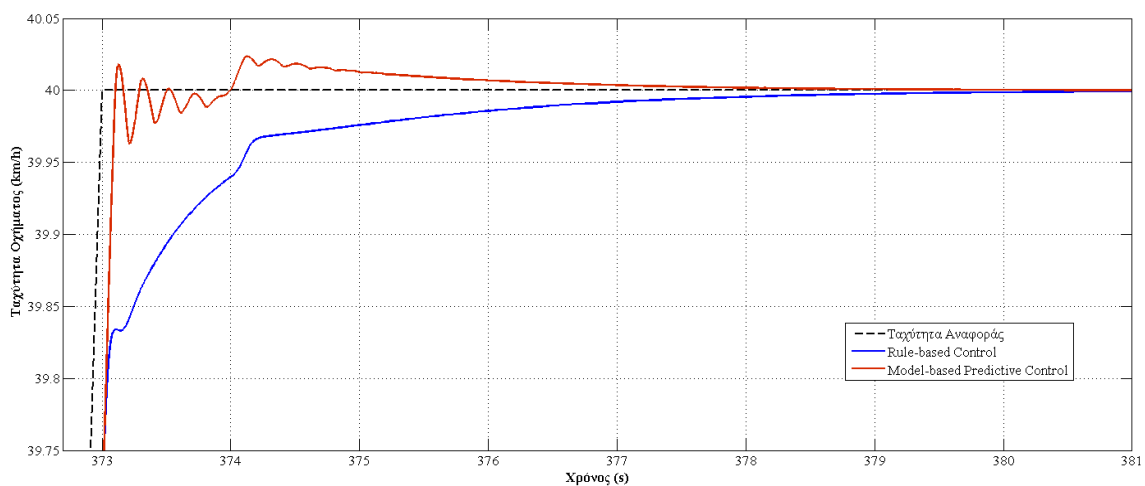
Σχήμα 64: Προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου

Πιο συγκεκριμένα, στα διαστήματα που η ταχύτητα ισούται με τη μέγιστη του κύκλου, η απόκριση είναι πιο άμεση με την εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το διάστημα [368s,375s] στο Σχήμα 65, στην οποία κοντά στο 373^ο δευτερόλεπτο καθίσταται ορατή η διαφορά απόκρισης των δύο ελέγχων.

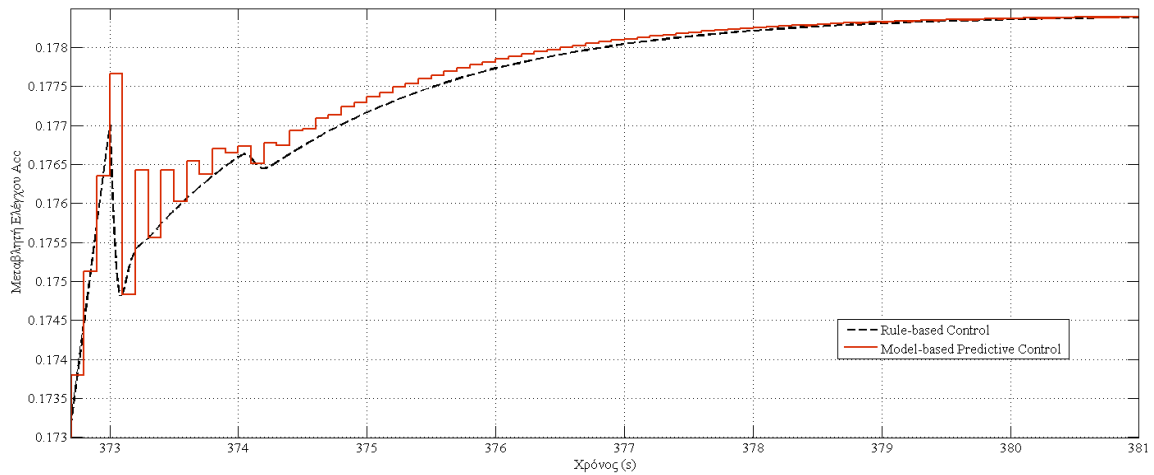


Σχήμα 65: Ταχύτητα οχήματος στο διάστημα [368s,375s]

Παρατηρώντας τα γραφήματα των Σχημάτων 66 και 67, είναι εμφανές ότι η ταχύτητα του οχήματος - με μικρές διακυμάνσεις - στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου αποκτά την επιθυμητή τιμή πιο σύντομα από ό,τι στον έλεγχο βάσει κανόνων, ο οποίος καθυστερεί για αξιόλογο χρονικό διάστημα. Χάρη στην ιδιότητα της πρόβλεψης, ο ελεγκτής διαμορφώνει κατάλληλη ακολουθία της μεταβλητής ελέγχου για την επίτευξη του στόχου.



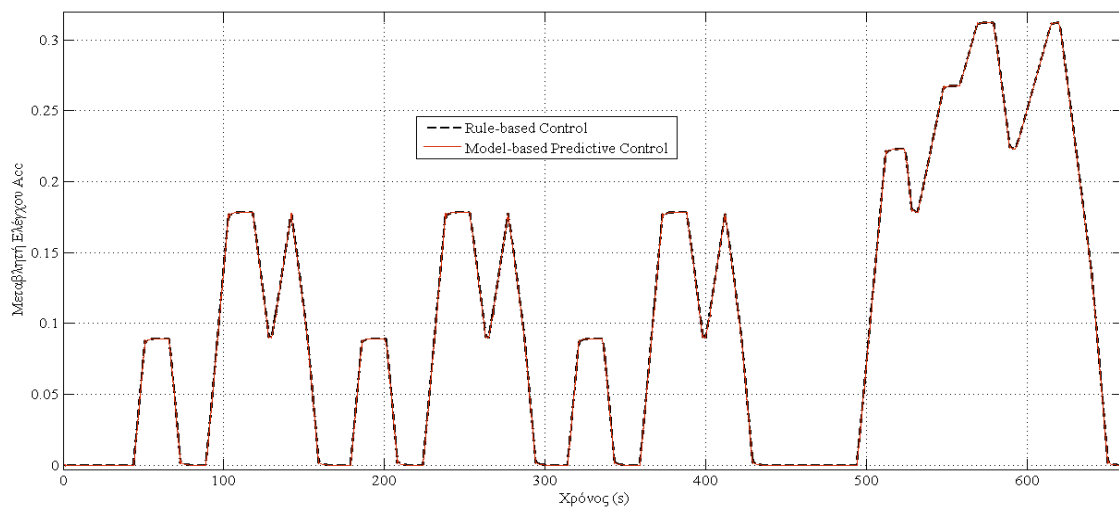
Σχήμα 66: Ταχύτητα οχήματος στο χρονικό διάστημα [373s,381s]



Σχήμα 67: Μεταβλητή ελέγχου στο χρονικό διάστημα [373s,381s]

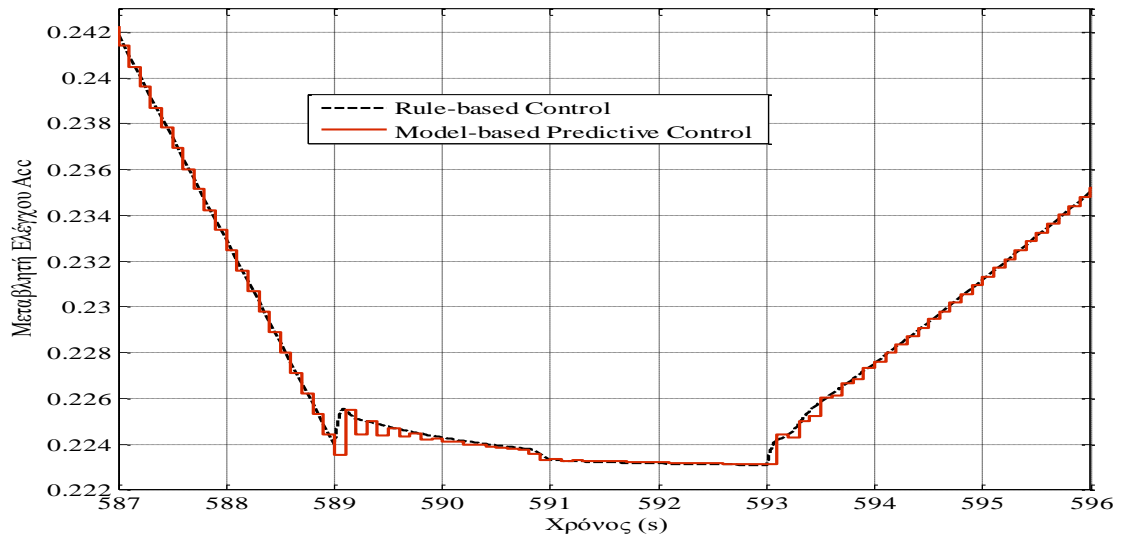
Εντολή ελέγχου

Μορφολογικά το γράφημα της εντολής ελέγχου (Σχήμα 68) είναι παρόμοιο εκείνου του κύκλου οδήγησης. Δεν είναι εμφανής, όμως, η διαφορά ανάμεσα στις δύο εντολές ελέγχου.



Σχήμα 68: Μεταβλητή ελέγχου Acc

Συμπληρωματικά προς το χρονικό διάστημα [373s, 381s] που παρουσιάστηκε προηγουμένως παρατίθεται το γράφημα εντολής ελέγχου (Σχήμα 69) για το χρονικό διάστημα [587s,596s]. Η διαφορά των δύο μεταβλητών ελέγχου είναι ότι η μεν στον έλεγχο βάσει κανόνων είναι συνεχής, η δε στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου βηματική. Ο βηματικός χαρακτήρας οφείλεται στον ορίζοντα πρόβλεψης και στο βήμα δειγματοληψίας που έχει εισαχθεί.

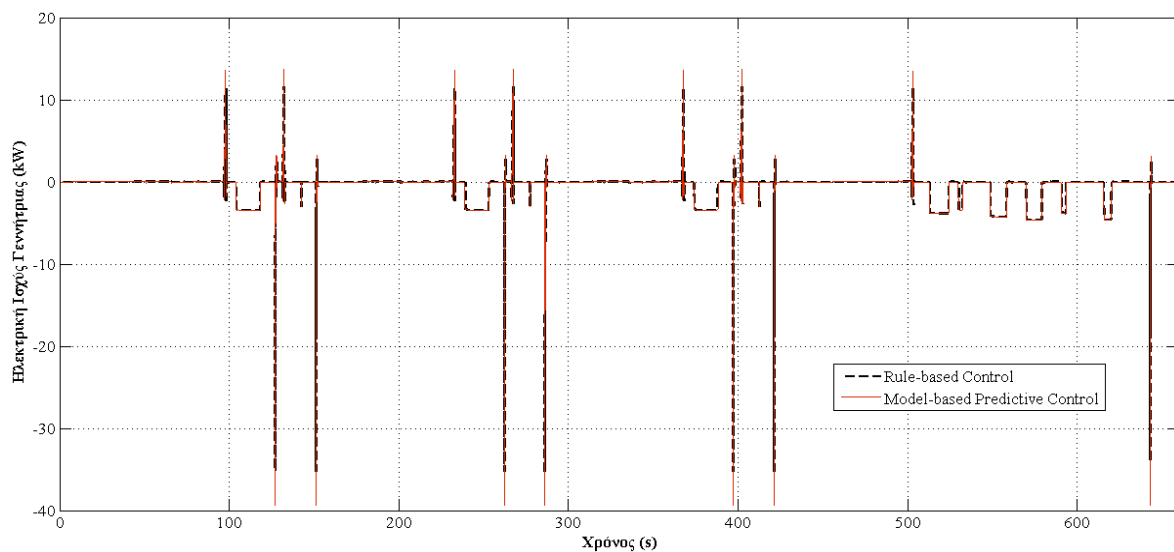


Σχήμα 69: Μεταβλητή ελέγχου Acc στο χρονικό διάστημα [587s,596s]

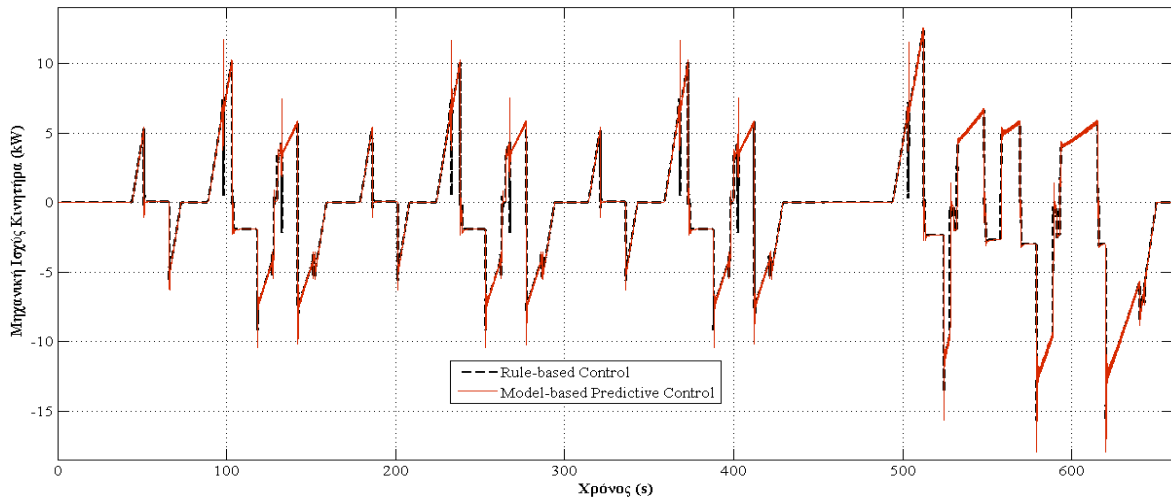
Ισχείς

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα γραφήματα (Σχήματα [70,72]) της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας, της μηχανικής ισχύος του κινητήρα και της μηχανικής ισχύος στον άξονα μετάδοσης κίνησης.

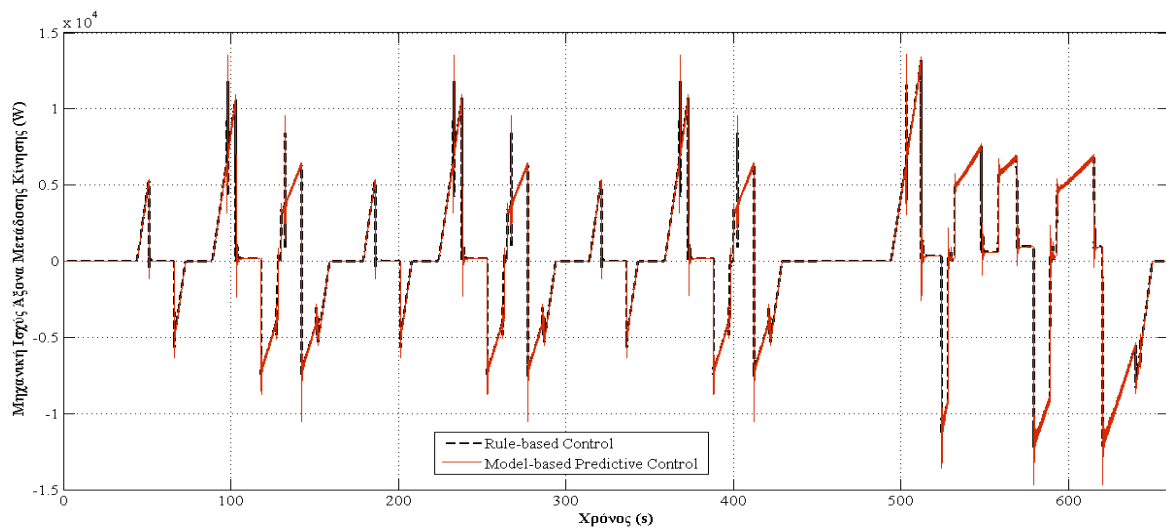
Παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές δεν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου από τον έλεγχο βάσει κανόνων. Σημειώνουμε πως στις απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις οι ισχείς στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου είναι κατά μέτρο περίπου 20% μεγαλύτερες από ό,τι στον έλεγχο βάσει κανόνων.



