



Πολυτεχνείο
Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη αλγορίθμου για την διαστασιολόγηση
αυτόνομων υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας
Algorithm Development for Hybrid Autonomous Electrical
Power Systems Sizing

Ελευθέριος Νικολάου

A.M. 2009010063

Επιβλέπων

Φώτιος Κανέλλος, Λέκτορας

Χανιά

Οκτώβριος 2015

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναπτυχθεί αλγόριθμος σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab για την διαστασιολόγηση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Θα δοθεί έμφαση σε απλοποιητικές παραδοχές για την ελαχιστοποίηση του χρόνου προσομοίωσης. Το εκάστοτε σύστημα θα προσομοιώνεται για διαφορετικές διαμορφώσεις του και για αντιπροσωπευτικές χρονοσειρές της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, με τελικό σκοπό την βέλτιστη διαστασιολόγησή του.

Abstract

In the present thesis, an algorithm will be developed in the Matlab programming language for the sizing of autonomous hybrid electrical power systems. Emphasis will be given on simplifying agreements in order to minimize the simulation time. Each given system will be simulated for different configurations and typical representative timeseries of electrical energy demand, with the final goal of optimal sizing.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον Καθηγητή μου κύριο Φώτιο Κανέλλο και τον κύριο Ιωάννη Κατσίγιαννη, Διδάσκοντα του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την συνεχή υποστήριξή τους σε κάθε στάδιο της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, αλλά και για τις γνώσεις, την έμπνευση και την βοήθεια που μας προσφέρουν στα προπτυχιακά μαθήματα της Σχολής μας.

Αφιερώνεται στους Γονείς μου
και στον Αδερφό μου

Περιεχόμενα

- 1 **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**
 - 1.1 Η κατάσταση στην Ευρώπη και στην Ελλάδα
 - 1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
 - 1.3 Μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
 - 1.3.1 Ηλιακή Ενέργεια και Φωτοβολταϊκά
 - 1.3.2 Αιολική Ενέργεια
 - 1.3.3 Βιομάζα
 - 1.3.4 Υγρά Βιοκαύσιμα
 - 1.3.5 Γεωθερμία
 - 1.3.6 Υδροηλεκτρική Ενέργεια
 - 1.3.7 Συμπαράγωγή
- 2 **Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας**
 - 2.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας
 - 2.2 Αυτόνομα υβριδικά συστήματα
 - 2.2.1 Ανάλυση αυτόνομου υβριδικού συστήματος
- 3 **Ηλιακή Ακτινοβολία - Φωτοβολταϊκά πλαίσια**
 - 3.1 Ηλιακή Ακτινοβολία
 - 3.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία - Φωτοβολταϊκά πλαίσια
 - 3.2.1 Καμπύλη I-V
 - 3.2.1.1 Γενικά
 - 3.2.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη I-V
 - 3.2.1.2.1 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G
 - 3.2.1.2.2 Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου T
 - 3.2.1.2.3 Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A
 - 3.2.1.2.4 Η αντίσταση σειράς R_s
 - 3.2.1.2.5 Η παράλληλη αντίσταση R_{sh}
 - 3.2.2 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών
 - 3.3 Η καρδιά του Φωτοβολταϊκού Συστήματος
 - 3.4 Υλικά για την κατασκευή των Φωτοβολταϊκών στοιχείων
 - 3.5 Δομές Φ/Β πλαισίων
 - 3.6 Πλεονεκτήματα χρήσης και παράγοντες απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων
- 4 **Αιολική Ενέργεια - Ανεμογεννήτριες Μικρής Ισχύος**
 - 4.1 Αιολική Ενέργεια
 - 4.2 Η Κατανομή του Ανέμου
 - 4.2.1 Εισαγωγή
 - 4.2.2 Στατιστική μελέτη του ανέμου
 - 4.2.3 Ευστάθεια της Ατμόσφαιρας
 - 4.3 Εκθετικός Νόμος Κατανομής του Ανέμου
 - 4.3.1 Όριο Τραχύτητας
 - 4.4 Κατανομή Weibull
 - 4.4.1 Κατανομή Rayleigh

- 4.5 **Ανεμογεννήτριες Μικρής Ισχύος**
 - 4.5.1 Γενικά
 - 4.5.2 Αυτόνομα συστήματα αιολικής ενέργειας
 - 4.5.3 Διασυνδεδεμένα συστήματα αιολικής ενέργειας με μπαταρίες
 - 4.5.4 Διασυνδεδεμένα συστήματα αιολικής ενέργειας χωρίς μπαταρίες
 - 4.5.5 Άντληση νερού με χρήση της αιολικής ενέργειας
- 4.6 **Διατάξεις Συστημάτων Αιολικής ενέργειας**
- 4.7 **Ενέργεια και Ισχύς από τον Άνεμο**
 - 4.7.1 Θεωρία Δίσκου Ενέργειας
 - 4.7.2 Ισχύς του ανέμου
 - 4.7.3 Θεωρητικά μέγιστη ενέργεια από τον άνεμο
- 4.8 **Απώλειες Ανεμογεννήτριας**
- 4.9 **Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας**
- 4.10 **Βαθμός Απόδοσης Ανεμογεννήτριας**
- 4.11 **Απόδοση Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από Αιολική Ενέργεια**
 - 4.11.1 Συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης
 - 4.11.2 Βαθμός απόδοσης μετατροπέα αιολικής ενέργειας
- 4.12 **Ετήσια Αναμενόμενη Ενεργειακή Παραγωγή**
- 4.13 **Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας**
- 4.14 **Μακροβιότητα και συντήρηση των συστημάτων με Α/Γ μικρής ισχύος**
- 5 **Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη – Γεννήτριες**
- 6 **Γενικά Τεχνικά Στοιχεία για τις Μπαταρίες**
 - 6.1 **Δομή του βασικού στοιχείου και ηλεκτροχημικές αντιδράσεις**
 - 6.2 **Ταξινόμηση στοιχείων και μπαταριών**
 - 6.2.1 Πρωτεύουσες μπαταρίες (primary batteries)
 - 6.2.2 Δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (secondary or rechargeable)
 - 6.2.3 Μπαταρίες αποθήκευσης (reserve batteries)
 - 6.3 **Απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν**
 - 6.4 **Χαρακτηριστικά Μεγέθη Μπαταρίας**
 - 6.4.1 Χωρητικότητα
 - 6.4.2 Τάση
 - 6.4.3 Στάθμη φόρτισης
 - 6.4.4 Βάθος εκφόρτισης
 - 6.4.5 Κύκλος / Κύκλος ζωής
 - 6.4.6 Αποδοτικότητα
 - 6.4.7 Μέρες αυτονομίας
 - 6.4.8 Ρεύμα μπαταρίας
 - 6.4.9 Χρόνος ζωής
 - 6.4.10 Αυτοεκφόρτιση
 - 6.4.11 Κατάσταση υγείας
 - 6.4.12 Ρυθμός εκφόρτισης, ρυθμός φόρτισης
 - 6.4.13 Ειδική ενέργεια, ενεργειακή πυκνότητα
 - 6.4.14 Εσωτερική αντίσταση
 - 6.4.15 Ειδικό βάρος

- 6.4.16 Ειδική ισχύς
- 7 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας
 - 7.1 Αντλησιοταμίευση (PHS)
 - 7.2 Σφόνδυλοι
 - 7.3 Μπαταρίες μολύβδου-οξέως
 - 7.4 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου
 - 7.5 Μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου
 - 7.6 Μπαταρίες νατρίου-θείου
 - 7.7 Μπαταρίες ροής
 - 7.7.1 Vanadium redox battery (VRB)
 - 7.7.2 Μπαταρίες ψευδαργύρου-βρωμίου
 - 7.7.3 Μπαταρίες πολυθειούχου βρωμιδίου
 - 7.8 Πνευματικές τεχνολογίες αποθήκευσης
 - 7.8.1 Αποθήκευση Ενέργειας με Συμπίεση Αέρα (CAES)
 - 7.8.2 Τεχνολογία Liquid-Piston
 - 7.9 Πυκνωτές – Υπερπυκνωτές
 - 7.10 Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση (SMES)
 - 7.11 Κυψέλες Καυσίμου
 - 7.12 Ανάλυση – Πλεονεκτήματα και Επιλογή Μπαταριών Τεχνολογίας Μολύβδου Οξέως
 - 7.12.1 Τύποι μπαταριών μολύβδου οξέως
 - 7.12.2 Επιλογή τύπου μπαταρίας
 - 7.12.3 Χωρητικότητα της μπαταρίας
 - 7.12.3.1 Σχεδιασμός του συστήματος με βάση το 80% της ονομαστικής χωρητικότητας
 - 7.12.3.2 Πως επιλέγεται η κατάλληλη χωρητικότητα σε ένα συγκεκριμένο σύστημα
 - 7.12.3.3 Γήρανση των μπαταριών
 - 7.12.3.4 Τα βήματα της διαδικασίας φόρτισης
- 8 Αντιστροφέας (Inverters)
 - 8.1 Γενικά Στοιχεία
 - 8.2 Κατηγορίες Αντιστροφέων
 - 8.2.1 Μονοφασικοί Αντιστροφέας για σύνδεση με το δίκτυο
 - 8.2.2 Θέματα σχεδιασμού του συστήματος
 - 8.2.3 Τοπολογίες αντιστροφέων στην ευρωπαϊκή αγορά
 - 8.2.3.1 Αντιστροφέας χωρίς μετασχηματιστή
 - 8.2.3.2 Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα
- 9 Αλγόριθμος και Προσομοιώσεις
 - 9.1 Διαστασιολόγηση του συστήματος με οικονομικά κριτήρια
 - 9.2 Αλγόριθμος Ελέγχου και Προσομοίωσης
 - 9.3 Προσωμοίωση και Αποτελέσματα
 - 9.3.1 Κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για ανεμογεννήτρια ισχύος 1kW
 - 9.3.2 Κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για φωτοβολταϊκό πάνελ ισχύος 1kW

9.3.3 **Δεδομένα φορτίου**

9.3.4 **Αποτελέσματα Προσομοίωσης**

Βιβλιογραφία

Παράρτημα

1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι σύγχρονες κοινωνίες καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας για τη θέρμανση χώρων (κατοικιών και γραφείων), τα μέσα μεταφοράς, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων. Με την πρόοδο της οικονομίας και την αύξηση του βιοτικού επιπέδου, η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται ολοένα. Στις μέρες μας, το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που χρησιμοποιούμε προέρχεται από τις συμβατικές πηγές ενέργειας που είναι το πετρέλαιο, η βενζίνη και ο άνθρακας. Πρόκειται για μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που αργά η γρήγορα θα εξαντληθούν. Η παραγωγή και χρήση της ενέργειας που προέρχεται από αυτές τις πηγές δημιουργούν μια σειρά από περιβαλλοντικά προβλήματα με αιχμή τους, το γνωστό σε όλους μας, φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Από την άλλη πλευρά, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Ο ήλιος, ο άνεμος, τα ποτάμια, οι οργανικές ύλες όπως το ξύλο και ακόμη τα απορρίμματα οικιακής και γεωργικής προέλευσης, είναι πηγές ενέργειας των οποίων η προσφορά δεν εξαντλείται ποτέ. Υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον και είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων.

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1979 και παγιώθηκε την επόμενη δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς η αξιοποίησή τους δεν το επιβαρύνει, αφού δεν συνοδεύεται από παραγωγή ρύπων ή αερίων που ενισχύουν τον κίνδυνο για κλιματικές αλλαγές. Έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικός υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων [63],[64].

1.1 Η κατάσταση στην Ευρώπη και στην Ελλάδα

Σύμφωνα με την Eurostat το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας στους "27" για το 2010 ήταν στο 12.4%, μεγαλύτερο συγκριτικά με το 11.7% ένα χρόνο πριν και το 10.5% το 2008. Σύμφωνα με την Οδηγία του 2009, η ΕΕ έχει δεσμευθεί να επιτύχει 20% μερίδιο συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας και 10% μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις μεταφορές.

Τα υψηλότερα ποσοστά ανανεώσιμων πηγών στην τελική κατανάλωση σημειώθηκαν στην Σουηδία (47.9%), Λετονία (32.6%), Φινλανδία(32.2%), Αυστρία (30.1%) και Πορτογαλία (24.6%), ενώ τα χαμηλότερα στη Μάλτα (0.4%), Λουξεμβούργο (2.8%), Ηνωμένο Βασίλειο (3.2%) και Ολλανδία (3.8%).

Την ίδια ώρα, ενώ η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μια πραγματική εναλλακτική λύση για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών, η χώρα μας πλησιάζει τις

τελευταίες θέσεις στην Ευρώπη, σε ό,τι αφορά το ποσοστό της ενέργειας από ΑΠΕ στη συνολική κατανάλωση. Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα το διάστημα 2006-2010 αύξησε την συμμετοχή των ΑΠΕ στην συνολική κατανάλωση ενέργειας από 7% σε 9,2%, ενώ γειτονικές χώρες, όπως για παράδειγμα η Ιταλία και η Κύπρος, σχεδόν το διπλασίασαν.

Η Ελλάδα είναι μια χώρα με αξιοποιήσιμο αιολικό και ηλιακό δυναμικό, πράγμα που ευνοεί την ανάπτυξη των ΑΠΕ σε πολλά μέρη της ηπειρωτικής και νησιωτικής χώρας. Η κυριότερη μορφή καυσίμου εξακολουθεί να είναι ο εγχώριος λιγνίτης που καλύπτει το 55.9% του συνόλου των αναγκών παραγωγής. Το πετρέλαιο χρησιμοποιείται κυρίως στις νησιωτικές εγκαταστάσεις του μη διασυνδεδεμένου συστήματος με την ηπειρωτική χώρα. Οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ περιλαμβάνουν τις συνδεδεμένες μονάδες που αποτελούν τα αιολικά πάρκα, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, οι μονάδες αξιοποίησης βιομάζας και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Όπως φαίνεται από τα στατιστικά στοιχεία, η ανάπτυξη των ΑΠΕ τα επόμενα χρόνια αναμένεται αλματώδης, δημιουργώντας νέα δεδομένα στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Η νέα φιλοσοφία προσανατολίζεται στην αξιοποίηση ποικίλων ενεργειακών πηγών και στην ενσωμάτωση αυτών σε ένα ενιαίο υβριδικό σύστημα.

1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Απαντούν στο ενεργειακό πρόβλημα για τη σταθεροποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των υπόλοιπων αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, υποκαθιστώντας τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας από συμβατικές πηγές οδηγούν σε ελάττωση εκπομπών από άλλους ρυπαντές π.χ. οξείδια θείου και αζώτου που προκαλούν την όξινη βροχή.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).

Όσον αφορά τις αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρουν οι ΑΠΕ, αυτές έγκεινται στην πιθανή δυσκολία εύρεσης κατάλληλων τοποθεσιών για τις ΑΠΕ (πχ. περιοχές με αρκετή ηλιοφάνεια - περιοχές με υψηλό ποσό μέσης ταχύτητας), την δέσμευση καλλιεργήσιμης γης, την οπτική ρύπανση, φαινόμενα ηχορύπανσης και θανάτου πουλιών όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ανεμογεννητριών.

Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας. Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.

Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.

Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.

Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

1.3 Μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

1.3.1 Ηλιακή Ενέργεια και Φωτοβολταϊκά

Με τον όρο Ηλιακή Ενέργεια χαρακτηρίζουμε το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Το φώς και η θερμότητα που ακτινοβολούνται, απορροφούνται από στοιχεία και ενώσεις στη Γη και μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας. Η τεχνολογία σήμερα αξιοποιεί ένα μηδαμινό ποσοστό της καταθάνουσας στην επιφάνεια του πλανήτη μας ηλιακής ενέργειας με τριών ειδών συστήματα: τα θερμικά ηλιακά, τα παθητικά ηλιακά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

- **Θερμικά Ηλιακά Συστήματα**

Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες, οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια, τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό, όπως το νερό για παράδειγμα. Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών, σκουρόχρωμων δηλαδή επιφανειών καλά προσανατολισμένων στον ήλιο, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με νερό και του μεταδίδουν μέρος της θερμότητας που παρέλαβαν. Το παραγόμενο ζεστό νερό χρησιμοποιείται για απλή οικιακή ή πιο σύνθετη βιομηχανική χρήση, τελευταία δε ακόμη και για τη θέρμανση και ψύξη χώρων μέσω κατάλληλων διατάξεων.

• Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τον φυσικό φωτισμό των κτιρίων ή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα σε αυτά. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούν την αρχή της Βιοκλιματικής Αρχιτεκτονικής και μπορούν να εφαρμοσθούν σε όλους σχεδόν τους τύπους κτιρίων.

• Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Όλοι έχουμε συναντήσει φωτοβολταϊκά συστήματα σε μικρούς υπολογιστές και ρολόγια. Πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και που, εδώ και πολλά χρόνια, χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση μη διασυνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεων. Δορυφόροι, φάροι και απομονωμένα σπίτια χρησιμοποιούν παραδοσιακά τα φωτοβολταϊκά για την ηλεκτροδότησή τους. Στην Ελλάδα, η προοπτική ανάπτυξης και εφαρμογής των Φ/Β συστημάτων είναι τεράστια, λόγω του ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή από Φωτοβολταϊκά έχει ένα τεράστιο πλεονέκτημα, ότι αποδίδει την μέγιστη ισχύ της κατά τη διάρκεια της ημέρας που παρουσιάζεται η μέγιστη ζήτηση.

Ανάλογα με τη χρήση του παραγόμενου ρεύματος, τα Φ/Β κατατάσσονται σε:

- Αυτόνομα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων καταναλώνεται επιτόπου και εξ'ολοκλήρου από την παραγωγή στην κατανάλωση
- Διασυνδεδεμένα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να μεταφερθεί και να καταναλωθεί αλλού.

1.3.2 Αιολική Ενέργεια

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μία πρακτική που βρίσκει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι τα ιστιοφόρα και οι ανεμόμυλοι. Σήμερα, για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούμε τις ανεμογεννήτριες (Α/Γ).

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Οι Α/Γ χρησιμοποιούνται για την πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών. Το παραγόμενο από τις ανεμογεννήτριες ηλεκτρικό ρεύμα είτε καταναλώνεται επιτόπου, είτε εγχέεται και διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να καταναλωθεί αλλού. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις Α/Γ, όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση, συχνά αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή. Η αποθήκευση σήμερα γίνεται με δύο οικονομικά βιώσιμους τρόπους, ανάλογα με το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) είναι η πλέον γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης Η/Ε, η οποία χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παραγωγικές μη διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο μονάδες. Η

άντληση ύδατος με χρήση Η/Ε παραγόμενης από Α/Γ και η ταμίευσή του σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο το οποίο είναι ικανό να τροφοδοτήσει υδροηλεκτρικό σταθμό, είναι η μέθοδος αποθήκευσης που χρησιμοποιείται όταν η παραγόμενη Η/Ε είναι μεγάλη.

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Ευβοίας και φυσικά στα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές θα συναντήσουμε και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Η αιολική ενέργεια είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η εκμετάλλευση του υψηλού της δυναμικού στη χώρα μας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών που ενσωματώνεται στις σύγχρονες αποδοτικές ανεμογεννήτριες, έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

1.3.3 Βιομάζα

Βιομάζα είναι το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των προϊόντων, αποβλήτων και υπολειμμάτων που προέρχονται από τη γεωργία, (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοκομία και τις συναφείς βιομηχανίες, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων, όπως ορίζει η ΟΔΗΓΙΑ 2001/77/ΕΚ.

Ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση. Πρακτικά περιλαμβάνεται σε αυτήν οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από τον φυτικό κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο βιομάζα εννοούμε τα φυτικά και δασικά υπολείμματα (καυσόξυλα, κλαδοδέματα, άχυρα, πριονίδια, ελαιοπυρήνες, κουκούτσια), τα ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα), τα φυτά που καλλιεργούνται στις ενεργειακές φυτείες για να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας, καθώς επίσης και τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων, της αγροτικής βιομηχανίας και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων.

Η βιομάζα χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών (θέρμανσης, ψύξης, ηλεκτρισμού κ.λπ.) και ακόμα για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων (βιοαιθανόλη, βιοντήζελ κ.λπ.).

Οι κύριες εφαρμογές με καύσιμο βιομάζα είναι:

- **Θέρμανση θερμοκηπίων** : Σε περιοχές της χώρας όπου υπάρχουν μεγάλες ποσότητες διαθέσιμης βιομάζας, χρησιμοποιείται η βιομάζα σαν καύσιμο σε κατάλληλους λέβητες για τη θέρμανση θερμοκηπίων.
- **Θέρμανση κτιρίων με καύση βιομάζας σε ατομικούς/κεντρικούς λέβητες** : Σε ορισμένες περιοχές της Ελλάδας χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση κτιρίων ατομικοί/κεντρικοί λέβητες πυρηνόξυλου.
- **Παραγωγή ενέργειας σε γεωργικές βιομηχανίες** : Βιομάζα για παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιείται από γεωργικές βιομηχανίες στις οποίες η βιομάζα προκύπτει σε σημαντικές ποσότητες σαν υπόλειμμα ή υποπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας και έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε θερμότητα. Εκκοκκιστήρια, πυρηνελαιουργεία, βιομηχανίες ρυζιού καθώς και

βιοτεχνίες κονσερβοποίησης καίνε τα υπολείμματά τους (υπολείμματα εκκοκκισμού, πυρηνόξυλο, φλοιοί και κουκούτσια, αντίστοιχα) για την κάλυψη των θερμικών τους αναγκών ή/και μέρος των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

- **Παραγωγή ενέργειας σε βιομηχανίες ξύλου :** Τα υπολείμματα βιομηχανιών επεξεργασίας ξύλου (πριονίδι, πούδρα, ξακρίδια κλπ) χρησιμοποιούνται για τη κάλυψη των θερμικών αναγκών της διεργασίας καθώς και για την θέρμανση των κτιρίων.
- **Τηλεθέρμανση :** είναι η προμήθεια θέρμανσης χώρων καθώς και θερμού νερού χρήσης σε ένα σύνολο κτιρίων, έναν οικισμό, ένα χωριό ή μια πόλη, από έναν κεντρικό σταθμό παραγωγής θερμότητας. Η θερμότητα μεταφέρεται με προ-μονωμένο δίκτυο αγωγών από το σταθμό προς τα θερμαινόμενα κτίρια.
- **Παραγωγή ενέργειας σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού και Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ):** Το βιοαέριο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση των υγρών αποβλήτων σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού, και των απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ καίγεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα μπορεί να αξιοποιείται η θερμική ενέργεια των καυσαερίων και του ψυκτικού μέσου των μηχανών για να καλυφθούν ανάγκες τις διεργασίας ή/και άλλες ανάγκες θέρμανσης (πχ θέρμανση κτιρίων).

1.3.4 Υγρά Βιοκαύσιμα

Σήμερα, ο όρος βιοκαύσιμα χρησιμοποιείται συνήθως για υγρά καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα των μεταφορών. Τα πιο συνηθισμένα στο εμπόριο είναι το βιοντήζελ, μεθυλεστέρας ο οποίος παράγεται κυρίως από ελαιούχους σπόρους (ηλίανθος, ελαιοκράμβη, κ.ά) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του ή σε μίγμα με πετρέλαιο κίνησης σε πετρελαιοκινητήρες και η βιοαιθανόλη η οποία παράγεται από σακχαρούχα, κυταρινούχα και αμυλούχα φυτά (σιτάρι, καλαμπόκι, σόργο, τεύτλα, κ.ά.) και χρησιμοποιείται είτε ως έχει σε βενζινοκινητήρες που έχουν υποστεί μετατροπή είτε σε μίγμα με βενζίνη σε κανονικούς βενζινοκινητήρες είτε τέλος να μετατραπεί σε ETBE (πρόσθετο βενζίνης).

Τα βιοκαύσιμα είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον από τα συμβατικά καύσιμα γιατί έχουν λιγότερες εκπομπές και χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πρώτες ύλες. Συμβάλλουν στη μείωση των εισαγωγών και στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας.

1.3.5 Γεωθερμία

Η γεωθερμία είναι μια ήπια και πρακτικά ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, που μπορεί με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες να καλύψει ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η γεωθερμία προσφέρει ενέργεια χαμηλού κόστους, ενώ δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με εκπομπές βλαβερών ρύπων.

Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού ή ατμού, ποικίλει από περιοχή σε περιοχή, ενώ συνήθως κυμαίνεται από 25ο C μέχρι 360ο C. Στις περιπτώσεις που τα γεωθερμικά ρευστά έχουν υψηλή θερμοκρασία (πάνω από 150ο C), η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η κυριότερη θερμική χρήση της γεωθερμικής ενέργειας παγκοσμίως αφορά στη θέρμανση θερμοκηπίων. Χρησιμοποιείται ακόμα στις υδατοκαλλιέργειες, όπου εκτρέφονται υδρόβιοι οργανισμοί αλλά και για τηλεθέρμανση, δηλαδή θέρμανση συνόλου κτιρίων, οικισμών, χωριών ή και πόλεων.

Σήμερα στην Ελλάδα, η εκμετάλλευση της γεωθερμίας γίνεται αποκλειστικά για χρήση της σε θερμικές εφαρμογές, οι οποίες είναι εξίσου σημαντικές με την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ακόμα, λόγω του πλούσιου σε γεωθερμική ενέργεια υπεδάφους της χώρας μας, κυρίως κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου (Μήλος, Νίσυρος, Σαντορίνη), μπορεί να έχει ευρεία εφαρμογή για τη θερμική αφαλάτωση του θαλασσινού νερού με στόχο την απόληψη πόσιμου, κυρίως στις άνυδρες νησιωτικές και παραθαλάσσιες περιοχές. Μία τέτοια εφαρμογή έχει χαμηλότερο κόστος από εκείνο που απαιτείται για τον εφοδιασμό των περιοχών αυτών με πόσιμο νερό, μέσω υδροφόρων πλοίων.

1.3.6 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια (Υ/Ε) είναι η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση και τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής του στροβίλου, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το σύνολο των έργων και εξοπλισμού μέσω των οποίων γίνεται η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ονομάζεται Υδροηλεκτρικό Έργο (ΥΗΕ).

Η δέσμευση - αποθήκευση ποσοτήτων ύδατος σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες, για ένα Υδροηλεκτρικό Σταθμό, ισοδυναμεί πρακτικά με αποταμίευση Υδροηλεκτρικής Ενέργειας. Η προγραμματισμένη αποδέσμευση αυτών των ποσοτήτων ύδατος και η εκτόνώσή τους στους υδροστροβίλους οδηγεί στην ελεγχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένη την ύπαρξη κατάλληλων υδάτινων πόρων και τον επαρκή εφοδιασμό τους με τις απαραίτητες βροχοπτώσεις, η Υ/Ε καθίσταται μια σημαντικότερη εναλλακτική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Τα περιβαλλοντικά οφέλη ενός Υδροηλεκτρικού Σταθμού είναι ποικίλα. Ακόμα και το μειονέκτημα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εξ αιτίας των μεγάλης κλίμακας έργων πολιτικού μηχανικού, τα οποία ένα μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο προϋποθέτει, με μια καλοσχεδιασμένη μελέτη, μπορεί να μετατραπεί σε πλεονέκτημα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της λίμνης Πλαστήρα, κατά την οποία ο κατακλυσμός της περιοχής από ύδατα μετά τη δημιουργία του φράγματος, δημιούργησε ένα νέο υγροβιότοπο, ο οποίος σύντομα μετατράπηκε σε πόλο τουριστικής έλξης δίνοντας ταυτόχρονα νέες αρδευτικές δυνατότητες στη γύρω περιοχή.

Τα Μικρής κλίμακας Υδροηλεκτρικά έργα (ΜΥΗΕ) είναι κυρίως "συνεχούς ροής", δηλαδή δεν περιλαμβάνουν σημαντική περισυλλογή και αποταμίευση ύδατος, και συνεπώς ούτε κατασκευή μεγάλων φραγμάτων και ταμιευτήρων. Γι' αυτό το λόγο γίνεται συνήθως και ο διαχωρισμός μεταξύ μικρών και μεγάλων υδροηλεκτρικών. Ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός αποτελεί ένα έργο απόλυτα συμβατό με το περιβάλλον, καθώς το σύνολο των επιμέρους παρεμβάσεων στην περιοχή εγκατάστασης του έργου μπορεί να ενταχθεί αισθητικά και λειτουργικά στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας τους τοπικούς πόρους.

1.3.7 Συμπαραγωγή

Συμπαραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας & Θερμότητας (ΣΗΘ) είναι η ταυτόχρονη παραγωγή Θερμικής και Ηλεκτρικής ή και Μηχανικής Ενέργειας στο πλαίσιο μιας μόνο διαδικασίας. (βλ. Ν 3468/2006)

Συμπαραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ,, σύμφωνα με τον Ν 3468/2006) είναι η συμπαραγωγή που εξασφαλίζει εξοικονόμηση Πρωτογενούς Ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 10%, σε σχέση με τη Θερμική και Ηλεκτρική Ενέργεια που παράγεται στο πλαίσιο διακριτών διαδικασιών, καθώς και η παραγωγή από Μονάδες Μικρής και Πολύ Μικρής Κλίμακας που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, ανεξάρτητα από το ποσοστό εξοικονόμησης. Ο υπολογισμός της εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, όπου αυτός απαιτείται, γίνεται σύμφωνα με τα οριζόμενα στην περίπτωση β' του Παραρτήματος ΙΙΙ της Οδηγίας 2004/8/ΕΚ (L 52)

2. Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας

Όπως είδαμε, υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, η βιομάζα, η γεωθερμία, κα. Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει ως στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς δυσμενείς για το περιβάλλον συνέπειες. Ταυτόχρονα όμως θα πρέπει να διασφαλίζεται η ποιότητα παραγωγής και η αξιοπιστία του συστήματος. Γι' αυτό τον λόγο οι ΑΠΕ μπορούν να συνδυάζονται με τις ήδη υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ή και μεταξύ τους. Τα συστήματα που αποτελούνται από τουλάχιστον δύο διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται υβριδικά συστήματα.

Ο όρος "Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας" ή πιο απλά "Υβριδικά Συστήματα", αναφέρεται σε συστήματα όπου χρησιμοποιούνται πολλαπλές διατάξεις ενεργειακής μετατροπής ή περισσότερα του ενός καύσιμα για την ίδια διάταξη, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό, όμως, με τουλάχιστον μία μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, αλλά και ένα σύστημα διαχείρισης φορτίου. Βάσει των ανωτέρω, τα υβριδικά συστήματα αποτελούν μία εναλλακτική επιλογή σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα, τα οποία στηρίζονται στην παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Ο σχεδιασμός ενός υβριδικού συστήματος θα πρέπει να γίνεται βάσει κάποιων παραγόντων όπως είναι οι ακόλουθοι:

- Η εθνική πολιτική για την προώθηση των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας και γενικότερα για την προώθηση των ΑΠΕ.
- Τα χαρακτηριστικά του φορτίου και της περιοχής στην οποία βρίσκεται το σύστημα (ημερήσιες kWh, φορτίο αιχμής).
- Η διαθεσιμότητα και η βέλτιστη εκμετάλλευση των ΑΠΕ.
- Το ποσοστό διείσδυσης των ΑΠΕ στο υβριδικό σύστημα.
- Το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος.
- Την αξιοπιστία του συστήματος και την επίδρασή του στο περιβάλλον.

Βάσει νομοθεσίας [Ν. 3468/2006], ως υβριδικό σύστημα ή υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Χρησιμοποιεί τουλάχιστον μία μορφή ΑΠΕ.
2. Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για τον κορεσμό του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού. Ως ενέργεια που απορροφά ο σταθμός από το δίκτυο ορίζεται η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που μετράται κατά την είσοδό της στο σταθμό και της ενέργειας που αποδίδεται απευθείας στο δίκτυο από τις μονάδες ΑΠΕ του υβριδικού αυτού σταθμού. Αν για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας εφαρμόζεται τεχνολογία διαφορετική από αυτή των φωτοβολταϊκών, μπορεί να χρησιμοποιείται και συμβατική ενέργεια που δεν απορροφάται στο δίκτυο, εφόσον η χρήση της ενέργειας αυτής κρίνεται αναγκαία για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η χρησιμοποιούμενη συμβατική ενέργεια δεν μπορεί να υπερβαίνει το 10% της συνολικής ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, σε ετήσια βάση.

3. Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ του σταθμού δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό έως και 20%.

Ως κυριότερα οφέλη από την αξιοποίηση των ΥΣΕ θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν τα εξής:

- Διασφαλίζουν την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς οι ΑΠΕ εξαρτώνται από καιρικές συνθήκες, οι οποίες εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις, όπως η ταχύτητα ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία.
- Συμβάλλουν στην διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών (energy diversification), αποφεύγοντας έτσι την εξάρτηση από συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές.
- Επιτυγχάνουν την οικονομικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, καθώς αυτές φορτίζονται με σταθερότερο φορτίο και πλησίον της χαμηλότερης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες υβριδικών συστημάτων, τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο και τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα.

2.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Αν ένας υβριδικός σταθμός συνδεθεί σε δίκτυο απείρου ζυγού, τότε γίνεται λόγος για διεσπαρμένη παραγωγή. Δεδομένου ότι το κεντρικό δίκτυο έχει την ευθύνη για τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας, αλλά και για την παραγωγή έργου ισχύος, ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος απλοποιείται, καθώς δεν απαιτούνται συστήματα ελέγχου. Όταν ζητείται περισσότερη ενέργεια από αυτήν που μπορεί να παράγει ο σταθμός, το έλλειμμα ενέργειας παρέχεται από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Παρομοίως, τυχούσα περίσσεια ενέργειας που παράγεται από το υβριδικό σύστημα μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο με κάποιους περιορισμούς για την στιγμιαία παραγωγή ισχύος του ΥΣΕ. Στην περίπτωση ασθενούς δικτύου, όπου η ρύθμιση τάσης και συχνότητας μπορεί να επηρεαστεί από την ύπαρξη του ΥΣΕ, απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου.

2.2 Αυτόνομα υβριδικά συστήματα

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων φορτίων/φορτίων ειδικού σκοπού ή απομονωμένων/νησιωτικών περιοχών, που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε δεν υπάρχει σύστημα μεταφοράς παρά μόνο σύστημα διανομής. Η σημαντικότερη διαφορά του αυτόνομου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα είναι ότι πρέπει να μπορεί να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου, όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, οφείλει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής έργου ισχύος, ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από ΑΠΕ ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιο τρόπο, ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα ΑΥΣ περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου.

2.2.1 Ανάλυση αυτόνομου υβριδικού συστήματος

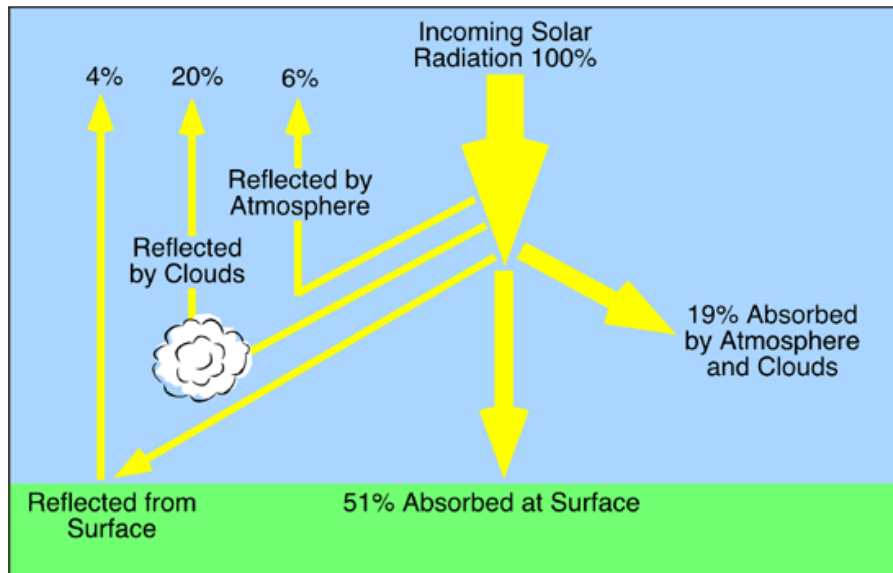
Οι βασικές συνιστώσες - μονάδες που αποτελούν ένα υβριδικό σύστημα είναι:

- Οι μονάδες βάσης, από τις οποίες προέρχεται το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης της ζήτησης.
- Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, που σκοπό έχουν την προσαρμογή της μη εγγυημένης παραγωγής των μονάδων βάσεων στη ζήτηση ισχύος.
- Οι μονάδες εφεδρείας, που σκοπό έχουν την κάλυψη ζήτησης ισχύος σε περιόδους που αυτή αδυνατεί να καλυφθεί από τις μονάδες βάσης ή τις μονάδες αποθήκευσης.
- Τα συστήματα ελέγχου ή διαχείρισης ισχύος, που βάσει του προσχεδιασμένου αλγορίθμου λειτουργίας ελέγχουν και συντονίζουν τη συνδυασμένη λειτουργία των ανωτέρω μονάδων βάσης, αποθήκευσης και εφεδρείας.

3. Ηλιακή Ακτινοβολία - Φωτοβολταϊκά πλαίσια

3.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης, συνίσταται από ένα μέρος άμεσης ακτινοβολίας και ένα μέρος διάχυτης. Το 51% της ακτινοβολίας απορροφάται άμεσα από το έδαφος, το 19% απορροφάται από την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα ενώ το υπόλοιπο 30% ανακλάται από την επιφάνεια, τα σύννεφα και την ατμόσφαιρα. Η άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας, προέρχεται από την κατεύθυνση του ήλιου σε αντίθεση με τη διάχυτη, η οποία σκεδάζεται από τον ουράνιο θόλο και δεν έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση.



Ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα [38],[65]

Η ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο είναι το άθροισμα της ακτινικής και διάχυτης ακτινοβολίας :

$$I = I_b + I_d$$

Όπου:

- I η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης
- I_b η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο
- I_d η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Εάν η επιφάνεια είναι κεκλιμένη, τότε στον προηγούμενο ορισμό προσθέτουμε την ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος :

$$I_T = I_{b,T} + I_{d,T} + I_{refl,T}$$

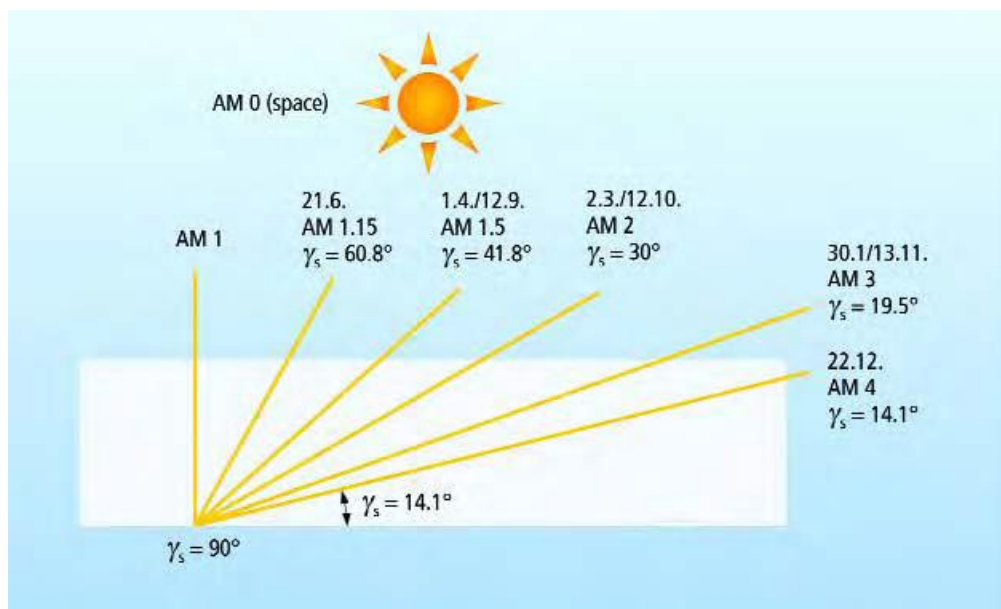
Όπου:

- I_T : η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης
- $I_{b,T}$: η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο
- $I_{d,T}$: η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

- $I_{\text{refl},T}$: η ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

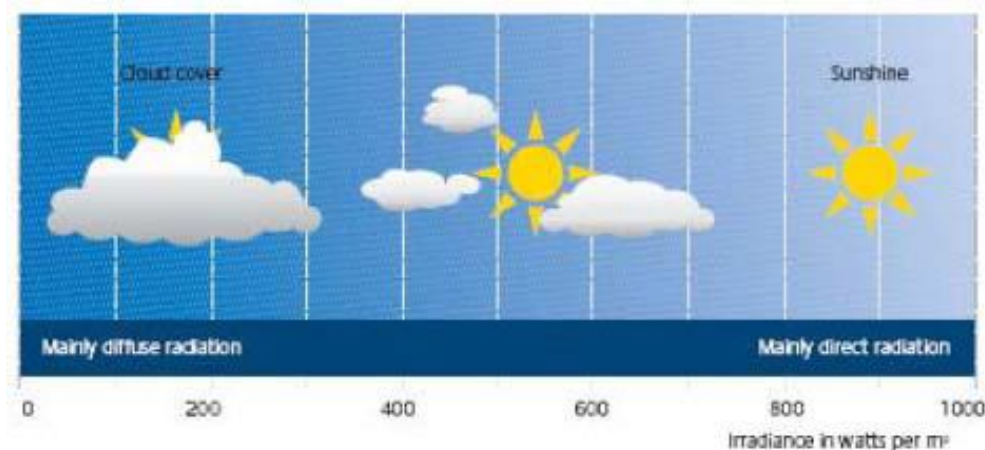
Η ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά άκρως μεταβλητή. Επιπλέον, πέρα από την κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινόμενης κίνησης του ήλιου, ακατάστατες μεταβολές (κάλυψη από σύννεφα) προκαλούνται από τις κλιματολογικές συνθήκες καθώς επίσης και τη γενικότερη σύνθεση της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρούμενων δεδομένων που λαμβάνονται στην τοποθεσία εγκατάστασης ή κοντά σε αυτή.

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας στη διαδρομή του ηλιακού φωτός, είναι η μάζα αέρος (A.M), ίση προς το σχετικό μήκος της διαδρομής της απευθείας δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας. Στη διάρκεια μίας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας στο επίπεδο της θάλασσας, η ακτινοβολία από τον ήλιο, όταν βρίσκεται στο Ζενίθ, αντιστοιχεί σε μάζα αέρος 1. Σε άλλες περιπτώσεις, η μάζα αέρος (A.M), είναι κατά προσέγγιση ίση προς το $1/\cos\gamma_s$, όπου γ_s είναι η γωνία του Ζενίθ όπως μας δείχνει το παρακάτω σχήμα.



Ορισμός μάζας αέρος A.M. [38],[66]

Ανάλογα με τις συνθήκες συννεφιάς και την ώρα της ημέρας (γωνία ύψους του ήλιου), η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία διαφοροποιούνται σημαντικά. Τις αίθριες ημέρες, η άμεση ακτινοβολία, είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, σε πολύ συννεφιασμένες μέρες (κυρίως το χειμώνα), η συνολική ακτινοβολία οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη της διάχυτης συνιστώσας. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη γη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές. Οι περιοχές κοντά στον ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από οποιεσδήποτε άλλες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (ιδιαίτερα τα σύννεφα που σκεδάζουν τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν το ποσό της ηλιακής ενέργειας που διατίθεται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

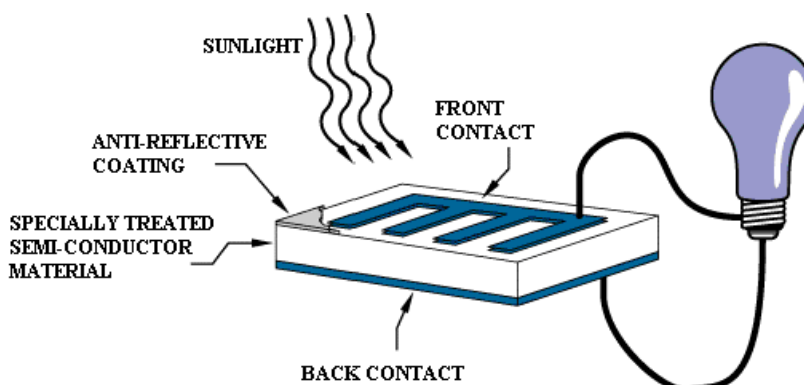


Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας σε αίθριες και συννεφιασμένες μέρες [38],[66]

Το ποσό της ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία αλλά επηρεάζεται σημαντικά και από την ικανότητα των στοιχείων να μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια (conversion efficiency)[38].

3.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία - Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Ο όρος φωτοβολταϊκά παραπέμπει στο φως, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία και στα βολτ που είναι συνώνυμο της ηλεκτρικής ενέργειας. Περιγράφει έτσι την διαδικασία μετατροπής της ενέργειας του ήλιου σε μια μορφή άμεσα εκμεταλλεύσιμη από τον άνθρωπο. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο που πρώτος ανακάλυψε ο γάλλος φυσικός E. Becquerel το 1839. Περιληπτικά πρόκειται για την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος. Το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο Φ/Β στοιχείο οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο.



Αρχή λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου [57]

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να συνδεθεί σε σειρά ή παράλληλα με άλλα Φ/Β στοιχεία, ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ρεύμα και τάση. Το Φ/Β πλαίσιο (panel) είναι μια σύνθεση πολλών Φ/Β στοιχείων σε μια ενιαία κατασκευή, εύκολη στη μεταφορά, την τοποθέτηση και στην αντικατάστασή της. Στο πίσω μέρος της κατασκευής υπάρχει κατάλληλο ηλεκτρικό κιβώτιο για τη συνδεσμολογία με την υπόλοιπη εγκατάσταση. Τα Φ/Β στοιχεία ενθυλακώνονται σε κάποιο πολυμερές υλικό, όπως ο οξικός εστέρας αιθυλενίου-βινυλίου (EVA), το οποίο στη συνέχεια τοποθετείται μεταξύ γυαλιού στην επάνω επιφάνεια και Mylar ή Tedlar στην κάτω.

Οι ακμές σφραγίζονται με ένα στεγανωτικό παρέμβυσμα και υποστηρίζονται από ένα πλαίσιο. Ο συνδυασμός πολλών Φ/Β πλαισίων, καλωδιωμένων μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα λέγεται Φ/Β συστοιχία (PV array). Τοποθετούνται συνήθως στην ίδια επίπεδη επιφάνεια, σταθερή ή περιστρεφόμενη. Η παράλληλη σύνδεση αυξάνει το ολικό ρεύμα, ενώ η σύνδεση σε σειρά αυξάνει την ολική τάση. Συνήθως συνδέονται κατά κλάδους. Κάθε κλάδος αποτελείται από πλαίσια σε σειρά. Οι ισοδύναμοι κλάδοι συνδέονται παράλληλα. Έτσι επιτυγχάνονται μεγάλες τάσεις (μέσα σε επιτρεπτά όρια, 600 V max) και μικρά ρεύματα, άρα μικρές θερμικές απώλειες στους αγωγούς μεταφοράς της ισχύος και χαμηλό κόστος αγοράς των αγωγών και της τοποθέτησής τους. Πολλές συστοιχίες συνεργαζόμενες, εν σειρά ή παράλληλα αποτελούν ένα Φ/Β συγκρότημα ή Φ/Β πάρκο.

Τα τρία περισσότερο σημαντικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας βασικής μονάδας είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος, η τάση ανοικτού κυκλώματος και το σημείο μέγιστης ισχύος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία. Αυτές οι χαρακτηριστικές μοιάζουν με τη χαρακτηριστική I-V ενός ηλιακού στοιχείου, ωστόσο υπάρχουν συγκεκριμένες ιδιομορφίες. Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής μιας διάταξης είναι το που θα στερεωθούν οι βασικές μονάδες, αν θα στερεωθούν σε σταθερές θέσεις ή οι προσανατολισμοί τους θα ακολουθούν (ιχνηλατούν) την κίνηση του ηλίου. Στις περισσότερες διατάξεις οι βασικές μονάδες στερεώνονται σ' ένα σταθερό κεκλιμένο επίπεδο με την πρόσοψη προς τον ισημερινό. Αυτό έχει το πλεονέκτημα της απλότητας, δηλαδή κανένα κινούμενο τμήμα και χαμηλό κόστος. Η άριστη γωνία κλίσης εξαρτάται κυρίως από το γεωγραφικό πλάτος, την αναλογία της διάχυτης ακτινοβολίας στην τοποθεσία και το είδος του φορτίου.

Στερεώνοντας τη διάταξη πάνω σε σύστημα με δύο άξονες παρακολούθησης του ηλίου, μπορεί να συλλεχθεί μέχρι 25% περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους, σε σύγκριση με την εγκατάσταση σταθερής κλίσης. Κάτι τέτοιο όμως αυξάνει την πολυπλοκότητα και έχει ως αποτέλεσμα μια χαμηλότερης αξιοπιστίας και υψηλότερου κόστους συντήρησης. Η μονού άξονα παρακολούθηση (ιχνηλάτηση) είναι λιγότερο σύνθετη αλλά παρουσιάζει μικρότερο κέρδος. Ο προσανατολισμός μπορεί να ρυθμίζεται χειροκίνητα, εκεί που η προσφορά εργασίας είναι διαθέσιμη, αυξάνοντας έτσι τις όποιες απολαβές. Έχει υπολογιστεί ότι σε κλίματα με ηλιοφάνεια μια διάταξη επίπεδης κινούμενης πλάκας που έχει κατάλληλη ρύθμιση ώστε να στρέφεται προς τον ήλιο δυο φορές την ημέρα και να παίρνει την κατάλληλη κρίση τέσσερις φορές το χρόνο, μπορεί να συλλαμβάνει το 95% της ενέργειας, που συλλέγεται με ένα σύστημα δυο αξόνων παρακολούθησης πλήρως αυτοματοποιημένο.

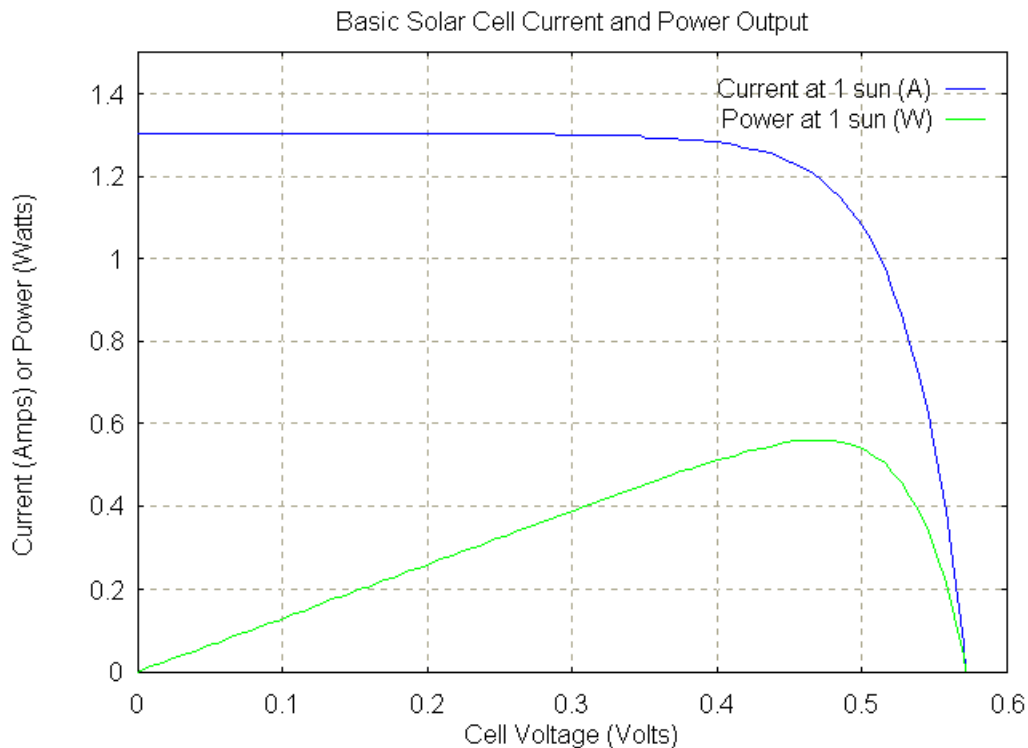
Το σύστημα παρακολούθησης είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα συστήματα, που λειτουργούν κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Η δομή αυτών των συστημάτων εκτείνεται από έναν απλό σχεδιασμό βασισμένο πάνω σε πλευρικούς ενισχυτικούς καθρέπτες μέχρι τα συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν υπερσύγχρονες οπτικές τεχνικές, για να αυξήσουν την είσοδο φωτός προς τα ηλιακά στοιχεία κατά μερικές τάξεις του μεγέθους. Αυτά τα συστήματα πρέπει να προνοούν για ένα σημαντικό γεγονός, ότι δηλαδή συγκεντρώνοντας το ηλιακό φως ελαττώνουν το γωνιακό άνοιγμα των ακτίνων, που το σύστημα μπορεί να δεχθεί. Η παρακολούθηση γίνεται απαραίτητη από τη στιγμή που ο λόγος

συγκέντρωσης υπερβαίνει το 10 περίπου και το σύστημα μπορεί να μετατρέψει μόνο την άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας [57].

3.2.1 Καμπύλη I-V

3.2.1.1 Γενικά

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο ως πηγή παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας έχει αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Ενώ οι περισσότερες ηλεκτρικές πηγές διατηρούν τη τάση τους σταθερή στην περιοχή κανονικής λειτουργίας τους, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η τάση μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που παρέχουν στο κύκλωμα ακόμα και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος που τροφοδοτεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (Το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και έχει μέγιστη τιμή ρεύματος I_{sc} και μηδενική τάση) και σε άπειρη αντίσταση (Το κύκλωμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο και έχει μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης V_{oc}), όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω χαρακτηριστική.



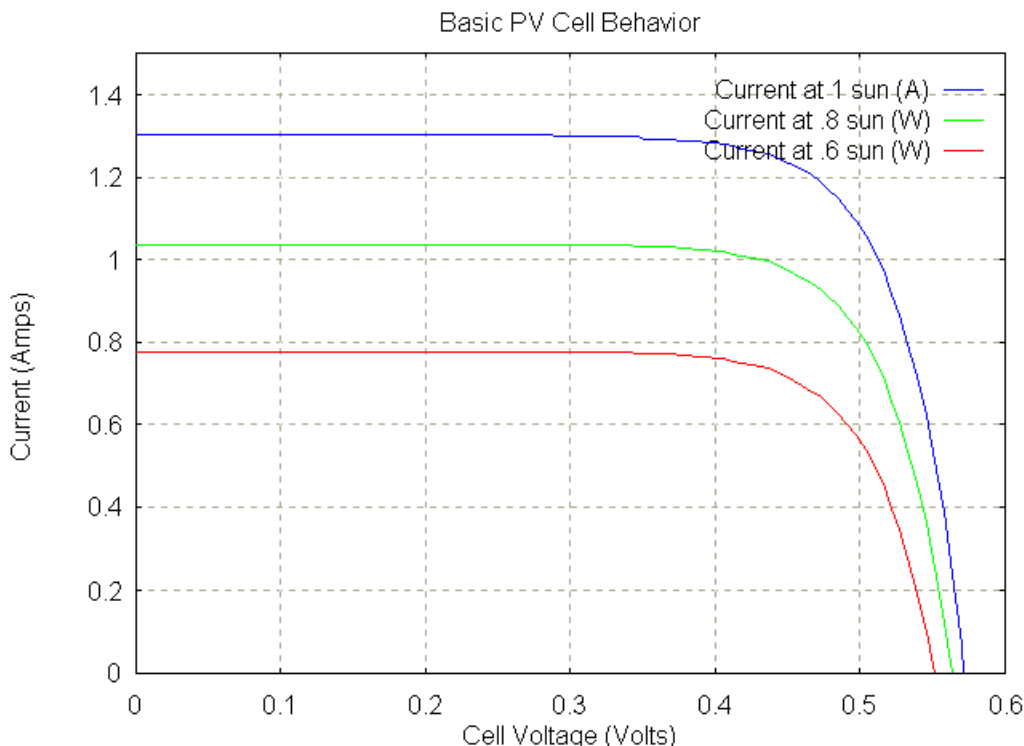
Χαρακτηριστική P-V: Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [38],[68]

Χαρακτηριστική I-V: Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [38],[68]

3.2.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη I-V

3.2.1.2.1 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G

Σε αυτή τη περίπτωση η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πρακτικά ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται, δηλαδή προς το γινόμενο της έντασης (της πυκνότητας της ισχύος) της ακτινοβολίας επί το εμβαδόν της επιφάνειάς του.



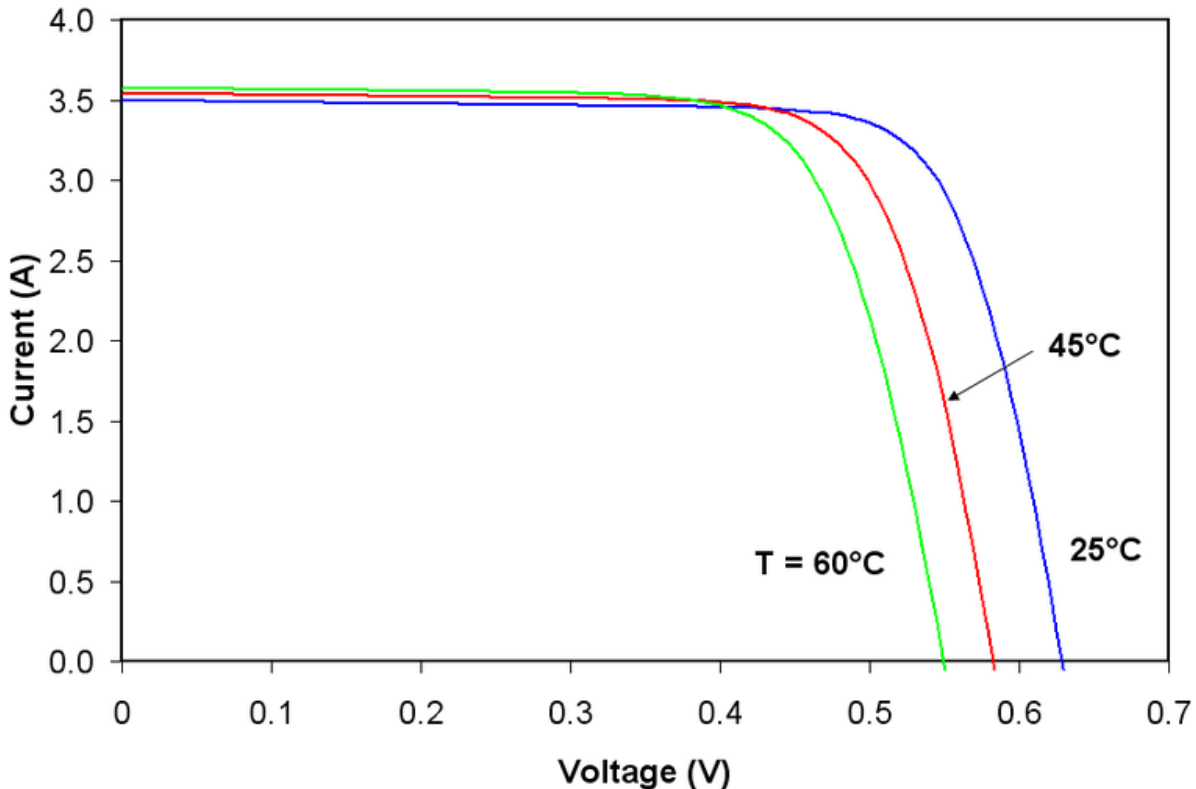
Χαρακτηριστική I-V : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από την ένταση ακτινοβολίας G [38],[68]

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία, ενώ η τάση του ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} μένει σχεδόν σταθερή στις μεταβολές της ακτινοβολίας για μεγάλες σχετικά τιμές ακτινοβολίας. Μαθηματικά, η εξάρτηση τάσης-ακτινοβολίας είναι λογαριθμική.

3.2.1.2.2 Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου T

Η θερμοκρασία επηρεάζει την χαρακτηριστική I-V με δύο τρόπους : άμεσα, μέσω του T και έμμεσα μέσω της επίδρασης του I_0 . Ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το μέγεθος του εκθέτη, το μέγεθος του I_0 αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση θερμοκρασίας. Η πιο σωστή επίδραση είναι να μειωθεί η V_{oc} γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το μέγεθος αυτής της μείωσης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την V_{oc} δηλαδή τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με τις υψηλότερες τιμές της V_{oc} υφίστανται τις μικρότερες μειώσεις της τάσης με την αυξανόμενη θερμοκρασία. Για τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου η αλλαγή στην V_{oc} με τη θερμοκρασία είναι της τάξης του $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$ ενώ για τα υψηλής απόδοσης είναι της τάξης του $-0,3\%/^{\circ}\text{C}$.

Η τιμή του φωτορεύματος I_{ph} αυξάνεται αργά καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία λόγω της αύξησης των φορέων στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Πάντως αυτή η επίδραση είναι μικρή της τάξης του 0.065%/°C για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου και 0.09%/°C για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου. Η γενική επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας αυτούς τους παράγοντες σε σχέση με τη χαρακτηριστική εξίσωση. Εντούτοις, δεδομένου ότι η αλλαγή στην τάση είναι πολύ ισχυρότερη από την αλλαγή στο ρεύμα, η γενική επίδραση στην απόδοση τείνει να είναι παρόμοια με αυτήν στη τάση. Στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου μειώνεται η απόδοσή τους κατά 0.50%/°C και στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου μειώνεται κατά 0.15-0.25%/°C.



