

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική αξιοποίηση εργαστηριακής μονάδας υδρογόνου -
κυψέλες καυσίμου**

Experimental utilization of a fuel cell unit



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ

ΠΑΠΑΝΔΡΕΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ,

ΤΕΣΣΕΡΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΟΣΜΑΣ ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέπων καθηγητή μας κ. Καβαδιά για την αμέριστη βοήθεια και στήριξη του σε όποιο πρόβλημα μας παρουσιάστηκε, καθώς και τον κύριο Αποστόλου, για την καθοδήγηση του στην διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πειραματική αξιοποίηση εργαστηριακής μονάδας υδρογόνου - κυψέλες καυσίμου

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, έχει αναγνωριστεί πως οι κυψέλες καυσίμων είναι μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στις υπάρχουσες τεχνολογίες ενέργειας.

Χρησιμοποιώντας τη συσκευή μετατροπής απιονισμένου νερού σε υδρογόνο και τη πειραματική διάταξη Nexa Training System θα διεξαχθούν διάφορα πειράματα και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα αυτών. Συνεπώς θα γίνει κατανοητή η σημασία των εναλλακτικών μορφών ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αναλυτικά:

- Οι μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου, συμβατικές και εναλλακτικές.
- Οι μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου.
- Η τεχνολογία και τα είδη των κυψελών καυσίμου, με έμφαση στον τύπο της πειραματικής διάταξης.
- Οι εργαστηριακές ασκήσεις με τις σχετικές ερωτήσεις, συνοδευόμενες από τα αποτελέσματα με σκοπό τη μελλοντική αξιοποίηση της διάταξης για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Σκοπός επομένως της πτυχιακής εργασίας είναι η κατανόηση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου και της χρησιμότητάς τους στην πράξη.

Λέξεις κλειδιά : Παραγωγή υδρογόνου, αποθήκευση υδρογόνου, κυψέλες καυσίμου, συσσωρευτές, ηλεκτρόλυση.

ABSTRACT

Experimental utilization of a fuel cell unit

During the last decade, it has been recognized that the Fuel Cells is a viable alternative to current energy technologies

With the use of the conversion device of deionized water and the Nexa Training System device, multiple experiments will be conducted. Afterwards, the extracted results will be analyzed making the importance of the alternative forms of energy clear

In the present thesis presents in detail:

- The hydrogen production methods, conventional and alternative.
- The hydrogen storage methods.
- The technology and types of Fuel Cells, emphasizing on the type of the experimental setup.
- The laboratory exercises and related questions, followed by results, for future use of the device for educational purposes.

Therefore, the purpose of the thesis, is to understand the technology of Fuel Cells, and their utility in practice.

Keywords : Hydrogen production, Hydrogen storage, fuel cells, batteries, electrolysis.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	7
1.1 Μέθοδοι αποθήκευσης	7
1.1.1 Αποθήκευση του Υδρογόνου σε υγρή μορφή	7
1.1.2 Αποθήκευση του υδρογόνου σε αέρια μορφή	8
1.1.3 Χημική αποθήκευση του υδρογόνου.....	9
1.1.4 Φυσική αποθήκευση του υδρογόνου (νανοσωλήνες άνθρακα).....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	13
2.1 Τύποι Κυψελών	13
2.1.1 Κυψέλες καυσίμων με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).....	13
2.1.2 Κυψέλες Καυσίμων Μεθανόλης (DMFC).....	13
2.1.3 Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC)	14
2.1.4 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	14
2.1.5 Κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)	15
2.1.6 Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)	16
2.1.7 Αναλυτική Περιγραφή της PEM Κυψέλης.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	18
3.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης Nexa Training System	18
3.1.1 Μονάδα Ελέγχου του Συστήματος.....	19
3.1.2 Μονάδα Προσομοίωσης DC Φορτίου.....	19
3.1.3 Μονάδα Συσσωρευτών.....	21
3.1.4 Μονάδα Διαχείρισης Ενέργειας	22
3.1.5 Μονάδα Κυψελών Καυσίμου.....	23
3.1.6 Παροχή Υδρογόνου.....	23
3.1.7 Μονάδα Αποθήκευσης Υδρογόνου.....	24
3.1.8 Πρόσθετα Εξαρτήματα.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	26
6.1 Εργαστηριακή Άσκηση 1 : Κυψέλες καυσίμου.....	27
6.1.1 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – έντασης (V-I)	27
6.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – έντασης (P-I)	32
6.1.3 Χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης – Ροής υδρογόνου (I–H ₂ Flow).....	33
6.2 Εργαστηριακή Άσκηση 2 : Μονάδα συσσωρευτών : Στάδια φόρτισης.....	35
6.3 Εργαστηριακή Άσκηση 3 : Υβριδικό λειτουργία της διάταξης: Μονάδα συσσωρευτών/Κυψέλες καυσίμου	41
6.4 Εργαστηριακή Άσκηση 4 : Αδιάληπτη παροχή ενέργειας (UPS)	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49

Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας συμβόλων	26
Πίνακας 2: Απαραίτητος εξοπλισμός	28
Πίνακας 3: : Προφίλ με καθορισμένες τιμές φορτίου	28
Πίνακας 4: Προφίλ με αυξανόμενο φορτίο	29
Πίνακας 5: Απαραίτητος εξοπλισμός	36
Πίνακας 6: Παράμετροι για τη διεξαγωγή του πειράματος.....	36
Πίνακας 7: Απαραίτητος εξοπλισμός	42
Πίνακας 8: Προφίλ φορτίου	42
Πίνακας 9: Απαραίτητος εξοπλισμός	45
Πίνακας 10: Παράμετροι φόρτισης	47

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1: Κρυογονική δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου	8
Σχήμα 2: Υψηλής πίεσης φιάλη αποθήκευσης H ₂	8
Σχήμα 3: Χαμηλής πίεσης φιάλη αποθήκευσης H ₂	9
Σχήμα 4: (α) Μονοφλοιϊκός σωλήνας (β) Πολυφλοιϊκός σωλήνας (γ)	
Συστοιχία Νανοσωλήνων	11
Σχήμα 5: PEM FUEL CELL	13
Σχήμα 6 : ALKALINE FUEL CELL	14
Σχήμα 7 : PAFC FUEL CELL	15
Σχήμα 8 : MOLTEN CARBONATE FUEL CELL.....	15
Σχήμα 9 : SOLID OXIDE FUEL CELL	16
Σχήμα 10 : Πειραματική διάταξη Nexa Training System.....	18
Σχήμα 11: Μονάδα ελέγχου	19
Σχήμα 12: Μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου.....	19
Σχήμα 13 : Μονάδα συσσωρευτή.....	21
Σχήμα 14: Μονάδα διαχείρισης ενέργειας	22
Σχήμα 15: Μονάδα κυψελών καυσίμου	23
Σχήμα 16: Πρόσθια πλευρά μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου	24
Σχήμα 17: Οπίσθια πλευρά μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου	25
Σχήμα 18: Συνδεσμολογία της διάταξης	27
Σχήμα 19: Θεωρητική καμπύλη Τάσης-Έντασης	29
Σχήμα 20: Ενδεικτικές καμπύλες Τάσης-Έντασης	30
Σχήμα 21: Ενδεικτικές καμπύλες Τάσης-Έντασης-Χρόνου.....	31
Σχήμα 22: Καμπύλη Ισχύος-Έντασης	33
Σχήμα 23: Καμπύλη Έντασης-Ροής υδρογόνου(H ₂ Flow)	34
Σχήμα 24: Συνδεσμολογία της διάταξης	35
Σχήμα 25: Καρτέλα DC/DC	38
Σχήμα 26: Καμπύλες Τάσης-Χρόνου, Έντασης-Χρόνου	39
Σχήμα 27: Καμπύλες Τάσης-Χρόνου, Έντασης-Χρόνου σε ιδανικές συνθήκες φόρτισης.....	39
Σχήμα 28: Συνδεσμολογία διάταξης	41
Σχήμα 29: Καμπύλες Τάσης-Χρόνου, Έντασης-Χρόνου	43
Σχήμα 30: Συνδεσμολογία της διάταξης	44
Σχήμα 31: Παροχή ισχύος από τη μονάδα συσσωρευτών.....	46
Σχήμα 32: Παροχή ισχύος από τη μονάδα κυψελών καυσίμου	46
Σχήμα 33: Καμπύλες Έντασης-Χρόνου, Ισχύος-Χρόνου	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° : ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

1.1 Μέθοδοι αποθήκευσης

Το υδρογόνο στο περιβάλλον, όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες (25 °C), εμφανίζεται σε αέρια λόγω της χαμηλής του πυκνότητας. Για την αποθήκευση του υδρογόνου πρέπει να επιτευχθεί μείωση της πυκνότητας του μέσω της μείωσης του όγκου του. Ένας από τους τρόπους αποθήκευσης, είναι η υγροποίηση του υδρογόνου. Αν θεωρήσουμε δεδομένο ότι το υδρογόνο έρχεται σε βρασμό στους -252,9 °C, καταλαβαίνουμε ότι απαιτείται πολύ μεγάλη ποσότητα ενέργειας για να υγροποιηθεί αλλά και να διατηρηθεί το υδρογόνο σε αυτή τη μορφή. Ένας δεύτερος τρόπος αποθήκευσης είναι η χημική αποθήκευση, κατά την οποία το υδρογόνο εμφανίζεται με τη μορφή σύνθετων υδρογονανθράκων ή υδριδίων. Τέλος, το υδρογόνο θα μπορούσε να αποθηκευτεί και σε φυσική μορφή, όπως μέσα σε μικροσφαιρές γυαλιού ή νανοσωλήνες άνθρακα. Παρακάτω αναλύονται λεπτομερώς οι μέθοδοι αποθήκευσής του.

1.1.1 Αποθήκευση του Υδρογόνου σε υγρή μορφή

Η μέθοδος αυτή στοχεύει στην υγροποίηση και την αποθήκευση ενός στοιχείου το οποίο σε συνθήκες περιβάλλοντος, έχει αέρια μορφή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση κρυογονικών δεξαμενών (Σχήμα 1). Ο τρόπος λειτουργίας των δεξαμενών αυτών περιλαμβάνει το συνδυασμό πολύ χαμηλών θερμοκρασιών και υψηλών πιέσεων. Για την επίτευξη αυτών ενδείκνυται η χρήση αερίων χαμηλού σημείου υγροποίησης. Με αυτή τη διαδικασία, προσφέρονται ευνοϊκές συνθήκες αφαίρεσης θερμότητας από υλικά που έχουν υψηλότερο σημείο υγροποίησης και διάφορες διατάξεις απαγωγής κενού. Συγκεκριμένα, το υδρογόνο, αποθηκεύεται σε πίεση μικρότερη από 5 ατμόσφαιρες, σε θερμοκρασία μικρότερη του σημείου βρασμού του (-252,9 °C) και η πυκνότητά του φτάνει τα 70.8 kg/m³, μειώνοντας έτσι τον όγκο του. Στις κρυογονικές δεξαμενές υπάρχουν διπλά τοιχώματα με κενό χώρο μεταξύ τους. Αυτός ο χώρος πρέπει να εκκενωθεί πλήρως για να περιοριστεί στο ελάχιστο το ποσό θερμότητας που ανταλλάσσεται με το εξωτερικό περιβάλλον λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας. Το εξωτερικό, αλλά και το εσωτερικό περίβλημα της δεξαμενής καλύπτεται είτε από φύλλα κολλοειδούς σιλικόνης, είτε από ένα ειδικό συνθετικό υλικό που ονομάζεται MYLAR (κράμα πλαστικού με ίνες αλουμινίου), εμποδίζοντας με αυτό τον τρόπο τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Στις δεξαμενές με μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης υγρού υδρογόνου, για να μειωθεί στο ελάχιστο η μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον, εγκαθίσταται στη περίμετρο ένα στρώμα γεμισμένο με υγρό άζωτο [1].

Ωστόσο, η θερμότητα μπορεί να εισέρθει στη δεξαμενή και να αυξήσει τη θερμοκρασία της, ακόμα και με την καλύτερη μόνωση. Σε μια τέτοια περίπτωση υπάρχει κίνδυνος το υδρογόνο να επέλθει στη αρχική του αέρια μορφή και ως αποτέλεσμα να έχουμε την αύξηση της εσωτερικής πίεσης της δεξαμενής και την εκρηκτική αποσυμπίεση. Για την αποφυγή αυτού του κινδύνου υπάρχει μια βαλβίδα αποσυμπίεσης σε κάθε δεξαμενή, η οποία σε περίπτωση αύξησης της εσωτερικής πίεσης, άνω των προκαθορισμένων ορίων, απελευθερώνει το επιπλέον υδρογόνο. Επίσης, συχνά, χρησιμοποιούνται και καταλύτες. Ως αποτέλεσμα όλων αυτών βέβαια είναι η απώλεια υδρογόνου. Επιπροσθέτως, είναι γεγονός πως για να διατηρηθεί το υδρογόνο σε υγρή μορφή δαπανώνται πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας που λαμβάνονται από το ίδιο το υδρογόνο που αποθηκεύεται και η δαπάνη αυτή ανέρχεται σε ποσοστό 30-40% του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου [2,3]. Επομένως, συνεπάγεται μείωση του αποθέματος του υδρογόνου και της απόδοσης του συστήματος στο σύνολό του.

Ως πλεονέκτημα, παρουσιάζεται ο όγκος που καταλαμβάνει το αποθηκευμένο υδροποιημένο υδρογόνο, καθώς ο όγκος που αποθηκεύεται είναι έως και 850 φορές μικρότερος σε σχέση με τον όγκο που θα καταλάμβανε η ίδια ποσότητα υδρογόνου εάν ήταν σε αέρια μορφή.



Σχήμα 1: Κρυογονική δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου

1.1.2 Αποθήκευση του υδρογόνου σε αέρια μορφή

Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί την πιο συχνή μορφή αποθήκευσης, κυρίως σε κινητές εφαρμογές. Σοβαρότερο μειονέκτημα αυτού του τρόπου αποθήκευσης είναι η ανάγκη μεγάλων πιέσεων, που απαιτούνται για να αποθηκευτεί επαρκής ποσότητα, λόγω της μικρής πυκνότητας του αέριου υδρογόνου. Οι τιμές πιέσεων αρχίζουν από τις 350 ατμόσφαιρες και μπορεί να φτάσουν τις 700, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα υλικά (Σχήμα 2). Ωστόσο, προωθούνται προς πώληση και δεξαμενές χαμηλής πίεσης, που φτάνουν περίπου τις 30 ατμόσφαιρες (Σχήμα 3).



Σχήμα 2: Υψηλής πίεσης φιάλη αποθήκευσης H₂



Σχήμα 3: Χαμηλής πίεσης φιάλη αποθήκευσης H₂

Από τα θετικά χαρακτηριστικά της αποθήκευσης υδρογόνου σε αέρια μορφή, είναι η απλότητα της ροής εισόδου-εξόδου, καθώς και το γεγονός ότι επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς επιπλέον κατανάλωση ενέργειας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [5]. Έχουμε επομένως, μια σχετικά απλή και γρήγορη διαδικασία, που βρίσκει εφαρμογή σε οχήματα με κυψέλες καυσίμων και άλλες κινητές εφαρμογές, καθώς ο εφοδιασμός, για παράδειγμα, μιας δεξαμενής οχήματος ολοκληρώνεται σε 3 λεπτά [6].

Εντούτοις, η συγκεκριμένη μέθοδος φέρει και αρκετά αρνητικά σημεία, όπως:

- Η συμπίεση του υδρογόνου απαιτεί μεγάλο κόστος (περίπου 13 €/kWh)
- Η χαμηλή πυκνότητα του υδρογόνου, περίπου 36 kg/m³, καθιστά απαραίτητη τη χρήση κοστολογικά ακριβών υλικών για την κατασκευή των δεξαμενών.
- Μεγάλο βάρος υλικών για την κατασκευή της φιάλης-δεξαμενής.
- Τα υλικά αυτά τείνουν να οξειδώνονται, συνεπώς χρειάζεται τακτικός έλεγχος των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών της φιάλης αλλά και η επίστρωση των εσωτερικών τοιχωμάτων της με αντιοξειδωτικό χρώμα, για να αποφύγουμε την πιθανή εκρηκτική αποσυμπίεση του υδρογόνου.
- Τέλος, η αποθήκευση σε αέρια μορφή προκαλεί μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας σε πιέσεις πάνω από 300 bar, προκαλώντας επιπλέον αύξηση της πίεσης εντός του κυλίνδρου έως και > 10 %.

1.1.3 Χημική αποθήκευση του υδρογόνου

Η χημική αποθήκευση υδρογόνου μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές και σε κατάλληλο περιβάλλον με μέσες πιέσεις και θερμοκρασίες. Ένα τρόπο χημικής αποθήκευσης αποτελούν τα υδρίδια. Τα υδρίδια συγκροτούνται όταν το υδρογόνο έρθει σε επαφή με συγκεκριμένα στοιχεία όπως το μαγνήσιο(Mg), το βόριο (B), το αλουμίνιο (Al), το λίθιο (Li) και το παλλάδιο (Pd) ή κράμματα αυτών. Άλλοι τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου είναι η χρήση υδατανθράκων ή η αποθήκευση σε μορφή αμμωνίας, από την οποία στη συνέχεια θα παραχθεί το υδρογόνο.

Αναλυτικότερα:

1) Μεταλλικά υδρίδια

Μεταλλικά υδρίδια σχηματίζονται με την απορρόφηση του υδρογόνου από διάφορα στοιχεία. Τα στοιχεία και τα κράματα αυτών, που λαμβάνουν μέρος στο σχηματισμό των υδριδίων είναι: Mg, B, Pd, Li και Al. Κατά το σχηματισμό υδριδίων, δημιουργείται ένας ισχυρός χημικός δεσμός μεταξύ του υδρογόνου και του επιλεγμένου στοιχείου. Για την απελευθέρωση των στοιχείων είναι αναγκαία η θερμοκρασία των 120° C - 200° C. Η δομή και η καθαρότητα του μετάλλου, η παρουσία καταλυτών και η αργή απομάκρυνση της θερμότητας που διαχέεται είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ολοκλήρωσης της διαδικασίας. Ανιχνεύονται διαφορετικοί τύποι υδριδίων και διακρίνονται σύμφωνα με τη δυνατότητα απορρόφησης μικρών ή μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου ή με το αν η εκτόνωση – παροχή του υδρογόνου γίνεται παρουσία χαμηλών ή υψηλών θερμοκρασιών [4].

