



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**Ανάκτηση και διαχείριση ενέργειας για  
πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα**

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την  
απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης  
υπό

**Αμαργιανό Αλέξανδρο**

Χανιά, 2015

## **Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:**

Νικόλαος Τσουρβελούδης  
Καθηγητής Σχολής ΜΠΔ, Πολυτεχνείο Κρήτης  
Επιβλέπων Καθηγητής

Φώτιος Κανέλλος  
Λέκτορας Σχολής ΜΠΔ, Πολυτεχνείο Κρήτης

Ευτύχιος Κουτρούλης  
Επίκουρος Καθηγητής Σχολής ΗΜΜΥ, Πολυτεχνείο Κρήτης

# Ευχαριστίες

Κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων της μεταπτυχιακής μου διατριβής συνεργάστηκα με αρκετούς ανθρώπους τους οποίους νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Τσουρβελούδη, η συνεργασία με τον οποίο ήταν αψεγάδιαστη για όλη την περίοδο των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Εκτός αυτού, η διατριβή αυτή δε θα ήταν εύκολο να πραγματοποιηθεί στην πληρότητα και ευρύτητα της χωρίς την στήριξη και εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου.

Τον Λέκτορα κ. Φώτιο Κανέλλο όπως επίσης και τον επίκουρο καθηγητή κ. Ευτύχιο Κουτρούλη που δε συμμετείχαν μόνο στην εξεταστική μου επιτροπή αλλά ήταν συνέχεια πρόθυμοι και διαθέσιμοι για βοήθεια όταν τα πειράματά μου έπεφταν σε σκόπελο.

Τον κ. Σπανουδάκη Πολυχρόνη, διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης και επικεφαλής της ερευνητικής ομάδας TUCER, για τη συμμετοχή μου στην ομάδα όπως επίσης και κάθε ένα μέλος της ομάδας για την άψογη συνεργασία μας. Ιδιαίτερη αναφορά θα ήθελα να κάνω, χωρίς να θίγω ή να υποτιμώ στο λιγότερο τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας, στον Γιάννη Τζώρτζη. Η συνεργασία μαζί του υπήρξε καταλύτης για το αποτέλεσμα της διατριβής.

Τον κ. Σάββα Πιπερίδη, μέλος Ε.ΔΙ.Π του εργαστηρίου Ευφώνων Συστημάτων και Ρομποτικής και ιδρυτικό μέλος της ομάδας TUCER, για την καθοδήγηση, το χρόνο και γενικότερα την άψογη συνεργασία μας από την πρώτη στιγμή και σε όλα τα επίπεδα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό τον καιρό.

*Αφιερώνεται στην οικογένεια μου*

# Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	9
Πρόλογος.....	9
Δομή εργασίας.....	10
Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρικοί Κινητήρες.....	11
1.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος.....	12
1.2 Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος.....	14
1.2.1 Ασύγχρονοι Κινητήρες.....	14
1.2.2 Σύγχρονοι Κινητήρες.....	15
Κεφάλαιο 2: Έλεγχος Ηλεκτρικών Κινητήρων.....	16
2.1 Βαθμωτός Έλεγχος.....	16
2.2 Διανυσματικός Έλεγχος.....	17
2.3 Έλεγχος κινητήρα Axi 5360/20.....	21
2.3.1 Προσδιορισμός Θέσης δρομέας.....	23
2.3.2 Υπολογισμός Αντίστασης Στάτη.....	24
2.3.3 Προσδιορισμός σταθερών PI ελέγχου.....	26
2.3.4 Υλοποίηση ελεγκτή.....	29
Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες Ανάκτησης Ενέργειας.....	32
3.1 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση Σφονδύλου.....	33
3.2 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση Υδραυλικών συστημάτων.....	35
3.3 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση συμπίεσης αέρα.....	37
3.4 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση Γεννήτριας- Υπερπυκνωτών.....	38
3.5 Περιγραφή Συστήματος ανάκτησης ενέργειας στο όχημα ER 14.....	39
Κεφάλαιο 4: Διαχείριση ενέργειας οχήματος ER14.....	44
4.1 Διαχείριση Ενέργειας με χρήση Μηχανής Πεπερασμένων Καταστάσεων.....	44
4.1.1 Πολιτική διαχείρισης με βάση το επίπεδο φόρτισης υπερπυκνωτών.....	46
4.1.2 Πολιτική διαχείρισης με βάση την ταχύτητα του οχήματος.....	49
4.1.3 Πολιτική διαχείρισης με βάση τον τρόπο οδήγησης του οχήματος.....	52
Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα.....	55
5.1 Αποτελέσματα χρήσης πολιτικής διαχείρισης με βάση επίπεδο φόρτισης υπερπυκνωτών.....	55
5.2 Αποτελέσματα με χρήση Πολιτικής διαχείρισης με βάση την ταχύτητα του οχήματος.....	58

5.3 Αποτελέσματα με χρήση Πολιτικής διαχείρισης με βάση τρόπο οδήγησης οδηγού.....	61
ΕΠΙΛΟΓΟΣ: Παρατηρήσεις- Μελλοντικές προτάσεις.....	64
Παρατηρήσεις.....	64
Μελλοντικές Προτάσεις.....	64
Βιβλιογραφία.....	65

## Ευρετήριο Σχημάτων

Εικόνα 1: Είδη ηλεκτρικών κινητήρων [2].....	11
Εικόνα 2: Κινητήρας Συνεχούς ρεύματος.....	12
Εικόνα 3: Λειτουργία DC κινητήρα.....	13
Εικόνα 4: Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη.....	15
Εικόνα 5: Διάγραμμα Ροπής/φάσης στάτη-δρομέα.....	17
Εικόνα 6: Χωρικά διανύσματα έντασης ρεύματος του στάτη.....	18
Εικόνα 7: Μετασχηματισμός Clarke.....	19
Εικόνα 8: Μετασχηματισμός Park.....	20
Εικόνα 9: Κινητήρας Axi 5360/20.....	21
Εικόνα 10: Διανυσματικός έλεγχος PMSM.....	21
Εικόνα 11 : SMO για τον υπολογισμό γωνίας $\theta$ του δρομέα.....	23
Εικόνα 12: PI ελεγκτής με τοπολογία σειράς.....	26
Εικόνα 13 : Διάγραμμα οντοτήτων DRV8301 EVM.....	30
Εικόνα 14: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με χρήση σφονδύλου.....	33
Εικόνα 15: Οχήματα αγώνων με σύστημα ανάκτησης ενέργειας με χρήση σφονδύλου.....	34
Εικόνα 16: Αρχή ανάκτησης ενέργειας με χρήση υδραυλικών συστημάτων.....	35
Εικόνα 17: Κίνηση με χρήση υδραυλικών συστημάτων.....	35
Εικόνα 18: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με χρήση συμπίεσης αέρα.....	37
Εικόνα 19: Ανάκτηση ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτών.....	38
Εικόνα 20: Υπερπυκνωτές Maxwell BPAK0052.....	39
Εικόνα 21: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας οχήματος ER14.....	40
Εικόνα 22: Τοπολογία Ανάκτησης ενέργειας όχημα με κυψέλες καυσίμου.....	41
Εικόνα 23: Τοπολογία ανάκτησης και διαχείρισης ενέργειας του οχήματος ER14.....	42
Εικόνα 24: Ηλεκτρονόμος Omron G8P-1A4P.....	43

Εικόνα 25: Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων για πολιτική επιπέδου φόρτισης.....	46
Εικόνα 26: ΜΠΚ για έλεγχο ταχύτητας.....	49
Εικόνα 27: Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων για συγκεκριμένο τρόπο οδήγησης οδηγού.....	52
Εικόνα 28: Όχημα ER14.....	55
Εικόνα 29: Διαδρομή πειράματος πολιτικής διαχείρισης τάσης λειτουργίας υπερπυκνωτών.....	56
Εικόνα 30: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου πολιτικής διαχείρισης τάσης λειτουργίας υπερπυκνωτών.....	57
Εικόνα 31: Σύγκριση επιτάχυνσης προκαθορισμένη από το χρήστη.....	58
Εικόνα 32: Διάγραμμα χρόνου- ισχύος, ταχύτητα για εισαγωγή υπερπυκνωτών.....	59
Εικόνα 33: Διάγραμμα Χρόνου- Τάσης, ταχύτητα για εισαγωγή υπερπυκνωτών.....	60
Εικόνα 34: Διαδρομή για επιλογή πολιτικής τρόπου οδήγησης.....	61
Εικόνα 35: Διάγραμμα χρόνου- ταχύτητας, πολιτική οδήγησης.....	62
Εικόνα 36: Διάγραμμα χρόνου-ισχύος, πολιτική οδήγησης.....	63

## Παράρτημα Πινάκων

Πίνακας 1 : Τιμή αντίστασης Rs.....	25
Πίνακας 2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Maxwell BPAK0052.....	40
Πίνακας 3: Περιγραφή καταστάσεων ΜΠΚ.....	47
Πίνακας 4: Περιγραφή Συμβόλων ΜΠΚ.....	48
Πίνακας 5: Περιγραφή καταστάσεων Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων για έλεγχο ταχύτητας.....	50
Πίνακας 6: Περιγραφή Συμβόλων ΜΠΚ για έλεγχο ταχύτητας.....	51
Πίνακας 7: Περιγραφή ΜΠΚ για συγκεκριμένο τρόπο οδήγησης.....	53
Πίνακας 8: Περιγραφή Συμβόλων ΜΠΚ για συγκεκριμένο τρόπο οδήγησης .....	54
Πίνακας 9: Σύγκριση ενέργειας για πολιτική οδήγησης.....	63



## **Περίληψη**

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με την εφαρμογή διανυσματικού ελέγχου ηλεκτροκινητήρα μόνιμου μαγνήτη και καθορισμού των παραμέτρων ελέγχου του. Επίσης μελετά την εξέλιξη ενός πρωτότυπου συστήματος ανάκτησης κινητικής ενέργειας που αναπτύχθηκε από την ομάδα TUCer του πολυτεχνείου Κρήτης. Εφαρμόστηκε εξελιγμένη πολιτική διαχείρισης της ανακτώμενης αυτής ενέργειας ενώ πειραματικά αποτελέσματα καθορίζουν τις αναγκαίες παραμέτρους της προτεινόμενης πολιτικής.

## Εισαγωγή

### Πρόλογος

Οι ανάγκες μείωσης κατανάλωσης ενέργειας ειδικότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι πιο εμφανείς από ποτέ. Οι συμβατικές μέθοδοι, “downsize-turbocharge” κατά τις οποίες μειώνεται το μέγεθος της ΜΕΚ και εισάγεται υπεσυμπιεστής δείχνουν πως δεν αποτελούν λύση στο πρόβλημα αφού η ανάγκη για παραμονή στα ορυκτά καύσιμα παραμένει. Ένας πιο “πράσινος” τρόπος μείωσης της συνολικής κατανάλωσης είναι η ανάκτηση ενός μέρους της κινητικής ενέργειας του οχήματος κατά την πέδη του η οποία αλλιώς θα χανόταν ως θερμική ενέργεια κατά το φρενάρισμα του οχήματος. Εκτός από αυτό, η είσοδος ηλεκτροκινητήρων στα συμβατικά οχήματα, έχοντας από κατασκευής τους 2-3 φορές μεγαλύτερη απόδοση από τις ΜΕΚ, φέρνει στο προσκήνιο την ανάγκη για την πιο αποδοτική τους οδήγηση.

Με γνώμονα αυτά, η ομάδα TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης, η οποία δραστηριοποιείται στο σχεδιασμό και κατασκευή πρωτότυπων οχημάτων από το 2007, κατασκεύασε ένα ηλεκτρικό όχημα τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Ως συνέχεια αυτού του επιχειρήματος, η ομάδα ασχολήθηκε και στην ανάπτυξη ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας. Εξέλιξη του συστήματος αυτού αποτελεί μια πολιτική διαχείρισης της ανακτώμενης ενέργειας. Τέλος, ο καθορισμός των βέλτιστων παραμέτρων ελέγχου του ηλεκτρικού κινητήρα συμβάλει στη συνολική μείωση κατανάλωσης ενέργειας του ηλεκτρικού οχήματος.

## Δομή εργασίας

Η εργασία είναι δομημένη με τον ακόλουθο τρόπο:

Στο *Κεφάλαιο 1* αναφέρεται μια συνοπτική περιγραφή των ηλεκτρικών κινητήρων.

Στο *Κεφάλαιο 2* περιγράφονται οι τρόποι ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων όπως επίσης και η μεθοδολογία ελέγχου του ηλεκτρικού κινητήρα του οχήματος ER14.

Στο *Κεφάλαιο 3* αναφέρονται οι τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας σε οχήματα. Επίσης περιγράφεται το σύστημα ανάκτησης ενέργειας που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για το ηλεκτρικό όχημα ER14.

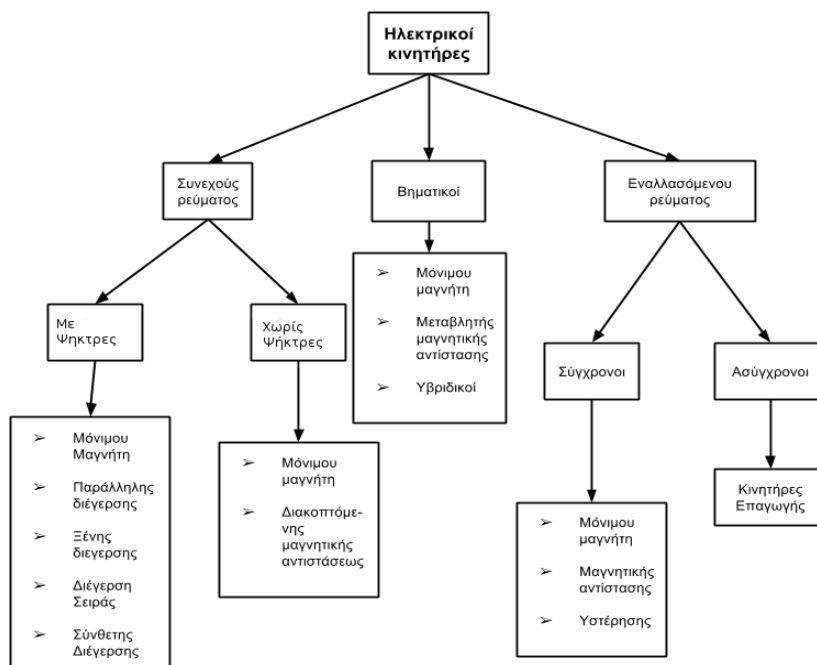
Στο *Κεφάλαιο 4* περιγράφεται η μεθοδολογία διαχείρισης ενέργειας του οχήματος ER14 όπως επίσης και οι επιμέρους πολιτικές διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση μιας συνολικής πολιτικής μείωσης κατανάλωσης.

Στο *Κεφάλαιο 5* εμφανίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των επιμέρους πολιτικών διαχείρισης ενέργειας που εφαρμόστηκαν στο όχημα ER14 καθώς και η επιλογή των παραμέτρων που μειώνουν τη συνολική κατανάλωση του οχήματος.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία όπως επίσης και παρατηρήσεις και μελλοντικές προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος ανάκτησης και διαχείρισης ενέργειας.

## Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρικοί Κινητήρες

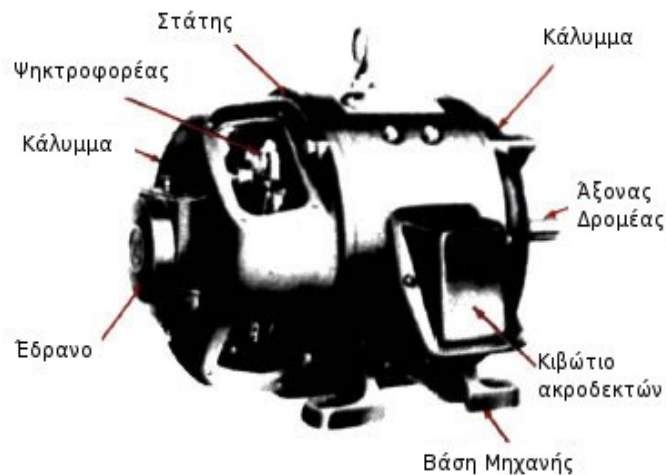
Οι ηλεκτρικοί κινητήρες καταναλώνουν σήμερα σχεδόν τα 2/3 της ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία και συνολικά το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας κάθε κράτους [1], συνεπώς, λόγω του υψηλού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται σημαντικές προσπάθειες αύξησης της απόδοσης τους. Η βασική αρχή λειτουργίας και κατασκευής τους παραμένει σχεδόν ίδια για τουλάχιστον μισό αιώνα και η μεγαλύτερη βαρύτητα έχει πέσει στην εύρεση τεχνικών ελέγχου που ελαχιστοποιούν τις απώλειες του κινητήριου συστήματος. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να οδηγήσουν τον κινητήρα να λειτουργεί με μέγιστη απόδοση κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Με τη χρησιμοποίηση των σύγχρονων ηλεκτρονικών ισχύος, η εφαρμογή των μεθόδων αυτών είναι αποδοτική και οικονομικότερη από τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των μηχανών. Αρχικά, το ενδιαφέρον για την κατασκευή αποδοτικών κινητήρων στράφηκε στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και πιο πρόσφατα στους επαγωγικούς. Στη συνέχεια, με την εμφάνιση των νέων σιδηρομαγνητικών υλικών, το ενδιαφέρον στράφηκε στους σύγχρονους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι κυριαρχούν στον σχεδιασμό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Τα διάφορα είδη των ηλεκτρικών κινητήρων φαίνονται στην Εικόνα 1



Εικόνα 1: Είδη ηλεκτρικών κινητήρων [2]

## 1.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

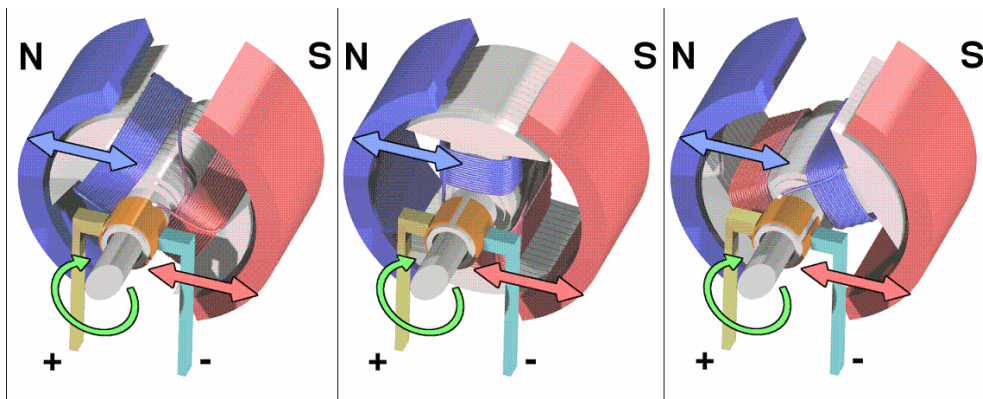
Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούν για την τροφοδοσία τους συνεχές ρεύμα, όπως φανερώνεται και από την ονομασία τους. Κατασκευαστικά αποτελούνται από ένα ακίνητο μέρος, τον στάτη, και ένα περιστρεφόμενο, τον δρομέα. Ο άξονας κίνησης της μηχανής είναι επέκταση του δρομέα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 [3].



