

«Καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω Κυψελών Καυσίμου – Εφαρμογές»

Σάββας Τσοτουλίδης, Διπλ. Ηλ. Μηχ/κός,
Υποψήφιος Διδάκτορας, Εργαστήριο Ηλεκτρο-
μηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο
Πατρών, τηλ.: 2610-997351, Fax:2610-997362,
e-mail: stsotoulidis@ece.upatras.gr

Αθανάσιος Σαφάκας, Καθ. Δρ. -Μηχανικός,
Πανεπιστήμιο Πατρών, Διευθυντής Εργαστηρίου
Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας
τηλ.: 2610-997351, Fax:2610-997362,
e-mail: a.n.safacas@ece.upatras.gr

Περίληψη:

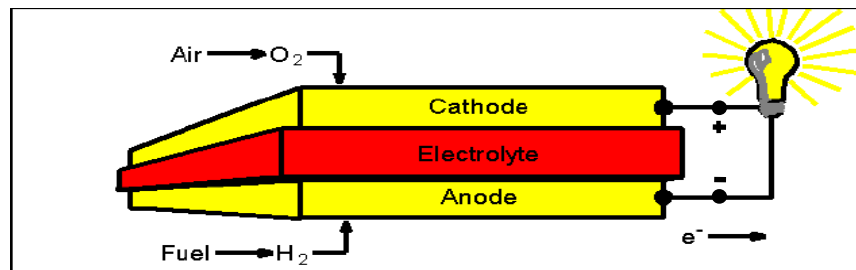
Τα τελευταία χρόνια, μεγάλη ερευνητική προσπάθεια και έντονοι ρυθμοί ανάπτυξης τεχνολογίας επικεντρώνονται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και ήδη έχει επιτευχθεί ευρεία εφαρμογή αυτών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζουν τα συστήματα κυψελών καυσίμου, διότι παρουσιάζουν υψηλή ενεργειακή απόδοση, υψηλή πυκνότητα ισχύος και είναι αθόρυβα, αφού δεν διαθέτουν κινητά μέρη. Επιπρόσθετα, δεν παράγουν καθόλου ρύπους κατά την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, όπως: **μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, φωσφορικού οξέως, αλκαλικές, τήγματος ανθρακικών αλάτων και στερεών οξειδίων**. Τα συστήματα για αυτή τη μετατροπή αντλούν την πρωτογενή ενέργεια κυρίως από αποθηκευμένο **υδρογόνο ή υδρογονάνθρακες** και μέσω κατάλληλης ηλεκτροχημικής διεργασίας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Οι συστοιχίες κυψελών καυσίμου, ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθός τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οικιακή ή βιομηχανική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, πέραν της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται εκμετάλλευση και της παραγόμενης θερμότητας για τη θέρμανση χώρων ή τη θέρμανση υλικών σε μια βιομηχανική διεργασία. Επιπλέον, ευρεία χρήση των συστοιχιών κυψελών καυσίμου πραγματοποιείται στα συστήματα ηλεκτροκίνησης τόσο σε επιβατικά οχήματα όσο και στα μέσα μαζικής μεταφοράς. Σπουδαίο ρόλο για τη διάθεση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παίζουν οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Μέσω αυτών, **η παραγόμενη από τις κυψέλες καυσίμου συνεχή ηλεκτρική τάση** μετατρέπεται σε συνεχή τάση άλλης στάθμης ή σε εναλλασσόμενη τάση μεταβαλλόμενου πλάτους και συχνότητας. Ερευνητική πρόκληση αποτελεί η σχεδίαση και η κατασκευή ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι μετατρέπουν με βέλτιστο τρόπο την παραγόμενη ενέργεια των συστοιχιών κυψελών καυσίμου με προσαρμογή στις εκάστοτε λειτουργικές ιδιότητες αυτών όπως θερμοκρασιακές μεταβολές, εξάρτηση της παραγόμενης

ηλεκτρικής τάσης από το φορτίο κ.λ.π. Οι εξελίξεις στον τομέα αυτό είναι ραγδαίες, το δε κόστος των κυψελών καυσίμου μειώνεται διαρκώς.

1. Εισαγωγή [1,3,6]

Η κυψέλη καυσίμου είναι ένας ηλεκτροχημικός μετατροπέας ενέργειας που μετατρέπει την χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική παράγοντας συνεχή ηλεκτρική τάση. Συνήθως, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύσιμα πραγματοποιείται σε πολλά στάδια ενεργειακών μετατροπών. Πιο συγκεκριμένα: α) μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμότητα μέσω καύσης, β) χρησιμοποίηση της θερμότητας για παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης, γ) χρησιμοποίηση του ατμού για τη λειτουργία ενός στροβίλου, όπου η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική – περιστροφική και δ) μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω μιας γεννήτριας.

Η κυψέλη καυσίμου παρακάμπτει όλες τις παραπάνω μετατροπές, αφού παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω μόνο ενός σταδίου, χωρίς να εμπλέκονται κινούμενα μέρη κατά τη διαδικασία της μετατροπής αυτής όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.



Σχ. 1: Η κυψέλη καυσίμου παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση απευθείας από καύσιμο[12].

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου μοιάζει με αυτή ενός ηλεκτροχημικού συσσωρευτή. Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο και παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Σε αντίθεση με έναν ηλεκτροχημικό συσσωρευτή, μια κυψέλη καυσίμου απαιτεί συνεχή τροφοδοσία καυσίμου και οξυγόνου. Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρόδια της κυψέλης δεν υποβάλλονται σε αλλαγές ως προς τη χημική τους σύσταση. Οι μπαταρίες, ως γνωστόν, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η πραγματοποίηση αυτών των αντιδράσεων βασίζεται σε αντιδρώντα στοιχεία, τα οποία ήδη υπάρχουν μέσα στους συσσωρευτές. Εξαιτίας αυτού, οι μπαταρίες εκφορτίζονται, όταν τα αντιδρώντα εξαντλούνται. Μία κυψέλη καυσίμου δε μπορεί να «εκφορτιστεί» εφόσον το καύσιμο και το οξυγόνο τροφοδοτούνται διαρκώς. Τυπικά αντιδρώντα στοιχεία για τις κυψέλες καυσίμου είναι το υδρογόνο και το οξυγόνο, όχι κατά ανάγκην

υψηλής καθαρότητας. Το υδρογόνο ως καύσιμο μπορεί να παρουσιάζεται είτε ως μίγμα με άλλα αέρια (όπως CO₂, N₂, CO), είτε υπό μορφή υδρογονανθράκων όπως το φυσικό αέριο, CH₄, είτε σε μορφή υγρών υδρογονανθράκων όπως μεθανόλη, CH₃OH. Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει αρκετό οξυγόνο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις κυψέλες καυσίμου. Τέλος, τα προϊόντα που παράγονται από την ηλεκτροχημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα μέσα στην κυψέλη καυσίμου είναι νερό και αρκετή ποσότητα θερμότητας.

