



# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή συστήματος παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας για αστικό όχημα”



## Ευσταθίου Σ. Δημήτριος

Επιβλέπων: Νικόλαος Τσουρβελούδης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά 2010



Εργαστήριο Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής

## **Ευχαριστίες**

Κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων της διπλωματικής μου συνεργάστηκα με αρκετούς ανθρώπους οι οποίοι με βοήθησαν να ολοκληρώσω αυτή την εργασία και γι' αυτό το λόγο θέλω να τους ευχαριστήσω.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Τσουρβελούδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της εργασίας και για την καθοδήγηση που μου παρείχε με τις γνώσεις, τις ιδέες και τις συμβουλές του. Επίσης τον ευχαριστώ γιατί μου παρείχε κάθε είδος εξοπλισμού που χρειαζόμουν.

Τον κ. Πιπερίδη Σάββα, ΕΤΕΠ του Εργαστηρίου Ευφύων Συστημάτων & Ρομποτικής, για την άψογη συνεργασία μας σε όλα τα στάδια της εργασίας, από τη σχεδίαση του συστήματος μέχρι την τοποθέτησή του στο όχημα.

Τον κ. Σπανουδάκη Πολυχρόνη, υποψήφιο διδάκτωρα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης και επικεφαλή της ερευνητικής ομάδας TUCER, για τη συμμετοχή μου στην ομάδα TUCER από το 2007 μέχρι το 2010 καθώς και για τις συνεχώς αναβαθμιζόμενες αρμοδιότητές μου σε αυτήν.

Τον κ. Τσινάρη Ιωάννη, προσωπικό του Διατμητικού Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών, ο οποίος με τις πολλές ώρες εργασίας στο εργαστήριο βοήθησε στην έγκαιρη ολοκλήρωση της κατασκευής του οχήματος.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου και μέλη της ομάδας TUCER, Παππά Αναστάσιο, Πλουμάκη Ευάγγελο και Στρατηγό Ιωάννη για την άψογη συνεργασία μας, η οποία ήταν καταλυτική για την επιτυχή ολοκλήρωση του project.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με ώθησε στην τριτοβάθμια εκπαίδευση και για τη στήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνεται στους γονείς μου  
Σπύρο , Χρυσούλα

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	7
1.1        Πρόλογος .....	7
1.2        Παρουσίαση του οχήματος.....	8
1.3        Περιγραφή του προβλήματος .....	8
1.4        Δομή εργασίας .....	9
Κεφάλαιο 2: Τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές του υδρογόνου .....	10
2.1        Τρόποι παραγωγής υδρογόνου .....	10
2.2        Αποθήκευση υδρογόνου.....	12
2.3        Εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς.....	14
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση δυνάμεων και Βέλτιστος Έλεγχος .....	17
3.1        Ανάλυση δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα.....	17
3.2        Διατύπωση προβλήματος βέλτιστου ελέγχου .....	21
Κεφάλαιο 4: Κυψέλες καυσίμου.....	25
4.1        Εισαγωγή.....	25
4.1.1    Ιστορική αναδρομή.....	25
4.1.2    Αρχή λειτουργίας.....	25
4.1.3    Τύποι κυψελών καυσίμου.....	26
4.1.4    Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου.....	28
4.2        Κύψελες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM) .....	29
4.2.1    Αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου .....	29
4.2.2    Δομή .....	29
4.2.3    Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων .....	30
4.2.4    Ηλεκτρόδια.....	31
4.2.5    Καταλύτης ή ηλεκτροκαταλύτης .....	32
4.2.6    Στρώμα διάχυσης αερίων ή πορώδες στρώμα.....	34
4.2.7    Διπολικές πλάκες.....	35
4.2.8    Απόδοση, ισχύς και αποδιδόμενη ενέργεια .....	36
4.2.9    Συστοιχία κυψελών καυσίμου.....	37
4.2.10   Διαχείριση νερού - υγρασία.....	38
4.2.11   Θερμοκρασία λειτουργίας και πίεση.....	39
4.3        Το ολοκληρωμένο σύστημα NEXA Power Module.....	40
Κεφάλαιο 5: Ηλεκτρικοί κινητήρες .....	52
5.1        Κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων .....	52
5.1.1    Μηχανές συνεχούς ρεύματος .....	52
5.1.2    Σύγχρονοι κινητήρες.....	54

5.1.3	Ασύγχρονοι κινητήρες .....	54
5.1.4	Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς Ψήκτρες .....	57
5.1.5	Σύγκριση των ειδών των ηλεκτροκινητήρων.....	58
5.2	Επιλογή ηλεκτροκινητήρα.....	59
	<b>Κεφάλαιο 6: Υπόλοιπα συστήματα οχήματος.....</b>	<b>64</b>
6.1	Υπερπυκνωτές .....	64
6.1.1	Κατηγορίες και χαρακτηριστικά κοινών πυκνωτών.....	64
6.1.2	Ορισμός και χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών.....	65
6.1.3	Κατηγορίες υπερπυκνωτών.....	66
6.1.4	Εφαρμογές υπερπυκνωτών σε οχήματα.....	69
6.1.5	Επιλογή υπερπυκνωτών για το όχημα ER10 .....	71
6.2	Ηλεκτρονικά ισχύος .....	74
6.2.1	Χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στα συστήματα κυψελών καυσίμου.....	74
6.2.2	Επιλογή dc/dc μετατροπέα για το όχημα ER10.....	75
6.3	Σύστημα παροχής υδρογόνου.....	79
6.4	Σύστημα ασφαλείας .....	79
6.5	Ηλεκτρικό κύκλωμα .....	80
	<b>Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα και μελλοντικές προτάσεις.....</b>	<b>83</b>
7.1	Αποτελέσματα.....	83
7.2	Μελλοντικές προτάσεις .....	84
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>85</b>

## **Περίληψη**

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο τη μελέτη, τη σχεδίαση και τη κατασκευή ενός συστήματος παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας για αστικό όχημα. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από μηδενική βάση στο Εργαστήριο Ευφυών Συστημάτων και Ρομποτικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι το ενεργειακό σύστημα, το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για συγκεκριμένο όχημα, να έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης και μικρή ενεργειακή κατανάλωση. Τα κύρια υποσυστήματα που απαρτίζουν το συγκεκριμένο σύστημα είναι οι κυψέλες υδρογόνου, ο ηλεκτροκινητήρας και τα ηλεκτρονικά ισχύος.

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Πρόλογος

Το μεγαλύτερο ποσοστό οχημάτων που κυκλοφορούν στις μέρες μας χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσεως (Μ.Ε.Κ.). Αν και οι Μ.Ε.Κ. συνεχώς βελτιώνονται έχουν κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Το σημαντικότερο από αυτά είναι ότι τα αέρια κατάλοιπα που προέρχονται από την καύση της βενζίνης και του πετρελαίου είναι εξαιρετικά επιβλαβή για το περιβάλλον και προκαλούν ακόμα και κλιματικά φαινόμενα όπως για παράδειγμα το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επίσης, ένα επιπλέον μειονέκτημα, είναι η "πετρελαϊκή κρίση" η οποία έχει ως επακόλουθο τη συνεχώς αυξανόμενη τιμή του πετρελαίου. Ως αποτέλεσμα αυτών των καταστάσεων, η έρευνα έχει οδηγηθεί σε μια προσπάθεια εύρεσης νέων αξιόλογων εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Οι πιο σημαντικές νέες κατηγορίες οχημάτων αλλά και αυτές που αξιοποιούνται εμπορικά είναι οι ακόλουθες: υβριδικά, πλήρως ηλεκτρικά, υδρογονοκίνητα αλλά και οχήματα που αξιοποιούν το φυσικό αέριο.

Το κοινό στοιχείο, στα περισσότερα από τα οχήματα των παραπάνω κατηγοριών, είναι η αξιοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων οι οποίοι έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις Μ.Ε.Κ. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η υψηλή ροπή στις χαμηλές στροφές, ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης, η αθόρυβη λειτουργία και η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον.

Όσον αφορά τη πηγή ενέργειας, η οποία τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα, κάθε μια από τις παραπάνω εναλλακτικές έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της και γι' αυτό το λόγο αναπτύσσονται ταυτόχρονα οι περισσότερες από αυτές. Για παράδειγμα, ένα πλήρως ηλεκτρικό όχημα έχει πιο απλή κατασκευή και είναι πιο προσιτό οικονομικά από ένα όχημα με κυψέλες υδρογόνου. Όμως όταν σε μια πόλη όλοι οι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων συνδέσουν τα οχήματά τους με το δίκτυο για να τα φορτίσουν θα υπάρχει μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Αν αυτή η ηλεκτρική ενέργεια δεν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (υποδομές οι οποίες απαιτούν αρκετά χρόνια μέχρι να δημιουργηθούν αλλά και μεγάλο κόστος) τότε τα ηλεκτρικά οχήματα χάνουν τη φιλικότητά τους ως προς το περιβάλλον.

Στο τομέα των οχημάτων που αξιοποιούν κυψέλες καυσίμου, όπως αυτό που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, έχει γίνει μεγάλη πρόοδος αλλά υπάρχουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα. Το κύριο μειονέκτημα είναι το μεγάλο κόστος των κυψελών υδρογόνου λόγω της χρησιμοποίησης πλατίνας. Ωστόσο σε ορισμένα πανεπιστήμια όπως του Akron και του Dayton καθώς και το Ερευνητικό Εργαστήριο Υλικών και Κατασκευών της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ διεξάγεται έρευνα για την αντικατάσταση της πλατίνας με «αζωτούχους» νανοσωλήνες άνθρακα με σκοπό την μείωση του κόστους. Επίσης για την επίλυση του ίδιου προβλήματος η βρετανική εταιρία ACAL Energy παρουσίασε την καινοτομία της "Flow Catch" και ισχυρίζεται ότι η συγκεκριμένη καινοτομία θα μπει στη παραγωγή στο άμεσο μέλλον. Με τη καινοτομία αυτή οι «στερεές» κάθοδοι αντικαθίστανται από «υγρές»

οι οποίες δεν απαιτούν την παρουσία λευκόχρυσου, ως καταλύτη. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχουν δίκτυα ανεφοδιασμού για υδρογονοκίνητα οχήματα, όμως αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί όταν αρχίσει η μαζική τους παραγωγή.

## 1.2 Παρουσίαση του οχήματος

Το όχημα στο οποίο θα τοποθετηθεί το σύστημα παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας που περιγράφεται σε αυτή την εργασία ονομάζεται ER10. Το συγκεκριμένο όχημα σχεδιάστηκε από την ερευνητική ομάδα TUCER και κατασκευάσθηκε στο Διατμητικό Εργαστήριο Εργαλειομηχανών του Πολυτεχνείου Κρήτης το 2009 και υπέστη ορισμένες βελτιώσεις το 2010.

Το πλαίσιο του οχήματος είναι κατασκευασμένο από σωλήνες αλουμινίου ενώ το κάλυμμα από ανθρακονήματα. Οι διαστάσεις του είναι  $2,5 \times 1,25 \times 1\text{m}$  ( $\text{M} \times \text{Π} \times \text{Υ}$ ) και το βάρος του 110kg.



Εικόνα 1: Το όχημα ER10

## 1.3 Περιγραφή του προβλήματος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένα σύστημα παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας κατάλληλο για την κίνηση του οχήματος ER10. Στόχος είναι το συγκεκριμένο σύστημα να έχει μεγάλη απόδοση και μικρή ενεργειακή κατανάλωση. Η πηγή ενέργειας του συστήματος είναι κυψέλες υδρογόνου και η κίνηση στους τροχούς μεταδίδεται μέσω ηλεκτροκινητήρα. Τόσο η σχεδίαση όσο και η κατασκευή περιστράφηκαν γύρω από δυο κύριους άξονες. Ο

πρώτος είναι η βέλτιστη απόδοση του συστήματος και ο δεύτερος η ασφάλεια .Η ύπαρξη σε κοντινή απόσταση αέριου υδρογόνου και ηλεκτρικού ρεύματος απαιτούσε συστήματα ασφαλείας που θα απέτρεπαν ένα ενδεχόμενο ατύχημα.

## 1.4 Δομή εργασίας

Αρχικά, στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου καθώς και η χρήση του στα μέσα μεταφοράς.

Στο κεφάλαιο 3 αναλύεται το φυσικό μοντέλο που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα. Επίσης παρουσιάζεται το του βέλτιστου ελέγχου του οχήματος για δεδομένη διαδρομή κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των κυψελών υδρογόνου, τα είδη των κυψελών που υπάρχουν καθώς και η συστοιχία των κυψελών που χρησιμοποιούνται στο όχημα ER10.

Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται τα είδη των ηλεκτροκινητήρων καθώς και τα χαρακτηριστικά τους και παρουσιάζεται ο ηλεκτροκινητήρας που επιλέχθηκε.

Στο κεφάλαιο 6 αναλύεται ο τρόπος επιλογής και τα χαρακτηριστικά των υπολοίπων υποσυστημάτων του συστήματος παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αλλά και μελλοντικές προτάσεις για την βελτίωση του συστήματος.

## Κεφάλαιο 2: Τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές του υδρογόνου

### 2.1 Τρόποι παραγωγής υδρογόνου

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο αέριο στη φύση. Στη γη, βρίσκεται κυρίως σε ενώσεις όπως το νερό, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και αλλού. Για να παραχθεί υδρογόνο απαιτείται ενέργεια, άρα το υδρογόνο δεν είναι πηγή ενέργειας (μιας και δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση), αλλά είναι φορέας ενέργειας. Αν μάλιστα παραχθεί από καθαρή ενεργειακή πηγή, τότε είναι καθαρός φορέας ενέργειας. Εκτιμάται ότι το υδρογόνο θα αποτελέσει ένα νέο καύσιμο που θα χρησιμοποιούμε στο μέλλον, τόσο στα σπίτια όσο και στα αυτοκίνητά μας.

Η παραγωγή του υδρογόνου μπορεί να γίνει με δύο διαδικασίες:

- με *Χημική Μετατροπή*
- με *Ηλεκτρολυτική Μετατροπή*

Στη συνέχεια αναπτύσσονται αυτές οι διαδικασίες καθώς και οι υποκατηγορίες που ανήκουν σε αυτές.

#### ➤ Χημική μετατροπή

Οι τεχνικές χημικής μετατροπής υδρογονανθράκων για την παραγωγή υδρογόνου συμπεριλαμβάνουν την αεριοποίηση, την αναμόρφωση παρουσία καταλυτών και την μερική οξείδωση. Η αεριοποίηση περιλαμβάνει θέρμανση στους  $750^{\circ}\text{C}$  παρουσία υδρατμών και οξυγόνου, που το διασπούν σε υγρά, αέρια και στερεά προϊόντα. Σε αυτή τη περίπτωση όμως πρέπει να τονιστεί ότι έχουμε παραγωγή ανεπιθύμητου διοξειδίου του άνθρακα (το οποίο συλλέγεται σε ειδικά φίλτρα αν απαιτηθεί) αλλά προς το παρόν είναι από τις πιο φθηνές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου προς άμεση χρήση.

#### ➤ Ηλεκτρολυτική μετατροπή

Είναι η μόνη περίπτωση που δεν έχουμε συμπαραγωγή ανεπιθύμητων ρύπων. Η διάσπαση δε του νερού μπορεί να γίνει με τους κάτωθι τρόπους:

1. Ηλεκτρόλυση του νερού (μέσω ΑΠΕ)

Η πιο «καθαρή» και ασφαλής μέθοδος παραγωγής είναι η ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) όπως η ηλιακή, αιολική και η γεωθερμία. Αυτή η τεχνική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της ενέργειας από ΑΠΕ σε μορφή υδρογόνου σε κατάλληλες δεξαμενές, το οποίο μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρισμό, ιδανικά μέσω κυψελών καυσίμου, σε άλλες περιόδους.

Υπάρχουν δύο ειδών μονάδες ηλεκτρόλυσης αρκετά αναπτυγμένες στις μέρες μας. Πέρα από τη συμβατική ηλεκτρόλυση νερού, όπου χρησιμοποιείται ένα μικρο-πορώδες διάφραγμα για το διαχωρισμό των παραγόμενων αερίων (οξυγόνο στην κάθιδο και υδρογόνο στην άνοδο) από το αλκαλικό διάλειμμα (*Άλκαλικές Μονάδες Ηλεκτρόλυσης*), κατασκευάζονται σήμερα μονάδες ηλεκτρόλυσης που παράγουν υδρογόνο σε υψηλή πίεση (έως 30bar), οι οποίες αποτελούνται από διπολικές πλάκες/ηλεκτρόδια, ενώ ερευνάται η λειτουργία τους σε πίεση έως 150bar. Επίσης έχουν αναπτυχθεί και μονάδες ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (*Μονάδες Ηλεκτρόλυσης τύπου PEM*), οι οποίες δεν περιέχουν καυστική ποτάσα (όπως οι αλκαλικές), παράγουν καθαρότερο υδρογόνο, ενώ υπάρχει προοπτική για παραγωγή υδρογόνου υπό πίεση.

## 2. Θερμική καταλυτική διάσπαση

Πρόκειται ουσιαστικά για τη θερμοχημική διαδικασία διάσπασης του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει υψηλό θεωρητικό βαθμό μετατροπής θερμικής ενέργειας σε υδρογόνο (της τάξης του 50%), ο οποίος είναι υψηλότερος από τον βαθμό απόδοσης της οδού θερμότητα – ηλεκτρισμός – ηλεκτρόλυση. Η μέθοδος ερευνάται ταυτόχρονα για την χρήση τους με νέου τύπου πυρηνικούς αντιδραστήρες (4<sup>ης</sup> γενιάς), καθώς και άλλες συγκεντρωτικές ηλιακές τεχνολογίες, με πολλαπλά συγκεντρωτικά κάτοπτρα.

## 3. Φωτοκαταλυτική διάσπαση

Η φωτο-ηλεκτρόλυση αποτελείται από συνδυασμό φωτοβολταϊκών και επιτόπιας ηλεκτρόλυσης. Η μέθοδος αυτή της φώτο-ηλεκτρόλυσης μελετάται τα τελευταία 12 χρόνια (σε εργαστηριακό επίπεδο) και σήμερα υπάρχουν εταιρίες που έχουν κατασκευάσει πρωτότυπα. Ο βαθμός απόδοσης είναι συγκρισιμός με τα συστήματα φωτοβολταϊκών σε συνδυασμό με μονάδες ηλεκτρόλυσης αλλά προβλήματα θεωρούνται η διαχείριση και η στεγανοποίηση των συλλεκτών που αναγκαστικά πρέπει να καλύπτουν μεγάλες επιφάνειες. Πάντως ως σύστημα η φωτο-ηλεκτρόλυση θεωρείται απλούστερη από το συνδυασμό φωτοβολταϊκών και μονάδας ηλεκτρόλυσης.

#### 4. Φωτόλυση, Βίο-φωτόλυση

Αερόβιες και αναερόβιες μικροβιολογικές διαδικασίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα, άλλα απόβλητα σε υγρή μορφή αλλά και φύκια. Οι διαδικασίες αυτές βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο και σίγουρα θα χρειαστούν ανεπτυγμένες μονάδες καθαρισμού

## 2.2 Αποθήκευση υδρογόνου

Ένα σημαντικό κομμάτι για τη τεχνολογία του υδρογόνου είναι ο τρόπος αποθήκευσης του είτε υπό χαμηλή είτε υπό υψηλή πίεση. Στις μέρες μας υπάρχουν δύο διαδεδομένοι τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου. Αυτοί είναι:

- Δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου υπό πίεση

Οι φιάλες αυτές ανάλογα με την κατασκευή τους μπορούν να φτάσουν έως και το 700bar πίεση. Πιο διαδεδομένη πίεση είναι αυτή των 200bar που οποιοσδήποτε μπορεί πολύ εύκολα να προμηθευτεί από το εμπόριο μέσω εταιρειών που εμπορεύονται χημικά αέρια. Επίσης μπορεί ο καθένας να παράξει υδρογόνο μόνο που σε αυτή την περύττωση θα χρειαστεί είτε μονάδα ηλεκτρόλυσης η οποία αποδίδει το υδρογόνο σε υψηλές πιέσεις είτε επιβάλλεται η χρησιμοποίηση συμπιεστών για να μπορεί να φτάσει το υδρογόνο σε πιέσεις κοντά στα 200bar.

Όσον αφορά τις φιάλες των 500bar ή ακόμα και των 700bar αυτές είναι κατασκευασμένες από ειδικά κράματα μετάλλων και το εξωτερικό τους είναι καλυμμένο με ένα περίβλημα από ανθρακονήματα που έχουν την μορφή πλεκτού. Αυτές οι δεξαμενές είναι πολύ ελαφριές, μικρές σε όγκο, απολύτως ασφαλής αλλά βασικό μειονέκτημα τους είναι η υψηλή τιμή κτίσης τους μιας και δεν υπάρχουν σε μαζική παραγωγή.



Εικόνα 2: Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου υπό πίεση

➤ Δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου μεταλλικών υδριδίων

Τα υδρίδια μετάλλων είναι συγκεκριμένοι συνδυασμοί μεταλλικών κραμάτων τα οποία δρουν σαν σε ένα σφουγγάρι που απορροφά νερό. Τα υδρίδια μετάλλων έχουν την ικανότητα να απορροφούν υδρογόνο και να το απελευθερώνουν αργότερα, είτε σε θερμοκρασία δωματίου είτε μέσω θέρμανσης του δοχείου. Η συνολική ποσότητα του υδρογόνου που απορροφάται είναι γενικά 1% - 2% του συνολικού βάρους του δοχείου. Μερικά μεταλλικά υδρίδια (τελευταίας γενιάς) είναι σε θέση να αποθηκεύουν 7% - 10% του δικού τους βάρους αλλά μόνο όταν θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Το ποσοστό του αερίου που απορροφάται στον βαθμό του μετάλλου είναι ακόμη σχετικά χαμηλό αλλά τα υδρίδια προσφέρουν μια αξιόπιστη λύση για την αποθήκευση υδρογόνου.

Τα υδρίδια μετάλλων προσφέρουν το πλεονέκτημα της ασφαλούς μεταφοράς υδρογόνου κάτω από συνεχή πίεση. Η διάρκεια ζωής του δοχείου αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την καθαρότητα του υδρογόνου όταν αποθηκεύεται. Τα κράματα δρουν σαν σφουγγάρι, τα οποία απορροφούν υδρογόνο, αλλά επίσης απορροφούν τους ρύπους που εισάγονται στο δοχείο μέσω του υδρογόνου. Το αποτέλεσμα είναι ότι το υδρογόνο που απελευθερώνεται από το δοχείο είναι εξαιρετικά καθαρό, αλλά η διάρκεια ζωής του δοχείου και η ικανότητα να αποθηκεύει υδρογόνο μειώνεται καθώς οι ρύποι μένουν και γεμίζουν τα κενά στο μέταλλο τα οποία κατείχε το υδρογόνο.



Εικόνα 3: Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου μεταλλικών υδριδίων

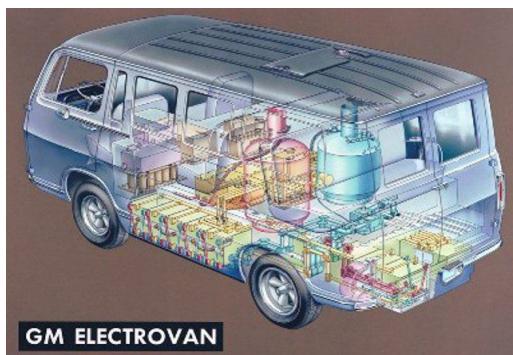
➤ Νέες δομές αποθήκευσης υδρογόνου σε νανοπαπύρους – νανοσωλήνες

Τα τελευταία χρόνια μια νέα κατηγορία πορωδών υλικών, οι νανοσωλήνες του άνθρακα, προτάθηκαν για να χρησιμοποιηθούν ως νάνο-δεξαμενές για την αποθήκευση υδρογόνου. Πολύ σύντομα όμως έγινε αντιληπτό ότι η απορρόφηση

δεν ήταν τόσο μεγάλη ώστε να δικαιολογήσει την χρήση τους γι αυτό το σκοπό. Έτσι η προσπάθεια αυτή μετατέθηκε μέχρι να βρεθεί τρόπος να αυξηθεί η απορροφητική τους ικανότητα.

## 2.3 Εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς

Το πρώτο υδρογονοκίνητο όχημα κατασκευάστηκε το 1807 από τον Ελβετό εφευρέτη François Isaac de Rivaz. Το συγκεκριμένο όχημα είχε κινητήρα εσωτερικής καύσεως ο οποίος για καύσιμο απαιτούσε μίγμα υδρογόνου με οξυγόνο. Ωστόσο το πρώτο αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου, το οποίο μπορούσε να κυκλοφορήσει στους δρόμους, παρήχθει το 1966 από την αυτοκινητοβιομηχανία General Motors.



**Εικόνα 4: Το πρώτο όχημα που κυκλοφόρησε με κυψέλες καυσίμου (1966 GM Electrovan)**

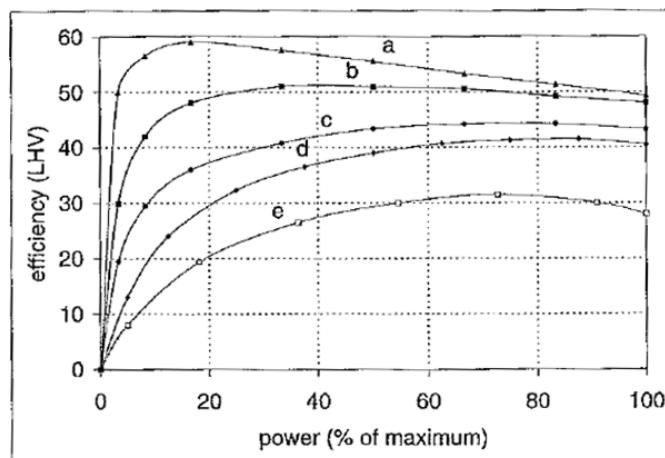
Τα τελευταία 20 χρόνια σχεδόν όλες οι εταιρίες έχουν σχεδιάσει και παράξει υδρογονοκίνητα οχήματα τα οποία αξιοποιούν το υδρογόνο με διάφορους τύπους κινητήρων. Για παράδειγμα η Mercedes λανσάρει το όχημα Mercedes-Benz F-Cell το οποίο αξιοποιεί κυψέλες υδρογόνου. Η BMW σχεδίασε και κατασκεύασε το όχημα BMW H2R το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο υγρό υδρογόνο. Το μοντέλο της BMW είναι το πιο γρήγορο υδρογονοκίνητο όχημα αναπτύσσοντας ταχύτητα 301,95 km/h. Ένα διαφορετικό είδος κινητήρα ο οποίος αξιοποιεί το υδρογόνο είναι ο Hydrogen Winkel ο οποίος αναπτύχθηκε από τη Mazda. Επίσης διάφοροι τύποι μηχανών που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο έχουν αναπτυχθεί, εκτός των αυτοκινήτων, σε λεωφορεία, σε μοτοσυκλέτες, σε πλοία αλλά και σε βιομηχανικές εφαρμογές.



Εικόνα 5: Τα υδρογονοκίνητα οχήματα των εταιριών BMW, Mazda και Mercedes αντίστοιχα

Τα FCVs μπορούν να τροφοδοτούνται με αέριο υδρογόνο που αποθηκεύεται απευθείας στο όχημα μέσα σε δεξαμενές ή παράγεται από ένα δευτερεύον καύσιμο, όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη ή το φυσικό αέριο που εμπεριέχει οξυγόνο. Αυτά τα δευτερεύοντα καύσιμα μετατρέπονται σε αέριο υδρογόνο από έναν αναμορφωτή καυσίμου (reformer) που είναι επί του οχήματος. Τα FCVs που τροφοδοτούνται άμεσα με υδρογόνο δεν εκπέμπουν ρύπους, ενώ αυτά που κάνουν χρήση δευτερευόντων αερίων και ενός αναμορφωτή καυσίμου (reformer) παράγουν μικρές ποσότητες αέριων ρύπων.