Χαρακτηριστικά παραδείγματα υδριδίων είναι τα εξής:

- Βοράνιο (Βορίνη)
- Υδρίδιο του μαγνησίου (Μαγνησιάνιο)
- Υδρίδιο του λιθίου (Λιθάνιο)

Κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το χαμηλό κόστος της, καθώς δεν απαιτείται επιπλέον κατανάλωση ενέργειας για τη διατήρηση του περιεχομένου. Επιπροσθέτως, δεν υπάρχει κίνδυνος εκρηκτικής αποσυμπίεσης, λόγω της απαίτησης πρόσδοσης θερμότητας για την απελευθέρωση του υδρογόνου. Τέλος, επιπλέον θετικό χαρακτηριστικό αποτελεί η απελευθέρωση υδρογόνου σε χαμηλές πιέσεις [4]. Εφόσον αποτελεί, θεωρητικά, την ασφαλέστερη μέθοδο αποθήκευσης υδρογόνου, καθίσταται ασφαλής και η χρήση της σε κινητές εφαρμογές. Χρειάζεται ωστόσο να σημειωθεί ότι και σε αυτό το τύπο αποθήκευσης υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα. Αρχικά, τα υδρίδια που απελευθερώνουν υδρογόνο σε υψηλές θερμοκρασίες κατακρατούν μεγαλύτερη ποσότητα υδρογόνου σε σχέση με εκείνα που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Βέβαια έχουν προσιτό κόστος κατασκευής, όμως δαπανούν πολύ μεγάλες ποσότητες θερμότητας έως ότου φτάσουν στην απαιτούμενη θερμοκρασία εκτόνωσης. Ωστόσο ορισμένα υδρίδια απελευθερώνουν υδρογόνο σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τις επιθυμητές με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας. Είναι απαραίτητο λοιπόν, να απελευθερώνεται το υδρογόνο μόνο σε συνθήκες υψηλής πίεσης, καθιστώντας τη διαδικασία λειτουργίας τους ακόμη πιο περίπλοκη. Επιπλέον μειονέκτημα αποτελεί και το μεγάλο βάρος των αποθηκευτικών μέσων με τα αποτελεσματικότερα υδρίδια να περιέχουν μόνο 8% κατά βάρος υδρογόνου. Τέλος, η απαιτούμενη πλήρωση των δεξαμενών με υδρογόνο υψηλής καθαρότητας, για την αποφυγή καταστροφής της ικανότητας απορρόφησής τους, θεωρείται βασική ατέλεια, μιας και έχουμε αύξηση κόστους αλλά και μείωση διάρκειας ζωής των δεξαμενών σε μη χρήση καθαρού υδρογόνου [4].

2) Υδατάνθρακες

Σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και με κρυογονική βοήθεια, οι υδατάνθρακες αποτελούν μέσο για την αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή ή στερεή μορφή. Είναι ιδιαιτέρως χρήσιμοι, καθώς η εκμετάλλευσή τους γίνεται εύκολα λόγω της αφθονίας τους, αλλά και η κατά μάζα πυκνότητά τους σε υδρογόνο φτάνει το 15%.

Υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες υδατανθράκων:

- Οι μονοσακχαρίτες, όπως η γλυκόζη και η φρουκτόζη

- Οι δισακχαρίτες, όπως η λακτόζη και η μαλτόζη, που αποτελούνται από δυο μονοσακχαρίτες
- Οι ολιγοσακχαρίτες, που αποτελούνται 2-10 μονοσακχαρίτες.
- Οι πολυσακχαρίτες, όπως το άμυλο, το γλυκογόνο και η κυτταρίνη, που αποτελούνται από εκατοντάδες χιλιάδες υπομονάδες γλυκόζης [7].

3) Αμμωνία

Η αμμωνία (NH_3) είναι ανόργανη χημική ένωση αζώτου και υδρογόνου η οποία κάτω από κατάλληλες συνθήκες, ήπιες θερμοκρασίες και πιέσεις ή ακόμα και σε συνθήκες περιβάλλοντος εάν αναμειχθεί με νερό, αποθηκεύεται σε υγρή μορφή. Λόγω της ήδη υπάρχουσας υποδομής για τη μεταφορά και τη χρήση της αμμωνίας, αυτός ο τρόπος αποθήκευσης υδρογόνου είναι ευκολά εφικτός. Επιπλέον, η αμμωνία αποτελεί το πιο διαδεδομένο χημικό που παράγεται και μετατρέπεται εύκολα σε υδρογόνο χωρίς να αφήνει βλαβερά κατάλοιπα. Πλεονεκτεί στο κόστος μεταφοράς σε σχέση με το υδρογόνο ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αξιόπιστος φορέας ενέργειας σε οχήματα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμων. Ωστόσο, η θερμογόνος δύναμη της αμμωνίας ισούται με το 1/10 της αντίστοιχης του υδρογόνου. Επιπλέον μειονεκτεί στο γεγονός ότι σε περιβαλλοντικές συνθήκες εμφανίζεται σε μορφή άχρωμου τοξικού αερίου [8].

1.1.4 Φυσική αποθήκευση του υδρογόνου (νανοσωλήνες άνθρακα)

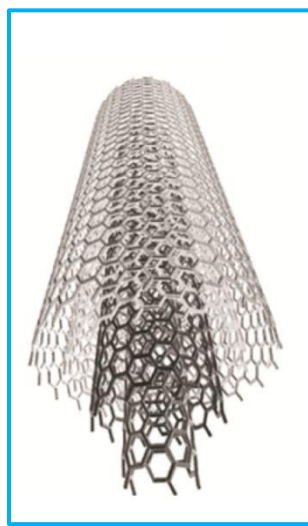
Οι νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούνται από ομόκεντρους κοίλους κυλίνδρους γραφίτη. Οι κύλινδροι γραφίτη, με τη σειρά τους, αποτελούνται από πολυάριθμους πενταμελείς δακτυλίους άνθρακα, οι οποίοι όταν ομαδοποιούνται συγκροτούν συστοιχίες. Διακρίνονται σε μονοφλοιϊκούς (Σχήμα 4), πολυφλοιϊκούς (Σχήμα 5) και συστοιχίες (Σχήμα 6).

Οι μέθοδοι παρασκευής του είναι:

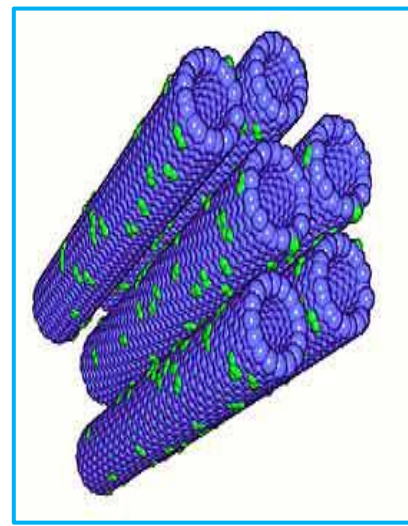
- η φωτοδιάσπαση του γραφίτη
- η καταλυτική απόθεση ατμού (ευρέως διαδεδομένη)
- η εξάχνωση ηλεκτροδίων άνθρακα μέσω ενός ηλεκτρικού τόξου



Σχήμα 4: (α) Μονοφλοιϊκός σωλήνας



(β) Πολυφλοιϊκός σωλήνας



(γ) Συστοιχία Νανοσωλήνων

Η μεγάλη διαφορά της χημικής αποθήκευσης σε σχέση με τη χρήση νανοσωλήνων ανευρίσκεται στο τρόπο απορρόφησης του υδρογόνου. Στη μορφή των υδριδίων το υδρογόνο απορροφάται μέσα στη μάζα του εκάστοτε υλικού, ενώ στην περίπτωση των νανοσωλήνων, το υδρογόνο με την αέρια μορφή του, προσροφάται στις επιφάνειές τους.

Αναλυτικότερα παρατίθεται η διαφορά απορρόφησης-προσρόφησης:

- Μέσω δεσμών VanderWaals, στην προσρόφηση, το υδρογόνο κατανέμεται ομοιόμορφα στα εξής:
 1. Μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών των πολυφλοϊικών.
 2. Στην επιφάνεια μονοφλοϊικών ή στην εξωτερική επιφάνεια πολυφλοϊικών.
 3. Ανάμεσα σε νανοσωλήνες συστοιχίας.
 4. Ανάμεσα στα επίπεδα του γραφίτη.
- Στην απορρόφηση, το υδρογόνο, αποθηκεύεται μέσα στα μεταλλικά υδρίδια και κατανέμεται ομοιόμορφα στο εσωτερικό της μάζας τους.

Αξίζει να τονίσουμε πως στους νανοσωλήνες άνθρακα μπορεί να γίνει και χημική προσρόφηση υδρογόνου εκτός από τη φυσική αποθήκευσή του. Στη χημική προσρόφηση του υδρογόνου γίνεται διάσπαση αυτού σε άτομα, τα οποία στη συνέχεια θα δημιουργήσουν χημικούς δεσμούς με άτομα άνθρακα. Στη φυσική αποθήκευση το υδρογόνο διατηρεί τη μοριακή του δομή και συγκρατείται από την εξωτερική επιφάνεια των νανοσωλήνων.

Η προσρόφηση γίνεται σε συνθήκες χαμηλής πίεσης (≤ 150 bar) και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, προσφέροντας πλεονέκτημα στη μέθοδο αυτή σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες που απαιτούν υψηλές πιέσεις και εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή παρέχει αυξημένη ασφάλεια.

Προσροφητικά υλικά άνθρακα (νανο-σωλήνες και νανο-ίνες άνθρακα, ενεργοί άνθρακες, κ.α.) αποτέλεσαν αντικείμενο διαφόρων ερευνών την τελευταία δεκαετία. Ο εντοπισμός σφαλμάτων και παραλείψεων των πειραματικών μετρήσεων και το γεγονός ότι δεν έγινε επανάληψη των μετρήσεων και των τιμών, κατέρριψε τον αρχικό ενθουσιασμό που υπήρχε από ανακοινώσεις και μελέτες που παρουσίαζαν ασυνήθιστα υψηλές τιμές αποθήκευσης υδρογόνου σε υλικά που περιείχαν άνθρακα. Εν συνεχεία, παρουσιάστηκαν σε θεωρητικό επίπεδο, προσπάθειες πρόβλεψης των παραπάνω ιδιοτήτων, με τη χρήση υπολογιστών και λεπτομερών μοριακών προσομοιώσεων σε υλικά με άνθρακα, φανερώνοντας με αυτή τη μέθοδο την αδυναμία των υλικών αυτών να αποθηκεύσουν επαρκή ποσότητα υδρογόνου [9]. Ως ιδανικές συνθήκες αποθήκευσης είναι οι θερμοκρασίες μικρότερες των 80 K, ή/και οι πιέσεις μεγαλύτερες των 150 bar, τιμές ωστόσο απαγορευτικές για κινητές εφαρμογές. Σήμερα, επομένως, έχουμε οδηγηθεί στο συμπέρασμα ότι τα ανθρακούχα υλικά έπαψαν να θεωρούνται ικανά μέσα αποθήκευσης υδρογόνου για εμπορικές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

2.1 Τύποι Κυψελών

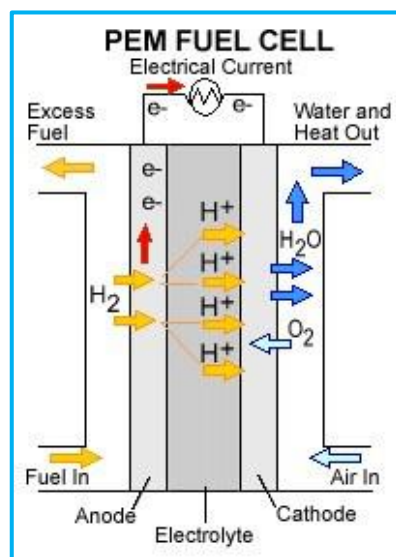
Κυψέλες Καυσίμων

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου εξαρτάται από το καύσιμο, τον ηλεκτρολύτη αλλά και τη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Τροφοδοτούμενα συνήθως με υδρογόνο, φυσικό αέριο ή μεθανόλη και αέρα, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 40% έως 80%.

Ως αρνητικός και θετικός πόλος της κυψέλης, λειτουργούν τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου αντίστοιχα. Ο ηλεκτρολύτης αναλαμβάνει τη μεταφορά των φορτισμένων ιόντων μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διάφορα είδη των κυψελών καυσίμου [10].

2.1.1 Κυψέλες καυσίμων με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων. Η κυψέλη αυτή χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη μία συμπαγή μεμβράνη πολυμερούς. Για το λόγο αυτό ονομάζεται και μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη. Ακόμη, η κυψέλη περιλαμβάνει καταλύτη από πλατίνα και ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από πορώδη άνθρακα. Ρόλος της μεμβράνης είναι να επιτρέπει τη μεταφορά των ιόντων υδρογόνου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου και να εμποδίζει τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων, προς αποφυγή βραχυκυκλώματος. Συγκεκριμένα, το υδρογόνο εισέρχεται στην κυψέλη από την άνοδο της μεμβράνης και στη συνέχεια, κατά την επαφή του με τον καταλύτη, διαχωρίζεται σε κατιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια, επειδή εμποδίζονται να περάσουν στην κάθοδο από τη μεμβράνη, επικοινωνούν με αυτή μέσω εξωτερικών αγωγών. Οι αγωγοί αυτοί, που ενώνουν την άνοδο με την κάθοδο, συνδέονται με το ηλεκτρικό φορτίο με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος για την τροφοδοσία του φορτίου. Αντίθετα, τα κατιόντα υδρογόνου εισέρχονται στην κάθοδο όπου αντιδρούν με το οξυγόνο παράγοντας νερό [11][12].



Σχήμα 5: PEM FUEL CELL

Οι κυψέλες PEMFC παρέχουν σημαντικά ποσά ενέργειας ενώ πρόκειται για μονάδες χαμηλού όγκου και βάρους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται συχνά σε οχήματα με καύσιμο υδρογόνο. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των κυψελών PEMFC είναι η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας που συμβάλει στην αντοχή και την αξιοπιστία τους. Η χαμηλή θερμοκρασία ωστόσο απαιτεί τη χρήση του υψηλού κόστους καταλύτη πλατίνας, που είναι ευαίσθητος στον άνθρακα (C) [11]. Το τελευταίο καθιστά αναγκαία τη χρήση υδρογόνου υψηλής καθαρότητας.

2.1.2 Κυψέλες Καυσίμων Μεθανόλης (DMFC)

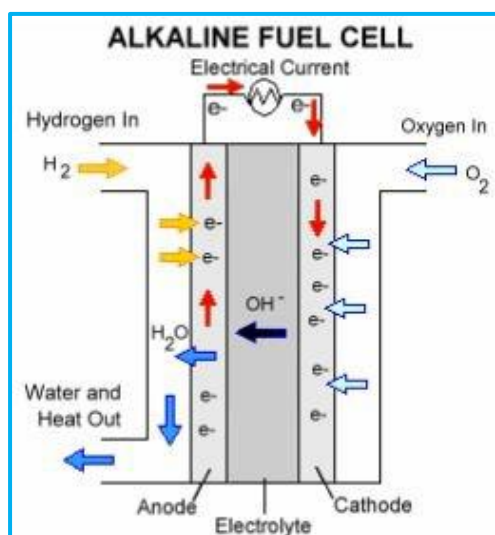
Οι κυψέλες DMFC (direct methanol fuelcell) χρησιμοποιούν μεθανόλη αντί για υδρογόνο, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία.

Οι κυψέλες DMFC είναι οι πιο πρόσφατες παρουσιάζοντας ακόμη προβλήματα, όπως η απαίτηση για υψηλή ποσότητα καταλύτη. Αποτελούν όμως τη λύση στο πρόβλημα της απόθηκευσης του καυσίμου που παρουσιάζεται στην αντίστοιχη περίπτωση του υδρογόνου, καθώς η αποθήκευση της μεθανόλης είναι λιγότερο πολύπλοκη και κοστοβόρα.

2.1.3 Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC)

Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται η λειτουργία των κυψελών καυσίμου αλκαλίων (AFC). Ο ηλεκτρολύτης είναι εμποτισμένος με υδατικό διάλυμα αλκαλίων. Ονομάζονται και κυψέλες Bacon, ενώ χρησιμοποιούνται από τη NASA σε διαστημικές αποστολές για την κάλυψη των αναγκών σε νερό, ηλεκτρισμό και θερμότητα.

Αρχικά το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο και ερχόμενο σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη, οξειδώνεται. Αποτέλεσμα της οξείδωσης είναι η παραγωγή νερού (H_2O) και η απελευθέρωση ηλεκτρονίων, τα οποία όπως και στις κυψέλες PEMFC εισέρχονται στο ηλεκτρόδιο της



Σχήμα 6 : ALKALINE FUEL CELL

καθόδου μέσω εξωτερικού αγωγού. Ο αγωγός αυτός συνδέεται με φορτίο με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τέλος, τα ηλεκτρόνια επαναχρησιμοποιούνται αφού φτάσουν στην κάθοδο για την οξείδωση του υδρογόνου [12].