2. Σύνοψη ιστορική αναδρομή για την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου[1,2]

Αν και οι κυψέλες καυσίμου είναι ένα σύγχρονο τεχνολογικό επίτευγμα, η αρχή λειτουργίας τους ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Sir William Grove. Ο Francis T. Bacon ξεκίνησε να εργάζεται πάνω στις κυψέλες καυσίμου το 1937, προκειμένου οι διατάξεις αυτές να αποκτήσουν μια πιο πρακτική εφαρμογή. Μετά από συνεχείς προσπάθειες ανέπτυξε μια συστοιχία κυψελών καυσίμου ονομαστικής ισχύος 6 kW στα τέλη τις δεκαετίας του 1950. Παρόλα αυτά, η πρώτη ουσιαστική εφαρμογή των κυψελών καυσίμου έγινε σε ένα σύστημα στο πλαίσιο διαστημικού προγράμματος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Η εταιρία General Electric ανέπτυξε κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Gemini στις αρχές του 1960. Στη συνέχεια ακολούθησε το διαστημικό πρόγραμμα Apollo, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν κυψέλες καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την κάλυψη των ανθρώπινων καθώς και τηλεπικοινωνιακών αναγκών στο δορυφόρο. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου κατασκευάστηκαν από τους Pratt και Whitney, και βασίστηκαν στην ιδέα του Bacon. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 η εταιρία General Motors κατασκεύασε ένα πειραματικό φορτηγό όχημα με κυψέλες καυσίμου. Το 1989 η εταιρία Perry Energy Systems σε συνεργασία με την Ballard κατασκεύασαν ένα υποβρύχιο, που τροφοδοτούνταν από συστοιχία κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Το 1993 η εταιρία Ballard παρουσίασε αστικά λεωφορεία που τροφοδοτούνταν από κυψέλες καυσίμου. Η Energy Partners, μια θυγατρική της Perry Energy Systems δημιούργησε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου το 1993. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες υποστηριζόμενες από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α., περί τα τέλη του προηγούμενου αιώνα κατασκεύασαν πειραματικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία κυψελών καυσίμου.

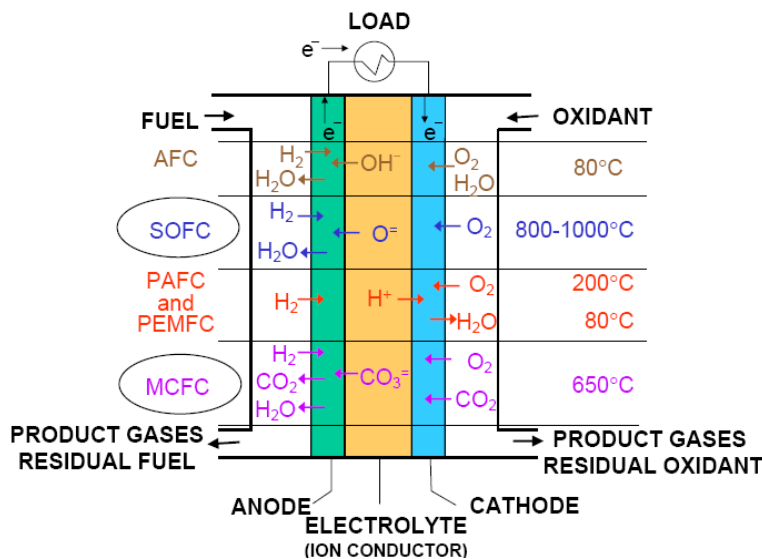
3. Τα είδη των κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν ως ακολούθως:

- α) **Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)**, όπου χρησιμοποιείται ΚΟΗ ως ηλεκτρολύτης σε συγκέντρωση 85 wt% όταν η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασία 250 °C και σε συγκέντρωση 35 – 50 wt% για θερμοκρασίες μικρότερες των 120 °C. Τέτοιου είδους κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα Apollo.
- β) **Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)**, όπου χρησιμοποιείται πολυμερές περφλουροσουλφιδικό οξύ ως ηλεκτρολύτης. Ο καταλύτης αποτελείται από πλατίνα που εναποτίθεται σε στρώμα άνθρακα. Εάν η τροφοδοσία με υδρογόνο περιέχει μέρη μονοξειδίου του άνθρακα, τότε χρησιμοποιούνται κράματα Pt –Ru ως καταλύτες. Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτών των κυψελών κυμαίνεται μεταξύ 60 και 80 °C. Τα PEMFC είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικά για εφαρμογές στην αυτοκίνηση, αλλά και σε σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας για κατανεμημένη παραγωγή.
- γ) **Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC)**, όπου χρησιμοποιείται φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτης. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ 150 και 220 °C. Τα PAFC έχουν εισέλθει στην παγκόσμια αγορά σε σταθμούς βάσης με ισχύ της τάξεως των 200 kW.
- δ) **Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)**, στις οποίες ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από ανθρακικά αλκάλια μέσα σε μία κεραμική μήτρα από LiAlO₂. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας βρίσκονται μεταξύ 600 και 700 °C. Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες δεν απαιτούνται ευγενή μέταλλα ως καταλύτες. Αυτού του τύπου κυψέλες καυσίμου έχουν εφαρμοστεί σε πειραματικούς σταθμούς βάσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- ε) **Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)**, στις οποίες χρησιμοποιείται ένα μη πορώδες στερεό οξείδιο ως ηλεκτρολύτης. Αυτές οι κυψέλες λειτουργούν στους 800 με 1000 °C, στις οποίες έχουμε αγωγή ιόντων οξυγόνου. Τα SOFC, όμοια με τα MCFC, χρησιμοποιούνται σε πειραματικούς σταθμούς βάσης παραγωγής αλλά και σε φορητές μονάδες ως βοηθητική πηγή σε οχήματα.