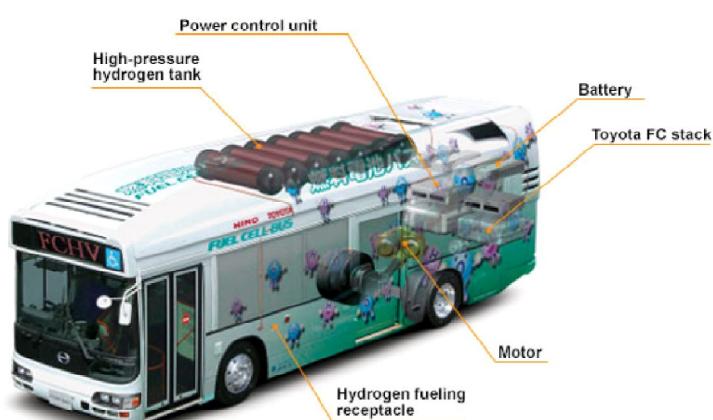
Η δυσκολία παραγωγής και η έλλειψη υποδομών για τη διάθεση του υδρογόνου αποτελεί, προς το παρόν, ένα εμπόδιο για την ευρεία χρήση αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου. Ωστόσο τα οχήματα που έχουν εγκατεστημένο αναμορφωτή καυσίμου μπορούν να τροφοδοτούνται απευθείας με υδρογονάνθρακες. Βέβαια, η εγκατάσταση αναμορφωτών αυξάνει το κόστος, την πολυπλοκότητα της κατασκευής του αυτοκινήτου και επιπλέον υπάρχει έκλυση επιβλαβών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα(λιγότερα βεβαίως από αυτά των μηχανών εσωτερικής καύσης). Αν και οι μηχανές εσωτερικής καύσης παρουσιάζουν μέγιστη απόδοση κοντά στη μέγιστη ισχύ τους, ένα σύστημα κυψελών καυσίμου παρουσιάζει μέγιστη ισχύ σε μερική φόρτιση. Εξαιτίας αυτού, η απόδοση των υδρογονοκίνητων οχημάτων σε μια τυπική αστική οδηγική συμπεριφορά, όπου η μηχανή του οχήματος λειτουργεί ως επί το πλείστον σε μερική φόρτιση, μπορεί να είναι έως και διπλάσια σε σύγκριση με αυτή των μηχανών εσωτερικής καύσης. Η απόδοση ενός οχήματος που διαθέτει κυψέλες καυσίμου και τροφοδοτείται με υδρογόνο για ένα τυπικό τρόπο οδήγησης παίρνει τιμές πάνω από 40%. Η απόδοση των οχημάτων που διαθέτουν και αναμορφωτή καυσίμου μειώνεται σε σύγκριση με αυτή των οχημάτων που τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο, αλλά εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη αυτής των μηχανών εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 6 : Σύκριση αποδόσεων των κυψελών καυσίμου και των μηχανών εσωτερικής καύσης:

- a) σύστημα κυψελών καυσίμου που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και πίεση,
- b) σύστημα κυψελών καυσίμου που λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση,
- c) σύστημα κυψελών καυσίμου με αναμορφωτή καυσίμου,
- d) μηχανή εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη μέσω συμπίεση (diesel),
- e) μηχανή εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη μέσω σπινθήρα (θενζινοκινητήρας)

Όσον αφορά τα αστικά λεωφορεία, οι απαιτήσεις είναι αρκετά διαφορετικές σε σχέση με τα μικρά αυτοκίνητα. Απαιτούν περισσότερη ισχύ, τυπικά από 250 kW και άνω, και ο τρόπος χρήσης τους διαφέρει αφού απαιτούν συχνές εκκινήσεις και στάσεις. Τα αστικά λεωφορεία έχουν κεντρικούς σταθμούς τροφοδότησης καυσίμου και αυτό διευκολύνει τη δημιουργία σταθμών παραγωγής υδρογόνου. Μπορούν εύκολα να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, συνήθως πάνω από 20 kg σε φιάλες των 250 ή και 300 bar στην οροφή του λεωφορείου. Επειδή το υδρογόνο είναι πιο ελαφρύ από τον αέρα, η τοποθέτηση στην οροφή αποτελεί μια αρκετά ασφαλή λύση. Υπό την αιγίδα του ευρωπαϊκού προγράμματος «Clean Urban Transport for Europe» (CUTE), αρκετές μεγάλες ευρωπαϊκές πόλεις όπως το Άμστερνταμ, η Βαρκελώνη, το Αμβούργο, το Λονδίνο, η Μαδρίτη, η Στοκχόλμη, η Στουτγάρδη και άλλες, χρησιμοποιούν υδρογονοκίνητα λεωφορεία.



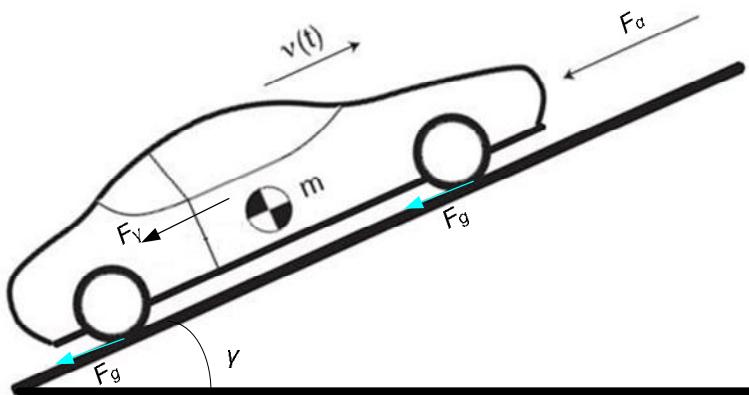
Εικόνα 7: Λεωφορείο με κυψέλες καυσίμου

## Κεφάλαιο 3: Ανάλυση δυνάμεων και Βέλτιστος Έλεγχος

### 3.1 Ανάλυση δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα

Όταν το όχημα κινείται επιδρούν επάνω σε αυτό οι εξής δυνάμεις:

- Η δύναμη αντίστασης του αέρα  $F_a$
- Η δύναμη αντίστασης στην κύλιση  $F_r$
- Η δύναμη λόγω των υψημετρικών διαφορών που υπάρχουν στο οδόστρωμα  $F_g$
- Η δύναμη επιτάχυνσης  $F_e$  (κατά τη διαδικασία της επιτάχυνσης)
- Η δύναμη αντίστασης  $F_B$  που δημιουργείται από τα ρουλεμάν των τροχών



Εικόνα 8 : Απεικόνιση των δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα

#### Δύναμη αντίστασης του αέρα

Αυτή η δύναμη υφίσταται όταν το όχημα κινείται σε περιβάλλον όπου υπάρχει αέρας και υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot u^2 \quad (1)$$

όπου

$\rho$ : πυκνότητα του αέρα

$A$ : η επιφάνεια του οχήματος όπως απεικονίζεται σε σκιαγράφημα, αν ιδωθεί από εμπρός

$c_d$ : αδιάστατη σταθερά (συντελεστής οπισθολκής)

$u$  : ταχύτητα του οχήματος

Οι μεταβλητές  $A, c_d$  εξαρτώνται από το σχήμα του οχήματος

### Δύναμη αντίστασης στην κύλιση

Αυτή η δύναμη υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_r = m \cdot g \cdot c_r \cdot \cos \gamma \quad (2)$$

όπου

$m$  : μάζα του οχήματος (συμπεριλαμβάνεται και η μάζα του οδηγού)

$g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας

$c_r$ : αδιάστατη σταθερά (συντελεστής ολίσθησης)

$\gamma$  : κλίση του οδοστρώματος

Ο συντελεστής  $c_r$  εξαρτάται κυρίως από το είδος του ελαστικού. Άλλοι παράγοντες που τον επηρεάζουν είναι οι καιρικές συνθήκες και αν το όχημα κινείται ευθύγραμμα ή στρίβει.

### Δύναμη λόγω των υψομετρικών διαφορών που υπάρχουν στο οδόστρωμα

Αυτή η δύναμη υφίσταται όταν το όχημα κινείται σε τμήματα του οδοστρώματος τα οποία έχουν μεταξύ τους υψομετρική διαφορά και υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\gamma) \quad (3)$$

όπου

$m$  : μάζα του οχήματος (συμπεριλαμβάνεται και η μάζα του οδηγού)

$g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας

$\gamma$  : κλίση του οδοστρώματος

### Δύναμη επιτάχυνσης

Αυτή η δύναμη υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$F_e = m \cdot a \quad (4)$$

όπου

$m$  : μάζα του οχήματος (συμπεριλαμβάνεται και η μάζα του οδηγού)

$a$  : επιτάχυνση του οχήματος

Στη παραπάνω εξίσωση δεν συμπεριλαμβάνεται η αδράνεια των τροχών του οχήματος.

### **Δύναμη αντίστασης που δημιουργείται από τα ρουλεμάν των τροχών**

Αυτή η δύναμη μπορεί να υπολογιστεί από τη παρακάτω εξίσωση:

$$F_B = \mu \cdot m \cdot g \cdot \frac{d}{D} \quad (5)$$

όπου

$\mu$  : συντελεστής τριβής των ρουλεμάν

$m$  : μάζα του οχήματος (συμπεριλαμβάνεται και η μάζα του οδηγού)

$g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας

$d$  : εσωτερική διάμετρος των ρουλεμάν

$D$  : διάμετρος των τροχών

Ο συντελεστής τριβών των ρουλεμάν εξαρτάται από το είδος των ρουλεμάν.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του οχήματος ER10:

Μάζα οχήματος συμπεριλαμβανομένης και της μάζας του οδηγού (m)	180 kg
Συντελεστής οπισθολκής (cd)	0.3
Η επιφάνεια του αυτοκινήτου όπως απεικονίζεται σε σκιαγράφημα αν ιδωθεί από εμπρός (A)	1 m <sup>2</sup>
Πυκνότητα αέρα σε κανονικές συνθήκες (ρ)	1,2 kg/m <sup>3</sup>
Συντελεστής ολίσθησης (c <sub>r</sub> )	0.005
Μέγιστη κλίση πίστας (γ)	4%
Συντελεστής τριβών των ρουλεμάν (μ)	0.0015
Εσωτερική διάμετρος των ρουλεμάν (d)	0.016
Διάμετρος των τροχών (D)	0.55

Πίνακας 1:Βασικές παράμετροι του οχήματος TUCER

Το όχημα είτε θα εκτελεί κίνηση με σταθερή ταχύτητα είτε επιταχυνόμενη κίνηση.

Αρχικά εξετάζεται η κίνηση με σταθερή ταχύτητα. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα είναι:

- Η δύναμη αντίστασης του αέρα  $F_a$   
Για ταχύτητα  $u=25 \text{ km/h}$  :  $F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot u^2 \Rightarrow F_a = 8,670 \text{ N}$
- Η δύναμη αντίστασης στην κύλιση  $F_r$   
 $F_r = m \cdot g \cdot c_r \cdot \cos \gamma \Rightarrow F_r = 8,85 \text{ N}$
- Η δύναμη λόγω των υψημετρικών διαφορών που υπάρχουν στην πίστα  $F_g$   
 $F_g = m \cdot g \cdot \sin(\gamma) \Rightarrow F_g = 17,65 \text{ N}$
- Η δύναμη αντίστασης  $F_B$  που δημιουργείται από τα ρουλεμάν των τροχών  
 $F_B = \mu \cdot m \cdot g \cdot \frac{d}{D} \Rightarrow F_B = 0,077 \text{ N}$

Επομένως η συνολική δύναμη που ασκείται στο όχημα είναι:

$$F_{totl} = F_a + F_r + F_g + F_B = 35,274 \text{ N}$$

Στην περίπτωση της επιταχυνόμενης κίνησης οι δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα είναι:

- Η δύναμη αντίστασης του αέρα  $F_a$

$$\text{Για ταχύτητα } u=25 \text{ km/h} : F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot u^2 \Rightarrow F_a = 8,670N$$

- Η δύναμη αντίστασης στην κύλιση  $F_r$

$$F_r = m \cdot g \cdot c_r \cdot \cos \gamma \Rightarrow F_r = 8,85N$$

- Η δύναμη επιτάχυνσης  $F_e$

$$F_e = m \cdot a \Rightarrow F_e = 36N$$

- Η δύναμη αντίστασης  $F_B$  που δημιουργείται από τα ρουλεμάν των τροχών

$$F_B = \mu \cdot m \cdot g \cdot \frac{d}{D} \Rightarrow F_B = 0,077N$$

Επομένως η συνολική δύναμη που ασκείται στο όχημα είναι:

$$F_{tot2} = F_a + F_r + F_e + F_B = 53,597N$$

### 3.2 Διατύπωση προβλήματος βέλτιστου ελέγχου

Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου σε συγκεκριμένη διαδρομή, γνωρίζοντας τα στοιχεία της, μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου. Σε αυτή την ενότητα θα διατυπωθεί το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου.

Αρχικά πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η δύναμη ώθησης  $u$  του οχήματος. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της ολικής δύναμης που ασκείται στο όχημα

$$F_{tot} = u - F_a - F_r - F_g - F_B \quad (1)$$

(από την εξίσωση δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η δύναμη  $F_B$  γιατί έχει πολύ μικρή τιμή σε σχέση με τις υπόλοιπες δυνάμεις) και το νόμο του Newton προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις οι οποίες ορίζουν το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου:

$$\dot{x} = v \quad (2)$$

$$v = c_1 \cdot u - c_2 \cdot v^2 - c_3 - c_4 \cdot \gamma(x) \quad (3)$$

όπου

$v$  η ταχύτητα του οχήματος

$x$  η διανυόμενη απόσταση

$\gamma(x)$  το υψημετρικό της πίστας

Οι συντελεστές  $c_1, c_2, c_3, c_4$  της εξίσωσης (3) προκύπτουν από διαίρεση όλων των όρων της εξίσωσης (1) με τη μάζα του οχήματος  $m$ :

$$c_1 = \frac{u}{m} \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{\frac{\rho_{air}}{2} \cdot A \cdot c_d}{m} \quad (5)$$

$$c_3 = \frac{F_r}{m} \quad (6)$$

$$c_4 = \frac{F_g}{m} \quad (7)$$

Κατά τη διάρκεια του αγώνα, όταν το οχημα φρενάρει υπάρχει απώλεια ενέργειας επομένως αυτό πρέπει να αποφεύγεται. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η δύναμη  $u$  παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0, u_{max}]$ .

Η αντικειμενική συνάρτηση προκύπτει από την ελαχιστοποίηση του έργου που δημιουργεί η δύναμη  $u$  στο χρονικό διάστημα του αγώνα επομένως έχει τη παρακάτω μορφή:

$$J(x_2) = \int_{t_0}^{t_e} u(t) \cdot v(t) dt \quad (8)$$

με αρχικές συνθήκες

$$x^\circ(t_0) = 0 \quad (9)$$

$$v^\circ(t_0) = 0 \quad (10)$$

$$x^\circ(t_e) = 3150 \quad (11)$$

$$v^\circ(t_0) = [5.5 - 8.4] m/s \quad (12)$$

$$t_0 = 0s \quad (13)$$

$$t_e = 450s \quad (14)$$

Η Hamiltonian συνάρτηση στη γενική περίπτωση ορίζεται ως

$$H(t, x, u, \lambda) = f(t, x, u) + \lambda \cdot g(t, x, u)$$

επομένως η Hamiltonian συνάρτηση του προβλήματος είναι:

$$H = u \cdot v + \lambda_1 \cdot v + \lambda_2 \cdot (c_1 \cdot u - c_2 \cdot v^2 - c_3 - c_4 \cdot \gamma(x)) \quad (15)$$

Δεδομένου ότι το πρόβλημα είναι χρονικά αμετάβλητο η Hamiltonian συνάρτηση πρέπει να είναι σταθερή, επομένως προκύπτουν οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{\lambda}_1(t) = \lambda_2 \cdot c_4 \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial x} \quad (16)$$

$$\dot{\lambda}_2(t) = -u - \lambda_1 + 2 \cdot \lambda_2 \cdot c_2 \cdot u \quad (17)$$

Από την αρχή του ελαχίστου του Pontryagin η Hamiltonian συνάρτηση έχει ένα ολικό ελάχιστο για τη βέλτιστη εισαγωγή ελέγχου

$$H(x^\circ(t), v^\circ(t), u^\circ(t), t, \lambda^\circ(t)) \leq H(x^\circ(t), v^\circ(t), u(t), t, \lambda^\circ(t))$$

όπου το σύμβολο  $\circ$  δείχνει τη βέλτιστη λύση

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς η ακόλουθη στρατηγική ελέγχου μπορεί να καθοριστεί:

$$u^\circ = \begin{cases} 0 & , \text{εάν } v^\circ + \lambda_2^\circ \cdot c_1 > 0 \\ u^\circ = u_{\text{sing}} & , \text{εάν } v^\circ + \lambda_2^\circ \cdot c_1 = 0 \\ u_{\max} & , \text{εάν } v^\circ + \lambda_2^\circ \cdot c_1 < 0 \end{cases}$$

Θέτω τη μεταβλητή  $h(t) = v^\circ + \lambda_2^\circ \cdot c_1$

Όταν το  $h(t)=0$  για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα η βέλτιστη εισαγωγή ελέγχου δεν μπορεί να προέλθει άμεσα από τη συνάρτηση  $h(t)$  και το σύστημα βρίσκεται σε ένα μοναδικό τόξο. Σε αυτή τη περίπτωση παραγωγίζεται η συνάρτηση  $h(t)$  ως προς το χρόνο για να υπολογιστεί η  $u(t)$ .

Η πρώτη παράγωγος της  $h(t)$  είναι:

$$h(t) = v + c_1 \cdot \lambda_2 \quad (18)$$

Αν αντικατασταθούν οι σχέσεις (2),(16) στην (17) η  $h(t)$  παίρνει τη παρακάτω μορφή

$$h(t) = 2 \cdot \lambda_2 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot v - c_1 \cdot \lambda_1 - c_2 \cdot v^2 - c_3 - c_4 \cdot \gamma(x) \quad (19)$$

$$\text{Για } h = 0 \Leftrightarrow v + \lambda_2 \cdot c_1 = 0 \Leftrightarrow c_1 = -\frac{v}{\lambda_2} \quad (20)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (20) στην εξίσωση (19) προκύπτει:

$$h(t) = -3 \cdot c_2 \cdot v^2 - c_1 \cdot \lambda_1 - c_3 - c_4 \cdot \gamma(x)$$

Επειδή η μεταβλητή  $u$  δεν εμφανίζεται ρητά στη παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται και η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης.

$$h(t) = -6 \cdot c_2 \cdot v \cdot (c_1 \cdot u - c_2 \cdot v^2 - c_3 - c_4 \cdot \gamma(x))$$

Η παρακάτω εξίσωση δείχνει το βέλτιστο έλεγχο  $u_{\text{sing}}$  στο μοναδικό τόξο.

$$u_{\text{sing}} = \frac{1}{c_1} \cdot (c_2 \cdot v^2 + c_3 + c_4 \cdot \gamma(x))$$

## Κεφάλαιο 4: Κυψέλες καυσίμου

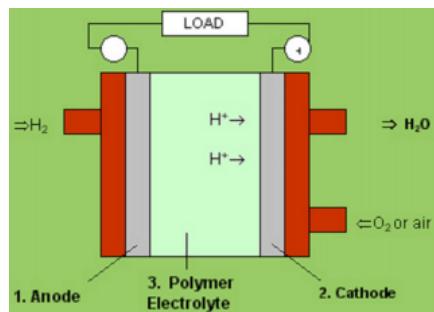
### 4.1 Εισαγωγή

#### 4.1.1 Ιστορική αναδρομή

Το έναυσμα για τη μελέτη των κυψελών καυσίμου δόθηκε από τους W. Nicholson και A. Carlisle οι οποίοι μελέτησαν το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης, το αντίστροφο φαινόμενο από αυτό που πραγματοποιείται στην κυψέλη καυσίμου. Το 1838, ο Γερμανοελβετός χημικός Cristian Friedrich Schönbein πρωτοπαρουσίασε την ιδέα στην οποία στηρίζονται οι κυψέλες καυσίμου. Ωστόσο, ο "πατέρας" της κυψέλης καυσίμου θεωρείται ο Άγγλος William Grove, ο οποίος εφηύρε την πρώτη κυψέλη καυσίμου το 1839, με τη συνεργασία του Schönbein. Η κυψέλη αυτή είχε τη δυνατότητα να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, καθώς το υδρογόνο αντιδρούσε με το οξυγόνο. Η κυψέλη του Grove αποτελούταν από δύο ηλεκτρόδια, βυθισμένα σε διάλυμα θειικού οξέος και εμπλουτισμένα με υδρογόνο και οξυγόνο. Στη συνέχεια ο F. Ostwald ανέπτυξε το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και το 1893 επεξήγησε πειραματικά τη λειτουργία των διαφόρων τμημάτων που την απαρτίζουν. Ακολούθησε διάστημα στο οποίο μελετήθηκαν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, τόσο χαμηλής όσο και υψηλής θερμοκρασιακής λειτουργίας. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 ο T. Grubb και ο L. Niedrach εφηύραν την κυψέλη καυσίμου τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων στην General Electric με επακόλουθο την αναζωπύρωση της μελέτης πάνω στις κυψέλες καυσίμου, η οποία συνεχίζεται μέχρι σήμερα.

#### 4.1.2 Αρχή λειτουργίας

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης. Στη βασική της μορφή, λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα.



Εικόνα 9: Δομή κελιού καυσίμου

Δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από μία μεμβράνη η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Μεταξύ αυτής της πολυμερισμένης μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη. Συνοπτικά, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτροισμού περιγράφεται από τα παρακάτω επιμέρους στάδια.

Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης, το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομογενή τρόπο. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερωθήκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την άνοδο δημιουργώντας ηλεκτροισμό αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευση τους μέσω αυτής. Για αυτό το λόγο άνοδος και καταλύτης διαλέγονται αγώγιμα υλικά. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου (στην ουσία αναφερόμαστε σε μεμονωμένα πρωτόνια) διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνου το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο, το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, και παράγεται νερό. Όπως και πριν, την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας. Η θεωρητική τιμή της τάσεως για κυψέλες καυσίμου υδρογόνου κυμαίνεται στα 1.23V για θερμοκρασία 25°C. Στην πράξη όμως το φάσμα των τιμών της τάσεως βρίσκεται περίπου στο 0.5-1V. Για την επίτευξη μεγαλύτερης τάσεως συνδέονται πολλές κυψέλες μαζί, δημιουργώντας μια συστοιχία κυψελών.

#### 4.1.3 Τύποι κυψελών καυσίμου

Ανάλογα με την περιοχή χρησιμοποίησης, οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται σε πέντε κύριους τύπους. Τα ονόματα των κυψελών προσδιορίζουν το είδος του μεταφερόμενου ιόντος που διέρχεται από τον ηλεκτρολύτη. Η βασική δομή των κυψελών αυτών είναι όμοια, διαφοροποιούνται όμως ως προς το είδος του

ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τους καταλύτες, την καθαρότητα των αντιδρώντων και τις επιμέρους χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται. Οι κύριοι τύποι κυψελών καυσίμου είναι:

- Κυψέλη Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)
- Κυψέλη Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)
- Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC)
- Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)
- Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)
- Κυψέλη Καυσίμου με Τετηγμένα Ανθρακικά άλατα (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

### **Κυψέλη Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)**

Αυτές οι κυψέλες λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και παράγουν ισχύ αρκετή για την εφαρμογή τους για την ικανοποίηση καθημερινών ενεργειακών αναγκών, όπως αυτή για την κίνηση ενός οχήματος. Σε αυτό βοηθά η ικανότητα τους να προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος. Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη μπορεί να είναι από μερικά W έως 250 kW. Ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο. Η κατηγορία αυτή είναι πιο πρόσφατη των κυψελών PEM με αρκετά ακόμα προβλήματα προς επίλυση όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη όπου απαιτείται. Ωστόσο, εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στη θέση των PEM κυψέλων δε θα υπήρχε η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών τρόπων αποθήκευσης του καυσίμου όπως γίνεται στη δεύτερη περίπτωση με το υδρογόνο ενώ δε θα ήταν αναγκαία και η ανάπτυξη αναμορφωτών υδρογονανθράκων.

### **Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC)**

Οι Αλκαλικές κυψέλες χρησιμοποιούν υδροξείδιο του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτη (30-45% διάλυμα σε νερό). Λειτουργούν καλά σε θερμοκρασία δωματίου και δίνουν την υψηλότερη τάση σε σύγκριση με τα άλλα συστήματα στοιχείων καυσίμου. Το οξυγόνο που χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό δεν πρέπει να περιέχει καθόλου διοξείδιο του άνθρακα, διότι τότε σχηματίζονται ανθρακικά άλατα που φράζουν τους πόρους. Ως κάθιδος χρησιμοποιείται λιθιωμένο πορώδες νικέλιο, και ως άνοδος πορώδες νικέλιο, με απόθεση λευκόχρυσου, που είναι καλός καταλύτης για την οξείδωση του υδρογόνου. Έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαστημόπλοια της NASA

(Gemini & Apollo) και σε μεταφορικά μέσα όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα γκολφ (Fuel cell powered golf cars).

### **Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)**

Σε αυτά τις κυψέλες τα ηλεκτρόδια και ο ηλεκτρολύτης είναι κατασκευασμένα από κεραμικά υλικά στερεών οξειδίων, όπως π.χ. οξειδίων νατρίου ή ζιρκονίου. Αυτά τα υλικά γίνονται αγωγοί του ιόντος  $O_2$  - σε θερμοκρασίες άνω των  $800^{\circ}C$ . Ως καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και φυσικό αέριο ή ατμοί υγρών καυσίμων που μετατρέπονται σε μίγμα αερίων που περιέχουν υδρογόνο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας. Οι κυψέλες αυτές δεν περιέχουν ακριβά υλικά και έχουν μεγάλη διάρκεια λειτουργίας, δεν έχουν όμως καλή θερμοδυναμική απόδοση (περίπου 40%) αλλά αν η παραγωγή ηλεκτρισμού συνδυαστεί με παροχή θερμότητας, τότε η απόδοση μπορεί να φτάσει το 90%. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου έχουν πολλές δυνατότητες, μεγάλη ποικιλία εφαρμογών και προορίζονται για μεγάλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, ισχύος από 100kW έως 100 MW.

### **Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)**

Το φωσφορικό οξύ που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης στις κυψέλες φωσφορικού οξέος είναι προσροφημένο σε ένα λεπτό στρώμα καρβιδίου του πυριτίου. Οι κυψέλες αυτές λειτουργούν με ατμοσφαιρικό αέρα, που περιέχει διοξείδιο του άνθρακα και χρησιμοποιούνται σε συστοιχίες διπολικού τύπου, και μπορούν να δώσουν ισχύ από μερικά kW έως και MW. Η διάρκεια ζωής τους φθάνει τις 40.000 ώρες και βασικά μειονεκτήματα τους είναι η σχετικά μικρή απόδοση και το υψηλό κόστος του καταλύτη λευκόχρυσου.

### **Κυψέλη Καυσίμου με Τετηγμένα Ανθρακικά άλατα (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)**

Σ' αυτά τις κυψέλες χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρολύτες μίγματα ανθρακικού λιθίου και ανθρακικού καλίου τετηγμένα, ακινητοποιημένα σε μια μήτρα. Απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας,  $500-700^{\circ}C$  και δεν χρειάζονται καταλύτες για να ενεργοποιούν τα ηλεκτρόδια στις θερμοκρασίες αυτές. Ως καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας υδρογονάνθρακες που στις υψηλές αυτές θερμοκρασίες μετατρέπονται σε αέρια που περιέχουν υδρογόνο. Η διάρκεια ζωής τους δεν είναι μεγάλη, περίπου 5.000 ώρες, και έχουν δοκιμαστεί σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 2 MW με την απόδοσή τους να φθάνει το 75%.

#### **4.1.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου**

##### **Πλεονεκτήματα**

- Ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Προστασία της ατμόσφαιρας, φιλικός προς το περιβάλλον ηλεκτρισμός
- Οι κυψέλες δεν έχουν κινητά μέρη. Ήσυχη λειτουργία και μικρή συντήρηση.
- Μεγάλη απόδοση στην μετατροπή ηλεκτρισμού της τάξης του 40-65% .
- Προσαρμοζόμενος σχεδιασμός για εφαρμογές από watt μέχρι MW.
- Σαν αέριο ή υγρό, το υδρογόνο μπορεί εύκολα να μεταφερθεί, να φυλαχθεί και τελικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή όπου χρησιμοποιούνται σήμερα τα καύσιμα.