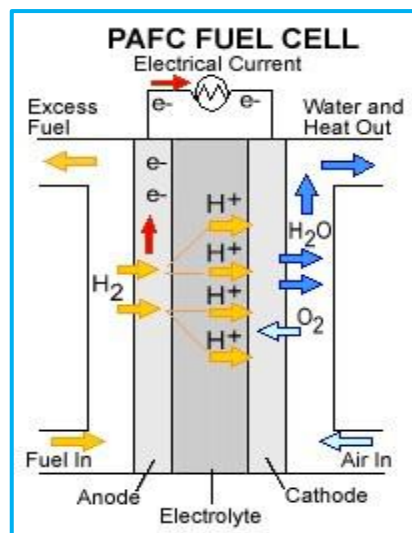
Ο βαθμός απόδοσής τους αγγίζει το 70%, ωστόσο η χρήση τους είναι περιορισμένη. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία που παρουσιάζουν στο διοξείδιο του άνθρακα. Η ευαισθησία τους αυτή αυξάνει απαγορευτικά το κόστος λειτουργίας τους καθώς ο εισερχόμενος αέρας πρέπει να φιλτραριστεί πρώτα από μικροποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Σε διαφορετική περίπτωση, μειώνεται σημαντικά ο χρόνος ζωής των κυψελών[11][13].

2.1.4 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (H_3PO_4) (Σχήμα 7) χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτη από καρβίδιο του πυριτίου, εμποτισμένο με υγρό φωσφορικό οξύ. Τα ηλεκτρόδια άνοδου και καθόδου είναι κατασκευασμένα από πορώδη άνθρακα ο οποίος περιέχει πλατίνα, ώστε να χρησιμοποιείται ως καταλύτης.

Αρχικά, το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο και αντιδρά με το φωσφορικό οξύ του ηλεκτρολύτη παράγοντας ηλεκτρόνια και κατιόντα. Τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στο ηλεκτρόδιο της καθόδου μέσω εξωτερικού αγωγού, συνδεδεμένου με φορτίο, παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Το οξυγόνο εισέρχεται στην κάθοδο, όπου αντιδρώντας με τα ηλεκτρόνια και τα κατιόντα υδρογόνου παράγει νερό και θερμική ενέργεια. Το νερό λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της αντίδρασης ατμοποιείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές. Το γεγονός αυτό αυξάνει τη συνολική απόδοση της διεργασίας [12] [13].

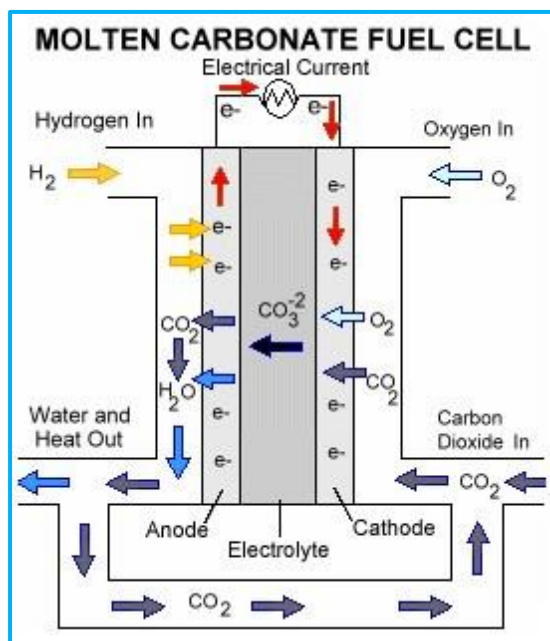
Η απόδοσή τους ξεκινά από 40% και φτάνει μέχρι 60% ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας τους από 150 μέχρι 210 C [4]. Πλεονέκτημα των κυψελών PAFC είναι πως το φωσφορικό οξύ δεν αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα, γεγονός που καθιστά εφικτή τη χρήση καυσίμων χαμηλότερης καθαρότητας. Μειονέκτημα αποτελεί το χαμηλό σημείο πήξης του φωσφορικού οξέος (40 C), το οποίο δυσκολεύει την κρύα εκκίνηση των κυψελών. Τέλος, στα αρνητικά συμπεριλαμβάνεται το υψηλό κόστος κατασκευής, λόγω του μεγάλου όγκου και βάρους αλλά και της χρήσης πλατίνας στο καταλύτη. Το στοιχείο αυτό καθιστά σπάνια την χρήση των κυψελών PAFC σε κινητές εφαρμογές. [11] [12].



Σχήμα 7 : PAFC FUEL CELL

2.1.5 Κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (CO_3^{2-}) χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη κεραμικές μήτρες χημικά ουδέτερες και εμποτισμένες με μείγμα τηγμένου ανθρακικού άλατος. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους (περίπου 600 °C), δεν είναι απαραίτητη η χρήση των κοστοβόρων πολύτιμων μετάλλων ως καταλύτες. Τα πολύτιμα μέταλλα έχουν την ιδιότητα να λειτουργούν ως καταλύτες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, σε αυτή τη περίπτωση οι υψηλές θερμοκρασίες δεν καθιστούν την χρήση τους αναγκαία. Αντίθετα επαρκεί η χρήση χαμηλότερου κόστους στοιχείων όπως το λίθιο (Li), το νικέλιο (Ni), το κάλιο (K) και το νάτριο (Na) [11].



Σχήμα 8 : MOLTEN CARBONATE FUEL CELL

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας των κυψελών MCFC. Αρχικά το υδρογόνο εισέρχεται στο ηλεκτρόδιο ανόδου, όπου αντιδρώντας με τον ηλεκτρολύτη (τριοξείδιο του άνθρακα) παράγει νερό, ηλεκτρόνια και διοξείδιο του άνθρακα. Τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στο ηλεκτρόδιο της καθόδου μέσω εξωτερικού αγωγού, συνδεδεμένου με φορτίο, παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Στη συνέχεια το διοξείδιο του άνθρακα εισέρχεται στην κάθοδο, αντιδρά με τα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο του εισερχόμενου αέρα παράγοντας ιόντα τριοξειδίου του άνθρακα. Τα ιόντα αυτά περνούν στο ηλεκτρολύτη και η παραπάνω διεργασία επαναλαμβάνεται. Όπως και στην περίπτωση της PAFC κυψέλης, το νερό μπορεί να ατμοποιηθεί αυξάνοντας την απόδοση της διεργασίας [12] [13].

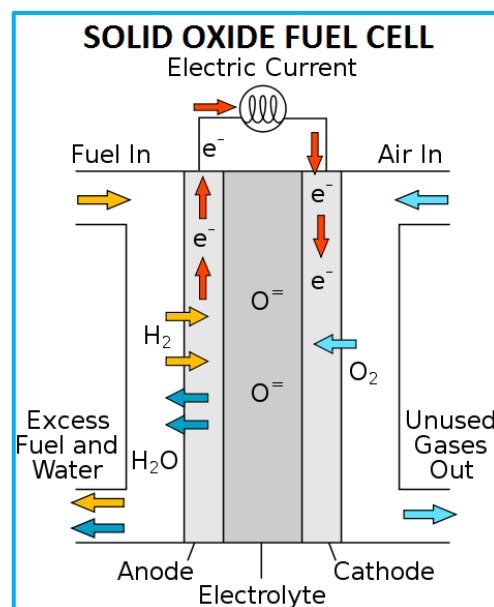
Πλεονέκτημα των κυψελών MCFC αποτελεί το γεγονός ότι το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω αντιδράσεων αναμόρφωσης, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν καύσιμα χαμηλότερης καθαρότητας. Συγκεκριμένα καύσιμα όπως το μεθάνιο (CH_4), αντιδρώντας με τον ηλεκτρολύτη (CO_3) παράγουν υδρογόνο (H_2). Επιπλέον η χρήση μη πολύτιμων μετάλλων αυξάνει την αντοχή τους στο μονοξείδιο του άνθρακα και μειώνει το κόστος κατασκευής.

Αρνητικό παράγοντα αποτελεί η πρόωρη φθορά του ηλεκτρολύτη και οι πιθανές διαρροές, λόγω του διαβρωτικού χαρακτήρα των αλάτων και της υψηλής θερμοκρασίας [11] [13].

2.1.6 Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Σχήμα 13) χρησιμοποιούν μη πορώδεις στερεούς κεραμικούς ηλεκτρολύτες κατασκευασμένους από κράματα οξειδίου του ζirkονίου και του νατρίου. Αντίθετα τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου είναι κατασκευασμένα από πορώδη υλικά ώστε να διευκολύνεται η κίνηση των εισερχόμενων αερίων. Οι κυψέλες SOFC λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 1000 °C), γεγονός που επιτρέπει την χρήση φτηνότερων στοιχείων στη θέση των πολύτιμων μετάλλων.

Το καύσιμο εισέρχεται στην άνοδο, υφίσταται εσωτερική αναμόρφωση σε υδρογόνο και στη συνέχεια αντιδρά με τα ανιόντα οξυγόνου του ηλεκτρολύτη παράγοντας ηλεκτρόνια και νερό. Τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στο ηλεκτρόδιο της καθόδου μέσω εξωτερικού αγωγού, συνδεδεμένου με φορτίο, παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Το οξυγόνο που εισέρχεται στην κάθοδο, αντιδρά με τη σειρά του με τα ηλεκτρόνια αυτά παράγοντας ανιόντα υδρογόνου. Τα τελευταία απορροφώνται από τον ηλεκτρολύτη αντιδρώντας με το υδρογόνο, με αποτέλεσμα την επανάληψη της διεργασίας. Όπως και στις περιπτώσεις των κυψελών PAFC και MCFC, το νερό που παράγεται μπορεί να ατμοποιηθεί αυξάνοντας την απόδοση της διεργασίας [11] [12].



Σχήμα 9 : SOLID OXIDE FUEL CELL

Κύριο πλεονέκτημα της χρήσης των κυψελών SOFC είναι, όπως είδαμε παραπάνω, η δυνατότητα χρήσης χαμηλού κόστους μεταλλικών στοιχείων εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας. Επιπλέον, το γεγονός πως το καύσιμο αναμορφώνεται εσωτερικά επιτρέπει τη χρήση καυσίμων με προσμίξεις αντί καθαρού υδρογόνου. Τέτοιου είδους μπορεί να είναι καύσιμα που είναι παράγωγα του άνθρακα. Μειονέκτημα της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας είναι η απαίτηση για καλή μόνωση της διάταξης και η μειωμένη ταχύτητα εκκίνησης των κυψελών [11].

2.1.7 Αναλυτική Περιγραφή της PEM Κυψέλης

“Κύρια στοιχεία της κυψέλης PEM αποτελούν τα ηλεκτρόδια (άνοδου και καθόδου) και ο ηλεκτρολύτης που παρεμβάλλεται μεταξύ τους. Στον τύπο κυψέλης που μελετάμε στην πειραματική διάταξη, ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται ένα οργανικό πολυμερές στοιχείο γνωστό ως μεμβράνη. Η πιο διαδεδομένη μεμβράνη τέτοιου τύπου είναι η Nafion (σουλφονωμένο πολυτετραφθοροαιθυλένιο), η οποία αποτελείται από τρεις ομάδες ατόμων.

Η πρώτη ομάδα παρουσιάζει δομή ίδια με αυτήν του Teflon (πολυτετραφθοροαιθυλένιο), με εκατοντάδες επαναλαμβανόμενες μονάδες τύπου $-CF_2-CF-CF_2-$. Μιας δεύτερης τύπου $-O-CF_2-CF-O-CF_2-CF_2-$ στο πόλο πλαϊνής αλυσίδας η οποία ενώνει τις προηγούμενες μονάδες, με μια τρίτη, με τύπο SO_3-H^+ .

Τα αρνητικά ιόντα του SO_3^- είναι μόνιμα ενωμένα στις πλαϊνές αλυσίδες. Ωστόσο όταν η μεμβράνη βρεθεί σε ένυδρο περιβάλλον απορροφώντας H_2O , τα ιόντα υδρογόνου αποκτούν την ικανότητα να κινηθούν ελεύθερα. Η κίνηση αυτή γίνεται, καθώς προσκολλώνται στα

πολικά μόρια του νερού, όπως περιγράφεται από τον τύπο $Z(Z_2O)+P$, και μεταπηδούν μεταξύ των SO_3^- ιόντων μέσα στη μεμβράνη.

Από την άλλη μεριά τίθεται ένας περιορισμός ως προς τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των PEM κυψελών καυσίμου, αφού το νερό θα πρέπει να παραμένει σε υγρή κατάσταση. Σε συνθήκες λειτουργίας οι οποίες χαρακτηρίζονται από αυξανόμενες πιέσεις, το όριο των $100\text{ }^\circ\text{C}$ αίρεται αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και ο χρόνος ζωής της κυψέλης. Για αυτό το λόγο έρευνα γίνεται σήμερα προς αναζήτηση συν τοις άλλοις και για μεμβράνες όπου μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες των $100\text{ }^\circ\text{C}$ θερμοκρασίες. Το πάχος αυτής της μεμβράνης κυμαίνεται μεταξύ των 25 και 175 μm . Συγκρινόμενο δηλαδή, με ένα φύλλο χαρτί, είναι 2 με 7 φορές πιο παχύ. Για τη λειτουργία της κυψέλης απαιτείται η μεμβράνη να είναι ένυδρη. Η ιδιαιτερότητα των PEM μεμβρανών ως ηλεκτρολύτες είναι η παρουσία νερού, τα αρνητικά ιόντα παραμένουν σταθερά στη θέση τους ενώ μπορούν να κινηθούν μόνο τα θετικά. Η κίνηση αυτή πρέπει να γίνεται προς μια κατεύθυνση μόνο. Επίσης η μεμβράνη εκ κατασκευής εμποδίζει το αέριο υδρογόνο να αναμειχθεί με το αέριο οξυγόνο διότι σε αντίθετη περίπτωση δεν θα ήταν δυνατή η λειτουργία της κυψέλης” [14].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

3.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης Nexa Training System

Η πειραματική διάταξη *Nexa Training System* (Σχήμα 10) κατασκευάστηκε στη Γερμανία από την εταιρία *Heliocentris Energy Solutions AG* η οποία εξειδικεύεται στα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης και στις υβριδικές υπηρεσίες παροχής ενέργειας. Η συγκεκριμένη διάταξη αποκτήθηκε από το ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Στο πλαίσιο αυτό θα αναλυθεί ατομικά κάθε μέρος της διάταξης και έπειτα θα επεξεργαστούν δεδομένα από συγκεκριμένα πειράματα που διεξήχθησαν με σκοπό την περαιτέρω κατανόηση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου.

Αναλυτικά τα μέρη από τα οποία αποτελείται η διάταξη είναι τα:

- Μονάδα Ελέγχου του Συστήματος
- Μονάδα Προσομοίωσης DC Φορτίου
- Μονάδα Συσσωρευτών
- Μονάδα Διαχείρισης Ενέργειας
- Μονάδα Κυψελών Καυσίμου
- Σύστημα Παροχής Υδρογόνου
- Μονάδα Αποθήκευσης Υδρογόνου
- Πρόσθετα Εξαρτήματα

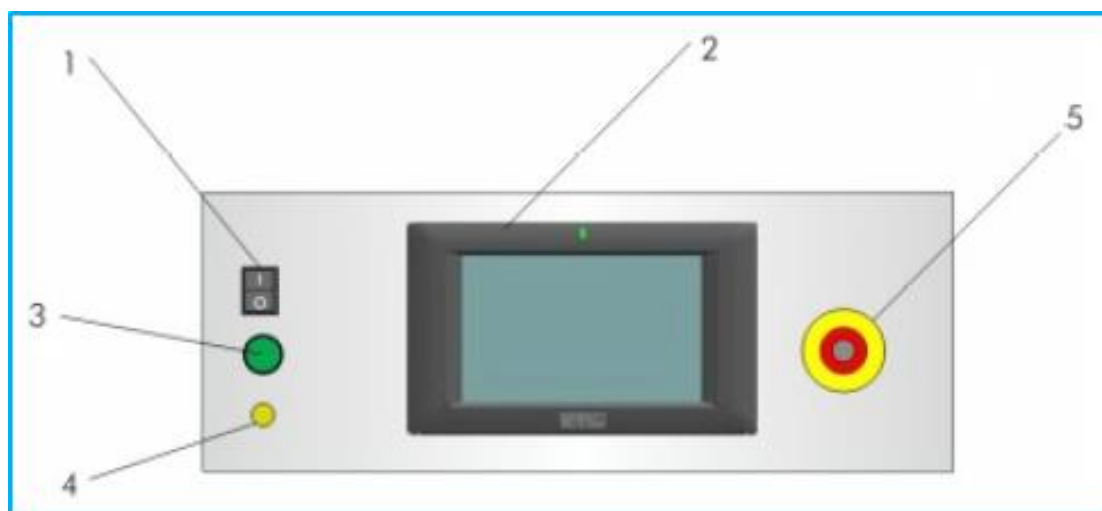


Σχήμα 10 : Πειραματική διάταξη Nexa Training System

3.1.1 Μονάδα Ελέγχου του Συστήματος

Στη μονάδα Ελέγχου του Συστήματος, περιλαμβάνονται ο κεντρικός διακόπτης, το κουμπί εκκίνησης, η οθόνη αφής και το κουμπί έκτακτης ανάγκης.

Το σύστημα τροφοδοτείται από τον κεντρικό διακόπτη (1) και διαχειρίζεται από την οθόνη αφής του υπολογιστή (2). Επιπλέον, μετά την προετοιμασία, το σύστημα ενεργοποιείται από το κουμπί εκκίνησης (3) ενώ η κατάσταση λειτουργίας του διακρίνεται από τον αντίστοιχο λαμπτήρα (4). Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης το σύστημα απενεργοποιείται από το κουμπί έκτακτης ανάγκης (5).



Σχήμα 11: Μονάδα ελέγχου

3.1.2 Μονάδα Προσομοίωσης DC Φορτίου

Η μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου, μας επιτρέπει ταυτόχρονες μετρήσεις έντασης και τάσης, καθώς προσομοιώνει το φορτίο στη διάταξη Nexa Training System. Επίσης, η μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου λειτουργεί και χειροκίνητα, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία ελέγχου στο έμπροσθεν μέρος της μονάδας.