Εικόνα 2: Κινητήρας Συνεχούς ρεύματος

Η αρχή λειτουργίας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος βασίζεται στις δυνάμεις αλληλεπίδρασης που υπάρχουν μεταξύ δύο μαγνητικών υλικών, συγκεκριμένα ενός μόνιμου μαγνήτη και του τροφοδοτημένου με συνεχές ρεύμα τυλίγματος διέγερσης, ο οποίος συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης.

Η τοποθέτηση του μόνιμου μαγνήτη και του τυλίγματος διέγερσης είναι τέτοια, ώστε σε κάθε στιγμή οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ τους να δημιουργούν μια ροπή που θα τείνει να περιστρέψει τον δρομέα κατά την επιθυμητή κατεύθυνση. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει η ροή του ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης να αλλάζει φορά, ανάλογα με τη θέση του τυλίγματος ως προς τον μόνιμο μαγνήτη. Αυτό γίνεται με τη χρήση του συλλέκτη και των ψήκτρων. Ο συλλέκτης περιστρέφεται μαζί με τον δρομέα ενώ οι ψήκτρες παραμένουν σταθερές. Έτσι ανάλογα με τη θέση του συλλέκτη ως προς τις ψήκτρες εναλλάσσεται η ροή ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης. Παρόλο που η μηχανή τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα, το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Στην Εικόνα 3 φαίνεται ο συλλέκτης, ο οποίος περιστρέφεται, ενώ οι δύο ακροδέκτες με την τροφοδοσία είναι οι ακίνητες ψήκτρες .



Εικόνα 3: Λειτουργία DC κινητήρα

Υπάρχουν διάφορα είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Το τύλιγμα διέγερσης μπορεί να βρίσκεται τοποθετημένο είτε στον στάτη είτε στον δρομέα. Οι συμβατικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και μόνιμο μαγνήτη, των οποίων η λειτουργία περιγράφηκε προηγουμένως, ήταν οι πρώτοι που κατασκευάστηκαν. Αργότερα δημιουργήθηκαν και κινητήρες συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα αντί μόνιμου μαγνήτη. Σε αυτούς το τύλιγμα διέγερσης μπορεί να τοποθετηθεί σε σειρά ή παράλληλα με το τύλιγμα του τυμπάνου. Οι κινητήρες με διέγερση σε σειρά είναι σχετικά απλοί στην κατασκευή τους, αξιόπιστοι ενώ αποδίδουν τη μέγιστη ισχύ τους σε μηδενικές στροφές. Το τελευταίο πλεονέκτημα αποτελεί και το μειονέκτημά τους αφού σε υψηλότερες στροφές απαιτείται η ύπαρξη κιβωτίου ταχυτήτων για να παραχθεί αρκετή ροπή. Οι κινητήρες με ξένη διέγερση είναι πιο πολύπλοκοι στην κατασκευή τους, όμως δεν απαιτείται αναγκαστικά η ύπαρξη κιβωτίου ταχυτήτων. [4]

## 1.2 Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

### 1.2.1 Ασύγχρονοι Κινητήρες

Οι ασύγχρονοι κινητήρες αποτελούν την πιο διαδεδομένη επιλογή σε βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές. Αποτελούνται από ένα τύλιγμα, μονοφασικό ή πολυφασικό, τοποθετημένο στον στάτη και τον δρομέα. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η επαγωγή ρευμάτων. Τα επαγωγικά αυτά ρεύματα αυτά δημιουργούνται από τη σχετική διαφορά της ταχύτητας μεταξύ του στρεφόμενου πεδίου και του δρομέα. Συγκεκριμένα τροφοδοτώντας το τύλιγμα του στάτη με ρεύμα δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργεί ρεύματα από επαγωγή στον δρομέα. Τα ρεύματα αυτά, με τη σειρά τους δημιουργούν ένα διαφορετικό μαγνητικό πεδίο. Τα δύο μαγνητικά πεδία, του στάτη και του δρομέα, αλληλεπιδρούν και δημιουργούν δυνάμεις και κατ' επέκταση ροπή, η οποία περιστρέφει τον δρομέα.

Στα κύρια πλεονεκτήματα τους συγκαταλέγονται η απλή και στιβαρή κατασκευή τους, το χαμηλό κόστος και η έλλειψη τακτικής συντήρησης. Οι ασύγχρονοι κινητήρες συναντώνται σε διάφορες μορφές ανάλογα με τη φύση της εφαρμογής τους. Παρόλο που η σχεδίαση τους είναι απλούστερη σε σύγκριση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, ο έλεγχος της ταχύτητας και ροπής τους απαιτεί βαθύτερη γνώση του σχεδιασμού και των χαρακτηριστικών της μηχανής.

Η ιδιαιτερότητα τους είναι ότι δεν μπορούν να εκκινήσουν κατά τη σύνδεση τους στο δίκτυο. Στο εσωτερικό της μηχανής δημιουργούνται δύο πεδία που στρέφονται με αντίθετη φορά το ένα από το στάτη και το δεύτερο από το δρομέα λόγω επαγωγής τάσης σε αυτόν, η συνιστώσα των οποίων παραμένει μηδενική και δεν είναι ικανή να δημιουργήσει ροπή εκκινήσεως. Απαιτείται λοιπόν ένας μηχανισμός που θα μπορέσει να στρέψει αρχικά τη μηχανή. Όταν ο δρομέας αποκτήσει μια ταχύτητα, ο κινητήρας μπορεί να διατηρήσει την περιστροφή του πεδίου του προς μία κατεύθυνση και να παράγει ροπή.

### 1.2.2 Σύγχρονοι Κινητήρες

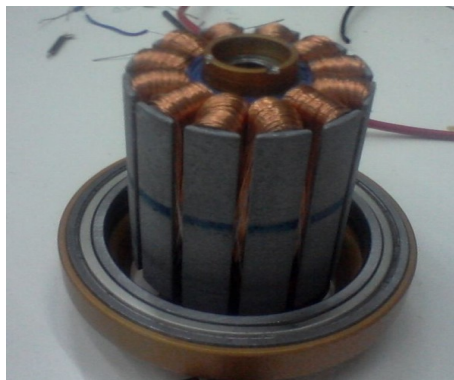
Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας η ταχύτητα περιστροφής τους είναι ίση με την ταχύτητα του πεδίου του στάτη (σύγχρονη ταχύτητα), Εξίσωση 1.

$$N_s = \frac{120 * f}{p} \quad (1)$$

Όπου  $N_s$  η ταχύτητα περιστροφής τους,  $f$  η ηλεκτρική συχνότητα του πεδίου του στάτη,  $p$  ο αριθμός των πόλων του κινητήρα.

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία σύγχρονων κινητήρων είναι αυτή του Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) ο οποίος χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες αντί περιέλιξης για τη διέγερση του πεδίου του δρομέα.

Οι PMSM αποτελούν ελκυστική τεχνολογία για τη μελλοντική λύση συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης λόγω του εξαιρετικά υψηλού βαθμού απόδοσής τους, της μεγάλης πυκνότητας ισχύος τους, της μειωμένης κυμάτωσης ροπής και του χαμηλού ακουστικού θορύβου τους. Ωστόσο το κόστος τους παραμένει υψηλό, εξ αιτίας του κόστους των μόνιμων μαγνητών και την πολύπλοκη κατασκευή του δρομέα, προκειμένου να συγκρατηθούν οι μόνιμοι μαγνήτες σε υψηλές ταχύτητες. Επιπλέον, οι PMSM είναι ευπαθείς στις υψηλές θερμοκρασίες, που μπορούν να απομαγνητίσουν τους μαγνήτες προσωρινά ή μόνιμα. Στην Εικόνα 4 φαίνεται ένας τριφασικός κινητήρας χωρίς ψήκτρες, με 12 πόλους στον στάτη και 4 πόλους στο δρομέα. Ο δρομέας είναι τοποθετημένος στο εξωτερικό κομμάτι του κινητήρα, τοπολογία που βοηθάει τους μόνιμους μαγνήτες σε υψηλές στροφές να μην αποκολληθούν και εισέλθουν στο μαγνητικό διάκενο (air-gap) λόγω της φυγόκεντρης δύναμης.



Εικόνα 4: Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη



## Κεφάλαιο 2: Έλεγχος Ηλεκτρικών Κινητήρων

### 2.1 Βαθμωτός Έλεγχος

Μια από τις πρώτες και πιο κλασικές μεθόδους ελέγχου που εφαρμόστηκαν, κυρίως λόγω της απλής και εύκολης λειτουργίας του, είναι ο βαθμωτός ή μονόμετρος έλεγχος (Scalar Control). Ο έλεγχος αυτός, όπως φανερώνει και το όνομα του, συνίσταται στον έλεγχο μόνο του μέτρου (πλάτους) των ελεγχόμενων μεταβλητών, αγνοώντας τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου του ελεγχόμενου συστήματος. Έτσι το μέτρο της τάσης τροφοδοσίας της μηχανής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μαγνητικής ροής εντός της μηχανής και η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροπής της μηχανής και συνεπώς της ταχύτητάς της. Η πλέον καθιερωμένη τεχνική που εμπίπτει σε αυτή την κατηγορία είναι ο έλεγχος με προδιαγεγραμμένο λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας ( $V/f$ ).

Κύριο χαρακτηριστικό και ταυτόχρονα μειονέκτημα του ελέγχου αυτού είναι ότι η ροπή και η μαγνητική ροή διακένου ελέγχονται από κοινού, μέσω του λόγου τάσης προς συχνότητα και δεν υπάρχει η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου. Για παράδειγμα σε έναν ελεγκτή όπου διατηρείται σταθερή αναλογία τάσης προς συχνότητα (σταθερή μαγνητική ροή), αν αυξηθεί απότομα η ταχύτητα αναφοράς τότε η μαγνητική ροή τείνει να μειωθεί. Όμως η μεταβολή της μαγνητικής ροής με τη σειρά της αυξάνει την τάση. Ωστόσο, θα μεσολαβήσει ένα σημαντικό χρονικό διάστημα μέχρι να μπορέσει ο κινητήρας να αναπτύξει ροπή και να επιταχυνθεί έως ότου φτάσει την επιθυμητή ταχύτητα. Συνεπώς δεν υπάρχει καλή δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ώστε να επιτευχθούν γρήγορες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις και να ακολουθηθούν ικανοποιητικά οι μεταβολές των σημάτων αναφοράς. Αποτέλεσμα αυτού είναι και η αδυναμία ουσιαστικά του βαθμωτού ελέγχου να λειτουργήσει σε έλεγχο θέσης. Στις μέρες μας ο βαθμωτός έλεγχος χρησιμοποιείται μόνο σε απλές εφαρμογές όπου λόγω της εύκολης και φθηνής υλοποίησης του υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων.

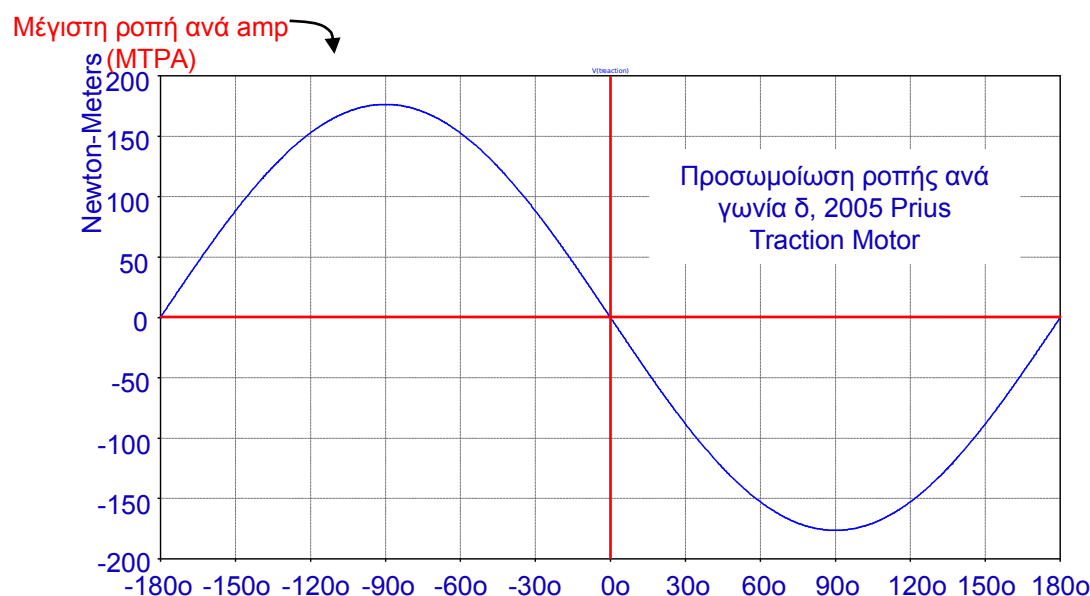
## 2.2 Διανυσματικός Έλεγχος

Ο διανυσματικός έλεγχος (Vector control ή Field Oriented Control- FOC) μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον ξεχωριστό έλεγχο της ροπής της (άρα και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα) και της μαγνητικής ροής του κινητήρα. Αυτή η ιδιότητα αποτελεί το κυριότερο πλεονέκτημα του διανυσματικού ελέγχου αφού επιτρέπει τον έλεγχο του PMSM σαν να ήταν μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

Η ροπή που παράγεται σε έναν σύγχρονο κινητήρα ισούται με το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2

$$T_{em} = \vec{B}_s \times \vec{B}_r \quad (2)$$

Αυτή η έκφραση δείχνει ότι η μέγιστη ροπή παράγεται όταν τα διανύσματα των δυο αυτών μαγνητικών πεδίων είναι κάθετα μεταξύ τους. Στην Εικόνα 5 φαίνεται το διάγραμμα ροπής/φάσης στάτη-δρομέα σε προσομοίωση ηλεκτρικού κινητήρα που χρησιμοποιείται στο Toyota Prius 2005 [5].



Εικόνα 5: Διάγραμμα Ροπής/φάσης στάτη-δρομέα

Η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου, όπως υποδηλώνει και το όνομα της ελέγχει διανύσματα των ρευμάτων που διαρρέουν το στάτη κάθε χρονική στιγμή. Αλλάζοντας το σύστημα αναφοράς από χρονικά εξαρτώμενο τριών μεταβλητών σε χρονικά ανεξάρτητο δύο μεταβλητών μέσω των μετασχηματισμών Clarke και Park [6] αντίστοιχα όπως φαίνεται στη συνέχεια είναι δυνατόν να ελεγχθεί ξεχωριστά η ροπή της οποίας το διάνυσμα είναι συγγραμμικό του q-άξονα και του μαγνητικού πεδίου το διάνυσμα του οποίου είναι συγγραμμικό του d-άξονα.

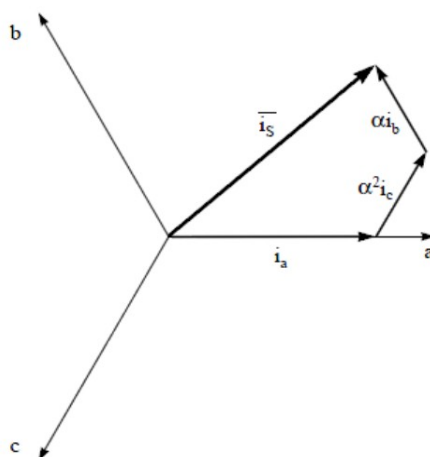
Σε τριφασικά συστήματα, η ένταση των ρευμάτων και τα μαγνητικά πεδία των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος μπορούν να αναλυθούν με βάση σύνθετα χωρικά διανύσματα της μορφής που φαίνεται στην Εξίσωση 3.

$$\bar{i}_s = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c \quad (3)$$

Όπου:

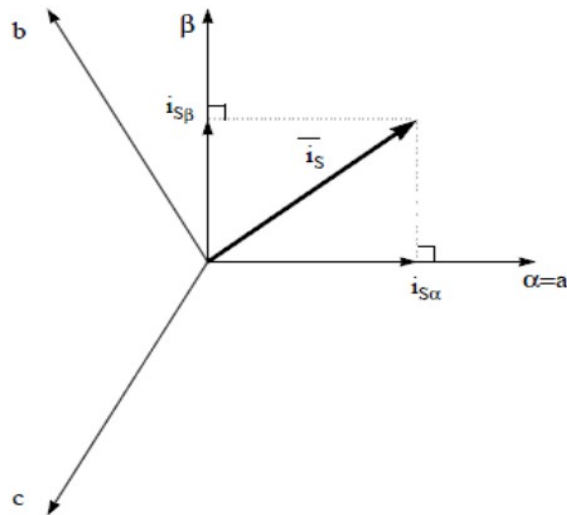
- $\bar{i}_s$  το σύνθετο διάνυσμα ρεύματος στάτη.
- $i_a, i_b, i_c$  τα στιγμιαία ρεύματα κάθε φάσης στο στάτη.
- $\alpha = e^{(j\frac{2}{3}\pi)}, \alpha^2 = e^{(j\frac{4}{3}\pi)}$  Οι χωρικοί τελεστές.

Στην Εικόνα 6 φαίνονται τα χωρικά διανύσματα της έντασης ρεύματος του στάτη όπως αναλύθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 6: Χωρικά διανύσματα έντασης ρεύματος του στάτη

Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Clarke ή αλλιώς “μετασχηματισμό άλφα βήτα (αβγ)” μπορούμε να μεταφερθούμε από το σύστημα συντεταγμένων τριών αξόνων a,b,c των φάσεων του κινητήρα, στο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων α,β όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.

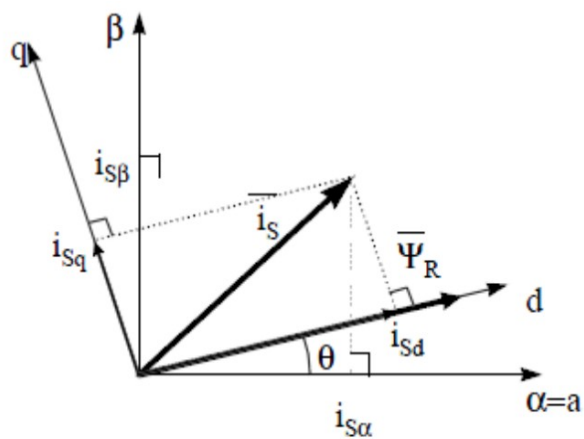


Εικόνα 7: Μετασχηματισμός Clarke

Όπου:

- $i_{s\alpha} = i_{\alpha}$
- $i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b$

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα παραμένει χρονικά εξαρτημένο. Για να γίνει χρονικά ανεξάρτητο πρέπει να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός Park. Στην Εικόνα 8 φαίνεται το διάνυσμα της έντασης απεικονισμένο πριν και μετά το μετασχηματισμό. Με τον μετασχηματισμό Park, το σταθερό σύστημα συντεταγμένων γίνεται στρεφόμενο και για την ακρίβεια ευθυγραμμισμένο με τον άξονα d που αποτελεί το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου του δρομέα.