Σχήμα 70: Ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας

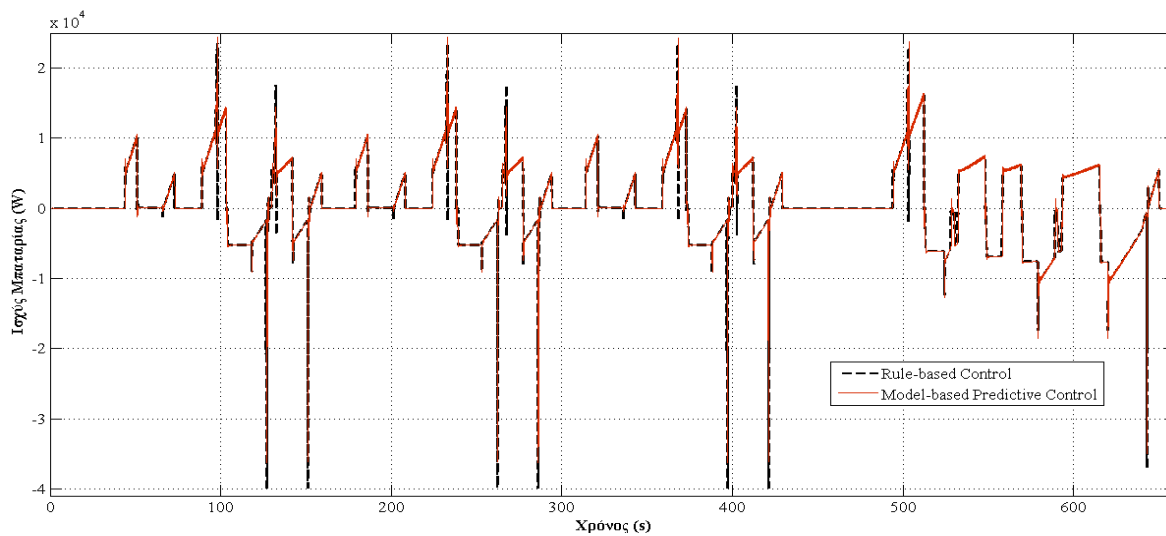


Σχήμα 71: Μηχανική ισχύς κινητήρα



Σχήμα 72: Μηχανική ισχύς άξονα μετάδοσης κίνησης

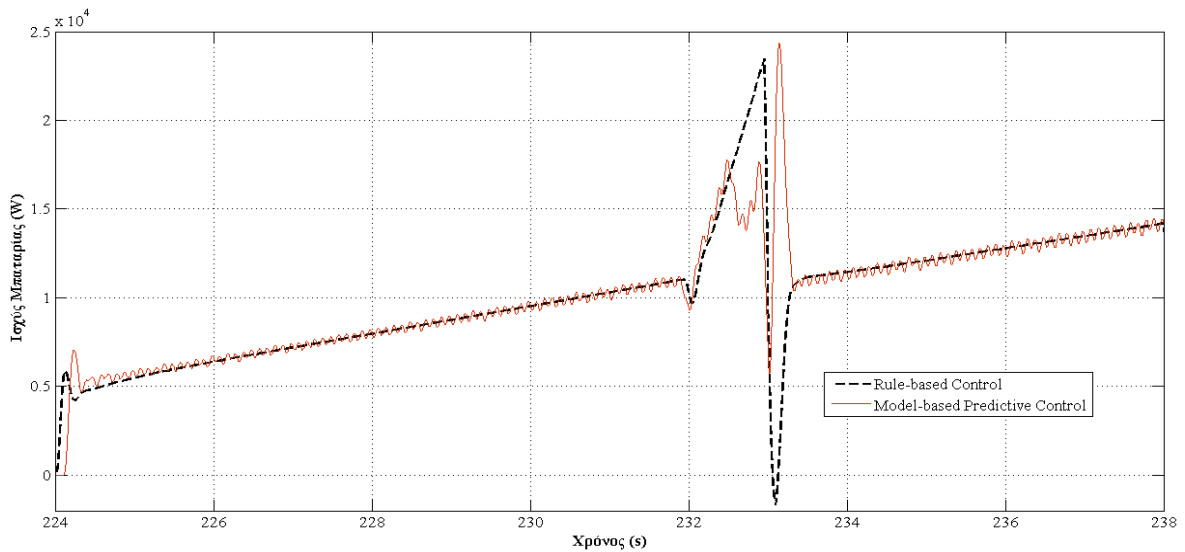
Ομοίως, στο γράφημα ισχύος της μπαταρίας (Σχήμα 73) δεν εμφανίζονται σοβαρές αποκλίσεις.



Σχήμα 73: Ισχύς μπαταρίας

Ωστόσο, εφόσον γνωρίζουμε ότι ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου απέφερε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου, συμπεραίνουμε ότι η χρήση της μπαταρίας ήταν επαυξημένη κατά την εφαρμογή του. Ενδεικτικά εστιάζουμε στο διάστημα [224s,238s] και το Σχήμα 74.

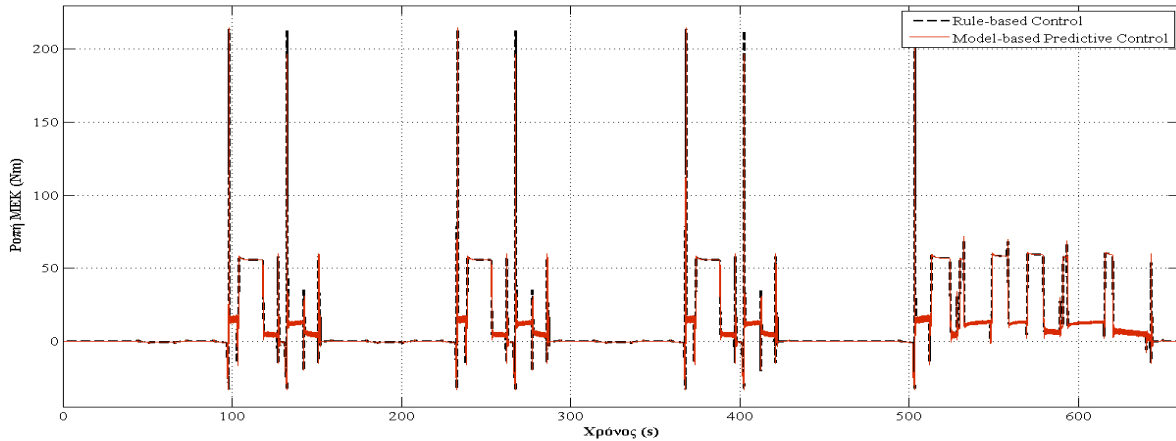
Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το όχημα επιταχύνει. Στο διάστημα [232s,234s] είναι εμφανής η διαφορά στην απόδοση της μπαταρίας. Ενώ ο έλεγχος βάσει κανόνων εξοικονομεί σε ένα μέρος την ενέργεια της μπαταρίας, ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου τη χρησιμοποιεί.



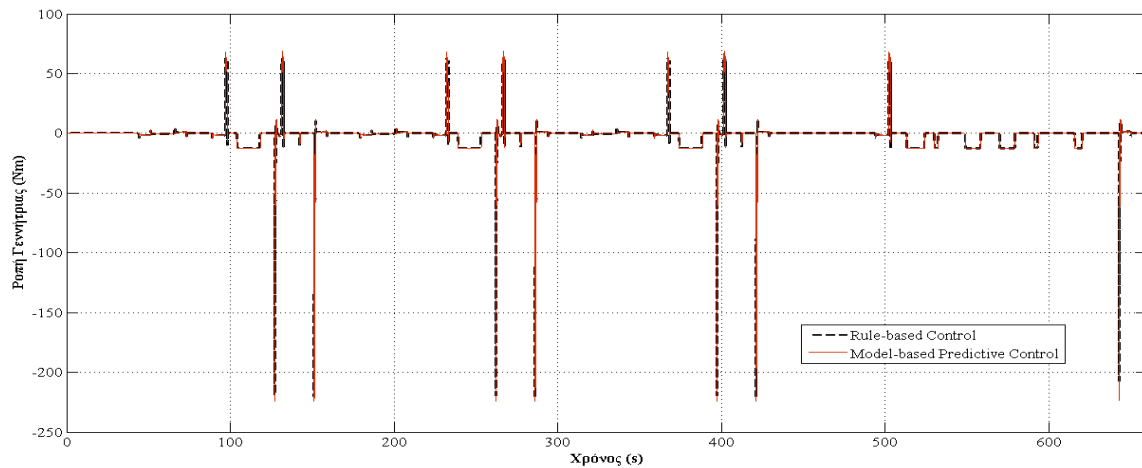
Σχήμα 74: Ισχύς μπαταρίας στο χρονικό διάστημα [224s,238s]

Ροπές

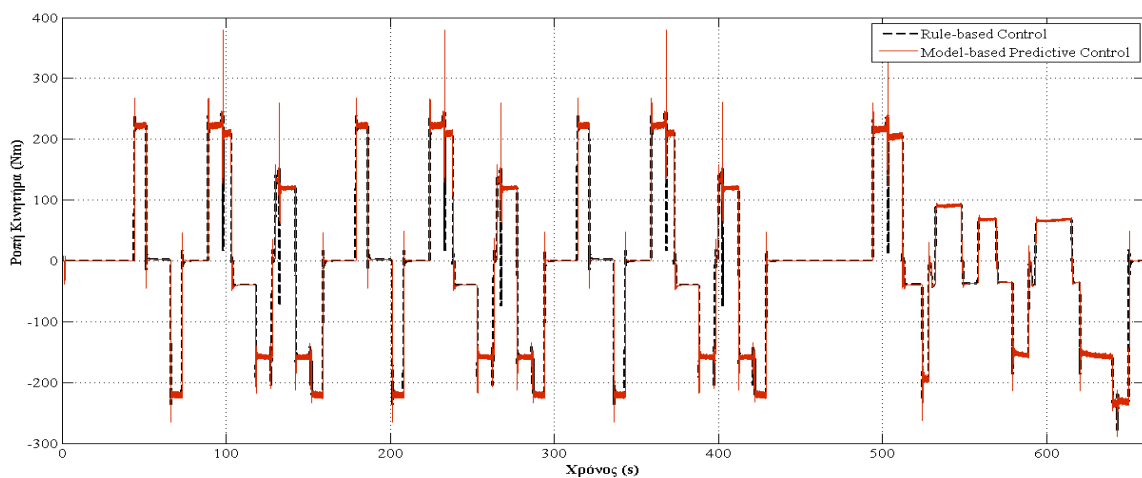
Τα γραφήματα ροπής (Σχήματα [75,77]) των δύο ελέγχων είναι σχεδόν ταυτόσημα. Μικρές αποκλίσεις παρατηρούνται αν εστιάσουμε σε ορισμένα τμήματα, οι οποίες οφείλονται στη διαφορά χρήσης της μπαταρίας.



Σχήμα 75: Ροπή μηχανής εσωτερικής καύσης



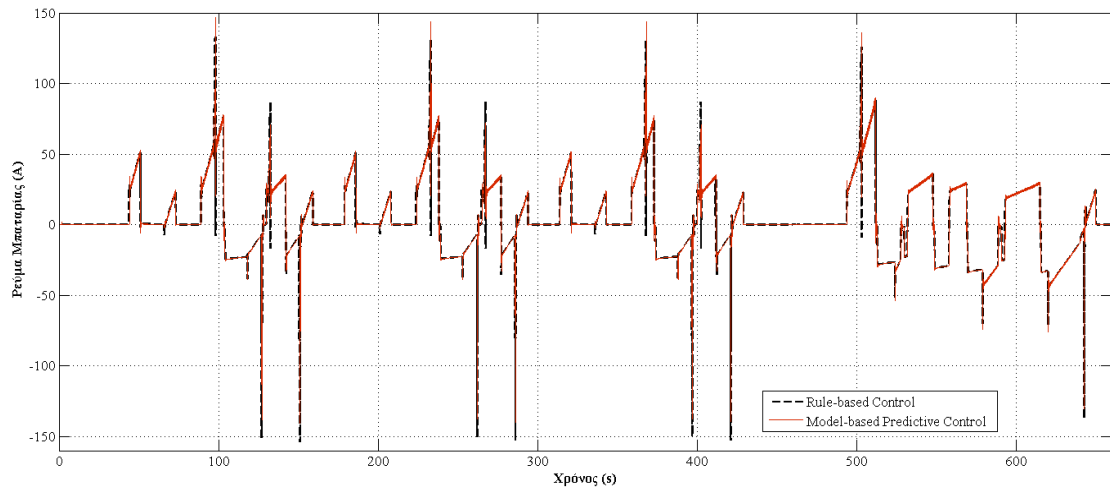
Σχήμα 76: Ροπή γεννήτριας



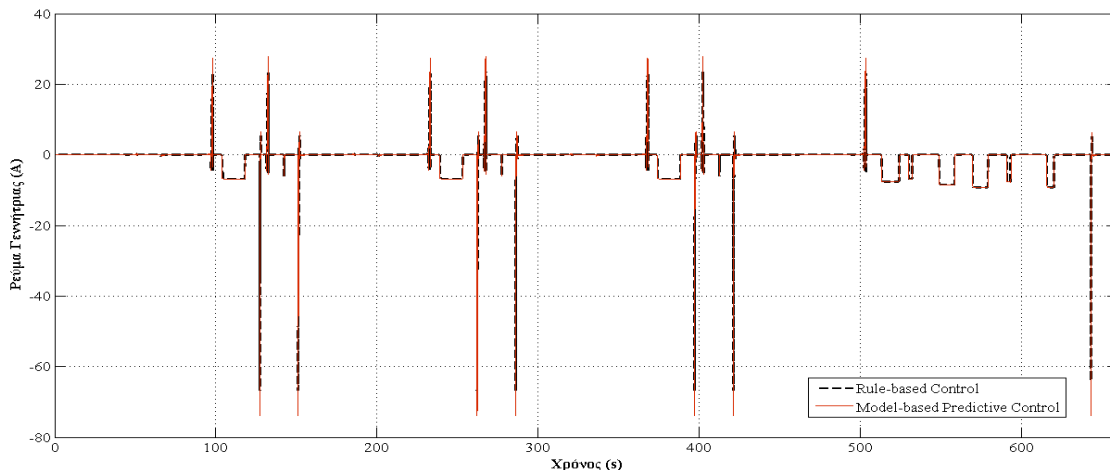
Σχήμα 77: Ροπή κινητήρα

Ρεύματα

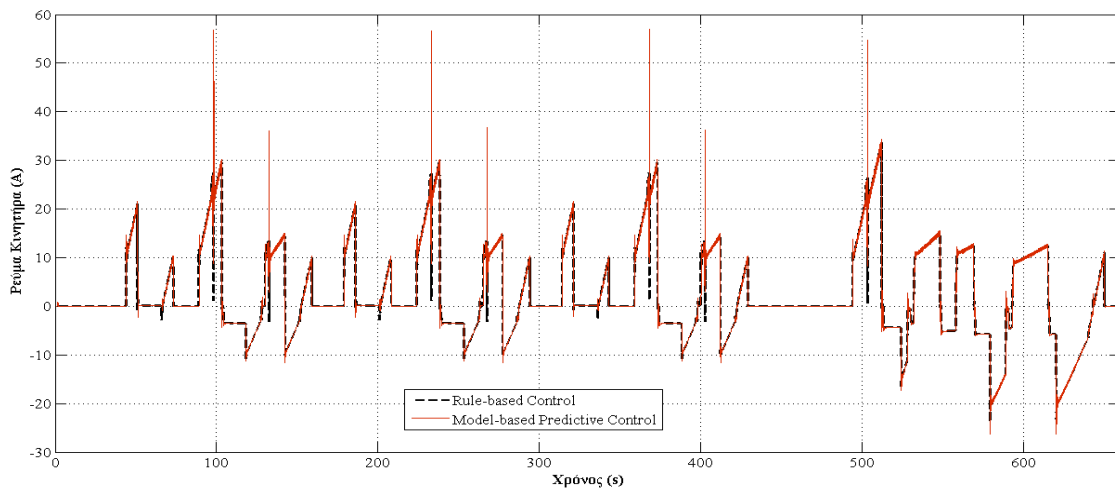
Εποπτικά, υπάρχει ταύτιση μεταξύ των γραφημάτων (Σχήματα [78,80]) των ελέγχων.