### Μειονεκτήματα

- Σύμφωνα με υπολογισμούς, η διαρροή από τις μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής του καυσίμου θα αντιστοιχεί στο 20% της ολικής ποσότητας υδρογόνου.
- Μεγάλο οικονομικό κόστος για την απόκτησή τους

## 4.2 Κύψελες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM)

### 4.2.1 Αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου

Σε κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου πραγματοποιείται μια οξειδοαναγωγή στα ηλεκτρόδια της. Στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου PEM οξειδώνεται το υδρογόνο H<sub>2</sub>, ενώ στην κάθοδο έχουμε την αναγωγή του οξυγόνου O<sub>2</sub>.

Στην άνοδο το εισερχόμενο υδρογόνο υπό την επίδραση ενός καταλύτη οξειδώνεται και διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Το μεταφερόμενο ιόν, που στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου PEMFC είναι το κατιόν H<sup>+</sup>, μεταφέρεται από την άνοδο στην κάθοδο, διασχίζοντας τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι αγώγιμος μόνο για πρωτόνια. Τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από την οξείδωση, διασχίζουν εξωτερικό κύκλωμα, παράγοντας ηλεκτρικό έργο και καταλήγουν στην κάθοδο. Στην κάθοδο αντιδρούν με το εισερχόμενο οξυγόνο και με τα πρωτόνια που καταφθάνουν από την άνοδο, διασχίζοντας τον ηλεκτρολύτη. Η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται την κάθοδο έχει ως προϊόν το νερό, το οποίο στη συνέχεια εξάγεται από την κυψέλη ή επαναχρησιμοποιείται στην ενυδάτωση των αερίων αντιδρώντων.

### 4.2.2 Δομή

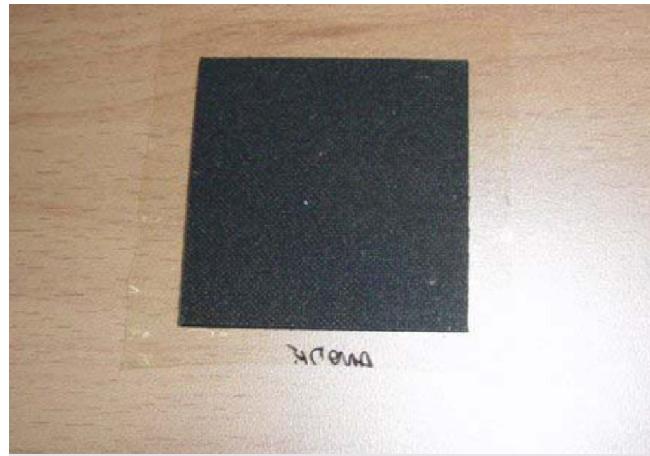
Τα δομικά στοιχεία μίας κυψέλης καυσίμου είναι :

- Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων (Proton Exchange Membrane) ή Ηλεκτρολύτης (electrolyte)
- Ηλεκτρόδια (electrodes) ή ηλεκτροκαταλύτης
- Στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layers) ή Πορώδες στρώμα (Porous Backing Layer)
- Διπολικές πλάκες (Bipolar Plates) ροής καυσίμου και οξειδωτικής ουσίας

#### 4.2.3 Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων

Η βασική λειτουργία της μεμβράνης είναι να επιτρέπει σε ιόντα να τη διαπερνούν ενώ ταυτόχρονα διαχωρίζει φυσικά τα αντιδρώντα από τα προϊόντα. Η μεταφορά ιόντων γίνεται μέσα στο πολυμερές και εξαρτάται από την ποσότητα νερού που βρίσκεται δεσμευμένη ή ελεύθερη μέσα στο πολυμερές.

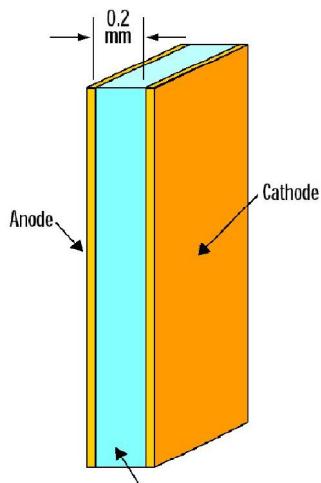
Το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται η μεμβράνη είναι πλήρως φθοριωμένο Teflon. Χαρακτηρίζεται από το ισοδύναμο βάρος του που είναι αντιστρόφως ανάλογο με την ικανότητα αγωγής ιόντων. Συνηθισμένες τιμές για το ισοδύναμο βάρος είναι 800-1100 milliequivalents / στερεό γραμμάριο πολυμερούς (αυτό σημαίνει ότι σε ένα γραμμάριο της μεμβράνης 800-1100 mg μπορούν να αντιδράσουν με ιόντα). Το εμπορικό όνομα με το οποίο κυκλοφορούν οι μεμβράνες είναι Nafion 117 (117 είναι το πιο συνηθισμένο, μπορεί να είναι για παράδειγμα 115 ή 118) και συναντάται σε διαφορετικό πάχος σε διάφορες κυψέλες (π.χ. 178 μμ, συνήθως ο αριθμός συνδέεται με το πάχος). Οι μεμβράνες αυτές παρουσιάζουν υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα. Η βασική λειτουργία της μεμβράνης στηρίζεται στην ιδιότητα που έχει να επιτρέπει την μετακίνηση ιόντων στο εσωτερικό της. Η μεμβράνη θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη ιοντική αγωγιμότητα και παράλληλα να εμποδίζει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες και να διατηρείται η ομαλή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Εάν η μεμβράνη επιτρέπει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, τότε παρουσιάζονται προβλήματα βραχυκύκλωσης, με αποτέλεσμα τη μη ομαλή λειτουργία του στοιχείου. Παράλληλα λειτουργεί και σαν διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο οξειδωτικό και το καύσιμο, έτσι ώστε να αποφεύγεται η απευθείας αντίδρασή τους. Η μεμβράνη προσδιορίζει τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Έτσι η θερμοκρασία λειτουργίας, εξαρτάται άμεσα από το είδος μεμβράνης που αυτή διαθέτει. Εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM χρησιμοποιούν ακριβούς ηλεκτρολύτες για την επαρκή κατάλυση της αντίδρασης, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τους.



Εικόνα 10: Μεμβράνη κυψέλης καυσίμου

#### 4.2.4 Ηλεκτρόδια

Η μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιέχει το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια, γίνεται στα ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος), καθώς από τα άτομα του καυσίμου και του αέρα, αποδεσμεύονται τα ηλεκτρόνια. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από εξωτερικό κύκλωμα, ενώ τα ιόντα διαπερνάνε τον ηλεκτρολύτη. Επομένως τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη, διαπερατά από τα αέρια μόρια, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια, καθώς και καλοί αγωγοί ηλεκτρισμού. Τα ηλεκτρόδια έρχονται σε άμεση επαφή και με την μεμβράνη και το πορώδες στρώμα.

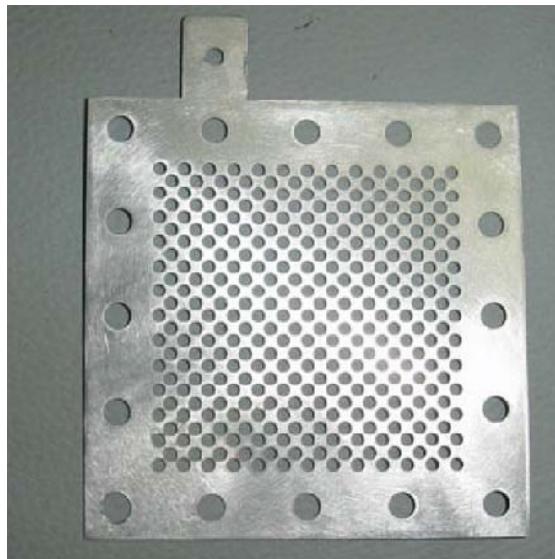


Membrane/electrode assembly

Εικόνα 11: Τα ηλεκτρόδια προσκολλημένα στα πλευρά της μεμβράνης

Ο ρυθμός με τον οποίο γίνονται οι αντιδράσεις, σχετίζεται με την επιφάνεια των

ηλεκτροδίων. Η πορώδης κατασκευή τους αυξάνει την ενεργό επιφάνειά τους. Η ταχύτητα των αντιδράσεων είναι βασικής σημασίας για την απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Η αύξηση της ταχύτητας γίνεται, εκτός από την αύξηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, είτε με την προσθήκη καταλυτικών επενδύσεων στην επιφάνεια των ηλεκτρόδιων, είτε με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση όξινων ηλεκτρολυτών μόνο ευγενή μέταλλα, όπως ο λευκόχρυσος (Pt) και το ρουθήνιο (Ru) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καταλύτες, γιατί λιγότερο πολύτιμα μέταλλα θα αντιμετώπιζαν πρόβλημα διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου. Η άνοδος αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο της κυψέλης καυσίμου. Άγει τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τα μόρια του υδρογόνου, έτσι ώστε αυτά να οδηγηθούν στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα. Η κάθοδος είναι το θετικό ηλεκτρόδιο της κυψέλης καυσίμου. Άγει τα ηλεκτρόνια που επιστρέφουν από την άνοδο, έτσι ώστε να μπορούν να ενωθούν με τα ιόντα υδρογόνου και το οξυγόνο, για τον σχηματισμό νερού.



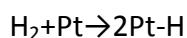
Εικόνα 12: Ηλεκτρόδιο πειραματικής κυψέλης

#### 4.2.5 Καταλύτης ή ηλεκτροκαταλύτης

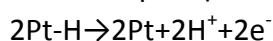
Στις κυψέλες τύπου PEM χρησιμοποιείται ως καταλύτης λευκόχρυσος (Pt) καθώς είναι ο μόνος που μπορεί να παρέχει υψηλούς ρυθμούς αναγωγής του οξυγόνου, στις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της PEM ( $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$ ). Ο σκοπός του είναι να επιταχύνει την αντίδραση της καθόδου, η οποία είναι εκατό φορές πιο αργή από την αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου. Ο λευκόχρυσος χρησιμοποιείται εξαιτίας της μοναδικής του ιδιότητας να διασπά τόσο το υδρογόνο, όσο και το οξυγόνο. Ανάμεσα στις αντιδράσεις οξείδωσης και αναγωγής, μεσολαβεί ένα ενδιάμεσο βήμα, στο οποίο τα άτομα της πλατίνας ενώνονται με τα άτομα του υδρογόνου και

του οξυγόνου. Ο δεσμός αυτός είναι τόσο ισχυρός ώστε να έλκει τα άτομα, ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά ασθενής ώστε απελευθερώνει τα άτομα του υδρογόνου ή του οξυγόνου προκειμένου να σχηματιστούν τα τελικά προϊόντα. Η διεργασία που γίνεται στο ηλεκτρόδιο της ανόδου, είναι:

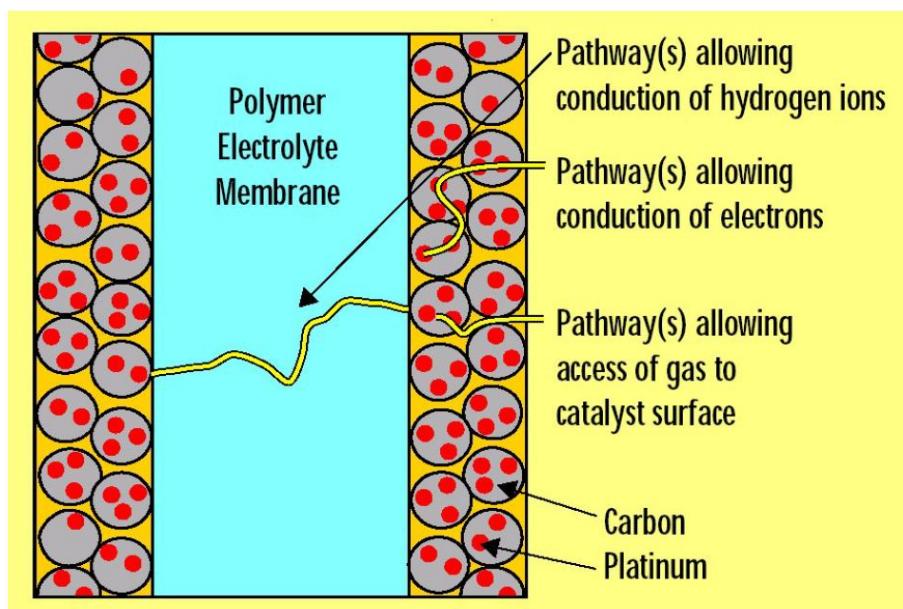
Δεσμεύονται τα άτομα του υδρογόνου από τον λευκόχρυσο



Απελευθέρωση ιόντων υδρογόνου και ηλεκτρονίων



Λόγω του υψηλού κόστους του λευκόχρυσου γίνεται προσπάθεια να μειωθεί η ποσότητα που απαιτείται. Συνηθισμένη πλέον τιμή είναι 1 mg Pt/cm<sup>2</sup> συνολικά και στην άνοδο και στην κάθοδο. Ένας τρόπος για καλύτερη αξιοποίηση του καταλύτη είναι να κατασκευαστεί το στρώμα του καταλύτη με τέτοιο τρόπο ώστε να καταλαμβάνει την μέγιστη δυνατή επιφάνεια. Κάθε ηλεκτρόδιο αποτελείται από πορώδη άνθρακα (C) με τον οποίο συνδέονται τα πολύ μικρά μόρια πλατίνας. Το ηλεκτρόδιο είναι πορώδες ώστε τα μόρια του αέριου να μπορούν να διαπεράσουν κάθε ηλεκτρόδιο για να φθάσουν στον καταλύτη. Τόσο η πλατίνα όσο και ο άνθρακας έχουν καλή αγωγιμότητα ηλεκτρονίων, που τα επιτρέπει να κινούνται ελεύθερα μέσω του ηλεκτροδίου.



Εικόνα 13: Πολυμερική μεμβράνη με πορώδη ηλεκτρόδια

Το μικρό μέγεθος των μορίων Pt, περίπου 2 nm σε διάμετρο, οδηγεί σε πολύ μεγάλη συνολική περιοχή επιφάνειας που είναι προσβάσιμη στα μόρια αερίου. Η μεγάλη περιοχή επιφάνειας Pt επιτρέπει τις αντιδράσεις ηλεκτροδίων να πραγματοποιούνται σε πολλές περιοχές επιφάνειας Pt ταυτόχρονα. Η μεγάλη

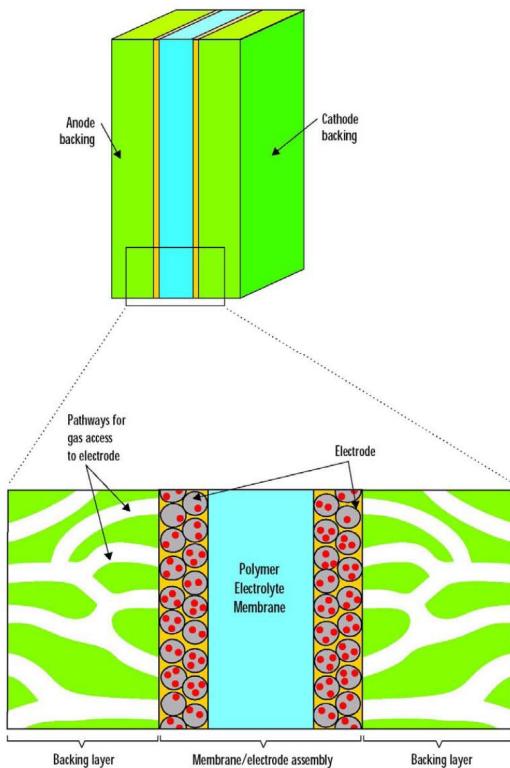
διασπορά των μορίων του λευκόχρυσου αυξάνει δραματικά τη συνολική επιφάνεια του, ακόμα και όταν η ποσότητα λευκόχρυσου που χρησιμοποιείται είναι μικρή. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνει σημαντικά η ταχύτητα της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στο ηλεκτρόδιο. Αυτή η υψηλή διασπορά του καταλύτη είναι βασική για την ροή ηλεκτρονίων, δηλαδή το παραγόμενο ρεύμα, σε μία κυψέλη καυσίμου. Ο συνδυασμός Άνοδος/Μεμβράνη/Κάθοδος συχνά αναφέρεται και ως σώμα Μεμβράνης Ηλεκτρόδια (membrane/electrode assembly - MEA).

#### 4.2.6 Στρώμα διάχυσης αερίων ή πορώδες στρώμα

Το στρώμα διάχυσης αερίων, μπορεί είτε να αποτελεί μέρος του ηλεκτροδίου, τόσο της ανόδου όσο και της καθόδου, είτε να είναι ξεχωριστό στρώμα. Ο πρωταρχικός του ρόλος είναι η διάχυση και η ισοκατανομή των αερίων πάνω στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου (καύσιμο και οξειδωτική ουσία). Επιπλέον, δημιουργεί ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα στον καταλύτη και στην διπολική πλάκα. Επίσης απομακρύνει το παραγόμενο νερό από την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη και σχηματίζει ένα προστατευτικό λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του καταλύτη. Τέλος λειτουργεί και ως μηχανικό στήριγμα για την μεμβράνη.

Το υλικό που χρησιμοποιείται έχει συνήθως ως βάση τον άνθρακα μαζί με κάποιο υδροφοβικό υλικό το οποίο αποτρέπει τη συγκέντρωση του νερού (ώστε να μπορούν τα αέρια να έρχονται ελεύθερα σε επαφή με τον καταλύτη). Το στρώμα διάχυσης αερίων βοηθά στην διαχείριση του παραγόμενου νερού κατά την λειτουργία της κυψέλης. Το υλικό κατασκευής επιλέγεται ώστε να επιτρέπει την απομάκρυνση του νερού αλλά και να παρέχει την επιθυμητή υγρασία στην μεμβράνη. Η πορώδης φύση του υλικού εξασφαλίζει την αποτελεσματική διάχυση κάθε αερίου στον καταλύτη του σώματος Μεμβράνης-Ηλεκτροδίου. Η διάχυση αναφέρεται στη ροή των μορίων αερίου από μία περιοχή υψηλής συγκέντρωσης, (εξωτερική πλευρά του στρώματος) σε μια περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης, (εσωτερική πλευρά του στρώματος) δίπλα στο καταλύτη όπου το αέριο καταναλώνεται από την αντίδραση. Η πορώδης δομή επιτρέπει στο αέριο να διασκορπιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε όταν διαπερνά το στρώμα να είναι σε επαφή με ολόκληρη την περιοχή επιφάνειας της καταλυτικής μεμβράνης.

Membrane/electrode assembly with backing layers.



Εικόνα 14: Τα υποστηρικτικά στρώματα

#### 4.2.7 Διπολικές πλάκες

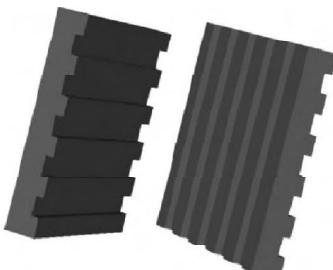
Η τάση μίας κυψέλης καυσίμου, υπό φορτίο είναι αρκετά μικρή, της τάξης του 0.7 Volt. Για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο της τάσης ενώνονται στη σειρά πολλές κυψέλες καυσίμου. Η εν σειρά ένωση των κυψελών καυσίμου, δημιουργεί μία συστοιχία κυψελών καυσίμου. Ο πιο απλός τρόπος, είναι η σύνδεση της άκρης της καθόδου της μίας κυψέλης, στην άνοδο της επόμενης κυψέλης. Το πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι θα πρέπει τα ηλεκτρόνια να διατρέξουν όλη την επιφάνεια του ηλεκτρόδιου, μέχρι να φτάσουν στο άκρο της ηλεκτρικής σύνδεσης. Παρόλο που τα ηλεκτρόδια είναι καλοί αγωγοί όταν η κυψέλη έχει τάση 0.7 Volt, ακόμα και η πιο μικρή πτώση τάσης είναι εξαιρετικά σημαντική.

Μια καλύτερη μέθοδος σύνδεσης των κυψελών είναι η χρήση διπολικών πλακών. Οι πλάκες συνδέουν ολόκληρη την επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης, με ολόκληρη την επιφάνεια της ανόδου της επόμενης κυψέλης, για τον λόγο αυτό ονομάζονται διπολικές. Ταυτόχρονα οι διπολικές πλάκες τροφοδοτούν με οξυγόνο την κάθοδο και με υδρογόνο την άνοδο. Παρότι τα δύο ηλεκτρόδια πρέπει να έχουν καλή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους, τα αέρια πρέπει να τροφοδοτούνται ξεχωριστά. Είναι κατασκευασμένες από αγώγιμα υλικά, όπως ο γραφίτης ή το

ανοξείδωτο ατσάλι.

Οι πλάκες έχουν κανάλια έτσι ώστε τα αέρια να ρέουν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Τα κατακόρυφα κανάλια είναι για τη ροή του υδρογόνου στην άνοδο, ενώ τα οριζόντια κανάλια είναι για τη ροή του οξυγόνου στην κάθοδο. Είναι επίσης κατασκευασμένες με τρόπο τέτοιο ώστε έχουν αγώγιμη επαφή με την επιφάνεια του κάθε ηλεκτρόδιου. Το αποτέλεσμα αυτής της εν σειρά σύνδεσης των κυψελών, είναι το ηλεκτρικό ρεύμα να περνά στην ουσία κατευθείαν από τη μία κυψέλη στην άλλη και όχι από την επιφάνεια του ενός ηλεκτροδίου στο άλλο.

Η ιδανική διπολική πλάκα πρέπει να είναι λεπτή, για την ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης και του μεγέθους της κυψέλης. Αυτό όμως περιορίζει τη ροή των αερίων στα κανάλια και είναι δυσκολότερη η εισαγωγή τους μέσα στην κυψέλη. Στις χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου, ο αέρας που κυκλοφορεί πρέπει απομακρύνει μαζί του και το παραγόμενο νερό. Οι διπολικές πλάκες διαθέτουν επιπλέον κανάλια για την κυκλοφορία του ψυκτικού υγρού.



Εικόνα 15: Διπολικές πλάκες

#### 4.2.8 Απόδοση, ισχύς και αποδιδόμενη ενέργεια

Στις παρακάτω παραγράφους ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των βασικών ηλεκτρικών και ενεργειακών μεγεθών που χαρακτηρίζουν τις κυψέλες PEM, όπως είναι ο βαθμός απόδοσης, η διαφορά δυναμικού των πόλων της κυψέλης, η ενέργειά της κ.λ.π

Η σχέση που περιγράφει γενικότερα την ισορροπία ενέργειας στις κυψέλες είναι:

Χημική Ενέργεια Καυσίμου = Ηλεκτρική Ενέργεια + Θερμική Ενέργεια

Θεωρητικά, η ιδανική κυψέλη PEM η οποία χρησιμοποιεί ως καύσιμο καθαρό  $H_2$  το οποίο οξειδώνει με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, μπορεί να εμφανίσει τάση στους πόλους της ίση με 1.16 Volt (η μέτρηση γίνεται χωρίς την ύπαρξη συνδεδεμένου κυκλώματος λειτουργίας «ανοιχτό κύκλωμα»). Η κανονική θερμοκρασία λειτουργίας στην οποία εμφανίζεται η παραπάνω τιμή τάσης είναι  $80^{\circ}C$  και η πίεση εισόδου των αερίων, 1atm.

Μια συνηθισμένη μέτρηση που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης των κυψελών καυσίμου είναι και ο Πραγματικός Βαθμός Απόδοσης. Ο

λόγος δηλαδή της τιμής της τάσης που παράγει μια κυψέλη καυσίμου προς τη θεωρητική τιμή της τάσης (1.16 Volt). Έτσι λοιπόν, μια κυψέλη η οποία αποδίδει 0.7 Volt παρουσιάζει Πραγματικό Βαθμό Απόδοσης περίπου 0,6 ή (60%). Σήμερα, και σε επίπεδο εργαστηρίου ή περιορισμένης παραγωγής πρωτοτύπων, έχει επιτευχθεί η παραγωγή κυψελών με πραγματικό βαθμό απόδοσης λίγο πάνω από 77% και παραγόμενη τάση της τάξης του 0.9 Volt. Το 77% δηλαδή της ενέργειας του καυσίμου γίνεται ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια ενώ το 23% "χάνεται" με τη μορφή θερμότητας. Κάθε κυψέλη συνοδεύεται από μια χαρακτηριστική καμπύλη απόδοσης η οποία τη χαρακτηρίζει. Η καμπύλη αυτή κατασκευάζεται σε καρτεσιανό σύστημα αξόνων όπου ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την πυκνότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ( $mA/cm^2$ ) ενώ ο κάθετος άξονας φέρει τιμές τάσης (mV). Οι τιμές τάσης αφορούν τη διαφορά δυναμικού στους πόλους της κυψέλης, ενώ οι τιμές πυκνότητας ρεύματος αφορούν το παραγόμενο ρεύμα ανά τετραγωνικό εκατοστό μεμβράνης. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με συνδεδεμένο τυποποιημένο ηλεκτρικό κύκλωμα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη μιας κυψέλης υδρογόνου/αέρα.

Η παραγόμενη ισχύς των κυψελών καυσίμου μετράται σε Watt και άλλοτε εκφράζει το γινόμενο του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος επί τη διαφορά δυναμικού στους πόλους της κυψέλης ( $P=IV$ ), και άλλοτε το ρυθμό παραγωγής ενέργειας ( $P=E/t$ ). Ωστόσο για την περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών των κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται και ορισμένες καθιερωμένες μονάδες ενέργειας όπως είναι η οι κιλοβατώρες ( $E=Pt$ ) οι οποίες εκφράζουν την παραγόμενη ισχύ η οποία είναι διαθέσιμη ανά ώρα.

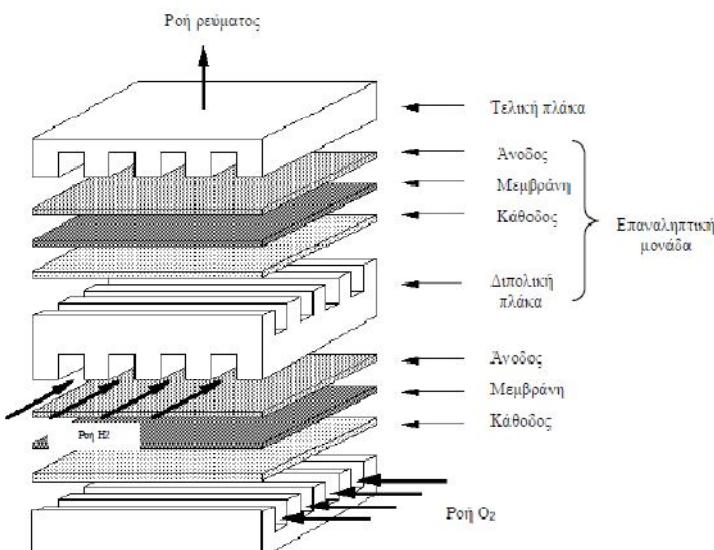
Υπάρχουν βέβαια και ορισμένα φυσικά μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν τις κυψέλες υδρογόνου όπως είναι το βάρος και ο όγκος τους. Για την περιγραφή λοιπόν και αυτών των μεγεθών ορίζονται ορισμένοι επιπλέον δείκτες όπως ο "δείκτης ειδικής ισχύος" και ο "δείκτης πυκνότητας ισχύος". Ως "δείκτης ειδικής ισχύος" ορίζεται ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τη μάζα της κυψέλης, ενώ ο "δείκτης πυκνότητας ισχύος" είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τον όγκο της κυψέλης. Οι παραπάνω δείκτες που συνδέουν τα χαρακτηριστικά απόδοσης των κυψελών με τα φυσικά τους χαρακτηριστικά είναι πολύ σημαντικοί για ορισμένες ειδικές εφαρμογές όπως η χρήση των κυψελών σε οχήματα ή αεροσκάφη, όπου τόσο το βάρος όσο και ο όγκος παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο.

