



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ”

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Περιγραφή, προσομοίωση και βέλτιστη διαστασιολόγηση
υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
στην περιοχή των Χανίων

Αντωνία Παπασταματάκη
Α.Μ. 2011019021

Επιβλέπων: Κανέλλος Φώτιος

Χανιά, Ιούλιος 2014

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τον Δεκέμβριο του 2013 έως τον Ιούλιο του 2014 στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η εν λόγω διατριβή παρουσιάζει τη μελέτη και τη μοντελοποίηση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο θα μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω ανεμογεννητριών, ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και μίας γεννήτριας πετρελαίου, για τη κάλυψη έκτακτων αναγκών, και θα διαθέτει μπαταρία ροής ως αποθηκευτικό μέσο. Για την μοντελοποίηση και την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα ανάλυσης και βελτιστοποίησης ενεργειακών συστημάτων HOMER και μετεωρολογικά δεδομένα που αφορούν την ευρύτερη περιοχή των Χανίων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας θα γίνει μια γενικότερη αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παρουσιάζονται οι ανανεώσιμες πηγές που χρησιμοποιούνται στα υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής, οι πιθανοί τρόποι συνδεσμολογίας τους και οι διάφορες αρχιτεκτονικές τους.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας αναλύονται τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος που θα προσομοιωθεί ενώ παράλληλα θα γίνει και η βέλτιστη διαστασιολόγηση του. Οι προσομοιώσεις θα αφορούν δύο διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος. Στην μία περίπτωση το σύστημα θα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο ηλεκτροδότησης και δεν θα διαθέτει ξεχωριστό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες) ενώ στην δεύτερη θα προσομοιωθεί ένα σύστημα μη συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο το οποίο θα διαθέτει, γεννήτριες για την κάλυψη έκτακτων αναγκών και μπαταρίες ώστε το φορτίο ζήτησης να εξυπηρετείται από το αποθηκευμένο ενεργειακό πλεόνασμα.

Χανιά, Ιούλιος 2014

Αντωνία Παπασταματάκη

Abstract

This thesis was elaborated at the Technical University of Crete from December 2013 until July 2014 in the framework of the postgraduate course of the School of Production Engineering and Management,.

It presents the design and modeling of an autonomous hybrid power plant, which will be able to generate electricity through the use of wind turbines, solar-panels and a diesel generator - in case of emergency power supply needs - comprising a string of batteries for storing the surplus energy produced. For the modeling and simulation of the system's operation the HOMER software, an analysis and optimization tool for hybrid energy systems, will be used. The meteorological data needed for the simulation (solar irradiation and wind resource) were extracted from measurements in the region of Chania, Crete.

The first part of the thesis provides a general reference to renewable energy sources, and states which of those can be used in a hybrid power plant as well as how they can be interconnected via various architectures.

The second part of the paper presents the characteristics of the simulated hybrid energy system. The system's operation as well as optimal dimensioning, as obtained by the program will be analyzed. The simulations will involve two different system configurations. The first simulation deals with a grid-connected system which does not need energy storage devices (batteries), while the second simulation will be that of a stand-alone system, i.e. not connected to the grid, which will include batteries in order to meet the load demand by using the stored energy surplus when the electricity produced by the wind turbines, pv panels and generators is not enough.

Λέξεις-Κλειδιά

Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες, HOMER, αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, βέλτιστη διαστασιολόγηση υβριδικού ΣΗΕ, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, υβριδικό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο, αυτόνομο υβριδικό ΣΗΕ.

Index Terms

Hybrid power plant, wind turbines, photovoltaic panels, batteries, electricity storage systems, HOMER, wind energy, solar energy, clean energy, renewable energy, hybrid power system optimal sizing, grid-connected hybrid power system, stand alone hybrid power system.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου, Φώτιο Κανέλλο, για την συνεχή καθοδήγηση,
καθώς και τον κύριο Ιωάννη Κατσίγιαννη για τις παρατηρήσεις του.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract	3
Λέξεις-Κλειδιά.....	4
Index Terms	4
Ευχαριστίες.....	5
Ονοματολογία.....	8
1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	9
2. Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας	10
2.1 Πλεονεκτήματα Υβριδικών Συστημάτων.....	13
2.2 Εφαρμογές Υβριδικών Συστημάτων.....	15
2.2.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο	15
2.2.2 Αυτόνομα υβριδικά συστήματα	15
2.2.3 Τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού	16
3. Ηλιακή Ενέργεια.....	16
3.1 Δομή, λειτουργία και απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων	17
3.2 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων	19
3.3 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	20
3.4 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων	21
3.4.1 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα	21
3.4.2 Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	22
3.5 Υπολογισμός πλήθους φωτοβολταϊκών πλασιών	22
3.6 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων	23
3.7 Προϋποθέσεις κτιρίων για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών.....	24
3.8 Παθητικά ηλιακά συστήματα	25
3.9 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα.....	26
4. Αιολική ενέργεια	26
4.1 Λειτουργικά στοιχεία ανεμογεννητριών	27
4.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών	28
4.2.1 Απόδοση ανεμογεννητριών.....	31
4.3 Χρήσεις αιολικής ενέργειας.....	33
4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά αιολικών πάρκων	34
4.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας	36
5. Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας	36

5.1 Αντλησιοταμίευση (PHS).....	37
5.2 Σφόνδυλοι.....	38
5.3 Μπαταρίες μολύβδου-οξέως	40
5.4 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου.....	42
5.5 Μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου.....	43
5.6 Μπαταρίες νατρίου-θείου.....	44
5.7 Μπαταρίες ροής.....	45
5.7.1 Vanadium redox battery (VRB)	46
5.7.2 Μπαταρίες ψευδαργύρου-βρωμίου.....	47
5.7.3 Μπαταρίες πολυθειούχου βρωμίδιου.....	48
5.8 Πνευματικές τεχνολογίες αποθήκευσης	48
5.8.1 Αποθήκευση Ενέργειας με Συμπίεση Αέρα (CAES).....	48
5.8.2 Τεχνολογία Liquid-Piston.....	50
5.9 Πυκνωτές – Υπερπυκνωτές.....	51
5.10 Υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση (SMES)	51
5.11 Κυψέλες Καυσίμου.....	52
6. Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη (Γεννήτριες)	53
7. Σχετικά με το πρόγραμμα	56
7.1 Προσομοίωση	57
7.2 Βελτιστοποίηση	59
7.3 Ανάλυση ευαισθησίας.....	61
8. Προσομοιώσεις	62
8.1 Δεδομένα αιολικού δυναμικού	63
8.2 Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας.....	63
8.3 Δεδομένα φορτίου	64
8.4 Υβριδικό ΣΗΕ συνδεδεμένο σε δίκτυο	65
8.4.1 Αποτελέσματα	67
8.5 Αυτόνομο υβριδικό ΣΗΕ	70
8.5.1 Αποτελέσματα	72
8.6 Σύγκριση συστημάτων	76
Κατάλογος Πινάκων & Σχημάτων	78
Βιβλιογραφία.....	79

Ονοματολογία

ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Α/Γ	Ανεμογεννήτριες
Φ/Β ή PV	Φωτοβολταϊκό Σύστημα
V	Volt
kWh	Kilo Watt / hour
MW	Mega Watt
kW	Kilo Watt
DC	Direct Current - Συνεχές Ρεύμα
AC	Alternating Current - Εναλλασσόμενο Ρεύμα
ΑΥΣ	Αυτόνομο Υβριδικό Σύστημα
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΥΥΤ	Υπερυψηλή τάση
Α/Π	Αιολικό Πάρκο
FRT	Fault Ride-Through
LVRT	Low Voltage Ride-Through
PHS	Pumped Hydroelectric Storage
CAES	Compressed Air Energy Storage
TES	Thermal Energy Storage
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
ΚΑΠΕ	Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
ΣΑΛ	Στροφές Ανά Λεπτό
VRLA	Valve-Regulated Lead-Acid batteries
UPS	Uninterrupted Power Supply
NiCd	Μπαταρία Νικελίου-Καδμίου
NiMH	Μπαταρία Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου
NaS	Μπαταρία Νατρίου-Θείου
PSB	Μπαταρία Πολυθειούχου βρωμιδίου
VRB	Vanadium Redox Battery
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cells
AFC	Alkaline Fuel Cells
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cells
RFC	Regenerative Fuel Cells
MEK	Μηχανές Εσωτερικές Καύσης
NREL	National Renewable Energy Laboratory
IET	Institute of Energy and Transport
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
NPC	Net Present Cost
SOC	State of Charge

1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τις τελευταίες δεκαετίες ένα από τα βασικά θέματα που προβληματίζουν την παγκόσμια κοινότητα είναι η εύρεση μίας λύσης για την κάλυψη της συνεχώς αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης και η οποία θα επιφέρει τις, κατά το δυνατόν, ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Τον προηγούμενο αιώνα η παραγωγή ενέργειας βασίστηκε κυρίως στα ορυκτά καύσιμα λόγω του χαμηλού τους κόστους. Όμως η ανεξέλεγκτη και αφειδής άντλησή τους έχει οδηγήσει στην επικείμενη εξάντληση των υπαρκτών αποθεμάτων. Παράλληλα, ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των συμβατικών πηγών ενέργειας είναι οι επιπτώσεις που επιφέρουν στο περιβάλλον οι διαδικασίες που είναι απαραίτητες για την εκμετάλλευσή τους. Γεγονότα που είναι εμφανή σε παγκόσμιο επίπεδο, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, τα απρόβλεπτα καιρικά φαινόμενα, η μείωση των βροχοπτώσεων και των υδάτινων αποθεμάτων συνιστούν τα αποτελέσματα της ενεργειακής δραστηριότητας των προηγούμενων ετών. Έχει γίνει πλέον σαφές πως η ενίσχυση της χρήσης άλλων μεθόδων για την παραγωγή ενέργειας είναι αναγκαία, εφόσον η αναμονή για μείωση της ζήτησης είναι ανέλπιδη βάσει των σημερινών δεδομένων.

Η ανάγκη για απεξάρτηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας και για μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης οδηγούν στην χρήση ήπιων μορφών ενέργειας ή αλλιώς "Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας" (ΑΠΕ) οι οποίες μπορούν να λύσουν τα προαναφερθέντα προβλήματα. Οι ΑΠΕ είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες όπως είναι η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού, τα ρεύματα αέρα κ.α. και χαρακτηρίζονται ως ανανεώσιμες λόγω του ότι δεν υπάρχει ένα πεπερασμένο αποθεματικό αυτών και είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμες.

Οι ΑΠΕ, έχοντας ξεπεράσει τα μειονεκτήματα του παρελθόντος, κρίνονται πλέον ανταγωνιστικές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μαζικότερη παραγωγή, αλλά και η εκτεταμένη έρευνα που γίνεται στον εν λόγω τομέα, έχουν οδηγήσει σε μείωση του κόστους παραγωγής και αύξηση της απόδοσης των συστημάτων αυτών. Η τάση για εφαρμογή πειραματικών τεχνολογιών ΑΠΕ αναμένεται ότι θα συμβάλει στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και θα συνεισφέρει στην ενεργειακή αυτάρκεια και ανάπτυξη απομονωμένων περιοχών, ενώ παράλληλα οι ρυπογόνοι τρόποι παραγωγής ενέργειας θα αντικατασταθούν από φιλικότερα προς το περιβάλλον συστήματα.

2. Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας

Υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, η βιομάζα, η γεωθερμία κτλ. 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 [Μακρής (2009)].

Ο όρος "Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας" ή 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. [Manwell (2004)]

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%.

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής σχεδιάζονται για την παραγωγή και διαχείριση ηλεκτρικής ισχύος. Είναι ανεξάρτητα από τα μεγάλα εθνικά δίκτυα και ενσωματώνουν πολλούς και διαφορετικούς τύπους πηγών ισχύος που συνίστανται κυρίως από ΑΠΕ αλλά και από συμβατικές πηγές ενέργειας. Το μέγεθός τους από πλευράς ισχύος μπορεί να κυμαίνεται από πολλά MW, όπως για παράδειγμα στα αυτόνομα δίκτυα απομονωμένων νησιών, έως λίγα kW, όπως στις περιπτώσεις απομονωμένων εξοχικών κατοικιών. Μικρά υβριδικά συστήματα που τροφοδοτούν μόνο φορτία DC ισχύος λίγων kW μπορούν να χρησιμοποιούνται σε απομονωμένες περιοχές για εφαρμογές κατανάλωσης ισχύος, όπως για παράδειγμα σε αναμεταδότες τηλεπικοινωνιών. Τα υβριδικά πάρκα είναι το πρώτο βήμα για μία εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς συνδυάζουν αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια με τις υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ρεύματος που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα ή πετρέλαιο. Με τον τρόπο αυτό οι ανανεώσιμες και οι συμβατικές πηγές ενέργειας αλληλοσυμπληρώνονται όταν τα στοιχεία της φύσης δεν βοηθούν.

Τα υβριδικά συστήματα ισχύος είναι μία τεχνολογία που αναπτύχθηκε ώστε να είναι εφικτή η τροφοδοσία με ηλεκτρική ισχύ AC καθορισμένης συχνότητας σε απομακρυσμένες περιοχές. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στο σημείο κατανάλωσης μας απαλλάσσει από τη δαπάνη κατασκευής του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ελαχιστοποιεί τις απώλειες ισχύος που εμφανίζονται στο δίκτυο αυτό, γεγονός μεγάλης σημασίας ειδικά για δίκτυα μεγάλων αποστάσεων.

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα περιλαμβάνουν στον σχεδιασμό τους τουλάχιστον μία συμβατική γεννήτρια ντίζελ AC, ένα σύστημα διανομής ένα διανεμημένο φορτίο AC, συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και κάποιες ανανεώσιμες πηγές ισχύος όπως είναι οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά κ.α.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συσκευές αποθήκευσης του συστήματος λειτουργούν σε ορισμένες περιπτώσεις και σαν φορτία. Γενικά ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει γεννήτριες ντίζελ AC ή DC, ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας AC ή DC, φορτία, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, μετατροπείς ισχύος, σύγχρονους πυκνωτές, διατάξεις αυτόματης απόρριψης φορτίου και ένα σύστημα διαχείρισης και εποπτικού ελέγχου του αυτόνομου δικτύου [Μακρής (2009)]. Οι σταθμοί που παράγουν ηλεκτρική ισχύ από ΑΠΕ λειτουργούν όχι μόνο όταν η ενέργειά τους μπορεί να απορροφηθεί άμεσα από το δίκτυο, αλλά και εκτός αυτής της χρονικής περιόδου, προκειμένου, επί παραδείγματι, να αντλήσουν νερό και να ανυψώσουν τη στάθμη του νερού σε έναν ταμιευτήρα, από τον οποίο θα μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια κατά τις ώρες αιχμής του φορτίου, ώστε αυτή να απορροφηθεί από το δίκτυο. Προκειμένου αυτά τα έργα να είναι περισσότερο συμφέροντα από οικονομικής απόψεως, θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια, είτε από το δίκτυο είτε από συμβατικές πηγές ενέργειας, κατά τις ώρες βασικού φορτίου, ώστε να αποθηκεύεται ακόμη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας, αποσκοπώντας σε μεγαλύτερη συνεισφορά τους σε ώρες αιχμής φορτίου, κατά τις οποίες η ενέργεια είναι ακριβότερη.

Ο πλέον κατάλληλος και οικονομικός τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για τα ελληνικά νησιά είναι η αντλησιοταμίευση που έχει τη μορφή αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού έργου. Αποτελείται συνήθως από το αιολικό πάρκο, τον υδροστρόβιλο, το αντλιοστάσιο, δύο δεξαμενές για την ανακύκλωση του νερού και σωληνώσεις. Οι δύο δεξαμενές πρέπει να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση και με ικανή υψομετρική διαφορά.

Το αιολικό πάρκο παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία, εφόσον δεν μπορεί να απορροφηθεί απευθείας από το μη διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο, αξιοποιείται για άντληση νερού από την κάτω προς την άνω δεξαμενή. Με αυτόν τον τρόπο η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια του νερού και αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή. Κατά τις ώρες αυξημένης ζήτησης, ή όταν η αιολική ενέργεια δεν είναι ικανή να εξυπηρετήσει την ζήτηση εξ ολοκλήρου, το νερό της άνω δεξαμενής χρησιμοποιείται για τη λειτουργία υδροστρόβιλου. Η συνδυασμένη χρήση αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση αποτελεί λύση που μπορεί να οδηγήσει σε ουσιαστική αύξηση της κάλυψης των αναγκών από ΑΠΕ σε ένα αυτόνομο νησί μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους.

Παράλληλα, τα περισσότερα ελληνικά νησιά υποφέρουν από έλλειψη νερού. Το σύστημα που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να συνδυαστεί με μονάδες αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιούν μέρος της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή πόσιμου νερού. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα του νερού, όχι μόνο για ενεργειακή χρήση, αλλά και για ύδρευση ή άρδευση.

Είναι σαφές πως τα υβριδικά έργα παρέχουν δυνατότητα για μεγαλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε δίκτυα με περιορισμένη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως είναι τα μη διασυνδεδεμένα νησιά [Μακρής (2009)].

Τα διαφορετικά είδη γεννητριών ηλεκτρικής ισχύος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τροφοδοτήσουν με ισχύ ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να συνδεθούν με το δίκτυο με διαφορετικούς τρόπους. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική που υιοθετείται κάθε φορά, όπως το είδος και το μέγεθος των πηγών ισχύος που θα χρησιμοποιηθούν, εξαρτάται από τις εκάστοτε τοπικές συνθήκες της περιοχής.

2.1 Πλεονεκτήματα Υβριδικών Συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας χαρακτηρίζονται γενικά ως δυναμικά συστήματα καθώς είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να εναλλάσσουν τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας ή και να τις συνδυάζουν ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να εξαρτώνται στον ελάχιστο δυνατό βαθμό από μεταβολές εξωγενών παραγόντων, όπως το τοπικό δίκτυο, η ηλιοφάνεια, η ένταση του ανέμου κτλ.

Τα υβριδικά συστήματα εκμεταλλεύονται τα καλύτερα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας και παρέχουν ενέργεια ισάξιας ποιότητας με αυτή που παρέχεται από το δίκτυο, παράγοντας σε εύρος από 1kW έως μερικές εκατοντάδες kW.

Τα υβριδικά συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε περιοχές των οποίων η σύνδεση στο δίκτυο και η μεταφορά του καυσίμου θεωρούνται μη συμφέρουσες οικονομικά επιλογές. Παρέχουν επίσης τη δυνατότητα μελλοντικής σύνδεσης με το δίκτυο στις περιοχές όπου γίνεται η εγκατάστασή τους. Επιπλέον, λόγω υψηλής αποδοτικότητας και αξιοπιστίας, τέτοιου τύπου συστήματα μπορούν να χρησιμεύσουν ως αποτελεσματική λύση για παροχή ισχύος σε περιπτώσεις διακοπών ρεύματος, ή ακόμη και σε ιδιάζοντος τύπου καταναλωτές όπως οι τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί και οι νοσοκομειακές μονάδες.

Αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο πως ένα τυπικό υβριδικό σύστημα συνδυάζει τουλάχιστον δύο τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Από ΑΠΕ υπάρχει η δυνατότητα χρήσης φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών ή μικρών υδροηλεκτρικών συστημάτων και από τις συμβατικές τεχνολογίες παρουσιάζεται συνήθως χρήση ντιζελογεννητριών, μονάδων που παράγουν ενέργεια από τη χρήση βιομάζας ή κυψελών καυσίμου. Επιπλέον περιλαμβάνονται και ηλεκτρονικά ισχύος, όπως είναι οι ανορθωτές, οι αντιστροφείς και οι ρυθμιστές τάσης, και μπαταρίες για την αποθήκευση ενέργειας.

Τα υβριδικά συστήματα που περιέχουν τεχνολογίες με καύσιμο λειτουργούν με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση, επειδή προβλέπεται παραγωγή ενέργειας μέσω αυτού μόνο κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης ή χαμηλού ανανεώσιμου δυναμικού. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου σε σχέση μονάδες που ενσωματώνουν μόνο συμβατικές τεχνολογίες.

Το κόστος ηλεκτροδότησης μίας περιοχής καθορίζεται από πολλούς παράγοντες όπως είναι το κόστος εγκατάστασης γραμμών μεταφοράς ενέργειας υψηλής και μέσης τάξης, το κόστος που θα έχει η πιθανή δημιουργία υποσταθμών, το κόστος κατασκευής του δικτύου διανομής, το μέγεθος του φορτίου που θα χρειαστεί να καλυφθεί, η απόσταση του φορτίου από την υπάρχουσα γραμμή μεταφοράς και το είδος του εδάφους που θα πρέπει να διασχιστεί. Τα υβριδικά συστήματα συνήθως εγκαθίστανται σε αγροτικές περιοχές που είναι απομονωμένες από το δίκτυο. Επειδή οι περιοχές αυτές δεν εμφανίζουν υψηλό φορτίο ζήτησης και συνήθως βρίσκονται μακριά από το υπάρχον δίκτυο κρίνεται αντισυμβατική η δημιουργία δικτύου για την ηλεκτροδότησή τους. Συνεπώς, η παροχή ενέργειας από υβριδικά συστήματα που βασίζονται σε ΑΠΕ κρίνεται πιο οικονομική σε αυτές τις περιπτώσεις, ενώ παράλληλα αποτελούν λύση φιλικότερη προς το περιβάλλον.