Σχήμα 78: Ρεύμα μπαταρίας



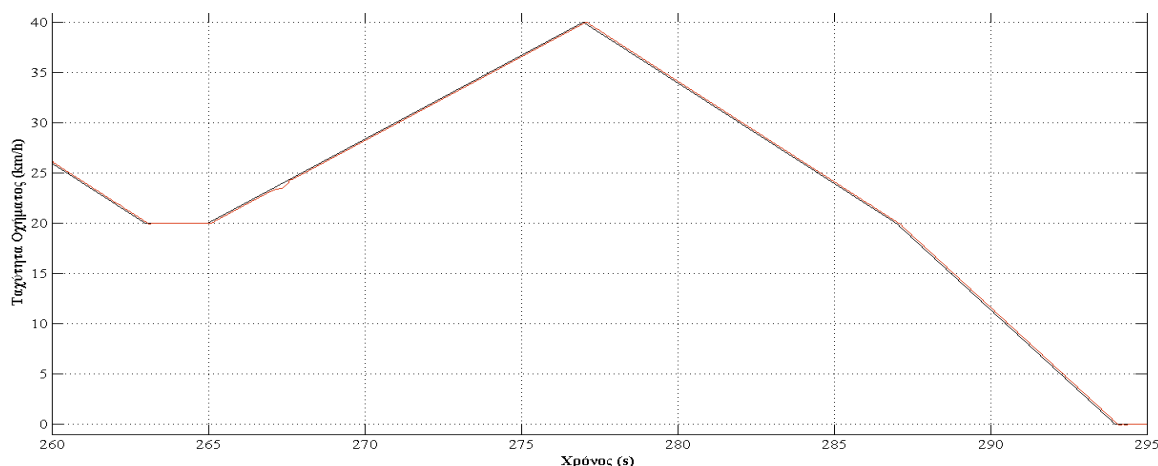
Σχήμα 79: Ρεύμα γεννήτριας



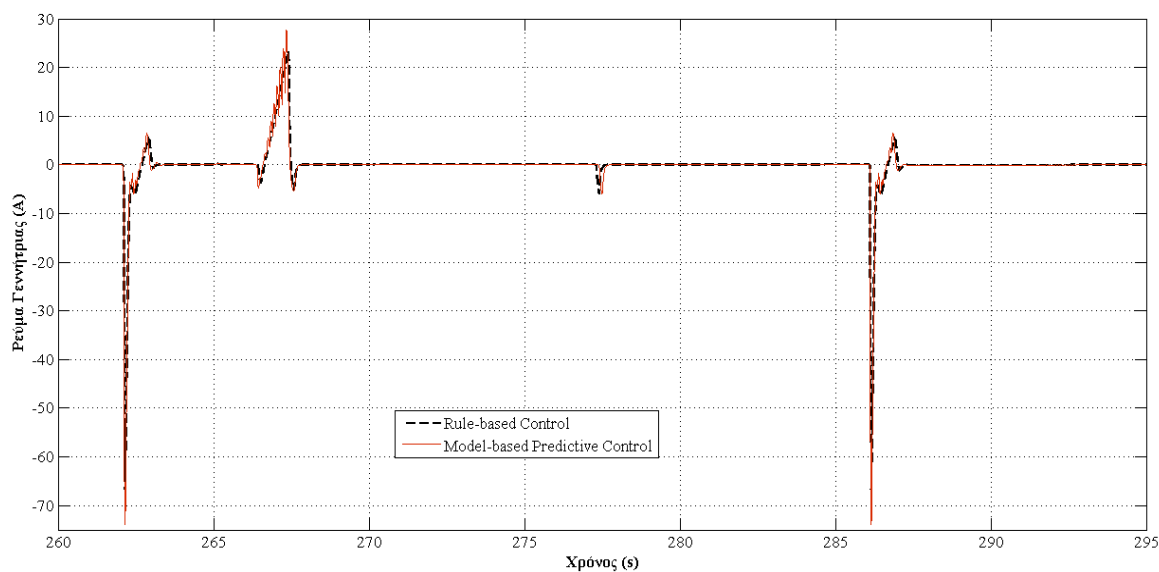
Σχήμα 80: Ρεύμα κινητήρα

Σε σημεία έντονης επιβράδυνσης, η συμπεριφορά των δύο ελέγχων διαφέρει, όπως αποδεικνύεται ακολούθως για το διάστημα [260s, 295s]. Στο Σχήμα 81 φαίνεται η καμπύλη της ταχύτητας του οχήματος συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρούμε πως κατά την επιτάχυνση το όχημα που υφίσταται προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου χρησιμοποιεί πιο έντονα την μπαταρία (Σχήμα 83).

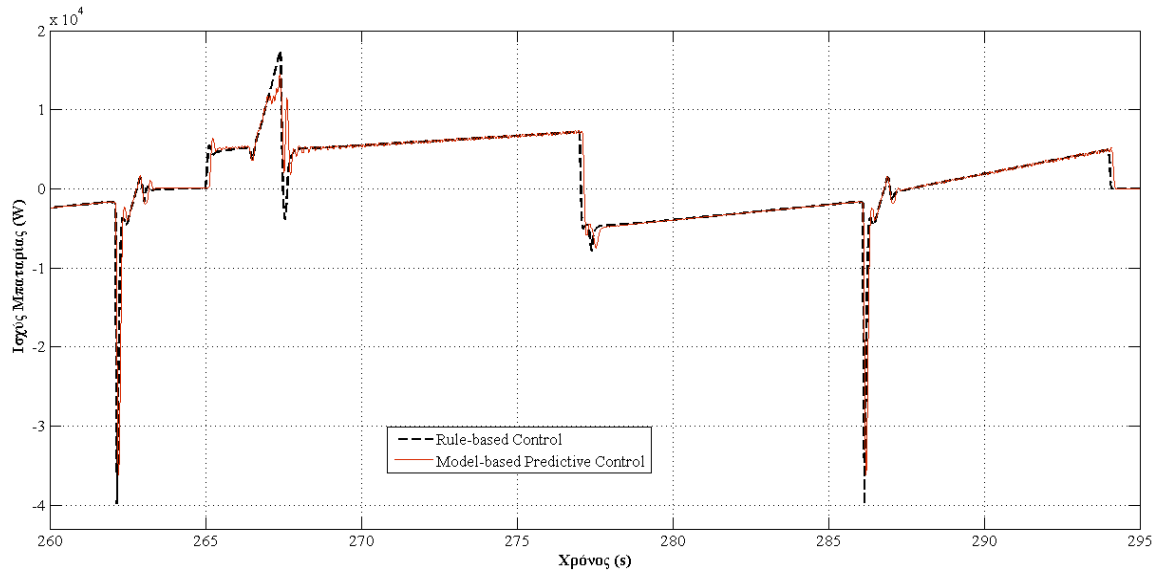
Επίσης, κατά την επιβράδυνση του οχήματος ο έλεγχος βάσει κανόνων επιτυγχάνει μεγαλύτερη φόρτιση της μπαταρίας, κάτι που αποδεικνύεται από το γράφημα ισχύος της μπαταρίας P_{bat} (Σχήμα 83), όπου η ισχύς είναι πιο αρνητική για τον έλεγχο βάσει κανόνων απ' ό,τι για τον προβλεπτικό. Ενδεικτικά, παρέχεται το γράφημα του Σχήματος 82, στο οποίο είναι ορατή η διαφοροποίηση του μέτρου του ρεύματος της γεννήτριας για τους δύο ελέγχους. Ωστόσο, μόνο το γράφημα της ισχύος δηλώνει την κατάσταση φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας.



Σχήμα 81: Ταχύτητα οχήματος στο χρονικό διάστημα [260s,295s]



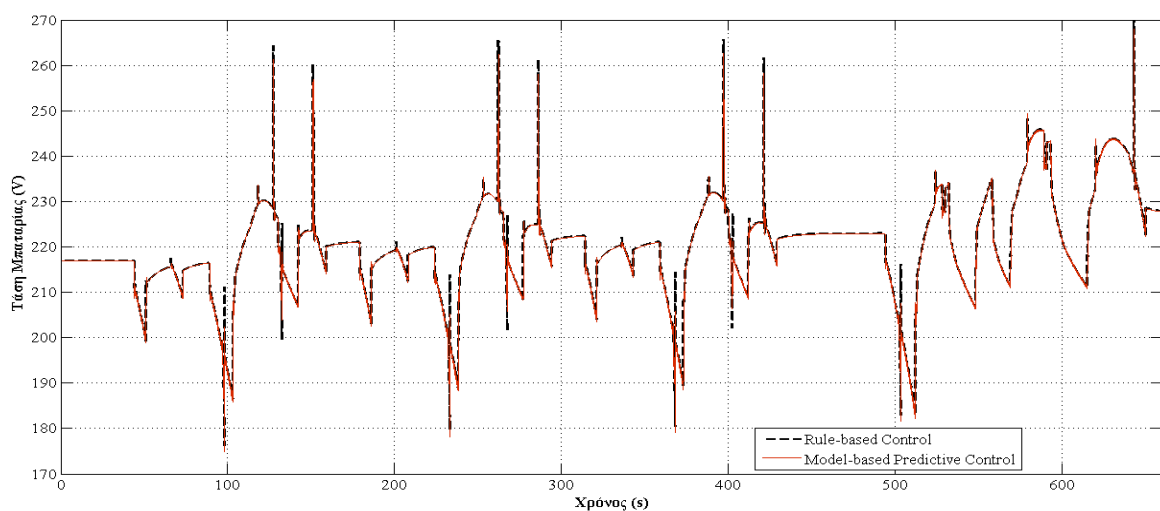
Σχήμα 82: Ρεύμα γεννήτριας στο χρονικό διάστημα [260s,295s]



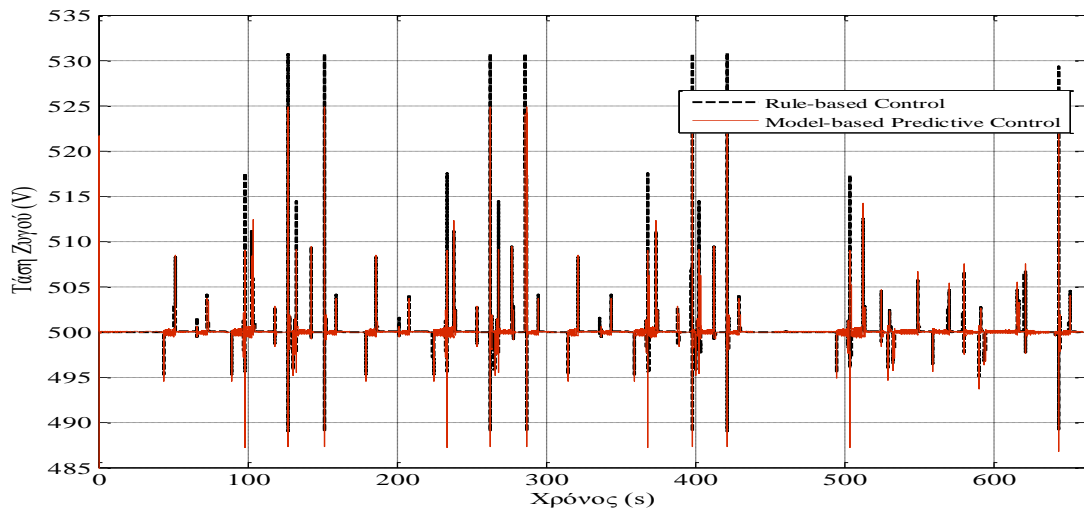
Σχήμα 83: Ισχύς μπαταρίας στο χρονικό διάστημα [260s,295s]

Τάσεις

Παρατηρούμε πως παρά τη γενικότερη ταύτιση στα γραφήματα των τάσεων (Σχήματα 84 και 85), υπάρχουν αποκλίσεις κυρίως στην τάση του ζυγού (Σχήμα 85) στα τμήματα της επιτάχυνσης. Αυτό ίσως οφείλεται στην εντονότερη λειτουργία της μπαταρίας στην επιτάχυνση και συνεπώς τη μεγαλύτερη διαφορά τάσης για τους δύο ελέγχους. Ένας ακόμη πιθανός παράγοντας που συμβάλλει στην εμφάνιση των τιμών αυτών είναι η ιδιότητα της γεννήτριας να συμπεριφέρεται ως κινητήρας στις επιταχύνσεις από στάση.



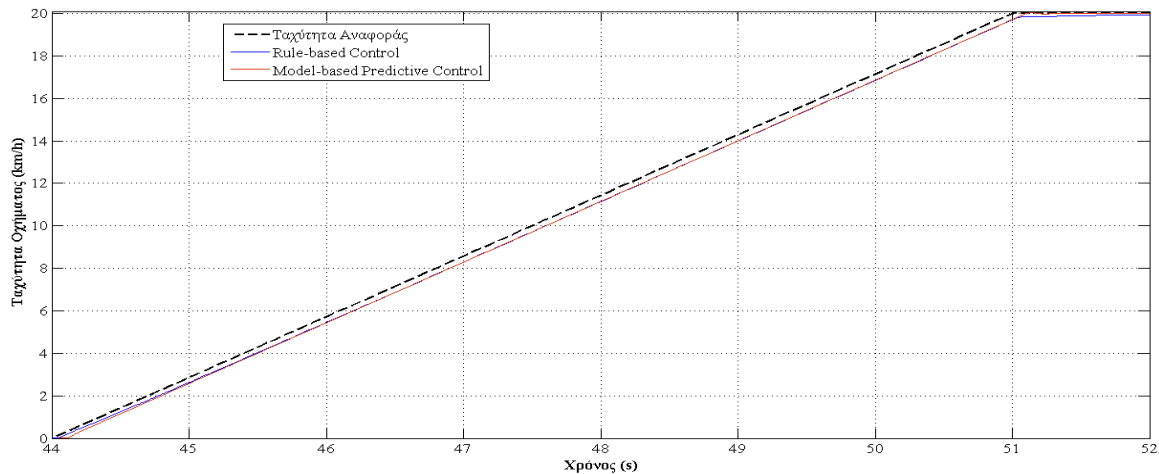
Σχήμα 84: Τάση μπαταρίας



Σχήμα 85: Τάση ζυγού

Μελέτη μπαταρίας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η λειτουργία της μπαταρίας για το χρονικό διάστημα [44s,52s] μέσα από τα γραφήματα ρεύματος, τάσης, ισχύος και στάθμης φόρτισης. Η επιλογή έγινε στηριζόμενοι στην καμπύλη της στάθμης φόρτισης, καθώς σε αυτό το διάστημα είναι εμφανής η διαφορά της για τους δύο ελέγχους. Το διάστημα αυτό αφορά σε επιτάχυνση, όπως φαίνεται και στο εξής γράφημα του Σχήματος 86.

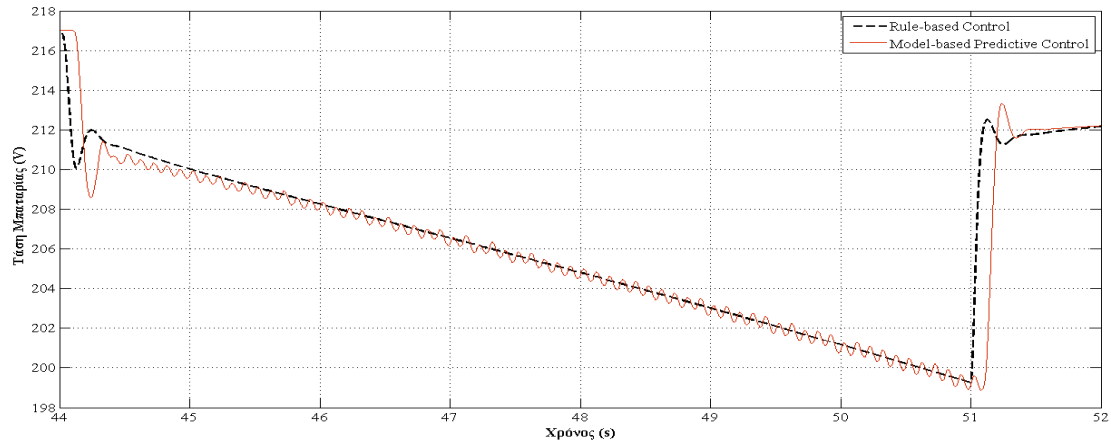


Σχήμα 86: Επιτάχυνση του οχήματος στο χρονικό διάστημα [44s,52s]:

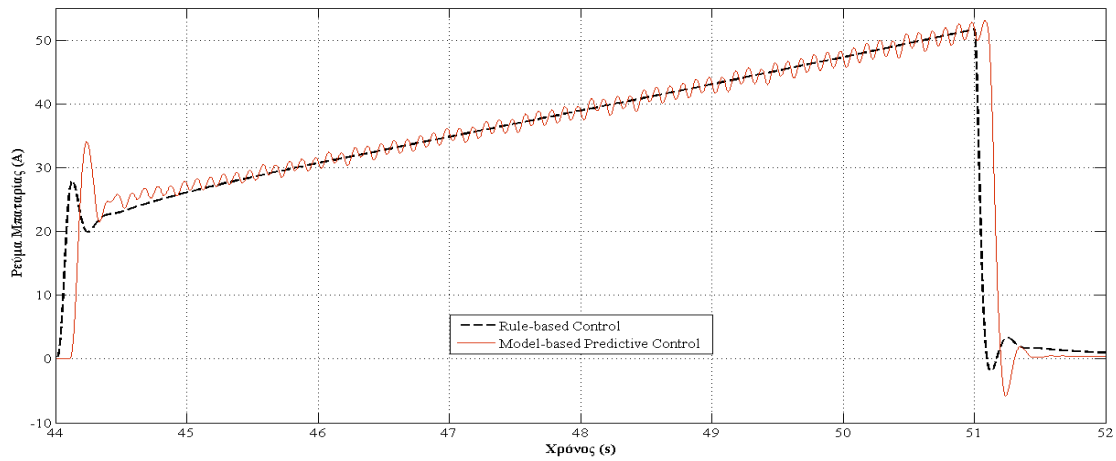
Από την ακόλουθη παράθεση γραφημάτων παρατηρούμε πως μετά τη χρονική στιγμή $t = 46s$ έχει επικρατήσει μία αξιόλογη μετατόπιση 0,025% προς τα κάτω της στάθμης φόρτισης (Σχήμα 90) κατά τον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου ως προς εκείνη του ελέγχου βάσει κανόνων. Στο τέλος του κύκλου η απόκλιση ανάμεσα στις δύο καμπύλες στάθμης φόρτισης σταθεροποιείται στο 0,492%.