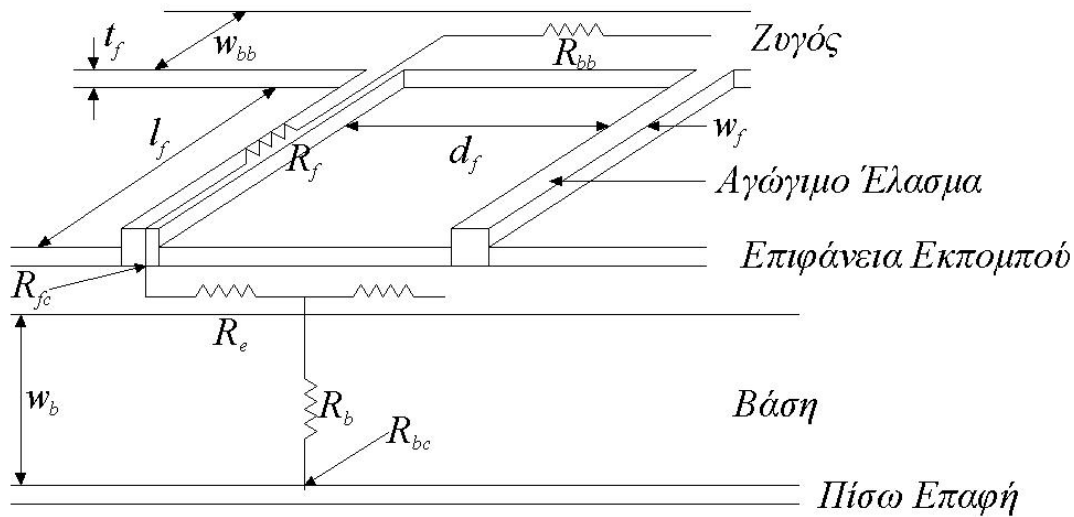
Χαρακτηριστική I-V : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από T [38],[67]

3.2.1.2.3 Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A

Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A εκφράζει πόσο πλησιάζει η συμπεριφορά της διόδου την θεωρητική όπου η επαφή p-n είναι ιδανική και δεν υπάρχει καμία επανασύνδεση φορέων μέσα στην περιοχή ανταλλαγής φορτίου. Όταν ο συντελεστής είναι 1 έχουμε την ιδανική δίοδο ενώ είναι 2 όταν υπάρχει σε μεγάλο βαθμό επανασύνδεση φορέων.

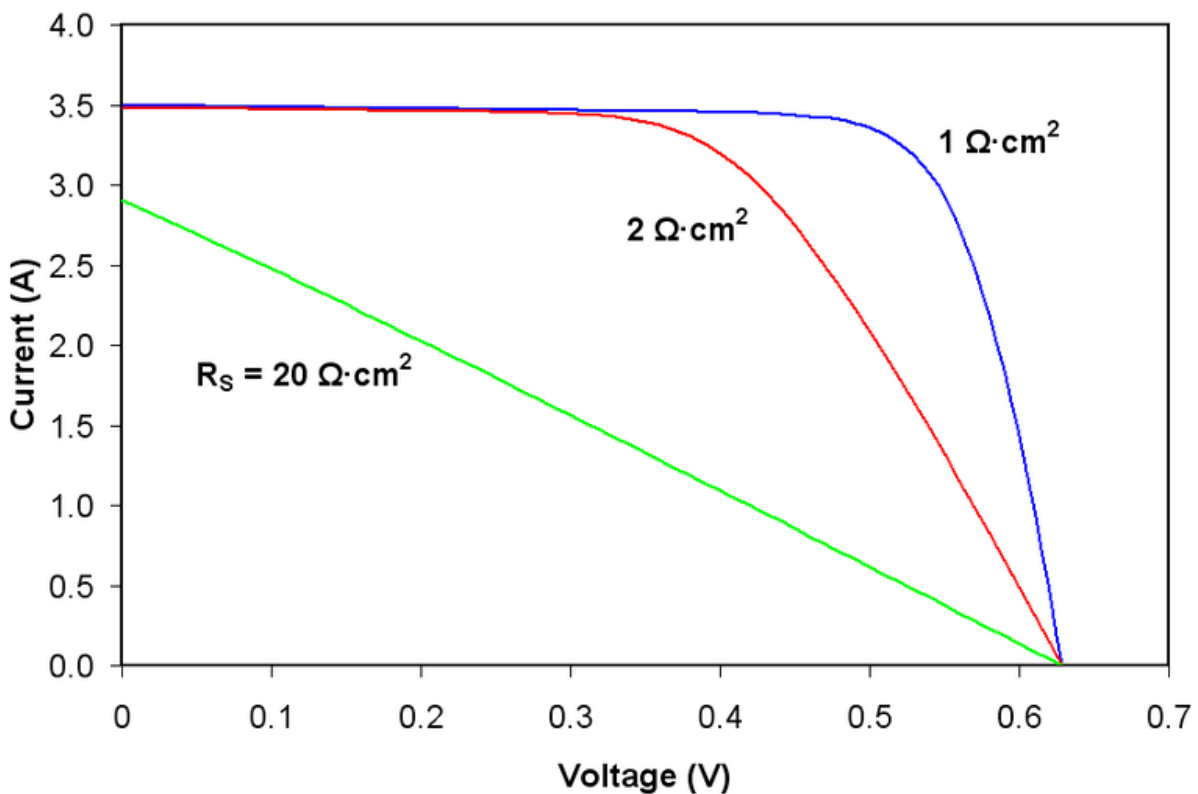
3.2.1.2.4 Η αντίσταση σειράς R_s

Η αντίσταση σειράς R_s εμποδίζει τη διέλευση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αναλυτικότερα η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου καθώς και οι αντιστάσεις από τις οποίες αποτελείται η αντίσταση σειράς.



Αντιστάσεις που αποτελούν την αντίσταση σειράς του φωτοβολταϊκού στοιχείου [27],[38]

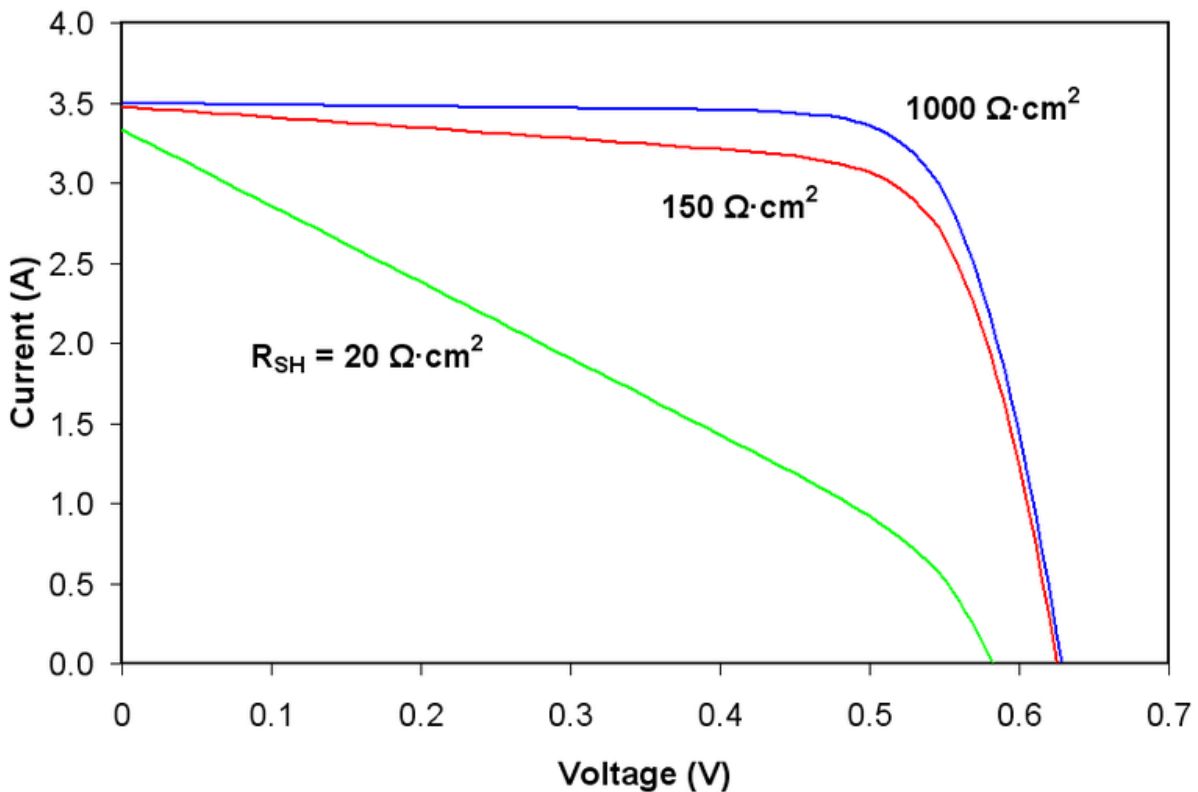
Οι εκφράσεις για τις διάφορες αντιστάσεις οι οποίες αποτελούν την αντίσταση σειράς R_s αναλύονται στον παρακάτω πίνακα. Συγκεκριμένα R_{sp} είναι η αντίσταση επιφάνειας του εκπομπού (Ω /τετράγωνο), ρ_{cf} και ρ_{cr} είναι οι ειδικές αντιστάσεις της μπροστινής και της πίσω επαφής, ρ_b είναι η ειδική αντίσταση της βάσης και ρ_m είναι η ειδική αντίσταση των μπροστινών αγώγιμων ελασμάτων. Αν υποθέσουμε ότι η αντίσταση σειράς αυξάνεται, τότε η πτώση τάσης στα άκρα της αυξάνεται για την ίδια τιμή της έντασης του ρεύματος, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τάση V στα άκρα του φορτίου άρα και του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} για μεγάλες τιμές της R_s , ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} παραμένει σταθερή. Οι απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση $P = I^2 R_s$ και αυξάνονται όσο αυξάνεται το I_{ph} δηλαδή όσο αυξάνεται η ένταση ακτινοβολίας.



Χαρακτηριστική I-V : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από R_s [38],[67]

3.2.1.2.5 Η παράλληλη αντίσταση R_{sh}

Αν υποθέσουμε ότι η παράλληλη αντίσταση μειώνεται, τότε η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_{sh} αυξάνεται για δεδομένη τιμή της τάσης V στα άκρα της, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή της έντασης του ρεύματος φορτίου I_L και συνεπώς η τάση V_{oc} . Για μικρές τιμές της R_{sh} θα υπάρξει σημαντική μείωση της τάσης V_{oc} .



Χαρακτηριστική I-V : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από R_{sh} [38],[67]

3.2.2 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_{mmp} προς το γινόμενο της επιφάνειας A του φωτοβολταϊκού στοιχείου και της έντασης ακτινοβολίας G μας δίνει το βαθμό απόδοσης.

$$N = P_{mmp}/AG = I_{mmp} \cdot V_{mmp}/AG = FF I_{sc} V_{oc}/AG$$

Η απόδοση αυτή είναι πάντοτε μικρότερη από τη μέγιστη θεωρητική απόδοση $n_{max,th}$, που δίνεται από τη σχέση:

$$n_{max,th} = \phi(E_g) V_m / \phi E_\mu$$

όπου:

- $\phi(E_g)$ είναι η ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού
- ϕ είναι η συνολική φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο
- E_μ είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας

Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου τα 2/3 των φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου (1,1eV). Επίσης, η V_m των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το 1/3 της E_μ της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε πρόχειρα ότι η μέγιστη θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου:

$$n = (2/3) * (1/3) = 22\%$$

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείο την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

3.3 Η καρδιά του Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Τα Φ/Β στοιχεία είναι διατάξεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, φτιαγμένες από ημιαγώγιμα υλικά. Τα μεγέθη και οι μορφές τους διαφοροποιούνται ανάλογα με το υλικό και την εφαρμογή. Συνδέονται μεταξύ τους συνήθως σε σειρά, για να δημιουργήσουν τα Φ/Β πλαίσια, δηλαδή τα ακέραια panels που βλέπουμε στα Φ/Β συστήματα. Τα πλαίσια συνδέονται σε σειρά και παράλληλα, διαμορφώνοντας την Φ/Β συστοιχία. Το μέγεθος της συστοιχίας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμη στη συγκεκριμένη τοποθεσία καθώς και οι ανάγκες του καταναλωτή. Τα Φ/Β πλαίσια αποτελούν το σημαντικότερο μέρος ενός Φ/Β συστήματος, το οποίο μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές συνδέσεις, τη δομή στήριξης, τον αντιστροφέα DC/AC και τις μπαταρίες που αποθηκεύουν τη ηλιακή ενέργεια για χρήση όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί.

3.4 Υλικά για την κατασκευή των Φωτοβολταϊκών στοιχείων

Ενώ όλα τα Φ/Β συστήματα έχουν παρόμοια δομή, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι Φ/Β στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αυτοί ποικίλλουν στα βασικά υλικά, στην ικανότητα να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, και στο κόστος. Τα κυριότερα είδη Φ/Β στοιχείων και πλαισίων που βρίσκονται σήμερα στην αγορά είναι τα εξής [57]:

- **Κρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία με βάση το Πυρίτιο**

Το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β. Η κυριαρχία αυτή οφείλεται αρχικά στην τεράστια παγκόσμια επιστημονική και τεχνική υποδομή για το υλικό αυτό από τη δεκαετία του '60. Μεγάλες κυβερνητικές και βιομηχανικές επενδύσεις έγιναν σε προγράμματα για τις χημικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες του Si, ώστε να δημιουργηθεί ο εξοπλισμός που απαιτείται στα βήματα της επεξεργασίας για την απόκτηση της απαραίτητης καθαρότητας και της κρυσταλλικής δομής του υλικού. Η γνώση που προέκυψε έτσι για το πυρίτιο, τα χαρακτηριστικά του και η αφθονία του στη γη, το κατέστησαν ικανό και συμφέρον μέσο για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Εντούτοις, λόγω του ότι είναι εύθραυστο, το πυρίτιο απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων σχετικά μεγάλου πάχους. Αυτό σημαίνει ότι μερικά από τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται μετά την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας πρέπει να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις για να ενταχθούν στην ροή του ρεύματος και να συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Συνεπώς, το υλικό θα πρέπει να έχει υψηλή καθαρότητα και δομική τελειότητα ώστε να αποτρέψει την επιστροφή των ηλεκτρονίων στις φυσικές τους θέσεις. Οι ατέλειες πρέπει να αποφευχθούν ώστε η ενέργεια του ηλεκτρονίου να μην μετατραπεί σε θερμότητα. Η παραγωγή θερμότητας, που είναι επιθυμητή στις ηλιακά θερμικά πλαίσια, όπου αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα ρευστό, είναι ανεπιθύμητη στα Φ/Β πλαίσια, όπου η ηλιακή ενέργεια θα πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρική.

Το πυρίτιο, ανάλογα με την επεξεργασία του, δίνει μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά, από τα οποία παράγονται τα Φ/Β στοιχεία.

α. Μονοκρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια.

Τα μονοκρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία χρησιμοποιούν το κρυσταλλικό πυρίτιο. Αυτό παράγεται σε μεγάλα φύλλα που μπορούν να κοπούν σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος και να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία σε ένα Φ/Β πλαίσιο. Αγωγίμες μεταλλικές λωρίδες τοποθετούνται πάνω από τα στοιχεία ώστε να συλλέξουν τα ηλεκτρόνια και να δημιουργηθεί το ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτά τα πλαίσια είναι ακριβότερα από τα πολυκρυσταλλικά που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Όμως, είναι ιδιαίτερα αποδοτικά και μπορεί κατά συνέπεια να αποτελέσουν την πιο κερδοφόρα επένδυση σε βάθος χρόνου. Η απόδοσή τους κυμαίνεται μεταξύ 12% και 17%. Αυτό σημαίνει ότι το πλαίσιο μπορεί να μετατρέψει το 12-17% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε αυτό σε ηλεκτρική. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των τυποποιημένων μονοκρυσταλλικών πλαισίων που διατίθενται σήμερα έχουν απόδοση μεταξύ 13-16%. Εταιρείες που κατασκευάζουν πλαίσια με απόδοση γύρω στο 17%, αποτελούν μειοψηφία.

β. Πολυκρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια.

Τα πολυκρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία ήρθαν σαν εξέλιξη των μονοκρυσταλλικών κυρίως λόγω της γρηγορότερης και φθηνότερης παραγωγικής διαδικασίας. Η απόδοσή τους είναι μικρότερη, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ανομοιογένεια του υλικού. Το ποσοστό απόδοσης των πλαισίων τέτοιου τύπου κυμαίνεται μεταξύ 12% και 14% και έχουν αρκετά χαμηλότερο κόστος από τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια.

• Φ/Β πλαίσια thin film

Τα λεπτά υλικά είναι ένας τρόπος να μειωθεί το κόστος των Φ/Β πλαισίων και να αυξηθεί η απόδοσή τους. Εκτός από τη χρήση μικρότερης ποσότητας υλικού, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι ολόκληρα πλαίσια μπορούν να κατασκευαστούν παράλληλα με τη διαδικασία απόθεσης. Αυτό είναι συμφέρον οικονομικά, αλλά επίσης πολύ απαιτητικό τεχνικά, επειδή η επεξεργασία χωρίς ατέλειες αφορά σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Στα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν θα πρέπει να αντιπαρατεθεί η χαμηλότερη ως τώρα απόδοση τους που περιορίζεται στο 5-10%, ανάλογα με το υλικό. Η τεχνολογία thin film βρίσκεται σε αναπτυσσόμενο στάδιο αφού με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας και χρήση διαφορετικών υλικών αναμένεται αύξηση απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα πάντως αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή Φ/Β πλαισίων.

α. Φ/Β πλαίσια άμορφου πυριτίου.

Τα πλαίσια αυτού του τύπου διαφοροποιούνται από τα προηγούμενα κατά πρώτο λόγο στη δομή, αφού δεν είναι κρυσταλλικά. Το μικρό πάχος του υλικού αρχικά δημιούργησε μείωση στην απορρόφηση του φωτός από το άμορφο πυρίτιο. Το πρόβλημα ξεπεράστηκε με την τεχνική της οπτικής ενίσχυσης. Αυτή τη στιγμή στην αγορά υπάρχουν Φ/Β πλαίσια άμορφου πυριτίου με απόδοση 6-8%. Το κύριο πρόβλημα με το άμορφο πυρίτιο είναι η αρχική αλλοίωση των χαρακτηριστικών του με την πρώτη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, γεγονός που προσδίδει μια αστάθεια στην ηλεκτρική του συμπεριφορά. Το φαινόμενο αυτό αν και έχει ερευνηθεί αρκετά δεν έχει ακόμα αποσαφηνιστεί πλήρως.

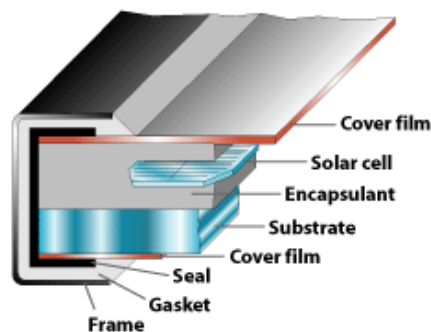
β. Άλλα υλικά

Οι λόγοι που το πυρίτιο είναι ο κυρίαρχος της φωτοβολταϊκής αγοράς μέχρι σήμερα έχουν να κάνουν περισσότερο με τη διαθεσιμότητα του υλικού και της τεχνογνωσίας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι η στροφή προς άλλα υλικά, που ίσως με την κατάλληλη επεξεργασία δώσουν αποδοτικότερα και φθηνότερα Φ/Β πλαίσια, είναι πλέον γεγονός.

Σήμερα, υλικά όπως το CIS (copper indium diselenide) με προσθήκη Ga και το CdTe (cadmium telluride) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία thin film πλαισίων. Το πρώτο δίνει σήμερα Φ/Β πλαίσια με απόδοση περίπου ως 10%. Το υλικό είναι πολλά υποσχόμενο αφού εργαστηριακά έχει επιτευχθεί απόδοση ως 19%. Το CdTe δίνει επίσης Φ/Β πλαίσια με απόδοση 10%, ενώ εργαστηριακά Φ/Β στοιχεία έχουν φτάσει το 16%. Υπάρχουν και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα συμπυκνωτών, μονοκρυσταλλικά thin film στοιχεία με βάση το GaAs, τα οποία έχουν μεγάλη απόδοση αλλά επίσης μεγάλο κόστος. Η μείωση του κόστους αυτών των Φ/Β στοιχείων θα τα καταστήσει ανταγωνιστικά, δεδομένης της υπεροχής τους όσον αφορά την απόδοση.

3.5 Δομές Φ/Β πλαισίων

Τα υλικά που παρουσιάστηκαν συμμετέχουν σε διατάξεις διαφορετικής δομής για την δημιουργία των πλαισίων. Τα πιο συνηθισμένα και ευρύτερα χρησιμοποιούμενα πλαίσια είναι τα flat-plate (επίπεδα και συμπαγή), όπου οι επιστρώσεις υλικών διαδέχονται η μία την άλλη σχηματίζοντας μια συμπαγή κατασκευή. Υπάρχουν παρόλα αυτά και άλλες δομές, οι οποίες διευρύνουν την χρησιμότητα των Φ/Β συστημάτων.



Δομή Φ/Β πλαισίου [57]

- **Επίπεδα, συμπαγή πλαίσια**

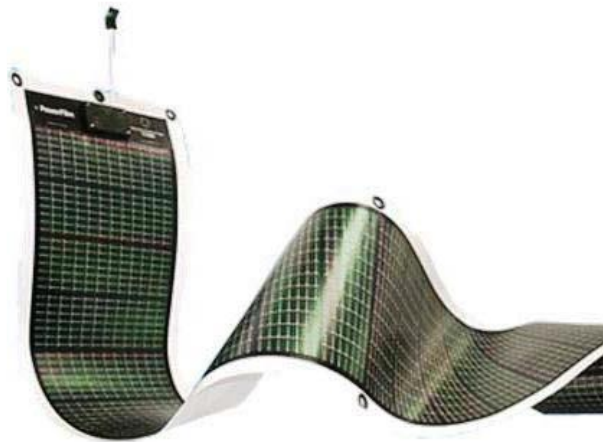
Η κατασκευή τους είναι συμπαγής και το βάρος σχετικά χαμηλό. Η συνήθης δομή ενός συμπαγούς και επίπεδου πλαισίου περιλαμβάνει τα Φ/Β στοιχεία, το υλικό ενθυλάκωσης τους, το αδιαφανές φύλλο κάλυψης του πίσω μέρους, το γυαλί υψηλής μετάδοσης που καλύπτει το εμπρόσθιο μέρος του πλαισίου και τέλος το πλαίσιο από αλουμίνιο που καλύπτει τις πλαϊνές πλευρές, συγκρατεί και προστατεύει τα επιμέρους στοιχεία του Φ/Β πάνελ. Η ονομαστική ισχύς των επίπεδων κρυσταλλικών πλαισίων κυμαίνεται μεταξύ 10-250 Wp. Μερικοί κατασκευαστές παράγουν πλαίσια με ισχύ εξόδου ως 280 Wp. Τα επίπεδα πλαίσια τεχνολογίας thin film έχουν ισχύ εξόδου ως 100 Wp. Συνήθως τοποθετούνται με

σταθερή κλίση. Υπάρχουν και διατάξεις με τις οποίες τα Φ/Β πλαίσια ακολουθούν την κίνηση του ήλιου, αλλά αυξάνουν δραματικά το κόστος του συστήματος.

- **Φ/Β πλαίσια ειδικά για ενσωμάτωση σε κτιριακές κατασκευές (BIPV)**

Οι τεχνολογίες BIPV μπορούν να αποτελέσουν, εκτός από πηγές ενέργειας, δομικά στοιχεία του κτιρίου όπου τοποθετούνται. Ακόμα και σε κτίρια σύγχρονου αρχιτεκτονικού σχεδιασμού μπορούν να ενσωματωθούν Φ/Β διατάξεις δημιουργώντας ένα άρτιο αισθητικό αποτέλεσμα. Εκτός από τα flatplate πλαίσια με την προαναφερθείσα δομή, σε τέτοιες εφαρμογές εγκαθίστανται και πάνελ με ιδιαίτερο design και επεξεργασία. Στα glass to glass Φ/Β πλαίσια η λεπτή ταινία Φ/Β υλικού τοποθετείται ανάμεσα σε φύλλα γυαλιού, προσκαλώντας έτσι το φως στο εσωτερικό του κτηρίου καθώς παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Ένα άλλο είδος BIPV είναι οι εύκαμπτες Φ/Β μεμβράνες οι οποίες δεν περιέχουν γυαλί στη δομή τους και επικολλούνται σε μονωτικά φύλλα για την κάλυψη ταρατσών.



Εύκαμπτη Φ/Β μεμβράνη [57]

3.6 Πλεονεκτήματα χρήσης και παράγοντες απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Παρακάτω δίνεται μία συνοπτική λίστα των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζονται από την χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων.

1. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν καταναλώνουν καύσιμα.
2. Κατά τη λειτουργία τους δε ρυπαίνουν το περιβάλλον μειώνοντας έτσι την εκπομπή καυσαερίων που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
3. Δεν έχουν κινούμενα μέρη και παράγουν ισχύ αθόρυβα.
4. Λόγω του σπονδυλωτού τρόπου κατασκευής τους, μπορούν να προσαρμοστούν σε όλες τις απαιτήσεις μεγέθους και ζήτησης ισχύος, επομένως είναι ευκόλως επεκτάσιμα.
5. Μπορούν να λειτουργήσουν αρμονικά με άλλα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του ευρύτερου συστήματος.
6. Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή.
7. Έχουν πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

8. Οι εργασίες συντήρησης είναι περιορισμένες και μόνο οι διατάξεις που χρησιμοποιούν trackers για την παρακολούθηση της ηλιακής πορείας εμφανίζουν περισσότερες απαιτήσεις.
9. Λειτουργούν χωρίς προβλήματα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και υπό όλες τις καιρικές συνθήκες.
10. Τα ηλιακά κύτταρα έχουν περιορισμένη αλλοίωση κατά την διάρκεια λειτουργίας τους και, συνεπώς, μεγάλη διάρκεια ζωής.
11. Μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη επίτευξη "διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας", η οποία αποτελεί το νέο μοντέλο ανάπτυξης σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με διασύνδεση.

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικά σε προηγούμενη παράγραφο αλλά και με την προσθήκη περισσότερων στοιχείων, η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζεται από παράγοντες όπως:

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας: Αυξημένη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και συνεπώς μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

Η θερμοκρασία: Οι υψηλές θερμοκρασίες έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, καθώς μειώνουν την απόδοση και την αποδιδόμενη μέγιστη ισχύ. Η θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/Β συστήματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης. Όμως, είναι δυνατή η εγκατάσταση συστήματος ψύξης για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος.

Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου: Μεγάλες ταχύτητες ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η ρύπανση: Η ηλεκτροπαραγωγή των πλαισίων μειώνεται με τη ρύπανση της επιφάνειάς τους από την προσκόλληση σκόνης, φύλλων, γύρης κ.α.

Η γήρανση: Με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζεται μία βαθμιαία πτώση στην ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία εκτιμάται πως είναι της τάξης του 1-2% ανά έτος.

Η σκίαση: Η σκίαση των φωτοβολταϊκών από βλάστηση, κεραίες, κτλ επιδρά αρνητικά στην απόδοσή τους.

Οι απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος: Κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Επομένως, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης περίπου του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο.

4. Αιολική Ενέργεια - Ανεμογεννήτριες Μικρής Ισχύος

4.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία καθώς η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλες μάζες αέρα να μετακινούνται από την μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον, η οποία προωθείται για την μείωση του ρυθμού εξάντλησης των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων καθώς και τον περιορισμό των εκπομπών που δημιουργούνται από συμβατικές πηγές ενέργειας. Η εκτεταμένη χρήση των τελευταίων προκαλεί την ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου και αυξάνει την ατμοσφαιρική ρύπανση. Αν υπήρχε η δυνατότητα πλήρους εκμετάλλευσης του συνολικού αιολικού δυναμικού της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας. Σύμφωνα με υπολογισμούς, στο 25% της συνολικής επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας άνω των 5, 1 m/sec σε ύψος 10 μέτρα από το έδαφος, κάτι που μας βοηθά να εξαγάγουμε το συμπέρασμα πως το ανώτερο ποσοστό αντιστοιχεί σε περιοχή εκμεταλλεύσιμου αιολικού δυναμικού και οι εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες. Αυτό, σε συνδυασμό με το ότι το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αιολική ενέργεια κατέχει μια δυναμική θέση έναντι των συμβατικών μορφών ενέργειας. Ειδικά στη χώρα μας, το αιολικό δυναμικό είναι εξαιρετικά πλούσιο και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξης. Η συστηματική εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού της χώρας μας θα συμβάλλει στην αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με ταυτόχρονη εξοικονόμηση μεγάλου ποσοστού συμβατικών καυσίμων, με αποτέλεσμα συναλλαγματικά οφέλη, ενώ μεγάλη επίσης θα είναι η συμβολή στον περιορισμό της κλιματικής μεταβολής, αφού η χρήση ανεμογεννητριών συνεπάγεται αποτροπή εκπομπών CO₂.

4.2 Η Κατανομή του Ανέμου

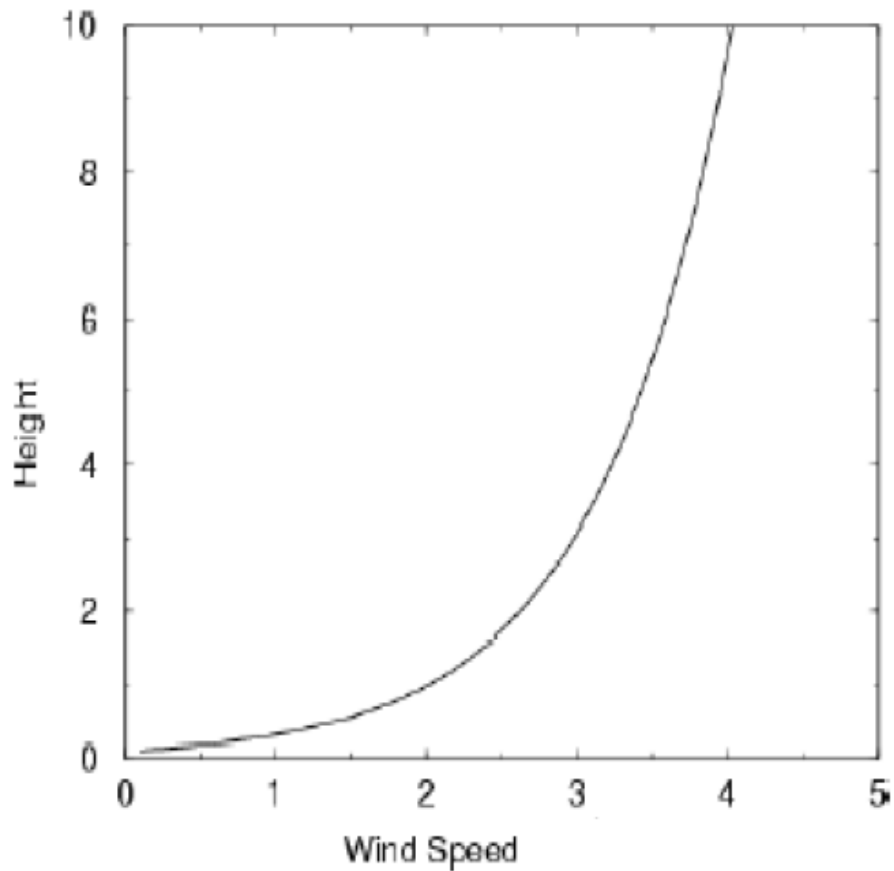
4.2.1 Εισαγωγή

Η κατανομή του ανέμου (wind profile) που ενδιαφέρει σε σχέση με την αιολική ενέργεια αναφέρεται στην μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, στις πρώτες λίγες εκατοντάδες μέτρα πάνω από το έδαφος [5],[37].

Η κατανομή του ανέμου επηρεάζει:

- Την αιολική ενέργεια που απορροφά η αιολική μηχανή.
- Την κόπωση της αιολικής μηχανής.
- Την αντοχή του πύργου στήριξης.

Η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από το τοπικό περιβάλλον και την ευστάθεια της ατμόσφαιρας.



Η κατανομή του ανέμου [37]

Η μεταβολή της μέσης ταχύτητας με το ύψος δίνεται από την εξίσωση:

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \int_{z_0}^{z+z_0} \frac{\phi(z/L)}{z} dz$$

όπου:

- u_* η ταχύτητα τριβής η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα (ρ) και την επιφανειακή τάση Reynolds (τ): $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$
- k είναι η σταθερά von Karman (~ 0.4 σταθερά αναλογίας)
- z_0 το μήκος τραχύτητας του εδάφους
- L η παράμετρος ευστάθειας της ατμόσφαιρας
- ϕ συνάρτηση που εξαρτάται από την ατμοσφαιρική ευστάθεια

Η παράμετρος L της ευστάθειας της ατμόσφαιρας, δίνεται από την σχέση:

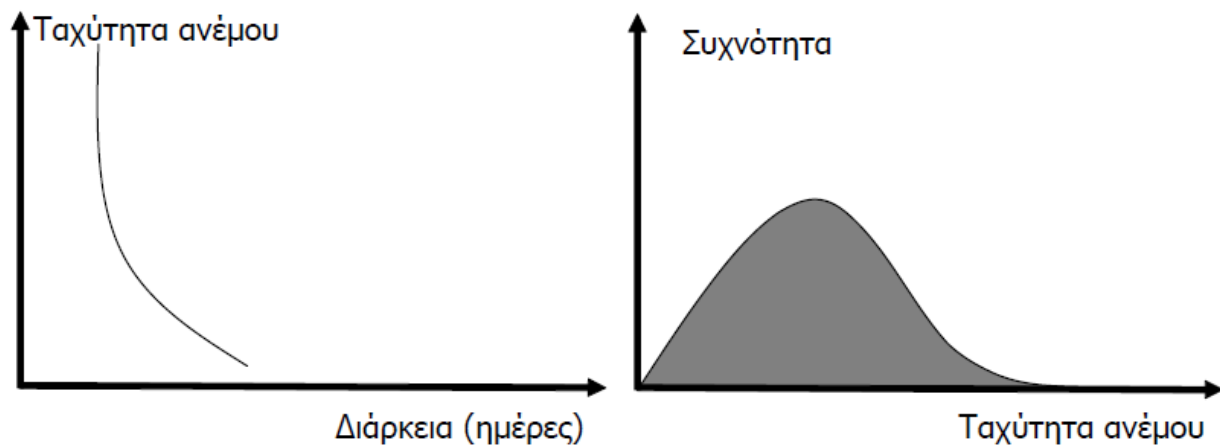
$$L = \frac{u_*^2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot T}{k \cdot g \cdot H_f}$$

όπου

- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας
- T : η απόλυτη θερμοκρασία του αέρα
- H_f : η κατακόρυφη ροή θερμότητας
- C_p : η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση

4.2.2 Στατιστική μελέτη του ανέμου

Για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής απαιτούνται αναλυτικά δεδομένα της κατανομής συχνοτήτων των διαφόρων ταχυτήτων του ανέμου και μάλιστα κατά διεύθυνση ώστε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τις κύριες διευθύνσεις του ανέμου.



Κατανομή συχνοτήτων των ταχυτήτων του ανέμου [37]

Διαστήματα νηνεμίας

Η μελέτη των διαδοχικών ημερών ή ωρών με νηνεμία ή χαμηλές ταχύτητες του ανέμου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί προσδιορίζει την περίοδο όπου μια αιολική μηχανή βρίσκεται εκτός λειτουργίας και καθορίζει τα συστήματα υποστήριξης των αιολικών μηχανών (συσσωρευτές, ηλεκτρικό δίκτυο, κλπ.).

4.2.3 Ευστάθεια της Ατμόσφαιρας

Ορίζεται από την κατακόρυφη με το ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα. Η ευστάθεια της ατμόσφαιρας μετριέται από την τάση που έχει μία αέρια μάζα, που έχει μετακινηθεί κατακόρυφα, να επιστρέψει ή όχι στην αρχική της θέση.

$$\frac{dT}{dz} > -\frac{g}{C_p} \quad \text{ευσταθής ατμόσφαιρα}$$

$$\frac{dT}{dz} < -\frac{g}{C_p} \quad \text{ασταθής ατμόσφαιρα}$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C_p} \quad \text{ουδέτερη ατμόσφαιρα}$$

- Σε ευσταθείς συνθήκες το πάχος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος μπορεί να φτάσει στα 10 m ενώ συνήθως είναι μεταξύ 50 m και 2 km.
- Σε ουδέτερη ατμόσφαιρα η σχέση μεταβολής ανέμου καθ' ύψος γίνεται (ύψη μεταξύ $3z_0$ και $1000z_0$, z_0 : μήκος τραχύτητας):

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z_0 + z}{z_0}$$

4.3 Εκθετικός Νόμος Κατανομής του Ανέμου

Όπως έχει τονισθεί, η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από το ύψος, αυξανόμενη με αυτό σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{u_{z_1}}{u_{z_2}} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^n$$

Όπου z_1 το ύψος αναφοράς (συνήθως 10m), u_{z_1} η αντίστοιχη ταχύτητα του ανέμου, z_2 το ύψος που θέλουμε και u_{z_2} η αντίστοιχη ταχύτητα. Ο συντελεστής n είναι αδιάστατος και εξαρτάται από τη μορφή του εδάφους, όπως θα δούμε και παρακάτω. Αυτή η σχέση ονομάζεται εκθετικός νόμος κατανομής του ανέμου και:

- Εφαρμόζεται σε μεγάλο πλήθος μετρήσεων και όχι σε ατομικές μετρήσεις.
- Εμφανίζει καλή ακρίβεια σε περιπτώσεις που η διαφορά ύψους είναι περισσότερο από 30-50 m. Η ακρίβεια όμως ελαττώνεται πολύ για μεγάλες διαφορές υψών.
- Δεν χρειάζονται γνώσεις ευστάθειας της ατμόσφαιρας.
- Το n δίνεται από τη σχέση, όταν το ύψος αναφοράς (z_2) είναι διαφορετικό από τα 10m (z_0 : μήκος τραχύτητας):

$$n = 0.04 \ln z_0 + 0.003(\ln z_0)^2 + 0.24$$

Για ύψος αναφοράς $z_2=10\text{m}$ οι τιμές του n δίνονται από πίνακες.

Οι τιμές του n για διάφορες κατηγορίες τραχύτητας [37]

Κατηγορία Τραχύτητας	Είδος Εδάφους	z_0 (m)	n
0	Εξομαλυσμένο (θάλασσα, χιόνι, άμμος)	0.001-0.02	0.10-0.13
1	Μέτρια τραχύτητα (χαμηλή βλάστηση και καλλιέργειες, αγροτικές περιοχές)	0.02-0.30	0.13-0.20
2	Τραχύ έδαφος (Δάση, προάστια πόλεων)	0.30-2.0	0.20-0.27
3	Πολύ τραχύ έδαφος (αστικές περιοχές, ψηλά κτίρια)	2.0-10.0	0.27-0.40

Τυπικές τιμές του συντελεστή n [37]

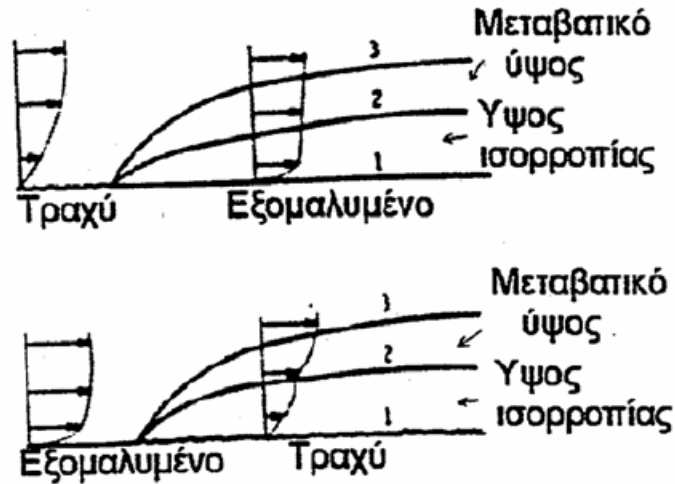
άμμος	0.10
θερισμένο γρασίδι	0.13
ψηλό γρασίδι	0.19
προάστιο	0.32

Για ουδέτερες συνθήκες έχουμε (Τα ύψη z_1 και z_2 λαμβάνονται από τη ζώνη μηδενικής ταχύτητας ανέμου):

$$n = \frac{1}{\ln \sqrt{\frac{z_1 z_2}{z_0}}}$$

4.3.1 Όριο Τραχύτητας

Η διαχωριστική γραμμή μεταξύ δύο γειτονικών περιοχών διαφορετικής τραχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία του ορίου τραχύτητας. Η μεταβολή αυτή του μήκους τραχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα την διαδοχική μεταβολή του κατανομής του ανέμου λόγω του σχηματισμού διαδοχικών εσωτερικών οριακών στρωμάτων. Απαιτείται προσεκτική διαστασιολόγηση του πύργου της αιολικής μηχανής ώστε η πτερωτή της μηχανής να μην βρίσκεται σε ζώνη σημαντικών «αναταράξεων».



Όριο τραχύτητας [37]

4.4 Κατανομή Weibull

Για να καταλήξουμε σε ασφαλή αποτελέσματα για την εγκατάσταση μιας αιολικής μηχανής απαιτούνται μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις. Το κόστος των μετρήσεων και η αναπόφευκτη καθυστέρηση του έργου σε συνδυασμό με την συχνή έλλειψη μακροχρόνιων μετρήσεων στις περιοχές που ενδιαφερόμαστε οδηγούν στην χρήση ημιεμπειρικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να περιγράψουν το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής βάσει μικρού αριθμού παραμέτρων, ώστε να εκτιμηθεί η ενέργεια που μπορούμε να πάρουμε από τον άνεμο. Η κατανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100m από το έδαφος [37]:

$$P(V)dV = \frac{k}{c} \left[\frac{V}{c} \right]^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} dV$$

Η σχέση αυτή εκφράζει την πιθανότητα η ταχύτητα V να βρίσκεται στην περιοχή $V - dV / 2$ και $V + dV / 2$. Η παράμετρος c συνδέεται με την μέση ταχύτητα με την σχέση:

$$\bar{V} = c \Gamma \left[1 + \frac{1}{k} \right]$$

Ο κύβος της μέσης ταχύτητας του ανέμου δίνεται από την εξίσωση:

$$V^3 = c^3 \Gamma \left[1 + \frac{3}{k} \right]$$

Η παράμετρος k είναι αντιστρόφως ανάλογη της διακύμανσης σ^2 των ταχυτήτων του ανέμου ως προς την μέση ταχύτητα:

$$\sigma^2 = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right\}^2 \right]$$

Μεγαλύτερες τιμές του k εκφράζουν μικρότερη διασπορά των ταχυτήτων του ανέμου και συνεπώς μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από την μέση τιμή.

Υπολογισμός k και c

Για την εύρεση της καμπύλης διάρκειας των ταχυτήτων του ανέμου πρέπει να προσδιοριστεί το χρονικό διάστημα για το οποίο η μετρημένη ταχύτητα είναι μικρότερη από κάποια προσδιορισμένη τιμή. Ολοκληρώνοντας την κατανομή Weibull έχουμε:

$$P(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} P(V) dV = 1 - e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k}$$

Λογαριθμούμε:

$$\ln[-\ln\{1 - P(V \leq V_x)\}] = -k \ln c + k \ln V_x$$

Θέτουμε:

$$\left. \begin{array}{l} y = \ln[-\ln\{1 - P(V \leq V_x)\}] \\ x = \ln V_x \end{array} \right\} \quad y = -k \ln c + kx$$

Με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων υπολογίζουμε τα k και c :

$$Y = A + BX$$

$$A = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

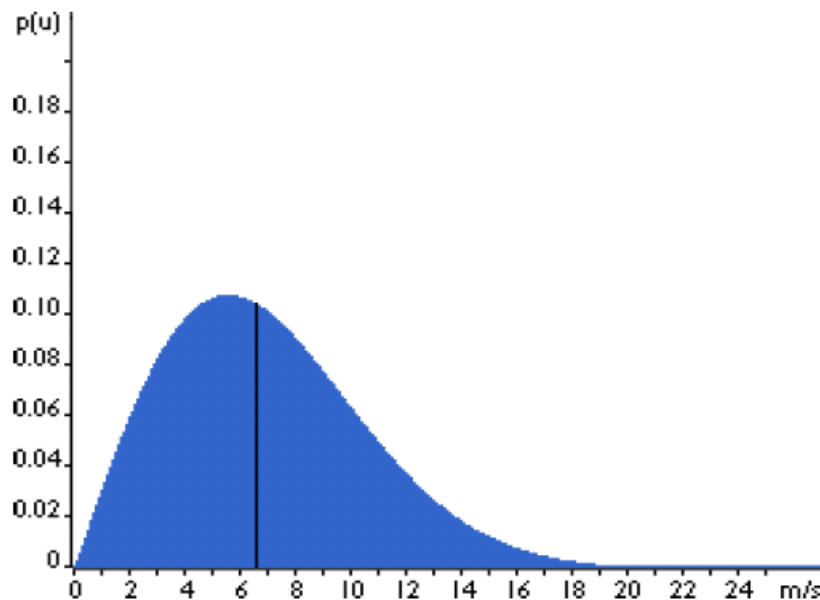
$$B = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$c = e^{-\frac{A}{B}} \quad \text{και} \quad k = B$$

Η αναγωγή των τιμών της παραμέτρου c σε διάφορα ύψη μπορεί να γίνει με βάση το μοντέλο κατανομής του ανέμου το οποίο χρησιμοποιούμε για την συγκεκριμένη περιοχή της μελέτης. Η μεταβολή της παραμέτρου k καθ' ύψος υπολογίζεται από νομόγραμμα το οποίο δίνει την μεταβολή της καθ' ύψος.

Η κατανομή της πυκνότητας πιθανότητας για τα ανεμολογικά δεδομένα του παρακάτω σχήματος είναι:

- Συνολική επιφάνεια=1
- Ο μέσος της κατανομής=6.6m/sec (ίσα εμβαδά)
- Τον μισό χρόνο η ταχύτητα του ανέμου έχει τιμή μικρότερη από 6.6m/sec και τον άλλο μισό μεγαλύτερη από 6.6m/sec
- Μέση τιμή ανέμου: 7m/sec
- Η συχνότερη τιμή: 5.5m/sec



Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των ταχυτήτων του ανέμου [35],[37]

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι οι υψηλές ταχύτητες ανέμου σπανίζουν αλλά η συνεισφορά τους στην παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγάλη. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως θα αποδείξουμε και σε επόμενο κεφάλαιο, η ισχύς του ανέμου ορισμένης ταχύτητας είναι [37]:

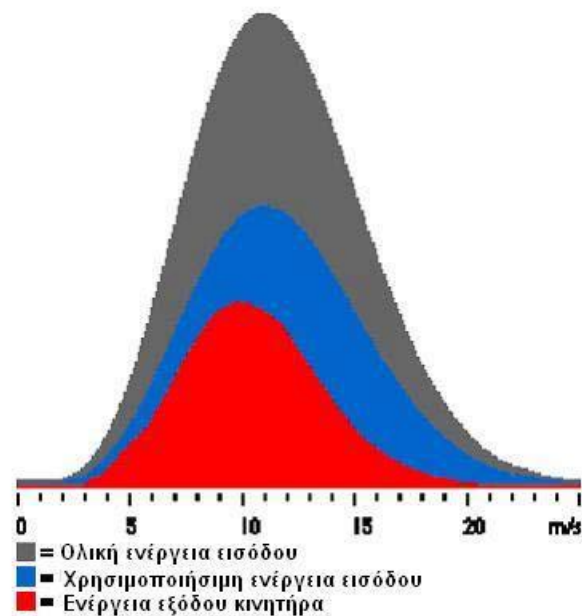
$$P = 0,5 \cdot p \cdot A \cdot u^3$$

όπου:

- p είναι η πυκνότητα του αέρα
- A είναι η επιφάνεια από όπου διέρχεται ο άνεμος
- u είναι η ταχύτητα του ανέμου

Για τον υπολογισμό της αιολικής ισχύος δεν λαμβάνουμε υπόψη την μέση ταχύτητα αλλά πολλαπλασιάζουμε κάθε πιθανότητα μιας ορισμένης ταχύτητας ανέμου (από την Weibull) με την ισχύ που παράγεται σε αυτή η ταχύτητα. Έτσι σχηματίζεται η θεωρητική κατανομή της αιολικής ισχύος για

κάθε ταχύτητα. Μια Α/Γ δεν μπορεί να παραλάβει όλη αυτή την ισχύ γιατί τότε ο αέρας που θα περνούσε πίσω από τον έλικα της ανεμογεννήτριας δεν θα απομακρύνονταν διότι θα είχε μηδενική κινητική ενέργεια στην έξοδο. Έτσι, δεν θα παραλάμβανε καθόλου ενέργεια επειδή ο στάσιμος αέρας στην έξοδο δεν θα επέτρεπε να εισαχθεί νέος. Στην αντίθετη περίπτωση θα διέρχονταν ο αέρας χωρίς καμία αντίσταση και δεν θα παράγονταν έργο. Έχει αποδειχτεί ότι μια ιδανική ανεμογεννήτρια θα πρέπει να μειώσει την αρχική ταχύτητα του αέρα κατά τα $2/3$ της. Επιπλέον, όπως θα δούμε αναλυτικότερα και παρακάτω, σύμφωνα με τον νόμο του Albert Betz (1919): Η μέγιστη μηχανική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από αιολική είναι ίση με 59,3% αυτής.



Συνάρτηση πυκνότητας ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτρια [35],[37]

Όπως αναφέραμε, αν πολλαπλασιαστεί η ισχύς ανέμου για κάθε ταχύτητα με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης αυτής της ταχύτητας τότε προκύπτει η γκρι καμπύλη του παραπάνω σχήματος. Έτσι κάτω από την γκρι καμπύλη φαίνεται η θεωρητική ισχύς ανά τετραγωνικά μέτρα ροής αέρα (δεχόμενοι μια μέση ταχύτητα 7m/s και παράμετρο μορφής της Weibull 2). Η περιοχή κάτω από την μπλε καμπύλη αποτελεί το 59,3% της θεωρητικής, ενώ η κόκκινη περιοχή εκφράζει την πραγματική ηλεκτρική ισχύ που παράγεται από την ανεμογεννήτρια.

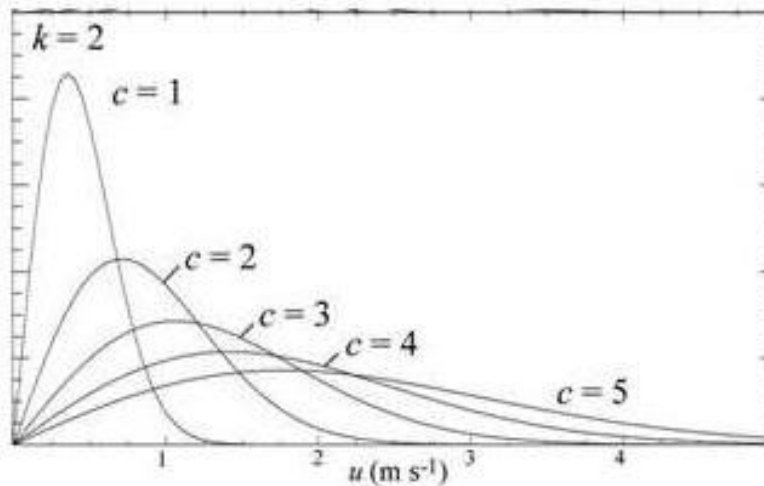
Συγκρίνοντας την μορφή των τελευταίων δύο σχημάτων συμπεραίνουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια κατά την διάρκεια ενός έτους παραλαμβάνεται σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της μέσης (γι' αυτό άλλωστε δεν μπορούμε να υπολογίσουμε το αιολικό δυναμικό από την μέση ταχύτητα).

Η μορφή της κατανομής διαφέρει από τόπο σε τόπο και εξαρτάται από τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, το ανάγλυφο του εδάφους και άλλους γεωγραφικούς παράγοντες.

4.4.1 Κατανομή Rayleigh

Συχνά, όταν είναι γνωστή μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου και επειδή είναι δύσκολος ο υπολογισμός της παραμέτρου μορφής, λαμβάνεται η τιμή $k=2$, που τότε η κατανομή Weibull ονομάζεται κατανομή Rayleigh. Το πλεονέκτημα της κατανομής αυτής είναι ότι εξαρτάται μόνο από την παράμετρο c , η οποία με τη σειρά της εξαρτάται μόνο από τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Η μαθηματική της έκφραση είναι:

$$h(v_w) = \frac{2}{c^2} \cdot v_w \cdot e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^2}$$



Η κατανομή Rayleigh [37]

4.5 Ανεμογεννήτριες Μικρής Ισχύος

Τα αιολικά συστήματα μικρής ισχύος ενδείκνυνται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε πληθώρα εφαρμογών. Αποτελούν την πιο αποδοτική οικονομικά τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Όμως τα συστήματα αυτά είναι πιο επιρρεπή στα προβλήματα, ενώ απαιτούν σχετικά μεγαλύτερη προσοχή και ίσως υψηλότερη αρχική επένδυση για την αγορά και την εγκατάστασή τους [54].

4.5.1 Γενικά

Οι Α/Γ μικρής ισχύος είναι κατάλληλες για ηλεκτροδότηση σπιτιών και αγροκτημάτων. Μπορεί να αποτελέσουν την ιδανική λύση, όταν στην περιοχή της εγκατάστασης δεν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο. Ο χώρος που απαιτείται για την τοποθέτηση ενός τέτοιου συστήματος δεν αφορά μεγάλη έκταση, αλλά προσοχή θα πρέπει να δοθεί ώστε να μην επηρεάζεται η ομαλότητα του αέρα από παρακείμενα εμπόδια. Επιπλέον, η αγορά μιας Α/Γ μικρής ισχύος γίνεται μετά τον υπολογισμό της ενεργειακής της απόδοσης σε ετήσια βάση. Είναι σημαντικό η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου να έχει την κατάλληλη τιμή, από πλευράς απόδοσης και μακροβιότητας του αιολικού συστήματος. Οι δυνατότητες διαμόρφωσης των συστημάτων με Α/Γ είναι πολλές. Αυτό σημαίνει ότι διαφοροποιούνται ανάλογα με τις ανάγκες της εγκατάστασης και του ιδιοκτήτη θέτοντας έτσι την λειτουργικότητα σε πρώτο πλάνο. Αυτό θα πρέπει να αποτελεί και στόχο του κάθε σχεδιασμού αιολικού συστήματος: η κάλυψη των αναγκών του πελάτη του με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής από αιολική ενέργεια- τα απομονωμένα και τα διασυνδεδεμένα. Ο σχεδιασμός των Α/Γ μικρής ισχύος μπορεί να περιλαμβάνει κατακόρυφο ή οριζόντιο άξονα, με τον τελευταίο να είναι με διαφορά ο πιο συνηθισμένος. Η επιλογή μεταξύ των διαφόρων Α/Γ θα γίνει ανάλογα με τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής. Υπάρχουν Α/Γ μικρής ισχύος από 100W ως 50kW. Οι μικρότερες από αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως για τη φόρτιση μπαταριών σε αυτόνομα συστήματα. Α/Γ με ισχύ μεταξύ 0.6kW και 50kW μπορούν να εγκατασταθούν για την παροχή ενέργειας σε σπίτια και επιχειρήσεις, με τα μοντέλα που προορίζονται για τοποθέτηση σε στέγες να κυμαίνονται από 0.5kW ως 2.5kW.

4.5.2 Αυτόνομα συστήματα αιολικής ενέργειας

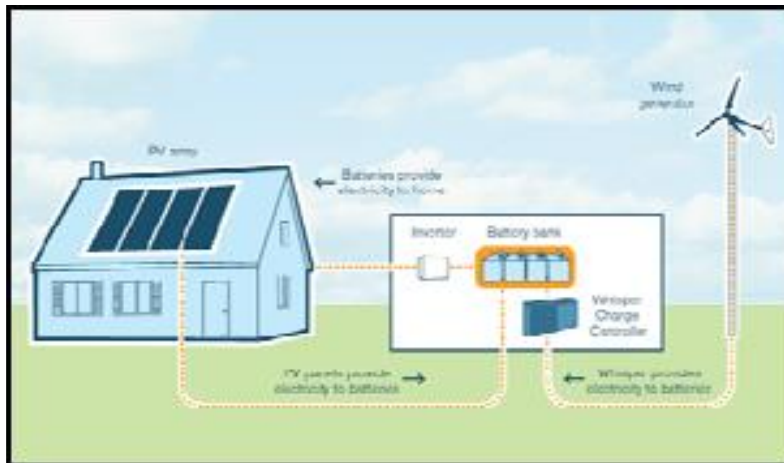
Τα αυτόνομα συστήματα αιολικής ενέργειας βασίζονται στην δυνατότητα αποθήκευση της ενέργειας σε μπαταρίες. Οι μπαταρίες αποτελούν την εφεδρική πηγή ενέργειας, η οποία διασφαλίζει την εξυπηρέτηση του φορτίου όταν δεν φυσάει. Συνήθως τέτοια συστήματα επιλέγονται όταν στην τοποθεσία της εγκατάστασης δεν υπάρχει δίκτυο και η σύνδεση με αυτό είναι ιδιαίτερα ακριβή. Άλλοι πάλι μπορεί να προτιμήσουν την ανεξαρτησία από το δίκτυο που θα τους παρέχει ένα αυτόνομο σύστημα ή να μην θέλουν να εμπλακούν στην γραφειοκρατία της σύνδεσης στο δίκτυο ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η ενεργειακή ικανότητα των αυτόνομων συστημάτων περιορίζεται από την ισχύ που μπορούν να αποδώσουν τα διάφορα συστήματα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Α/Γ, φωτοβολταϊκά κ.λπ.), τους διαθέσιμους πόρους ανανεώσιμης ενέργειας (π.χ. ταχύτητα ανέμου) και την ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν οι μπαταρίες. Ο ιδιοκτήτης ενός αυτόνομου συστήματος θα πρέπει να μάθει να ζει με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τους παραπάνω παράγοντες, κάνοντας σωστή διαχείριση των δυνατοτήτων του συστήματός του.

4.5.3 Διασυνδεδεμένα συστήματα αιολικής ενέργειας με μπαταρίες

Η σύνδεση του συστήματος αιολικής ενέργειας στο δίκτυο είναι η καλύτερη περίπτωση από την πλευρά της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του σπιτιού ή της επιχείρησης. Η ενέργεια από το δίκτυο είναι συνεχώς διαθέσιμη, οπότε σε περίπτωση που υπάρξει κάποιο πρόβλημα στο σύστημα παραγωγής, τα φορτία θα μπορούν και πάλι να εξυπηρετηθούν. Όταν όμως όλα λειτουργούν κανονικά η ενέργεια από τον άνεμο θα καλύπτει το φορτίο και το πλεονάζον μέρος της θα φορτίζει τις μπαταρίες. Το μόνο μειονέκτημα αυτού του τύπου συστήματος είναι το υψηλό του κόστος, που ξεπερνά τα κόστη όλων των υπόλοιπων διαμορφώσεων.

4.5.4 Διασυνδεδεμένα συστήματα αιολικής ενέργειας χωρίς μπαταρίες

Η διασύνδεση της Α/Γ στο δίκτυο μέσω των κατάλληλων διατάξεων είναι ο πιο οικονομικός και φιλικός προς το περιβάλλον τρόπος να υλοποιηθεί το σύστημα αιολικής ενέργειας. Η αφαίρεση των μπαταριών, οι οποίες προσθέτουν σημαντικά στο κόστος του συστήματος, έχουν απώλειες και απαιτούν συχνή συντήρηση, καθιστούν το σύστημα πιο αποδοτικό. Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι σε περίπτωση που παρουσιαστεί διακοπή στο δίκτυο, το σύστημα της Α/Γ θα βγει εκτός λειτουργίας. Όμως, οι διακοπές της τροφοδότησης από το δίκτυο είναι φαινόμενο που συμβαίνει μόνο μερικές ώρες το χρόνο. Έτσι δεν μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα για την επιλογή τέτοιων συστημάτων.



Αυτόνομο Σύστημα Αιολικής Ενέργειας (Υβριδικό Σύστημα) [53]

4.5.5 Άντληση νερού με χρήση της αιολικής ενέργειας

Τέτοια συστήματα είναι πιο σπάνια από τα προαναφερθέντα. Μια Α/Γ τροφοδοτεί άμεσα μια αντλία μέσω ηλεκτρονικού ελεγκτή. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετή, το νερό αντλείται σε μια ανυψωμένη δεξαμενή, μια δεξαμενή αποθήκευσης ή κατευθύνεται άμεσα στη γη που θα ποτιστεί. Αυτά τα συστήματα μπορεί είναι απλά και οικονομικά. Η ίδια λογική εφαρμόζεται και σε συστήματα θέρμανσης, όπου η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας. Κάτι τέτοιο είναι αποδοτικό, αν σκεφτεί κανείς ότι όταν φυσάει έχει και περισσότερο κρύο. Τα συστήματα θέρμανσης αποτελούν όμως μεγάλο φορτίο, οπότε απαιτείται Α/Γ μεγαλύτερης ισχύος.