Συγκεντρωτικά, ως βασικότερα οφέλη της χρήσης υβριδικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να χαρακτηριστούν τα ακόλουθα:

- Διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος.
- Εκμετάλλευση των καλύτερων χαρακτηριστικών της κάθε τεχνολογίας που περιλαμβάνουν και, συνεπώς, εξασφάλιση υψηλής απόδοσης.
- Εξυπηρέτηση του φορτίου ζήτησης ακόμα και σε περιπτώσεις χαμηλού ανανεώσιμου δυναμικού.
- Οικονομικότερη χρήση συμβατικών μονάδων.
- Διαφοροποίηση ενεργειακών πηγών και αποφυγή εξάρτησης από συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές.

Η αύξηση της αξιοπιστίας αυτών των συστημάτων, οι αμελητέες απώλειες μεταφοράς και η χρήση αειφόρων πηγών ενέργειας παίζουν σημαντικό ρόλο για να αποτελέσουν τα υβριδικά συστήματα την καλύτερη αποκεντρωμένη λύση.

Τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να εγκαθίστανται είτε αποκλειστικά για την παραγωγή ενέργειας, είτε ως συστήματα υποστήριξης σε περιπτώσεις διακοπής του κεντρικού δικτύου, είτε μπαίνουν σε λειτουργία τις ώρες αιχμής όταν η τιμή της kWh είναι υψηλή. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν ΑΠΕ οι οποίες συνδέονται απευθείας στο δίκτυο ή αποθηκεύουν την ενέργεια που παράγουν σε κατάλληλες μονάδες αποθήκευσης ώστε αυτή να είναι διαθέσιμη για χρήση όταν κάτι τέτοιο κριθεί αναγκαίο.

2.2 Εφαρμογές Υβριδικών Συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να βρουν εφαρμογές σε διάφορες περιπτώσεις, οι σημαντικότερες τρεις εκ των οποίων είναι οι εξής: [Manwell (2004)]

2.2.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο

Τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα αποτελούνται από τα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι ότι διατρέχονται από εναλλασσόμενο ρεύμα και ότι η τάση και συχνότητα που τα χαρακτηρίζει δεν επηρεάζονται από την παρουσία επιπρόσθετων γεννητριών ή φορτίων, είναι δηλαδή δίκτυα άπειρου ζυγού. Αν ένας υβριδικός σταθμός συνδεθεί σε ένα τέτοιο δίκτυο, 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 αέργου ισχύος, ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος απλοποιείται καθώς πλέον δεν απαιτείται επιπλέον σύστημα ελέγχου. Όταν υπάρχει ζήτηση για περισσότερη ενέργεια από αυτήν που μπορεί να παράγει ο σταθμός, το ζητούμενο έλλειμμα ενέργειας παρέχεται από το κεντρικό δίκτυο. Κατά τον ίδιο τρόπο, μία πιθανή περίσσεια ενέργειας που παράγεται από το υβριδικό σύστημα, απορροφάται από το κεντρικό δίκτυο, αν και αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί σχετικά με την συμμετοχή του υβριδικού σταθμού στην στιγμιαία παραγωγή ισχύος. Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες η παρουσία του υβριδικού σταθμού επηρεάζει την ικανότητα του κεντρικού δικτύου να διατηρεί σταθερή την τάση και την συχνότητά του, οπότε γίνεται λόγος για ασθενές δίκτυο και απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου ώστε να σταθεροποιηθούν τα ζητούμενα μεγέθη.

2.2.2 Αυτόνομα υβριδικά συστήματα

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων ή νησιωτικών περιοχών που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν υπάρχει ανάγκη για παρουσία συστήματος μεταφοράς, αλλά μόνο για σύστημα διανομής της ενέργειας. Η μετατροπή ενός συμβατικού αυτόνομου σταθμού σε υβριδικό αποσκοπεί κατά βάση στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των ωρών λειτουργίας των

συμβατικών γεννητριών. Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός αυτόνομου και ενός διασυνδεδεμένου υβριδικού συστήματος είναι ότι το αυτόνομο θα πρέπει να έχει την δυνατότητα για κάλυψη όλης της ζητούμενης ενέργειας ανά πάσα χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου σε περιπτώσεις που κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό. Επιπλέον θα πρέπει να έχει ικανότητες παραγωγής αέργου ισχύος και ρύθμισης συχνότητας, ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτροπαραγωγή από τις μονάδες ΑΠΕ του συστήματος ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας θα πρέπει να αποθηκευτεί ή ακόμα και να απορριφθεί ώστε να αποφευχθεί η πρόκληση αστάθειας στο σύστημα. Τα αυτόνομα δίκτυα δεν έχουν άπειρο ζυγό και συνεπώς επηρεάζονται έντονα από τη σύνδεση επιπρόσθετου φορτίου ή γεννήτριας. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου.

2.2.3 Τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού

Υβριδικά συστήματα χωρίς δίκτυο διανομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού, τα οποία μπορεί να είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος ή ακόμα και μεταβλητής τάσης και συχνότητας. Παραδείγματα τέτοιων φορτίων είναι οι ηλεκτρικοί φάροι, τα φανάρια σήμανσης αυτοκινητοδρόμων, η άντληση νερού, τα συστήματα αφαλάτωσης καθώς και οι ηλεκτρικοί μύλοι. Μία εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος θα μπορούσε να περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ σε συνδυασμό με μπαταρίες και ηλεκτρονικά ισχύος. Σε τέτοιου τύπου συστήματα ο έλεγχος συχνότητας και τάσης και οι διαχείριση της περίσσειας ισχύος δεν αποτελούν κύριες παραμέτρους κατά την σχεδίαση. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα χρησιμοποίησης και μίας συμβατικής γεννήτριας που θα λειτουργεί όποτε η παραγωγή ΑΠΕ δεν επαρκεί, αλλά συνήθως δεν βρίσκεται σε λειτουργία ταυτόχρονα με τις γεννήτριες ΑΠΕ.

3. Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή, ήπια, ανεξάντλητη και ανανεώσιμη. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι αρκετά διαδεδομένη κυρίως με εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων (Φ/Β ή PV). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα βασίζονται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή στην άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό, με τη χρήση τεχνολογίας ημιαγωγικών υλικών τα οποία ενεργοποιούνται στο φάσμα του ηλιακού φωτός. Τέτοια συστήματα

χαρακτηρίζονται ως ηλιακοί συσσωρευτές και η λειτουργία τους είναι φιλική προς το περιβάλλον, ενώ η διάρκεια ζωής τους φθάνει τα 25 χρόνια [Κανατσούλη (2009)].

3.1 Δομή, λειτουργία και απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η δομή και η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων ή ηλιακών κυψελών (cells) βασίζεται στους ημιαγωγούς, οι οποίοι συνδέονται σε ζεύγη αρνητικής και θετικής φόρτισης (p-n), ώστε να διαμορφώσουν μεγάλης επιφάνειας ηλεκτροδιόδους. Η ορθή κατασκευή της ηλεκτροδιόδου αποτελεί βασική προϋπόθεση της επιτυχούς λειτουργίας της φωτοβολταϊκής κυψέλης ως ημιαγωγού.

Οι κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες, συνιστώντας φωτοβολταϊκά πλαίσια. Με τη σύνδεση σε σειρά (το οπίσθιο ηλεκτρόδιο της μιας κυψέλης συνδέεται με το εμπρόσθιο της επόμενης) επιτυγχάνεται αύξηση της τάσης, ενώ η ισχύς του πλαισίου ισούται με την ισχύ της κυψέλης. Αντίθετα, με την παράλληλη σύνδεση (το εμπρόσθιο ηλεκτρόδιο της μιας συνδέεται με το εμπρόσθιο της επόμενης και αντίστοιχα το οπίσθιο ηλεκτρόδιο της μιας με το οπίσθιο της επόμενης) η ισχύς του πλαισίου αποτελεί άθροισμα της ισχύος των κυψελών, ενώ η τάση του ρεύματος ισούται με την τάση της μιας κυψέλης. Ανάλογα με τις ανάγκες είναι δυνατό να εφαρμοστούν διάφοροι συνδυασμοί των δυο τύπων σύνδεσης, τόσο μέσα στο ίδιο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, όσο και μεταξύ των πλαισίων. Το μέγεθος και η μορφή του πλαισίου εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως η θέση και ο τρόπος εγκατάστασής του.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων με τις μεταλλικές βάσεις τους, καθώς και αντιστροφείς (inverter) που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Η μέγιστη ισχύς που αποδίδει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε καθορισμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, οι αποκαλούμενες "πρότυπες συνθήκες", αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του και ονομάζεται ισχύς αιχμής (W_p).

Για να λειτουργήσουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα επιτυχώς κατά τη διάρκεια μιας αναμενόμενης διάρκειας ζωής, απαιτείται έρευνα σε όλες τις πτυχές. Οι εκτιμήσεις ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν δίνουν συνήθως μια ακριβή ένδειξη της απόδοσης τους. Τα αποτελέσματα ερευνών, έδειξαν ότι οι μετεωρολογικές συνθήκες θα μπορούσαν να προκαλέσουν μείωση μέχρι και 18% της πιθανής ισχύος τους. Η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία είναι οι δυο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως ο αέρας, η βροχή, η κάλυψη σύννεφων και η διανομή του ηλιακού φάσματος, επηρεάζουν τη θερμοκρασία, κάτω από την οποία

τα συστήματα λειτουργούν, καθώς και την αναμενόμενη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. [Κανατσούλη (2009)]

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.

3.2 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Οι δύο βασικότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η τεχνολογία λεπτού υμένα (thin film) και η τεχνολογία παραγωγής ημιαγωγικών υλικών με κρυσταλλική δομή, τα οποία κατά κύριο λόγο αποτελούνται από άμορφο ή κρυσταλλικό πυρίτιο [Λαδάς (2012)].

Το πυρίτιο βρίσκεται σε διάφορα ορυκτά και πετρώματα που αποτελούν σχεδόν το 87% του φλοιού της γης, ενώ αποτελεί το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στη φύση. Το καθαρό πυρίτιο παράγεται μέσω μίας πολύπλοκης διαδικασίας αφαίρεσης των προσμίξεων που περιέχει και οι οποίες μειώνουν την ικανότητα ημιαγωγιμότητας του. Τα περισσότερα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου, μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού, η απόδοση των οποίων κυμαίνεται μεταξύ του 13% και 16%. Το κόστος τους παραμένει σχετικά υψηλό, ενώ ο χρόνος απόδοσης ενέργειας κυμαίνεται από δύο έως έξι χρόνια κανονικής λειτουργίας. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες άμορφου πυριτίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μικρής κλίμακας. Το χαμηλότερο κόστος κατασκευής τους και η μικρότερη απόδοση τους σε σχέση με τις κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου, οφείλονται στον τρόπο κατασκευής των ημιαγωγών, οι οποίοι αποτελούνται από μια εξαιρετικά λεπτή στρώση πυριτίου εφαρμοσμένη επάνω σε συγκεκριμένο υπόστρωμα, συνήθως συνθετικό φύλλο. Ο χρόνος απόδοσης της ενέργειας των κυψελών άμορφου πυριτίου κυμαίνεται σε 1-3 χρόνια κανονικής λειτουργίας. Με σκοπό την ελάττωση του κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων ακολουθεί την τεχνολογία των ημιαγωγών λεπτής στρώσης. Με την προσθήκη στο άμορφο πυρίτιο συγκεκριμένης ποσότητας ορισμένων χημικών στοιχείων αυξάνεται η απόδοση της ηλιακής κυψέλης χωρίς αύξηση του κόστους κατασκευής.

Τα Φ/Β λεπτού υμένα (thin film) είναι εύκαμπτα, με χαμηλό βάρος αλλά σχετικά χαμηλή απόδοση και χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ωστόσο έχουν αρχίσει να διεισδύουν δυναμικά στις αγορές των ενσωματωμένων Φ/Β σε κτίρια ως αρχιτεκτονικά στοιχεία. Πλεονεκτούν όμως στην αξιοποίηση της απόδοσης τους σε σχέση με τα κρυσταλλικά Φ/Β, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Οι κρύσταλλοι και η μορφή λεπτού φιλμ διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά την απόδοση απορρόφησης του φωτός, την απόδοση μετατροπής της μίας ενέργειας στην άλλη, την τεχνολογία και το κόστος κατασκευής [Κανατσούλη (2009)].

3.3 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Κατά την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της απόστασης του από την κατανάλωση. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, τα πλαίσια μπορούν να τοποθετηθούν ελεύθερα στο έδαφος, επάνω σε κτίρια ή σε άλλες κατασκευές ακόμη και να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία και υλικά επικάλυψης στεγών.

Στην περίπτωση απομακρυσμένης ηλεκτροδότησης, οι φωτοβολταϊκές μονάδες διασυνδέονται μεταξύ τους και στηρίζονται σε μεταλλικά πλαίσια. Πιο συγκεκριμένα, τα μεταλλικά αυτά πλαίσια, στην απλούστερη μορφή τους, είναι ακίνητα και στερεώνονται στο έδαφος με διάφορες μεθόδους, όπως η πασσαλόπληξη. Πάνω τους στερεώνονται τα φωτοβολταϊκά πάνελ και συνδέονται μεταξύ τους ανάλογα με την εφαρμογή. Σε πολλά φωτοβολταϊκά συστήματα υπάρχουν 2-3 επίπεδα κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ώστε να μεγιστοποιείται η απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας σε διαφορετικούς μήνες αλλά και ώρες της ημέρας. Πιο περίπλοκη είναι η εγκατάσταση με μετακινούμενο τον ένα άξονα ώστε να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου. Ο άξονας αυτός μπορεί να είναι είτε ως προς το οριζόντιο επίπεδο, κι έτσι η γωνία εγκατάστασης ως προς αυτό να μεταβάλλεται μέρα με την ημέρα, είτε ως προς το αζιμούθιο (ως προς το νότο) ώστε να μεταβάλλεται η θέση του φωτοβολταϊκού ακολουθώντας την ημερήσια κίνηση του ήλιου. Η πιο περίπλοκη διάταξη είναι εκείνη που μοιάζει με το ηλιοτρόπιο και προβλέπει κίνηση σε 2 άξονες παρακολουθώντας την πορεία του ηλίου κατά την διάρκεια της ημέρας και των εποχών. Επίσης, εκτιμάται ότι η χρήση επιπέδων κλίσης αυξάνει την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας κατά 20-45%. Ωστόσο, όσο πιο περίπλοκη είναι η διάταξη στήριξης και εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών τόσο πιο αυξημένες είναι οι ανάγκες επιτήρησης και συντήρησής τους.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC). Αν υπάρχουν τέτοιου είδους καταναλώσεις, τότε μπορούν να τροφοδοτηθούν απ' ευθείας ή συνήθως με τη βοήθεια συσσωρευτών χωρίς άλλες διατάξεις μετατροπής, ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία συσκευών και όταν δεν υπάρχει δυνατότητα παραγωγής. Κάτι τέτοιο αφορά όμως μικρές και αυτόνομες καταναλώσεις. Οι καταναλωτές στην πλειονότητά τους ωστόσο, απαιτούν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Πιο συγκεκριμένα, το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από το φωτοβολταϊκό μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο με τη βοήθεια αντιστροφέα DC-AC, μία διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος με κατάλληλη διακοπτική συχνότητα και παροχή ενεργού ισχύος. Επιπλέον, για την εξομάλυνση της τάσης και την αποφυγή αρμονικών πολλαπλάσιας συχνότητας από εκείνης του δικτύου απαιτείται η χρήση κατάλληλων φίλτρων συχνότητας πριν τη διασύνδεση του αντιστροφέα με το

δίκτυο, έτσι ώστε η παραγόμενη τάση να έχει μορφή που πλησιάζει κατά το δυνατόν περισσότερο την ιδανική ημιτονοειδή καμπύλη. Το τελικό σημείο διασύνδεσης αν πρόκειται για διασυνδεδεμένο (grid-connected) δίκτυο είναι ο μετρητής ενέργειας για την αποζημίωση του κατόχου της εγκατάστασης.

Σε κάποια αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες), για την δυνατότητα ηλεκτροδότησης των ωρών που δεν παρατηρείται ηλιακή ακτινοβολία [Κανατσούλη (2009)].

3.4 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας, από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές μέχρι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάρκα. Επιπλέον, προσφέρουν δυνατότητα μείωσης απωλειών στα δίκτυα διανομής και βελτίωσης της στάθμης της τάσης σε ακτινικά δίκτυα. Ανάλογα με τη χρήση τους χωρίζονται στις κατηγορίες που παρουσιάζονται παρακάτω.

3.4.1 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

Οι αυτόνομες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αποτελούν ίσως τις πληρέστερες εφαρμογές φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Είναι εγκαταστάσεις που λειτουργούν αυτοδύναμα για την τροφοδότηση καθορισμένων καταναλώσεων, χωρίς να συνδέονται με μεγάλα κεντρικά δίκτυα ηλεκτρικής διανομής. Αποτελούν την ιδανικότερη λύση για περιοχές οι οποίες βρίσκονται μακριά από το κεντρικό δίκτυο και η διασύνδεσή τους με αυτό θα απαιτούσε μεγάλο οικονομικό κεφάλαιο. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση, την άντληση και τον καθαρισμό νερού αλλά και σε συστήματα εξωτερικού φωτισμού οδών, συστήματα τηλεπικοινωνιών, σηματοδότησης και σε αγροτικές εφαρμογές. Οι εφαρμογές αυτές συνήθως αποδίδουν ισχύ ύψους 100-200KWp. Βέβαια υπάρχουν συστοιχίες συσσωρευτών οι οποίες αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. ενώ σε περίπτωση που έχουμε φορτία εναλλασσομένου ρεύματος θα πρέπει να υπάρχει ένας αντιστροφέας στο σύστημα ο οποίος θα μετατρέπει την συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση.

3.4.2 Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας εφ' όσον υπάρχει διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο. Στις περιπτώσεις όμως που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν επαρκεί για να καλύψει τα φορτία τότε το δίκτυο παρέχει τη συμπληρωματική ενέργεια. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας μετράει την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Επίσης στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και το κόστος συντήρησης [Κανατσούλη (2009)].

3.5 Υπολογισμός πλήθους φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η διαδικασία υπολογισμού του πλήθους των απαιτούμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων για μια εγκατάσταση αποτελείται από τα εξής βήματα [Μπούρης]

1. Καταγράφονται οι μήνες κατά τους οποίους θα γίνουν οι υπολογισμοί.
2. Καταγράφεται η γωνία κλίσης των πλαισίων για κάθε μήνα (βέλτιστη ή σταθερή).
3. Υπολογίζεται η ολική μηνιαία ακτινοβολία που προσπίπτει σε πλαίσιο υπό τη δεδομένη κλίση και για κάθε μήνα.
4. Υπολογίζονται ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης (σ_T) και ο συντελεστής καθαρότητας (σ_p) για τιμές θερμοκρασίας αέρα και επίπεδα ρύπανσης κάθε μήνα. Ο παράγοντας (σ_T), ή δίνεται από τον κατασκευαστή ή, για Φ/Β πυριτίου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\sigma_T = 1 - \frac{T_a + 10}{200} \quad (3.1)$$

όπου T_a είναι η μέση θερμοκρασία αέρα. Ο παράγοντας σ_p εκφράζει την επίδραση της ρύπανσης ή του σκονισμού της επιφάνειας και είναι ($\sigma_p = 1$) για περιβάλλον χωρίς ρύπανση και ($\sigma_p = 0,8$) για υψηλό επίπεδο ρύπανσης.

5. Καταγράφονται οι ενεργειακές ανάγκες για κάθε μήνα.
6. Υπολογίζεται η συνολικά απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β πλαισίων A από τη σχέση:

$$A = \frac{E_\varphi}{H_T * \eta_{ολ} * \sigma_T * \sigma_p} \quad (3.2)$$

όπου H_T η ολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και A η συνολικά απαιτούμενη επιφάνεια για να

καλυφθούν οι μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις E_{φ} . Το $\eta_{ολ}$ είναι ο βαθμός απόδοσης όλου του συστήματος (ηλεκτρικό κύκλωμα, συσκευές και ϕ/β πλαίσια). Διαιρώντας το αποτέλεσμα της παραπάνω σχέσης με το εμβαδόν του τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου με βάση το οποίο έγινε η σύνδεση της συστοιχίας, προκύπτει και ο αριθμός των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτούνται για να καλυφθούν οι ανάγκες.