Πολλές φορές οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC) αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία, αλλά με βάση τα ανωτέρω κριτήρια (το είδος του ηλεκτρολύτη) εμπεριέχονται στις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, όπου αντί ως καύσιμο χρησιμοποιούν μεθανόλη αντί για υδρογόνο.

Το σχήμα 2 συνοψίζει τις βασικές αρχές, τα είδη και τα αντιδρώντα των κυψελών καυσίμου.



Σχ. 2: Τα είδη, τα αντιδρώντα και οι θερμοκρασίες λειτουργίας των κυψελών καυσίμου[12].

4. Ιδιότητες – χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου[1]

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή τεχνολογία με πληθώρα πιθανών εφαρμογών, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν σε σύγκριση με τις υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας. Αναλυτικότερα:

- α) Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν υψηλότερο θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις θερμικές μηχανές. Οι θερμικές μηχανές, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι ατμοστρόβιλοι και οι αεριοστρόβιλοι, μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε θερμότητα και στη συνέχεια σε μηχανικό έργο. Ο βέλτιστος θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης (Carnot) μιας θερμικής μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Efficiency}_{\max} = 1 - (T_2/T_1) \quad (1)$$

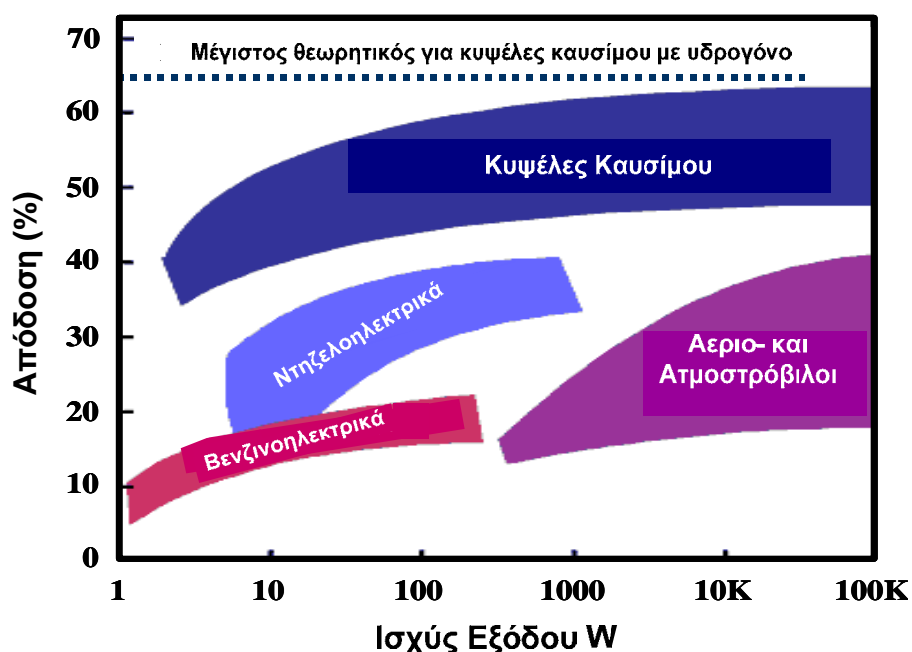
όπου:

T_1 = Απόλυτη θερμοκρασία εισερχόμενου (θερμού) αερίου

T_2 = Απόλυτη θερμοκρασία εξερχόμενου (ψυχρού) αερίου

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου αερίου και όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου, τόσο μεγιστοποιείται ο βαθμός απόδοσης. Επομένως, θεωρητικά, καθώς αυξάνουμε την θερμοκρασία του εισερχόμενου αερίου μπορούμε να πετύχουμε οποιονδήποτε βαθμό απόδοσης, αφού η θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου δεν

μπορεί να είναι χαμηλότερη από εκείνη του περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά, σε πραγματικές μηχανές εσωτερικής καύσης η θερμοκρασία εισόδου της μηχανής είναι η θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής, η οποία είναι πολύ μικρότερη από τη θερμοκρασία ανάφλεξης. Αφού στις κυψέλες καυσίμου δεν πραγματοποιείται καύση, η απόδοσή τους δεν σχετίζεται με την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι ο βαθμός απόδοσης κατά τη μετατροπή ενέργειας (ηλεκτροχημική αντίδραση σε σχέση με την καύση) γίνεται σημαντικά μεγαλύτερος στις κυψέλες καυσίμου. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των βαθμών απόδοσης των κυψελών καυσίμου συγκρίνονται με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παρουσιάζονται στο σχήμα 3.



Σχ. 3: Σύγκριση βαθμού απόδοσης συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας[12].

β) Οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο, έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων και τα μόνα «καυσαέρια» που εκλύουν είναι ο αχρησιμοποίητος αέρας και το νερό. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς, σε εσωτερικούς χώρους και στα υποβρύχια. Παρόλα αυτά όμως το υδρογόνο δεν είναι ένα στοιχείο που το συναντούμε ελεύθερο στη φύση. Επομένως σε μερικές εφαρμογές απαιτείται ένα προστάδιο επεξεργασίας καυσίμου με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου από μεθανόλη. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν εκπομπές κάποιων καυσαερίων μεταξύ των οποίων και διοξείδιο του άνθρακα. Γενικά αυτές οι εκπομπές είναι χαμηλότερες σε σχέση με εκείνες που προέρχονται από τις συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας.