4.6 Διατάξεις Συστημάτων Αιολικής ενέργειας

Τα συστατικά μέρη των συστημάτων αιολικής ενέργειας, για όλους τους τύπους που αναφέρθηκαν περιγράφονται στη συνέχεια:

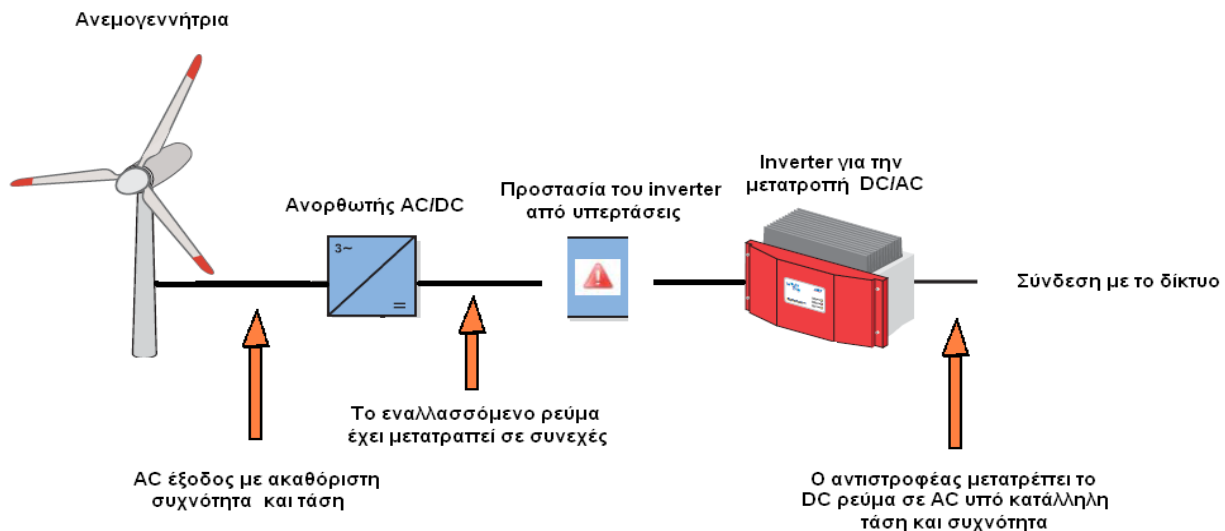
- Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος → Η Α/Γ είναι η διάταξη του συστήματος που έχει την ευθύνη της παραγωγής ενέργειας μετατρέποντας την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Οι περισσότερες Α/Γ που θα συναντήσει κανείς στην αγορά είναι τύπου upwind, δηλαδή τα πτερύγια είναι στην πλευρά του πύργου που αντικρίζει πρώτη τον άνεμο. Ο δρομέας συνδέεται στην γεννήτρια η οποία είναι συνήθως μονίμων μαγνητών. Οι Α/Γ μικρής ισχύος έχουν τρία πτερύγια συμβιβάζοντας έτσι την απόδοση με την ισορροπία του δρομέα. Προστατεύονται από τον δυνατό άνεμο με αλλαγή της κλίσης του δρομέα προς τα επάνω ή στο πλάι, ή ακόμα και με ρύθμιση της κλίσης των πτερυγίων. Το ρεύμα που παράγεται είναι ακαθόριστης συχνότητας και πλάτους, αφού αυτά μεταβάλλονται με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Το ρεύμα αυτό μετατρέπεται σε συνεχές (DC), με τη βοήθεια ενός ανορθωτή. Ο ανορθωτής περιλαμβάνεται συνήθως στην διάταξη της Α/Γ. Έτσι το συνεχές ρεύμα μπορεί να φορτίσει μπαταρίες.
- Πύργος (Tower) → Ο πύργος είναι ο μεταλλικός στύλος στην κορυφή του οποίου τοποθετείται ο δρομέας της Α/Γ. Έχει συνήθως μεγαλύτερο κόστος από την ίδια την Α/Γ. Ο ρόλος του είναι να τοποθετήσει την Α/Γ σε τέτοιο ύψος ώστε ο άνεμος να έχει ομοιόμορφη κατεύθυνση και τη μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα. Μόνο έτσι θα επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση της Α/Γ. Η Α/Γ θα πρέπει να τοποθετείται τουλάχιστον 9 μέτρα ψηλότερα από το ψηλότερο αντικείμενο που βρίσκεται σε ακτίνα 150 μέτρων από αυτήν. Ο πύργος κατασκευάζεται ειδικά για το βάρος και

την πλευρική ώθηση της κάθε Α/Γ. Επιπλέον θα πρέπει να είναι κατάλληλα γειωμένος ώστε να παρέχεται προστασία έναντι βλαβών από κεραυνοπληξία.

- Ρυθμιστής φόρτισης → Ο ρυθμιστής φόρτισης έχει σαν πρωταρχική του λειτουργία, την προστασία των μπαταριών από υπερφόρτιση. Παρακολουθεί την κατάσταση των μπαταριών και όταν αντιληφθεί ότι αυτές είναι πλήρως φορτισμένες, στέλνει την πλεονάζουσα ενέργεια στο φορτίο απόρριψης (dump load). Πολλοί ρυθμιστές φόρτισης είναι ενσωματωμένοι στον ανορθωτή AC/DC. Προστασία από υπερένταση χρειάζεται μεταξύ των μπαταριών και του ρυθμιστή ή του φορτίου απόρριψης. Στα συστήματα που δεν υπάρχουν μπαταρίες, δεν είναι αναγκαία η εγκατάσταση ρυθμιστή φόρτισης. Θα πρέπει όμως να υπάρχει μία λειτουργία ελέγχου σε περίπτωση που αποσυνδεθεί το δίκτυο. Ηλεκτρονικός έλεγχος πριν τον αντιστροφέα μπορεί να χρειάζεται ώστε να υπάρχει ρύθμιση της τάσεως εισόδου σε αυτόν. Μεταξύ της Α/Γ και του ρυθμιστή ή του ελεγκτή θα πρέπει να τοποθετηθεί μια διάταξη για το σταμάτημα της Α/Γ (φρένο) σε περιπτώσεις όπου αυτό απαιτείται (συντήρηση ή έκτακτη ανάγκη). Οι διατάξεις αυτές είτε βραχυκυκλώνουν τις τρεις φάσεις της Α/Γ, ή εκτρέπουν τον δρομέα εκτός του πεδίου του ανέμου ώστε να επιβραδύνουν τη διάταξη. Ο δεύτερος τρόπος είναι γενικά πιο αξιόπιστος και αποδοτικός.
- Φορτίο Απόρριψης ή Εκτροπής → Οι Α/Γ με διάμετρο δρομέα μικρότερη του 1 μέτρου, δεν διαθέτουν συνήθως σύστημα ελέγχου της ισχύος τους. Τέτοιου τύπου Α/Γ χρησιμοποιούνται επί το πλείστον για την φόρτιση μπαταριών. Όταν υπάρχουν άνεμοι υψηλών ταχυτήτων οι μπαταρίες μπορεί να φτάσουν το σημείο υπερφόρτισης και να αρχίσουν να χάνουν υγρά. Για να περιοριστεί αυτός ο κίνδυνος, τοποθετείται ένα φορτίο απόρριψης η τροφοδότηση του οποίου ενεργοποιείται από την υψηλή τάση της συστοιχίας των μπαταριών. Η λειτουργία αυτή ελέγχεται από τον ρυθμιστή φόρτισης, ο οποίος θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα εκτροπής της πλεονάζουσας ενέργειας. Το φορτίο απόρριψης είναι συνήθως μια αντίσταση η οποία στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση αέρα ή νερού. Θα πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να αντέξει την πλήρη ισχύ της Α/Γ του συστήματος.
- Συστοιχία μπαταριών → Η Α/Γ παράγει ενέργεια όποτε η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ταχύτητα λειτουργίας ($\sim 4\text{m/s}$). Αν το σύστημα είναι απομονωμένο, θα χρειαστούν μπαταρίες, ώστε η ενέργεια να αποθηκεύεται για χρήση όταν η Α/Γ δεν παράγει. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι μπαταρίες θα πρέπει να έχουν την ικανότητα κάλυψης του φορτίου για 1 ως 3 μέρες χωρίς άνεμο. Σε διασυνδεδεμένα συστήματα οι μπαταρίες μπορεί να υπάρχουν για χρήση σε περιπτώσεις απώλειας του δικτύου, ώστε τα σημαντικά φορτία να παραμείνουν σε λειτουργία. Σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως είναι τα αιολικά ή τα Φ/Β συστήματα, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται είναι βαθιάς εκφόρτισης. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος. Μολύβδου οξέως μπαταρίες μέσα σε υγρό ηλεκτρολύτη αποτελούν την πιο οικονομική λύση. Απαιτούν όμως συντήρηση με προσθήκη νερού, αφού χάνουν υγρό κατά τη φόρτιση. Επίσης πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να υπόκεινται σε εξισωτική φόρτιση. Αυτού του είδους η φόρτιση θα φροντίσει να φορτιστούν εξίσου, όλες οι μπαταρίες που συνδέονται σε σειρά στη συστοιχία. Οι μπαταρίες τύπου AGM δεν χρειάζονται συντήρηση αλλά είναι πιο ακριβές. Είναι κατάλληλες για διασυνδεδεμένα συστήματα όπου η χρήση των μπαταριών είναι λιγότερο συχνή, αφού οι AGM παρουσιάζουν λιγότερο από 2% αυτό - εκφόρτιση σε περιόδους αποθήκευσης (όταν δηλαδή δεν φορτίζονται και εκφορτίζονται συνεχώς). Επίσης δεν απαιτούν συντήρηση με προσθήκη νερού και δεν χρειάζονται εξισωτική φόρτιση. Οι μπαταρίες τύπου sealed gel-cell, έχουν τα πλεονεκτήματα των AGM αλλά η φόρτισή

τους είναι πιο αργή. Προτιμούνται σε μη θερμαινόμενους χώρους λόγω της αντοχής τους στις χαμηλές θερμοκρασίες.

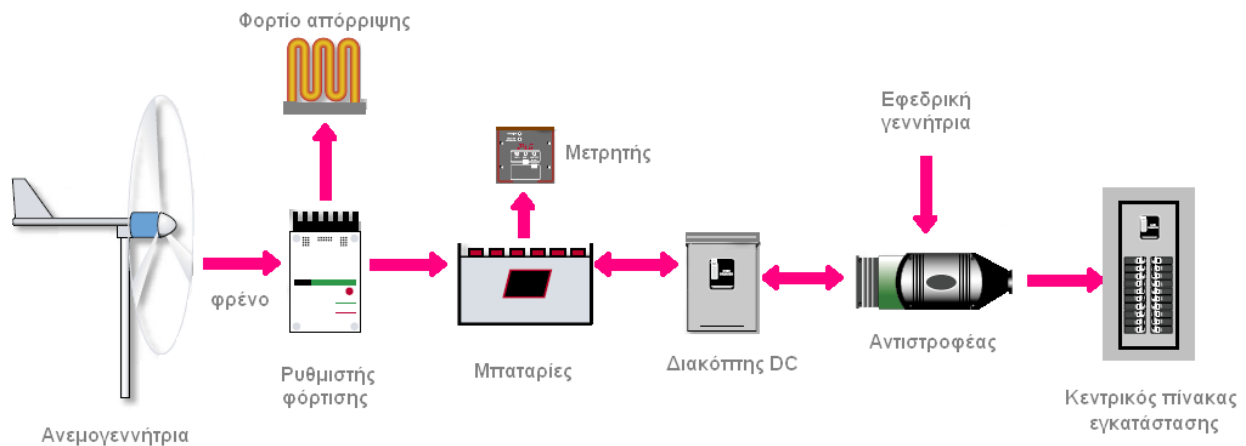
- Αντιστροφέας (inverter) → Το συνεχές ρεύμα που παράγει η Α/Γ δεν μπορεί να αποδοθεί απευθείας στο δίκτυο. Για τη σύνδεση στο δίκτυο πρέπει πρώτα να γίνει μετατροπή σε AC, μέσω ενός αντιστροφέα (inverter), ο οποίος αποτελεί ξεχωριστή διάταξη από το σύστημα της Α/Γ. Ένα παράδειγμα αντιστροφέα που είναι κατάλληλος για Α/Γ μικρής ισχύος, είναι ο Windy Boy από την εταιρεία SMA. Η Α/Γ παράγει ένα εναλλασσόμενο ρεύμα με ακαθόριστη συχνότητα και υπό μη σταθερή τάση. Για να γίνει η μετατροπή αυτού του ρεύματος στην κατάλληλη μορφή θα πρέπει πρώτα να ανορθωθεί, να μετατραπεί δηλαδή σε συνεχές, και στη συνέχεια να περάσει μέσα από τον αντιστροφέα (inverter) ο οποίος ξαναμετατρέπει το ρεύμα σε εναλλασσόμενο, αυτή τη φορά όμως με συχνότητα 50 Hz, ενώ η τάση στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο θα διατηρείται στην τιμή που επιβάλλει το δίκτυο. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην τάση εισόδου του inverter, καθώς τέτοιες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος είναι αρκετά ευαίσθητες στις υπερτάσεις. Μια υπέρταση, αν δεν υπάρχει η κατάλληλη προστασία πριν τον inverter, μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτη βλάβη. Κάτι τέτοιο είναι επιζήμιο, γιατί εκτός του ότι το σύστημα θα μείνει εκτός λειτουργίας για κάποιο διάστημα, οι εταιρείες δεν καλύπτουν τέτοιου είδους παράληψη μέσω της εγγύησης.



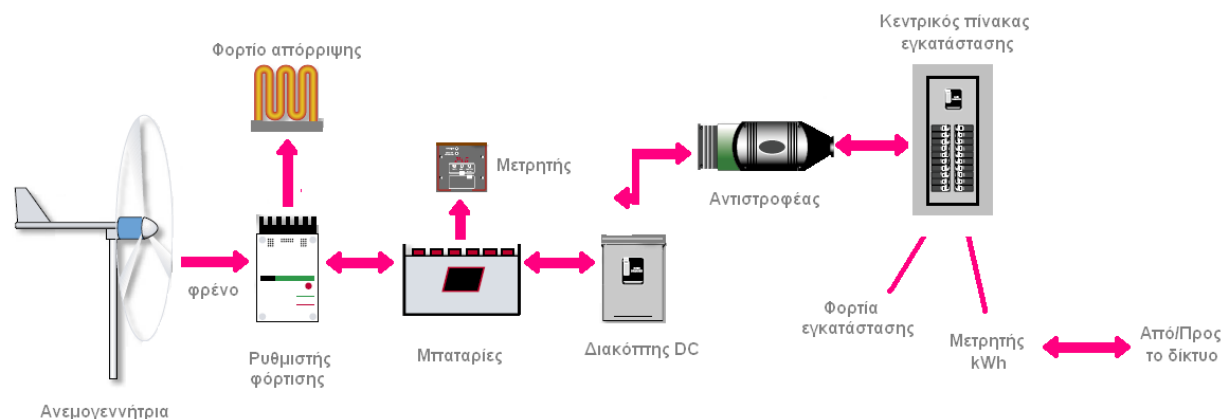
Διασύνδεση Α/Γ μικρής ισχύος στο δίκτυο [54]

- Μετρητές → Οι μετρητές σε ένα σύστημα αιολικής ενέργειας επιτρέπουν την μέτρηση της ενέργειας που παράγεται από την Α/Γ, της τάσης και του ρεύματος των μπαταριών καθώς και της ενέργειας που αποδίδεται στο δίκτυο ή καταναλώνεται από τα φορτία. Υπάρχουν διάφορα πολυόργανα διαθέσιμα στην αγορά, που εκτελούν τις παραπάνω λειτουργίες και μπορούν σε κάθε σημείο του συστήματος να μετρούν πολλά μεγέθη (π.χ. τάση, ρεύμα, συχνότητα, συντελεστή ισχύος, ενεργό και άεργο ισχύ για την AC πλευρά – τάση ρεύμα και ισχύ στην DC πλευρά). Επιπλέον τέτοιου είδους πολυόργανα δίνουν συνήθως τη δυνατότητα σύνδεσης σε BUS και λήψης των μετρήσεων στον υπολογιστή. Η πιο απλή λύση βέβαια για την εμφάνιση των μετρούμενων μεγεθών είναι η εμφάνισή τους στις οθόνες των πολυοργάνων.

- Διακόπτης απομόνωσης DC → Ένας διακόπτης για την απομόνωση των μπαταριών από τον αντιστροφέα θα πρέπει να είναι εγκατεστημένος, για τις περιπτώσεις που χρειάζεται η αποσύνδεση των μπαταριών για συντήρηση. Αυτός ο διακόπτης είναι κατάλληλος για DC δίκτυα και προστατεύει τα καλώδια μεταξύ μπαταριών και αντιστροφέα.
- Διακόπτης AC → Το σύστημα αιολικής ενέργειας (έξοδος του αντιστροφέα) θα συνδεθεί στον κεντρικό πίνακα του σπιτιού, μέσω ενός αυτόματου διακόπτη όπως όλα τα υπόλοιπα κυκλώματα της εγκατάστασης. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα αποσύνδεσης του αντιστροφέα για συντήρηση, καθώς επίσης επιτυγχάνεται και προστασία.



Απλοποιημένο διάγραμμα αυτόνομου συστήματος με A/Γ μικρής ισχύος και μπαταρίες [54]



Απλοποιημένο διάγραμμα διασυνδεδεμένου συστήματος με A/Γ μικρής ισχύος και μπαταρίες [54]



Απλοποιημένο διάγραμμα διασυνδεδεμένου συστήματος με Α/Γ μικρής ισχύος χωρίς μπαταρίες [54]

4.7 Ενέργεια και Ισχύς από τον Άνεμο

4.7.1 Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

Σύμφωνα με τη θεωρία του δίσκου ενέργειας ο μηχανισμός δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από το δρομέα του ανεμοκινητήρα θεωρείται ιδανικός. Ο δρομέας θεωρείται ως (κυκλικός) δίσκος που έρχεται σε επαφή με το ρευστό εν προκειμένω τον άνεμο και ενεργεί πάνω του. Μια στοιχειώδης αέρια μάζα ανάντι από το δίσκο όγκου U_1 , εμβαδού διατομής A και στατικής πίεσης p πλησιάζει το δίσκο με ταχύτητα V_{w1} . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και κατάντι, μακριά από το δίσκο όπου η πίεση του αέρα θα έχει ξανά την πίεση του περιβάλλοντος, θα έχει ταχύτητα V_{w3} για την οποία ισχύει $V_{w3} < V_{w1}$. Προκειμένου να υπάρχει διατήρηση της μάζας μέσα στο ροϊκό σωλήνα θα πρέπει η διατομή A και συνεπώς η διάμετρος του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει κατάντι του δρομέα δηλαδή να υπάρχει διαστολή του ομόρρου του ανεμοκινητήρα [29],[30],[37].

Το ρευστό μετά από τη διέλευσή του από το δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια από αυτή που είχε πριν το δίσκο και επειδή η αξονική ταχύτητα του ρευστού πάνω στο δίσκο και οριακά λίγο πριν και λίγο μετά από το δίσκο παραμένει η ίδια για λόγους διατήρησης της μάζας, η στατική πίεση του ρευστού μετά από το δίσκο θα είναι μικρότερη από τη στατική πίεση του ρευστού πριν το δίσκο. Η ενέργεια που αφαιρείται από τη στοιχειώδη αέρια μάζα είναι:

$$\Delta E = U = \frac{\rho}{2} \cdot (V_{w1}^2 - V_{w3}^2)$$

Η διαφορά κινητικής ενέργειας του ανέμου πριν και μετά από το δίσκο δεσμεύτηκε από τον ιδανικό δρομέα του ανεμοκινητήρα (στην επόμενη ενότητα θα προχωρήσουμε στη διατύπωση εξισώσεων που δικαιολογούν αυτόν το ισχυρισμό). Να αναφέρουμε ότι για την πλήρη μελέτη του αεροδυναμικού πεδίου γύρω από το δίσκο εφαρμόζονται οι γνωστοί νόμοι της Μηχανικής:

1. διατήρηση μάζας
2. διατήρηση της ορμής
3. ενεργειακός ισολογισμός
4. η εξίσωση ροπής της ορμής

4.7.2 Ισχύς του ανέμου

Ο άνεμος είναι κίνηση μαζών αέρα. Αν αέρια μάζα m κινείται με μέση ταχύτητα V_w η κινητική ενέργεια του ανέμου είναι :

$$KE = \frac{1}{2} * m * V_w^2$$

Ας θεωρήσουμε ότι άνεμος περνά κάθετα από μία επιφάνεια A , πάχους x οποιουδήποτε σχήματος. Αν η ροή του αέρα είναι ομαλή, χωρίς στροβιλισμούς και έχει πυκνότητα ρ τότε η μάζα αέρα που υπάρχει στο δοκίμιο είναι:

$$m = \rho A x$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε ότι η κινητική ενέργεια της αέριας μάζας (KE) δίνεται από τη σχέση:

$$KE = \frac{1}{2} * \rho * A * x * V_w^2$$

Άρα η εξίσωση για την ισχύ γίνεται:

$$P_w = \frac{1}{2} * \rho * A * V_w^3$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η βασική εξίσωση για τους υπολογισμούς ισχύος και αιολικής ενέργειας. Από εδώ βλέπουμε ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητάς του και σε μέσα γεωγραφικά πλάτη δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα του αέρα (η πυκνότητα του αέρα είναι σε κανονικές συνθήκες $\rho = 1,201 \text{ kg/m}^3$).

Επομένως αυτή η σχέση δικαιολογεί γιατί η ταχύτητα του ανέμου σε μια περιοχή είναι κρίσιμο μέγεθος για την εγκατάσταση ή όχι αιολικής μηχανής. Αυτή η ισχύς είναι η ισχύς την οποία μπορεί να δεσμεύσει μια αιολική μηχανή. Στην πράξη ένας ανεμοκινητήρας (A/K) δεν δεσμεύει όλη την παραπάνω ενέργεια αλλά μόνο ένα κλάσμα αυτής ($P_{αν}$). Αυτό συμβαίνει επειδή αφ' ενός μεν ο αέρας πρέπει να απομακρύνεται με κάποια ταχύτητα, αφ' ετέρου δε η φτερωτή του A/K προκαλεί εκτροπή μέρους του αέρα το οποίο την παρακάμπτει χωρίς να την διαπεράσει. Η παράγραφος που ακολουθεί εξηγεί πλήρως τον παραπάνω ισχυρισμό.

Μεταβολή της πυκνότητας ρ με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας [37]

Υψόμετρο (σε πόδια) *	Ποσοστό (%) Σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας	Υψόμετρο (σε πόδια)	Ποσοστό (%) Σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας
500	99	6000	83
1000	97	7000	80
2000	94	8000	77
3000	91	9000	74
4000	88	10000	70
5000	86		

* 1 πόδι = 0.3048m

4.7.3 Θεωρητικά μέγιστη ενέργεια από τον άνεμο

Από την συνολική ισχύ του ανέμου μόνο ένα κλάσμα εκμεταλλεύεται ένας ανεμοκινητήρας (Α/Κ). Αυτό είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει σε όλα τα συστήματα μετατροπής σύμφωνα με το οποίο όταν η ενέργεια μετατρέπεται από μια μορφή σε άλλη, η απόδοση μετατροπής περιορίζεται από διάφορους φυσικούς περιορισμούς [37].

Όταν μια μάζα αέρα με ταχύτητα V_{w1} προσπίπτει στα πτερύγια μιας αιολικής μηχανής ένα μέρος της ενέργειας που μεταφέρει προσλαμβάνεται από τη μηχανή ενώ το υπόλοιπο που τη διαπερνάει κινείται με μια μικρότερη ταχύτητα V_{w2} όπως είδαμε ($V_{w2} < V_{w1}$). Η μείωση της ενέργειας της κινούμενης μάζας είναι:

$$KE = \frac{1}{2} * m * (V_{w1}^2 - V_{w2}^2)$$

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ιδανικό αιολικό σύστημα. Κατ' αρχήν διαπιστώνουμε ότι η ταχύτητα V_{wr} με την οποία περιστρέφονται τα πτερύγια μιας αιολικής μηχανής είναι μικρότερη από την V_{w1} . Επειδή έχουμε ένα ιδανικό σύστημα όλη η μείωση της ταχύτητας V_{w1} πηγαίνει στο ρότορα του Α/Κ. Άρα η ταχύτητα V_{w2} είναι μικρότερη από τη V_{wr} . Εξισώνοντας την παραπάνω εξίσωση με την ενέργεια που απορροφάται κατά την αλλαγή της ορμής του αέρα $m(V_{w1} - V_{w2}) V_{wr}$ έχουμε ότι:

$$\frac{1}{2} m(V_{w1}^2 - V_{w2}^2) = m(V_{w1} - V_{w2}) V_{wr} \Rightarrow$$

$$V_{wr} = (V_{w1} + V_{w2}) / 2$$

Η ισχύς του ανέμου P_w που απομαστεύεται από τον άξονα του ανεμοκινητήρα θα είναι ο ρυθμός μεταβολής της μειούμενης κινητικής ενέργειας της αέριας μάζας, δηλαδή:

$$P_w = \frac{d(KE)}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} (V_{w1}^2 - V_{w2}^2) \Rightarrow$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{wr} (V_{w1}^2 - V_{w2}^2)$$

Από τις τρεις προηγούμενες εξισώσεις έχουμε ότι:

$$P_w = \frac{1}{4} \rho \cdot A (V_{w1} + V_{w2}) (V_{w1}^2 - V_{w2}^2) \Rightarrow$$

$$P_w = \frac{1}{4} \rho \cdot A \cdot V_{w1}^3 \left[1 + \frac{V_{w2}}{V_{w1}} - \left(\frac{V_{w2}}{V_{w1}} \right)^2 - \left(\frac{V_{w2}}{V_{w1}} \right)^3 \right]$$

Αν παραγωγίσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς V_{w2}/V_{w1} (ο λόγος αυτός αποτελεί τη μεταφορά ισχύος) και εξισώσουμε με το μηδέν προκύπτει η εξίσωση από την οποία βρίσκουμε τη μέγιστη μεταφορά ισχύος:

$$\frac{V_{w2}}{V_{w1}} = \frac{1}{3}$$

Αντικαθιστώντας αυτή την τιμή στην εξίσωση της ισχύος του ανέμου έχουμε ότι :

$$P_{w_{max}} = \frac{8}{27} \cdot \rho A V_{w1}^3 \Rightarrow$$

$$P_{w_{max}} = \left(\frac{16}{27} \right) \frac{1}{2} \rho A V_{w1}^3 \Rightarrow$$

$$P_{w_{max}} = (0.593) \cdot \frac{1}{2} \rho A V_{w1}^3$$

Η τελευταία εξίσωση λέγεται νόμος ή όριο Betz. Σύμφωνα με αυτόν ακόμη και σε ιδανική ενεργειακή μετατροπή η μέγιστη ισχύς που εξάγεται (που λαμβάνουμε) είναι μόνο 0.593 ή 16/27 της συνολικής ισχύος P_w του ανέμου.

Τα παραπάνω αναφέρονται σε ιδεατές ανεμογεννήτριες πράγμα το οποίο δεν υφίσταται στην πραγματικότητα. Οι πραγματικές ανεμογεννήτριες συναντούν αντίσταση λόγω του αέρα στα πτερύγιά τους προκαλώντας τριβές και συνεπώς απώλεια ενέργειας. Επιπλέον η περιστροφή του ρότορα της Α/Γ

προκαλεί στροβιλισμό του ανέμου προκαλώντας μείωση της ροπής στρέψης των φτερών. Η επίδραση όλων των απωλειών που εμφανίζονται σε μία Α/Γ λαμβάνονται υπόψη από μία παράμετρο που συμβολίζεται C_p και λέγεται συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης. Το C_p έχει παρόμοια επίδραση στην ισχύ μίας Α/Γ με το $\cos\phi$ κατά τον υπολογισμό της ενεργού ισχύος μιας συσκευής κ.τ.λ. Για παράδειγμα για μια ταχύτητα ανέμου V_{w1} κατάντι στην ανεμογεννήτρια η ισχύς που παράγεται είναι:

$$P_{w_{\max}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{w1}^3$$

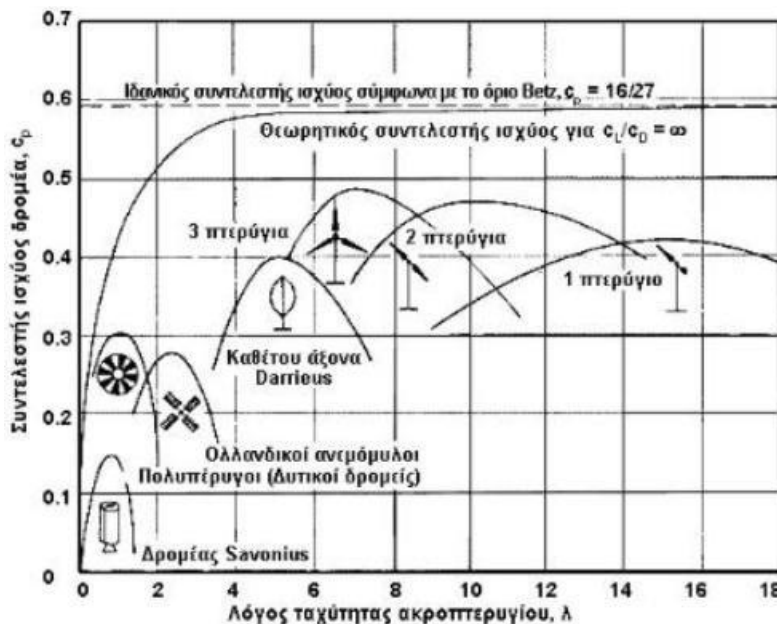
η παράμετρος C_p είναι αδιάστατη και δίνεται από τη σχέση:

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{V_{w2}}{V_{w1}} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{V_{w2}}{V_{w1}} \right)^2 \right]$$

Σε ιδανικές περιπτώσεις όταν $V_{w1}/V_{w2}=1/3$ το C_p έχει τιμή ίση με 0,593 που είναι η μέγιστη τιμή του και λέγεται όριο Betz όπως αναφέραμε παραπάνω. Στις πραγματικές ανεμογεννήτριες παίρνει τιμές:

$0 < C_p < 0.4$. Για τιμή ίση με 0,4 διαπιστώνουμε ότι η ισχύς που απομαστεύεται από τον άνεμο είναι 0,4/0,593 ή 67% της ιδανικής θεωρητικής τιμής.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p δεν είναι σταθερός. Εξαρτάται από δύο παράγοντες, το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ και τη γωνία βήματος πτερυγίου β .



Τυπικά διαγράμματα $C_p - \lambda$ για πληθώρα διατάξεων / πτερυγίων Α/Γ [37]

Ο συντελεστής ισχύος C_p (λ , β) είναι συνάρτηση των λ και β και για κάθε ταχύτητα του ανέμου πρέπει η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα να παίρνει τιμές που να βελτιστοποιεί τα λ και β , έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη παραγωγή ισχύος από την Α/Γ. Για τον καθορισμό του συντελεστή C_p για

δεδομένες τιμές της παραμέτρου λ και της γωνίας β χρησιμοποιείται ένας γενικός προσεγγιστικός τύπος για διάφορους τύπους Α/Γ:

$$C_p = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_1}} + C_6 \lambda$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - C_7 \beta} - \frac{C_8}{\beta^3 + 1}}$$

Όπου λ_1 και C_1 έως C_9 συντελεστές που προκύπτουν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας.

Για μεσαίες μέχρι μεγάλες α/γ (διάμετρος πάνω από 20 m) η τιμή του συντελεστή ισχύος είναι ίση με 0.4, ενώ για μικρότερου μεγέθους μηχανές είναι μικρότερος του 0.4.

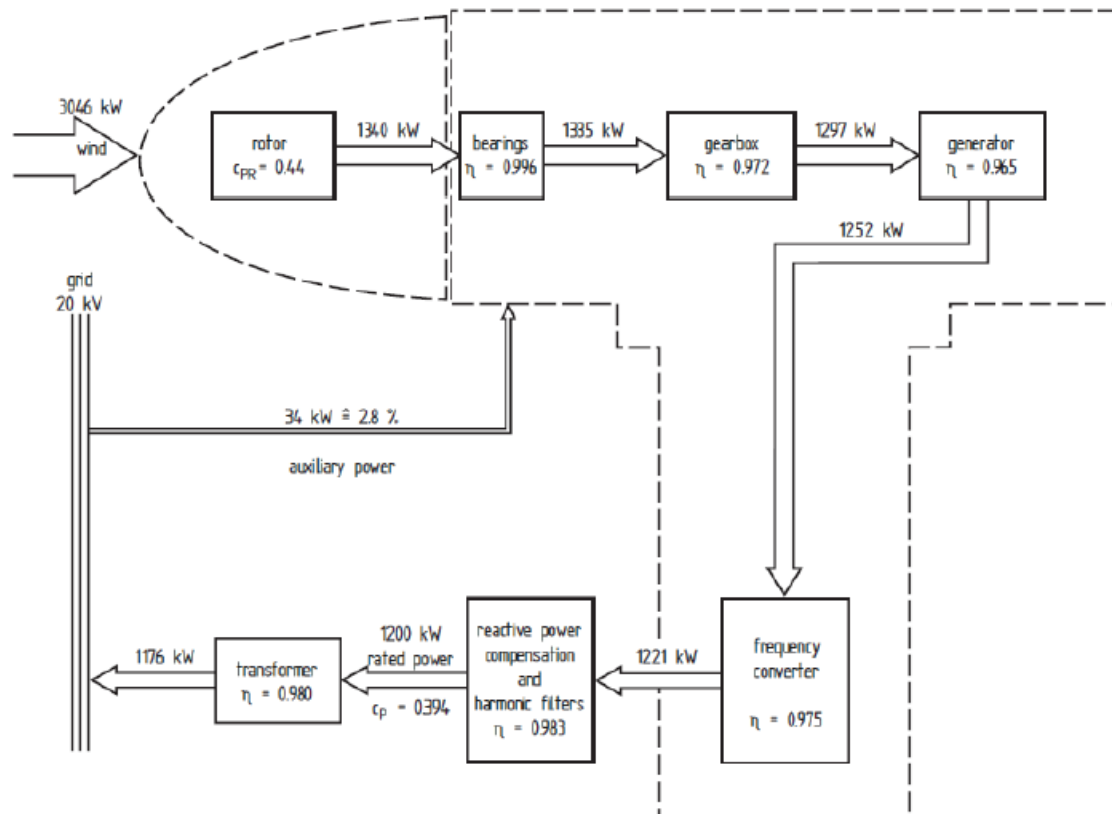
Τυπικές τιμές του βαθμού απόδοσης είναι για διάφορους τύπους είναι:

- **Picaresque** Ολλανδική α/γ (4 βραχίονες) 16%
- **Περιστρεφόμενος με πτερύγια** 30%
- **Μεγάλης ταχύτητας** (κατακόρυφος) 42%

4.8 Απώλειες Ανεμογεννήτριας

Όσον αφορά στο μηχανικό - ηλεκτρικό κομμάτι μίας Α/Γ υπάρχουν απώλειες λόγω:

- της τριβής στον άξονα του δρομέα
- της αποτελεσματικότητας του κιβωτίου ταχυτήτων (εάν υπάρχει)
- της αποδοτικότητας της ηλεκτρικής γεννήτριας και του αντιστροφέα που συνδέεται
- της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (για διασυνδεδεμένα συστήματα) ή στις μπαταρίες (για αυτόνομα συστήματα)
- της ανάγκης τροφοδότησης βοηθητικών λειτουργιών (εσωτερική κατανάλωση) και οργάνων μέτρησης που ενδεχομένως να υπάρχουν



Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα αποδόσεων κι απωλειών του μηχανικού κι ηλεκτρικού μέρους μίας Α/Γ [37]

4.9 Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας

Η καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο της και ουσιαστικά την χαρακτηρίζει, ενώ είναι το βέλτιστο κριτήριο για την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών Α/Γ. Επίσης, είναι το στοιχείο αυτό που κρίνει την καταλληλότητα μίας Α/Γ συγκεκριμένης τεχνολογίας για μία συγκεκριμένη τοποθεσία, αφού διαφορετικές κατανομές ανέμου, προκαλούν διαφορετικές συμπεριφορές από τις Α/Γ και άρα διαφορετική παραγωγή ενέργειας. Συνεπώς, η καμπύλη ισχύος βασίζεται σε διάφορα κριτήρια. Ανάλογα με την τεχνολογία της Α/Γ, βασίζεται στην αεροδυναμική της ποιότητα και στις μεμονωμένες αποδοτικότητες του μηχανικού και του ηλεκτρικού μέρους της και ανάλογα με την τοποθεσία που βρίσκεται, εξαρτάται και βασίζεται στις επικρατούσες συνθήκες ανέμου και στα χαρακτηριστικά του εδάφους (μήκος τραχύτητας και διάφορα εμπόδια)

Η αεροδυναμική ποιότητα του δρομέα παρουσιάζεται μέσω του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p και εξαρτάται ουσιαστικά από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων, μέσω των οποίων γίνεται ουσιαστικά η απορρόφηση της αιολικής ισχύος και εμφανίζει απώλειες λόγω:

- της αναπόφευκτης καθυστέρησης λόγω του γαω του δρομέα
- της επιδείνωσης της ποιότητας της επιφάνειας των πτερυγίων
- του φαινομένου της σκίασης του πύργου (tower shadow) (2-3%)

Τα χαρακτηριστικά σημεία μίας καμπύλης ισχύος που την καθορίζουν και διακρίνονται εύκολα σε ένα διάγραμμα $P(v_w) - v_w$ βρίσκονται σε τρεις χαρακτηριστικές, για κάθε Α/Γ, ταχύτητες ανέμου, οι οποίες είναι:

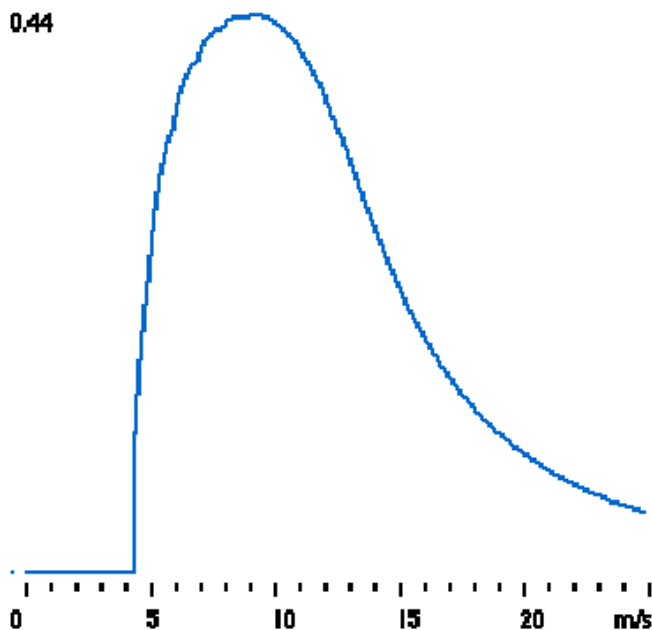
- η ταχύτητα ένταξης V_{cut-in} , η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία μία Α/Γ αρχίζει να λειτουργεί και να παράγει ισχύ
- η ονομαστική ταχύτητα V_{nom} , η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία η Α/Γ ξεκινάει να λειτουργεί στα ονομαστικά της μεγέθη και να παράγει την ονομαστική της ισχύ
- η ταχύτητα αποκοπής $V_{cut-out}$, η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία η Α/Γ σταματάει να λειτουργεί για λόγους ασφαλείας και για την αποφυγή μεγάλης καταπόνησης των υδραυλικών της κομματιών και κυρίως των πτερυγίων

Η ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων στο δρομέα μπορεί να γίνει ανεξέλεγκτη, με κίνδυνο καταστροφής της γεννήτριας, εφόσον είναι δυνατόν να παραχθούν μεγάλα ρεύματα σε σχέση με τα μέγιστα της γεννήτριας, αλλά και κίνδυνο αποκόλλησης της φτερωτής και άλλων μηχανικών κομματιών της με οδυνηρές συνέπειες για ότι βρίσκεται σε ακτίνα πολλών μέτρων (αναλόγως της διαμέτρου του έλικα και του ύψους ανύψωσης του δρομέα). Για το λόγο αυτό φρενάρεται μέσω συστημάτων πέδησης ή μέσω της απομάκρυνσης των πτερυγίων από την κατεύθυνση του πνέοντος ανέμου.

Ο προσδιορισμός των τριών αυτών ταχυτήτων καθώς και της ισχύος εξόδου μιας αιολικής ηλεκτρογεννήτριας για μια συγκεκριμένη θέση είναι αντικείμενο βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπ' όψη του τις ενεργειακές ανάγκες, τα στοιχεία κόστους και τα ανεμολογικά δεδομένα.

4.10 Βαθμός Απόδοσης Ανεμογεννήτριας

Για να προσδιοριστεί ο βαθμός απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου, πρέπει να διαιρεθεί κάθε ισχύς της αντίστοιχης καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας με την θεωρητική ισχύ του ανέμου σε αυτή την ταχύτητα. Έτσι προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του επομένου σχήματος.



Βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας [35],[37]

Είναι προφανές ότι κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι βελτιστοποιημένη ώστε να αποδίδει καλύτερα σε ένα εύρος ταχυτήτων. Μεταβάλλοντας μεγέθη όπως το ύψος της ή την γωνία και τη γεωμετρία των πτερυγίων ή το μέγεθος των πτερυγίων ή το μέγεθος της γεννήτριας μεταβάλλεται η ενεργειακή συμπεριφορά της. Αλλάζοντας τα δύο τελευταία μεγέθη μεταβάλλεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, ενώ το ύψος της επηρεάζει μόνο την ταχύτητα του ανέμου. Γενικά οι ανεμογεννήτριες πρέπει να έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στις ταχύτητες ανέμου που παράγεται η περισσότερη ενέργεια ετησίως (δηλ. στο εύρος των συχνότερων υψηλών ταχυτήτων).

Για δεδομένο μέγεθος έλικα, όσο πιο μεγάλη είναι η γεννήτρια και όσο μεγαλύτερες οι ταχύτητες του ανέμου (αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας το ύψος του ρότορα), τόσο πιο πολύ ενέργεια θα παράγεται, όμως συγχρόνως δεν θα αποδίδει ικανοποιητικά σε μικρές και μέσες ταχύτητες. Αντίθετα για την ίδια έλικα, όσο μικρότερη είναι η γεννήτρια τόσο καλύτερα θα αποδίδει σε αδύναμους ανέμους αλλά δεν θα αποδίδει ικανοποιητικά σε μεγάλες ταχύτητες.

Οι μικρές ανεμογεννήτριες παράγουν μικρά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, όμως δεν απαιτούν ισχυρό δίκτυο, παράγουν σχετικά πιο σταθερή ισχύ (διότι αποδίδουν καλύτερα σε μικρότερες ταχύτητες), απαιτούν μικρότερο κόστος θεμελίωσης και είναι αισθητικά πιο αποδεκτές από τους κατοίκους. Τέλος τα αιολικά πάρκα είναι προφανώς πιο αξιόπιστα όταν έχουν πολλές μικρές ανεμογεννήτριες.

Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ότι μια μεγάλη ανεμογεννήτρια δεν είναι πάντα η καλύτερη λύση λόγω της οικονομίας κλίμακας, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα των ανέμων και τις ανάγκες μας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι οι ανεμογεννήτριες παραλαμβάνουν περίπου μέσα σε 2-3 μήνες λειτουργίας όλη την ενέργεια που απαιτήθηκε για να κατασκευαστούν, ενώ οι παραθαλάσσιες ανεμογεννήτριες απαιτούν ακόμα λιγότερο χρόνο.

4.11 Απόδοση Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από Αιολική Ενέργεια

4.11.1 Συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης

Αναφέρεται στο δρομέα του ανεμοκινητήρα και δίνεται από τη σχέση

$$C_P = \frac{P_m}{P_w}$$

Ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης εκφράζει το ποσοστό της ισχύος του ανέμου λίγο πριν τον ανεμοκινητήρα (P_w) το οποίο μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ στον άξονα του δρομέα (P_m) [37].

4.11.2 Βαθμός απόδοσης μετατροπέα αιολικής ενέργειας

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του μετατροπέα αιολικής ενέργειας θα ισούται με:

$$\eta = \frac{\text{Ηλεκτρική Ισχύς Έξοδου}}{\text{Ισχύς ανέμου}} \Rightarrow$$

$$= \frac{P}{P_w} = \frac{P_m}{P_w} \cdot \frac{P_{mg}}{P_m} \cdot \frac{P}{P_{mg}} = C_P \cdot n_{gb} \cdot n_g$$

όπου:

- n_{gb} είναι ο βαθμός απόδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων
- n_g ο βαθμός απόδοσης της ηλεκτρικής γεννήτριας
- P_m η μηχανική ισχύς που απομαστεύει ο Α/Γ
- P_w η ισχύς του ανέμου
- P_{mg} η ισχύς στην έξοδο του κιβωτίου ταχυτήτων
- P η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας

4.12 Ετήσια Αναμενόμενη Ενεργειακή Παραγωγή

Κατά την περίοδο των μετρήσεων των δεδομένων του ανέμου και πριν την εγκατάσταση μίας Α/Γ, είναι δυνατό να υπολογιστεί η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή, δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί θεωρητικά για την κατανομή ανέμου μίας περιοχής και για μία συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος Α/Γ. Επιπροσθέτως, και με μεγαλύτερη ακρίβεια, αυτός ο υπολογισμός μπορεί να γίνει και μετά την εγκατάσταση μίας Α/Γ και την παράλληλη μέτρηση της πραγματικής της καμπύλης ισχύος. Αναφέρεται ο όρος πραγματική καμπύλη ισχύος, αφού συχνά οι κατασκευαστικές καμπύλες ισχύος που συνοδεύουν μία Α/Γ είναι ιδανικότερες κι εξιδανικευμένες σε σχέση με την πραγματική συμπεριφορά της. Συνήθως, αυτός ο υπολογισμός γίνεται για περίοδο ενός έτους και για αυτό έχει καθιερωθεί ο όρος ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (Ετήσια ΑΕΠ) και δίνεται συνήθως από τη σχέση [37]:

$$E = \frac{8760}{100} \cdot \sum_{V_{cut-in}}^{V_{cut-out}} P_{el}(v_w) \cdot H(v_w)$$

Όπου,

- E , η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (kWh)
- $h=8760$, οι ώρες ενός έτους
- P_{el} , η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της Α/Γ (kW)
- H , η διακριτή και συνεχής κατανομή του ανέμου σε ποσοστά % (όταν δεν είναι γνωστά αρκετά στοιχεία, λαμβάνεται ως Rayleigh)

4.13 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή. Συγκεκριμένα είναι ανεξάντλητη μορφή ενέργειας, ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον εφόσον δεν είναι ρυπογόνα, οι επιδράσεις που έχει στην πανίδα είναι ουσιαστικά αμελητέες και έχει μικρές εδαφικές απαιτήσεις. Παράλληλα τα αιολικά πάρκα έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος, είναι ανεξάρτητα από τα κεντρικά δίκτυα διανομής και έχουν μικρές απώλειες ως συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Σαφώς όμως τέτοιου τύπου συστήματα ηλεκτροπαραγωγής έχουν και κάποια μειονεκτήματα όπως είναι η διακύμανση στην απόδοση ισχύος, η οποία οφείλεται στην μεταβαλλόμενη ένταση του ανέμου, η χαμηλή πυκνότητα που παρουσιάζει ως μορφή ενέργειας με συνέπεια να απαιτούνται πολλές ανεμογεννήτριες για την παραγωγή αξιόλογης ισχύος, το υψηλό κόστος εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου, το οποίο όμως συνεχώς μειώνεται, και το σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την έρευνα και την χαρτογράφηση του αιολικού δυναμικού των υποψήφιων περιοχών εγκατάστασης, ώστε να εντοπιστούν τα ευνοϊκότερα σημεία [49].

4.14 Μακροβιότητα και συντήρηση των συστημάτων με Α/Γ μικρής ισχύος

Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι ιδιαίτερα υψηλή, επιβαρύνεται πολύ η λειτουργία της Α/Γ και μπορεί να προκληθούν σοβαρές βλάβες. Σε εγκαταστάσεις όπου η ανθρώπινη παρουσία είναι συνεχής, ο ιδιοκτήτης είναι δυνατόν να θέσει εκτός λειτουργίας την Α/Γ βραχυκυκλώνοντάς την, για να την προστατέψει από τους ισχυρούς ανέμους. Αν το βραχυκύκλωμα διαρκέσει λίγα δευτερόλεπτα, η Α/Γ επιβραδύνεται και μπορεί να σταματήσει. Αν ο παραπάνω χειρισμός γίνει από άτομα που δεν γνωρίζουν, υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των κυκλωμάτων της Α/Γ από υπερθέρμανση. Τα εγχειρίδια χειρισμού των Α/Γ θα πρέπει να περιγράφουν τον κατάλληλο τρόπο για το σταμάτημα της κάθε μηχανής. Οι Α/Γ που δεν εκτελούν έλεγχο της ισχύος εξόδου, κινδυνεύουν όταν η πραγματική ταχύτητα ανέμου γίνει μεγαλύτερη των 20 m/s. Τοποθεσίες με μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου κοντά στα 5 m/s αναμένεται να παρουσιάσουν ταχύτητα 20 m/s μόνο κάποια λεπτά ανά έτος. Έτσι θεωρείται ότι σε τέτοιες περιοχές η εγκατάσταση Α/Γ χωρίς έλεγχο ισχύος είναι ασφαλής επιλογή. Παρόλα αυτά θα πρέπει να υπάρχει επίβλεψη του συστήματος και ο ιδιοκτήτης να είναι σε θέση να προστατέψει την Α/Γ στην περίπτωση ισχυρών ανέμων. Οι μικρές Α/Γ που ελέγχουν την ισχύ τους με αλλαγή της κατεύθυνσης του δρομέα μπορούν να εγκατασταθούν σε περιοχές όπου η ταχύτητα ανέμου φτάνει τα 20 m/s αρκετά συχνά μέσα στο έτος. Επομένως προτείνεται η εγκατάσταση τέτοιων Α/Γ σε τοποθεσίες με μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου μεταξύ 6-7 m/s. Να σημειωθεί εδώ ότι οι συνεχείς αλλαγές στην κατεύθυνση του δρομέα καταπονούν μηχανικά την Α/Γ και μειώνουν τον χρόνο ζωής της. Για το λόγο αυτό, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε τέτοιου τύπου Α/Γ να μην εγκαθίστανται σε περιοχές με υψηλές ταχύτητες ανέμου. Οι Α/Γ που διαθέτουν έλεγχο της γωνίας των πτερυγών (pitch control) μπορούν να εγκατασταθούν πρακτικά οπουδήποτε, αφού είναι οι πιο ανθεκτικές στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Όμως αυτή η μέθοδος ελέγχου εφαρμόζεται κυρίως σε Α/Γ μεγάλης ισχύος, ενώ σε μικρότερες ισχύεις η εφαρμογή της είναι περιορισμένη. Εκτός από τη μέση ταχύτητα ανέμου σημασία για τον χρόνο ζωής της Α/Γ έχει και η ποιότητα του ανέμου. Οι «καλές» τοποθεσίες είναι αυτές όπου η ροή του ανέμου δεν μεταβάλλεται από εμπόδια πριν την Α/Γ, και έτσι δεν διαταράσσεται. Στις μεγάλες Α/Γ το κόστος συντήρησης αποτελεί το 3% της αρχικής επένδυσης ετησίως. Το κόστος είναι χαμηλό όταν ο εξοπλισμός είναι καινούργιος και αυξάνεται με τα έτη λειτουργίας. Μια Α/Γ καλής ποιότητας με τη σωστή συντήρηση μπορεί να έχει χρόνο ζωής κοντά στα 20 χρόνια. Όσον αφορά τις μικρές Α/Γ το κόστος συντήρησης εξαρτάται από το πόσο απομακρυσμένη είναι η τοποθεσία εγκατάστασης. Ένα αυτόνομο σύστημα που εξυπηρετεί για παράδειγμα έναν μικρό οικισμό, μπορεί να έχει υψηλό κόστος συντήρησης αν τα έξοδα για την επίσκεψη του τεχνικού και τη μεταφορά του εξοπλισμού που θέλει επιδιόρθωση φτάσουν το 1% της αρχικής επένδυσης.

5. Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη - Γεννήτριες

Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ή ευρέως γνωστότερο ως γεννήτρια είναι η συμβατική πηγή ενέργειας του υβριδικού συστήματος. Έχει ως στόχο την εφεδρική κάλυψη των απαιτήσεων του συστήματος σε στιγμές που οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν είναι σε θέση να παράξουν την απαιτούμενη ενέργεια. Ταυτόχρονα μπορεί να καλύψει φορτία αιχμής υψηλότερα από εκείνα που δύνανται να καλύψουν τα συστήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα, δηλαδή βενζίνη και πετρέλαιο. Η επιλογή του καυσίμου εξαρτάται από τον σχεδιασμό του υβριδικού συστήματος και τον ρόλο που έχει εντός αυτού το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη βενζίνης είναι φθηνότερα, αλλά παρουσιάζουν αυξημένο κόστος λειτουργίας, λόγω της υψηλότερης τιμής της βενζίνης, και μειωμένη διάρκεια ζωής. Αντίθετα, τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη πετρελαίου παρόλο που έχουν αρκετά υψηλότερο αρχικό κόστος, παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερο κόστος λειτουργίας, αυξημένη διάρκεια ζωής και αυξημένη αξιοπιστία. Από αυτά προκύπτει ότι για πολύ αραιές χρήσεις περιορισμένου χρόνου ιδανικά είναι τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη βενζίνης ενώ για συχνές χρήσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας ιδανικά είναι τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη πετρελαίου. Από αυτά τα χαρακτηριστικά συμπεραίνεται ότι τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη βενζίνης χρησιμοποιούνται σε περίπτωση που το υβριδικό σύστημα είναι σχεδιασμένο ώστε οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να καλύπτουν πλήρως τις απαιτήσεις για όλο το χρόνο και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος λειτουργεί αποκλειστικά ως εφεδρικό. Αντίθετα, τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη πετρελαίου χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν μόνο ένα μέρος των απαιτήσεων της εφαρμογής, οπότε υπάρχει έλλειμμα ενέργειας το οποίο πρέπει να καλύπτεται συνεχώς από την λειτουργία του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Άρα ο τύπος του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους που θα χρησιμοποιηθεί θα επιλεγεί κατά την σχεδίαση και αφού υπολογιστεί το ποσοστό των απαιτήσεων που καλύπτεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση πάντως η ισχύς του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να καλύψει το συνολικό φορτίο της εφαρμογής σε περίπτωση που για συνεχόμενες ημέρες οι καιρικές συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές για ηλεκτροπαραγωγή από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Συνήθως προτιμούνται τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ανοικτού τύπου τα οποία συναντούνται ευρύτερα. Η εγκατάσταση τους γίνεται σε εσωτερικό χώρο ώστε αυτά να είναι προστατευμένα από τις καιρικές συνθήκες. Ο εσωτερικός χώρος πρέπει να έχει τέτοιες διαστάσεις ώστε να είναι δυνατός ο επαρκής αερισμός του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (για να μην τίθεται εκτός λειτουργίας λόγω υπερθέρμανσης) και ταυτόχρονα να υπάρχει χώρος για να μπορεί να γίνει η συντήρησή του. Για λόγους μείωσης του θορύβου καλό είναι να ηχομονώνεται ο χώρος. Σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η ηχομόνωση του χώρου και το πρόβλημα θορύβου είναι μεγάλο τότε είναι καλύτερη η επιλογή ενός ηλεκτροπαραγωγού στοιχείου κλειστού τύπου, το οποίο τοποθετείται σε εξωτερικό χώρο. Σε κάθε περίπτωση πάντως το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος πρέπει να τοποθετείται σε βάσεις από μπετόν, ενώ για τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη μεγάλης ισχύος πιθανόν να απαιτείται και η ύπαρξη ελαστικών στοιχείων ανάμεσα στα μεταλλικά στοιχεία του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους και της βάσης από μπετόν, προκειμένου να απορροφούνται οι κραδασμοί.

Οι αυτόνομοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK), όπως αυτές που είναι εγκατεστημένες στα περισσότερα νησιά της χώρας μας. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με στατιστική μελέτη της Eurostat η εγκατεστημένη ισχύς πετρελαϊκών σταθμών στην Ελλάδα το 2006 για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 775 MW.

Οι MEK ονομάζονται έτσι διότι η καύση του καυσίμου που χρησιμοποιούν γίνεται μέσα σε αυτές, εν αντιθέσει με άλλες τεχνολογίες, όπως οι αεριοστροβίλοι για παράδειγμα, όπου η καύση γίνεται σε λέβητα. Οι ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί κάνουν χρήση εμβολοφόρων μηχανών. Οι εμβολοφόρες MEK, γνωστές και σαν ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία διανεμημένης παραγωγής. Πρόκειται για μια παραδοσιακή και δοκιμασμένη τεχνολογία που συνδυάζει χαμηλό κόστος προμήθειας ανά εγκατεστημένο kW, μεγάλη διαθεσιμότητα σε μεγέθη, δυνατότητα γρήγορης εκκίνησης, υψηλούς συντελεστές απόδοσης και υψηλή λειτουργική αξιοπιστία. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την ικανότητα των συστημάτων αυτών να εκκινούν χωρίς ηλεκτρική τροφοδότηση από το δίκτυο, το καθιστούν πρωταρχική επιλογή σε εφαρμογές εφεδρικής. Επιπλέον, αποτελούν σήμερα την πιο διαδεδομένη μορφή συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής για ισχείς μικρότερες από 1 MW. Οι κινητήριες μηχανές λειτουργούν με αέρια και υγρά καύσιμα. Οι μηχανές υγρών καυσίμων χρησιμοποιούν συνήθως πετρέλαιο αν και υπάρχουν συστήματα βενζίνης ή βαρέων κλασμάτων πετρελαίου (τα βαρύτερα χρησιμοποιούνται για τους μεγαλύτερους κινητήρες) και βιοκαυσίμων.

Η ταξινόμηση των μηχανών Ντίζελ μπορεί να γίνει βάσει του μέγιστου αριθμού στροφών που αναπτύσσονται ανά λεπτό. Διακρίνονται σε αργόστροφες (μέχρι 350 σ.α.λ.) σε μεσαίων στροφών (μέχρι 1.200 σ.α.λ.) και σε πολύστροφες (έως 5.000 σ.α.λ.). Ανάλογα με την ισχύ που αποδίδουν στις κανονικές στροφές λειτουργίας τους τις διακρίνουμε σε: μηχανές μικρής ισχύος (μέχρι 25 ίππους ανά κύλινδρο), σε μηχανές μέσης ισχύος (από 25 έως 200 ίππους ανά κύλινδρο) και σε μηχανές υψηλής ισχύος (πάνω από 200 ίππους ανά κύλινδρο). Επιπλέον, ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων διακρίνονται σε μηχανές μονοκύλινδρες μέχρι και 24κύλινδρες. Ακόμη, ανάλογα με τον αριθμό των χρόνων του κύκλου λειτουργίας τους χωρίζονται σε τετράχρονες και δίχρονες.

Στα βασικά πλεονεκτήματα των ντιζελομηχανών, πέραν της άμεσης φόρτισης και λειτουργίας τους, συγκαταλέγονται η ελαφριά και μικρή δομή τους, οι μη πολύπλοκες εγκαταστάσεις, ο υψηλός βαθμός απόδοσης σε μικρές και μέσες ισχείς (έως 5 MW) και οι ελάχιστες απαιτήσεις που έχουν για προσωπικό λειτουργίας. Βασικά τους μειονεκτήματα αποτελούν η συχνή συντήρηση, η ανάγκη χειρισμού τους από εξειδικευμένο προσωπικό και οι συχνές βλάβες που παθαίνουν.

Ο βαθμός απόδοσης μικρών (751.000 kW) και μεσαίων κινητήρων (1.000 - 6.000 kW) είναι 35-45%, ενώ σε σύγχρονους μεγάλους κινητήρες (άνω των 6.000 kW) φτάνει το 50%. Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής με εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης βρίσκεται στην περιοχή του 80%. Συγκεκριμένα οι μηχανές έχουν καλό βαθμό απόδοσης όταν λειτουργούν στο 75% έως 80% της ονομαστικής τους ισχύος αλλά αυτός μειώνεται πολύ όταν λειτουργούν κάτω από το 50% της ονομαστικής τους ισχύος. Η διάρκεια ζωής είναι 15-20 έτη και εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, την ποιότητα του καυσίμου και την ποιότητα της συντήρησης. Οι παλινδρομικοί κινητήρες απαιτούν τακτικότερη συντήρηση απ' ότι τα προηγούμενα συστήματα με αποτέλεσμα μικρότερη μέση ετήσια διαθεσιμότητα (80-90%) [43],[48].

6. Γενικά Τεχνικά Στοιχεία για τις Μπαταρίες

6.1 Δομή του βασικού στοιχείου και ηλεκτροχημικές αντιδράσεις

Μια μπαταρία είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια που εμπεριέχεται στα ενεργά υλικά της απ'ευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξείδωσης – μείωσης (oxidation – reduction, redox). Στην περίπτωση ενός επαναφορτιζόμενου συστήματος, η μπαταρία επαναφορτίζεται με αντιστροφή αυτής της διαδικασίας. Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε άλλο δια μέσου ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Σε μια μη ηλεκτροχημική redox αντίδραση, όπως είναι οι διαδικασίες της σκουριάς και της καύσης, η μεταφορά των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται απ'ευθείας και μόνο η θερμότητα εμπλέκεται σε αυτή την αντίδραση. Επειδή η μπαταρία μετατρέπει ηλεκτροχημικά τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, δεν υπόκειται, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης, στους περιορισμούς του κύκλου Carnot που υπαγορεύει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής. Για αυτό το λόγο, οι μπαταρίες είναι σε θέση να παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση στη μετατροπή ενέργειας.