Βλέπουμε, ακόμη, τα γραφήματα τάσης (Σχήμα 87) και ρεύματος της μπαταρίας (Σχήμα 88) να συνδυάζονται στο γράφημα ισχύος της μπαταρίας (Σχήμα 89).

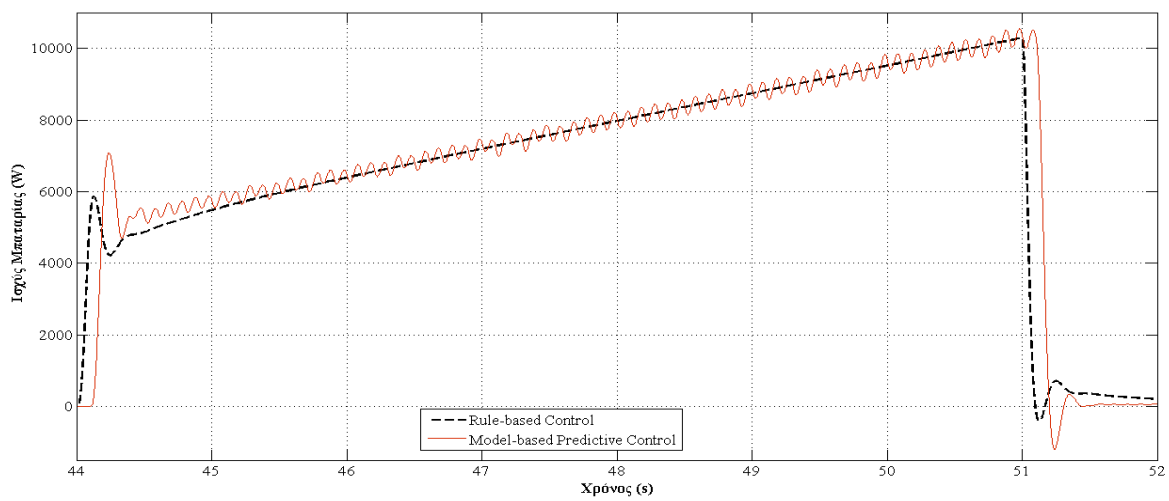
Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πως για την αναγνώριση της κατάστασης φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας δεν αρκεί η εξέταση του γραφήματος ρεύματος ή τάσης, αλλά ο συνδυασμός τους, δηλαδή η ισχύς της μπαταρίας.



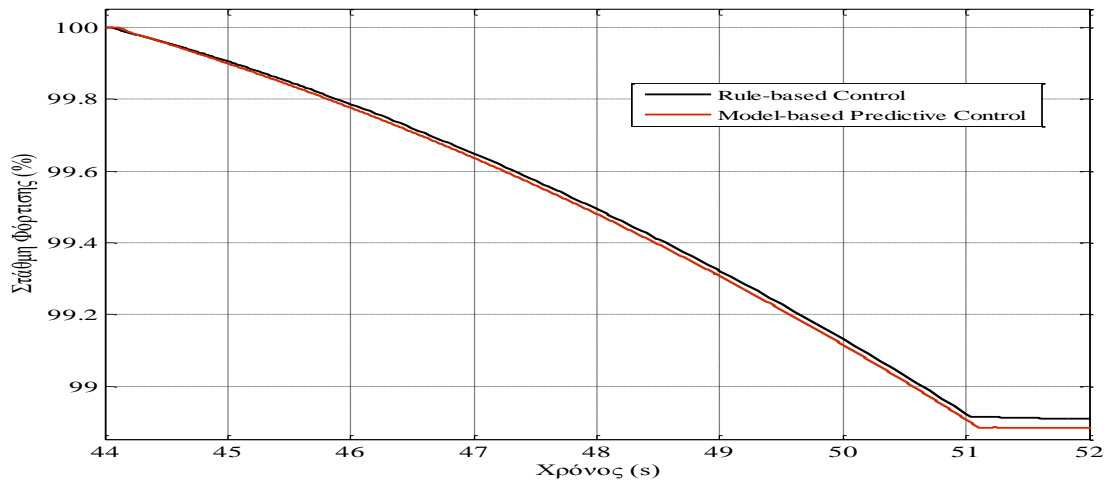
Σχήμα 87: Τάση μπαταρίας



Σχήμα 88: Ρεύμα μπαταρίας



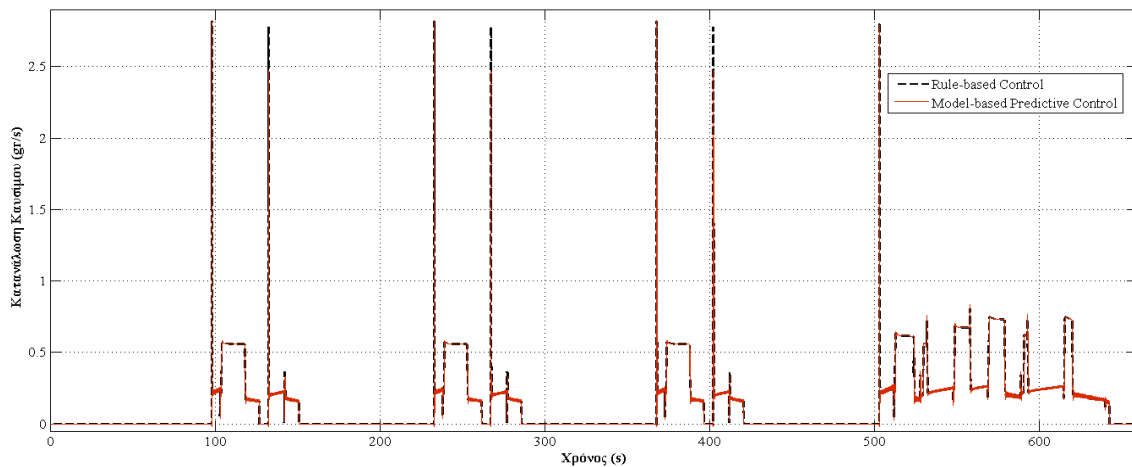
Σχήμα 89: Ισχύς μπαταρίας



Σχήμα 90: Στάθμη φόρτισης

Στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου

Στο ακόλουθο γράφημα κατανάλωσης καυσίμου (Σχήμα 91) δε φαίνεται ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στους δύο ελέγχους, εκτός από τις στιγμές των αλμάτων, σε μερικά εκ των οποίων η κατανάλωση στον προβλεπτικό έλεγχο είναι μικρότερη όπως είναι επιθυμητό.



Σχήμα 91: Στιγμιαία ροή καυσίμου (gr/s)

Ρύθμιση ελεγκτών

Χρησιμοποιούμε δύο ελεγκτές, έναν για τις απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις και έναν για τα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα.

Έστω t ο χρόνος. Αν ισχύει η εξής υπόθεση:

$$(t \geq 33 \ \& \ t \leq 51) | (t \geq 81 \ \& \ t \leq 104) | (t \geq 127 \ \& \ t \leq 142) | (t \geq 170 \ \& \ t \leq 186) |$$

$$(t \geq 211 \ \& \ t \leq 238) | (t \geq 263 \ \& \ t \leq 277) | (t \geq 307 \ \& \ t \leq 321) |$$

$$(t \geq 349 \ \& \ t \leq 373) | (t \geq 397 \ \& \ t \leq 412) | (t \geq 481 \ \& \ t \leq 512) |$$

$$(t \geq 527 \ \& \ t \leq 568) | (t \geq 588 \ \& \ t \leq 614)$$

Ενεργοποιείται ο ελεγκτής MPCa. Στα υπόλοιπα διαστήματα ενεργοποιείται ο MPCb. Οι ρυθμίσεις των δύο ελεγκτών παρατίθενται παρακάτω.

Μοντέλο και ορίζοντες

Ομοίως με τον προηγούμενο κύκλο της ενότητας 10.2, το διάστημα ελέγχου –βήμα δειγματοληψίας - επιλέχθηκε 0,1 με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή του ελεγκτή. Οι ορίζοντες και για τους δύο ελεγκτές οριστικοποιήθηκαν έπειτα από δοκιμές για τη βέλτιστη και άμεση απόκριση των ελεγκτών.

MPCa MPCb

Διάστημα Ελέγχου (s)	0,1	
Ορίζοντας Πρόβλεψης (διαστήματα)	20	30
Ορίζοντας Ελέγχου (διαστήματα)	4	3

Περιορισμοί και βάρη

Για τον MPCa επιλέχθηκε τόσο μεγάλη τιμή για τους μέγιστου ρυθμούς ανόδου και καθόδου, προκειμένου να διευκολύνεται η παρακολούθηση της ταχύτητας επιβράδυνσης και επιτάχυνσης αντιστοίχως. Για τον MPCb οι ρυθμοί επιλέχθηκαν έπειτα σειρά δοκιμών από ποικίλους συνδυασμούς τιμών. Ο ρυθμός βάρους ορίζεται με τη βοήθεια της αυτοματοποιημένης διαδικασίας της εργαλειοθήκης,

Ελεγκτής	Μεταβλητή Ελέγχου	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέγιστος Ρυθμός		Βάρος	Ρυθμός Βάρους
				Καθόδου	Ανόδου		
MPCa	<i>Acc</i>	0	1	-1000	+1000	0	0,162
MPCb				-5	5		0,241

Ομοίως με τον κύκλο οδήγησης 10.2 η κατανάλωση καυσίμου δέχεται όρια ενός πίνακα αναζήτησης, ο οποίος ενσωματώνεται στην προσομοίωση του μοντέλου και η ταχύτητα ορίζεται εντός του άνω και κάτω ορίου που επιβάλλει ο κύκλος.

Ελεγκτής	Μεταβλητές Εξόδου	Ελάχιστο	Μέγιστο	Βάρος
MPCa / MPCb	$f_{cons} (g/s)$	0,01	2,5	1,240
	$VehSpeed(km/h)$	0	70	0,619

Το ολικό βάρος επιλέγεται σταθερά 0,8, καθώς συνδυάζει ευρωστία και ταχύτητα.

Ολικό Βάρος
0,8

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αστικού κύκλου οδήγησης Ευρώπης συνοψίζονται στους εξής πίνακες.

Έλεγχος	Ενέργεια Μπαταρίας (kJ)	Θερμογόνος Ενέργεια (J)	Ενέργεια Άξονα Μετάδοσης Κίνησης (kJ)	Καύσιμο (L)	Τελική Στάθμη Φόρτισης (%)	Βαθμός Απόδοσης (%)
Βάσει κανόνων	414,76	3.963.700	894,65	0,126	89,38	20,43
Προβλεπτικός βάσει μοντέλου	436,93	3.954.600	899,43	0,126	88,89	20,48
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	+5,35	-0,230	+0,53	0,00	-0,55	+0,24

Έλεγχος	Απαιτούμενη ενέργεια από τον κύκλο οδήγησης (kJ)	
Βάσει κανόνων	4.378,46	$E_2 = E_f + E_{bat}$
Προβλεπτικός βάσει μοντέλου	4.391,53	
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	+0,30	

Συμπέρασμα

Όπως ήταν λογικό σημειώθηκε αύξηση στη χρήση της μπαταρίας, άρα και της ενέργειας που προσέφερε στο σύστημα. Κατά συνέπεια και η στάθμη φόρτισης σημείωσε μείωση. Ο στόχος, όμως, έστω και σε μικρό βαθμό επετεύχθη, καθώς μειώθηκε η χρήση της μηχανής εσωτερικής καύσης, καθώς η καταναλωθείσα ποσότητα καυσίμου ήταν ίδια για τους δύο κύκλους.

Αξίζει να αναφέρουμε πως ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυξήθηκε κατά 0,24%, αλλά αυξήθηκε επίσης και η συνολικά απαιτούμενη ενέργεια από τον κύκλο οδήγησης κατά 0,30%. Αυτό σημαίνει πως ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου διένειμε πιο αποδοτικά την ενέργεια, αλλά εις βάρος της μπαταρίας.

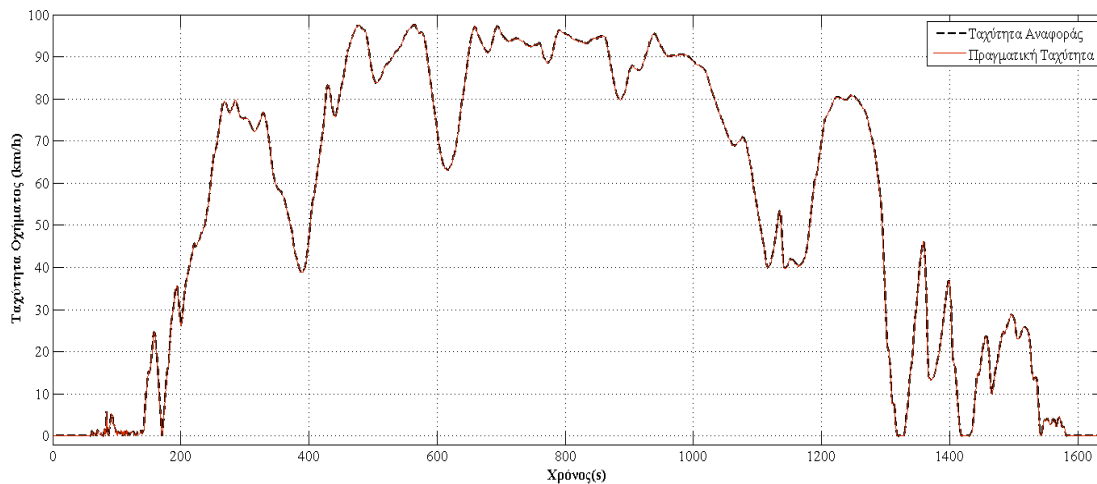
Τέλος, είναι προφανές πως και οι δύο έλεγχοι απέφεραν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με ελάχιστη διαφορά. Αυτό οφείλεται ίσως στη σταθερή ταχύτητα που επέβαλλε συχνά ο κύκλος οδήγησης επαναλαμβανόμενου μοτίβου, με αποτέλεσμα ο έλεγχος βάσει κανόνων να έχει ήδη επιτύχει πολύ καλή απόδοση.

10.4. Μικτός κύκλος οδήγησης

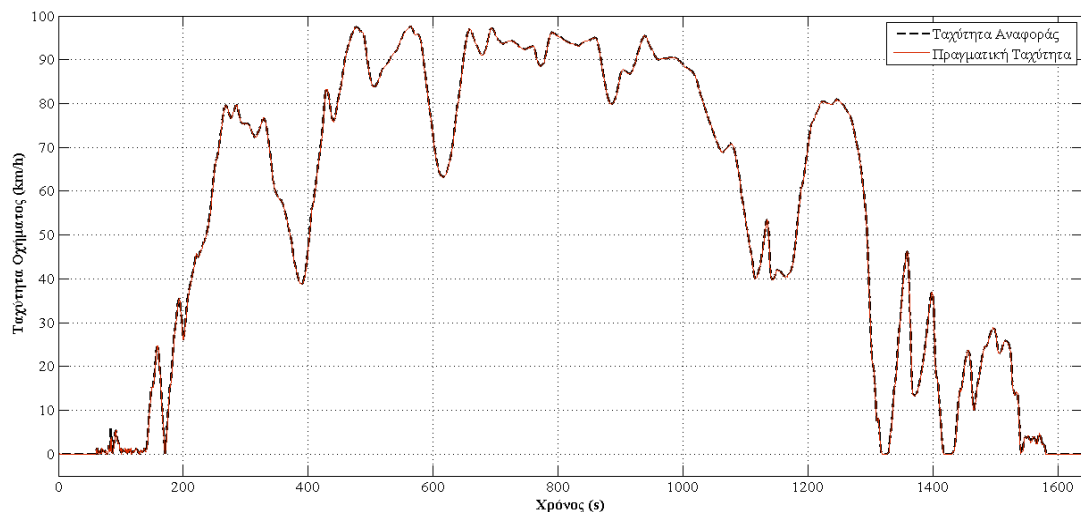
Παρακολούθηση κύκλου οδήγησης

Ο μικτός κύκλος οδήγησης είναι μακράς διάρκειας και αφορά σε οδήγηση πολλών και συχνών διακυμάνσεων, χωρίς ενδιάμεσες στάσεις όπως στον προηγούμενο κύκλο οδήγησης. Στο τέλος του κύκλου επιβάλλεται απότομη επιβράδυνση με σκοπό το σταμάτημα του οχήματος. Η μέγιστη ταχύτητα που αποκτά το όχημα είναι 97,78km/h.