7. Υπολογίζονται οι ελάχιστες ημέρες αυτονομίας με βάση τις οποίες θα πρέπει να σχεδιαστεί και το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η αυτοδυναμία του συστήματος έχει την έννοια της κάλυψης ενεργειακής ζήτησης ακόμη και σε περίοδο κατά την οποία οι μετεωρολογικές συνθήκες δεν επιτρέπουν την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Η αυτοδυναμία εκφράζεται σε διαστάσεις χρόνου και η επιλογή που θα γίνει για την τιμή της επηρεάζει κυρίως το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνηθισμένος τρόπος ορισμού της απαιτούμενης αυτοδυναμίας ενός συστήματος είναι:

$$S_p = \frac{5}{17} * \frac{N_s * d_{om} - N_{so}}{N_s} + \frac{12}{17} \quad (3.3)$$

όπου N_s είναι οι ώρες ηλιοφάνειας για τελείως ανέφελο ουρανό την μέση ημέρα του μήνα, N_{so} είναι ο πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας του μήνα και d_{om} είναι οι ημέρες του μήνα. Τέλος, από τις μηνιαίες ενεργειακές ανάγκες υπολογίζονται οι ενεργειακές ανάγκες κατά τη περίοδο αυτονομίας, τις οποίες καλούνται να καλύψουν οι συσσωρευτές.

3.6 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα 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.

Όμως τα φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα όπως είναι τα εξής:

1. Η απόδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες, ενώ η έξοδος τους μεταβάλλεται σημαντικά με τη νέφωση.
2. Απαιτείται σημαντική έκταση γης για την εγκατάστασή τους.
3. Η παραγωγή τους μηδενίζεται τις νυχτερινές ώρες.
4. Έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης.

3.7 Προϋποθέσεις κτιρίων για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

Προκειμένου τα φωτοβολταϊκά συστήματα να λειτουργούν με την μέγιστη δυνατή απόδοση θα πρέπει να ισχύουν κάποιες προϋποθέσεις. Κατ' αρχήν θα πρέπει να υπάρχει επαρκής ελεύθερος και ασκίαστος χώρος. Αν ο χώρος δεν είναι παντελώς ασκίαστος καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, τότε το σύστημα λειτουργεί με μικρότερη απόδοση. Βάσει ενός εμπειρικού κανόνα για την αποφυγή μειωμένης απόδοσης λόγω σκίασης, θα πρέπει τα φωτοβολταϊκά πάνελ να τοποθετούνται σε απόσταση διπλάσια από το ύψος του εκάστοτε πιθανού εμποδίου. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα πρέπει να έχουν νότιο προσανατολισμό καθώς έτσι επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοσή τους. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι έτσι δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία με τη μέγιστη πυκνότητά της για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην διάρκεια της ημέρας. Αποκλίσεις από το Νότο είναι επιτρεπτές, αν και μειώνουν την απόδοση. Τέλος θα πρέπει να βεβαιώνεται ότι το φωτοβολταϊκό έχει τοποθετηθεί με κατάλληλη κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως επιλέγεται μια κλίση που να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στην Ελλάδα, η βέλτιστη κλίση είναι γύρω στις 25° - 35° (κλίση περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου $\pm 10^{\circ}$).

3.8 Παθητικά ηλιακά συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα στα κτίρια αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση των χώρων το χειμώνα, καθώς και για παροχή φυσικού φωτισμού. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο.

Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και, ειδικότερα, στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού και τον εγκλωβισμό της προκύπτουσας θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου που καλύπτεται από το γυαλί. Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα πρέπει να έχουν προσανατολισμό περίπου νότιο, ώστε να υπάρχει ηλιακή πρόσπτωση στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας το χειμώνα.

Το συνηθέστερο παθητικό ηλιακό σύστημα (σύστημα άμεσου κέρδους) βασίζεται στην αξιοποίηση των παραθύρων κατάλληλου προσανατολισμού, σε συνδυασμό με την κατάλληλη θερμική μάζα (βαριά υλικά, όπως πέτρα, πλάκες, μπετόν στους τοίχους και στα δάπεδα, χωρίς να είναι καλυμμένα, π.χ. από χαλιά), η οποία απορροφά μέρος της θερμότητας και την «προσφέρει» στο χώρο αργότερα και έτσι διατηρείται ο χώρος θερμός για πολλές ώρες. Ένα νότιο οριζόντιο σκίαστρο μπορεί να εμποδίσει τον καλοκαιρινό ήλιο που έρχεται από πιο ψηλά να μπει απ' ευθείας στο χώρο.

Τα υπόλοιπα παθητικά συστήματα είναι συστήματα έμμεσου κέρδους και ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

Ηλιακοί τοίχοι: Έχουν στην εξωτερική τους πλευρά, σε μικρή απόσταση από την τοιχοποιία, τζάμι (υαλοπίνακα) και λειτουργούν ως ηλιακοί συλλέκτες, μεταφέροντας τη θερμότητα είτε μέσω του υλικού του τοίχου (τοίχος θερμικής αποθήκευσης), είτε μέσω θυρίδων (θερμοσιφωνικό πανέλο) στον εσωτερικό χώρο. Συνδυασμός των δύο λειτουργιών είναι ο τοίχος μάζας με θυρίδες, ευρύτερα γνωστός ως τοίχος Trombe - Michel [Zrikem & Bilgen (1987), Shen et al. (2007)].

Θερμοκήπια (ηλιακοί χώροι): Είναι κλειστοί χώροι που ενσωματώνονται σε νότια τμήματα του κτιριακού κελύφους και περιβάλλονται από υαλοστάσια. Η ηλιακή θερμότητα από το θερμοκήπιο μεταφέρεται στους κυρίως χώρους του κτιρίου μέσω ανοιγμάτων ή και διαπερνά τον τοίχο.

Ηλιακά αίθρια: είναι εσωτερικοί χώροι του κτιρίου οι οποίοι έχουν στην οροφή τους τζάμι και λειτουργούν όπως τα θερμοκήπια.

Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα πρέπει να συνδυάζονται με την απαιτούμενη θερμική προστασία (θερμομόνωση) και την απαιτούμενη θερμική μάζα του κτιρίου, η οποία αποθηκεύει και αποδίδει τη θερμότητα στο χώρο με χρονική υστέρηση, ομαλοποιώντας έτσι την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο εικοσιτετράωρο. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θα πρέπει το καλοκαίρι να συνδυάζονται με ηλιοπροστασία και συχνά με δυνατότητα αερισμού.

3.9 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι όσα συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία, και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, σε αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι αρκετά απλή και υπάρχουν πολλές δυνατότητες εφαρμογής της σε θερμικές χρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών. Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, με τους γνωστούς ηλιακούς θερμοσίφωνες.

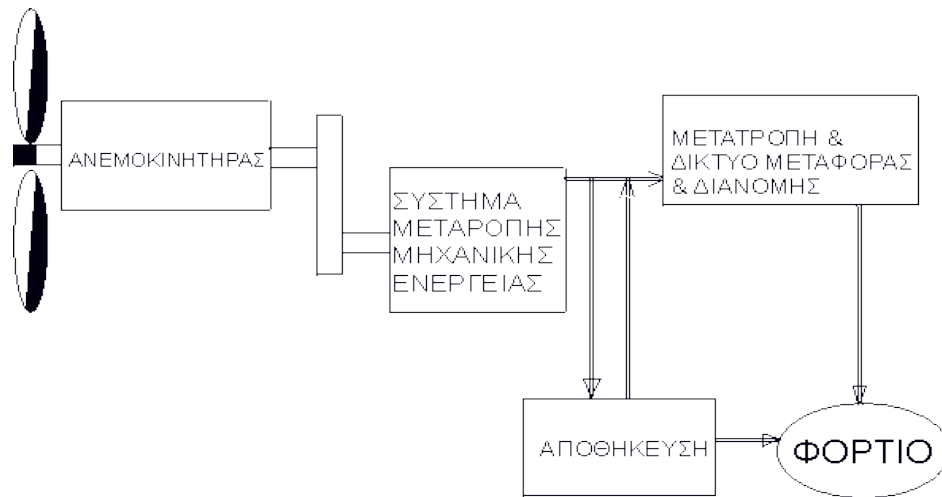
Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού αποτελείται από επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, ένα δοχείο αποθήκευσης της θερμότητας και σωληνώσεις. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το συλλέκτη και η συλλεγόμενη θερμότητα μεταφέρεται στο δοχείο αποθήκευσης. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως στην οροφή του κτιρίου, με νότιο προσανατολισμό και κλίση 30° - 60° ως προς τον ορίζοντα, ώστε να μεγιστοποιηθεί το ποσό της ακτινοβολίας που συλλέγεται ετησίως.

Πέρα από την οικιακή χρήση, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη σήμερα, ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε απαιτείται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασιακής στάθμης. Έτσι, η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ψύξης, για τον κλιματισμό χώρων και άλλες εφαρμογές (βιομηχανικές διεργασίες, αφαλάτωση, θέρμανση πισίνας κλπ.), εμφανίζεται ως μία από τις πολλά υποσχόμενες προοπτικές, λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας ακριβώς την εποχή που απαιτούνται τα ψυκτικά φορτία. Υπάρχουν ήδη μερικές επιτυχημένες εφαρμογές τέτοιων συστημάτων στη χώρα μας και αναμένεται να έχουν ταχεία ανάπτυξη.

4. Αιολική ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η κινητική ενέργεια του ανέμου που οφείλεται κυρίως στην ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προκαλεί την μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από μια περιοχή σε μια

άλλη δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Ο άνεμος είναι μια ανεξάντλητη πρωτογενής πηγή ενέργειας ενώ οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιδράσεις που απορρέουν από τη χρήση ανεμογεννητριών είναι περιορισμένες. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες διαφοροποιείται σημαντικά από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μία εγκατάσταση εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 4.1 Βασικά μέρη εγκατάστασης εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας

Συγκεκριμένα, η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου γίνεται μέσω μιας αεροδυναμικής διάταξης, του ανεμοκινητήρα, που τη μετατρέπει σε ωφέλιμη μηχανική ενέργεια, και μέσω ανεμογεννήτριας, ανεμοκινητήρα δηλαδή που διαθέτει ηλεκτρογεννήτρια και τη μετατρέπει απευθείας σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην έξοδο της γεννήτριας, τροφοδοτείται στο δίκτυο, μέσω της χρησιμοποιούμενης συσκευής συνδέσεώς της με αυτό.

Οι μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο, οδηγούν σε ασυμφωνία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δοθεί με την χρήση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει το ενεργειακό έλλειμμα, όταν η ισχύς της ανεμογεννήτριας πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

4.1 Λειτουργικά στοιχεία ανεμογεννητριών

Η λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας (Α/Γ) βασίζεται σε δύο συστήματα μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας. Το μηχανικό σύστημα που μετατρέπει την κινητική ενέργεια

του ανέμου σε μηχανική ροπή στον ρότορα και το ηλεκτρικό σύστημα στο οποίο η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ροπή του ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια [Γκίκα (2008)].

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τυπικά μεγέθη των σύγχρονων εμπορικών ανεμογεννητριών.

Ισχύς Α/Γ	500 - 5000 kW
Διάμετρος δρομέα	40 - 120 m
Αριθμός πτερυγίων	3
Ύψος Α/Γ	50 - 120 m
Εύρος ταχύτητας ανέμου	3 - 30 m/s
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 - 16 m/s
Ονομαστική ταχύτητα δρομέα	12 - 40 rpm
Εύρος ταχύτητας δρομέα	8 - 40 rpm
Κόστος Α/Γ	1000 €/kW

Πίνακας 4.1 Τυπικά μεγέθη ανεμογεννητριών

Οι Α/Γ συνήθως οργανώνονται σε αιολικά πάρκα γιατί έτσι κατ' αρχάς χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό τοποθεσίες με καλή αιολική συμπεριφορά και, επίσης, η οπτική ενόχληση από τις Α/Γ περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές.

4.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Οι βασικοί τύποι ανεμογεννητριών είναι δύο [Σουσουνής (2011)]: γεννήτριες σταθερών ή μεταβλητών στροφών. Οι **γεννήτριες σταθερών στροφών** συνδέονται απευθείας στο δίκτυο και η ταχύτητα περιστροφής τους δεν εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου αλλά από τη συχνότητα του δικτύου, το λόγο του κιβωτίου ταχυτήτων και τον σχεδιασμό της γεννήτριας. Έτσι λειτουργούν σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Λόγω των σταθερών στροφών, οι Α/Γ αυτές δεν εκμεταλλεύονται με βέλτιστο τρόπο την αεροδυναμική ροπή, συνεπώς έχουν χαμηλότερη απόδοση. Αντίθετα οι **γεννήτριες μεταβλητών στροφών** συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος AC/DC/AC και ο ρυθμός περιστροφής τους μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και βάσει των αναγκών της απαιτούμενης ισχύος. Συνήθως οι Α/Γ αυτού του είδους χρησιμοποιούν έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Με τη λειτουργία μεταβλητών στροφών η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας μπορεί να

προσαρμόζεται στην εκάστοτε ταχύτητα ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται με το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V_w} \quad (4.1)$$

όπου ω η ταχύτητα περιστροφής, R η ταχύτητα της έλικας και V_w η ταχύτητα του ανέμου. Ο λόγος αυτός διατηρείται σταθερός στη βέλτιστη τιμή ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής C_p . Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις γεννήτριες που λειτουργούν με σταθερές στροφές.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχουν αντικαταστήσει τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών εξαιτίας του χαμηλού αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος, της χαμηλής ποιότητας ισχύος εξόδου και της καταπόνησης των μηχανικών μερών. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών μπορούν να ελεγχθούν κατάλληλα ώστε να λειτουργούν με υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου, να μειώνουν την καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας και να έχουν μειωμένο αεροδυναμικό θόρυβο [Σουσουνής (2011)].

Οι Α/Γ κατηγοριοποιούνται σε μικρές, μεσαίες ή μεγάλες ανάλογα με την ισχύ που αποδίδουν και την διάμετρο του ρότορα. Ενδεικτικά στοιχεία των διάφορων κατηγοριών ανεμογεννητριών δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Κατηγορία	Ισχύς P(kW)	Διάμετρος d(m)
Μικρές	$P \leq 75$	$d \leq 16$
Μεσαίες	$75 < P \leq 1000$	$16 < d \leq 50$
Μεγάλες	$P > 1000$	$d > 50$

Πίνακας 4.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Μία επιπλέον ταξινόμηση των Α/Γ γίνεται βάσει του προσανατολισμού τους ως προς την ροή του ανέμου. Συγκεκριμένα κατηγοριοποιούνται σε **Α/Γ με οριζόντιο άξονα**, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικας και στις οποίες ο άξονας μπορεί να περιστρέφεται με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκεται σε παραλληλία με τη ροή του ανέμου και σε **Α/Γ με κατακόρυφο άξονα**, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους και τη κατεύθυνση του ανέμου.

Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα έχουν το πλεονέκτημα ότι η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων και άλλα μέρη της Α/Γ τοποθετούνται στο έδαφος και έτσι δεν απαιτείται πύργος. Επιπλέον δεν απαιτείται και σύστημα προσανατολισμού. Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα έχουν όμως τα πρακτικά μειονεκτήματα ότι το κάτω μέρος του δρομέα βρίσκεται πολύ κοντά στο έδαφος όπου και επικρατούν χαμηλές ταχύτητες

ανέμου, έχουν μέτρια συνολική απόδοση, ο δρομέας δεν αναπτύσσει ροπή εκκίνησης, απαιτείται σχετικά μεγάλη επιφάνεια λόγω των καλωδίων στήριξης και συναντώνται δυσκολίες μηχανικής συντήρησης.

Στην αγορά φαίνεται πως έχουν επικρατήσει οι Α/Γ με οριζόντιο άξονα με δύο ή τρία πτερύγια. Μία τυπική ανεμογεννήτρια τέτοιου είδους αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Το *δρομέα*, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- Το *σύστημα μετάδοσης της κίνησης*, που απαρτίζεται από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
- Την *ηλεκτρική γεννήτρια*, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδης το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- Το *σύστημα προσανατολισμού*, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- Τον *πύργο*, ο οποίος στηρίζει όλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Το *σύστημα ελέγχου* (ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου), ο οποίος είναι τοποθετημένος στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

Επίσης, σύμφωνα με τον αριθμό των πτερυγίων του δρομέα τους, οι Α/Γ οριζόντιου άξονα διακρίνονται σε μονόπτερες, δίπτερες, τρίπτερες κ.ο.κ. Η πλειονότητα των Α/Γ που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή έχουν τρία πτερύγια. Είναι πιο σταθερές καθώς το αεροδυναμικό φορτίο είναι σχετικά ομοιόμορφο.

Σύμφωνα και με το αν ο άνεμος συναντά πρώτα το θάλαμο με τη γεννήτρια ή το δρομέα, οι οριζοντίου άξονα πάλι διακρίνονται σε ανάντη και κατάντη ροής αντίστοιχα.

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διακριθούν και από τον τύπο της γεννήτριας που είναι εφοδιασμένες αλλά και από τον τρόπο σύνδεσής τους στο δίκτυο. Έτσι έχουμε τις παρακάτω επικρατέστερες διαμορφώσεις [Ζουσουνής (2011)]:

- Ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού, σταθερών στροφών, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.
- Ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, μεταβλητών στροφών, μεταβλητής αντίστασης, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.
- Ασύγχρονη γεννήτρια μεταβλητών στροφών διπλής τροφοδότησης.
- Σύγχρονη γεννήτρια μεταβλητών στροφών με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη και μετατροπέα AC/DC/AC για σύνδεση στο δίκτυο.

Ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται, οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις αυτόνομες και τις συνδεδεμένες. Οι **αυτόνομες** δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρισμού και είναι ιδανικές για εξοχικές κατοικίες που βρίσκονται σε περιοχές απομακρυσμένες από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την λειτουργία τους απαιτούνται συσσωρευτές (μπαταρίες) έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση ενέργειας, καθώς και η εγκατάσταση ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Στην περίπτωση των συνδεδεμένων γεννητριών με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρισμού, η παραγόμενη ενέργεια πωλείται απευθείας στο δίκτυο και συνεπώς δεν είναι αναγκαία η χρήση μπαταριών. Όμως και σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητη η παρουσία ενός μετατροπέα.

4.2.1 Απόδοση ανεμογεννητριών

Η παραγωγή ισχύος μίας ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου, και κάθε μηχανή χαρακτηρίζεται από την καμπύλη ισχύος της, που εξαρτάται από τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά και τον σχεδιασμό της. Καμπύλη ισχύος ορίζεται η γραφική παράσταση της εξόδου της Α/Γ για κάθε τιμή της ταχύτητας του ανέμου και δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι χαρακτηριστική για κάθε ανεμογεννήτρια.

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της (V_{cut-in}) όπου η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να παράγει ισχύ (4-5 m/sec περίπου), την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ή όριο αποκοπής ($V_{cut-out}$), όπου η μηχανή τίθεται εκτός λειτουργίας για να προστατευθεί από τον πολύ δυνατό άνεμο και κυμαίνεται από 20 μέχρι 30 m/s, και την ονομαστική ταχύτητα (V_{nom}), που είναι η μικρότερη ταχύτητα από την οποία και μετά η μηχανή παράγει την ονομαστική της τιμή ισχύος (P_{nom}) και παίρνει τιμές από 12 μέχρι 16 m/s. Έτσι, όπως είναι

εμφανές η Α/Γ παράγει την ονομαστική της ισχύ, όταν η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται μεταξύ της ονομαστικής της τιμής και του ορίου αποκοπής [Τόλης (2011)].

Η εγκατεστημένη ισχύς της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια που πρόκειται να καλυφθούν. Σχετικά με τις διαστάσεις της ανεμογεννήτριας αξίζει να αναφερθεί ότι η διάμετρος της έλικας αυξάνεται ανάλογα με την ονομαστική ισχύ και συνεπώς αυξάνεται και το ύψος στο οποίο θα τοποθετηθεί καθώς επίσης και ότι το ύψος του ιστού καθορίζεται βάσει παραμέτρων όπως είναι τα εμπόδια του περιβάλλοντος χώρου, το είδος της βάσης αλλά, φυσικά, και βάσει των προδιαγραφών του κατασκευαστή.

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος της και την ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει και ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια Watt. Για παράδειγμα οι τυπικές διαστάσεις μιας μικρής ανεμογεννήτριας 2kW είναι: διάμετρος δρομέα, 4m και ύψος 9m, ενώ μιας μεγάλης αυτής των 3MW οι διαστάσεις είναι: 80 και 80–100m αντίστοιχα. Η ύπαρξη ικανοποιητικού αιολικού δυναμικού αποτελεί το βασικότερο κριτήριο για την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας.