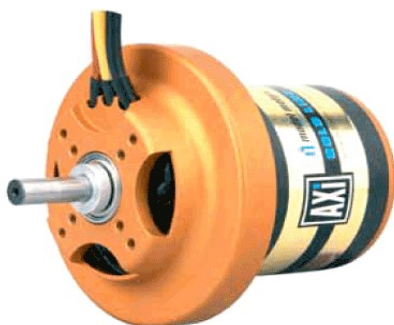
Εικόνα 8: Μετασχηματισμός Park

$$i_{sd} = i_{s\alpha} \cos\theta + i_{s\beta} \sin\theta \quad (4)$$

$$i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin\theta + i_{s\beta} \cos\theta \quad (5)$$

## 2.3 Έλεγχος κινητήρα Axi 5360/20

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο είναι ο Axi 5360/20 gold line που είναι PMSM με τα εξής χαρακτηριστικά και φαίνεται στην Εικόνα 9:

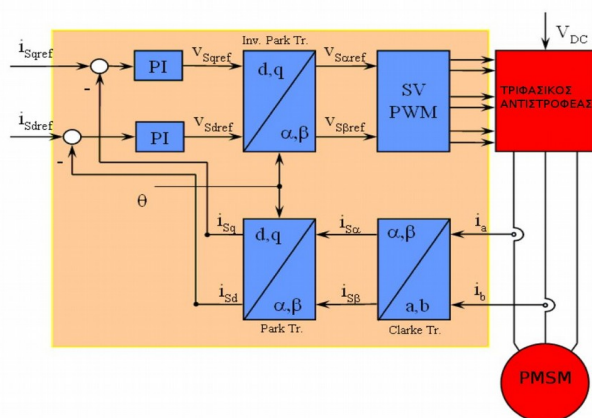


Εικόνα 9: Κινητήρας Axi 5360/20

- Μέγιστη απόδοση 94%
- Αριθμός πόλων δρομέα: 14
- Αριθμός πόλων στάτη: 12
- Βάρος: 1350g
- Μέγιστο ρεύμα: 60 A

Ο ηλεκτροκινητήρας αυτός επιλέχθηκε λόγω της υψηλής του απόδοσης σε μεγάλο εύρος λειτουργίας, του μικρού του βάρους και της αξιόπιστης κατασκευής του.

Εφαρμόστηκε διανυσματικός έλεγχος με τη διαδικασία που φαίνεται στην Εικόνα 10:



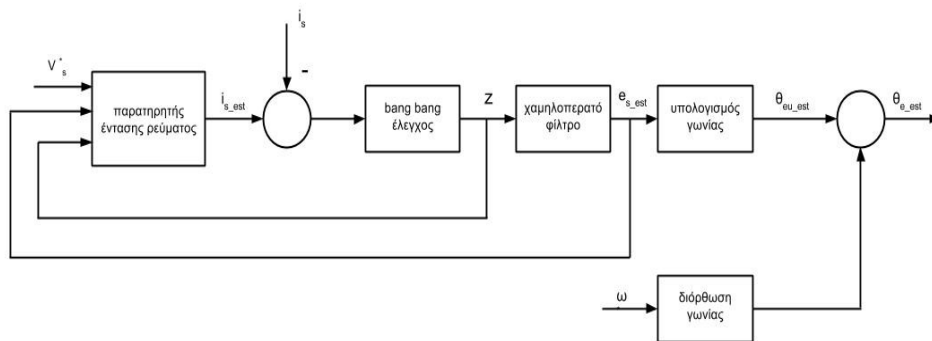
Εικόνα 10: Διανυσματικός έλεγχος PMSM

Αρχικά υπολογίζονται ρεύματα δύο φάσεων. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μετασχηματισμός Clarke και Park αντίστοιχα ούτως ώστε να αναχθούν τα ρεύματα στο κινούμενο πλαίσιο d,q (Εικόνα 8) όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.2.2. Τα διανύσματα αυτά συγκρίνονται με τα επιθυμητά διανύσματα-στόχος  $i_{sqref}$ ,  $i_{sdref}$ . Η ιδιότητα των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη να έχουν το μαγνητικό πεδίο τους “σύγχρονο” με την κίνηση του δρομέα απλοποιεί τον έλεγχο αφού το  $i_{sdref}$  τίθεται ίσο με μηδέν. Έτσι, για τον έλεγχο ταχύτητας του ηλεκτροκινητήρα, σαν είσοδος από τον χρήστη χρειάζεται μόνο η απαιτούμενη ροπή  $i_{qref}$ . Η έξοδος από τους PI ελεγκτές είναι οι απαιτούμενες τάσεις  $v_{sqref}$ ,  $v_{qdref}$  η οποίες μέσω του αντιστροφου μετασχηματισμού Park αποτελούν τις συνιστώσες του διανύσματος τάσης του στάτη. Τέλος, με τη μέθοδο διαμόρφωσης διανύσματος τάσης (space vector modulation [7]) δίνονται στον αντιστροφέα τάσης τα κατάλληλα σήματα οδήγησης του ηλεκτροκινητήρα.

### 2.3.1 Προσδιορισμός Θέσης δρομέας

Η γνώση του πεδίου του δρομέα αποτελεί τον πυρήνα του διανυσματικού ελέγχου. Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα του δρομέα ισούται με την ταχύτητα του πεδίου οπότε η γωνία  $\theta$ , δηλαδή η θέση του πεδίου του δρομέα, υπολογίζεται με αισθητήρες θέσης ή με τεχνικές που δε χρησιμοποιούν αισθητήρες. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, για οικονομικούς αλλά και για λόγους απλότητας του ολοκληρωμένου συστήματος επιλέχθηκε να μη χρησιμοποιηθούν αισθητήρες αλλά παρατηρητής με ολίσθηση επί επιφανείας [8] (sliding mode observer, SMO).

Ο παρατηρητής με ολίσθηση επί επιφανείας αποτελείται από έναν παρατηρητή έντασης ρεύματος βασιζόμενος στα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτροκινητήρα και από έναν ελεγκτή τύπου “bang-bang” που οδηγείται από τη διαφορά της εκτιμώμενης και πραγματικής έντασης του ρεύματος. Στην Εικόνα 11 φαίνεται σχηματικά ο SMO για τον υπολογισμό της γωνίας  $\theta$ .



Εικόνα 11 : SMO για τον υπολογισμό γωνίας  $\theta$  του δρομέα

Ο σκοπός του bang-bang ελέγχου  $z$  είναι να οδηγεί την εκτίμηση του σφάλματος του ρεύματος στο μηδέν που επιτυγχάνεται με τη σωστή επιλογή του  $k$ . Στην Εξίσωση 6 φαίνεται η μαθηματική διατύπωση του bang-bang ελέγχου.

$$z = k \operatorname{sign}(i_{s\_est} - i_s) \quad (6)$$



### 2.3.2 Υπολογισμός Αντίστασης Στάτη

Κατά την εκκίνηση του ηλεκτροκινητήρα και ειδικότερα όταν εκκινεί με φορτίο είναι απαραίτητη η γνώση της ακριβούς τιμής της αντίστασης του στάτη  $R_s$ . Η αντίσταση μπορεί να διαφέρει ακόμα και ανάμεσα σε δυο ίδια μοντέλα ηλεκτροκινητήρα οπότε όταν απαιτείται η ακριβής τιμή της, πρέπει να υπολογίζεται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εκτός αυτού, η θερμοκρασία των πηνίων του στάτη παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στην τιμή της αντίστασης. Στο χαλκό, το οποίο είναι το μέταλλο κατασκευής των πηνίων του ηλεκτροκινητήρα η σχέση θερμοκρασίας- αντίστασης περιγράφεται από την Εξίσωση 7, όπου  $\alpha$  χαλκού  $0.00393^\circ \text{C}^{-1}$ .

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (7)$$

Το μοντέλο του ηλεκτροκινητήρα που χρησιμοποιείται για τον διανυσματικό έλεγχο επηρεάζεται από την αντίσταση ιδιαίτερα στις χαμηλές στροφές επειδή η πλειοψηφία της πτώση τάσης μέσα στον ηλεκτροκινητήρα παράγεται από την αντίσταση του στάτη και τη DC συνιστώσα του ρεύματος ( $R_s i_s$ ).

Η μέτρηση της τιμής της αντίστασης του στάτη γίνεται με δυο τρόπους. Είτε ακριβώς πριν την εκκίνηση του ηλεκτροκινητήρα, όπου παραμένει ακίνητος, εγχύνεται συνεχές ρεύμα (DC) στον  $i_d$  άξονα, είτε όταν ο ηλεκτροκινητήρας περιστρέφεται, εγχύνεται εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) στον άξονα  $i_d$  και μετράται η τιμή της αντίστασης σε πραγματικό χρόνο.

Η ένταση του ρεύματος μέτρησης πρέπει να είναι αρκετά μικρή για να μην καταστρέψει τα πηνία, αλλά αρκετά μεγάλη για να μπορεί να μετρηθεί. Συνήθως απαιτείται ένα ρεύμα έντασης 5% του μέγιστου ρεύματος του ηλεκτροκινητήρα. Στον διανυσματικό έλεγχο αυτό σημαίνει ότι τι  $i_d$  δεν τίθεται πια μηδέν, άρα το συνολικό ρεύμα που διαπερνά τον κινητήρα δε θα ισούται με  $i_q$  αλλά με  $i_{total}$  σύμφωνα με την Εξίσωση 8.

$$i_{total} = \sqrt{i_q^2 + i_s^2} \quad (8)$$

Στην εφαρμογή μας, για λόγους μείωσης της συνολικής κατανάλωσης του οχήματος, επιλέχθηκε η μέτρηση της αντίστασης του στάτη να γίνεται όταν το όχημα βρίσκεται ακίνητο.

Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι τιμές της αντίστασης  $R_s$  σε μια κλειστή διαδρομή μήκους 1.626 m στην πίστα Ahooy του Rotterdam όπως μετρήθηκε κατά την προβλεπόμενη στάση του οχήματος κατά την ολοκλήρωση ενός γύρου.

Αριθμός Γύρου	Τιμή Αντίστασης $R_s$ (Ohm)
1	0.02655454
2	0.02490871
3	0.02645633
4	0.02667657
5	0.02621526

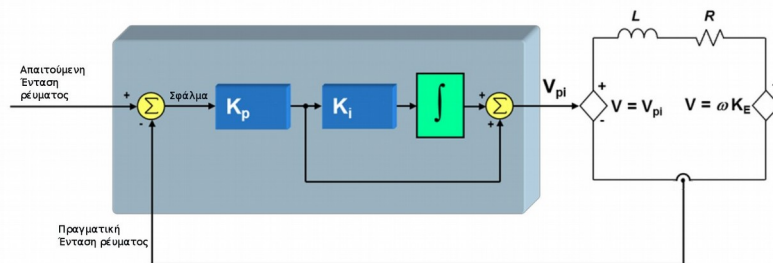
*Πίνακας 1 : Τιμή αντίστασης  $R_s$*

Οι διαφορές στην τιμή της αντίστασης, αν και μικρές, είναι ικανές να μην αφήνουν τον αλγόριθμο ελέγχου να λειτουργεί σωστά και κατά συνέπεια υπάρχει κίνδυνος ακόμα και μη εκκίνησης του οχήματος.

### 2.3.3 Προσδιορισμός σταθερών PI ελέγχου

Στις τεχνικές έλεγχου των ηλεκτρικών κινητήρων, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ο έλεγχος γίνεται μέσω αναλογικού-ολοκληρωτικού (PI) ελεγκτή χωρίς να απαιτείται ο διαφορικός όρος (PID). Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχει ένας πραγματικός πόλος στο σύστημα όπως θα δειχθεί στη συνέχεια. Στις εφαρμογές αυτοκίνησης ο ελεγκτής που πρέπει να σχεδιαστεί συνηθίζεται να είναι ελεγκτής ροπής και όχι ταχύτητας. Ο εκάστοτε οδηγός απαιτεί από το όχημα συγκεκριμένη ροπή και ο έλεγχος της ταχύτητας γίνεται από τον ίδιο οδηγό μέσω του ταχυμέτρου. Μόνο σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπως cruise control ή speed limiting απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας του ηλεκτροκινητήρα.

Με τη χρήση του διανυσματικού ελέγχου, η απαιτούμενη ροπή είναι ανάλογη με την απαιτούμενη ένταση ρεύματος, για την ακρίβεια με τη συνιστώσα  $i_q$ . Σχεδιάζοντας ένα PI ελεγκτή σε συνδεσμολογία σειράς θεωρώντας, τη λειτουργία του κινητήρα ως ένα RL κύκλωμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, μπορούμε να ορίσουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή της σχέσης (9) και της συνάρτηση μεταφοράς έντασης-τάσης της σχέσης (10).



Εικόνα 12: PI ελεγκτής με τοπολογία σειράς

$$PI(s) = \frac{K_p \cdot K_i}{s} + K_p = \frac{K_p \cdot K_i (1 + \frac{s}{K_i})}{s} \quad (9)$$

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{\frac{1}{R}}{(1 + \frac{L}{R}s)} \quad (10)$$

Στην Εξίσωση 9 φαίνεται ότι ο πόλος του συστήματος είναι για  $s=0$  και το μηδενικό για  $s=K_i$ . Ενώ η συνολική απόκριση του συστήματος υποθέτοντας πως ο όρος ανατροφοδότησης (feedback term)  $H(s)$  ισούται με τη μονάδα, φαίνεται στην Εξίσωση 11.

$$G(s) = \frac{PI(s) \cdot \frac{I(s)}{V(s)}}{1 + PI(s) \cdot \frac{I(s)}{V(s)}} \quad (11)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις 9, 10 στην 11 έχουμε:

$$G(s) = \frac{\frac{K_p \cdot K_i (1 + \frac{s}{K_i})}{s} \cdot \frac{\frac{1}{R}}{(1 + \frac{L}{R}s)}}{1 + \frac{K_p \cdot K_i (1 + \frac{s}{K_i})}{s} \cdot \frac{\frac{1}{R}}{(1 + \frac{L}{R}s)}} \quad (12)$$

ή ισοδύναμα:

$$G(s) = \frac{(1 + \frac{s}{K_i})}{(\frac{L}{K_p \cdot K_i})s^2 + (\frac{R}{K_p \cdot K_i} + \frac{1}{K_i})s + 1} \quad (13)$$

Όπως φαίνεται από την Εξίσωση 13, ο παρονομαστής είναι δευτέρου βαθμού, που σημαίνει ότι υπάρχουν δύο πόλοι στη συνάρτηση μεταφοράς. Θεωρώντας δύο πραγματικούς αριθμούς C, D θα ορίσουμε τις τιμές τους έτσι ώστε οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς να είναι πραγματικοί. Έστω:

$$\left(\frac{L}{K_p \cdot K_i}\right)s^2 + \left(\frac{R}{K_p \cdot K_i} + \frac{1}{K_i}\right)s + 1 = (1 + Cs)(1 +Ds) \quad (14)$$

Για να υπάρξουν πραγματικοί πόλοι πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των Εξισώσεων 15, 16:

$$\frac{L}{K_p \cdot K_i} = C \cdot D \quad (15)$$

$$\frac{R}{K_p \cdot K_i} + \frac{1}{K_i} = C + D \quad (16)$$

Από την Εξίσωση 16, μπορούμε να θεωρήσουμε σαν C το  $\frac{R}{K_p \cdot K_i}$

και σαν D το  $\frac{1}{K_i}$ . Τελικά, η συνάρτηση μεταφοράς της σχέσης (13)

μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$G(s) = \frac{\left(1 + \frac{s}{K_i}\right)}{\left(1 + \frac{R}{K_p \cdot K_i}s\right)\left(1 + \frac{s}{K_i}\right)} \quad (17)$$

Ο όρος D που επιλέχθηκε όχι μόνο αποτελεί πραγματικό πόλο της συνάρτησης μεταφοράς αλλά ακυρώνει και το μηδενικό της. Έτσι, επιλέγοντας σωστούς όρους σαν C, D όχι μόνο καταλήξαμε σε ένα σύστημα με πραγματικούς πόλους, αλλά το σύστημα αυτό περιέχει μόνο έναν πόλο και κανένα μηδενικό.

Τέλος, έμεινε να προσδιορισθούν τα βάρη  $K_i, K_p$ . Αντικαθιστώντας τα C, D στην Εξίσωση 15 έχουμε:

$$\frac{L}{K_p \cdot K_i} = \frac{R}{K_p \cdot K_i} \cdot \frac{1}{K_i} \Leftrightarrow K_i = \frac{R}{L} \quad (18)$$

Ενώ ο όρος  $K_p$  βρίσκεται με αντικατάσταση στην Εξίσωση 17:

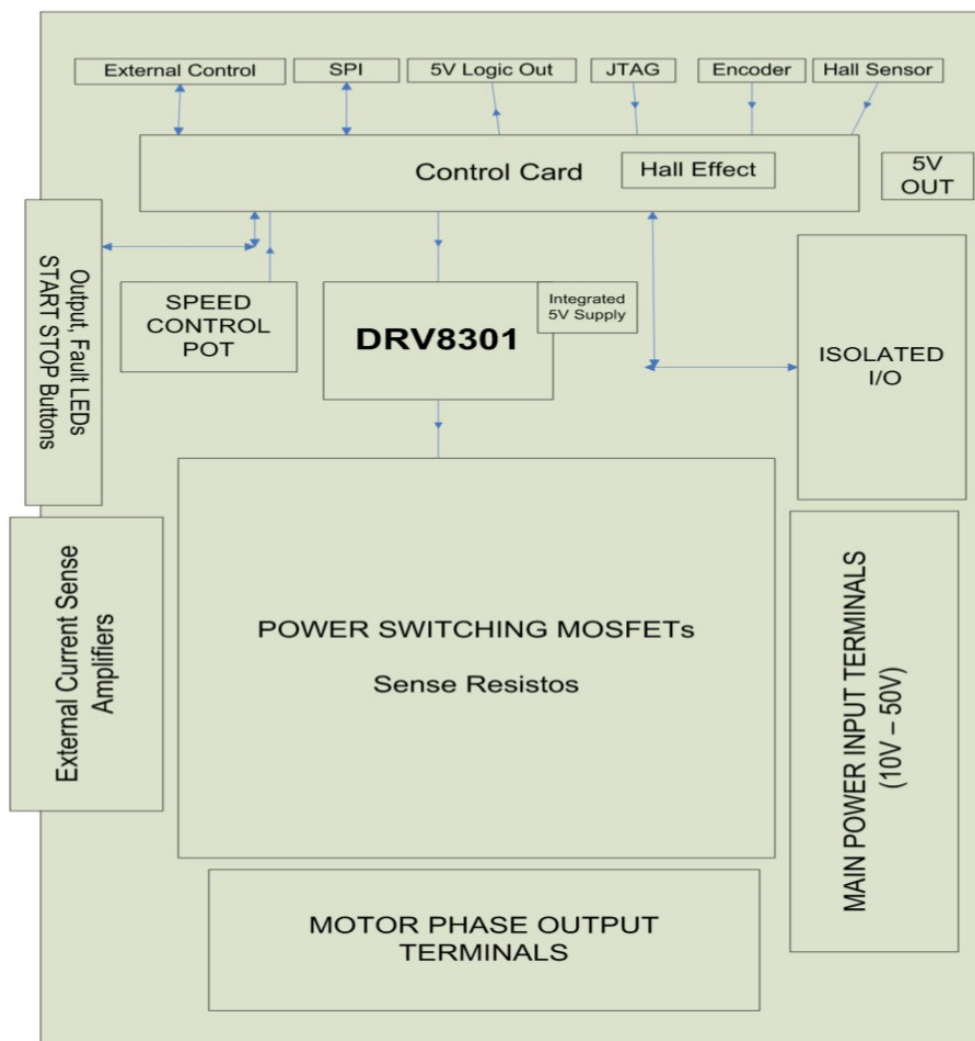
$$G(s) = \frac{1}{\frac{L}{K_p}s + 1} \Rightarrow K_p = L \cdot \text{Εύρος Ζώνης} \quad (19)$$

Συμπερασματικά, ενώ το βάρος  $K_i$  προσδιορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτροκινητήρα, το βάρος  $K_p$  προσδιορίζεται πειραματικά από το χρήστη μεταβάλλοντας το εύρος ζώνης (bandwidth) του συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης, τόσο η καθυστέρηση δειγματοληψίας έχει αρνητικές επιπτώσεις στον ελεγκτή κάνοντας τον πιο ασταθή, δημιουργώντας ταλαντώσεις στην κυματομορφή του ρεύματος.