Ακολουθώς παρατίθενται τα γραφήματα της επιθυμητής ταχύτητας του οχήματος εν συγκρίσει προς τους δύο εφαρμοζόμενους ελέγχους (Σχήματα [92,93]). Παρατηρώντας τα στο σύνολό τους δεν εντοπίζεται κάποια σοβαρή διακύμανση.

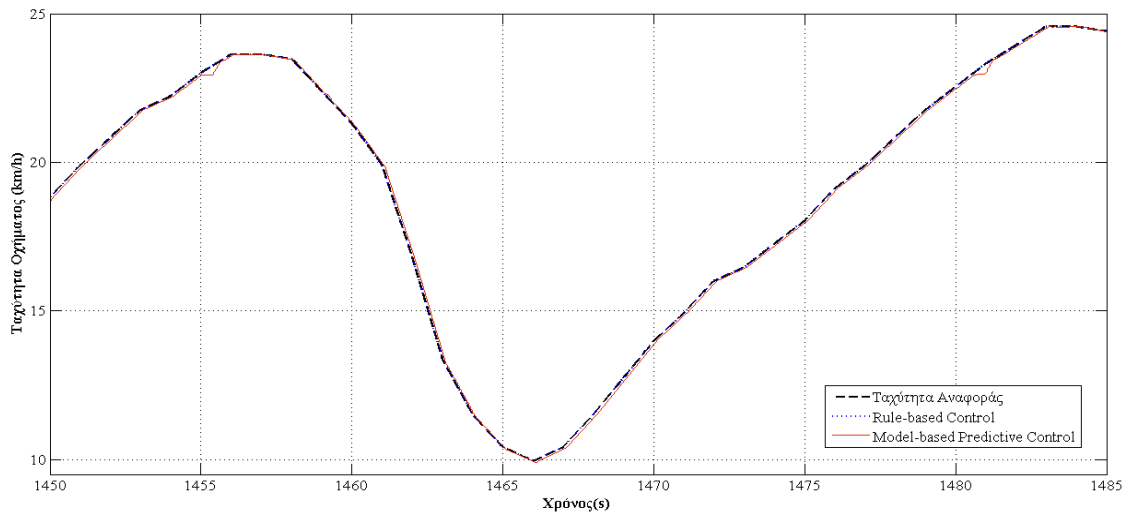


Σχήμα 92: Έλεγχος βάσει κανόνων

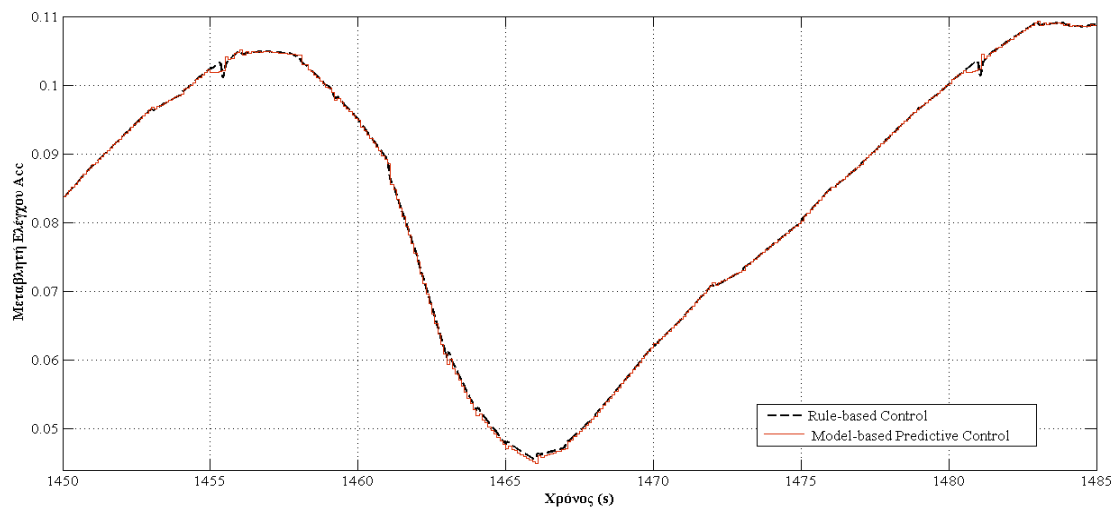


Σχήμα 93: Προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το διάστημα [1450s,1485s]. Από το γράφημα του Σχήματος 94 παρατηρούμε πως η ταχύτητα για τους δύο ελέγχους ταυτίζεται με εξαίρεση κάποια σημεία, στα οποία ο βηματικός χαρακτήρας του προβλεπτικού ελέγχου προκαλεί μικρές αποκλίσεις στην ταχύτητα του οχήματος. Ο βηματικός χαρακτήρας της πρόβλεψης είναι εμφανής στο Σχήμα 95, όπου αποτυπώνεται το γράφημα της εντολής ελέγχου.



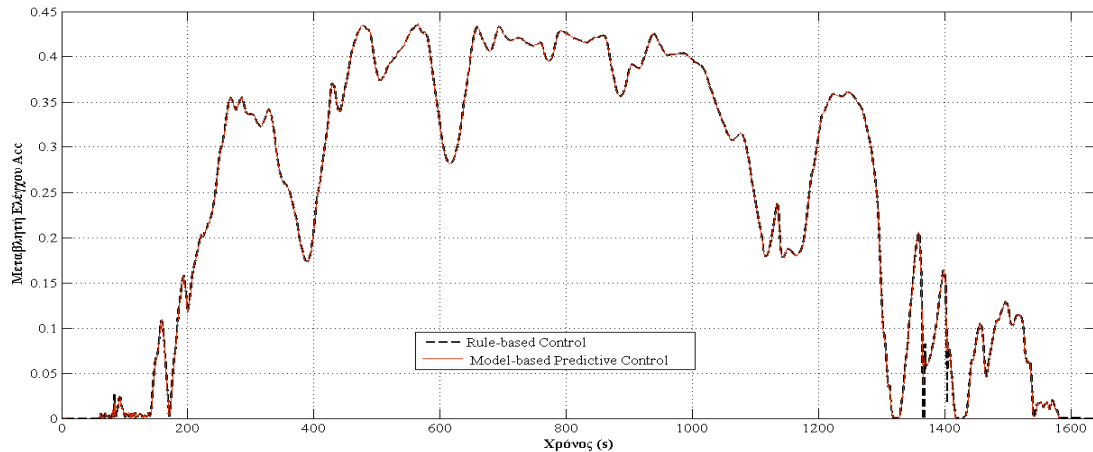
Σχήμα 94: Ταχύτητα οχήματος στο χρονικό διάστημα [1450s,1485s]



Σχήμα 95: Μεταβλητή ελέγχου Acc στο χρονικό διάστημα [1450s-1485s]

Εντολή ελέγχου

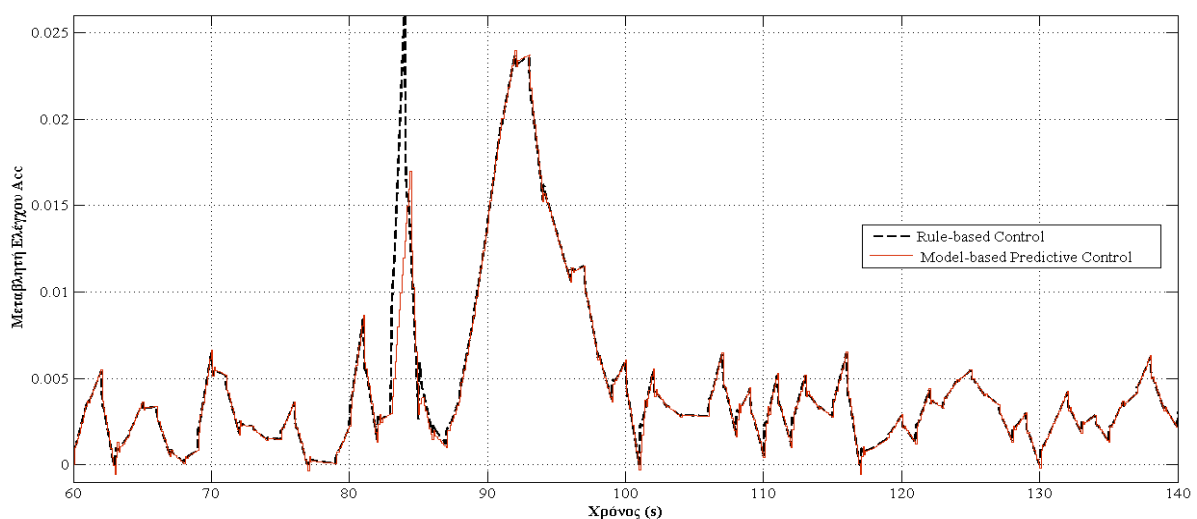
Μορφολογικά το γράφημα της εντολής ελέγχου του Σχήματος 96 είναι παρόμοιο εκείνου του κύκλου οδήγησης.



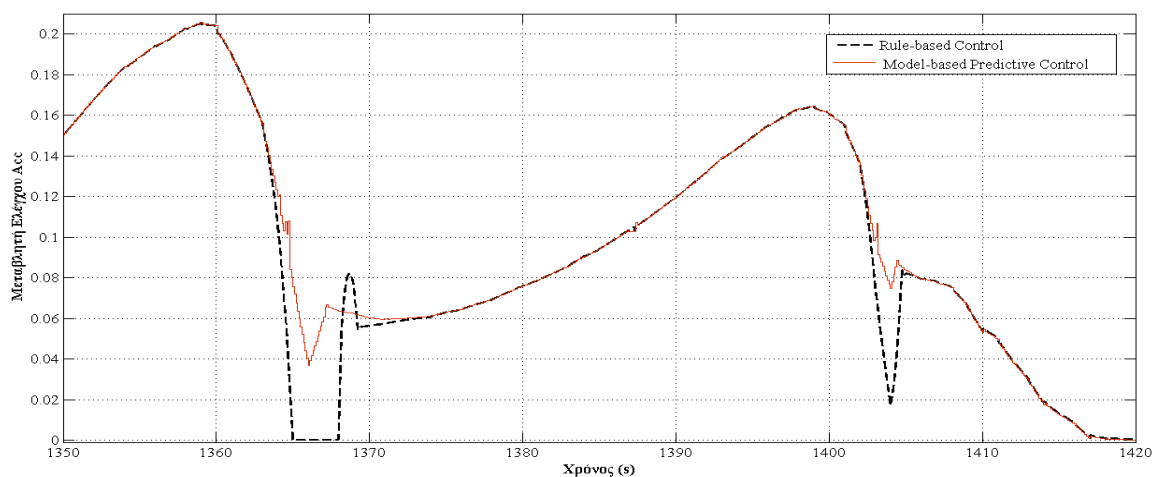
Σχήμα 96: Μεταβλητή ελέγχου

Δεν είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα στις δύο εντολές ελέγχου, εκτός από τα διαστήματα [60s,140s] και [1350s,1420s], όπως φαίνεται καλύτερα ακολούθως στα Σχήματα 97 και 98. Ωστόσο, η προκύπτουσα ταχύτητα για τους δύο ελέγχους ικανοποιεί τον επιθυμητό στόχο.

Οι σοβαρές αυτές αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεταβλητών ελέγχου οφείλεται στον ορίζοντα πρόβλεψης και τον βηματικό χαρακτήρα που διαθέτει ο προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου. Στην προσπάθεια, δηλαδή, να παράγει τη ακολουθία ελέγχου εντός των περιορισμών, παρατηρείται αυτή η σημαντική διαφοροποίηση.



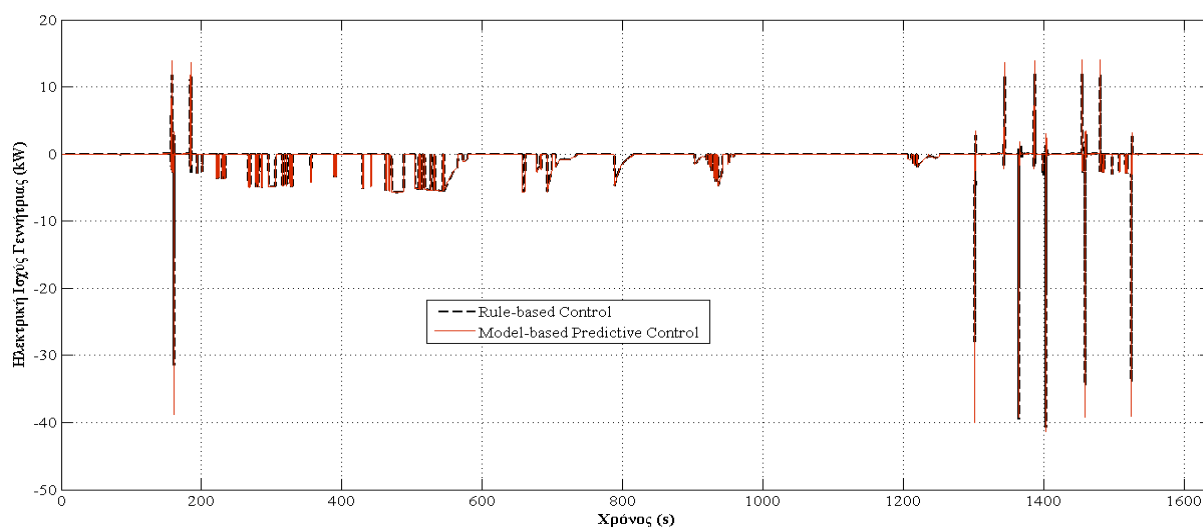
Σχήμα 97: Μεταβλητή ελέγχου στο χρονικό διάστημα [60s,140s]



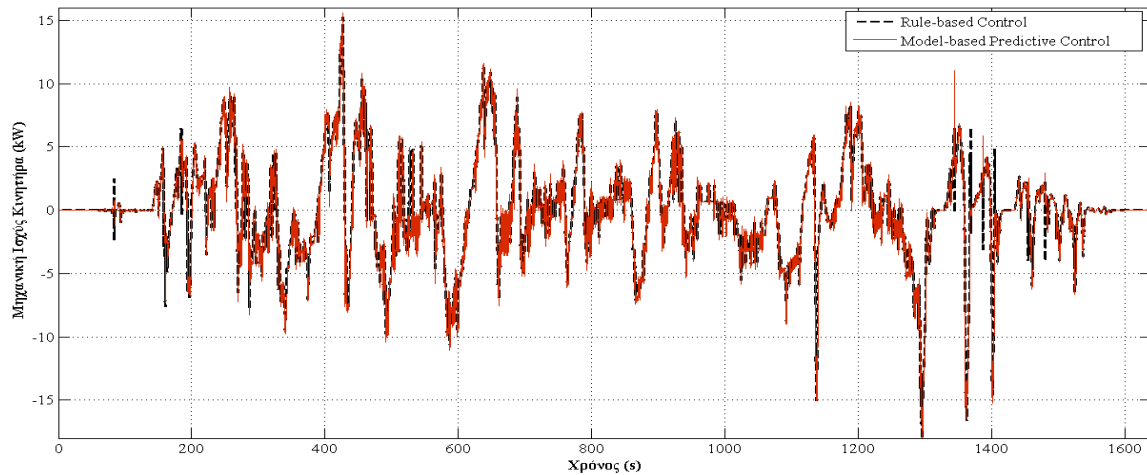
Σχήμα 98: Μεταβλητή ελέγχου στο χρονικό διάστημα [1350s,1420s]

Ισχύεις

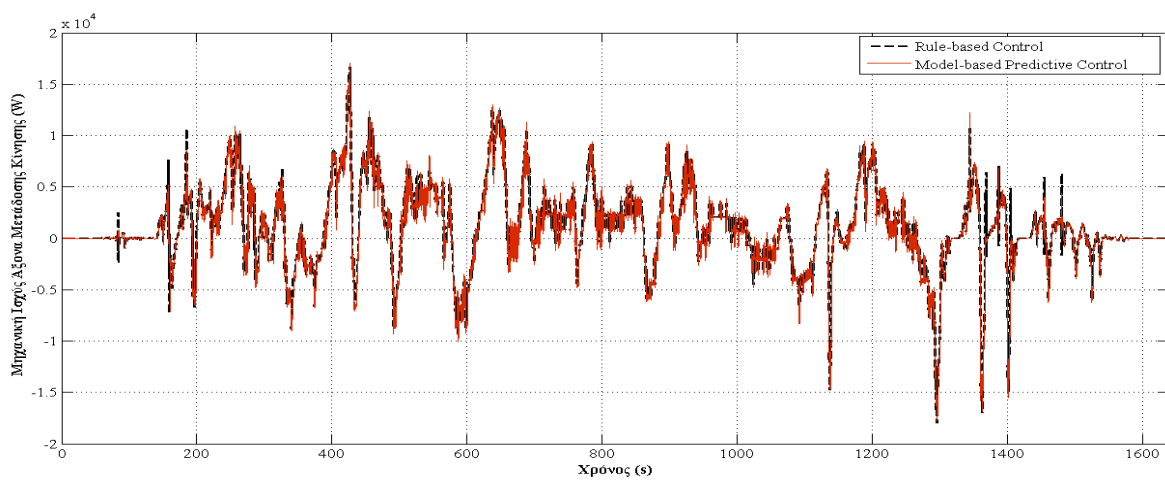
Στη συνέχεια παρατίθενται τα γραφήματα της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας (Σχήμα 99), της μηχανικής ισχύος του κινητήρα (Σχήμα 100) και της μηχανικής ισχύος στον άξονα μετάδοσης κίνησης (Σχήμα 101).