Σχήμα 12: Μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου

Οθόνη

Οι τρέχουσες τιμές τάσης, ισχύς, έντασης και αντίστασης παρουσιάζονται στο αριστερό μέρος της οθόνης (1).

Οι ρυθμίσεις, τα σφάλματα, το χρονόμετρο και άλλες μετρήσεις παρουσιάζονται στο δεξί μέρος της οθόνης.

Κεντρικός Διακόπτης

Η μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου, ενεργοποιείται και απενεργοποιείται ξεχωριστά, με τον κεντρικό διακόπτη (8).

Διακόπτης Επιλογής Ρύθμισης

Ο Διακόπτης Επιλογής Ρύθμισης (6), επιλέγει τον τρόπο λειτουργίας του φορτίου.

Επιλέγονται οι ακόλουθοι τρόποι ρύθμισης:

- CC : Σταθερή Ένταση.
- CV : Σταθερή Τάση.
- CP : Σταθερή Ισχύς.
- CR_{10R} , CR_{400R} : Σταθερή αντίσταση για διαφορετικό εύρος. Μεταβλητές ρυθμίσεις για την ένταση, την ισχύ και την αντίσταση. Η τάση ή η ένταση μεταβάλλεται έως ότου ο λόγος τάσεως προς την ισχύ να αποδίδει την επιθυμητή αντίσταση .

Διακόπτης Ελέγχου Λειτουργίας

Με το διακόπτη Ελέγχου Λειτουργίας (5), καθορίζονται οι ακόλουθοι τρόποι λειτουργίας:

- A or B: Επιλογή μεταξύ των λειτουργιών A και B.
- A/B: Αυτόματη εναλλαγή μεταξύ των λειτουργιών A και B. Το φορτίο απενεργοποιείται και ενεργοποιείται η παλμική λειτουργία.
- Battery: Απενεργοποιείται το φορτίο και ενεργοποιείται η λειτουργία δοκιμής (test mode) του συσσωρευτή .
- Setup: Απενεργοποιείται το φορτίο και εμφανίζεται το μενού ρυθμίσεων.

Κουμπί «Εισαγωγή on/off»

Το κουμπί εισαγωγή on/off (4) χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της λειτουργίας φορτίου. Όταν το κουμπί βρίσκεται στη θέση off εμφανίζεται ένδειξη αναμονής στην οθόνη.

Περιστροφικός Επιλογέας

Ο περιστροφικός επιλογέας χρησιμοποιείται για την επιλογή διαφορετικών στοιχείων στην οθόνη. Ο επιλογέας δεν έχει αρχή και τέλος. Ανάλογα με τη θέση του επιλέγεται και διαφορετικό στοιχείο.

Περιστροφικός Ρυθμιστής

Ο περιστροφικός ρυθμιστής (2) είναι επίσης, συνεχόμενος. Με κάθε περιστροφή (βήμα), γίνεται η ρύθμιση του αντίστοιχου στοιχείου που έχει επιλεγθεί από τον περιστροφικό επιλογέα.

3.1.3 Μονάδα Συσσωρευτών

Το σύστημα διαθέτει 2 συστοιχίες συσσωρευτών, διαφορετικής χωρητικότητας. Κάθε μία εξ αυτών να περιλαμβάνει 2 συσσωρευτές μολύβδου. Οι συνδέσεις για τη φόρτιση ή την αποφόρτιση των συσσωρευτών βρίσκονται στο πρόσθιο μέρος της μονάδας.



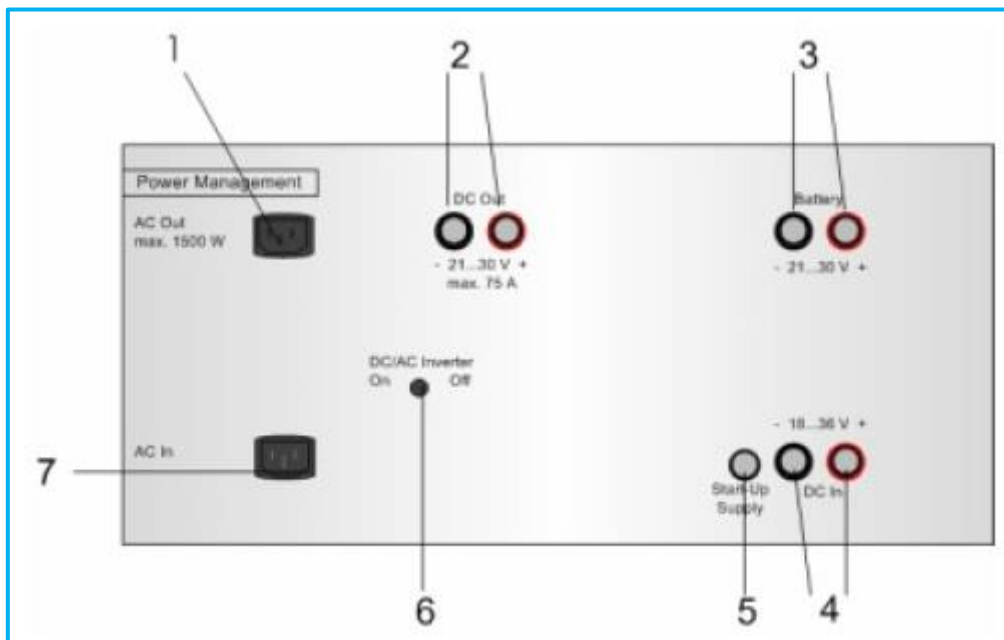
Σχήμα 13 : Μονάδα συσσωρευτή

1. Σύνδεση Χαμηλής χωρητικότητας συστοιχίας συσσωρευτών.
2. Σύνδεση Υψηλής χωρητικότητας συστοιχίας συσσωρευτών.

Η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι το μέτρο της ποσότητας του ηλεκτρικού φορτίου το οποίο μπορεί να προσφερθεί από έναν συσσωρευτή όταν αυτός μεταβεί από κατάσταση πλήρους φόρτισης στην ελάχιστη επιτρεπτή τάση.

3.1.4 Μονάδα Διαχείρισης Ενέργειας

Η Μονάδα Διαχείρισης Ενέργειας μετατρέπει την εξωτερική παροχή ισχύς της Μονάδας Κυψελών Καυσίμου, σε ρυθμιζόμενη (24V συνεχούς ή εναλλασσόμενης έντασης), ελέγχει και φορτίζει τους συσσωρευτές και τροφοδοτεί τα εσωτερικά φορτία του συστήματος με ηλεκτρικό ρεύμα.

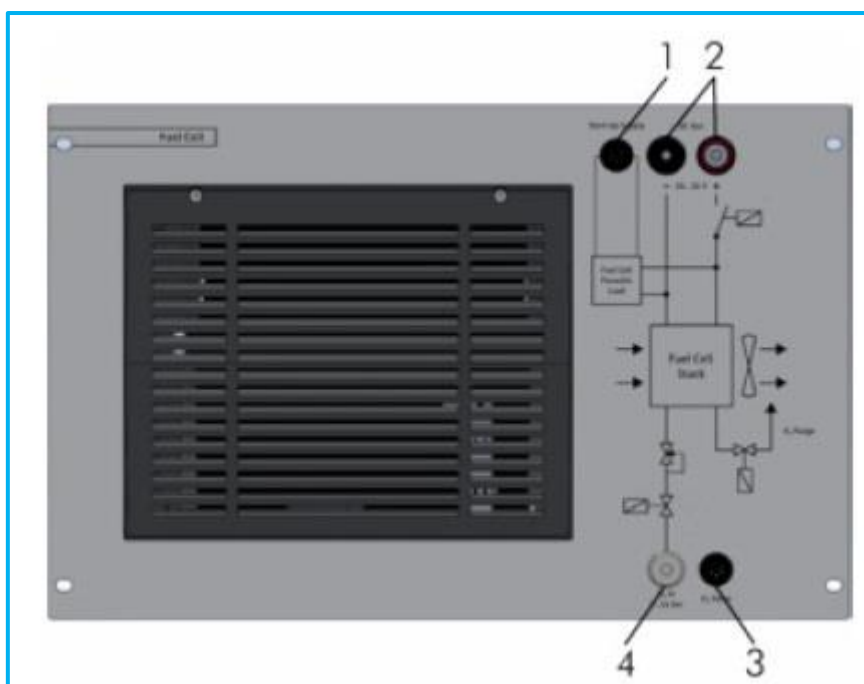


Σχήμα 14: Μονάδα διαχείρισης ενέργειας

1. AC OUT: Παροχή Εναλλασσόμενου Ρεύματος.
2. DC OUT: Παροχή Συνεχούς Ρεύματος.
3. Συσσωρευτή : Σύνδεση συσσωρευτών.
4. DC IN: Εισαγωγή Συνεχούς Ρεύματος
5. Εκκίνηση Παροχής: Έναρξη παροχής ενέργειας από τη μονάδα κυψελών καυσίμου προς τη μονάδα διαχείρισης ενέργειας
6. Εναλλάκτης DC/AC: Διακόπτης εναλλαγής μεταξύ συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος.
7. AC IN: Εισαγωγή Εναλλασσόμενου Ρεύματος

3.1.5 Μονάδα Κυψελών Καυσίμου

Κεντρικό στοιχείο της Μονάδας Κυψελών Καυσίμου είναι το *Nexa[®] 1200 fuel cell system*. Αποτελείται από μια αερόψυκτη PEM συστοιχία κυψελών καυσίμων με 36 ξεχωριστές κυψέλες και με μετρούμενη ισχύς 1200W. Επιπλέον, διαθέτει τα απαιτούμενα περιφερειακά για την εξασφάλιση της αυτόνομης λειτουργίας, καθώς και ολοκληρωμένο εξοπλισμό ασφαλείας.



Σχήμα 15: Μονάδα κυψελών καυσίμου

1. Παροχή Εκκίνησης: Εξωτερική παροχή ενέργειας
2. DC OUT: Παροχή συνεχούς ρεύματος.
3. Βαλβίδα Υδρογόνου: Παροχή επικοινωνίας της μονάδας κυψελών καυσίμων με εκείνη του υδρογόνου μέσω καλωδίου.
4. H₂ In: Εισαγωγή παροχής Υδρογόνου.

3.1.6 Παροχή Υδρογόνου

Για την σωστή λειτουργία ενδείκνυται η χρήση υδρογόνου που παρέχεται από τον κατασκευαστή της πειραματικής διάταξης.

Η μονάδα κυψελών καυσίμου απαιτεί υδρογόνο σε αέρια μορφή, ελάχιστου βαθμού καθαρότητας 99.999%, σε πίεση εισαγωγής από 1 έως 10 bar. Η παροχή υδρογόνου επιτυγχάνεται μέσω της μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου.

Για την πλήρωση των μεταλλικών υδρογονούχων φιαλών, που βρίσκονται στη μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου, χρησιμοποιούνται:

- Φιάλες συμπιεσμένου υδρογόνου ή
- Συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού

3.1.7 Μονάδα Αποθήκευσης Υδρογόνου

Η μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου αποτελείται από 3 ξεχωριστές μεταλλικές φιάλες, χωρητικότητας υδρογόνου 250 lt, η κάθε μια. Για την παρακολούθηση των φιαλών τοποθετήθηκαν στη μονάδα, ένας αισθητήρας υδρογόνου, ένας αισθητήρας πίεσης και τρεις αισθητήρες θερμοκρασίας.

Η είσοδος και η έξοδος του υδρογόνου, ελέγχονται και ασφαλίζονται από μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, η οποία αποτρέπει την αντίστροφη ροή ή τη διαρροή του υδρογόνου από τις φιάλες.

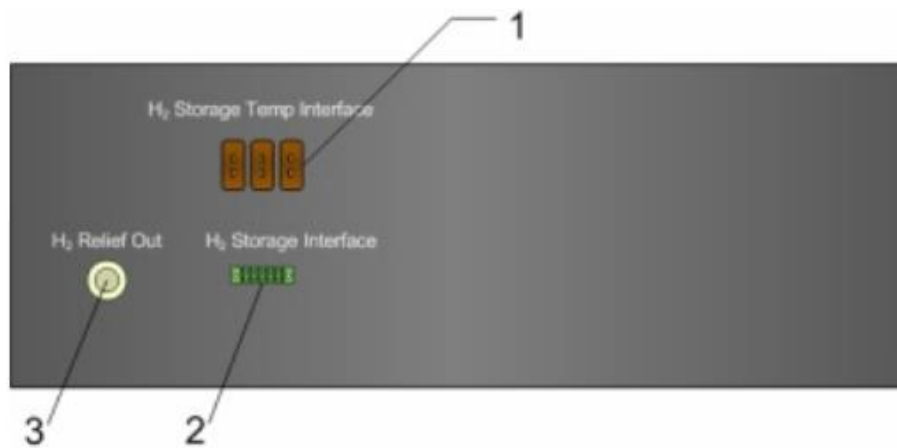
Επιπλέον, η μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου φέρει σύστημα εξαγωγής, απεγκατάστασης και επανεγκατάστασης των φιαλών.



Σχήμα 16: Πρόσθια πλευρά μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου

1. H₂ OUT: Παροχή υδρογόνου προς τη μονάδα κυψελών καυσίμου.
2. H₂ VALVE: Παροχή επικοινωνίας της μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου με εκείνη των κυψελών καυσίμων μέσω καλωδίου.
3. H₂ IN: Εισαγωγή Υδρογόνου.

Σε περίπτωση αύξησης της πίεσης άνω των 16 bar, ενεργοποιείτε η βαλβίδα εκτόνωσης της μονάδας. Το επιπλέον υδρογόνο απελευθερώνεται από το σύστημα μέσω της εξόδου εκτόνωσης (H₂ RELIEF OUT), που βρίσκεται στο πίσω μέρος της μονάδας (Σχήμα 17).



Σχήμα 17: Οπίσθια πλευρά μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου

1. Αισθητήρες θερμοκρασίας.
2. Αισθητήρας υδρογόνου.
3. Έξοδος εκτόνωσης

3.1.8 Πρόσθετα Εξαρτήματα

Κεντρικός Υπολογιστής

Το λογισμικό του Nexa training System, είναι προεγκατεστημένο στον κεντρικό υπολογιστή. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό οι μονάδες μπορούν να ελεγχθούν και μερικώς να παραμετροποιηθούν . Επιπλέον οι τιμές του φορτίου μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να καταγραφούν οι απαιτούμενες πληροφορίες για την διαμόρφωση των χαρακτηριστικών καμπυλών.

Μονάδα Τροφοδοτικού

Η μονάδα συσσωρευτή, έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί εσωτερικά τη πειραματική διάταξη. Ωστόσο συνίσταται η ηλεκτροδότηση της διάταξης από τη μονάδα τροφοδοτικού. Η μονάδα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω καλωδίου IEC. Επιπλέον δύναται να παρέχει ισχύ είτε στη μονάδα ελέγχου συστήματος, είτε στη μονάδα διαχείρισης ενέργειας μέσω συσσωρευτών. Η παροχή αυτή γίνεται με τη χρήση καλωδίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Ο εργαστηριακός αυτός οδηγός περιέχει 4 πειράματα που καλύπτουν ένα πλήθος θεματικών ενοτήτων από τον τομέα της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου.

Συγκεκριμένα ο οδηγός περιλαμβάνει τις παρακάτω εργαστηριακές ασκήσεις:

- Κυψέλες καυσίμου
- Μονάδα συσσωρευτών
- Υβριδικό λειτουργία της διάταξης: Μονάδα συσσωρευτών/Κυψέλες καυσίμου
- Αδιάληπτη παροχή ενέργειας (UPS)

Κάθε εργαστηριακή άσκηση περιλαμβάνει 1 – 3 πειράματα, συνοδευόμενα από οδηγίες για τον απαραίτητο εξοπλισμό, τις συνθήκες, τις απαιτούμενες ρυθμίσεις, τα βήματα διεξαγωγής τους. Τέλος, περιλαμβάνει ερωτήσεις για την καλύτερη κατανόηση κάθε πειράματος και ενδεικτικές καμπύλες και εικόνες για την καθοδήγηση του σπουδαστή.

Για την επεξήγηση των συμβόλων που χρησιμοποιούνται στα παρακάτω πειράματα, συμβουλευτείτε τον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Πίνακας συμβόλων

Σύμβολο	Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης
$I_{StackOut}$	Ένταση της συστοιχίας	A
I_{FCMout}	Ένταση εξόδου της μονάδας κυψελών καυσίμου	A
$V_{StackOut}$	Τάση της συστοιχίας	V
V_{FCMOut}	Τάση εξόδου της μονάδας κυψελών καυσίμου	V
P_{FCMOut}	Ισχύς εξόδου της μονάδας κυψελών καυσίμου	W
P_{Stack}	Ισχύς της συστοιχίας	W
$I_{DC/DC Out}$	Ένταση εξόδου της μονάδας μετατροπέα DC/DC	A
$I_{DC/DC Load}$	Ένταση εισόδου του ηλεκτρικού φορτίου	A

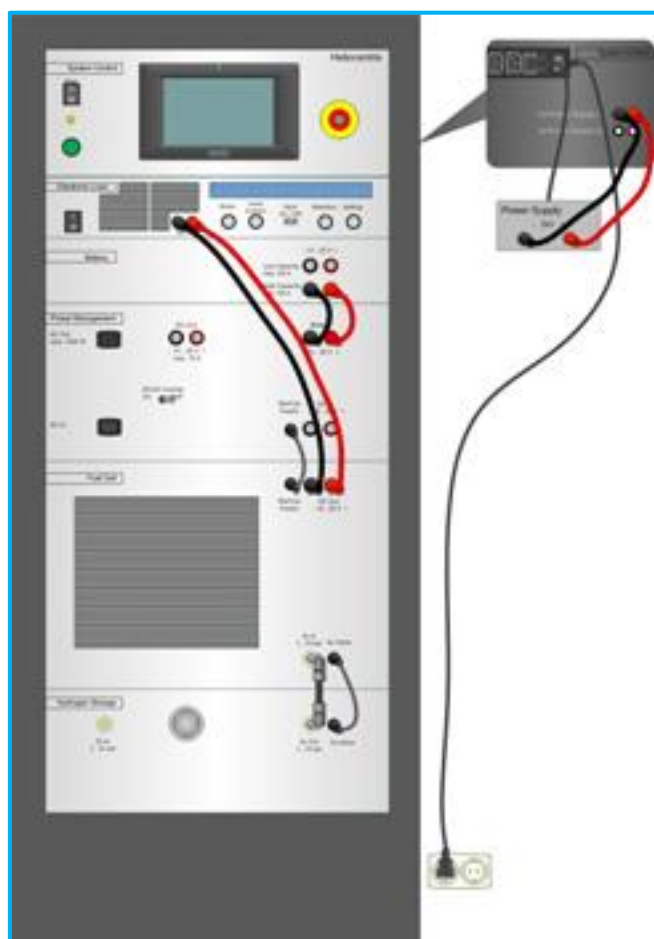
6.1 Εργαστηριακή Άσκηση 1 : Κυψέλες καυσίμου

❖ Σκοπός του πειράματος

Σε αυτή την ομάδα πειραμάτων οι σπουδαστές θα μελετήσουν τη λειτουργία και τη χρήση μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου με τη βοήθεια χαρακτηριστικών καμπυλών. Κάθε χαρακτηριστική καμπύλη προκύπτει από ένα αντίστοιχο πείραμα, ενώ η διαδικασία λήψης των μετρήσεων επαναλαμβάνεται όμοια σε όλα τα πειράματα.