#### 2.3.4 Υλοποίηση ελεγκτή.

Παλαιότερα, ο έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής των ηλεκτρικών κινητήρων γινόταν με αναλογική τεχνολογία. Σήμερα η εξέλιξη της τεχνολογίας των μικροεπεξεργαστών και των ψηφιακών επεξεργαστών σήματος DSP επιτρέπουν να υλοποιούνται πολύπλοκοι αλγόριθμοι ελέγχου κινητήρων. Επειδή τα σήματα εξόδου του ψηφιακού επεξεργαστή προς τον μετατροπέα ισχύος παράγονται συνήθως με την μορφή παλμών διαμόρφωσης εύρους (PWM), είναι οικονομικότερο αν οι μικροεπεξεργαστές διαθέτουν ενσωματωμένη μονάδα παραγωγής αυτών των σημάτων. Επίσης, για τον έλεγχο των κινητήρων γίνονται μετρήσεις ρεύματος, τάσεων και ταχύτητας, χρειάζονται μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (ADC). [9].

Η DSP μονάδα που χρησιμοποιήθηκε στο όχημα ER14 το οποίο έλαβε και μέρος στο διαγωνισμό Shell Eco Marathon το Μάιο 2014 είναι η TMS320F28069M της εταιρία Texas Instruments. Η μονάδα αυτή τοποθετήθηκε στη εμπορική αναπτυξιακή πλακέτα DRV8301-69M-KIT της ίδιας εταιρίας. Η πλακέτα αυτή περιέχει τον εξοπλισμό των ηλεκτρονικών ισχύος, τους οδηγούς, τους αντιστροφείς και τους αισθητήρες που απαιτούνται για την οδήγηση του ηλεκτροκινητήρα και την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου. Το διάγραμμα οντοτήτων της αναπτυξιακής αυτής πλακέτας φαίνεται στην Εικόνα 13.[10]



Εικόνα 13 : Διάγραμμα οντοτήτων DRV8301 EVM

Εκτός των παραμέτρων για την πραγματοποίηση του διανυσματικού ελέγχου, χρησιμοποιήθηκαν δυο επιπλέον θύρες εισόδου-εξόδου γενικής χρήσεως (GPIO) από τις 54 που διαθέτει η μονάδα επεξεργασίας. Η μια ορίστηκε σαν ψηφιακή θύρα εισόδου η οποία συνδέθηκε σε έναν διακόπτη στη βάση του επιταχυντή. Όταν ο οδηγός απομακρύνει το πόδι του από τον επιταχυντή, για λόγους ασφαλείας, τερματίζεται το πρόγραμμα οδήγησης του κινητήρα. Η δεύτερη θύρα ορίστηκε σαν θύρα εισόδου για τον ορισμό της απαιτούμενης ροπής που απαιτεί ο οδηγός. Η υπολογιστική μονάδα περιέχει 16 κανάλια μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (analog to digital converter). Κάθε ένα έχει ακρίβεια 12-bit και χρόνο δειγματοληψίας 289 ns. Η είσοδος του μετατροπέα παίρνει τιμές [0, 3.3] volts και η έξοδος υπολογίζεται από την Εξίσωση 20 για τιμές (0, 3.3). Για τάση ίση με 0 V παίρνει τιμή 0 ενώ για τάση ίση με 3.3 V παίρνει τιμή 4095.

$$\text{Ψηφιακή Τιμή} = 4096 \times \frac{\text{Τιμή Εισόδου Αναλογική Τάσης} - V_{REFLO}}{3.3} \quad (20)$$

Όπου  $V_{REFLO}$  η τάση αναφοράς γείωσης, στην περίπτωση μας 0.

Με αυτό τον τρόπο, ο επιταχυντής του οχήματος που αποτελείται από μια μεταβλητή ωμική αντίσταση 3 KΩ μπορεί να βαθμονομήσει το εύρος ροπής που παράγει ο ηλεκτροκινητήρας.

Για τον προγραμματισμό του ελεγκτή χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον Code Composer Studio [11].



### Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες Ανάκτησης Ενέργειας

Η ανάκτηση ενέργειας οχημάτων αποτελεί ένα πεδίο μείζονος σημασίας στην αυτοκινητοβιομηχανία στις μέρες μας. Αποσκοπεί στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του οχήματος κατά την επιβράδυνση του σε μια μορφή ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί για μετέπειτα χρήση. Διάφορες τεχνολογίες έχουν εξελιχθεί για το σκοπό αυτό όπως η χρήση σφόνδουλου (flywheel) [12], συμπίεσης αέρα [13], υδραυλικών συστημάτων [14], όμως πιο σύνηθες σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα (HEV) είναι η χρήση του ηλεκτροκινητήρα ως γεννήτρια και η αποθήκευση της ηλεκτρικής αυτής ενέργειας. Για την αποθήκευση έχουν προταθεί αρκετά είδη συσσωρευτών.

Οι μπαταρίες μολύβδου έχουν το μειονέκτημα ότι ο χρόνος ζωής τους μειώνεται για υψηλούς ρυθμούς φόρτισης [15]. Οι μπαταρίες Νικελίου-Μετάλλου Υδριδίου (NiMH) περιέχουν περιορισμούς στη λειτουργία τους σε ακραίες θερμοκρασίες όπως επίσης αποτελούν μια ακριβή λύση χωρίς προοπτικές να μειωθεί το κόστος κατασκευής τους στο άμεσο μέλλον [16]. Οι μπαταρίες ιόντων Λιθίου έχουν την καλύτερη προοπτική από τις συμβατικές μπαταρίες αλλά η διάρκεια ζωής και η απόδοση τους επηρεάζεται από τις υψηλές θερμοκρασίες ( $>40^{\circ}\text{C}$ ) και τη φόρτιση τους σε υψηλές εντάσεις ρεύματος [17].

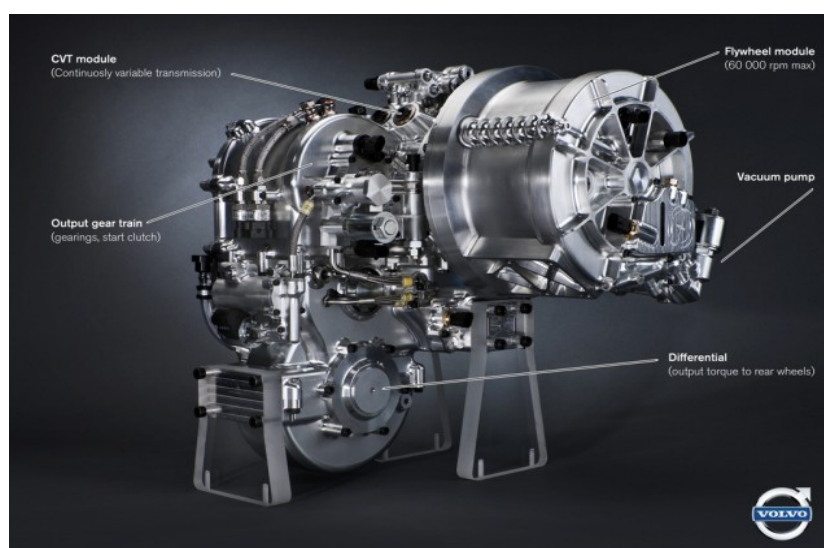
Λύση στα θέματα των συμβατικών ηλεκτρολυτικών συσσωρευτών αποτελούν οι πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας αποκαλούμενοι και υπερπυκνωτές (supercapacitors ή ultracapacitors) αφού με τη χρήση τους δεν αλλάζει η χημική τους σύσταση οπότε έχουν αρκετά μεγαλύτερο κύκλο ζωής. Επίσης, έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος [18] από τις μπαταρίες. Η ανάκτηση ενέργειας στο όχημα ER14 έγινε με τη σχεδίαση και κατασκευή συσκευής φόρτισης-εκφόρτισης υπερπυκνωτών και απομόνωσης της κυψέλης καυσίμου όταν αυτό είναι απαραίτητο.

### 3.1 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση Σφονδύλου

Με αυτή τη μεθοδολογία ανάκτησης ενέργειας, η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε περιστροφική κινητική ενέργεια ενός σφονδύλου. Κατά την επιβράδυνση του οχήματος, η μάζα του σφόνδουλου επιταχύνεται φτάνοντας μεγάλη γωνιακή ταχύτητα, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο την ενέργεια στο σύστημα ως περιστροφική. Από την άλλη, όταν η ενέργεια αυτή απαιτείται από το όχημα, τότε ο σφόνδυλος επιβραδύνεται παρέχοντας ισχύ. Η μετατροπή της κινητική ενέργειας του οχήματος σε κινητική του σφονδύλου πραγματοποιείται είτε με μηχανικό τρόπο (μέσω κιβωτίου συνεχής σχέσης), είτε ηλεκτρικά μέσω μονάδας κινητήρα/ γεννήτριας.

Λόγω της υψηλής ταχύτητας περιστροφής του σφονδύλου η οποία φτάνει τις 60.000 στροφές/λεπτό, ο σφόνδυλος βρίσκεται σε μέσα σε θάλαμο κενού αέρος. Διαφορετικά, η τριβή που αναπτύσσεται μειώνει την απόδοση και κάνει το σύστημα ασταθές [19].

Στην Εικόνα 14 φαίνεται η τεχνολογία ανάκτησης ενέργειας με χρήση σφονδύλου και CVT που ανέπτυξε η αυτοκινητοβιομηχανία Volvo [20].



Εικόνα 14: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με χρήση σφονδύλου

Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας, η χρήση σφονδύλου επιτρέπει τη λειτουργία του σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Εάν χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί ηλεκτροκινητήρα, το επίπεδο της τάσης που παράγει είναι σταθερό και ανεξάρτητο από το φορτίο και το επίπεδο φόρτισης του.

Από την άλλη, η κατασκευή του σφονδύλου με συμβατικά υλικά αυξάνει το βάρος της κατασκευής και την επικινδυνότητα της σε περίπτωση ατυχήματος. Σύνθετα υλικά όπως τα ανθρακονήματα μπορούν να ελαττώσουν αυτά τα μειονεκτήματα όμως αυξάνουν το κόστος κατασκευής κάνοντας αυτή την τεχνολογία ασύμφορη για εισαγωγή σε αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής.

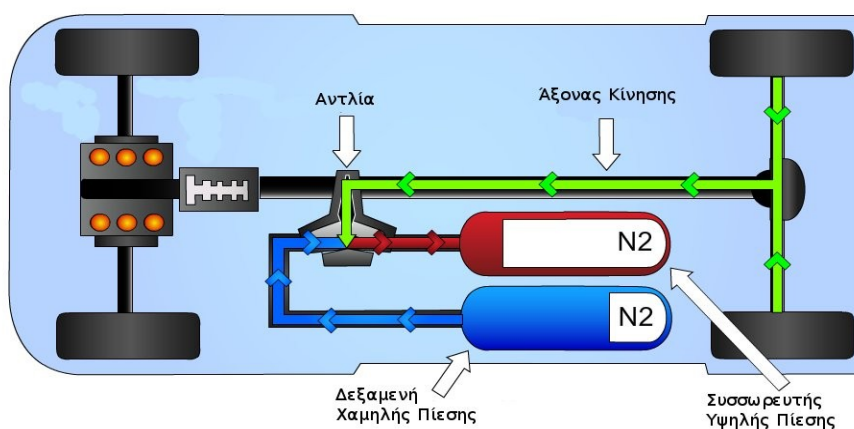
Το ποσό ενέργειας που αποθηκεύεται σε σφόνδυλο μπορεί να απελευθερωθεί πιο γρήγορα από ότι στην μπαταρία. Όμως ο σφόνδυλος έχει μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα από την μπαταρία, περιορίζοντας τη μελλοντική χρήση του στην αυτοκινητοβιομηχανία μόνο σε αυτοκίνητα αστικού κύκλου. Το πλεονέκτημα αυτό όμως της άμεσης απελευθέρωσης της αποθηκευμένης ενέργειας έχει κάνει την τεχνολογία αυτή ελκυστική για αυτοκίνητα αγώνων, Εικόνα 15, που αγωνίζονται στην F1 και στο Le Mans αντίστοιχα.



*Εικόνα 15: Οχήματα αγώνων με σύστημα ανάκτησης ενέργειας με χρήση σφονδύλου*

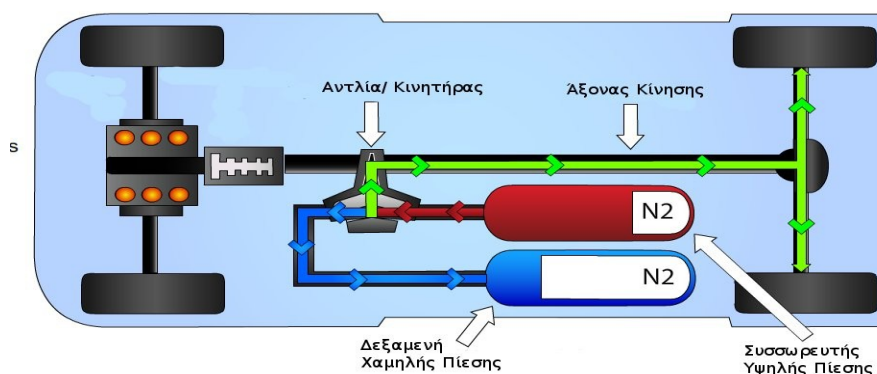
### 3.2 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση Υδραυλικών συστημάτων

Η ανάκτηση ενέργειας σε οχήματα με χρήση υδραυλικών συστημάτων (Hydraulic Hybrid Vehicles, HHV) παρουσιάστηκε το 1972 όταν οι Searl Dunn και Wojciechowski πειραματίστηκαν επιτυχώς στην ανάκτηση ενέργειας με χρήση υδραυλικών σε όχημα και πέτυχαν ανάκτηση πάνω από της μισής κινητικής ενέργειας του οχήματος που διαφορετικά θα χανόταν σε τριβές [21]. Η βασική αρχή αυτού του συστήματος είναι ότι κατά την ανάκτηση ενέργειας, μέσω μιας αντλίας, υγρό μεταφέρεται από μια δεξαμενή χαμηλής πίεσης, σε μια δεξαμενή υψηλής πίεσης που ονομάζεται συσσωρευτής (accumulator), Εικόνα 16.



Εικόνα 16: Αρχή ανάκτησης ενέργειας με χρήση υδραυλικών συστημάτων

Για τη χρησιμοποίηση αυτής της ενέργειας, η αντλία λειτουργεί σαν κινητήρας, δίνοντας ενέργεια στους τροχούς του οχήματος, Εικόνα 17 .



Εικόνα 17: Κίνηση με χρήση υδραυλικών συστημάτων

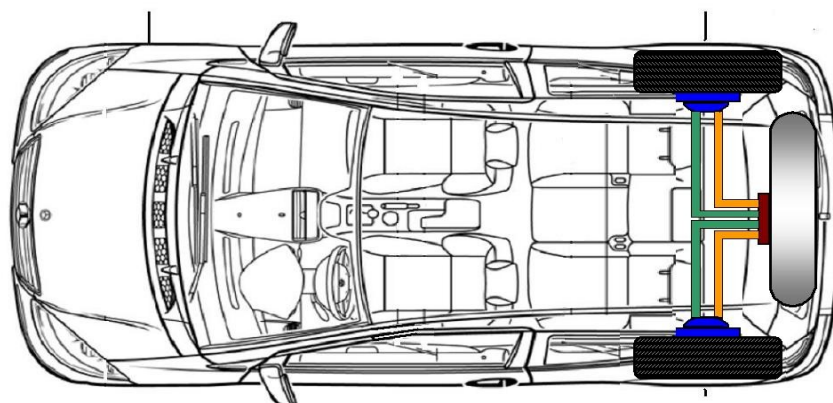
Τα πράσινα βέλη δείχνουν την πορεία της ενέργειας, τα μπλε την κίνηση του ρευστού χαμηλής πίεσης ενώ τα κόκκινα του ρευστού υψηλής πίεσης. Το υδραυλικό αυτό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει και σε σειρά με τη μηχανή εσωτερικής καύσης (MEK) αλλά και παράλληλα με αυτή. Κατά την εν σειρά λειτουργία, η MEK δε δίνει κίνηση απ' ευθείας στους τροχούς, αλλά λειτουργεί σαν κινητήρας που μεταφέρει ρευστό από τη δεξαμενή χαμηλής πίεσης προς το συσσωρευτή. Κατά την παράλληλη λειτουργία, η ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση του οχήματος παρέχεται στον άξονα ταυτόχρονα από το υδραυλικό σύστημα και από τη MEK.

Λόγω της ανάγκης για δύο δεξαμενές με ρευστό, το υδραυλικό σύστημα είναι ογκώδες και βαρύ, κάνοντας το σχεδόν απαγορευτικό για μικρά οχήματα όπως για παράδειγμα τα επιβατικά, βιώσιμο όμως για οχήματα βαρέως τύπου. Η εταιρία φορτηγών MAN [22] έχει ασχοληθεί με την ανάκτηση ενέργειας με χρήση υδραυλικών σε φορτηγά, όπως επίσης οι εταιρίες Mitsubishi Motors και Volvo [23] έχουν πειραματιστεί επίσης σε αυτή την τεχνολογία.

Τέλος, επειδή η φόρτιση και εκφόρτιση του συσσωρευτή αποτελεί θέμα μόνο μερικών δευτερολέπτων, ο έλεγχος του συστήματος πρέπει να διασφαλίζει ότι ο οδηγός δε θα καταλαβαίνει διαφορά στην οδήγηση του οχήματος.

