



Κεφάλαιο

## ΕΙΔΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κύριος στόχος των μικροδίκτυων είναι ο συνδυασμός όλων των πλεονεκτημάτων που συνεπάγεται η χρήση των ανανεώσιμων/μη συμβατικών πηγών ενέργειας και της υψηλής απόδοσης των συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (Combined Heat and Power (CHP) systems). Με αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής βασιζόμενα σε CHP συστήματα διευκολύνουν την υψηλής ενεργειακής απόδοσης παραγωγή ενέργειας, αξιοποιώντας την αποβαλλόμενη θερμότητα, ενώ τα συστήματα ΑΠΕ παράγουν καθαρή ενέργεια χωρίς να ρυπαίνουν το περιβάλλον. Η επιλογή του εκάστοτε συστήματος ΔΠ εξαρτάται από το κλίμα και την μορφολογία της περιοχής, καθώς και από την διαθεσιμότητα καυσίμου. Τα συστήματα ΔΠ είναι είτε μικρο (micro)-CHP συστήματα βασιζόμενα σε μηχανές τύπου Stirling, κυψέλες καυσίμου και μικροπαραγωγές, είτε συστήματα ΑΠΕ, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας και μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική παραγωγή.

### 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ-ΗΛΕΚΤΡΙΣ- ΜΟΥ (CHP)

Το κύριο πλεονέκτημα των CHP συστημάτων, που τα καθιστά πολύ κατάλληλα για εφαρμογή ως συστήματα ΔΠ, είναι η υψηλή ενεργειακή απόδοση στην παραγωγή ενέργειας, μέσω της παράλληλης χρησιμοποίησης της αποβαλλόμενης θερμότητας. Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για τη θέρμανση των τοπικών οικιών ή σε βιομηχανικές διαδικασίες. Μέσης

θερμοκρασίας (100-180°C) αποβαλλόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ψύξη. Τα CHP συστήματα πρέπει να βρίσκονται πιο κοντά στα θερμικά φορτία και σχετικά απομακρυσμένα από τα ηλεκτρικά, γιατί είναι πιο ακριβό να μεταφερθεί η θερμότητα απ' ό τι ο ηλεκτρισμός και έχουν απόδοση πάνω από 80%. Βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα θέρμανσης πόλεων, νοσοκομείων, φυλακών, εργοστασίων.

### 2.2.1 Micro-CHP συστήματα

Τα micro-CHP συστήματα διαφέρουν από τα μεγάλα CHP συστήματα όχι μόνο στην παραγόμενη ισχύ (χρησιμοποιούνται σε σπίτια ή μικρά εμπορικά κτίρια), αλλά και στις μεθόδους παροχής της μηχανικής ισχύος. Τα περισσότερα μεγάλα CHP συστήματα παράγουν πρωταρχικά ηλεκτρισμό και δευτερευόντως θερμότητα. Τα micro-CHP συστήματα λειτουργούν κυρίως για παραγωγή θερμότητας και ο ηλεκτρισμός είναι υποπροϊόν. Έτσι η ενεργειακή παραγωγή των micro-CHP συστημάτων οδηγείται κυρίως από τις θερμικές απαιτήσεις των καταναλωτών. Τα micro-CHP συστήματα είναι αξιόπιστα, στιβαρά, φθηνά και μπορούν να λειτουργήσουν με καύσιμα όπως φυσικό αέριο, βιοκαύσιμο, προπάνιο ή υγρό καύσιμο και έχουν καθαρή καύση με λίγα σωματίδια.

Τα μικροδίκτυα εξασφαλίζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα με τη χρήση micro-CHP συστημάτων:

- Την τοποθέτηση των micro-CHP συστημάτων κοντά στα θερμικά φορτία, για την πλήρη αξιοποίηση της παραγόμενης θερμότητας.
- Την ευελιξία των micro-CHP συστημάτων για τη βέλτιστη τροφοδοσία πολλών μικρών θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων.

Οι κύριες τεχνολογίες παραγωγής μηχανικής ισχύος στις οποίες βασίζονται τα micro-CHP συστήματα είναι:

- Μηχανές εσωτερικής καύσης.
- Μηχανές τύπου Stirling.
- Μικροστρόβιλοι (Microturbines).
- Κυψέλες καυσίμου.

#### **Μηχανές εσωτερικής καύσης.**

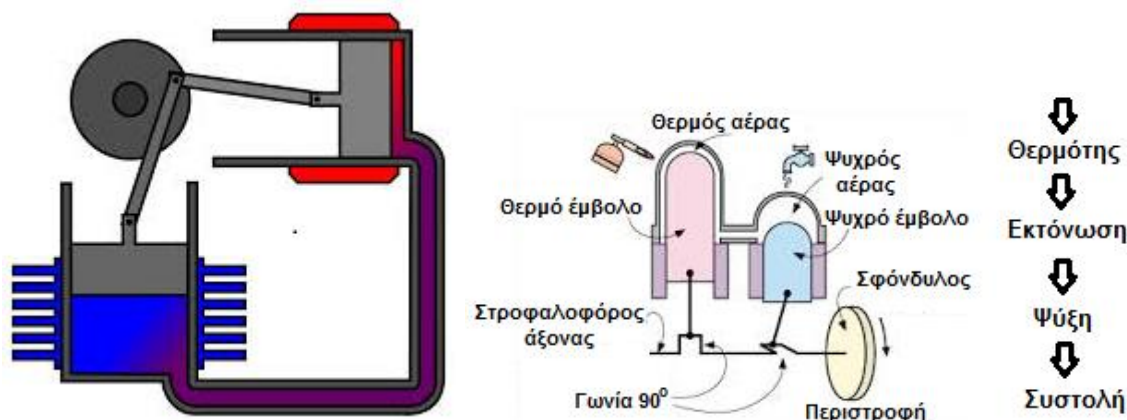
Στις μηχανές εσωτερικής καύσης, το καύσιμο καίγεται σε θάλαμο ανάφλεξης, μέσα στη μηχανή. Η ανάφλεξη παράγει υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης

αέρια, τα οποία εκτονώνονται και δρουν πάνω σε κινούμενα μέρη, όπως πιστόνια ή δρομείς. Τα κυριότερα καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι τα: ντίζελ, βενζίνη, προπάνιο, φυσικό αέριο, βιοκαύσιμα κ.α.

### Μηχανή τύπου Stirling.

Η μηχανή Stirling είναι μία κλειστού κύκλου, εξωτερικής καύσης θερμική μηχανή, όπου το αέριο λειτουργίας είναι μονίμως περιορισμένο μέσα στον κύλινδρο. Αυτή η μηχανή χρησιμοποιεί μία εξωτερική πηγή θερμότητας (όπως ηλιακή, γεωθερμική, χημική κ.λ.π.) και ένα εκπομπό θερμότητας, τα οποία έχουν σχεδόν σταθερή θερμοκρασία και μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους.

Η μηχανή Stirling χρησιμοποιεί συγκεκριμένη ποσότητα αέρα, υδρογόνου ή ηλίου ως αέριο λειτουργίας. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η μηχανή είναι σφραγισμένη και καθόλου αέριο δεν εισάγεται ή βγαίνει από αυτήν. Λειτουργεί με κυκλικές εναλλαγές συμπίεσης και εκτόνωσης του αερίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες, έτσι ώστε να υπάρχει μία καθαρή μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο, Σχ. 2.1. Η λειτουργία της μηχανής Stirling περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις: i) ψύξη, ii) συστολή, iii) θέρμανση, iv) εκτόνωση, μέσω της κίνησης του αερίου λειτουργίας μεταξύ του θερμού και ψυχρού εναλλάκτη. Ο θερμός εναλλάκτης είναι σε επαφή με μία εξωτερική πηγή θέρμανσης, ενώ ο ψυχρός είναι σε επαφή με ένα θερμοπομπό (π.χ. σώμα καλοριφέρ). Μία αλλαγή στη θερμοκρασία του αερίου προκαλεί μια αντίστοιχη μεταβολή της πίεσής του και η κίνηση του πιστονιού προκαλεί εναλλακτικά την συμπίεση και εκτόνωση του αερίου.