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου ακολουθεί συχνά την κατανομή Weibull, που μπορεί να ορισθεί από τη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου και από μια παράμετρο k (παράμετρος μορφής). Ειδικά για την περίπτωση που η παράμετρος k είναι ίση με 2, η κατανομή Weibull ταυτίζεται με την κατανομή Rayleigh.

Η μετατροπή της αεροδυναμικής ισχύος του προσπίπτοντος ανέμου σε μηχανική από το δρομέα της ανεμογεννήτριας, πραγματοποιείται μέσω της παρακάτω σχέσης [Γκίκα (2008)]:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot V_w^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (4.2)$$

όπου P_m η μηχανική ισχύς του δρομέα σε Watt, ρ η πυκνότητα του αέρα μετρημένη σε kg/m^3 , V_w η ταχύτητα του ανέμου σε m/s^2 , C_p ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του δρομέα και $A = \pi R^2$ η επιφάνεια δίσκου του δρομέα ακτίνας R , μετρημένη σε m^2 .

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p εξαρτάται από δύο παράγοντες, τους λ και β . Ο παράγοντας β αντιπροσωπεύει την τιμή της γωνίας του βήματος της έλικας των πτερυγίων και ο παράγοντας λ είναι ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου. Ο παράγοντας λ ορίζεται από την σχέση που ακολουθεί:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_R}{V_w} \quad (4.3)$$

όπου ω_R είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της έλικας μετρημένη σε rad/sec.

Έχει αποδειχτεί ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή αυτού είναι $16/27 = 0,593$, γνωστή και ως "όριο του Betz" και αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή ισχύος από τον άνεμο που μπορεί να ληφθεί από μία ιδανική έλικα. Στην πράξη μια καλά σχεδιασμένη ανεμογεννήτρια έχει έναν αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος της τάξης του 0,35 [Van Kuik (2007)].

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας το οποίο εξαρτάται από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια του έτους, τον τόπο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της, είναι ο **συντελεστής εκμετάλλευσής** της, οποίος εκφράζει το λόγο της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας προς αυτήν που θα παραγόταν αν η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε συνεχώς στην ονομαστική της ισχύ καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ο συντελεστής εκμετάλλευσης εκφράζει ουσιαστικά το κατά πόσο αξιοποιείται η ανεμογεννήτρια βάσει της περιοχής στην οποία έχει εγκατασταθεί.

Είναι προφανές ότι κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι βελτιστοποιημένη ώστε να αποδίδει καλύτερα εντός ενός εύρους ταχυτήτων. Μεταβάλλοντας μεγέθη όπως: το ύψος της ανεμογεννήτριας, τη γωνία και τη γεωμετρία των πτερυγίων, το μέγεθος των πτερυγίων ή το μέγεθος της γεννήτριας, μεταβάλλεται η ενεργειακή συμπεριφορά της. Αλλάζοντας τα δυο τελευταία μεγέθη μεταβάλλεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, ενώ το ύψος της επηρεάζει μόνο την ταχύτητα του ανέμου. Γενικά οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε εκείνες τις ταχύτητες ανέμου που παράγεται η περισσότερη ενέργεια ετησίως, δηλαδή εντός του εύρους των συχνότερων υψηλών ταχυτήτων.

4.3 Χρήσεις αιολικής ενέργειας

Οι συνηθέστερες εφαρμογές αιολικής ενέργειας έχουν ως στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που είναι συνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο είτε για την κάλυψη των αναγκών της ίδιας της περιοχής είτε για την πώληση του ρεύματος στην εταιρεία εκμετάλλευσης του δικτύου, αλλά και σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, στην οποία περίπτωση οι ανεμογεννήτριες είτε λειτουργούν αυτόνομα, αποθηκεύοντας την περίσσεια ενέργειας σε μπαταρίες, είτε λειτουργούν σε συνδυασμό με σταθμό ηλεκτροπαραγωγής που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αφαλάτωση, θέρμανση, άντληση, άρδευση κτλ.

4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά αιολικών πάρκων

Οι κυριότερες τεχνικές απαιτήσεις που θέτουν οι κώδικες των χωρών για τα αιολικά πάρκα είναι οι παρακάτω [<http://www.rae.gr>]:

Ανοχή στις βυθίσεις τάσης και απόκριση σε καταστάσεις σφαλμάτων του δικτύου

Οι Α/Γ, μέχρι τώρα, σε περίπτωση σφάλματος αποσυνδέονταν από το σύστημα για να προστατευτούν οι ίδιες. Αυτό μέχρι τώρα δεν αποτελούσε μεγάλο πρόβλημα αφού τα μεγέθη σε ισχύ ήταν μικρά και οι Α/Γ συνδέονταν κυρίως στο δίκτυο διανομής. Σήμερα λόγω της υψηλής διείσδυσης της αιολικής ενέργειας και επειδή τα Α/Π συνδέονται περισσότερο στην ΥΤ ή και στην ΥΥΤ η παραπάνω φιλοσοφία δεν είναι αποδεκτή. Αυτό διότι μια σύντομη βύθιση τάσης σε μια ευρεία παραγωγή θα είχε σαν αποτέλεσμα την απώλεια αρκετών εκατοντάδων MW.

Για τον λόγο αυτό, οι σύγχρονοι κώδικες προβλέπουν συγκεκριμένες και αυστηρές απαιτήσεις για τη δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία των Α/Γ υπό συνθήκες βύθισης της τάσης, οι οποίες είναι γνωστές ως Fault Ride-Through (FRT) ή Low Voltage Ride-Through (LVRT) Capability και εκφράζονται υπό τη μορφή καμπυλών τάσης-χρόνου. Για βυθίσεις τάσεις πάνω από το όριο που ορίζει η συγκεκριμένη καμπύλη, τα Α/Π πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο, ενώ η αποσύνδεσή τους επιτρέπεται για βυθίσεις κάτω από το όριο αυτό.

Περαιτέρω απαιτήσεις είναι η επαναφορά της ενεργού και αέργου ισχύος μετά την αποκατάσταση της τάσης σε επιτρεπτά επίπεδα. Τα Α/Π καλούνται να παρέχουν υποστήριξη τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος αλλά και μετά από αυτό. Η παραγωγή αέργου ρεύματος μετά το σφάλμα βοηθάει στη γρηγορότερη επαναφορά του συστήματος μετά το σφάλμα.

Έλεγχος ενεργού ισχύος και συχνότητας

Η μη ικανοποίηση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος οδηγεί σε αποκλίσεις από την ονομαστική τιμή της συχνότητας. Οι σύγχρονοι κώδικες απαιτούν από τα Α/Π να παραμένουν συνδεδεμένα σε αποκλίσεις συχνότητας και να παρέχουν απόκριση συχνότητας. Δηλαδή να μεταβάλλουν την ενεργό ισχύ τους σε συνάρτηση με τις διακυμάνσεις της συχνότητας.

Υπό συνθήκες αυξημένης συχνότητας (πλεόνασμα παραγωγής) επιβάλλεται δραστικός περιορισμός της ισχύος εξόδου του σταθμού, ενώ, αντίθετα, σε συνθήκες υποσυχνότητας (έλλειμμα παραγωγής) η παραγωγή του αυξάνεται. Για να επιτευχθεί απόκριση αυτού του τύπου σε συνθήκες υποσυχνότητας, ο σταθμός πρέπει να διαθέτει την απαραίτητη εφεδρεία ισχύος και συνεπώς να λειτουργεί υπό

ελαφρώς μειωμένη ισχύ (σε σχέση με αυτή που μπορεί να παράγει για τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου) υπό κανονικές συνθήκες συχνότητας.

Εκτός από την απόκριση συχνότητας οι περισσότεροι κώδικες προδιαγράφουν τη δυνατότητα περιορισμού της ενεργού ισχύος εξόδου (curtailment) των Α/Π σε μια τιμή αναφοράς (setpoint), με συγκεκριμένο ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος. Αυτή η απαίτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε δίκτυα με περιορισμένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος (κορεσμένο δίκτυο).

Όρια τάσης και συχνότητας

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μπορεί να εμφανιστούν τάσεις και συχνότητες που να αποκλίνουν σε κάποιο βαθμό από τις ονομαστικές τιμές. Οι Κώδικες σε γενικές γραμμές απαιτούν από τους σταθμούς παραγωγής, είτε είναι συμβατικοί είτε κάνουν χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, να παραμένουν συνδεδεμένοι για απόκλιση της τάσης $\pm 10\%$ και για ακραίες τιμές της συχνότητας 47-47.5 Hz και 52-53 Hz αλλά για περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Έλεγχος αέργου ισχύος και τάσης

Για τη διατήρηση της τάσης του συστήματος εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας είναι αναγκαία η εξασφάλιση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης αέργου ισχύος, όχι μόνο σε επίπεδο συνολικού συστήματος, αλλά και τοπικά στις επιμέρους ζώνες του, δεδομένου ότι η άεργος ισχύς δεν μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να παραβιάζονται τα όρια τάσης.

Με την αύξηση της αιολικής διεύθυνσης, τόσο τοπικά όσο και συνολικά σε επίπεδο συστήματος, αναπόφευκτα επηρεάζεται η ρύθμιση της τάσης και καθίσταται αναγκαία η ενεργός συμμετοχή των νέων σταθμών στη διατήρηση του ισοζυγίου αέργου ισχύος. Ενώ παλιότερα υπήρχε η απαίτηση για λειτουργία του αιολικού σταθμού σε σταθερό συντελεστή ισχύος, σήμερα απαιτείται η ικανότητα του για λειτουργία μέσα σε ένα εύρος αποδεκτών συντελεστών ισχύος. Έτσι στους σημερινούς κώδικες τίθενται σημαντικά διευρυμένα όρια δυνατής ρύθμισης του συντελεστή, τόσο σε επαγωγικές όσο και σε χωρητικές τιμές (σε αρκετές περιπτώσεις και πέραν του 0.9 επαγωγικού ή χωρητικού). Επιπλέον, το εύρος ρύθμισης του συντελεστή ισχύος συχνά συναρτάται με την ενεργό ισχύ του σταθμού, δεδομένου ότι υπό χαμηλή παραγωγή υφίσταται αυξημένο περιθώριο αέργου φόρτισης των μονάδων. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις κωδίκων τα ζητούμενα περιθώρια ρύθμισης του συντελεστή εξαρτώνται άμεσα από την τάση του συστήματος στο σημείο σύνδεσης του σταθμού.

Η δυνατότητα ελέγχου του συντελεστή ισχύος εξόδου των αιολικών σταθμών επιτρέπει ποικιλία εναλλακτικών τρόπων ρύθμισης της αέργου παραγωγής τους,

όπως: απλή διατήρηση μιας σταθερής τιμής του συντελεστή ισχύος, υλοποίηση χαρακτηριστικής ρύθμισης βάσει της τάσης του συστήματος, μεταβολή της άεργου ισχύος κεντρικά, με εντολές από το κέντρο κατανομής κλπ.

4.5 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 [Καπανταϊδάκη & Τσούτσος (2006)].

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 [Καπανταϊδάκη & Τσούτσος (2006)].

5. 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 υπεραγωγίμης μαγνητική αποθήκευσης

(Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES), οι σφόνδυλοι και οι μπαταρίες μικρής κλίμακας εντάσσονται στην κατηγορία ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας.

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 καθαρά χημικής ενέργειας όπως γίνεται με τις κυψέλες καυσίμου και τις μπαταρίες μετάλλου-αέρα.
- Θερμική αποθήκευση: Αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα χαμηλής ή υψηλής θερμοκρασίας.

Όλα τα παραπάνω θα αναπτυχθούν εκτενέστερα στις ενότητες που ακολουθούν.

5.1 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 [ΚΑΠΕ (2001)]. 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 [Semadeni (2003)]. 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 [Katsaprakakis et al. (2008)] 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 [ΚΑΠΕ (2001)].

5.2 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 [Bolund et al. (2007)]. Η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στο σφόνδυλο (E_K) είναι ανάλογη της ροπής αδράνειάς του, και κατά συνέπεια και της μάζας του, και ανάλογη του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής βάσει της σχέσης:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (5.1)$$

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 [Bolund et al. (2007), Semadeni (2003)].

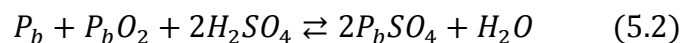
Οι σφόνδυλοι έχουν σημαντικές ιδιότητες που τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές στα υβριδικά συστήματα. Κατά πρώτο λόγο χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές ειδικής ισχύος (μεγαλύτερη από 500 W/kg) και ειδικής ενέργειας. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, η χωρητικότητα του σφονδύλου δεν υποβαθμίζεται, 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 [Kaldelis et al. (2009), Τάσσιου Ι (2005), Bolund et al. (2007)].

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) [Bolund et al. (2007)].

5.3 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. Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση και την φόρτιση είναι:



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

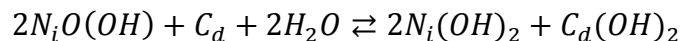
παρατηρείται υπερβολική ηλεκτρόλυση του νερού με ταυτόχρονη εκπομπή υδρογόνου και οξυγόνου από κάθε κελί, αέρια που συνιστούν ένα εκρηκτικό μίγμα. Για αυτό το λόγο απαιτείται η παρουσία μηχανισμού που σταματά τη διαδικασία φόρτισης όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη (trickle charge) [Berndt (2001)]. 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 [ΚΑΠΕ (2001), Berndt (2001), Divya et al. (2009)].

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 [Chen et al. (2009)]. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ο ρυθμός αστοχίας των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι μικρότερος από 0,25% [Semadeni (2003)]. 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 100 kW έως 10 MW [Kaldelis et al. (2009)].

5.4 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. Η συνολική χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι (με φορά προς τα δεξιά η εκφόρτιση) [Chen et al. (2009)]:



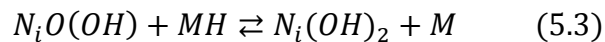
Συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέως, οι νικελίου καδμίου έχουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής ενέργειας (50-75 Wh/kg), μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (2000 – 2500 κύκλοι), υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης, αλλά έχουν μικρότερη απόδοση (60 – 75%) είναι και πιο ακριβές [Chen et al. (2009)]. 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 [Chen et al. (2009), Divya & Østergaard (2009)]. Η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Έχουν εγκατασταθεί υβριδικά συστήματα που διαθέτουν μπαταρίες νικελίου καδμίου ως διατάξεις αποθήκευσης [Baring-Gould & Dabo (2009)].

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 [ΚΑΠΕ (2001), Chen et al. (2009)]. 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.

5.5 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. Οι συνολικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση (προς τα δεξιά) και κατά τη φόρτιση (προς τα αριστερά) είναι [Kopera (2004)]:



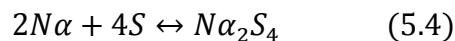
Η χρήση υδριδίου του μετάλλου αντί για κάδμιο εκμηδενίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μπαταριών NiCd, ενώ παράλληλα περιορίζεται η επίδραση του φαινομένου μνήμης, το οποίο εδώ αποκαλείται lazy effect. Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες μπαταρίες που παρουσιάζουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 1000 κύκλους 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 [Kopera (2004)]. 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) [Kopera (2004)].

5.6 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 [Hadjipaschalis et al. (2009)]. 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 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 [Chen et al. (2009), Hadjipaschalis et al. (2009)]. Η συνολική χημική αντίδραση που πραγματοποιείται δίνεται παρακάτω (προς τα δεξιά η εκφόρτιση):



Στα θετικά της τεχνολογίας συμπεριλαμβάνονται οι μεγάλες τιμές πυκνότητα 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 [Chen et al. (2009)]. 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 [Hadjipaschalis et al. (2009)]. 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 [Kaldellis et al. (2009)].

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 [Wen et al. (2008)].

5.7 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 [Kaldellis et al. (2009)].

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

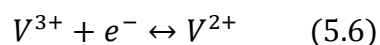
θειικού οξέως με vanadium redox couples, ηλεκτρολύτης βρωμιούχου ψευδαργύρου και ηλεκτρολύτης βρωμιδίου του νατρίου ή πολυθειούχου νατρίου [Chen et al. (2009), Divya et al. (2009)].

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 [Divya et al. (2009)]. Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφονται οι τρεις βασικότερες τεχνολογίες μπαταριών ροής.

5.7.1 Vanadium redox battery (VRB)

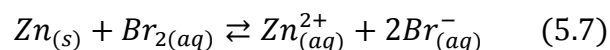
Αυτός ο τύπος μπαταρίας αποθηκεύει ενέργεια με τη χρήση οξειδοαναγωγικών ζευγών βαναδίου (vanadium redox couples), που είναι V^{2+}/V^{3+} στην άνοδο και V^{4+}/V^{5+} στην κάθοδο της κυψέλης, και που περιέχονται σε ήπιο διάλυμα ηλεκτρολύτη θειικού οξέως. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης 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%. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται για το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι αντίστοιχα (η φόρτιση είναι προς τα δεξιά) [Dumancic (2011)]:



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% [Dinva et al. (2009)]. 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 [Chen et al. (2009)].

5.7.2 Μπαταρίες ψευδαργύρου-βρωμίου

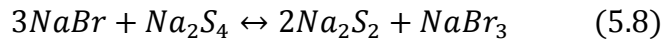
Οι μπαταρίες ψευδαργύρου βρωμίου (Zinc Bromine – ZnBr) χαρακτηρίζονται ως υβριδικές μπαταρίες ροής για λόγους που θα εξηγηθούν στη συνέχεια. Σε κάθε κυψέλη δύο διαφορετικοί ηλεκτρολύτες ρέουν κατά μήκος συνθετικών ηλεκτροδίων άνθρακα –πλαστικού σε δύο διαμερίσματα διαχωρισμένα από μεμβράνη πορώδους πολυολεφίνης. 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. Η συνολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι (προς τα δεξιά η εκφόρτιση) [Singh & Jonshagen (1991)]:



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 [Jossen & Sauer (2006)].

5.7.3 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 [Divya et al. (2009)]. Η συνολική αντίδραση είναι (προς τα δεξιά η εκφόρτιση):



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%.

5.8 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. Οι διαφορές αυτών των δύο τεχνολογιών αναλύονται στις ενότητες που ακολουθούν.

5.8.1 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 [Hadjipaschalis et al. (2009), Kaldelis et al. (2009)]. 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 [Hadjipaschalis et al. (2009)]:

- 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 [Hadjipaschalis et al. (2009), Chen et al. (2009)]. 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% [Najjar & Zaatout (1998)].

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 [Denholm & Kulcinski (2004)]. 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 [Hadjipaschalis et al. (2009)]. 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 [Chen et al. (2009)].

5.8.2 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 [Hadjipaschalis et al. (2009)].

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, η 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 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 [Hadjipaschalis et al. (2009)].

5.9 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 s kW) [Chen et al. (2009)]. Οι υπερπυκνωτές, αντί για στερεό διηλεκτρικό, χρησιμοποιούν ως διαχωριστικό μεταξύ των οπλισμών ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Μειονέκτημα και των πυκνωτών και των υπερπυκνωτών αποτελούν οι μικρές διάρκειες 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 περπυκνωτές αποτελούν ώριμη τεχνολογία, υπερπυκνωτές με πυκνότητες ενέργειας άνω των 20 kWh/m³ είναι ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης.

5.10 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 K ή super fluid ήλιο θερμοκρασίας 1.8 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. Η αποθηκευμένη ενέργεια σε ένα πηνίο SMES δίνεται από την εξίσωση:

$$E = 0,5 \cdot L \cdot I^2 \quad (5.9)$$

όπου L είναι η επαγωγή του πηνίου και I το ρεύμα που το διαρρέει.

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 [Chen et al. (2009)].

5.11 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 A παράγοντας ηλεκτρισμό και ένα χημικό B και αντίστροφα να καταναλώνει ηλεκτρισμό και το χημικό B παράγοντας το χημικό A. 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) [Chen et al. (2009)].

6. 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 χρήσης 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 συναντώνται ευρύτερα. Η εγκατάστασή 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 (ΜΕΚ), 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 [Σαραφianός, Σειραγάκης (2009)].

Οι ΜΕΚ ονομάζονται έτσι διότι η καύση του καυσίμου που χρησιμοποιούν γίνεται μέσα σε αυτές, εν αντιθέσει με άλλες τεχνολογίες, όπως οι αεριοστρόβιλοι για παράδειγμα, όπου η καύση γίνεται σε λέβητα. Οι ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί κάνουν χρήση εμβολοφόρων μηχανών. Οι εμβολοφόρες ΜΕΚ, 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 24 κύλινδρες. Ακόμη, ανάλογα με τον αριθμό των χρόνων του κύκλου λειτουργίας τους χωρίζονται σε τετράχρονες και δίχρονες [Σαραφιανός, Σειραγάκης (2009)].