### 3.3 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση συμπίεσης αέρα

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος ανάκτησης ενέργειας με συμπίεση αέρα είναι παρόμοια με αυτή των υδραυλικών συστημάτων. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι με τη χρήση αέρα δεν απαιτούνται δυο δεξαμενές (δεξαμενή χαμηλής πίεσης και συσσωρευτής) αλλά μόνο μια δεξαμενή αφού ο ατμοσφαιρικός αέρας από το περιβάλλον συμπιέζεται σε μια δεξαμενή, Εικόνα 18. [12]



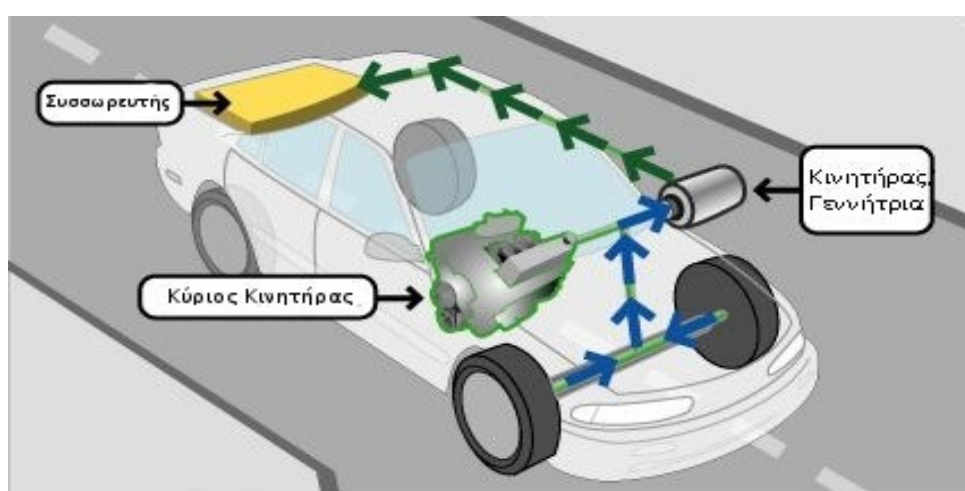
*Εικόνα 18: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με χρήση συμπίεσης αέρα*

Η απουσία της μιας δεξαμενής, όπως και ρευστού όπως λάδι αλλά και η αντικατάσταση των υδραυλικών κινητήρων και αντλιών με κινητήρες αέρα ρίχνουν το βάρος, την πολυπλοκότητα και το κόστος της κατασκευής.

Από την άλλη, η ενεργειακή πυκνότητα του αέρα σε ένα υβριδικό σύστημα αέρα είναι πολύ μικρότερη από αυτή ενός αντίστοιχου υδραυλικού, οπότε η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ μικρότερη από ενός HHV.

### 3.4 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση Γεννήτριας-Υπερπυκνωτών

Με αυτή τη μεθοδολογία, η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται σε μια συστοιχία υπερπυκνωτών για μελλοντική χρήση. Η γεννήτρια του συστήματος μπορεί να είναι ο ίδιος ο ηλεκτρικός κινητήρας που κινεί το όχημα κατά την κίνηση του, είτε ξεχωριστή συσκευή. Στις περισσότερες εφαρμογές όμως υπερσχύει η πρώτη περίπτωση. Ένα γενικό σχηματικό της ανάκτησης ενέργειας φαίνεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Ανάκτηση ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτών



### 3.5 Περιγραφή Συστήματος ανάκτησης ενέργειας στο όχημα ER 14.

Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για να καλύψει τις ανάγκες του οχήματος ER14 ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος όπου για την κίνηση του χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου -υδρογόνου.

Οι υπερπυκνωτές που χρησιμοποιήθηκαν είναι χωρητικότητας 52F, σειρά BPAK0052 P015 B01 της εταιρίας Maxwell, Εικόνα 20. Η επιλογή και συνδεσμολογία τους έγινε λαμβάνοντας υπ όψιν τις απαιτήσεις ισχύος του ηλεκτροκινητήρα και των χαρακτηριστικών του κυκλώματος φόρτισης- εκφόρτισης.



*Εικόνα 20: Υπερπυκνωτές Maxwell BPAK0052*

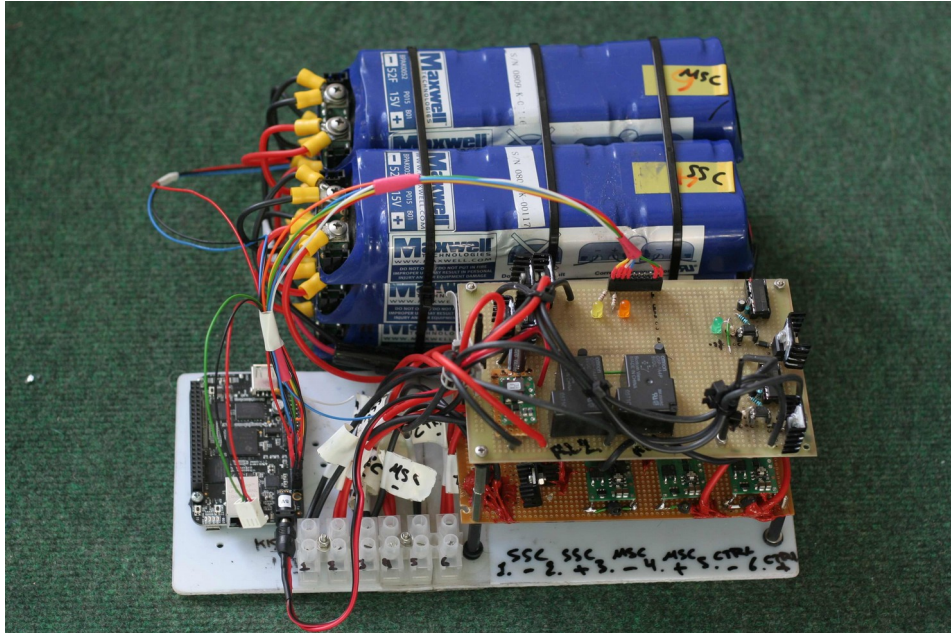
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπερπυκνωτών φαίνονται στον Πίνακα 2 .



<b>Maxwell Part No: BPAK0052 P015 B01</b>	
Μέγιστη Τάση (V)	15
Χωρητικότητα (F)	52
Ανοχές χωρητικότητας (%)	±20
Ρεύμα Διαρροής (mA)	1
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)	1500
Ενέργεια (Wh/kg)	3.25
Ισχύς(W/kg)	3000
Μάζα (g)	500
Όγκος (L)	0.566
Διαστάσεις (ΜxΠxΥ) (mm)	216x69x28

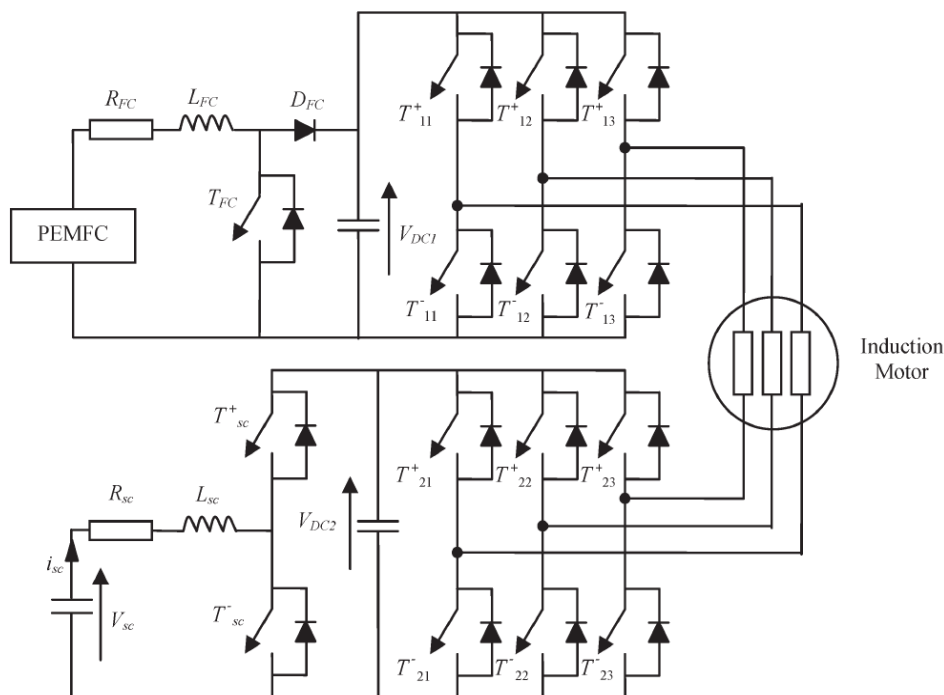
*Πίνακας 2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Maxwell BPAK0052*

Το σύστημα φόρτισης- εκφόρτισης, από εδώ και στο εξής ονομαζόμενο σύστημα ανάκτησης ενέργειας, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με φιλοσοφία τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας. Δηλαδή είναι ανεξάρτητο κυψέλης καυσίμου, μοντέλου κινητήρα και ελεγκτή, εύχρηστο στη λειτουργία του και τροφοδοτεί το ίδιο τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά στοιχεία που διαθέτει και φαίνεται στην Εικόνα 21.



*Εικόνα 21: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας οχήματος ER14*

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες ανάκτησης και διαχείρισης ενέργειας σε οχήματα με κυψέλες καυσίμου και υπερπυκνωτές με πιο γενική αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 22 [24].



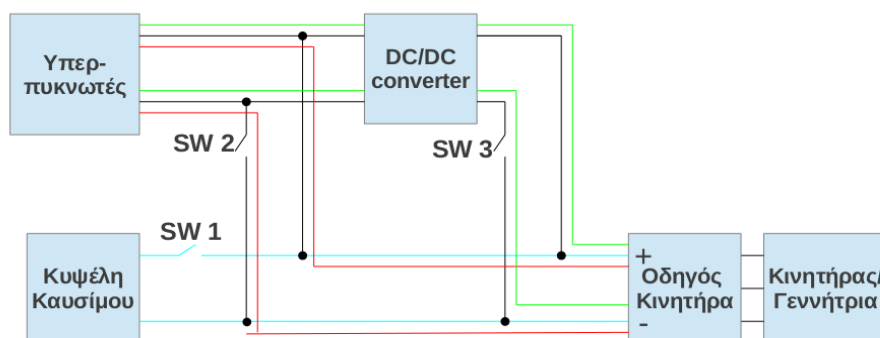
Εικόνα 22: Τοπολογία Ανάκτησης ενέργειας όχημα με κυψέλες καυσίμου

Στην τοπολογία αυτή, η κυψέλη καυσίμου (PEMFC) αποτελεί την κύρια πηγή ισχύος και οι υπερπυκνωτές κάτω αριστερά αποτελούν τόσο το σύστημα υποβοήθησης (power boost) όσο και την “ενεργειακή δεξαμενή” αποθήκευσης ενέργειας κατά την επιβράδυνση. Σύμφωνα με αυτή την τοπολογία, με την κατάλληλη διαχείριση των δυαδικών μεταβλητών  $T_{x,y}$  το σύστημα μπορεί να μεταβεί σε 5 ξεχωριστές καταστάσεις:

- 1) Κατάσταση 1: ομαλή επιτάχυνση και κίνηση.
- 2) Κατάσταση 2: γρήγορη επιτάχυνση και κίνηση με υποβοήθησης από υπερπυκνωτές.
- 3) Κατάσταση 3: φρενάρισμα του κινητήρα.
- 4) Κατάσταση 4: φόρτιση υπερπυκνωτών κατά την ομαλή κίνηση του οχήματος.
- 5) Κατάσταση 5: φόρτιση υπερπυκνωτών κατά τη στάση του οχήματος.

Η τοπολογία που σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε στο όχημα ER 14 φαίνεται στην Εικόνα 23 και χρησιμοποιεί 3 καταστάσεις του συστήματος.

- 1) Κατάσταση 1: Κίνηση με χρήση κυψέλης καυσίμου.
- 2) Κατάσταση 2: Κίνηση με χρήση υπερπυκνωτών.
- 3) Κατάσταση 3: Επιβράδυνση και φόρτιση υπερπυκνωτών.



*Εικόνα 23: Τοπολογία ανάκτησης και διαχείρισης ενέργειας του οχήματος ER14*

Αυτή η τοπολογία επιτρέπει μόνο εν σειρά συνδεσμολογία των υπερπυκνωτών με την κυψέλη καυσίμου. Δηλαδή κάθε στιγμή που απαιτείται ενέργεια από τον ηλεκτρικό κινητήρα, η ενέργεια αυτή παρέχεται είτε από τη συστοιχία των υπερπυκνωτών, είτε από την κυψέλη καυσίμου και ποτέ και από τις δυο πηγές μαζί.

Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας που φαίνεται στην Εικόνα 21 αποτελεί εξέλιξη ενός συστήματος που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης [25] και αποτελείται από μια συστοιχία υπερπυκνωτών, έναν εναλλάκτη συνεχούς ρεύματος ο οποίος είναι απαραίτητος για τη φόρτιση των υπερπυκνωτών, ηλεκτρικούς διακόπτες τύπου MOS-FET και ηλεκτρονόμους. Τέλος, υπάρχει μια υπολογιστική μονάδα η οποία ελέγχει τους ηλεκτρικούς διακόπτες.

Η διαφορά του συστήματος αυτού από το προηγούμενο, βρίσκεται στην τάση εκφόρτισης των υπερπυκνωτών. Σε αντίθεση με το προηγούμενο, στο οποίο οι υπερπυκνωτές είναι πάντα συνδεδεμένοι παράλληλα, το σύστημα εξελίχθηκε έτσι ώστε οι υπερπυκνωτές να συνδέονται μεν παράλληλα κατά τη φόρτιση τους, όμως κατά την εκφόρτιση τους να συνδέονται ανά δυο σε σειρά διπλασιάζοντας τη μέγιστη τάση εκφόρτισης στα 30V.

Για την αλλαγή συνδεσμολογίας, για λόγους ασφαλείας, χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονόμοι. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η φυσική απομόνωση των υπερπυκνωτών εκμηδενίζοντας τον κίνδυνο βραχυκυκλώματος τους. Οι ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρίας Omron, σειρά G8P-1A4P, Εικόνα 24.



*Εικόνα 24: Ηλεκτρονόμος Omron G8P-1A4P*

Τέλος, για την εισαγωγή πιο ενός πιο “έξυπνου” συστήματος πολιτικής διαχείρισης της ενέργειας απαιτήθηκε και η εισαγωγή αισθητήρα υπολογισμού της ταχύτητας του οχήματος. Μαζί με τους υπάρχοντες αισθητήρες μέτρησης τάσης και υπολογισμού πίεσης ποδοστηρίου επιτάχυνσης του οδηγού αποτελούν τα σήματα εισόδου του συστήματος ανάκτησης και διαχείρισης ενέργειας του οχήματος.

## Κεφάλαιο 4: Διαχείριση ενέργειας οχήματος ER14

### 4.1 Διαχείριση Ενέργειας με χρήση Μηχανής Πεπερασμένων Καταστάσεων.

Το κύκλωμα ανάκτησης και διαχείρισης ενέργειας του οχήματος ER14 είναι ένα ακολουθιακό σύστημα που αποτελείται από τα υποσυστήματα:

- Αρχικοποίηση του συστήματος.
- Φόρτιση υπερπυκνωτών.
- Εκφόρτιση υπερπυκνωτών.
- Χρήση κυψέλης καυσίμου.

Η χρήση Μηχανής Πεπερασμένων Καταστάσεων (ΜΠΚ) αποτελεί μια πολύ καλή λύση αναπαράστασης του συστήματος ειδικότερα εφόσον θα πρέπει να αναπτυχθούν διάφορες παραλλαγές σε διαφορετικά σενάρια δοκιμών. Είναι απλή στην αναπαράσταση, μεταφέρεται εύκολα σε γλώσσες αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα αλγοριθμικού λάθους.

Η Μηχανή Πεπερασμένων καταστάσεων ορίζεται από [26]:

- Ένα πεπερασμένο, μη κενό σύνολο καταστάσεων  $Q = \{q_0, q_1, q_2, \dots\}$ .
- Ένα ειδικό στοιχείο,  $q_0$ , του συνόλου  $Q$  που ονομάζεται αρχική κατάσταση.
- Ένα πεπερασμένο σύνολο  $X$  από γράμματα εισόδου.
- Ένα πεπερασμένο σύνολο  $Y$  από γράμματα εξόδου.
- Μια συνάρτηση μετάβασης  $\delta$  από το  $Q \times X$  στο  $Q$ .

➤ Μια συνάρτηση εξόδου  $\lambda$  από  $Q$  στο  $Y$ .

Εάν η ΜΠΚ δεχθεί σαν είσοδο  $x \in X$  όταν βρίσκεται στην κατάσταση  $q$ , τότε παράγει μια έξοδο  $y = \lambda(q, x)$  και μετακινείται στην κατάσταση  $q' = \delta(q, x)$

Για λόγους ευκολότερης κατανόησης της Μηχανής πεπερασμένων Καταστάσεων, ακολουθείται η εξής χρωματολογία:

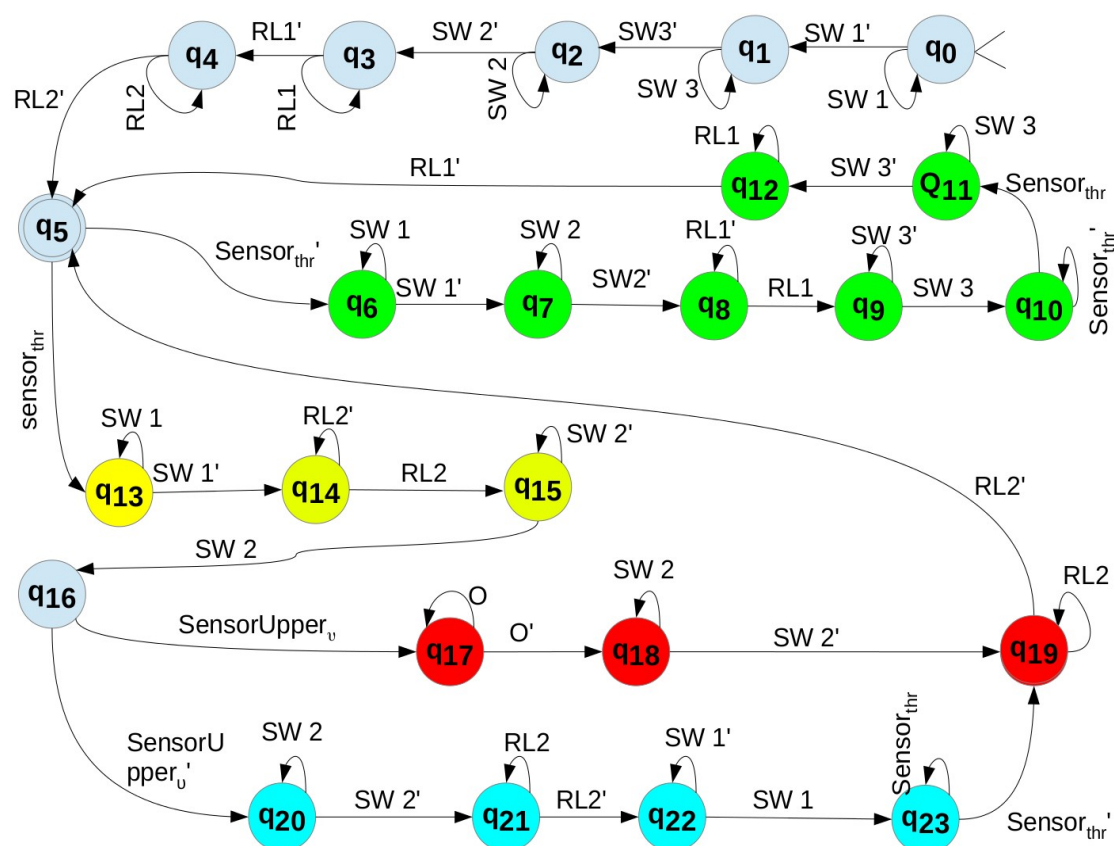
- Μπλε χρώμα στις καταστάσεις αρχικοποίησης του συστήματος.
- Πράσινο χρώμα στις καταστάσεις φόρτισης των υπερπυκνωτών.
- Κόκκινο χρώμα στις καταστάσεις εκφόρτισης των υπερπυκνωτών.
- Γαλάζιο χρώμα στις καταστάσεις λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.