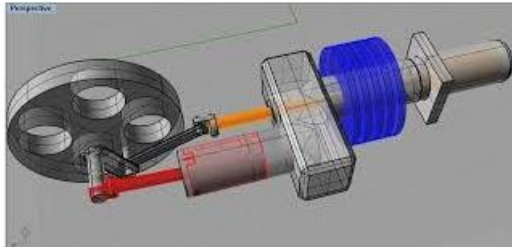
Σχ. 2.1 Αρχή λειτουργίας της μηχανής Stirling.

Για εφαρμογές σε CHP συστήματα, η μηχανή Stirling εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην κυρίως θερμική πηγή και την εφαρμογή χρήσης της θερμότητας. Επειδή ο κινητήρας Stirling παράγει ενέργεια μόνο στη μια φάση και επί πλέον πρέπει να μετατραπεί η παλινδρομική κίνηση σε περιστροφική χρησιμοποιείται σφόνδυλος με τον οποίο επιτυγχάνεται ομαλή περιστροφική κίνηση. Η θερμότητα από τη ψύξη της μηχανής Stirling μπορεί να αξιοποιείται στην κάλυψη θερμικών αναγκών και η κινητική ενέργεια από μια σύγχρονη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μηχανή Stirling έχει μεγαλύτερη απόδοση από την ατμομηχανή, παράγει λιγότερο θόρυβο, είναι πιο αξιόπιστη σε σχέση με μία μηχανή εσωτερικής καύσης και μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε πηγή θερμότητας και συνεπώς και ΑΠΕ, Σχ. 2.2. Ωστόσο έχει μεγαλύτερο μέγεθος και υψηλότερο αρχικό κόστος.



Σχ. 2.2 Stirling μέσης θερμοκρασίας, ταχύτητας και πίεσης

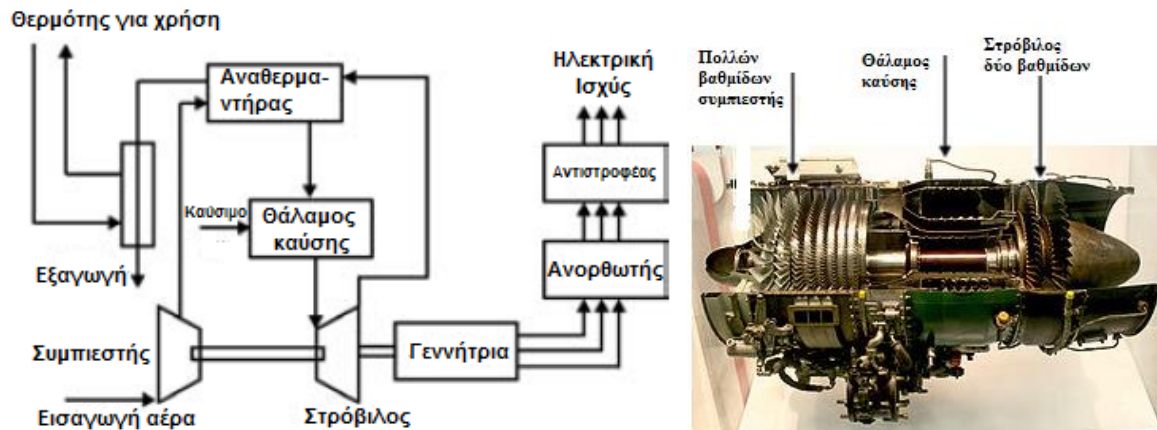


Κατασκευαστικές ιδέες

### **Μικροστρόβιλοι.**

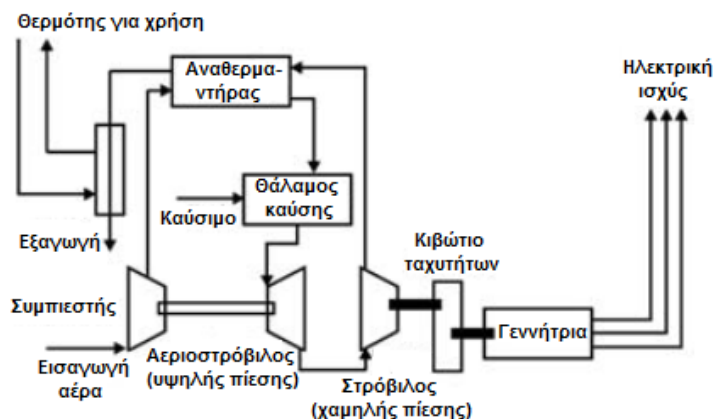
Οι μικροστρόβιλοι (microturbines) είναι ευρέως διαδεδομένοι σε συστήματα ΔΠ και CHP συστήματα. Είναι μικροί και απλού κύκλου αεριοστρόβιλοι, με εύρος ισχύος 25-300 kW. Για τη βελτίωση της απόδοσής τους χρησιμοποιούν τεχνικές ανάκτησης θερμότητας (χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας), εξελιγμένα υλικά (όπως κεραμικά για τις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας) και έχουν χαμηλές εκπομπές  $NO_x$ . Είναι διαθέσιμοι ως μονού ή διπλού άξονα. Η

μονάδα μονού άξονα είναι μία υψηλής ταχύτητας σύγχρονη γεννήτρια με μόνιμους μαγνήτες, με το συμπιεστή και το στρόβιλο τοποθετημένους στον ίδιο άξονα και ταχύτητα του στροβίλου 50000-120000 rpm, Σχ. 2.3. Κατά τη



Σχ. 2.3 Μονού άξονα μικροστρόβιλος.

λειτουργία του μικροστρόβιλου, η πίεση του εισαγόμενου αέρα αυξάνεται μέσω του συμπιεστή. Η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα αυξάνεται επιπλέον καθώς αυτός περνά από τον αναθερμαντήρα. Όταν ο θερμός, συμπιεσμένος αέρας εισάγεται στο θάλαμο καύσης αναμιγνύεται με καύσιμο και καίγεται. Τα υψηλής θερμοκρασίας καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο και παράγουν μηχανική ροπή, η οποία γυρίζει την ηλεκτρική γεννήτρια και παράγεται ηλεκτρική ισχύς. Η υψηλής συχνότητας τάση εξόδου μετατρέπεται σε τάση ΣΡ μέσω ενός ανορθωτή και η τάση ΣΡ στη συνέχεια μετατρέπεται σε τάση ΕΡ συγκεκριμένης συχνότητας μέσω ενός αντιστροφέα. Η ηλεκτρική απόδοσή τους είναι 20-30%. Στο διπλού άξονα μικροστρόβιλο, Σχ. 2.4, χρησιμοποιείται επιπλέον ένας στρόβιλος ισχύος χαμηλής πίεσης, με 3000 rpm, που στρέφει μία συμβατική γεννήτρια με κιβώτιο ταχυτήτων για να έχουμε ονομαστική συχνότητα στην έξοδο. Αυτός επιτυγχάνει ηλεκτρική απόδοση 35-40%.



Σχ. 2.4 Διπλού άξονα μικροστρόβιλος.

Οι μικροστρόβιλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τροφοδοσία του ηλεκτρικού φορτίου των καταναλωτών ή και για εφαρμογές συμπαραγωγής.