Ενώ συχνά χρησιμοποιείται ο όρος «μπαταρία», η βασική ηλεκτροχημική μονάδα στην οποία αναφέρεται είναι το «στοιχείο». Μια μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα τέτοια στοιχεία, σε συνδεσμολογία σειράς ή παράλληλη ή συνδυασμό των δύο ανάλογα με την επιθυμητή τάση και χωρητικότητα εξόδου. Το στοιχείο αποτελείται από τα παρακάτω συστατικά:

- Το ηλεκτρόδιο ανόδου ή αρνητικό ηλεκτρόδιο (το ηλεκτρόδιο μείωσης ή καυσίμου), το οποίο παραχωρεί ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
- Το ηλεκτρόδιο καθόδου ή θετικό ηλεκτρόδιο (το ηλεκτρόδιο οξείδωσης), το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και μειώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας.
- Τον ηλεκτρολύτη (ιοντικό αγωγό), ο οποίος παρέχει το μέσο για τη μεταφορά του φορτίου, με τη μορφή ιόντων, μέσα στο στοιχείο ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης είναι τυπικά ένα υγρό, όπως το νερό ή άλλοι διαλύτες, με διαλυμένα άλατα, οξέα ή αλκάλια να μεταδίδουν την ιοντική αγωγιμότητα. Μερικές μπαταρίες χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου.

Η δυνατότητα του διαχωρισμού της αντίδρασης του στοιχείου σε δύο ξεχωριστές αντιδράσεις ηλεκτροδίων είναι βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση οποιουδήποτε ηλεκτροχημικού στοιχείου. Μόνο τότε μπορεί η ανταλλαγή των ηλεκτρονίων που συνδέεται με τις αντιδράσεις των ηλεκτροδίων να συλληχθεί σαν ένα ρεύμα που ρέει μέσα από τον καταναλωτή (ή τη συσκευή φόρτισης) και η ενέργεια εισόδου ή εξόδου που συνδέεται με τη χημική αντίδραση να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Διαφορετικά, η αντίδραση θα εμφανιζόταν απλώς ως μια χημική αντίδραση. Θα γινόταν ανταλλαγή του ηλεκτρικού φορτίου απ'ευθείας ανάμεσα στις αντιδρώσες ουσίες και η ενέργεια που θα απελευθερωνόταν θα μετατρεπόταν κυρίως σε θερμότητα και σε κάποιο βαθμό σε ενεργειακή ένταση (volume energy).

Το σύστημα της ηλεκτροχημικής αποθήκευσης βασίζεται στη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα στοιχείο καθορίζεται από το διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο των χημικών ουσιών που αναπαριστά την

κατάσταση φόρτισης και εκφόρτισης. Συνεπώς, οι χαρακτηριστικές παράμετροι του συστήματος καθορίζονται από ένα σύνολο ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και τις ενεργειακές μεταβολές που συνδέονται με αυτές τις αντιδράσεις. Συνολικά, αυτές οι αντιδράσεις αποτελούν τις αντιδράσεις στοιχείου που χαρακτηρίζουν το σύστημα της μπαταρίας.

Οι συνδυασμοί των υλικών ανόδου και καθόδου που έχουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα είναι αυτοί που θα είναι ελαφρύτεροι και θα δίνουν υψηλή τάση και χωρητικότητα στοιχείου. Παρ'όλα αυτά, τέτοιοι συνδυασμοί μπορεί να μην είναι πάντα πρακτικοί, εξαιτίας της αντιδραστικότητας με άλλα συστατικά του στοιχείου, της πόλωσης, της δυσκολίας στο χειρισμό, του υψηλού κόστους και άλλων ατελειών.

Σε ένα πρακτικό σύστημα, η άνοδος επιλέγεται με βάση τις ακόλουθες ιδιότητες: να έχει αποδοτικότητα σαν παράγοντας μείωσης, καλή αγωγιμότητα, σταθερότητα, ευκολία κατασκευής και χαμηλό κόστος. Το υδρογόνο είναι ελκυστικό σαν υλικό ανόδου, αλλά προφανώς, πρέπει να περιοριστεί με κάποιο τρόπο, κάτι που μειώνει αποτελεσματικά την ηλεκτροχημική ισοδυναμία του (electrochemical equivalence). Πρακτικά, κυρίως μέταλλα χρησιμοποιούνται σαν το υλικό ανόδου. Ο ψευδάργυρος έχει κυριαρχήσει σαν άνοδος, λόγω των ευνοϊκών του ιδιοτήτων. Το λίθιο, το ελαφρύτερο μέταλλο, με υψηλή ηλεκτροχημική ισοδυναμία, έχει γίνει μια αρκετά ελκυστική άνοδος, αφού έχουν αναπτυχθεί κατάλληλοι και συμβατοί ηλεκτρολύτες και σχεδιασμοί στοιχείων για να ελέγχουν τη δραστηριότητά του.

Η κάθοδος πρέπει να είναι ένας αποδοτικός παράγοντας οξείδωσης, να είναι σταθερή στην επαφή με τον ηλεκτρολύτη και να έχει μια χρήσιμη τάση λειτουργίας. Το οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν από τον ατμοσφαιρικό αέρα, τραβώντας το μέσα στο στοιχείο όπως στη μπαταρία ψευδάργυρου/αέρα (zinc/air battery). Παρ'όλα αυτά, τα περισσότερα συνήθη υλικά καθόδου είναι μεταλλικά οξείδια. Άλλα υλικά καθόδου, όπως τα αλογόνα και τα οξυαλογονίδια, το θείο και τα οξειδιά του, χρησιμοποιούνται για ειδικά συστήματα μπαταριών.

Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα αλλά να μην είναι ηλεκτρονικά αγωγίμος, γιατί αυτό θα προκαλούσε εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η μη αντιδραστικότητα με τα υλικά των ηλεκτροδίων, μικρή αλλαγή των ιδιοτήτων με αλλαγή της θερμοκρασίας, ασφάλεια στο χειρισμό και χαμηλό κόστος. Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδάτινα διαλύματα, αλλά υπάρχουν σημαντικές εξαιρέσεις όπως, για παράδειγμα, στις μπαταρίες θερμικής ανόδου ή ανόδου λιθίου, όπου λιωμένο αλάτι και άλλοι μη – υδάτινοι ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί η αντίδραση της ανόδου με τον ηλεκτρολύτη.

Φυσικά, τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου είναι ηλεκτρονικά απομονωμένα στο στοιχείο για την αποφυγή εσωτερικού βραχυκυκλώματος, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Σε πρακτικούς σχεδιασμούς στοιχείων ένα υλικό διαχωρισμού χρησιμοποιείται για να χωρίζει τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου μηχανικά. Ο διαχωριστής, όμως, είναι διαπερατός από τον ηλεκτρολύτη για να διατηρείται η επιθυμητή ιοντική αγωγιμότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο ηλεκτρολύτης ακινητοποιείται για ένα σχεδιασμό χωρίς διαρροή (non spill design). Ηλεκτρικά αγωγίμες δομές ή υλικά μπορούν επίσης να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για μείωση της εσωτερικής αντίστασης.

Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε διάφορους σχηματισμούς – κυλινδρικό, επίπεδο, πρισματικό – και τα μέρη του στοιχείου σχεδιάζονται για να διευκολύνουν το συγκεκριμένο σχήμα. Τα στοιχεία σφραγίζονται με ποικίλους τρόπους για να αποφευχθεί διαρροή και στέγνωμα. Κάποια στοιχεία είναι εφοδιασμένα με συσκευές εξαερισμού ή άλλα μέσα που επιτρέπουν στα συσσωρευμένα αέρια να διαφύγουν. Κατάλληλες θήκες ή δοχεία, μέσα για τερματική σύνδεση και τιτλοφόρηση προστίθενται για να ολοκληρωθεί η κατασκευή του στοιχείου και της μπαταρίας [19],[20],[42].

6.2 Ταξινόμηση στοιχείων και μπαταριών

Τα ηλεκτροχημικά στοιχεία και οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται ως πρωτεύουσες (μη επαναφορτιζόμενες) ή δευτερεύουσες (επαναφορτιζόμενες), με βάση την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά. Αυτές οι 2 μεγάλες κατηγορίες περιέχουν υποκατηγορίες που έχουν να κάνουν με συγκεκριμένες δομές ή σχεδιασμούς [20],[42].

6.2.1 Πρωτεύουσες μπαταρίες (primary batteries)

Αυτές οι μπαταρίες δεν έχουν τη δυνατότητα εύκολης ή αποτελεσματικής ηλεκτρικής επαναφόρτισης και, για το λόγο αυτό, εκφορτίζονται μια φορά και στη συνέχεια απορρίπτονται. Πολλά πρωτεύοντα στοιχεία στα οποία ο ηλεκτρολύτης περιέχεται σε ένα απορροφητικό ή διαχωριστικό υλικό (δεν υπάρχει ελεύθερος ή υγρός ηλεκτρολύτης) ονομάζονται «ξηρά στοιχεία».

Η πρωτεύουσα μπαταρία είναι μια βολική, συνήθως οικονομική, ελαφριά πηγή συσκευασμένης ενέργειας για φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμό, φωτογραφικό εξοπλισμό, παιχνίδια, εφεδρικές μνήμες και μια σειρά από άλλες εφαρμογές. Γενικά, τα πλεονεκτήματα των πρωτευουσών μπαταριών είναι καλή διάρκεια ζωής «ραφίου» (shelf life), υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς εκφόρτισης, μικρή (ή καθόλου) ανάγκη για συντήρηση και ευκολία στη χρήση. Παρ'όλο που μεγάλες πρωτεύουσες μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές, σηματοδότηση, ενέργεια αναμονής (standby power) και αλλού, η συντριπτική πλειοψηφία των πρωτευουσών μπαταριών είναι οι γνωστές σε όλους μας μπαταρίες ενός κυλινδρικού στοιχείου και flat button ή πολυκυτταρικές μπαταρίες που χρησιμοποιούν αυτά τα στοιχεία σαν συστατικά.

6.2.2 Δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (secondary or rechargeable)

Αυτές οι μπαταρίες μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά, μετά από την εκφόρτισή τους, στην αρχική τους κατάσταση με τη διαδικασία ροής ρεύματος μέσα από αυτές στην αντίθετη όμως κατεύθυνση από αυτή του ρεύματος εκφόρτισης. Είναι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και είναι επίσης γνωστές σαν «μπαταρίες αποθήκευσης» (storage batteries) ή «συσσωρευτές» (accumulators).

Οι εφαρμογές των δευτερευουσών μπαταριών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Εφαρμογές στις οποίες η δευτερεύουσα μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, που συνήθως είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη και φορτίζεται από μια κύρια πηγή ενέργειας και μεταφέρει την ενέργειά της στο φορτίο όταν της ζητηθεί. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι συστήματα αυτοκινήτων και αεροσκαφών, πηγές ενέργειας αναμονής (UPS) για να μην υπάρξει αποτυχία σε περίπτωση ανάγκης, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα στάσιμης ενεργειακής αποθήκευσης (stationary energy storage – SES) για ηλεκτρική χρήση ανύψωσης φορτίου.
- Εφαρμογές στις οποίες η δευτερεύουσα μπαταρία χρησιμοποιείται ή εκφορτίζεται ουσιαστικά σαν μια πρωτεύουσα μπαταρία, αλλά αντί να απορρίπτεται μετά τη χρήση επαναφορτίζεται. Οι δευτερεύουσες μπαταρίες χρησιμοποιούνται κατ' αυτό τον τρόπο, για παράδειγμα, σε φορητές ηλεκτρονικές καταναλώσεις, ηλεκτρικά εργαλεία, ηλεκτρικά οχήματα κλπ, για μείωση του κόστους (αφού μπορούν να επαναφορτιστούν αντί να αντικατασταθούν) και σε εφαρμογές που απαιτούν άντληση ενέργειας πέρα από τα όρια μιας πρωτεύουσας μπαταρίας.

Οι δευτερεύουσες μπαταρίες χαρακτηρίζονται (εκτός από την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται) από υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και καλές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι ενεργειακές τους πυκνότητες είναι γενικά χαμηλότερες από αυτές των πρωτεύουσών μπαταριών και η κατακράτηση φορτίου (charge retention) είναι επίσης φτωχότερη από ότι στις περισσότερες πρωτεύουσες μπαταρίες, όμως η χωρητικότητα που χάνεται σε μια δευτερεύουσα μπαταρία μπορεί να ανακτηθεί με την επαναφόρτιση.

Μερικές μπαταρίες, γνωστές σαν «μηχανικά επαναφορτιζόμενες», «επαναφορτίζονται» αντικαθιστώντας το εκφορτισμένο ή απεμπλουτισμένο ηλεκτρόδιο, συνήθως το μέταλλο της ανόδου με ένα καινούργιο. Κάποιες από τις μπαταρίες μετάλλου/αέρος (metal/air) είναι χαρακτηριστικές αυτού του τύπου μπαταρίας.

6.2.3 Μπαταρίες αποθήκευσης (reserve batteries)

Σε αυτούς τους τύπους, ένα βασικό συστατικό χωρίζεται από την υπόλοιπη μπαταρία πριν από την ενεργοποίησή της. Σε αυτήν την κατάσταση ο κίνδυνος χημικής αλλοίωσης ή αυτοεκφόρτισης ουσιαστικά εξαλείφεται και έτσι η μπαταρία μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Συνήθως το συστατικό που απομονώνεται είναι ο ηλεκτρολύτης. Σε άλλα συστήματα, όπως η θερμική μπαταρία, η μπαταρία είναι ανενεργή μέχρι να θερμανθεί, λιώνοντας έναν στερεό ηλεκτρολύτη ο οποίος μετά γίνεται αγωγίμος. Ο σχεδιασμός των μπαταριών αποθήκευσης χρησιμοποιείται για να ανταποκριθεί σε υπερβολικά μεγάλες ή περιβαλλοντικά ακραίες απαιτήσεις αποθήκευσης οι οποίες δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από μια «ενεργή» μπαταρία που έχει σχεδιαστεί για τα ίδια χαρακτηριστικά απόδοσης. Τέτοιες μπαταρίες χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, για να αποδώσουν μεγάλη ισχύ για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα σε πυραύλους, torpilles και άλλα οπικά συστήματα.

6.3 Απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν

Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν τα συστήματα αποθήκευσης σε ένα αυτόνομο σύστημα παραγωγής ισχύος είναι πολυάριθμες. Μερικές από αυτές έρχονται σε αντίθεση η μία με την άλλη και επομένως δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Ορισμένες από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

- Υψηλή ενεργειακή απόδοση
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (σε χρόνια)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής από την άποψη της απόδοσης χωρητικότητας
- Χαμηλό κόστος
- Καλή αποδοτικότητα φόρτισης ακόμα και σε πολύ μικρά ρεύματα
- Χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης
- Μικρές απαιτήσεις συντήρησης
- Υψηλή διαθεσιμότητα παγκοσμίως
- Υψηλή διαθεσιμότητα ενέργειας
- Εύκολη εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης
- Χαμηλή έκθεση σε ακατάλληλες συνθήκες
- Εύκολα ανακυκλώσιμη
- Χαμηλή τοξικότητα των υλικών

- Ασφαλής συμπεριφορά σε περίπτωση υπερφόρτισης ή βαθιάς εκφόρτισης
- Εύκολη επεκτασιμότητα τάσης και χωρητικότητας μέσω συνδέσεων σε σειρά και παράλληλα
- Μικρό χάσμα τάσης μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης (επιτρέπει τη σύνδεση φορτίων κατευθείαν στη μπαταρία)
- Ικανότητα γρήγορης φόρτισης
- Κανένα φαινόμενο μνήμης
- Χαμηλές εκρηκτικές δυνατότητες
- Υψηλή αξιοπιστία στη λειτουργία – πολύς χρόνος μεταξύ αστοχιών

Ο σχεδιασμός αυτόνομων συστημάτων παροχής ενέργειας θα πρέπει να εξετάζει τις ιδιότητες και τις απαιτήσεις του συστήματος αποθήκευσης από την αρχή. Αν σχεδιαστεί το σύστημα και στη συνέχεια προστεθεί το σύστημα αποθήκευσης, θα έχουμε αμελήσει τις πολυάριθμες αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στη μπαταρία, τα περιφερειακά και συνολικά στο σχεδιασμό και τον έλεγχο όλου του συστήματος. Ως εκ τούτου, μόνο ένας ολοκληρωμένος προγραμματισμός του συστήματος μας επιτρέπει να κάνουμε χρήση όλων των συνεργειών και να σχεδιάσουμε συστήματα τα οποία θα είναι σε θέση να λειτουργούν με το ελάχιστο κόστος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους [19].

6.4 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Μπαταρίας

Στην υπό-ενότητα αυτή αναλύονται διάφορα μεγέθη σχετικά με τις μπαταρίες και τη λειτουργία τους, ορισμένα από τα οποία έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω. Η σχετική γνώση των μεγεθών αυτών είναι απαραίτητη για την κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων.

6.4.1 Χωρητικότητα

Χωρητικότητα μιας μπαταρίας C (από την αγγλική λέξη capacity) είναι το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που μπορούμε να πάρουμε από μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες εκφόρτισης (ρυθμό εκφόρτισης, τάση και θερμοκρασία). Η χωρητικότητα που μπορεί να δώσει μια μπαταρία είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ποσό των υλικών ανόδου και καθόδου (δηλαδή των ενεργών υλικών) που περιέχει. Η χωρητικότητα ενός στοιχείου/μπαταρίας μετριέται συνήθως σε αμπερ – ώρες (Ah) και καθορίζεται από ένα σταθερό ρεύμα εκφόρτισης που εκφορτίζει τη μπαταρία μέχρι μια ορισμένη τελική τάση εκφόρτισης (συνήθως 1.75 V περίπου). Η χωρητικότητα εξαρτάται σημαντικά από το ρεύμα εκφόρτισης και τη θερμοκρασία. Ο υπολογισμός της χωρητικότητας γίνεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή του ρεύματος εκφόρτισης με το χρόνο που χρειάζεται για να φτάσει η μπαταρία στην τελική τάση. Οι κατασκευαστές μπαταριών μπορούν να ορίσουν οι ίδιοι το ρεύμα και την τελική τάση εκφόρτισης. Ο όρος που χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει την ικανότητα της μπαταρίας να μεταφέρει ρεύμα είναι η ονομαστική της χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές συχνά καθορίζουν την ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών τους σε αμπερ – ώρες για ένα συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης. Για παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι μια μπαταρία 200Ah (για ένα ρυθμό 10 ωρών) θα μεταφέρει 20 A ρεύματος για 10 ώρες κάτω από κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (25o C ή 77o F). Εναλλακτικά, ένας ρυθμός εκφόρτισης μπορεί να καθορίζεται από το ρυθμό φόρτισης, $C - rate$, ο οποίος εκφράζεται σαν ένα πολλαπλάσιο της ονομαστικής χωρητικότητας του στοιχείου ή της μπαταρίας. Για παράδειγμα, μια μπαταρία μπορεί να έχει χωρητικότητα 200 Ah για ένα ρυθμό εκφόρτισης $C/10$.

Η χωρητικότητα της μπαταρίας ποικίλει για διάφορους ρυθμούς εκφόρτισης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα του στοιχείου. Χαμηλότεροι ρυθμοί εκφόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές μπαταριών συνήθως ορίζουν μερικούς ρυθμούς εκφόρτισης (σε αμπέρ) μαζί με τους χρόνους εκφόρτισης που συνδέονται με αυτούς (σε ώρες). Η χωρητικότητα της μπαταρίας για κάθε έναν από αυτούς τους ρυθμούς εκφόρτισης υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η ονομαστική χωρητικότητα για τις μπαταρίες μολύβδου οξέος συνήθως καθορίζεται για ρυθμούς 8, 10 ή 20-ωρών (C/8, C/10, C/20). Οι UPS μπαταρίες βαθμονομούνται σε 8 – ωρών χωρητικότητες και οι μπαταρίες τηλεπικοινωνιών σε 10 – ωρών χωρητικότητες.

Η χωρητικότητα όλων των μπαταριών μολύβδου οξέος (για δεδομένη τελική τάση) μειώνεται στις χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει λόγω πολλών παραγόντων μεταξύ των οποίων είναι η αυξημένη αντίσταση και ο μειωμένος ρυθμός διάχυσης στον ηλεκτρολύτη. Το δεύτερο φαινόμενο σημαίνει ότι οι μπαταρίες μολύβδου οξέος με μεγάλο απόθεμα οξέος τείνουν να χάνουν περισσότερη χωρητικότητα στις χαμηλές θερμοκρασίες από ότι αυτές που έχουν μικρότερο όγκο οξέος. Οι ονομαστικές χωρητικότητες συνήθως αναφέρονται σε θερμοκρασία λειτουργίας 20°C. Αν μια μπαταρία χρειάζεται να παρέχει αυτονομία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, είναι συνήθως πρακτική να αυξάνεται η ονομαστική χωρητικότητα για να ληφθεί υπόψη η μειωμένη χωρητικότητα για τη χειρότερη θερμοκρασία. Οι χωρητικότητες αυξάνονται ελαφρώς για θερμοκρασίες πάνω από 20°C αλλά δεν είναι φυσιολογικό να μειώνεται η καθορισμένη χωρητικότητα της μπαταρίας λόγω αυτού.

Στις χωρητικότητες που δίνονται από τον κατασκευαστή πρέπει να αναφέρεται η τελική τάση στην οποία αυτές εφαρμόζονται. Για μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η τάση αυτή είναι συνήθως μεταξύ 1.75V και 1.85V ανά στοιχείο. Όταν συγκρίνονται δύο διαφορετικές μπαταρίες, πρέπει οι προς σύγκριση χωρητικότητες να είναι ως προς την ίδια τελική τάση. Προφανώς, όσο χαμηλότερη είναι η τελική τάση, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διαθέσιμη χωρητικότητα [19],[22],[23].

6.4.2 Τάση

Για να είναι ικανό ένα στοιχείο ή μια μπαταρία να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, πρέπει να υπάρχει μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Αυτή η διαφορά δυναμικού, η οποία μετριέται σε volts αναφέρεται ως τάση του στοιχείου ή της μπαταρίας. Ένα μόνο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού περίπου 2 V υπό φορτίο. Ένα πλήρως εκφορτισμένο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού περίπου 1.75 V, ανάλογα με το ρυθμό εκφόρτισης. Η τάση ισορροπίας ενός στοιχείου είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας. Η τάση ανοικτού κυκλώματος (OCV) μπορεί να μετρηθεί εάν κανένα εξωτερικό ρεύμα δε διαρέει τη μπαταρία. Αυτή ταυτίζεται με την τάση ισορροπίας αν όλες οι εσωτερικές υπερτάσεις, που προκαλούνται κυρίως από διαδικασίες διάχυσης, έχουν σταθεροποιηθεί. Ο χρόνος για να επιτευχθεί αυτό το στάδιο εξαρτάται από την τεχνολογία της μπαταρίας και τις συνθήκες λειτουργίας και κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι πολλές ώρες. Η OCV μιας μπαταρίας εξαρτάται από το πρότυπο δυναμικό των χρησιμοποιούμενων ενεργών υλικών και το ποσό του φορτίου που απομένει. Το λίθιο χρησιμοποιείται ευρέως ως άνοδος σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες μπαταρίες γιατί προσφέρει το υψηλότερο πρότυπο δυναμικό από όλες τις χημείες των μπαταριών. Η τάση του στοιχείου υπό φορτίο, η τάση κλειστού κυκλώματος (CCV), εξαρτάται από το ρεύμα, τη στάθμη φόρτισης και το ιστορικό του στοιχείου, όπως τη διάρκεια ζωής του ή το χρόνο αποθήκευσης.

Τυπικά, οι ονομαστικές τάσεις των στοιχείων είναι μεταξύ 1.2 και 3.6 V. Ως εκ τούτου, αρκετά στοιχεία συνδέονται συνήθως σε σειρά για να χτίσουν μια αλυσίδα με μεγαλύτερη ονομαστική τάση. Επομένως, η ονομαστική τάση μιας μπαταρίας καθορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα

σε σειρά επί την ονομαστική τάση του ενός στοιχείου. Οι μπαταρίες συχνά πωλούνται σε δομές, στις οποίες είναι ενσωματωμένα και συνδεδεμένα σε σειρά μερικά στοιχεία με μόνο ένα σετ ακροδεκτών. Ένα γνωστό παράδειγμα είναι οι SLI μπαταρίες αυτοκινήτων, όπου 6 στοιχεία συνδέονται σε σειρά αλλά πωλούνται ως ένα μπλοκ των 12 V. (Το SLI προέρχεται από τις λέξεις starting, lighting, ignition που σημαίνουν εκκίνηση, φωτισμός και ανάφλεξη.)

Η τελική τάση φόρτισης (end-of-charge voltage) καθορίζει ένα άνω όριο για την τάση. Η φόρτιση μιας μπαταρίας δε σταματά όταν φτάσει την τελική τάση φόρτισης (όπως συμβαίνει με την τελική τάση εκφόρτισης – end-of-discharge voltage), αλλά το ρεύμα φόρτισης μειώνεται κατάλληλα για να διατηρεί την τελική τάση φόρτισης με την πάροδο του χρόνου [22],[23].

6.4.3 Στάθμη φόρτισης

Η στάθμη φόρτισης (state of charge – SOC) δίνει τη χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Εκατό τοις εκατό στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ 0% στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η ονομαστική χωρητικότητα έχει εκφορτιστεί.

Για τη λειτουργία και τη διαχείριση της ενέργειας στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, η χωρητικότητα της μπαταρίας και η πραγματική στάθμη φόρτισης είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι. Ο καθορισμός της στάθμης φόρτισης είναι δύσκολος σε αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επειδή η πλήρης φόρτιση της μπαταρίας όπως γίνεται συχνά με τους συμβατικούς φορτιστές μπαταρίας είναι πολύ ασυνήθιστη.

Αν μας δίνεται η στάθμη φόρτισης, το ερώτημα που εγείρεται είναι ποια είναι η σημασία των συγκεκριμένων τιμών. Υπάρχουν επιμέρους ορισμοί για τη χωρητικότητα της μπαταρίας και οι αντίστοιχοι ορισμοί για τη στάθμη φόρτισης. Η μετρούμενη χωρητικότητα μιας μπαταρίας μπορεί να είναι μικρότερη ή ακόμα και μεγαλύτερη από την ονομαστική χωρητικότητα που δίνεται από τον κατασκευαστή. Καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η μετρούμενη χωρητικότητα μειώνεται όλο και περισσότερο λόγω των επιπτώσεων της γήρανσης. Η πρακτική χωρητικότητα είναι μικρότερη από τη μετρούμενη χωρητικότητα. Λόγω των ειδικών συνθηκών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι μπαταρίες δεν επαναφορτίζονται πλήρως σχεδόν ποτέ (ο αριθμός των ωρών φόρτισης είναι περιορισμένος). Η μέγιστη στάθμη φόρτισης που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη φυσιολογική λειτουργία του συστήματος ονομάζεται στάθμη φόρτισης πλήρους ακτινοβολίας (solar-full state of charge). Επίσης, το σύστημα καθορίζει ένα κριτήριο τέλους εκφόρτισης για να αποφευχθεί η βαθειά εκφόρτιση της μπαταρίας και κατά συνέπεια η επιτάχυνση της γήρανσης, το οποίο συνήθως διαφέρει από τα κριτήρια τέλους εκφόρτισης που χρησιμοποιούνται στους ελέγχους της χωρητικότητας. Έτσι, η πρακτική χωρητικότητα της μπαταρίας είναι μικρότερη από τη μετρούμενη χωρητικότητα.

Η ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται ως η χωρητικότητα για εκφόρτιση 10 ωρών (C/10). Αυτή είναι η βάση για τον καθορισμό της στάθμης φόρτισης. Η ονομαστική χωρητικότητα δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ η μετρούμενη χωρητικότητα μεταβάλλεται με το χρόνο. Η στάθμη φόρτισης που σχετίζεται με τη μετρούμενη χωρητικότητα ονομάζεται σχετική στάθμη φόρτισης (relative state of charge – SOC_r). Η στάθμη φόρτισης που σχετίζεται με την πρακτική χωρητικότητα λέγεται πρακτική στάθμη φόρτισης (practical state of charge – SOC_p). Η SOC_p είναι 100% αν μια solar-full στάθμη φόρτισης έχει αποκτηθεί [19].

6.4.4 Βάθος εκφόρτισης

Το βάθος εκφόρτισης (depth of discharge – DOD) είναι το κλάσμα ή το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Το αντίθετο, δηλαδή, από τη στάθμη φόρτισης που όπως είδαμε παραπάνω είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που είναι ακόμα διαθέσιμη στη μπαταρία. Παρ'όλα αυτά, οι τιμές για τη στάθμη φόρτισης και το βάθος εκφόρτισης συνήθως αναφέρονται στην ονομαστική χωρητικότητα (π.χ. τη χωρητικότητα για το ρυθμό των 10 ωρών). Για χαμηλότερα ρεύματα εκφόρτισης, μπορεί να συναντήσουμε αναφορές για DOD μεγαλύτερο του 100%. Αυτό απλά σημαίνει ότι η μπαταρία μπορεί να παράγει περισσότερο από το 100% της ονομαστικής της χωρητικότητας σε ρυθμούς εκφόρτισης χαμηλότερους από τον ονομαστικό ρυθμό εκφόρτισης [27].

6.4.5 Κύκλος / Κύκλος ζωής

Με τον όρο κύκλος, περιγράφουμε την επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε μια μπαταρία σε λειτουργία. Ένας κύκλος ισοδυναμεί με μια εκφόρτιση που ακολουθείται από μια φόρτιση. Ο κύκλος ζωής είναι ένα μέτρο του πόσους κύκλους μια μπαταρία μπορεί να δώσει κατά τη διάρκεια της χρήσιμης ζωής της. Συνήθως αντιστοιχεί στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για ένα συγκεκριμένο DOD που η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η διαθέσιμη χωρητικότητά της μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό (συνήθως 80%) της αρχικής χωρητικότητας.

Ο κύκλος ζωής εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το βάθος του κάθε κύκλου. Εάν ο κύκλος ζωής μετριέται πειραματικά για ένα υψηλό DOD, τότε σε χαμηλότερα DODs το αποτέλεσμα του γινομένου του αριθμού των κύκλων επί το DOD είναι περίπου σταθερό, δηλαδή ο κύκλος εργασιών της χωρητικότητας (capacity turnover) είναι περίπου ο ίδιος για χαμηλότερα DODs.

Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όταν αναλύουμε τον κύκλο ζωής που δίνεται από τους κατασκευαστές μπαταρίας. Συνήθως μετριέται σε σχετικά μεγάλα ρεύματα (μικρούς χρόνους εκφόρτισης) και το αναγραφόμενο DOD συχνά αναφέρεται στη χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη σε αυτό το μικρό χρόνο εκφόρτισης. Ας δώσουμε ένα πιο συγκεκριμένο παράδειγμα. Ένας κατασκευαστής δίνει κύκλο ζωής 400 κύκλων για 50% DOD για το προϊόν του. Σχολαστικότερη παρατήρηση των στοιχείων που δίνει ο κατασκευαστής δείχνουν ότι αυτό έγινε για ρυθμό εκφόρτισης 5 ωρών και το DOD που αναγράφεται αναφέρεται στη χωρητικότητα για αυτό το ρυθμό. Η ονομαστική χωρητικότητα αυτής της μπαταρίας όμως έχει υπολογιστεί για ρυθμό εκφόρτισης 20 ωρών και η χωρητικότητα για ρυθμό εκφόρτισης 5 ωρών είναι το 85% της ονομαστικής χωρητικότητας. Παρ'όλο που ο κύκλος εργασιών της χωρητικότητας είναι $400 \times 50\% = 200$ για τον ρυθμό των 5 ωρών, όταν αναφερόμαστε στις πραγματικές Ah είναι μόνο $400 \times 50\% \times 85\% = 170$ για την ονομαστική χωρητικότητα (για ρυθμό 20 ωρών). Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να περιμένουμε μόνο 340 κύκλους σε 50% DOD για την ονομαστική χωρητικότητα, όχι 400.

Στις δοκιμές του κύκλου ζωής, στις μπαταρίες πραγματοποιείται μια πλήρης επαναφόρτιση μετά από κάθε εκφόρτιση. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η επαναφόρτιση δεν είναι τόσο πλήρης. Είναι δηλαδή συνετό, σαν παράγοντας ασφάλειας, να φθείρεται κάπως ο κύκλος ζωής όταν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χρόνων ζωής σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα ποσοστό 80% του κύκλου ζωής που προκύπτει από τις δοκιμές. Έτσι, στο παραπάνω παράδειγμα για την μπαταρία που ξεκίνησε στους 400 κύκλους για 50% DOD και μειώθηκε στους 340 κύκλους για το πραγματικό 50% DOD, θα παίρναμε μόνο 272 τέτοιους κύκλους σε συνθήκες φωτοβολταϊκού συστήματος.

Τα πρώτα χρόνια του σχεδιασμού φωτοβολταϊκών συστημάτων, η «εύκολη λύση» για την αύξηση της ζωής της μπαταρίας όταν αυτή ήταν απογοητευτικά χαμηλή σε κάποιες περιπτώσεις, ήταν η αναζήτηση μιας μπαταρίας με αυξημένο κύκλο ζωής. Δυστυχώς, ο κύκλος ζωής δεν είναι ο μόνος παράγοντας που καθορίζει το χρόνο ζωής της μπαταρίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα και σε μερικές περιπτώσεις αυτή η αλλαγή οδηγούσε σε ακόμα μικρότερο χρόνο ζωής.

Στα αυτόνομα συστήματα παρατηρούνται πολλοί μερικοί κύκλοι (partial cycles) μέσα σε έναν μακρόκύκλο (macrosycle). Ένας μακρόκύκλος είναι ο χρόνος μεταξύ 2 πλήρως φορτισμένων καταστάσεων, ενώ ο μερικός κύκλος ορίζεται ως η μεταφορά φορτίου μέσα στο χρόνο της αλλαγής της κατεύθυνσης του ρεύματος της μπαταρίας. Γενικά, η μεταφορά φορτίου της μπαταρίας στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας καθορίζεται από της απόδοση χωρητικότητας (capacity throughput). Αυτή δίνεται από τις συσσωρευμένες αμπερ – ώρες που έχουν εκφορτιστεί από τη μπαταρία δια την ονομαστική χωρητικότητα. Ο αριθμός που προκύπτει είναι επίσημα ισοδύναμος με τον αριθμό των 100% DOD κύκλων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της ζωής της μπαταρίας. Αυτός ο κανονικοποιημένος αριθμός αναφέρεται ως απόδοση χωρητικότητας [19],[27].

6.4.6 Αποδοτικότητα

Η αποδοτικότητα αμπερ – ωρών η_{Ah} ορίζεται ως ο λόγος των αμπερ – ωρών που εκφορτίζονται από τη μπαταρία προς τις αμπερ – ώρες που φορτίζονται στην μπαταρία μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (τυπικές περίοδοι είναι ένας μήνας ή ένας χρόνος ή μια περίοδος ανάμεσα σε δύο διαδικασίες πλήρους φόρτισης). Συχνά, αντί για την αποδοτικότητα αμπερ – ωρών χρησιμοποιείται ο παράγοντας φόρτισης, ο οποίος ορίζεται ως $1/\eta_{Ah}$. Για μια βιώσιμη λειτουργία μπαταρίας είναι απαραίτητοι παράγοντες φόρτισης μεγαλύτεροι της μονάδας.

Η αποδοτικότητα ενέργειας η_{Wh} είναι ο λόγος της ενέργειας που εκφορτίζεται από μια μπαταρία προς την ενέργεια που φορτίζεται σε μια μπαταρία μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η ενεργειακή αποδοτικότητα μιας μπαταρίας είναι χαμηλότερη από την αποδοτικότητα αμπερ – ωρών διότι οι μπαταρίες εκφορτίζονται σε χαμηλότερη τάση από ότι φορτίζονται. Επειδή η αποδοτικότητα αμπερ – ωρών είναι κοντά στη μονάδα, θεωρείται πιο βολικό να δουλεύουμε σε Ah όταν υπολογίζουμε πόση φόρτιση χρειάζεται για να αντικατασταθεί ένα συγκεκριμένο ποσό εκφόρτισης σε φωτοβολταϊκούς (και άλλους) υπολογισμούς. Παρ'όλα αυτά, επειδή η αποδοτικότητα αμπερ – ωρών για μια πλήρη επαναφόρτιση είναι πάντα ελάχιστα μικρότερη της μονάδας, πρέπει να τροφοδοτηθεί η μπαταρία με λίγο περισσότερες Ah από όσες πραγματικά καταναλώνονται στη διαδικασία φόρτισης. Αυτό το επιπρόσθετο φορτίο, ή η υπερφόρτιση, καταναλώνεται από άλλες, ανεπιθύμητες, χημικές αντιδράσεις μέσα στη μπαταρία. Στις μπαταρίες μολύβδου οξέος και νικελίου καδμίου, αυτές είναι η παραγωγή αερίων οξυγόνου από το νερό στο θετικό ηλεκτρόδιο και στις ανοικτές μπαταρίες, η παραγωγή αερίων υδρογόνου από το νερό στο αρνητικό ηλεκτρόδιο [27].

6.4.7 Μέρες αυτονομίας

Το μέγεθος μιας μπαταρίας δίνεται από το ονομαστικό ενεργειακό περιεχόμενο (energy content) σε κατάσταση πλήρους φόρτισης. Για να εκφράσουμε το σχετικό μέγεθος μιας μπαταρίας σε σχέση με το φορτίο στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιείται συχνά ο όρος μέρες αυτονομίας. Οι μέρες αυτονομίας καθορίζονται από το λόγο του ονομαστικού ενεργειακού περιεχομένου της μπαταρίας (kWh) προς τη μέση ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση (kWh/ημέρα). Επομένως, η μονάδα είναι οι «μέρες» και εκφράζει το χρονικό διάστημα για το οποίο το σύστημα μπορεί να τροφοδοτείται μόνο από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία [19].

6.4.8 Ρεύμα μπαταρίας

Τα ρεύματα μπαταρίας δίνονται συνήθως σε σχέση με το μέγεθος της μπαταρίας. Ο λόγος είναι ότι οι εντάσεις και οι εξαρτώμενες από το ρεύμα ηλεκτρικές ιδιότητες σχετίζονται με συγκεκριμένα φορτία στα ηλεκτρόδια όσον αφορά τα ενεργά υλικά. Για μεγαλύτερες χωρητικότητες που έχουν δημιουργηθεί από την παράλληλη σύνδεση ηλεκτροδίων ή κυττάρων ή από μεγαλύτερα ηλεκτρόδια, η κανονικοποίηση του ρεύματος ως προς την χωρητικότητα είναι ένα κατάλληλο μέτρο. Ως εκ τούτου, τα ρεύματα μπαταρίας εκφράζονται ως πολλαπλάσια της χωρητικότητας σε αμπερ – ώρες ή ως πολλαπλάσια του ρεύματος εκφόρτισης που καθορίζεται από τη χωρητικότητα. Για μια μπαταρία με χωρητικότητα $C = 100 \text{ Ah}$, ένα ρεύμα 10 A ορίζεται ως $0.1 \times C$. Στο παράδειγμα, τα 100 A καλούνται $C - \text{rate}$. Το I_{10} είναι το ρεύμα που εκφορτίζει μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία μέσα σε 10 ώρες στην καθορισμένη τελική τάση εκφόρτισης. Η τυπική ονοματολογία για τη χωρητικότητα είναι C_x , όπου x είναι ο χρόνος μέσα στον οποίο η μπαταρία εκφορτίζεται. Για παράδειγμα, $C_{10} = 10 \text{ h} \times I_{10}$ ή $C_{10} = 100 \text{ Ah}$, $I_{10} = 10 \text{ A} = 0.1 \times C_{10}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι το $1 \times I_{10}$ δεν είναι ισοδύναμο με το $10 \times I_{100}$ αφού η χωρητικότητα C_{100} είναι γενικά μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα C_{10} [19].

6.4.9 Χρόνος ζωής

Ο χρόνος ζωής μιας μπαταρίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας και από τις στρατηγικές ελέγχου. Ο όρος χρόνος ζωής, έχει διαφορετική σημασία για τις πρωτεύουσες και για τις δευτερεύουσες μπαταρίες. Ο χρόνος ζωής (ή ζωή «ραφίου» - shelf life) στις πρωτεύουσες μπαταρίες περιορίζεται από την αυτοεκφόρτισή τους και ορίζεται συνήθως σαν ο χρόνος που χρειάζεται η μπαταρία για να φτάσει το 90% της αρχικής της χωρητικότητας. Αντίθετα, ο χρόνος ζωής των δευτερευουσών μπαταριών ορίζεται σαν τη διάρκεια ικανοποιητικής επίδοσης που μετράται σε χρόνια (float ή ημερολογιακός χρόνος ζωής) ή σαν τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης (κύκλος ζωής). Το κριτήριο τέλους ζωής για τις δευτερεύουσες μπαταρίες καθορίζεται συνήθως από το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η μπαταρία το 80% της αρχικής της χωρητικότητας. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης τυπικά αυξάνεται καθώς μειώνεται το DOD. Και οι δύο τύποι χρόνου ζωής των δευτερευουσών μπαταριών, επηρεάζονται από έναν αριθμό συνθηκών, μεταξύ αυτών από τη θερμοκρασία κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση, το DOD, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης, τη μέθοδο ελέγχου της φόρτισης, την έκθεση σε υπερφόρτιση και/ή υπερεκφόρτιση και τη διάρκεια και τις συνθήκες αποθήκευσης.

6.4.10 Αυτοεκφόρτιση

Αυτοεκφόρτιση ονομάζεται η απώλεια φορτίου σε μια μπαταρία αν αυτή αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για υπολογίσιμο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, σε μια πρωτεύουσα μπαταρία που είναι τοποθετημένη στο ράφι ενός καταστήματος για μερικά χρόνια δε θα έχει απομείνει ολόκληρη η χωρητικότητά της. Για επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης συνήθως αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό χωρητικότητας που χάνεται ανά μήνα όταν αρχίζουμε με μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, πρέπει όμως να αναφέρεται μαζί με τη θερμοκρασία της μπαταρίας. Σε πολλές περιπτώσεις, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης διπλασιάζεται για κάθε αύξηση 10°C στη θερμοκρασία της μπαταρίας. Στους περισσότερους υπολογισμούς για φωτοβολταϊκές μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης των προτιμώμενων τύπων μπαταριών είναι χαμηλός (μεταξύ 1 και 4% ανά μήνα σε θερμοκρασία $20 - 25^\circ\text{C}$)

και η αυτοεκφόρτιση απαιτεί τόσο μικρό ποσοστό επιπρόσθετης φόρτισης συγκριτικά με το φορτίο (ή ακόμα και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό ελέγχου) που μπορεί εύκολα να αγνοηθεί [27].

6.4.11 Κατάσταση υγείας

Η κατάσταση της υγείας ορίζεται σαν ο λόγος της πραγματικά μετρούμενης χωρητικότητας και της ονομαστικής χωρητικότητας. Η κατάσταση υγείας υποδεικνύει σε ποιο βαθμό η μπαταρία είναι ακόμα ικανή να πληροί τις απαιτήσεις του συστήματος. Σύμφωνα με τα πρότυπα, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι στο τέλος της ζωής τους αν η κατάσταση της υγείας τους είναι κάτω από 80%. Παρ'όλα αυτά, οι μπαταρίες μπορούν να λειτουργήσουν για πολύ περισσότερο, οι μέρες αυτονομίας τους όμως μειώνονται αναλόγως και το σύστημα μπορεί να μην είναι σε θέση να ικανοποιήσει πλέον τις ενεργειακές απαιτήσεις. Μπαταρίες που λειτουργούν σε κατάσταση υγείας περίπου 50% συναντώνται συχνά, κυρίως σε υβριδικά συστήματα. Αυτό έχει σαν συνέπεια το μερίδιο της γεννήτριας να αυξάνεται [19].

6.4.12 Ρυθμός εκφόρτισης, ρυθμός φόρτισης

Οι ρυθμοί εκφόρτισης και φόρτισης είναι βολικές κλίμακες για τη σύγκριση ρευμάτων στα οποία φορτίζονται οι μπαταρίες, ανεξάρτητα από τη χωρητικότητά τους. Εκφράζονται ως ένας αριθμός ωρών, π.χ. ο ρυθμός 10 ωρών, 240 ωρών κλπ. Το ρεύμα στο οποίο αντιστοιχούν είναι η κατάλληλη ολική χωρητικότητα εκφόρτισης διαιρεμένη με τον αριθμό των ωρών.

Για παράδειγμα, C/10 (ρυθμός 10 ωρών) είναι ένα ρεύμα που ισούται με την ονομαστική χωρητικότητα σε Ah διαιρεμένη δια 10 [27].

6.4.13 Ειδική ενέργεια, ενεργειακή πυκνότητα

Για τη σύγκριση συστημάτων, έχει γίνει κοινή πρακτική να συσχετίζεται το ενεργειακό περιεχόμενο μιας δοσμένης μπαταρίας με το βάρος ή τον όγκο της. Η σχετική με το βάρος ενέργεια ονομάζεται ειδική ενέργεια και μετριέται σε Wh/kg. Μια τυπική τιμή για την ειδική ενέργεια μιας μπαταρίας έλξης (traction battery) μολύβδου οξέος είναι 25 Wh/kg. Για σύγκριση, παρατίθεται ότι μια σύγχρονη μπαταρία ιόντων λιθίου προσφέρει περίπου 125 Wh/kg. Η σχετική με τον όγκο ενέργεια ονομάζεται ενεργειακή πυκνότητα και συναντάται με τις μονάδες Wh/L ή Wh/cm³. Η ενεργειακή πυκνότητα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις μπαταρίες που σχεδιάζονται να τροφοδοτούν φορητό εξοπλισμό. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, το μέγεθος της μπαταρίας είναι συνήθως πιο σημαντικό από ότι το βάρος της. Τα σημερινά συστήματα καλύπτουν ένα εύρος από 150 mWh/cm³ (ψευδάργυρος/ άνθρακας) μέχρι 1.2 Wh/cm³ (alkaline zinc / αέρας).

Πολλές προόδους έχουν σημειωθεί στην τεχνολογία των μπαταριών τα τελευταία χρόνια, τόσο μέσω της συνεχούς βελτίωσης ενός συγκεκριμένου ηλεκτροχημικού συστήματος όσο και μέσω της ανάπτυξης και εισαγωγής μπαταριών διαφορετικής χημικής σύστασης. Όμως οι μπαταρίες δε συμβαδίζουν με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών, όπου οι επιδόσεις διπλασιάζονται κάθε 18 μήνες, ένα φαινόμενο γνωστό ως ο νόμος του Moore. Οι μπαταρίες, λοιπόν, αντίθετα με τις ηλεκτρονικές συσκευές, καταναλώνουν υλικά όταν παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και υπάρχουν θεωρητικοί περιορισμοί στο ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποδοθεί ηλεκτροχημικά από τα διαθέσιμα υλικά. Το άνω όριο τώρα επιτυγχάνεται εφόσον τα περισσότερα από τα υλικά που είναι ικανά να λειτουργήσουν ως

ενεργά υλικά έχουν διερευνηθεί και η λίστα των ανεξερεύνητων υλικών μικραίνει. Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2, εκτός από μερικά συστήματα, όπου το βάρος του ενεργού υλικού της καθόδου δεν περιλαμβάνεται στον υπολογισμό, οι τιμές για τη θεωρητική ενεργειακή πυκνότητα δεν υπερβαίνουν τις 1500 Wh/L. Οι περισσότερες από τις τιμές είναι, στην πραγματικότητα, χαμηλότερες. Τα δεδομένα στον πίνακα αυτό, δείχνουν επίσης ότι η ειδική ενέργεια που παρέχεται από αυτές τις μπαταρίες (με βάση τις πραγματικές επιδόσεις όταν έχουμε εκφόρτιση υπό βέλτιστες συνθήκες) δεν υπερβαίνει τις 450 Wh/kg. Ομοίως, οι τιμές της ενεργειακής πυκνότητας δεν υπερβαίνουν τις 1000 Wh/L. Αξίζει, ακόμα, να σημειωθεί ότι οι τιμές για τα επαναφορτιζόμενα συστήματα είναι χαμηλότερες από αυτές στις πρωτεύουσες μπαταρίες, κατά ένα μέρος λόγω του πιο περιορισμένου εύρους υλικών που μπορούν να επαναφορτιστούν πρακτικά και της ανάγκης για σχεδιασμούς που θα βελτιώνουν την επαναφόρτιση και τον κύκλο ζωής [20],[24].

6.4.14 Εσωτερική αντίσταση

Η εσωτερική αντίσταση χαρακτηρίζει την ικανότητα της μπαταρίας να χειρίζεται ένα συγκεκριμένο φορτίο. Καθορίζει την ισχύ εξόδου της μπαταρίας και μια γενική απαίτηση είναι η DC εσωτερική αντίσταση να είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή της συσκευής ($1/10$ ή λιγότερο), διαφορετικά η πτώση τάσης που θα προκληθεί από την απαίτηση ρεύματος της συσκευής κατανάλωσης θα περιορίζει την διάρκεια της λειτουργίας της μπαταρίας πολύ νωρίς. Η ερμηνεία του όρου «εσωτερική αντίσταση» θέλει προσοχή, γιατί δεν είναι απλά μια ωμική αντίσταση και ο καθορισμός της εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται καθώς επίσης και από τη στάθμη φόρτισης της μπαταρίας. Στα περισσότερα συστήματα μπαταριών, η εσωτερική αντίσταση αυξάνεται όταν η μπαταρία πλησιάζει το τέλος της εκφόρτισης λόγω της μειωμένης αγωγιμότητας των ενώσεων που έχουν σχηματιστεί. Κυρίως, εφαρμόζεται η μέθοδος συνεχούς ρεύματος, όπου η τελική τάση συγκρίνεται σε 2 διαφορετικά φορτία. Η μπαταρία φορτίζεται για μερικά δευτερόλεπτα με το ρεύμα i_1 και προκύπτει η τάση U_1 . Στη συνέχεια, το ρεύμα αυξάνεται στην τιμή i_2 και η τάση της μπαταρίας μειώνεται στην τιμή U_2 και η εσωτερική αντίσταση R_i υπολογίζεται.

Αυτό το R_i περιλαμβάνει την ωμική αντίσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη καθώς επίσης και την υπέρταση στα όρια φάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη. Η παραπάνω εξίσωση υποδεικνύει ότι η υπέρταση είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με την ωμική πτώση τάσης. Για μπαταρίες με υδάτινο ηλεκτρολύτη, η εσωτερική αντίσταση μπορεί να καθοριστεί με αυτή τη μέθοδο μόνο για την εκφόρτιση. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης αυτό δεν είναι δυνατό λόγω της υψηλής υπέρτασης των αντιδράσεων αεριοποίησης. Όταν μια διαδικασία διάχυσης περιορίζει τη μεταφορά των αντιδρώντων σωματιδίων και δημιουργεί ένα ρεύμα περιορισμού, η αύξηση της τάσης δεν μπορεί πια να αυξήσει το ρεύμα. Η παραπάνω εξίσωση θα οδηγούσε σε αυτή την περίπτωση σε R_i που τείνει στο άπειρο. Ένα παράδειγμα τέτοιας συμπεριφοράς είναι το σύστημα αέρα/ψευδαργύρου: με την αύξηση του ρεύματος i η μεταφορά του οξυγόνου, που καθορίζεται από το ρυθμό διάχυσης, και η τάση υπό ένα μεγαλύτερο φορτίο, καταρρέουν.

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος έχει ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για μεγάλες στάσιμες μπαταρίες, εφόσον αναπαριστά το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δώσει η μπαταρία για μια μικρή χρονική περίοδο. Η τιμή του βοηθάει στην εκτίμηση του μεγέθους μιας ασφάλειας που μπορεί να λειτουργεί μαζί με την μπαταρία. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος καθορίζεται από την παραπάνω εξίσωση με προέκταση του αποτελέσματος για μηδενική τάση. Αναπαριστά μια δυναμική παράμετρο, η οποία μειώνεται γρήγορα με τη διαδικασία της εκφόρτισης. Οι τιμές που δίνονται πάντα αναφέρονται σε φορτισμένη μπαταρία, αν δε διευκρινίζεται το αντίθετο.

Η AC εσωτερική αντίσταση μιας μπαταρίας είναι μια σύνθετη παράμετρος με δυσκολία στην ερμηνεία, αφού η AC συμπεριφορά μιας μπαταρίας μπορεί μόνο να προσεγγιστεί από ένα ισοδύναμο κύκλωμα με πολλά στοιχεία. Τις τελευταίες δεκαετίες, το ωμικό μέρος της αντίστασης έχει αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία ως μια δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης των ρυθμιζόμενων από βαλβίδα μπαταριών μολύβδου οξέος, οι οποίες διαφορετικά θα μπορούσαν να καθοριστούν μόνο από την εκφόρτιση. Η αντίσταση μετράται κυρίως σε μια συχνότητα 1000Hz. Σε μια τόσο μεγάλη συχνότητα δε δίνει καμία πληροφορία για την ηλεκτροχημεία της μπαταρίας παρά μόνο για τα ωμικά στοιχεία του, συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρολύτη. Οι τιμές που προκύπτουν χρησιμοποιούνται μόνο για τη σύγκριση και τον εντοπισμό ελαττωματικών κυττάρων σε μια σειρά [24].

6.4.15 Ειδικό βάρος

Ειδικό βάρος (specific gravity) ονομάζεται ο λόγος ενός διαλύματος προς έναν ίσο όγκο νερού σε μια καθορισμένη θερμοκρασία. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται σαν δείκτης για τη στάθμη φόρτισης ενός στοιχείου ή μιας μπαταρίας [23].

6.4.16 Ειδική ισχύς

Η ειδική ισχύς (specific power) δείχνει την ικανότητα φόρτισης ή το ποσό του ρεύματος που μπορεί να τροφοδοτήσει η μπαταρία. Μπαταρίες για εργαλεία ισχύος παρουσιάζουν υψηλή ειδική ισχύ αλλά μειωμένη ειδική ενέργεια. Ειδική ισχύς σημαίνει χαμηλή εσωτερική αντίσταση. Μια μπαταρία μπορεί να έχει υψηλή ειδική ενέργεια αλλά χαμηλή ειδική ισχύ, όπως είναι η περίπτωση της αλκαλικής μπαταρίας. Εναλλακτικά, μια μπαταρία μπορεί να έχει χαμηλή ειδική ενέργεια αλλά να μπορεί να αποδόσει μεγάλη ειδική ισχύ, κάτι το οποίο είναι δυνατό με τους supercapacitors [61].

7. Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση δύο κριτήρια: τη λειτουργία και τη μορφή αποθήκευσης. Με βάση το πρώτο κριτήριο, οι τεχνολογίες διακρίνονται σε αυτές που αποσκοπούν πρωταρχικά στην ποιότητα και την αξιοπιστία της παρεχόμενης ισχύος και χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές ονομαστικής ισχύος αλλά από σχετικά μικρό ενεργειακό περιεχόμενο, και σε αυτές που σχεδιάζονται για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Οι τεχνολογίες αντλησιοταμίευσης (Pumped Hydroelectric Storage System - PHS), αποθήκευσης ενέργειας με συμπίεση αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES), θερμικής αποθήκευσης (Thermal Energy Storage - TES), οι μπαταρίες μεγάλης κλίμακας, οι μπαταρίες ροής και οι κυψέλες καυσίμου κατατάσσονται στην κατηγορία διαχείρισης ενέργειας, ενώ οι πυκνωτές/υπερπυκνωτές, η τεχνολογία υπεραγώγιμης μαγνητική αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES), οι σφόνδυλοι και οι μπαταρίες μικρής κλίμακας εντάσσονται στην κατηγορία ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας [43].

Με βάση τη μορφή με την οποία αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- Ηλεκτρική αποθήκευση: Ηλεκτροστατική αποθήκευση με τη χρήση πυκνωτών και υπερπυκνωτών καθώς και μαγνητική αποθήκευση με χρήση της τεχνολογίας SMES.
- Μηχανική αποθήκευση: Αποθήκευση σε μορφή κινητικής ενέργειας (σφόνδυλοι) ή σε μορφή δυναμικής ενέργειας με χρήση τεχνολογιών όπως η CAES και η PHS.
- Χημική αποθήκευση: Με τη μορφή ηλεκτροχημικής ενέργειας, όπως γίνεται με τις συμβατικές μπαταρίες και τις μπαταρίες ροής είτε με τη μορφή καθαρής χημικής ενέργειας όπως γίνεται με τις κυψέλες καυσίμου και τις μπαταρίες μετάλλου-αέρα.
- Θερμική αποθήκευση: Αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα χαμηλής ή υψηλής θερμοκρασίας.

7.1 Αντλησιοταμίευση (PHS)

Η αποθήκευση με άντληση υδάτων αποτελεί την παλιότερη από τις τεχνολογίες αποθήκευσης κεντρικού σταθμού. Ξεκίνησε να εφαρμόζεται το 1929 και ουσιαστικά μέχρι το 1970 ήταν η μόνη εμπορικά διαθέσιμη επιλογή για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Σήμερα η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πιο ελκυστική μέθοδο αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας (100MW – 5000 MW) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αιολικά πάρκα τόσο ως διεσπαρμένη παραγωγή, όσο και σε αυτόνομα συστήματα. Η πιο γενική συγκρότηση ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης (PHS) περιλαμβάνει δύο ταμιευτήρες νερού που έχουν μεταξύ τους υψομετρική διαφορά της τάξης των εκατοντάδων μέτρων, έναν αριθμό υδροστροβίλων με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές γεννήτριες, έναν αριθμό αντλιών με τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς κινητήρες, καθώς και ένα σύστημα ελέγχου. Η επικοινωνία μεταξύ του άνω και του κάτω ταμιευτήρα μπορεί να γίνει με έναν ή με δύο αγωγούς πτώσης.

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος έχει ως εξής: η περίσσεια ενέργειας που εμφανίζεται κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου και υψηλής παραγωγής από ΑΠΕ αξιοποιείται για την άντληση νερού στον άνω ταμιευτήρα και άρα αποθηκεύεται με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Ανάλογα, κατά τις περιόδους αιχμής ελευθερώνεται νερό από τον άνω ταμιευτήρα, το οποίο με την πτώση του περιστρέφει τους υδροστροβίλους παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια, καταλήγοντας τελικά στον κάτω ταμιευτήρα. Με

αυτόν τον τρόπο το σύστημα μπορεί να καλύψει την έλλειψη ισχύος χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ποσό ενέργειας που έχει προηγουμένως αποθηκευτεί. Με μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο ταμιευτήρων, λιγότερος όγκος νερού μπορεί να παρέχει την ίδια αποθηκευτική χωρητικότητα και συνεπώς αγωγοί πτώσεως μικρότερης διαμέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του ίδιου ποσού ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο διπλός αγωγός πτώσης υπερτερεί έναντι του μονού επειδή παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής ενέργειας από τους υδροστροβίλους και κατανάλωσης ενέργειας από τις αντλίες. Η κατάσταση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή κυκλοφορία του νερού στο σύστημα και πλεονεκτεί ιδιαίτερα όταν συμπίπτει υψηλό φορτίο με μεγάλη παραγωγή ΑΠΕ.

Τα συστήματα PHS μπορούν να αναλάβουν φορτίο σε λίγα δευτερόλεπτα και το μέγιστο βάθος εκφόρτισης τους είναι έως 95% χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Η τυπική συνολική απόδοση (roundtrip efficiency) του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 65% και 77%, με τους υδροστροβίλους να εμφανίζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από της αντλίες. Το βασικότερο πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης είναι ότι παρέχει εγγυημένη ισχύ, γεγονός που παρέχει δυνατότητα υποκατάστασης της συμβατικής ισχύος (capacity credit), δυνατότητα που δεν έχουν οι ΑΠΕ λόγω της μεταβλητής φύσης τους. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα αύξησης της αιολικής διείσδυσης και της διείσδυσης ΑΠΕ γενικότερα σε νησιωτικά συστήματα, που διαφορετικά περιορίζεται από τα όρια τεχνικού ελαχίστου και δυναμικής απόκρισης. Υπάρχουν εργασίες στη βιβλιογραφία όπου ερευνάται ο βαθμός αύξησης της αιολικής διείσδυσης, όπου εξετάζεται η βέλτιστη ενσωμάτωση συστήματος αντλησιοταμίευσης στην Κρήτη και τη Ρόδο. Παρόλα αυτά η αντλησιοταμίευση έχει και κάποια μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι οι γεωγραφικοί, γεωλογικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί που σχετίζονται με τη σχεδίαση των ταμιευτήρων, το υψηλό κόστος επένδυσης και οι μακροί χρόνοι υλοποίησης [4],[5],[32].

7.2 Σφόνδυλοι

Τα συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο (flywheel) αποθηκεύουν ενέργεια υπό μορφή κινητικής ενέργειας σε μία περιστρεφόμενη μάζα. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σε μία πληθώρα εφαρμογών όπως τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, τα συστήματα UPS σε βιομηχανίες και τα υβριδικά συστήματα ενέργειας. Ο σφόνδυλος τοποθετείται στο εσωτερικό ενός θαλάμου υπό κενό, αιωρούμενος με τη βοήθεια μαγνητικών τριβών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι μηχανικές απώλειες λόγω τριβών. Η κινητική ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται ή να αποσπάται από το σφόνδυλο μέσω μίας ηλεκτρικής μηχανής μεταβλητών στροφών τεχνολογίας μόνιμων μαγνητών, η οποία μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια αντίστοιχα.

Σε λειτουργία κινητήρα, η ηλεκτρική ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται ο στάτης μετατρέπεται σε ροπή στον άξονα του δρομέα, με αποτέλεσμα την επιτάχυνσή του και άρα την αύξηση της κινητικής του ενέργειας. Σε λειτουργία γεννήτριας, η αποθηκευμένη ενέργεια στο σφόνδυλο ασκεί ροπή στο δρομέα της μηχανής, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα αποθήκευσης εκτός από το σφόνδυλο περιλαμβάνει και ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο της εισερχόμενης και εξερχόμενης ισχύος, της ταχύτητας περιστροφής και της συχνότητας. Η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στο σφόνδυλο (ΕΚ) είναι ανάλογη της ροπής αδράνειάς του, και κατά συνέπεια και της μάζας του, και ανάλογη του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής.