Σχήμα 99: Ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας



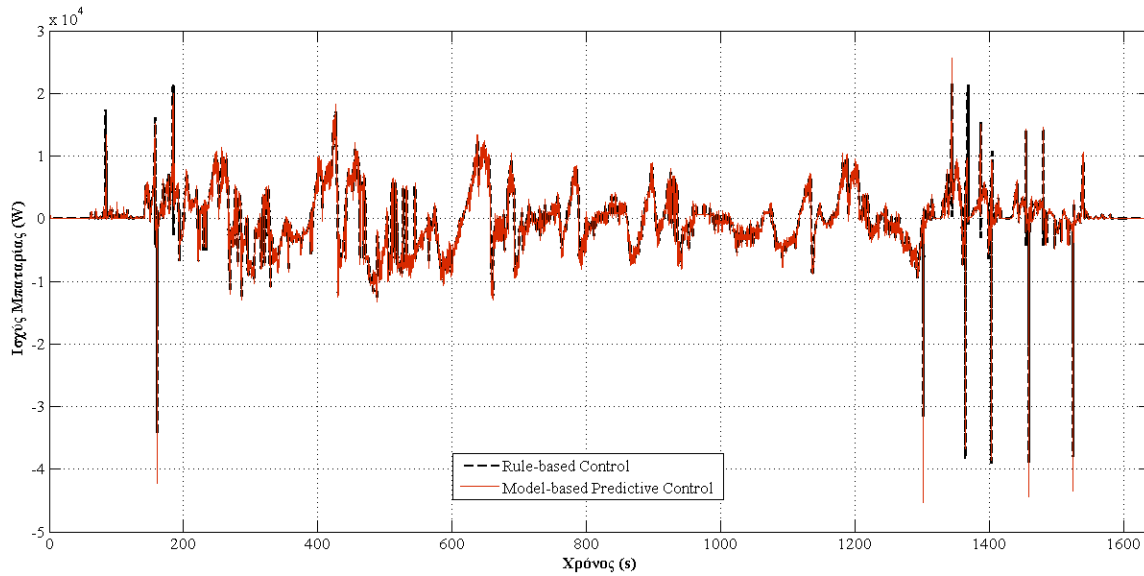
Σχήμα 100: Μηχανική ισχύς κινητήρα



Σχήμα 101: Μηχανική ισχύς μετάδοσης κίνησης

Παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές δεν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου από τον έλεγχο βάσει κανόνων. Σημειώνουμε πως η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας (Σχήμα 99) στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου στα [1300s,1550s] παρουσιάζει αρνητικότερες τιμές από τον έλεγχο βάσει κανόνων.

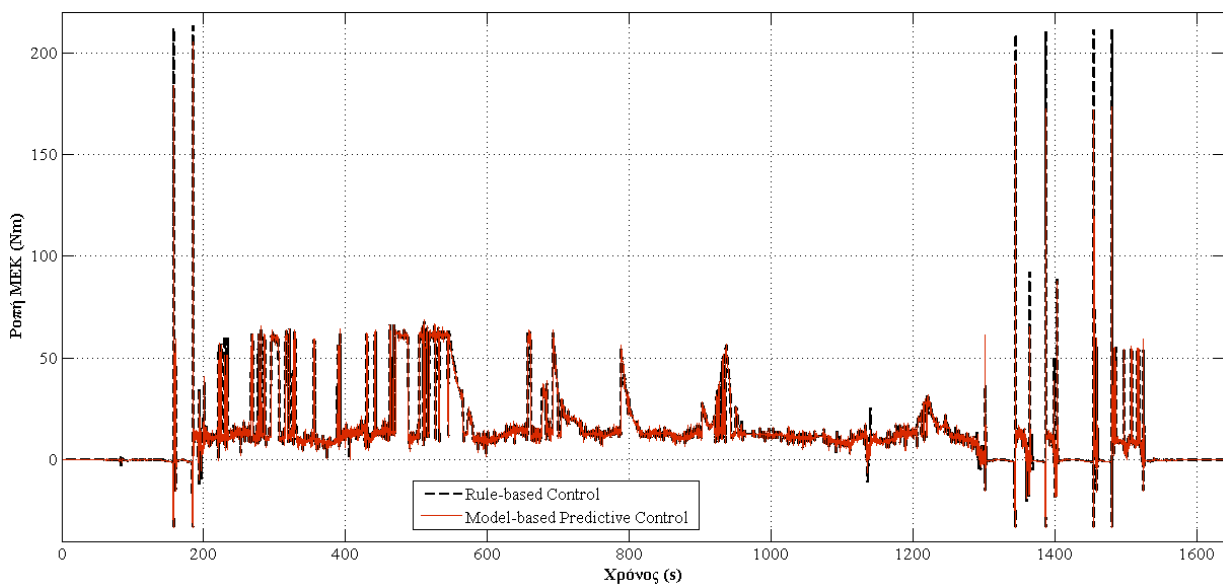
Ομοίως, στο γράφημα ισχύος της μπαταρίας (Σχήμα 102) δεν εμφανίζονται σοβαρές αποκλίσεις, εκτός από τα ίδια διαστήματα, στα οποία αποκλίσεις σημείωσε η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας. Επισημαίνουμε πως τα διαστήματα αυτά αντιστοιχίζονται σε επιβραδύνσεις. Άρα, ο προβλεπτικός έλεγχος κάνει εντονότερη φόρτιση των μπαταριών.



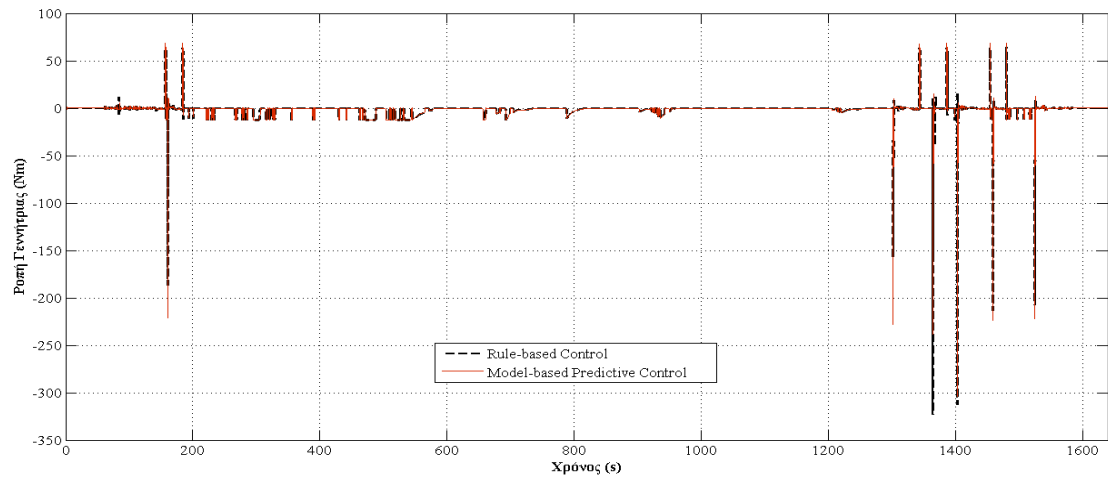
Σχήμα 102: Ισχύς μπαταρίας

Ροπές

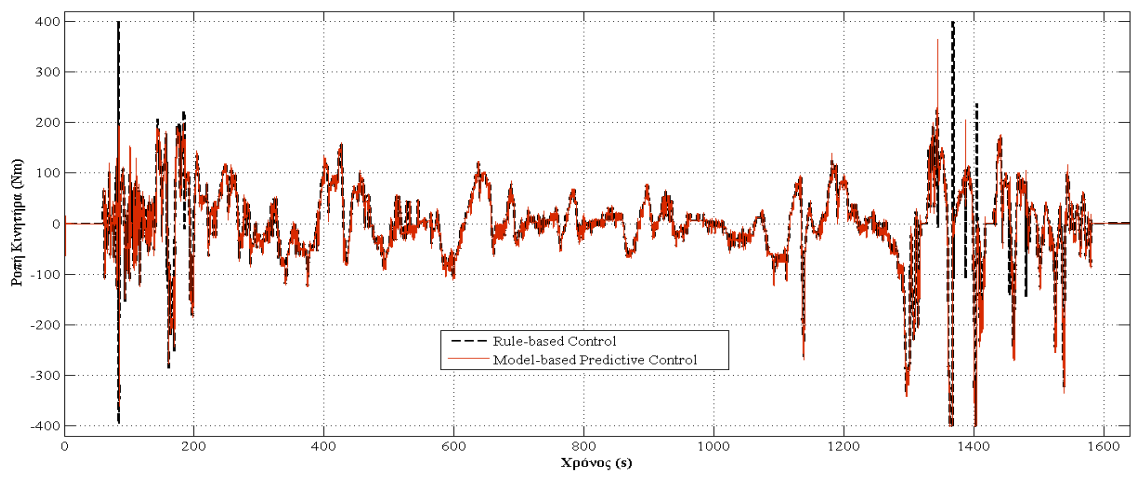
Τα γραφήματα ροπής (Σχήματα [103,105]) των δύο ελέγχων είναι σχεδόν ταυτόσημα. Μικρές αποκλίσεις παρατηρούνται αν εστιάσουμε σε τμήματα, που επισημάνθηκαν κατά τον σχολιασμό των ισχύων.



Σχήμα 103: Ροπή μηχανής εσωτερικής καύσης



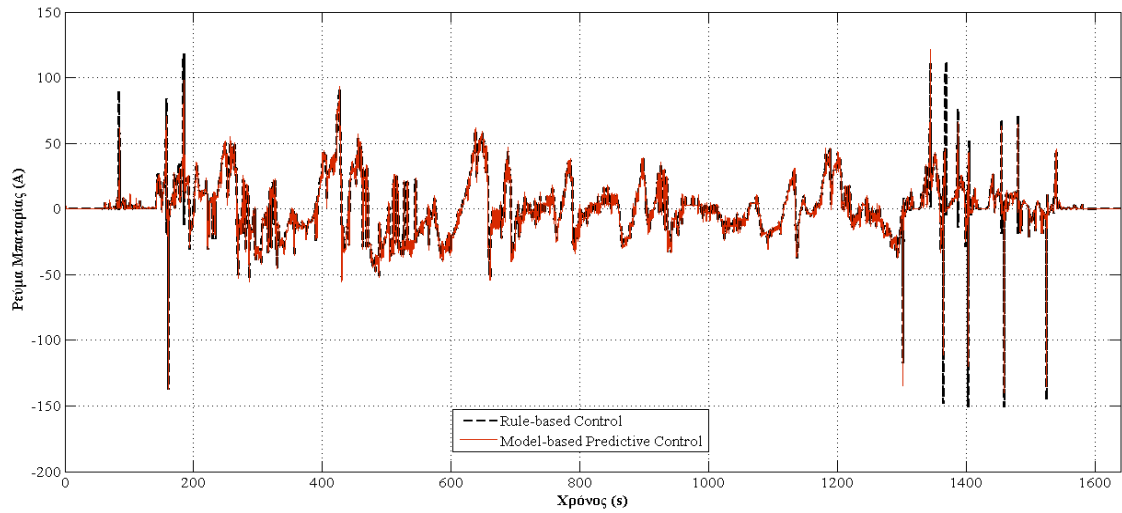
Σχήμα 104: Ροπή γεννήτριας



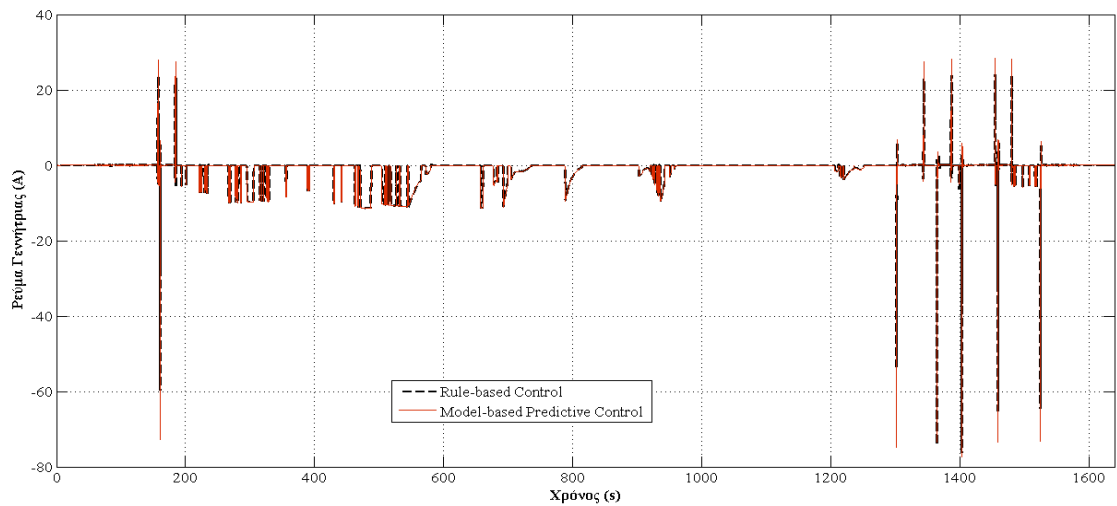
Σχήμα 105: Ροπή κινητήρα

Ρεύματα

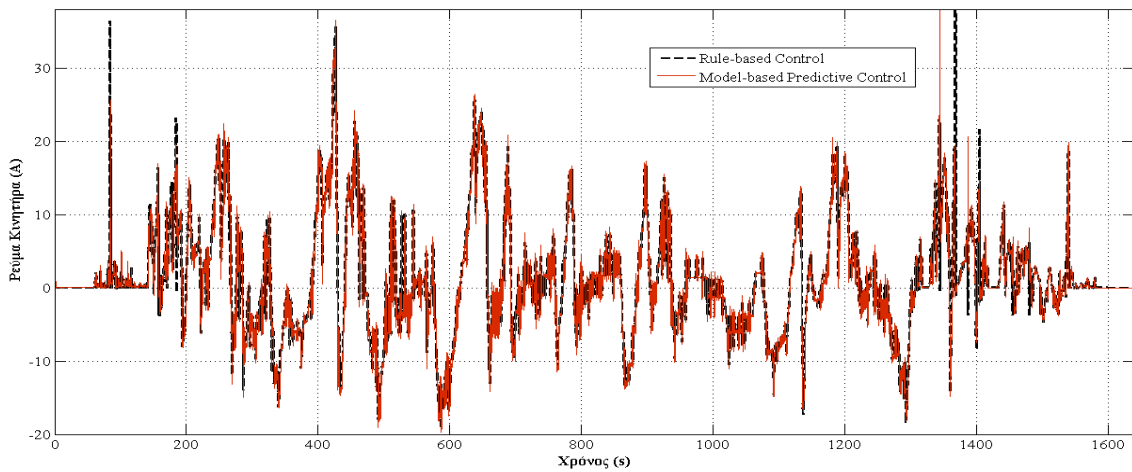
Εποπτικά, υπάρχει ταύτιση μεταξύ των γραφημάτων των δύο ελέγχων σύμφωνα με τα γραφήματα των Σχημάτων [106,108].