#### 4.2.9 Συστοιχία κυψελών καυσίμου

Η εν σειρά σύνδεση των κυψελών καυσίμου, δημιουργεί μια συστοιχία. Η παραγόμενη τάση εξαρτάται από τον αριθμό κυψελών, ενώ το ρεύμα εξαρτάται από το εμβαδό των ηλεκτροδίων, των κυψελών καυσίμου. Σε κάθε μεμονωμένη κυψέλη αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο περίπου 0.7 Volt. Συνδέοντας σε σειρά κυψέλες καυσίμου, παίρνουμε την επιθυμητή τάση της συστοιχίας.

Το υδρογόνο εισέρχεται στα κανάλια της διπολικής πλάκας ανόδου κάθε κυψέλης καυσίμου και το οξυγόνο στα κανάλια της διπολικής πλάκας καθόδου κάθε κυψέλης καυσίμου. Η εξωτερική πλευρά κάθε κυψέλης που είναι η διπολική πλάκα καθόδου, εφάπτεται με την εξωτερική πλευρά της επόμενης κυψέλης που είναι η διπολική πλάκα ανόδου. Ανάμεσα στις δύο αυτές πλάκες, δηλαδή ανάμεσα στις κυψέλες κυκλοφορεί στα κανάλια και ψυκτικό υγρό για την απομάκρυνση της θερμότητας που δημιουργείται λόγω της αντίδρασης.

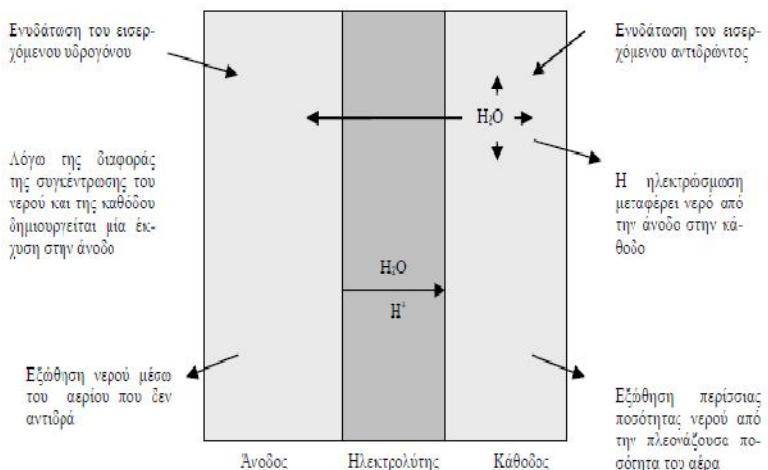
Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται στην άνοδο, δεν κινούνται προς την κάθοδο, αφού δεν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα που να συνδέει την άνοδο με την κάθοδο της κάθε κυψέλης. Έτσι κινούνται προς τα πίσω, στην αγώγιμη για τα ηλεκτρόνια διπολική πλάκα της ανόδου. Επίσης μετακινούνται και προς την αγώγιμη διπολική πλάκα της καθόδου της προηγούμενη κυψέλης, όπου ενώνονται με τα πρωτόνια και σχηματίζεται το παραγόμενο νερό. Υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα που επιτρέπει την ροή ηλεκτρονίων ανάμεσα στην άνοδο της πρώτης κυψέλης και στην κάθοδο της τελευταίας κυψέλης. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων εξαρτάται από τον ρυθμό της αντίδρασης στις επιμέρους κυψέλες. Άρα όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργός επιφάνεια των ηλεκτροδίων της κυψέλης καυσίμου, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 16: Συστοιχία κυψελών υδρογόνου

#### 4.2.10 Διαχείριση νερού - υγρασία

Η διαχείριση του παραγόμενου νερού είναι ζωτικής σημασίας για την αποδοτική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Παρόλο που το νερό είναι προϊόν των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στην κυψέλη καυσίμου και μεταφέρεται έξω από αυτή κατά τη διάρκεια λειτουργία της, πρέπει τόσο το υδρογόνο όσο και ο αέρας που εισάγονται να υγροποιούνται. Η υγρασία των αερίων θα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά. Ακόμα η ύπαρξη ελάχιστου νερού, μειώνει την αγωγιμότητα της μεμβράνης στα ιόντα υδρογόνου και προκαλεί τη μείωση του ρεύματος της κυψέλης. Όπως έχει προαναφερθεί για να ολοκληρωθεί η αντίδραση (τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο) πρέπει το καύσιμο να έρθει σε επαφή ταυτόχρονα και με το ηλεκτρόδιο και με τον ηλεκτρολύτη. Επειδή στις PEMFC ο ηλεκτρολύτης (μεμβράνη) δεν είναι υγρός και δεν μπορεί να γεμίσει τις περιοχές ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στον ηλεκτρολύτη, η ύπαρξη νερού είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Όταν η μεμβράνη είναι πλήρως ενυδατωμένη η απόδοση της κυψέλης αυξάνεται γιατί δημιουργούνται περισσότερες περιοχές που είναι δυνατή η αντίδραση. Υπάρχει όμως ένα σημείο το οποίο αν ξεπεραστεί ο ηλεκτρολύτης «πλημμυρίζει» και το νερό εμποδίζει την επαφή του αερίου με τον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. Επομένως ο έλεγχος της ποσότητας του νερού είναι πολύ σημαντικός. Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου όταν ένα πρωτόνιο διαπερνά τη μεμβράνη μεταφέρει περίπου 2.5 μόρια νερού από την άνοδο στην κάθοδο. Η αναλογία είναι μια εκτίμηση και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ένας από τους οποίους είναι και η ίδια η μεμβράνη. Όταν η κυψέλη λειτουργεί σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος το πρόβλημα της αφυδάτωσης είναι μεγαλύτερο. Η λειτουργία με αφυδάτωμένη μεμβράνη μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης.



**Εικόνα 17: Διαχείριση του νερού στο εσωτερικό της κυψέλης**

#### 4.2.11 Θερμοκρασία λειτουργίας και πίεση

Η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να κυμαίνεται σε κάποια πλαίσια. Αν η

Θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου μειωθεί πολύ, τότε μειώνεται η απόδοση της κυψέλης. Αν αντίθετα η θερμοκρασία ξεπεράσει το ανώτατο όριο λειτουργίας της κυψέλης, τότε θα αφυδατωθεί η μεμβράνη, λόγω εξάτμισης του νερού, οπότε η κυψέλη θα καταστραφεί. Για τον λόγο αυτό πρέπει με κάποιο τρόπο να γίνεται απαγωγή της θερμότητας που παράγεται. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για συμπαραγωγή θερμότητας είτε σε κάποιο υβριδικό σύστημα με ατμοστρόβιλο είτε στη μονάδα επεξεργασίας καυσίμου ή ακόμα και με κάποιο τρόπο να γίνει απαγωγή της στο περιβάλλον.

Επιπλέον η θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), περιορίζεται από το γεγονός ότι πρέπει το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή. Η μεμβράνη πρέπει να περιέχει νερό, έτσι ώστε να μεταφέρονται τα πρωτόνια μέσα από αυτήν. Έτσι, η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες κάτω των 100C. Η λειτουργία κυψελών σε θερμοκρασίες άνω των 100 βαθμών είναι δυνατή, αρκεί να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης, ώστε το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή ή να υπάρχει κατάλληλη μεμβράνη για λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Η πίεση του υδρογόνου θα πρέπει να ελέγχεται. Αν η πίεση είναι πολύ μικρή, τότε μειώνεται η απόδοση της κυψέλης, ενώ αν η πίεση γίνει πολύ μεγάλη τότε τίθεται θέματα δομικής αντοχής της. Οι κυψέλες τύπου PEM λειτουργούν σε θερμοκρασία 60-80°C και πίεση 0.001 - 1 Mpa (0.0098 - 9.8 atm). Ενώ υπάρχει μια προτίμηση για κυψέλες που λειτουργούν σε πίεση ίση με αυτή της ατμόσφαιρας (1 atm).

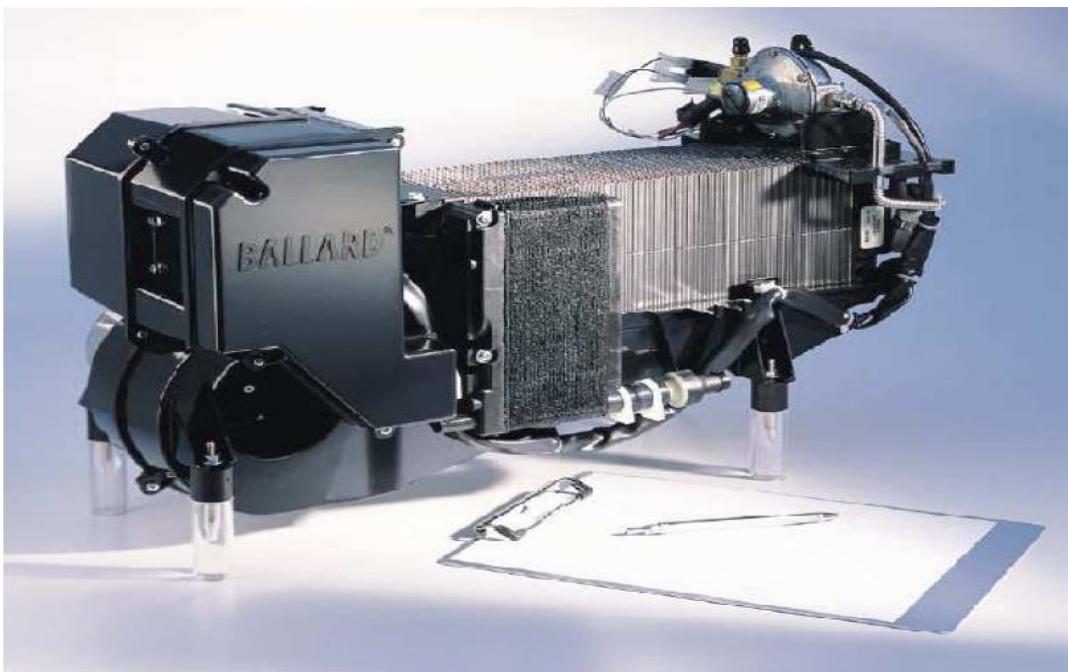
## 4.3 Το ολοκληρωμένο σύστημα Nexa Power Module

### 4.3.1 Εισαγωγή

Στο όχημα ER10 τοποθετήθηκε το Nexa Power Module το οποίο είναι ένα μικρό, χαμηλής συντηρήσεως, πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα κελιών καυσίμου το οποίο είναι σχεδιασμένο για να τοποθετηθεί σε φορητές εφαρμογές και σε συστήματα βιοηθητικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση υδρογόνου ως καύσιμο το καθιστά εξαιρετικά αθόρυβο και φιλικό προς το περιβάλλον, διότι δεν παράγει επιβλαβή προϊόντα. Τα υποσυστήματα που το απαρτίζουν είναι το σύστημα τροφοδοσίας υδρογόνου, το σύστημα τροφοδοσίας αέρα, το σύστημα ψύξης, το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου και τα συστήματα ασφαλείας.

Η στοίβα κελιών καυσίμου του συστήματος, η οποία αποτελείται από 47 κυψέλες με ενεργό εμβαδόν  $110\text{cm}^2$  η κάθε μία, παράγει μη σταθεροποιημένη DC ισχύ με τη χρήση οξυγόνου και υδρογόνου ως αντιδρώντα. Τα μόνα προϊόντα της αντίδραση είναι νερό και θερμότητα. Η στοίβα κελιών καυσίμου είναι τεχνολογίας PEM και

λειτουργεί σε χαμηλή πίεση, μειώνοντας έτσι όλες τις παρασιτικές απώλειες, τον παραγόμενο θόρυβο και αυξάνοντας την αξιοπιστία του συστήματος. Το σύστημα είναι αερόψυκτο, πράγμα που απλοποιεί ακόμα περισσότερο την κατασκευή και την λειτουργία. Η ηλεκτρική ισχύ που παράγει είναι 1.2kW. Η τάση εξόδου εξαρτάται και μεταβάλλεται με την ισχύ (από 43V στην κατάσταση ανοικτού κυκλώματος, μέχρι 26V σε πλήρες φορτίο). Κατά την διάρκεια λειτουργίας, η τάση της στοίβας επιτηρείται για διάφορους λόγους, όπως είναι, η ασφάλεια, η διάγνωση και ο έλεγχος. Επιπρόσθετα, το σύστημα ελέγχου της τάσης των κελιών, παρακολουθεί την απόδοση των κελιών ανά ζευγάρια και διακρίνει πιο κελί έχει μειωμένη απόδοση. Η μονάδα ελέγχου του συστήματος θα σταματήσει την λειτουργία του, είτε σε περίπτωση σφάλματος, είτε σε περίπτωση μη ασφαλής λειτουργίας της στοίβας.



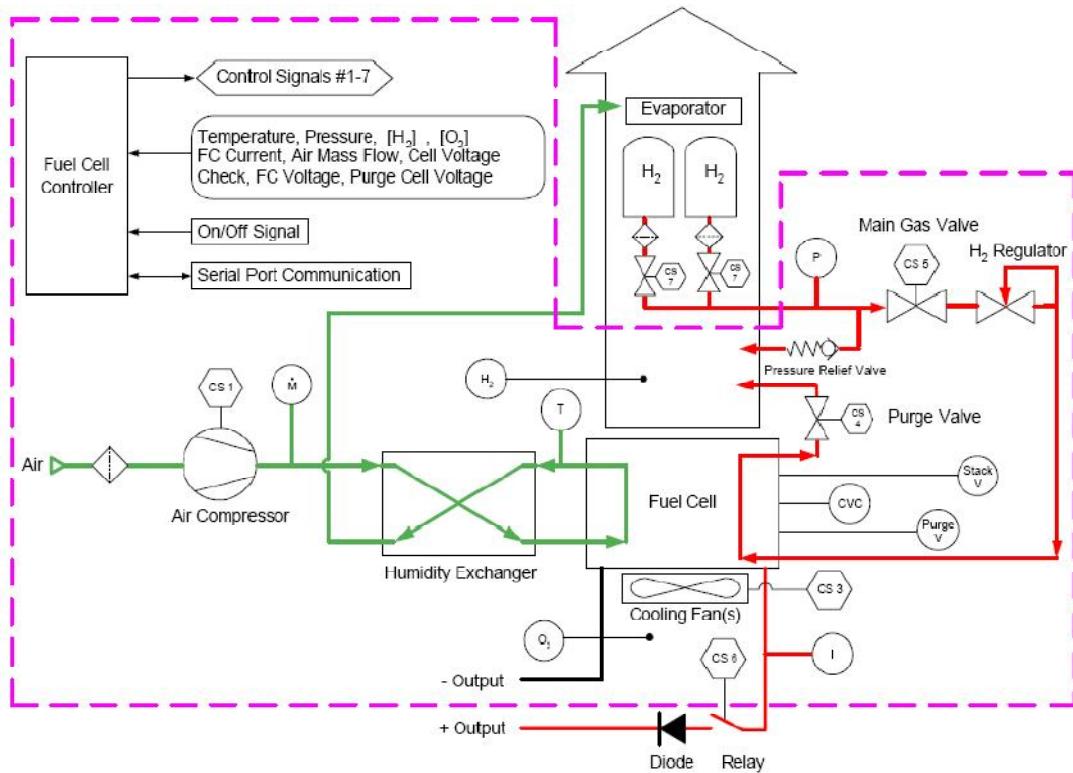
Εικόνα 18: Nexa Power Module 1.2kW

Εξόδοι	Χαρακτηριστικό	Επεξήγηση	Τιμή
<i>Iσχύς</i>	Ονομαστική Ισχύς		1.2 kW
	Τάση	Τάση λειτουργίας	22V – 50V
		Τάση για ονομ. ισχύς	26V
<i>Εκπομπές</i>	Χρόνος εκκίνησης	Ελάχιστος χρόνος για επίτευξη ονομαστικής ισχύς	2 minutes
	Θόρυβος	Μέγιστη εκπομπή θορύβου (1m)	72dB(A)
	Νερό	Παραγόμενη ποσότητα νερού κατά την ονομαστική ισχύ	0.87L/hr
<i>Φυσικά χαρακτηριστικά</i>	Διαστάσεις		56x25x33cm
	Μάζα		13kg
<i>Διάρκεια ζωής</i>	Λειτουργική διάρκεια	Ελάχιστη διάρκεια ζωής	1500 hours
	Διάρκεια κύκλου ζωής	Αριθμός των εκκινήσεων και διακοπών (ελάχιστος)	500
Είσοδοι	Χαρακτηριστικό	Επεξήγηση	Τιμή
<i>Καύσιμο</i>	Καθαρότητα	Ανεκτικότητα (ελάχιστη) συγκέντρωσης υδρογόνου	99.99% H <sub>2</sub> (vol)
	Πίεση	Επιτρεπτή εσωτερική πίεση	70-1720kPa(g)
	Ανεκτικότητα σε προσμίξεις	Μέγιστη νόθευση He, Ar, N <sub>2</sub>	0.01% (vol)
		Μέγιστη νόθευση CO και CO <sub>2</sub>	2ppm (vol)
	Κατανάλωση	Μέγιστη νόθευση υδρογονανθράκων	1ppm (vol)
		Μέγιστη νόθευση O <sub>2</sub>	500ppm (vol)
		Μέγιστη κατανάλωση καυσίμου κατά την ονομ. ισχύς	<18.5 SLPM
<i>Κατάσταση λειτουργίας</i>	Κυμάτωση ρεύματος	Ανεκτική κυμάτωση ρεύματος στα 120Hz	24.7% RMS 35% peak-peak
<i>DC τροφοδοσία</i>	Τάση	Επιτρεπτή τάση	18V to 30 V
	Ισχύς	Μέγιστη ισχύς	60W
<i>Λειτουργικό περιβάλλον</i>	Τοποθεσία	Επιτρεπτή τοποθεσία για χρήση	Εσωτερικοί και εξωτερικοί χώροι
	Θερμοκρασία	Φάσμα επιτρεπτής θερμοκρασίας περιβάλλοντος	3°C-40°C
	Σχετική υγρασία	Φάσμα επιτρεπτής σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος	0%-95%

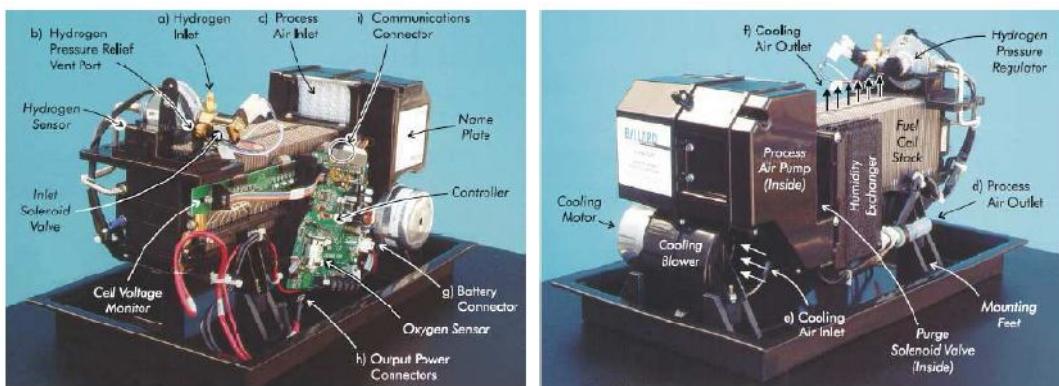
Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά NEXA Power Module

### 4.3.2 Δομή της πειραματικής συστοιχίας

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η διάρθρωση των επιμέρους συστημάτων που πλαισιώνουν τη συστοιχία των κυψελών καυσίμου PEM. Όπως έχει προαναφερθεί, υδρογόνο και οξυγόνο εισέρχονται στη συστοιχία ώστε να οδηγηθούν στην ηλεκτροχημική μετατροπή. Η συστοιχία ψύχεται από ειδικό ανεμιστήρα (cooling fan), ώστε να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία κάτω από 65°C. Στη παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η ροή των αερίων που ακολουθείται, όπως επίσης και η μονάδα ελέγχου (Fuel Cell Controller).



Εικόνα 19: Δομική περιγραφή Nexa Power Module



Εικόνα 20: Όψεις συστοιχίας κυψελών καυσίμου

### 4.3.3 Σύστημα παροχής υδρογόνου

Η συστοιχία λειτουργεί με καθαρό υδρογόνο (99.99% dry gaseous hydrogen). Το σύστημα παροχής υδρογόνου είναι το πιο πολύπλοκο υποσύστημα σε όλη τη λειτουργική μονάδα. Το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει τα παρακάτω επιμέρους εξαρτήματα:

- Ένα ελεγκτή πίεσης ο οποίος παρακολουθεί τις συνθήκες ροής του καυσίμου για να διασφαλίσει ότι υπάρχει αρκετό καύσιμο για την λειτουργία του Nexa.
- Μια βαλβίδα απελευθέρωσης καυσίμου η οποία προστατεύει τα εξαρτήματα από την υπερβολική αύξηση της πίεσης του καυσίμου.
- Μια σωληνοειδή βαλβίδα η οποία παρέχει απομόνωση από την παροχή του καυσίμου κατά τον τερματισμό της λειτουργίας του συστήματος.
- Ένα ρυθμιστή πίεσης ο οποίος διατηρεί κατάλληλη πίεση στο παρεχόμενο καύσιμο
- Ένα ανιχνευτή διαρροής υδρογόνου ο οποίος παρακολουθεί τα επίπεδα της συγκέντρωσης του υδρογόνου, κοντά στο σύστημα παροχής καυσίμου. Σε περίπτωση ανόδου της συγκέντρωσης, εμφανίζεται προειδοποιητικό σήμα και γίνεται τερματισμός της λειτουργίας του συστήματος.

Η στοίβα βρίσκεται υπό την πίεση του παρεχόμενου υδρογόνου κατά την διάρκεια της λειτουργίας. Το σύστημα ρύθμισης της πίεσης φροντίζει να υπάρχει αρκετό υδρογόνο, το οποίο καταναλώνεται κατά την λειτουργία. Το άζωτο και το παραγόμενο νερό στο κύκλωμα των καναλιών του αέρα μετακινείται αργά κατά μήκος των κελιών της στοίβας και σταδιακά συσσωρεύεται στο κύκλωμα καναλιών του υδρογόνου. Η συσσώρευση του αζώτου και του νερού στην άνοδο έχει ως αποτέλεσμα μια σταδιακή μείωση της απόδοσης συγκεκριμένων κελιών, τα οποία ονομάζονται, κελιά εκκαθάρισης. Η παραγόμενη τάση αυτών των κελιών παρακολουθείται και ανάλογα με την τιμή της, μια βαλβίδα καθαρισμού απελευθερώνει υδρογόνο περιοδικά στην έξοδο της στοίβας για να απομακρύνει αδρανή συστατικά στην άνοδο και να αποκαταστήσει την απόδοση.

Μόνο ένα μικρό ποσοστό του καυσίμου χρησιμοποιείται για καθαρισμό, και είναι μικρότερο από 1% του συνολικού καυσίμου που καταναλώνεται κάθε στιγμή. Το υδρογόνο του έχει χρησιμοποιήθηκε για τον καθαρισμό τροφοδοτείται στο σύστημα ψύξης, πριν απομακρυνθεί από το Nexa. Το υδρογόνο διαχέεται στο σύστημα ψύξης μέσω του αέρα, και μειώνεται η συγκέντρωση του, πολύ κάτω από το όριο επικινδυνότητας. Ο ανιχνευτής διαρροής του υδρογόνου, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο σημείο εξόδου του συστήματος ψύξης, διασφαλίζει ότι η συγκέντρωση του υδρογόνου είναι πολύ μικρότερη από το όριο επικινδυνότητας. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά το Nexa ικανό για εσωτερική χρήση.

#### 4.3.4 Σύστημα παροχής αέρα

Ένας μικρός συμπιεστής τροφοδοτεί με περίσσια οξειδωτικού αέρα την στοίβα των κελιών καυσίμου, για να συντηρείται η αντίδραση. Ένα φίλτρο εισαγωγής αέρα

προστατεύει τον συμπιεστή και τα εξαρτήματα μετά από αυτόν από τα μικροσωματίδια που βρίσκονται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η ταχύτητα του συμπιεστή προσαρμόζεται ανάλογα με το ρεύμα που απαιτείται από την στοίβα. Μεγάλα ρεύματα απαιτούν και μεγαλύτερες παροχές αέρα. Ένας αισθητήρας ροής αέρα μετράει και προσαρμόζει ανάλογα την ταχύτητα του συμπιεστή στην εκάστοτε απαίτηση ρεύματος. Ο οξειδωτικός αέρας υγραίνεται πριν φτάσει τα κελιά καυσίμου, για να διατηρηθεί ο κορεσμός της υγρασίας στις μεμβράνες και ταυτόχρονα να διατηρηθεί σε υψηλό βαθμό η διάρκεια ζωής των κελιών. Ένας εναλλάκτης υγρασίας μεταφέρει ταυτόχρονα το παραγόμενο νερό και την θερμότητα από την κάθιδο, στην είσοδο του ξηρού αέρα. Το παραπανίσιο παραγόμενο νερό απομακρύνεται από το σύστημα, σε υγρή και αέρια μορφή, στην έξοδο του οξειδωτικού αέρα, δηλαδή στην «εξάτμιση» τις στοίβας.

#### **4.3.5 Σύστημα Ψύξης**

Το Nexa είναι αερόψυκτο. Ένας ανεμιστήρας τοποθετημένος στην βάση της μονάδας σπρώχνει αέρα κάθετα μέσα στα κανάλια ψύξης στην στοίβα. Η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος διατηρείται στους 65 βαθμούς κελσίου, μεταβάλλοντας κατάλληλα την ταχύτητα του ανεμιστήρα. Η θερμοκρασία μετράται στην κάθιδο, που βρίσκεται και η έξοδος του αέρα. Το σύστημα ψύξης χρησιμοποιείται για να διαλύσει το χρησιμοποιούμενο για τον καθαρισμό υδρογόνο, που αποβάλλεται κατά την διάρκεια κανονικής λειτουργίας. Το υδρογόνο απελευθερώνεται στην ροή του ψυκτικού αέρα μέσω της αυτόματής βαλβίδας καθαρισμού. Το υδρογόνο γρήγορα διαχέεται στον αέρα και η συγκέντρωσή του μειώνεται σε επίπεδα πολύ χαμηλότερα από το όριο ανάφλεξης (LFL) του. Για λόγους ασφαλείας, είναι τοποθετημένος ένας αισθητήρας υδρογόνου στην εξαγωγή του ψυκτικού αέρα και παρέχει στοιχεία στο σύστημα ελέγχου. Το σύστημα ελέγχου παράγει προειδοποιητικά σήματα και συναγερμούς εάν η συγκέντρωση του υδρογόνου πλησιάσει το 25% του ορίου ανάφλεξης (LFL).

#### **4.3.6 Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου**

Η λειτουργία του Nexa είναι πλήρως αυτοματοποιημένη από ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου. Η μονάδα ελέγχου λαμβάνει διάφορα σήματα εισόδου από τους διάφορους αισθητήρες που υπάρχουν στο σύστημα όπως οι διάφορες θερμοκρασιακές μετρήσεις της στοίβας, η πίεση του υδρογόνου, οι συγκεντρώσεις διαρροής του υδρογόνου, το ρεύμα που διαρρέει την στοίβα, η ροή της μάζας του αέρα, η τάση της στοίβας και η τάση του κελιού καθαρισμού. Η κατάσταση του

συστήματος του ελεγκτή της τάσης του κελιού (CVC) είναι επίσης μια είσοδος στο σύστημα ελέγχου, παράγοντας ένα ψηφιακό σήμα δύο καταστάσεων που δηλώνουν την καλή ή λανθασμένη λειτουργία της στοίβας. Η συγκέντρωση του οξυγόνου στο περιβάλλον που βρίσκεται η συσκευή, μετράται από έναν ενσωματωμένο αισθητήρα, για την διασφάλιση ιδανικών συνθηκών περιβάλλοντος για τον χρήστη της συσκευής. Αναλογικά και ψηφιακά σήματα εξόδου παράγονται από τον ελεγκτή για να ρυθμίσουν όλες τις λειτουργίες.