Ο σφόνδυλος μπορεί να είναι κατασκευασμένος από ατσάλι, ανθρακονήματα (carbon fiber), τηγμένο διοξείδιο του πυριτίου (fused silica) και άλλα συνθετικά υλικά. Ο καθοριστικός παράγοντας που

επηρεάζει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας του σφονδύλου είναι η ταχύτητα περιστροφής. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα έχοντας ως δεδομένα τη διάμετρο και το πλάτος του σφονδύλου, απαιτούνται ανθεκτικότερα και ελαφρύτερα υλικά, ικανά να αντέχουν τα αδρανειακά φορτία που υφίστανται σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Η ειδική ενέργεια σε Wh/kg για σφόνδυλο από τηγμένο διοξείδιο του πυριτίου είναι πάνω από είκοσι φορές μεγαλύτερη από την ειδική ενέργεια ενός σφονδύλου από ατσάλι και περίπου σαράντα φορές μεγαλύτερη από αυτήν μίας μπαταρίας μολύβδου οξέως.

Οι σφόνδυλοι έχουν σημαντικές ιδιότητες που τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές στα υβριδικά συστήματα. Κατά πρώτο λόγο χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές ειδικής ισχύος (μεγαλύτερη από 500 W/kg) και ειδικής ενέργειας. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, η χωρητικότητα του σφονδύλου δεν υποβαθμίζεται, η διάρκεια ζωής του είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το βάθος φόρτισης και εκφόρτισής του και μπορεί να λειτουργεί εξίσου καλά τόσο σε κατάσταση χαμηλής όσο και βαθιάς εκφόρτισης. Ακόμα, η κατάσταση φόρτισης μετράται εύκολα, καθώς εξαρτάται από την περιστροφική ταχύτητα. Η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου είκοσι έτη ή μερικές δεκάδες χιλιάδες κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για την επαναφόρτισή τους είναι μικρός. Ακόμα, οι σφόνδυλοι δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, δεν απαιτούν περιοδική συντήρηση και κατασκευάζονται από υλικά που είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Χαρακτηρίζονται από υψηλή συνολική απόδοση (85%) και οι απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους σε κατάσταση αναμονής (stand-by) είναι μικρότερες από το 2% της ονομαστικής ισχύος.

Σε γενικές γραμμές οι σφόνδυλοι έχουν ικανότητα αποθήκευσης μικρών ποσοτήτων ενέργειας, αλλά μπορούν να την αποδώσουν σε μεγάλες τιμές ισχύος με καλή ποιότητα και αξιοπιστία.. Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιούνται τυπικά στα υβριδικά συστήματα για την εξομάλυνση ταχέων διακυμάνσεων ισχύος (στην κλίμακα των δευτερολέπτων ή των λεπτών) και επιπλέον για τη διευκόλυνση του ελέγχου του συστήματος. Ο γρήγορος χρόνος απόκρισης των συστημάτων αποθήκευσης με σφονδύλους τα καθιστά κατάλληλα για ρύθμιση της συχνότητας στα δίκτυα των υβριδικών συστημάτων. Σήμερα είναι διαθέσιμοι σφόνδυλοι με ικανότητα αποθήκευσης περίπου 140 kWh και ικανότητα απόδοσης ισχύος από kW έως GW, δουλεύοντας σε ταχύτητα περιστροφής περίπου 50.000 στροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ) [3],[5],[10],[50].

7.3 Μπαταρίες μολύβδου-οξέως

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως (lead-acid), που εφευρέθηκαν το 1859, αποτελούν την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη μορφή επαναφορτιζόμενων ηλεκτροχημικών συσκευών. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα και αποτελούν πλέον ώριμη τεχνολογία. Στην κατάσταση πλήρους φόρτισης αποτελούνται από ένα ηλεκτρόδιο μολύβδου (άνοδος) και ένα ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου (κάθοδος) βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη με περιεκτικότητα περίπου 37% σε θειικό οξύ. Σε κατάσταση πλήρους εκφόρτισης και τα δύο ηλεκτρόδια αποτελούνται από θειικό μόλυβδο, η τάση στα άκρα του στοιχείου μηδενίζεται και ο ηλεκτρολύτης δεν περιέχει πλέον θειικό οξύ και ουσιαστικά μετατρέπεται σε νερό.

Ανάλογα με τον τύπο της ανόδου οι μπαταρίες διακρίνονται σε τύπου Manchex, σωληνωτού τύπου και τύπου λεπτής επίπεδης πλάκας. Η ονομαστική τάση κάθε κελιού είναι περίπου 2 Volt. Με κριτήριο τη λειτουργία, οι δύο κύριοι τύποι μπαταριών μολύβδου οξέως είναι οι flooded batteries και οι VRLA. Στις πρώτες ο ηλεκτρολύτης είναι σε υγρή μορφή και απαιτείται συστηματική προσθήκη αποσταγμένου νερού για σωστή λειτουργία. Σε περίπτωση υπερφόρτισης παρατηρείται υπερβολική ηλεκτρόλυση του

νερού με ταυτόχρονη εκπομπή υδρογόνου και οξυγόνου από κάθε κελί, αέρια που συνιστούν ένα εκρηκτικό μίγμα. Για αυτό το λόγο απαιτείται η παρουσία μηχανισμού που σταματά τη διαδικασία φόρτισης όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη (trickle charge). Οι μπαταρίες VRLA διαφέρουν στο ότι σφραγίζονται με μία βαλβίδα ελέγχου της πίεσης και στο ότι ο ηλεκτρολύτης είναι ακινητοποιημένος σε μορφή gel ή σε απορροφητικό γυαλί (absorbent glass mat). Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των τελευταίων είναι η δραματική μείωση της απαιτούμενης συντήρησης, η μη εκπομπή όξινων αερίων, το μικρότερο βάρος και η πιο εύκολη τοποθέτηση, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το μεγαλύτερο κόστος.

Η βασικότερη αιτία της τόσο ευρείας διάδοσης των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι το μικρό κόστος τους συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες μπαταριών (\$200 – \$400 ανά kWh), σε συνδυασμό με την εμπορική διαθεσιμότητα, αλλά και η πολυετής συσσωρευμένη λειτουργική εμπειρία. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες τέτοιου τύπου χαρακτηρίζονται από υψηλούς βαθμούς απόδοσης (roundtrip efficiency) της τάξης του 70% - 90%, καθώς και από υψηλή αξιοπιστία. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ο ρυθμός αστοχίας των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι μικρότερος από 0,25%. Επίσης, πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι οι μικροί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης που παρουσιάζει και η εξαιρετική συμπεριφορά στην παροχή βηματικής τάσης. Για τον τελευταίο λόγο οι μπαταρίες αυτές μπορούν να παρακολουθήσουν αποτελεσματικά τις γρήγορες αλλαγές του φορτίου, ιδιότητα που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος, UPS, διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας και για power bridging σε υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν ΑΠΕ.

Από την άλλη μεριά, οι εφαρμογές τους για διαχείριση ενέργειας μεγάλης κλίμακας είναι πολύ περιορισμένες εξαιτίας της μικρής διάρκειας ζωής τους και της χαμηλής ειδικής ενέργειας, που εν γένει κυμαίνεται μεταξύ 25 και 50 Wh/kg. Επιπρόσθετα αρνητικά χαρακτηριστικά αποτελούν η μειωμένη απόδοση σε πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές θερμοκρασίες (σύννηθες θερμοκρασιακό εύρος -20° C έως 50° C), η χρήση μη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, η ανάγκη για συχνή αναπλήρωση νερού και το συνιστώμενο μικρό βάθος εκφόρτισης. Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι μπαταρίες μολύβδου οξέως είναι ελκυστικές ως διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές ισχύος 100kW έως 10MW [5],[7],[10],[11],[12],[32].

7.4 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου

Οι μπαταρίες νικελίου καδμίου (NiCd) κατατάσσονται μαζί με τις μολύβδου οξέως από άποψη δημοτικότητας και τεχνολογικής ωριμότητας, αφού χρησιμοποιούνται για περίπου εκατό χρόνια. Τα κελιά αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτη με υδροξείδιο του καλίου και ένα διαχωριστή, ενώ συνήθως περικλείονται σε μεταλλική θήκη που σφραγίζεται με μία πλάκα εφοδιασμένη με βαλβίδα ασφαλείας. Το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο απομονωμένα το ένα από το άλλο μέσω του διαχωριστή τυλίγονται σε σπирάλ σχήμα μέσα στη θήκη. Σε κατάσταση πλήρους φόρτισης το θετικό ηλεκτρόδιο περιέχει υδροξείδιο του νικελίου και το αρνητικό κάδμιο. Η ονομαστική τάση εκφόρτισης του κελιού είναι 1,2 V σε ρυθμό εκφόρτισης 0,2C και ελαττώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας.

Συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέως, οι νικελίου καδμίου έχουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής ενέργειας (50-75 Wh/kg), μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (2000 – 2500 κύκλοι), υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης, αλλά έχουν μικρότερη απόδοση (60 – 75%) είναι και πιο ακριβές. Επιπλέον πλεονεκτήματα τους αποτελούν η αυξημένη αξιοπιστία και οι πολύ μικρές ανάγκες συντήρησης, η δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης και η εξαιρετική παροχή βηματικής τάσης. Για τους λόγους αυτούς είναι γενικά κατάλληλες για φορητές συσκευές, φωτισμό έκτακτης ανάγκης, UPS και εκκίνηση κινητήρων. Ωστόσο, σήμερα οι φορητές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί

υπολογιστές χρησιμοποιούν άλλες τεχνολογίες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης. Η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Έχουν εγκατασταθεί υβριδικά συστήματα που διαθέτουν μπαταρίες νικελίου καδμίου ως διατάξεις αποθήκευσης.

Το βασικό μειονέκτημα τους είναι το σχετικά υψηλό κόστος (\$1000/kWh) εξαιτίας της ακριβής κατασκευαστικής διαδικασίας. Επιπλέον, το κάδμιο είναι ένα βαρύ τοξικό μέταλλο που εισάγει προβλήματα διάθεσης και ανακύκλωσης των μπαταριών νικελίου καδμίου. Αρνητικό χαρακτηριστικό αποτελεί και το φαινόμενο μνήμης (memory effect), σύμφωνα με το οποίο όταν μία μπαταρία NiCd φορτίζεται και εκφορτίζεται εκατοντάδες φορές σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας, τείνει να το «θυμάται» και τελικά μπορεί να εκφορτιστεί αποτελεσματικά μόνο μέχρι το ποσοστό αυτό. Στην πραγματικότητα, στο σημείο που αρχίζει η επαναφόρτιση παρατηρείται μία δραματική μείωση της τάσης της μπαταρίας, σαν να ήταν πλήρως εκφορτισμένη, ενώ πρωτογενώς η χωρητικότητα δεν μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, εάν το σύστημα που ηλεκτροδοτείται από την μπαταρία δε μπορεί να λειτουργήσει κατά τη διάρκεια της χαμηλής τιμής της τάσης, είναι αδύνατο να αξιοποιήσει όλη την αποθηκευμένη ενέργεια, οπότε πρακτικά η μπαταρία εμφανίζει μειωμένη χωρητικότητα. Αν παρατηρηθεί το memory effect, μπορεί να εξαλειφθεί μετά από μία σειρά πλήρων εκφορτίσεων της μπαταρίας [7],[13],[32].

7.5 Μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου

Οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH) αποτελούν επέκταση της τεχνολογίας που εφαρμοζόταν στις μπαταρίες νικελίου καδμίου με την κύρια διαφορά να εντοπίζεται στην πλάκα της ανόδου που κατασκευάζεται από υδρίδιο ενός μετάλλου M. Η χρήση υδριδίου του μετάλλου αντί για κάδμιο εκμηδενίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μπαταριών NiCd, ενώ παράλληλα περιορίζεται η επίδραση του φαινομένου μνήμης, το οποίο εδώ αποκαλείται lazy effect. Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες μπαταρίες που παρουσιάζουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 1000 κύκλους εκφόρτισης σε βάθος 80%. Η ειδική ενέργεια των μπαταριών NiMH είναι εν γένει 30 – 50% μεγαλύτερη από των μπαταριών NiCd, με μία αντιπροσωπευτική τιμή 70 Wh/kg. Το σημαντικότερο μειονέκτημα έναντι της τεχνολογίας NiCd είναι τα υψηλότερα ποσοστά αυτοεκφόρτισης που κυμαίνονται μεταξύ 5 – 10% την πρώτη μέρα και σταθεροποιούνται περίπου στο 0,5 – 1% την ημέρα σε θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον μειονεκτήματα είναι η χαμηλή αποδοτικότητα των κελίων τους, ο σχετικά χαμηλός βαθμός αξιοπιστίας, η υψηλή θερμοκρασία που δημιουργείται κατά την φόρτιση και το υψηλό τους κόστος.

Η τεχνολογία NiMH έχει φτάσει σε μεγάλο βαθμό ωριμότητας για μία ποικιλία εμπορικών εφαρμογών μεταξύ των οποίων εφαρμογές μικρής ισχύος όπως κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές και εργαλεία με κινητήρα, μέχρι εφαρμογές μεγάλης ισχύος όπως αεροδιαστημικές εφαρμογές και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα. Ακόμα, μέχρι σήμερα έχουν υλοποιηθεί επιτυχώς μερικά αποθηκευτικά συστήματα μεγάλης κλίμακας με τεχνολογία NiMH για σταθερά συστήματα εφεδρείας ηλεκτρικής ισχύος και εφαρμογές διεσπαρμένης παραγωγής. Παράλληλα, γίνονται δοκιμαστικές εφαρμογές της τεχνολογίας ως αποθηκευτικό μέσο σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, ως εφεδρεία σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, καθώς και σε συστήματα κάλυψης αιχμής (peak shaving) [6].

7.6 Μπαταρίες νατρίου-θείου

Οι μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS) αποτελούν μία νέα τεχνολογία αποθήκευσης που προς το παρόν καταλαμβάνει ένα σχετικά μικρό μερίδιο της αγοράς, αλλά εκτιμάται ότι στο μέλλον θα γίνει εξαιρετικά δημοφιλής. Κατασκευαστικά περιλαμβάνουν ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο που ως ενεργά στοιχεία έχουν το τηγμένο θείο και το τηγμένο νάτριο αντίστοιχα, τα οποία διαχωρίζονται από έναν στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη από β-οξείδιο του αργιλίου (solid beta alumina ceramic electrolyte), ο

ο οποίος επιτρέπει μόνο στα θετικά ιόντα νατρίου να περάσουν διαμέσου αυτού. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης ενός κελιού, το νάτριο δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα παρέχοντας τάση περίπου 2 Volt, ενώ τα κατιόντα νατρίου που προκύπτουν μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη προς το ηλεκτρόδιο τηγμένου θείου σχηματίζοντας πολυθειούχο νάτριο. Αυτή η διαδικασία είναι αντιστρέψιμη, καθώς κατά τη φόρτιση το εξωτερικό ρεύμα αναγκάζει το πολυθειούχο νάτριο να ελευθερώσει το κατιόν νατρίου στον ηλεκτρολύτη, ώστε να γίνει πάλι στοιχειακό νάτριο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο.

Στα θετικά της τεχνολογίας συμπεριλαμβάνονται οι μεγάλες τιμές πυκνότητας ενέργειας και ισχύος που κυμαίνονται μεταξύ 100-240 Wh/kg και 150-230 W/kg αντίστοιχα. Η τυπική διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 2500 κύκλοι, χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (75-90%) και από ικανότητα παροχής βηματικής ισχύος για 30 sec πάνω από έξι φορές μεγαλύτερη από την συνεχή ονομαστική ικανότητα. Η τελευταία ιδιότητα καθιστά κατάλληλες και οικονομικές τις μπαταρίες NaS σε εφαρμογές που συνδυάζουν ποιότητα ισχύος και κάλυψη φορτίου.

Ακόμα, εξαιτίας της ύπαρξης του κεραμικού ηλεκτρολύτη που χαρακτηρίζεται από μηδενική αγωγιμότητα ηλεκτρονίων, εξαλείφεται το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιούν υλικά φιλικά προς το περιβάλλον, το κόστος τους θεωρείται σχετικά χαμηλό (\$350/kWh), οι ανάγκες συντήρησης ασήμαντες και η περίοδος λειτουργίας πολύ ικανοποιητική. Από την άλλη μεριά, σημαντικό μειονέκτημα της τεχνολογίας αποτελεί η μη καταλληλότητα της για συγκεκριμένες εφαρμογές, δεδομένης της ανάγκης να διατηρείται η θερμοκρασία λειτουργίας τους σε υψηλά επίπεδα (μεταξύ 300° C και 350° C), ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση του ηλεκτροχημικού φαινομένου.

Σε γενικές γραμμές οι μπαταρίες NaS είναι περισσότερο κατάλληλες για σταθερές εφαρμογές μεγάλης ισχύος και μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί για κάλυψη φορτίου (load leveling), peak shaving, παροχή έκτακτης ισχύος, UPS, βελτίωση ποιότητας ισχύος σε βιομηχανικές μονάδες και υποβοήθηση μονάδων ΑΠΕ [7],[8],[10],[14].

7.7 Μπαταρίες ροής

Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (redox flow batteries), ή πιο απλά μπαταρίες ροής, αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία ηλεκτροχημικής αποθήκευσης με δυνατότητα επαναφόρτισης. Σε γενικές γραμμές, αποτελούνται από έναν αριθμό ηλεκτροχημικών κυψελών, δύο ηλεκτρολύτες και δύο δεξαμενές για την αποθήκευσή τους. Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει δύο διαμερίσματα, την άνοδο και την κάθοδο, που χωρίζονται από μία μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων και είναι ένα για κάθε ηλεκτρολύτη. Με τη βοήθεια αντλιών οι δύο ηλεκτρολύτες κυκλοφορούν διαμέσου των κυψελών και καθώς περνάνε από τη μεμβράνη ο ένας ηλεκτρολύτης οξειδώνεται και ο άλλος ανάγεται, με αποτέλεσμα την παραγωγή ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα. Με αυτόν τον τρόπο η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική κατά τη φάση της εκφόρτισης. Η χρήση των αντλιών έχει σαν συνέπεια κάποιες ανεπιθύμητες απώλειες στη διάταξη, αλλά παράλληλα συνεισφέρει στη διατήρηση της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα.

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής αποθηκεύουν ενέργεια στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη και επιπλέον η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι ανεξάρτητη από την ικανότητα παροχής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η χωρητικότητα αποθήκευσης καθορίζεται από την ποσότητα του διαθέσιμου ηλεκτρολύτη και το μέγεθος των δεξαμενών, ενώ η ικανότητα απόδοσης ισχύος εξαρτάται από το ενεργό εμβαδό της στοίβας των κυψελών. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μπαταρίες ροής διαφέρουν από τις κυψέλες καυσίμου, αφού στις τελευταίες μόνο τα ηλεκτρικά ενεργά χημικά στοιχεία (υδρογόνο, μεθανόλη, οξυγόνο) ρέουν διαμέσου της κυψέλης, ενώ ο ηλεκτρολύτης παραμένει συνεχώς στο εσωτερικό της. Η σημαντικότερη διαφορά με τις κυψέλες καυσίμου είναι το γεγονός ότι στις μπαταρίες ροής η χημική αντίδραση είναι αντιστρέψιμη, οπότε χρησιμοποιούνται ως δευτερεύοντα αποθηκευτικά

μέσα και μπορούν να επαναφορτιστούν χωρίς αντικατάσταση του ηλεκτρικά ενεργού υλικού. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ηλεκτρολυτών που ορίζουν ισάριθμες κατηγορίες μπαταριών ροής: ηλεκτρολύτης θειϊκού οξέως με vanadium redox couples, ηλεκτρολύτης βρωμιούχου ψευδαργύρου και ηλεκτρολύτης βρωμιδίου του νατρίου ή πολυθειούχου νατρίου.

Οι τρεις αυτοί τύποι μπαταριών ροής παρουσιάζουν κάποια κύρια κοινά χαρακτηριστικά. Αρχικά, υπάρχει η δυνατότητα παροχής μεγάλων ποσοτήτων ισχύος, αλλά και η δυνατότητα συνεχούς απόδοσης ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα έως και δέκα ώρες. Επίσης, επιτρέπεται η ευέλικτη διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης δεδομένου ότι η χωρητικότητα και η ικανότητα απόδοσης ισχύος είναι ανεξάρτητα μεγέθη. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες ροής εμφανίζουν γρήγορη απόκριση και μπορούν να μεταβούν από λειτουργία φόρτισης σε λειτουργία εκφόρτισης σε περίπου 1 ms επειδή η διάρκεια των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής είναι πολύ μικρή. Ακόμα, οι ηλεκτρολύτες μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα, ενώ η αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος επιτυγχάνεται απλά με την προσθήκη μεγαλύτερων δεξαμενών και περισσότερου ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα αποθήκευσης δεν υποφέρουν από αυτοεκφόρτιση αφού οι ηλεκτρολύτες είναι αποθηκευμένοι ξεχωριστά και δε μπορούν να αντιδράσουν. Στις αρνητικές ιδιότητες της τεχνολογίας συγκαταλέγονται ο χαμηλός βαθμός απόδοσης λόγω των απωλειών από τη χρήση των αντλιών και των απωλειών των χημικών αντιδράσεων, οι χαμηλές τιμές ειδικής ενέργειας και το αυξημένο κόστος κτήσης και λειτουργικό κόστος. Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφονται οι τρεις βασικότερες τεχνολογίες μπαταριών ροής [7],[10],[12].

7.7.1 Vanadium redox battery (VRB)

Αυτός ο τύπος μπαταρίας αποθηκεύει ενέργεια με τη χρήση οξειδοαναγωγικών ζευγών βαναδίου (vanadium redox couples), που είναι V^{2+}/V^{3+} στην άνοδο και V^{4+}/V^{5+} στην κάθοδο της κυψέλης, και που περιέχονται σε ήπιο διάλυμα ηλεκτρολύτη θειϊκού οξέως. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης ανταλλάσσονται κατιόντα υδρογόνου μεταξύ των δύο ηλεκτρολυτών διαμέσου της περατής μεμβράνης πολυμερούς. Η τάση κάθε κυψέλης κυμαίνεται μεταξύ 1,4 – 1,6 Volt και ο βαθμός απόδοσης μπορεί να είναι έως και 85%. Σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας VRB είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής υπό καθεστώς βαθιών εκφορτίσεων, καθώς έχουν αναφερθεί διάρκειες ζωής έως και πάνω από 10.000 κύκλους με βάθη εκφόρτισης 75%. Επιπλέον η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κανονική και τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Αρνητικό της τεχνολογίας αποτελεί η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας με τιμές μεταξύ 10 – 30 Wh/kg. Οι μπαταρίες VRB είναι κατάλληλες για μία γκάμα εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας για επιχειρήσεις ηλεκτρισμού και για βιομηχανικούς καταναλωτές. Αυτές περιλαμβάνουν βελτίωση ποιότητας ισχύος με εξομάλυνση της τάσης, UPS, κάλυψη αιχμής (peak shaving), αύξηση της ασφάλειας τροφοδοσίας και ενσωμάτωση με συστήματα ΑΠΕ. Η πλειονότητα των έργων ανάπτυξης της τεχνολογίας εστιάζει σε σταθερές εφαρμογές εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας ενέργειας [7],[12],[15].

7.7.2 Μπαταρίες ψευδαργύρου-βρωμίου

Οι μπαταρίες ψευδαργύρου βρωμίου (Zinc Bromine – ZnBr) χαρακτηρίζονται ως υβριδικές μπαταρίες ροής για λόγους που θα εξηγηθούν στη συνέχεια. Σε κάθε κυψέλη δύο διαφορετικοί ηλεκτρολύτες ρέουν κατά μήκος συνθετικών ηλεκτροδίων άνθρακα –πλαστικού σε δύο διαμερίσματα διαχωρισμένα από μεμβράνη πορώδους πολυολεφίνης. Κατά την εκφόρτιση, ο ψευδάργυρος και το βρώμιο αντιδρούν δίνοντας άλας βρωμιούχου ψευδαργύρου και παράγοντας τάση 1,8 Volt σε κάθε κυψέλη. Αυτή η

διαδικασία αυξάνει την περιεκτικότητα των ιόντων Zn^{2+} και Br^- και στους δύο ηλεκτρολύτες. Κατά τη φόρτιση, μεταλλικός ψευδάργυρος επικάθεται σε μορφή λεπτού στρώματος στη μία πλευρά του ηλεκτροδίου, ενώ στην άλλη μεριά της μεμβράνης το βρώμιο αντιδρά με οργανικές ουσίες με αποτέλεσμα την παραγωγή thick bromine oil το οποίο βυθίζεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής. Δεδομένου ότι το ενεργό στοιχείο Zn επικάθεται στο ένα ηλεκτρόδιο της κυψέλης κατά τη φάση της φόρτισης, η πυκνότητα ενέργειας καθορίζεται όχι μόνο από την ποσότητα του ηλεκτρολύτη όπως στις μπαταρίες VRB, αλλά και από το εμβαδό της στοιβάδας των κυψελών. Για το λόγο αυτό, στην τεχνολογία ZnBr η χωρητικότητα και η ικανότητα απόδοσης ισχύος δεν είναι εντελώς ανεξάρτητα μεγέθη [16],[17].

7.7.3 Μπαταρίες πολυθειούχου βρωμιδίου

Οι μπαταρίες πολυθειούχου βρωμιδίου (polysulphide bromide – PSB - Regenesis) ανήκουν στην τεχνολογία regenerative κυψελών καυσίμου και παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας λόγω της πραγματοποίησης αντιστρέψιμης ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ ενός διαλύματος ηλεκτρολύτη βρωμιδίου του νατρίου και ενός διαλύματος πολυθειούχου νατρίου.

Τα ηλεκτρόδια χωρίζονται εντός των κυψελών από πολυμερή μεμβράνη που επιτρέπει μόνο στα κατιόντα νατρίου να περάσουν παράγοντας μία διαφορά δυναμικού περίπου 1,5 Volt κατά μήκος της κυψέλης. Τα κελιά συνδέονται σε σειρά και παράλληλα ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα τάσης και ρεύματος. Η θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας PSB είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος και, όπως και στις μπαταρίες ZnBr, ο καθαρός βαθμός απόδοσης είναι περίπου 75% [12].

7.8 Πνευματικές τεχνολογίες αποθήκευσης

Οι λεγόμενες πνευματικές τεχνολογίες (pneumatic storage technologies) αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια συμπιέζοντας είτε ατμοσφαιρικό αέρα είτε άλλα αέρια, συνήθως άζωτο. Αν το χρησιμοποιούμενο αέριο είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, τότε γίνεται λόγος για συστήματα CAES (Compressed Air Energy Storage), ενώ αν είναι κάποιο άλλο αέριο μιλάμε για Liquid-piston technology.

7.8.1 Αποθήκευση Ενέργειας με Συμπίεση Αέρα (CAES)

Η τεχνολογία CAES αποτελεί μαζί με την αντλησιοταμίευση την μόνη εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία που έχει δυνατότητα αποθήκευσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Ο κύκλος παραγωγής σε μία εγκατάσταση CAES είναι μία παραλλαγή του κύκλου ενός συμβατικού αεριοστρόβιλου. Η περίσσεια ενέργειας από ΑΠΕ ή η ενέργεια χαμηλού φορτίου χρησιμοποιείται για τη συμπίεση αέρα (περίπου 75 bar) εντός ενός στεγανού αποθηκευτικού χώρου με τη βοήθεια ενός συμπιεστή, αφού προηγουμένως ψυχθεί ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή αποθήκευση. Κατά τις ώρες αιχμής, η αναγκαία ποσότητα αέρα για την κάλυψη του φορτίου ελευθερώνεται από το χώρο αποθήκευσης, προθερμαίνεται, αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα καυσίμου και οδηγείται στο θάλαμο καύσης της εγκατάστασης. Τα αέρια εξόδου του θαλάμου καύσης εκτονώνονται σε έναν αεριοστρόβιλο που είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια, η οποία παράγει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Ως μέσα αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί όπως πετρώδη σπήλαια, σπήλαια άλατος, εξαντλημένα κοιτάσματα αερίων και αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες.

Ένα σύστημα CAES αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Έναν κινητήρα σε σύμπλεξη με τον συμπιεστή και μία γεννήτρια συνδεδεμένη με τους αεριοστρόβιλους υψηλής και χαμηλής πίεσης.
- Έναν συμπιεστή που μπορεί να περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα στάδια, ενδιάμεσους ψύκτες (intercoolers) και συμπληρωματικούς ψύκτες (after coolers), ώστε να επιτυγχάνεται οικονομία στην συμπίεση και να μειώνεται το ποσοστό υγρασίας.
- Έναν προθερμαντήρα, έναν αεριοστρόβιλο υψηλής πίεσης και έναν χαμηλής πίεσης.
- Εξοπλισμό για τον έλεγχο των στοιχείων του συστήματος καθώς και για τη μετάβαση από λειτουργία παραγωγής σε λειτουργία αποθήκευσης.
- Σύστημα αποθήκευσης του καυσίμου και κάποιους εναλλάκτες θερμότητας.

Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας αυτής της τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, ενώ επιπλέον απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη εγκατάστασης αεριοστρόβιλου. Σημαντικό μειονέκτημα συνιστούν και οι διάφοροι γεωλογικοί περιορισμοί. Από την άλλη μεριά, οι τυπικές τιμές ονομαστικής ισχύος των συστημάτων CAES κυμαίνονται μεταξύ 50 – 300 MW, ενώ επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα μακράς αποθήκευσης, ίσως και πάνω από ένα έτος, λόγω των χαμηλών απωλειών. Επιπλέον πλεονέκτημα συνιστά ο γρήγορος χρόνος απόκρισης, δεδομένου ότι σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ένα σύστημα CAES μπορεί να αναλάβει φορτίο μέσα σε 12 λεπτά, τη στιγμή που ο ίδιος χρόνος για συμβατικό αεριοστρόβιλο κυμαίνεται μεταξύ 20 – 30 λεπτών. Μη λαμβάνοντας υπόψη το ρόλο του αερίου και με βάση μόνο την απόδοση της εκτόνωσης και της συμπίεσης, ο ολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, που μπορεί ευθέως να συγκριθεί με τις άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης, είναι περίπου 70%.

Η τεχνολογία CAES δεν είναι πράσινη, αφού κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης 1 kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί περίπου 0,75 kWh ενέργειας συμπίεσης και 1,25 kWh καυσίμου. Αυτή η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου αποτελεί το κυριότερο θέμα αντιπαράθεσης σχετικά με την ανεπιφύλακτη αποδοχή τέτοιων συστημάτων. Το κόστος των συστημάτων CAES εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωλογία του υπεδάφους και τυπικά κυμαίνεται μεταξύ \$400 - \$800/kW. Σήμερα υπάρχουν μόλις δύο μονάδες CAES στον κόσμο, η μία στο Huntorf της Γερμανίας και η άλλη στο McIntosh, Alabama των ΗΠΑ. Πρέπει να σημειωθεί ότι βρίσκεται υπό ανάπτυξη και η τεχνολογία CAES μικρής κλίμακας (small scale CAES), στην οποία ο πεπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές, αλλά το σημερινό της κόστος την καθιστά μη βιώσιμη [7],[8],[9],[10],[55].

7.8.2 Τεχνολογία Liquid-Piston

Η βασική αρχή λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας είναι η συμπίεση και η εκτόνωση ενός παγιδευμένου όγκου αερίου, το οποίο συνήθως είναι άζωτο, στο εσωτερικό μίας δεξαμενής. Ο έλεγχος του όγκου και της πίεσής του αερίου γίνεται από την ποσότητα του υγρού μέσα στη δεξαμενή, με την πίεση να κυμαίνεται γενικά από 100 bar όταν δεν υπάρχει καθόλου υγρό, μέχρι 250 bar όταν η δεξαμενή είναι κατά το ήμισυ γεμάτη με υγρό. Όταν αποθηκεύεται ενέργεια, η αντλία ωθεί το υγρό προς το εσωτερικό των δεξαμενών με αποτέλεσμα να συμπιέζει το αέριο. Κατά τη φάση της εκφόρτισης, το πεπιεσμένο αέριο εκτονώνεται ωθώντας το υγρό έξω από τις δεξαμενές και προς τις αντλίες, που τώρα λειτουργούν ως στρόβιλοι περιστρέφοντας τις γεννήτριες.

Η τεχνολογία δεν έχει καταστεί ακόμα εμπορικά διαθέσιμη, ωστόσο ελπίζεται ότι μελλοντικά θα μπορέσει να αντικαταστήσει τις μπαταρίες μολύβδου οξέως σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα τροφοδότησης ειδικών φορτίων, όπως εργαστήρια, μονάδες επεξεργασίας τροφής και παραγωγής

γάλακτος, καθώς και εγκαταστάσεις UPS. Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας liquid-piston έναντι των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής που δεν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά φόρτισης-εκφόρτισης, οι μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης, η μη υποβάθμιση της χωρητικότητας με τον καιρό, η δυνατότητα πλήρους εκφόρτισης, ο χειρισμός των υπερφορτίσεων με τη βοήθεια βαλβίδας στο υδραυλικό σύστημα, η ανεξαρτησία της ικανότητας ισχύος από τη χωρητικότητα και οι χαμηλοί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος. Αντίθετα, σημαντικά μειονεκτήματα αποτελούν οι πολύ χαμηλές τιμές ειδικής ενέργειας ($3,2 - 5,55 \text{ Wh/kg}$) που εξαρτώνται από την πίεση του αερίου, η έντονη αυτοεκφόρτιση σε standby κατάσταση, ο κίνδυνος διαρροών στο πνευματικό και υδραυλικό σύστημα και η ελαφρά χαμηλότερη απόδοση (περίπου 73%) σχετικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέως [8].

7.9 Πυκνωτές – Υπερπυκνωτές

Ο πιο άμεσος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι στο ηλεκτρικό πεδίο ενός πυκνωτή. Οι πυκνωτές μπορούν να φορτιστούν σημαντικά ταχύτερα από τις συμβατικές μπαταρίες και να υποστούν δεκάδες χιλιάδες κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης με υψηλό βαθμό απόδοσης. Συμβατικοί πυκνωτές έχουν αναπτυχθεί για κάλυψη αιχμιακού φορτίου της τάξης μεγέθους των λίγων kW για διάστημα μικρότερο της μίας ώρας. Ωστόσο, το κυριότερο πρόβλημα των πυκνωτών είναι η μικρή τιμή πυκνότητας ενέργειας, με συνέπεια μεγάλες χωρητικότητες να απαιτούν εξαιρετικά μεγάλη επιφάνεια διηλεκτρικού υλικού, κατάσταση που είναι εντελώς μη οικονομική. Η πρόσφατη πρόοδος των ηλεκτροχημικών πυκνωτών ή υπερπυκνωτών (supercapacitors) έχει οδηγήσει σε πολύ μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας ενέργειας και χωρητικότητας σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές, που κατά προσέγγιση διαφέρουν κατά δύο τάξεις μεγέθους ($10-100 \text{ s kW}$). Οι υπερπυκνωτές, αντί για στερεό διηλεκτρικό, χρησιμοποιούν ως διαχωριστικό μεταξύ των οπλισμών ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Μειονέκτημα και των πυκνωτών και των υπερπυκνωτών αποτελούν η μικρή διάρκεια εκφόρτισης, καθώς και οι υψηλές απώλειες ενέργειας λόγω αυτοεκφόρτισης. Για το λόγο αυτό, όπως και οι σφόνδυλοι, χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος όπως ride-through και power bridging, καθώς και εφαρμογές ανάκτησης ενέργειας σε εκτεταμένα συστήματα διαμετακόμισης (transit systems). Τέλος, μολονότι οι μικροί υπερπυκνωτές αποτελούν ώριμη τεχνολογία, υπερπυκνωτές με πυκνότητες ενέργειας άνω των 20 kWh/m^3 είναι ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης [7].

7.10 Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση (SMES)

Η τεχνολογία SMES είναι η μοναδική γνωστή τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας άμεσα με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος. Η ενέργεια αποθηκεύεται στο συνεχές ρεύμα που ρέει σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο, κυκλικής κατασκευής ώστε το ρεύμα να το διαρρέει αέναα με σχεδόν μηδενικές απώλειες. Μία παραλλαγή της τεχνολογίας αποτελεί η αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα. Προκειμένου να διατηρηθεί το πηνίο στην υπεραγώγιμη κατάστασή του είναι βυθισμένο σε ένα κρυοστάτη που περιέχει υγρό ήλιο. Τυπικά, το πηνίο κατασκευάζεται από νιόβιο-τιτάνιο και το ψυκτικό υγρό μπορεί να είναι υγρό ήλιο σε θερμοκρασία $4,2 \text{ K}$ ή super fluid ήλιο θερμοκρασίας $1,8 \text{ K}$. Συνήθως, ένα σύστημα SMES περιλαμβάνει τέσσερις βασικές συνιστώσες: τη μονάδα του υπεραγωγού, το κρυογόνο σύστημα ψύξης, το μονωμένο δοχείο και ένα σύστημα μετατροπής ισχύος.

Οι διατάξεις SMES παρουσιάζουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης ενέργειας (τυπικά $>97\%$) και ταχεία απόκριση ισχύος σε χρόνο λίγων ms σε σχέση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης. Ένα πλεονέκτημα

έναντι των συσσωρευτών είναι ότι η ικανότητα απόδοσης ενέργειας εξαρτάται σε πολύ μικρότερο βαθμό από το ρυθμό εκφόρτισης. Επιπλέον τα συστήματα SMES χαρακτηρίζονται από υψηλή διάρκεια ζωής και άρα είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν συνεχείς πλήρεις εκφορτίσεις. Αυτά τα στοιχεία καθιστούν ελκυστική την τεχνολογία για εφαρμογές σταθεροποίησης τάσης (voltage stability), σταθεροποίησης συχνότητας (frequency control) και ποιότητας ισχύος, ιδίως σε μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές. Επιπλέον, όπως και οι υπερπυκνωτές, χρησιμοποιούνται για ανάκτηση ενέργειας σε συστήματα διαμετακόμισης, όπως σε συστήματα ηλεκτρικών σιδηροδρόμων. Τυπικά μεγέθη ικανότητας είναι 1-10 MW για μερικά δευτερόλεπτα, αν και διεξάγεται έρευνα για την ανάπτυξη μεγαλύτερων συστημάτων SMES στο εύρος 10-100 MW για διάστημα μερικών λεπτών. Από την άλλη μεριά, το σημαντικότερο μειονέκτημα της τεχνολογίας είναι οι πολύ μικροί χρόνοι εκφόρτισης, ενώ προβληματισμό προκαλούν και το υψηλό επενδυτικό κόστος και τα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με τα ισχυρά μαγνητικά πεδία [7].

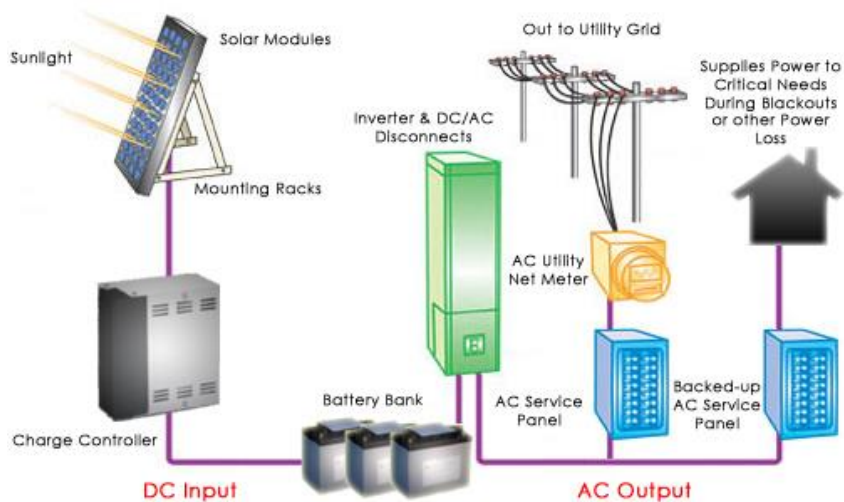
7.11 Κυψέλες Καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου είναι μία συσκευή ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας. Παράγει ηλεκτρική ενέργεια με την εξωτερική παροχή καυσίμου (άνοδος) και οξειδωτικού (κάθοδος), τα οποία αντιδρούν παρουσία ηλεκτρολύτη. Γενικά, τα αντιδρώντα ρέουν προς την κυψέλη καυσίμου και τα προϊόντα ρέουν εκτός αυτής, ενώ ο ηλεκτρολύτης παραμένει συνεχώς μέσα στο κελί. Μία αντιστρέψιμη κυψέλη καυσίμου είναι σχεδιασμένη να καταναλώνει ένα χημικό Α παράγοντας ηλεκτρισμό και ένα χημικό Β και αντίστροφα να καταναλώνει ηλεκτρισμό και το χημικό Β παράγοντας το χημικό Α. Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των κυψελών καυσίμου και των μπαταριών είναι ότι οι πρώτες καταναλώνουν αντιδρώντα που πρέπει να αναπληρώνονται καθώς και ότι τα ηλεκτρόδια τους δεν συμμετέχουν στις αντιδράσεις, αλλά έχουν απλά καταλυτικό ρόλο. Η πιο κοινή μορφή κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιεί υδρογόνο σαν καύσιμο και οξυγόνο σαν οξειδωτικό. Άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν σαν καύσιμα υδρογονάνθρακες, αλκοόλες ή ακόμα και μέταλλα, ενώ σαν οξειδωτικά αέρα, χλώριο ή διοξείδιο του χλωρίου. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου όπως οι κυψέλες PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells), οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC) και οι Regenerative Fuel Cells (RFC). Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται η υψηλή πυκνότητα ενέργειας (0.6-1.2 kWh/kg), η δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο εύρος εγκατεστημένων ισχύων (από λίγα kW έως και πολλά MW), η ευέλικτη επέκταση του συστήματος αποθήκευσης και ο βαθμός συνέργειας με άλλους ενεργειακούς τομείς, όπως οι μεταφορές. Σημαντικό μειονέκτημά τους όμως αποτελεί ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που εν γένει κυμαίνεται στο εύρος 20-50%.

Οι μπαταρίες μετάλλου αέρα μπορούν να θεωρηθούν ως μία ειδική περίπτωση κυψελών καυσίμου όπου το μέταλλο παίζει το ρόλο του καυσίμου και ο αέρας το ρόλο του οξειδωτικού. Οι μπαταρίες αυτές έχουν τα πλεονεκτήματα του ελάχιστου κόστους και της φιλικότητας προς το περιβάλλον, ωστόσο τα μειονεκτήματά τους είναι σημαντικά και αφορούν το βαθμό απόδοσης (εν γένει κάτω από 50%), τους ρυθμούς απόδοσης ισχύος και τη διάρκεια ζωής (μερικές εκατοντάδες κύκλοι) [7].

7.12 Ανάλυση – Πλεονεκτήματα και Επιλογή Μπαταριών Τεχνολογίας Μολύβδου Οξέως

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως - ειδικά σχεδιασμένες για τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των συστημάτων ΑΠΕ - είναι συνήθως η πρώτη επιλογή για την αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές καθώς έχουν ως κύρια πλεονεκτήματα το χαμηλό κόστος, την αντοχή σε κύκλους λειτουργίας και την ικανότητα φόρτισης/εκφόρτισης. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν ακόμα προκλήσεις για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους, ειδικότερα ως προς τον χρόνο ζωής σε θερμά κλίματα. Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή μέσω της τεχνολογίας Φ/Β είναι μία διαδικασία ηλεκτροπαραγωγής, φιλική προς το περιβάλλον. Οι διατάξεις που συνήθως πλαισιώνουν τα Φ/Β πάνελ σε ένα σύστημα με δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας (δηλαδή χωρίς το δίκτυο της ΔΕΗ) είναι ο ρυθμιστής φόρτισης, οι μπαταρίες και ο αντιστροφέας. Η Φ/Β συστοιχία μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, η οποία διατηρεί τις μπαταρίες φορτισμένες. Οι μπαταρίες με τη σειρά τους μέσω του αντιστροφέα DC/AC τροφοδοτούν το φορτίο. Η συστοιχία μπαταριών περιλαμβάνει πολλά στοιχεία μολύβδου οξέως συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως είναι σχετικά φθηνές και άμεσα διαθέσιμες από τους κατασκευαστές, σε σύγκριση με άλλα συστήματα μπαταριών όπως οι ιόντων λιθίου και οι νικελίου- υδριδίου μετάλλου. Υπάρχουν πολλοί τύποι, διαστάσεις και χωρητικότητες μπαταριών μολύβδου οξέως για να επιλέξει κανείς ανάλογα με την εφαρμογή [56].



Φ/Β σύστημα με μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας [56]

7.12.1 Τύποι μπαταριών μολύβδου οξέως

Παρά την πληθώρα τύπων και εφαρμογών όσον αφορά τις μπαταρίες μολύβδου οξέως, τα χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε εφαρμογές Φ/Β συστημάτων είναι οι απαιτήσεις συντήρησης της μπαταρίας και η δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης, διατηρώντας παράλληλα μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης μπορούν να είναι ανοικτού ή κλειστού τύπου. Οι μπαταρίες ανοικτού τύπου αποτελούνται από στιβαρές πλάκες και ηλεκτρολυτικό διάλυμα και απαιτούν συντήρηση κάθε 6-12 μήνες με συμπλήρωση απιονισμένου νερού. Οι μπαταρίες κλειστού τύπου, όπως οι AGM και GEL, δεν απαιτούν συντήρηση. Βασικά θετικά χαρακτηριστικά των μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης είναι η μεγάλη αντοχή σε κύκλους και ο μεγάλος χρόνος ζωής. Οι μπαταρίες με μικρό βάθος εκφόρτισης – μικρότερο του 25% - έχουν συνήθως λεπτότερες πλάκες από κράματα ασβεστίου μολύβδου.



Μπαταρία μολύβδου οξέως κλειστού τύπου [56]

Χαρακτηριστικό των μπαταριών ανοικτού τύπου είναι ότι μικρά ποσά υδρογόνου και οξυγόνου που παράγονται στα ηλεκτρόδια κατά τη λειτουργία της μπαταρίας ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω μικρών οπών στο επάνω μέρος της μπαταρίας. Σε μία μπαταρία κλειστού τύπου μία ειδική διάταξη καταλύτη μέσα στη μπαταρία χρησιμοποιείται για να επανενώσει το υδρογόνο με το οξυγόνο δημιουργώντας νερό. Επομένως δεν υπάρχει απώλεια υγρού, όπως στις ανοικτού τύπου.

Οι αυστηρές απαιτήσεις για τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν προτρέψει διάφορους κατασκευαστές να αναπτύξουν μπαταρίες ειδικά σχεδιασμένες για Φ/Β ή άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι είτε μολύβδου οξέως βαθιάς εκφόρτισης, είτε λιγότερων κύκλων χωρίς απαιτήσεις συντήρησης. Οι ειδικές μπαταρίες με μικρό βάθος εκφόρτισης που δεν απαιτούν συντήρηση μπορούν επίσης να εγκατασταθούν, αν η συστοιχία μπαταριών σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μην απαιτηθεί ποτέ εκφόρτιση κάτω του 25%. Μια μπαταρία μεγάλου χρόνου ζωής σε ένα κατάλληλα σχεδιασμένο Φ/Β σύστημα με τη σωστή συντήρηση μπορεί να διαρκέσει μέχρι 15 έτη, αλλά η χρήση μπαταριών που δεν σχεδιάστηκαν για πολλούς κύκλους φόρτισης, ή είναι ακατάλληλες για το συγκεκριμένο σύστημα, μπορεί να οδηγήσει σε μια συστοιχία μπαταριών ανίκανη να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της εφαρμογής σε μόλις μερικά χρόνια.



Μπαταρία μολύβδου οξέως ανοικτού τύπου [56]

7.12.2 Επιλογή τύπου μπαταρίας

Για ένα μικρό Φ/Β σύστημα, το αρχικό κόστος και η αντοχή σε κύκλους παίζουν τον κυριότερο ρόλο. Σε τέτοιες εφαρμογές λοιπόν, που το σχετικό κόστος πρέπει να διατηρηθεί χαμηλά, η καλύτερη επιλογή είναι οι μπαταρίες που σχεδιάζονται ειδικά για Φ/Β συστήματα (solar batteries). Οι μπαταρίες SLI που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα δεν είναι κατάλληλες λόγω του μειωμένου χρόνου ζωής σε ένα Φ/Β σύστημα. Οι μπαταρίες αυτοκινήτου έχουν ικανοποιητικό χρόνο ζωής σε συνθήκες μικρού βάθους εκφόρτισης, ενώ έχουν την ικανότητα γρήγορης επαναφόρτισης. Εκτός από την εκκίνηση, στο υπόλοιπο μέρος της λειτουργίας τους καλούνται να καλύψουν πολύ μικρά φορτία (φώτα, ραδιόφωνο, κ.λπ.) με άλλα λόγια δεν υπάρχει απαίτηση για αποθήκευση μεγάλης ποσότητας ενέργειας. Ο χρόνος ζωής όμως όταν οι μπαταρίες αυτές πρέπει να ανταποκριθούν σε μεγαλύτερα βάθη εκφόρτισης (όπως αναμένεται σε ένα Φ/Β σύστημα), μειώνεται δραματικά. Οι μπαταρίες SLI που χρησιμοποιούνται στα φορτηγά, παρά την ευαισθησία τους στην βαθιά εκφόρτιση, έχουν καλύτερο χρόνο ζωής από τις μπαταρίες αυτοκινήτου σε λειτουργία ως μέρος ενός Φ/Β συστήματος με την προϋπόθεση ότι δεν θα υποστούν βαθιά εκφόρτιση. Το ίδιο ισχύει και για τον τύπο μπαταριών που χρησιμοποιείται σε εξοχικές κατοικίες και σκάφη, του οποίου βασικό μειονέκτημα είναι η περιορισμένη αντοχή σε κύκλους.

Μπαταρίες που συνήθως βρίσκουν εφαρμογή σε μηχανές γκαζόν και αμαξίδια γκολφ έχουν καλύτερο χρόνο ζωής από τις μπαταρίες αυτοκινήτου και μπορούν να ανταπεξέλθουν σε σχετικά μεγάλα βάθη εκφόρτισης. Αν ληφθεί μέριμνα στο να μην υπόκεινται σε απαγορευτικά βαθιές εκφορτίσεις, μπορούν να αποτελέσουν την καλύτερη λύση για ένα Φ/Β σύστημα, μετά τις εξειδικευμένες ηλιακές μπαταρίες. Είναι γεγονός πως η καλύτερη μπαταρία έχει συνήθως και μεγαλύτερο αρχικό κόστος, το οποίο όμως αποσβένει κανείς σε βάθος χρόνου. Η διαθεσιμότητα των ειδικών μπαταριών δεν αποτελεί πλέον ζήτημα, αφού οι μεγάλοι κατασκευαστές έχουν προσθέσει στη γκάμα τους και αυτό τον τύπο.

7.12.3 Χωρητικότητα της μπαταρίας

Η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι το μέτρο για την ποσότητα ρεύματος που μπορεί να αποθηκευτεί και να αντληθεί από μία μπαταρία. Η μονάδα μέτρησης είναι τα αμπερώρια (Ah). Η τιμή αυτή είναι θεωρητική και εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων. Στις μπαταρίες μολύβδου οξέως υπάρχουν τρία ενεργά συστατικά μέρη, το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου, το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου και ο ηλεκτρολύτης. Μία από αυτές τις ουσίες μπορεί να μειώσει τη χωρητικότητα και αν έχει καταναλωθεί, η τάση της μπαταρίας καταρρέει και η μπαταρία αποφορτίζεται. Είναι λοιπόν πιο πρακτικό να αναφερόμαστε στην ονομαστική τιμή της χωρητικότητας, η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή για την εγγυημένη χωρητικότητα μιας καινούργιας μπαταρίας που εκφορτίζεται με κάποια τυποποιημένη διαδικασία. Για τις μπαταρίες αυτοκινήτου, η μπαταρία αποφορτίζεται σε 20 ώρες με σταθερό ρεύμα ως μία προκαθορισμένη τιμή τάσης. Το ρεύμα αυτό επισημαίνεται με I20 και η αντίστοιχη χωρητικότητα με C20. Η χωρητικότητα μπορεί να διαφέρει από την ονομαστική τιμή. Πολλαπλές παράμετροι επηρεάζουν τη χωρητικότητα όπως η θερμοκρασία, η προηγούμενη φόρτιση, ο χρόνος από την τελευταία φόρτιση, η ηλικία της μπαταρίας, η συμπεριφορά ως προς το ρεύμα, η τάση αποφόρτισης κ.λπ.

7.12.3.1 Σχεδιασμός του συστήματος με βάση το 80% της ονομαστικής χωρητικότητας

Είναι σημαντικό να κατανοήσει κανείς ότι η ονομαστική χωρητικότητα αναφέρεται σε μία καινούργια μπαταρία. Το τέλος της ζωής της μπαταρίας ορίζεται ως το σημείο που η χωρητικότητα μειώνεται στο 80% της ονομαστικής. Όταν γίνεται ο σχεδιασμός μίας εγκατάστασης με μπαταρίες, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η μείωση της χωρητικότητας από μία νέα σε μία παλιά μπαταρία. Είναι σημαντικό η συστοιχία μπαταριών να μπορεί να επιτελεί το έργο της ακόμα και μετά από κάποια έτη λειτουργίας, όταν η

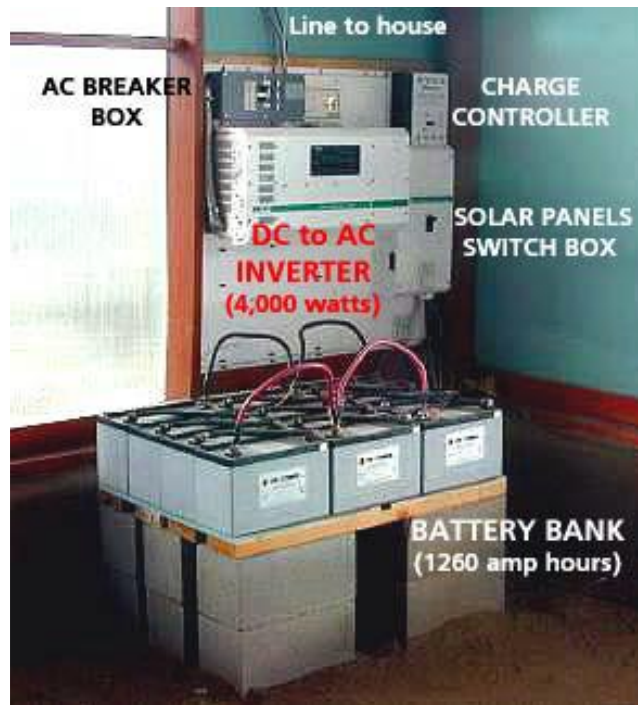
χωρητικότητα θα έχει μειωθεί. Σε ένα Φ/Β σύστημα ένα επιπλέον περιθώριο προτείνεται να υπάρχει, αφού η επαναφόρτιση της μπαταρίας μπορεί να πάρει αρκετό χρόνο ειδικά σε διαστήματα με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία. Ένας συνηθισμένος κανόνας είναι να διαστασιολογείται το σύστημα για εκφόρτιση 50% στη χειρότερη περίπτωση. Αυτό θα παρατείνει το χρόνο ζωής της μπαταρίας σημαντικά σε ένα Φ/Β σύστημα, αφού η πιθανότητα για βαθειά εκφόρτιση είναι μικρότερη.

7.12.3.2 Πως επιλέγεται η κατάλληλη χωρητικότητα σε ένα συγκεκριμένο σύστημα

Ας πάρουμε ως παράδειγμα ένα μικρό Φ/Β οικιακό σύστημα των 12 V με 2 λαμπτήρες των 11 W οι οποίοι χρησιμοποιούνται 5 ώρες/ ημέρα, και μία τηλεόραση 15W η οποία βρίσκεται σε λειτουργία 3 ώρες/ημέρα.

1. Αρχικά υπολογίζουμε την ενέργεια που καταναλώνεται ημερησίως από το φορτίο του σπιτιού: αριθμός συσκευών x ισχύς x ώρες λειτουργίας = $2 \times 11W \times 5h + 1 \times 15W \times 3h = 155Wh$ την ημέρα.
2. Υπολογίζεται η ενέργεια που περιέχει μία μπαταρία για το συγκεκριμένο σύστημα: Έστω ότι διαθέτουμε στοιχείο 12V/75Ah το οποίο δίνει 1kWh (με μεγαλύτερη ακρίβεια $75 \times 12 = 900 Wh$). Αν λάβουμε υπόψη μόνο το 80% της ονομαστικής ενέργειας και επιπλέον ότι η μπαταρία θα πρέπει να εκφορτίζεται ημερησίως μόνο κατά το 50%, τότε το $0.8 \times 0.5 = 0.4 = 40\%$ της ονομαστικής ενέργειας θα είναι η βάση της διαστασιολόγησης. Στη δική μας περίπτωση $900 \times 0.4 = 360Wh$.
3. Υπολογίζεται ο αριθμός των μπαταριών που χρειάζεται ώστε η μπαταρία να μπορεί να καλύψει το φορτίο για 3-7 ημέρες χωρίς ενέργεια από τον ήλιο (αυτονομία). Για το παρόν παράδειγμα μία μπαταρία 12V/75Ah μπορεί να καλύψει το φορτίο για 2.3 μέρες ($360Wh/155Wh/ημέρα = 2,3$ ημέρες).

Για γεωγραφικά πλάτη κοντά στον ισημερινό όπου η ετήσια κατανομή της ηλιακής ενέργειας είναι πιο ομαλή, 2 μπαταρίες θα ήταν ικανές να καλύψουν το φορτίο για 4,6 μέρες. Σε τοποθεσίες με υψηλότερα πλάτη, προτιμάται η εγκατάσταση 3-4 μπαταριών που θα δώσουν 7-9 μέρες αυτονομία. Είναι σημαντικό ο χρήστης να μπορεί να ελέγξει σε γενικές γραμμές την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών. Κάτι τέτοιο γίνεται με τους σύγχρονους ρυθμιστές φόρτισης.



Μπαταρίες, αντιστροφέας και ρυθμιστής φόρτισης Φ/Β συστήματος [56]

7.12.3.3 Γήρανση των μπαταριών

Στην κανονική λειτουργία υπάρχουν τέσσερις κύριοι λόγοι για την γήρανση των μπαταριών:

- Βαθεία εκφόρτιση
- Υπερφόρτιση
- Χαμηλό επίπεδο ηλεκτρολύτη
- Υψηλή θερμοκρασία μπαταρίας

Ως παράδειγμα, ο χρόνος ζωής της μπαταρίας μειώνεται δραματικά αν αφεθεί σε βαθιά αποφόρτιση για πολύ καιρό (περισσότερο από μερικές μέρες). Μία τέτοια κατάσταση μπορεί να προκύψει αν το φορτίο είναι μεγάλο σε σχέση με την ενέργεια που δίνει η Φ/Β πηγή και ο ρυθμιστής φόρτισης δεν έχει κάποια ειδική προστασία για αποσύνδεση των μπαταριών σε κατάσταση χαμηλής φόρτισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις η μπαταρία θα πρέπει να αποσυνδεθεί αμέσως από το φορτίο και να φορτιστεί με άλλα μέσα πριν τεθεί ξανά σε λειτουργία. Ένας καλός ρυθμιστής δεν θα επέτρεπε να φτάσουν οι μπαταρίες που επιβλέπει σε τέτοιες επικίνδυνες καταστάσεις. Μια μπαταρία μολύβδου οξέως σε ένα Φ/Β σύστημα δεν χρειάζεται να δίνει υψηλό ρεύμα κατά την εκφόρτιση ή να υπόκειται σε ταχεία φόρτιση. Θα πρέπει όμως να έχει υψηλή χωρητικότητα. Μία μπαταρία αυτοκινήτου που συνδέεται σε Φ/Β σύστημα θα δουλέψει καλά για 1-5 μέρες, αλλά η αντοχή σε κύκλους δεν θα μπορέσει να καλύψει το σύστημα για περισσότερο χρόνο. Για το λόγο αυτό οι μπαταρίες που εγκαθίστανται σε Φ/Β συστήματα σχεδιάζονται για περισσότερους κύκλους.

7.12.3.4 Τα βήματα της διαδικασίας φόρτισης

- Κύρια φόρτιση, όπου η μπαταρία φορτίζεται ως ένα επίπεδο τάσης που ξεκινά ο βρασμός του υγρού και η τάση αυξάνεται.
- Φόρτιση για το 100%, όπου η μπαταρία φορτίζεται από μία κατάσταση του 90-95% για να φτάσει το 100%.
- Φόρτιση εξισορρόπησης, όπου η χωρητικότητα των επιμέρους στοιχείων εξισώνεται ώστε όλα τα στοιχεία να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο φόρτισης.
- Φόρτιση συντήρησης, ώστε να διατηρείται σε μέγιστο επίπεδο η χωρητικότητα της μπαταρίας που είναι ήδη φορτισμένη αλλά δεν έχει αποφορτιστεί για κάποιο χρόνο.

Οι μπαταρίες δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην κύρια φόρτιση, εκτός από την αύξηση της θερμοκρασίας που αυτή επιφέρει. Είναι προτιμότερο να μην ξεκινήσει κανείς να φορτίζει μία μπαταρία που έχει υψηλή θερμοκρασία αν μπορεί με κάποιο τρόπο να τη ρίξει πρώτα. Όταν ο ρυθμιστής ρυθμίζει τη λειτουργία της φόρτισης σύμφωνα με τη τάση, θεωρείται πως όλα τα στοιχεία έχουν την ίδια τάση. Επειδή αυτό δεν είναι πάντα αληθές μερικά στοιχεία μπορεί να μην φορτιστούν πλήρως. Είναι λοιπόν σημαντικό να ελέγχεται η τάση σε κάθε στοιχείο συχνά.