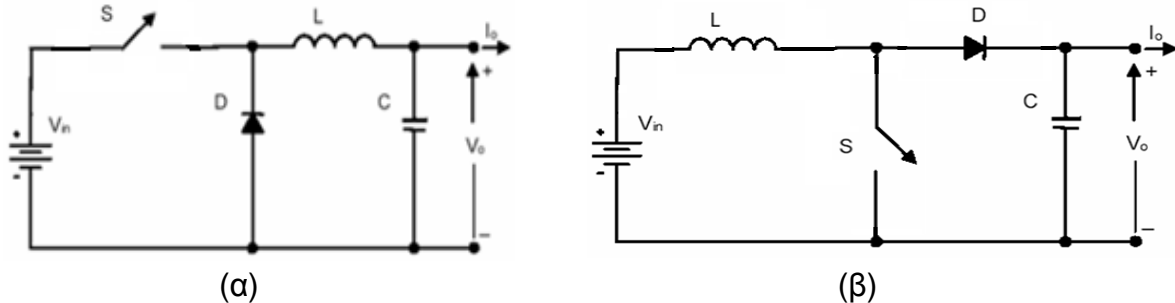
- γ) Οι κυψέλες καυσίμου διαθέτουν μια απλή δομή. Αποτελούνται από στρώσεις επαναλαμβανόμενων στοιχείων και δεν έχουν κινούμενα μέρη. Εξαιτίας αυτού έχουν τη δυνατότητα να παράγονται μαζικά με κόστος συγκρίσιμο με αυτό των σημερινών συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Σήμερα, οι κυψέλες καυσίμου είναι ακριβές κυρίως λόγω των υλικών κατασκευής τους όπως είναι τα πολυμερή στις μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων και των ευγενών μετάλλων που χρησιμοποιούνται ως καταλύτες και παράγονται σε μικρές ποσότητες.
- δ) Οι κυψέλες καυσίμου δεν παράγουν θόρυβο, πράγμα που τις κάνει ιδιαίτερα ελκυστικές σε στρατιωτικές εφαρμογές και σε εφεδρικά συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
- ε) Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο, το οποίο δεν συναντάται ελεύθερο στη φύση, αλλά μπορεί να παραχθεί από εγχώριες πρώτες ύλες. Η παραγωγή μπορεί να γίνει είτε μέσω ηλεκτρόλυσης είτε μέσω αναμόρφωσης υδρογονανθράκων. **Η χρήση εγχώριων πηγών (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πυρηνική ενέργεια, βιομάζα, κάρβουνο ή φυσικό αέριο) για παραγωγή υδρογόνου μπορεί να μειώσει ουσιαστικά την εξάρτηση από το εισαγόμενο πετρέλαιο, πράγμα το οποίο θα επιδράσει στην εθνική οικονομική σταθερότητα.**

5. Χρήση ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος στα συστήματα κυψελών καυσίμου[8,14,15]

Ένα ηλεκτρικό υποσύστημα είναι απαραίτητο για να μεταφέρει και να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου στους καταναλωτές. 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 μετατροπών 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.

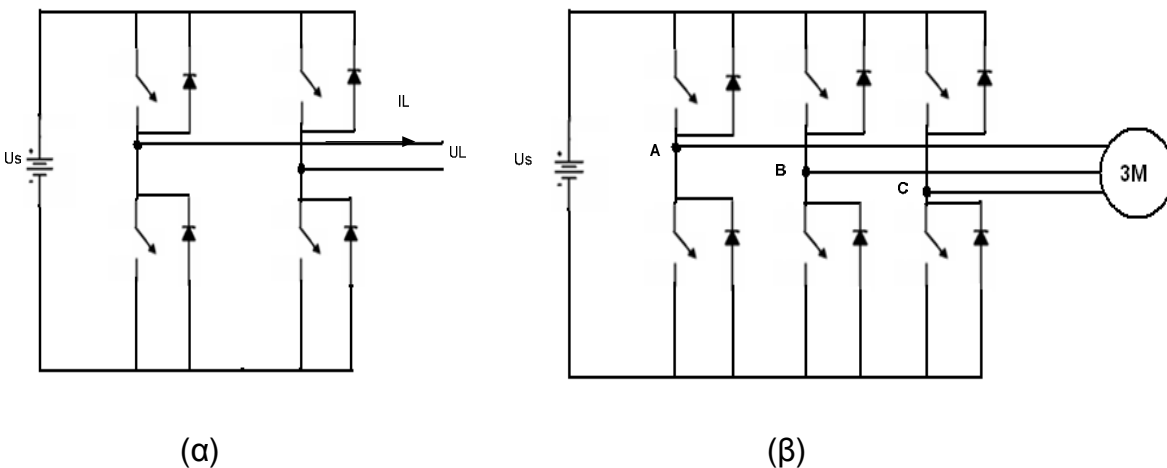
Το ηλεκτρικό δυναμικό μιας κυψέλης μεταβάλλεται έντονα με τις μεταβολές του ρεύματος φορτίου και εξαρτάται από τη θερμοκρασία της κυψέλης καθώς και την παροχή καυσίμου και οξυγόνου. Η διακύμανση της ηλεκτρικής τάσης στην περιοχή λειτουργίας της κυψέλης είναι της τάξης του 30 έως 40 % επί της ονομαστικής 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:



Σχ. 4: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση με: (α) υποβιβασμό τάσης, (β) ανύψωση τάσης.

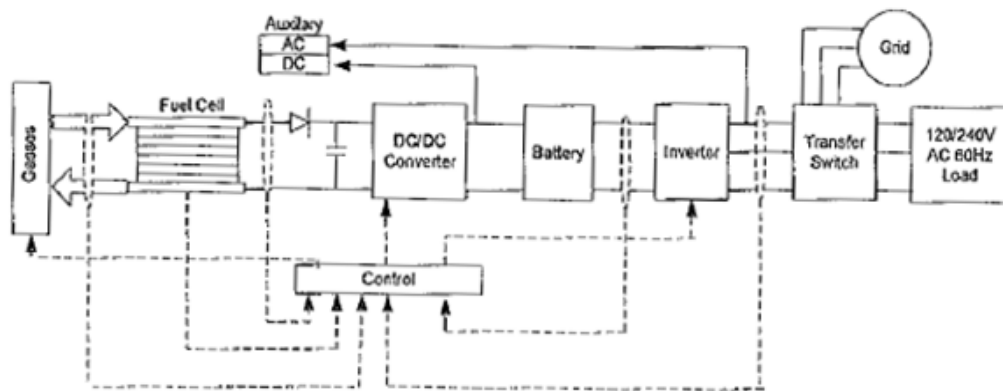
Οι κυψέλες καυσίμου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παράγουν συνεχή τάση, αλλά τα περισσότερα φορτία απαιτούν τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μετά από τον μετατροπέα συνεχής τάσης συνδέεται ένας αντιστροφέας, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη κατάλληλης ενεργούς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



Σχ. 5: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη: (α) μονοφασικός αντιστροφέας, (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 μετατροπών.