Στις περιπτώσεις που απαιτείται η δειγματοληψία της τάσης των υπερπυκνωτών, οι καταστάσεις αναμονής προς δειγματοληψία όπως και δειγματοληψίας παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα.

Σημειώνεται ότι όλες οι καταστάσεις είναι αμοιβαία αποκλειόμενες.

#### 4.1.1 Πολιτική διαχείρισης με βάση το επίπεδο φόρτισης υπερπυκνωτών

Σε αυτό το Κεφάλαιο, η Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων θα διαμορφωθεί έτσι ώστε η συστοιχία των υπερπυκνωτών να αποτελεί την πηγή ενέργειας του οχήματος όταν η τάση τους βρίσκεται ανάμεσα σε κάποια ορισμένα όρια. Η ΜΠΚ θα έχει τη μορφή της Εικόνας 25.



Εικόνα 25: Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων για πολιτική επιπέδου φόρτισης

Η αρχικοποίηση του συστήματος γίνεται στις καταστάσεις  $q_0, q_1, \dots, q_4$ .

Η κατάσταση αποδοχής είναι η  $q_5$ .

Η φόρτιση των υπερπυκνωτών επιτυγχάνεται στις καταστάσεις  $q_6, q_7, \dots, q_{12}$ .

Στις καταστάσεις  $q_{13}, q_{14}, q_{15}$  οι υπερπυκνωτές συνδέονται σε σειρά για να γίνει η δειγματοληψία της τάσης τους.

Στην κατάσταση  $q_{16}$  παίρνεται η απόφαση εάν η προωθητική πηγή του οχήματος θα είναι οι υπερπυκνωτές ή η κυψέλη καυσίμου.

Οι καταστάσεις  $q_{17}$ ,  $q_{18}$ ,  $q_{19}$  αποτελούν το υποσύστημα εκφόρτισης των υπερπυκνωτών.

Οι καταστάσεις  $q_{20}$ ,  $q_{21}, \dots, q_{23}$  αποτελούν το υποσύστημα εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου σαν πηγή ενέργειας.

Οι καταστάσεις εξηγούνται λεπτομερώς στον Πίνακα 3.

<b>Κατάσταση</b>	<b>Περιγραφή Κατάστασης- Κανόνες εξόδου από κατάσταση</b>
$q_0$	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW1 δεν άγει
$q_1$	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW3 δεν άγει
$q_2$	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW2 δεν άγει
$q_3$	Αρχικοποίηση- Ηλεκτρονόμος RL1 δεν άγει
$q_4$	Αρχικοποίηση- Ηλεκτρονόμος RL2 δεν άγει
$q_5$	Κατάσταση Αποδοχής-
$q_6$	Κατάσταση φόρτισης- Διακόπτης SW1 δεν άγει
$q_7$	Κατάσταση φόρτισης- Διακόπτης SW2 δεν άγει
$q_8$	Κατάσταση φόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL1 άγει
$q_9$	Κατάστασης φόρτισης- Διακόπτης SW3 άγει
$q_{10}$	Κατάστασης φόρτισης- Φόρτιση υπερπυκνωτών
$q_{11}$	Κατάστασης φόρτισης- Διακόπτης δεν SW3 άγει
$q_{12}$	Κατάσταση φόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL1 δεν άγει
$q_{13}$	Αναμονή δειγματοληψίας τάσης- Διακόπτης SW1 δεν άγει
$q_{14}$	Αναμονή δειγματοληψίας τάσης- Ηλεκτρονόμος RL2 άγει
$q_{15}$	Δειγματοληψίας τάσης- Διακόπτης SW2 άγει
$q_{16}$	Επιλογή Πηγής ενέργειας
$q_{17}$	Κατάσταση εκφόρτισης- Εκφόρτιση υπερπυκνωτών
$q_{18}$	Κατάσταση εκφόρτισης- Διακόπτης SW2 δεν άγει
$q_{19}$	Κατάσταση εκφόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL2 δεν άγει
$q_{20}$	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Διακόπτης SW2 δεν άγει
$q_{21}$	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Ηλεκτρονόμος RL2 δεν άγει
$q_{22}$	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Διακόπτης SW1 άγει
$q_{23}$	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Πρόωση με ενέργεια κυψέλης καυσίμου

*Πίνακας 3: Περιγραφή καταστάσεων ΜΠΚ*



Τα σύμβολα/γράμματα του αλφάβητου περιγράφονται στον Πίνακα 4.

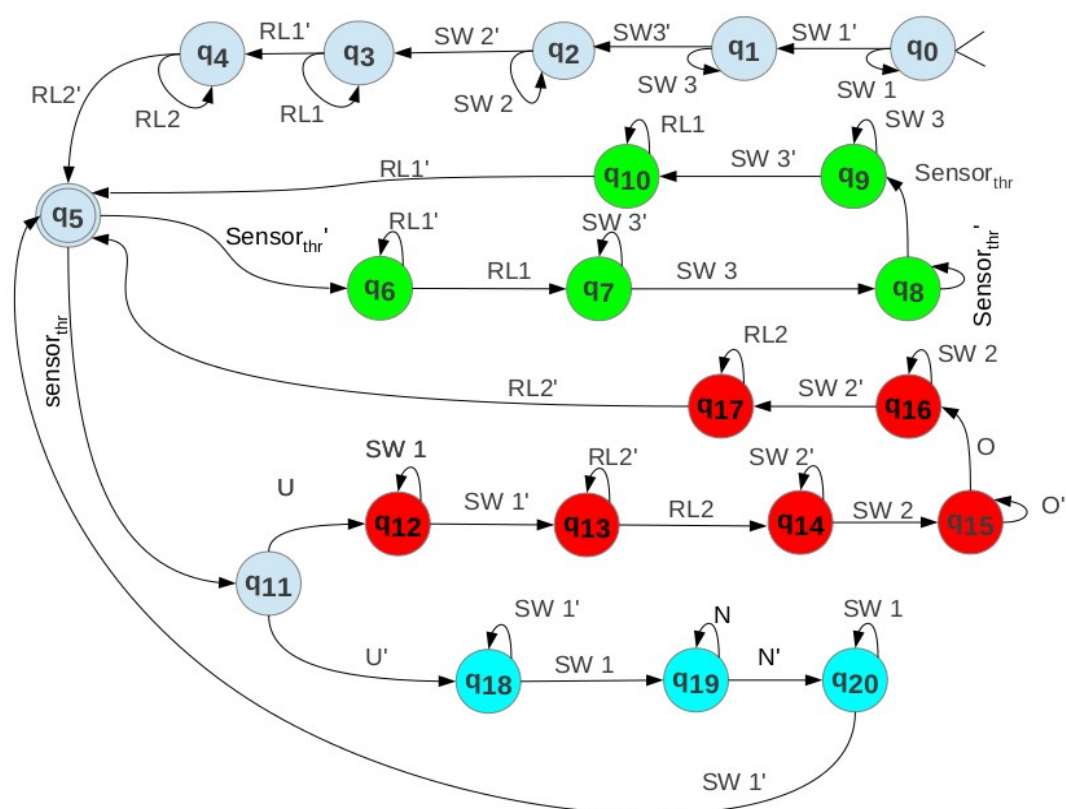
<b>Σύμβολο</b>	<b>Περιγραφή Συμβόλου</b>
SW1	Διακόπτης κυψέλης καυσίμου- άγει
SW1'	Διακόπτης κυψέλης καυσίμου- δεν άγει
SW2	Διακόπτης εκφόρτισης υπερπυκνωτών- άγει
SW2'	Διακόπτης εκφόρτισης υπερπυκνωτών- δεν άγει
SW3	Διακόπτης φόρτισης υπερπυκνωτών- άγει
SW3'	Διακόπτης φόρτισης υπερπυκνωτών- δεν άγει
RL1	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών παράλληλα- άγει
RL1'	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών παράλληλα- δεν άγει
RL2	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών σε σειρά- άγει
RL2'	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών σε σειρά- δεν άγει
sensor <sub>thr</sub>	Αισθητήρας ενεργοποίησης επιταχυντή- Λογικό “ΝΑΙ”
sensor <sub>thr</sub> '	Αισθητήρας ενεργοποίησης επιταχυντή- Λογικό “ΟΧΙ”
SensorUpper <sub>u</sub>	Αισθητήρας μέτρησης τάσης υπερπυκνωτών- τάση μεγαλύτερη από ορισμένο άνω όριο
SensorUpper <sub>u</sub> '	Αισθητήρας μέτρησης τάσης υπερπυκνωτών- τάση μικρότερη από ορισμένο άνω όριο
O	Sensor <sub>thr</sub> ΚΑΙ τάση μεγαλύτερη από ορισμένο κάτω όριο
O'	Sensor <sub>thr</sub> ' Ή τάση μικρότερη από ορισμένο κάτω όριο

*Πίνακας 4: Περιγραφή Συμβόλων ΜΠΚ*

Με την Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων που περιγράφηκε, οι υπερπυκνωτές εισέρχονται στο σύστημα πρόωσης αν και μόνο αν θεωρηθεί ικανοποιητικό το επίπεδο φόρτισης τους (State Of Charge). Επίσης, θα εξέλθουν απ το σύστημα αν το επίπεδο φόρτισης τους είναι πολύ χαμηλό. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως, όμως στο σύστημα ανάκτησης ενέργειας όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.5 δε μπορεί η τάση τους να πέσει κάτω από 5 Volts εφόσον τροφοδοτούν τους ηλεκτρονόμους και την υπολογιστική μονάδα. Εκτός αυτού, κατά τη διάρκεια που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά και τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα, η πολύ χαμηλή τους τάση επηρεάζει και την τελική ταχύτητα του οχήματος αφού οι στροφές του ηλεκτροκινητήρα είναι ανάλογες με την τάση της πηγής ενέργειας του.

#### 4.1.2 Πολιτική διαχείρισης με βάση την ταχύτητα του οχήματος.

Σε αυτό το Κεφάλαιο, στη Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων προσαρμόζονται οι καταστάσεις και τα σύμβολα έτσι ώστε οι υπερπυκνωτές να εκφορτίζονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχύτητας του οχήματος. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να μελετηθεί ένας αποδοτικός τρόπος εισαγωγής τους στο σύστημα. Εφόσον μελετάται μόνο η ταχύτητα του οχήματος και όχι η τάση των υπερπυκνωτών, η ΜΠΚ απλοποιείται όπως φαίνεται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26:ΜΠΚ για έλεγχο ταχύτητας

Σε αυτή τη ΜΠΚ οι καταστάσεις μειώνονται σε 20 ενώ τα σύμβολα γίνονται 9 χωρίς τα συμπληρωματικά τους. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται ο νέος πίνακας καταστάσεων .

<b>Κατάσταση</b>	<b>Περιγραφή Κατάστασης- Κανόνες εξόδου από κατάσταση</b>
q <sub>0</sub>	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW1 δεν άγει
q <sub>1</sub>	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW3 δεν άγει
q <sub>2</sub>	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW2 δεν άγει
q <sub>3</sub>	Αρχικοποίηση- Ηλεκτρονόμος RL1 δεν άγει
q <sub>4</sub>	Αρχικοποίηση- Ηλεκτρονόμος RL2 δεν άγει
q <sub>5</sub>	Κατάσταση Αποδοχής-
q <sub>6</sub>	Κατάσταση φόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL1 άγει
q <sub>7</sub>	Κατάσταση φόρτισης-Διακόπτης SW3 άγει
q <sub>8</sub>	Κατάσταση φόρτισης- Φόρτιση υπερπυκνωτών
q <sub>9</sub>	Κατάστασης φόρτισης- Διακόπτης SW3 δεν άγει
q <sub>10</sub>	Κατάστασης φόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL1 δεν άγει
q <sub>11</sub>	Επιλογή πηγής ενέργειας
q <sub>12</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης- Διακόπτης SW1 δεν άγει
q <sub>13</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL2 άγει
q <sub>14</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης- Διακόπτης SW2 άγει
q <sub>15</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης- Εκφόρτιση υπερπυκνωτών
q <sub>16</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης- Διακόπτης SW2 δεν άγει
q <sub>17</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης-Ηλεκτρονόμος RL2 δεν άγει
q <sub>18</sub>	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Διακόπτης SW1 άγει
q <sub>19</sub>	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου-Πρόωση με ενέργεια κυψέλης καυσίμου
q <sub>20</sub>	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου-Διακόπτης SW1 δεν άγει

*Πίνακας 5: Περιγραφή καταστάσεων Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων για έλεγχο ταχύτητας*

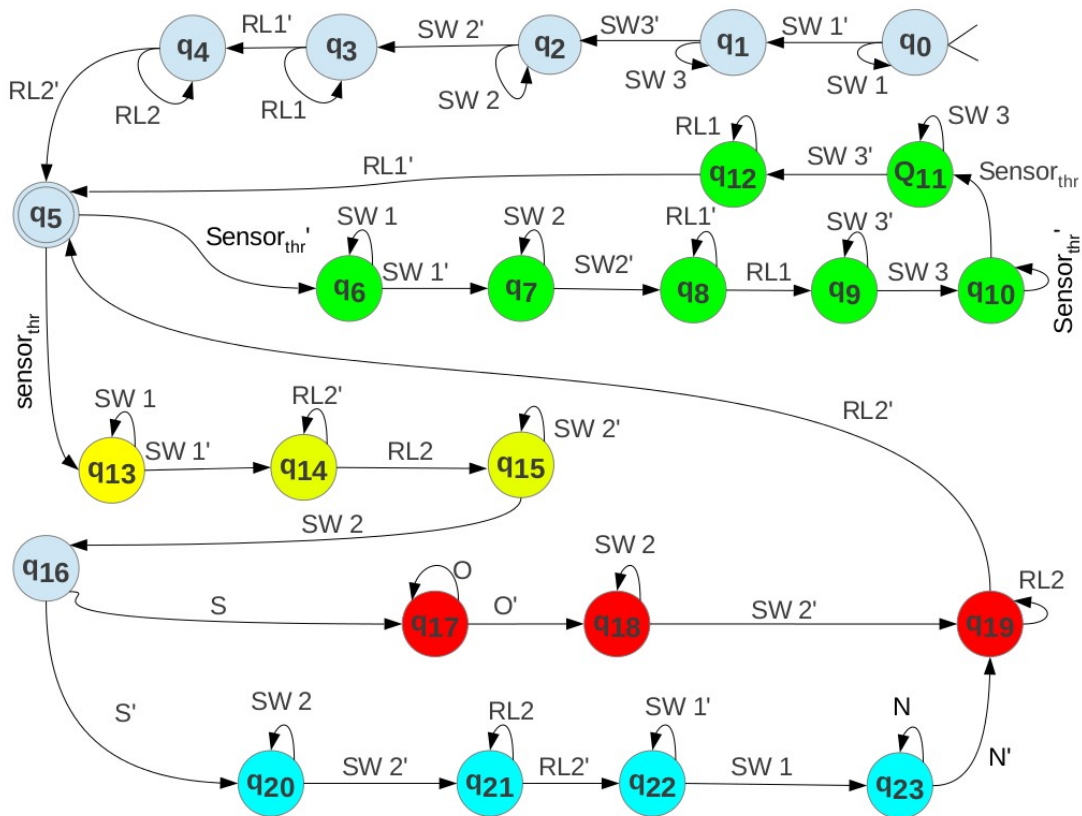
Ο Πίνακας 6 περιγράφει τα σύμβολα του αλφάβητου.

<b>Σύμβολο</b>	<b>Περιγραφή Συμβόλου</b>
SW1	Διακόπτης κυψέλης καυσίμου- άγει
SW1'	Διακόπτης κυψέλης καυσίμου- δεν άγει
SW2	Διακόπτης εκφόρτισης υπερπυκνωτών- άγει
SW2'	Διακόπτης εκφόρτισης υπερπυκνωτών- δεν άγει
SW3	Διακόπτης φόρτισης υπερπυκνωτών- άγει
SW3'	Διακόπτης φόρτισης υπερπυκνωτών- δεν άγει
RL1	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών παράλληλα- άγει
RL1'	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών παράλληλα- δεν άγει
RL2	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών σε σειρά- άγει
RL2'	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών σε σειρά- δεν άγει
Sensor <sub>thr</sub>	Αισθητήρας ενεργοποίησης επιταχυντή- Λογικό "ΝΑΙ"
Sensor <sub>thr</sub> '	Αισθητήρας ενεργοποίησης επιταχυντή- Λογικό "ΟΧΙ"
U	Αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας- ταχύτητα οχήματος ανάμεσα σε ορισμένα όρια
U'	Αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας- ταχύτητα οχήματος εκτός ορισμένων ορίων
O	Sensor <sub>thr</sub> ΚΑΙ U
O'	Sensor <sub>thr</sub> ' Ή U'
N	Sensor <sub>thr</sub> ΚΑΙ U'
N'	Sensor <sub>thr</sub> Ή U

*Πίνακας 6: Περιγραφή Συμβόλων ΜΠΚ για έλεγχο ταχύτητας*

#### 4.1.3 Πολιτική διαχείρισης με βάση τον τρόπο οδήγησης του οχήματος.

Η διαχείριση της ενέργειας ενός υβριδικού οχήματος όπως είναι το υβριδικό-ηλεκτρικό όχημα (Hybrid Electric Vehicle) ER14 δεν είναι μονοκριτήριο πρόβλημα και απαιτεί πολλές παραμέτρους να ληφθούν υπ όψη. Ένα μεγάλο θέμα που εγείρεται είναι ο τρόπος οδήγησης του οχήματος, δηλαδή εάν αξίζει να ο οδηγός του οχήματος να οδηγεί με αυξομειώσεις της ταχύτητας του οχήματος ή εάν είναι, από ενεργειακή άποψη πάντα, καλύτερο να οδηγεί ομαλά κρατώντας έτσι τη μέγιστη ταχύτητα σε χαμηλότερα επίπεδα. Στις δυο προαναφερόμενες περιπτώσεις, η μέση ταχύτητα σε μια συγκεκριμένη διαδρομή παραμένει ίση. Σε πραγματικές συνθήκες δρόμου, ο οδηγός καθορίζει τον τρόπο οδήγησης του οχήματος οπότε η Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων μπορεί να ρυθμίσει την εισαγωγή των υπερπυκνωτών στο σύστημα κίνησης του οχήματος ανάλογα με την ταχύτητα του και το επίπεδο φόρτισης τους. Στην Εικόνα 27 φαίνεται η ΜΠΚ.



Εικόνα 27: Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων για συγκεκριμένο τρόπο οδήγησης οδηγού

Ο πίνακας καταστάσεων με την περιγραφή των καταστάσεων και τους κανόνες εξόδου από τις καταστάσεις φαίνεται στον Πίνακα 7.