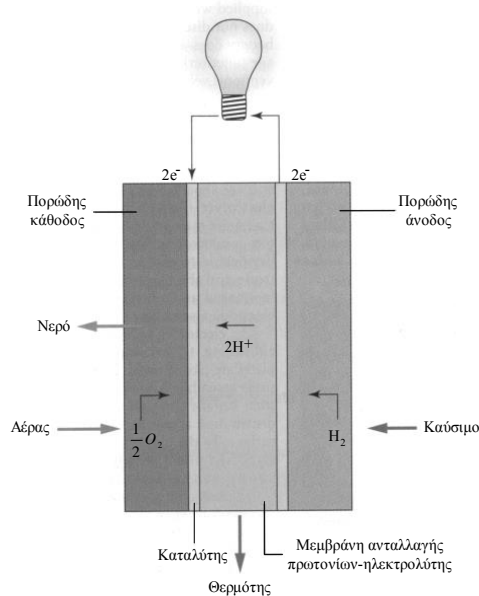
Τα κύρια χαρακτηριστικά των μικροστρόβιλων είναι:

- Μικρότερο μέγεθος σε σχέση με λοιπά συστήματα ΔΠ.
- Ενεργειακή απόδοση της τάξης του 80%, σε CHP εφαρμογές.
- Χαμηλές εκπομπές NO<sub>x</sub>.
- Διάρκεια ζωής πάνω από 45000 ώρες.
- Κόστος εξοπλισμού 650 \$/KW και λειτουργίας συγκρίσιμο με ανανεώσιμες πηγές.
- Ευελιξία στο είδος καυσίμου (ντίζελ, φυσικό αέριο, κτλ).
- Χαμηλά επίπεδα θορύβου (65 db) και δονήσεων.
- Απλή διαδικασία εγκατάστασης.

Οι περισσότεροι μικροστρόβιλοι χρησιμοποιούν σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)) ή ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες για την παραγωγή ισχύος. Το κύριο πλεονέκτημα της σύζευξης μίας σύγχρονης γεννήτριας με διπλού άξονα μικροστρόβιλο, είναι η απουσία ανάγκης χρήσης ηλεκτρονικού μετατροπέα, εφόσον η γεννήτρια συνδεθεί με το στρόβιλο μέσω κιβωτίου ταχυτήτων. Ωστόσο το κιβώτιο ταχυτήτων μειώνει τη συνολική απόδοση του συστήματος. Για μονού άξονα μικροστρόβιλο η χρήση PMSG μεγάλων ταχυτήτων έχει μειονεκτήματα, όπως θερμικές πιέσεις, φαινόμενα απομαγνήτισης και απώλειες δρομέα. Το μειονέκτημα της χρήσης ασύγχρονης γεννήτριας είναι η χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι προσθέτουν κόστος, έχουν απώλειες και εισάγουν αρμονικές στο δίκτυο.

### ***Κυψέλες καυσίμου.***

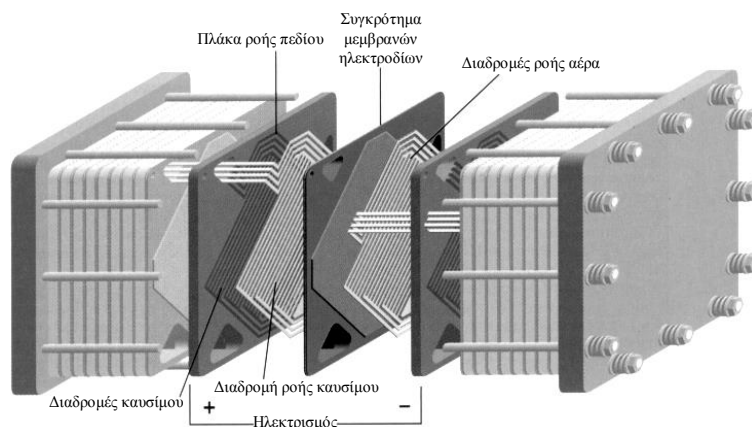
Μία κυψέλη καυσίμου μετατρέπει τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι συσκευές ηλεκτροχημικής μετατροπής, που παράγουν ηλεκτρισμό απευθείας μέσω ηλεκτροχημικής οξειδωσης στα ηλεκτρόδια και απόδοση 40-80% (με τεχνικές ανάκτησης θερμότητας). Κατάλληλα για εφαρμογή σε αυτοκίνητα είναι αυτά που χρησιμοποιούν Μεμβράνη Ανταλλαγής Πρωτονίων (ΜΑΠ) (Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)) και έχουν θερμοκρασία λειτουργίας 80°C. Αποτελούνται (Σχ. 2.5) από δύο πορώδη ηλεκτρόδια, που διαχωρίζονται από μια πολυμερή ΜΑΠ. Η μεμβράνη επιτρέπει τη διόδο πρωτονίων υδρογόνου (H<sup>+</sup>), αλλά εμποδίζει τη ροή ηλεκτρονίων και αερίων. Το καύσιμο (υδρογόνο) ρέει κατά μήκος της



Σχ. 2.5 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου με ΜΑΠ.

επιφάνειας του ηλεκτροδίου ανόδου, ενώ το οξυγόνο ή ο αέρας ρέουν κατά μήκος του ηλεκτροδίου καθόδου, όπου παράγεται νερό και θερμότητα. Ο καταλύτης βοηθάει τη διάσπαση υδρογόνου σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια.

Το 1995, η Καναδική εταιρία Ballard Power Systems Inc. ανακοίνωσε την κατασκευή συστοιχίας κυψελών καυσίμου ισχύος 30 KW (Σχ. 2.6) με πυκνότητα ισχύος 1 KW/lit. Με τη σύνδεση του ηλεκτρικού φορτίου, που αποτελεί το δρόμο κυκλοφορίας των ηλεκτρονίων, αρχίζει η αντίδραση και λειτουργία της κυψέλης, που σταματά αμέσως με την αποσύνδεση του φορτίου.



Σχ. 2.6 Συστοιχία κυψελών καυσίμου. Η μια πλευρά της πλάκας ηλεκτροδίου χρησιμεύει σαν άνοδος για τη μία κυψέλη, ενώ η άλλη σαν κάθοδος της διπλανής κυψέλης.

Η αναμόρφωση με ατμό υγρών υδρογονανθράκων ( $C_nH_m$ ) σε αναμορφωτές (reformer) είναι ένας δυναμικός τρόπος δημιουργίας καυσίμου πλούσιου σε υδρογόνο για κυψέλες καυσίμου, που όμως περιέχει και μικρές ποσότητες CO. Αυτή η μέθοδος προτιμάται γιατί η αποθήκευση υδρογόνου είναι επικίνδυνη και δαπανηρή. Η αναμόρφωση υδρογονανθράκων εξασφαλίζει το απαραίτητο υδρογόνο αποφεύγοντας τη χρήση μεγάλων ντεπόζιτων με υδρογόνο μεγάλης πίεσης ή τη χρήση αυτοκινήτων για τη διανομή του υδρογόνου.

Πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου:

- Χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> ανά KW παραγόμενης ισχύος.
- Απουσία κινούμενων μερών που οδηγεί σε στιβαρή κατασκευή, χαμηλή συντήρηση, έλλειψη δονήσεων και θορύβου.
- Ευελιξία στην επιλογή καυσίμου (φυσικό αέριο, προπάνιο, αέριο χωματερών, αέριο από δεξαμενές αναερόβιας χώνευσης ιλύος, ντίζελ, νάφθα, μεθανόλη, υδρογόνο).

Κάποια προβλήματα στη χρήση των κυψελών καυσίμου είναι:

- Οι υγροί υδρογονάνθρακες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υδρογόνου μπορεί να μην είναι διαθέσιμοι σε ποσότητες επαρκείς για συνεχή παραγωγή υδρογόνου.
- Έχουν υψηλό χρόνο εκκίνησης και απαιτούν ακριβά υλικά, ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Περιλαμβάνουν πολύ ακριβούς καταλύτες, των οποίων οι ιδιότητες μπορεί να αλλοιωθούν από τις θεικές ενώσεις του καυσίμου.
- Το παραγόμενο CO μπορεί να μειώσει την απόδοση της μεμβράνης της κυψέλης καυσίμου.
- Η θερμοδυναμική απόδοση (70-85%) της αντίδρασης εξαρτάται από την καθαρότητα του υδρογόνου.