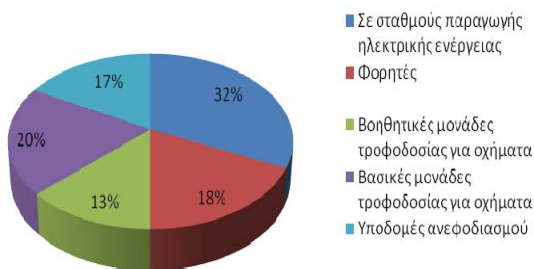


Σχ. 6: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος σύνδεσης των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο και με τοπικά φορτία[1].

6. Εφαρμογές συστοιχιών κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου λόγω των χαρακτηριστικών λειτουργίας και της κατασκευαστικής τους δομής έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος, από μερικά mW έως αρκετές εκατοντάδες kW. Έχουν ήδη κατασκευαστεί αυτοκίνητα, λεωφορεία, και ποδήλατα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου. Είναι επίσης ιδανικά για μονάδες κατανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κτίρια προσφέροντας ευελιξία στην τροφοδοσία ισχύος, ειδικά όταν συνδυάζονται και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Χρησιμοποιούνται για εφεδρικά συστήματα τροφοδοσίας μεγάλης ή μικρής κλίμακας (UPS) και μπορούν να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες σε φορητές συσκευές.

Σε μια παγκόσμια έρευνα αγοράς που διεξήγαγε το «US Fuel Cell Council» αναφέρεται η κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου ανά εφαρμογή (Σχ.7).



(α)

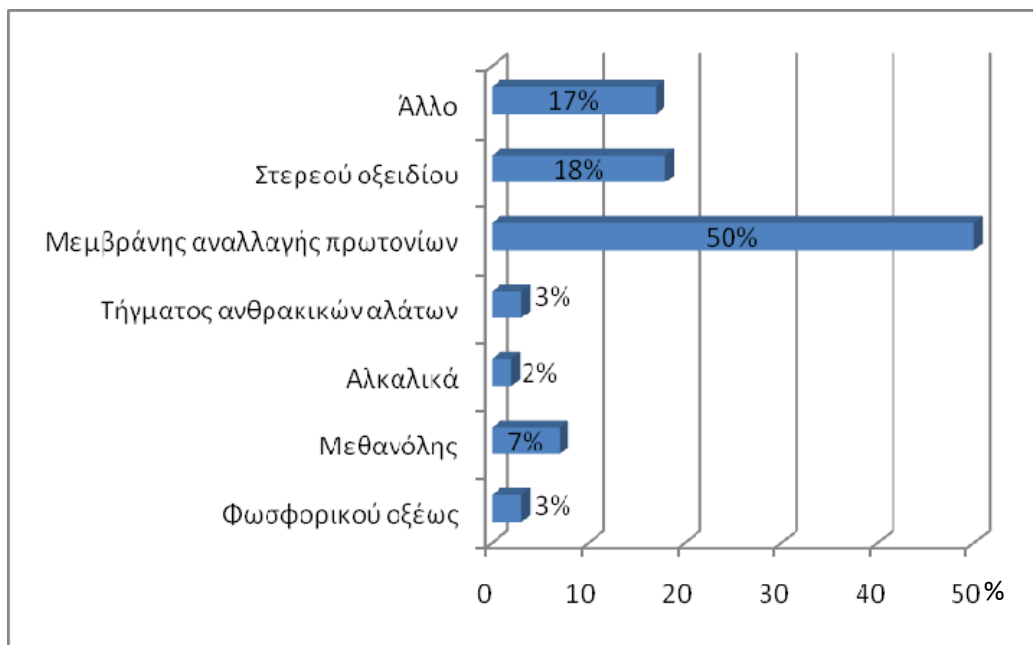
Εφαρμογές	Η.Π.Α.	Ιαπωνία	Ευρώπη	Καναδάς
Σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	55	17	30	33
Φορητές	42	2	16	20
Βοηθητικές μονάδες τροφοδοσίας για οχήματα	27	5	17	25
Βασικές μονάδες τροφοδοσίας για οχήματα	28	10	15	36
Υποδομές ανεφοδιασμού	33		23	-
Σύνολο	185	35	101	114

(β)

Σχ. 7: Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου (α) ανά εφαρμογή και (β) ανά χώρα[11].

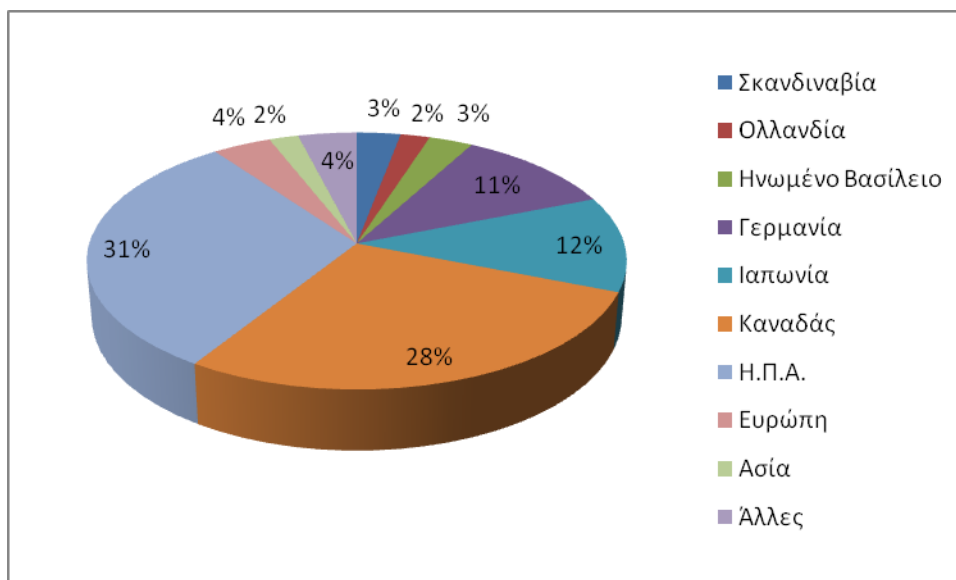
Οι εφαρμογές σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς (32%), ενώ ακολουθούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με 20%.