8. Αντιστροφείς (Inverters)

8.1 Γενικά Στοιχεία

Ο αντιστροφέας (inverter), είναι μία ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγουν τα φωτοβολταϊκά σε εναλλασσόμενο αντίστοιχο με αυτό του δικτύου. Οι αντιστροφείς μπορεί να είναι μικροί (string inverters) ή κεντρικοί, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Στην τεχνολογία στοιχειοσειρών (string), η φωτοβολταϊκή γεννήτρια χωρίζεται σε επιμέρους επιφάνειες μονάδας και σε κάθε μία από τις επιμέρους "στοιχειοσειρές" αντιστοιχίζεται ένας ξεχωριστός μετατροπέας. Χάρη σε αυτή την τεχνολογία μειώνονται τα έξοδα του συστήματος, η εγκατάσταση απλοποιείται σημαντικά και αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση καθώς και η διαθεσιμότητα της εγκατάστασης. Οι κεντρικοί μετατροπείς ενδείκνυνται ιδιαίτερα για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με ομοιογενή δομή (πλαίσια του ίδιου τύπου με ταυτόσημο προσανατολισμό και κλίση) [34].

Χρησιμοποιούνται για εγκαταστάσεις άνω των 100 kWp και έχουν σχεδιαστεί για εξωτερική χρήση. Οι αντιστροφείς μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα (DC), σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Κατ' αρχήν το πλάτος είναι παρόμοιο μεταξύ DC και AC. Μέσα στην ίδια συσκευασία μπορεί να περιέχεται και μετασχηματιστής ο οποίος στόχο έχει την προσαρμογή της τάσης στα επίπεδα του εναλλασσόμενου ρεύματος που επιθυμούμε, π.χ. 400V. Επίσης, στους αντιστροφείς για ΦΒ είναι δυνατόν να περιλαμβάνεται διάταξη ανίχνευσης της μέγιστης παραγωγής από την πηγή (Maximum Power Point Tracker (MPPT)).

Αντιστροφείς στις ΑΠΕ χρησιμοποιούνται σε:

- ΦΒ συστήματα
- Κυψέλες Καυσίμου
- Μικρές Α/Γ που παράγουν ισχύ απευθείας σε DC
- Σε μεγάλες Α/Γ σε κατάλληλους μετατροπείς για τη ρύθμιση της ισχύος μέσω μετατροπών δικτύου για φιλικότερη λειτουργία.
- Σε διατάξεις μπαταριών για την παροχή της αποθηκευμένης ενέργειας προς το δίκτυο.

Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή τους απόδοση (ακόμα και σε χαμηλή ισχύ εισόδου), το μεγάλο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας (-25°C έως $+60^{\circ}\text{C}$), και ο υψηλός βαθμός προστασίας τους από σκόνη και υγρασία (τυπική τιμή: IP65). Κατά την τοποθέτηση των αντιστροφέων είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ο επαρκής αερισμός τους. Συγκεκριμένα, γύρω από τη συσκευή πρέπει να υπάρχουν αποστάσεις 300mm – 500mm και, αν απαιτείται, χρήση τεχνητού εξαερισμού. Αν δεν διατίθενται μετεωρολογικά δεδομένα για τον τόπο εγκατάστασης του ΦΒ συστήματος, ο οποίος έστω ότι δεν σκιάζεται από εμπόδια κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ιδανικότερο είναι να επιλέξουμε γωνία κλίσης συλλέκτη ίση με $\beta = \phi - (50 \div 100)$. Πιθανότατα θα προσεγγίζει τη θέση καλύτερης δυνατής εκμετάλλευσης της ημερήσιας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας ετησίως. Τέλος, αν ο συλλέκτης πρέπει να εγκατασταθεί σε περιοχές με φυσικά εμπόδια, που τον σκιάζουν ορισμένη περίοδο της ημέρας, π.χ. δένδρα ή κτίρια, τότε ο συλλέκτης προσανατολίζεται έτσι ώστε να προκύπτει η βέλτιστη απόδοση. Κατά τη σύνταξη της σχετικής μελέτης, λαμβάνεται υπόψη, αφενός το τμήμα του ουρανού που αποκόπτεται από τα εμπόδια, αφετέρου το μικροκλίμα της περιοχής.

Οι αντιστροφείς μπορεί να είναι κατάλληλοι για διασύνδεση στο δημόσιο δίκτυο ή για αυτόνομη λειτουργία και να διαφοροποιούνται στην ονομαστική ισχύ, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και την

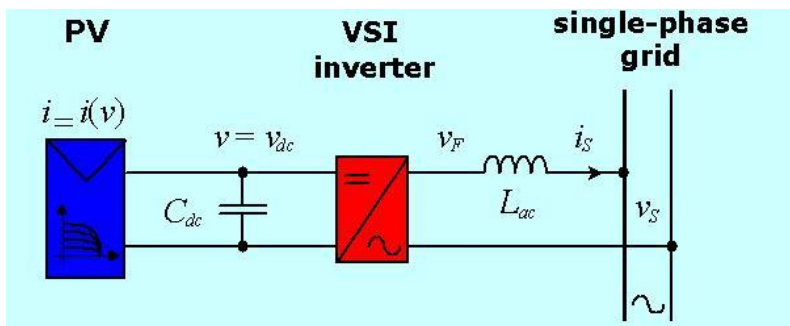
απόδοση. Λειτουργούν εφόσον υπάρχει επαρκής ηλιακή ακτινοβολία και θα πρέπει να τοποθετούνται σε δροσερά μέρη, μακριά από την άμεση ακτινοβολία του ήλιου. Οι περισσότεροι αντιστροφείς που προορίζονται για σύνδεση με το δίκτυο, σχεδιάζονται για να λειτουργήσουν χωρίς μπαταρίες, αλλά τοπολογίες που περιλαμβάνουν μπαταρίες είναι επίσης διαθέσιμες. Οι αντιστροφείς που διαχειρίζονται μπαταρίες περιλαμβάνουν έναν φορτιστή μπαταριών, ο οποίος είναι σε θέση να φορτίζει μια συστοιχία μπαταριών από το δίκτυο ή μέσω μιας εφεδρικής γεννήτριας όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι περιορισμένη. Αντιστροφείς που συνδέονται στο δίκτυο μπορούν να εγκατασταθούν υπαίθρια (ιδανικά, στη σκιά). Εκείνοι που προορίζονται για αυτόνομη λειτουργία δεν είναι στεγανοί και πρέπει να τοποθετηθούν στο εσωτερικό, κοντά στη συστοιχία μπαταριών. Όταν το δίκτυο παρουσιάζει προβλήματα οι αντιστροφείς θα πρέπει να τα ανιχνεύουν και να μη συμβάλλουν σε αυτά. Θα πρέπει επίσης να αποφεύγεται το islanding (νησιδοποίηση). Όταν η τάση ή η συχνότητα του δικτύου που βλέπει ο αντιστροφέας ξεπεράσουν κάποια προκαθορισμένα όρια θα πρέπει επίσης να γίνεται απόξευση της Φ/Β πηγής από το δίκτυο. Η επαναφορά της σύνδεσης, εφόσον το δίκτυο δεν είναι πια προβληματικό θα πρέπει να γίνεται μετά από καθορισμένο χρόνο αναμονής.

8.2 Κατηγορίες Αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς χωρίζονται ανάλογα με τον αριθμό φάσεων που εμπλέκουν αλλά και τον τύπο διαμόρφωσης της συνεχούς τάσης προς εναλλασσόμενη που δέχονται. Οι τετραγωνικού παλμού είναι οι πιο απλοί αλλά η χρήση τους συστήνεται σχεδόν αποκλειστικά σε πολύ απλές κατασκευές για μικρή ισχύ και για “αναίσθητα” φορτία όπως οι λαμπτήρες πυράκτωσης, κάποιο μικρό θερμικό φορτίο κλπ. Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε μόνο-φασικούς ή τρι-φασικούς, ανάλογα με τον αριθμό φάσεων.

8.2.1 Μονοφασικοί Αντιστροφείς για σύνδεση με το δίκτυο

Η διείσδυση Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο αυξάνεται με ταχύ ρυθμό τα τελευταία χρόνια. Προγράμματα και αλλαγές στην ενεργειακή πολιτική των ευρωπαϊκών χωρών έχουν συμβάλει σε αυτό, ενώ η τεχνολογική ανάπτυξη στο πεδίο των ημιαγωγών και των μαγνητικών υλικών οδήγησαν τους αντιστροφείς σε βελτιωμένη λειτουργία. Μέσα στην τελευταία δεκαετία το κόστος τους έχει μειωθεί κατά 50% και η απόδοση τους αυξήθηκε από 94% στο 97%. Εκτός αυτών, σήμερα έχουν τεθεί και ζητήματα ασφάλειας, αξιοπιστίας και επίβλεψης των συστημάτων των αντιστροφέων.



Σύνδεση 1φ Φ/Β αντιστροφέα με το δίκτυο [58]

8.2.2 Θέματα σχεδιασμού του συστήματος

Τα πρώτα Φ/Β συστήματα στη δεκαετία του 1980 είχαν εγκατεστημένους κεντρικούς αντιστροφείς αρκετών kW, οι τοπολογίες των οποίων ήταν βασισμένες στα βιομηχανικά συστήματα οδήγησης χωρίς εξειδίκευση στη λειτουργία της Φ/Β πηγής. Αυτό είχε επιπτώσεις στην λειτουργία του Φ/Β συστήματος, όπως μειωμένη απόδοση στην εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος, απώλειες και θέματα ασφάλειας στην καλωδίωση της DC πλευράς και μειωμένη προσαρμοστικότητα του συστήματος στις απαιτήσεις του πελάτη. Ως εκ τούτου αναπτύχθηκαν συστήματα αντιστροφών, ώστε να καλύπτουν τις ειδικές απαιτήσεις ενός Φ/Β συστήματος, με πλεονεκτήματα τη μείωση του κόστους, την αξιοπιστία και την απλότητα στον σχεδιασμό. Το καλύτερο από πλευράς απόδοσης και απλότητας θα ήταν η ενσωμάτωση του αντιστροφέα στο Φ/Β πλαίσιο. Ζητήματα αντικατάστασης και μειωμένης απόδοσης λόγω χαμηλών τιμών ισχύος, που αναγείρονται, οδηγούν προς αντιστροφείς προσανατολισμένους σε μία σειρά Φ/Β πλαισίων. Η μέγιστη απόδοση σήμερα αυτών των αντιστροφών φτάνει το 97% , ενώ υπάρχει περιορισμένος χώρος για περαιτέρω αύξηση.

8.2.3 Τοπολογίες αντιστροφών στην ευρωπαϊκή αγορά

Οι τρεις βασικές λειτουργίες που θα πρέπει να εκτελέσει ένας αντιστροφέας για την σύνδεση με το δίκτυο είναι οι εξής:

1. Μετατροπή του ρεύματος σε εναλλασσόμενο.
2. Μετασχηματισμός του ρεύματος σε ημιτονοειδή κυματομορφή.
3. Ενίσχυση της τάσης της Φ/Β πηγής με μετατροπέα DC/DC εάν αυτή είναι χαμηλότερη από την απαιτούμενη για την σύνδεση στα 230V.

Η ακολουθία αυτών των λειτουργιών στο σύστημα του αντιστροφέα καθορίζει τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν και τις απώλειες, το μέγεθος και την τιμή του. Το επίπεδο της τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα εξαρτάται από την τάση του Φ/Β πλαισίου και τον σχηματισμό της συστοιχίας. Η τάση αυτή μπορεί να μην είναι η βέλτιστη που χρειάζεται η γέφυρα του αντιστροφέα για να διατηρήσει τα 230V στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές που περιέχονται στο σύστημα του αντιστροφέα και μπορεί να είναι υψηλής ή χαμηλής συχνότητας. Γενικά οι μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας είναι ελαφρύτεροι και μικρότεροι σε μέγεθος και έτσι προτιμούνται. Εναλλακτικά μπορούν να τοποθετηθούν μετατροπείς DC/DC στην πλευρά συνεχούς (boost converters) που ενισχύουν την τάση που λαμβάνουν από την γεννήτρια. Άλλο στοιχείο είναι τα φίλτρα που τοποθετούνται στην DC και AC πλευρά για τις αρμονικές που προκύπτουν από τη λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων.

8.2.3.1 Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή

Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή έχουν εισαχθεί στην αγορά με σταθερά αυξανόμενο ρυθμό διείσδυσης, προσφέροντας γενικά καλύτερη απόδοση, χαμηλότερο κόστος και βάρος. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι η άμεση σύνδεση με την AC πλευρά χωρίς γαλβανική απομόνωση. Ανάλογα με την τοπολογία του αντιστροφέα αυτό μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις μεταξύ του δυναμικού της Φ/Β συστοιχίας και της γης. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορεί να έχουν συμπεριφορά ημίτονου ή τετραγωνικού παλμού στην συχνότητα του δικτύου ή την διακοπτική συχνότητα. Οι επιπτώσεις την λειτουργία του συστήματος και την ασφάλεια των ατόμων που έρχονται σε επαφή με αυτό οφείλονται στην ανάπτυξη δύο φαινομένων:

1. Η επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας αναπτύσσει χωρητικότητα σε σχέση με τη γη, η οποία ενεργοποιείται με τις διακυμάνσεις του δυναμικού. Τίθενται λοιπόν θέματα ασφαλείας για άμεση επαφή με τη Φ/Β γεννήτρια.
2. Οι διακυμάνσεις του δυναμικού προκαλούν τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων γύρω από τη συστοιχία (ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή).

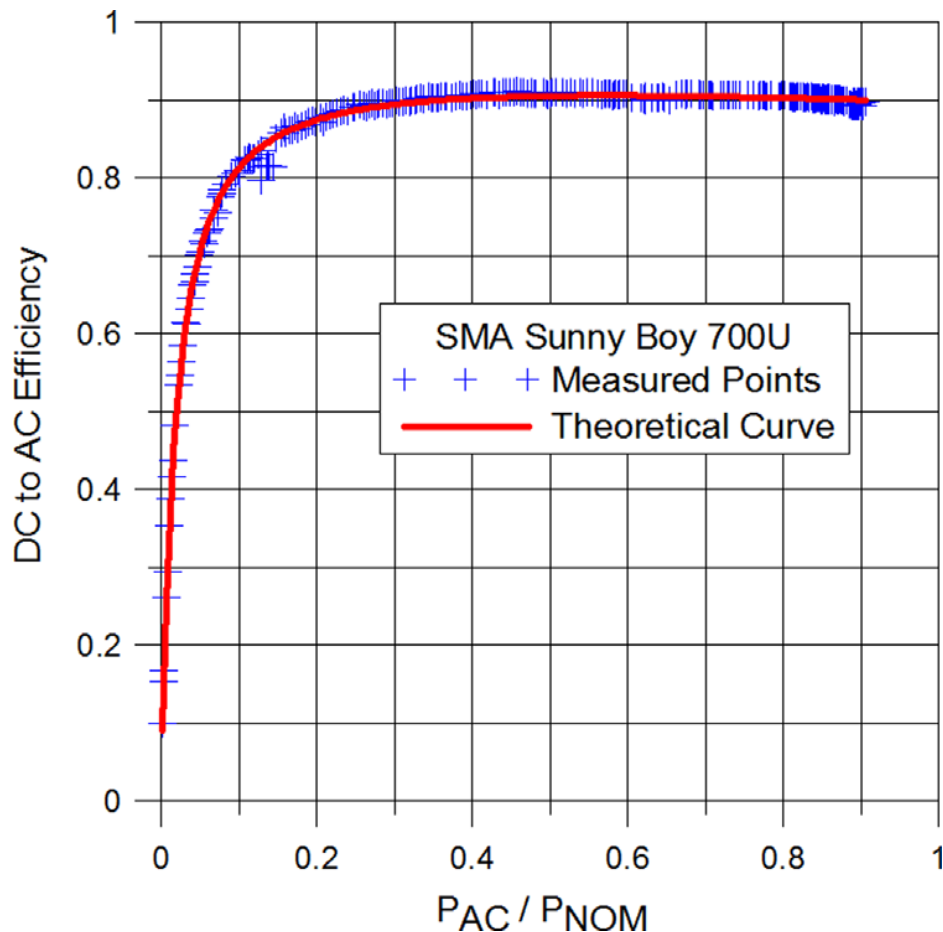
Ο βαθμός της επίδρασης αυτών των φαινομένων εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος και την τοπολογία του αντιστροφέα. Η γείωση εξοπλισμού μειώνει αρκετά την αναπτυσσόμενη χωρητικότητα και άρα τον κίνδυνο που αυτή συνεπάγεται. Σε συνδυασμό με την κατάλληλη τοπολογία αντιστροφέα και εγκατάσταση εξοπλισμού κλάσης II, οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή δεν αποτελούν πηγή κινδύνων για το σύστημα και τους ανθρώπους που το χειρίζονται.

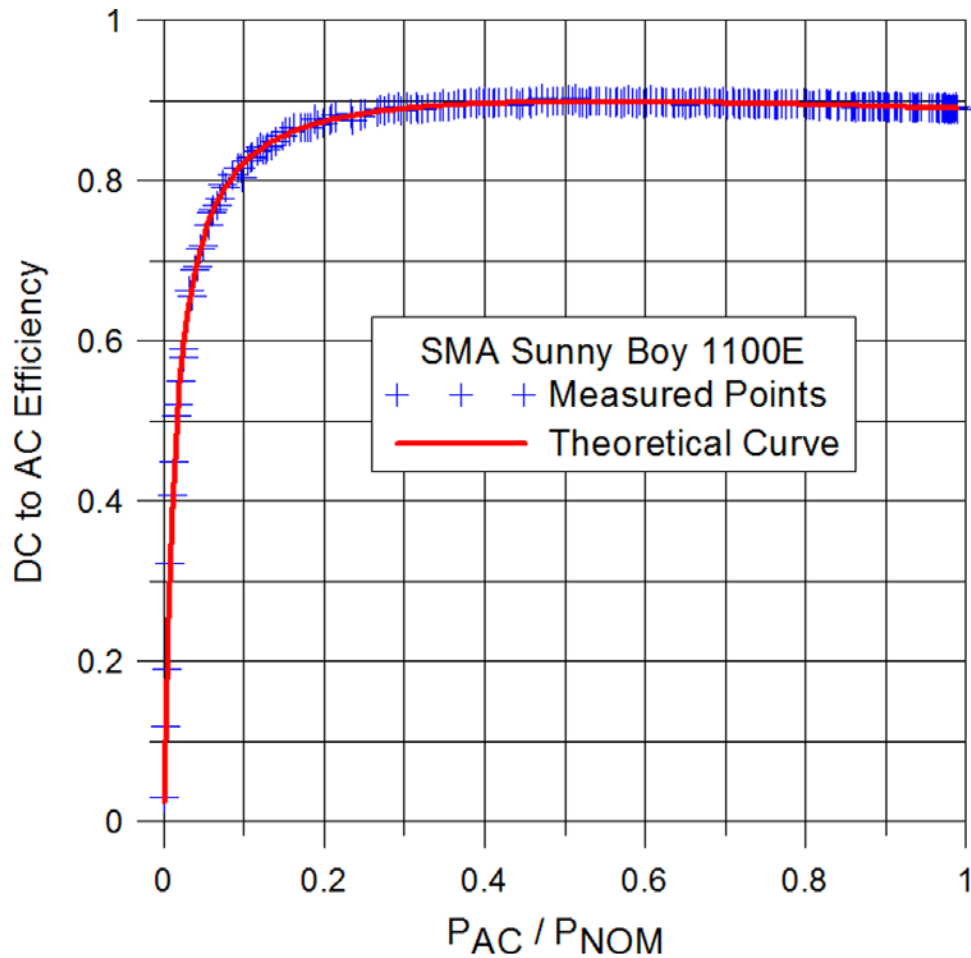


Φ/Β αντιστροφέας της εταιρείας Fronius [58]

8.2.3.2 Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα

Οι απώλειες ισχύος σε έναν αντιστροφέα αποτελούνται από δύο μέρη. Ένα σταθερό και ένα μεταβλητό το οποίο εξαρτάται από το φορτίο. Το σταθερό μέρος σχετίζεται με την ισχύ που απαιτείται για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων ελέγχου και άλλων βοηθητικών μερών του αντιστροφέα. Το μεταβλητό αποτελείται από τις απώλειες αγωγής και διακοπής στα διακοπτικά στοιχεία (συνήθως IGBTs) του αντιστροφέα. Οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες του ρεύματος εξόδου. Γι' αυτό ο βαθμός απόδοσης ενός αντιστροφέα δεν είναι σταθερός.





Ένας αντιστροφέας με σχετικά μικρή ονομαστική ισχύ δεν θα μεταφέρει στο δίκτυο την dc ισχύ η οποία είναι μικρότερη της ονομαστικής ισχύος του, καθώς ο αντιστροφέας δεν επιτρέπει το ac ρεύμα να ξεπερνά την ονομαστική τιμή του. Επίσης, από τα παραπάνω δύο χαρακτηριστικά διαγράμματα [1], φαίνεται ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ενός αντιστροφέα εμφανίζεται σε ένα μικρό εύρος φόρτισης.

Οι υψηλότερες μέγιστες αποδόσεις επιτυγχάνονται στους αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή με μέση μέγιστη απόδοση 96,5%. Η ευρωπαϊκή απόδοση είναι ένας τρόπος εκτίμησης της απόδοσης των αντιστροφέων σε τυπικές συνθήκες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση δύο αντιστροφέων.

Ορίζεται ως εξής:

$$n_{\text{euro}} = 0.03 \cdot n_5 + 0.06 \cdot n_{10} + 0.13 \cdot n_{20} + 0.1 \cdot n_{30} + 0.48 \cdot n_{50} + 0.2 \cdot n_{100}$$

Οι συνηθισμένες τιμές πλέον υπερβαίνουν το 90% και σε κάποιες περιπτώσεις μεγαλύτερων μετατροπέων αγγίζουν το 97%-98%. Γενικά συνίσταται το μέγεθος του αντιστροφέα $V_{DC, \min}$ $V_{DC, \max}$ να είναι στο 95-110% της ονομαστικής ισχύος του Φ/Β όταν συνδέεται σε φωτοβολταϊκό σύστημα. Η υπό-λειτουργία του θα οδηγεί σε χαμηλό βαθμό απόδοσης ενώ η πολύ χαμηλή ισχύς σε σχέση με την εγκαταστημένη ισχύ του Φ/Β θα οδηγεί σε μη εκμετάλλευση της παραγωγής του Φ/Β.

Ο δείκτης των αποδόσεων που συμμετέχουν στον προσδιορισμό του n_{euro} αναφέρεται στο ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος. Οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή που συνδέονται στο δίκτυο παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες ευρωπαϊκές αποδόσεις (~90%). Γενικότερα η ευρωπαϊκή απόδοση των αντιστροφών όλων των τοπολογιών αυξάνεται σταθερά από το 2000 και μετά. Η μέγιστη απόδοση σε αντίθεση έχει παραμείνει σταθερή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της μέγιστης απόδοσης οδηγεί στην αύξηση του κόστους και έτσι οι εταιρείες στοχεύουν στην βελτίωση της απόδοσης σε χαμηλότερα ποσοστά ισχύος.

Μια απλή μαθηματική συνάρτηση που περιγράφει με πολύ καλή ακρίβεια την καμπύλη απόδοσης του αντιστροφέα είναι η παρακάτω:

$$n(P_{dc,pu}) = D + G P_{dc,pu} + F / P_{dc,pu}$$

όπου n είναι ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα σε % ποσοστό και $P_{dc,pu} > 0$, η ανά μονάδα ισχύς του αντιστροφέα. D , G , F είναι σταθερές προς προσδιορισμό. Είναι εμφανές από την παραπάνω σχέση ότι απαιτούνται τρία ζεύγη τιμών $(n, P_{dc,pu})$, ώστε να γίνει ο προσδιορισμός αυτός. Αυτά τα ζεύγη τιμών μπορούν να βρεθούν από την καμπύλη απόδοσης του αντιστροφέα που παρέχει ο κατασκευαστής. Μια καλή επιλογή είναι τα ζεύγη που αντιστοιχούν σε $P_{dc,pu} = 0.1, 0.2$ και $1pu$, διότι το $P_{dc,pu} = 0.1pu$ αντιστοιχεί στο ανελθόν μέτωπο της καμπύλης απόδοσης, το $P_{dc,pu} = 0.2pu$ στο μέγιστο της καμπύλης και το $P_{dc,pu} = 1pu$ στην ουρά της. Οπότε οι παράμετροι μπορούν πλέον να βρεθούν λύνοντας ένα σύστημα τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους. Βέβαια οι σταθερές D , G , F μπορούν να βρεθούν και μέσω μιας μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων.

Οι τιμές των D , G , F που αντιστοιχούν σε κάποια χαρακτηριστικά μοντέλα αντιστροφών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [44].

	D	G	F
Satcon, 50kW	99.799	-2.977	-0.892
Satcon, 100kW	99.316	-2.697	-0.578
Siemens, 1000kVA	98.778	-0.873	-0.105
SMA, 5kW	97.004	-1.580	-0.362
SMA, 11kW	98.641	-1.782	-0.153
Solar Konzept, 2kW	97.330	-1.801	-0.141
Sunways, 3kW	97.157	-2.272	-0.398

9. Αλγόριθμος και Προσομοιώσεις

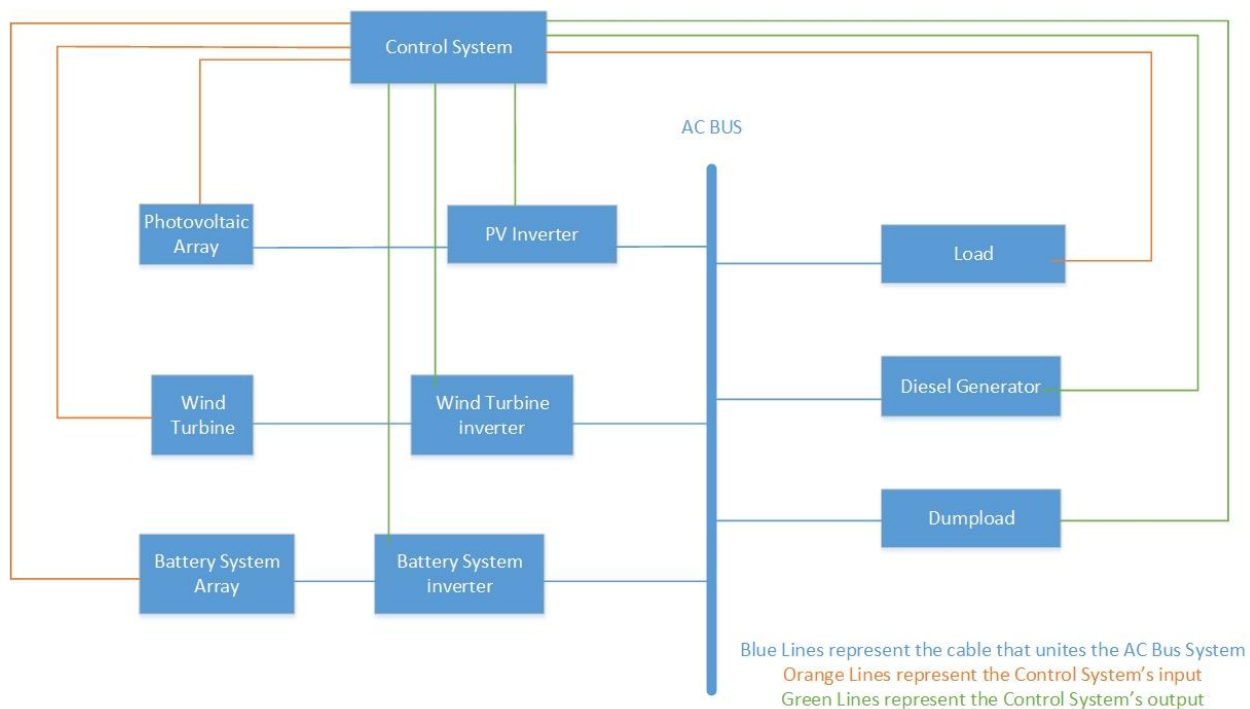
Ο παρών αλγόριθμος αποτελεί το σύστημα προσομοίωσης και διαστασιολόγησης ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος (ΑΥΣ) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το υβριδικό σύστημα που μοντελοποιήθηκε είχε ως στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός συστήματος που χαρακτηρίζεται από την ζήτηση φορτίου που θα δούμε παρακάτω. Σε αυτό ενσωματώθηκαν ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πλαίσια, ώστε να αξιοποιηθούν η αιολική και ηλιακή ενέργεια αντίστοιχα. Έγιναν προσομοιώσεις με ωριαίο βήμα διάτρεξης για δεδομένα ζήτησης φορτίου ενός έτους και για την βέλτιστη διαστασιολόγηση του συστήματος σύμφωνα με επένδυση βάθους εικοσαετίας.

Πιο συγκεκριμένα το σύστημα χρησιμοποιεί ζυγό εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) και σε αυτό διασυνδέονται:

- μία ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος (ηλεκτροπαραγωγή σε συνεχές ρεύμα)
- μία συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων (ηλεκτροπαραγωγή σε συνεχές ρεύμα)
- ένας αριθμός συστοιχιών μπαταριών τεχνολογίας μολύβδου οξέως (παροχή ενέργειας σε συνεχές ρεύμα)
- ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (ηλεκτροπαραγωγή σε εναλλασσόμενο ρεύμα)
- μία διάταξη ελεγχόμενου φορτίου (dumpload)
- τρεις αντιστροφείς DC/AC, ένας για κάθε σύστημα ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. και ένας για την διάταξη των μπαταριών

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διάταξη των μερών του συστήματος στον ζυγό αλλά και η επικοινωνία κάθε μέρους με το σύστημα ελέγχου. Οι πορτοκαλί γραμμές αποτελούν τις μετρήσεις οι οποίες εισάγονται στο σύστημα ελέγχου (όπως για παράδειγμα η παροχή ισχύος από την ανεμογεννήτρια), οι πράσινες γραμμές αποτελούν τις εξόδους του συστήματος ελέγχου, τις εντολές, προς τους αντιστροφείς, το ελεγχόμενο φορτίο και την γεννήτρια ντίζελ για την διανομή της ενέργειας στους αντίστοιχους κλάδους, ενώ οι μπλε γραμμές αποτελούν τα καλώδια με τα οποία συνδέονται τα μέρη του συστήματος με τον ζυγό εναλλασσόμενου ρεύματος.



Τα μέρη του συστήματος τα οποία μπορούν να διαστασιολογηθούν εφαρμόζοντας τεχνικά και οικονομικά κριτήρια και τα μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν είναι τα εξής:

- Η ονομαστική μέγιστη απόδοση ισχύος της ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος μαζί με τον DC/AC αντιστροφέα για την απόδοση της ηλεκτροπαραγωγής της στον AC ζυγό και την ικανοποίηση του φορτίου ζήτησης, σε σχέση με τα κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για ανεμογεννήτρια ισχύος 1kW
- Η ονομαστική μέγιστη απόδοση ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων μαζί με τον DC/AC αντιστροφέα για την απόδοση της ηλεκτροπαραγωγής της στον AC ζυγό και την ικανοποίηση του φορτίου ζήτησης, σε σχέση με τα κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για φωτοβολταϊκό πάνελ ισχύος 1kW
- Ο αριθμός των συστοιχιών των μπαταριών μαζί με τον DC/AC αντιστροφέα για την απόδοση της αποθηκευμένης ενέργειάς της στον AC ζυγό και την ικανοποίηση του φορτίου ζήτησης, ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης, η χωρητικότητα των μπαταριών σε μονάδες ανάλογες με την ισχύ (σε kWh), το βάθος εκφόρτισης (σε kWh), και η διάρκεια ζωής των μπαταριών ανάλογα με την συνολική ενέργεια εκφόρτισης για τον χρόνο προσομοίωσης
- Η απαιτούμενη μέγιστη ισχύς του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε σχέση με τον βαθμό απόδοσής του στις στροφές λειτουργίας του αλλά και με το φορτίο ζήτησης και την διαφορά του από την ηλεκτροπαραγωγή των μονάδων Α.Π.Ε. και την παροχή ενέργειας των συστοιχιών των μπαταριών
- Η διάταξη του ελεγχόμενου φορτίου σύμφωνα με το φορτίο απόρριψης, η οποία χρησιμοποιείται για περίσσεια της παραχθείσας ενέργειας των ΑΠΕ που δεν μπορεί να αποθηκευτεί στις συστοιχίες των μπαταριών και για την απόρριψη μικρών φορτίων όταν δεν μπορούν να περάσουν από αντιστροφέα διότι είναι κάτω από το 5% της ονομαστικής του ισχύος.

9.1 Διαστασιολόγηση του συστήματος με οικονομικά κριτήρια

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης έχουν επιλεγεί συγκεκριμένα μοντέλα και τεχνολογίες για κάθε ένα από τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημά μας και τα οικονομικά μεγέθη που αντιστοιχούν στην αγορά, εγκατάσταση, συντήρηση και αντικατάσταση των στοιχείων αυτών.

Το σημαντικότερο κριτήριο για την εύρεση της βέλτιστης λύσης και διαστασιολόγησης του συστήματός μας, πέρα από τους τεχνικούς περιορισμούς είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους κύκλου ζωής της επένδυσης (LCC). Πιο συγκεκριμένα, ακολουθείται η εξής μεθοδολογία για τον υπολογισμό των δαπανών ενός κύκλου ζωής επένδυσης σε βάθος εικοσαετίας [51].

$$LCC = C_{res} + C_{installation} + C_{maintainance} + C_{BatterySystem} + C_{inverter} + C_{DieselGenerator} - S$$

Το κόστος αυτό απαρτίζεται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- **C_{res} :** Αρχικό κόστος αγοράς των μονάδων παραγωγής που εκμεταλλεύονται τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Στο παρόν σύστημα αναφέρεται στο κόστος της ανεμογεννήτριας και των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στην παρούσα μελέτη και σύμφωνα με τις τρέχουσες συνθήκες στην αγορά οι δαπάνες αυτές ορίζονται ως εξής:

Αρχικό κόστος ανεμογεννήτριας: 2500 ευρώ ανά kW

Αρχικό κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων: 1000 ευρώ ανά kW

- **$C_{installation}$:** Κόστος εγκατάστασης του συστήματος. Το κόστος αυτό υπολογίζεται κατά προσέγγιση ως ένα ποσοστό του αρχικού κόστους αγοράς των μονάδων παραγωγής που εκμεταλλεύονται τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Συγκεκριμένα το κόστος εγκατάστασης θεωρείται ίσο με 8% του C_{res} :

$$C_{installation} = a * C_{res}, a = 8\%$$

- **$C_{maintainance}$:** Η παρούσα αξία του συνολικού κόστους συντήρησης των μονάδων του συστήματος σε σχέση με την διάρκεια ζωής του. Αρχικά υπολογίζεται το ετήσιο κόστος συντήρησης το οποίο είναι και αυτό ένα ποσοστό του αρχικού κόστους αγοράς των μονάδων παραγωγής που εκμεταλλεύονται τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Συγκεκριμένα το ετήσιο κόστος συντήρησης θεωρείται ίσο με 2% του C_{res} :

$$C_{annual_maintainance} = a * C_{res}, a = 2\%$$

Η παρούσα αξία (present value), $PV(N)$ ενός ποσού στο έτος N , δίνεται από την ακόλουθη σχέση: $PV(N) = PV(0) (1 + r)^{-N}$, όπου r είναι το κόστος των χρημάτων. Στην παρούσα μελέτη το κόστος των χρημάτων τίθεται ίσο με, $r=4,4\%$ και η περίοδος ζωής της επένδυσης θεωρείται ίση με, $N=20$ έτη.

Οπότε το συνολικό κόστος συντήρησης για ολόκληρη την διάρκεια ζωής της επένδυσης θα δίνεται από την σχέση:

$$C_{\text{maintenance}} = a * C_{\text{res}} * \sum_{j=1}^N (1 + r)^{-j}$$

- **$C_{\text{BatterySystem}}$:** Το κόστος του συνολικού αριθμού των μπαταριών που θα χρησιμοποιηθούν καθ'όλη την διάρκεια ζωής της επένδυσης. Αυτό περιλαμβάνει το αρχικό κόστος των μπαταριών με βάση το μοντέλο και την τεχνολογία που επιλέγουμε αρχικά για το σύστημα αποθήκευσης, αλλά και το κόστος των μπαταριών που ίσως απαιτηθεί να αντικαταστήσουμε πριν την παλεύση της διάρκειας ζωής της επένδυσης λόγω του ιδιαίτερου κύκλου ζωής των μπαταριών.

Το κόστος αυτό θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{\text{BatterySystem}} = C_{B0} * (1 + \sum_{j=1}^n (1 + r)^{-Nj})$$

Στην παραπάνω σχέση το n είναι ο συνολικός αριθμός των αντικαταστάσεων όλων των μπαταριών και το Nj είναι το έτος στο οποίο πραγματοποιείται κάθε αντικατάσταση.

Για το σύστημα των μπαταριών επιλέγουμε το μοντέλο Horphecke 6 OPzS 300 με τιμή ανά τεμάχιο 200€ και με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Ονομαστική χωρητικότητα C : 300Ah
- Τάση στοιχείου: 2V
- Συνολική απόδοση: 86%
- Μέγιστο βάθος εκφόρτισης: 70%
- Μέγιστο ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης: $C/5 = 60A$

Ως διάρκεια ζωής κάθε μπαταρίας θεωρούμε την εκφόρτιση ενέργειας 1000kWh.

Από τα στοιχεία του μέγιστου ρεύματος και για τάση στοιχείου 2V, λαμβάνουμε τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης για κάθε μπαταρία, $60A * 2V = 120W$.

Για την προσομοίωση που θα κάνουμε θεωρούμε σύστημα αποθήκευσης αποτελούμενο από συστοιχίες των εικοσιτεσσάρων μπαταριών με τάση 48V και μέγιστο ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης $120W * 24 = 2880W$ η καθεμία.

Η χωρητικότητα των συστοιχιών σε μονάδες ανάλογες με την ισχύ (σε kWh) θα είναι $24 \cdot 300 \text{Ah} \cdot 2\text{V} = 14.4 \text{kWh}$, το μέγιστο βάθος εκφόρτισης (σε kWh) $0.7 \cdot 14400 = 10.08 \text{kWh}$, δηλαδή η αποθηκευμένη ενέργεια κάθε στιγμή θα πρέπει να είναι κατ'ελάχιστο $0.3 \cdot 14400 = 4.32 \text{kWh}$, και η διάρκεια ζωής των μπαταριών θα θεωρείται η εκφόρτιση 24000kWh .

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της παραπάνω συστοιχίας μπαταριών επιλέγεται ο βέλτιστος αριθμός των συστοιχιών για τις ανάγκες του συστήματος και για την εξοικονόμηση καυσίμων στο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

- **C_{inverter}**: Το αρχικό κόστος των αντιστροφών. Το κόστος αυτό αποδίδεται για καθένα από τους αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται στο σύστημα κατά προσέγγιση: 600 ευρώ ανά kW

Στο σύστημά μας χρησιμοποιούνται τρεις αντιστροφείς DC/AC με διαφορετική μέγιστη ισχύ.

Για την προσομοίωση και για την εύρεση του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα κάθε στιγμή ανάλογα με τις συναλλαγές ενέργειας, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα για την καμπύλη απόδοσης του μοντέλου Sunny Boy 3800U της εταιρίας SMA. Για κάθε ποσό ενέργειας που περνά από τον αντιστροφέα ως ποσοστό της ονομαστικής μέγιστης απόδοσης του, έχουμε και τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης [1].

5%	10%	20%	30%	50%	75%	100%
70.7	81.4	87.7	89.9	91.2	91.3	90.9

- **C_{DieselGenerator}**: Συνολικό κόστος αγοράς και χρήσης του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (γεννήτριας ντίζελ). Το κόστος αυτό απαρτίζεται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

Το αρχικό κόστος της πετρελαιομηχανής **C_{DieselGeneratorBuyingCost}** και το συνολικό κόστος κατανάλωσης καυσίμων για όλη την διάρκεια ζωής της επένδυσης **C_{FuelCost}**.

$$C_{\text{DieselGenerator}} = C_{\text{DieselGeneratorBuyingCost}} + C_{\text{FuelCost}}$$

Κατά προσέγγιση το κόστος αγοράς μίας γεννήτριας ντίζελ είναι 300 ευρώ ανά kW.

Η συνολική κατανάλωση καυσίμων **C_{FuelCost}** στην περίοδο ζωής της επένδυσης υπολογίζεται με από ακόλουθη σχέση:

$$C_{\text{FuelCost}} = V_{\text{FuelCost}} \cdot C_{\text{FuelCost}} \cdot \sum_{j=1}^N [(1 + \text{FPIR})^j \cdot (1 + r)^{-j}]$$

όπου,

V_{FuelCost}: η ετήσια κατανάλωση καυσίμων diesel ανά lt

C_{FuelCost}: η τιμή καυσίμων diesel κατά την διάρκεια της εγκατάστασης του συστήματος € ανά lt

FPIR: το ετήσιο ποσοστό αύξησης της τιμής των καυσίμων, τίθεται ίσο με 5%

r: το κόστος των χρημάτων, το οποίο τίθεται ίσο με 4.4%

N: η περίοδος ζωής της επένδυσης (20 έτη).

Η τρέχουσα τιμή του πετρελαίου diesel στην Κρήτη (Οκτώβριος 2015) διαμορφώνεται σε 1.14€/lt.

Επίσης, για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου για κάθε ώρα της προσομοίωσης, υιοθετούμε τα παρακάτω μοντέλα της IPSI ανάλογα με την μέγιστη ονομαστική ισχύ της γεννήτριας ντίζελ, τις στροφές ανά λεπτό και την απόδοση ισχύος [21].

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η πραγματική μέγιστη απόδοση ισχύος της γεννήτριας είναι στο 90% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος της, πράγμα που αποτέλεσε αντικείμενο ελέγχου και προσαρμογής στον αλγόριθμο προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται από τον αλγόριθμο η μέγιστη ωριαία απαίτηση ισχύος από την γεννήτρια για ολόκληρο το έτος. Αυτή η τιμή καθορίζει και την μέγιστη ονομαστική ισχύ της γεννήτριας ντίζελ σύμφωνα με το 90% της απόδοσης των παρακάτω μοντέλων, και αποτελεί το αντικείμενο ελέγχου για την επιλογή ενός εκ των παρακάτω μοντέλων γεννητριών από το οποίο υπολογίζεται και η κατανάλωση καυσίμων. Αν για παράδειγμα η μέγιστη απαίτηση ισχύος από την γεννήτρια είναι μικρότερη ή ίση με 9kW, τότε η μέγιστη ονομαστική ισχύς της γεννήτριας τίθεται 10kW, επιλέγεται το πρώτο μοντέλο γεννήτριας και υπολογίζεται για κάθε ώρα ξεχωριστά η κατανάλωση λίτρων καυσίμου σε συνάρτηση με την απόδοση ισχύος την ίδια ώρα. Αν η μέγιστη απαίτηση ισχύος από την γεννήτρια είναι μεγαλύτερη από 9kW και μικρότερη ή ίση με 10.8kW, τότε η μέγιστη ονομαστική ισχύς της γεννήτριας τίθεται 12kW, επιλέγεται το δεύτερο μοντέλο γεννήτριας και υπολογίζεται για κάθε ώρα ξεχωριστά η κατανάλωση λίτρων καυσίμου σε συνάρτηση με την απόδοση ισχύος την ίδια ώρα. Η ίδια στρατηγική ακολουθείται ανάλογα με την μέγιστη απαίτηση ισχύος και για τον έλεγχο των υπολοίπων μοντέλων.

10 kW Diesel Generator Set

Load	1500 RPM	
	kW	Litre/h
1/4	2.25	0.72
1/2	4.5	1.4
3/4	6.75	2.2
Full	9	2.9

12 kW Diesel Generator Set

Load	1500 RPM	
	kW	Litre/h
1/4	2.7	0.76
1/2	5.4	1.51
3/4	8.1	2.31
Full	10.8	2.76

15 kW Diesel Generator Set

Load	1500 RPM	
	kW	Litre/h
1/4	3.375	0.95
1/2	6.75	1.9
3/4	10.125	2.9
Full	13.5	3.8

25 kW Diesel Generator Set

Load	1500 RPM	
	kW	Litre/h
1/4	5.625	1.7
1/2	11.25	3.1
3/4	16.875	4.5
Full	22.5	6.3

30 kW Diesel Generator Set

Load	1500 RPM	
	kW	Litre/h
1/4	6.75	2
1/2	13.5	3.8
3/4	20.25	5.5
Full	27	7.5

- **S:** Αυτό μας δείχνει την αξία της επένδυσης μετά το τέλος της περιόδου ζωής της. Συνήθως είναι κατ' εκτίμηση ίσο σε 10% - 20% του αρχικού κόστους της συνολικής επένδυσης. Στην παρούσα μελέτη θεωρείται ίσο με το 20% του αρχικού κόστους της συνολικής επένδυσης.

9.2 Αλγόριθμος Ελέγχου και Προσομοίωσης

Ο αλγόριθμος δέχεται τις εξής εισόδους:

- Το εύρος των τιμών για την μέγιστη ονομαστική ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Το εύρος των τιμών για την μέγιστη ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος
- Τα κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για ανεμογεννήτρια ισχύος 1kW
- Τα κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για φωτοβολταϊκό πάνελ ισχύος 1kW
- Τα δεδομένα του φορτίου ζήτησης
- Το εύρος των τιμών για τον αριθμό των συστοιχιών για το σύστημα των μπαταριών
- Το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών, ως την αποθηκευμένη ενέργεια στις μπαταρίες στην αρχή της προσομοίωσης, η οποία τίθεται ίση με το 50% της χωρητικότητας των συστοιχιών των μπαταριών σε μονάδες ανάλογες της ισχύος (σε kWh)

- Τον συντελεστή απόδοσης των μπαταριών, ο οποίος τίθεται ίσος με την τετραγωνική ρίζα του 0.86 (βαθμό απόδοσης ολικού κύκλου λειτουργίας)
- Την μέγιστη ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η οποία τίθεται ίση με τον επόμενο μεγαλύτερο ακέραιο αριθμό του 110% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, αν ο αρχικός αριθμός είχε δεκαδικό μέρος.
- Την μέγιστη ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα της ανεμογεννήτριας, η οποία τίθεται ίση με τον επόμενο μεγαλύτερο ακέραιο αριθμό του 110% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας, αν ο αρχικός αριθμός είχε δεκαδικό μέρος.
- Την μέγιστη ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα για τις συστοιχίες των μπαταριών, η οποία τίθεται ίση με τον επόμενο μεγαλύτερο ακέραιο αριθμό του 110% του μέγιστου ρυθμού φόρτισης/εκφόρτισης για τον αριθμό των συστοιχιών των μπαταριών, αν ο αρχικός αριθμός είχε δεκαδικό μέρος.
- Τα δεδομένα της καμπύλης απόδοσης του αντιστροφέα
- Το αρχικό κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά kW ισχύος
- Το αρχικό κόστος της ανεμογεννήτριας ανά kW ισχύος
- Το αρχικό κόστος της γεννήτριας ντίζελ ανά kW ισχύος
- Το αρχικό κόστος ανά μπαταρία ή ανά συστοιχία μπαταριών
- Το κόστος καυσίμου (πετρελαίου ντίζελ) ανά λίτρο
- Το κόστος των χρημάτων (r) για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας
- Το ετήσιο ποσοστό αύξησης της τιμής των καυσίμων
- Την περίοδο ζωής της επένδυσης

Ο αλγόριθμος δύναται να εξάγει τα εξής αποτελέσματα:

- Την βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Το πραγματικό αρχικό κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Την βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος
- Το πραγματικό αρχικό κόστος της ανεμογεννήτριας
- Το πραγματικό αρχικό κόστος αγοράς των μονάδων παραγωγής που εκμεταλλεύονται τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- Το κόστος εγκατάστασης του συστήματος
- Το ετήσιο κόστος συντήρησης αλλά και την παρούσα αξία του συνολικού κόστους συντήρησης των μονάδων του συστήματος σε σχέση με την διάρκεια ζωής του
- Την βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ των αντιστροφέων για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, την ανεμογεννήτρια και τις συστοιχίες των μπαταριών
- Την βέλτιστη τιμή για τον αριθμό των συστοιχιών για το σύστημα των μπαταριών
- Το πλήθος των μπαταριών που χρειάστηκαν αλλαγή στην περίοδο προσομοίωσης και την παρούσα αξία του κόστους αλλαγής τους
- Τις συνολικές συναλλαγές ενέργειας μεταξύ του συστήματος και των μπαταριών (συνολική ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης)
- Την βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ της γεννήτριας ντίζελ
- Την ενέργεια που παρήγαγε η γεννήτρια ντίζελ για ένα έτος ή και για όλη την περίοδο ζωής της επένδυσης

- Τον αριθμό των λίτρων καυσίμων που δαπανήθηκαν στην γεννήτρια ντίζελ για ένα έτος ή και για όλη την περίοδο ζωής της επένδυσης
- Τις ώρες λειτουργίας της γεννήτριας ντίζελ στην διάρκεια του έτους
- Το κόστος κατανάλωσης καυσίμων για ένα έτος ή και για όλη την περίοδο ζωής της επένδυσης
- Το συνολικό κόστος της επένδυσης με βάση το οποίο επιλέγεται η βέλτιστη λύση

Για κάθε ώρα προσομοίωσης, ο αλγόριθμος διεξάγει υπολογισμούς και ελέγχους σύμφωνα με τα δεδομένα.

Αρχικά, υπολογίζει το ποσό της ισχύος των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της ανεμογεννήτριας το οποίο δύναται να περάσει από τον αντίστοιχο αντιστροφέα για να διατεθεί στον ζυγό εναλλασσόμενου ρεύματος. Αν η ισχύς εισόδου στον αντιστροφέα είναι μικρότερη από το 5% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέως, τότε δεν πραγματοποιείται συναλλαγή ενέργειας και η ενέργεια αυτή απορρίπτεται. Διαφορετικά, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα και η ισχύς αποδίδεται στον ζυγό σε συνάρτηση με τον βαθμό απόδοσης.

Έπειτα πραγματοποιούνται οι πιο βασικοί έλεγχοι για το εάν η ισχύς από τις μονάδες παραγωγής που εκμεταλλεύονται τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, καλύπτει την ισχύ του φορτίου ζήτησης.

- ❖ Αν η ισχύς από τις Ανανεώσιμες Πηγές καλύπτει την ισχύ του φορτίου ζήτησης τότε δεν γίνεται χρήση της γεννήτριας ντίζελ και δεν χρησιμοποιούνται καθόλου οι συστοιχίες των μπαταριών.
- ❖ Αν η ισχύς από τις Ανανεώσιμες Πηγές είναι μεγαλύτερη από την ισχύ του φορτίου ζήτησης τότε θα υπολογίζεται αν η διαφορά τους μπορεί να προσφέρει ενέργεια προς φόρτιση της μπαταρίας.
 - Αν η διαφορά της ισχύος αυτής είναι μικρότερη του 5% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα των συστοιχιών των μπαταριών, τότε δεν πραγματοποιείται συναλλαγή ενέργειας και η ενέργεια αυτή απορρίπτεται.
 - Διαφορετικά, αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη του 5%, γίνεται έλεγχος για το αν είναι και μεγαλύτερη του 100% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα.
 - Εάν είναι μεγαλύτερη, τότε η περίσσεια της ισχύος απορρίπτεται και η ισχύς η οποία περνά από τον αντιστροφέα τίθεται ίση με την μέγιστη ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα. Έπειτα υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης για την δεδομένη ισχύ.
 - Αν κατά τον έλεγχο η διαφορά ισχύος είναι μικρότερη του 100% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα τότε και πάλι υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα για την δεδομένη διαφορά ισχύος.

Ο επόμενος έλεγχος αφορά στην αποθηκευμένη ενέργεια στις συστοιχίες των μπαταριών.

- Αν στις μπαταρίες χωρά η ενέργεια με την οποία μπορούν να φορτιστούν κατά τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης, τότε γίνεται έλεγχος για την σχέση του μέγιστου ρυθμού φόρτισης με το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα, του βαθμού απόδοσης των μπαταριών και της διαφοράς της ισχύος των ΑΠΕ από το φορτίο ζήτησης.
 - Αν το γινόμενο είναι μικρότερο από τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης τότε οι μπαταρίες φορτίζονται με το παραπάνω γινόμενο της ισχύος.

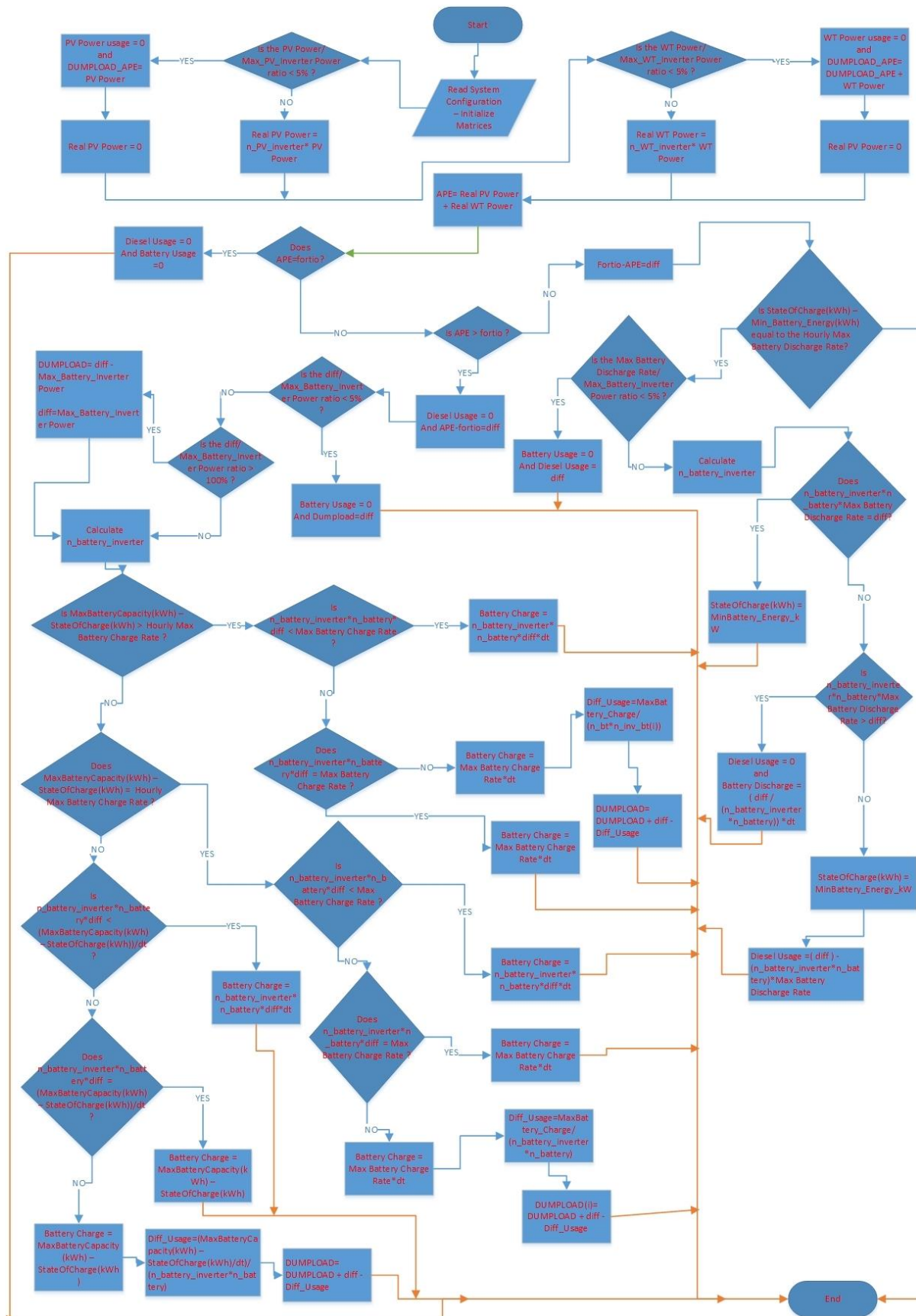
- Αν το γινόμενο είναι ίσο με τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης τότε οι μπαταρίες φορτίζονται με τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης.
 - Αν το γινόμενο είναι μεγαλύτερο από τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης, τότε οι μπαταρίες φορτίζονται με τον μέγιστο ρυθμό και η περίσσεια του φορτίου απορρίπτεται.
- Αν στις μπαταρίες δεν χωρά η ενέργεια με την οποία μπορούν να φορτιστούν κατά τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης, τότε γίνεται έλεγχος για την σχέση του γινομένου του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα, του βαθμού απόδοσης των μπαταριών και της διαφοράς της ισχύος των ΑΠΕ από το φορτίο ζήτησης με την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί.
- Αν το γινόμενο είναι μικρότερο από την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί, τότε οι μπαταρίες φορτίζονται με το παραπάνω γινόμενο της ισχύος.
 - Αν το γινόμενο είναι ίσο με την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί, τότε οι μπαταρίες φορτίζονται πλήρως.
 - Αν το γινόμενο είναι μεγαλύτερο από την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί, τότε οι μπαταρίες φορτίζονται πλήρως και η περίσσεια απορρίπτεται.
- ❖ Αν η ισχύς από τις Ανανεώσιμες Πηγές είναι μικρότερη από την ισχύ του φορτίου ζήτησης εξετάζεται το ποσό της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία και έπειτα αν αυτή δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες της ζήτησης, γίνεται χρήση της γεννήτριας ντίζελ, ακολουθώντας την στρατηγική Load Following.
- Εάν η πλήρης εκφόρτιση των μπαταριών είναι ίση με τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης των μπαταριών τότε γίνεται έλεγχος για το τι ποσοστό της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα των μπαταριών, αποτελεί ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτισης.
- Αν ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτισης είναι μικρότερος του 5% της μέγιστης ισχύος, τότε δεν γίνεται καμμία συναλλαγή ενέργειας με τις μπαταρίες, και η γεννήτρια ντίζελ καλείται να καλύψει το έλλειμα ισχύος. (Στην παρούσα προσομοίωση ο έλεγχος αυτός δεν απαιτείται καθώς η μέγιστη ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα έχει τεθεί ίση με 110% του μέγιστου ρυθμού φόρτισης/εκφόρτισης των μπαταριών. Σε ένα γενικότερο μοντέλο όμως, στο οποίο η μέγιστη ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα μπορεί να είναι δυσανάλογα μεγάλη σε σχέση με τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης, ο έλεγχος αυτός είναι απαραίτητος.)
 - Διαφορετικά, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα.
 - Έπειτα γίνεται έλεγχος για το αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης είναι ίσο με το έλλειμα ισχύος. Αν ναι, τότε οι μπαταρίες εκφορτίζονται μέχρι το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης.
 - Αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο από το έλλειμα

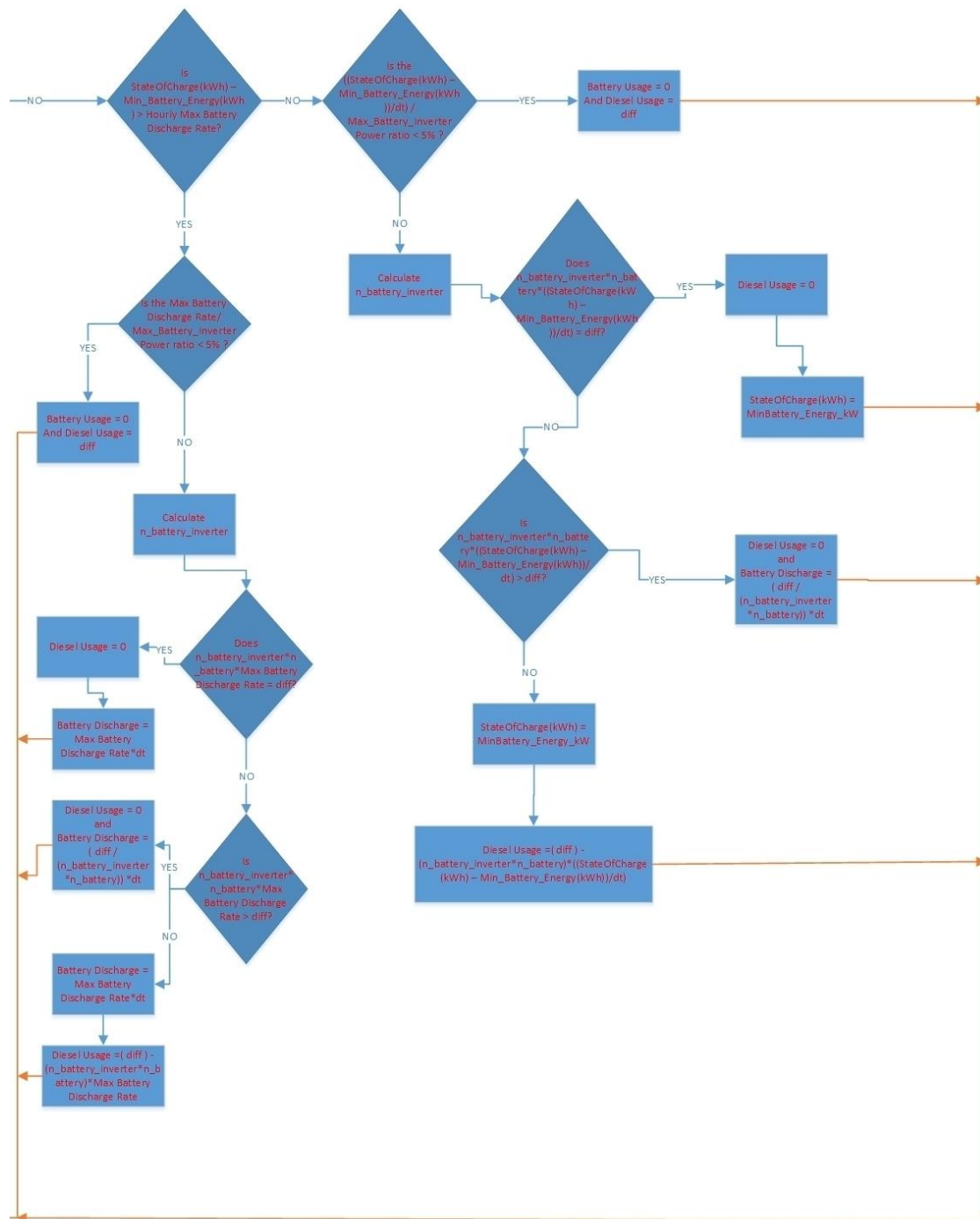
- ισχύος, τότε η εκφόρτιση των μπαταριών θα είναι ίση με το πηλίκο του ελλείματος ισχύος δια το γινόμενο των βαθμών απόδοσης του αντιστροφέα και των μπαταριών.
- Αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης είναι μικρότερο από έλλειμα ισχύος, τότε οι μπαταρίες εκφορτίζονται μέχρι το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης, και η γεννήτρια ντίζελ καλείται να αποδώσει ισχύ ίση με την διαφορά του ελλείματος ισχύος και του γινομένου των βαθμών απόδοσης του αντιστροφέα και των μπαταριών και του μέγιστου ρυθμού εκφόρτισης.
- Εάν η πλήρης εκφόρτιση των μπαταριών είναι μεγαλύτερη από τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης των μπαταριών τότε γίνεται έλεγχος για το τι ποσοστό της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα των μπαταριών, αποτελεί ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτισης.
- Αν ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτισης είναι μικρότερος του 5% της μέγιστης ισχύος, τότε δεν γίνεται καμμία συναλλαγή ενέργειας με τις μπαταρίες, και η γεννήτρια ντίζελ καλείται να καλύψει το έλλειμα ισχύος. (Στην παρούσα προσομοίωση ο έλεγχος αυτός δεν απαιτείται καθώς η μέγιστη ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα έχει τεθεί ίση με 110% του μέγιστου ρυθμού φόρτισης/εκφόρτισης των μπαταριών. Σε ένα γενικότερο μοντέλο όμως, στο οποίο η μέγιστη ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα μπορεί να είναι δυσανάλογα μεγάλη σε σχέση με τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης, ο έλεγχος αυτός είναι απαραίτητος)
 - Διαφορετικά, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα.
 - Έπειτα γίνεται έλεγχος για το αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης είναι ίσο με το έλλειμα ισχύος. Αν ναι, τότε οι μπαταρίες εκφορτίζονται με τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης.
 - Αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο από το έλλειμα ισχύος, τότε η εκφόρτιση των μπαταριών θα είναι ίση με το πηλίκο του ελλείματος ισχύος δια το γινόμενο των βαθμών απόδοσης του αντιστροφέα και των μπαταριών.
 - Αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης είναι μικρότερο από έλλειμα ισχύος, τότε οι μπαταρίες εκφορτίζονται με τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης, και η γεννήτρια ντίζελ καλείται να αποδώσει ισχύ ίση με την διαφορά του ελλείματος ισχύος και του γινομένου των βαθμών απόδοσης του αντιστροφέα και των μπαταριών και του μέγιστου ρυθμού εκφόρτισης.