Στα βασικά πλεονεκτήματα των ντιζελομηχανών, πέραν της άμεσης φόρτισης και λειτουργία τους, συγκαταλέγονται η ελαφριά και μικρή δομή τους, οι μη πολύπλοκες εγκαταστάσεις, ο υψηλός βαθμός απόδοσης σε μικρές και μέσες ισχύς (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%).

7. Σχετικά με το πρόγραμμα

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός συστήματος ηλεκτροπαραγωγής πρέπει να ληφθούν διάφορες αποφάσεις ώστε να είναι ρυθμισμένο και να λειτουργεί ορθά, όπως το τι είδους στοιχεία πρέπει να συμπεριληφθούν στο σύστημα, σε τι ποσότητα και σε ποιο μέγεθος. Η ποικιλία των τεχνολογιών που είναι πλέον διαθέσιμες, οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας και το αποθεματικό τους, καθώς και το κόστος του κάθε προς χρήση στοιχείου καθιστούν πολύπλοκες αυτές τις αποφάσεις. Το Homer, που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, συμβάλει στην διευκόλυνση αυτής της αλληλουχίας αποφάσεων. Σχεδιάστηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας των ΗΠΑ (National Renewable Energy Laboratory - NREL) ως μοντέλο βελτιστοποίησης διεσπαρμένης ενέργειας και συνεπώς παρέχει μοντέλα βελτιστοποίησης για μικρά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής, απλοποιώντας τη διαδικασία αξιολόγησης του σχεδιασμού συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για πληθώρα εφαρμογών, είτε αυτά είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης είτε όχι.

Το Homer αναπτύσσεται και εμπλουτίζεται από τον Φεβρουάριο του 2000. Αποτελεί ένα εξελιγμένο εργαλείο προσομοίωσης και έχει χρησιμοποιηθεί για τον αρχικό σχεδιασμό χιλιάδων απλών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής ανά τον κόσμο. Τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων στοιχεία των ανανεώσιμων πηγών (αναμενόμενες ταχύτητες ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία κτλ.), δεδομένα του φορτίου ζήτησης, κόστη λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος, αρχικό κόστος της επένδυσης κ.α.

Το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη του τις οικονομικές και τεχνικές δυνατότητες του επιθυμητού συστήματος και δημιουργεί αναλυτικές εκθέσεις οι οποίες παρουσιάζουν πλήθος χαρακτηριστικών του εκάστοτε συστήματος (αρχικό κόστος επένδυσης, ετήσιο κόστος λειτουργίας, βαθμός εισχώρησης ανανεώσιμων πηγών κτλ.). Παράλληλα, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και ανάλυσης ευαισθησίας που χρησιμοποιεί το Homer κάνουν ευκολότερη την εκτίμηση των διαθέσιμων παραμετροποιήσεων που μπορεί να γίνουν στο σύστημα ώστε να είναι αποδοτικότερο. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικότερα τα στάδια λειτουργίας του προγράμματος.

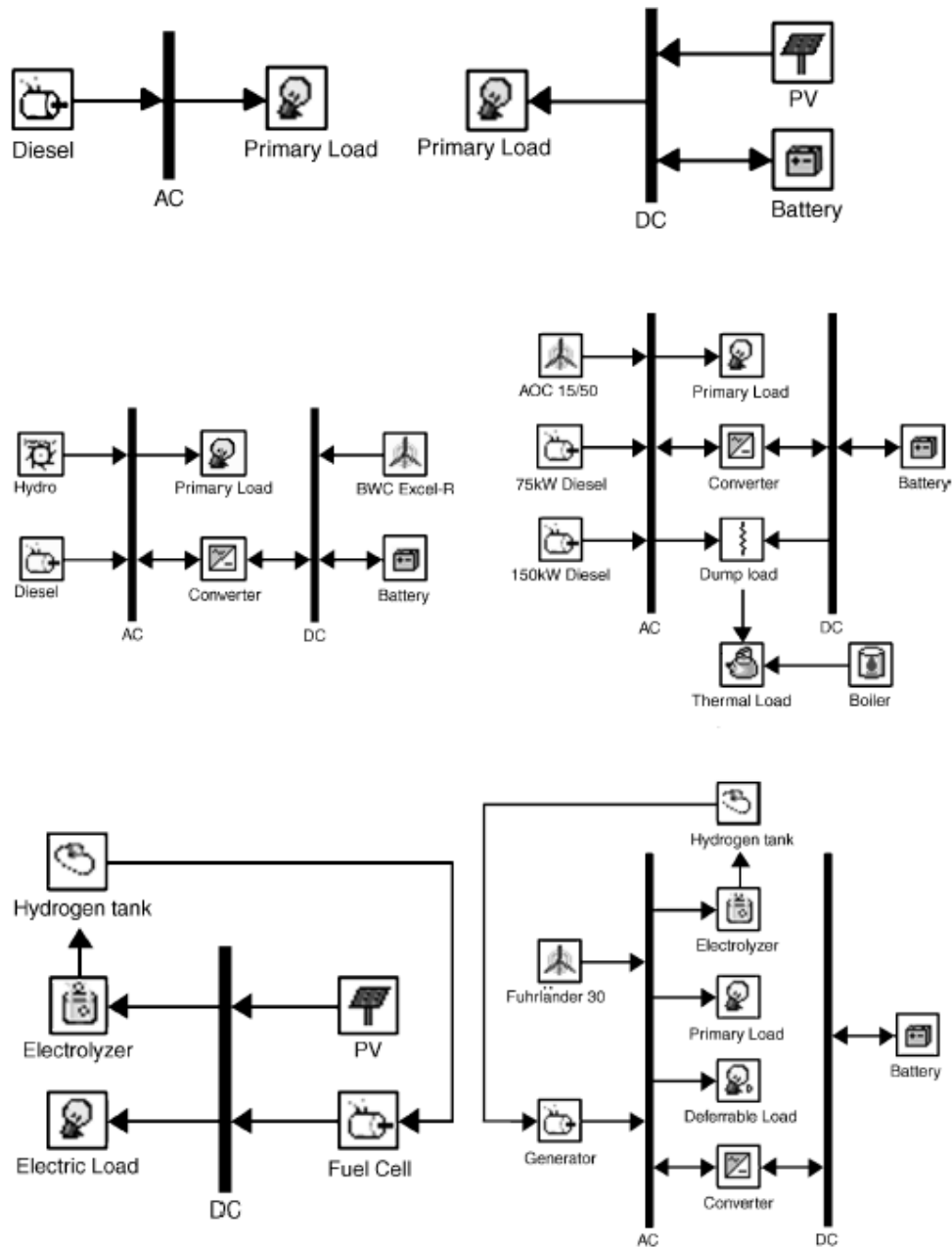
7.1 Προσομοίωση

Η βασικότερη δυνατότητα του Homer είναι η προσομοίωση της μακροπρόθεσμης λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Οι δυνατότητες βελτιστοποίησης και ανάλυσης ευαισθησίας είναι πιο εξειδικευμένες και βασίζονται στην δυνατότητα της προσομοίωσης. Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης προσδιορίζεται το πώς μία συγκεκριμένη διαμόρφωση του συστήματος, ένας συνδυασμός στοιχείων συγκεκριμένου μεγέθους και μία στρατηγική λειτουργίας που καθορίζει το πώς αυτά τα στοιχεία συνεργάζονται μεταξύ τους, θα λειτουργούν σε βάθος χρόνου και σε ένα δεδομένο περιβάλλον.

Το Homer δύναται να προσομοιώσει πληθώρα διαμορφώσεων για ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες ανεμογεννήτριες, κάθε δυνατό συνδυασμό ΦΒ πάνελ, μέχρι τρεις γεννήτριες, συστοιχίες μπαταριών, έναν AC-DC μετατροπέα, έναν ηλεκτρολύτη, μία μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου και μία υδρογεννήτρια. Το σύστημα μπορεί να είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο ή να είναι αυτόνομο και να εξυπηρετεί θερμικό και ηλεκτρικό φορτίο, είτε αυτό είναι συνεχές, είτε είναι εναλλασσόμενο. Στο σχήμα 7.1 φαίνονται κάποια παραδείγματα συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να προσομοιώσει το Homer.

Για τα συστήματα που περιλαμβάνουν μπαταρίες και μία ή περισσότερες γεννήτριες πετρελαίου απαιτείται να υπάρχει μία στρατηγική αποδέσμευσης, η οποία θα ορίζει τους κανόνες βάσει των οποίων το σύστημα θα φορτίζει τις μπαταρίες. Το πρόγραμμα μπορεί να μοντελοποιήσει τις εξής δύο στρατηγικές: (1) οι μπαταρίες φορτίζονται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά όχι από τις γεννήτριες (load following strategy), (2) οι μπαταρίες φορτίζονται από τις γεννήτριες, οι οποίες όταν τίθενται σε λειτουργία παράγουν περισσότερη ενέργεια από αυτήν του φορτίου, ώστε η περίσσεια να αποθηκεύεται στις μπαταρίες (cycle-charging strategy).

Η διαδικασία της προσομοίωσης έχει δύο στόχους. Κατ' αρχάς προσδιορίζει αν το εξεταζόμενο σύστημα είναι εφικτό. Το πρόγραμμα θεωρεί πως ένα σύστημα είναι εφικτό εάν μπορεί να εξυπηρετήσει επαρκώς το θερμικό ή/και ηλεκτρικό φορτίο ζήτησης ενώ παράλληλα να ικανοποιεί κάθε περιορισμό που έχει θέσει ο χρήστης. Επιπλέον, υπολογίζει το κόστος για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος, το οποίο ισούται με το σύνολο του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος, και εξυπηρετεί την σύγκριση διαφόρων διαμορφώσεων του συστήματος.



Σχήμα 7. 1 Παραδείγματα ΣΗΕ που μπορεί να προσομοιώσει το HOMER

Το Homer μοντελοποιεί την εκάστοτε διαμόρφωση του συστήματος εκτελώντας προσομοίωση της λειτουργίας του για τη διάρκεια ενός έτους. Συνηθίζεται η προσομοίωση με ωριαίο βήμα, αν και το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα ορισμού βήματος ανά όσα λεπτά επιθυμεί ο ερευνητής. Διατρέχει δηλαδή όλο το έτος με το βήμα που του έχει οριστεί, υπολογίζοντας τη διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συγκρίνοντάς την με το φορτίο ζήτησης και αποφασίζοντας πώς θα διαχειριστεί το πλεόνασμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή πώς θα παράγει (ή θα αγοράσει από το δίκτυο) ενέργεια ώστε να καλύψει το φορτίο σε περιόδους ελλείμματος. Όταν ολοκληρωθούν αυτοί οι

υπολογισμοί για όλο το έτος, το Homer προσδιορίζει εάν το σύστημα ικανοποιεί τους περιορισμούς που έχει ορίσει ο χρήστης. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να αφορούν το ποσοστό του εξυπηρετούμενου φορτίου, το ποσοστό διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τις εκπομπές ρύπων κτλ.

Το πρόγραμμα προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος για ένα έτος και θεωρεί πως είναι αντιπροσωπευτικά για όλα τα υπόλοιπα έτη της εκτιμώμενης συνολικής διάρκειας ζωής του συστήματος. Δεν λαμβάνει υπόψη του αλλαγές όπως αύξηση του φορτίου ζήτησης ή μείωση της απόδοσης των μπαταριών. Όμως ο ερευνητής μπορεί να εξετάσει τις επιπτώσεις τέτοιων παραγόντων με την ανάλυση ευαισθησίας, για την οποία γίνεται λόγος σε παρακάτω ενότητα.

7.2 Βελτιστοποίηση

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης υποδεικνύει την καλύτερη δυνατή διαμόρφωση του συστήματος, σε αντίθεση με τη διαδικασία προσομοίωσης, η οποία μοντελοποιεί μία συγκεκριμένη διαμόρφωση. Για το Homer, ως βέλτιστη διαμόρφωση ορίζεται αυτή που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς που έχει θέσει ο χρήστης και έχει το χαμηλότερο κόστος. Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος θα πρέπει να ληφθούν αποφάσεις για τον συνδυασμό των στοιχείων που θα συμπεριληφθούν, το μέγεθος ή το πλήθος κάθε τέτοιου στοιχείου και την στρατηγική αποδέσμευσης που θα πρέπει να χρησιμοποιεί το σύστημα. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης το Homer προσομοιώνει πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος, απορρίπτει αυτές που δεν ικανοποιούν τους περιορισμούς που έχει θέσει ο χρήστης, κατηγοριοποιεί τις υπόλοιπες εφικτές διαμορφώσεις βάσει το συνολικού τους κόστους και παρουσιάζει ως βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος αυτήν που έχει το μικρότερο κόστος.

Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι να προσδιοριστεί η καλύτερη τιμή για κάθε μεταβλητή αποφάσεως που ενδιαφέρει τον χρήστη. Ως μεταβλητή αποφάσεως ορίζεται κάθε μεταβλητή που ελέγχεται από τον σχεδιαστή του συστήματος και για την οποία το Homer μπορεί να εξετάσει πολλαπλές τιμές κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησής της. Τέτοιου είδους μεταβλητές στο Homer είναι οι εξής:

- Το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος
- Ο αριθμός των ανεμογεννητριών
- Το μέγεθος κάθε γεννήτριας
- Το πλήθος των μπαταριών

- Το μέγεθος του μετατροπέα AC-DC
- Η στρατηγική αποδέσμευσης (το σύνολο των κανόνων που καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος)

Το πρόγραμμα δίνει στον σχεδιαστή τη δυνατότητα να εισάγει πολλές τιμές για κάθε μεταβλητή αποφάσεως. Στον πίνακα 7.1 φαίνεται ο χώρος αναζήτησης για την βέλτιστη λύση, όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει οποιοδήποτε πλήθος τιμών για κάθε μεταβλητή αποφάσεως. Τα βήματα μεταξύ των τιμών δεν χρειάζεται ισαπέχουν ή να ακολουθούν συγκεκριμένη μορφή. Ο χώρος αναζήτησης περιλαμβάνει το σύνολο όλων των πιθανών διαμορφώσεων του συστήματος, οι οποίες ισούνται με $320 (4 \text{ μεγέθη } \Phi\text{B} * 5 \text{ ποσότητες } \text{ΑΓ} * 4 \text{ μεγέθη γεννητριών} * 1 \text{ ποσότητα αγορών από το δίκτυο} * 4 \text{ μεγέθη μετατροπέων})$.

	PV Array (kW)	PGE25 (Quantity)	Gener (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)
1	10.000	0	100.00	500.000	50.00
2	200.000	10	300.00		300.00
3	500.000	50	500.00		750.00
4	1,000.000	100	1,000.00		1,500.00
5		200			
6					
7					
8					
9					
10					

Πίνακας 7.1 Χώρος αναζήτησης 320 διαμορφώσεων συστήματος

Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, το Homer προσομοιώνει κάθε διαμόρφωση του συστήματος που βρίσκεται εντός του χώρου αναζήτησης και παρουσιάζει τις εφικτές, ταξινομημένες βάσει του συνολικού καθαρού παρόντος κόστους τους. Στον πίνακα 7.2 φαίνονται τα αποτελέσματα ενός συστήματος με ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και γεννήτρια πετρελαίου που είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο. Κάθε γραμμή του πίνακα αποτελεί μία εφικτή διαμόρφωση του συστήματος. Οι πέντε πρώτες στήλες περιέχουν εικονίδια που υποδηλώνουν την ύπαρξη ή μη ενός στοιχείου στην εκάστοτε διαμόρφωση. Οι επόμενες πέντε δηλώνουν την ποσότητα ή το μέγεθος των στοιχείων αυτών και οι υπόλοιπες επτά δίνουν κάποια βασικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση (αρχικό κεφάλαιο, κόστος λειτουργίας, συνολικό καθαρό κόστος, κόστος ενέργειας, ποσοστό διείσδυσης των ΑΠΕ, κατανάλωση καυσίμου και ώρες λειτουργίας της γεννήτριας ανά έτος). Αυτός ο πίνακας αποτελεί περίληψη των στοιχείων της κάθε προσομοίωσης, τα αναλυτικά στοιχεία για κάθε μία από αυτές παρέχονται στον χρήστη όταν αυτό επιλέξει μία διαμόρφωση με διπλό κλικ.

		PV (kW)	PGE25	Gener (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Gener (hrs)
							\$ 15,525,000	-1,117,136	\$ 1,244,251	0.019	0.93	137,576	1,680
							\$ 15,600,000	-1,115,545	\$ 1,339,597	0.021	0.93	137,576	1,680
							\$ 14,825,000	-1,015,047	\$ 1,849,291	0.029	0.91	154,766	1,900
							\$ 14,780,000	-1,010,376	\$ 1,864,003	0.029	0.91	154,766	1,900
							\$ 14,900,000	-1,012,047	\$ 1,962,641	0.031	0.91	154,766	1,900
							\$ 15,480,000	-1,041,449	\$ 2,166,792	0.034	0.92	137,576	1,680
							\$ 14,360,000	-918,042	\$ 2,624,343	0.041	0.90	189,646	2,346
							\$ 14,405,000	-916,242	\$ 2,692,353	0.042	0.90	189,646	2,346
							\$ 14,480,000	-913,242	\$ 2,805,703	0.044	0.90	189,646	2,346
							\$ 14,335,000	-887,668	\$ 2,987,624	0.047	0.90	198,287	2,455
							\$ 14,069,000	-858,563	\$ 3,093,677	0.048	0.89	211,168	2,603
							\$ 14,094,000	-857,563	\$ 3,131,462	0.049	0.89	211,168	2,603
							\$ 14,139,000	-855,763	\$ 3,199,471	0.050	0.89	211,168	2,603
							\$ 14,214,000	-852,763	\$ 3,312,821	0.052	0.89	211,168	2,603
							\$ 14,755,000	-883,744	\$ 3,457,791	0.054	0.90	195,261	2,418
							\$ 15,575,000	-918,836	\$ 3,829,190	0.060	0.93	260,530	1,680
							\$ 15,650,000	-917,244	\$ 3,924,540	0.061	0.93	260,530	1,680
							\$ 15,455,000	-868,359	\$ 4,354,461	0.068	0.91	194,508	2,409
							\$ 15,530,000	-843,148	\$ 4,751,743	0.074	0.92	260,530	1,680
							\$ 14,875,000	-789,858	\$ 4,777,961	0.074	0.91	294,634	1,900
							\$ 14,830,000	-785,187	\$ 4,792,672	0.075	0.91	294,634	1,900
							\$ 14,950,000	-786,858	\$ 4,891,311	0.076	0.91	294,634	1,900
							\$ 8,525,000	-247,365	\$ 5,362,846	0.084	0.86	155,724	1,910
							\$ 8,600,000	-245,773	\$ 5,458,197	0.085	0.86	155,724	1,910

Πίνακας 7. 2 Μέρος πιθανών διαμορφώσεων του συστήματος

7.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθεί το πρόγραμμα κατά την βελτιστοποίηση, όπου το Homer βρίσκει την καλύτερη διαμόρφωση του συστήματος έχοντας ως δεδομένο ένα συγκεκριμένο σύνολο αρχικών υποθέσεων που αφορούν τα δεδομένα εισόδου. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται κατά την ανάλυση ευαισθησίας, όπου το Homer εκτελεί πολλαπλές βελτιστοποιήσεις, κάθε μία εκ των οποίων αφορά ένα διαφορετικό σύνολο υποθέσεων εισόδου. Στόχος της ανάλυσης ευαισθησίας είναι να εξεταστεί το πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα εξόδου από τις αρχικές υποθέσεις.

Για την ανάλυση ευαισθησίας, ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει στο πρόγραμμα ένα εύρος πιθανών τιμών που μπορεί να έχει μία μεταβλητή εισόδου. Μία τέτοια μεταβλητή, για την οποία έχουν τεθεί πολλαπλές τιμές, ονομάζεται μεταβλητή ευαισθησίας (sensitivity variable). Ως μεταβλητή ευαισθησίας μπορούν να τεθούν σχεδόν όλες οι αριθμητικές μεταβλητές του προγράμματος, που δεν αποτελούν μεταβλητές αποφάσεως. Δηλαδή ως μεταβλητές αποφάσεως δύναται να οριστούν η τιμή με την οποία παρέχει ισχύ το δίκτυο, η τιμή του καυσίμου, το επιτόκιο, η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πάνελ, ή ακόμα και το αναμενόμενο ωριαίο φορτίο του συστήματος και τα ωριαία δεδομένα που αφορούν τις ανανεώσιμες πηγές.

Ο χρήστης μπορεί να εισάγει όσες μεταβλητές ευαισθησίας επιθυμεί. Κάθε συνδυασμός αυτών ορίζει μία ξεχωριστή περίπτωση ευαισθησίας. Για παράδειγμα, εάν ο χρήστης εισάγει έξι πιθανές τιμές κόστους της ενέργειας που αγοράζει το υβριδικό σύστημα από το δίκτυο και τέσσερις πιθανές τιμές επιτοκίου, δημιουργούνται αυτομάτως είκοσι τέσσερις ξεχωριστές περιπτώσεις ευαισθησίας. Το πρόγραμμα εκτελεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε περίπτωση ευαισθησίας και παρουσιάζει τα αποτελέσματα υπό μορφή πινάκων και γραφικών παραστάσεων.