Οι εταιρίες και οι δραστηριότητες των ερευνητικών κέντρων επικεντρώνονται στην ανάπτυξη κυρίως κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και λιγότερο σε αυτές του στερεού οξειδίου, όπως φαίνεται στην έρευνα που έκανε το «US Fuel Cell Council» το 2007(Σχ. 8).



Σχ. 8: Η κατανομή των παραγόμενων κυψελών καυσίμου ανά είδος το έτος 2007[11].

Ακολουθεί η γεωγραφική κατανομή των εταιριών και των ερευνητικών κέντρων, που αναπτύσσουν την τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Παρατηρούμε ότι την πρώτη θέση καταλαμβάνει ο Καναδάς και στη συνέχεια ακολουθούν οι Η.Π.Α. και η Γερμανία (Σχ. 9).



Σχ. 9: Γεωγραφική κατανομή των εταιριών και ερευνητικών κέντρων που αναπτύσσουν την τεχνολογία κυψελών καυσίμου[11].

6.1 Εφαρμογές στα Μέσα Μεταφοράς[4,16]

Οι κατασκευαστικές εταιρίες των κυψελών καυσίμου επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους για εφαρμογές των τεχνολογιών που αναπτύσσουν στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα λόγω του προβλεπόμενου μεγέθους της αγοράς. Τα καινοτόμα αυτοκίνητα αποτελούν ένα μεγάλο κίνητρο για την ανάπτυξη τεχνολογιών κυψελών καυσίμου, αφού τα συμβατικά συμβάλουν σημαντικά στην μόλυνση της ατμόσφαιρας.

Σχεδόν όλες οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν κατασκευάσει πρότυπα οχήματα κυψελών καυσίμου και έχουν ανακοινώσει τη μαζική παραγωγή τους στο άμεσο μέλλον. Αρκετά από αυτά χρησιμοποιούν μόνο κυψέλες υδρογόνου ως πηγή τροφοδοσίας, ενώ κάποια άλλα χρησιμοποιούν και μπαταρίες ως εναλλακτική πηγή τροφοδοσίας. Το καύσιμο είναι είτε καθαρό υδρογόνο σε υγρή ή αέρια μορφή, είτε από αναμόρφωση. Φωτογραφίες μερικών αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου παρουσιάζονται στη συνέχεια.

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. Πολλά πρότυπα οχήματα έχουν εγκατεστημένο έναν αναμορφωτή καυσίμου

και έτσι μπορούν να τροφοδοτούνται απευθείας με υδρογονάνθρακες. Βέβαια, η εγκατάσταση αναμορφωτών αυξάνει το κόστος, την πολυπλοκότητα της κατασκευής του αυτοκινήτου και επιπλέον έχουμε έκλυση επιβλαβών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα, λιγότερα βεβαίως από αυτά των μηχανών εσωτερικής καύσης.



Ford THINK FCV



DaimlerChrysler Nekar 4



DaimlerChrysler Jeep Commander



Honda FCX V3



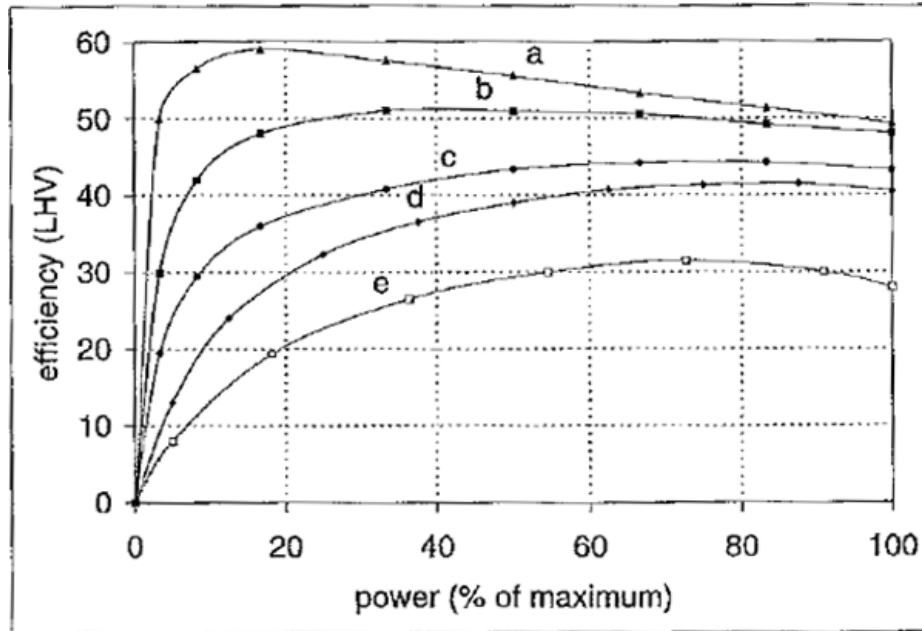
Mazda Premacy FC-EV



Nissan Xterra FCV

Εικόνα 1: Πρότυπα αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου.