- Εάν η πλήρης εκφόρτιση των μπαταριών είναι μικρότερη από τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης των μπαταριών τότε γίνεται έλεγχος για το τι ποσοστό της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα των μπαταριών, αποτελεί ο ρυθμός εκφόρτισης της αποθηκευμένης ενέργειας μέχρι το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης.
 - Αν αυτός ο ρυθμός εκφόρτισης είναι μικρότερος του 5% της μέγιστης ισχύος, τότε δεν γίνεται καμμία συναλλαγή ενέργειας με τις μπαταρίες, και η γεννήτρια ντίζελ καλείται να καλύψει το έλλειμα ισχύος.
 - Διαφορετικά, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα.
 - Έπειτα γίνεται έλεγχος για το αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον ρυθμό εκφόρτισης είναι ίσο με το έλλειμα ισχύος. Αν ναι, τότε οι μπαταρίες εκφορτίζονται μέχρι το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης.
 - Αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον ρυθμό εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο από το έλλειμα ισχύος, τότε η εκφόρτιση των μπαταριών θα είναι ίση με το πηλίκο του ελλείματος ισχύος δια το γινόμενο των βαθμών απόδοσης του αντιστροφέα και των μπαταριών.
 - Αν το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα με τον βαθμό απόδοσης των μπαταριών και τον μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης είναι μικρότερο από έλλειμα ισχύος, τότε οι μπαταρίες εκφορτίζονται μέχρι το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης, και η γεννήτρια ντίζελ καλείται να αποδώσει ισχύ ίση με την διαφορά του ελλείματος ισχύος και του γινομένου των βαθμών απόδοσης του αντιστροφέα και των μπαταριών και του ρυθμού εκφόρτισης.

Όλα τα βήματα του αλγορίθμου ελέγχου για κάθε ώρα προσομοίωσης μπορούν να επεξηγηθούν συμπληρωματικά, με το παρακάτω διάγραμμα ροής αλλά και με ολόκληρο τον αλγόριθμο ο οποίος βρίσκεται στο Παράρτημα.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, όπως είναι εμφανές και στο σώμα του αλγορίθμου, το εύρος αναζήτησης που ορίστηκε για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους του φωτοβολταϊκού συστήματος ήταν τα 0, 2, 4, 6, 8 και 10 kW. Το εύρος αναζήτησης για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους της ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος ήταν τα 0, 2, 4, 6, 8 και 10 kW, ενώ το εύρος αναζήτησης που ορίστηκε για την εύρεση του βέλτιστου πλήθους συστοιχιών μπαταριών που θα χρησιμοποιεί το σύστημα ήταν 1, 2, 3 ή 4 συστοιχίες.

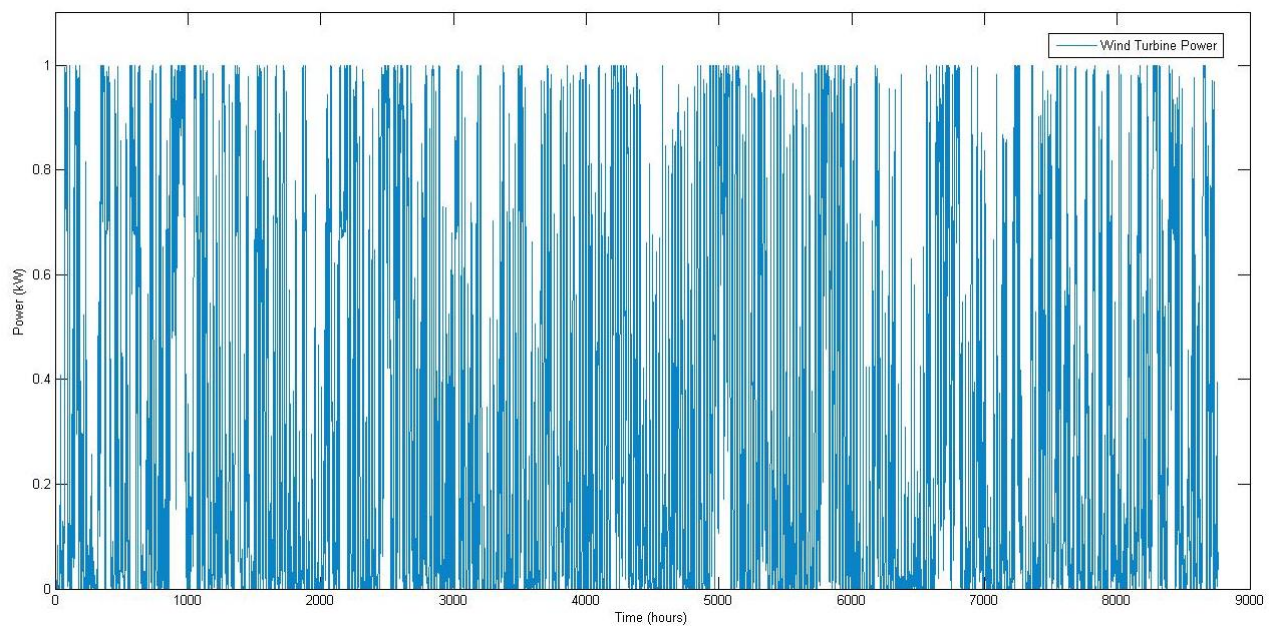




9.3 Προσομοίωση και Αποτελέσματα

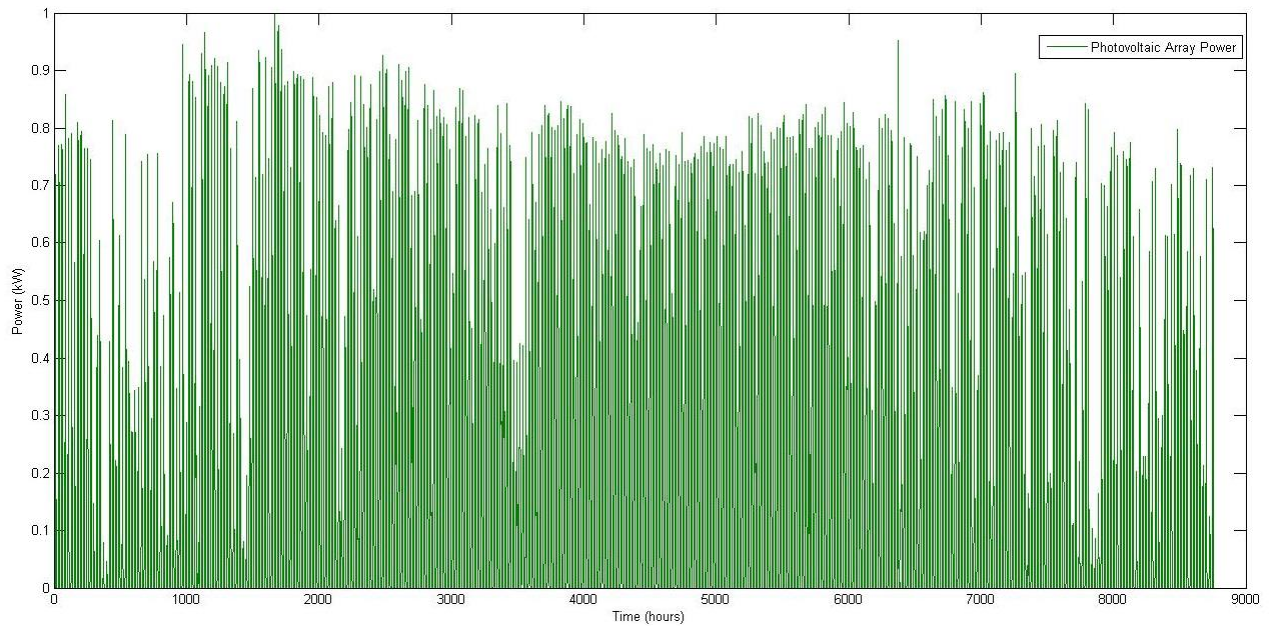
9.3.1 Κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για ανεμογεννήτρια ισχύος 1kW

Για την διεξαγωγή της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για ανεμογεννήτρια ισχύος 1kW έπειτα από μετατροπή των δεδομένων του αιολικού δυναμικού για την περιοχή των Χανίων. Τα δεδομένα αφορούν την ωριαία παραγωγή για ένα ολόκληρο έτος.



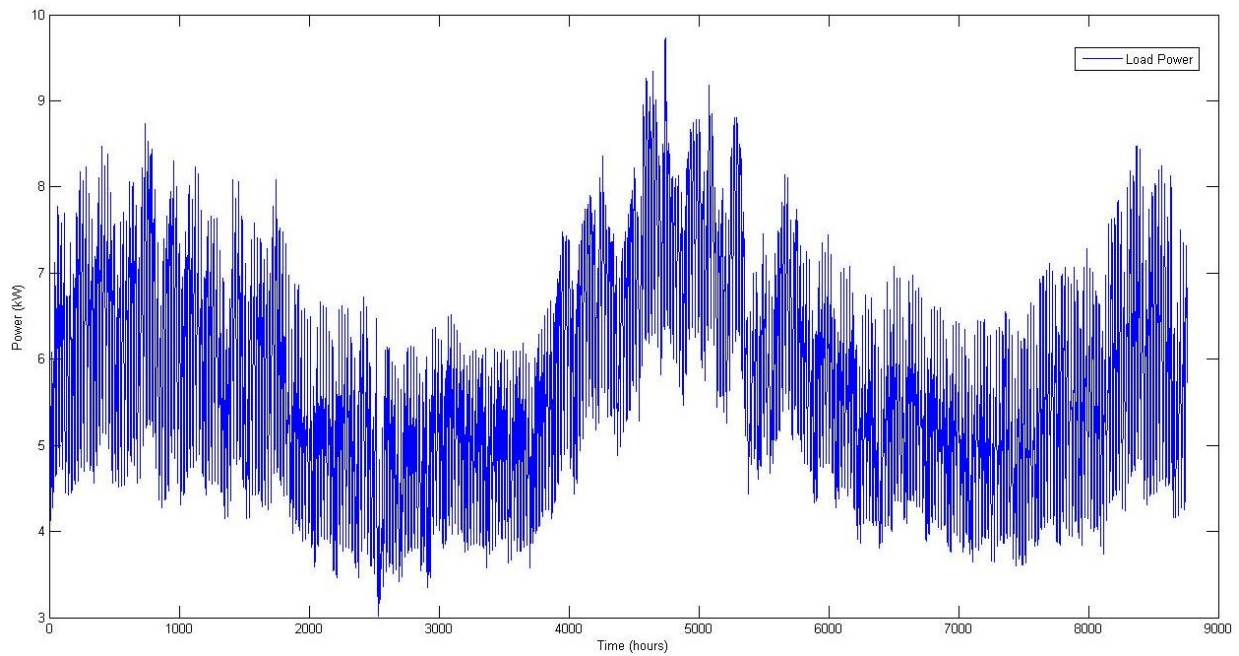
9.3.2 Κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για φωτοβολταϊκό πάνελ ισχύος 1kW

Όπως για το αιολικό δυναμικό, έτσι και για την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκαν κανονικοποιημένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για φωτοβολταϊκό πάνελ ισχύος 1kW έπειτα από μετατροπή των αρχικών δεδομένων για την περιοχή των Χανίων. Τα δεδομένα αφορούν την ωριαία παραγωγή για ένα ολόκληρο έτος.



9.3.3 Δεδομένα φορτίου

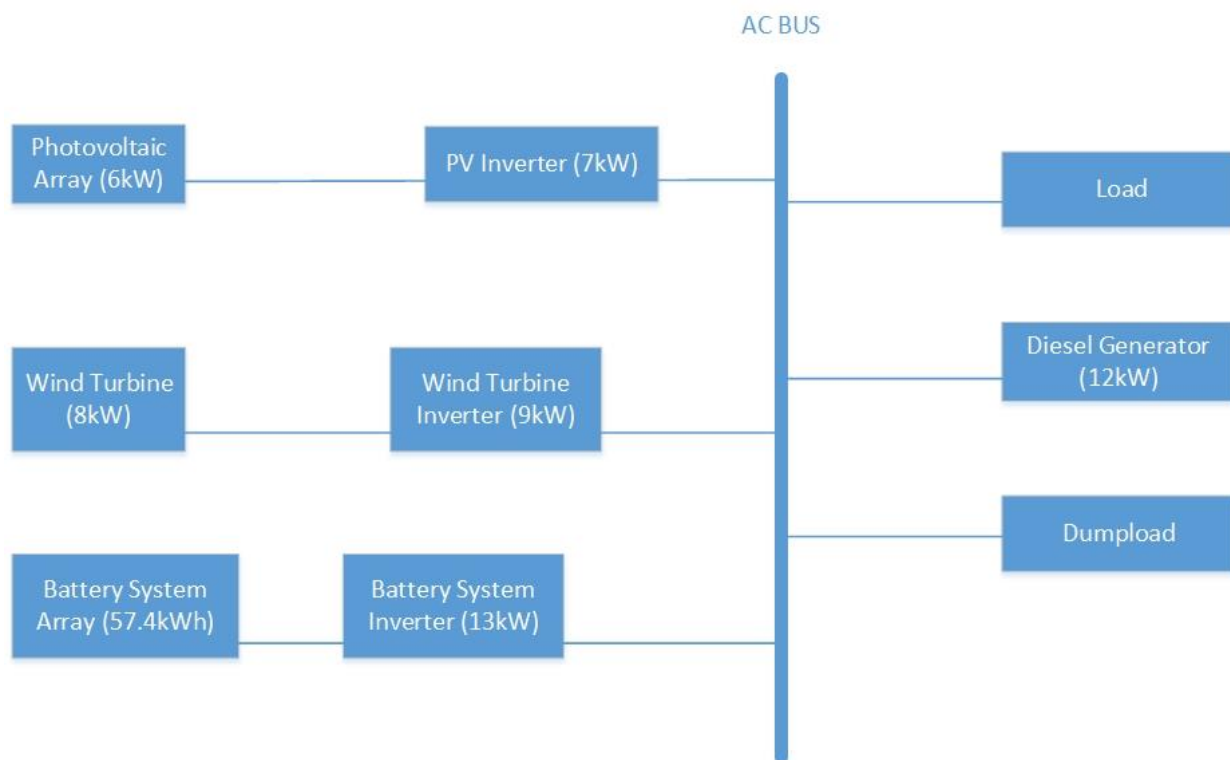
Για την δημιουργία του απαιτούμενου ενεργειακού προφίλ χρησιμοποιήθηκαν κανονικοποιημένα δεδομένα ζήτησης φορτίου, τα οποία αφορούν την ωριαία ζήτηση φορτίου για ένα ολόκληρο έτος.



Η χαμηλότερη τιμή φορτίου ζήτησης είναι 3.015 kW και η υψηλότερη τιμή είναι 9.735 kW

9.3.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Η διαμόρφωση του συστήματος και τα μεγέθη που εξάγονται φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



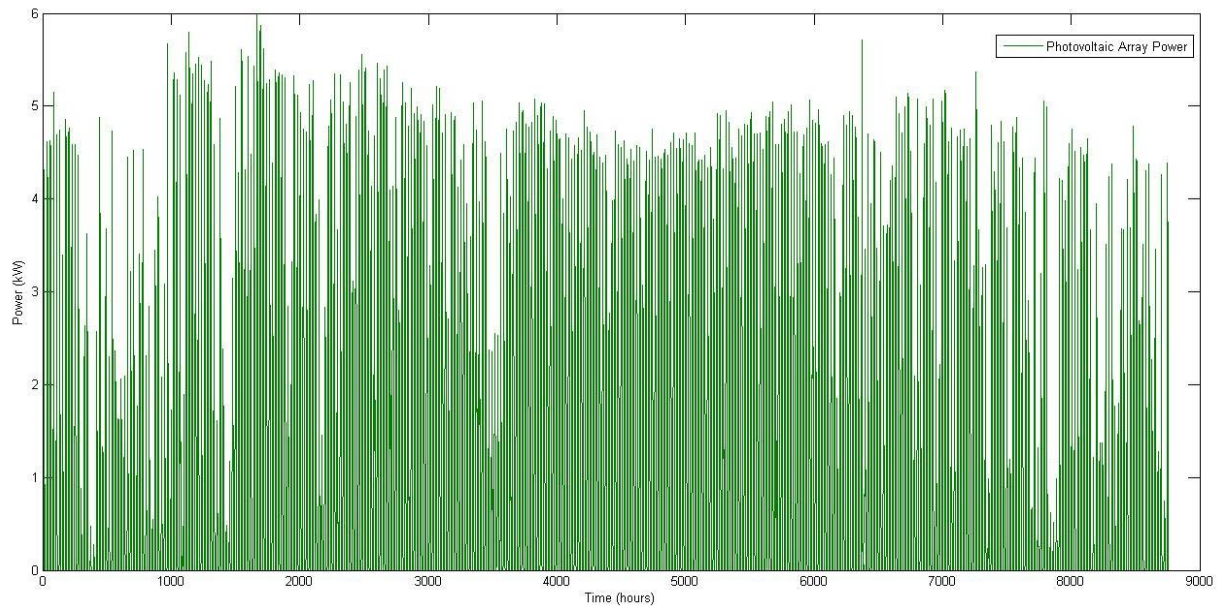
Βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων	6 kW
Βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια	7 kW
Βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος	8 kW
Βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα για την ανεμογεννήτρια	9 kW
Πραγματικό αρχικό κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων	6.000 €

Πραγματικό αρχικό κόστος της ανεμογεννήτριας	20.000 €
Πραγματικό αρχικό κόστος του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών πλαισίων	4.200 €
Πραγματικό αρχικό κόστος του αντιστροφέα της ανεμογεννήτριας	5.400 €
Κόστος εγκατάστασης του συστήματος	2.080 €
Ετήσιο κόστος συντήρησης	520 €
Παρούσα αξία του συνολικού κόστους συντήρησης	6.823 €
Βέλτιστη τιμή για τον αριθμό των συστοιχιών για το σύστημα των μπαταριών	4
Βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα για τις συστοιχίες των μπαταριών	13 kW
Πραγματικό αρχικό κόστος για τον αριθμό των συστοιχιών των μπαταριών	19.200 €
Πραγματικό αρχικό κόστος για τον αντιστροφέα των μπαταριών	7.800 €
Πλήθος των μπαταριών που χρειάστηκαν αλλαγή στην περίοδο προσομοίωσης	0
Παρούσα αξία του κόστους αλλαγής των μπαταριών	0 €
Συνολική ενέργεια φόρτισης μπαταρίας κατά έτος	4.099 kWh
Συνολική ενέργεια εκφόρτισης μπαταρίας κατά έτος	4.111 kWh
Βέλτιστη τιμή για την μέγιστη ονομαστική ισχύ της γεννήτριας ντίζελ	12 kW
Πραγματικό αρχικό κόστος για την γεννήτρια ντίζελ	3.600 €
Παραγωγή Ενέργειας από την γεννήτρια ντίζελ κατά έτος	23.579 kWh

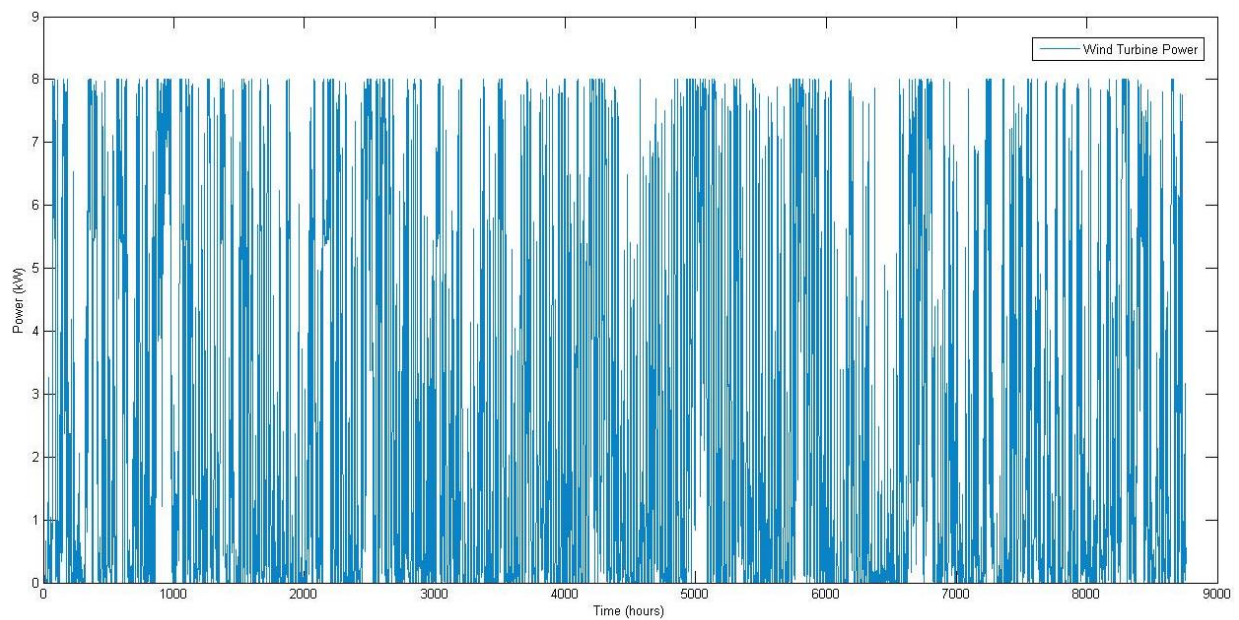
Αριθμός λίτρων καυσίμων που δαπανούνται κατά έτος	6.628 lt
Κόστος κατανάλωσης καυσίμων κατά έτος	7.556 €
Συνολική Παρούσα Αξία του κόστους κατανάλωσης καυσίμων για όλα τα έτη	160.605 €
Ώρες λειτουργίας της γεννήτριας ντίζελ κατά έτος	5.468
Αρχικό Κόστος της Επένδυσης	68.280 €
Συνολική Παρούσα Αξία του Κόστους της Επένδυσης	222.040 €

Για πληρέστερη εικόνα των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει χρήση των παρακάτω γραφημάτων, για τα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία της βέλτιστης διαμόρφωσης του συστήματος και για χρονικό εύρος το ένα έτος.

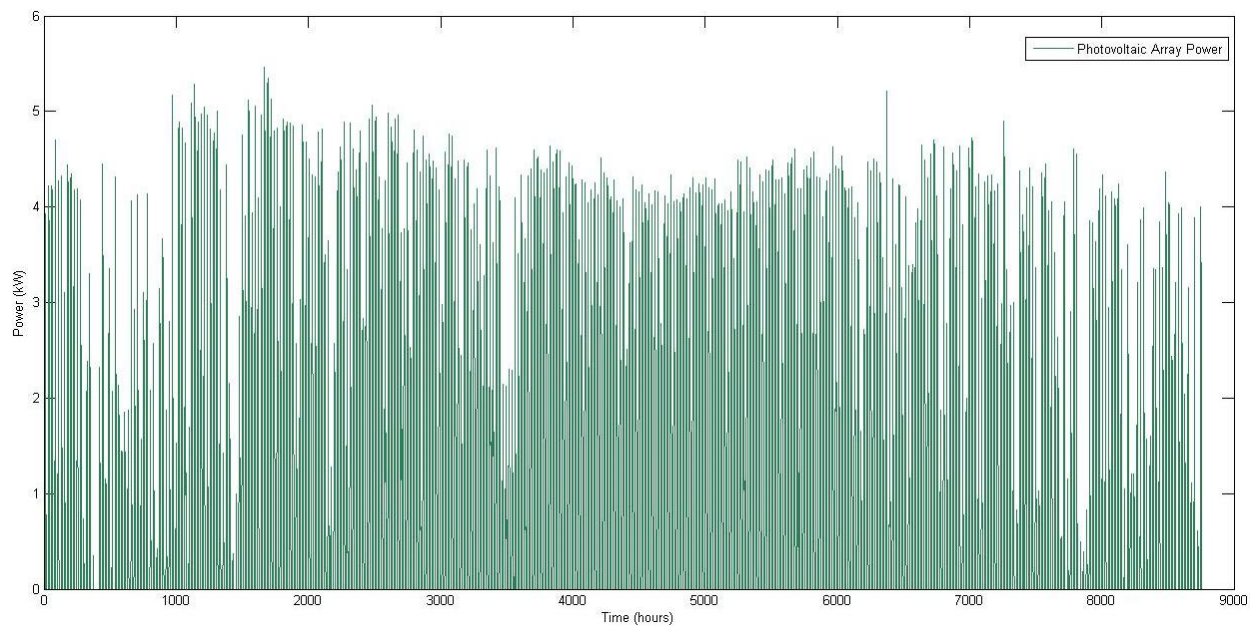
Πραγματική Παραγωγή Ενέργειας από τα Φωτοβολταϊκά Πλαίσια (Απόδοση Ισχύος σε kW)



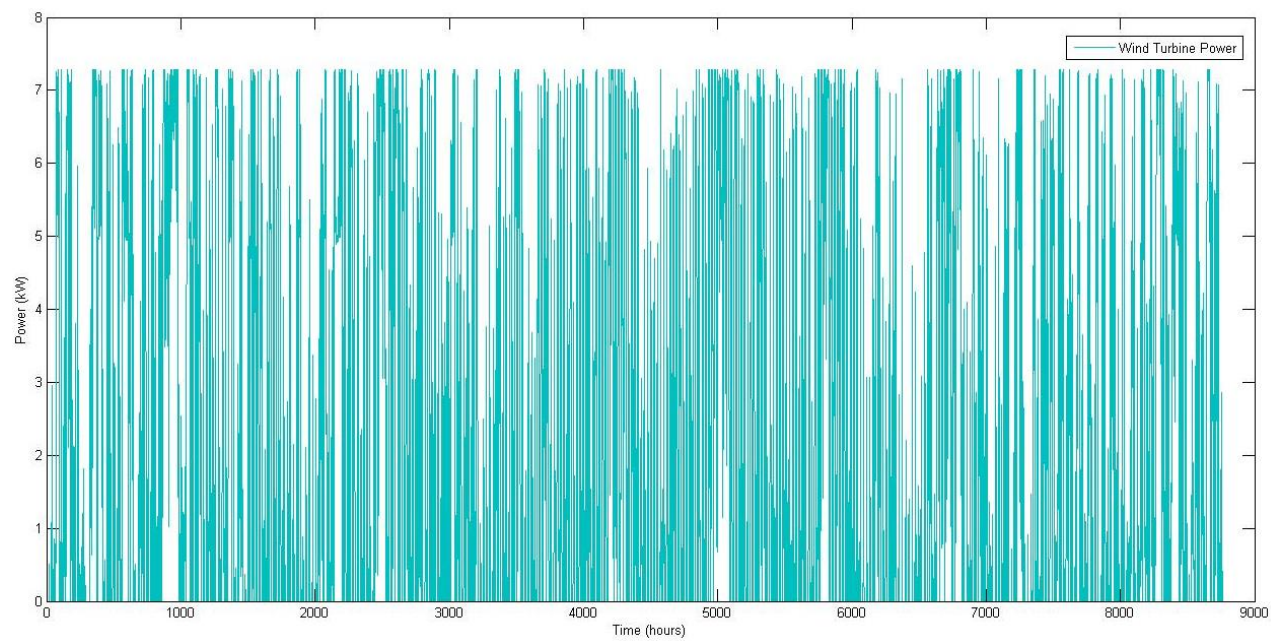
Πραγματική Παραγωγή Ενέργειας από την Ανεμογεννήτρια Μικρής Ισχύος (Απόδοση Ισχύος σε kW)



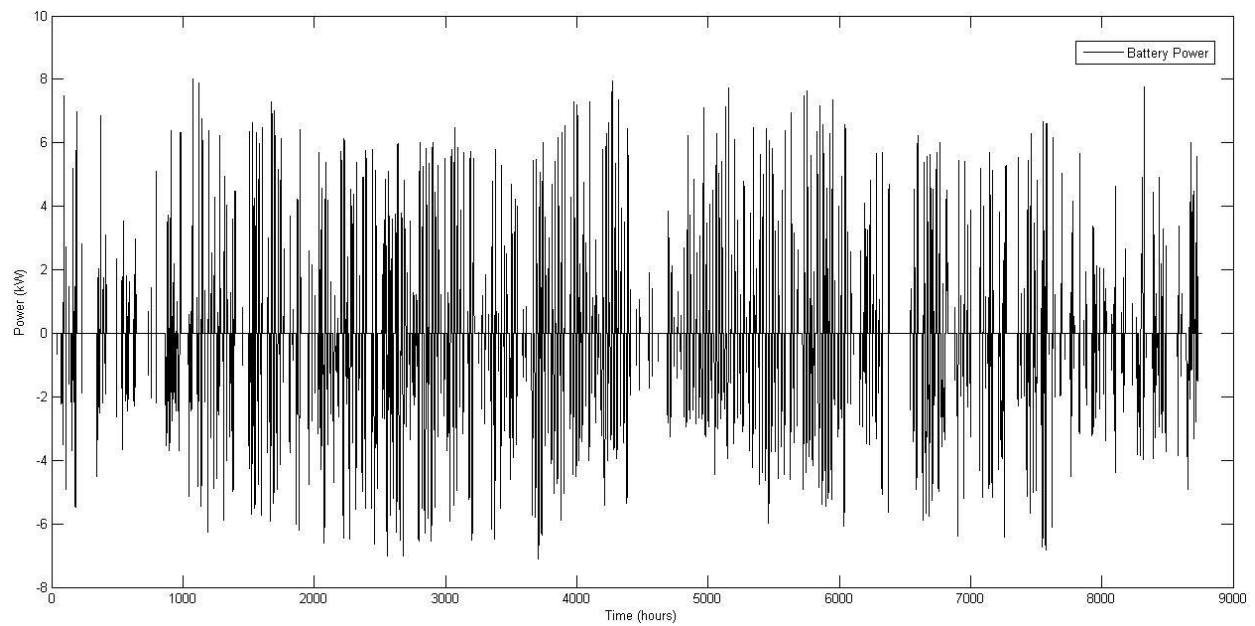
Ισχύς που περνά από τον Αντιστροφέα των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων (kW)



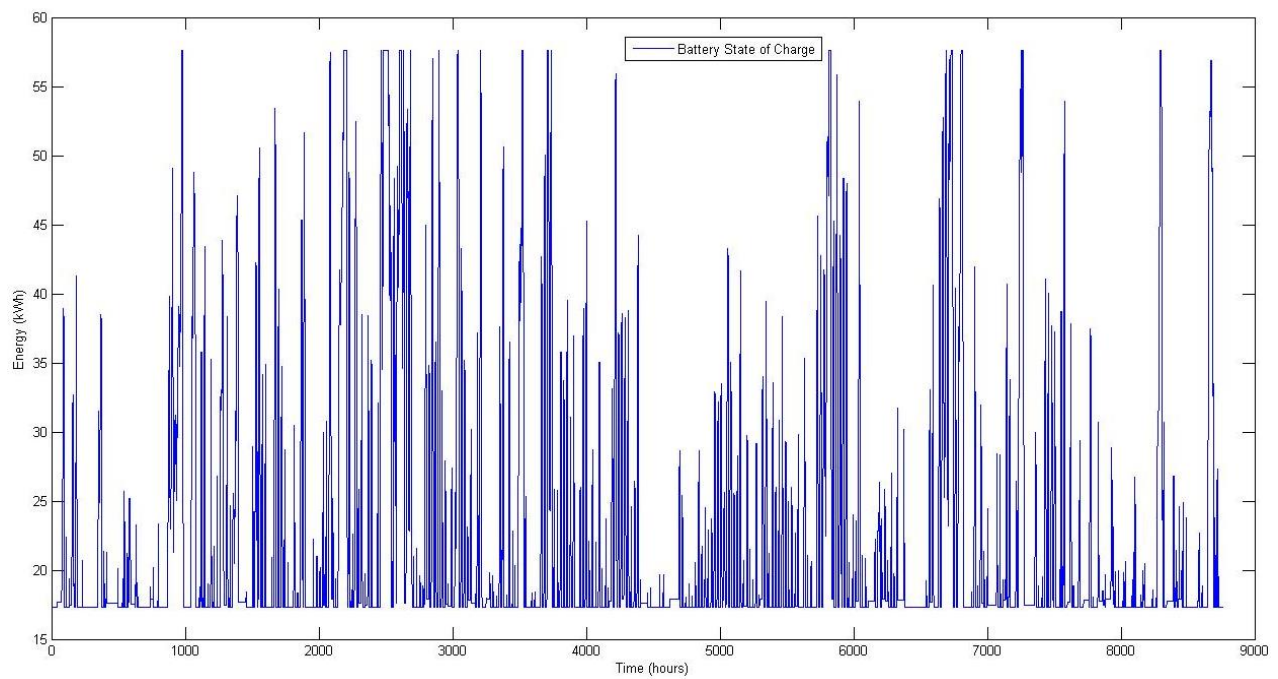
Ισχύς που περνά από τον Αντιστροφέα της Ανεμογεννήτριας (kW)



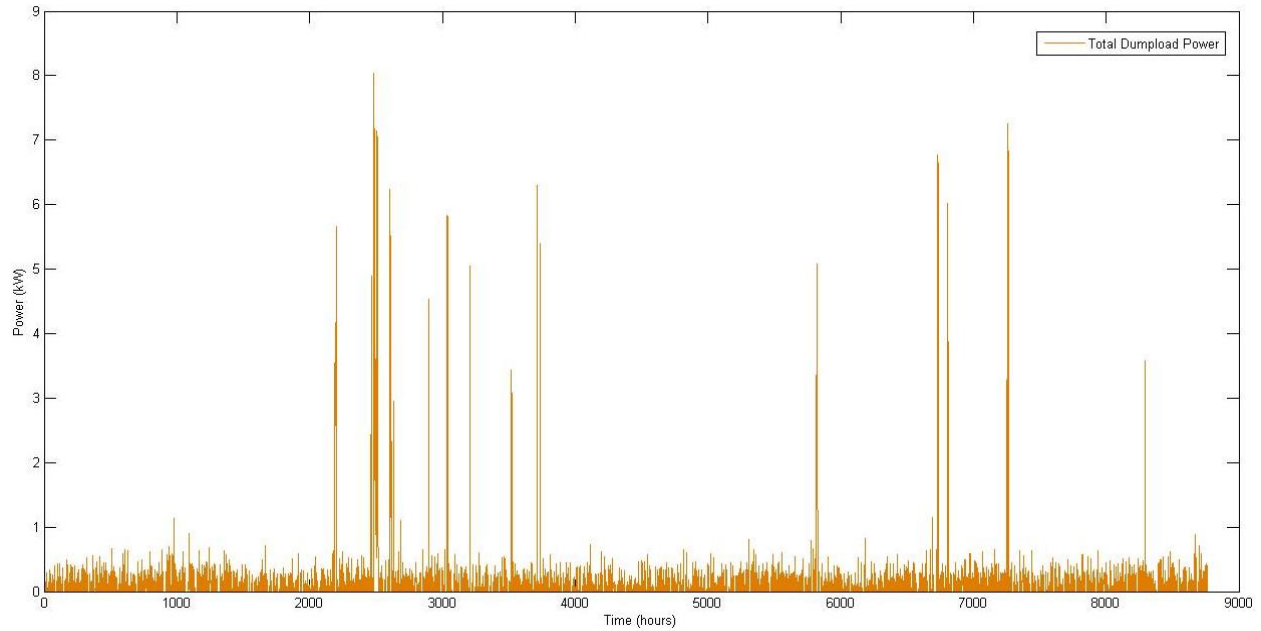
Ισχύς της μπαταρίας (kW)



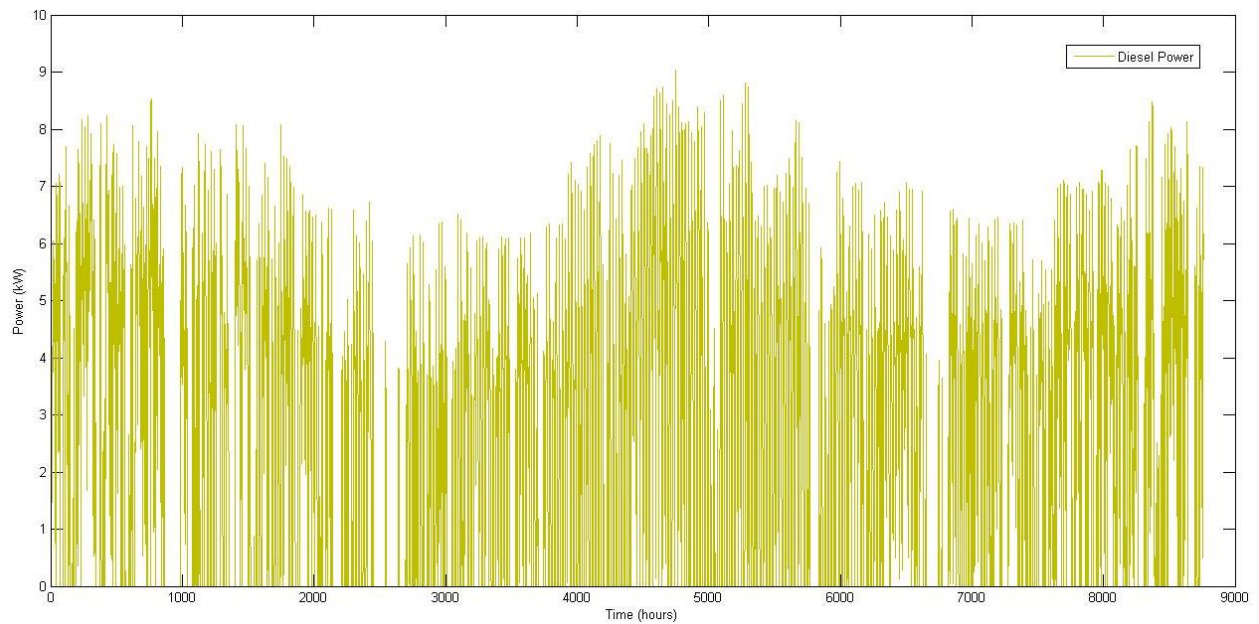
Επίπεδο φόρτισης (kWh)



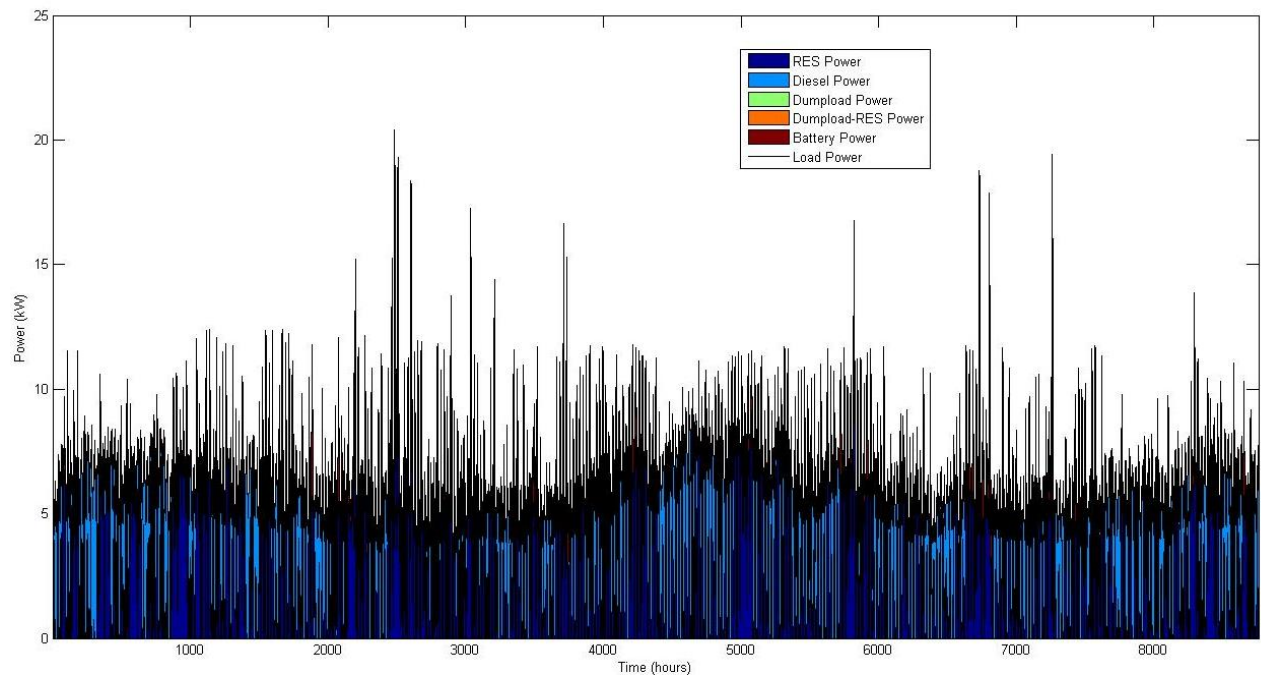
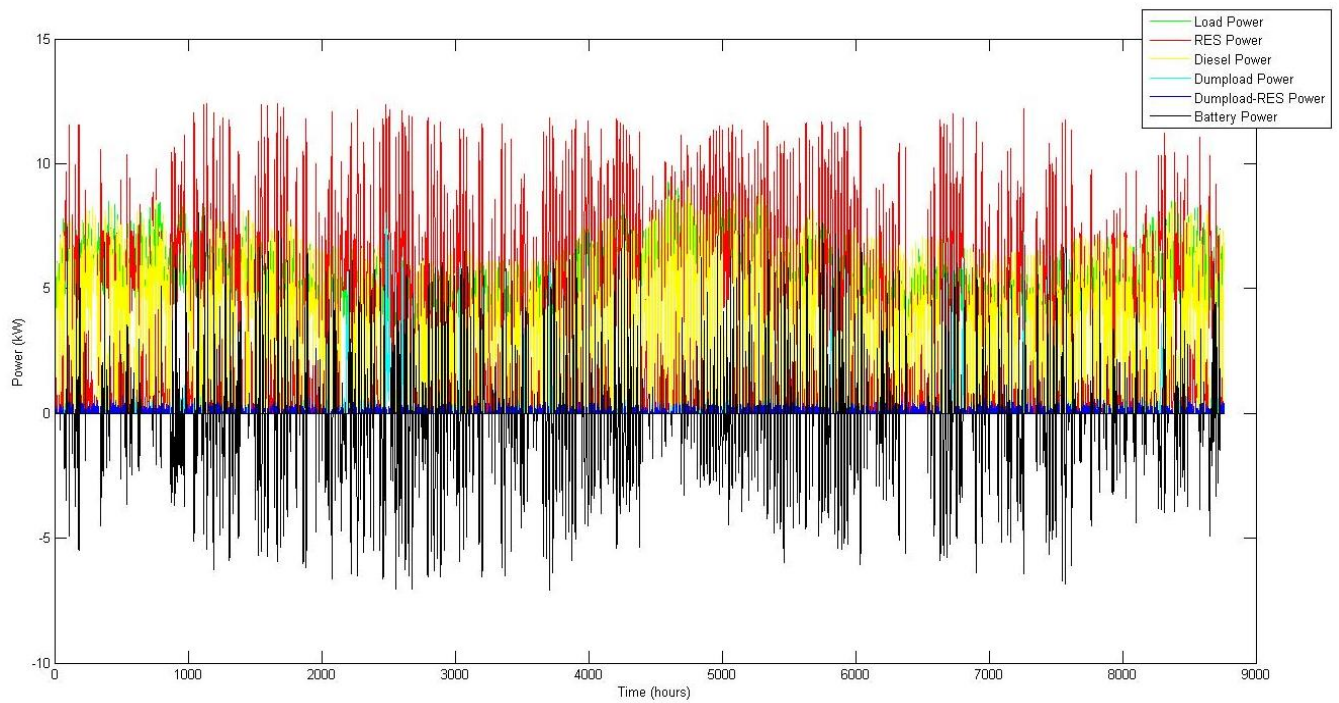
Συνολικό Φορτίο Απόρριψης (kW)



Αποδιδόμενη Ισχύς από την Γεννήτρια Ντίζελ (kW)

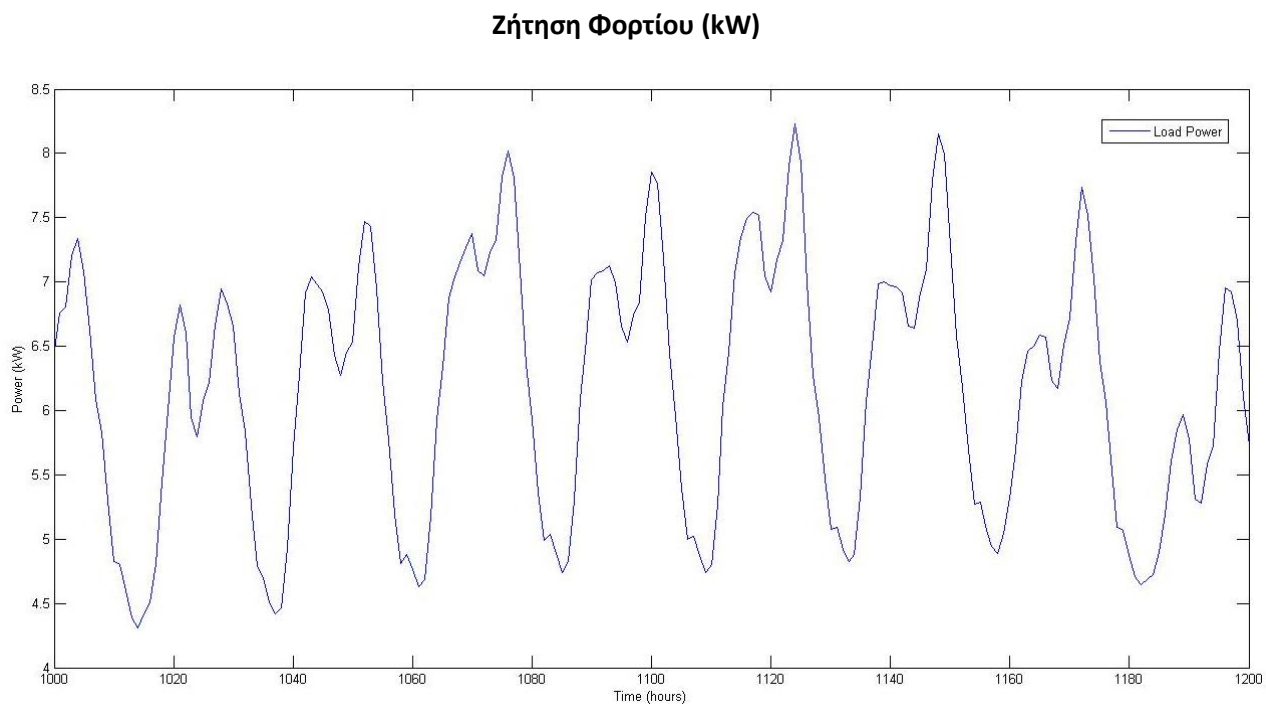


Γραφήματα για το Ισοζύγιο Ισχύος



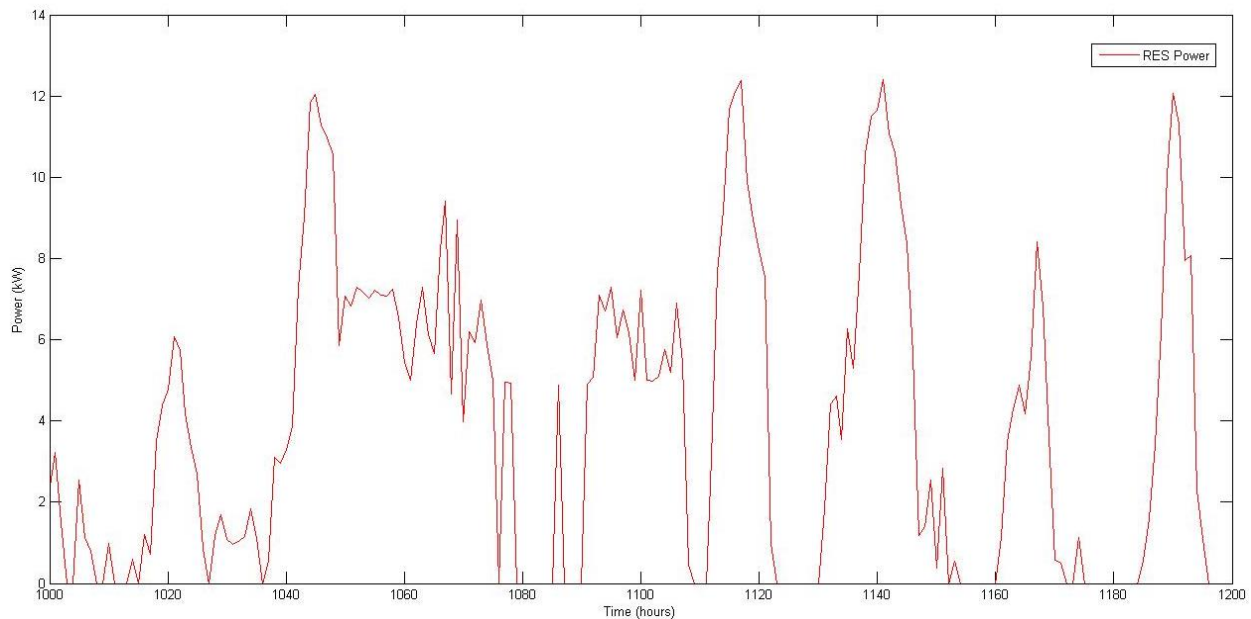
Εξετάζοντας τις συναλλαγές ενέργειας για την βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος και για ορισμένο χρονικό εύρος, από 1000 έως 1200 ώρες, αναπαρίσταται και γραφικά η ικανοποίηση της ζήτησης του φορτίου, αλλά και η ικανοποίηση όλων των τεχνικών περιορισμών του συστήματος και η πραγματοποίηση της επιλεγόμενης στρατηγικής για την φόρτιση και εκφόρτιση των συστοιχιών των μπαταριών και της ένταξης της γεννήτριας ντίζελ στην ηλεκτροπαραγωγή.

Το παρακάτω γράφημα αναπαριστά την ζήτηση του φορτίου.



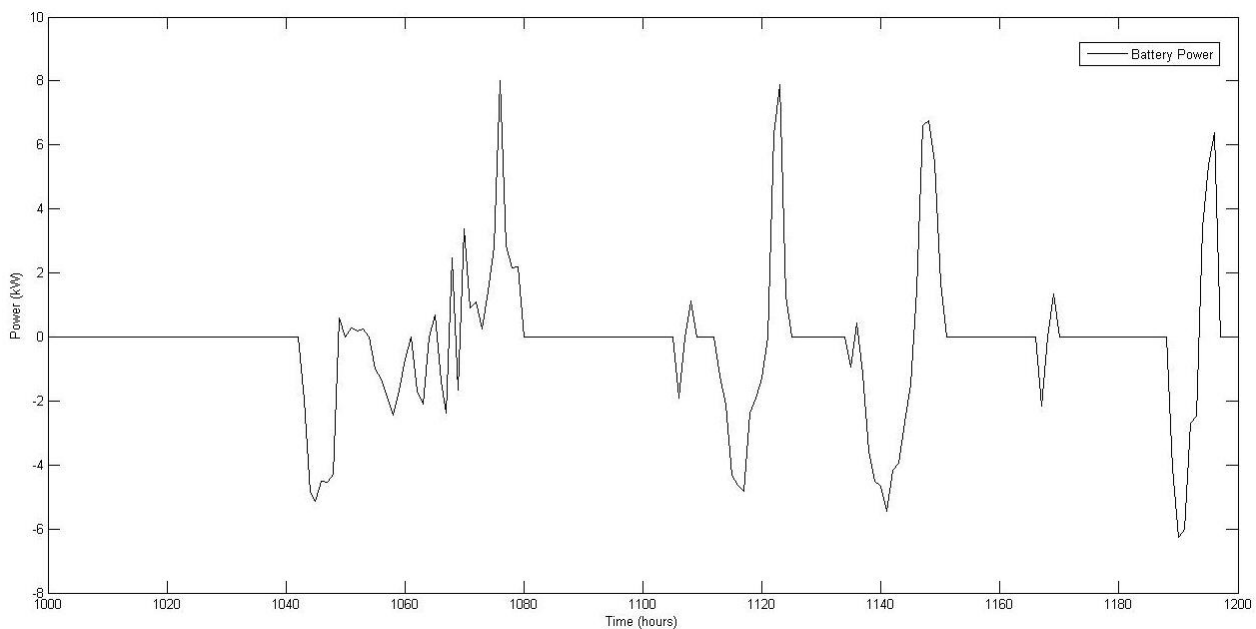
Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνεται η ωριαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες που εκμεταλλεύονται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Ισχύς από τις μονάδες παραγωγής των ΑΠΕ που αποδίδεται στον ζυγό (kW)

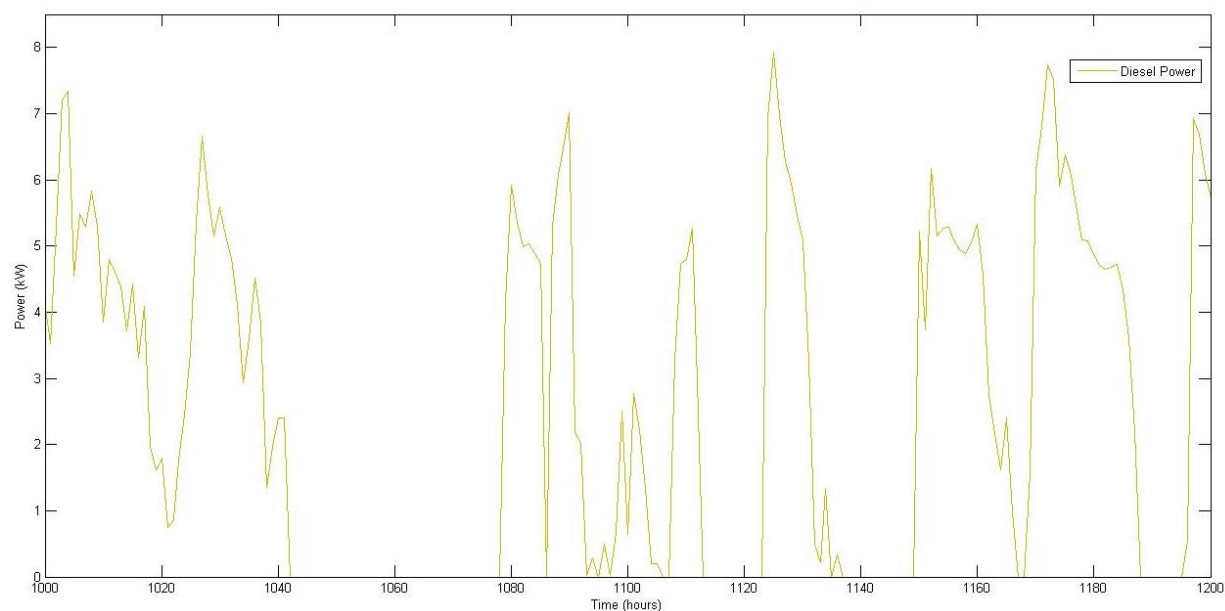


Αν συγκρίνουμε αυτό το γράφημα με τα δύο που ακολουθούν, τα οποία δείχνουν την μεταφορά ενέργειας από την συστοιχία των μπαταριών και την παραγωγή από την γεννήτρια ντίζελ αντίστοιχα, φαίνονται τα σημεία στα οποία η παραγωγή από τις ΑΠΕ δεν μπορεί να καλύψει την ζήτηση του φορτίου και στα οποία γίνεται πρώτα η εκφόρτιση των μπαταριών και έπειτα η ηλεκτροπαραγωγή από την γεννήτρια ντίζελ.

Ισχύς της μπαταρίας (kW)

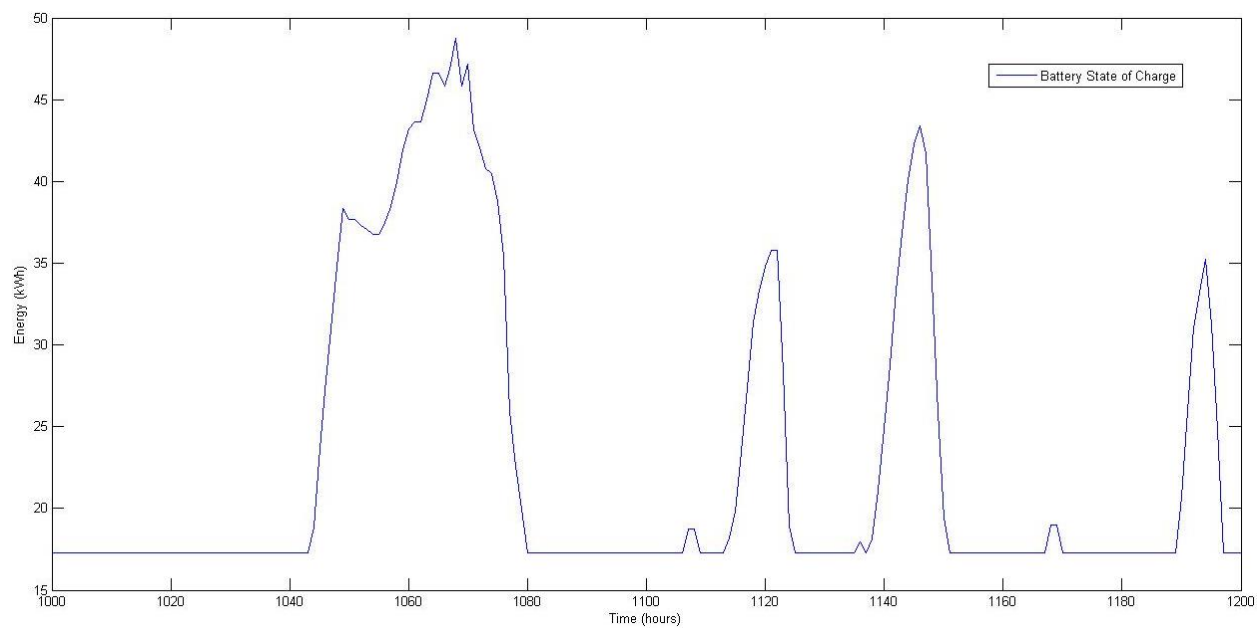


Αποδιδόμενη Ισχύς από την Γεννήτρια Ντίζελ (kW)



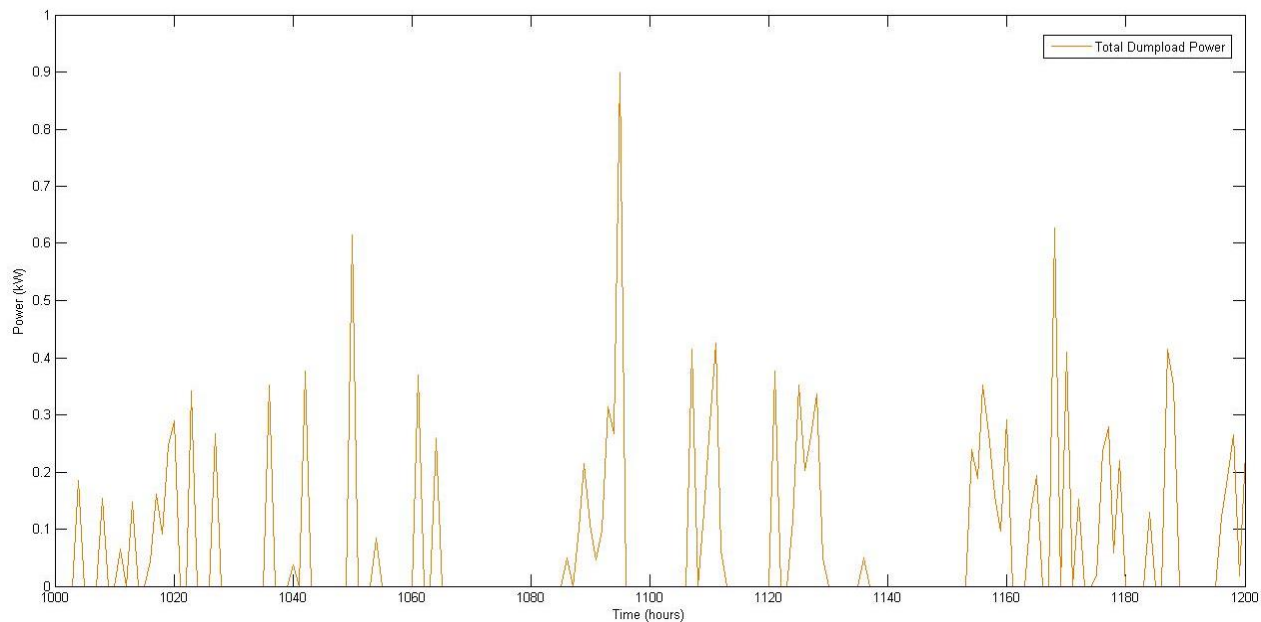
Η κατά καιρούς φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών μπορεί να φανεί ακόμα πιο παραστατικά από το ποσό της ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη κάθε ώρα στην μπαταρία.