Επίσης, εντολές ελέγχου παράγονται για τον έλεγχο των βαλβίδων του υδρογόνου και του καθαρισμού, οι οποίες είναι ηλεκτρομαγνητικές, για να απομονώσουν την πηγή του υδρογόνου όταν το σύστημα δεν είναι σε λειτουργία. Η ταχύτητα του συμπιεστή του αέρα μεταβάλλεται ανάλογα με την ζήτηση του ρεύματος. Η ταχύτητα του ανεμιστήρα του συστήματος ψύξης ρυθμίζεται ανάλογα για να διατηρηθεί μια σταθερή θερμοκρασία στην στοίβα. Η σύνδεση του εξωτερικού ηλεκτρικού φορτίου γίνεται μέσω ενός ηλεκτρονόμου τον οποίο ελέγχει η μονάδα ελέγχου. Η επικοινωνία από και προς την μονάδα ελέγχου γίνεται μέσω εξωτερικού εξοπλισμού, με την χρήση της σειριακής σύνδεσης RS-485. Τα μεταδιδόμενα δεδομένα από την μονάδα ελέγχου ενημερώνουν το χρήστη για την απόδοση και την κατάσταση του συστήματος. Η μονάδα ελέγχου δέχεται λειτουργικές και διαγνωστικές εντολές.

Συνθήκες λειτουργίας οι οποίες είναι είτε μη ασφαλείς είτε ασυνήθιστες, έχουν ως αποτέλεσμα προειδοποιητικά μηνύματα ή συναγερμούς, και αυτόματη διακοπή της λειτουργίας, ανάλογα με την επικινδυνότητα της κατάστασης. Όταν εμφανιστεί μια προειδοποίηση το Nexa συνεχίζει να λειτουργεί και η μονάδα ελέγχου προσπαθεί να επαναφέρει τις ιδανικές συνθήκες λειτουργίας λύνοντας το πρόβλημα. Κατά την διάρκεια ενός συναγερμού η μονάδα ελέγχου αυτόματα τερματίζει την λειτουργία του συστήματος. Απενεργοποιώντας τον διακόπτη εκκίνησης τα περισσότερα σήματα συναγερμών θα απενεργοποιηθούν και το σύστημα μπορεί να κάνει επανεκκίνηση.



Εικόνα 21: Μονάδα ελέγχου

#### 4.3.7 Συστήματα ασφαλείας

Το Nexa έχει αυτοματοποιημένες λειτουργίες για να διασφαλίσει την ασφάλεια του χρήστη και να εμποδίσει καταστροφή του εξοπλισμού. Μια προειδοποίηση ή ένας συναγερμός θα εμφανιστεί όταν η λειτουργία του συστήματος είναι μη ασφαλής ή εκτός συνήθων συνθηκών. Το σύστημα ασφαλείας εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες :

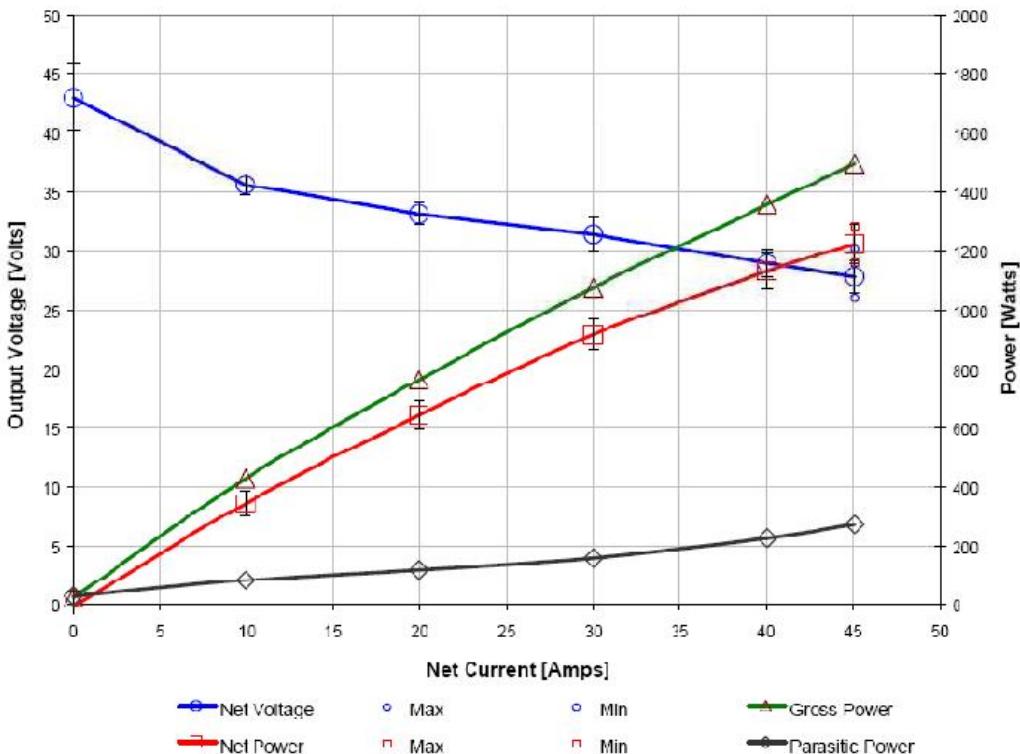
- Οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος παρακολουθούνται συνεχώς για να διασφαλιστεί ότι θα βρίσκονται μέσα στα προβλεπόμενα όρια. Αυτές οι παράμετροι συμπεριλαμβάνουν την θερμοκρασία λειτουργίας, το ρεύμα που διαρρέει την στοίβα, την τάση λειτουργίας και την πίεση του παρεχόμενου καυσίμου. Ειδοποιήσεις και Συναγερμοί ενεργοποιούνται αν οποιαδήποτε από αυτές τις παραμέτρους ξεφύγει από τα επιθυμητά όρια.
- Ο ελεγκτής της τάσης του κελιού, παρακολουθεί συνεχώς την λειτουργία και την απόδοση κάθε ζεύγους κελιών ξεχωριστά. Η παρουσία ενός ελαττωματικού κελιού θα προκαλέσει αυτόματα τον τερματισμό της λειτουργίας του συστήματος.
- Ο ανιχνευτής διαρροής υδρογόνου είναι τοποθετημένος κοντά στο υποσύστημα διανομής του καυσίμου. Τοποθετημένος μέσα στο σύστημα ψύξης μπορεί να ανιχνεύει υπερβολική ποσότητα υδρογόνου καθαρισμού ή την παρουσία εξωτερικής διαρροής καυσίμου. Εάν ξεπεραστούν τα προκαθορισμένα όρια θα γίνει αυτόματος τερματισμός της λειτουργίας του Nexa.
- Το Nexa εξοπλίζεται με έναν αισθητήρα οξυγόνου για να μετράται η συγκέντρωσή του στον περιβάλλοντα αέρα. Το σύστημα τερματίζει την λειτουργία του αυτόματα όταν τα επίπεδα συγκέντρωσης του οξυγόνου πέσουν κάτω από τα επιτρεπτά όρια ασφαλείας.

Πέρα από τις διάφορες προειδοποίήσεις και συναγερμούς, το Nexa ενσωματώνει και άλλα χαρακτηριστικά ασφαλείας :

- Όταν το σύστημα βγαίνει εκτός λειτουργίας ενεργοποιείται μια βαλβίδα αποκοπής του καυσίμου. Αυτή η λειτουργία απομονώνει την παροχή του καυσίμου και αποτρέπει να εισέλθει υδρογόνο στην στοίβα των κελιών, στην περίπτωση που έχει ενεργοποιηθεί κάποιος συναγερμός.
- Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, το υδρογόνο από το σύστημα καθαρισμού αναμιγνύεται με τον αέρα από το σύστημα ψύξης, όπου γρήγορα διαχέεται και διαλύεται σε συγκεντρώσεις πολύ μικρότερες από την συγκέντρωση ανάφλεξης του υδρογόνου (LFL).
- Μια βαλβίδα απελευθέρωσης υδρογόνου η οποία ανοίγει κάθε φορά που η πίεση ξεπεράσει τα επιθυμητά όρια λειτουργίας, και απελευθερώνει το παραπανίσιο υδρογόνο στο σύστημα ψύξης για να προστατευτεί ο εξοπλισμός από υπερπιέσεις. Εάν η συγκέντρωση του απελευθερωμένου υδρογόνου ξεπεράσει τα όρια ασφαλείας τότε η λειτουργία του συστήματος διακόπτεται.

#### 4.3.8 Χαρακτηριστικά διαγράμματα απόδοσης της συστοιχίας

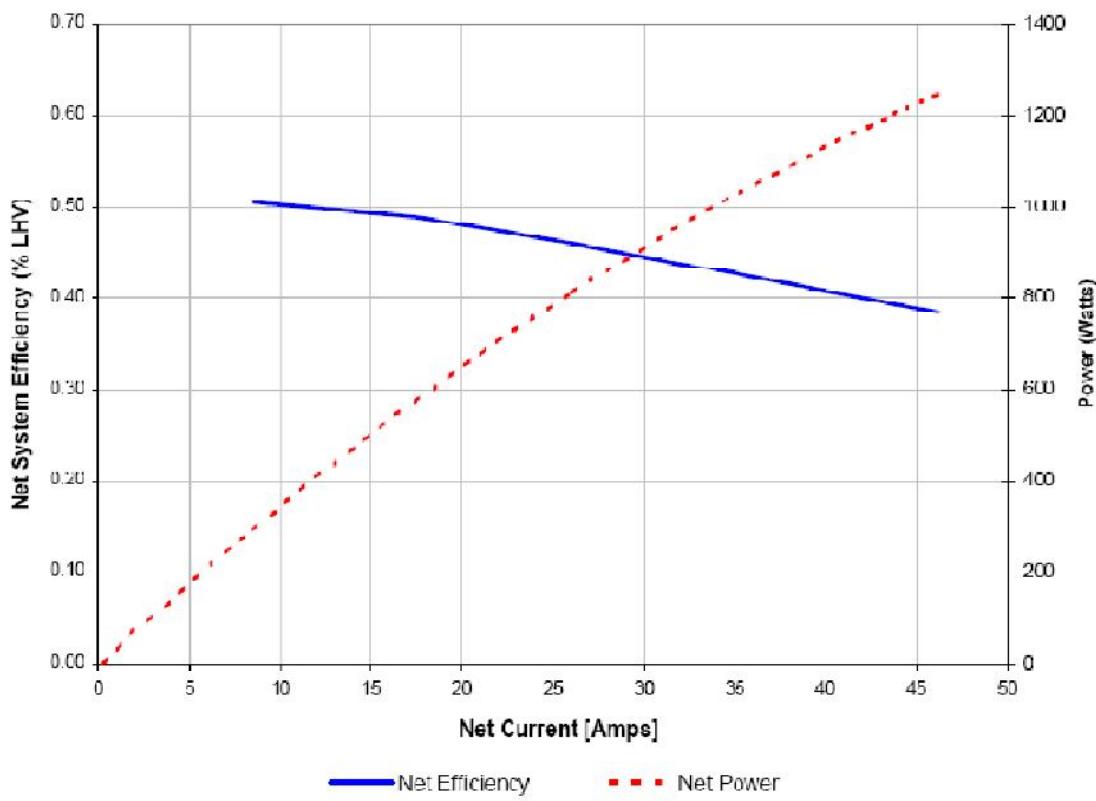
Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη της συστοιχίας, όπως μετρήθηκαν από την κατασκευαστική εταιρία τη χρονική στιγμή που τέθηκε σε λειτουργία για πρώτη φορά.



Εικόνα 22: Χαρακτηριστική τάση-ρεύματος και ισχύς- ρεύματος

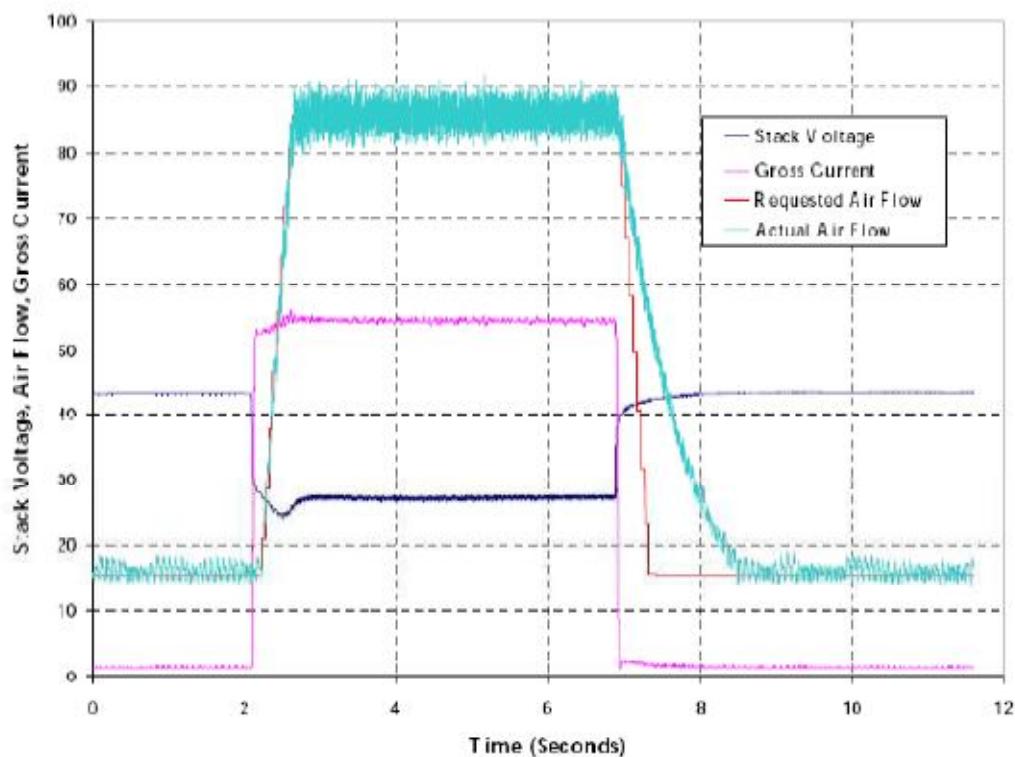
Στην παραπάνω χαρακτηριστική η ισχύς εξόδου κυμαίνεται μεταξύ 0kW, στην περίπτωση ανοικτού κυκλώματος και 1.2 kW όταν βρίσκεται υπό κατάσταση πλήρους φορτίου. Το αντίστοιχο ρεύμα κυμαίνεται μεταξύ 0 και 46A ενώ η τάση εξόδου μεταξύ 43V και 26V. Επίσης στο διάγραμμα παρουσιάζεται η ισχύς συναρτήσει του ρεύματος, η παρασιτική ισχύς (η ισχύς που χρειάζονται τα επιμέρους συστήματα όπως είναι η αντλία του αέρα και ο ανεμιστήρας) και η συνολική ισχύς.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης, υπολογισμένος με βάση την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (Lower Heating Value, LHV). Όπως διαφαίνεται και από το διάγραμμα ο βαθμός απόδοσης υπό πλήρες φορτίο (1,2 kW) ισούται με 38% ενώ ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι 50% και παρουσιάζεται υπό φορτίο ισχύος 300W. Στη συνέχεια όπως είναι φυσικό ο βαθμός απόδοσης μειώνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο.

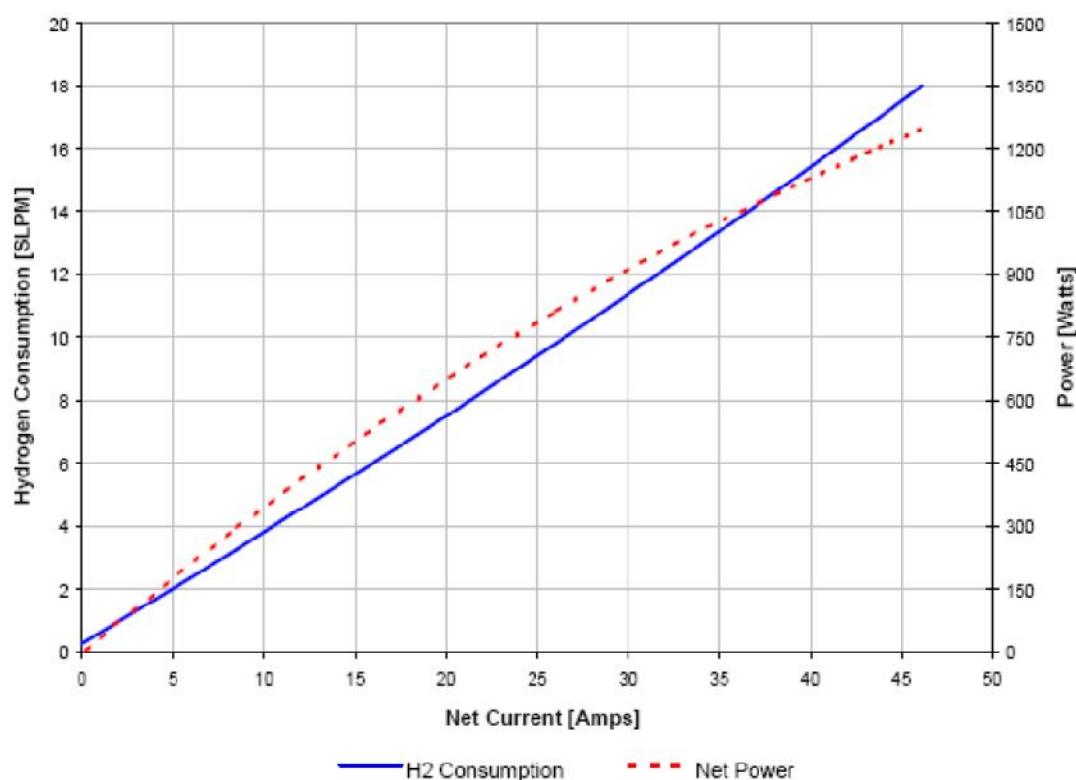


Εικόνα 23 : Απόδοση της κυψέλης συναρτήσει του ρεύματος

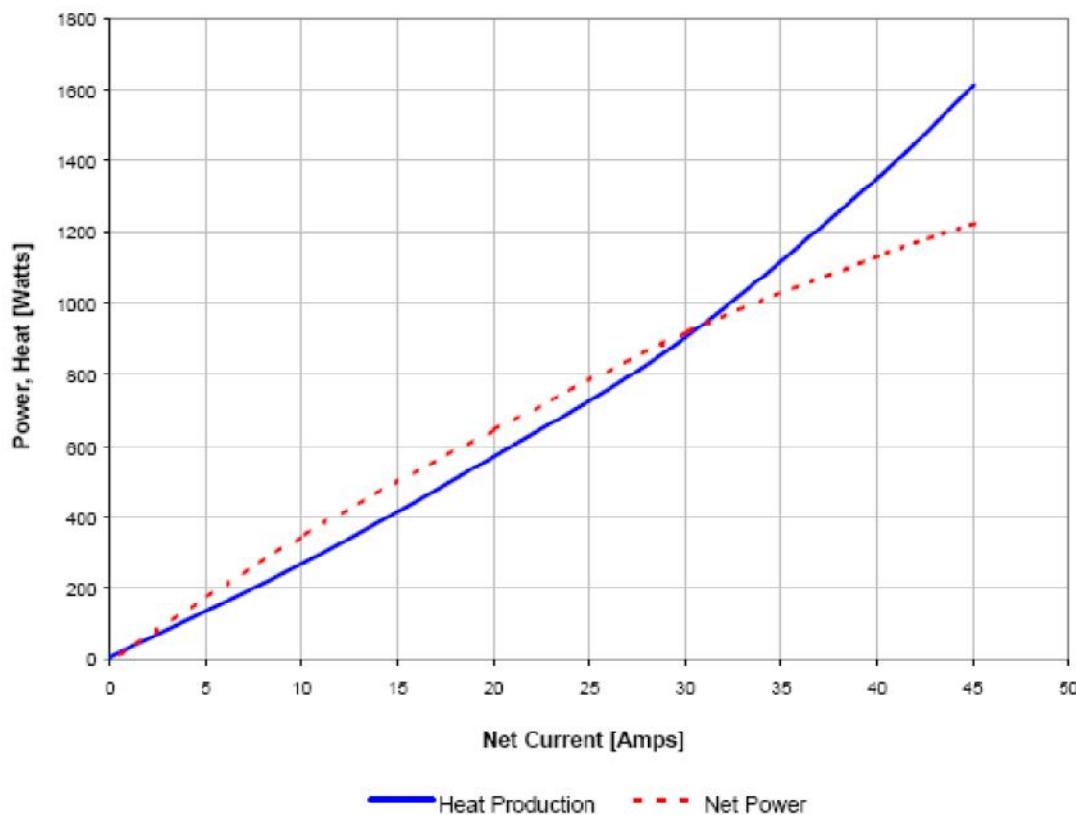
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβατική απόκριση της συστοιχίας NEXA. Η δυναμική απόκριση ισοδυναμεί με τη μεταβολή της κατάστασης από συνθήκες ανοικτού κυκλώματος (43V και 1A) στην κατάσταση πλήρους φορτίου (26V και 54A). Η μεταβολή του ρεύματος είναι ακαριαία με τη μεταβολή του φορτίου. Επίσης η ποσότητα του υδρογόνου που απαιτείται για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του φορτίου ανεφοδιάζεται αυτόματα. Η κύρια αιτία που προκαλεί την καθυστέρηση της απόκρισης είναι η αντλία του αέρα.



Εικόνα 24 : Δυναμική απόκριση της συστοιχίας



Εικόνα 25 : Ρυθμός κατανάλωσης υδρογόνου



Εικόνα 26 : Ρυθμός παραγωγής θερμότητας

## Κεφάλαιο 5: Ηλεκτρικοί κινητήρες

### 5.1 Κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων

Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα ενός ηλεκτρικού οχήματος. Οι κινητήρες διαχωρίζονται με βάση το είδος της τάσης που παρέχεται στο στάτη. Χωρίζονται, λοιπόν, σε κινητήρες συνεχούς (dc) και εναλλασσόμενης (ac) τάσης. Οι κινητήρες εναλλασσόμενης τάσης, που χρησιμοποιούνται στον τομέα της αυτοκίνησης είναι τριφασικοί, λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή απόδοσης συγκριτικά με τους μονοφασικούς κινητήρες.

Οι βασικές κατηγορίες των μηχανών συνεχούς ρεύματος είναι:

- Κινητήρας Σ.Ρ. με διέγερση εν σειρά
- Κινητήρας Σ.Ρ. με παράλληλη διέγερση
- Κινητήρας Σ.Ρ. με ανεξάρτητη διέγερση
- Κινητήρας Σ.Ρ. με σύνθετη διέγερση
- Κινητήρας Σ.Ρ. με μόνιμο μαγνήτη

Οι βασικές κατηγορίες των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος είναι:

- Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού
- Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα
- Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δρομέα χωρίς αυλακώσεις
- Ασύγχρονος μονοφασικός κινητήρας
- Σύγχρονος τριφασικός με ή χωρίς μόνιμο μαγνήτη

Μια ειδική κατηγορία, η οποία έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, είναι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (brushless motors).

Από τους παραπάνω τύπους κινητήρων οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι είναι ο τριφασικός ασύγχρονος με βραχυκυκλωμένο κλωβό, ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμο μαγνήτη, ο κινητήρας Σ.Ρ. με διέγερση σειράς, ο κινητήρας Σ.Ρ. με μόνιμο μαγνήτη και ο κινητήρας τύπου Brushless.

#### 5.1.1 Μηχανές συνεχούς ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη συνεχή ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Τα βασικά τμήματα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι ο στάτης και

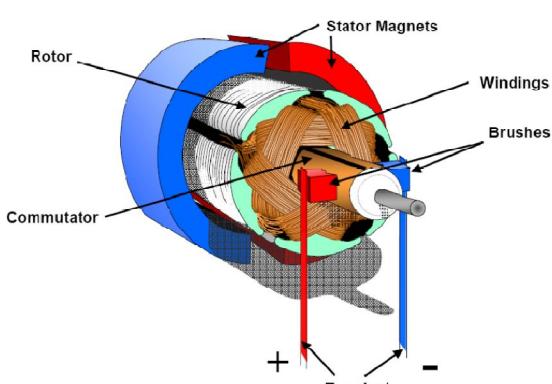
τα κύρια τυλίγματα διέγερσης, ο οπλισμός και τα τυλίγματα οπλισμού, το διάκενο, τα βοηθητικά τυλίγματα διέγερσης, οι ψήκτρες και το μεταλλικό περίβλημα.

Ο στάτης της μηχανής συνεχούς ρεύματος δύναται να έχει μια εκ των δύο μορφών:

- Στάτης με μόνιμο μαγνήτη
- Στάτης με τύλιγμα διέγερσης

Στην πρώτη περίπτωση το μαγνητικό στο εσωτερικό του στάτη είναι μόνιμο λόγω της ύπαρξης μαγνητικού υλικού. Η λύση αυτή απαλλάσσει τη μηχανή από την ανάγκη τροφοδοσίας στο στάτη, είναι όμως περισσότερο δαπανηρή, ενώ υπάρχει κίνδυνος απομαγνητισμού του μαγνήτη, οπότε και θα πρέπει η μηχανή να επισκευαστεί. Τίθεται επίσης θέμα με την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς τα υλικά του μαγνήτη είναι επιβλαβή με την απόθεσή τους. Η χρήση μόνιμων μαγνητών είναι, πάραυτα, περισσότερο διαδεδομένη. Στη δεύτερη περίπτωση το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τη ροή ρευμάτων στα κατάλληλα διαμορφωμένα τυλίγματα του στάτη. Τα τυλίγματα αυτά εγκαθίστανται γύρω από ειδικές κατασκευές επί του στάτη που ονομάζονται πόλοι. Συναντώνται μηχανές με διάφορους αριθμούς πόλων, πάντα όμως ο αριθμός τους είναι ζυγός.

Ο δρομέας της μηχανής συνεχούς ρεύματος αποτελείται από φύλλα σιδηρομαγνητικού υλικού που φέρουν επάνω τους τυλίγματα. Τα τυλίγματα αυτά όταν διαρρέονται από ρεύμα από την πηγή αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο του στάτη και έλκονται από τον αντίστοιχο μαγνητικό πόλο του. Για να μην «κλειδώσει» η μηχανή σε μία συγκεκριμένη θέση, όταν τα τυλίγματα του δρομέα φτάσουν στο κοντινότερο σημείο των πόλων που έλκονται, γίνεται αντιστροφή των ρευμάτων μέσα στα τυλίγματα αξιοποιώντας τις ψήκτρες. Οι ψήκτρες έχουν ως σκοπό τη σύνδεση του κινούμενου ρότορα με τους αγωγούς τροφοδοσίας. Κατασκευάζονται από κάρβουνο και φθείρονται με τη λειτουργία της μηχανής, γεγονός που προσδίδει την ανάγκη για συντήρηση της μηχανής.



Εικόνα 27: dc ηλεκτροκινητήρας

### 5.1.2 Σύγχρονοι κινητήρες

Οι σύγχρονοι κινητήρες αποτελούνται από τον στάτη ο οποίος φέρει ένα τριφασικό τύλιγμα και από τον δρομέα ο οποίος μπορεί να έχει δύο μορφές:

- Τύλιγμα διέγερσης
- Μόνιμο μαγνήτη

Στον πρώτο τύπο, το τύλιγμα διέγερσης απαιτεί τροφοδοσία με συνεχές ρεύμα, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα του. Οι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη είναι μεν πιο ακριβοί, αλλά μειώνουν την πολυπλοκότητα της κατασκευής. Στον δεύτερο τύπο διακρίνουμε δύο υποκατηγορίες, που αναφέρονται στην κατασκευή του δρομέα, η πρώτη είναι λεία και η δεύτερη παρουσιάζει έκτυπους πόλους.

Ο χαρακτηρισμός «σύγχρονος» προέρχεται από το γεγονός ότι ο δρομέας στρέφεται με την ίδια ταχύτητα με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο εσωτερικό της μηχανής, ανεξάρτητα του φορτίου, μέχρι κάποιο όριο ισχύος. Για τη λειτουργία του κινητήρα τροφοδοτείται ο δρομέας με συνεχές ρεύμα διέγερσης το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου του δρομέα, ή εναλλακτικά αυτό το πεδίο δημιουργείται από το μόνιμο μαγνήτη. Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων το οποίο παράγει στο εσωτερικό της μηχανής ένα στρεφόμενο ομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Έτσι στο εσωτερικό του κινητήρα υπάρχουν πλέον δύο πεδία τα οποία τείνουν να ευθυγραμμιστούν. Επειδή το πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς (λόγω των τριφασικών εναλλασσόμενων ρευμάτων), ο δρομέας, οδηγούμενος από το πεδίο του, προσπαθεί συνεχώς να ακολουθήσει. Ο έλεγχος των στροφών της μηχανής πραγματοποιείται με αλλαγή της συχνότητας τροφοδοσίας.