6.1.1 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – έντασης (V-I)

Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – έντασης είναι μία από τις σημαντικότερες καμπύλες που αφορούν τη λειτουργία μιας μονάδας κυψελών καυσίμου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της καταλληλότητας της συσκευής για χρήση της σε πλήθος εφαρμογών. Επιπλέον, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τον καθορισμό των απωλειών ενέργειας της κυψέλης και του χρόνου στον οποίο συμβαίνουν αυτές.



Σχήμα 18: Συνδεσμολογία της διάταξης

Πίνακας 2: Απαραίτητος εξοπλισμός

Απαραίτητος εξοπλισμός
1 κόκκινο / μαύρο καλώδιο (μακρύ)
1 κόκκινο / μαύρο καλώδιο (κοντό)
Καλώδιο για την αρχική παροχή ρεύματος (εκκίνηση της συσκευής)
Γέφυρα ζεύξης του υδρογόνου
Καλώδιο για την βαλβίδα υδρογόνου
Μονάδα εξωτερικής παροχής ισχύος

❖ **Πειραματική διαδικασία σε βήματα:**

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες καταγράφονται χρησιμοποιώντας την πρώτη φορά ένα προφίλ με καθορισμένες τιμές φορτίου και τη δεύτερη με ένα συνεχώς αργά αυξανόμενο φορτίο:

1. Η συνδεσμολογία του πειράματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 18.
2. Πριν την εκκίνηση της συσκευής πραγματοποιείτε έλεγχο για τυχόν διαρροές υδρογόνου, χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα που παρέχεται από το κατασκευαστή.
3. Εκκινήστε τη συσκευή και τη μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου χρησιμοποιώντας τους κεντρικούς διακόπτες της μονάδας ελέγχου και της μονάδας προσομοίωσης DC φορτίου αντίστοιχα.
4. Εκκινήστε τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και ανοίξτε το αντίστοιχο λογισμικό (Nexa Training System Software).
5. Συνδέστε μέσω δικτύου τον υπολογιστή της συσκευής με την μονάδα PC.
6. Μέσα από το λογισμικό, ρυθμίστε τη λειτουργία σε “Manual”.
7. Ενεργοποιήστε τη μονάδα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell).
8. Θέστε τη μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου σε ρύθμιση σταθερού ρεύματος (CC – Mode).
9. Ενεργοποιήστε τη μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου μέσω του λογισμικού.
10. Δημιουργήστε τα παρακάτω προφίλ (load profile) για την καταγραφή δεδομένων με καθορισμένες τιμές φορτίου (Πίνακας 3) και την καταγραφή δεδομένων με αυξανόμενο φορτίο (Πίνακας 4) :

Πίνακας 3 : Προφίλ με καθορισμένες τιμές φορτίου

Delay (s)	Mode	Current (A)
20	cc	0
20	cc	10
20	cc	25
20	cc	40
20	cc	50
20	cc	0

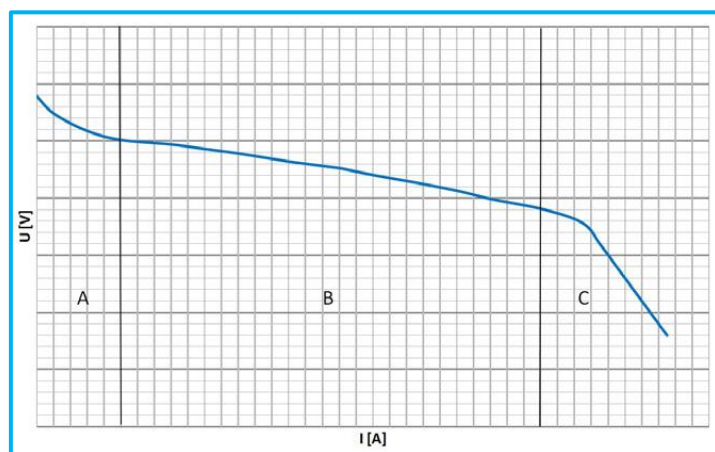
Πίνακας 4: Προφίλ με αυξανόμενο φορτίο

Delay (s)	Mode	Current (A)
2	cc	1
2	cc	2
2	cc	3
2	cc	..
2	cc	49
2	cc	50

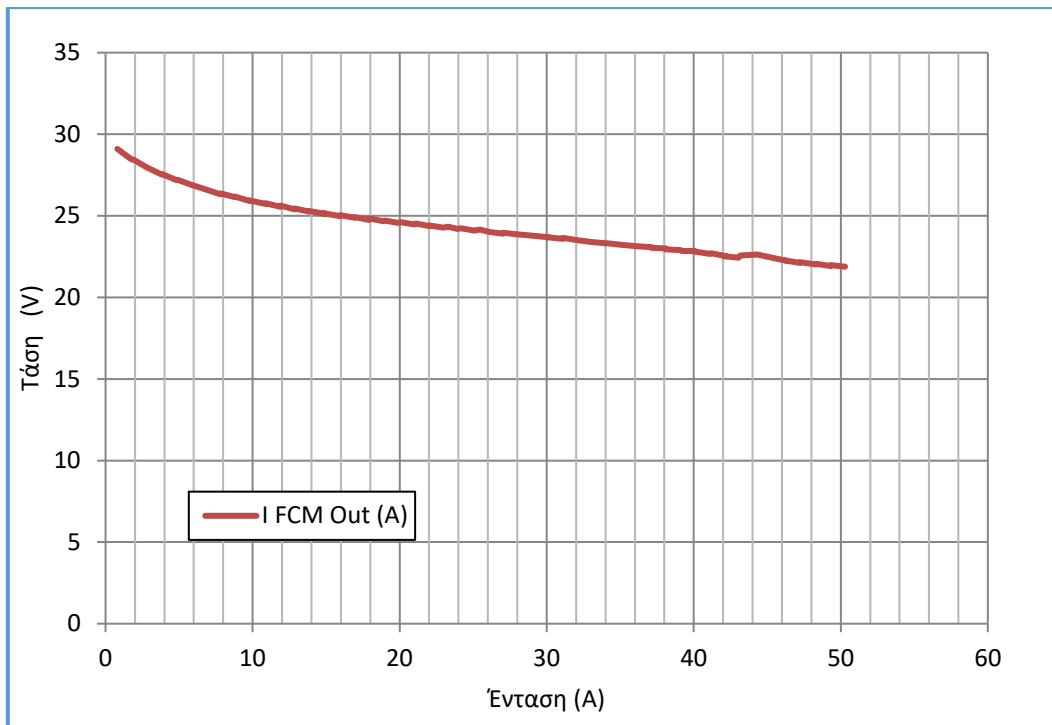
11. Εκκινήστε την καταγραφή δεδομένων (data acquisition), ορίστε το χρονικό διάστημα σε 1 sec.(Αποθηκεύστε τα δεδομένα σε εξωτερική μονάδα αποθήκευσης πριν τον τερματισμό του συστήματος.)
12. «Τρέξτε» το προφίλ του Πίνακα 4.
13. Απενεργοποιήστε τη μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου.
14. Σταματήστε την καταγραφή δεδομένων.
15. Σταματήστε τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου.
16. Με τη λήξη του πειράματος, τερματίστε το λογισμικό “Nexa Training System”.

❖ **Ερωτήσεις σχετικά με το πείραμα:**

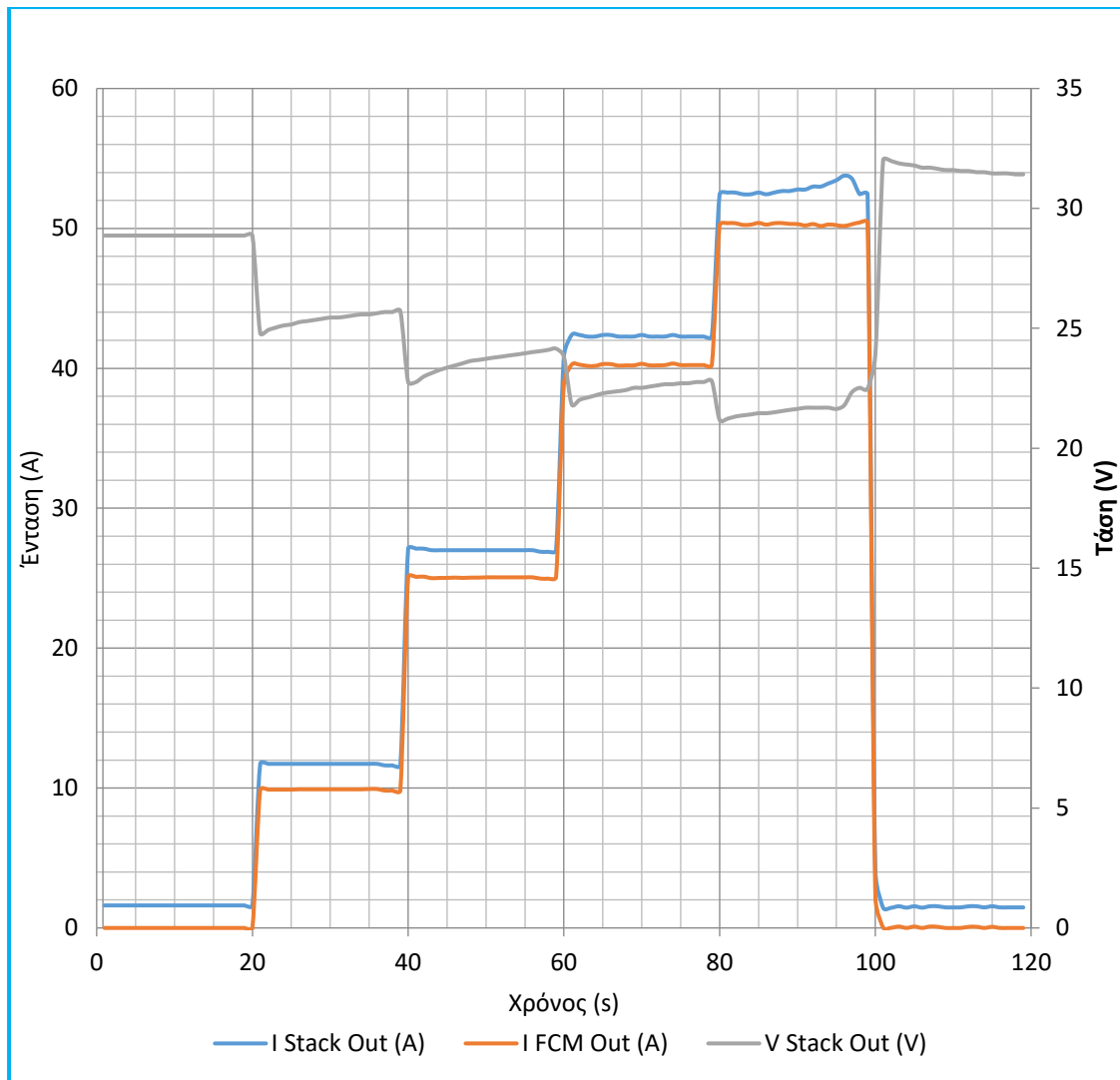
1. Αναφέρατε 3 βασικά είδη κυψελών καυσίμου και τις αρχές λειτουργίας τους.
2. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις, σχεδιάστε την καμπύλη τάσης – έντασης (V-I) και την καμπύλη τάσης-έντασης-χρόνου (V- I – t). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήστε τις στήλες $I_{StackOut}$, I_{FCMOut} , $V_{StackOut}$ και t (sec) από τα δεδομένα που καταγράψατε. Για μια ενδεικτική μορφή των καμπυλών δείτε τα Σχήματα 20 και 21.
3. Σχολιάστε τις χαρακτηριστικές καμπύλες. Τι συμπεράσματα προκύπτουν;
4. Για ποιο λόγο η καμπύλη $V_{StackOut} - I_{FCMOut}$ ξεκινάει στα 0 A, ενώ η $V_{StackOut} - I_{StackOut}$ στα 3A ;
5. Συγκρίνετε την καταγεγραμμένη καμπύλη V – I με την αντίστοιχη που παρέχεται από τον κατασκευαστή (Σχήμα 19). Που οφείλονται οι διαφορές που παρατηρούνται;



Σχήμα 19: Θεωρητική καμπύλη Τάσης-Έντασης



Σχήμα 20: Ενδεικτικές καμπύλες Τάσης-Έντασης



Σχήμα 21: Ενδεικτικές καμπύλες Τάσης-Έντασης-Χρόνου

❖ Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως η ένταση της συστοιχίας «ξεκινά» από τα περίπου 2 A ενώ της μονάδας κυψελών καυσίμου από μηδενική τιμή. Αυτή η διαφορά εξηγείται από το γεγονός πως η μονάδα κυψελών απορροφά ενέργεια λόγω της τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας κτλ. Η ενέργεια αυτή απορροφάται από την συστοιχία μέσω της έντασης του ρεύματος της συστοιχίας.

6.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – έντασης (P-I)

Όπως και στην περίπτωση της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης-έντασης (V-I) έτσι και εκείνη της ισχύος – έντασης (P – I) είναι από τις σημαντικότερες καμπύλες που αφορούν την μονάδα κυψελών καυσίμου όσον αφορά το πεδίο εφαρμογής της κυψέλης σε ένα εύρος εφαρμογών.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός, οι συνθήκες διεξαγωγής, η ρύθμιση και τα βήματα διεξαγωγής του πειράματος είναι πανομοιότυπες με αυτό της καμπύλης V-I (πείραμα 6.1.1), χρησιμοποιώντας το προφίλ συνεχώς αυξανόμενου φορτίου.

Για το λόγο αυτό, εφόσον έχει πραγματοποιηθεί το πείραμα 6.1.1, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ίδια καταγεγραμμένα δεδομένα προς επεξεργασία.

❖ Ερωτήσεις σχετικά με το πείραμα:

1. Υπολογίστε τα P_{FCMout} και P_{Stack} .

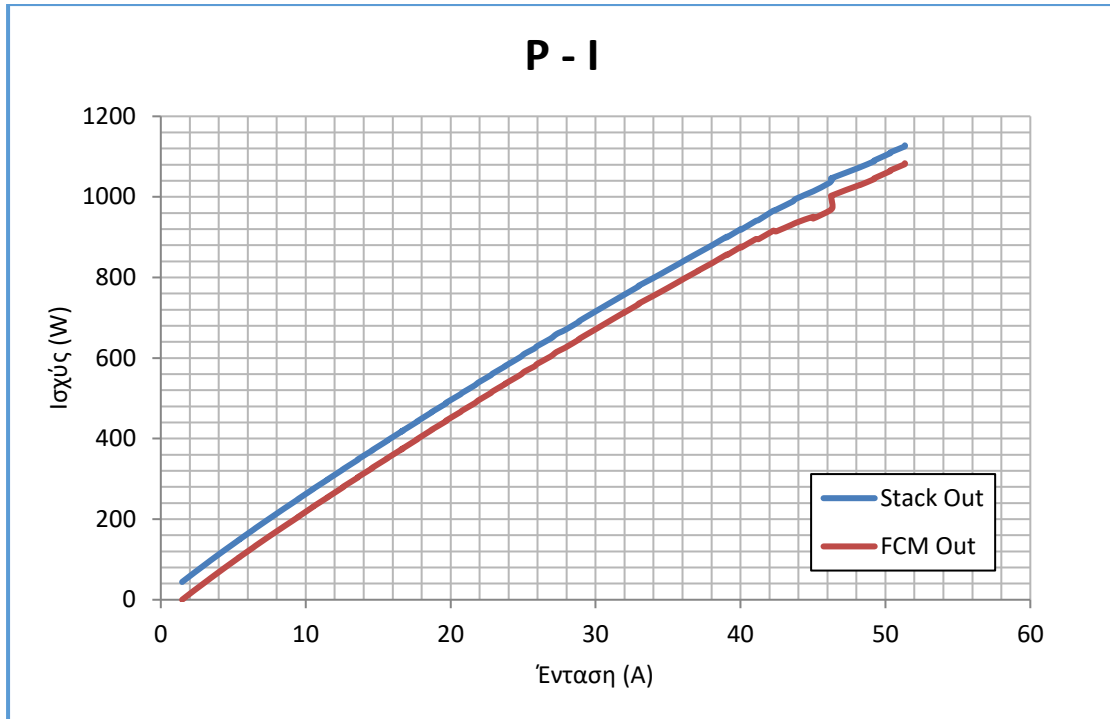
Για τον υπολογισμό των παραπάνω ισχύει:

$$P_{FCMout} = I_{FCMout} * V_{FCMout}$$

και

$$P_{Stack} = I_{Stackout} * V_{Stackout}$$

2. Σχεδιάστε και ερμηνεύστε τα χαρακτηριστικά της καμπύλης P - I. Τι συμπεράσματα προκύπτουν; Ενδεικτική μορφή της καμπύλης δείτε στο Σχήμα 22.
3. Ποια είναι η διαφορά της καμπύλης P – I της συστοιχίας σε σχέση με αυτή της κυψέλης καυσίμου;
4. Προεκτείνεται την καμπύλη ισχύος – έντασης για υψηλότερες τιμές της τελευταίας και παρέχετε μία λογική εξήγηση της καμπύλης που προκύπτει.