Ο βασικότερος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας είναι για να εξαιρεθεί ο παράγοντας της αβεβαιότητας και να μπορέσει ο χρήστης να εξετάσει όλα τα διαφορετικά σενάρια που τον ενδιαφέρουν. Με λίγα λόγια η ανάλυση ευαισθησίας βοηθάει τον χρήστη να κατανοήσει τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν κάποιοι παράγοντες στο σύστημα που σχεδιάζει και να πάρει τις ευνοϊκότερες γι' αυτόν αποφάσεις.

8. Προσομοιώσεις

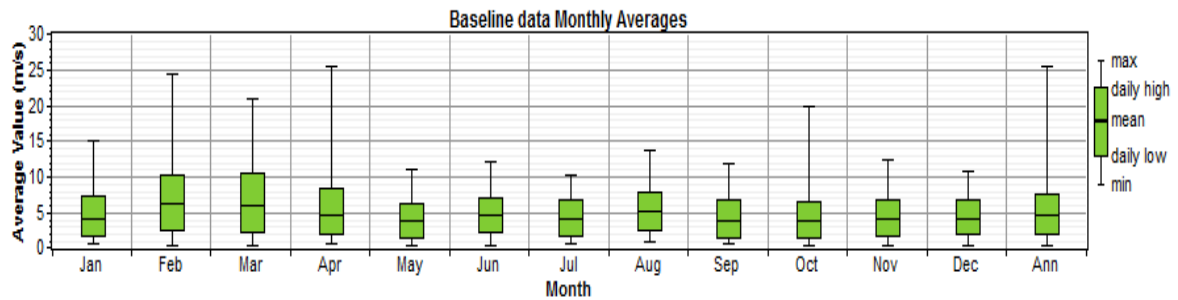
Το υβριδικό σύστημα που μοντελοποιήθηκε είχε ως στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μίας επαρχιώτικης περιοχής των Χανίων με περίπου 1000-1500 κατοίκους. Σε αυτό ενσωματώθηκαν ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πλαίσια, ώστε να αξιοποιηθούν η αιολική και ηλιακή ενέργεια αντίστοιχα.

Έγιναν προσομοιώσεις με ωριαίο βήμα διάτρεξης για δύο διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος. Στην πρώτη περίπτωση το σύστημα ήταν συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο, οπότε η παρουσία μπαταριών και γεννήτριας πετρελαίου κρίθηκε ως μη αναγκαία. Στην δεύτερη περίπτωση το σύστημα δεν ήταν συνδεδεμένο με το δίκτυο. Ως αυτόνομο σύστημα, προκειμένου να διατηρήσει την αξιοπιστία του έπρεπε να είναι εξοπλισμένο με γεννήτρια, ώστε να εξυπηρετείται το φορτίο και τις ώρες που δεν υπάρχει η απαραίτητη ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ, και με μπαταρίες, ώστε να αποθηκεύεται η περίσσεια ενέργειας όταν η παραγωγή ισχύος από ΑΠΕ υπερβαίνει τις ανάγκες του φορτίου, και να χρησιμοποιείται όταν παρουσιάζεται έλλειμμα.

Και στις δύο περιπτώσεις τα δεδομένα που αφορούν το αιολικό δυναμικό, την ηλιοφάνεια της περιοχής καθώς και το φορτίο ζήτησης είναι σταθερά και δίνονται στις παρακάτω ενότητες.

8.1 Δεδομένα αιολικού δυναμικού

Για την διεξαγωγή της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από μετρήσεις ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή της Μαλάξας, που είχαν γίνει το 2006. Η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου υπολογίζεται στα 4.46 m/s. Παρακάτω φαίνεται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση ταχύτητα ανέμου, για κάθε μήνα του έτους.

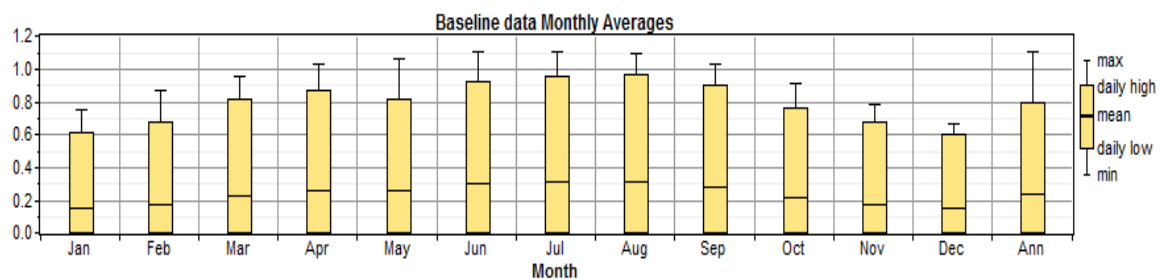


Σχήμα 8.1 Μέσες μηνιαίες τιμές ταχύτητας ανέμου

8.2 Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας

Για την απόκτηση των δεδομένων που αφορούν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή του παρακάτω συνδέσμου: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>

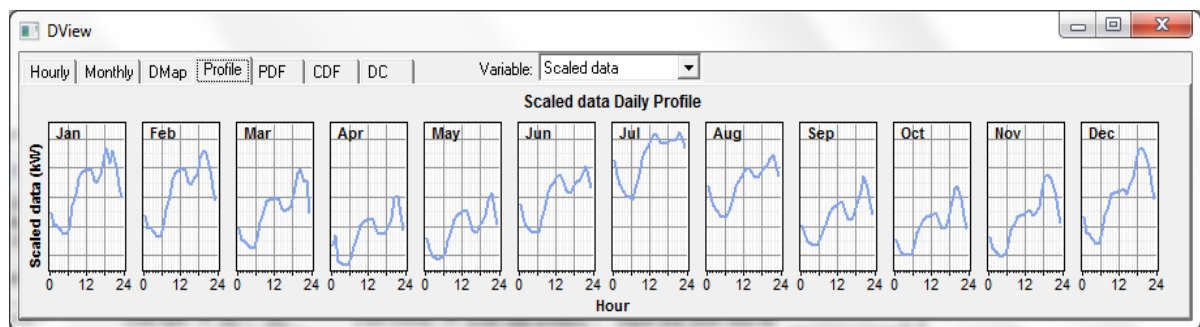
Αποτελεί μία εφαρμογή του Ινστιτούτου Ενέργειας και Μεταφοράς (Institute of Energy and Transport - IET), η οποία, εισάγοντας τις συντεταγμένες της προς μελέτη περιοχής, υπολογίζει την αναμενόμενη ετήσια ηλιοφάνεια. Βάσει αυτής υπολογίζεται πως η μέση ημερήσια ηλιοφάνεια ανέρχεται στις 5,65 kWh/m² για ολόκληρο το έτος, ενώ οι μέγιστες, οι ελάχιστες και οι μέσες μηνιαίες τιμές δίνονται από το σχήμα που ακολουθεί.



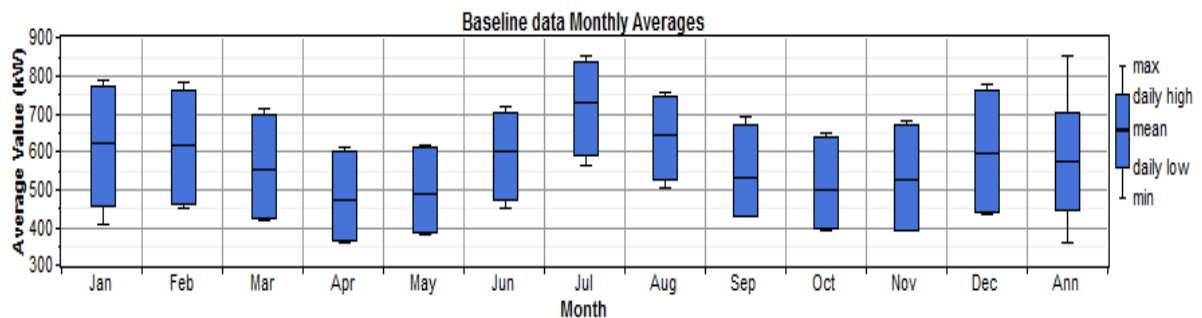
Σχήμα 8.2 Μέσες ημερήσιες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα

8.3 Δεδομένα φορτίου

Όπως προαναφέρθηκε, το υβριδικό σύστημα που μοντελοποιήθηκε είχε ως στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών 1000-1500 κατοίκων μίας περιοχής. Για την δημιουργία του απαιτούμενου ενεργειακού προφίλ χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του 2012 από τον ιστότοπο της ΑΔΜΗΕ. Το Homer, προκειμένου να εκτελέσει μία αξιόπιστη προσομοίωση του σχεδιαζόμενου συστήματος, ζητά το φορτίο ζήτησης για κάθε ώρα της ημέρας και κάθε μήνα του έτους, κάνοντας διαχωρισμό σε καθημερινές και σαββατοκύριακα. Μετά την επιτυχή εισαγωγή τους υπολογίστηκε πως η μέση ενεργειακή κατανάλωση των κατοίκων ισούται με 14MWh ημερησίως. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται το ωριαίο ενεργειακό προφίλ για κάθε μήνα του έτους και οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές του ημερήσιου φορτίου επίσης ανά μήνα.



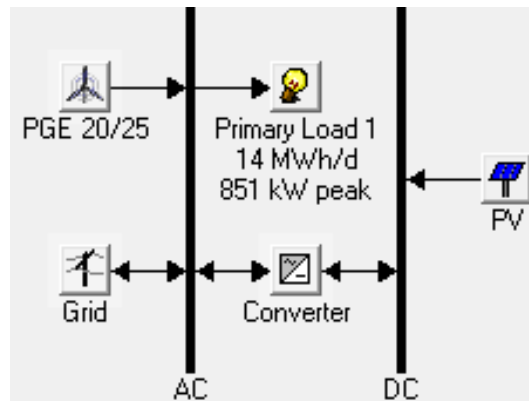
Σχήμα 8.3 Ενεργειακό προφίλ κατανάλωσης



Σχήμα 8.4 Μέσο ημερήσιο φορτίο ανά μήνα

8.4 Υβριδικό ΣΗΕ συνδεδεμένο σε δίκτυο

Η αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ενώ τα χαρακτηριστικά των επί μέρους στοιχείων που το αποτελούν αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

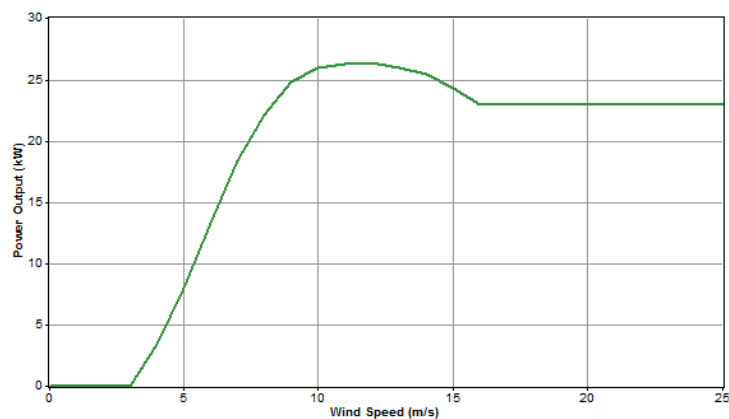


Σχήμα 8.5 Αρχιτεκτονική υβριδικού ΣΗΕ που συνδέεται με δίκτυο

Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν και για τις δύο διαμορφώσεις του συστήματος, λόγω της αποδοτικότητάς τους για το αιολικό προφίλ των Χανίων είναι οι PGE25 που κατασκευάζονται από την Energie PGE. Αποδίδουν ονομαστική ισχύ 25kW, με αρχικό κόστος αγοράς στις 70.000 € ανά μονάδα, κόστος αντικατάστασης στις 50.000€ και κόστος λειτουργίας στα 1000€/έτος. Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας καθώς και τα τεχνικά της χαρακτηριστικά δίνονται παρακάτω.

Το εύρος αναζήτησης που ορίστηκε στο πρόγραμμα για την εύρεση του βέλτιστου πλήθους Α/Γ που θα χρησιμοποιεί το σύστημα ήταν 10, 15, 20, 25, 35 ή 50 μονάδες.



Σχήμα 8.6 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

Ονομαστική ισχύς	25 kW
Ταχύτητα αποκοπής (χαμηλού ανέμου)	1,7 m/s
Ταχύτητα αποκοπής (υψηλού ανέμου)	25 m/s
Διάμετρος δρομέα	20 m
Ταχύτητα περιστροφής	32 rpm
Ύψος πλήμνης	25 m
Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας	3,5 m/s
Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής	20 έτη

Πίνακας 8.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ΑΓ

Φωτοβολταϊκά

Για την προσομοίωση επιλέχθηκαν φωτοβολταϊκά τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου χωρίς σύστημα ανίχνευσης (tracking system). Το κόστος εγκατάστασης και αντικατάστασης των φωτοβολταϊκών στοιχείων που επιλέχθηκαν ανέρχεται στις 20.000 € για κάθε 10kW, ενώ έχουν κόστος λειτουργίας και συντήρησης περίπου 350€ ανά έτος. Η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής τους είναι τα 25 έτη.

Το εύρος αναζήτησης που ορίστηκε στο πρόγραμμα για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους του συνολικού φωτοβολταϊκού συστήματος ήταν τα 100, 200, 300, 400 και 500 kW.

Μετατροπέας

Κάθε ΣΗΕ που περιλαμβάνει Φ/Β, μπαταρίες ή και κάποιο άλλο στοιχείο που παράγει συνεχές ρεύμα, ενώ καλείται να εξυπηρετήσει εναλλασσόμενο φορτίο, ή αντίστροφα, θα πρέπει να είναι εξοπλισμένο με έναν μετατροπέα. Ένας μετατροπέας μπορεί να λειτουργεί ως ανορθωτής/rectifier (AC/DC), ως αντιστροφέας/inverter (DC/AC) ή να μπορεί να εκτελέσει και τις δύο μετατροπές. Ζητούμενο στην παρούσα περίπτωση είναι το συνεχές ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά και τις μπαταρίες να μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο, να διοχετεύεται στον AC δίαυλο διανομής και τελικά να χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση του φορτίου.

Ο μετατροπέας που επιλέχθηκε για τις προσομοιώσεις έχει εκτιμώμενο χρόνο ζωής 15 έτη, 90% απόδοση όταν λειτουργεί ως αντιστροφέας και 85% όταν λειτουργεί ως ανορθωτής. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης ανέρχεται στα 500€/kW, το κόστος αντικατάστασης υπολογίζεται στα 450€, ενώ το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι περίπου 50€/έτος.

Το εύρος αναζήτησης που ορίστηκε στο πρόγραμμα για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους που θα έχει ο μετατροπέας ήταν τα 200, 250, 350, 450 και 550 kW.









Δίκτυο

Το κεντρικό δίκτυο με το οποίο είναι συνδεδεμένο το υπό μελέτη υβριδικό ΣΗΕ παρέχει ισχύ με 0,10€/kWh, ενώ αγοράζει την πλεονάζουσα ενέργεια που του επιστρέφεται από ΣΗΕ με 0,15€/kWh. Προκειμένου να περιοριστεί η ποσότητα ισχύος που θα αγοραστεί από το δίκτυο, ορίστηκαν ως εύρος αναζήτησης τα 200, 400, 600 ή 800 kW συνολικά. Επιπλέον τέθηκε ως μεταβλητή ευαισθησίας η ποσότητα ισχύος που μπορεί να πουλήσει το σύστημα στο δίκτυο, με εύρος αναζήτησης για τη βέλτιστη τιμή τα 0, 100, 200, 300 ή 400 kW.

8.4.1 Αποτελέσματα









Από τις 600 συνολικά διαφορετικές διαμορφώσεις που μπορούν να προκύψουν βάσει των δεδομένων εισόδου που ορίστηκαν, το Homer προτείνει τις εξής ως βέλτιστες, ανάλογα με την εκάστοτε μεταβλητή ευαισθησίας:

-Για ικανότητα πώλησης 0 kW στο δίκτυο:

				PV (kW)	PGE25	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage
				100	15	200	600	\$ 1,350,000	400,150	\$ 6,465,262	0.103	0.27	0.02









Σχήμα 8.7 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (0 kW)

-Για ικανότητα πώλησης 100 kW στο δίκτυο:

				PV (kW)	PGE25	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage
				100	25	200	600	\$ 2,050,000	340,788	\$ 6,406,409	0.102	0.41	0.02



Σχήμα 8.8 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (100 kW)

-Για ικανότητα πώλησης 200 kW στο δίκτυο:

				PV (kW)	PGE25	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage
				100	25	200	600	\$ 2,050,000	335,327	\$ 6,336,604	0.101	0.41	0.02

Σχήμα 8.9 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (200 kW)







- Για ικανότητα πώλησης 300 kW στο δίκτυο:

				PV (kW)	PGE25	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage
				100	35	200	600	\$ 2,750,000	265,891	\$ 6,148,980	0.097	0.52	0.02

Σχήμα 8.10 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (300 kW)

Περιγραφή, προσομοίωση & βέλτιστη διαστασιολόγηση υβριδικού ΣΗΕ

- Για ικανότητα πώλησης 400 kW στο δίκτυο:

			PV (kW)	PGE25	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage
			100	35	200	600	\$ 2,750,000	257,182	\$ 6,037,652	0.096	0.52	0.02

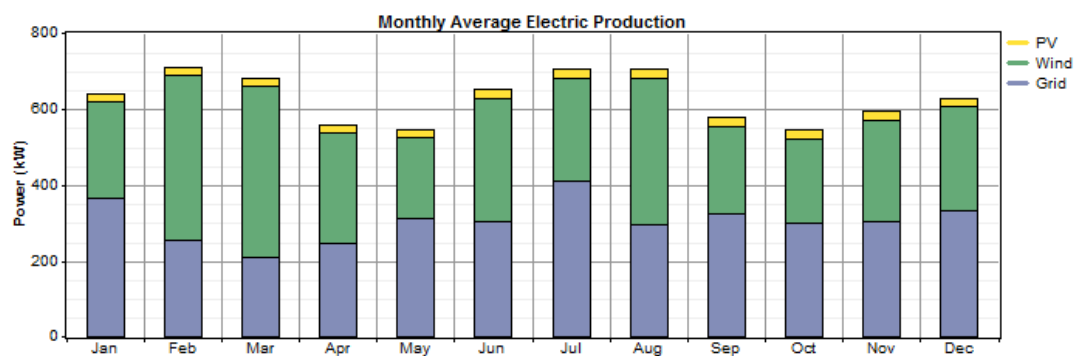
Σχήμα 8.11 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (400 kW)

Είναι προφανές από τα αποτελέσματα πως επιτρέποντας στο σύστημα να πουλήσει περισσότερη ισχύ στο δίκτυο, μειώνονται τα λειτουργικά του έξοδα. Γι' αυτό τον λόγο θεωρεί συμφέρουσα επιλογή την ενσωμάτωση περισσότερων ανεμογεννητριών, γεγονός που συντελεί παράλληλα στην αύξηση του συντελεστή διείσδυσης των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας αλλά και στη μείωση του κόστους ενέργειας (COE). Επιλέγοντας λοιπόν ως πιο συμφέρουσα λύση αυτήν του σχήματος 8.11, το συνολικό κόστος για κάθε στοιχείο που συμπεριλαμβάνεται στο σύστημα, για τα 25 πρώτα έτη λειτουργίας του, δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
PV	200,000	0	44,742	0	0	244,742
PGE 20/25	2,450,000	545,659	447,418	0	-305,811	3,137,266
Grid	0	0	2,397,249	0	0	2,397,249
Converter	100,000	37,554	127,834	0	-6,990	258,398
System	2,750,000	583,213	3,017,242	0	-312,801	6,037,654

Πίνακας 8.2 Κόστος στοιχείων για τα 25 πρώτα έτη λειτουργίας του συστήματος

Το 48% του φορτίου ζήτησης εξυπηρετείται από το δίκτυο, ενώ οι Α/Γ παράγουν το 48% και τα ΦΒ το υπολειπόμενο 3% της ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών. Συνεπώς ο συντελεστής διείσδυσης των ΑΠΕ ορίζεται στο 0,515. Παρακάτω φαίνονται σχηματικά τα ποσοστά ενέργειας που παράγονται από ΑΠΕ καθώς και το ποσοστό που προέρχεται από το δίκτυο.