### 5.1.3 Ασύγχρονοι κινητήρες

Οι ασύγχρονοι κινητήρες αποτελούν την πιο διαδεδομένη επιλογή σε βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές. Πλέον, με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών και μεθόδων ελέγχου τους κατέχουν ένα σημαντικό κομμάτι επί του ποσοστού των κινητήρων που τροφοδοτούν ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. 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.

Όπως η πλειοψηφία των ηλεκτρικών κινητήρων, οι ασύγχρονοι αποτελούνται από μία σταθερή εξωτερική κατασκευή, το στάτη και ένα κινούμενο τμήμα, το δρομέα, ο οποίος περιστρέφεται στο εσωτερικό με ένα μικρό διάκενο αέρα να υπάρχει μεταξύ τους. Στο εσωτερικό του ασύγχρονου κινητήρα ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο είναι υπεύθυνο για την κίνηση του ρότορα. Στους τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργείται λόγω της φύσης της τροφοδοσίας. Στους μονοφασικούς κινητήρες για να επιτευχθεί αυτό απαιτούνται πρόσθετα ηλεκτρικά κυκλώματα. Κατά τη λειτουργία δημιουργούνται δύο ξεχωριστά ζεύγη ηλεκτρομαγνητών, το πρώτο εκ των οποίων είναι στο στάτη λόγω της τροφοδοσίας. Στο δρομέα επάγεται τάση από το στάτη, η οποία ευθύνεται για τη δημιουργία ηλεκτρομαγνήτη σε αυτόν και για αυτό το λόγο οι ασύγχρονοι κινητήρες ονομάζονται και επαγωγικοί. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πεδίων των δύο ηλεκτρομαγνητών προκαλεί περιστροφική δύναμη και κατά συνέπεια ροπή στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα. Ο στάτης μιας ασύγχρονης μηχανής κατασκευάζεται από λεπτά ελάσματα αλουμινίου ή σιδήρου. Αυτά τοποθετούνται σε σειρά για να σχηματίσουν μία κυλινδρική κατασκευή που φέρει αυλακώσεις στο εσωτερικό του. Στις αυλακώσεις τοποθετούνται τυλίγματα από μονωμένους αγωγούς, τα οποία μαζί με τον πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού σχηματίζουν ένα ηλεκτρομαγνήτη όταν δεχθούν εναλλασσόμενη τροφοδοσία. Ο αριθμός των πόλων του ηλεκτρομαγνήτη που δημιουργείται εξαρτάται από τις εσωτερικές διασυνδέσεις των τυλιγμάτων, που σε κάθε περίπτωση είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε κατά την εφαρμογή εναλλασσόμενης τάσης να δημιουργούν περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο δρομέας κατασκευάζεται και αυτός από λεπτά χαλύβδινα ελάσματα ενώ στην περιφέρεια του φέρει μπάρες φτιαγμένες από αλουμίνιο ή χαλκό ή τυλίγματα. Ο περισσότερο διαδεδομένος τύπος δρομέα είναι αυτός που οι μπάρες του είναι βραχυκυλωμένες μέσω δακτυλίων στις άκρες του ρότορα (squirrel cage rotor). Η προτίμηση σε αυτόν τον τύπο δρομέα οφείλεται στην απλότητα και ανθεκτικότητα του. Ο δρομέας εδράζεται στο περίβλημα του στάτη χρησιμοποιώντας διατάξεις ρουλεμάν για την ομαλή περιστροφή του.

Σε εφαρμογές που δεν υπάρχει δυνατότητα τριφασικής τροφοδοσίας συναντώνται μονοφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες. Όπως δηλώνεται και από την ονομασία τους, οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνο ένα τύλιγμα στο στάτη και λειτουργούν με μονοφασική τροφοδοσία. Ο δρομέας των μονοφασικών κινητήρων είναι βραχυκυλωμένου κλωβού. 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 εξωτερικός μηχανισμός που θα μπορέσει να στρέψει αρχικά τη μηχανή. Όταν ο

δρομέας αποκτήσει μια ταχύτητα, η μηχανή μπορεί να διατηρήσει την περιστροφή του πεδίου της προς μία κατεύθυνση και να παράγει ροπή.

Για την εκκίνηση τους οι μονοφασικές μηχανές έχουν συνήθως και ένα επιπλέον τύλιγμα στο στάτη, το οποίο έχει εν σειρά ένα χωρητικό στοιχείο και έναν φυγοκεντρικό διακόπτη. Κατά την εφαρμογή της τροφοδοσίας, το κύριο τύλιγμα φέρει ρεύμα που έχει διαφορετική φάση από αυτό που ρέει στο δευτερεύον. Η αλληλεπίδραση των δύο διαφορετικών πεδίων συντελεί στη δημιουργία ενός συνισταμένου πεδίου, περιστρεφόμενου προς μία κατεύθυνση, προς την οποία αρχίζει και στρέφεται ο κινητήρας. Μόλις ο κινητήρας φτάσει έναν καθορισμένο αριθμό στροφών, μικρότερο των ονομαστικών του, ο φυγοκεντρικός διακόπτης αποσυνδέει το τύλιγμα εκκινήσεως, καθώς ο κινητήρας μπορεί να διατηρήσει τη ροπή του.

Οι μονοφασικοί κινητήρες, εκτός από ειδικές κατασκευές, χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές μικρής ισχύος. Ανάλογα με τη μορφή του μηχανισμού εκκινήσεως μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μηχανή με τυλίγματα διαφορετικής φάσης (split-phase).
- Μηχανή με πυκνωτή εκκίνησης
- Μηχανή με μόνιμα συνδεδεμένο πυκνωτή στο βοηθητικό τύλιγμα.
- Μηχανή με πυκνωτή εκκινήσεως και μόνιμο πυκνωτή λειτουργίας.
- Μηχανή ασύμμετρων πόλων

Οι τριφασικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές που οι απαιτήσεις τους σε ισχύ ξεπερνούν τα όρια εφαρμογής των μονοφασικών. Μπορούν να εκκινήσουν χωρίς κάποιο βοηθητικό κύκλωμα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι περισσότεροι εκ των τριφασικών κινητήρων φέρουν δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού, όμως σε αυτό το ζήτημα υπάρχουν και διαφορετικές σχεδιάσεις. Μπορούμε να κατατάξουμε τους κινητήρες ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα τους σε:

**Βραχυκυκλωμένου δρομέα.** Αποτελούν την πιο απλή και οικονομική επιλογή. Μία ιδιαιτερότητα του δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι ότι οι μπάρες που φέρει στην περιφέρεια του δεν είναι τοποθετημένες παράλληλα με τον άξονα της μηχανής, αλλά υπό μία μικρή κλίση. Οι λόγοι είναι η μείωση των δονήσεων λόγω ηλεκτρομαγνητικού θορύβου καθώς και τον περιορισμό των ανώτερων αρμονικών. Πρόσθετα, η κλίση στις μπάρες αποτρέπει τις τάσεις «κλειδώματος» του ρότορα, καθώς οι μπάρες τείνουν να ακινητοποιηθούν κάτω από τα δόντια του στάτη, ιδιαίτερα όταν ο αριθμός τους είναι ίσος. Ο δρομέας στηρίζεται μέσω ρουλεμάν στο σώμα της μηχανής και η προέκταση του άξονα του χρησιμοποιείται για να μεταδώσει την κίνηση σε διάφορα φορτία.

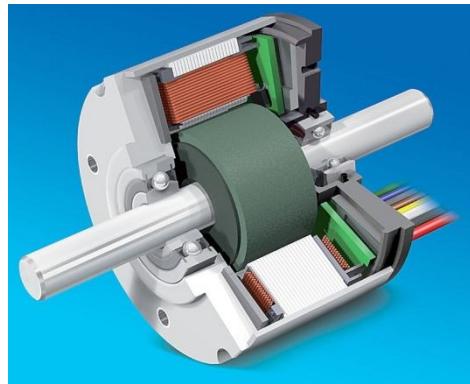
**Δακτυλιοφόρου δρομέα.** Εδώ ο δρομέας φέρει τυλίγματα παρόμοια με αυτά του στάτη τα οποία δεν είναι βραχυκυκλωμένα στις άκρες τους, αλλά καταλήγουν σε

δακτυλίους ώστε να μπορεί να συνδεθεί σε αυτούς κάποιο εξωτερικό κύκλωμα, συνήθως αμικό φορτίο. Η ολίσθηση στην οποία εμφανίζεται η ροπή ανατροπής του κινητήρα είναι ανάλογη της αντίστασης των τυλιγμάτων του δρομέα. Με την αύξηση των εξωτερικά συνδεδεμένων αντιστάσεων μέσω των δακτυλίων πετυχαίνουμε τη μετατόπιση της ροπής ανατροπής σε χαμηλότερες στροφές περιστροφής του κινητήρα και επομένως μεγαλύτερο ωφέλιμο εύρος στροφών. Με τιμές της αντίστασης πολύ μεγάλες, η ροπή ανατροπής εμφανίζεται από μηδενική ταχύτητα, παρέχοντας τη δυνατότητα για μεγάλη ροπή εκκινήσεως. Καθώς ο κινητήρας επιταχύνει, η τιμή της εξωτερικής αντίστασης μπορεί να μειωθεί ώστε να προσαρμοστεί η χαρακτηριστική του κινητήρα στο τρέχον φορτίο. Όταν ο κινητήρας φτάσει τις ονομαστικές του στροφές, οι εξωτερικές αντιστάσεις μπορούν να αποσυνδεθούν ώστε να περάσουμε καθαρά σε λειτουργία επαγωγικού κινητήρα. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ροπή εκκινήσεως και γρήγορη επιτάχυνση ως τις ονομαστικές στροφές με περιορισμένα ρεύματα. Στον αντίποδα, η ύπαρξη των δακτυλίων απαιτεί και ψήκτρες για τη σύνδεση τους με τα τυλίγματα του δρομέα, δεδομένο που αυξάνει το κόστος και την ανάγκη συντήρησης.

**Δρομέα χωρίς αυλακώσεις.** Στον τελευταίο αυτό τύπο δρομέα απουσιάζουν οι αυλακώσεις και δεν φέρει τυλίγματα ή μπάρες. Η ροπή δημιουργείται από την επίδραση του μαγνητικού πεδίου και των δινορευμάτων του σιδηρομαγνητικού υλικού του δρομέα. Λόγω της αντοχής του δρομέα στις φυγοκεντρικές δυνάμεις, οι κινητήρες αυτού του τύπου μπορούν να επιτύχουν υψηλό αριθμό στροφών.

#### 5.1.4 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

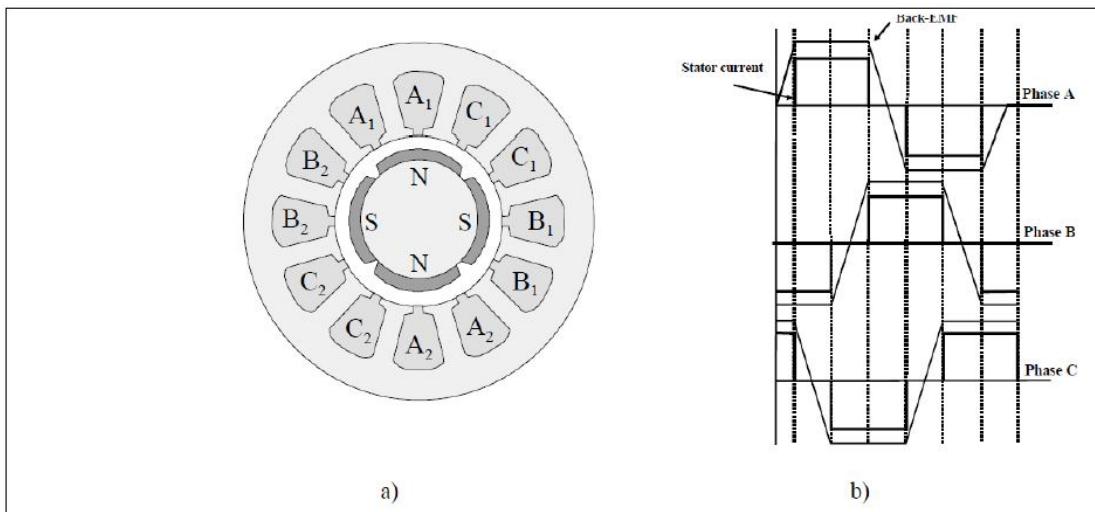
Αυτοί οι κινητήρες, οι οποίοι αναπτύχθηκαν τα τελευταία 25 χρόνια, ονομάστηκαν κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες γιατί τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος αλλά δεν έχουν μεταγωγείς και ψήκτρες. Ο στάτης μπορεί να έχει τρεις ή περισσότερες φάσεις ενώ ο δρομέας έχει μόνιμους μαγνήτες. Η μηχανή οδηγείται από παλμούς τάσης σχήματος ορθογωνίου ή τραπεζίου εναλλασσόμενης πολικότητας που παράγονται σύμφωνα με τη θέση του δρομέα. Είναι σημαντικό η γωνία μεταξύ της μαγνητικής ροής του πεδίου του στάτη και του πεδίου του δρομέα να είναι κοντά στις 90 μοίρες, ώστε να παράγεται η μέγιστη ροπή.



Εικόνα 28: Brushless ηλεκτροκινητήρας

Τα βασικά εξαρτήματα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες είναι:

- Ένας μόνιμος μαγνητικός δρομέας
- Ένας στάτης με τρία ή περισσότερα τυλίγματα φάσης
- Ένας αισθητήρας θέσης δρομέα
- Μια ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου των φάσεων των τυλιγμάτων του δρομέα



Εικόνα 29: Παλμοί τροφοδοσίας dc brushless κινητήρα

### 5.1.5 Σύγκριση των ειδών των ηλεκτροκινητήρων

Αρχίζοντας με τα πλεονεκτήματα του dc κινητήρα, πρέπει να αναφέρουμε την ευκολία στον έλεγχο του. Μέσω ενός μετατροπέα chopper ελέγχουμε το ρεύμα του δρομέα, πετυχαίνοντας την ταχύτατη ρύθμιση της ροπής και κατ' επέκταση της ταχύτητας. Το κύκλωμα του chopper είναι απλό. Λόγω, όμως της τοπολογίας του

έχουμε μεγάλο ρεύμα και χρειαζόμαστε ιδιαίτερα ανθεκτικά ημιαγωγικά στοιχεία. Ο ακριβής έλεγχος έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη κυμάτωση στη ροπή. Όπως είπαμε, προσφέρει υψηλή ροπή από μηδενικές στροφές, ιδιότητα σημαντική για οχήματα που κινούνται εντός πόλης και εκκινούν συχνά ή για οχήματα που μεταφέρουν βαρύ φορτίο. Ο συντελεστής απόδοσης είναι υψηλός. Από την άλλη πλευρά είναι πιο ογκώδεις και βαρείς συγκριτικά με τα άλλα είδη κινητήρων. Το σύστημα ψηκτρών – συλλέκτη της dc μηχανής χρειάζεται τακτική συντήρηση και, ενδεχομένως, αντικατάσταση, γεγονός που την καθιστά αναξιόπιστη σε οχήματα. Η αντοχή της σε υπερφόρτιση είναι μικρή.

Πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα είναι οι μικρές διαστάσεις του, η πολύ απλή δομή και η λειτουργία του, που αυξάνουν την αξιοπιστία του, το χαμηλό κόστος του αφού είναι ο πιο διαδεδομένος σε ηλεκτρομηχανικές εφαρμογές και το υψηλό επίπεδο τιμών ροπής που προσφέρει. Μπορεί να λειτουργήσει εύκολα και στα τέσσερα τεταρτημόρια της χαρακτηριστικής ροπής – στροφών (ως κινητήρας και ως γεννήτρια). Ο έλεγχος του είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος αλλά έχουν αναπτυχθεί διάφορες αποδοτικές τεχνικές που λύνουν αυτό το πρόβλημα. Με αυτόν τον τομέα θα ασχοληθούμε παρακάτω. Η κατασκευή του αντιστροφέα και της παλμοδότησης του είναι πιο πολύπλοκη. Το θετικό είναι ότι λόγω της τοπολογίας του διέρχονται από τα ημιαγωγικά στοιχεία μικρότερα ρεύματα. Άρα, δεν απαιτείται πρόσθετο κόστος για την προμήθεια πιο ανθεκτικών στοιχείων. Τέλος, παρουσιάζει χαμηλότερο συντελεστή απόδοσης σε μικρότερη ροπή φορτίου και καταναλώνει άεργο ισχύ εξαιτίας του τρόπου λειτουργίας του, μειώνοντας το συντελεστή ισχύος (cosφ) και έχοντας την ανάγκη για αντιστάθμιση μέσω πυκνωτών.

Όσο αφορά τις δύο παραλλαγές σύγχρονου κινητήρα, έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό τον υψηλό συντελεστή απόδοσης, τις μικρές διαστάσεις και βάρος, την υψηλή ειδική ισχύ και μεγάλη ροπή από τις χαμηλές στροφές και σε ευρύ φάσμα στροφών. Ακόμη, ο λόγος ροπή προς αδράνεια των κινητήρων έχει υψηλή τιμή. Επιδεικνύουν ανοχή σε υπερφόρτιση. Μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος κατασκευής, ο πιθανός απομαγνητισμός των μόνιμων μαγνητών του δρομέα και η πολυπλοκότητα στον έλεγχο τους, συγκριτικά με το dc.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες είναι η υψηλή απόδοση, η μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλή αξιοπιστία, η ελάχιστη συντήρηση, το πολύ μικρό επίπεδο θορύβου RF σε σύγκριση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και η δυνατότητα πολύ υψηλής ταχύτητας. Το βασικό μειονέκτημα των κινητήρων αυτού του είδους είναι ότι είναι ότι είναι πιο ακριβοί σε σύγκριση με τους αντίστοιχους με ψήκτρες.

## 5.2 Επιλογή ηλεκτροκινητήρα

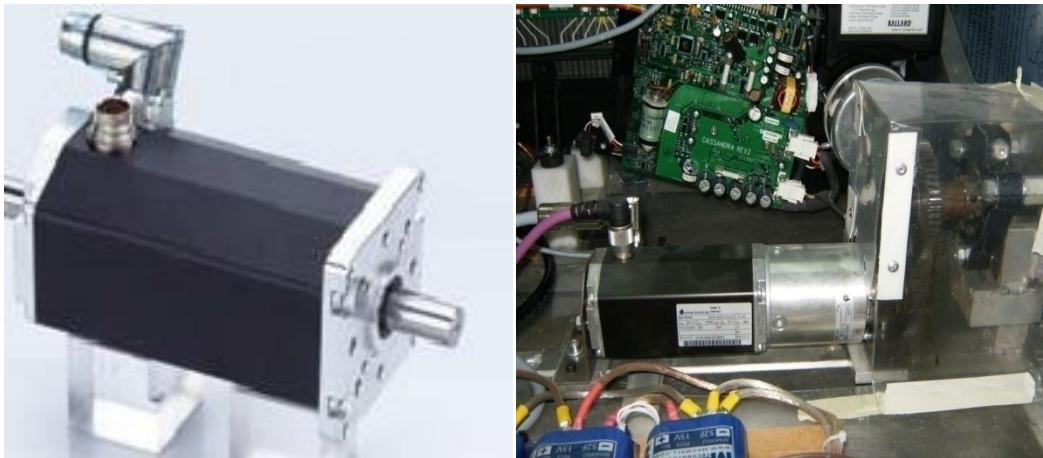
Ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα του ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας. Η επιλογή του ηλεκτροκινητήρα ήταν μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς ήταν αναγκαίο να τηρούνται ταυτοχρόνως τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Επιθυμητή τάση λειτουργίας
- Απαιτούμενη ισχύς
- Επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής
- Απαιτούμενη ροπή
- Μεγάλος συντελεστής απόδοσης
- Μικρό βάρος
- Επιθυμητές διαστάσεις

Η επιθυμητή τάση λειτουργίας είναι 24V DC καθώς η τάση εισόδου του ηλεκτροκινητήρα πρέπει να ταυτίζεται με τη τάση εξόδου του dc/dc μετατροπέα. Η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τα χαρακτηριστικά του οχήματος όσο και τα χαρακτηριστικά συγκεκριμένης διαδρομής (διανυόμενη απόσταση, κλίση εδάφους). Η απαιτούμενη ροπή υπολογίστηκε πειραματικά με τη χρήση δυναμόμετρου.

Έπειτα από έρευνα αγοράς επιλέχθηκε ο brushless κινητήρας BG 75\*50 της γερμανικής εταιρίας Dunkermotoren. Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>BG 75*50</b>	
Τάση λειτουργίας	24V
Ταχύτητα περιστροφής	3700rpm
Συνεχής ροπή	110N*cm
Ένταση ρεύματος στην ονομαστική ισχύ	21.2A
Μέγιστη ροπή	500N*cm
Μέγιστη ένταση ρεύματος	98A
Βάρος	2.2kg



**Εικόνα 30: Ο ηλεκτροκινητήρας που τοποθετήθηκε στο όχημα ER10**

Η κίνηση παρέχεται από τον ηλεκτροκινητήρα στον ένα τροχό του οχήματος μέσω του κιβωτίου υποβιβασμού της σχέσης μετάδοσης. Το κιβώτιο κατασκευάσθηκε στο εργαστήριο Εργαλειομηχανών, με λόγο μετάδοσης 12:1, και απόδοση περίπου 80%. Το κιβώτιο υποβιβασμού της σχέσης μετάδοσης χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη ροπή που μεταφέρεται στον τροχό.

Παράλληλα με την έρευνα αγοράς για τον ηλεκτροκινητήρα έγινε και έρευνα αγοράς για τον controller που θα τον τροφοδοτεί. Κριτήρια για την επιλογή του motor controller ήταν η τάση λειτουργίας (24V), η παροχή των επιθυμητών εντάσεων ρεύματος που απαιτεί ο ηλεκτροκινητήρας, η μεγάλη απόδοση και να μπορεί να προγραμματίζεται και να ελέγχεται μέσω υπολογιστή. Τελικά επιλέχθηκε ο motor controller BGE 6050, της ίδιας εταιρίας. Τα χαρακτηριστικά του controller παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

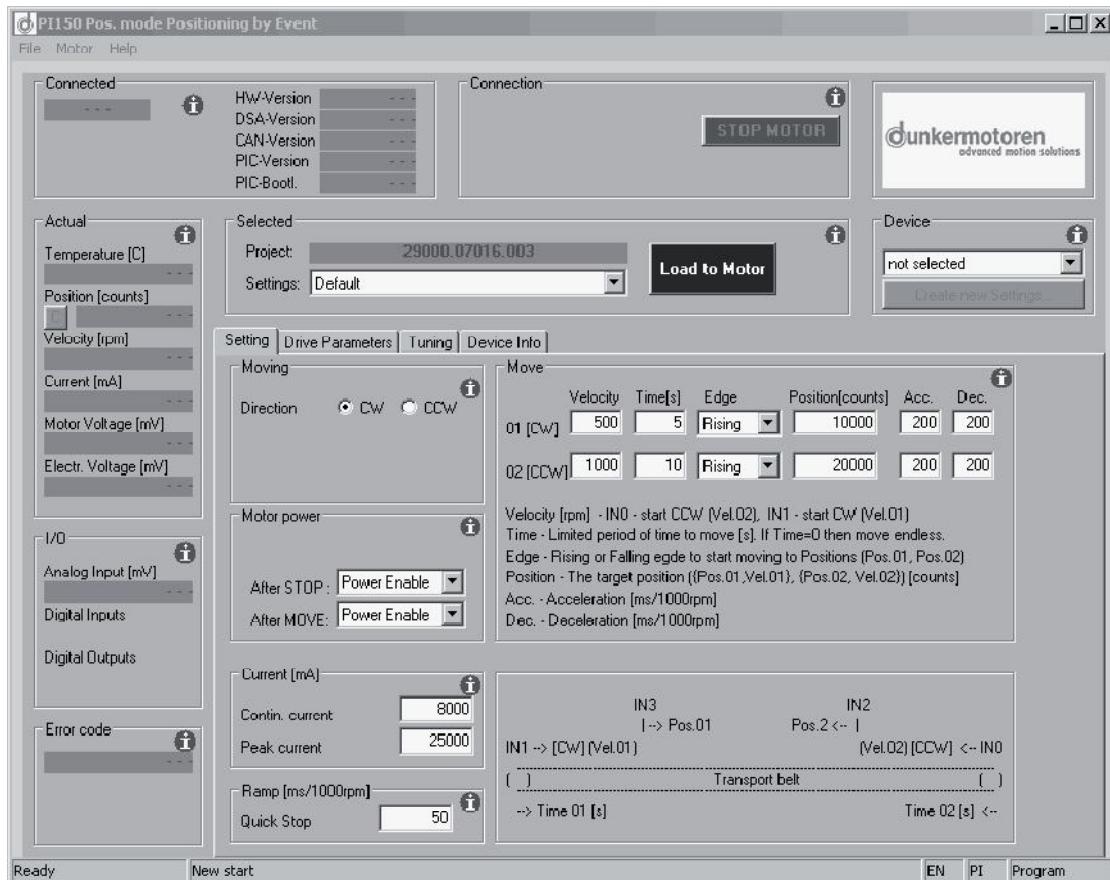
<b>BGE 6050</b>	
Τάση τροφοδοσίας	10-30VDC
Τάση εξόδου	10-60VDC
Κατανάλωση ρεύματος	65mA@24V
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	50A
Ρεύμα εξόδου	20A
Ψηφιακοί είσοδοι	5
Ψηφιακοί έξοδοι	1
Αναλογικοί είσοδοι	1
Ποιότητα	IP 20
Θερμοκρασία λειτουργίας	0-50°C
Υγρασία	22-80%
Διαστάσεις	112*100*30 mm
Βάρος	0.32 kg



Εικόνα 31: Ο ελεγκτής του ηλεκτροκινητήρα

Ένα βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου controller είναι οι πολλές δυνατότητες που έχει το λογισμικό του. Οι πιο χρήσιμες από αυτές για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι:

- Η ρύθμιση της μέγιστης εντάσεως του ρεύματος
- Η ρύθμιση της ροπής (μπορεί να ρυθμιστεί πόσο απότομα ή ήπια θα ασκηθεί)
- Ο χρόνος απόκρισης του κινητήρα (από τη στιγμή που θα δεχθεί κάποια εντολή)
- Η καταγραφή με τη μορφή διαγράμματος των χαρακτηριστικών του ηλεκτροκινητήρα όταν λειτουργεί (ένταση ρεύματος, ταχύτητα περιστροφής, κ.α.) για μια δεδομένη χρονική περίοδο



Εικόνα 32: Το λογισμικό του motor controller

## Κεφάλαιο 6: Υπόλοιπα συστήματα οχήματος

### 6.1 Υπερπυκνωτές

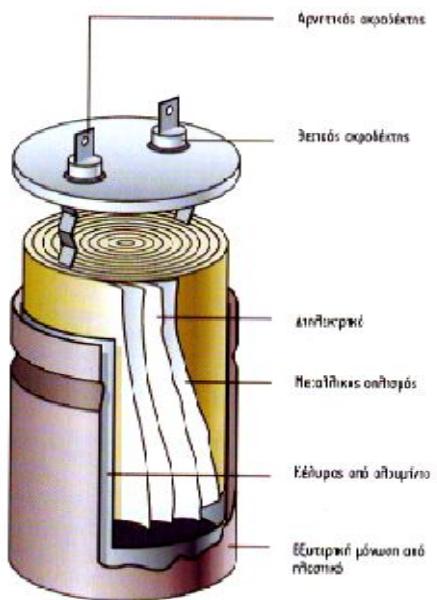
#### 6.1.1 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά κοινών πυκνωτών

Οι κοινοί πυκνωτές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες :

- i) τους ηλεκτροστατικούς
- ii) τους ηλεκτρολυτικούς
- iii) τους ηλεκτροχημικούς.

Αν και το όνομα των τελευταίων παραπέμπει στην αρχή λειτουργίας των μπαταριών, εντούτοις και οι τρεις αυτές κατηγορίες αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή του ηλεκτροστατικού πεδίου (λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς).