Επίπεδο φόρτισης (kWh)

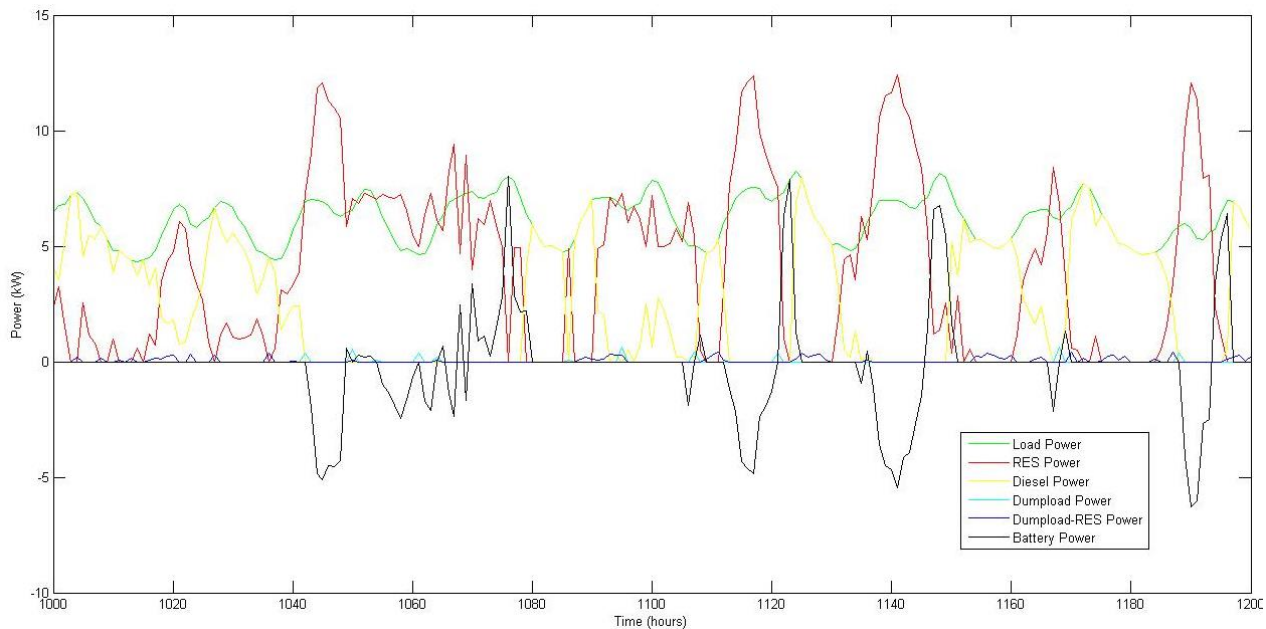


Η ανάγκη για απόρριψη ενέργειας λόγω περίσσειας ισχύος της παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ ή λόγω ελλειπούς παραγωγής σε σύγκριση με την ονομαστική μέγιστη ισχύ των αντιστροφών συνεχούς προς εναλλασσόμενο ρεύμα, φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.

Συνολικό Φορτίο Απόρριψης (kW)



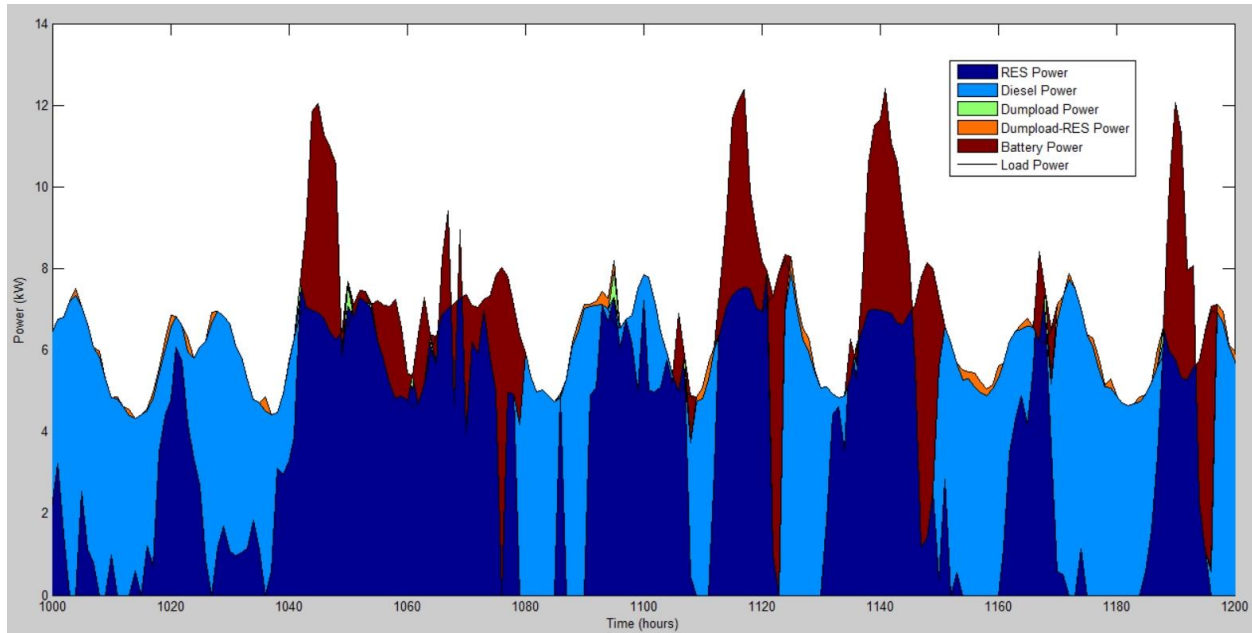
Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Χρονοσειρών για την Ισχύ όλων των μερών του συστήματος



Στο διάγραμμα, το άθροισμα των Dumpload Power και Dumpload-RES Power, είναι το συνολικό φορτίο απόρριψης που αναπαρίσταται στο προηγούμενο διάγραμμα.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται συγκεντρωτικά η ικανοποίηση της ζήτησης του φορτίου από κάθε πηγή ηλεκτροπαραγωγής, αλλά και η φόρτιση των μπαταριών και η απόρριψη του φορτίου για τις συναλλαγές ενέργειας, για κάθε ώρα για εύρος από 1000 έως και 1200 ώρες.

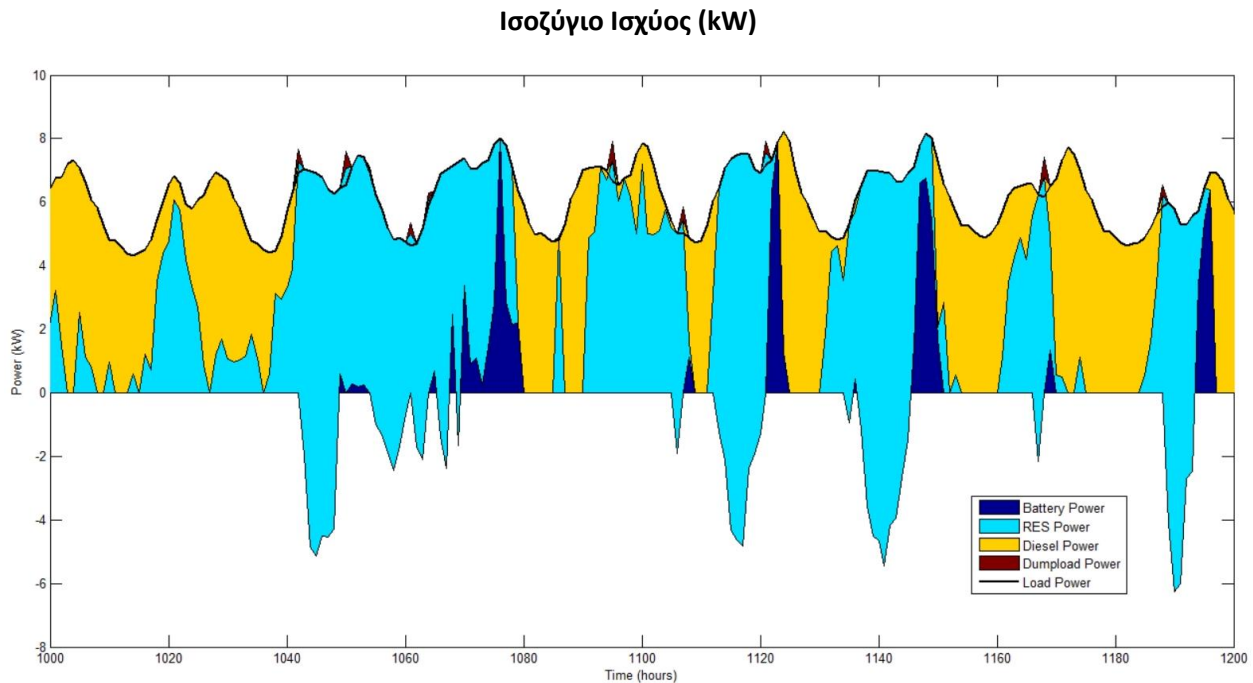
Συγκεντρωτικό Διάγραμμα (kW)



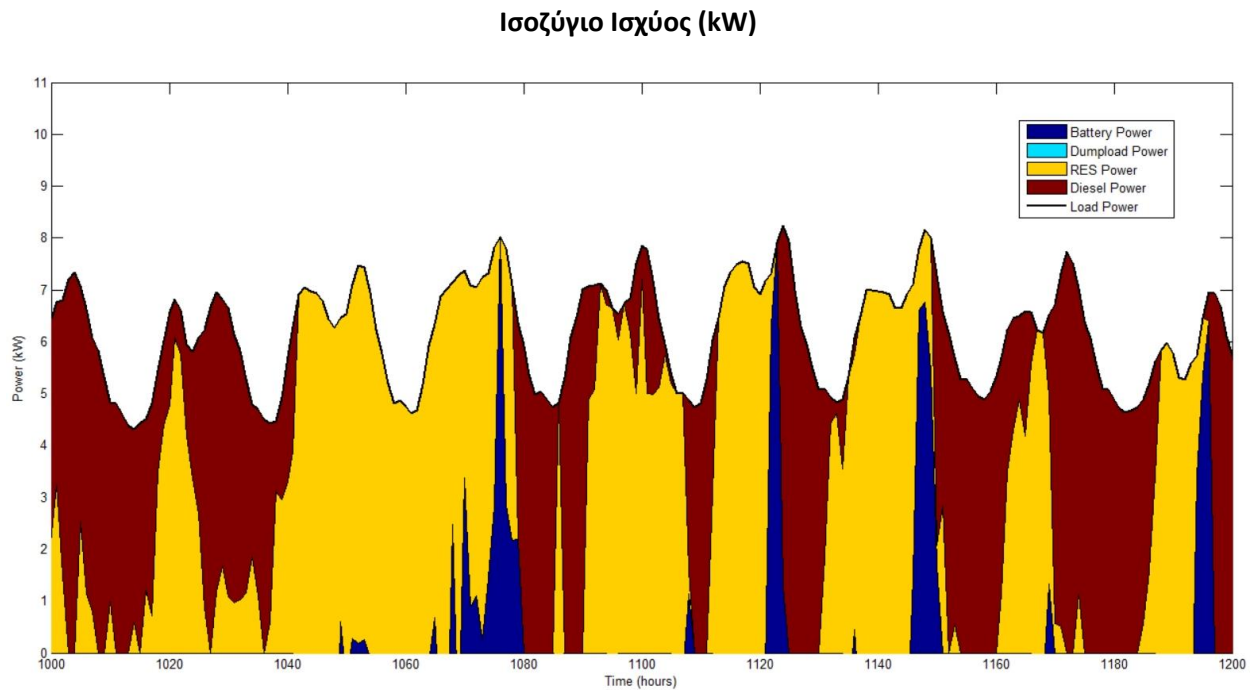
Στο γράφημα, με μαύρο χρώμα είναι το φορτίο ζήτησης το οποίο καλούνται όλες οι μονάδες να καλύψουν, με σκούρο μπλε χρώμα αναπαρίσταται η παραγωγή ενέργειας από τις μονάδες που εκμεταλλεύονται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, με γαλάζιο χρώμα η παραγωγή από την γεννήτρια ντίζελ (όταν η παραγωγή των ΑΠΕ είναι ελλιπής και οι μπαταρίες δεν μπορούν να καλύψουν την διαφορά), με πράσινο αναπαρίσταται η απόρριψη φορτίου όταν η περίσσεια της παραγωγής των ΑΠΕ δεν επαρκεί για να φορτίσει τις μπαταρίες (η περίσσεια είναι μικρότερη από το 5% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα των μπαταριών), όταν δεν μπορούν να φορτιστούν περισσότερο οι συστοιχίες των μπαταριών (λόγω χωρητικότητας) ή όταν η ισχύς αυτή είναι μεγαλύτερη από το 100% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα των μπαταριών, με πορτοκαλί χρώμα η απόρριψη φορτίου αποκλειστικά από τις ΑΠΕ όταν η ισχύς τους είναι μικρότερη από το 5% των αντίστοιχων αντιστροφέων για την ανεμογεννήτρια και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η καφέ απόχρωση αντιπροσωπεύει την συμμετοχή των μπαταριών στην κάλυψη του φορτίου ζήτησης (εκφόρτιση) όταν βρίσκεται κάτω από την καμπύλη του φορτίου ζήτησης, ενώ όταν την υπερβαίνει αντιπροσωπεύει την απορρόφηση της ενέργειας από την περίσσεια της παραγωγής της ισχύος των μονάδων ΑΠΕ (φόρτιση).

(Η απόρριψη φορτίου αποκλειστικά από τις ΑΠΕ η οποία συμβολίζεται με πορτοκαλί χρώμα, δεν αποτελεί μέρος του ισοζυγίου ισχύος)

Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω δύο γραφήματα, στα οποία φαίνεται η κάλυψη του φορτίου ζήτησης.



Στο γράφημα, το μαύρο χρώμα αφορά και πάλι το φορτίο, το κίτρινο χρώμα την παραγωγή από την γεννήτρια ντίζελ (όταν η παραγωγή των ΑΠΕ είναι ελλιπής και οι μπαταρίες δεν μπορούν να καλύψουν την διαφορά). Με καφέ αναπαρίσταται η απόρριψη φορτίου όταν η περίσσεια της παραγωγής των ΑΠΕ δεν επαρκεί για να φορτίσει τις μπαταρίες (η περίσσεια είναι μικρότερη από το 5% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα των μπαταριών), όταν δεν μπορούν να φορτιστούν περισσότερο οι συστοιχίες των μπαταριών (λόγω χωρητικότητας) ή όταν η ισχύς αυτή είναι μεγαλύτερη από το 100% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα των μπαταριών. Η σκούρα μπλε απόχρωση αντιπροσωπεύει την συμμετοχή των μπαταριών στην κάλυψη του φορτίου ζήτησης (εκφόρτιση). Τέλος, με γαλάζιο χρώμα αναπαρίσταται η παραγωγή ενέργειας από τις μονάδες που εκμεταλλεύονται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και για κάθε ώρα, αν η παραγωγή αυτή ξεκινά από τα αρνητικά, σημαίνει ότι εκτός από την κάλυψη του φορτίου, οι μονάδες παραγωγής από ΑΠΕ αναλαμβάνουν να φορτίσουν και τις μπαταρίες, για το ποσό αυτό της ενέργειας που βρίσκεται κάτω από τον οριζόντιο άξονα.



Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται σε απόλυτο βαθμό η κάλυψη του φορτίου ζήτησης (αναπαρίσταται με μαύρο χρώμα) από τις τρεις πηγές του συστήματος, από την συστοιχία των μπαταριών (με σκούρο μπλε χρώμα), από το σύστημα των μονάδων που εκμεταλλεύονται τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (με κίτρινο χρώμα) και από την Γεννήτρια Ντίζελ (με καφέ χρώμα). Το γράφημα αυτό προκύπτει όταν για κάθε ώρα αφαιρείται από τις συναλλαγές ενέργειας του συστήματος το φορτίο απόρριψης, ώστε να ληφθεί η περιοχή κάλυψης του φορτίου ζήτησης.

Βιβλιογραφία

1. G.A. Rampinelli - A. Krenzinger - F. Chenlo Romero, Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier (2014)
2. Manwell J F, Hybrid energy systems, Encyclopedia of Energy, Vol. 3 (2004)
3. Bolund B. - Bernhoff H. - Leijon M., Flywheel energy and power storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:2, Elsevier (2007)
4. Katsaprakakis D Al. - Christakis D G. - Zervos A. - Papantonis D. - Voutsinas, Pumped storage systems introduction in isolated power production systems, Renewable Energy, 33, Elsevier (2008)
5. Semadeni M, Energy storage as an essential part of sustainable energy systems, CEPE Working Paper (2003)
6. Kopera J J C, Inside the Nickel Metal Hydride Battery, Cobasys (2004)
7. Chen H. - Cong T N. - Yanga W. - Tan C. - Li Y. - Ding Y., Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in Natural Science, 19:3, Elsevier (2009)
8. Hadjipaschalis I. - Poulikkas A. - Efthimiou V., Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:6-7, Elsevier (2009)
9. Najjar Y S H. - Zaamout M S., Performance analysis of compressed air energy storage (CAES) plant for dry regions, Energy Conversion and Management, 39:15, Elsevier, (1998)
10. Kaldelis J K. - Zafirakis D. - Kavadias K., Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:2, Elsevier (2009)
11. Berndt D., Valve-regulated lead-acid batteries, Journal of Power Sources, 100:1-2, Elsevier, 29-46 (2001)
12. Divya K C. - Østergaard J., Battery energy storage technology for power systems - An Overview, Electric Power Systems Research, 79:4, Elsevier, 511-520 (2009)
13. Baring-Gould I. - Dabo M., Technology, Performance and Market Report of Wind-Diesel Application for Remote and Island Communities, European Wind Energy Conference, Marseille, France (March 2009)
14. Wen Z. - Cao J. - Gu Z. - Xu X. - Zhang F. - Lin Z., Research on sodium sulfur battery for energy storage, Solid State Ionics, 179:27-32, Elsevier, 1697-1701 (2008)
15. Dumancic D., Flow Batteries: Status and Potential, Thesis, Mälardalen University of Sweden, Department of Public Technology (2011)
16. Singh P. - Jonshagen B., Zinc-bromine battery for energy storage, Journal of Power Sources, 35:4, Elsevier, 405-410 (1991)
17. Jossen A. - Sauer D U., Advances in Redox-Flow Batteries, First International Renewable Energy Storage Conference, 30-31 October, Gelsenkirchen, Germany (2006)
18. B.K. BOSE, "Global Warming: Energy, Environmental Pollution and the Impact of Power Electronics", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 6-17 (March 2010)

19. Antonio Luque, Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd (2003)
20. David Linden, Thomas Reddy, Handbook of Batteries, Mc Graw – Hill, 3rd edition (2001)
21. IPSI Diesel Generator Sets 10kW through 30kW, Integrated Power Systems International Inc
22. Maria Teresa Penella – Lopez, Manuel Gasulla – Forner, Powering Autonomous Sensors: An Integral Approach With Focus On Solar And RF Energy Harvesting, Springer (2011)
23. DOE Handbook, Primer on Lead Acid Storage Batteries, Department of Energy, United States of America (09/1995)
24. H.A. Kiehne, Battery Technology Handbook, Marcel Dekker Inc, 2nd edition (2003)
25. Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi “Wind Energy Handbook”, John Wiley & Sons, 1st edition (November 2001)
26. Duffie, J. A. - Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 2η Έκδοση, Wiley, New York (1991)
27. Tomas Markvart - Luis Castaner, Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications, 2η Έκδοση, Elsevier (2003)
28. Δημήτριος Νομίδης «Αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στα νησιά του νοτίου Αιγαίου» Δελτίο Π.Σ.Δ.Μ.- Η, Νοέμβριος 1999 σ. 62-63 & Δεκέμβριος 1999 σ. 42-53
29. Αντώνη Αλεξανδρίδη «Τεχνολογίες ελέγχου στα αιολικά συστήματα», Πανεπιστημιακές εκδόσεις
30. Σ.Τ.Εφ. - Τμήμα μηχανολογίας Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Σημειώσεις εργαστηρίου, Ηράκλειο 2005
31. Κ.Καγκαράκης, « Φωτοβολταϊκή τεχνολογία », Εκδόσεις Συμμετρία (1992)
32. ΚΑΠΕ, Οδηγός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ (2001)
33. Tomas Markvart, « Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια », Εκδόσεις ΙΩΝ (2003)
34. Μηλιώνης Αλέξανδρος – Γεώργιος, Ανάλυση και διαχείριση ρίσκου σε έργα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης - Σχολή Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ (2014)
35. Μαρούδας Διονύσιος, Συγκριτική ανάλυση αιολικών συστημάτων και έλεγχος ισχύος σε σύστημα με ΑΜΔΤ (Ασύγχρονη Μηχανή Διπλής Τροφοδοσίας), Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (2008)
36. Γκίκας Δημήτριος, Δημιουργία αρχείου ανεμολογικών δεδομένων και ανάπτυξη προγράμματος υπολογισμού καμπυλών Weibull για τη διαχείριση της αιολικής ενέργειας, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (2011)
37. Γαρίνη Ευδοξία, Ανάλυση Διαθεσιμότητας και Βαθμού Χρησιμοποίησης Αιολικών Συστημάτων, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (2012)
38. Τετελένης Στέφανος, Προσδιορισμός Παραμέτρων Γήρανσης Φωτοβολταϊκών Στοιχείων, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (2011)

39. Σφακιανάκης Κωνσταντίνος, Εξομοίωση υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας συνδεδεμένου σε δίκτυο υψηλής τάσης, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (2009)
40. Καλογεράκης Γεώργιος, Μελέτη Εγκατάστασης και Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Πάρκου 80KW, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης (2013)
41. Δανιήλ Νικόλαος, Μοντελοποίηση μικροδικτύου και ένταξη αυτού στην αγορά ενέργειας με χρήση ευφυούς πράκτορα, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (2011)
42. Τσιουμπρή Ελένη, Συσσωρευτές στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα – Αντιμετώπιση των συνηθισμένων προβλημάτων των συσσωρευτών μολύβδου οξέως στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (2012)
43. Παπασταματάκη Αντωνία, Περιγραφή, προσομοίωση και βέλτιστη διαστασιολόγηση υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή των Χανίων, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στην Επιχειρησιακή Έρευνα (2014)
44. Παπαδόπουλος Αθανάσιος – Τοσκάνο Αλέξανδρος Σαβέριο, Προσδιορισμός της βέλτιστης ισχύος αντιστροφών σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με σύστημα δύο αξόνων, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (2011)
45. Παγγέλα Άννα – Τσακνάκη Σεβαστή, Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για τροφοδότηση κατοικίας, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (2012)
46. Βρεττός Ευάγγελος, Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (2010)
47. Μιχαήλ Αντωνιάκος, Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Τεχνολογίες Υδρογόνου, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (2010)
48. Σαραφιανός Δ. - Σειραγάκης Μ., Τεχνοοικονομική μελέτη και σύγκριση υβριδικών συστημάτων. Εφαρμογή σε αυτόνομη κατοικία, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (2009)

49. Καπανταϊδάκη Ε. - Τσούτσος Θ., Ανάλυση κύκλου ζωής αιολικών συστημάτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος (2006)
50. Τάσσιου Ι., Αποτίμηση του ρόλου των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (2005)
51. Κατσαπρακάκης Γεώργιος, Μοντελοποίηση και Διαστασιολόγηση Υβριδικού Ενεργειακού Συστήματος για Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στη Νήσο Ντία, Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι. Ηρακλείου, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας (2011)
52. Γκατζής Αθανάσιος – Κατριάδης Ιωάννης, Μέτρηση βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων και μελέτη της εξάρτησής του από την θερμοκρασία, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (2008)
53. Εύα Παρασκευαδάκη - Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π., Ανεμογεννήτριες Μικρής Ισχύος – Μέρος Ι, electroepistimi.blogspot.com
54. Εύα Παρασκευαδάκη - Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π., Ανεμογεννήτριες Μικρής Ισχύος – Μέρος ΙΙ, electroepistimi.blogspot.com
55. Denholm P. - Kulcinski G L., Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems, *Energy Conversion and Management*, 45:13-14, Elsevier, 2153-2172 (2004)
56. Εύα Παρασκευαδάκη - Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π. , Μπαταρίες μολύβδου οξέως για Φ/Β Συστήματα, electroepistimi.blogspot.com
57. Εύα Παρασκευαδάκη - Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π. , Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαϊσίων, electroepistimi.blogspot.com
58. Εύα Παρασκευαδάκη - Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π. , Αντιστροφείς Φ/Β συστημάτων, electroepistimi.blogspot.com
59. Μηνιαίο Τεχνικό Περιοδικό: Τεχνική Εκλογή
60. www.smallwindindustry.org
61. Battery University: http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions
62. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy: www1.eere.energy.gov/solar - <http://energy.gov/eere/solarpoweringamerica/solar-powering-america-home>
63. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας: <http://www.cres.gr>
64. Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας: <http://www.ypeka.gr>
65. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7f.html>
66. Photovoltaic basics, www.solarwatt.de
67. http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cell
68. <http://chuck-wright.com/SolarSprintPV/SolarSprintPV.html>

```

number_of_runs=0;
pv_power=zeros(144,1);
wt_power=zeros(144,1);
number_of_batteries=zeros(144,1);
TC=zeros(144,1);

for pv = [0, 2, 4, 6, 8, 10]
    for pw = [0, 2, 4, 6, 8, 10]
        for num_bt = [1, 2, 3, 4]

number_of_runs=number_of_runs+1;
pv_power(number_of_runs)=pv;
wt_power(number_of_runs)=pw;
number_of_batteries(number_of_runs)=num_bt;

filename = 'Ppv_max33kW.xlsx';
ppv=xlsread(filename);
sz_ppv=size(ppv);

filename = 'Pwt_max40kW.xlsx';
pwt=xlsread(filename);
sz_pwt=size(pwt);

filename = 'Load.xlsx';
Load=xlsread(filename);
size_Load=size(Load);

z=0;

max_inv_power_ppv = ceil(1.1* pv);

max_inv_power_pwt = ceil(1.1* pw);

starting_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
starting_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

fortio=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
DIESEL=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
BATTERY=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

inv_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
ppv_usage=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inverter_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inv_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
real_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

inv_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
pwt_usage=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inverter_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inv_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
real_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

```

```

APE=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

inv_bt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inverter_bt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inv_bt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

DUMpload=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

DUMpload_APE=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

TBD=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

Isozygio=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

state=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

Total_Dumpload=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

for i = 1:size_Load(1,1)
for j = 1:size_Load(1,2)
if z < sz_ppv(1,1)
    z=z+1;
fortio(z)= Load(i,j);
end
end
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    fortio(i) = fortio(i) / 1000;
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    starting_ppv(i)= ppv(i) / 33.4640;
    ppv(i) = ppv(i) / 33.4640;
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    starting_pwt(i) = pwt(i) / 40;
    pwt(i) = pwt(i) / 40;
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    ppv(i) = ppv(i) * pv;
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    pwt(i) = pwt(i) * pw;
end

```

```

Batt_Capacity_Ah=300;
Batt_Voltage=2;
MaxBattery_Capacity_kWh=num_bt*24*Batt_Capacity_Ah*Batt_Voltage/1000;
MaxBattery_Charge=60*Batt_Voltage*24*num_bt/1000;
MinBattery_Energy_kWh=0.3*(num_bt*24*Batt_Capacity_Ah*Batt_Voltage/1000);
PP=[0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 0.75 1];
nn=[70.7 81.4 87.7 89.9 91.2 91.3 90.9];

dt=1;

max_inv_power_bt = ceil(1.1* MaxBattery_Charge);

BATTERY(1)=0.5*MaxBattery_Capacity_kWh;

n_bt=sqrt(0.86);

BATTERY_USAGE=0;
Diff_Usage=0;

for i = 1:sz_ppv(1,1)

    inv_ppv(i)= ppv(i) / max_inv_power_ppv;

    if (inv_ppv(i) < 0.05 )
        ppv_usage(i)=0;
        DUMPLoad_APE(i)=ppv(i);
    else
        ppv_usage(i)=ppv(i);
        n_inverter_ppv(i)=interp1(PP,nn,inv_ppv(i));
        n_inv_ppv(i)= n_inverter_ppv(i) / 100;
    end

    if ( ppv_usage(i) > 0)
        real_ppv(i)= ppv_usage(i)*n_inv_ppv(i);
    else
        real_ppv(i)=0;
    end

    inv_pwt(i)= pwt(i) / max_inv_power_pwt;

    if (inv_pwt(i) < 0.05 )
        pwt_usage(i)=0;
        DUMPLoad_APE(i)=DUMPLoad_APE(i)+ pwt(i);
    else
        pwt_usage(i)=pwt(i);
        n_inverter_pwt(i)=interp1(PP,nn,inv_pwt(i));
        n_inv_pwt(i)= n_inverter_pwt(i) / 100;
    end

    if ( pwt_usage(i) > 0)
        real_pwt(i)= pwt_usage(i)*n_inv_pwt(i);

```

```

else
    real_pwt(i)=0;
end

APE(i)= real_ppv(i) + real_pwt(i);

if ( APE(i)==fortio(i) )
    DIESEL(i)=0;
    BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
    Isozygio(i)= APE(i)- fortio(i);
    state(i)=1;
elseif ( APE(i)>fortio(i) )
    DIESEL(i)=0;
    inv_bt(i)= (APE(i)-fortio(i)) / max_inv_power_bt;
    diff=(APE(i)-fortio(i));
    if (inv_bt(i)<0.05)
        BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
        DUMpload(i)=APE(i)-fortio(i);
        Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)-DUMpload(i);
        state(i)=2;
    else
        if (inv_bt(i) > 1)
            inv_bt(i)=1;
            diff=max_inv_power_bt;
            DUMpload(i)= ((APE(i)-fortio(i)) - max_inv_power_bt);
        end
        n_inverter_bt(i)=interp1(PP,nn,inv_bt(i));
        n_inv_bt(i)= n_inverter_bt(i) / 100;

        if ( (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)) > (MaxBattery_Charge*dt))

            if ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) < MaxBattery_Charge)
                BATTERY(i+1)=BATTERY(i)+ n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)*dt;
                Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
                state(i)=3;
            elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) == MaxBattery_Charge)
                BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ MaxBattery_Charge*dt);
                Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
                state(i)=4;
            elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) > MaxBattery_Charge)
                BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ MaxBattery_Charge*dt);
                Diff_Usage=MaxBattery_Charge/(n_bt*n_inv_bt(i));
                DUMpload(i)= DUMpload(i) + diff - Diff_Usage;
                Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- Diff_Usage - DUMpload(i) ;
                state(i)=5;
            end
        elseif ( (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)) == (MaxBattery_Charge*dt))
            if ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) < MaxBattery_Charge)
                BATTERY(i+1)=BATTERY(i)+ n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)*dt;
                Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
                state(i)=6;
            end
        end
    end
end

```

```

elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) == MaxBattery_Charge)
    BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ MaxBattery_Charge*dt);
    Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMPLoad(i);
    state(i)=7;
elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) > MaxBattery_Charge)
    BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ MaxBattery_Charge*dt);
    Diff_Usage=MaxBattery_Charge/(n_bt*n_inv_bt(i));
    DUMPLoad(i)= DUMPLoad(i) + diff - Diff_Usage;
    Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- Diff_Usage - DUMPLoad(i) ;
    state(i)=8;
end
elseif ( (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)) < (MaxBattery_Charge*dt))
    if ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) < (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)))✓
/dt )
        BATTERY(i+1)=BATTERY(i)+ n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)*dt;
        Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMPLoad(i);
        state(i)=9;
    elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) == (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)))✓
(i))/dt )
        BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)));
        Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMPLoad(i);
        state(i)=10;
    elseif (n_bt*n_inv_bt(i)*(diff) > (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)))✓
/dt)
        BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)));
        Diff_Usage=((MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i))/dt)/✓
(n_bt*n_inv_bt(i));
        DUMPLoad(i)= DUMPLoad(i) + diff - Diff_Usage;
        Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- Diff_Usage - DUMPLoad(i) ;
        state(i)=11;
    end
end
elseif ( APE(i)<fortio(i) )
    diff=(fortio(i)-APE(i));
    if ((BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh) == (MaxBattery_Charge*dt) )
        inv_bt(i)= (MaxBattery_Charge) / max_inv_power_bt;
        if (inv_bt(i)<0.05)
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
            DIESEL(i)=diff;
            Isozygio(i)=fortio(i)-APE(i)-DIESEL(i);
            state(i)=12;
        else
            n_inverter_bt(i)=interp1(PP,nn,inv_bt(i));
            n_inv_bt(i)= n_inverter_bt(i) / 100;

            if ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) == ( diff ))
                DIESEL(i)=0;
                BATTERY(i+1)=MinBattery_Energy_kWh;
                Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i))*✓
(MaxBattery_Charge));

```

```

        state(i)=13;
elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) > ( diff ))
    BATTERY_USAGE=( diff )/(n_bt*n_inv_bt(i));
    DIESEL(i)=0;
    BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - BATTERY_USAGE*dt;
    Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY_USAGE));
    state(i)=14;
elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) < ( diff ))
    DIESEL(i)=( diff ) - ( n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge));
    BATTERY(i+1)=MinBattery_Energy_kWh;
    Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*
(MaxBattery_Charge)) - DIESEL(i);
    state(i)=15;
end
end
elseif ((BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh) > (MaxBattery_Charge*dt) )
    inv_bt(i)= (MaxBattery_Charge) / max_inv_power_bt;
    if (inv_bt(i)<0.05)
        BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
        DIESEL(i)=diff;
        Isozygio(i)=fortio(i)-APE(i)-DIESEL(i);
        state(i)=16;
    else
        n_inverter_bt(i)=interp1(PP,nn,inv_bt(i));
        n_inv_bt(i)= n_inverter_bt(i) / 100;

        if ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) == ( diff ))
            DIESEL(i)=0;
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - (MaxBattery_Charge*dt);
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*
(MaxBattery_Charge));
            state(i)=17;
        elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) > ( diff ))
            BATTERY_USAGE=( diff )/(n_bt*n_inv_bt(i));
            DIESEL(i)=0;
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - BATTERY_USAGE*dt;
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY_USAGE));
            state(i)=18;
        elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) < ( diff ))
            DIESEL(i)=( diff ) - ( n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge));
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - (MaxBattery_Charge*dt);
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*
(MaxBattery_Charge)) - DIESEL(i);
            state(i)=19;
        end
    end
end
elseif ((BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh) < (MaxBattery_Charge*dt) )
    inv_bt(i)= ((BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh)/dt) / max_inv_power_bt;
    if (inv_bt(i)<0.05)
        BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
        DIESEL(i)=diff;

```



```

        Isozygio(i)=fortio(i)-APE(i)-DIESEL(i);
        state(i)=20;
    else
        n_inverter_bt(i)=interp1(PP,nn,inv_bt(i));
        n_inv_bt(i)= n_inverter_bt(i) / 100;

        if ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh)/dt) == (✓
diff ))
            DIESEL(i)=0;
            BATTERY(i+1)=MinBattery_Energy_kWh;
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - ✓
MinBattery_Energy_kWh)/dt);
            state(i)=21;
        elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh)/dt) > (✓
diff ))
            BATTERY_USAGE=( diff )/(n_bt*n_inv_bt(i));
            DIESEL(i)=0;
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - BATTERY_USAGE*dt;
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY_USAGE));
            state(i)=22;
        elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh)/dt) < (✓
diff ))
            DIESEL(i)=( diff ) - ( n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - ✓
MinBattery_Energy_kWh)/dt);
            BATTERY(i+1)=MinBattery_Energy_kWh;
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - ✓
MinBattery_Energy_kWh)/dt) - DIESEL(i);
            state(i)=23;
        end
    end
end
end
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    Total_Dumpload(i)= DUMpload_APE(i) + DUMpload(i);
end

Energy_Discharge=0;
Energy_Charge=0;
Total_Energy=0;
Lifetime_kWh=1000*24*num_bt;
Change_Battery=0;

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    if ( (BATTERY(i+1) - BATTERY(i)) < 0 )
        Energy_Discharge= Energy_Discharge + (BATTERY(i) - BATTERY(i+1));
        TBD(i)=(n_bt*n_inv_bt(i))*(BATTERY(i)- BATTERY(i+1));
    elseif ( (BATTERY(i+1) - BATTERY(i)) > 0 )
        Energy_Charge= Energy_Charge + (BATTERY(i+1) - BATTERY(i));
        TBD(i)=((BATTERY(i)- BATTERY(i+1))/(n_bt*n_inv_bt(i)));
    end
end

```

```

    end
end

Total_Energy=Energy_Discharge + Energy_Charge;

Change_Battery=Energy_Discharge/Lifetime_kWh;

number_of_changes=floor(20*Change_Battery);

change_every_n_years=20/number_of_changes;

pv_cost_per_kW=1000;
pw_cost_per_kW=2500;
bt_cost_per_24_elements=200*24;
diesel_cost_per_kW=300;
inverter_cost_per_kW=600;
fuel_cost_per_litre=1.14;

diesel_max=max(DIESEL);

diesel Rated_capacity= ceil(diesel_max);

fuel_used=0;
DD=zeros(5,1);
LU=zeros(5,1);

if (diesel Rated_capacity <= 9)
    diesel Rated_capacity=10;
    DD =[0 2.25 4.5 6.75 9];
    LU=[0 0.72 1.4 2.2 2.9];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
elseif (diesel Rated_capacity <= 10.8)
    diesel Rated_capacity=12;
    DD=[0 2.7 5.4 8.1 10.8];
    LU=[0 0.76 1.51 2.31 2.76];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
elseif (diesel Rated_capacity <= 13.5)
    diesel Rated_capacity=15;
    DD=[0 3.375 6.75 10.125 13.5];
    LU=[0 0.95 1.9 2.9 3.8];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
elseif (diesel Rated_capacity <= 22.5)

```

```

    diesel_rated_capacity=25;
    DD=[0 5.625 11.25 16.875 22.5];
    LU=[0 1.7 3.1 4.5 6.3];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
elseif (diesel_rated_capacity <= 27)
    diesel_rated_capacity=30;
    DD=[0 6.75 13.5 20.25 27];
    LU=[0 2 3.8 5.5 7.5];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
end

diesel_cost=diesel_rated_capacity*diesel_cost_per_kW;

diesel_production=sum(DIESEL);

diesel_production_fuel_cost=fuel_used*fuel_cost_per_litre;

Installation_Cost=0;
Annual_Maintainance_Cost=0;
Maintainance_Cost=0;

hours_worked=sz_ppv(1,1);

for i=1:sz_ppv(1,1)
    if (DIESEL(i)==0)
        hours_worked=hours_worked-1;
    end
end

RES_Cost=pv*pv_cost_per_kW+pw*pw_cost_per_kW;
Installation_Cost=0.08*RES_Cost;
Annual_Maintainance_Cost=0.02*RES_Cost;
maint_sum=0;
r=4.4/100;

for i=1:20
    maint_sum=maint_sum+(1+r)^(-i);
end
Maintainance_Cost=maint_sum*Annual_Maintainance_Cost;

year=zeros(number_of_changes,1);

cost_of_changed_batteries=0;
zz=0;

```

```

jj=0;
hh=0;
kk=0;

for i=1:number_of_changes
    year(i)=i*change_every_n_years;
end

for i=1:number_of_changes
    zz=zz+(1+r)^(year(i));
end

cost_of_changed_batteries=num_bt*bt_cost_per_24_elements*zz;

fuel_price_rise=5/100;
lifecycle_fuel_cost=0;
Total_Cost=0;
Total_fixed_cost=0;
Total_variable_cost=0;

for i=1:20
    jj=(1+fuel_price_rise)^(i);
    kk=(1+r)^(-i);
    hh=hh+(jj*kk);
end

lifecycle_fuel_cost=diesel_production_fuel_cost*hh;

Total_fixed_cost=RES_Cost+Installation_Cost+num_bt*bt_cost_per_24_elements+diesel_cost+✓
((max_inv_power_ppv+max_inv_power_pwt+max_inv_power_bt)*inverter_cost_per_kW);

Total_variable_cost=Maintainance_Cost+lifecycle_fuel_cost+cost_of_changed_batteries;

Total_Cost=Total_fixed_cost+Total_variable_cost-(0.2*Total_fixed_cost);

TC(number_of_runs)=Total_Cost;

    end
end
end

min_cost=min(TC);

cc=0;

for i=1:144
    if (TC(i)==min_cost)
        cc=i;
    end
end
end

```

```

for pv=pv_power(cc)
    for pw=wt_power(cc)
        for num_bt=number_of_batteries(cc)

filename = 'Ppv_max33kW.xlsx';
ppv=xlsread(filename);
sz_ppv=size(ppv);

filename = 'Pwt_max40kW.xlsx';
pwt=xlsread(filename);
sz_pwt=size(pwt);

filename = 'Load.xlsx';
Load=xlsread(filename);
size_Load=size(Load);

z=0;

max_inv_power_ppv = ceil(1.1* pv);

max_inv_power_pwt = ceil(1.1* pw);

starting_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
starting_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

fortio=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
DIESEL=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
BATTERY=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

inv_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
ppv_usage=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inverter_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inv_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
real_ppv=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

inv_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
pwt_usage=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inverter_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inv_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
real_pwt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

APE=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

inv_bt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inverter_bt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);
n_inv_bt=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

DUMPLoad=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

DUMPLoad_APE=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

```

```

TBD=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

Isozygio=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

state=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

Total_Dumpload=zeros(sz_ppv,'like',ppv);

for i = 1:size_Load(1,1)
for j = 1:size_Load(1,2)
if z < sz_ppv(1,1)
    z=z+1;
fortio(z)= Load(i,j);
end
end
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    fortio(i) = fortio(i) / 1000;
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    starting_ppv(i)= ppv(i) / 33.4640;
    ppv(i) = ppv(i) / 33.4640;
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    starting_pwt(i) = pwt(i) / 40;
    pwt(i) = pwt(i) / 40;
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    ppv(i) = ppv(i) * pv;
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    pwt(i) = pwt(i) * pw;
end

Batt_Capacity_Ah=300;
Batt_Voltage=2;
MaxBattery_Capacity_kWh=num_bt*24*Batt_Capacity_Ah*Batt_Voltage/1000;
MaxBattery_Charge=60*Batt_Voltage*24*num_bt/1000;
MinBattery_Energy_kWh=0.3*(num_bt*24*Batt_Capacity_Ah*Batt_Voltage/1000);
PP=[0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 0.75 1];
nn=[70.7 81.4 87.7 89.9 91.2 91.3 90.9];

dt=1;

max_inv_power_bt = ceil(1.1* MaxBattery_Charge);

```

```

BATTERY(1)=0.5*MaxBattery_Capacity_kWh;

n_bt=sqrt(0.86);

BATTERY_USAGE=0;
Diff_Usage=0;

for i = 1:sz_ppv(1,1)

    inv_ppv(i)= ppv(i) / max_inv_power_ppv;

    if (inv_ppv(i) < 0.05 )
        ppv_usage(i)=0;
        DUMPLoad_APE(i)=ppv(i);
    else
        ppv_usage(i)=ppv(i);
        n_inverter_ppv(i)=interp1(PP,nn,inv_ppv(i));
        n_inv_ppv(i)= n_inverter_ppv(i) / 100;
    end

    if ( ppv_usage(i) > 0)
        real_ppv(i)= ppv_usage(i)*n_inv_ppv(i);
    else
        real_ppv(i)=0;
    end

    inv_pwt(i)= pwt(i) / max_inv_power_pwt;

    if (inv_pwt(i) < 0.05 )
        pwt_usage(i)=0;
        DUMPLoad_APE(i)=DUMPLoad_APE(i)+ pwt(i);
    else
        pwt_usage(i)=pwt(i);
        n_inverter_pwt(i)=interp1(PP,nn,inv_pwt(i));
        n_inv_pwt(i)= n_inverter_pwt(i) / 100;
    end

    if ( pwt_usage(i) > 0)
        real_pwt(i)= pwt_usage(i)*n_inv_pwt(i);
    else
        real_pwt(i)=0;
    end

    APE(i)= real_ppv(i) + real_pwt(i);

    if ( APE(i)==fortio(i) )
        DIESEL(i)=0;
        BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
        Isozygio(i)= APE(i)- fortio(i);
        state(i)=1;
    elseif ( APE(i)>fortio(i) )

```



```

DIESEL(i)=0;
inv_bt(i)= (APE(i)-fortio(i)) / max_inv_power_bt;
diff=(APE(i)-fortio(i));
if (inv_bt(i)<0.05)
    BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
    DUMpload(i)=APE(i)-fortio(i);
    Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)-DUMpload(i);
    state(i)=2;
else
    if (inv_bt(i) > 1)
        inv_bt(i)=1;
        diff=max_inv_power_bt;
        DUMpload(i)=((APE(i)-fortio(i)) - max_inv_power_bt);
    end
    n_inverter_bt(i)=interp1(PP,nn,inv_bt(i));
    n_inv_bt(i)= n_inverter_bt(i) / 100;

    if ( (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)) > (MaxBattery_Charge*dt))

        if ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) < MaxBattery_Charge)
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i)+ n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)*dt;
            Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
            state(i)=3;
        elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) == MaxBattery_Charge)
            BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ MaxBattery_Charge*dt);
            Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
            state(i)=4;
        elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) > MaxBattery_Charge)
            BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ MaxBattery_Charge*dt);
            Diff_Usage=MaxBattery_Charge/(n_bt*n_inv_bt(i));
            DUMpload(i)= DUMpload(i) + diff - Diff_Usage;
            Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- Diff_Usage - DUMpload(i) ;
            state(i)=5;
        end
    elseif ( (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)) == (MaxBattery_Charge*dt))
        if ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) < MaxBattery_Charge)
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i)+ n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)*dt;
            Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
            state(i)=6;
        elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) == MaxBattery_Charge)
            BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ MaxBattery_Charge*dt);
            Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
            state(i)=7;
        elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) > MaxBattery_Charge)
            BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ MaxBattery_Charge*dt);
            Diff_Usage=MaxBattery_Charge/(n_bt*n_inv_bt(i));
            DUMpload(i)= DUMpload(i) + diff - Diff_Usage;
            Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- Diff_Usage - DUMpload(i) ;
            state(i)=8;
        end
    elseif ( (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)) < (MaxBattery_Charge*dt))

```

```

        if ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) < (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)))✓
/dt )
        BATTERY(i+1)=BATTERY(i)+ n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)*dt;
        Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
        state(i)=9;
    elseif ((n_bt*n_inv_bt(i)*(diff)) == (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)))✓
(i))/dt )
        BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)));
        Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- diff - DUMpload(i);
        state(i)=10;
    elseif (n_bt*n_inv_bt(i)*(diff) > (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)))✓
/dt)
        BATTERY(i+1)=(BATTERY(i)+ (MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i)));
        Diff_Usage=((MaxBattery_Capacity_kWh - BATTERY(i))/dt)/✓
(n_bt*n_inv_bt(i));
        DUMpload(i)= DUMpload(i) + diff - Diff_Usage;
        Isozygio(i)=APE(i)-fortio(i)- Diff_Usage - DUMpload(i) ;
        state(i)=11;
    end
end
end
elseif ( APE(i)<fortio(i) )
    diff=(fortio(i)-APE(i));
    if ((BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh) == (MaxBattery_Charge*dt) )
        inv_bt(i)= (MaxBattery_Charge) / max_inv_power_bt;
        if (inv_bt(i)<0.05)
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
            DIESEL(i)=diff;
            Isozygio(i)=fortio(i)-APE(i)-DIESEL(i);
            state(i)=12;
        else
            n_inverter_bt(i)=interp1(PP,nn,inv_bt(i));
            n_inv_bt(i)= n_inverter_bt(i) / 100;

            if ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) == ( diff ) )
                DIESEL(i)=0;
                BATTERY(i+1)=MinBattery_Energy_kWh;
                Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i))*✓
(MaxBattery_Charge));
                state(i)=13;
            elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) > ( diff ) )
                BATTERY_USAGE=(( diff )/(n_bt*n_inv_bt(i)));
                DIESEL(i)=0;
                BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - BATTERY_USAGE*dt;
                Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY_USAGE));
                state(i)=14;
            elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) < ( diff ) )
                DIESEL(i)=( diff ) - ( n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge));
                BATTERY(i+1)=MinBattery_Energy_kWh;
                Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i))*✓
(MaxBattery_Charge)) - DIESEL(i);

```

```

        state(i)=15;
    end
end
elseif ((BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh) > (MaxBattery_Charge*dt) )
    inv_bt(i)= (MaxBattery_Charge) / max_inv_power_bt;
    if (inv_bt(i)<0.05)
        BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
        DIESEL(i)=diff;
        Isozygio(i)=fortio(i)-APE(i)-DIESEL(i);
        state(i)=16;
    else
        n_inverter_bt(i)=interp1(PP,nn,inv_bt(i));
        n_inv_bt(i)= n_inverter_bt(i) / 100;

        if ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) == ( diff ))
            DIESEL(i)=0;
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - (MaxBattery_Charge*dt);
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*
(MaxBattery_Charge));
            state(i)=17;
        elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) > ( diff ))
            BATTERY_USAGE=( diff )/(n_bt*n_inv_bt(i));
            DIESEL(i)=0;
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - BATTERY_USAGE*dt;
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY_USAGE));
            state(i)=18;
        elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge)) < ( diff ))
            DIESEL(i)=( diff ) - ( n_bt*n_inv_bt(i)*(MaxBattery_Charge));
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - (MaxBattery_Charge*dt);
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*
(MaxBattery_Charge)) - DIESEL(i);
            state(i)=19;
        end
    end
elseif ((BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh) < (MaxBattery_Charge*dt) )
    inv_bt(i)= ((BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh)/dt) / max_inv_power_bt;
    if (inv_bt(i)<0.05)
        BATTERY(i+1)=BATTERY(i);
        DIESEL(i)=diff;
        Isozygio(i)=fortio(i)-APE(i)-DIESEL(i);
        state(i)=20;
    else
        n_inverter_bt(i)=interp1(PP,nn,inv_bt(i));
        n_inv_bt(i)= n_inverter_bt(i) / 100;

        if ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh)/dt) == (
diff ))
            DIESEL(i)=0;
            BATTERY(i+1)=MinBattery_Energy_kWh;
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) -
MinBattery_Energy_kWh)/dt);

```

```

        state(i)=21;
        elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh)/dt) > (✓
diff ))
            BATTERY_USAGE=( diff )/(n_bt*n_inv_bt(i));
            DIESEL(i)=0;
            BATTERY(i+1)=BATTERY(i) - BATTERY_USAGE*dt;
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY_USAGE));
            state(i)=22;
        elseif ( (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - MinBattery_Energy_kWh)/dt) < (✓
diff ))
            DIESEL(i)=( diff ) - ( n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - ✓
MinBattery_Energy_kWh)/dt);
            BATTERY(i+1)=MinBattery_Energy_kWh;
            Isozygio(i)=fortio(i) - APE(i) - (n_bt*n_inv_bt(i)*(BATTERY(i) - ✓
MinBattery_Energy_kWh)/dt) - DIESEL(i);
            state(i)=23;
        end
    end
end
end
end

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    Total_Dumpload(i)= DUMpload_APE(i) + DUMpload(i);
end

Energy_Discharge=0;
Energy_Charge=0;
Total_Energy=0;
Lifetime_kWh=1000*24*num_bt;
Change_Battery=0;

for i = 1:sz_ppv(1,1)
    if ( (BATTERY(i+1) - BATTERY(i)) < 0 )
        Energy_Discharge= Energy_Discharge + (BATTERY(i) - BATTERY(i+1));
        TBD(i)=(n_bt*n_inv_bt(i))*(BATTERY(i) - BATTERY(i+1));
    elseif ( (BATTERY(i+1) - BATTERY(i)) > 0 )
        Energy_Charge= Energy_Charge + (BATTERY(i+1) - BATTERY(i));
        TBD(i)=((BATTERY(i) - BATTERY(i+1))/(n_bt*n_inv_bt(i)));
    end
end

Total_Energy=Energy_Discharge + Energy_Charge;

Change_Battery=Energy_Discharge/Lifetime_kWh;

number_of_changes=floor(20*Change_Battery);

change_every_n_years=20/number_of_changes;

pv_cost_per_kW=1000;

```

```

pw_cost_per_kW=2500;
bt_cost_per_24_elements=200*24;
diesel_cost_per_kW=300;
inverter_cost_per_kW=600;
fuel_cost_per_litre=1.14;

diesel_max=max(DIESEL);

diesel Rated_capacity= ceil(diesel_max);

fuel_used=0;
DD=zeros(5,1);
LU=zeros(5,1);

if (diesel Rated_capacity <= 9)
    diesel Rated_capacity=10;
    DD =[0 2.25 4.5 6.75 9];
    LU=[0 0.72 1.4 2.2 2.9];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
elseif (diesel Rated_capacity <= 10.8)
    diesel Rated_capacity=12;
    DD=[0 2.7 5.4 8.1 10.8];
    LU=[0 0.76 1.51 2.31 2.76];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
elseif (diesel Rated_capacity <= 13.5)
    diesel Rated_capacity=15;
    DD=[0 3.375 6.75 10.125 13.5];
    LU=[0 0.95 1.9 2.9 3.8];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
elseif (diesel Rated_capacity <= 22.5)
    diesel Rated_capacity=25;
    DD=[0 5.625 11.25 16.875 22.5];
    LU=[0 1.7 3.1 4.5 6.3];
    for i=1:sz_ppv(1,1)
        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
elseif (diesel Rated_capacity <= 27)
    diesel Rated_capacity=30;
    DD=[0 6.75 13.5 20.25 27];
    LU=[0 2 3.8 5.5 7.5];
    for i=1:sz_ppv(1,1)

```

```

        DL=interp1(DD,LU,DIESEL(i));
        fuel_used=fuel_used+DL;
    end
end

diesel_cost=dieselRatedCapacity*dieselCostPerkW;

diesel_production=sum(DIESEL);

diesel_production_fuel_cost=fuel_used*fuelCostPerLitre;

Installation_Cost=0;
Annual_Maintenance_Cost=0;
Maintenance_Cost=0;

hours_worked=sz_ppv(1,1);

for i=1:sz_ppv(1,1)
    if (DIESEL(i)==0)
        hours_worked=hours_worked-1;
    end
end

RES_Cost=pv*pvCostPerkW+pw*pwCostPerkW;
Installation_Cost=0.08*RES_Cost;
Annual_Maintenance_Cost=0.02*RES_Cost;
maint_sum=0;
r=4.4/100;

for i=1:20
    maint_sum=maint_sum+(1+r)^(-i);
end
Maintenance_Cost=maint_sum*Annual_Maintenance_Cost;

year=zeros(number_of_changes,1);

cost_of_changed_batteries=0;
zz=0;
jj=0;
hh=0;
kk=0;

for i=1:number_of_changes
    year(i)=i*change_every_n_years;
end

for i=1:number_of_changes
    zz=(1+r)^(year(i));
end

```

```

cost_of_changed_batteries=num_bt*bt_cost_per_24_elements*zz;

fuel_price_rise=5/100;
lifecycle_fuel_cost=0;
Total_Cost=0;
Total_fixed_cost=0;
Total_variable_cost=0;

for i=1:20
    jj=(1+fuel_price_rise)^(i);
    kk=(1+r)^(-i);
    hh=hh+(jj*kk);
end

lifecycle_fuel_cost=diesel_production_fuel_cost*hh;

Total_fixed_cost=RES_Cost+Installation_Cost+num_bt*bt_cost_per_24_elements+diesel_cost+✓
((max_inv_power_ppv+max_inv_power_pwt+max_inv_power_bt)*inverter_cost_per_kW);

Total_variable_cost=Maintainance_Cost+lifecycle_fuel_cost+cost_of_changed_batteries;

Total_Cost=Total_fixed_cost+Total_variable_cost-(0.2*Total_fixed_cost);

prompt = 'The Present Value for this investment in euro is ';
disp(prompt)
disp(Total_Cost)
prompt = 'The starting cost in euro is ';
disp(prompt)
disp(Total_fixed_cost)
prompt = 'The rated capacity for the photovoltaic panels array in kW is ';
disp(prompt)
disp(pv)
prompt = 'The rated capacity for the photovoltaic panels inverter in kW is ';
disp(prompt)
disp(max_inv_power_ppv)
prompt = 'The rated capacity for the Wind Turbine in kW is ';
disp(prompt)
disp(pw)
prompt = 'The rated capacity for the Wind Turbine inverter in kW is ';
disp(prompt)
disp(max_inv_power_pwt)
prompt = 'The starting cost for the photovoltaic panels array in euro is ';
disp(prompt)
disp(pv*pv_cost_per_kW)
prompt = 'The cost for the photovoltaic panels inverter in euro is ';
disp(prompt)
disp(max_inv_power_ppv*inverter_cost_per_kW)
prompt = 'The starting cost for the Wind Turbine in euro is ';
disp(prompt)
disp(pw*pw_cost_per_kW)
prompt = 'The cost for the Wind Turbine inverter in euro is ';

```



```

disp(prompt)
disp(max_inv_power_pwt*inverter_cost_per_kW)
prompt = 'The installation cost for the RES System in euro is ';
disp(prompt)
disp(Installation_Cost)
prompt = 'The annual maintainance cost for the RES System in euro is ';
disp(prompt)
disp(Annual_Maintainance_Cost)
prompt = 'The present value of the total maintainance cost for the RES System in euro is '✓
';
disp(prompt)
disp(Maintainance_Cost)
prompt = 'The number of batteries in the system is';
disp(prompt)
disp(num_bt)
prompt = 'The rated capacity for the Battery System inverter in kW is ';
disp(prompt)
disp(max_inv_power_bt)
prompt = 'The starting cost for the Battery System in euro is ';
disp(prompt)
disp(num_bt*bt_cost_per_24_elements)
prompt = 'The cost for the Battery System inverter in euro is ';
disp(prompt)
disp(max_inv_power_bt*inverter_cost_per_kW)
prompt = 'The number of batteries that had to be changed is';
disp(prompt)
disp(num_bt*number_of_changes)
prompt = 'The present value of the cost for changing batteries in euro is ';
disp(prompt)
disp(cost_of_changed_batteries)
prompt = 'The yearly total energy that charged the batteries in kWh is ';
disp(prompt)
disp(Energy_Charge)
prompt = 'The yearly total energy that was discharged from the batteries in kWh is ';
disp(prompt)
disp(Energy_Discharge)
prompt = 'The rated capacity for the Diesel Generator array in kW is ';
disp(prompt)
disp(diesel Rated_capacity)
prompt = 'The starting cost for the Diesel Generator in euro is ';
disp(prompt)
disp(diesel_cost)
prompt = 'The yearly total energy productionn from the Diesel Generator in kWh is ';
disp(prompt)
disp(diesel_production*dt)
prompt = 'The number of litres of fuel used in a year is ';
disp(prompt)
disp(fuel_used)
prompt = 'The cost for the fuel used in a year in euro is ';
disp(prompt)
disp(diesel_production_fuel_cost)

```

```

prompt = 'The total present value of the cost for the fuel in euro is ';
disp(prompt)
disp(lifecycle_fuel_cost)
prompt = 'The number of hours that the diesel generator has worked in a year is ';
disp(prompt)
disp(hours_worked)

```

```

plot (fortio, 'green')
hold all
plot (APE, 'red')
hold all
plot (DIESEL, 'yellow')
hold all
plot (DUMpload, 'cyan')
hold all
plot (DUMpload_APE, 'blue')
hold all
plot (TBD, 'black')
hold all
    end
end
end

```

```

figure
area([APE';DIESEL';DUMpload';DUMpload_APE';TBD'])
hold all
plot (fortio, 'black')

```

```

figure
area([TBD';APE';DIESEL';DUMpload';])
hold all
plot (fortio, 'black')

```

```

figure
area([TBD';-DUMpload';APE';DIESEL';])
hold all
plot (fortio, 'black')

```