<b>Κατάσταση</b>	<b>Περιγραφή Κατάστασης- Κανόνες εξόδου από κατάσταση</b>
q <sub>0</sub>	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW1 δεν άγει
q <sub>1</sub>	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW3 δεν άγει
q <sub>2</sub>	Αρχικοποίηση- Διακόπτης SW2 δεν άγει
q <sub>3</sub>	Αρχικοποίηση- Ηλεκτρονόμος RL1 δεν άγει
q <sub>4</sub>	Αρχικοποίηση- Ηλεκτρονόμος RL2 δεν άγει
q <sub>5</sub>	Κατάσταση Αποδοχής-
q <sub>6</sub>	Κατάσταση φόρτισης- Διακόπτης SW1 δεν άγει
q <sub>7</sub>	Κατάσταση φόρτισης- Διακόπτης SW2 δεν άγει
q <sub>8</sub>	Κατάσταση φόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL1 άγει
q <sub>9</sub>	Κατάστασης φόρτισης- Διακόπτης SW3 άγει
q <sub>10</sub>	Κατάστασης φόρτισης- Φόρτιση υπερπυκνωτών
q <sub>11</sub>	Κατάστασης φόρτισης- Διακόπτης SW3 άγει
q <sub>12</sub>	Κατάσταση φόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL1 δεν άγει
q <sub>13</sub>	Αναμονή δειγματοληψίας τάσης- Διακόπτης SW1 δεν άγει
q <sub>14</sub>	Αναμονή δειγματοληψίας τάσης- Ηλεκτρονόμος RL2 άγει
q <sub>15</sub>	Δειγματοληψίας τάσης- Διακόπτης SW2 άγει
q <sub>16</sub>	Επιλογή Πηγής ενέργειας
q <sub>17</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης- Εκφόρτιση υπερπυκνωτών
q <sub>18</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης- Διακόπτης SW2 δεν άγει
q <sub>19</sub>	Κατάσταση εκφόρτισης- Ηλεκτρονόμος RL2 δεν άγει
q <sub>20</sub>	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Διακόπτης SW2 δεν άγει
q <sub>21</sub>	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Ηλεκτρονόμος RL2 δεν άγει
q <sub>22</sub>	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Διακόπτης SW1 άγει
q <sub>23</sub>	Λειτουργία κυψέλης καυσίμου- Πρόωση με ενέργεια κυψέλης καυσίμου

*Πίνακας 7: Περιγραφή ΜΠΚ για συγκεκριμένο τρόπο οδήγησης*

Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στην ΜΠΚ φαίνονται στον Πίνακα 8.

<b>Σύμβολο</b>	<b>Περιγραφή Συμβόλου</b>
SW1	Διακόπτης κυψέλης καυσίμου- άγει
SW1'	Διακόπτης κυψέλης καυσίμου- δεν άγει
SW2	Διακόπτης εκφόρτισης υπερπυκνωτών- άγει
SW2'	Διακόπτης εκφόρτισης υπερπυκνωτών- δεν άγει
SW3	Διακόπτης φόρτισης υπερπυκνωτών- άγει
SW3'	Διακόπτης φόρτισης υπερπυκνωτών- δεν άγει
RL1	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών παράλληλα- άγει
RL1'	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών παράλληλα- δεν άγει
RL2	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών σε σειρά- άγει
RL2'	Ηλεκτρονόμος σύνδεσης υπερπυκνωτών σε σειρά- δεν άγει
sensor <sub>thr</sub>	Αισθητήρας ενεργοποίησης επιταχυντή- Λογικό "ΝΑΙ"
sensor <sub>thr</sub> '	Αισθητήρας ενεργοποίησης επιταχυντή- Λογικό "ΟΧΙ"
S	Τάση μεγαλύτερη από ορισμένο άνω όριο ΚΑΙ ταχύτητα ανάμεσα σε ορισμένα όρια
S'	Τάση μικρότερη από ορισμένο άνω όριο Ή ταχύτητα εκτός ορισμένων ορίων
O	Sensor <sub>thr</sub> ΚΑΙ τάση μεγαλύτερη από ορισμένο κάτω όριο ΚΑΙ ταχύτητα ανάμεσα σε ορισμένα όρια
O'	Sensor <sub>thr</sub> ' Ή τάση μικρότερη από ορισμένο κάτω όριο Ή ταχύτητα εκτός ορισμένων ορίων
N	Sensor <sub>thr</sub> ΚΑΙ U'
N'	Sensor <sub>thr</sub> Ή U

*Πίνακας 8: Περιγραφή Συμβόλων ΜΠΚ για συγκεκριμένο τρόπο οδήγησης*

## Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα της υλοποίησης του συστήματος ανάκτησης ενέργειας με τις πολιτικές διαχείρισης που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Με αυτό τον τρόπο γίνεται δυνατόν να επιλεγθεί μια συνολική πολιτική, τόσο οδήγησης, όσο και του τρόπου και χρόνου εισαγωγής των υπερπυκνωτών σαν μονάδα προώθησης του οχήματος. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό χώρο, στους δρόμους της πολυτεχνειούπολης του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Κουνουπιδιανά Χανίων με το όχημα ER14, Εικόνα 28.



Εικόνα 28: Όχημα ER14

### 5.1 Αποτελέσματα χρήσης πολιτικής διαχείρισης με βάση επίπεδο φόρτισης υπερπυκνωτών.

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η τάση που είναι καλύτερο να λειτουργούν οι υπερπυκνωτές. Η φύση τους, σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, τους δίνει τη δυνατότητα να αποφορτίζονται μέχρι τα 0V χωρίς να καταστρέφονται. Το σύστημα φόρτισης, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.5 φορτίζει τους υπερπυκνωτές παράλληλα μεταξύ τους οπότε η μέγιστη τάση τους στη φόρτιση μπορεί να φτάσει τα 15V. Κατά την αποφόρτιση τους συνδέονται σε δύο τριάδες παράλληλα και αυτές σε σειρά μεταξύ τους έτσι ώστε η μέγιστη τάση εκφόρτισης τους να φτάνει τα 30V και να καθίσταται δυνατό να φτάνουν τον ηλεκτρικό κινητήρα μέχρι τις μέγιστες στροφές του.



Στη φάση που ο ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια, το σύστημα της ανόρθωσης του ρεύματος έχει τάση εξόδου μέχρι 30V. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ της τάσης ανόρθωσης της γεννήτριας και των υπερπυκνωτών, τόσο περισσότερη είναι και η ενέργεια φόρτισης τους.

Από την άλλη, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση των υπερπυκνωτών τόσο πιο καλή είναι η λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα. Αυτό συμβαίνει επειδή για την ίδια απαιτούμενη ισχύ, η ένταση του ρεύματος είναι μικρότερη, συνεπώς και οι θερμικές απώλειες των πηνίων του ηλεκτροκινητήρα γίνονται μικρότερες.

Συνεπώς, διεξήχθησαν δύο πειράματα για να βρεθεί σε ποια τάση λειτουργούν ενεργειακά πιο αποδοτικά οι υπερπυκνωτές. Αξίζει να σημειωθεί πως τα ηλεκτρονικά του συστήματος ανάκτησης ενέργειας τροφοδοτούνται από μια συστοιχία υπερπυκνωτών συνδεδεμένους παράλληλα, με μέγιστη τάση 15 V. Οπότε δεν εξετάζεται τάση μικρότερη από 12V αφού σε τάση χαμηλότερη των 10V δε λειτουργεί το σύστημα ανάκτησης ενέργειας. Έτσι, μελετούνται τα εξής σενάρια:

- Μεσαίο επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών, με χαμηλότερο επίπεδο εκφόρτισης τα 24V.
- Υψηλό επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών, με χαμηλότερο επίπεδο εκφόρτισης τα 26V.

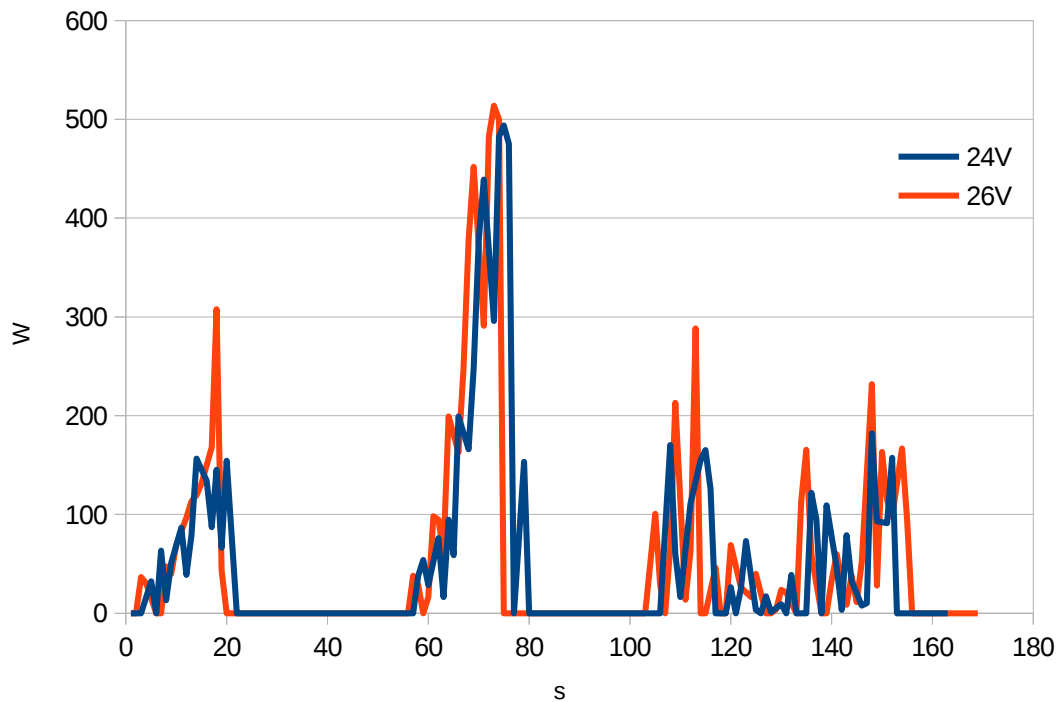
Η διαδρομή που ακολουθήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29: Διαδρομή πειράματος πολιτικής διαχείρισης τάσης λειτουργίας υπερπυκνωτών.

Το όχημα μετά την εκκίνηση του φτάνει την τελική ταχύτητα των 20 χιλιομέτρων/ώρα όπου και επιβραδύνει για να σταματήσει (κόκκινη διαδρομή). Ύστερα επιταχύνει άλλη μια φορά μέχρι να φτάσει ξανά την τελική του ταχύτητα των 20 χιλιομέτρων/ώρα (κίτρινη διαδρομή), προσεγγίζοντας τον χώρο στάθμευσης. Τέλος, γίνεται εκκίνηση στο χώρο στάθμευσης με υπερπυκνωτές και τελική ταχύτητα 10 χιλιομέτρα/ώρα (μπλε διαδρομή).

Το διάγραμμα ισχύος- χρόνου φαίνεται στην Εικόνα 30.



Εικόνα 30: Διάγραμμα ισχύος-χρόνου πολιτικής διαχείρισης τάσης λειτουργίας υπερπυκνωτών

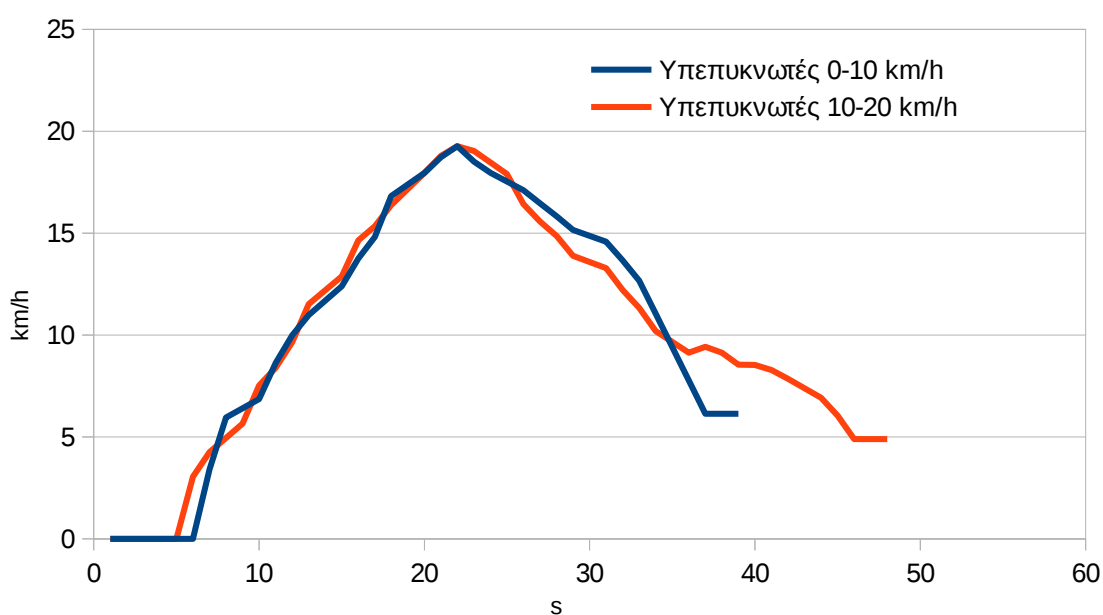
Τα αποτελέσματα της συνολικής ενέργειας που καταναλώθηκε δείχνουν ότι το σύστημα συμπεριφέρεται καλύτερα όταν οι υπερπυκνωτές βρίσκονται στο μεσαίο επίπεδο φόρτισης τους αφού με αυτό τον τρόπο καταναλώνονται 2092 J σε αντίθεση με το υψηλό επίπεδο φόρτισης τους όπου και καταναλώνονται 2480 J.

## 5.2 Αποτελέσματα με χρήση Πολιτικής διαχείρισης με βάση την ταχύτητα του οχήματος.

Σε αυτή την πολιτική, αποφασίζεται η ταχύτητα του οχήματος κατά την οποία οι υπερπυκνωτές αποτελούν την πηγή τροφοδοσίας ενέργειας του οχήματος. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο χώρο στάθμευσης του Κτηρίου Επιστημών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η τελική ταχύτητα του οχήματος έφτανε τα 20 χιλιόμετρα/ώρα και τα δυο πειράματα ήταν τα εξής:

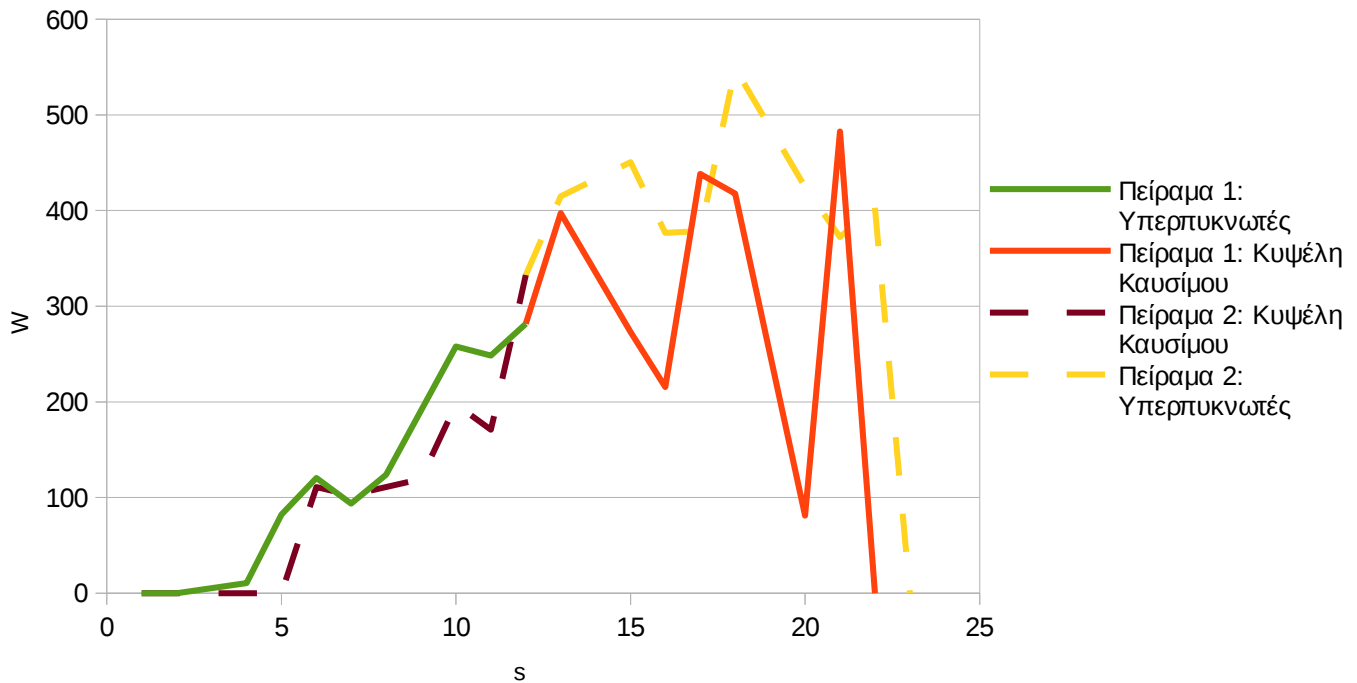
- Πείραμα 1: Επιτάχυνση του οχήματος από στάση έως 20 χιλιόμετρα/ώρα κατά την οποία οι υπερπυκνωτές προωθούν το όχημα από τη στάση μέχρι τα 10 χιλιόμετρα/ώρα.
- Πείραμα 2: Επιτάχυνση του οχήματος από στάση έως 20 χιλιόμετρα/ώρα κατά την οποία οι υπερπυκνωτές προωθούν το όχημα από ταχύτητα 10 χιλιόμετρα/ώρα έως την τελική του ταχύτητα.

Για να εξαλειφθεί στο μέτρο του δυνατού ο ανθρώπινος παράγοντας ο οποίος μπορεί να αλλοιώσει τα πειραματικά αποτελέσματα, η επιτάχυνση του οχήματος πραγματοποιήθηκε με ορισμένη εκ των προτέρων από το χρήστη επιτάχυνσης με έλεγχο ταχύτητας, κατά την οποία το όχημα φτάνει στην τελική του ταχύτητα (19.27 km/h) σε σχεδόν 20 δευτερόλεπτα όπως φαίνεται στην Εικόνα 31.