Σχήμα 22: Καμπύλη Ισχύος-Έντασης

❖ Συμπέρασμα

Όπως στα προηγούμενα διαγράμματα, έτσι και εδώ αντίστοιχα παρατηρούμε πως η ισχύς της συστοιχίας «ξεκινά» από τιμή μεγαλύτερη των 0 W, εν αντιθέσει με την ισχύ της μονάδας κυψελών καυσίμου. Η αυξημένη αυτή ισχύς, απαιτείται για την τροφοδοσία του ανεμιστήρα, της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας και των άλλων εσωτερικών στοιχείων της μονάδας κυψελών καυσίμου.

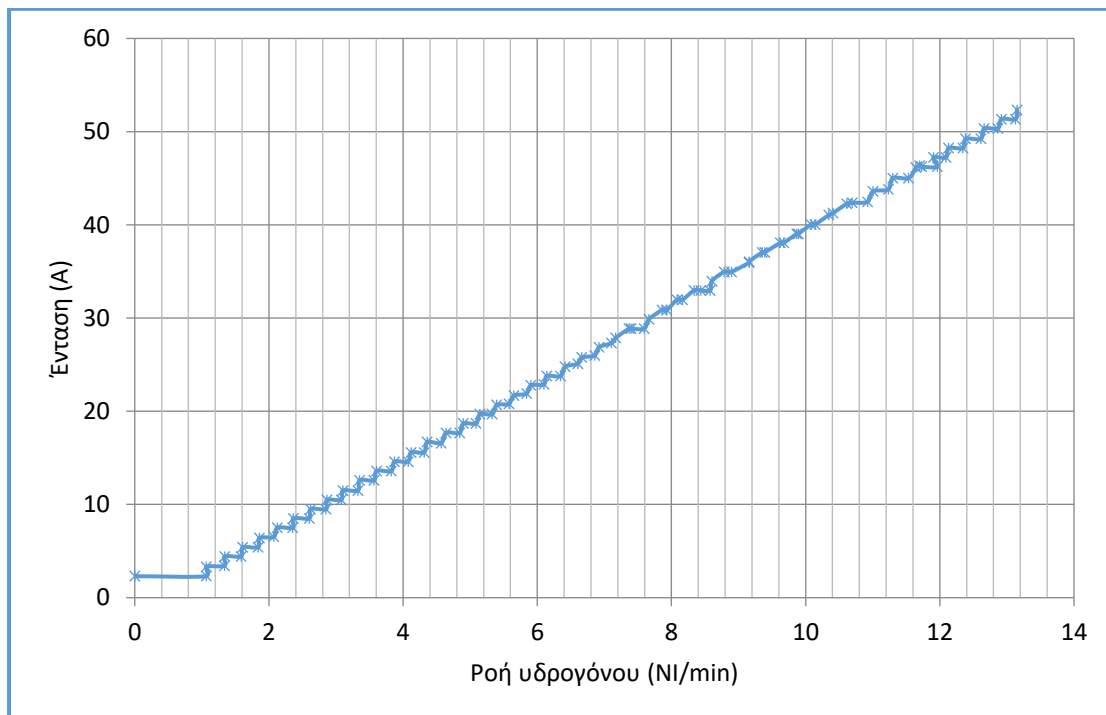
6.1.3 Χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης – Ροής υδρογόνου (I-H₂ Flow)

Η χρησιμότητα του καυσίμου μέσω της μονάδας κυψελών καυσίμου καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της καμπύλης Έντασης – Ροής υδρογόνου (I – H₂ Flow).

Ο απαραίτητος εξοπλισμός, οι συνθήκες διεξαγωγής, η ρύθμιση και τα βήματα διεξαγωγής του πειράματος είναι πανομοιότυπες με αυτό της καμπύλης V - I (πείραμα 6.1.1), χρησιμοποιώντας το προφίλ συνεχώς αυξανόμενου φορτίου. Για τον λόγο αυτό, εφόσον έχει πραγματοποιηθεί το πείραμα 6.1.1, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ίδια καταγεγραμμένα δεδομένα προς επεξεργασία.

❖ **Ερωτήσεις σχετικά με το πείραμα:**

1. Σχεδιάστε την καμπύλη Έντασης – Ροής Υδρογόνου και ερμηνεύστε τα χαρακτηριστικά της. Τι συμπεράσματα προκύπτουν; Ενδεικτική μορφή της καμπύλης δείτε στο Σχήμα 23.



Σχήμα 23: Καμπύλη Έντασης-Ροής υδρογόνου(H₂ Flow)

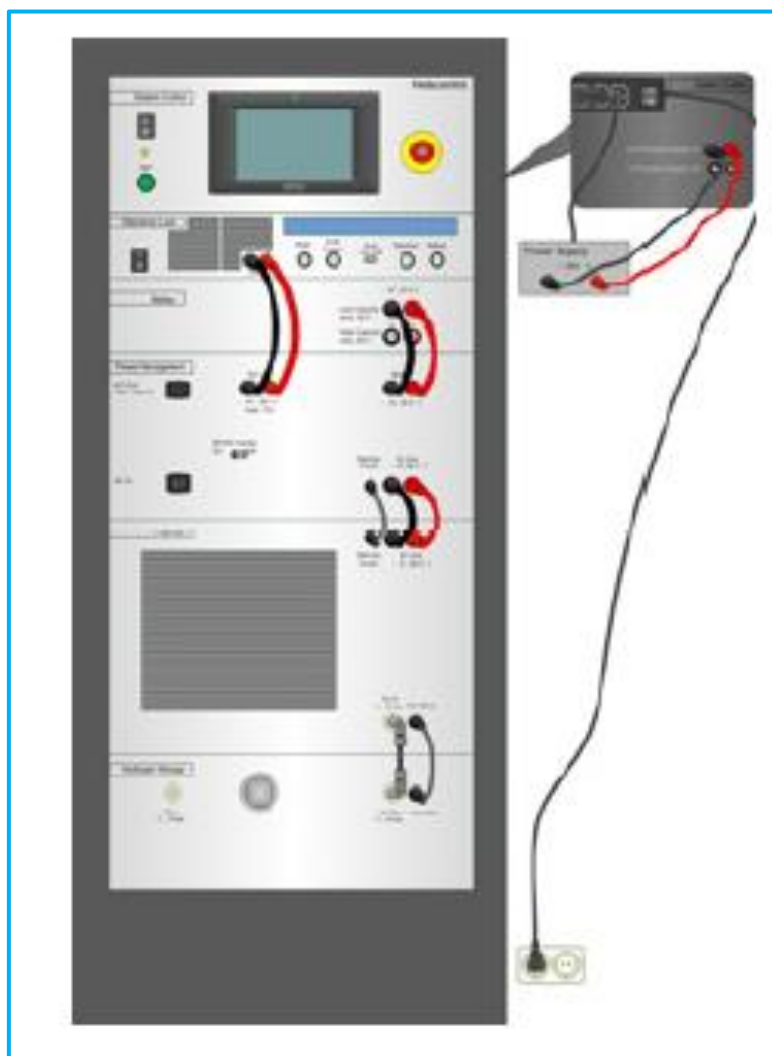
❖ **Συμπέρασμα**

Παρατηρούμε το αναμενόμενο, δηλαδή ότι η κατανάλωση του υδρογόνου αυξάνεται, όταν αυξάνεται και η ισχύς (άρα και η ένταση του ρεύματος) που εξάγεται από την μονάδα κυψελών καυσίμου.

6.2 Εργαστηριακή Άσκηση 2 : Μονάδα συσσωρευτών : Στάδια φόρτισης

❖ Σκοπός του πειράματος

Σκοπός του πειράματος αυτού είναι να εξοικειωθούν οι σπουδαστές με τα χαρακτηριστικά της φόρτισης των συσσωρευτών. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί το πείραμα σε μία προκαθορισμένη κατάσταση φόρτισης, οι συσσωρευτές πρέπει αρχικά να αποφορτιστούν πλήρως. Στη συνέχεια φορτίζονται σύμφωνα με τις επιλεγμένες παραμέτρους. Η πειραματική διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ρύθμιση χαμηλής (low capacity) ή υψηλής (high capacity) χωρητικότητας συσσωρευτή. Προκειμένου να εξοικονομηθεί χρόνος και ενέργεια, συνιστάται η πραγματοποίηση της διαδικασίας σε ρύθμιση χαμηλής χωρητικότητας. Για την παραγωγή ωστόσο των ενδεικτικών διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκε η ρύθμιση υψηλής χωρητικότητας.



Σχήμα 24: Συνδεσμολογία της διάταξης

Πίνακας 5: Απαραίτητος εξοπλισμός

Απαραίτητος εξοπλισμός
3 κόκκινα και 3 μαύρα καλώδια (κοντά)
Καλώδιο για την αρχική παροχή ρεύματος (εκκίνηση της συσκευής)
Γέφυρα ζεύξης του υδρογόνου
Καλώδιο για την βαλβίδα υδρογόνου
Μονάδα εξωτερικής παροχής ισχύος

❖ **Πειραματική διαδικασία σε βήματα:**

1. Η συνδεσμολογία για τη διεξαγωγή του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 24.

Αφαιρέστε πρώτα τα καλώδια εκκίνησης στο πίσω μέρος και ύστερα συνδέστε τον μετασχηματιστή AC στην εξωτερική παροχή ισχύος.

2. Εκκινήστε το σύστημα.
3. Εκκινήστε τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και ανοίξτε το λογισμικό.
4. Μεταβείτε στην καρτέλα DC/DC του λογισμικού (Σχήμα 25).
5. Ορίστε τις παρακάτω παραμέτρους ώστε να μειωθεί η διάρκεια του πειράματος:

Πίνακας 6: Παράμετροι για τη διεξαγωγή του πειράματος

Παράμετροι	Περιγραφή	Χαμηλή Χωρητικότητα	Υψηλή Χωρητικότητα
V Bat min	Ελάχιστη Τάση Συσσωρευτή	23 V	23 V
I charge max	Μέγιστη Ένταση Φόρτισης	2.2 A	5.4 A
I trickle charge	Όριο έντασης ρεύματος για την συντήρηση της τάσης του συσσωρευτή	3.6 A	4.6 A
t trickle charge	Διάρκεια Συντήρησης	3 Min	3 Min
V DC/DC Out max	Μέγιστη τάση συσσωρευτή κατά τη συντήρηση	28.2 V	28.2 V

6. Ορίστε τη λειτουργία της μονάδας σε υβριδική (“Hybrid”). Υβριδική είναι η λειτουργία της μονάδας κατά την οποία η παροχή ενέργειας γίνεται συνδυαστικά από τη μονάδα συσσωρευτών και τη μονάδα κυψελών καυσίμου.
7. Ενεργοποιήστε την μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου μέσω του λογισμικού.
8. Θέστε την μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου σε ρύθμιση συνεχούς ρεύματος (CC – Mode).

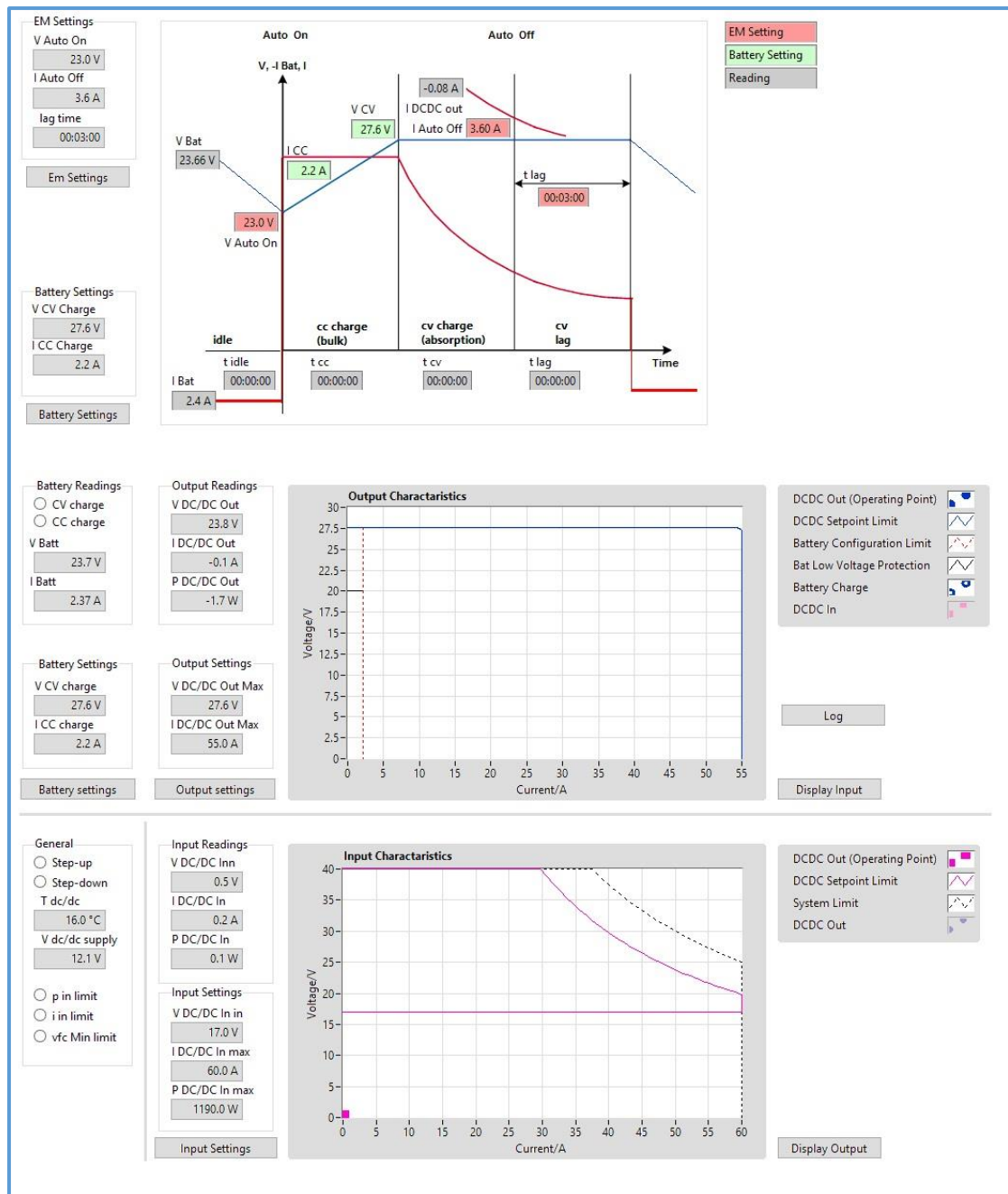
9. Εκκινήστε την καταγραφή δεδομένων (data acquisition), ορίστε το χρονικό διάστημα σε 1 sec. (Αποθηκεύστε τα δεδομένα σε εξωτερική μονάδα αποθήκευσης πριν τον τερματισμό του συστήματος.)
10. Ορίστε την τιμή της μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου σύμφωνα με την διπλασιασμένη χωρητικότητα του συσσωρευτή (36 A/ 14.4 A).

Τη στιγμή που η τάση του συσσωρευτή πέσει σε τιμή μικρότερη της ελάχιστης τάσης συσσωρευτή, η κυψέλη καυσίμου και ο μετασχηματιστής DC/DC θα εκκινήσουν.

11. Απενεργοποιήστε τη μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου ώστε η μονάδα κυψελών καυσίμου να φορτίζει αποκλειστικά τους συσσωρευτές και όχι άλλες μονάδες κατανάλωσης. Προς αποφυγή επιπλοκής λόγω ολικής αποφόρτισης, επαναφέρετε το φορτίο σε μηδενική τιμή πριν την απενεργοποίηση του.

Στο τέλος της φόρτισης, η μονάδα κυψελών καυσίμου και ο μετατροπέας DC/DC απενεργοποιούνται αυτόματα.

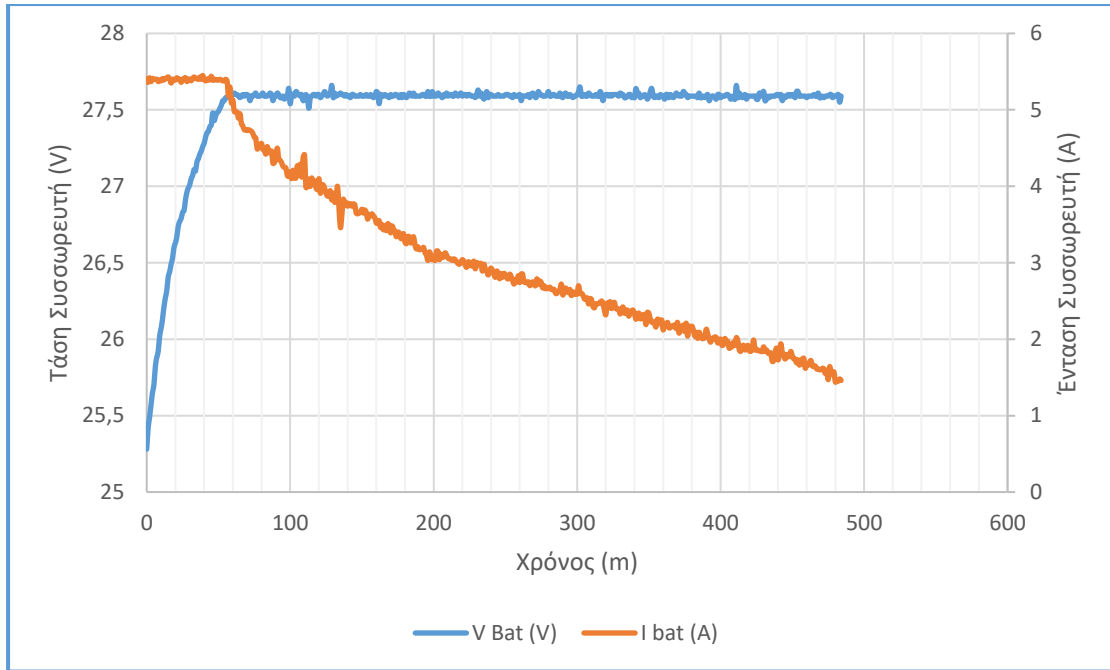
12. Σταματήστε την καταγραφή δεδομένων (data acquisition).
13. Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος, τερματίστε τη λειτουργία του Συστήματος Κατάρτισης “Nexa Training System”.