Υπάρχουν τέσσερεις κύριοι τύποι κυψελών καυσίμου:

- 1) Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), με θερμοκρασία λειτουργίας 80°C.
- 2) Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)), με θερμοκρασία λειτουργίας 200°C.
- 3) Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)), με θερμοκρασία λειτουργίας 650°C.
- 4) Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)), με θερμοκρασία λειτουργίας 1000 °C.



**Στη PEMFC** η θερμοκρασία λειτουργίας προσδιορίζεται από τη θερμική ευστάθεια και τα χαρακτηριστικά αγωγιμότητας της πολυμερούς μεμβράνης που χρησιμοποιείται. Αυτή για να έχει ικανοποιητική αγωγιμότητα ιόντων χρειάζεται νερό και άρα θερμοκρασία λειτουργίας μικρότερη των 100° C που βράζει το νερό. Η PEMFC μπορεί να λειτουργεί σε αυξημένη πίεση μέχρι 8 atm, με την οποία αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος της κυψέλης καυσίμου. Αν το CO υπερβαίνει τα 50 ppm μπορεί να αλλοιώσει τον καταλύτη και να μειώσει την απόδοση της PEMFC, γι αυτό όταν το υδρογόνο προέρχεται από αναμόρφωση με ατμό των υδρογονανθράκων πρέπει να λαμβάνονται μέτρα απομάκρυνσης του CO. Η ηλεκτρική απόδοση της PEMFC είναι περίπου 50%, αλλά επειδή η θερμοκρασία της αποβαλλόμενης θερμότητας είναι χαμηλή για να αξιοποιηθεί στον αναμορφωτή, η συνολική απόδοση του συστήματος περιορίζεται στο 42%. Κατασκευάζονται για ισχείς μικρότερες των 500 KW.

**Στη PAFC** ο ηλεκτρολύτης είναι 100% φωσφορικό οξύ. Δρα ως το υγρό μεταφοράς των ιόντων υδρογόνου από την άνοδο στην κάθοδο και άγει τα ιόντα φορτίου μεταξύ των ηλεκτροδίων, συμπληρώνοντας το ηλεκτρικό κύκλωμα. Επειδή ο ηλεκτρολύτης είναι υγρός, πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά η εξάτμιση και η μετακίνηση ιόντων. Χρησιμοποιεί πλατίνα ως καταλύτη στα ηλεκτρόδια, γι αυτό το CO δεν πρέπει να ξεπερνά το 2% σε όγκο. Άλλοι παράγοντες που μειώνουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής της PAFC είναι: 1) Διάβρωση του ανθρακικού υπόβαθρου του καταλύτη και της πλάκας διαχωρισμού του φωσφορικού οξέως. 2) Έναρξη τήξης της πλατίνας και υπερχειλίση του ηλεκτρολύτη σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ψύξη της γίνεται με πεπιεσμένο βραστό νερό. Λειτουργεί σε περίπου 200° C και πίεση μέχρι 8 atm. Η ηλεκτρική απόδοσή της κυμαίνεται από 37-42%. Σε CHP λειτουργία παρέχει ζεστό νερό 60-120° C ή ατμού σε πίεση  $\cong$  1 atm. Έχει διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 40000 h λειτουργίας και ανταπεξέρχεται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος από -32-49° C.

**Στη MCFC** ο καταλύτης είναι υγρός, αποτελούμενος από λίθιο-κάλιο ή λίθιο-νάτριο. Μετά τη δράση της καθόδου, τα ιόντα του ανθρακικού άλατος μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη στην άνοδο για να ολοκληρώσουν την οξείδωση του καυσίμου. Η θερμοκρασία λειτουργίας του είναι υψηλή, περίπου 650° C και η ηλεκτρική απόδοση 44%. Μπορεί να χρησιμοποιεί πολλούς διαφορετικούς τύπους καυσίμου γιατί δεν είναι ευάλωτη στο CO. Λόγω όμως της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας απαιτεί ακριβά υλικά κατασκευής που αντέχουν στη θερμοκρασία και στη διάβρωση. Ο χρόνος ζωής της περιορίζεται από τη διάλυση της καθόδου από τον ηλεκτρολύτη, τη διαχείριση του ηλεκτρολύτη και τη διάβρωση των υλικών. Γίνεται προσπάθεια ο χρόνος ζωής

της να φθάσει τις 40000 h. Αποβάλλει θερμότητα που μπορεί να αξιοποιηθεί στην επεξεργασία του καυσίμου, σε CHP παραγωγές, στην αναμόρφωση μεθανίου και τις βιομηχανικές χρήσεις.

**H SOFC** χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη ένα στερεό κεραμικό ανόργανο οξείδιο, συνήθως ζirkόνιο σταθεροποιημένο με ύτριο (yttrium) και έχει θερμοκρασία λειτουργίας 1000° C. Συνήθως λειτουργεί με ένα μίγμα υδρογόνου και CO, που παράγεται με εσωτερική αναμόρφωση στη SOFC κάποιου καυσίμου υδρογονάνθρακα και χρησιμοποιεί αέρα για οξειδωτικό. Η εσωτερική αναμόρφωση του καυσίμου αυξάνει την απόδοση, απλοποιεί την κατασκευή και ελαττώνει τα κόστη. Κατά τη λειτουργία το οξειδωτικό ενώνεται με τα ηλεκτρόνια στην κάθοδο και τα ιόντα οξυγόνου μέσω του ηλεκτρολύτη περνούν στην άνοδο, όπου οξειδώνουν το υδρογόνο.

(**κάθοδος:**  $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$

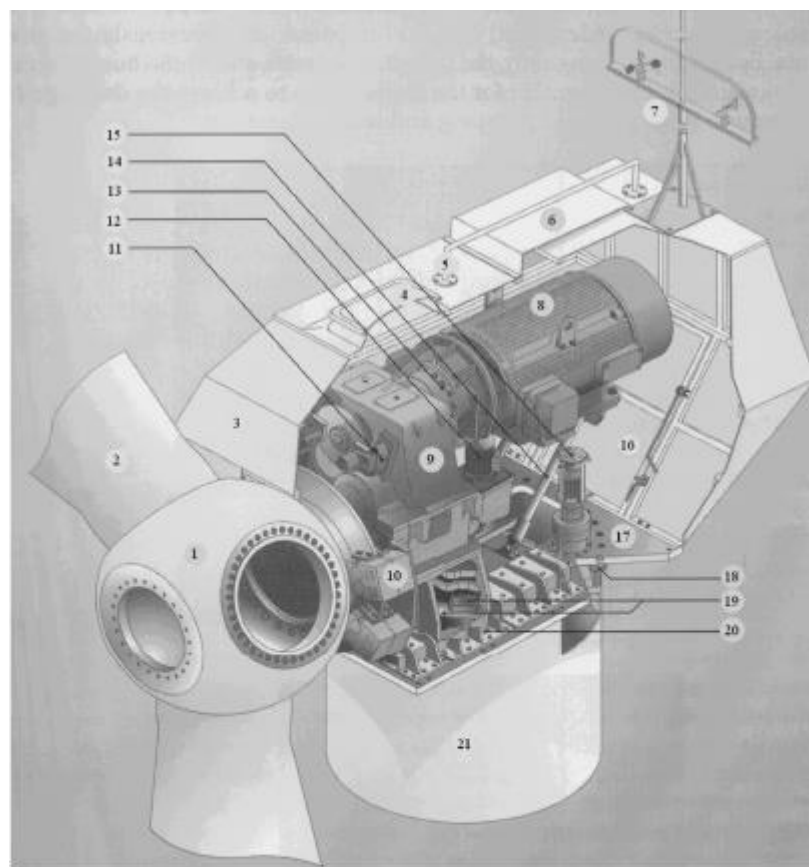
**άνοδος:**  $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ ,  $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ )

Δεν έχει προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης του ηλεκτρολύτη και είναι ανθεκτική στους ρύπους των καυσίμων. Είναι κατάλληλη για χρήση καυσίμων από την αεριοποίηση βιομάζας ή άνθρακα. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της παρέχει την κατάλληλη θερμότητα για την αναμόρφωση του καυσίμου ή για χρήση σε CHP συστήματα ή για τροφοδοσία στροβίλου σε παραγωγή επιπλέον ηλεκτρικής ενέργειας. Η SOFC όταν συνεργάζεται με αεριοστροβίλο επιτυγχάνει ηλεκτρική απόδοση 70-75%, την υψηλότερη μεταξύ όλων των κυψελών καυσίμου. Η ευελιξία στην επιλογή καυσίμου, η ικανότητα απευθείας χρήσης καυσίμων υδρογονανθράκων και η μεγάλη συνολική απόδοση είναι τα τρία βασικά πλεονεκτήματά της έναντι των άλλων κυψελών καυσίμου. Επίσης ο χρόνος ζωής της είναι 87600-175200 h, που είναι δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερος από το χρόνο ζωής των άλλων κυψελών καυσίμου. Το κύριο μειονέκτημά της είναι τα ειδικά υλικά που απαιτούνται στην κατασκευή των βασικών της μερών, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας του. Η χρήση ασυνήθιστων κεραμικών, σύνθετων ενώσεων μετάλλων-κεραμικών και η χρήση κραμάτων υψηλής θερμοκρασίας που απαιτούν ειδικές τεχνικές για την παραγωγή τους αυξάνουν πολύ το κόστος κατασκευής της. Για το λόγο αυτό γίνονται προσπάθειες να μειωθεί η θερμοκρασία λειτουργίας της στους περίπου 700-900° C.

### 2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα συστήματα αυτά μετατρέπουν την αιολική σε ηλεκτρική ενέργεια. Το κύριο τμήμα τους είναι ο δρομέας, ο οποίος συνδέεται με την ηλεκτρική γεννήτρια

μέσω κιβωτίου ταχυτήτων πολλών σχέσεων. Τα κύρια στοιχεία μίας ανεμογεννήτριας (Α/Γ) είναι ο πύργος στήριξης, ο δρομέας και η άτρακτος, Σχ. 2.7. Στην άτρακτο βρίσκονται η γεννήτρια και ο μηχανισμός μετάδοσης της κίνησης. Ο δρομέας μπορεί να έχει δύο ή περισσότερα πτερύγια. Η ανεμογεννήτρια αιχμαλωτίζει την κινητική ενέργεια από την ροή του ανέμου μέσω των πτερυγίων και τη μεταφέρει στην επαγωγική γεννήτρια μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων, όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Το κιβώτιο ταχυτήτων μετατρέπει τη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων σε υψηλή ταχύτητα περιστροφής του άξονα της γεννήτριας. Η συχνότητα και η τάση εξόδου διατηρούνται στα επιθυμητά όρια μέσω τεχνικών μέτρησης, ελέ-



- |   |   |
|---|---|
| 1. Πλήμνη δρομέα                              | 12. Υδραυλική                                   |
| 2. Πτερύγια δρομέα                            | 13. Ελαστικός σύνδεσμος                         |
| 3. Κάλυμμα ατράκτου                           | 14. Αναρτήσεις γεννήτριας                       |
| 4. Φωταγωγός                                  | 15. Σύστημα προσανατολισμού                     |
| 5. Ράβδος ασφαλείας                           | 16. Θυρίδα επισκόπησης                          |
| 6. Εξαγωγή αέρα                               | 17. Εξέδρα                                      |
| 7. Αλεξικέραυνο και μετρητής ταχύτητας ανέμου | 18. Στεφάνη ρουλεμάν συστήματος προσανατολισμού |
| 8. Γεννήτρια                                  | 19. Φρένο συστήματος προσανατολισμού            |
| 9. Κιβώτιο ταχυτήτων                          | 20. Αποκευκτης θορύβου                          |
| 10. Δισκόφρενο δρομέα                         | 21. Πύργος                                      |
| 11. Εφεδρικό φρένο                            |   |

Σχ. 2.7 Α/Γ ισχύος 600 MW.

γχου και προστασίας. Περίπου μέχρι το 1995 η μέση εμπορική ισχύς των Α/Γ ήταν 300 KW, αλλά πρόσφατα Α/Γ 6-8 MW έχουν σχεδιαστεί και εγκατασταθεί.

Η ισχύς εξόδου των Α/Γ δίνεται από τη σχέση:

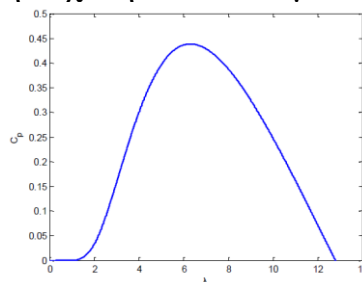
$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A \quad (2.1)$$

Όπου:  $P$  η ισχύς [W] της Α/Γ,  $C_p$  ο συντελεστής ισχύος,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα [ $\text{kg/m}^3$ ],  $V$  η ταχύτητα του ανέμου [m/s],  $A$  το εμβαδόν επιφάνειας σάρωσης των πτερυγίων [ $\text{m}^2$ ] της Α/Γ.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  έχει μέγιστη πρακτική τιμή περίπου 0.4 (Σχ. 2.8), δίνει το ποσοστό της ισχύος του ανέμου που εξάγεται από το δρομέα της Α/Γ και οι τιμές του εξαρτώνται από τη σχεδίαση του δρομέα, από το βήμα πτερυγίων και το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  (Tip Speed Ratio (TSR)):

$$\lambda = \frac{\omega_\delta R}{V}$$

Όπου:  $\omega_\delta$  είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ,  $R$  είναι η ακτίνα των πτερυγίων,  $V$  η ταχύτητα του ανέμου.



Σχ. 2.8 Εξάρτηση  $C_p$  από  $\lambda$  για βήμα μηδέν.

Η ροπή εξόδου των Α/Γ συχνά παρουσιάζει δυναμικές μεταβολές που οφείλονται στις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου και προκαλούνται από το πύργο στήριξης, τον διατμητικό άνεμο και το στροβιλισμό του ανέμου. Αυτές οι διακυμάνσεις προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου και την τάση. Αυτές οι διακυμάνσεις εισάγουν προβλήματα στο δίκτυο για τις Α/Γ σταθερών στροφών, ενώ στις Α/Γ μεταβλητών στροφών εξομαλύνονται ικανοποιητικά.

### 2.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Αυτές λειτουργούν με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, προκαθορισμένη από το σχεδιαστή της ανεμογεννήτριας και το κιβώτιο ταχυτήτων. Ο έλεγχος έχει ως

σκοπό είτε τη μέγιστη απομάστευση ισχύος με έλεγχο της ροπής του δρομέα, είτε τον έλεγχο της αποδιδόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια ανέμων υψηλής ταχύτητας, ελέγχοντας τη γωνία βήματος (pitch angle). Ανάλογα με τη στρατηγική ελέγχου οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χωρίζονται σε:

- Ανεμογεννήτριες με έλεγχο της απώλειας στήριξης (Stall).
- Ανεμογεννήτριες με έλεγχο της γωνίας βήματος.

Οι ανεμογεννήτριες με έλεγχο της απώλειας στήριξης δεν έχουν επιλογές ελέγχου. Τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα με σταθερή γωνία βήματος, ώστε να λειτουργούν καλύτερα σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου τόσο περισσότερο η ανεμογεννήτρια μπαίνει στην περιοχή της απώλειας στήριξης.