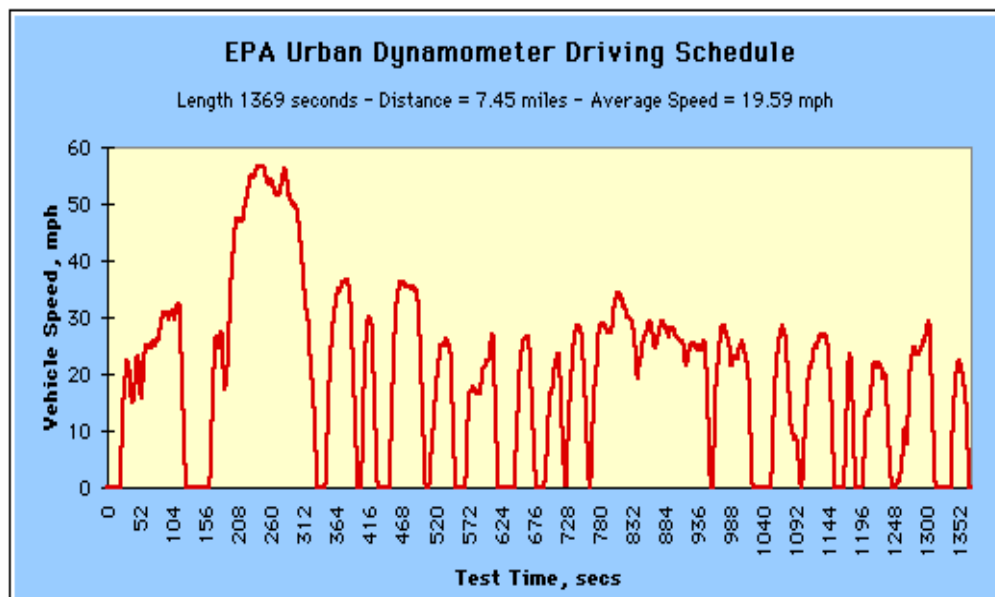
Οι αποδόσεις των κυψελών καυσίμου και των μηχανών εσωτερικής καύσης δεν πρέπει να συγκρίνονται μόνο στα σημεία μέγιστης ισχύος τους. Οι δύο αυτές τεχνολογίες παρουσιάζουν δυο εντελώς διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες απόδοσης – ισχύος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 10:



Σχ. 10: Σύγκριση 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 (βενζινοκινητήρας)[1].

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**, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 11, 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.



Σχ. 11: Δυναμομετρημένος αστικός τρόπος οδήγησης από το EPA (Environmental Protection Agency) των Η.Π.Α[10].

Πέραν των μικρών επιβατικών αυτοκινήτων, τα συστήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται και σε επαγγελματικά οχήματα καθώς και σε αστικά λεωφορεία. 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.

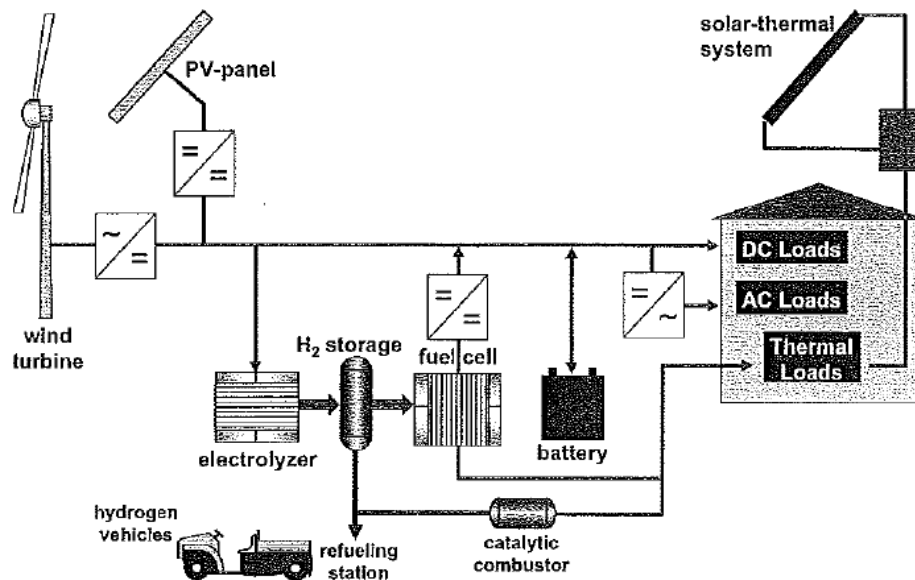
6.2 Εφαρμογές σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Πολλά συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν κατασκευαστεί για στατικές εφαρμογές. Ο βασικός σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων δεν διαφέρει και πολύ από εκείνων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα. Παρόλα αυτά, σε αυτές τις εφαρμογές

υπάρχουν κάποια κρίσιμα ζητήματα όπως είναι η επιλογή του καυσίμου, οι κλιματολογικές συνθήκες και η απομάκρυνση της εκλυόμενης θερμότητας. Επιπρόσθετα, οι απαιτήσεις σε βάρος και όγκο δεν είναι τόσο κρίσιμες όπως στις φορητές εφαρμογές. Τα επιτρεπτά επίπεδα θορύβου είναι χαμηλότερα για τις εφαρμογές στην, ειδικά στην περίπτωση που είναι εγκατεστημένες σε εσωτερικούς χώρους. Οι χρόνοι εκκίνησης στα ηλεκτρικά οχήματα που διαθέτουν κυψέλες καυσίμου είναι τις τάξεις των μερικών δευτερολέπτων, ενώ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για την εκκίνηση παρά μόνο αν χρησιμοποιούνται ως εφεδρικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κύριες εφαρμογές των κυψελών καυσίμου σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- α) Πηγή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας αντικαθιστώντας το δίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές.
- β) Πηγή διασυνδεδεμένη παράλληλα με το δίκτυο, λειτουργώντας είτε ως σταθμός βάσης είτε καλύπτοντας τις αιχμές ζήτησης.
- γ) Συνδυασμός με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους που οι άλλες πηγές δεν καλύπτουν τη ζήτηση. Μια τέτοια διασύνδεση παρουσιάζεται στο σχήμα 12.
- δ) Εφεδρικά συστήματα τροφοδοσίας όταν το δίκτυο αδυνατεί να παρέχει ενέργεια λόγω βλάβης.

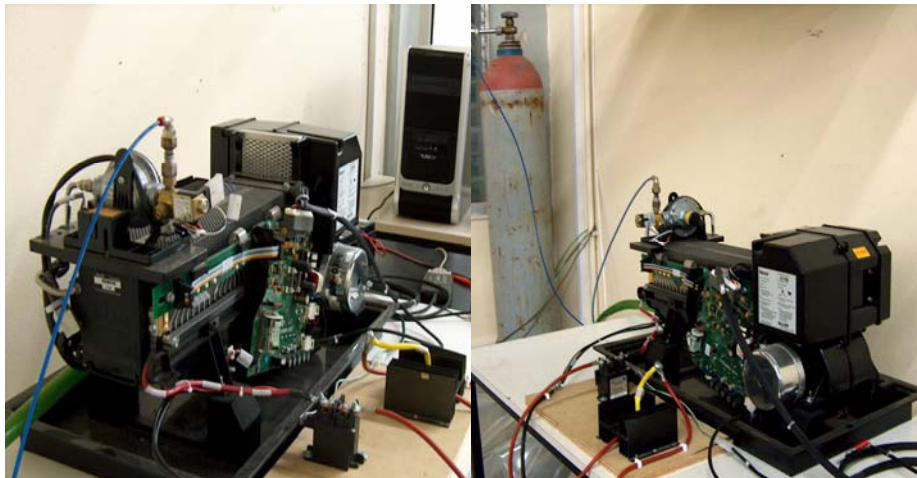


Σχ. 12: Σχηματική παράσταση ενός πάρκου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας[1].