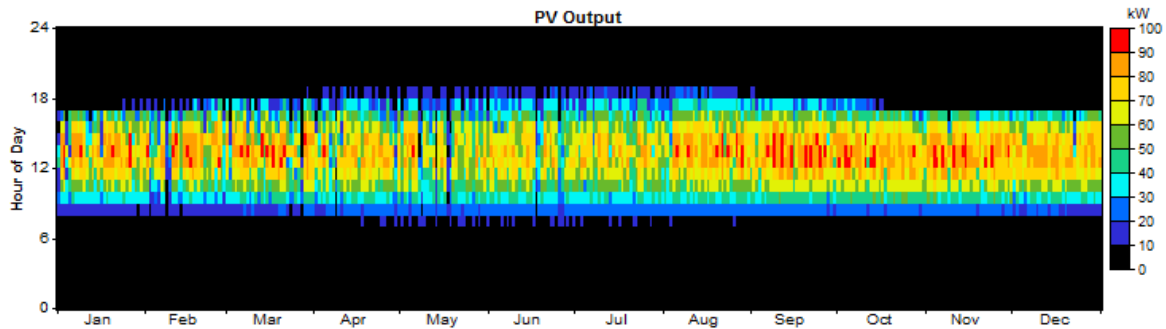


Σχήμα 8.11 Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα ποσοστό της τάξεως του 1,63% του συνολικού φορτίου ζήτησης μένει ανικανοποίητο, λόγω ανεπαρκούς παραγωγής σε ώρες αυξημένης ζήτησης, όμως βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων. Αξίζει να αναφερθεί επίσης πως στη διάρκεια

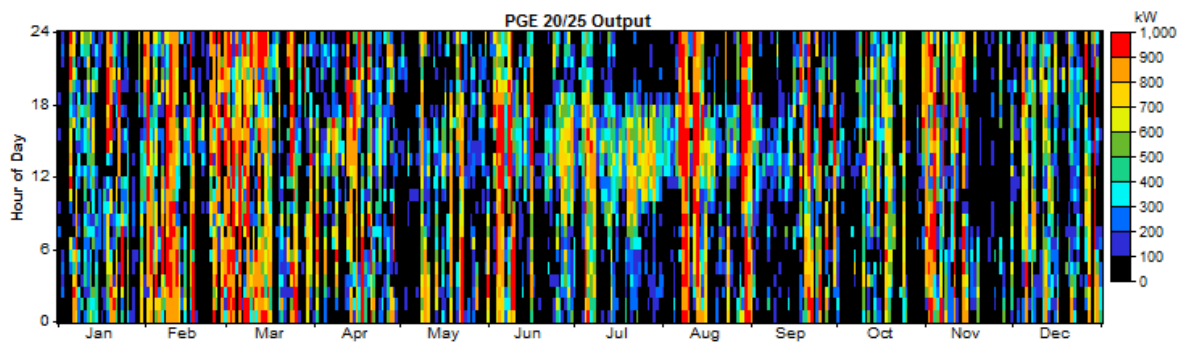
του έτους υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής παραγωγής της τάξεως των 19.700 kWh. Αυτό συμβαίνει γιατί έχει τεθεί άνω όριο στην ποσότητα ενέργειας που μπορεί να διοχετεύει το σύστημα στο κεντρικό δίκτυο. Συνεπώς τις ώρες που η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση ενέργειας κάποιο ποσοστό αυτής απορρίπτεται.

Αναλυτικότερα, στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται οι χάρτες παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες ανά ώρα για όλους τους μήνες του έτους.



Σχήμα 8.12 Παραγόμενη ενέργεια από ΦΒ

Όπως δηλώνεται από τα αποτελέσματα το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει συνολικά 192.115 kWh ανά έτος, με μέσο κόστος 0,1€/kWh, επιτυγχάνοντας έτσι ενεργειακή διεύθυνση της τάξεως του 3,83%.



Σχήμα 8.13 Παραγόμενη ενέργεια από Α/Γ

Βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, οι ανεμογεννήτριες παράγουν συνολικά 2.641.837 kWh ανά έτος, καλύπτοντας έτσι το 52,7% των ενεργειακών αναγκών του συστήματος με κόστος 0,09€/kWh.

Οι συναλλαγές του υβριδικού συστήματος με το δίκτυο δίνονται ανά μήνα στον πίνακα που ακολουθεί:

Month	Energy	Energy	Net	Peak	Energy	Demand
	Purchased	Sold	Purchases	Demand	Charge	Charge
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kW)	(\$)	(\$)
Jan	272,681	23,406	249,275	600	23,289	0
Feb	170,460	69,695	100,765	600	5,198	0
Mar	155,017	94,083	60,934	600	-492	0
Apr	176,675	55,254	121,421	600	8,274	0
May	230,589	37,301	193,288	600	16,718	0
Jun	217,462	40,944	176,518	600	14,786	0
Jul	304,581	8,650	295,930	600	28,988	0
Aug	218,823	55,943	162,881	600	12,372	0
Sep	233,914	32,342	201,572	600	17,893	0
Oct	223,132	32,308	190,824	600	16,821	0
Nov	219,162	48,893	170,269	600	13,604	0
Dec	246,142	30,082	216,060	600	19,500	0
Annual	2,668,640	528,901	2,139,739	600	176,951	0

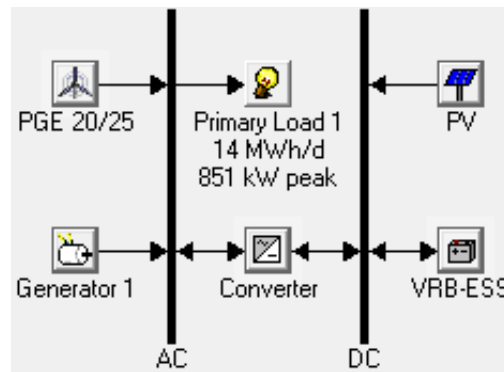
Πίνακας 8.3 Ενεργειακή αλληλεπίδραση συστήματος με δίκτυο

8.5 Αυτόνομο υβριδικό ΣΗΕ

Το αυτόνομο σύστημα που εξετάστηκε, περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και μετατροπέα ίδιου τύπου και τεχνολογίας με αυτά που περιγράφηκαν στην προσομοίωση για σύστημα που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, διαφοροποιώντας όμως το εύρος αναζήτησης για την βέλτιστη λύση που εισάγεται στο πρόγραμμα.

Συγκεκριμένα ως εύρος αναζήτησης για το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος ορίστηκαν τα 0, 200, 400, 600 και 900 kW, ενώ το αντίστοιχο εύρος που αφορά το μέγεθος του μετατροπέα εξετάζει μεγέθη των 100, 500, 1000 και 1500 kW. Τέλος, το εύρος αναζήτησης για την εύρεση του βέλτιστου πλήθους ανεμογεννητριών ήταν οι 0, 10, 50 ή 100 μονάδες.

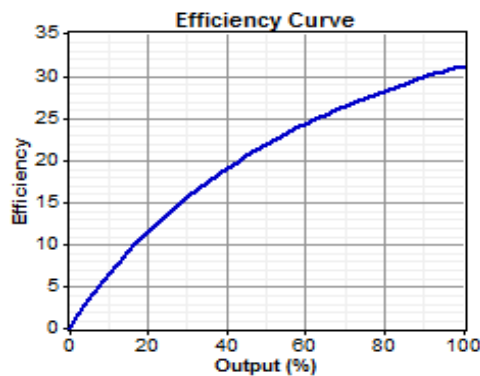
Πέραν των ανωτέρω, το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει γεννήτριες πετρελαίου και μπαταρίες ροής VRB, προκειμένου να είναι αξιόπιστο και να είναι ικανό να εξυπηρετήσει το φορτίο ζήτησης χωρίς διακοπές παρά το γεγονός ότι δεν συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο. Τα χαρακτηριστικά των γεννητριών και των μπαταριών αναλύονται στις ακόλουθες παραγράφους, ενώ η αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8.15 Αρχιτεκτονική αυτόνομου υβριδικού ΣΗΕ

Γεννήτριες

Οι γεννήτριες που ενσωματώθηκαν στο σύστημα είναι συμβατικές γεννήτριες πετρελαίου. Για μία γεννήτρια μεγέθους 100kW το αρχικό κόστος εγκατάστασης ορίζεται στα 34.500€ και ταυτίζεται με το κόστος αντικατάστασής της. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησής της, πέραν του καυσίμου που κοστίζει 1,3€/λίτρο, ορίστηκε στο 1€ ανά ώρα λειτουργίας. Η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής των γεννητριών υπολογίζεται στις 60.000 ώρες λειτουργίας, ενώ η καμπύλη απόδοσης που τις χαρακτηρίζει δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 8.16 Καμπύλη απόδοσης γεννητριών

Το εύρος αναζήτησης που ορίστηκε στο Homer για την εύρεση του βέλτιστου συνολικού μεγέθους που θα έχουν οι γεννήτριες ήταν τα 200, 400, 600 και 1000 kW.

Μπαταρίες

Στο σύστημα ενσωματώθηκαν μπαταρίες ροής τύπου VRB. Για την κοστολόγηση μπαταριών τέτοιου τύπου, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα δύο βασικά στοιχεία που τις απαρτίζουν, ο ηλεκτρολύτης και οι συστοιχίες κυψελών.

Το κόστος των κυψελών ορίζεται στα 400€ για κάθε kW, αποθηκευόμενης ισχύος, ενώ το κόστος χρήσης και συντήρησης υπολογίζεται στα 200€/έτος, ενώ έχουν εκτιμώμενη διάρκεια ζωής 15 έτη. Στο πρόγραμμα ορίστηκε εύρος αναζήτησης

μεταξύ των 700, 800, 900, 1.000 και 1.100 kW αποθηκευόμενης ισχύος, προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο μέγεθος που θα πρέπει να έχει η μπαταρία.

Ο ηλεκτρολύτης έχει κόστος 90€/kWh, με εκτιμώμενη διάρκεια ζωής τα 50 έτη. Η αναζήτηση βέλτιστου μεγέθους αποθηκευόμενης ενέργειας έγινε μεταξύ των 18.000, 20.000, 22.000, 25.000 και 30.000 kWh.

8.5.1 Αποτελέσματα

Από τις 8.000 συνολικά διαφορετικές διαμορφώσεις που μπορούν να προκύψουν βάσει των δεδομένων εισόδου που ορίστηκαν, το Homer προτείνει τις εξής ως βέλτιστες, ταξινομημένες βάσει του συνολικού καθαρού παρόντος κόστους τους:

	PV (kW)	PGE25	Gener (kW)	VRB-ESS (kW)	VRB-ESS (kWh)	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Gener (hrs)
	900	50	600	800	22000	1000	\$ 8,307,000	838,370	\$ 19,024,188	0.298	0.87	0.01	355,246	2,374
		100	600	900	30000	1000	\$ 10,767,000	839,824	\$ 21,502,770	0.337	0.90	0.01	314,389	1,968
	900		1000	700	18000	1000	\$ 4,545,000	2,677,194	\$ 38,768,524	0.604	0.33	0.00	1,677,416	7,362
			1000	700	18000	100	\$ 2,295,000	3,278,329	\$ 44,203,040	0.689	0.00	0.00	2,153,974	8,760

Σχήμα 8.17 Βέλτιστες διαμορφώσεις αυτόνομου συστήματος

Από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, φαίνεται πως το Homer έχει παρουσιάσει τέσσερις διαμορφώσεις, κάθε μία εκ των οποίων κάνει διαφορετική χρήση των ΑΠΕ. Στην πρώτη διαμόρφωση περιλαμβάνονται ανεμογεννήτριες αλλά και φωτοβολταϊκά, στη δεύτερη μόνο ανεμογεννήτριες, στην τρίτη μόνο φωτοβολταϊκά, ενώ στην τέταρτη το σύστημα βασίζεται εξ ολοκλήρου στην γεννήτρια και την μπαταρία για την εξυπηρέτηση του φορτίου. Ακολουθεί ανάλυση που αφορά την πρώτη περίπτωση.

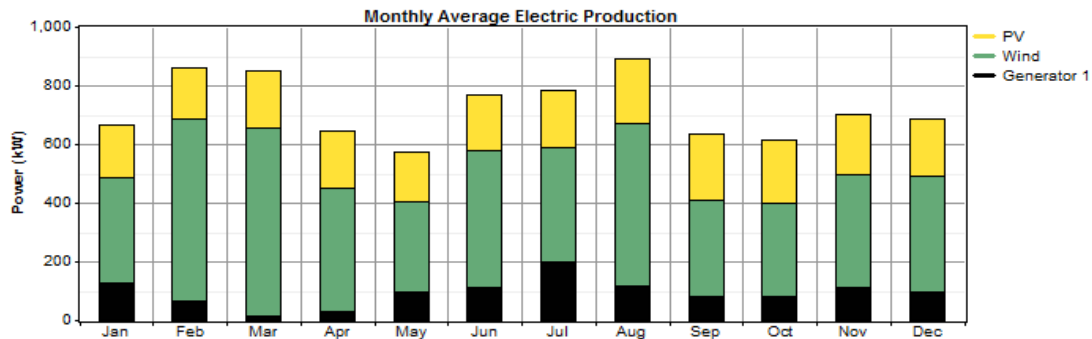
Όπως προαναφέρθηκε, βέλτιστη λύση θεωρείται αυτή που εμφανίζεται πρώτη στην λίστα που παράγει το πρόγραμμα. Εμπεριέχει τόσο ανεμογεννήτριες όσο και φωτοβολταϊκά, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλό συντελεστή διείσδυσης ΑΠΕ (0,87), ενώ παράλληλα χαρακτηρίζεται από το χαμηλότερο συνολικό καθαρό παρόν κόστος. Τα οικονομικά δεδομένα του συνολικού συστήματος αλλά και για κάθε στοιχείο του ξεχωριστά, δίνονται στον πίνακα 8.4.

Περιγραφή, προσομοίωση & βέλτιστη διαστασιολόγηση υβριδικού ΣΗΕ

Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
PV	1,800,000	0	402,676	0	0	2,202,676
PGE 20/25	3,500,000	779,513	639,168	0	-436,873	4,481,809
Generator 1	207,000	0	182,086	6,357,742	-523	6,746,305
VRB-ESS Flow Battery	2,300,000	133,525	2,123,416	0	-255,522	4,301,418
Converter	500,000	187,769	639,168	0	-34,950	1,291,988
System	8,307,000	1,100,807	3,986,515	6,357,742	-727,868	19,024,194

Πίνακας 8.4 Κόστος στοιχείων για τα 25 πρώτα έτη λειτουργίας του συστήματος

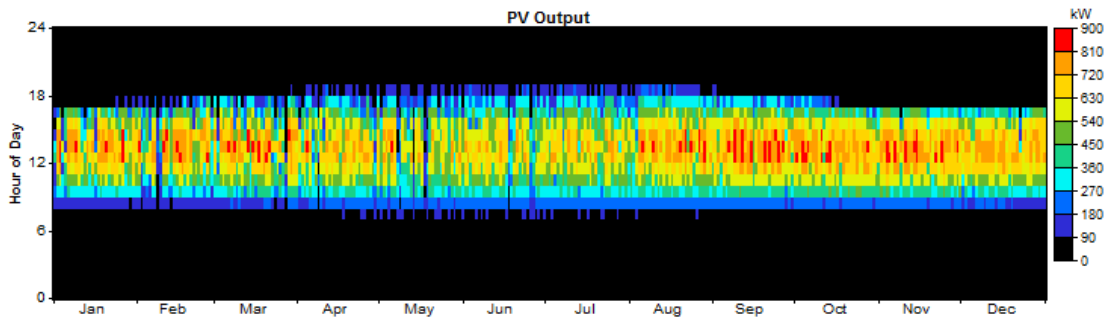
Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε παραγωγικό στοιχείο του συστήματος (ΦΒ, Α/Γ, γεννήτρια). Συγκεκριμένα, το φωτοβολταϊκό σύστημα εξυπηρετεί το 27% του συνολικού φορτίου ζήτησης, οι ανεμογεννήτριες εξυπηρετούν το 59%, ενώ το υπόλοιπο 13% του φορτίου βαρύνει την γεννήτρια.



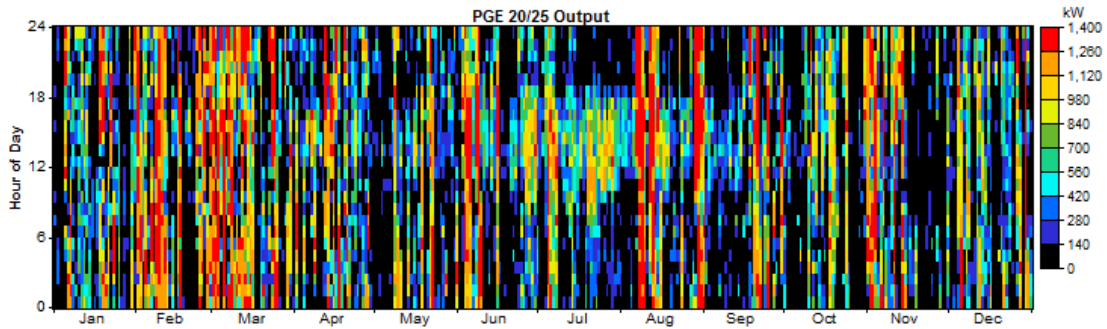
Σχήμα 8.18 Μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας

Ένα ποσοστό, της τάξεως του 0,5% του φορτίου ζήτησης μένει ανικανοποίητο, αλλά δεδομένου του ότι πρόκειται για αυτόνομο σύστημα, θεωρείται αμελητέο. Παράλληλα όμως, το 12,5% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα ή να εξυπηρετήσει το φορτίο ζήτησης, συνεπώς αποτελεί απορριπτόμενο πλεόνασμα.

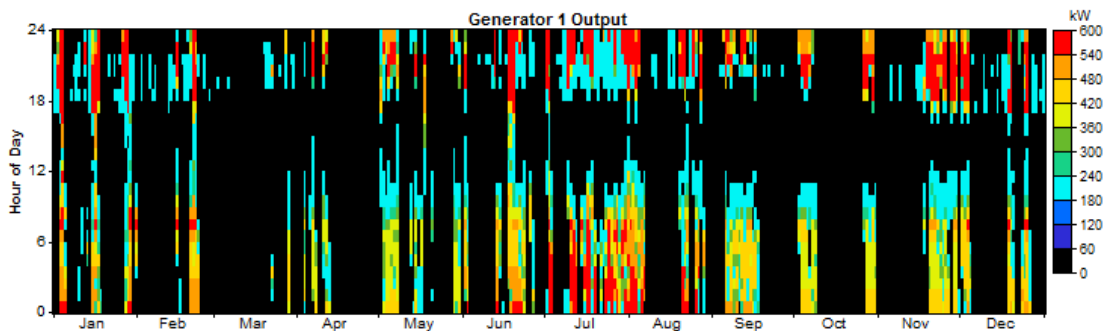
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η ενεργειακή παραγωγή ανά ώρα για κάθε μήνα του έτους, που προκύπτει από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες και τη γεννήτρια πετρελαίου (σχήματα 8.19, 8.20 και 8.21 αντίστοιχα).



Σχήμα 8.19 Ηλεκτροπαραγωγή από ΦΒ



Σχήμα 8.20 Ηλεκτροπαραγωγή από Α/Γ

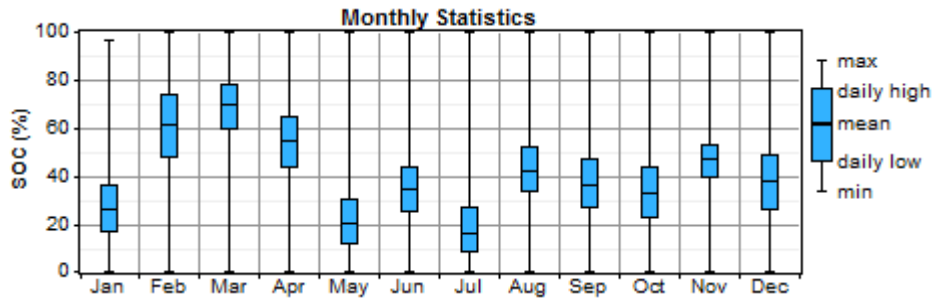


Σχήμα 8.21 Ηλεκτροπαραγωγή από γεννήτρια

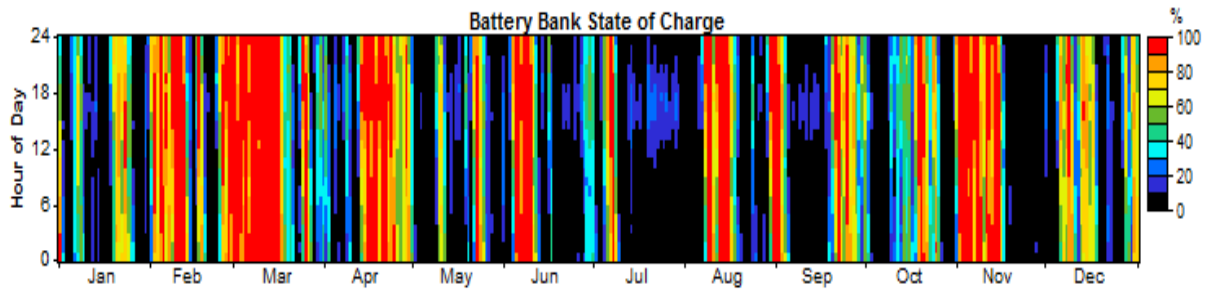
Όπως είναι αναμενόμενο, τα φωτοβολταϊκά παράγουν ενέργεια μόνο κατά τις πρωινές ώρες (περίπου 7 πμ. έως 6 μμ.), όταν δηλαδή υπάρχει ηλιοφάνεια. Αντίστοιχα, ισχυρό αιολικό δυναμικό παρατηρείται κατά τους μήνες Φεβρουάριο, Μάρτιο και Αύγουστο. Οι ανεμογεννήτριες όμως φαίνεται να αποδίδουν ισχύ καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, χωρίς να ακολουθούν κάποιο μοτίβο.