#### **Πλεονεκτήματα:**

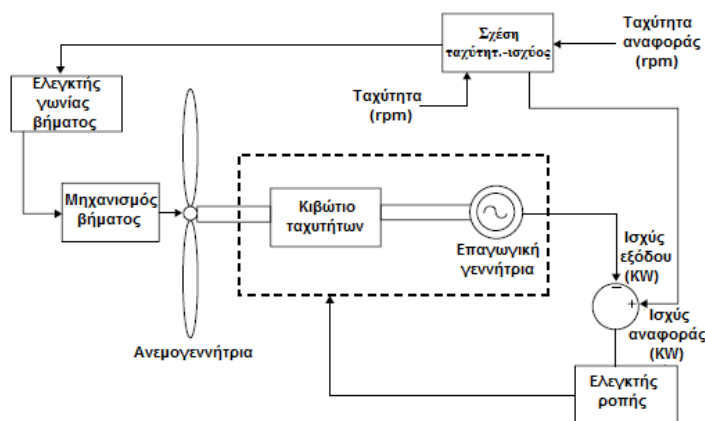
- Απλός σχεδιασμός, στιβαρή κατασκευή και αποδοτική ηλεκτρικά.
- Αυξημένη αξιοπιστία, επειδή αποτελούνται από λιγότερα μέρη.
- Δεν υπάρχει μετατροπή της συχνότητας, οπότε δεν εισάγονται αρμονικές στο δίκτυο.
- Μικρότερο κόστος αγοράς.

#### **Μειονεκτήματα:**

- Λιγότερο αποδοτικές αεροδυναμικά.
- Είναι επιρρεπείς στις μηχανικές καταπονήσεις και περισσότερο θορυβώδεις.

### 2.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Στο Σχ. 2.9 δείχνεται μία τυπική Α/Γ μεταβλητών στροφών με έλεγχο της γω-



Σχ. 2.9 Α/Γ μεταβλητών στροφών και έλεγχο του βήματος των πτερυγίων.

νίας βήματος. Έχει δύο στρατηγικές ελέγχου της λειτουργίας της: (i) Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, μέγιστη απομάστευση ισχύος, φροντίζοντας ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  να διατηρεί τη βέλτιστη τιμή του καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου. (ii) Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, έλεγχος της γωνίας βήματος των πτερυγίων ώστε η ισχύς εξόδου να μην ξεπερνά την ονομαστική της τιμή.

**Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλή ενεργειακή απολαβή, με μικρή μηχανική καταπόνηση.
- Αεροδυναμικά αποδοτικές με μικρή μεταβατική ροπή.
- Έλλειψη ανάγκης για συστήματα μηχανικής απόσβεσης (damping), επειδή την απόσβεση την προσφέρει το ηλεκτρικό σύστημα.
- Δεν υποφέρουν από προβλήματα συγχρονισμού ή βυθίσεις τάσεις λόγω του απότομου ηλεκτρικού ελέγχου.

**Μειονεκτήματα:**

- Μικρότερη ηλεκτρική απόδοση σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών.
- Πιο ακριβές και απαιτούν σύνθετες στρατηγικές ελέγχου.

## 2.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ (Φ/Β) ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

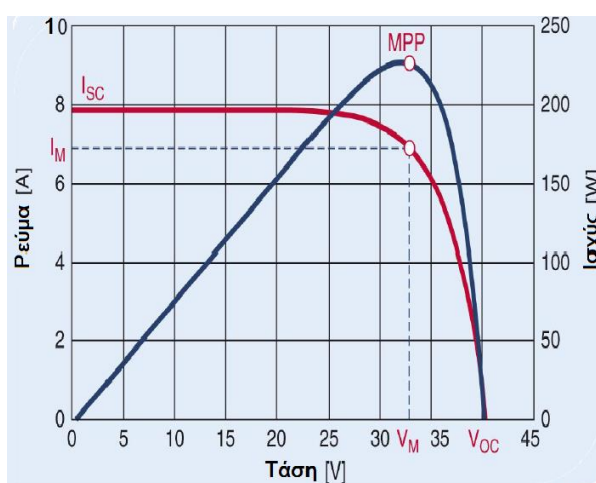
Τα Φ/Β συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την αστείρευτη και δωρεάν ηλιακή ενέργεια. Τα βασικά πλεονεκτήματα των Φ/Β συστημάτων είναι:

- Ανανεώσιμη φύση της ηλιακής ενέργειας ως καύσιμο.
- Ελάχιστη περιβαλλοντική επίδραση.
- Η ηλιακή ακτινοβολία είναι δωρεάν, οπότε μειώνεται σημαντικά ο λογαριασμός των καταναλωτών.
- Χρόνος ζωής περισσότερο από 30 χρόνια με ελάχιστη συντήρηση.
- Αθόρυβη λειτουργία.

Λόγω των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων εκτιμάται ότι τα Φ/Β θα παρέχουν στο μέλλον σημαντικό ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που θα προέρχεται από τις ΑΠΕ. Επίσης, λόγω της σημαντικής βελτίωσης των αντιστροφών, τα Φ/Β θεωρούνται η βασική μέθοδος αύξησης της τοπικής ΔΠ ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο διανομής.

Παρά τα πλεονεκτήματα που έχουν, τα Φ/Β συστήματα υποφέρουν από μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η χαμηλή απόδοση. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι μικρές Φ/Β εγκαταστάσεις είναι οικονομικά πιο αποδοτικές από τις μεγάλες. Η ευρεία διείσδυσή τους στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί εξελιγμένα δίκτυα διανομής ή μικροδίκτυα.

Τα Φ/Β συστήματα παράγουν ΣΡ τάση, οπότε είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρονικού μετατροπέα για τη μετατροπή της σε ΕΡ τάση, ονομαστικής συχνότητας. Επειδή το ρεύμα και η τάση ενός Φ/Β κυττάρου είναι πολύ μικρά, για να αυξηθεί η ισχύς και η τάση εξόδου, τα Φ/Β κύτταρα συνδυάζονται μεταξύ τους παράλληλα και σε σειρά, δημιουργώντας Φ/Β σειρές και συστοιχίες. Όπως φαίνεται από το Σχ. 2.10, για συγκεκριμένες τιμές τάσης-ρεύματος (με σταθερή ακτινοβολία και θερμοκρασία) η ισχύς εξόδου των Φ/Β γίνεται μέγιστη. Γι αυτό, τα περισσότερα Φ/Β συστήματα είναι εξοπλισμένα με σύστημα ανάχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking (MPPT)), το οποίο μεγιστοποιεί την ισχύ εξόδου μεταβάλλοντας το σημείο λειτουργίας ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία.



Σχ. 2.10 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας Φ/Β.

Τύποι Φ/Β κυττάρων:

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με απόδοση περίπου 15%.
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με απόδοση περίπου 12%.
- Άμορφου πυριτίου (thin film), με απόδοση περίπου 6%, αλλά πολύ φθηνότερα.
- Υβριδικής τεχνολογίας, με απόδοση περίπου 17%. Είναι εξαιρετικά δημοφιλή λόγω απόδοσης και απλής παραγωγικής διαδικασίας σε χαμηλή θερμοκρασία.