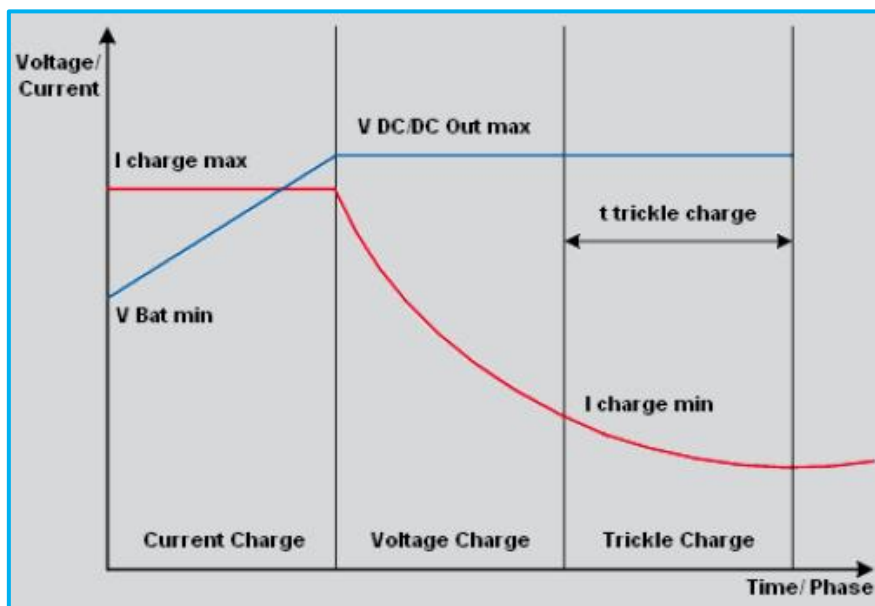
Σχήμα 25: Καρτέλα DC/DC

❖ **Ερωτήσεις σχετικά με το πείραμα:**

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα έντασης/τάσης των συσσωρευτών σε συνάρτηση με τον χρόνο. Ενδεικτική μορφή του διαγράμματος δίνεται στο Σχήμα 26.
2. Ερμηνεύστε τις χαρακτηριστικές καμπύλες που προκύπτουν; Τι συμπεραίνετε ; Τα χαρακτηριστικά μιας ιδανικής φόρτισης φαίνονται στο διάγραμμα Σχήμα 27.
3. Ποια στάδια φόρτισης παρατηρούνται;



Σχήμα 26: Καμπύλες Τάσης-Χρόνου, Έντασης-Χρόνου



Σχήμα 27: Καμπύλες Τάσης-Χρόνου, Έντασης-Χρόνου σε ιδανικές συνθήκες φόρτισης

❖ Συμπεράσματα

Από τα δύο διαγράμματα διακρίνονται τρία στάδια φόρτισης. Αρχικά παρέχεται από την μονάδα κυψελών καυσίμου σταθερή ένταση στο συσσωρευτή, ώσπου η τάση της να φτάσει την ορισμένη τιμή. Στη συνέχεια, προκειμένου η τάση να μην υπερβεί την τιμή αυτή, η τιμή της έντασης μειώνεται και τέλος, εάν η τιμή της τάσης μειωθεί κάτω από το όριο, η ένταση αυξάνεται και πάλι.

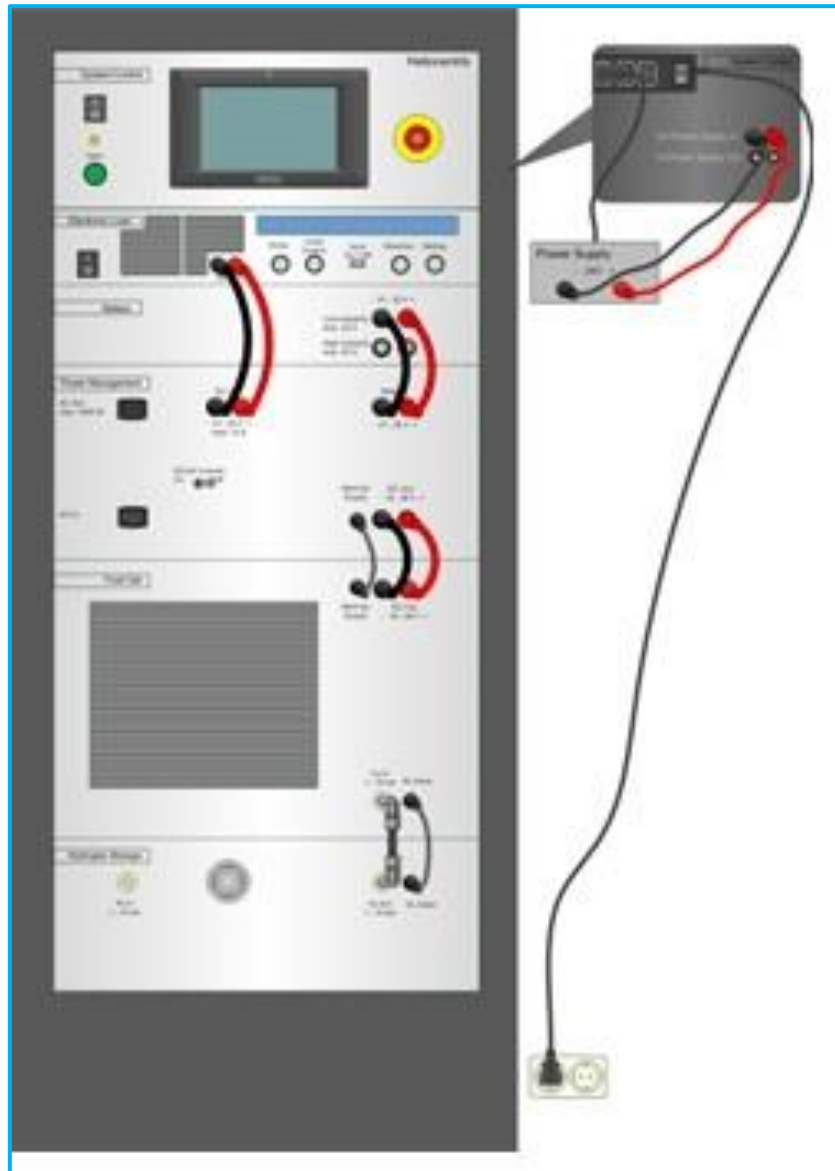
❖ **Γενικές ερωτήσεις:**

1. Γιατί παρατηρούνται διαφορετικά στάδια φόρτισης;
2. Πόσο υψηλή είναι η βέλτιστη τάση των κυψελών καυσίμου κατά τη διάρκεια της φόρτισης με έναν συσσωρευτή;
3. Υπολογίστε την βέλτιστη τάση των κυψελών καυσίμου κατά τη διάρκεια της φόρτισης.
4. Σε πόσο υψηλή τιμή πρέπει να βρίσκετε το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή;
5. Συνίσταται η αποθήκευση ενός αποφορτισμένου συσσωρευτή;

6.3 Εργαστηριακή Άσκηση 3 : Υβριδικό λειτουργία της διάταξης: Μονάδα συσσωρευτών/Κυψέλες καυσίμου

❖ Σκοπός του πειράματος

Συνδυασμός Συσσωρευτή και Κυψελών Καυσίμου για τη δημιουργία Υβριδικού Συστήματος.



Σχήμα 28: Συνδεσμολογία διάταξης

Πίνακας 7: Απαραίτητος εξοπλισμός

Απαραίτητος εξοπλισμός
3 κόκκινα και 3 μαύρα καλώδια (κοντά)
Καλώδιο για την αρχική παροχή ρεύματος (εκκίνηση της συσκευής)
Γέφυρα ζεύξης του υδρογόνου
Καλώδιο για την βαλβίδα υδρογόνου
Μονάδα εξωτερικής παροχής ισχύος

❖ **Πειραματική διαδικασία σε βήματα :**

1. Η συνδεσμολογία για τη διεξαγωγή του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 28.
2. Εκκινήστε το σύστημα.
3. Εκκινήστε τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και ανοίξτε το λογισμικό.
4. Μεταβείτε στην καρτέλα DC/DC του λογισμικού.
5. Επιλέξτε τις παραμέτρους φόρτισης για συσσωρευτή χαμηλής χωρητικότητας.
6. Θέστε τον τρόπο λειτουργία σε Υβριδικό (Hybrid).
7. Θέστε την μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου σε ρύθμιση συνεχούς ρεύματος (CC - mode).
8. Ενεργοποιήστε την είσοδο φορτίου της μονάδας προσομοίωσης DC φορτίου στο λογισμικό.
9. Εκκινήστε την καταγραφή δεδομένων (data acquisition), αφού ρυθμίσετε το χρονικό διάστημα έως 10 δευτερόλεπτα.
10. Δημιουργήστε το παρακάτω προφίλ φορτίου:

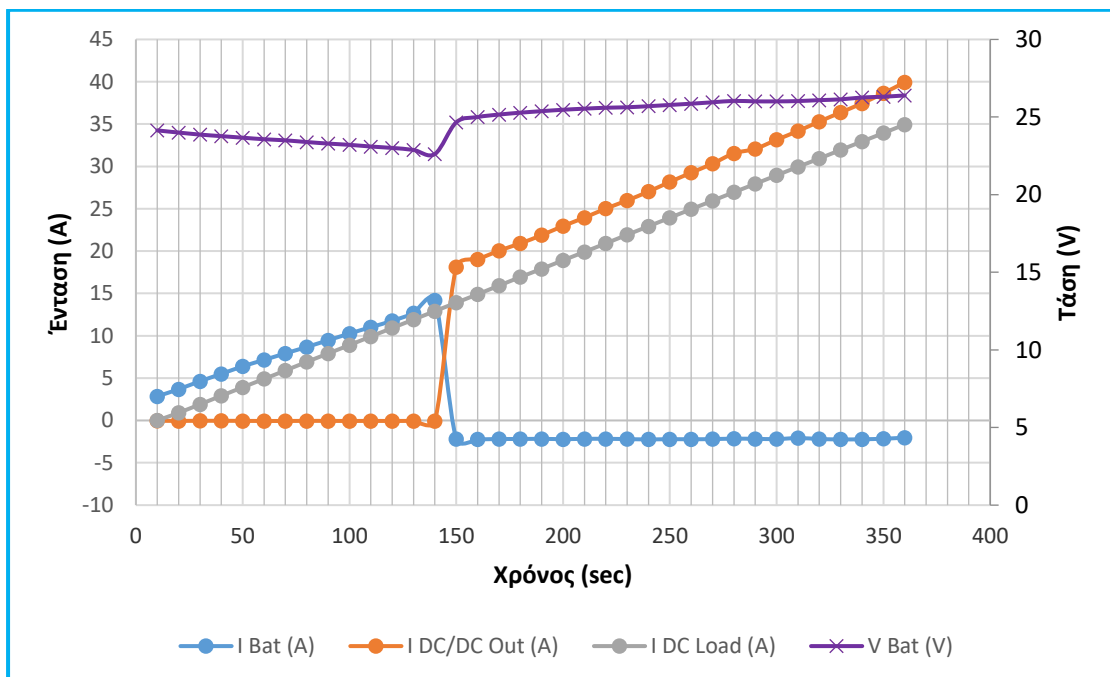
Πίνακας 8: Προφίλ φορτίου

Delay	Unit	Mode	Current
10	S	cc	0
10	S	cc	1
10	S	cc	2
...
10	S	cc	34
10	S	cc	35

11. Εκτελέστε το προφίλ φορτίου.
12. Σταματήστε την καταγραφή δεδομένων.
13. Σταματήστε την κυβέλη καυσίμου και τον μετατροπέα DC / DC .
14. Αποθηκεύστε την απόκτηση δεδομένων σε μια εξωτερική συσκευή αποθήκευσης, πριν από τον τερματισμό λειτουργίας του συστήματος.
15. Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος, τερματίστε τη λειτουργία του Συστήματος Κατάρτισης Nexa Training System.

❖ Ερωτήσεις σχετικά με το πείραμα

1. Συγκρίνετε τις καμπύλες έντασης. Εξηγήστε την εξέλιξή τους. Ενδεικτική μορφή των καμπυλών δίνεται στο Σχήμα 29.
2. Πόσες περιοχές προκύπτουν; Εξηγήστε τες .
3. Τι σημαίνει ο όρος υβριδικό σύστημα;
4. Παρατηρήστε την καταγεγραμμένη ισχύ και την τάση σε κάθε στάδιο φόρτισης σε υβριδική λειτουργία. Τι μπορεί να παρατηρηθεί στο τέλος των κύκλων του προφίλ φορτίου;
5. Εντοπίστε στο διάγραμμα την χρονική στιγμή στην οποία η συστοιχία κυψελών καυσίμου περνά σε υβριδική λειτουργία.
6. Πώς αλλάζει το ρεύμα του συσσωρευτή κατά τη διάρκεια της υβριδικής λειτουργίας;
7. Ποια είναι τα πλεονεκτήματα της υβριδικής λειτουργίας, μεταξύ του συσσωρευτή και των κυψελών καυσίμου;



Σχήμα 29: Καμπύλες Τάσης-Χρόνου, Έντασης-Χρόνου

❖ Συμπεράσματα

Αρχικά η μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου τροφοδοτείται από τον συσσωρευτή. Στη συνέχεια παρατηρούμε πως η ένταση του ρεύματός του μειώνεται απότομα, καθώς ενεργοποιείται η μονάδα κυψελών καυσίμου. Πλέον η μονάδα προσομοίωσης DC φορτίου τροφοδοτείται αποκλειστικά από τις κυψέλες καυσίμου.

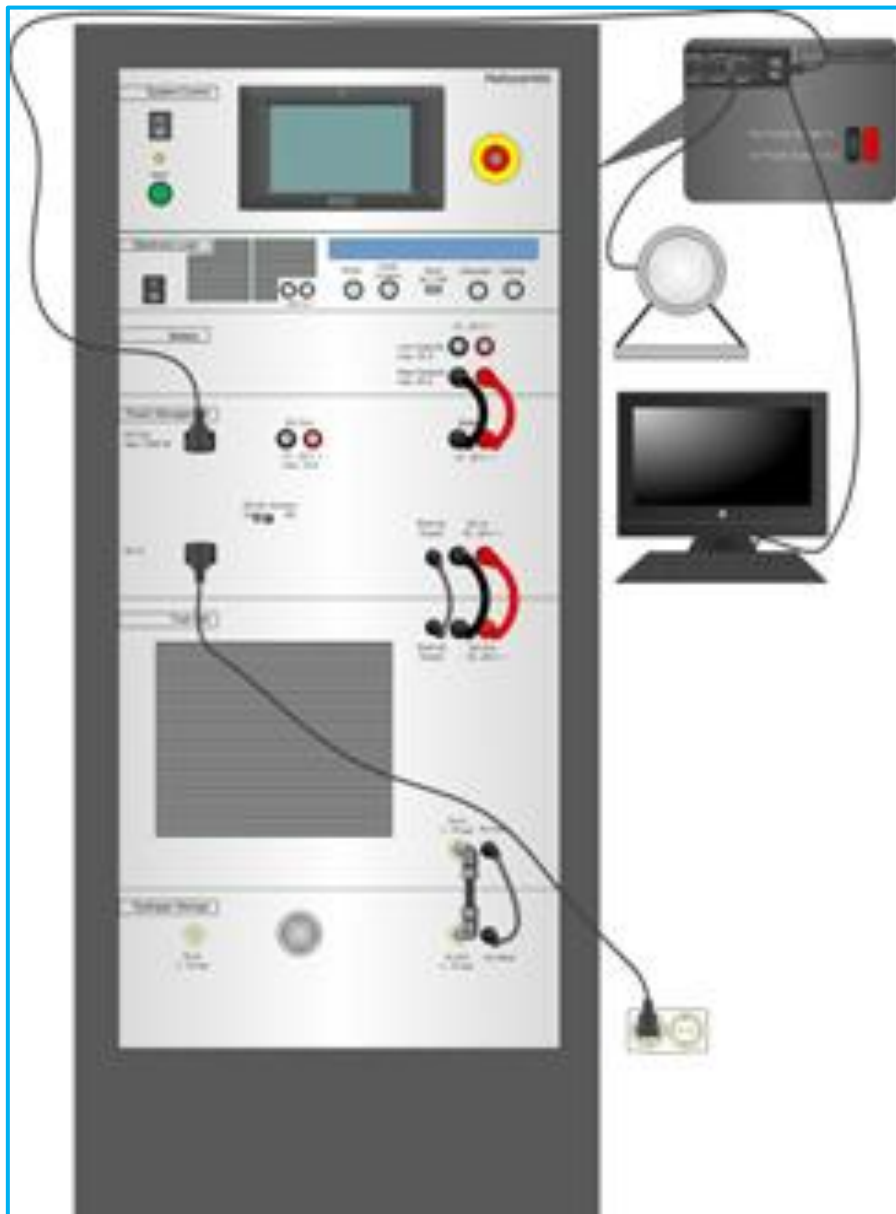
Σημειώστε πως προκειμένου να ερμηνευτεί ορθά η καμπύλη φόρτισης – εκφόρτισης του συσσωρευτή, έχουν αντιστραφεί τα πρόσημα των αντίστοιχων μετρήσεων.