Στο σχήμα 8.21 φαίνονται οι χρονικές περιόδους κατά τις οποίες η γεννήτρια καλείται να παράξει ενέργεια. Παρατηρείται παύση της λειτουργίας της κατά τις μεσημεριανές ώρες, όταν δηλαδή τα ΦΒ αποδίδουν περισσότερο, αλλά μειωμένη λειτουργία και κατά τις ώρες υψηλού αιολικού δυναμικού. Λειτουργεί δηλαδή, όπως σχεδιάστηκε, συμπληρωματικά προς τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ. Συμπερασματικά, τα στοιχεία του συστήματος λειτουργούν αρμονικά μεταξύ τους με στόχο την αδιάκοπτη κάλυψη του φορτίου ζήτησης.

Η μπαταρία συμβάλει στην εξυπηρέτηση φορτίου με 1.100.000 kWh ανά έτος, και έχει αυτονομία μέχρι και για 38,4 ώρες. Η μέση κατάσταση φόρτισης/αποφόρτισης στην οποία βρίσκεται ανά μήνα κατά τη διάρκεια του έτους δίνεται στο σχήμα 8.22, ενώ στο σχήμα 8.23 φαίνονται οι μεταβολές της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας.



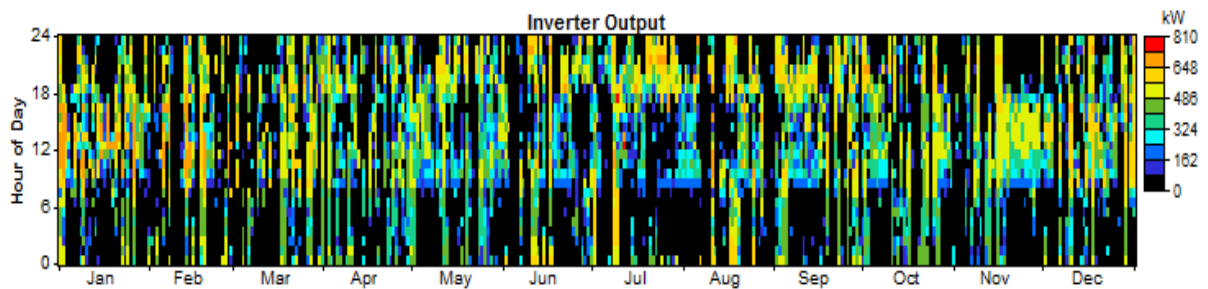
Σχήμα 8.22 Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας



Σχήμα 8.23 Μεταβολές της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας

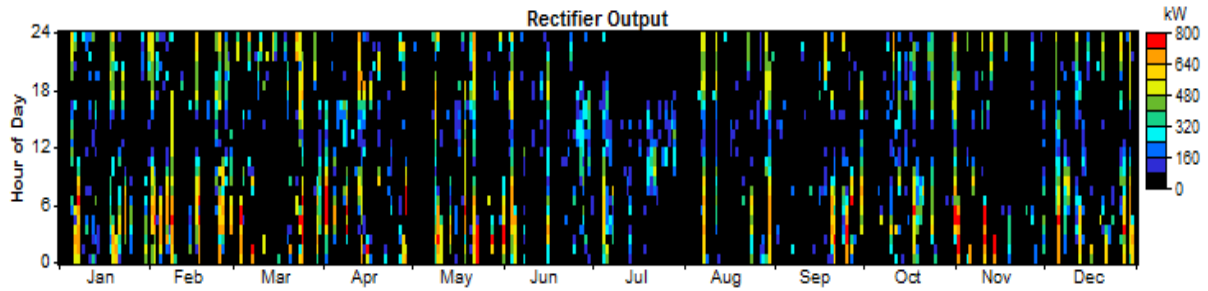
Εν κατακλείδι αξίζει να αναφερθεί και το προφίλ λειτουργίας του μετατροπέα, το οποίο δίνεται σχηματικά στις εικόνες που ακολουθούν.

Στο σχήμα 8.23 φαίνεται η έξοδος του αντιστροφέα (DC-AC) ανά ώρα και ανά μήνα για όλο το έτος. Ο αντιστροφέας τίθεται σε λειτουργία για 4.800 ώρες/έτος βάσει των αποτελεσμάτων, προκειμένου να γίνει χρήση της ενέργειας που προέρχεται από τα ΦΒ ή την μπαταρία.



Σχήμα 8.24 Έξοδος αντιστροφέα DC-AC

Στο σχήμα 8.24 δίνεται η ωριαία λειτουργία του ανορθωτή για όλο το έτος, ο οποίος τίθεται σε λειτουργία για 2.100 ώρες/έτος. Ο ανορθωτής καλείται να μετατρέψει το εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα, προκειμένου να αποθηκευτεί στη μπαταρία για μελλοντική χρήση ή περίσσεια ενέργειας που παράγεται από τις Α/Γ.



Σχήμα 8.25 Έξοδος ανορθωτή AC-DC

8.6 Σύγκριση συστημάτων

Ολοκληρώνοντας την μελέτη των υβριδικών συστημάτων που μοντελοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, κρίνεται σκόπιμο να συνοψιστούν και να συγκριθούν τα κυριότερα αποτελέσματα από την προσομοίωση των δύο συστημάτων ώστε να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός.

Καταρχάς υπενθυμίζεται ότι και τα δύο συστήματα καλούνται να εξυπηρετήσουν το ίδιο φορτίο ζήτησης αξιοποιώντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που παρουσιάζονται στην περιοχή, αν και το κάθε σύστημα διαθέτει διαφορετικό εξοπλισμό, ανάλογα με την βέλτιστη λύση που προτείνει το Homer. Στόχος των συστημάτων είναι να εξυπηρετούν το φορτίο με το μικρότερο δυνατό κόστος και την μεγαλύτερη αξιοπιστία. Στον πίνακα 8.5 που ακολουθεί δίνονται αριθμητικά στοιχεία για ευκολότερη σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων που μελετήθηκαν.

	Συνδεδεμένο σύστημα	Αυτόνομο σύστημα
Αρχικό Κεφάλαιο	2.750.000 €	8.307.000 €
Κόστος Λειτουργίας/έτος	257.182 €	838.370 €
Καθαρό Παρόν Κόστος	6.037.652 €	19.024.188 €
Κόστος Ενέργειας/kWh	0,096 €	0,298 €
Συντελεστής διείσδυσης ΑΠΕ	0,52	0,87
Φωτοβολταϊκά	100 kW	900 kW
Ανεμογεννήτριες	35 units/875 kW	50 units/1250 kW
Μετατροπέας DC/AC	200 kW	1000 kW
Μπαταρία	-	800 kW - 22.000 kWh
Γεννήτρια Diesel	-	600 kW
Ανικανοποίητο φορτίο	1,63%	0,5%
Ενεργειακό πλεόνασμα	0,36%	12,5%

Πίνακας 8.5 Συγκριτικά στοιχεία αυτόνομου και συνδεδεμένου συστήματος

Από τα παραπάνω είναι προφανές πως το συνδεδεμένο σύστημα υπερτερεί σε σχέση με το αυτόνομο, καθώς με μικρότερο κόστος - τόσο υπό την μορφή του αρχικού κεφαλαίου επένδυσης, όσο και του ετήσιου κόστους λειτουργίας - κατορθώνει να εξυπηρετεί το φορτίο, αφήνοντας ανικανοποίητο ένα αποδεκτό ποσοστό της ζήτησης (<2%). Παρ' όλα αυτά παρατηρείται πως το αυτόνομο σύστημα αφήνει μικρότερο ποσοστό του φορτίου ζήτησης ανικανοποίητο. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους: πρώτον το αυτόνομο ΣΗΕ διαθέτει αυξημένο ηλεκτροπαραγωγικό εξοπλισμό προκειμένου να διατηρήσει την αξιοπιστία του και δεύτερον, στο συνδεδεμένο ΣΗΕ έχει οριστεί μέγιστη τιμή ισχύος που μπορεί να αντληθεί από το δίκτυο, γεγονός που δεν του επιτρέπει να αντλεί όση ισχύ απαιτείται ανά πάσα στιγμή από αυτό. Βλέπουμε επίσης πως στην περίπτωση του αυτόνομου συστήματος υπάρχει αυξημένο ενεργειακό πλεόνασμα το οποίο απορρίπτεται και δεν αξιοποιείται από το σύστημα. Αυτό γίνεται γιατί η μπαταρία του συστήματος έχει πεπερασμένη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας. Συνεπώς όταν η ενέργεια που παράγεται από τις Α/Γ ή τα ΦΒ, σε ώρες που η μπαταρία βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, υπερκαλύπτει την ζήτηση, δεν μπορεί να αποθηκευτεί και απορρίπτεται.

Αξίζει όμως να αναφερθεί πως η παγκόσμια ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων απαιτεί αύξηση της εκμετάλλευσης των ΑΠΕ. Σε αυτό το σημείο υπερτερεί το αυτόνομο σύστημα, έχοντας 87% ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ, το οποίο είναι αρκετά υψηλότερο από αυτό του συνδεδεμένου ΣΗΕ που φτάνει στο 52%.

Συμπερασματικά, στην περίπτωση που υπάρχουν οικονομικά κριτήρια το συνδεδεμένο υβριδικό σύστημα αποτελεί την πιο συμφέρουσα λύση, ενώ αντίθετα στην περίπτωση που βασικότερο κριτήριο αποτελεί η αύξηση ηλεκτροπαραγωγής που βασίζεται σε ΑΠΕ ή επιθυμείται ηλεκτροδότηση περιοχής που είναι δύσκολο να διασυνδεθεί με το κεντρικό δίκτυο, θα πρέπει να προτιμηθεί η κατασκευή ενός αυτόνομου συστήματος.

Κατάλογος Πινάκων & Σχημάτων

Σχήμα 4.1 Βασικά μέρη εγκατάστασης εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας	27
Πίνακας 4.1 Τυπικά μεγέθη ανεμογεννητριών	28
Πίνακας 4.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών	29
Σχήμα 7. 1 Παραδείγματα ΣΗΕ που μπορεί να προσομοιώσει το HOMER	58
Πίνακας 7.1 Χώρος αναζήτησης 320 διαμορφώσεων συστήματος	60
Πίνακας 7. 2 Μέρος πιθανών διαμορφώσεων του συστήματος	61
Σχήμα 8.1 Μέσες μηνιαίες τιμές ταχύτητας ανέμου	63
Σχήμα 8.2 Μέσες ημερήσιες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα.....	63
Σχήμα 8.3 Ενεργειακό προφίλ κατανάλωσης.....	64
Σχήμα 8.4 Μέσο ημερήσιο φορτίο ανά μήνα	64
Σχήμα 8.5 Αρχιτεκτονική υβριδικού ΣΗΕ που συνδέεται με δίκτυο	65
Σχήμα 8.6 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας	65
Πίνακας 8.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ΑΓ	66
Σχήμα 8.7 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (0 kW)	67
Σχήμα 8.8 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (100 kW)	67
Σχήμα 8.9 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (200 kW)	67
Σχήμα 8.10 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (300 kW)	67
Σχήμα 8.11 Βέλτιστη διαμόρφωση συνδεδεμένου συστήματος (400 kW)	68
Πίνακας 8.2 Κόστος στοιχείων για τα 25 πρώτα έτη λειτουργίας του συστήματος ..	68
Σχήμα 8.11 Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	68
Σχήμα 8.12 Παραγόμενη ενέργεια από ΦΒ	69
Σχήμα 8.13 Παραγόμενη ενέργεια από Α/Γ	69
Πίνακας 8.3 Ενεργειακή αλληλεπίδραση συστήματος με δίκτυο	70
Σχήμα 8.15 Αρχιτεκτονική αυτόνομου υβριδικού ΣΗΕ	71
Σχήμα 8.16 Καμπύλη απόδοσης γεννητριών	71
Σχήμα 8.17 Βέλτιστες διαμορφώσεις αυτόνομου συστήματος	72
Πίνακας 8.4 Κόστος στοιχείων για τα 25 πρώτα έτη λειτουργίας του συστήματος ..	73
Σχήμα 8.18 Μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας	73
Σχήμα 8.19 Ηλεκτροπαραγωγή από ΦΒ.....	73
Σχήμα 8.20 Ηλεκτροπαραγωγή από Α/Γ	74
Σχήμα 8.21 Ηλεκτροπαραγωγή από γεννήτρια	74
Σχήμα 8.22 Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας	75
Σχήμα 8.23 Μεταβολές της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας	75
Σχήμα 8.24 Έξοδος αντιστροφέα DC-AC	75
Σχήμα 8.25 Έξοδος ανορθωτή AC-DC.....	76
Πίνακας 8.5 Συγκριτικά στοιχεία αυτόνομου και συνδεδεμένου συστήματος	76

Βιβλιογραφία

Baring-Gould I & Dabo M (2009) Technology, Performance and Market Report of Wind-Diesel Application for Remote and Island Communities, *European Wind Energy Conference*, Marseille, France, March 2009.

Bernal-Agustin J L & Dufo-Lopez R (2009) Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:8, Elsevier, 2111-2118.

Berndt D (2001) Valve-regulated lead-acid batteries, *Journal of Power Sources*, 100:1-2, Elsevier, 29-46.

Bolund B, Bernhoff H & Leijon M (2007) Flywheel energy and power storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:2, Elsevier, 235-258.

Chen H, Cong T N, Yanga W, Tan C, Li Y & Ding Y (2009) Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Progress in Natural Science*, 19:3, Elsevier, 291-312.

Denholm P & Kulcinski G L (2004) Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems, *Energy Conversion and Management*, 45:13-14, Elsevier, 2153-2172.

Divya K C & Østergaard J (2009) Battery energy storage technology for power systems - An Overview, *Electric Power Systems Research*, 79:4, Elsevier, 511-520.

Dumancic D (2011) Flow Batteries: Status and Potential, Thesis, Mälardalen University of Sweden, Department of Public Technology

Hadjipaschalis I, Poulikkas A & Efthimiou V (2009) Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:6-7, Elsevier, 1513-1522.

Jossen A & Sauer D U (2006) Advances in Redox-Flow Batteries, *First International Renewable Energy Storage Conference*, 30-31 October, Gelsenkirchen, Germany.

Kaldelis J K, Zafirakis D & Kavadias K (2009) Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:2, Elsevier, 278-392.

Karakoulidis K, Mavridis K, Bandekas D V, Adoniadis P, Potolias C & Vordos N (2011) Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid photovoltaic-diesel-battery-fuel cell power system, *Renewable Energy*, 36:8, Elsevier, 2238-2244.

Katsaprakakis D A I, Christakis D G, Zervos A, Papantonis D & Voutsinas S (2008) Pumped storage systems introduction in isolated power production systems, *Renewable Energy*, 33, Elsevier, 467-490.

Kopera J J C (2004) Inside the Nickel Metal Hydride Battery, *Cobasys*.

Kusakana K & Vermaak H J (2013) Hybrid diesel generator/renewable energy system performance modeling, *Renewable Energy*, Elsevier, 1-6.

Lambert T, Gilman P & Lilienthal P (2006) Micropower system modeling with Homer, *Integration of Alternative Sources of Energy by Felix A. Farret and M. Godoy Simões*, Wiley, Chapter 15.

Malla S G & Bhende C N (2013) Enhanced operation of stand-alone “Photovoltaic-Diesel Generator-Battery” system. *Electric Power Systems Research* 107 (2014), Elsevier, 250-257.

Manwell J F (2004) Hybrid energy systems, *Encyclopedia of Energy*, Vol. 3, 215-219.

Mousa K & Diabat A (2011) Optimizing the Design of a Hybrid Solar-Wind Power Plant to meet Variable Power Demand, *Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing*.

Najjar Y S H & Zaamout M S (1998) Performance analysis of compressed air energy storage (CAES) plant for dry regions, *Energy Conversion and Management*, 39:15, Elsevier, 1503-1511.

Nema P & Dutta S (2012) Feasibility Study of 1MW Standalone Hybrid Energy System: For Technical Institutes, *Low Carbon Economy*, 3:2012, Scientific Research, 63-68.

Saheb-Koussa D, Koussa M & Said N (2013) Prospects of Wind-Diesel Generator-Battery Hybrid Power System: A Feasibility Study in Algeria, *Journal of Wind Energy*, 413425:2013, Hindawi.

Semadeni M (2003) Energy storage as an essential part of sustainable energy systems, *CEPE Working Paper*, 24.

Shen J, Lassue S, Zalewski L & Huang D (2007) Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls, *Energy and Buildings*, 39:8, Elsevier, 926-974.

Singh P & Jonshagen B (1991) Zinc-bromine battery for energy storage, *Journal of Power Sources*, 35:4, Elsevier, 405-410.

Surianu F D, Borlea I, Jigoria-Oprea D & Lustrea B (2012) Comparative study of the opportunity to use Renewable Energy Sources to supply Residential Consumers,

International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ '12), 28-30 March 2012, Spain.

Van Kuik G A M (2007) The Lanchester-Betz-Joukowski Limit, *Wind Energy*, 2007:10, Wiley Interscience, 289-291.

Wen Z, Cao J, Gu Z, Xu X, Zhang F & Lin Z (2008) Research on sodium sulfur battery for energy storage, *Solid State Ionics*, 179:27-32, Elsevier, 1697-1701.

Zrikem Z & Bilgen E (1987) Theoretical study of a composite Trombe-Michel wall solar collector system, *Solar Energy*, 39:5, Elsevier, 409-419.

Βέρτακας Α (2013) Προσομοίωση Σφαλμάτων σε Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας - Διπλωματική Εργασία, *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Γκίκα Α (2008) Μοντελοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπών ευρέως χρησιμοποιούμενων σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, Διπλωματική Εργασία, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Κανατσούλη Ε (2009) Εφαρμογές Τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Σε Χώρες Της Μεσογείου Με Έμφαση Στην Ηλιακή Ενέργεια, Διπλωματική Εργασία, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Καπανταϊδάκη Ε & Τσούτσος Θ (2006) Ανάλυση κύκλου ζωής αιολικών συστημάτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, *Πολυτεχνείο Κρήτης*, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

ΚΑΠΕ (2001) Οδηγός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ.

Λαδάς Θ (2012) Οικονομοτεχνική μελέτη εγκατάστασης διασυνδεδεμένοι οικιακού συστήματος φωτοβολταϊκών, Διπλωματική Εργασία, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Μακρής Θ (2009) Συνδυασμένη χρήση ηλιακής και αιολικής ενέργειας για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών των κτιρίων, Μεταπτυχιακή Διατριβή, *Πανεπιστήμιο Πατρών*, Τμήμα Φυσικής, ΜΠΣ Εφαρμοσμένης Φυσικής,

Μπούρης Δ Εισαγωγή στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα, *Συμπληρωματικές σημειώσεις για το μάθημα Ηλιακή Τεχνική και Φωτοβολταϊκά Συστήματα*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων.

Νόμος 3468/2006 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης και λοιπές διατάξεις. *Εφημερίδα της κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*, Τεύχος 1, Αρ. Φύλλου 129, 27 Ιουνίου 2006

Σαραφιανός Δ & Σειραγάκης Μ (2009) Τεχνοοικονομική μελέτη και σύγκριση υβριδικών συστημάτων. Εφαρμογή σε αυτόνομη κατοικία, Διπλωματική Εργασία, *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Σουσουίνης Μ Χ (2011) Συμβολή στον έλεγχο ανεμογεννητριών μονίμων μαγνητών με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, Διπλωματική Εργασία, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Στεφανογιάννης Ε (2012) Ανάλυση λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους Ντιζελογεννήτριας υπό φορτίο Ασύγχρονης Μηχανής, Διπλωματική Εργασία, *Πανεπιστήμιο Πατρών*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

Τάσσιου Ι (2005) Αποτίμηση του ρόλου των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Διπλωματική Εργασία, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Τόλης Δ (2011) Πιθανοτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος κοντά στο όριο αποκοπής της ταχύτητας του ανέμου, Διπλωματική Εργασία, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

<http://www.anemogennitria.gr/index.html>

<http://www.ceere.org/index.html>

<http://www.cres.gr/kape/>

<http://helapco.gr/>

<http://www.rae.gr>

<http://www.sunshine-energy.gr/>