Οι πυκνωτές δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα πτώσης της απόδοσης τους ανάλογα με τον αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης, ακόμα κι αν οι κύκλοι πλήρους φόρτισης / πλήρους εκφόρτισης ξεπεράσουν τους 100.000. Από την άλλη είναι ικανοί να αποδώσουν ρεύματα μεγέθους σημαντικά πολλαπλάσιου από εκείνο που θα έκανε μια μπαταρία να εκραγεί. Σε αυτά προστίθεται και ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για τη φόρτιση τους, άρα και η αυξημένη δυνατότητα τους να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας που ανακτώνται κατά την πέδηση του οχήματος, καθώς και η σημαντικά μειωμένη εσωτερική τους ωμική αντίσταση. Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι η μεγάλη μεταβολή της τάσης τους κατά την εκφόρτιση και ο μεγάλος όγκος και το βάρος που απαιτείται να έχουν. Επίσης η ποσότητα του ρεύματος που μπορούν να αποθηκεύουν οι πυκνωτές εξαρτάται άμεσα από την “εκτεθειμένη” επιφάνεια των ηλεκτροδίων τους.



Εικόνα 33: Η δομή ενός πυκνωτή

### 6.1.2 Ορισμός και χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών

Η λύση στο πρόβλημα του μεγάλου όγκου και βάρους των κοινών πυκνωτών δόθηκε από τους υπερπυκνωτές, μια τεχνολογία με ζωή ελάχιστων δεκαετιών, η οποία βασίζεται, μεταξύ άλλων, στην ανάπτυξη “ενεργού επιφάνειας” σε ολόκληρη τη μάζα των ηλεκτροδίων και όχι μόνο στην εξωτερική τους επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό, έγινε εφικτή η μείωση του συνολικού όγκου σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές αλλά και ο εντυπωσιακός πολλαπλασιασμός της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα βάρους – παρ’ όλο που εξακολουθεί να υπολείπεται σημαντικά αυτής των μπαταριών. Αυτή τη στιγμή, η πλέον εξελιγμένη “αυτοκινητική” γενιά υπερπυκνωτών έχει σχεδόν διπλάσιο λόγο ισχύος εξόδου προς βάρος από τις μπαταρίες NiMH, ενώ διατηρεί και όλα τα πλεονεκτήματα των πυκνωτών και προπαντός τη σημαντικά υψηλότερη ταχύτητα φόρτισης, σε σύγκριση με τις συμβατικές μπαταρίες ιόντων ή υδριδίων.

Οι υπερπυκνωτές είναι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές (EC capacitors) και συγκεκριμένα, μια παραλλαγή των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, όπου, αντί το “παραδοσιακό” στρώμα του οξειδίου να παίζει το ρόλο του διηλεκτρικού, η εμφάνιση του διηλεκτρικού γίνεται κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες του. Με τον τρόπο αυτόν, το φορτίο αποθηκεύεται ηλεκτροστατικά (χωρίς να πραγματοποιούνται δηλαδή χημικές αντιδράσεις) μέσα στα πολωμένα στρώματα υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στον οργανικό ηλεκτρολύτη και στο ηλεκτρόδιο.



Εικόνα 34: Συστοιχία υπερπυκνωτών

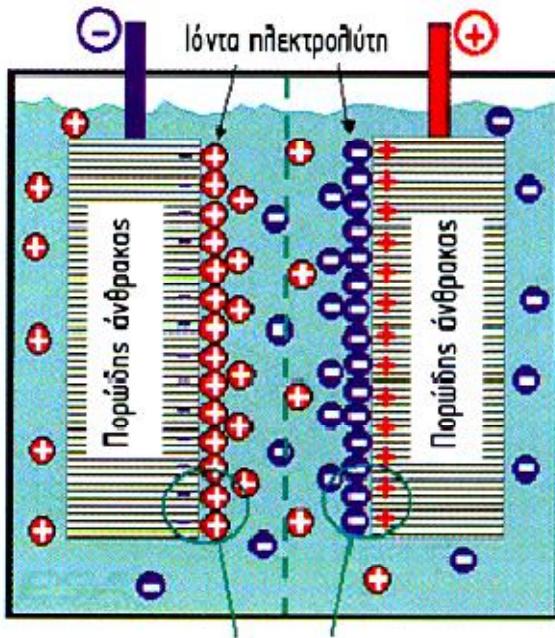
Αν και οι αρχές λειτουργίας τους είναι γνωστές εδώ κι έναν αιώνα, η εμπορική εκμετάλλευση των EC άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του '70 από την NEC, η οποία τους έδωσε το όνομα "supercapacitor". Η εμπορική ονομασία "ultracapacitor" τους δόθηκε αργότερα από την Pinnacle και τη Maxwell. Η τάση ενός υπερ-πυκνωτή με υδατώδη ηλεκτρολύτη συνήθως δεν ξεπερνά τα 2 Volt – εξαίρεση αποτελούν οι πυκνωτές της Maxwell, οι οποίοι λειτουργούν στα 2,5 Volt με όριο τα 2,7 Volt.

### 6.1.3 Κατηγορίες υπερπυκνωτών

Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διακρίνονται σε ηλεκτρικούς πυκνωτές διπλού στρώματος (Electric Double Layer Capacitor - EDLC) και σε ψευδο-πυκνωτές (pseudocapacitor). Στην πρώτη περίπτωση, οι οπλισμοί είναι κατασκευασμένοι από ενεργό άνθρακα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, από οξείδια μετάλλων ( $\text{RuO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ) πάνω σε φορέα από ενεργό άνθρακα. Και στις δυο περιπτώσεις, οι οπλισμοί είναι εμβαπτισμένοι σε ηλεκτρολύτη. Οι ψευδο-πυκνωτές αντιπροσωπεύουν την τελευταία γενιά των υπερπυκνωτών. Μπορούν να αποθηκεύουν 80% περισσότερη ενέργεια από έναν ίδιων διαστάσεων EDLC, χάρη στη μεγαλύτερη πυκνότητα των ηλεκτροδίων τα οποία είναι κατασκευασμένα από οξείδια μετάλλων. Είναι ασύμμετροι (άρα πολωμένοι), με μεγάλη εσωτερική αντίσταση (άρα ακατάλληλοι για εναλλασσόμενο ρεύμα) και επιπλέον εμφανίζουν αυξημένες διαρροές, ενώ χαρακτηρίζονται και από μεγάλη αστάθεια χωρητικότητας. Εξαίρεση, ως προς αυτά τα μειονεκτήματα, αποτελούν οι υπερπυκνωτές που τα ηλεκτρόδια τους χρησιμοποιούν οξείδια του Ρουθηνίου ( $\text{RuO}_2$ ) αλλά έχουν υπερβολικά μεγάλο κόστος και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ελάχιστα. Σε έναν υπερπυκνωτή, η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια προσδιορίζεται από το μέγεθος των ιόντων στον ηλεκτρολύτη που έλκονται προς το φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Το ηλεκτρικό

διπλό στρώμα λειτουργεί σαν μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό) και δεν παραβιάζεται εφόσον η τάση δεν ξεπεράσει την επιτρεπόμενη. Σε αντίθετη περίπτωση, έχουμε την αποσύνθεση του ηλεκτρολύτη, άρα και του φυσικού διηλεκτρικού. Ο διαχωριστής, σε αυτήν την περίπτωση, δεν παίζει το ρόλο του διηλεκτρικού υλικού, απλώς χωρίζει τον ενεργό άνθρακα σε δυο τμήματα. Το αποτέλεσμα, στην πράξη, είναι να έχουμε δυο πυκνωτές (συνδεδεμένους σε σειρά) στη συσκευασία του ενός. Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές αξιοποιούν την επονομαζόμενη χωρητικότητα διπλού στρώματος. Υπάρχουν πολλά θεωρητικά μοντέλα που εξηγούν τη δομή του διπλού στρώματος αλλά στην πράξη αξιοποιούνται μόνο τρία: του Helmholtz, των Gouy-Chapman και τέλος των Gouy-Chapman-Stern, το οποίο αποτελεί συνδυασμό των δυο πρώτων. Σύμφωνα με το πρώτο μοντέλο, η παρουσία φορτίου (περίσσευμα ή έλλειψη ηλεκτρονίων) σ' ένα ηλεκτρόδιο κατασκευασμένο από ενεργό άνθρακα, αντισταθμίζεται από την ανακατανομή ιόντων μέσα στον ηλεκτρολύτη (συνήθως ένα μίγμα από προπανονιτρίλιο και άλατα). Έτσι, τα ιόντα που έλκονται από το φορτισμένο ηλεκτρόδιο δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα με ετερώνυμο φορτίο (ως προς το ηλεκτρόδιο) χάρη στην ισορροπία των χημικών και ηλεκτρικών δυνάμεων. Εμβαπτίζοντας, τώρα, μέσα στον ηλεκτρολύτη ένα δεύτερο ηλεκτρόδιο, δημιουργείται ένας δεύτερος πυκνωτής (δεύτερο διπλό στρώμα) συνδεδεμένος σε σειρά με τον πρώτο. Το μοντέλο αυτό του Helmholtz είναι το πιο απλουστευμένο από όλα και δεν λαμβάνει υπόψη του τη διάχυση/μείξη στο διάλυμα (που οδηγεί στην ανομοιόμορφη κατανομή των ιόντων κοντά στα ηλεκτρόδια), τη δυνατότητα απορρόφησης ιόντων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και την αλληλοεπίδραση ανάμεσα στις διπολικές ροπές του διαλυτικού και του ηλεκτροδίου. Αντιθέτως, τα άλλα δυο μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τους ορισμένους απ' αυτούς τους περιορισμούς.

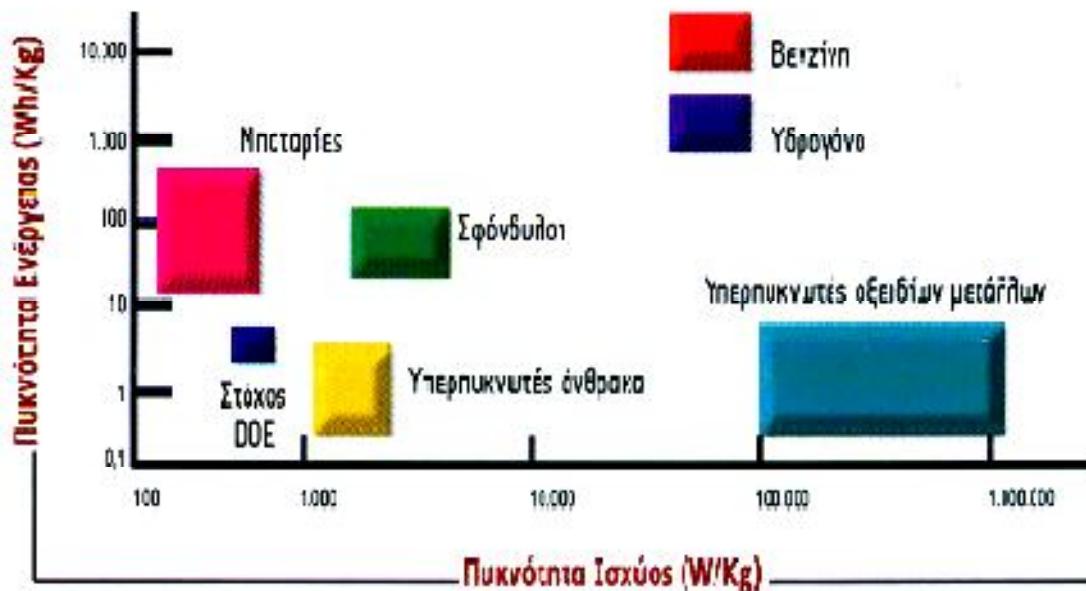
Παρακάτω διακρίνουμε τη σχηματική παράσταση ενός υπερπυκνωτή διπλού στρώματος. Παρατηρούνται ιόντα δεσμευμένα στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων αλλά και ελεύθερα. Τα δυο εκατέρωθεν στρώματα δεσμευμένων ιόντων αποτελούν, στην ουσία, δυο ξεχωριστούς πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά.



**Τα δύο διαφορετικά στρώματα δεσμευμένων ιόντων**

Εικόνα 35: Υπερπυκνωτής διπλού στρώματος

Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές έχουν τη μεγαλύτερη χωρητικότητα, σε σύγκριση με όλους τους άλλους τύπους πυκνωτών αλλά μικρότερη απ' αυτή των μπαταριών. Από την άλλη, έχουν μικρότερη εσωτερική αντίσταση από αυτή των μπαταριών αλλά μεγαλύτερη από αυτή των άλλων πυκνωτών. Σε σχέση με τις μπαταρίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, η οποία όμως δεν παύει να είναι μικρότερη από αυτήν των υπόλοιπων πυκνωτών, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη του ηλεκτρολύτη (ο οποίος στεγνώνει με την πάροδο του χρόνου ή ξεχειλίζει όταν γίνεται κακομεταχείριση του πυκνωτή). Στα μειονεκτήματα τους περιλαμβάνεται και το γεγονός της διαρροής ρεύματος (όταν είναι σε καλή κατάσταση και σε καθαρό περιβάλλον, χάνουν 1,2% της ενέργειας ημερησίως) καθώς και η υπόταση (3 Volt το πολύ). Ταλαιπωρούνται, επίσης, από τις υψηλές θερμοκρασίες (συνίσταται η λειτουργία τους σε θερμοκρασίες άνω των 65 oC) ενώ παρουσιάζουν ευαισθησία στα καυσαέρια, την υγρασία και τις πιέσεις/δονήσεις. Είναι, όμως, οικολογικοί και δεν αποφορτίζονται ξαφνικά, όπως οι μπαταρίες. Τέλος η κατάσταση φόρτισης τους μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί με ένα βολτόμετρο και δεν απαιτούν πολύπλοκα συστήματα φόρτισης, καθώς, όταν έχουν γεμίσει, η ένταση του ρεύματος φόρτισης μειώνεται αυτόματα.

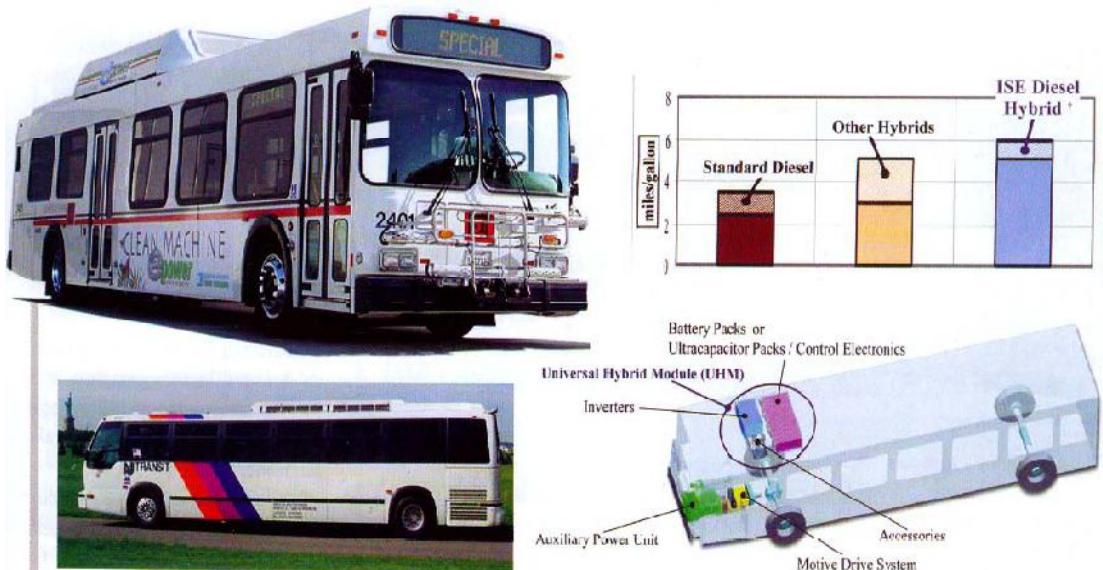


Εικόνα 36: Σύγκριση πυκνότητας ενέργειας και πυκνότητας ισχύος

#### 6.1.4 Εφαρμογές υπερπυκνωτών σε οχήματα

Προς το παρόν, δυο είναι οι επιλογές που υπάρχουν όσον αφορά την αξιοποίηση των πυκνωτών στα συστήματα προώθησης οχημάτων. Η πρώτη είναι τα καθαρόαιμα “πυκνωτικά οχήματα” που ήδη δοκιμάζονται στο χώρο των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (MMM), στα λεωφορεία. Τα τροχοφόρα αυτά φορτίζουν τους πυκνωτές τους σε κάθε στάση (μέσω κεραιών ή επαγωγικών φορτιστών υψηλής ισχύος) μέσα σε περίπου 10 δευτερόλεπτα, χάρη στους αντίστοιχους υπερπυκνωτές που βρίσκονται εγκατεστημένοι στην κάθε μονάδα ανεφοδιασμού. Εκεί κοντά, όμως, θα πρέπει και να διανυκτερεύσουν, γιατί το πρωί οι υπερπυκνωτές, λόγω των διαρροών που παρουσιάζουν, θα έχουν αποφορτιστεί αρκετά. Βασικά πλεονεκτήματα αυτής της λύσης είναι η ανάκτηση σχεδόν όλης της ενέργειας κατά την πέδηση και ο μεγάλος βαθμός ετοιμότητας τέτοιων λεωφορείων, λόγω μειωμένων απαιτήσεων συντήρησης και επισκευής. Η ISE Research έχει ήδη ολοκληρώσει τη δοκιμή ενός πειραματικού λεωφορείου και προέβη στην πρώτη, και παγκοσμίως μοναδική, παραγγελία συστοιχιών υπερπυκνωτών από την εταιρία Maxwell για 35 λεωφορεία. Στο παρακάτω Σχήμα φαίνονται τα δυο υβριδικά αυτοκίνητα της ISE (πάνω το βενζινοκίνητο με κινητήρα Ford Triton V-10 και κάτω το πετρελαιοκίνητο, με κινητήρα Cummins) που διαθέτουν στην οροφή τους μια συστοιχία υπερπυκνωτών με τη βοήθεια των οποίων ο ηλεκτροκινητήρας παρέχει, όταν χρειαστεί, την απαιτούμενη πρόσθετη ισχύ, χωρίς να απαιτηθεί η αύξηση

φορτίου από τον θερμικό κινητήρα αλλά και χωρίς να καταπονηθούν οι συσσωρευτές από τα ισχυρά ρεύματα που θα ζητηθούν. Χάρη και στην ικανότητα ταχείας ανάκτησης της κινητικής ενέργειας, κατά την πέδηση, οι υπερπυκνωτές δίνουν τη δυνατότητα επίτευξης μιας σημαντικής μείωσης της κατανάλωσης.



Εικόνα 37: Υβριδικά οχήματα της ISE , τα οποία διαθέτουν υπερπυκνωτές στην οροφή τους

Η δεύτερη επιλογή είναι αυτή των υβριδικών οχημάτων. Αυτά θα χρησιμοποιούν για τη σταθερή κίνηση τους τις μπαταρίες με τη μεγάλη τους αυτονομία, ενώ για την ανάκτηση της ενέργειας κατά την πέδηση και την επιβράδυνση, θα ενεργοποιούνται οι υπερπυκνωτές, οι οποίοι θα κληθούν να αποδώσουν την αποθηκευμένη τους ενέργεια στην επιτάχυνση του οχήματος. Με αυτόν τον τρόπο δεν υπερφορτώνονται οι μπαταρίες, τόσο στην επιβράδυνση όσο και στην επιτάχυνση, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τόσο των ίδιων όσο και των φρένων. Πολλές ελπίδες και κεφάλαια έχουν επενδυθεί στους υπερπυκνωτές με την ελπίδα να παρακαμφθούν οι αδυναμίες των μπαταριών και να υπάρξει εξέλιξη στην ευρύτερη καθιέρωση της ηλεκτροκίνησης, είτε της αμιγούς, είτε της υβριδικής.



Εικόνα 38: Υδρογονικό όχημα το οποίο διαθέτει συστοιχία υπερπυκνωτών

### 6.1.5 Επιλογή υπερπυκνωτών για το όχημα ER10

Η χρήση υπερπυκνωτών στο όχημα ER10 αποφασίστηκε για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι η εξοικονόμηση καυσίμου και ο δεύτερος η ασφαλής λειτουργία των ηλεκτρονικών της συστοιχίας των κυψελών καυσίμου. Η κατανάλωση καυσίμου των κυψελών καυσίμου είναι ανάλογη με την ισχύ που παράγουν οι κυψέλες στην έξοδο τους. Επομένως για την οικονομικότερη, ως προς το καύσιμο, λειτουργία του οχήματος πρέπει να αποφευχθεί η απότομη ζήτηση ισχύος από τις κυψέλες καυσίμου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των υπερπυκνωτών καθώς όταν ο ηλεκτροκινητήρας απαιτεί απότομη αύξηση της ισχύος του (π.χ. σε ένα ανηφορικό τμήμα) οι υπερπυκνωτές θα καλύψουν αυτή την ανάγκη. Στη συνέχεια οι υπερπυκνωτές θα επαναφορτιστούν από τις κυψέλες με αργό ρυθμό.

Η παραπάνω διαδικασία εκτός από οικονομικότερη χρήση του καυσίμου έχει και ως συνέπεια την ασφαλή λειτουργία των κυψελών και των ηλεκτρονικών τους. Από τον κατασκευαστή των κυψελών έχει οριστεί ένας μέγιστος ρυθμός με τον οποίο μπορεί να αυξηθεί η ισχύς που παράγουν οι κυψέλες. Σε περίπτωση αύξησης της ισχύος με μεγαλύτερο ρυθμό υπάρχει περίπτωση λόγω υπερτροφοδότησης να καταστραφούν τα ηλεκτρονικά της κυψέλης.

Η επιλογή των υπερπυκνωτών που χρησιμοποιήθηκαν στο όχημα έγιναν λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τις απαιτήσεις ισχύος του ηλεκτροκινητήρα όσο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του dc/dc μετατροπέα, ο οποίος είναι η πηγή τροφοδότησης των υπερπυκνωτών. Ο dc/dc μετατροπέας έχει τη δυνατότητα να “συνεργάζεται” με τους υπερπυκνωτές όταν η τάση του κυμαίνεται στο διάστημα 22-30V. Σε τάσεις κάτω των 22V ο dc/dc μετατροπέας δεν μπορεί να λειτουργήσει

και σταματάει τη λειτουργία του αυτόματα. Αντιθέτως, τάσεις μεγαλύτερες των 30V είναι καταστροφικές για αυτόν.

Από τα προϊόντα της εταιρίας Maxwell επιλέχθηκε το module BPAK 0052 P015 B01 καθώς τα τεχνικά του χαρακτηριστικά ικανοποιούσαν τις προδιαγραφές που είχαν τεθεί. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά στοιχεία αυτού του module υπερπυκνωτών.

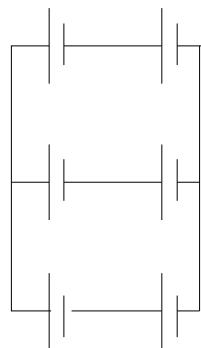
<b>Maxwell Part No: BPAK0052 P015 B01</b>	
Rated Voltage (V)	15
Capacitance (F)	52
Ic (mA)	1,00
Rth (C/W)	1,80
Isc (A)	1500
Emax (Wh/kg)	3,25
Pmax (W/kg)	14.000
Pd(W/kg)	3.000
Vol(l)	0,566
Mass (g)	500
Size (L×W×H) (mm)	216×69×38



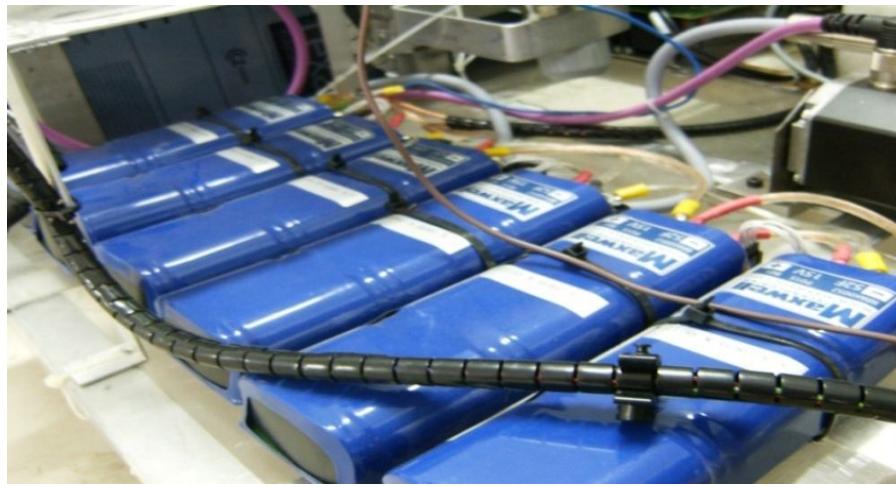
Εικόνα 39: Ο τύπος των υπερπυκνωτών που χρησιμοποιήθηκαν στο όχημα ER10

Η συστοιχία των υπερπυκνωτών που τοποθετήθηκαν στο όχημα περιλαμβάνει 6 modules BPAK0052 P015 B01, τα οποία έχουν συνδεθεί ανά δυο εν σειρά και μεταξύ τους παράλληλα. Η συστοιχία που προκύπτει έχει μέγιστη τάση 30V . Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να “αντλήσει” το υπόλοιπο σύστημα από τους υπερπυκνωτές είναι :

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot 78 \cdot 8^2 = 2.496 KJ$$



Εικόνα 40 : Ο τρόπος σύνδεσης των υπερπυκνωτών του οχήματος ER10



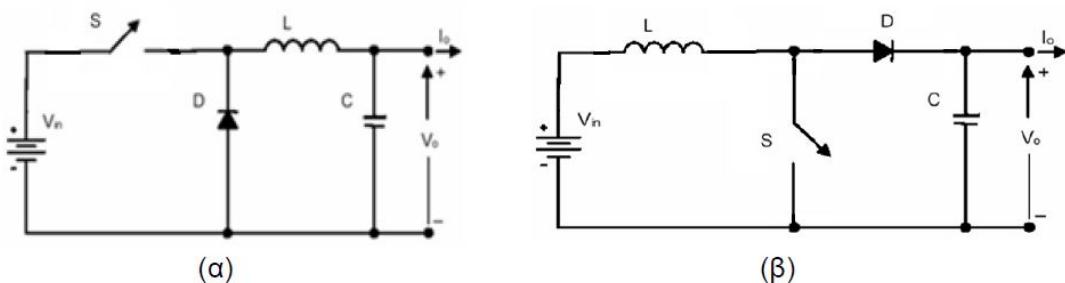
Εικόνα 41: Η συστοιχία των υπερπυκνωτών του οχήματος ER10

## 6.2 Ηλεκτρονικά ισχύος

### 6.2.1 Χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στα συστήματα κυψελών καυσίμου

Ένα ηλεκτρικό υποσύστημα είναι απαραίτητο για να μεταφέρει και να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου στη κατανάλωση. Το συγκεκριμένο υποσύστημα αποτελείται από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, που μετατρέπουν τη συνεχή τάση που παράγεται από την συστοιχία, είτε σε συνεχή τάση άλλου επιπέδου είτε σε εναλλασσόμενη τάση οποιασδήποτε συχνότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις των φορτίων. Γίνεται αντιληπτό ότι, τα χαρακτηριστικά και το είδος των μετατροπέων που συνδέονται στην έξοδο των κυψελών καυσίμου εξαρτώνται άμεσα από τις προδιαγραφές του φορτίου, οι οποίες πέραν του επιπέδου και της μορφής της τάσης, περιλαμβάνουν την ποιότητα ισχύος, το αρμονικό περιεχόμενο καθώς και την αντοχή σε μεταβατικά φαινόμενα.