Σχήμα 106: Ρεύμα μπαταρίας



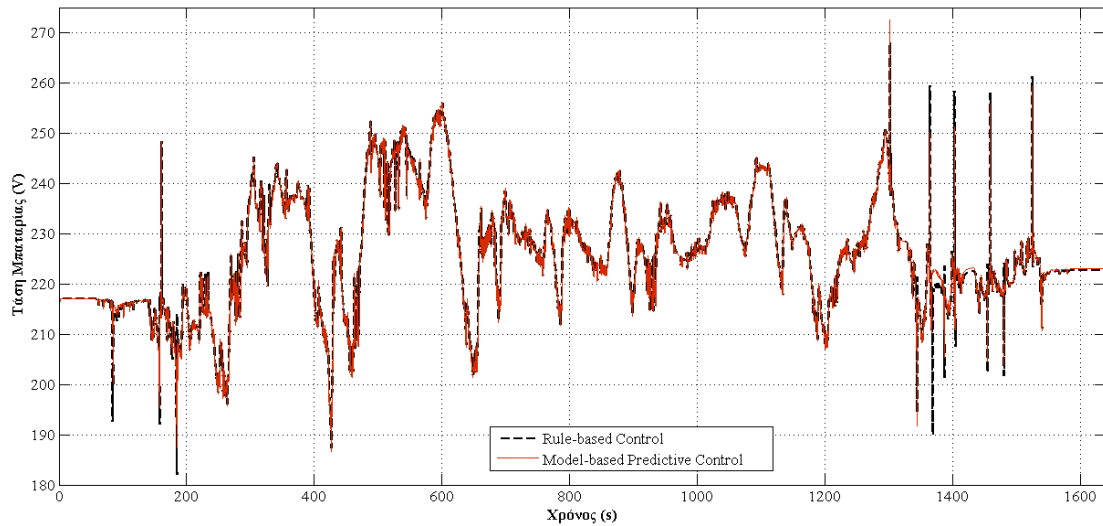
Σχήμα 107: Ρεύμα γεννήτριας



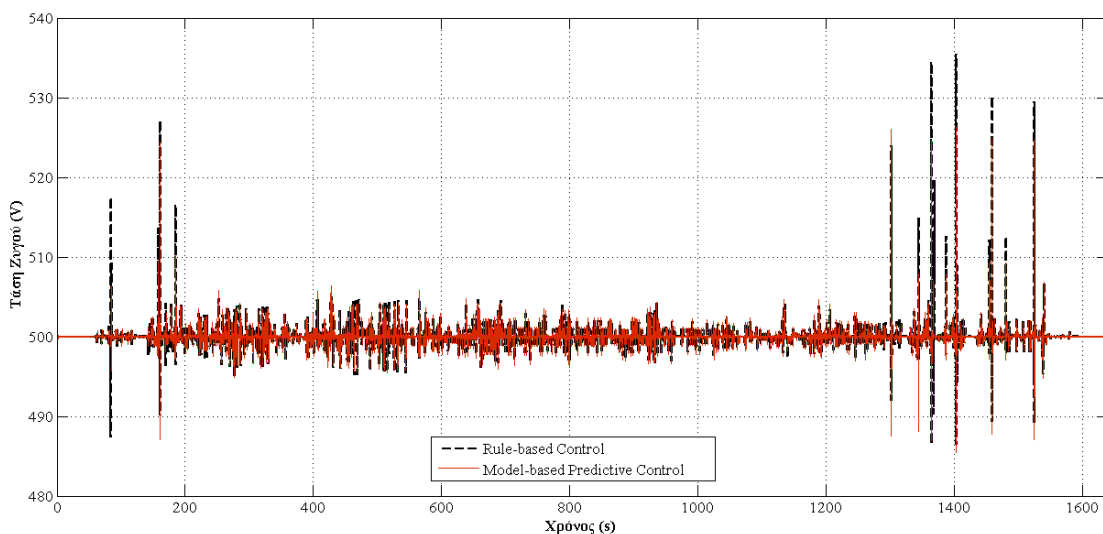
Σχήμα 108: Ρεύμα κινητήρα

Τάσεις

Παρατηρούμε πως παρά τη γενικότερη ταύτιση στα γραφήματα των τάσεων (Σχήματα 109,110), στον προβλεπτικό έλεγχο η τάση της μπαταρίας (Σχήμα 109) είναι μικρότερη από εκείνη του ελέγχου βάσει κανόνων μετά τη στιγμή $t=1200s$, στα διαστήματα, όπου υπάρχει επιβράδυνση.



Σχήμα 109: Τάση μπαταρίας

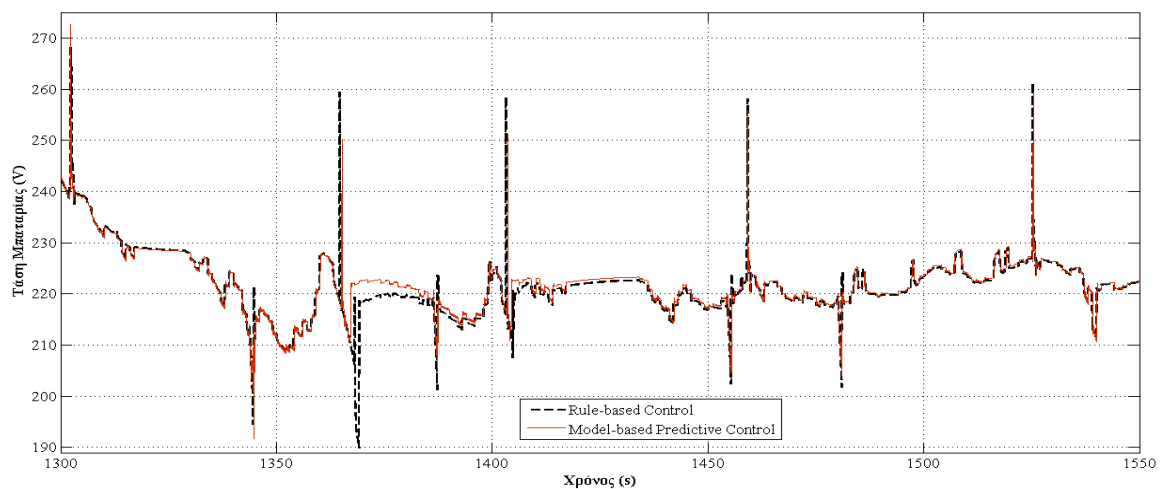


Σχήμα 110: Τάση ζυγού

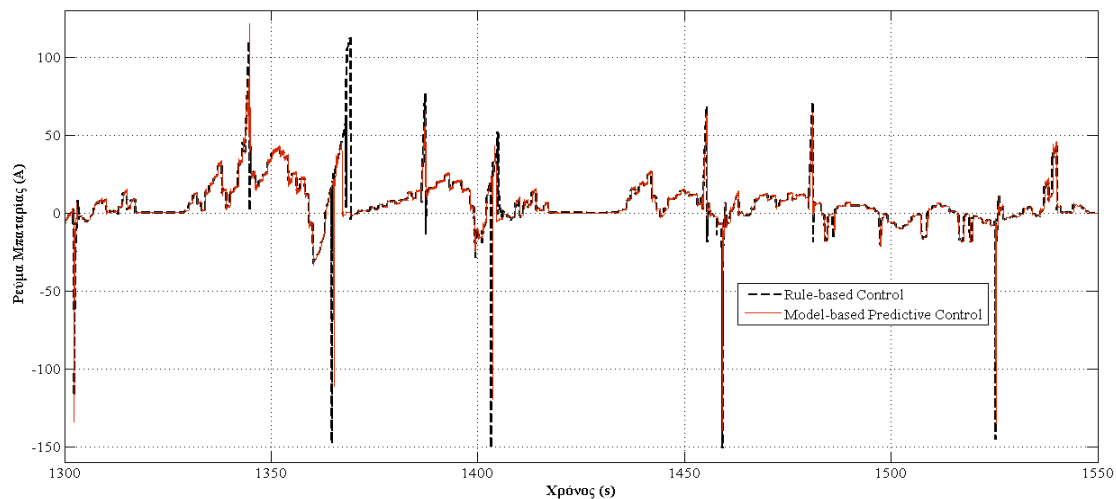
Μελέτη μπαταρίας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η λειτουργία της μπαταρίας για το χρονικό διάστημα [1300s,1550s] μέσα από τα γραφήματα ρεύματος, τάσης, ισχύος και στάθμης φόρτισης (Σχήματα [111,114]). Επιλέχθηκε αυτό το διάστημα, καθώς σε αυτό είναι εμφανής η διαφορά της στάθμης φόρτισης για τους δύο ελέγχους.

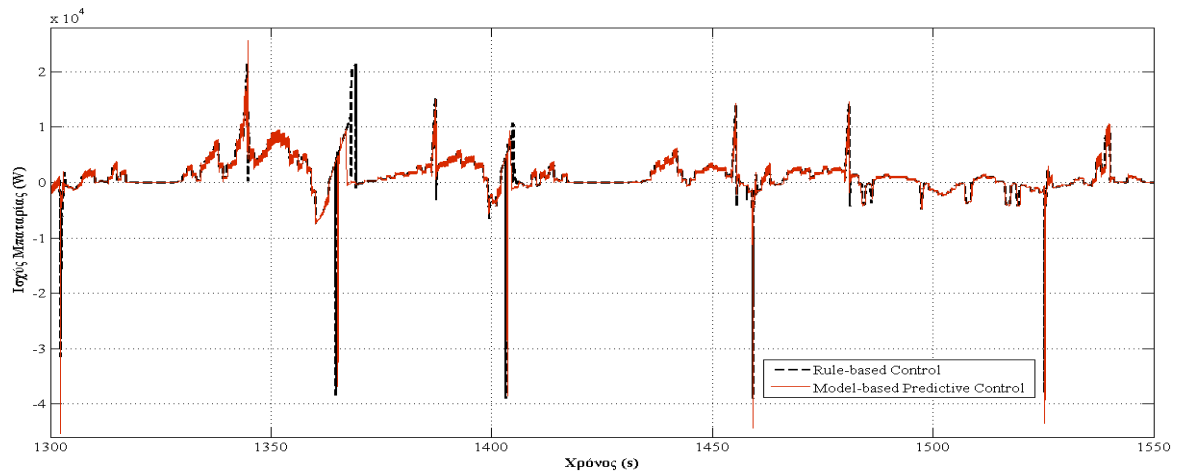
Παρατηρούμε πως όταν η ισχύς στον έλεγχο βάσει κανόνων είναι μεγαλύτερη από εκείνη του προβλεπτικού, τότε η μπαταρία φορτίζεται περισσότερο. Μετά από τη στιγμή $t = 1360$ η στάθμη φόρτισης στον προβλεπτικό έλεγχο είναι μεγαλύτερη εκείνης στον ντετερμινιστικό έλεγχο.



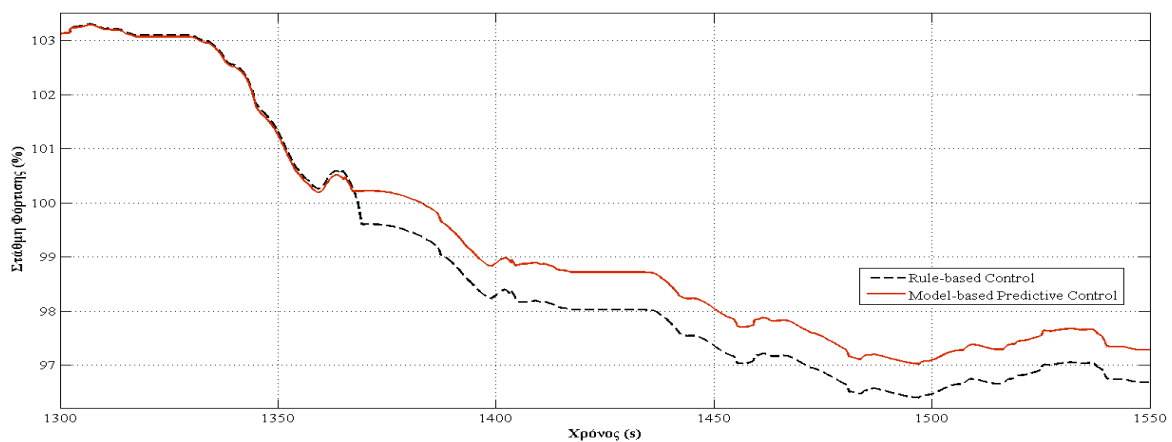
Σχήμα 111: Τάση μπαταρίας



Σχήμα 112: Ρεύμα μπαταρίας



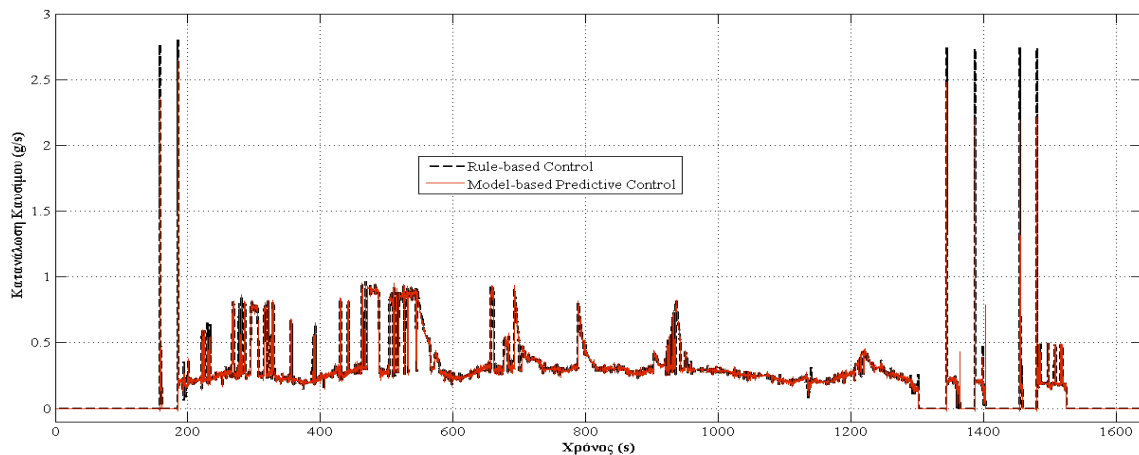
Σχήμα 113: Ισχύς μπαταρίας



Σχήμα 114: Στάθμη φόρτισης

Στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου

Στο ακόλουθο γράφημα κατανάλωσης καυσίμου (Σχήμα 115) δε φαίνεται ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στους δύο ελέγχους, εκτός από τις στιγμές των αλμάτων, σε μερικά εκ των οποίων η κατανάλωση στον προβλεπτικό έλεγχο βάσει μοντέλου είναι μικρότερη.



Σχήμα 115: Στιγμιαία ροή καυσίμου (gr/s)

Ρύθμιση ελεγκτών

Χρησιμοποιούμε δύο ελεγκτές, έναν για τις απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις και έναν για τα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα.

Έστω t ο χρόνος. Αν ισχύει η εξής υπόθεση:

$$(t \leq 400) | (t \geq 800 \ \& \ t \leq 1000),$$

ενεργοποιείται ο ελεγκτής MPCinter1. Στα υπόλοιπα διαστήματα ενεργοποιείται ο MPCinter2. Οι ρυθμίσεις των δύο ελεγκτών παρατίθενται παρακάτω.

Μοντέλο και Ορίζοντες

Ομοίως με τους δύο προηγούμενους κύκλους οδήγησης, το διάστημα ελέγχου, και βήμα δειγματοληψίας, παραμένει 0,1s για την καλύτερη δυνατή απόκριση του ελεγκτή. Οι ορίζοντες διαμορφώθηκαν σε αυτές τις τιμές, έπειτα από αρκετές δοκιμές, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

MPCinter1 MPCinter2

Διάστημα Ελέγχου (s)	0,1	
Ορίζοντας Πρόβλεψης (διαστήματα)	20	30
Ορίζοντας Ελέγχου (διαστήματα)	4	3

Περιορισμοί & Βάρη

Επειδή ο κύκλος αυτό επιβάλλει απότομες επιβραδύνσεις, επιλέγουμε μεγάλη τιμή για τον ρυθμό καθόδου. Ο ρυθμός ανόδου είναι ρυθμισμένος, επίσης, στην κατάλληλη τιμή. Όπως έχει προαναφερθεί το βάρος της μεταβλητής ελέγχου πρέπει να είναι μηδέν.

Ελεγκτής	Μεταβλητή Ελέγχου	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέγιστος Ρυθμός		Βάρος	Ρυθμός Βάρους
				Καθόδου	Ανόδου		
MPCinter1	Acc	0	1	-1000	+0,001	0	0,24
MPCinter2				-5	5		0,15

Όπως και στους προηγούμενους κύκλους οδήγησης, τα όρια των μεταβλητών εξόδου είναι τα ίδια. Τα βάρη επιλέγονται με την αυτοματοποιημένη διαδικασία Tuning Advisor.

Ελεγκτής	Μεταβλητές Εξόδου	Ελάχιστο	Μέγιστο	Βάρος
MPCinter1 / MPCinter2	$fcons (g/s)$	0,01	2,5	1,19
	$VehSpeed(km/h)$	0	97,78	0,92

Ολικό βάρος ίσο με 0,8 προσφέρει ευρωστία του ελεγκτή, αλλά και ευελιξία.