7. Πειραματικό πρότυπο συστήματος κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων στο Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας του Πανεπιστημίου Πατρών

Το Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας (Ε.Η.Μ.Ε) του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών έχει δραστηριοποιηθεί από την ίδρυση του το 1975, γενικά σε όλα τα θέματα που αφορούν τη σύγχρονη ηλεκτροκίνηση. Ειδικότερα, κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες έχει προωθήσει τη θεωρητική ανάλυση καθώς και τις πειραματικές κατασκευές σε ελεγχόμενα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα, που σχετίζονται με την ηλεκτροκίνηση των μέσων μεταφοράς. Μέγιστη πρόκληση αποτελεί η δημιουργία ενός ηλεκτρικού οχήματος που θα χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου υδρογόνου ως κύρια πηγή τροφοδοσίας. Διεξάγεται, επομένως, έρευνα για ένα σύνθετο γνωστικό αντικείμενο, το οποίο εμπεριέχει τέσσερις επιστημονικές περιοχές, δηλαδή επιστήμη και τεχνολογία κυψελών καυσίμου, σχεδιασμός, ανάλυση και κατασκευή ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος, ανάλυση συμπεριφοράς ηλεκτροκινητήρων για τη χρήση σε οχήματα «μηδενικών» ρύπων και μελέτη και εφαρμογή μεθόδων αυτομάτου ελέγχου.

Για το σκοπό αυτό το Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας διαθέτει μία συστοιχία κυψελών καυσίμου τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά: α) ονομαστική ισχύ 1,2 kW, β) ονομαστική τάση 24 V και γ) ονομαστικό ρεύμα 50 A, καθώς και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2: Όψεις του εγκατεστημένου συστήματος κυψελών καυσίμου τύπου PEM στο Ε.Η.Μ.Ε του Πανεπιστημίου Πατρών

Με αυτή την πειραματική διάταξη ερευνάται η δυναμική συμπεριφορά της συστοιχίας κυψελών καυσίμου, η οποία αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της μελέτης για τη συνολική ευστάθεια και απόδοση ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας αποτελούμενου από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου, ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και ηλεκτρική μηχανή. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μεταβατικές αποκρίσεις μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου είναι πολύ αργές σε σχέση με την απόκριση των συμβατικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Η διαφορά αυτή έχει σημαντικές συνέπειες στο συνολικό σχεδιασμό των συστημάτων ενέργειας, που περιέχουν συστοιχίες κυψελών καυσίμου και συνεπώς πρέπει να βρεθεί τρόπος αντιμετώπισης της βραδύτητας της απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, είναι επιβεβλημένη η ύπαρξη ενός βοηθητικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, με επαρκώς γρήγορη δυνατότητα φόρτισης και εκφόρτισης, όπως για παράδειγμα είναι οι συσσωρευτές ή οι υπερπυκνωτές, το οποίο μπορεί να παρέχει την κατάλληλη ενέργεια κατά τη διάρκεια γρήγορων αυξήσεων του ηλεκτρικού φορτίου. Για αυτό το λόγο διερευνάται η δομή ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, που επιτρέπει την ανάστροφη ροή ισχύος από την ηλεκτρική μηχανή προς τις μονάδες αποθήκευσης, η οποία υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να λειτουργεί ως γεννήτρια και διευκολύνει την ανάκτηση ενέργειας κατά τα χρονικά διαστήματα της πέδησης του οχήματος ή σε διαδρομές με κατωφέρειες.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Frano Barbir: “**PEM Fuel Cells: Theory and Practice**”, Elsevier Academic Press, 2005.
- [2] Ken Knany, Keith Frasher: “**Fuel Cell Electronics Packaging**”, Springer, 2007.
- [3] Supsamiam Srinivasm: “**Fuel Cells from Fundamentals to Applications**”, Springer, 2006.
- [4] Mehrdod Ehsani, Yimintsao, Sebastien E.Gay, Ali Fimadi: “**Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamental Theory and Design**”, CRC PRESS, 2005.
- [5] James Larminie, Andrew Dicks,: “**Fuel Cell Systems Explained**”, Wiley, 2003.
- [6] Ryan O' Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B.Prinz: “**Fuel Cell Fundamentals**”, Wiley, 2006.
- [7] Frederick 's, Borclay: “**Fuel Cells Engines and Hydrogen, an energy approach**”, Wiley, 2006.
- [8] Ned Mohan, Torekn Deland, William Robbins: “**POWER ELECTRONICS, Converters, Applications and Design**”, John Wiley & Sons Inc., 2002.

- [9] Stone,R., Competing Technologies for Transportation, in G. Hoogers (editor), “**Fuel Cell Technology Handbook**”, CRC Press, Boca Raton, FL,2003.
- [10] EPA Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS):
<http://www.epa.gov/nvfe/methods/uddsdds.gif>
- [11] US Fuel Cell Council: <http://www.usfcc.com>
- [12] http://www.nextechmaterials.com/view_page.php?id=35
- [13] Α.Σαφάκας: “**Ηλεκτρονικά Ισχύος**”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Διδακτικά Βιβλία, Πάτρα, 2007.
- [14] Α.Σαφάκας: “**Ηλεκτρικές Μηχανές**”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Διδακτικά Βιβλία, Πάτρα, 2008.
- [15] Klemens Heumann: “**Basic Principles of Power Electronics**”, Springer-Verlay, 1986.
- [16] Weiss, M.A., J.B. Heywood, E. M. Drake, A. Schafer, and F. F. AuYeung, “**On the Road in 2020. A life-Cycle Analysis of New Automobile Technologies**”, Massachusetts Institute of Technology, Boston 2000.