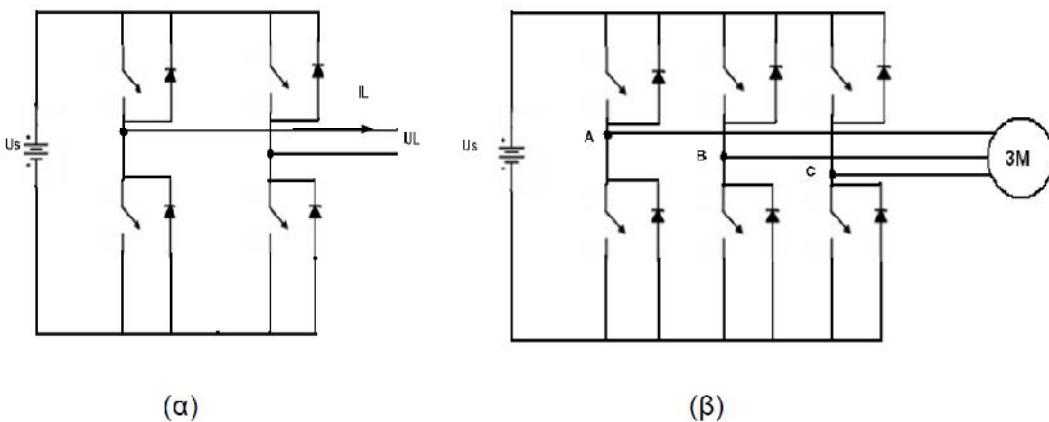
Το ηλεκτρικό δυναμικό μιας κυψέλης μεταβάλλεται έντονα με τις μεταβολές του ρεύματος φορτίου και εξαρτάται από τη θερμοκρασία της κυψέλης καθώς και την παροχή καυσίμου και οξυγόνου. Η διακύμανση της ηλεκτρικής τάσης στην περιοχή λειτουργίας της κυψέλης είναι της τάξης του 30 έως 40 % επί της ονομαστικής της τιμής. Ελάχιστα είδη φορτίων μπορούν να έχουν ανοχή σε τέτοιες μεγάλες διακυμάνσεις. Επομένως κρίνεται επιβεβλημένη η ύπαρξη μιας βαθμίδας για τη ρύθμιση και σταθεροποίηση της παραγόμενης τάσεως από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου. Ανάλογα με τις εφαρμογές, μπορεί να απαιτείται υποβιβασμός ή και ανύψωση της τάσεως εξόδου. Κάποιοι τυπικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 42: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση με: α) υποβιβασμό τάσης, β) ανύψωση τάσης

Οι κυψέλες καυσίμου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παράγουν συνεχή τάση, αλλά τα περισσότερα φορτία απαιτούν τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μετά από τον μετατροπέα συνεχής τάσης συνδέεται ένας αντιστροφέας, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη κατάλληλης

ενεργούς τιμής και συχνότητας με χρήση κατάλληλων μεθόδων ελέγχου. Η εναλλασσόμενη τάση που δημιουργείται μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική. Η τοπολογία τέτοιων μετατροπέων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 43: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη: α) μονοφασικός αντιστριφέας, β) τριφασικός αντιστροφέας

Η μονάδα ελέγχου είναι απαραίτητη σε τέτοιου είδους συστήματα όχι μόνο για τον έλεγχο των παραμέτρων που αφορούν τις κυψέλες καυσίμου, όπως είναι η παροχή καυσίμου και οξυγόνου, η θερμοκρασία, η υγρασία κ.τ.λ., αλλά και ηλεκτρολογικών παραμέτρων, όπως είναι η τάση, το ρεύμα και η ισχύς εξόδου των μετατροπέων.

### 6.2.2 Επιλογή dc/dc μετατροπέα για το όχημα ER10

Επειδή ο ηλεκτροκινητήρας του οχήματος απαιτεί συνεχή τροφοδοσία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένας dc/dc μετατροπέας. Έπειτα από έρευνα αγοράς επιλέχθηκε ο dc/dc μετατροπέας BSZ-PG 1200 της γερμανικής εταιρίας Isle, ο οποίος έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να “συνεργαστεί” με τη συστοιχία των κυψελών υδρογόνου NEXA της εταιρίας Ballard.

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας έχει τα παρακάτω λειτουργικά χαρακτηριστικά:

- Προστατεύει τις κυψέλες καυσίμου από ανάστροφα ρεύματα
- Πλήρως αυτόματη λειτουργία
- Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει, μέσω του λογισμικού, τις παραμέτρους του συστήματος
- Υψηλό βαθμό απόδοσης
- LCD οθόνη μέσω της οποίας προβάλλονται οι παράμετροι λειτουργίας των κυψελών υδρογόνου



Εικόνα 44: Η LCD οθόνη του dc/dc μετατροπέα

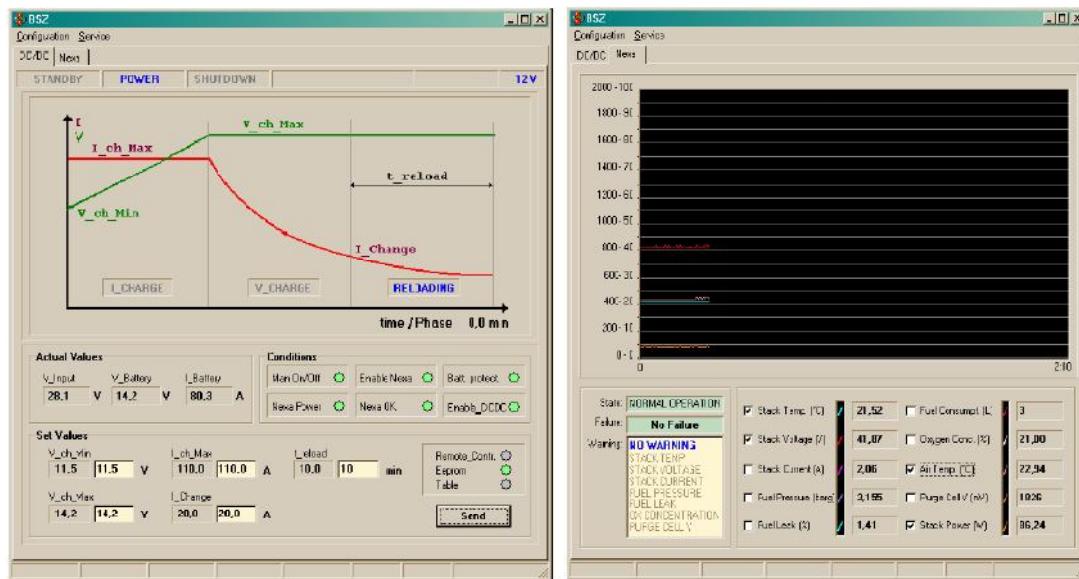
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Nominal output voltage	24V
Output voltage range	22-30V
Accuracy of output voltage	2%
Nominal output current	50A
Maximum output current	55A
Maximum output power	1200W
Maximum output current ripple	2%
Operating input voltage range	26VDC-48VDC
Maximum input voltage	50V
Minimum voltage drop input to output	2V
Power consumption standby	2W
Ambient temperature	0°C-40°C
Efficiency	96%
Short-circuit proof	Yes
Thermal protection	Internal 80°C
Mechanical dimensions (H×B×T)	320×14×80 mm
Weight	1.5kg

Οι κύριες δυνατότητες που δίνονται στο χρήστη μέσω του λογισμικού του μετατροπέα είναι οι ακόλουθες:

- Να ρυθμίζει το εύρος μέσα στο οποίο θα κυμαίνεται η τάση των υπερπυκνωτών
- Να ρυθμίζει την ένταση του ρεύματος με την οποία θα φορτίζονται οι υπερπυκνωτές
- Να προειδοποιείται για τυχόν πρόβλημα στο μετατροπέα ή στις κυψέλες καυσίμου

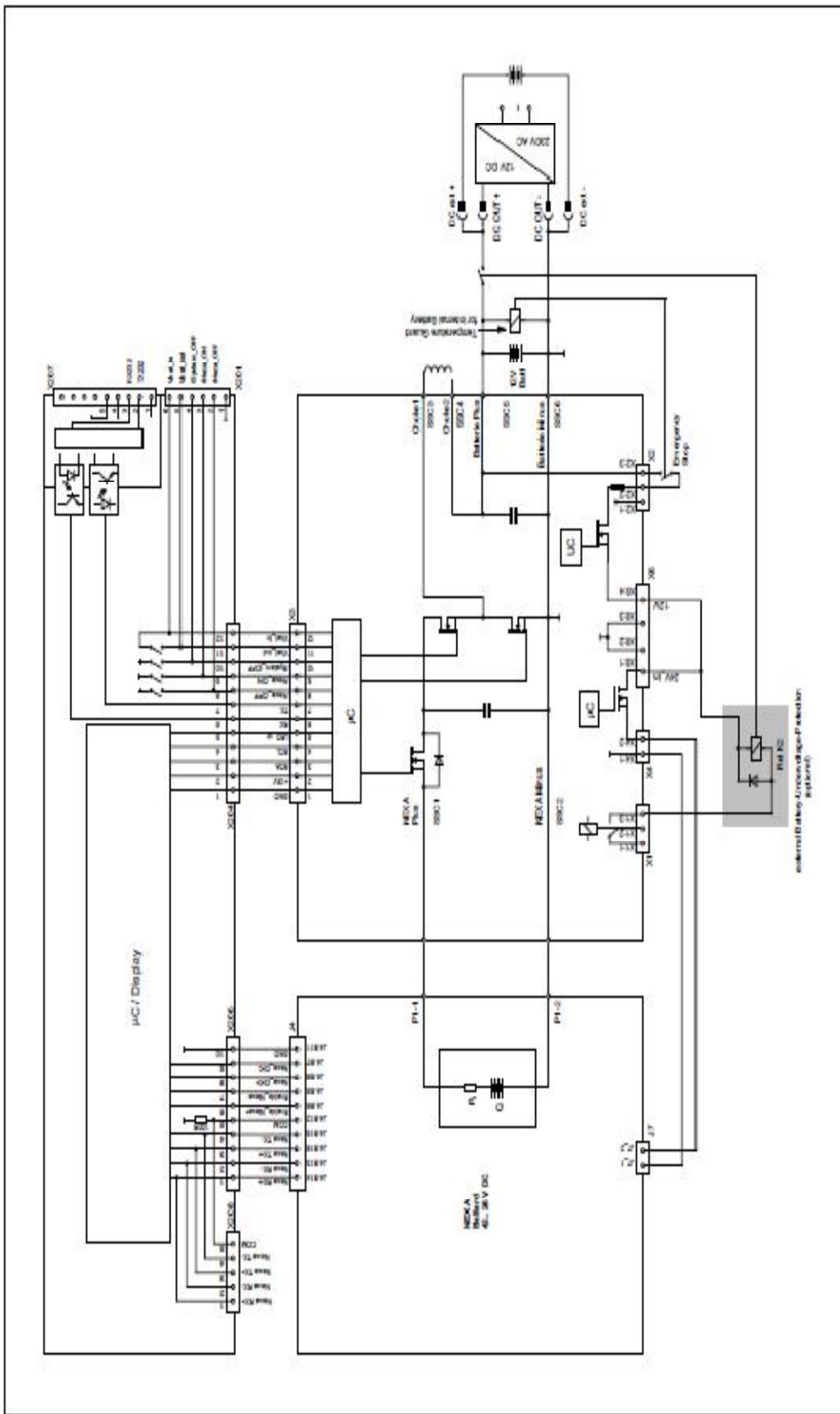
- Να ενημερώνετε για τις συνθήκες που επικρατούν στις κυψέλες καυσίμου (τάση κελιών, κατανάλωση καυσίμου, πίεση υδρογόνου, θερμοκρασία κελιών, κ.α.)



Εικόνα 45: Το λογισμικό του dc/dc μετατροπέα



Εικόνα 46: Ο dc/dc μετατροπέας τοποθετημένος στο όχημα ER10



Εικόνα 47: Το ηλεκτρολογικό σχέδιο σύνδεσης του μετατροπέα με τις κυψέλες καυσίμου και με την LCD οθόνη

### 6.3 Σύστημα παροχής υδρογόνου

Η παροχή των κυψελών καυσίμου με υδρογόνο γίνεται από φιάλη αέριου υδρογόνου πιέσεως 200 bar. Στη φιάλη έχει τοποθετηθεί ένας μειωτήρας ο οποίος μειώνει τη πίεση από τα 200 bar στα 2 bar. Οι σωληνώσεις που συνδέουν την έξοδο του μειωτήρα με τις κυψέλες καυσίμου έχουν διάμετρο 1/8" και είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο ατσάλι 316. Μεταξύ του μειωτήρα και των κυψελών έχει τοποθετηθεί μια ηλεκτροβιβάνα και ένα ροόμετρο. Η χρήση του ροόμετρου είναι η προβολή της κατανάλωσης του υδρογόνου.



Εικόνα 48: Το ροόμετρο που έχει τοποθετηθεί στο όχημα ER10

### 6.4 Σύστημα ασφαλείας

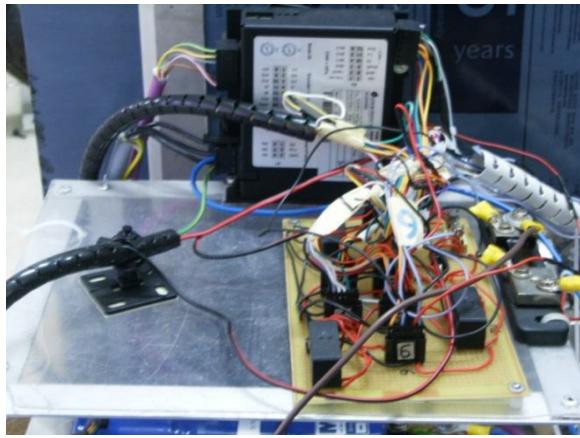
Το σύστημα ασφαλείας αποτελείται από μια ηλεκτροβαλβίδα αντιεκρηκτικού τύπου, έναν αισθητήρα υδρογόνου και τη κεντρική μονάδα ελέγχου η οποία κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Όταν ο αισθητήρας εντοπίσει διαρροή δίνει την αντίστοιχη εντολή στη μονάδα ελέγχου η οποία κλείνει την ηλεκτροβαλβίδα, απενεργοποίει όλα τα συστήματα (κυψέλες υδρογόνου, ηλεκτροκινητήρα, ηλεκτρονικά) και ειδοποιεί μέσω φωτεινής ένδειξης τον οδηγό του οχήματος. Με αυτή τη διαδικασία αποφεύγεται η διαρροή του υδρογόνου που υπάρχει στη φιάλη αλλά και το ενδεχόμενο ανάφλεξης καθώς δεν υπάρχει μέσα στο όχημα ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 49: Ηλεκτροβαλβίδα



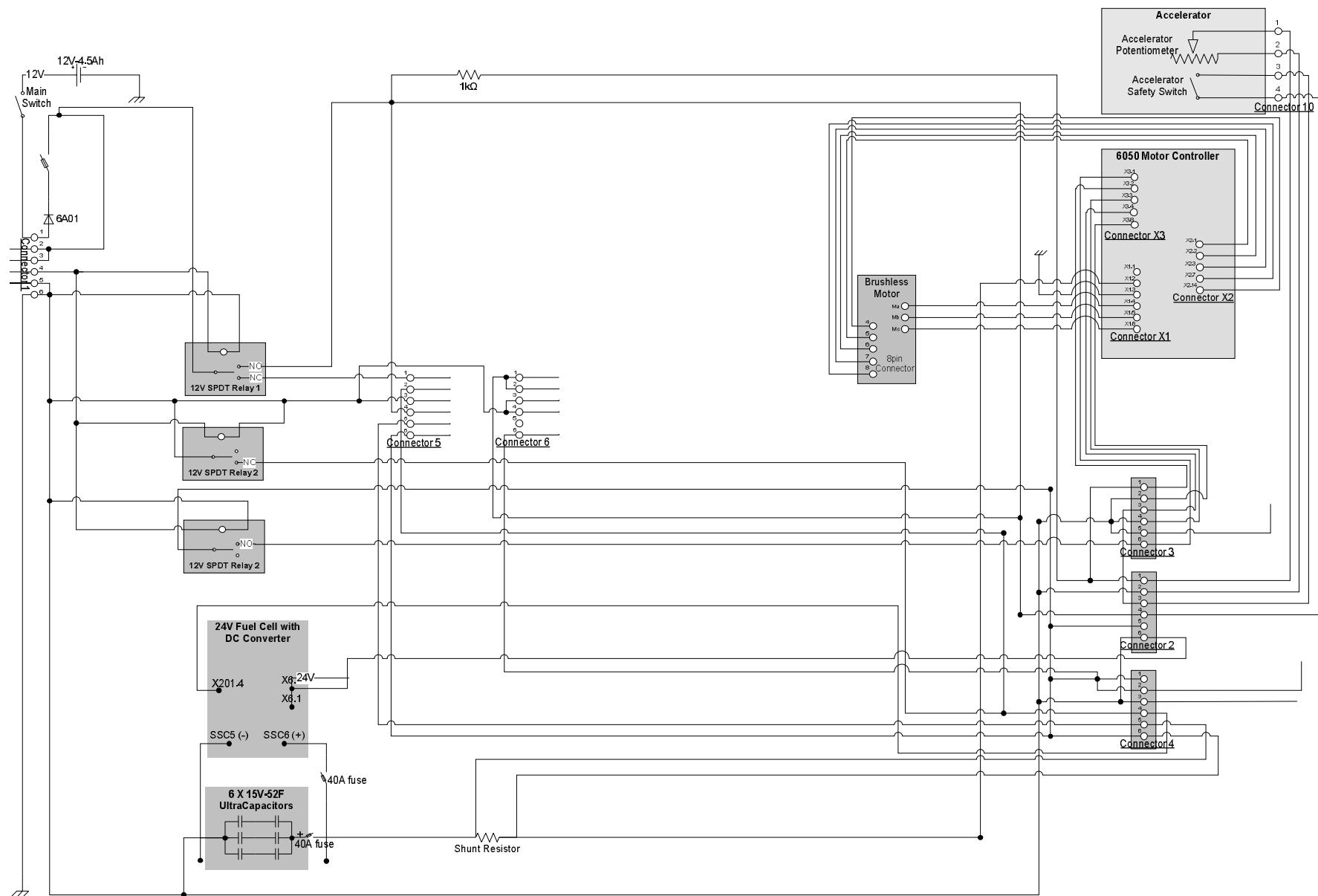
Εικόνα 50: Αισθητήρας υδρογόνου

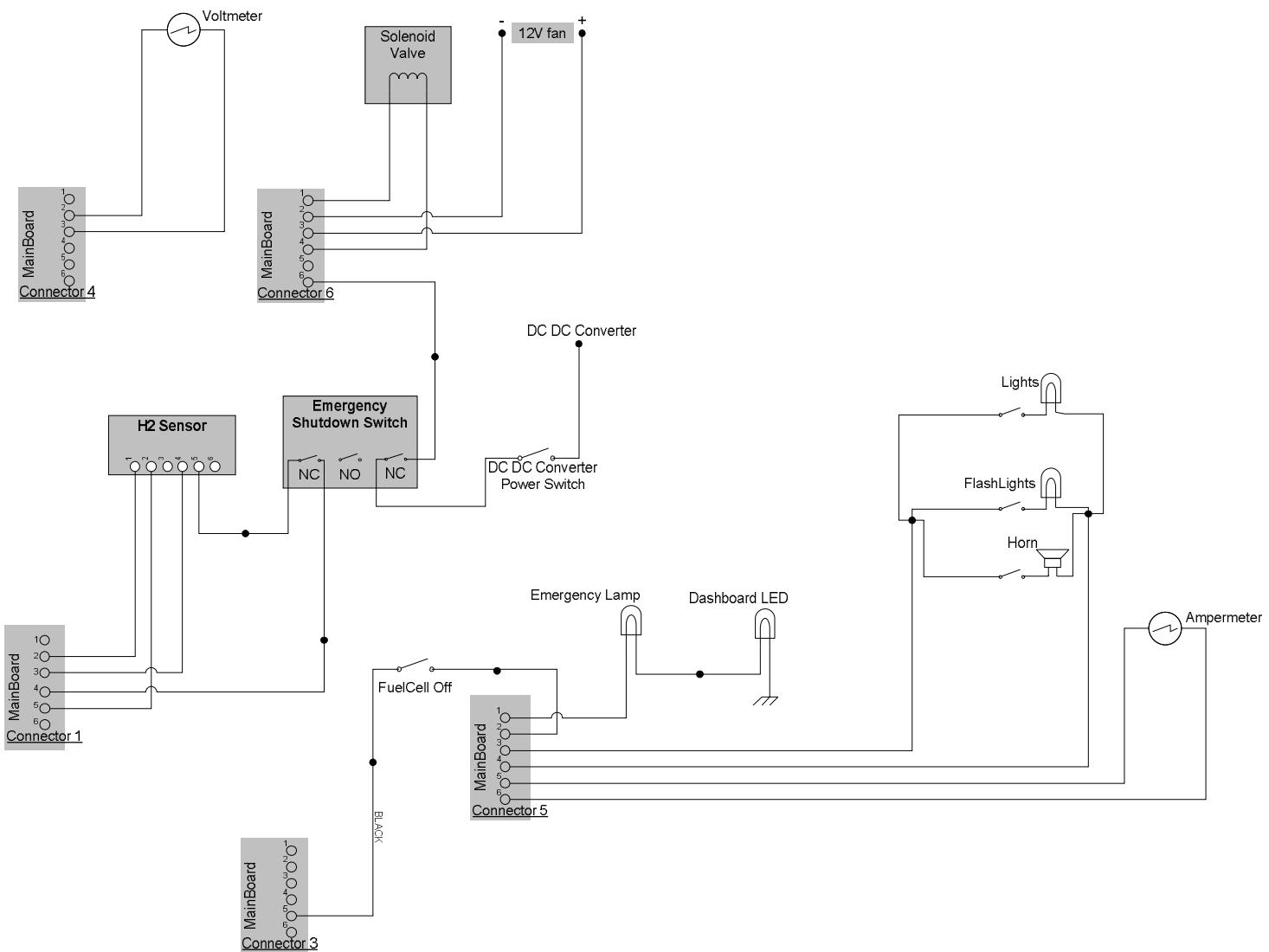


Εικόνα 51: Κεντρική μονάδα ελέγχου

## 6.5 Ηλεκτρικό κύκλωμα

Παρακάτω παρουσιάζεται το ηλεκτρικό κύκλωμα του οχήματος





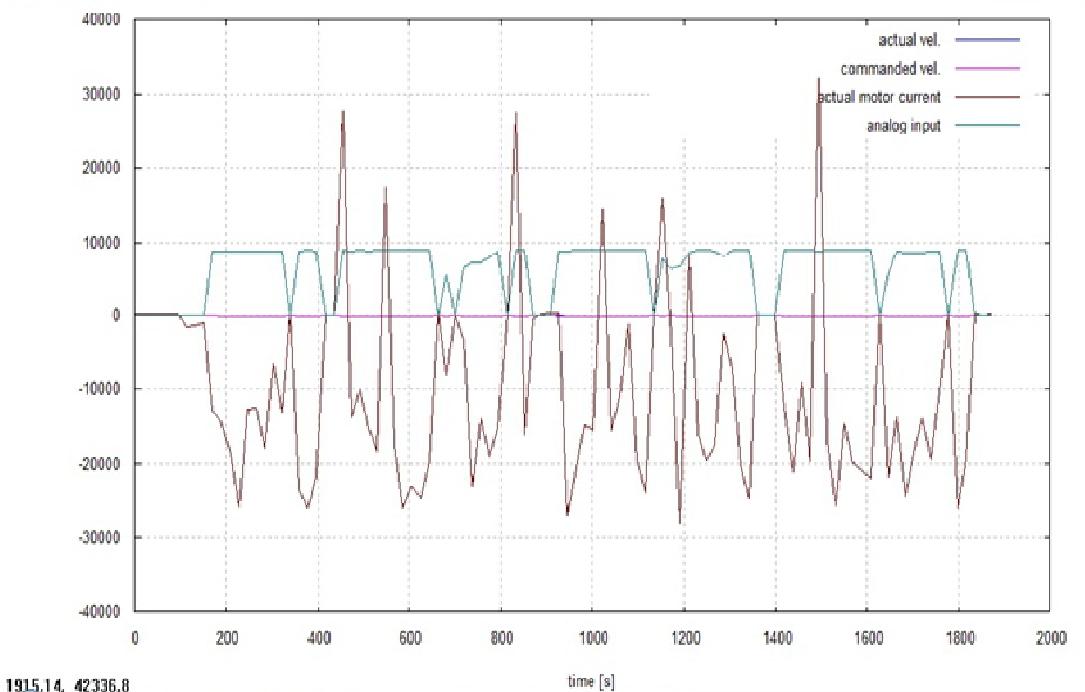
## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα και μελλοντικές προτάσεις

### 7.1 Αποτελέσματα

Το όχημα ER 10 συμμετείχε στον ευρωπαϊκό διαγωνισμό Shell Eco marathon 2010. Σκοπός αυτού του διαγωνισμού είναι τα οχήματα που συμμετέχουν να διανύσουν την μεγαλύτερη δυνατή απόσταση με ένα λίτρο καυσίμου, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Η επίδοση του ER10 ήταν 371km με το ισοδύναμο ενεργειακά ενός λίτρου βενζίνης. Αυτή η επίδοση έγινε με μέση ταχύτητα 25km/h και εκτελώντας ένα stop&go κάθε 3 km. Η συγκεκριμένη επίδοση ήταν 5 φορές καλύτερη από αυτή που είχε σημειωθεί από την ομάδα μας στον ίδιο διαγωνισμό το 2009.

Κατά τη διάρκεια του διαγωνισμού καταγράφηκε από το λογισμικό του ελεγκτή του κινητήρα η λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 52 : Η λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα στην πίστα του Lausitz

## 7.2 Μελλοντικές προτάσεις

Η μελέτη, η σχεδίαση και η κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος είναι αρκετά πολύπλοκη λόγω του μεγάλου αριθμού παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Τα εξαρτήματα είναι πολλά και η λειτουργία καθενός από αυτά απαιτεί διαφορετικό θεωρητικό υπόβαθρο για να μπορέσουν να λειτουργήσουν όλα ταυτόχρονα στο μέγιστο βαθμό απόδοσής τους. Επίσης επειδή τα περισσότερα εξαρτήματα έχουν πολύ μεγάλο κόστος, κατά τη σχεδίαση το κόστος ήταν μια από τις κύριες παραμέτρους και ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο έπρεπε συνεχώς να υπάρχουν εναλλακτικές προτάσεις. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης αυτού του συστήματος. Ενδεικτικά μπορούν να βελτιστοποιηθούν τα ακόλουθα:

- Η λειτουργία των κυψελών υδρογόνου και κατά συνέπεια ο βαθμός απόδοσής τους
- Ο τρόπος "συνεργασίας" των υπερπυκνωτών με τον ηλεκτροκινητήρα
- Το σημείο λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα
- Ο βαθμός απόδοσης του μειωτήρα
- Να εφαρμοστεί βέλτιστος έλεγχος στο σύστημα μέσω υπολογιστή

## Βιβλιογραφία

- [1] *Nexa™ (310-0027) Power Module User's Manual* 5,000,001 Series PBS, Ballard Power Systems Inc. , 2003.
- [2] R. A. Dougal, S. Liu, R. E. White, "Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 25, No. 1, pp. 120-131, 2002.
- [3] S.J.Chapman, "Ηλεκτρικές Μηχανές", 4η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2010.
- [4] Mohan, Undeland, Robbins, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Β' Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1996.
- [5] N. I. Μάργαρης : "Ελεγος και ελαχιστοποίηση των απωλειών των ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος", 2η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1999.
- [6] M. Uzunoglu, M. S. Alam, "Dynamic Modeling, Design, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultracapacitor System for Stand-Alone Residential Applications", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 3, 2006.
- [7] Ε.Ι.Ρίκος, Διδακτορική Διατριβή "Μέθοδοι Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Ηλεκτροκίνητα Οχήματα", Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα 2005.
- [8] [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html) , Types of Fuel Cells.
- [9] V. Paladini, T. Donateo, A. de Risi, D. Laforgia, "Super-capacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48 , No. 11, pp. 3001–3008, 2007.
- [10] A. F. Burke, "Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology", *Journal of Power Sources*, Vol. 91, No. 1, pp. 37–50, 2000.
- [11] Dr. Jean-Jacques Santin, Dr. Christopher H. Onder, Jérôme Bernard, Dominik Isler, Pius Kobler, Florian Kolb, Nicolas Weidmann, Professor Dr. Lino Guzzella "The world 's most fuel efficient vehicle", Deutsche Nationalbibliothek, 2004.
- [12] Donald E.Kirk, "Optimal control theory: an introduction", Mineola:Dover.Publications, 2004.
- [13] Emma Grunditz, Emma Jansson, "Modeling and Simulation of a Hybrid Electric Vehiclefor Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart", *Master of Science Thesis in Electric Power Engineering*, Chalmers University of Technology, Sweden, 2009.