Ολικό Βάρος
0,8

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Έλεγχος	Ενέργεια Μπαταρίας (kJ)	Θερμογόνος Ενέργεια (MJ)	Ενέργεια Αξονα Μετάδοσης Κίνησης (kJ)	Καύσιμο (L)	Τελική Στάθμη Φόρτισης (%)	Βαθμός Απόδοσης (%)
Βάσει Κανόνων	417,74	15,571	2.838,0	0,496	96,61	20,91
Προβλεπτικός βάσει μοντέλου	414,83	15,537	2.848,3	0,495	97,21	21,00
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-0,69	-0,22	+0,36	-0,20	+0,62	+0,43

Έλεγχος	Απαιτούμενη ενέργεια από τον κύκλο οδήγησης (MJ)	
Βάσει κανόνων	15,153	$E_3 = E_f - E_{bat}$
Προβλεπτικός βάσει μοντέλου	15,122	
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0,21	

Συμπέρασμα

Παρατηρούμε πως η τελική στάθμη της μπαταρίας υπερέχει στον προβλεπτικό έλεγχο ως προς τον συμβατικό ντετερμινιστικό κατά 0,62%. Συνεπώς, ο προβλεπτικός έλεγχος συνέβαλε στην ορθή διαχείριση της ενέργειας της μπαταρίας. Επίσης, μειώθηκε η χρήση της μηχανής εσωτερικής καύσης και η καταναλωθείσα ποσότητα καυσίμου κατά 0,22% και 0,20% αντιστοίχως.

Αξίζει να αναφέρουμε πως ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυξήθηκε κατά 0,43% και η απαιτούμενη ενέργεια από τον κύκλο οδήγησης ελαττώθηκε κατά 0,21%, το οποίο σημαίνει πως σημειώθηκε καλύτερη αξιοποίηση των πηγών ενέργειας.

11. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε μοντέλο διαχείρισης ενέργειας υβριδικού οχήματος διαμοιρασμού ισχύος βασισμένο σε εφαρμογή προβλεπτικού ελέγχου με στόχο την εξοικονόμηση καυσίμου ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις οδήγησης. Αρχικά, επιχειρήθηκε συγκριτική επισκόπηση των πλεονεκτημάτων των υβριδικών οχημάτων σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα. Στη συνέχεια, αναλύθηκαν τα κριτήρια κατηγοριοποίησης των υβριδικών οχημάτων και η μελέτη επικεντρώθηκε στη διαμόρφωση του κινητηρίου συστήματος.

Αναλύθηκαν οι συνηθέστερες χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος που απαρτίζουν τα υβριδικά οχήματα. Εξετάστηκε η συμβολή των υβριδικών οχημάτων στην επίλυση των οικολογικών προβλημάτων και παρουσιάστηκαν οι κυριότερες τεχνικές εξοικονόμησης καυσίμου που εφαρμόζονται σήμερα. Παρουσιάστηκαν οι συνηθέστερες μονάδες μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και οι στρατηγικές ελέγχου οχημάτων.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν η μοντελοποίηση ενός σύγχρονου υβριδικού οχήματος και η προσομοίωση τριών διαφορετικών κύκλων οδήγησης βάσει του προκύπτοντος μοντέλου εφαρμόζοντας προβλεπτικό έλεγχο. Συνεπώς, μετά από εκτενή ανάλυση στον τρόπο λειτουργίας του προβλεπτικού ελέγχου βάσει μοντέλου, αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία ενσωμάτωσής του στο πλήρες μοντέλο προσομοίωσης του οχήματος.

Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα τριών κύκλων οδήγησης υπό μορφή γραφημάτων και τιμών ποσοστιαίων μεταβολών των λειτουργικών χαρακτηριστικών και των ενεργειακών καταναλώσεων που προκύπτουν κατά τη χρήση των δύο τεχνικών ελέγχου: του προβλεπτικού ελέγχου και του συμβατικού ντετερμινιστικού ελέγχου.

11.1.Κύρια συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας έχουν ως εξής:

- i. Ο προβλεπτικός έλεγχος υπερτερεί του ντετερμινιστικού στις περιπτώσεις κύκλου οδήγησης με συχνές και ανομοιόμορφες διακυμάνσεις, καθώς διαθέτει τη δυνατότητα να διαμορφώνει κατάλληλα την εντολή ελέγχου για τουλάχιστον δύο μελλοντικά βήματα δειγματοληψίας και όχι μόνο για το επόμενο, όπως συμβαίνει στον συμβατικό ντετερμινιστικό έλεγχο.
- ii. Στον πρώτο κύκλο οδήγησης πόλης που θεωρήθηκε και περιλαμβάνει συχνές διακυμάνσεις ταχύτητας και ενδιάμεσες στάσεις, η βελτίωση του ολικού βαθμού απόδοσης αγγίζει το 4% και η εξοικονόμηση καυσίμου το 3,73% σε σχέση με τον συμβατικό ντετερμινιστικό έλεγχο.
- iii. Στον δεύτερο κύκλο οδήγησης, ο οποίος περιλαμβάνει ομοιόμορφες μεταβολές ταχύτητας, ο προβλεπτικός έλεγχος αποδίδει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με τον συμβατικό ντετερμινιστικό έλεγχο. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν απαιτούνται συχνές αναπροσαρμογές της εντολής ελέγχου και ήδη ο ντετερμινιστικός έλεγχος επιτυγχάνει ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, παρατηρήθηκε 0,24% βελτίωση της διαχείρισης ενέργειας με κριτήριο τον βαθμό απόδοσης και 0,23% μείωση της καταναλωθείσας θερμογόνου ενέργειας καυσίμου.
- iv. Η μέγιστη διαφορά (-4,33%) της τελικής στάθμης φόρτισης ανάμεσα στους δύο ελέγχους παρατηρήθηκε κατά την προσομοίωση του πρώτου κύκλου οδήγησης στις ΗΠΑ, ο οποίος περιελάμβανε αρκετές επιταχύνσεις από κατάσταση ηρεμίας. Αντίθετα, στην περίπτωση του δεύτερου αστικού κύκλου οδήγησης στην Ευρώπη, που χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφες μεταβολές ταχύτητας, η τελική στάθμη φόρτισης δεν μεταβλήθηκε σημαντικά ως προς τον ντετερμινιστικό έλεγχο. Κατά την προσομοίωση του τρίτου κύκλου οδήγησης, σημειώθηκε αύξηση της τελικής στάθμης φόρτισης (+0,62%) για τον προβλεπτικό έλεγχο.
- v. Καθοριστικής σημασίας παράγοντες για την επίδοση του εκάστοτε ελεγκτή είναι οι ορίζοντες ελέγχου και πρόβλεψης, καθώς και τα υιοθετούμενα βάρη των μεταβλητών. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών παίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης του ελεγκτή.

- vi. Ο προτεινόμενος προβλεπτικός έλεγχος βασίζεται σε μοντέλο συστήματος όγδοης τάξης. Η αύξηση της τάξης του συστήματος θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση του ελεγκτή.

11.2.Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας σημειώνονται τα παρακάτω σημεία συνεισφοράς στην επιστήμη:

- i. Αναπτύχθηκε νέο μοντέλο διαχείρισης ενέργειας υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων βασισμένο σε προβλεπτικό ελεγκτή.
- ii. Επισημάνθηκαν τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου ελεγκτή σε σχέση με τον συμβατικό ντετερμινιστικό έλεγχο στις περιπτώσεις κύκλων οδήγησης που περιλαμβάνουν σημαντικές διακυμάνσεις ταχύτητας και συχνές στάσεις.

11.3.Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Η περαιτέρω διερεύνηση και επέκταση του ελεγκτή που αναπτύχθηκε εκτιμάται ότι θα μπορούσε να βελτιώσει τις επιδόσεις του ως εξής:

- i. Η αύξηση της τάξης του ελεγκτή που προτάθηκε ενδεχομένως να επιτρέψει περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας. Η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς δεν ήταν αρκετή για να καλύψει προσομοιώσεις μοντέλου ανώτερης τάξης.
- ii. Η διαχείριση και της αποθηκευμένης ενέργειας των μπαταριών με προβλεπτικό έλεγχο θα μπορούσε ενδεχομένως να επιτύχει βελτίωση στην ενεργειακή της διαχείριση.

Κατάλογος ακρωνυμίων

BJT	Bipolar Junction Transistor
BLDC	Brushless DC electric motor
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα
CSI	Current Source Inverter
CVT	Continuously Variable Transmission
DMC	Dynamic Matrix Control
DP	Dynamic Programming
DIP	Driver Intention Predictor
DSI	Driving State Identification
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
ECR	Equal Concern for the Relaxation
EV	Electric Vehicle
FC	Fuel Cells
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FIR model	Finite Impulse Response model
FTD	Fuzzy Torque Distributor
GPC	Generalized Predictive Control
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Interior Combustion Engine
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
KWIK	Knows What It Knows
Li-ion	Lithium-ion
LP	Linear Programming
MIMO	Multiple Inputs - Multiple Outputs
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
MPC	Model Predictive Control
MPCT	Model Predictive Control Toolbox™
NiCd	Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου
NiMH	Nickel-Metal Hydride
NO _x	Οξειδία του αζώτου
PBC	Power Balance Controller
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PHEV	Parallel Hybrid Electric Vehicle
PID	Proportional-Integral-Derivative
PM	Permanent Magnets
PSHEV	Parallel/Series Hybrid Electric Vehicle
PWM	Pulse Width Modulation
QP	Quadratic Programming
SISO	Single Inputs - Single Outputs
SSM	State-Space Model
SDP	Stochastic Dynamic Programming
SHEV	Series Hybrid Electric Vehicle

SoC	State of Charge
UC	Ultracapacitors
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
VRLA	Valve-regulated lead-acid battery
VSI	Voltage Source Inverter
ΓΧΑ	Γραμμικό Χρονικά Αμετάβλητο
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης

Βιβλιογραφία

- [1] H. Ali Borhan, Ardalan Vahidi, Anthony M. Phillips, Ming L. Kuang, Ilya V. Kolmanovsky, Predictive Energy Management of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle, 2009 American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, June 10-12, 2009
- [2] Steve Miller, Mathworks website, Hybrid-Electric Vehicle Model in Simulink, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28441-hybrid-electric-vehicle-model-in-simulink>
- [3] John M. German, Hybrid Electric Vehicles, Encyclopedia of Energy, Volume 3.r2004 Elsevier Inc, United States, 2004
- [4] U.S. Energy Information Administration, Voluntary Reporting of Greenhouse Gases Program Fuel Emission Coefficients, <http://www.eia.gov/oiaf/1605/coefficients.html>
- [5] Lohner-Porsche Mixte Hybrid, 10/2009, http://wikicars.org/en/Lohner%E2%80%90Porsche_Mixte_Hybrid_10/2009
- [6] Lohner-Porsche Mixte Voiturette, Company press release, November 19, 2007 <http://www.ultimatecarpage.com/car/3456/Lohner-Porsche-Mixte-Voiturette.html>
- [7] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, CRC Press LLC, 2005
- [8] Dennis Dörffel, Energy Management of Hybrid Electric Vehicles, Mphil/PhD project - 9 months report, University of Southampton
- [9] Kamil Çagatay Bayindir, Mehmet Ali Gözüküçük, Ahmet Teke, A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units, 2010 Elsevier Lt
- [10] Lino Guzzella, Antonio Sciarretta, Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization, Springer, 2005-2007
- [11] Iqbal Husain, Electric and Hybrid Vehicles, Design Fundamentals, CRC Press, 2003
- [12] Stephen J. Chapman, Electrical Machinery Fundamentals, McGraw-Hill Companies, 2005
- [13] Leroy-Somer, Emerson Industrial Automation, <http://www.directindustry.com/>
- [14] K. T. Chau, C.C.Chan, Chunhua Liu, Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, June 2008
- [15] Ali Emadi, Young Joo Lee, Kaushik Rajashekara, Power Electronics and Motor Drives in Electric,Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, June 2008
- [16] K.T. Chau, Y.S. Wong, Overview of power management in hybrid electric vehicles,

- Energy Conversion and Management 43 (2002), 002 Elsevier Science Ltd, 2001
- [17] Chris Mi, M. Abul Masrur, David Wenzhong Gao, Hybrid Electric Vehicles, Principles and Applications with Practical Perspectives, Wiley Ltd, 2011
- [18] Ali Emadi, Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives, Taylor & Francis Group, LLC, 2005
- [19] Στέφανος Ν. Μανιάς, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Εκδόσεις Συμείων, 2007
- [20] Abdus Sattar, Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics, IXYS Corporation, IXAN0063
- [21] Yuan Cheng, Christophe Espanet, Alain Bouscayrol, Shumei Cui, Specifications and Design of a PM Electric Variable Transmission for Toyota Prius II, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, No. 9, November 2011
- [22] Timothy L. Skvarenina, The Power Electronics Handbook, CRC Press, 2002
- [23] Siang Fui Tie, Chee Wei Tan, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, Renewable and Sustainable Energy Reviews 20 (2013) 82–102
- [24] Hoseinali Borhan, Ardalan Vahidi, Anthony M. Phillips, Ming L. Kuang, Ilya V. Kolmanovsky, Stefano Di Cairano, MPC-Based Energy Management of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.20, No.3, May 2012
- [25] Cristian Musardo, Giorgio Rizzoni, Benedetto Staccia, A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management, Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005, Seville, Spain, December 12-15, 2005
- [26] Lorenzo Grandea, Vishnu Teja Chundi, Di Weib, Chris Bower, Piers Andrew, Tapani Ryhänen, Graphene for energy harvesting/storage devices and printed electronics, Particuology 10 (2012) 1–8, Chinese Society of Particuology and Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Elsevier, 2011
- [27] Chenguang Liu, Zhenning Yu, David Neff, Aruna Zhamu, Bor Z. Jang, Graphene-Based Supercapacitor with an Ultrahigh Energy Density, Nanotek Instruments, Inc., Angstrom Materials, Inc., American Chemical Society, 2010
- [28] Dr. Jyh-Cheng Jeng, Model Predictive Control, National Taipei University of Technology
- [29] <http://www.mathworks.com/discovery/quadratic-programming.html>
- [30] Farzad Rajaei Salmasi, Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison and Future Trends
- [31] G. Ripaccioli, A. Bemporad, F. Assadian, C. Dextreit, S. Di Cairano I.V. Kolmanovsky,

- Hybrid Modeling, Identification, and Predictive Control: An Application to Hybrid Electric Vehicle Energy Management, HSCC 2009, LNCS 5469, pp. 321–335, 2009
- [32] Liuping Wang, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®, Springer, 2009
- [33] J.A. Rossiter, Model-Based Predictive Control, A Practical Approach, CRC Press LLC, 2004
- [34] Ned Mohan, Tore M. Undelan, William P. Robbins, Power electronics, John Wiley & Sons, Inc, 1989
- [35] Pierluigi Pisu and Giorgio Rizzoni, A Comparative Study Of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Control Systemws Technology, Vol.15, No.3, May 2007
- [36] Luigi del Re, Frank Allgöwer, Luigi Glielmo, Carlos Guardiola, Ilya Kolmanovsky, Automotive Model Predictive Control Models, Methods and Applications, Springer, 2010
- [37] Alberto Bemporad, Manfred Morari, N. Lawrence Ricker, Model Predictive Control Toolbox™, User’s Guide, The MathWorks, Inc, 2005-2012
- [38] C. Schmid, L.T. Biegler, Quadratic programming methods for reduced hessian SQP, Computers & Chemical Engineering, Vol.18, No 9, 1994
- [39] Kaijiang Yu, Masakazu Mukai, Taketoshi Kawabe, Model predictive control of a power-split hybrid electric vehicle system, Artif Life Robotics, Springer, 2012
- [40] Κ. Παπαζαχαρόπουλος, Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Προσομοίωσης Λειτουργίας και Διαχείρισης Ενέργειας Υβριδικών Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων, Διπλωματική Εργασία, 2012
- [41] Jinming Liu, Huei Peng, Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle, IEEE Transactions on Control Systemws Technology, Vol.16, No.6, November 2008
- [42] Νίκος Λουπάκης, Εργαστήριο MEK & Τεχνολογίας Αυτοκινήτου, ΑΣΠΑΙΤΕ, <http://iceal.wikidot.com/automatic-transmission>
- [43] James Larminie, John Lowry, Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons, Ltd, 2003
- [44] Sanjaka G. Wirasingha, Ali Emadi, Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, No. 1, January 2011
- [45] Hamid Khayyam, Abbas Kouzani, Saeid Nahavandi, Vincenzo Marano, Giorgio Rizzoni, Intelligent Energy Management in Hybrid Electric Vehicles, InTech, 2010
- [46] S. Kermani, S. Delprat, T.M. Guerra, R. Trigui, B. Jeanneret, Predictive energy management for hybrid vehicle, Control Engineering Practice 20 (2012) 408–420,

Elsevier Ltd, 2011

- [47] Li Houyu , Zhang Guirong, Hybrid Electric Vehicle Drive Control, 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT 2011), Procedia Environmental Sciences 10 (2011) 403 – 407, Elsevier Ltd, 2011