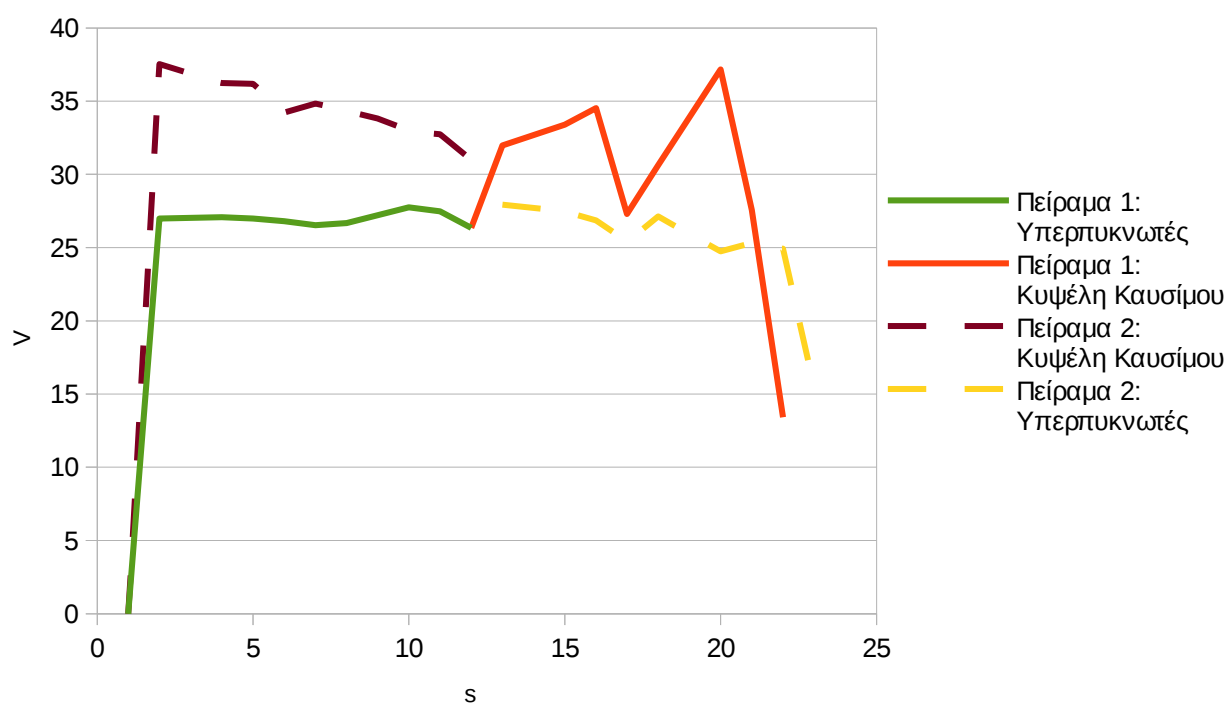
Εικόνα 31: Σύγκριση επιτάχυνσης προκαθορισμένη από το χρήστη

Στην Εικόνα 32 φαίνεται η ισχύς που καταναλώθηκε στα δύο πειράματα:



Εικόνα 32: Διάγραμμα χρόνου- ισχύος, ταχύτητα για εισαγωγή υπερπυκνωτών

Ακριβώς λόγω της ανάγκης ελέγχου των στροφών ανά λεπτό του ηλεκτροκινητήρα και όχι του ελέγχου της απαιτούμενης ροπής του, παρατηρούνται οι αυξομειώσεις της απαιτούμενης ισχύος στα γραφήματα και των δύο πειραμάτων. Ολοκληρώνοντας την ισχύ βρίσκεται η συνολική ενέργεια η οποία για το Πείραμα 1 υπολογίστηκε στα 3524 J ενώ στο Πείραμα 2 ήταν 4405 J. Κατά τα δύο πειράματα οι υπερπυκνωτές μπήκαν στο σύστημα με την ίδια τάση 27 V. Αυτό φαίνεται και στην Εικόνα 33 όπου στα διαγράμματα φαίνεται το χρονικό διάστημα που ήταν πηγή ενέργειας οι υπερπυκνωτές ή η κυψέλη καυσίμου βάσει της τάσης τους. Οι υπερπυκνωτές συνδεδεμένοι σε σειρά ανά δύο έχουν μέγιστη τάση 30V ενώ η κυψέλη καυσίμου χωρίς φορτίο φτάνει μέχρι τα 40V.



Εικόνα 33: Διάγραμμα Χρόνου- Τάσης, ταχύτητα για εισαγωγή υπερπυκνωτών

### 5.3 Αποτελέσματα με χρήση Πολιτικής διαχείρισης με βάση τρόπο οδήγησης οδηγού

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται ο ενεργειακά πιο αποδοτικός τρόπος οδήγησης του οχήματος. Εφαρμόστηκαν οι εξής δύο πολιτικές οδήγησης:

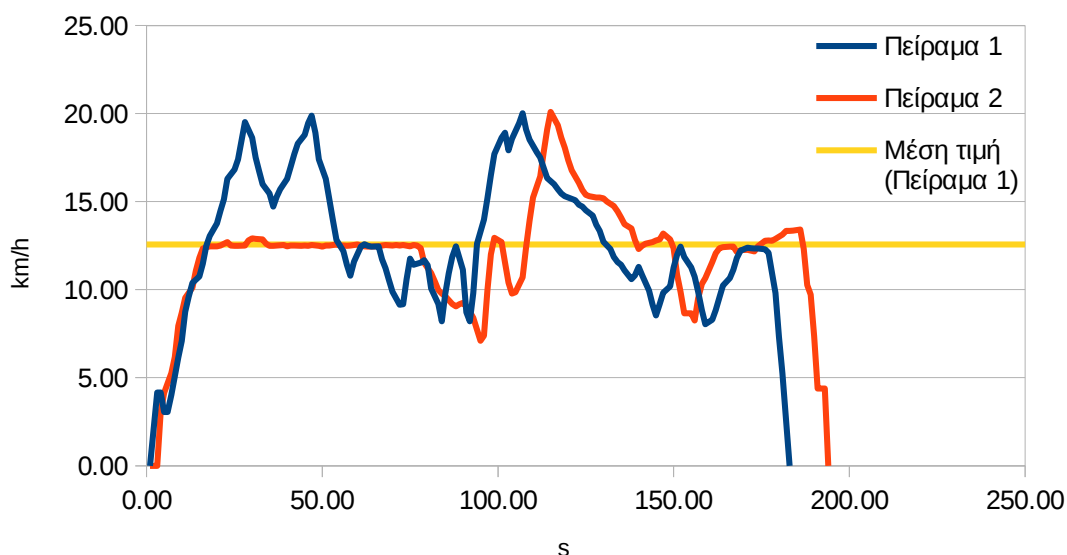
- Πείραμα 1: “*Bang bang*” τρόπος οδήγησης όπου το όχημα επαναλαμβανόμενα αναπτύσσει μεγάλη τελική ταχύτητα και ύστερα επιβραδύνει έως ένα σημείο προτού ξαναεπιταχύνει. Αυτός ο τρόπος οδήγησης αυξάνει το ποσό ανάκτησης ενέργειας στους υπερπυκνωτές.
- Πείραμα 2: “*Συμβατικός*” τρόπος οδήγησης, το όχημα αναπτύσσει μια χαμηλότερη σε σχέση με το Πείραμα 1 τελική ταχύτητα την οποία ακολουθεί για την περισσότερη ώρα του πειράματος. Αν και το ανακτώμενο ποσό ενέργειας είναι μικρότερο, η μέγιστη στιγμιαία απαιτούμενη ενέργεια είναι και αυτή μικρότερη από αυτή του πειράματος 1.

Τα πειράματα διεξήχθησαν στους δρόμους της Πολυτεχνειούπολης του Πολυτεχνείου Κρήτης και η διαδρομή διαδρομή που ακολουθήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 34 και η τελική ταχύτητα του οχήματος έφτασε τα 20 χιλιόμετρα/ώρα.



Εικόνα 34: Διαδρομή για επιλογή πολιτικής τρόπου οδήγησης

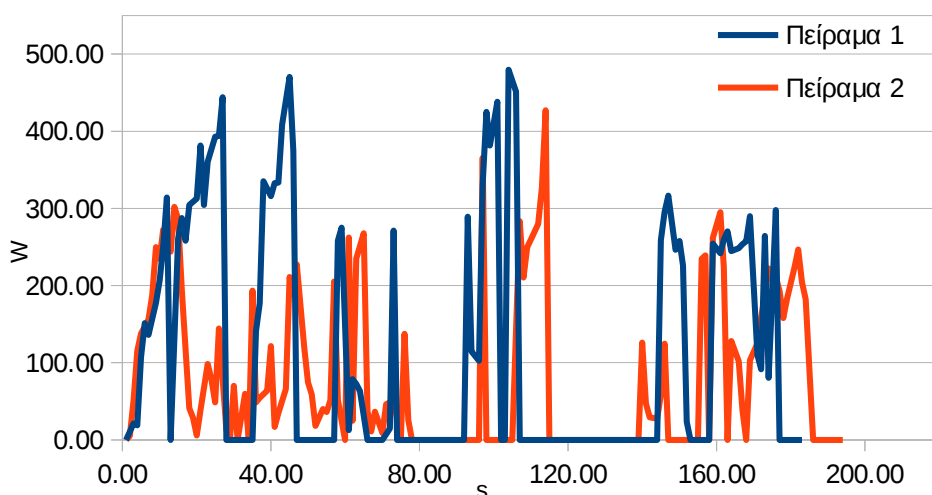
Αφού τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ανοιχτό χώρο, ο έλεγχος της ταχύτητας του οχήματος πραγματοποιήθηκε μόνο από τον οδηγό. Έτσι, κατά το Πείραμα 1, ορίστηκε η μέση ταχύτητα που έπρεπε να ακολουθηθεί κατά το δεύτερο πείραμα. Στην Εικόνα 35 φαίνονται τα διαγράμματα χρόνου- ταχύτητας στα δύο πειράματα όπως επίσης και η μέση ταχύτητα που έπρεπε να ακολουθηθεί στο πείραμα 2.



Εικόνα 35: Διάγραμμα χρόνου- ταχύτητας, πολιτική οδήγησης

Λόγω της φύσης της επιλεγμένης διαδρομής, μετά το 70ο δευτερόλεπτο το αυτοκίνητο πρέπει να επιβραδύνει για τη δεξιά στροφή προς το χώρο στάθμευσης της σχολής ΜΠΔ. Ακριβώς μετά τη δεξιά στροφή, ο δρόμος γίνεται ελαφρώς κατηφορικός και το αυτοκίνητο αναπτύσσει ταχύτητα 20 χιλιόμετρα/ώρα λόγω της ορμής του. Τέλος, επιταχύνει ξανά μέχρι να φτάσει στο τέλος της διαδρομής όπου και σταματάει. Το διάγραμμα χρόνου- ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 36.





Εικόνα 36: Διάγραμμα χρόνου-ισχύος, πολιτική οδήγησης

Εφαρμόζοντας αριθμητική ολοκλήρωση στο διάγραμμα χρόνου-ισχύος, βρίσκεται η συνολική ενέργεια. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα ποσά ενέργειας καταναλώθηκαν ανάλογα με την πηγή, όπως και η συνολική ενέργεια για τα δύο πειράματα.

	Πείραμα 1	Πείραμα 2
Ενέργεια από υπερπυκνωτές (J)	4445	2475
Ενέργεια από κυψέλη καυσίμου (J)	16453	13196
<b>Συνολική ενέργεια (J)</b>	<b>20898</b>	<b>15671</b>

Πίνακας 9: Σύγκριση ενέργειας για πολιτική οδήγησης

Αν και η ενέργεια που ανακτήθηκε και χρησιμοποιήθηκε από τους υπερπυκνωτές κατά το Πείραμα 1 ήταν μεγαλύτερη από αυτή του Πειράματος 2, η ενέργεια που απαιτήθηκε και από την κυψέλη καυσίμου είναι και αυτή μεγαλύτερη, οπότε σαν ενεργειακά πιο αποδοτική μέθοδος οδήγησης επιλέγεται αυτή της “συμβατικής” οδήγησης.

Σε πραγματικές συνθήκες δρόμου όπως για παράδειγμα στην πόλη ή σε αυτοκινητόδρομο, η πολιτική της “επιθετικής” οδήγησης μπορεί να είναι επικίνδυνη ή ακόμα και αδύνατη. Όμως αυτού του είδους τα πειράματα είναι πολύ χρήσιμα για ορισμό στρατηγικών σε κλειστές διαδρομές ή σε αγώνες όπως για παράδειγμα το Shell Eco Marathon όπου λαμβάνει μέρος η ομάδα Tucer από το 2008.



## **Παρατηρήσεις**

Ο ελεγκτής του ηλεκτροκινητήρα χρησιμοποιήθηκε στο όχημα κατά την συμμετοχή του στο διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου Shell Eco Marathon τις χρονιές 2014 και 2015. Εκεί φάνηκε τόσο η αξιοπιστία, όσο και η ικανότητα του να εκκινεί το όχημα ομαλά.

Το σύστημα ανάκτησης και διαχείρισης ενέργειας του οχήματος από την άλλη, δεν έχει εγκατασταθεί στο όχημα για συμμετοχή σου σε επίσημο διαγωνισμό αλλά τα πειραματικά αποτελέσματα από τις δοκιμές που έλαβαν μέρος στο Πολυτεχνείο Κρήτης αναδεικνύουν τις προοπτικές του για περαιτέρω βελτίωση της κατανάλωσης του οχήματος όπως επίσης και για μια αποδοτική αυτοματοποιημένη πολιτική οδήγησης η οποία προσαρμόζεται στις εκάστοτε ανάγκες του οχήματος.

## **Μελλοντικές Προτάσεις**

Το σύστημα ανάκτησης και διαχείρισης ενέργειας αυτή τη στιγμή φορτίζει τους υπερπυκνωτές μόνο κατά την επιβράδυνση του οχήματος, πράγμα το περιορίζει τις στρατηγικές οδήγησης του οχήματος. Στο μέλλον θα μπορούσε να τροποποιηθεί το υπάρχον σύστημα έτσι ώστε οι υπερπυκνωτές να φορτίζουν από την κυψέλη καυσίμου όταν αυτή δε τροφοδοτεί το όχημα, όπως όταν για παράδειγμα το όχημα βρίσκεται ακίνητο. Με αυτό τον τρόπο αυξάνονται οι αποστάσεις που μπορεί να διανύσει το όχημα με μόνη πηγή ενέργειας τους υπερπυκνωτές. Εκτός από αυτό, το σύστημα κυψέλης καυσίμου - υπερπυκνωτών αυτή τη στιγμή είναι συνδεδεμένο σε σειρά και έτσι κάθε στιγμή που απαιτείται ενέργεια από το όχημα, αυτή παρέχεται είτε από την κυψέλη καυσίμου, είτε από τους υπερπυκνωτές. Με μια πιο “έξυπνη” συνδεσμολογία, όπως παράλληλη ή με εναλλαγή συνδεσμολογίας εν κινήσει, μπορεί να αυξηθεί η οικονομία καυσίμου αφού με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε η κυψέλη καυσίμου να λειτουργεί σχεδόν μόνιμα στο σημείο μέγιστης απόδοσης της και οι υπερπυκνωτές σαν “φίλτρο” στις απότομες απαιτήσεις ενέργειας κατά τις οποίες η κυψέλη καυσίμου δε μπορεί να διαχειριστεί λόγω κατασκευής της.

Τέλος, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα μπορούσε να “εκπαιδεύεται” σε πραγματικό χρόνο, αλλάζοντας την πολιτική οδήγησης ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε διαδρομής.

## Βιβλιογραφία

[1] APEC Energy Working Group, "Electric Motors -Alignment of Standards and Best Practice Programmes within APEC", EWG, Oct 2008.

[2] Γ. Βασσάλος. "Διανυσματικός έλεγχος με ελαχιστοποίηση απωλειών σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, Msc thesis, Τμήμα Ηλεκτρ. Μηχ. Και Μηχ Υπολ., Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2010."

[3] Α. Βιδιαδάκης, *et al*, "Ηλεκτρικές Μηχανές" in *Ηλεκτρολογία Τεχνολογικής Κατεύθυνσης*, Αθήνα, Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων, 1999.

[4] Α. Ζερβάκος, "Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικής διάταξης για υβριδικό όχημα: ανάκτηση ενέργειας, Τμήμα Ηλεκτρολ. Μηχαν. Και Τεχνολ. Υπολογ., Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2009.

[5] D. Wilson, "Intro to the Field Oriented Control", Texas Instruments, 2014.

[6] S. Dan, "Clarke's and Park's Transformations" College of Electr. Engineering, Zhejiang University, 2008.

[7] Ξ. Λειβαδιώτης, Γ. Αδαμίδης, "ΟΔΗΓΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΤΑΣΕΩΣ", Αθήνα, 2006.

[8] Ι. ΣΤ. Μανωλάς, "Σχεδίαση Και Έλεγχος Ηλεκτρικών Μηχανών Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης (switched Reluctance Machines – Srms)", Ph.D dissertation, Σχολή Ηλ. Μηχ. Και Μηχ. Υπολ, ΕΜΠ, Αθήνα, 2010.

[9] Ε. Σ. Σεργάκη, "Βέλτιστος Έλεγχος λειτουργίας με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών απωλειών Ηλεκτρικών Κινητήριων Συστημάτων, με χρήση Δυναμικού Προγραμματισμού, Ασαφούς Λογικής και υλοποίηση-πειραματική επαλήθευση του βέλτιστου ελεγκτή σε Ψηφιακό Επεξεργαστή Σήματος DSP", PhD dissertation, Σχολή Ηλεκτρον. Μηχ. Και Μηχ. Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2010.

[10] *DRV830x\_RevD Hardware Developer's Package*, Texas Instruments, 2013.

[11] Wikipedia, "Code Composer Studio", Online Article. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Code\\_Composer\\_Studio](https://en.wikipedia.org/wiki/Code_Composer_Studio)

[12] J. Cibulka, "Kinetic energy recovery system by means of flywheel energy storage", 2009.

[13] Cliff Gall, "*Air Hybrid Drive*", Online Article. Available at: [itshybrid.com/Air-Hybrid.htm](http://itshybrid.com/Air-Hybrid.htm)

[14] J. Stecki, P. Matheson, "Advances in automotive hydraulic hybrid drives", in Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power, TSUKUBA, 2005.

[15] C.C. Hua, M.Y. Lin, "A Study of Charging Control of Lead-Acid Battery for Electric Vehicles, in Industrial Electronics, 2000. ISIE 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on, vol. 1, pp 135-140, 2000.

[16] E. Karden, *et al.* "Energy storage devices for future hybrid electric vehicles", Jurnal of Power Sources, vol. 168, Issue 1, pp. 2-11, 2007.

[17] N. Omar *et al.* "Lithium iron phosphate based battery - Assessment of the aging parameters and development of cycle life model", Applied Energy, vol. 113, pp 1575-1585, 2014.

[18] Santiago Miret, "*Storage wars: batteries vs supercapacitors*", Online Article. Available at: <http://berc.berkeley.edu/storage-wars-batteries-vs-supercapacitors/>

[19] Vovlo Car UK, "*Volvo car group and flybird conduct UK testing of flywheel KERS technology*", Online Article. Available at: <https://www.media.volvocars.com/uk/en-gb/media/pressreleases/141626/volvo-car-group-and-flybrid-conduct-uk-testing-of-flywheel-kers-technology>

[20] Bill Howard, "*Volvo hybrid drive: 60,000 rpm flywheel, 25% boost to mpg*", Online Article. Available at: <http://www.extremetech.com/extreme/154405-volvo-hybrid-drive-60000-rpm-flywheel-25-boost-to-mpg>

[21] H. Searl Dunn, P. H. Wojciechowski, "High-pressure hydraulic hybrid with regenerative braking", In Seventh Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proceedings, pp. 989-995, California, 1972.

[22] S. Martini, "The M.A. hydrobus: A drive concept with hydrostatic brake energy recovery", In International Symposium on Advanced and Hybrid Vehicles, 1984.

[23] S.J. Clegg, "A Review of Regenerative Braking Systems", University of Leeds, Leeds, 1996.

[24] C. Attaianese, M. Di Monaco, G. Tomasso, "Power Control for Fuel-Cell-Supercapacitor Traction Drive," in *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.61, no.5, pp.1961-1971, Jun 2012.

[25] G. Tzortzis, A. Amargianos, S. Piperidis, E. Koutroulis, N.C. Tsourveloudis, "Development of a compact regenerative braking system for electric vehicles," in *Control and Automation (MED), 2015 23th Mediterranean Conference on* , vol., no., pp.102-108, 16-19 June 2015.

[26] C. Ziogou *et al.* "Performance Assessment and Efficiency of a Renewable Hydrogen Production Station based on a Supervisory Control Methodology", in *Chemical Engineering Transactions*, Vol 35, 2013.