## 2.5 ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική παραγωγή χρησιμοποιείται αποτελεσματικά για παραγωγή ισχύος εντός των μικροδίκτυων. Η ισχύς παραγωγής τους εξαρτάται από την τοπολογία της περιοχής και το ετήσιο ποσοστό βροχής. Υποφέρουν από μεγάλες μεταβολές στην παραγωγή, λόγω

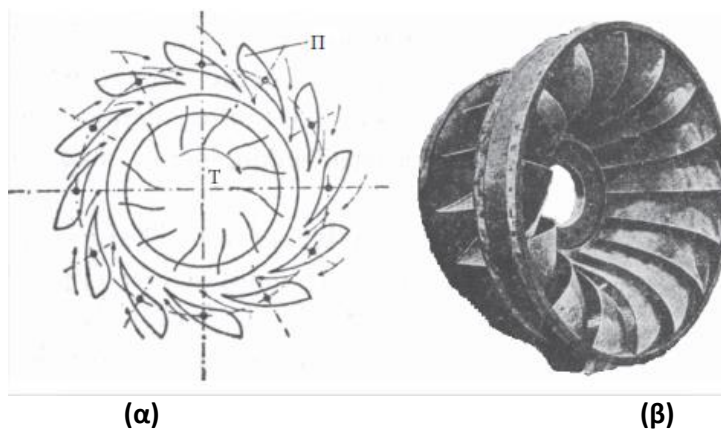
της μεταβαλλόμενης ροής νερού από την ακανόνιστη πτώση της βροχής, ιδιαίτερα αν δεν διαθέτουν κάποια δεξαμενή αποθήκευσης νερού.

Η ισχύς εξόδου ενός υδροστρόβιλου δίνεται από την εξίσωση:

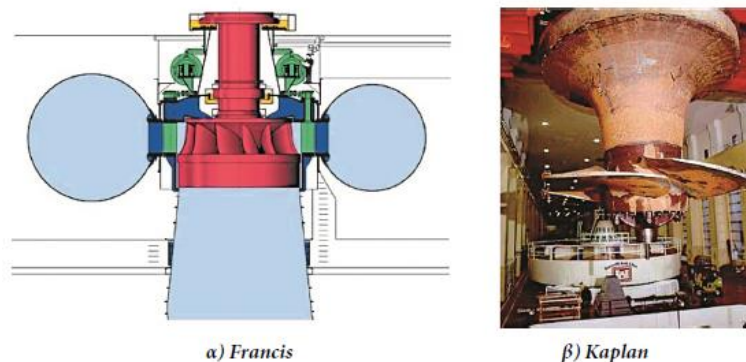
$$P = QH\eta\rho g \quad (2.2)$$

Όπου:  $P$  η συνολική ισχύς [W],  $Q$  η ροή νερού [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $H$  η υψομετρική διαφορά επιφάνειας νερού και γεννήτριας [m],  $\eta$  η συνολική απόδοση,  $\rho$  η πυκνότητα νερού [ $1000 \text{ kg/m}^3$ ],  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας [ $\text{m/s}^2$ ]

Για να αυξήσουμε την ισχύ εξόδου ενός υδροστρόβιλου, πρέπει να αυξήσουμε τη ροή νερού ή την υψομετρική διαφορά. Ανάλογα με τη ροή και την υψομετρική διαφορά χρησιμοποιούνται και αντίστοιχοι τύποι υδροστρόβιλων. Σε χαμηλή υψομετρική διαφορά χρησιμοποιούνται στρόβιλοι τύπου αντίδρασης (reaction) (π.χ. Francis, Kaplan), που αντλούν κινητική ενέργεια από την μείωση της πίεσης του νερού και την αύξηση της ταχύτητας, Σχ. 2.11 και Σχ. 2.12. Σε υψηλότερη υψομετρική διαφορά χρησιμοποιούνται στρόβιλοι τύπου δράσης (impulse) (π.χ. Pelton, Turgo), που αντλούν κινητική ενέργεια από την εκτόξευση του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση, Σχ. 2.13. Οι υδροστρό-

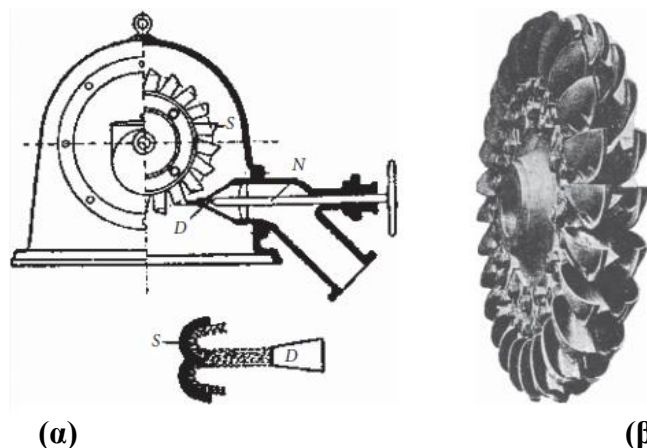


Σχ. 2.11 Υδροστρόβιλος αντίδρασης Francis: α) Σχηματική παράσταση. β) Στροφείο του στροβίλου.



Σχ. 2.12 Στροφεία των στροβίλων Francis και Kaplan για να τονισθεί η διαφορά τους





Σχ. 2.13 Υδροστρόβιλος δράσης Pelton. α) Σχηματικό διάγραμμα.  
β) Στροφέιο του υδροστροβίλου.

βίλοι συνδυάζονται με επαγωγικές και σύγχρονες γεννήτριες και χρήση κατάλληλου κιβωτίου ταχυτήτων. Ειδική σχεδίαση τους απαιτείται για την αντιμετώπιση καταστροφών από υπερτάχυνση λόγω ξαφνικών απωλειών φορτίου.

## 2.6 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα μικροδίκτυα, για να μπορούν να καλύπτουν τα κρίσιμα φορτία τους σε κατάσταση αποσύνδεσης από το δίκτυο, χρησιμοποιούν συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως:

- Μπαταρίες.
- Υπεραγωγίμα πηνία.
- Σφονδύλους με υπεραγωγίμη έδραση (flywheels).
- Υπερπυκνωτές (ultra-capacitors).

Αυτές οι συσκευές συνδέονται στο ζυγό ΣΡ του μικροδίκτυου και έχουν δυνατότητες συνέχισης της λειτουργίας τους (fault ride through) σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο.

**Μπαταρίες:** Η αύξηση της σημασίας τους την τελευταία δεκαετία οφείλεται κυρίως στην επιβολή του ηλεκτρικού αυτοκινήτου για περιβαλλοντικούς λόγους, αλλά και την εξομάλυνση της τροφοδοσίας ισχύος από αιολικές και ηλιακές πηγές ενέργειας. Οι διαδεδομένες μπαταρίες μολύβδου-οξέος, αν και έχουν λογικό κόστος, έχουν μικρή πυκνότητα ενέργειας (15 Wh/Kg), ενώ στην εξελιγμένη τους μορφή έχουν πυκνότητα ενέργειας 35-40 Wh/Kg και κόστος 8.8-13.2 €/KWh. Για την τροφοδοσία ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχουν αναπτυχθεί μπαταρίες Νικελίου- υδρογονούχου μετάλλου (NiMH) με 50-60 Wh/Kg και κόστος 26.4-35.2 €/KWh, μπαταρίες ιόντων Λιθίου με 80-90 Wh/Kg και Λιθίου με ηλεκτρολύτη πολυμερή με 100 Wh/Kg, αν και όλα αυτά

τα νούμερα ανακοινώνονται από τους κατασκευαστές και θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή.