6.4 Εργαστηριακή Άσκηση 4 : Αδιάλειπτη παροχή ενέργειας (UPS)

❖ Σκοπός του πειράματος

Μπορεί το σύστημα κυψελών καυσίμου να εγγραφή αδιάλειπτη τροφοδοσία (UPS) για ένα κέντρο υπολογιστών;

Το φορτίο AC στο πείραμα, αντιπροσωπεύεται από τον υπολογιστή και ένα λαμπτήρα φωτισμού, όπου θα πρέπει να τροφοδοτείται από το σύστημα κυψελών καυσίμου μετά από μια διακοπή ρεύματος. Η λειτουργία του UPS ξεκινά αυτόματα από την κατάσταση αναμονής. Η διακοπή της παροχής του συστήματος επιτυγχάνετε αποσυνδέοντας το τροφοδοτικό AC.



Σχήμα 30: Συνδεσμολογία της διάταξης

Πίνακας 9: Απαραίτητος εξοπλισμός

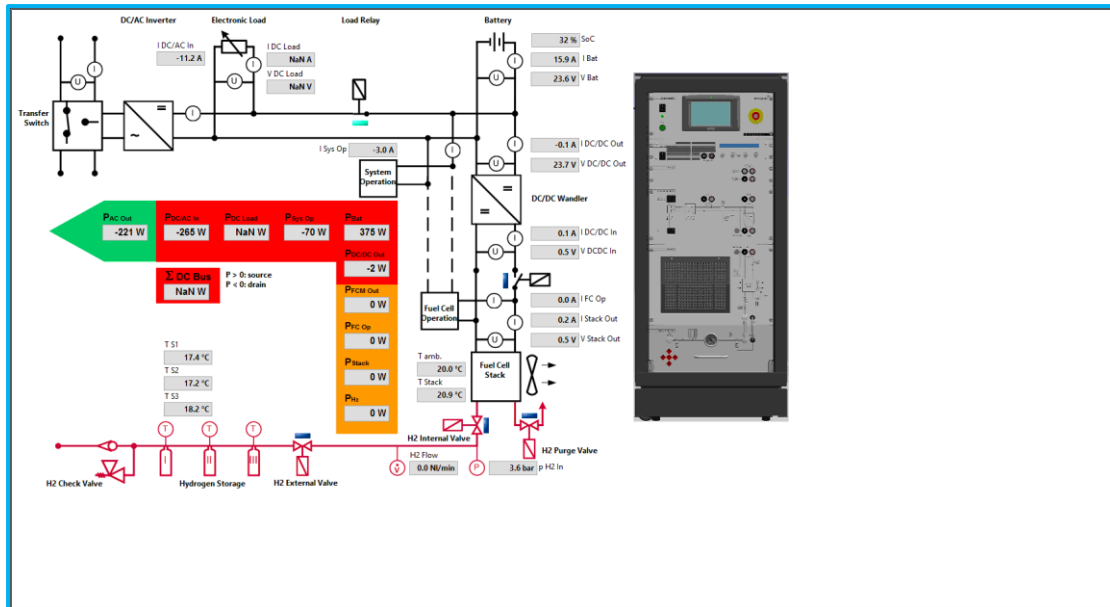
Απαραίτητος εξοπλισμός
2 κόκκινα και 2 μαύρα καλώδια (κοντά)
Καλώδιο για την αρχική παροχή ρεύματος (εκκίνηση της συσκευής)
Γέφυρα ζεύξης του υδρογόνου
Καλώδιο για την βαλβίδα υδρογόνου
Μονάδα κατανάλωσης AC κλειστή
2 IEC καλώδια ρεύματος

❖ **Πειραματική διαδικασία σε βήματα :**

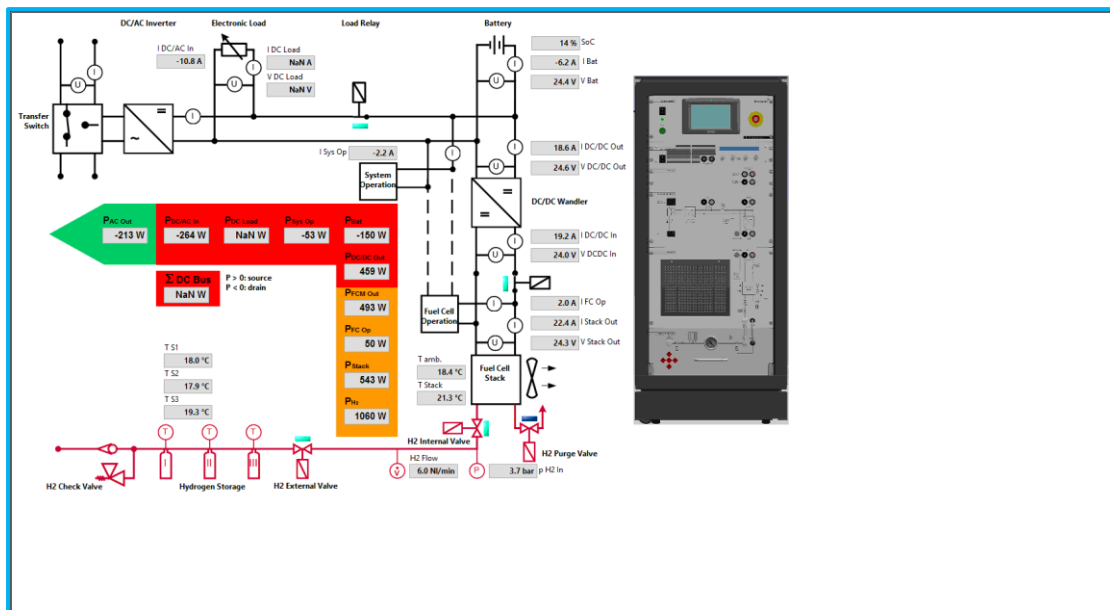
1. Η συνδεσμολογία για τη διεξαγωγή του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 30.
2. Εκκινήστε το σύστημα.
3. Εκκινήστε τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και ανοίξτε το λογισμικό.
4. Μεταβείτε στην καρτέλα DC/DC του λογισμικού.
5. Επιλέξτε τις παραμέτρους φόρτισης για τον υψηλής χωρητικότητας συσσωρευτή.
6. Ρυθμίστε τον τρόπο λειτουργίας σε υβριδική (HYBRID).
7. Ενεργοποιήστε τον διακόπτη DC / AC INVERTER στη θέση ON, στην μονάδα.
8. Εκκινήστε την καταγραφή δεδομένων (data acquisition), ορίστε το χρονικό διάστημα έως 1 δευτερόλεπτο.
9. Αποθηκεύστε τα δεδομένα σε ένα εξωτερικό μέσο αποθήκευσης, επειδή η λειτουργία του υπολογιστή θα τερματιστεί πριν από το τέλος του πειράματος.
10. Ενεργοποιήστε το πρόσθετο φορτίο AC (λαμπτήρας).
11. Ελέγξτε το σύστημα ως προς τα παρακάτω:
 - Παροχή μέσω συσσωρευτή
 - Οι κυψέλες καυσίμου και DC / DC είναι σε κατάσταση αναμονής (Σχήμα 31)
12. Αποσυνδέστε το τροφοδοτικό AC από την είσοδο AC IN για να προσομοιάσετε μια αστοχία δικτύου (διακοπή ρεύματος).

Οι συσσωρευτές τροφοδοτούν τα φορτία αυτόματα προσομοιώνοντας την λειτουργία αδιάληπτης παροχής ενέργειας(UPS) (Σχήμα 32).

13. Παραμείνετε σε λειτουργία UPS έως ότου εκκινήσει η λειτουργία της μονάδα κυψελών καυσίμου.
14. Απενεργοποιήστε το πρόσθετο φορτίο AC.
15. Σταματήστε την καταγραφή δεδομένων.
16. Τερματίστε τη λειτουργία του υπολογιστή .
17. Απενεργοποιήστε τον διακόπτη DC / AC INVERTER.
18. Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος, τερματίστε τη λειτουργία του Συστήματος Κατάρτισης “Nexa Training System”.



Σχήμα 31: Παροχή ισχύος από τη μονάδα συσσωρευτών



Σχήμα 32: Παροχή ισχύος από τη μονάδα κυψελών καυσίμου

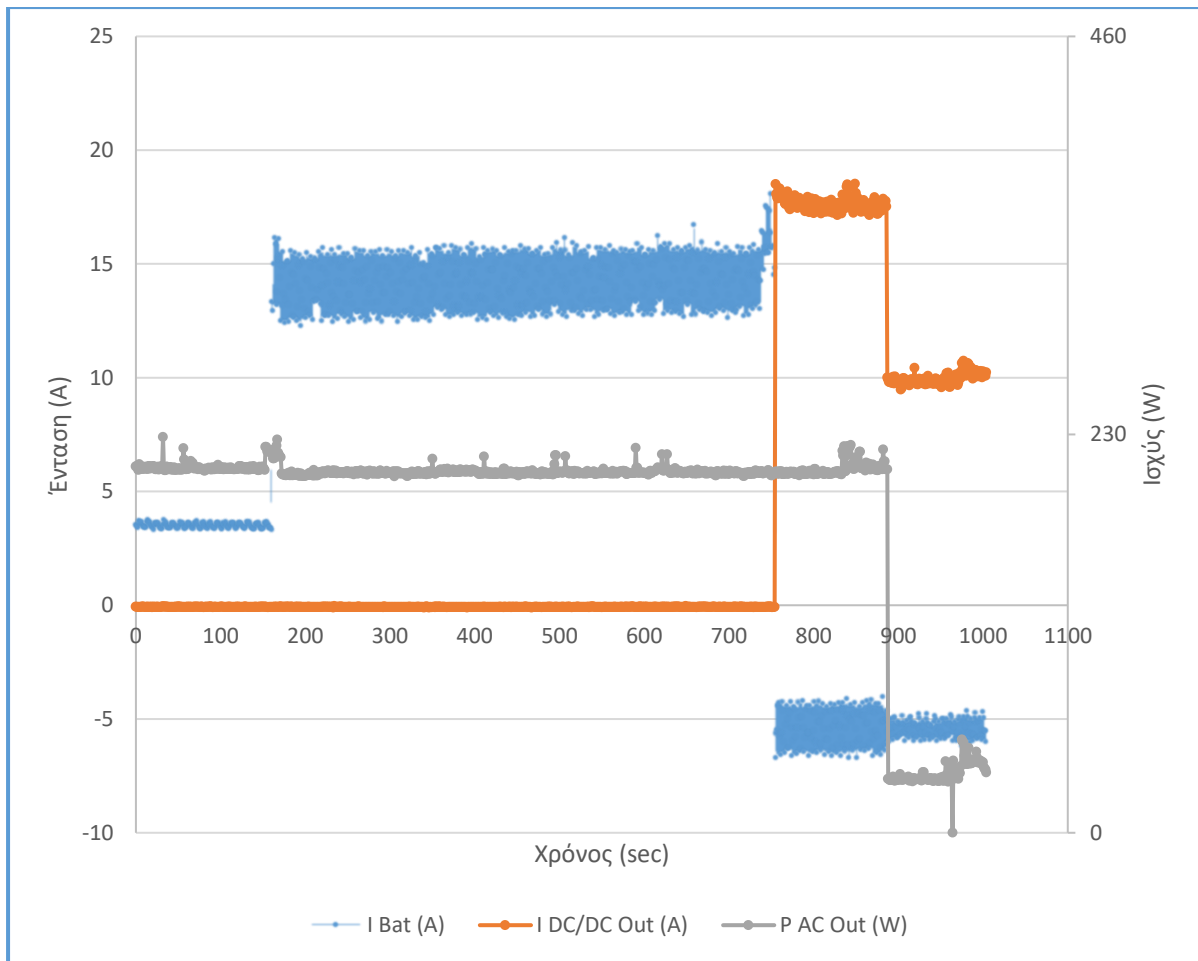
❖ **Ερωτήσεις σχετικά με το πείραμα:**

1. Δημιουργήστε τις χαρακτηριστικές καμπύλες έντασης της συστοιχίας των συσσωρευτών, του μετατροπέα DC / DC και τη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος του μετατροπέα με την πάροδο του χρόνου. Περιγράψτε εν συντομία την εξέλιξή τους. Ενδεικτική μορφή των καμπυλών δίνεται στο Σχήμα 33.
2. Ποια μέρη της διάταξης αναλαμβάνουν την τροφοδοσία των φορτίων ενέργειας μετά την διακοπή απ' το ηλεκτρικό δίκτυο και γιατί;
3. Σε μία διάταξη παροχής αδιάληπτης ισχύος, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν συσσωρευτές πολύ υψηλής χωρητικότητας ή ένα υβριδικό σύστημα κυψελών καυσίμου – συσσωρευτών;
4. Η μονάδα κυψελών καυσίμου αναλαμβάνει την παροχή ισχύος, εφόσον το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών είναι πολύ χαμηλό. Είναι εφικτό η μονάδα κυψελών καυσίμου να αναλάβει την παροχή αμέσως μετά την διακοπή ρεύματος;
5. Ποιες αλλαγές στις παραμέτρους του συστήματος πρέπει να γίνουν, ώστε να επιτευχθεί η εκκίνηση της μονάδας κυψελών καυσίμου νωρίτερα.

Για να επιτευχθεί το παραπάνω, πρέπει να υιοθετηθούν οι παράμετροι φόρτισης. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων αυτών δίνονται στον πίνακα 10.

Πίνακας 10: Παράμετροι φόρτισης

Παράμετροι	Περιγραφή	Χαμηλή Χωρητικότητα	Υψηλή Χωρητικότητα
V Bat min	Ελάχιστη Τάση Συσσωρευτή	23 V	23 V
I charge max	Μέγιστη Ένταση Φόρτισης	2.2 A	5.4 A
I trickle charge	Όριο έντασης ρεύματος για την συντήρηση της τάσης του συσσωρευτή	3.6 A	4.6 A
t trickle charge	Διάρκεια Συντήρησης	10 Min	10 Min
V DC/DC Out max	Μέγιστη τάση συσσωρευτή κατά τη συντήρηση	28.2 V	28.2 V



Σχήμα 33: Καμπύλες Έντασης-Χρόνου, Ισχύος-Χρόνου

❖ Συμπεράσματα

Στο διάγραμμα παρατηρούμε τρία στάδια. Αρχικά το πρόσθετο (εξωτερικό) φορτίο AC (λαμπτήρας) τροφοδοτείται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι συσσωρευτές τροφοδοτούν αποκλειστικά την εσωτερική κατανάλωση της πειραματικής μονάδας.

Στη συνέχεια, όταν διακόπτεται η εξωτερική παροχή ενέργειας, οι συσσωρευτές αναλαμβάνουν την παροχή της στο πρόσθετο φορτίο AC.

Τέλος στο τρίτο στάδιο, η τάση του συσσωρευτή πέφτει κάτω από το ορισμένο όριο και ενεργοποιούνται ο μετατροπέας DC/DC και η μονάδα κυψελών καυσίμου. Κατά το στάδιο αυτό, παρέχουν ενέργεια στον λαμπτήρα, φορτίζοντας παράλληλα και τον συσσωρευτή.

Σημειώστε πως προκειμένου να ερμηνευτεί ορθά η καμπύλη φόρτισης – εκφόρτισης των συσσωρευτών, έχουν αντιστραφεί τα πρόσημα των αντίστοιχων μετρήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Κωνσταντινίδης Δημήτρης**, “Παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού από φωτοβολταϊκό. Μελέτη κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του κτηρίου του παραρτήματος Χανίων του ΤΕΙ Κρήτης με σύστημα φωτοβολταϊκή γεννήτρια – υδρογόνο – κυψέλες καυσίμου”, Χανιά 2005.
- [2] **Σπυρίδων Βουτετάκης, Χ.Μ., Λεονίδας Ντζιαχρήστος, Μ.Μ., Ιωάννης Παναπακίδης, Η.Μ.**, “Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του «καυσίμου του μέλλοντος» - H₂”, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2010.
- [3] “Καύση υδρογόνου σε εμβολοφόρες ΜΕΚ”, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση : http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/1719/avdelidisy_piston.pdf
- [4] **Καραγεωργόπουλος Α.**, “Σχεδιασμός και ασφάλεια εγκαταστάσεων αποθήκευσης υδρογόνου”, 1996.
- [5] **Krishna R., Titus E., Salimian M., Okhay O.**, “Hydrogen Storage for Energy Application”, 2012. (<http://www.intechopen.com/books/hydrogen-storage/hydrogen-storage-for-energy-application>)
- [6] **Von Helmut R., Eberle U.**, “Fuel cell vehicles”, 2007.
(<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527693924.ch08/summary>)
- [7] Ανάκτηση από **Wikipedia**: <https://tinyurl.com/n6b6lft>
- [8] Ανάκτηση από **Wikipedia**: <https://el.wikipedia.org/wiki/Αμμωνία>
- [9] **Sakintun B, Lamari–Darkrim F, Hirscher M**, “Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review”, Elsevier Ltd., 2007.
- [10] **Παπαμελέτης Α. Κυριάκος**, «Αξιοποίηση τεχνολογιών υδρογόνου», Πτυχιακή Εργασία, Χαλκίδα 2012.
- [11] **Odile Bertoldi, Sebastien Berger**, Article “Report on Energy, Draft Version”, European Commission, ObservatoryNANO, August 2009.
- [12] Ανάκτηση από **Wikipedia**: http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell
- [13] **Μιχάλης Ι. Βαλάκας**, “Χρήση Υδρογόνου ως Εναλλακτική Πηγή Ενέργειας”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, Διπλωματική εργασία, 2007.
- [14] Ανάκτηση από: **Χήρας Χρήστος**, Το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας, Πτυχιακή Εργασία, Καβάλα 2009.