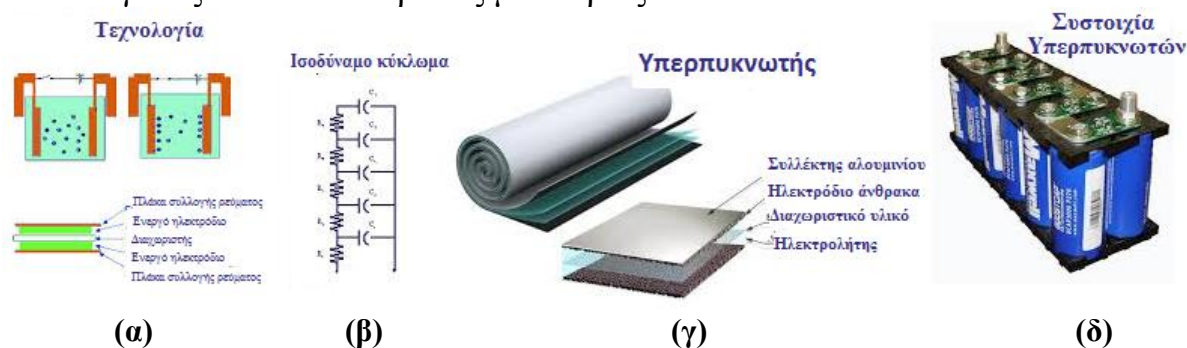
**Υπεραγωγή πηνία:** Μαγνητική ενέργεια αποθηκευμένη σε υπεραγωγή πηνία (Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)) χρησιμοποιείται όταν χρειαζόμαστε μεγάλη ισχύ (της τάξης των MW) για μικρό χρονικό διάστημα της τάξης μερικών δευτερολέπτων (30 MJ υπεραγωγή πηνία διατίθενται στο εμπόριο). Η ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα ηλεκτρομαγνήτη, που δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο από υπεραγωγή υλικά. Για να διατηρηθεί σε υπεραγωγή κατάσταση το πηνίο εμβαπτίζεται σε υγρό ήλιο σε θερμοκρασία 4.2° K, που περιέχεται σε ένα κρυογενητικό δοχείο με μόνωση κενού (για συσκευές 30 MJ η επαγωγή του πηνίου είναι 2.6 H, το ονομαστικό ρεύμα 5 KA και το μέγιστο μαγνητικό πεδίο 3T). Η φόρτιση και η εκφόρτιση του υπεραγωγίμου πηνίου επιτυγχάνεται με ελεγχόμενους μετατροπείς ισχύος.

**Σφόνδυλοι:** Ταχέως περιστρεφόμενοι δίσκοι ή κύλινδροι χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποθήκευση κινητικής ενέργειας, που μετατρέπεται εύκολα σε ηλεκτρική με τη σύζευξή τους σε μία γεννήτρια. Ο περιοριστικός παράγοντας για την αποθήκευση της ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι οι απώλειες στα έδρανα στήριξης του σφονδύλου. Πρόσφατα όμως, η ανάπτυξη της *υπεραγωγίμης έδρασης*, υπόσχεται να ελαττώσει την τριβή κατά δύο τάξεις μεγέθους, για αποθήκευση ενέργειας στη περιοχή των 10 KWh.

Στην απλούστερή της μορφή η υπεραγωγή έδραση αποτελείται από έναν μόνιμο μαγνήτη, αιωρούμενο σε μια σταθερή θέση πάνω από ένα υπεραγωγό. Οι υπεραγωγοί έχουν την ιδιότητα να αποκλείουν τη δίοδο της μαγνητικής ροής από το εσωτερικό τους, δρώντας ως *διαμαγνητικά* υλικά. Αυτή η ιδιότητα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση βόρειου πόλου όταν σε αυτόν πλησιάζουμε το βόρειο πόλο ενός μόνιμου μαγνήτη, γιατί στον υπεραγωγό εμφανίζονται ρεύματα με τέτοια φορά ώστε να αποκλείουν τη δίοδο της μαγνητικής ροής από το εσωτερικό του. Έτσι αναπτύσσεται μία απωθητική δύναμη μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του υπεραγωγού, που αυξάνει όσο μικραίνει η απόστασή τους. Αυτό δημιουργεί μια ευσταθή κατάσταση αιώρησης κατά τον κατακόρυφο άξονα, αν η διεύθυνση μαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη είναι κατακόρυφη. Για να επιτύχουμε και οριζόντια ευστάθεια, ο υπεραγωγός δημιουργεί κοιλότητα μέσα στην οποία εισέρχεται ο μόνιμος μαγνήτης, ώστε να περιβάλλεται από κατακόρυφα υπεραγωγή τοιχώματα. Κρυσταλλικές ανωμαλίες στον υπεραγωγό, δημιουργούν περιοχές που δεν έχουν την υπεραγωγή ιδιότητα και στις οποίες παγιδεύονται μαγνητικές γραμμές. Αυτή

την ιδιότητα την εκμεταλλευόμαστε για την ανάπτυξη δυνάμεων συγκράτησης του μόνιμου μαγνήτη και του υπεραγωγού, γιατί οι μαγνητικές γραμμές δρουν σαν ελατήρια σύνδεσης μεταξύ τους. Όσο η κατανομή της μαγνητικής ροής δεν αλλάζει στον υπεραγωγό, η περιστροφή του μόνιμου μαγνήτη δεν συναντά αντίσταση. Όμως κατακόρυφες ή οριζόντιες μετακινήσεις του μαγνήτη προκαλούν ανακατανομή των μαγνητικών γραμμών και την εμφάνιση του φαινομένου της υστέρησης, που είναι υπεύθυνο για τις μικρές απώλειες της υπεραγωγίμης έδρασης.

**Υπερπυκνωτές:** Στους επιστήμονες είναι εδώ και πολύ καιρό γνωστό ότι η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως ηλεκτρικό φορτίο, αντί των χημικών αντιδράσεων που έχουμε στις μπαταρίες. Η τεχνολογία για την ταχεία φόρτιση υπάρχει εδώ και δεκαετίες στους υπερπυκνωτές (ultracapacitors). Οι υπερπυκνωτές, ακριβέστερα γνωστοί ως ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλού στρώματος ή ηλεκτροχημικοί πυκνωτές, Σχ. 2.14, μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ περισσότερο φορτίο σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές. Οι υπερπυκνωτές όχι μόνο φορτίζουν πιο γρήγορα από τις μπαταρίες, αλλά διαρκούν και περισσότερο, επειδή δεν υποφέρουν από τη φυσική φθορά της φόρτισης και εκφόρτισης, που καταπονεί τις μπαταρίες. Έχουν επίσης μια σειρά από πλεονεκτήματα ασφάλειας. Ωστόσο, το μέγεθος των υπερπυκνωτών θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο για να αποθηκεύσουν την ίδια ενέργεια με τις μπαταρίες και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. Όμως, οι ερευνητές πιστεύουν ότι οι πρόσφατες ανακαλύψεις για γρήγορη, αξιόπιστη και ασφαλέστερη αποθήκευση ενέργειας σε υπερπυκνωτές θα τους κάνει ικανούς να ανταγωνίζονται καλύτερα τις μπαταρίες.



Σχ. 2.14 Υπερπυκνωτής α) Τεχνολογία. β) Ισοδύναμο κύκλωμα. γ) Μεθοδολογία κατασκευής. δ) Συστοιχία υπερπυκνωτών.

Πρόσφατα ερευνητές στις ΗΠΑ κατασκεύασαν έναν υπερπυκνωτή βασισμένο στο υλικό γραφένιο (μόνο-ατομικό φύλλο από άτομα άνθρακα) που μπορεί να αποθηκεύσει τόση ενέργεια ανά μονάδα μάζας όσο και οι υβριδικές μπαταρίες των μετάλλων νικελίου. Αυτός ο υπερπυκνωτής μπορεί να φορτιστεί ή να

εκφορτιστεί σε μερικά λεπτά ή ακόμα και σε μερικά δευτερόλεπτα και έχει ενεργειακή πυκνότητα 85.6 Wh/kg στη θερμοκρασία δωματίου και 136 Wh/kg στους 80 °C. Αυτές είναι οι υψηλότερες τιμές για ένα διπλού στρώματος υπερπυκνωτή βασισμένο σε νάνο-υλικά από άνθρακα και είναι κατάλληλος για κινητά τηλέφωνα, ψηφιακές κάμερες και μικροϋπολογιστές. Παρά το θεωρητικά υψηλό συντελεστή επιφάνειας ανά μάζα του γραφένιου, ένας υπερπυκνωτής των 550 F/g δεν έχει επιτευχθεί σε μία πραγματική συσκευή και αυτό γιατί τα φύλλα γραφένιου τείνουν να κολλήσουν μεταξύ τους και γίνονται προσπάθειες να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα.