

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της ΜΠΑΛΛΑ ΕΥΡΥΣΘΕΑΣ -ΣΤΑΜΑΤΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ ΓΕΩΡΓΙΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Υποψήφιος Διδάκτωρ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΓΕΩΡΓΙΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής ΔΟΥΛΑΜΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής ΝΙΚΟΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Λέκτορας

> ΧΑΝΙΑ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2008

Στην οικογένειά μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2006 και ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 2008, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεωργιλάκη Παύλου και του υποψήφιου Διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Κατσίγιαννη Ιωάννη.

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της εργασίας μου αυτής θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες μου στον κ. Γεωργιλάκη Παύλο για την πολύτιμη βοήθεια του, ώστε να διεκπεραιωθεί η παρούσα εργασία με επιτυχία, και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με τον τομέα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως, τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Ιωάννη Κατσίγιαννη, η συμβολή του οποίου σε αυτή την εργασία ήταν πολύ μεγάλη και χωρίς την άψογη συνεργασία του και το ενδιαφέρον που έδειξε δε θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωσή της.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ επίσης στους γονείς μου και τον αδερφό μου, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου σε κάθε μου προσπάθεια και μου παρείχαν όλα τα απαραίτητα, πέρα από την ψυχολογική στήριξη, για την ολοκλήρωση των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Ότι κατάφερα όλα αυτά τα χρόνια οφείλεται κυρίως σε αυτούς.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στους φίλους μου και να τους εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ όχι μόνο για τις ωραίες στιγμές που ζήσαμε μαζί στα Χανιά αλλά και για την υποστήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες και η αβεβαιότητα που υπάρχει για τη διαθεσιμότητα και τις τιμές των συμβατικών καυσίμων, έχουν οδηγήσει στην ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί το πραγματικό όφελος της αιολικής και ηλιακής ενέργειας σε ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι αξιοπιστίας, οι οποίες εφαρμόζονται σε απομονωμένα συστήματα.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια μέθοδο προσομοίωσης για την μελέτη της αξιοπιστίας απομονωμένων συστημάτων, που αξιοποιούν την ηλιακή και την αιολική ενέργεια. Η αξιοπιστία είναι ένα σημαντικό ζήτημα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και ιστορικά έχει αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας αιτιοκρατικά κριτήρια και δείκτες. Το κύριο μειονέκτημα των αιτιοκρατικών κριτηρίων είναι ότι δεν αναγνωρίζουν και δεν μπορούν να απεικονίσουν εγγενείς αβεβαιότητες, όπως ο τυχαίος αριθμός βλαβών των συστατικών του συστήματος και η κυμαινόμενη ζήτηση του φορτίου από τους καταναλωτές, τα οποία έχουν καθοριστική επίδραση στην απόδοση και την αξιοπιστία. Οι πιθανοτικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπερνικήσουν αυτό το πρόβλημα. Ωστόσο, οι σχεδιαστές των συστημάτων, αντιμετωπίζουν μερικές φορές δυσκολίες στην ερμηνεία και χρησιμοποίηση των πιθανοτικών δεικτών αξιοπιστίας. Αυτή η δυσκολία μπορεί να ανακουφιστεί με την ενσωμάτωση των αιτιοκρατικών εκτιμήσεων σε μια πιθανοτική αξιολόγηση, χρησιμοποιώντας μια νέα πιθανοτική μέθοδο, που είναι γνωστή ως 'Ανάλυση ευμάρειας συστημάτων'. Η προσέγγιση ευμάρειας παρέχει μια γέφυρα μεταξύ των αποδεκτών αιτιοκρατικών και πιθανοτικών μεθόδων και καθορίζει τους δείκτες που μπορούν να είναι γρήσιμοι στην πρακτική ανάλυση και τον προγραμματισμό αξιοπιστίας των απομονωμένων συστημάτων. Παρουσιάζεται η διαδοχική τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo προκειμένου να αξιολογηθούν διαφορετικές στρατηγικές λειτουργίας για τα μικρά απομονωμένα συστήματα, που χρησιμοποιούν την αιολική ή/ και την ηλιακή ενέργεια και έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας και εφεδρική λειτουργία συμβατικών μηχανών. Δύο τύποι στρατηγικών συζητούνται και αξιολογούνται. Αυτοί είναι η εφεδρική λειτουργία ενός ντηζελοκινητήρα χωρίς αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και η εφεδρική λειτουργία ενός ντηζελοκινητήρα με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών των στρατηγικών αναλύονται σε σχέση με την αξιοπιστία, την εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων, την επίδραση της μπαταρίας, το μέσο αριθμό εκκίνησης-διακοπής του ντηζελοκινητήρα. Οι δείκτες αξιοπιστίας που σχετίζονται αυτές τις παραμέτρους, υπολογίζονται και αναλύονται.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Προσομοίωση Monte Carlo, Αξιοπιστία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Αιολική ενέργεια, Ηλιακή ενέργεια, Απομονωμένα συστήματα, Ανεμογεννήτριες, Φωτοβολταϊκά, Μπαταρία, Ντηζελοκινητήρας, Ανάλυση ευμάρειας.

ABSTRACT

Environmental concerns and fuel cost uncertainties, associated with the use of conventional energy sources, have resulted in rapid growth of wind and solar energy applications in power generating systems. Therefore, it is important to assess the actual benefit of utilizing wind and solar energy in a power system. Such assessments require realistic reliability evaluation methods and quantitative indices.

This thesis presents a time series simulation model for the reliability evaluation of small stand-alone wind and solar energy conversion systems. Reliability is an important issue in power systems and historically has been assessed using deterministic criteria and indices. The main disadvantage of deterministic criteria is that they do not recognize and reflect the inherent random nature of site resources, the system behavior and the customer demands. Probabilistic techniques can be used to overcome this drawback and incorporate the inherent uncertainty in these factors. However, power system planners and designers, sometimes experience difficulties in interpreting and using probabilistic reliability indices. This difficulty can be alleviated by incorporating deterministic considerations into a probabilistic evaluation, using a new probabilistic method, designated as 'System Well-Being Analysis'. Well-being approach provides a bridge between the accepted deterministic and probabilistic methods and defines indices that can be useful in practical power reliability analysis and planning. A sequential Monte Carlo simulation technique is presented, in order to evaluate different operating strategies for small stand-alone systems, using wind and/ or solar energy, as well as storage and back-up facilities. Two types of operating strategies are discussed and evaluated. These are intermittent back-up diesel operation without storage and intermittent back-up diesel operation with storage. The advantage and disadvantage of these strategies are analyzed with reference to reliability, diesel-fuel savings, effect of the battery, back-up average start-stop cycles. The probability distributions associated with these parameters, are also constructed and analyzed.

KEYWORDS

Monte Carlo simulation, Power system reliability, Wind energy, Solar energy, Standalone power systems, Wind turbine generators, Photovoltaics, Battery storage, Back-up diesel engine, Well-Being Analysis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

| 1.1 | Η ενέργεια ως στόχος και προοπτική ανάπτυξης | | |
|-----|--|--|---|
| | 1.1.1 | Άνθρωπος και ενέργεια | 1 |
| | 1.1.2 | Οι πηγές ενέργειας σήμερα | 2 |
| | 1.1.3 | Κύριες αιτίες κατασπατάλησης της ενέργειας | 3 |
| | 1.1.4 | Ενέργεια και περιβάλλον | 5 |
| | 1.1.5 | Στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας | 5 |
| 1.2 | Σκοπός | ς της εργασίας | 6 |
| 1.3 | Περιεχόμενα της εργασίας | | |
| 1.4 | Βιβλιογραφία | | |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

| 2.1 | Εισαγ | ωγή | | 9 |
|------------------------------------|-------|------------------|---|----|
| 2.2 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας | | τρικής ενέργειας | 10 | |
| | 2.2.1 | Σκοπός κ | αι απαιτήσεις συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας | 10 |
| | 2.2.2 | Δομή συο | στημάτων ηλεκτρικής ενέργειας | 10 |
| | | 2.2.2.1 | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 11 |
| | | 2.2.2.2 | Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας | 13 |
| | | 2.2.2.3 | Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας | 13 |
| | | 2.2.2.4 | Φορτία | 13 |
| 2.3 | Απομο | ονωμένα σι | οστήματα ηλεκτρικής ενέργειας | 14 |
| 2.3.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα | | παϊκά συστήματα | 15 | |
| | | 2.3.1.1 | Υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων | 15 |
| | | 2.3.1.2 | Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου | 17 |
| | | 2.3.1.3 | Φωτοβολταϊκή γεννήτρια | 18 |
| | | 2.3.1.4 | Ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκού πλαισίου | 20 |
| | | 2.3.1.5 | Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων | 20 |
| | 2.3.2 | Αιολικά | συστήματα | 21 |
| | | 2.3.2.1 | Ανεμοκινητήρες | 21 |
| | | 2.3.2.2 | Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας | 22 |
| | | 2.3.2.3 | Ταχύτητα ανέμου και κατανομή Weibull | 24 |
| | | 2.3.2.4 | Ισχύς αέριας δέσμης | 25 |
| | | 2.3.2.5 | Επίδραση του ύψους του πύργου στην ισχύ του ανέμου | 26 |
| | | 2.3.2.6 | Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους | 26 |

| | | 2.3.2.7 | Επίδραση επιφανειακών εμποδίων | | 27 |
|--|--------|------------------------------------|--|-----|----|
| 2.3.2.8 Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας | | Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας | | 28 | |
| | | 2.3.2.9 | Ωφέλιμη αιολική ισχύς | | 28 |
| | | 2.3.2.10 | Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας η ανεμογεννήτριας | της | 29 |
| | | 2.3.2.11 | Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας | | 30 |
| | 2.3.3 | Συστήματα | τα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας | | 31 |
| | | 2.3.3.1 | Συσσωρευτές θειικού οξέος - μολύβδου | | 31 |
| | 2.3.4 | Παλινδρομ | ικές μηχανές εσωτερικής καύσης | | 33 |
| 2.4 | Βιβλιο | γραφία | | | 35 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

| 3.1 | Εισαγωγή | | |
|-----|-------------------|---------------------|----|
| 3.2 | Μέθοδ | δοι αξιοπιστίας | 38 |
| | 3.2.1 | Δείκτες αξιοπιστίας | 39 |
| 3.3 | Ανάλυση ευμάρειας | | 40 |
| 3.4 | Βιβλιογραφία | | 41 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

| 4.1 | Εισαγα | 43 | |
|-----|--|---|----|
| 4.2 | Προσομοίωση Monte Carlo | | |
| 4.3 | Υπολογισμός ηλεκτρικής ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων | | |
| | 4.3.1 | Χαρακτηριστικά μεγέθη | 44 |
| | 4.3.2 | Ηλιακή και ωρολογιακή ώρα | 47 |
| | 4.3.3 | Ο προσανατολισμός του συλλέκτη | 48 |
| | 4.3.4 | Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης | 51 |
| 4.4 | Υπολο | 54 | |
| 4.5 | Μοντελοποίηση μπαταρίας | | |
| 4.6 | Μοντελοποίηση παλινδρομικής μηχανής εσωτερικής καύσης | | |
| 4.7 | Μοντελοποίηση της λειτουργίας του συστήματος | | |
| 4.8 | Ανάλυση ευμάρειας | | 60 |
| | 4.8.1 | Συστήματα με αποθήκευση ενέργειας | 61 |
| | 4.8.2 | Συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας | 61 |
| | 4.8.3 | Δείκτες αξιοπιστίας | 61 |
| 4.9 | Βιβλιο | 63 | |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

| 5.1 | Εισαγα | 65 | |
|-----|---------------------------------------|--------------------------------------|----|
| 5.2 | Αποτελέσματα της ανάλυσης αξιοπιστίας | | 65 |
| | 5.2.1 | Δείκτες αξιοπιστίας | 65 |
| | 5.2.2 | Κατανάλωση καυσίμου | 69 |
| 5.3 | Ανάλυ | 70 | |
| | 5.3.1 | Επίδραση της μπαταρίας | 70 |
| | 5.3.2 | Επίδραση του ηλεκτρικού φορτίου | 76 |
| | 5.3.3 | Επίδραση της ανανεώσιμης ενέργειας | 80 |
| | 5.3.4 | Επίδραση του αιτιοκρατικού κριτηρίου | 85 |
| 5.4 | Βιβλιο | γραφία | 90 |
| | | | |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΩΣ ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Η αντικατάσταση εκ μέρους του ανθρώπου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, από τα συμβατικά και μη ανανεώσιμα καύσιμα σε συνδυασμό με τη σπατάλη και την αλόγιστη κατανάλωσή τους, θέτει σε κίνδυνο τη μελλοντική εξασφάλιση του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου. Η συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας, καθώς επίσης και η έντονη ανομοιομορφία της ενεργειακής ζήτησης στις διάφορες περιοχές του πλανήτη, εγγυώνται τη διατήρηση υψηλών ρυθμών κατανάλωσης και κατά τα επόμενα χρόνια. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικά αναπόφευκτες σήμερα απώλειες ενέργειας στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς, καθώς και τη μη ορθολογική χρήση της ενεργειας, όπως και την αδιαφορία και έλλειψη ενημέρωσης των πολιτών για την αναμενόμενη εξάντληση των βεβαιωμένων ενεργειακών αποθεμάτων, αρκετοί επιστήμονες πιστεύουν ότι η άφιξη του «ενεργειακού χειμώνα» στον πλανήτη μας καθίσταται πλέον αναπόφευκτη.

1.1.1 Άνθρωπος και ενέργεια

Η προσπάθεια του ανθρώπου για τη συνεχή άνοδο του βιοτικού του επιπέδου, σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της γης και την αλόγιστη σπατάλη και κακή χρήση των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη, απειλούν να οδηγήσουν σύντομα την ανθρωπότητα, σύμφωνα με έγκυρες απόψεις ειδικών, σε έναν μακρύ ενεργειακό χειμώνα. Σε μια προσπάθεια να απεικονιστεί το μέγεθος της κατασπατάλησης των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων του πλανήτη μας, αξίζει να σημειωθεί ότι η ανθρωπότητα έχει δαπανήσει τα τελευταία εκατό χρόνια, αποθέματα πρώτων υλών και πηγών ενέργειας, τα οποία αποταμιεύτηκαν κατά τη διάρκεια της μέχρι σήμερα ζωής του πλανήτη. Πράγματι, μέχρι τον 16° αιώνα, το ξύλο, μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αποτελούσε την αποκλειστική σχεδόν πηγή εκμεταλλεύσιμης θερμικής ενέργειας. Μετά όμως από την πρώτη βιομηχανική επανάσταση το ξύλο αντικαταστάθηκε σχεδόν ολοκληρωτικά από μια νέα μορφή ενέργειας, τον άνθρακα. Η χρήση του άνθρακα για την παραγωγή ενέργειας εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χρήση του ξύλου, γι' αυτό άλλωστε συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Όμως, η βασική ειδοποιός διαφορά μεταξύ του άνθρακα και του ξύλου, ως πηγή ενέργειας, είναι ότι ο άνθρακας αποτελεί μη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ενέργειας σε αντίθεση με το ξύλο [1.1].

Στα επόμενα χρόνια, στις αρχές του εικοστού αιώνα, ο άνθρακας αποκαθίσταται από μια νέα πλέον εύχρηστη, αλλά επίσης μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, το πετρέλαιο. Με την αξιοποίηση των κοιτασμάτων του πετρελαίου δόθηκε στην ανθρωπότητα η ευκαιρία να βελτιώσει το βιοτικό της επίπεδο, με τη χρήση της ενεργειακής κληρονομιάς του πλανήτη. Το αποτέλεσμα όμως της χρήσης του πετρελαίου ήταν τελείως διαφορετικό. Τα αποθέματα πετρελαίου καθώς και των υπολοίπων φυσικών πόρων κατασπαταλήθηκαν, σε μια ξέφρενη πορεία ανάπτυξης, η οποία δημιούργησε αντίστοιχα μια νέα σειρά από προβλήματα.

Είναι, επομένως, γεγονός ότι η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη αναστάτωσε το ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη. Η αντικατάσταση των ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών, όπως το

ξύλο και η μυϊκή δύναμη, από τα συμβατικά και μη ανανεώσιμα καύσιμα και η αλόγιστη κατανάλωσή τους, έθεσε σε κίνδυνο ακόμη και τη διασφάλιση του σημερινού βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου. Όλα τα μηνύματα δείχνουν καθαρά, ότι η συνέχιση της πορείας μας στο μέλλον επιβάλλει την αλλαγή της καθημερινής νοοτροπίας μας και αναθεώρηση των αξιών της ζωής, σε συνδυασμό με τον επαναπροσδιορισμό της έννοιας και των στόχων της τεχνολογικής ανάπτυξης. Είναι πολύ σημαντικό και επιπλέον εξαιρετικά χρήσιμο για την ορθή επιλογή των μέτρων περιβαλλοντικής αποκατάστασης, να συνειδητοποιήσουμε το εντυπωσιακά μεγάλο μέγεθος της χρονικής απόκρισης του φυσικού μας κόσμου, σε κλιματικές μεταβολές. Απαιτούνται δεκαετίες για να διαπιστωθούν τα πρώτα ενθαρρυντικά θετικά αποτελέσματα, των όποιων σημερινών διορθωτικών επεμβάσεων στο οικολογικό σύστημα. Η αποδοχή των ριζικών αυτών αλλαγών στον τρόπο ζωής μας καθώς και στην τροποποίηση του είδους και του τρόπου παραγωγής ενέργειας και στόχων της τεχνολογίας, είναι η πιο δύσκολη φάση προσαρμογής μας στην νέα κατάσταση. Η ανησυχία και ο σκεπτικισμός των ολίγων οικολόγων, κάποτε, αποτελεί σήμερα καθημερινό προβληματισμό των περισσοτέρων.

Η διάσκεψη στο Ρίο, το καλοκαίρι του 1992, προσδιόρισε το πρόβλημα στις διαστάσεις του, προδιαγράφοντας άμεσες ενέργειες και επεμβάσεις. Τα επιστημονικά στοιχεία για την σχέση της βιομηχανικής δραστηριότητας με τις αρνητικές κλιματικές αλλαγές, την οικολογική υποβάθμιση και το δυσοίωνο μέλλον του πλανήτη μας, ήταν συντριπτικά. Παρά ταύτα, οι τρόποι αντιμετώπισης και ο έλεγχος εφαρμογής τους δεν βρήκαν όλες τις κυβερνήσεις σύμφωνες. Αιτία; Οι επαγόμενες συνέπειες από τον περιορισμό της δράσης της βιομηχανίας των ανεπτυγμένων χωρών. Ο στόχος να διατηρηθούν τα επίπεδα ρύπανσης μέχρι το 2000, σε αυτά του 1990, δεν φαίνεται, σήμερα, να έχει επιτευχθεί. Στην επόμενη, όμοια διάσκεψη, στο Κιότο της Ιαπωνίας, το Δεκέμβριο του 1997, καταβλήθηκε προσπάθεια για μια νέα συμφωνία, βασισμένη σε πιο δραστικά μέτρα, χωρίς τελικά να υπάρξει ομοφωνία [1.2].

Πάντως, παρά τις αντιδράσεις των ολίγων, αλλά ισχυρών αυτού του κόσμου, η ευαισθητοποίηση και η κινητοποίηση των πολιτών ολοένα και αυξάνει. Η εκφραζόμενη, ποικιλοτρόπως, πρόθεση αντιμετώπισης του θέματος σε διεθνή κλίμακα, δείχνει ότι συνειδητοποιούμε αργά, αλλά σταθερά, πως η τεχνολογία, ως καρπός ανώτερης πνευματικής εργασίας, πρέπει να έχει στόχο να θεραπεύει και να υπηρετεί τον άνθρωπο, με σεβασμό προς το οικοσύστημα που τον φιλοξενεί. Αυτό το οικοσύστημα, χώρος ανάπτυξης και διαβίωσης όλων των μορφών ζωής, δεν είναι υπόθεση μερικών ανθρώπινων γενεών. Χρειάστηκαν 5 δισεκατομμύρια χρόνια για να εξιδανικευτούν οι κλιματικές συνθήκες στον πλανήτη μας, σε τέτοιο βαθμό, που να συμβάλουν στη δημιουργία της ζωής.

Είναι γεγονός αδιαμφισβήτητο, η σημαντική συμβολή των πηγών ενέργειας μεγάλης ισχύος στην τεχνολογική πρόοδο, από την οποία προέκυψαν πολλά θετικά αποτελέσματα. Μέσα από την ιστορική αναγκαιότητα των συμβατικών καυσίμων ξεπήδησαν νέες και συνεχώς βελτιώνονται παλαιότερες μέθοδοι, εξευγενισμένης παραγωγής ενέργειας, χωρίς πρακτικά οικολογικές επιβαρύνσεις. Ο ήλιος και ο άνεμος θα έχουν τον πρώτο λόγο στις επόμενες δεκαετίες.

1.1.2 Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στον φλοιό της γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σε αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.

Οι δεύτερες, έχουν βασική τους προέλευση τον ήλιο. Η ακτινοβολούμενη από τον ήλιο ενέργεια, που φτάνει στην γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία,

ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (ενέργεια κυμάτων). Απορροφούμενο από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυσικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

1.1.3 Κύριες αιτίες κατασπατάλησης της ενέργειας

Αν και η ανθρωπότητα τα τελευταία είκοσι χρόνια συνειδητοποίησε τον κίνδυνο του επερχόμενου ενεργειακού χειμώνα, οπότε ξεκίνησε ορισμένες φιλότιμες προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης και ορθολογικότερης χρήσης των ενεργειακών αποθεμάτων, ωστόσο οι βασικότερες αιτίες αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας παραμένουν και είναι οι εξής [1.1]:

Συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας

Η προσπάθεια του ανθρώπου για βελτίωση του βιοτικού του επιπέδου (π.χ. παραγωγή περισσότερων καταναλωτικών αγαθών), συνεχίζεται με αυξανόμενους ρυθμούς, όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα. Αν και γίνονται προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη μας, αυτές δεν αποδίδουν πάντοτε καρπούς. Πιο συγκεκριμένα, μετά τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις της τελευταίας τριακονταετίας, οι ανεπτυγμένες χώρες έδειξαν ότι διαθέτουν τα περιθώρια κάποιας περιορισμένης μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως στον τομέα της βιομηχανίας. Αντίθετα, χώρες λιγότερο ανεπτυγμένες με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, έχουν μικρότερα ή και μηδενικά περιθώρια περιορισμού των ενεργειακών τους αναγκών.

Ανομοιομορφία στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

Το παραπάνω γεγονός υπογραμμίζει την τρομακτική ανομοιομορφία που διέπει την κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας στις διάφορες περιοχές του πλανήτη μας. Σαν παράδειγμα, αναφέρεται ότι η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας στις Η.Π.Α. και στον Καναδά, είναι περίπου εικοσαπλάσια, από αυτήν των υπό ανάπτυξη χωρών όπως το Μεξικό, η Βραζιλία, η Συρία κ.τ.λ. Η πραγματικότητα αυτή πρέπει να συνδυασθεί και με το γεγονός ότι η παραγωγικότητα ενός λαού και η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας μεταβάλλονται σχεδόν ανάλογα.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, είναι ότι ορισμένοι λαοί καταναλώνουν αρκετά μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από ορισμένους άλλους. Χώρες αναπτυσσόμενες που βρίσκονται στη φάση της εκβιομηχάνισης και ανάπτυξης των ανέσεων της ζωής (σύγχρονες κατοικίες με θέρμανση και κλιματισμό, ιδιωτικής χρήσεως αυτοκίνητα κ.τ.λ.), έχουν υψηλή εισοδηματική ελαστικότητα ενέργειας, γι' αυτό είναι αδύνατο να συνδυάσουν τη συνέχιση της ανάπτυξής τους με τη μείωση της ενεργειακής έντασης.

Αύξηση του πληθυσμού της γης

Η ανομοιογενής ενεργειακή κατανάλωση στις διάφορες περιοχές του πλανήτη μας συνοδεύεται και από τη διαρκή αύξηση του πληθυσμού της γης. Όμως το πλέον σημαντικό στοιχείο, είναι η πληθυσμιακή έκρηξη που παρατηρείται στις υπό ανάπτυξη χώρες του πλανήτη μας, γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητες μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Στις περιπτώσεις αυτές, ακόμα και με σταθερή κατά κεφαλήν κατανάλωση, ο πλανήτης οδηγείται σε μια αύξηση της συνολικής κατανάλωσης, τουλάχιστον ανάλογης με την αύξηση του πληθυσμού.

Απώλειες συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας

Στις παραπάνω αιτίες θα πρέπει να προστεθεί και ένας αριθμός τεχνολογικών λόγων, οι οποίοι οδηγούν αναπόφευκτα στην αύξηση του ρυθμού κατανάλωσης των ενεργειακών αποθεμάτων. Σύμφωνα λοιπόν με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο είναι αδύνατο να εξαφανιστεί δεδομένη ποσότητα ενέργειας ή να παραχθεί ενέργεια από το μηδέν. Όμως κατά τη μετατροπή της ενέργειας από τη μια μορφή σε άλλη, δημιουργούνται ορισμένες απώλειες ωφέλιμης ενέργειας, οι οποίες εκφράζονται από την τιμή της εντροπίας του υπό διερεύνηση ενεργειακού συστήματος. Οι απώλειες ενέργειας σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, αποτελούν απώλειες ποσότητες ενέργειας χαμηλότερης ποιότητας, όπως για παράδειγμα η θερμική ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό σε κάθε μετατροπή ενέργειας έχουμε παραγωγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, η οποία δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και στη συνέχεια απορρίπτεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμικής ρύπανσης, συντελώντας ταυτόχρονα στο «θερμικό θάνατο» του πλανήτη μας. Παράλληλα σημαντικά ποσά ενέργειας χάνονται κατά τη μεταφορά και διανομή της ενέργειας από τον τόπο παραγωγής στην περιοχή κατανάλωσής της.

Συνοψίζοντας, αναφέρεται ότι ο βαθμός απόδοσης μιας θερμικής μηχανής κυμαίνεται σήμερα από 15% έως 45%, κάτι το οποίο αν συνδυαστεί με το πλήθος των θερμοηλεκτρικών σταθμών που τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τον πλανήτη μας, κάνει προφανή τη σημασία των ενεργειακών απωλειών των συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Φυσικά γίνονται σημαντικές προσπάθειες μείωσης των απωλειών και αύξησης του βαθμού απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων, γεγονός όμως το οποίο θα βελτιώσει ελάχιστα προς το παρόν το πλανητικό ενεργειακό ισοζύγιο. Τέλος, μορφές ενέργειας όπως η ηλεκτρική, θεωρούνται εξευγενισμένες, δεδομένου ότι παρέχουν τη δυνατότητα μετατροπής τους με ελάχιστες απώλειες, σε κάθε άλλη επιθυμητή μορφή ενέργειας. Ο διαχωρισμός αυτός της ενέργειας σε διαφορετικής ποιότητας μορφές, οδηγεί στην επόμενη αιτία κατασπατάλησης της ενέργειας.

Μη ορθολογική χρήση της ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε, η ενέργεια διατίθεται σε διάφορες ποιότητες, οι οποίες σχετίζονται με το βαθμό μετατρεψιμότητας των σε άλλη επιθυμητή μορφή ενέργειας. Είναι συνεπώς σκόπιμο να αξιολογηθούν και να ιεραρχηθούν οι απαιτήσεις της ανθρωπότητας στις μορφές ενέργειας διαφορετικής ποιότητας. Είναι, για παράδειγμα, ενεργειακά απαράδεκτο να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση κατοικιών ή για οικιακή χρήση ηλεκτρική ενέργεια υψηλής ποιότητας, της στιγμή που ακόμα και χαμηλής ποιότητας θερμότητα καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις ενός νοικοκυριού. Παράλληλα με κατάλληλη διαχείριση της ζήτησης ενέργειας μπορούν να μειωθούν και να μετατεθούν οι αιχμές ζήτησης, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση εγκατεστημένης ισχύος.

Αδιαφορία και σπατάλη ενέργειας

Η έλλειψη ενημέρωσης των πολιτών καθώς και η επικράτηση της άποψης ότι τα αποθέματα ενέργειας και πρώτων υλών είναι απεριόριστα, οδηγούν το μέσο άνθρωπο στην αδιαφορία για την κατασπατάληση της ενέργειας που προκαλεί. Μόλις πρόσφατα άρχισε να γίνεται αντιληπτό το περιορισμένο μέγεθος των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη, με αποτέλεσμα να ληφθούν κάποιες τιμολογιακές και διοικητικές αποφάσεις, που σκοπό έχουν την εξοικονόμηση ενέργειας. Ο πολίτης ωστόσο παραμένει απληροφόρητος, εφ' όσον δε διδάσκεται στη διάρκεια της βασικής του εκπαίδευσης ενεργειακή οικονομία και ορθολογική διαχείριση της ενέργειας και των φυσικών πόρων.

Ολοκληρώνοντας, πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι λόγοι που αναφέρθηκαν συντελούν στην εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων. Συνεπώς, κοινή προσπάθεια όλων των ανθρώπων πρέπει να είναι ο περιορισμός της σπατάλης και τελικά η σταδιακή και μεθοδευμένη απεξάρτηση πριν τη πλήρη εξάλειψή τους.

1.1.4 Ενέργεια και περιβάλλον

Ολόκληρη η διαδικασία παραγωγής ενέργειας, και ιδιαίτερα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση συμβατικών καυσίμων, είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες μόλυνσης της ατμόσφαιρας και γενικότερα υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα αναφέρονται οι σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και οξειδίων του θείου (SO_x), ενώ δεν πρέπει να αγνοούνται οι επιπτώσεις άμεσης απειλής από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Τόσο το CO₂ όσο και το SO₂ παράγονται από τη καύση των υδρογονανθράκων (πετρέλαιο, άνθρακας κ.τ.λ.). Το SO₂ σε συνδυασμό με νιτρώδεις ατμούς θεωρείται υπεύθυνο για την όξινη βροχή, που καταστρέφει την πανίδα και τη χλωρίδα της βόρειας και κεντρικής Ευρώπης, ενώ το CO₂ ευθύνεται για τη βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, επιτείνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου προκαλείται από το γεγονός ότι το CO₂ έχει την ιδιότητα να απορροφά την υπέρυθρη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα υψηλές συγκεντρώσεις του στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας να εμποδίζουν την απαγωγή θερμότητας από τη γη στο διάστημα, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή CO₂ είναι περίπου 22 εκατομμύρια τόνοι. Η συνεισφορά της Ευρώπης στην παραγωγή CO₂ είναι σημαντική, δεδομένου ότι οι εκτιμήσεις αναφέρουν ότι η μείωση κατά 10% της ευρωπαϊκής παραγωγής CO₂ θα επιφέρει αντίστοιχη μείωση κατά 5% σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η Ε.Ε. σε μια προσπάθεια για περιορισμό των επιπτώσεων του φαινόμενου του θερμοκηπίου, επιχειρεί με διάφορους τρόπους να συγκρατήσει τις εκπομπές του CO₂ στο σύνολο των χωρών μελών της. Στα πλαίσια της γενικότερης προσπάθειας της Ε.Ε. η Ελλάδα εκπόνησε (1995) το «Ελληνικό Πρόγραμμα για την Κλιματική Μεταβολή». Στο πρόγραμμα αυτό αναγνωρίζεται ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι μόνες πηγές ενέργειας που δεν επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με εκπομπές CO₂. Για το λόγο αυτό προτείνεται η θεσμική και οικονομική ενίσχυση επενδυτικών πρωτοβουλιών στον τομέα αξιοποίησης των ΑΠΕ με άμεσο περιβαλλοντικό όφελος 3.3 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η ετήσια μείωση των εκπομπών CO₂ με εφαρμογή τεχνολογιών ΑΠΕ [1.1].

| Εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας | Εκατομμύρια τόνοι | |
|---------------------------------------|-------------------|--|
| Αιολικά πάρκα | 1.0 | |
| Εφαρμογές ηλιακής ενέργειας | 1.0 | |
| Αξιοποίηση βιομάζας | 0.9 | |
| Μικρά υδροηλεκτρικά | 0.2 | |
| Αξιοποίηση γεωθερμίας | 0.1 | |
| Επιδεικτικά προγράμματα | 0.1 | |
| Σύνολο | 3.3 | |

Πίνακας 1.1: Μείωση εκπομπών CO₂ με ανάπτυξη ανανεώσιμων πηνών ενέργειας

1.1.5 Στροφή στις Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ανακεφαλαιώνοντας, πρέπει να επισημανθεί ότι αμέσως μετά τη δεύτερη ενεργειακή κρίση, στις αρχές του 1980, η διεθνής κοινότητα άρχισε να αναγνωρίζει το πεπερασμένο των παγκόσμιων αποθεμάτων των συμβατικών πηγών ενέργειας σε σύγκριση με την ανεξέλεγκτη αύξηση των ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη.

Ίσως οι προβλέψεις της πρώτης έκθεσης της Λέσχης της Ρώμης (1970) με τίτλο «Τα όρια της ανάπτυξης» να μην πραγματοποιήθηκαν στο βαθμό που η έκθεση προέβλεπε, όμως οι αρνητικές επιπτώσεις που συνοδεύουν την αλόγιστη κατανάλωση ενέργειας εξακολουθούν να ισχύουν και να επιβεβαιώνονται από τα πορίσματα της δεύτερης έκθεσης, η οποία συνετάχθη το 1991. Δεν πρέπει συνεπώς, να αγνοείται το γεγονός ότι τα βεβαιωμένα αποθέματα των κυριότερων συμβατικών καυσίμων επαρκούν στις καλύτερες περιπτώσεις για τα επόμενα εκατό χρόνια, ενώ ακόμη κι αν ανακαλυφθούν στο μέλλον χιλιοπλάσια αποθέματα συμβατικών καυσίμων, με τους σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας, θα παρατείνουν για άλλα εκατό πενήντα μόλις χρόνια την άφιξη του ενεργειακού χειμώνα στον πλανήτη.

Ταυτόχρονα η επιταχυνόμενη συσσώρευση επικίνδυνων ρυπαντών (τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα) και η αντίστοιχη καταστροφή του περιβάλλοντος, οδηγούν στην εμφάνιση σημαντικών προβλημάτων υγείας, υποβαθμίζοντας παράλληλα την ποιότητα ζωής στις περισσότερες μεγαλουπόλεις.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω προβλήματα που πηγάζουν από τη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας, αρκετοί ειδικοί πρότειναν την αξιοποίηση των ήπιων ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Φυσικά οι ανανεώσιμες πηγές δεν είναι δυνατό τη στιγμή αυτή να επιλύσουν το συνολικό ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας, τουλάχιστον με τα σημερινά οικονομικά και τεχνολογικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντική η μελέτη της αξιοπιστίας συστημάτων με ανανεώσιμες τεχνολογίες για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή και η αιολική, για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Αυτό ευθύνεται στο γεγονός ότι αυτές οι μη συμβατικές μορφές ενέργειας είναι φιλικές προς το περιβάλλον και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά τόσο σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συνδεδεμένα στο δίκτυο, όσο και σε απομονωμένα. Αναμένεται ότι η συνεισφορά των ανανεώσιμων μονάδων στις ανάγκες της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας τους [5.3].

Αντικείμενο λοιπόν της εργασίας αποτελεί η μελέτη της αξιοπιστίας των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που περιέχουν αιολική και φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Τα συστήματα που θα μας απασχολήσουν είναι υβριδικά. Αυτό σημαίνει πως περιέχουν και μια εφεδρική συμβατική μονάδα μικρής ισχύος, η οποία ενισχύει την απόδοση του συστήματος. Επομένως, σκοπός της εργασίας είναι η μοντελοποίηση ενός απομονωμένου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η μελέτη της αξιοπιστίας και της απόδοσής του. Επιλέχθηκε επίτηδες μικρή συμβατική μονάδα γιατί μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά συστημάτων που έχουν μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών. Ωστόσο, η μεταβλητή φύση αυτών των πηγών μπορεί να μειώσει την αξιοπιστία των απομονωμένων συστημάτων. Εκείνα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο δεν παρουσιάζουν αυτό το πρόβλημα επειδή σε ενδεχόμενη απώλεια φορτίου καλύπτονται από το κεντρικό δίκτυο. Αυτό όμως δεν συμβαίνει στα απομονωμένα συστήματα, τα οποία πρέπει να παράγουν μόνα τους και να καλύψουν τη ζήτηση των καταναλωτών. Για το λόγο αυτό στα συστήματα που μελετώνται προστίθενται συσκευές αποθήκευσης ενέργειας ώστε να διερευνηθεί πως επηρεάζουν την αξιοπιστία ενός απομονωμένου συστήματος. Οι διαχειριστές των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν κυρίως αιτιοκρατικές μεθόδους για την αποτίμηση της αξιοπιστίας τους. Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε ωστόσο μια σχετικά καινούρια μέθοδος αξιοπιστίας, η οποία λαμβάνει υπόψη τις εγγενείς αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις ανανεώσιμες τεχνολογίες. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ανάλυση ευμάρειας και παρέχει τη δυνατότητα μιας πιθανοτικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας αιτιοκρατικά κριτήρια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και παρέχουν πληροφορίες για τη μελέτη και τη βελτίωση των συστημάτων αυτών.

1.3 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα κεφάλαια της εργασίας έχουν την ακόλουθη δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2**, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και πιο ειδικά των απομονωμένων. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά τα συστατικά από τα οποία αποτελείται το απομονωμένο σύστημα που μελετήθηκε σε αυτήν την εργασία (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης).

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι μέθοδοι αξιοπιστίας που χρησιμοποιούνται από τους διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως επίσης και οι δείκτες αξιοπιστίας. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε μια καινούρια μέθοδο ανάλυσης της αξιοπιστίας, που ονομάζεται ανάλυση ευμάρειας και εφαρμόστηκε στο απομονωμένο σύστημα για την αποτίμηση της απόδοσής του.

Στο **Κεφάλαιο 4**, παρατίθεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να μοντελοποιηθεί ένα απομονωμένο υβριδικό σύστημα στο λογισμικό Matlab.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της αξιοπιστίας του απομονωμένου συστήματος. Ένα βασικό σύστημα που αποτελείται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και έναν εφεδρικό ντηζελοκινητήρα συγκρίνεται με διάφορους σχηματισμούς συστημάτων (Α/Γ - μπαταρία - ντηζελοκινητήρας, Φ/Β - ντηζελοκινητήρας, κ.α.) και τα αποτελέσματα που εξάγονται σχολιάζονται με σκοπό την ανάλυση της αξιοπιστίας συστημάτων που έχουν μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και εφαρμογές των προηγούμενων κεφαλαίων.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Ι.Κ Καλδέλλης, 'Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας', 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα 2005.
- [1.2] Ι.Ε Φραγκιαδάκης, 'Φωτοβολταϊκά Συστήματα', 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2006.
- [1.3] M.R Patel, 'Wind and Solar Power Systems', CRC, Press LLC, 1999.

8

ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία περιγραφή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που τροφοδοτούν απομακρυσμένες περιοχές, τοποθεσίες που δεν μπορούν να συνδεθούν με το δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, είτε για οικονομικούς είτε για φυσικούς λόγους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατηγοριοποιούνται σε απομονωμένα (ή εκτός δικτύου) και σε εκείνα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο [2.1]. Τα απομονωμένα συστήματα, διακρίνονται σε αυτόνομα και υβριδικά.

Στα αυτόνομα συστήματα η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται εξ ολοκλήρου από τις ανανεώσιμες πηγές, χωρίς τη συμμετοχή συμβατικών πηγών ενέργειας και μπορεί να περιλαμβάνονται ή όχι ηλεκτρικοί συσσωρευτές.



Σχήμα 2.1: Κατηγορίες και λειτουργία συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Στα υβριδικά συστήματα, η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από το συνδυασμό ανανεώσιμων πηγών με συμβατικές πηγές, οι οποίες επιστρατεύονται σε περιπτώσεις όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας υπερβαίνει την παραγόμενη. Στις περισσότερες περιπτώσεις υβριδικών συστημάτων προβλέπεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Αρχικά λοιπόν, γίνεται μία αναφορά στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συστατικά μέρη που απαρτίζουν τα απομονωμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που εξετάζονται σ' αυτή την εργασία.

2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.2.1 Σκοπός και απαιτήσεις συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Τα πρώτα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1880. Από τότε, αυξήθηκαν δραστικά σε μέγεθος και πολυπλοκότητα. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μία εξυπηρετούμενη περιοχή καταναλώσεως. Πρωταρχικός σκοπός του συστήματος είναι η εξυπηρέτηση των καταναλωτών κατά τον πλέον ποιοτικό, αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο. Γι' αυτό το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να έχει μελετηθεί και να λειτουργεί σωστά, όπως επίσης να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις [2.2]:

- Να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε όλες τις περιοχές που υπάρχει ζήτηση.
- Να μπορεί να ικανοποιεί τη διαρκώς μεταβαλλόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Να παρέχει στους καταναλωτές ποιοτική ηλεκτρική ενέργεια, η οποία εξασφαλίζεται με σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.
- 4. Να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

2.2.2 Δομή Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα σύνολο εγκαταστάσεων και μέσων απαρτίζουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να γίνεται εφικτή η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης. Μπορούμε να διακρίνουμε τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε «Εθνικά Συστήματα», «Περιφερειακά Συστήματα» και «Ιδιωτικά Συστήματα» ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή που καλούνται να καλύψουν. Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατόν να διακριθούν τα εξής ειδικότερα συστήματα [2.3]:

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- 2. Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας
- 3. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας
- 4. Φορτία

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την βοήθεια τριφασικών γεννητριών. Οι σταθμοί παραγωγής βρίσκονται συνήθως μακριά από τα σημεία κατανάλωσης, οπότε η ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να μεταφερθεί στα σημεία κατανάλωσης με την βοήθεια των τριφασικών γραμμών μεταφοράς.

Για να είναι οικονομική η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να γίνεται σε υψηλή τάση. Για το λόγο αυτό, η τάση εξόδου των γεννητριών (π.χ. 15kV ή 20kV) ανυψώνεται σε υψηλή τάση (π.χ. 150kV ή 400kV για την Ελλάδα) με την βοήθεια των τριφασικών μετασχηματισμών ανύψωσης τάσης.

Μετά τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (των 150 kV ή των 400 kV για την Ελλάδα) υπάρχουν οι τριφασικοί μετασχηματιστές υποβιβασμού της τάσης από την υψηλή τάση στη μέση τάση (π.χ. 20 kV για την Ελλάδα).

Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τις γραμμές διανομής μέσης τάσης (π.χ. 20 kV για την Ελλάδα), τους τριφασικούς μετασχηματιστές που υποβιβάζουν τη μέση τάση σε χαμηλή τάση (π.χ. 380 kV για την Ελλάδα) και τις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης που μεταφέρουν υπό χαμηλή τάση την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές χαμηλής τάσης.

2.2.2.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία μετατροπής μίας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται είτε από συμβατικούς σταθμούς είτε από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η ταξινόμηση των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [2.3].



Σχήμα 2.2: Ταξινόμηση σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλων, η οποία μηχανική ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γεννητριών.

Οι ντηζελοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν το πετρέλαιο ως μέσο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω μηχανών εσωτερικής καύσης, η οποία μηχανική ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γεννητριών.

Στους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου υπάρχει συνδυασμός λειτουργίας αεριοστρόβιλου και ατμοστρόβιλου: από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας, συνήθως φυσικό αέριο, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια πρώτα στον αεριοστρόβιλο και μετά στον ατμοστρόβιλο.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν την κινητική και δυναμική ενέργεια του νερού ως μέσο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω υδροστροβίλων, η οποία μηχανική ενέργεια στην συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γεννητριών.

Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, όπου ο λέβητας έχει αντικατασταθεί από πυρηνικό αντιδραστήρα, στον οποίο γίνεται η πυρηνική σχάση ουρανίου ή πλουτωνίου.

Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιβαρύνουν το περιβάλλον. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι μειώνονται τα αποθέματα σε πρώτη ύλη (πετρέλαιο, λιγνίτης, φυσικό αέριο) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικούς σταθμούς. Επιπλέον, η τιμή του πετρελαίου (πρώτη ύλη στους ντηζελοηλεκτρικούς σταθμούς) έχει αυξητικές τάσεις.

Τα τελευταία χρόνια οι σταθμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κερδίζουν έδαφος, καθώς είναι περιβαλλοντικά φιλικοί και επίσης επειδή χρησιμοποιούν πηγές ενέργειας που βρίσκονται στη φύση ανεξάντλητες (π.χ. ήλιος, αέρας).

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι τα αιολικά, τα φωτοβολταϊκά, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι κυψέλες καυσίμου, η κυματική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα. Οι σταθμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές ή αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για σύνδεση με συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σήμερα οι πλέον ώριμες είναι τα αιολικά, τα μικρά υδροηλεκτρικά και τα φωτοβολταϊκά.

Τα αιολικά συστήματα αξιοποιούν μέσω των ανεμογεννητριών την κινητική ενέργεια του ανέμου, την οποία μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο βρίσκεται σήμερα σε θεαματική εξέλιξη. Ειδικά η Ελλάδα, όπου το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ταχύτητα του ανέμου, βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, κυρίως στις νησιωτικές περιοχές, αποτελεί ιδανικό πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αξιοποιούν μέσω των φωτοβολταϊκών γεννητριών την ηλιακή ενέργεια, την οποία μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές, όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι πολύ ακριβή. Αν και όλη η γη δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η ποσότητά της εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική θέση, την ημέρα, την εποχή και τη νεφοκάλυψη.

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, όπως οι συμβατικοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, αξιοποιούν την κινητική και την δυναμική ενέργεια του νερού ως μέσο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω υδροστροβίλων, η οποία μηχανική ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γεννητριών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί αξιοποιούν υδάτινα ρεύματα, για τα οποία δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποθήκευσης (π.χ. φράγματα) του νερού.

Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας κατάλληλες διατάξεις, ηλεκτρολύτες ή αναμορφωτές.

Οι σταθμοί κυματικής ενέργειας στοχεύουν στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας των κυμάτων της θάλασσας σε ηλεκτρική ενέργεια, με τη χρήση κατάλληλων διατάξεων. Η

παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή τις παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, κυρίως στις βόρειες θάλασσες.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμφανίζεται με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Η ενέργεια αυτή σχετίζεται με την ηφαιστειότητα και τις ειδικότερες γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Είναι μία ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή, που με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικές ενεργειακές ανάγκες.

Η βιομάζα περιλαμβάνει τα διάφορα γεωργικά και δασικά υπολείμματα, από τα οποία με κατάλληλες θερμοχημικές επεξεργασίες μπορούν να ληφθούν καύσιμα. Καλύπτει σήμερα το 14% της παγκοσμίως απαιτούμενης ενέργειας. Η καύση αποτελεί, ουσιαστικά, ουδέτερη διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αρκεί να μην διαταράσσεται η λεπτή ισορροπία στο φυσικό περιβάλλον.

2.2.2.2 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Το σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας αφορά το δίκτυο που συνδέει τους σταθμούς παραγωγής αλλά και διαφορετικά συστήματα μεταξύ τους (π.χ. συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γειτονικών χωρών). Επίσης το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ισχύος προς τα κέντρα βάρους της κατανάλωσης. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Η μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος με υψηλή τάση επιφέρει μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία.

2.2.2.3. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης με το σύστημα διανομής. Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τρία υποσυστήματα:

- 1. Το σύστημα διανομής μέσης τάσης
- 2. Τους υποσταθμούς διανομής
- 3. Το σύστημα διανομής χαμηλής τάσης

Το σύστημα διανομής μέσης τάσης τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής τάσης προς μέση τάση ενώ τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής μέσης τάσης προς χαμηλή τάση και τους καταναλωτές μέσης τάσης.

Οι υποσταθμοί διανομής αποτελούν κυρίως τους κόμβους του συστήματος διανομής μέσης τάσης και τα σημεία τροφοδότησης και αφετηρίας του συστήματος χαμηλής τάσης. Στους υποσταθμούς διανομής υποβιβάζεται η τάση από τη μέση στη χαμηλή τάση διανομής.

Το σύστημα διανομής χαμηλής τάσης τροφοδοτεί τους καταναλωτές χαμηλής τάσης.

2.2.2.4 Φορτία

Τα φορτία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται σε βιομηχανικά, εμπορικά και οικιακά, ανάλογα με το μέγεθος, τη συμμετρία (μονοφασικό ή τριφασικό), τη σταθερότητα (ως προς το χρόνο, τη συχνότητα και την τάση), και την περίοδο λειτουργίας τους (συστηματική ή τυχαία λειτουργία). Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ισχύος, μπορεί να τροφοδοτήσει τα πολύ μεγάλα βιομηχανικά φορτία. Αντίστοιχα, τα μικρά βιομηχανικά φορτία εξυπηρετούνται από το σύστημα διανομής μέσης. Τα βιομηχανικά φορτία είναι σύνθετα φορτία (έχουν ωμικό και επαγωγικό μέρος), καθώς οι κινητήρες επαγωγής αποτελούν μεγάλο τμήμα των φορτίων αυτών. Τα σύνθετα αυτά βιομηχανικά φορτία εξαρτώνται από την τάση και τη συχνότητα και αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του φορτίου του συστήματος ηλεκτρική ενέργειας.

Τα εμπορικά και οικιακά φορτία αποτελούνται κυρίως από φορτία φωτισμού, θέρμανσης και ψύξης. Τα φορτία αυτά είναι ανεξάρτητα της συχνότητας και καταναλώνουν αμελητέα άεργο ισχύ.

Η πραγματική ισχύς του φορτίου εκφράζεται σε kW ή MW. Το μέτρο του φορτίου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ημερήσια καμπύλη φορτίου μίας ηλεκτρικής εταιρίας είναι μία σύνθεση της ζήτησης φορτίου των διάφορων κατηγοριών καταναλωτών. Η μέγιστη τιμή του φορτίου κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου ονομάζεται ημερήσια αιχμή φορτίου ή μέγιστο ημερήσιο φορτίο.

Ο συντελεστής φορτίου σε μία χρονική περίοδο είναι ίσος με το λόγο της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίοδο αυτή προς τη μέγιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσε να έχει ο καταναλωτής αν ζητούσε συνεχώς το μέγιστο φορτίο της περιόδου αυτής. Ο συντελεστής φορτίου μπορεί να αφορά περίοδο μίας ημέρας, ενός μήνα, ή ενός χρόνου.

Γενικά υπάρχει διαφορά στην αιχμή φορτίου μεταξύ διαφορετικών κατηγοριών καταναλωτών, η οποία βελτιώνει το συνολικό συντελεστή φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για να λειτουργεί οικονομικά το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να είναι υψηλός ο συντελεστής φορτίου του συστήματος. Τα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τυπικούς συντελεστές φορτίου από 55% έως 70%.

2.3 ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πολλές απομονωμένες περιοχές σ' ολόκληρο τον κόσμο δεν έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, είτε για οικονομικούς είτε για φυσικούς λόγους. Σε αυτές τις περιοχές, οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια ικανοποιούνται κυρίως από μικρούς ντηζελοηλεκτρικούς σταθμούς. Όμως, τα λειτουργικά κόστη που σχετίζονται με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι απαράδεκτα υψηλά. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην ανοδική πορεία που εμφανίζουν οι τιμές των φυσικών καυσίμων, στις δυσκολίες που προκύπτουν κατά τη μεταφορά και τη διανομή τους, καθώς επίσης και στη συντήρηση του εξοπλισμού. Η εξοικονόμηση καυσίμου μπορεί να επιτευχθεί ενσωματώνοντας σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [2.4]. Αν το απομονωμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το σύστημα παραγωγής συνδυάζεται με ένα ελαχίστου μεγέθους ή μη υπάρχων δίκτυο μεταφοράς και με ένα εξαιρετικά μικρό και αρκετά συνεπτυγμένο δίκτυο διανομής. Για το λόγο αυτό στη μελέτη τέτοιου είδους συστημάτων λαμβάνεται υπόψη μόνο το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη μελέτη τέτοιου είδους συστημάτων λαμβάνεται υπόψη μόνο το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν αισθητά τις δαπάνες στα καύσιμα, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αλλά και τις φυσικές διαταραχές των βιοτόπων, που σχετίζονται με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν πλέον ιδανική επιλογή για τις αναπτυσσόμενες χώρες, αφού υπάρχει επιτακτική ανάγκη να παρασχεθεί η βασική ηλεκτρική ενέργεια στις αγροτικές και στις απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν υπάρχει καμία υποδομή [2.5].

Η αξιοποίηση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους στις απομονωμένες περιοχές. Μία μέθοδος είναι η παράλληλη λειτουργία των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών με έναν ντηζελοκινητήρα, έτσι ώστε να εξοικονομείται ποσότητα καυσίμου. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη όταν υπάρχει σχετικά μικρή διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας στο σύστημα. Ωστόσο, σε περιόδους όπου υπάρχει επαρκής αιολικό και ηλιακό δυναμικό, παρατηρείται σημαντική απώλεια ενέργειας. Μία εναλλακτική μέθοδος λειτουργίας είναι η ύπαρξη ενός εφεδρικού ντηζελοκινητήρα. Ο κινητήρας θα λειτουργεί διακοπτόμενα, ώστε να επαναφέρει το σύστημα, όταν υπάρχουν ξαφνικές ελλείψεις ενέργειας και να καλύπτει το απαιτούμενο ηλεκτρικό φορτίο. Βέβαια η αστάθεια που εμφανίζουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στον εφεδρικό ντηζελοκινητήρα λόγω του μεγάλου αριθμού κύκλων εκκίνησης και διακοπής του [2.6]. Εξαιτίας λοιπόν της μεταβλητής φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και του απαιτούμενου φορτίου, οι ασυνέχειες στην τροφοδοσία είναι αναπόφευκτες. Συσκευές αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ανακουφίσουν σε κάποιο βαθμό τέτοιου είδους προβλήματα. Η χρησιμοποίηση τέτοιων συσκευών, όπως είναι οι μπαταρίες, μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την αξιοπιστία ενός μικρού απομονωμένου σταθμού. Οι συμβατικοί σταθμοί συχνά λειτουργούν, στα απομονωμένα συστήματα, χωρίς συσκευές αποθήκευσης ενέργειας [2.7]. Η χρήση όμως ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στα απομονωμένα συστήματα, απαιτεί τη δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας ή την ενίσχυση του συστήματος με μία ντηζελοηλεκτρική μονάδα ή και τα δύο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συστατικά των απομονωμένων συστημάτων που μελετώνται σε αυτή την εργασία. Επίσης γίνεται μία αναφορά και στα εφεδρικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις ασυνέχειες που εμφανίζουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

2.3.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα είναι συστήματα ειδικά διαμορφωμένων και συνδεόμενων διατάξεων, που επιτυγχάνουν την άμεση και αποδοτική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η διαδικασία μετατροπής βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο λαμβάνει χώρα όταν η ηλιακή ακτινοβολία πέσει στην επιφάνεια του υλικού του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών. Μπορούν να καλύψουν ευρεία περιοχή ισχύος, από το μέγεθος της πολύ χαμηλής ισχύος ευρείας χρήσεως καταναλωτικών προϊόντων, όπως είναι οι αριθμητικοί υπολογιστές, τα μικρά φωτιστικά σώματα κήπου κ.α., έως συστήματα μεγάλης ισχύος, για την τροφοδοσία νησιών ή πρότυπων μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων, συνδεδεμένων ή όχι στο δίκτυο.

Η συνηθέστερη εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η κατασκευή αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι εγκαταστάσεις αυτές λειτουργούν αυτοδύναμα για την τροφοδότηση συγκεκριμένων καταναλώσεων, χωρίς να συνδέονται με μεγάλα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, από τα οποία θα μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια ή να στέλνουν την ενδεχόμενη περίσσεια της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας [2.1].

2.3.1.1 Υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το υλικό που χρησιμοποιείται κυρίως στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι το πυρίτιο (Si). Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο διάκενο 1,1 eV. Αν και οι ιδιότητές του δεν είναι ιδεώδεις για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο κυριάρχησε εδώ και πολλά χρόνια σαν υλικό κατασκευής των ηλιακών στοιχείων. Αυτό μάλλον οφείλεται στην ευρεία χρήση του πυριτίου σε εφαρμογές της ηλεκτρονικής για τουλάχιστον τρεις δεκαετίες. Επίσης, το πυρίτιο κυκλοφορούσε σε μεγάλες ποσότητες στην αγορά με πολύ καλή χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής [2.8].

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής. Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής [2.1], [2.8]:

Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αποτελείται από λεπτό πυρίτιο σε μορφή λεπτών δίσκων με ομοιόμορφο μπλε σκούρο χρώμα. Η απόδοσή τους, με τη μορφή κυψελίδας, κυμαίνεται από 21 έως 24%, ενώ με τη μορφή φωτοβολταϊκών πλαισίων, μεταξύ 13 έως 16%. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής.

Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Το κόστος κατασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία, τα οποία αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα πάχους 10 έως 50 μm. Στην επιφάνεια της κυψελίδας διακρίνονται τέσσερις διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές, τα όρια των οποίων αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων. Άρα όσο μικρότερο το συνολικό μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης φωτοβολταϊκό στοιχείο, τόσο καλύτερη η ηλεκτρική αγωγιμότητά τους. Γενικά ισχύει πως όσο μεγαλύτερες οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, τόσο υψηλότερη η απόδοσή του, η οποία κυμαίνεται από 17 έως 20%, σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας και από 10 έως 14%, σε βιομηχανική μορφή φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από υψηλή χρονική σταθερότητα. Το χρώμα τους είναι γαλάζιο.

Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας. Αποτελούνται από μία λεπτή ταινία από τηγμένο υλικό.
 Η μέθοδος κατασκευής τους έχει υψηλό κόστος και για το λόγο αυτό η βιομηχανική παραγωγή του είναι περιορισμένη.

Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου. Αν και το άμορφο πυρίτιο παρουσιάζει μεγάλη ατέλεια στην κρυσταλλική δομή του, εντούτοις χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλιακών στοιχείων, αφού παρουσιάζει μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο από ό,τι το κρυσταλλικό και απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Επίσης, παρασκευάζεται με μεθόδους πολύ χαμηλού κόστους. Η απόδοσή τους μειώνεται έντονα, στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6 έως 8%. Το ιδιαίτερο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδοχικών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Ωστόσο, γίνονται εργαστηριακές μελέτες και για άλλα υλικά, οι οποίες έχουν δώσει θετικά αποτελέσματα, για το θειούχο κάδμιο (CdS) και το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από θειούχο κάδμιο παρουσιάζουν αρκετά χαμηλό κόστος κατασκευής, ωστόσο η απόδοσή τους δεν είναι πολύ καλή (<10%). Το γεγονός αυτό, σε σχέση με τα προβλήματα σταθερότητας που εμφανίζουν, συνέτειναν στην διακοπή των ερευνητικών προσπαθειών με επίκεντρο το υλικό αυτό, παρόλο που παρουσιάζει μεγάλο ενεργειακό διάκενο (2,45 eV). Από την άλλη μεριά, το αρσενικούχο γάλλιο παρέχει μεγάλη απόδοση (θεωρητικά περίπου 25%), ενώ έχει μικρότερο ενεργειακό διάκενο (1,43 eV) από το θειούχο κάδμιο. Η μεγάλη σχετικά τιμή του ενεργειακού διακένου εξασφαλίζει αρκετά μεγάλη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας και καλή συμπεριφορά στις σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό επειδή τα ηλιακά στοιχεία υπερθερμαίνονται λόγω της έντονης ακτινοβολίας που δέχονται. Ωστόσο όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο η απόδοση του GaAs πέφτει. Βέβαια, το ίδιο συμβαίνει και για το πυρίτιο και για το CdS και μάλιστα σε πιο έντονο βαθμό. Σε σχέση με το πυρίτιο όμως το κόστος κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων από αρσενικούχο γάλλιο είναι αρκετά υψηλότερο. Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μία αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές, οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά (και μη γραμμικά) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή.

Η χαρακτηριστική καμπύλη που δείχνει τη μεταβολή της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση (I) του ηλιακού στοιχείου πυριτίου φαίνεται στο Σχήμα 2.3, από όπου παρατηρείται ότι αν αυξηθεί η τάση πάνω από 0,52V, τότε μειώνεται η ένταση του ρεύματος σχεδόν κατακόρυφα.

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή ισχύος (P) που αποδίδει ένα ηλιακό στοιχείο πυριτίου σε σχέση με την τάση του (V). Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό ότι αυξανόμενης της τάσης, μέχρι περίπου τα 0,52V, η αποδιδόμενη ισχύς αυξάνει σχεδόν γραμμικά, ενώ μετά το σημείο αυτό μειώνεται απότομα η απόδοση του ηλιακού στοιχείου [2.8].

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η τάση του ηλιακού στοιχείου ελαττώνεται. Το ίδιο συμβαίνει και με την απόδοσή του, δηλαδή όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η απόδοσή του. Με βάση αυτή την παρατήρηση προκύπτει πως αν είναι γνωστή η ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μία θερμοκρασία αναφοράς T_{ref}, τότε μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου σε μία άλλη θερμοκρασία Τ_α από την ακόλουθη σχέση [2.9]:

$$P_a = P_{ref} \cdot \left[1 + \beta \cdot \left(T_{ref} - T_\alpha \right) \right]$$
(2.1)

όπου P_{ref} η ισχύς εξόδου (σε W) στη θερμοκρασία T_{ref} και P_a η ισχύς εξόδου (σε W) σε θερμοκρασία T_a .



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστική έντασης – τάσης σε ηλιακό στοιχείο Si



Σχήμα 2.4: Το γράφημα ισχύος – τάσης για ένα ηλιακό στοιχείο Si

2.3.1.3 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια

Το βασικότερο συστατικό κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία. Ανάλογα με τον σκοπό λειτουργίας και το βαθμό πολυπλοκότητας στην κατασκευή, οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες κατατάσσονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες, οι οποίες είναι οι εξής [2.5]:

 Τις απλές διατάξεις, όπου ο συλλέκτης τοποθετείται με σταθερή γωνία κλίσης. Η γωνία κλίσης του συλλέκτη πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη ενεργειακή απολαβή. Οι στατικές συλλεκτικές επιφάνειες χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιοχές όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι ή είναι ενσωματωμένες σε κτίρια, κυρίως επειδή εμφανίζουν επαρκή μηχανική αντοχή. Σ' αυτές τις διατάξεις, τα ηλιακά στοιχεία του συλλέκτη δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία με τη φυσική της πυκνότητα και διακύμανση στη διάρκεια της ημέρας.

2. Τις διατάξεις με κινητά πλαίσια που περιστρέφονται αυτόματα και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου στον ουρανό, ώστε τα ηλιακά στοιχεία να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα ηλιακό στοιχείο μέχρι 50% περίπου, αφού δέχεται πυκνότερη ακτινοβολία, ανά μονάδα εμβαδού της επιφανείας του.

3. Τις διατάξεις που με τη χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την στέλνουν πολύ συμπυκνωμένη πάνω στα ηλιακά στοιχεία. Για την αποφυγή θέρμανσης, στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές διατάξεις απαιτείται συνήθως η τεχνητή ψύξη των ηλιακών στοιχείων με κυκλοφορία ψυχρού αέρα ή ψυκτικών υγρών.

Το ηλιακό στοιχείο αναπτύσσει πολύ χαμηλή τάση και παράγει πολύ μικρή ηλεκτρική ισχύ για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων. Η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο ηλιακό στοιχείο, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία είναι περίπου 0.5 V, ενώ η παραγόμενη ισχύς δεν ξεπερνά τα 0.4 W. Ο τρόπος για να αυξηθεί η τάση και η ισχύς από τα ηλιακά στοιχεία, είναι αυτά να τοποθετηθούν πολλά μαζί, ανά 10 έως 50 περίπου, με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Τα στοιχεία στην περίπτωση αυτή συνδέονται σε σειρά, συγκροτώντας μια διάταξη που ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Το πλήθος των στοιχείων που απαρτίζουν κάθε πλαίσιο, εξαρτάται από την επιθυμητή τάση που πρέπει να επιτευχθεί. Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα σε μορφή σάντουιτς. Δηλαδή, τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή από ενισχυμένο πλαστικό, που αποτελεί το πίσω μέρος του πλαισίου. Το μπροστινό μέρος καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω μέρος συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με τη βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και χρησιμεύει ως συλλέκτης της ηλιακής ακτινοβολίας. Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή του, το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος των ηλιακών στοιχείων που περιέχουν.

Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, που εξαρτώνται από τα αντίστοιχα μεγέθη των χωριστών ηλιακών στοιχείων που περιέχει. Για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός πλαισίου χρησιμοποιείται ένας συντελεστής, που ονομάζεται συντελεστής απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου n_{π} . Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το πλαίσιο, P_P (σε W), προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του (S, σε m²). Ο συντελεστής απόδοσης είναι επίσης ίσος με το λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο E (σε kWh) για ένα χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που αυτό δέχεται για το ίδιο χρονικό διάστημα. Έτσι λοιπόν ισχύει:

$$n_{\pi} = \frac{P_p}{\mathrm{H} \cdot S} = \frac{E}{I_s \cdot S}$$
(2.2)

όπου I_s είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου (σε kWh/m²) και Η είναι η πυκνότητα ηλεκτρικής ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (σε W/m²).

Η τιμή του n_{π} εξαρτάται όχι μόνο από τη μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων (n), αλλά και από το συντελεστή κάλυψης του πλαισίου σ_{κ} , που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι:

$$n_{\pi} = n \cdot \sigma_{\kappa} \tag{2.3}$$

Ο συντελεστής κάλυψης εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Πρακτικά κυμαίνεται από 0.78 έως και 0.98 (για τα μεγάλου κόστους ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία).

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αντιστοιχεί σε μια συμβατική θερμοκρασία, συνήθως $20^{\circ}C$. Στους θερινούς μήνες, ωστόσο, η θερμοκρασία αυτή διαφέρει αξιόλογα από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου. Έχει παρατηρηθεί ότι λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται αλλά και των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά τη λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά $25 - 30^{\circ}C$, ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου. Αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι n, η τιμή του σε μία διαφορετική θερμοκρασία θ θα είναι:

$$n_{\theta} = n \cdot \sigma_{\theta} \tag{2.4}$$

όπου σ_θ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης. Στη συμβατική θερμοκρασία, ο σ_θ είναι ίσος με τη μονάδα, ενώ μειώνεται κατά περίπου 0.005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου. Ο συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης εφαρμόζεται αντίστοιχα και για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Δηλαδή για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική ο συντελεστής αυόδοσης του πλαισίου γίνεται:

$$n_{\pi} \leftarrow n_{\pi} \cdot \sigma_{\theta} \tag{2.5}$$

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ιδίως όταν εμφανίζουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειάς τους από την επικάθηση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη όταν τα πλαίσια τοποθετούνται σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να τη ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειάς τους με απορρυπαντικό.

Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή όπου εκτιμάται ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, πρέπει να προβλέπεται στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας σ_ρ, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγει όταν η επιφάνειά του είναι εντελώς καθαρή. Η τιμή του σ_ρ είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή αυτή κ.τ.λ.

2.3.1.4 Ισχύς Αιχμής Φωτοβολταϊκού πλαισίου

Συχνά δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ωστόσο, δίνεται μόνο μία ενδεικτική ισχύς αιχμής που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος ενός ηλίου, δηλαδή $I_s=1$ ήλιος.

Οι μονάδες ισχύος, που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, μιας ολόκληρης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ή και ενός ηλιακού στοιχείου, ονομάζονται «βατ αιχμής» και συμβολίζονται ως W_p (peak Watts), το οποίο εκφράζει συνδυασμένα το κόστος του φωτοβολταϊκού πλαισίου και την απόδοσή του. Από τον τύπο (2.1), προκύπτει λοιπόν:

$$P_p = 1(kW/m^2) \cdot S \cdot n_{\pi} \tag{2.6}$$

2.3.1.5 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων

Όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται από ένα πλήθος θετικών χαρακτηριστικών, αν εξαιρεθούν κυρίως το υψηλό αρχικό κόστος και η αδυναμία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια, λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου [2.1].

Θετικά χαρακτηριστικά:

- 1. Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
- 2. Ικανοποιητική απόδοση μετατροπής.
- 3. Άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μικρή ή μεγάλη ισχύ.
- 4. Σχετικά εύκολη μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες που αφθονούν.
- 5. Δυνατότητα σταδιακής υλοποίησης του συστήματος.
- 6. Πρακτικά απεριόριστη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων.
- 7. Αθόρυβη λειτουργία.
- 8. Ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης.
- 9. Μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους.

Αρνητικά χαρακτηριστικά:

1. Υψηλό κόστος κατασκευής.

2. Για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται η δαπανηρή αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της αστάθειας και της μεγάλης διακύμανσης της ισχύος της ηλιακής διακύμανσης.

3. Απαιτείται η χρησιμοποίηση μεγάλων σχετικά επιφανειών, λόγω της μικρής πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ενέργειας.

2.3.2 Αιολικά Συστήματα

Η αιολική ενέργεια αποτελεί, σήμερα, τη σημαντικότερη συνιστώσα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεγάλης ισχύος. Έχει την προέλευσή της στην ηλιακή ακτινοβολία, η απορρόφηση της οποίας, από τη γη και την ατμόσφαιρά της, προκαλεί διαφορές πίεσης στον αέρα, που τον θέτουν σε κίνηση, δηλαδή δημιουργούν τον άνεμο. Η κινητική ενέργεια του ανέμου ανήκει στις ήπιες ή ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, δεδομένου ότι αφ' ενός δε ρυπαίνει το περιβάλλον (ήπια προς το περιβάλλον) και αφ' ετέρου είναι θεωρητικά ανεξάντλητη (ανανεώνεται συνεχώς) [2.10].

2.3.2.1 Ανεμοκινητήρες

Οι αιολικές μηχανές αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις, που έχουν σαν σκοπό την αξιοποίηση του μεγαλύτερου δυνατού ποσοστού της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Τελικός στόχος είναι η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ωφέλιμη ενέργεια, δηλαδή σε οποιαδήποτε μορφή εύχρηστης ενέργειας, άμεσα απολήψιμης από τον άνθρωπο [2.11].

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμοκινητήρων είναι οι ανεμογεννήτριες «οριζόντιου» και οι ανεμογεννήτριες «κατακόρυφου» άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, δεδομένου ότι ο άξονάς τους είναι κάθετος σε αυτή καθώς και στην επιφάνεια της γης.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν συνήθως τον άξονά τους παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου και την επιφάνεια της γης (head on), ενώ υπάρχουν και κάποιες εφαρμογές όπου η διεύθυνσή τους είναι κάθετη προς τη διεύθυνση του ανέμου (cross-wind). Επίσης οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να έχουν ένα, δύο, τρία ή ακόμα και πενήντα πτερύγια. Η πτερωτή τους μπορεί να τοποθετηθεί σε προσήνεμη διάταξη (up-wind), δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη διάταξη (down-wind), πίσω από τον πύργο στήριξης σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου.

Ανάλογα με τη μηχανική ισχύ (P_R) που παρέχουν οι ανεμοκινητήρες στην έξοδό τους κατατάσσονται από πλευράς μεγέθους σαν [2.10]:

1. Μικροί, όταν για την ονομαστική ισχύ τους ισχύει ότι:

 $50W \le P_R \le 30kW$

2. Μεσαίοι, όταν η ονομαστική ισχύ τους κυμαίνεται από:

 $30kW \le P_R \le 200kW$

3. Μεγάλοι, όταν για την ονομαστική τους ισχύ έχουμε ότι:

 $200kW \le P_R \le 4MW$

Ο χαρακτηρισμός μιας ανεμογεννήτριας σε μικρή ή μεγάλη δεν ακολουθεί αυστηρά τις παραπάνω τιμές, δεδομένου ότι οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και μπορούν να αλλάξουν σε κάθε χρονική περίοδο. Στη συνέχεια η ανάλυση που παρουσιάζεται αφορά ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα.

2.3.2.2 Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας

Τα βασικά μέρη που απαρτίζουν μία ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, φαίνονται στο Σχήμα 2.5, και είναι η πτερωτή, ο πύργος στηρίξεως, ο άξονας περιστροφής, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, καθώς και η ηλεκτρική γεννήτρια [2.10].

Η πτερωτή της ανεμογεννήτριας αποτελείται από πτερύγια, των οποίων το σχήμα έχει προέλθει από αντίστοιχα πτερύγια αεροπορικών κινητήρων. Το υλικό κατασκευής τους είναι συνήθως ελαφρά κράματα μετάλλων, ενισχυμένο πολυεστέρα, αλλά και από ξύλο σε συνδυασμό με ειδικές ρυτίνες. Ο συνηθέστερος τρόπος κατασκευής τους βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση χάλυβα και πλαστικού, όπου το κεντρικό χαλύβδινο τμήμα απορροφά τα φορτία κάμψης και στρέψης, ενώ η χρήση πλαστικών κελυφών προσδίδει την απαιτούμενη αεροδυναμική μορφή στα πτερύγια. Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων σχετίζεται με την αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων, με το βαθμό απόδοσής τους, με το κόστος κατασκευής της ανεμογεννήτριας καθώς και με θέματα αντοχής και συντονισμού λόγω ταλαντώσεων. Για λόγους ασφαλείας της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια είναι συνήθως εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης (αερόφρενα), τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία τη μηχανής σε έκτακτες περιπτώσεις. Η ασφάλεια της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται επίσης και με μικρά αλεξίπτωτα, τα οποία απελευθερώνονται φυγοκεντρικά μετά από κάποιο όριο στροφών και επιβραδύνουν την ανεμογεννήτρια.

Για τη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς μιας πτερωτής ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιούνται πτερωτές μεταβλητού βήματος σε αντιδιαστολή με τις απλούστερες περιπτώσεις πτερωτών σταθερού βήματος. Η μεταβολή του βήματος μιας πτερωτής συνίσταται στην περιστροφή του πτερυγίου γύρω από το διαμήκη άξονά του, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της γωνίας προσβολής του από τον άνεμο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας, η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης των πτερυγίων, ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος και ο περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα πτερύγια [2.4].



Σχήμα 2.5: Πρόσοψη και πλάγια όψη ανεμογεννήτριας

Η πλήμνη είναι το δεύτερο συστατικό της πτερωτής και περιλαμβάνει το μέρος της ανεμογεννήτριας που τοποθετούνται τα πτερύγια.

Ο άξονας της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα, ώστε να μπορεί να μεταφέρει ισχυρές μη μόνιμες ροπές κάμψης και στρέψης. Η έδρασή του γίνεται συνήθως σε δύο ένσφαιρα έδρανα ικανά να παραλαμβάνουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα εξασκούμενα φορτία.

Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης αποτελεί ένα από τα κυριότερα μέρη της ανεμογεννήτριας. Περιλαμβάνει διβάθμιο ή τριβάθμιο κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής (συνήθως 20 έως 110 rpm) σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής (άνω των 1000 rpm), στις οποίες λειτουργούν συνήθως οι ηλεκτρικές γεννήτριες. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός διβάθμιου συστήματος μετάδοσης είναι 96%, ενώ για λόγους ασφαλείας η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης περιλαμβάνει επίσης, υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και ελαστικούς συνδέσμους απορρόφησης στρεπτικών ταλαντώσεων.

Ο πύργος στηρίξεως της ανεμογεννήτριας αποτελείται συνήθως είτε από ένα μεταλλικό δικτύωμα, είτε από μία στήλη από μπετόν ή μεταλλικό σωλήνα για μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Για μεγάλες ανεμογεννήτριες χρειάζεται η ύπαρξη εσωτερικής σκάλας ή ανελκυστήρα. Το ελάχιστο ύψος του πύργου στηρίξεως είναι συνήθως ίσο με τη διάμετρο της πτερωτής. Για την εκλογή του πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το κόστος κατασκευής και θεμελίωσης για μεγάλα ύψη, η δυνατότητα αξιοποίησης υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου, με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης της πτερωτής.

Η ηλεκτρική γεννήτρια χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και σπανιότερα ηλεκτρικές γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.

Ολοκληρώνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι για την προστασία των τμημάτων της ανεμογεννήτριας από τις καιρικές συνθήκες, χρησιμοποιείται ειδικό κέλυφος από συνθετικό υλικό, π.χ. ειδικά κράματα χάλυβα ή αλουμινίου, που στην περιοχή της πλήμνης πρέπει να έχει και αεροδυναμική μορφή. Επιπλέον το κέλυφος της ανεμογεννήτριας πρέπει να έχει και αντιδιαβρωτική προστασία.

2.3.2.3 Ταχύτητα ανέμου και κατανομή Weibull

Οι άνεμοι προκαλούνται κυρίως από τη διαφορά θερμοκρασίας που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες οφείλονται κυρίως στη διαφορά του γεωγραφικού πλάτους και στη διαφορετική φύση και επιφάνεια του εδάφους. Επομένως, η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο μέγεθος κατά μέτρο και κατεύθυνση. Η μέτρηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου γίνεται συνήθως με ανεμόμετρα, τα οποία συνήθως πραγματοποιούν και στατιστική επεξεργασία της ταχύτητας του ανέμου.

Ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού σε μια ορισμένη θέση και τελικά της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί με την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, βασίζονται συνήθως σε χρονοσειρές μέσων ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους. Λόγω της σημαντικής διαφοράς που παρουσιάζουν οι άνεμοι, όχι μόνο μεταξύ εποχών αλλά και ετών, απαιτούνται στοιχεία άνω των τριών ή και πέντε ετών ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα.

Από μεγάλο αριθμό χρονοσειρών μέσων ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου, για μεγάλα χρονικά διαστήματα, προέκυψε ότι η συχνότητα ή πιθανότητα εμφάνισής τους ακολουθούν την κατανομή Weibull:

$$f(U) = \frac{c}{k} \cdot \left(\frac{U}{k}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{U}{k}\right)^c}$$
(2.7)

όπου U είναι η ταχύτητα του ανέμου, c η παράμετρος σχήματος της κατανομής και k η παράμετρος κλίμακας ταχύτητας. Η σχέση δίνει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητα του ανέμου, όταν αυτή ακολουθεί την κατανομή Weibull.

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull της ταχύτητας του ανέμου για σταθερό k=8 και για τις τρεις διαφορετικές τιμές του c, δηλαδή για c=1,2 και 3. Για c=1, η σ.π.π. της ταχύτητας του ανέμου μοιάζει με συνάρτηση εκθετικής εξασθένισης,

οπότε μια περιοχή με τέτοιες ταχύτητες ανέμου δεν είναι ευνοϊκή για εγκατάσταση ανεμογεννητριών, αφού οι περισσότεροι άνεμοι παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές ταχύτητες. Για c=2, ο άνεμος πνέει σχεδόν με σταθερή ταχύτητα, αλλά υπάρχουν περίοδοι πνέουν πολύ πιο ισχυροί από τις περισσότερο τυπικές ταχύτητες που συσσωρεύονται κοντά στην κορυφή της σ.π.π. Για c=3, η σ.π.π. μοιάζει με συνάρτηση μορφής καμπάνας και στην περιοχή αυτή σχεδόν πάντα φυσούν άνεμοι με μια σχετικά σταθερή ταχύτητα, οπότε μια τέτοια περιοχή είναι κατάλληλη για εγκατάσταση ανεμογεννήτριας [2.11].



Σχήμα 2.6: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull με k=8 και c=1,2,3

2.3.2.4 Ισχύς αέριας δέσμης

Η εξίσωση που περιγράφει την κινητική ενέργεια E_{κ} μιας αέριας δέσμης σταθερής ταχύτητας V_w και μάζας *m* είναι:

$$E_{\kappa} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{w}^{2} \tag{2.8}$$

Η ισχύς της ποσότητας του ανέμου ισούται με την ανά μονάδα χρόνου κινητική ενέργεια που περιέχεται στην ποσότητα αυτή και δίνεται από τον τύπο:

$$P_{w} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \mathbf{A} \cdot V_{w}^{3}$$
(2.9)

όπου, E_{κ} είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου (σε J), P_{w} είναι η ισχύς του ανέμου (σε W), mείναι η μάζα του ανέμου (σε kg), A το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής μέσα από την οποία περνάει η κινούμενη μάζα του ανέμου (σε m²), ρ είναι η πυκνότητα του ανέμου (σε kg/m³) και V_{w} η ταχύτητα του ανέμου (σε m/s). Η ισχύς λοιπόν του ανέμου είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητάς του, με αποτέλεσμα μικρές μεταβολές της ταχύτητας να οδηγούν σε σημαντικές μεταβολές της ισχύος του ανέμου.

2.3.2.5 Επίδραση του ύψους του πύργου στην ισχύ του ανέμου

Επειδή, λοιπόν, η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, η οικονομική επίδραση ακόμη και μέτριων αυξήσεων της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να είναι σημαντική. Ένας τρόπος για να βρεθεί ο ανεμοκινητήρας εκτεθειμένος σε ισχυρότερους ανέμους επιτυγχάνεται με τη στήριξή του σε ψηλότερο πύργο. Στις πρώτες μερικές εκατοντάδες μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζεται σημαντικά από την τριβή του ανέμου καθώς αυτός περνάει από την επιφάνεια του εδάφους.

Η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους στην ταχύτητα του ανέμου περιγράφεται από τη σχέση [2.11]:

$$\frac{V_w}{V_{w,o}} = \left[\frac{H}{H_o}\right]^a \tag{2.10}$$

όπου V_w η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H, και $V_{w,o}$ η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς H_o . Συνήθως το ύψος αναφοράς είναι 10m και είναι το ύψος που τοποθετείται το ανεμόμετρο.

Ο συντελεστής τριβής *a* εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους, πάνω από το οποίο πνέει ο άνεμος, αλλά και από τη διεύθυνση του ανέμου. Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές για διάφορους τύπους εδαφών:

Πίνακας 2.1: Συντελεστής τριβής για διάφορους τύπους εδάφους

| Χαρακτηριστικά εδάφους | Συντελεστής τριβής a |
|---|----------------------|
| Λείο σκληρό έδαφος, ήρεμη θάλασσα | 0.10 |
| Ψηλό χορτάρι στην επιφάνεια του εδάφους | 0.15 |
| Ψηλοί σωροί, εμπόδια και θάμνοι | 0.20 |
| Δασώδης ύπαιθρος, πολλά δέντρα | 0.25 |
| Μικρή πόλη με δέντρα και θάμνους | 0.30 |
| Μεγάλη πόλη με ψηλά κτίρια | 0.40 |

2.3.2.6 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους

Είναι συνηθισμένο το φαινόμενο της μέτριας λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας αν και έχει εγκατασταθεί σε περιοχή με αυξημένο αιολικό δυναμικό. Στις περισσότερες από τις περιπτώσεις αυτές η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε έντονα μεταβαλλόμενο πεδίο ροής λόγω της υψηλής τύρβης της περιοχής. Η εμφάνιση υψηλής τύρβης εξαρτάται εκτός από τις γενικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, τόσο από την ύπαρξη μεμονωμένων κτιρίων όσο και από την τραχύτητα του εδάφους της περιοχής. Άλλωστε, η τραχύτητα του εδάφους επηρεάζει άμεσα και την τιμή του συντελεστή τριβής *α*. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει δυνατότητα μελέτης του πεδίου ταχύτητας σε αστικές περιοχές, σε περιοχές με βλάστηση καθώς και σε θαλάσσιες περιοχές (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Επίδραση τραχύτητας στην ταχύτητα του ανέμου

2.3.2.7 Επίδραση επιφανειακών εμποδίων

Για τη σωστή αεροδυναμική συμπεριφορά μιας αιολικής μηχανής είναι σκόπιμο η πτερωτή της ανεμογεννήτριας να βρίσκεται εκτός του πεδίου επιρροής τυχόν επιφανειακών εμποδίων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της διαθέσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου, το πεδίο ροής είναι ελεύθερο στροβιλισμού και η τύρβη του ανέμου είναι η ελάχιστη δυνατή.

Η παρουσία συστοιχίας δένδρων έχει σαν αποτέλεσμα το μηδενισμό της ταχύτητας του ανέμου μέχρι και το ύψος κορυφής των δένδρων (Σχήμα 2.8), ενώ το οριακό στρώμα φαίνεται να αναπτύσσεται από την κορυφή των δένδρων και κατάντη. Στις περιπτώσεις αυτές το ύψος της ζώνης επιρροής είναι τουλάχιστον πέντε έως έξι φορές το μέσο ύψος των δένδρων. Τέλος, η τοποθέτηση της πτερωτής της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να βρίσκεται εκτός του οριακού στρώματος, που αναπτύσσεται στην περιοχή της συστοιχίας.



Σχήμα 2.8: Επίδραση επιφανειακών εμποδίων

2.3.2.8 Συντελεστής Ισχύος της Α/Γ

Στην πραγματικότητα η πτερωτή της ανεμογεννήτριας εκμεταλλεύεται ένα ποσοστό από την ισχύ του αέρα. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από τον συντελεστή ισχύος C_p της ανεμογεννήτριας, ο οποίος αποτελεί στην ουσία τον αεροδυναμικό βαθμό της πτερωτής. Πρέπει να σημειωθεί, πως ακόμα και για μια ιδανική πτερωτή ο συντελεστής ισχύος δεν μπορεί να υπερβεί το όριο του Betz, δηλαδή [2.10]:

$$C_p \le \frac{16}{27} = 0.593 \tag{2.11}$$

Στην πραγματικότητα ο συντελεστής ισχύος είναι πάντοτε αρκετά μικρότερος του ορίου του Betz, λόγω της συνεκτικότητας του ανέμου, του πεπερασμένου αριθμού των πτερυγίων της πτερωτής και της απώλειας κινητικής ενέργειας, που δεν μετατρέπεται σε στατική πίεση λόγω της μη βέλτιστης σχεδίασης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

2.3.2.9 Ωφέλιμη Αιολική Ισχύς

Εκτός από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί που μειώνουν σημαντικά το πραγματικό αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό μιας περιοχής από μια ανεμογεννήτρια:

1. Ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου μένει αναξιοποίητο, δεδομένου ότι για μικρές ταχύτητες ανέμου η ανεμογεννήτρια δεν περιστρέφεται, επειδή οι απώλειες κενού φορτίου της εγκατάστασης (τριβές στον άξονα, στο μειωτήρα κ.τ.λ.) είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη ισχύ της μηχανής. Η ταχύτητα του ανέμου στην οποία αρχίζει η λειτουργία της ανεμογεννήτριας λέγεται ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V_{in} . Συνεπώς για ταχύτητες ανέμου παραμένει αναξιοποίητη. Οι τυπικές τιμές της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας καρξης λειτουργίας ναμηλώτερες ανέμου παραμένει αναξιοποίητη. Οι τυπικές τιμές της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας κυμαίνονται μεταξύ των 2.5 m/s και των 5 m/s. Συνήθως οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας έναρξης λειτουργίας. Τα τελευταία χρόνια δίδεται ολοένα και μεγαλύτερη έμφαση στην αξιοποίηση και των χαμηλών ταχυτήτων του ανέμου, λόγω της συχνότητας εμφάνισης ασθενών ανέμων.

2. Από μία τιμή της ταχύτητας του ανέμου και μετά η ωφέλιμη ισχύς της ανεμογεννήτριας παραμένει για λειτουργικούς λόγους περίπου σταθερή, με αποτέλεσμα να χάνεται ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας του ανέμου, ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες (π.χ. $V_{\mu} \ge 15$ m/s). Η ωφέλιμη ισχύς του ανεμοκινητήρα αυξάνεται με την ταχύτητα του ανέμου μέχρι να φτάσει την ονομαστική ισχύ P_R της μηχανής. Από το σημείο αυτό και μετά η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας διατηρείται σταθερή. Η μικρότερη ταχύτητα του ανέμου στην οποία έχουμε ονομαστική ισχύ της μηχανής ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας και συμβολίζεται ως V_R . Συνεπώς, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής ταχύτητας λειτουργίας του αυμαντικό της αιολική ενέργειας παραμένει αναξιοποίητο. Οι τυπικές τιμές της ονομαστικής ταχύτητας λειτουργίας λειτουργίας και 14m/s.

3. Τέλος, λόγοι ασφαλείας της εγκατάστασης επιβάλλουν τη διακοπή της λειτουργίας της μηχανής σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας V_{out} κυμαίνεται μεταξύ 20m/s για μικρές μηχανές έως και 30m/s για στιβαρές κατασκευές.
2.3.2.10 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας Α/Γ

Στο σημείο αυτό θα εξεταστεί η μορφή της καμπύλης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται μια απλοποιημένη, αλλά αντιπροσωπευτική μορφή της καμπύλης παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου.

Η ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι μηδενική, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V_{in} .

Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και μέχρι την ταχύτητα ονομαστικής ισχύος V_R , η ισχύς της ανεμογεννήτριας αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η ταχύτητα του ανέμου. Ο ρυθμός αύξησης της ισχύος στη λεγόμενη «μεταβατική» περιοχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας ποικίλει. Εκτός από τη γραμμική μορφή του σχήματος έχουμε παραβολικούς ή και εκθετικούς ρυθμούς μεταβολής, ανάλογα με τον τύπο της μηχανής.

Από την ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας και μέχρι την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας V_{out} μιας ανεμογεννήτριας επιχειρείται η παραγόμενη ισχύς να είναι κατά το δυνατόν σταθερή και ίση με την ονομαστική τιμή της μηχανής, ανεξάρτητα από τη διαθέσιμη ισχύ του ανέμου. Η σταθεροποίηση της ισχύος ενός ανεμοκινητήρα αποκαλείται διαδικασία ρύθμισης της ισχύος και γίνεται κυρίως για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση της εγκατάστασης. Η ρύθμιση ισχύος, κυρίως στις μηχανές οριζόντιου άξονα γίνεται μηχανικά με τη χρήση αερόφρενων ή με τη μεταβολή της διεύθυνσης της πτερωτής σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου.

Για ταχύτητες ανέμου πάνω από την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας V_{out} , η παραγόμενη ισχύς είναι μηδενική, δεδομένου ότι λόγοι ασφαλείας της εγκατάστασης επιβάλλουν τη διακοπή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.9: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

L

2.3.2.11 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, το οποίο και εξηγεί γιατί είναι η πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας από τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [2.12].

Θετικά χαρακτηριστικά:

1. Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιεί σαν «καύσιμο» τον άνεμο, είναι μια καθαρή πηγή ενέργειας. Δεν μολύνει το περιβάλλον, όπως συμβαίνει με τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας που στηρίζονται στην καύση συμβατικών καυσίμων.

2. Οι ανεμογεννήτριες δεν παράγουν τις ατμοσφαιρικές εκπομπές που προκαλούν την όξινη βροχή ή το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

3. Η αιολική ενέργεια είναι σήμερα από τις πλέον ανταγωνιστικές ανανεώσιμες τεχνολογίες ενέργειας, κοστίζοντας μεταξύ 4 και 6 σεντς ανά kWh, ανάλογα με τη χρηματοδότηση του έργου και το αιολικό δυναμικό.

4. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν στα αγροκτήματα, καθώς και να ωφελήσουν την οικονομία σε απομονωμένες περιοχές.

5. Οι αγρότες μπορούν να συνεχίσουν να εργάζονται με την καλλιέργεια της γης επειδή οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν μόνο ένα μέρος του εδάφους.

6. Οι ιδιοκτήτες εγκατεστημένων συστημάτων παραγωγής αιολικής ενέργειας πληρώνουν φθηνό αγροτικό ενοίκιο για τη χρήση της.

Αρνητικά χαρακτηριστικά:

1. Η αιολική ενέργεια πρέπει να ανταγωνιστεί τις συμβατικές πηγές παραγωγής ενέργειας, όσο αφορά το κόστος. Ανάλογα με το αιολικό δυναμικό της περιοχής, το αιολικό πάρκο μπορεί να είναι ή όχι ανταγωνιστικό. Παρόλο που το κόστος της αιολικής ενέργειας έχει μειωθεί εντυπωσιακά τα τελευταία 10 χρόνια, η τεχνολογία απαιτεί υψηλότερη αρχική επένδυση από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2. Η σημαντικότερη δυσκολία στη χρησιμοποίηση του ανέμου είναι ότι ο αέρας δε φυσά πάντα όταν απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια.

3. Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί (εκτός αν χρησιμοποιούνται συστήματα αποθήκευσης ενέργειας) και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι διαφορετικές ταχύτητες ανέμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως έχει αναφερθεί, σε πολύ μικρές και σε πολύ μεγάλες ταχύτητες ανέμου η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μηδενική.

4. Οι καλές περιοχές για εγκατάσταση αιολικών συστημάτων βρίσκονται συχνά σε απομονωμένες περιοχές, μακριά από τις πόλεις όπου υπάρχει υψηλή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, συχνά απαιτείται ανάπτυξη γραμμών μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

5. Αν και οι εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας ασκούν σχετικά μικρή επίδραση στο περιβάλλον σε σχέση με άλλες συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, υπάρχει κάποια ανησυχία σχετικά με το θόρυβο που παράγεται από τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, καθώς και τις αισθητικές (οπτικές) επιδράσεις. Επίσης, υπάρχουν αντιδράσεις για το θάνατο πουλιών που προσκαλείται από τις ανεμογεννήτριες, όταν αυτά πετούν κοντά στις τελευταίες. Τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα έχουν επιλυθεί, ωστόσο, ή έχουν περιοριστεί πολύ μέσω της τεχνολογικής ανάπτυξης ή με κατάλληλες αιολικές εγκαταστάσεις.

2.3.3 Συστήματα Αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας

Το βασικότερο ίσως μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η ασυνέχεια στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η αδυναμία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά βούληση με σκοπό την κάλυψη της στιγμιαίας ζήτησης [2.7]. Τα αιολικά συστήματα εξαρτώνται κυρίως από την μεταβλητή φύση του αέρα ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα από την πολύπλοκη ηλιακή γεωμετρία και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που μεταβάλλεται ανάλογα με τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την ανάγκη για αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας, ώστε να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε περιόδους άπνοιας και ισχυρών ανέμων για τα αιολικά ή κατά τη διάρκεια της νύχτας και σε ημέρες με χαμηλή ηλιοφάνεια για τα φωτοβολταϊκά.

Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που είναι συνδεδεμένα με κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, αντλούν από αυτά την απαιτούμενη συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης διοχετεύουν προς τα δίκτυα την ενδεχόμενη περίσσεια της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, όταν υπερβαίνει την κατανάλωση του συστήματος. Ωστόσο τα απομονωμένα αυτόνομα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν έχουν τη δυνατότητα αυτής της ενεργειακής ανταλλαγής. Επομένως, χρειάζεται να αποθηκεύουν μια ποσότητα από την περίσσεια της ηλεκτρικής τους παραγωγής, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή.

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να προνοείται να αποθηκεύεται, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις, τις αιχμές της κατανάλωσης και τον βαθμό της αξιοπιστίας που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ή όχι βοηθητικών συμβατικών ενεργειακών πηγών.

Μέχρι στιγμής, η καλύτερη λύση, από πλευράς κόστους πυκνότητας αποταμιευμένης ενέργειας ανά μονάδα βάρους και όγκου της διάταξης, είναι οι διάφοροι τύποι ηλεκτρικών συσσωρευτών. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν οι συσσωρευτές θείου-μολύβδου και οι συσσωρευτές NiCd.

Εκτός από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές, που ονομάζονται και ηλεκτρικά στοιχεία δευτέρας τάξεως, υπάρχουν και εκείνα τα οποία δίνουν ηλεκτρική ενέργεια, μετατρέποντας τη δυναμική ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο εσωτερικό τους, κατά τις χημικές αντιδράσεις, που έλαβαν χώρα μεταξύ ενώσεων ή στοιχείων. Ονομάζονται πρωτογενή στοιχεία ή στοιχεία πρώτης τάξεως. Διακρίνονται από τους συσσωρευτές κατά το ότι δεν έχουν τη δυνατότητα επαναφόρτισής τους και ως εκ τούτου δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες εφαρμογές [2.1].

2.3.3.1 Συσσωρευτές θειικού οξέος-μολύβδου (H₂SO₄-Pb)

Ο συσσωρευτής θειικού οξέος-μολύβδου είναι ίσως ο δημοφιλέστερος τύπος ηλεκτρικού συσσωρευτή, γνωστός από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Χαρακτηριστικά του είναι το χαμηλό κόστος, η υψηλή μηχανική αντοχή του, αυξημένη δυνατότητα για βαθιές εκφορτίσεις με δυνατότητα μεγάλων ρευμάτων. Τα ηλεκτρόδιά τους είναι πλάκες από κράματα μολύβδου, π.χ.Pb-Sb ή Pb-Ca, βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος.

Η λειτουργία των συσσωρευτών μολύβδου-θειικού οξέος στηρίζεται σε μια αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία, που περιγράφεται από την αμφίδρομη αντίδραση [2.8]:

$$PbO_{2} + Pb + 2H_{2}SO_{4} \xrightarrow{\epsilon \kappa \phi i \rho \tau i \sigma \eta} 2PbSO_{4} + 2H_{2}O$$

$$(2.12)$$

Συγκεκριμένα, οι συσσωρευτές αποτελούνται από κυψελίδες, δηλαδή ζεύγη μονωμένων μεταξύ τους πλακών βυθισμένων στο ίδιο διάλυμα θειικού οξέος. Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θειικό μόλυβδο (PbSO₄ ή ακριβέστερα $Pb^{2+}SO_4^{2-}$). Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός μόλυβδος και σχηματίζεται οξείδιο του μολύβδου (PbO₂ ή ακριβέστερα $Pb^{4+}O_2^{2-}$) στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός μόλυβδος Pb στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και την τροφοδότηση του ηλεκτρικού φορτίου, ο μόλυβδος Pb οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών.

$$Pb \to Pb^{2+} + 2e \tag{2.13}$$

ενώ στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων ο Pb^{4+} ανάγεται προς Pb^{2+} , παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα.

$$Pb^{4+} + 2e \to Pb^{2+} \tag{2.14}$$

Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλαδή τα ιόντα Pb^{2+} , ενώνονται με θειικά ιόντα (SO_4^{2-}) από το διάλυμα και σχηματίζουν ξανά τον θειικό μόλυβδο πάνω στις πλάκες των κυψελίδων. Με αυτόν τον τρόπο, καταναλώνεται θειικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στις κυψελίδες. Με τη φόρτιση όμως που ακολουθεί, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα, όπως δείχνει η αμφίδρομη αντίδραση και η περιεκτικότητά του αποκαθίσταται στην κανονική τιμή [2.8].

Κάθε φορτισμένη κυψελίδα των συσσωρευτών μολύβδου δίνει τάση περίπου 2.0 V. Για την πλήρη όμως φόρτιση κάθε κυψελίδας χρειάζεται να γίνει τροφοδότηση με τάση περίπου 2.4 V. Στη συνέχεια, η τροφοδότηση του συσσωρευτή πρέπει να διακοπεί διότι η υπερφόρτιση των κυψελίδων προκαλεί τη θέρμανση του διαλύματος του θειικού οξέος, την εξάτμιση του νερού του και τελικά την επιτάχυνση της φθοράς του συσσωρευτή. Επίσης προκαλεί την ηλεκτρόλυση του διαλύματος με έκλυση υδρογόνου και οξυγόνου. Αυτό, εκτός από την απώλεια του υγρού, δημιουργεί κινδύνους για την ασφάλεια της εγκατάστασης γιατί αν ο χώρος που βρίσκεται ο συσσωρευτής δεν έχει καλό αερισμό, το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει εκρηκτικό μίγμα με τον αέρα, που με ένα τυχαίο σπινθήρα θα προκαλέσει ατύχημα.

Το φορτίο που αποθηκεύει, δηλαδή η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μετράται συνήθως σε αμπερώρια (Ah), που ορίζεται, σε ιδανικές συνθήκες, το γινόμενο της μέσης έντασης του ρεύματος *I*, που δίνει ο συσσωρευτής, ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλήθος των ωρών μέχρι να εκφορτιστεί, ξεκινώντας από πλήρη φόρτιση. Πιο χρήσιμο μέγεθος είναι η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ένας συσσωρευτής, η οποία όμως εξαρτάται από την τάση που δίνει ο συσσωρευτής. Για παράδειγμα, ένας συσσωρευτής με χωρητικότητα *C*=100Ah, που δίνει μέση τάση *V*=12V, έχει ονομαστική ικανότητα αποθήκευσης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας ίσης με:

$$100Ah \cdot 12V = 1200Wh = 1.2kWh \tag{2.15}$$

Οι συσσωρευτές εκτός από το γεγονός ότι δεν πρέπει να υφίστανται παρατεταμένη φόρτιση σε υψηλή τάση γι' αυτούς, δεν πρέπει ούτε να εκφορτίζονται κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Ο κανόνας αυτός είναι πολύ σημαντικός και καθορίζει το χρόνο ζωής τους. Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών εκφράζεται σε κύκλους λειτουργίας, καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει τις διαδοχικές διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισής του. Η χωρητικότητα, C, του συσσωρευτή δεν παραμένει σταθερή, αλλά μειώνεται όσο αυξάνουν οι κύκλοι λειτουργίας. Για παράδειγμα, περιοδική φόρτιση - εκφόρτιση ενός, καλής ποιότητας, συσσωρευτή H₂SO₄-Pb, σε ποσοστό 20% κάτω από την ονομαστική χωρητικότητά του, αντιστοιχεί περίπου σε 4500 κύκλους λειτουργίας. Αν το βάθος εκφόρτισης αυξηθεί σε 40%, οι κύκλοι λειτουργίας ελαττώνονται κάτω από τους μισούς. Ένας πρακτικός κανόνας που προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά των συσσωρευτών και ουσιαστικά περιγράφει το χρόνο ζωής τους είναι ο ακόλουθος [2.1]:

$$\beta \cdot \mathbf{N}_{\kappa} = \sigma \tau \alpha \theta \varepsilon \rho \, \dot{o} \tag{2.16}$$

Η παραπάνω σχέση ουσιαστικά περιγράφει πως το γινόμενο βάθους εκφόρτισης β επί τους κύκλους λειτουργίας Ν_κ είναι σταθερό. Για τους συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης το γινόμενο αυτό έχει την τιμή 1200, ενώ για κοινούς συσσωρευτές περιορίζεται στο 120.

Το Σχήμα 2.10 δείχνει την τυπική εξάρτηση της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή όσο αυξάνει ο χρόνος ζωής του, μετρούμενος σε κύκλους λειτουργίας, με δεδομένο βάθος εκφόρτισης. Όπως φαίνεται, η χωρητικότητά του ελαττώνεται και μάλιστα, όσο αυξάνονται οι κύκλοι λειτουργίας, ο ρυθμός ελάττωσης αυξάνει. Το φαινόμενο της ελάττωσης της χωρητικότητας κατά τη διάρκεια των κύκλων λειτουργίας του, οφείλεται στη σταδιακή μείωση των ενεργών υλικών των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 2.10: Σχηματική απεικόνιση της χωρητικότητας του συσσωρευτή συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας

2.3.4 Παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης

Το απομονωμένο σύστημα συμπληρώνεται με μια βοηθητική πηγή ηλεκτροπαραγωγής, για την αντιμετώπιση ανώμαλων καταστάσεων, όπως μια σοβαρή βλάβη του συστήματος, ένα παρατεταμένο διάστημα συνεχούς συννεφιάς ή ισχυρών ανέμων, όπου οι συσσωρευτές μόνο δεν επαρκούν. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας κυριαρχούν οι παλινδρομικές, εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης, οι οποίες είναι άμεσα διαθέσιμες σε μεγέθη ισχύος που κυμαίνονται από 0.5kW έως 6.5MW. Οι μηχανές αυτές είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν καταναλώνοντας μια σειρά καυσίμων, όπως βενζίνη, φυσικό αέριο, κηροζίνη, προπάνιο, πετρέλαιο και υδρογόνο. Αποτελούν τις πιο οικονομικές επιλογές για την στελέχωση των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ όταν χρησιμοποιούν φυσικό αέριο θεωρούνται σχετικά φιλικές προς το περιβάλλον.

Οι περισσότερες μηχανές είναι τετράχρονες παλινδρομικές μηχανές, παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα. Ο κύκλος λειτουργίας πραγματοποιείται σε τέσσερις χρόνους, οι οποίοι εκτελούνται διαδοχικά. Κάθε κύλινδρος πραγματοποιεί σταδιακά όλες τις λειτουργίες του κινητήρα (Σχήμα 2.11): εισαγωγή, συμπίεση, εκτόνωση - ανάφλεξη, εξαγωγή. Κατά τη διάρκεια της εισαγωγής το έμβολο κινείται προς τα κάτω. Στο κενό που εμφανίζεται, δημιουργείται υποπίεση, η οποία αναρροφά μίγμα αέρα – καυσίμου μέσω της ανοιχτής βαλβίδας εισόδου. Στη φάση της συμπίεσης το έμβολο κινείται προς τα πάνω, ενώ και οι δύο βαλβίδες (εισόδου και εξόδου) παραμένουν κλειστές. Το μίγμα αέρα – καυσίμου συμπιέζεται και θερμαίνεται μέχρι ο χώρος του μίγματος να γίνει ο ελάχιστος δυνατός και η συμπίεση μέγιστη. Σε αυτό το σημείο ξεκινάει η διαδικασία της ανάφλεξης. Τα θερμά αέρια εξαπλώνονται και οδηγούν το έμβολο προς τα κάτω, αναγκάζοντας τον στροφαλοφόρο άξονα να περιστραφεί. Στον τελικό χρόνο, το έμβολο πιέζει τα καυσαέρια, τα οποία είναι έτοιμα να διαφύγουν προς την εξάτμιση μέσω της βαλβίδας εξόδου, που είναι τώρα ανοιχτή, ολοκληρώνοντας τον κύκλο.



Σχήμα 2.11: Οι τέσσερις λειτουργίες του κινητήρα

Υπάρχουν δύο σημαντικές παραλλαγές τετράχρονων μηχανών όσο αφορά το σύστημα ανάφλεξης. Χωρίζονται σε αυτές τις μηχανές, όπου η ανάφλεξη γίνεται με σπινθήρα (μπουζί) και σε εκείνες, όπου η ανάφλεξη γίνεται με συμπίεση. Οι μηχανές που έχουν σύστημα ανάφλεξης με σπινθήρα καταναλώνουν κυρίως βενζίνη ή άλλα εύφλεκτα καύσιμα, όπως φυσικό αέριο και προπάνιο. Η καύση ξεκινάει από ένα εξωτερικά χρονικά ρυθμισμένο σπινθήρα, που αναφλέγει το μίγμα αέρα – καυσίμου. Αντίθετα, οι μηχανές που έχουν σύστημα ανάφλεξης με συμπίεση καταναλώνουν βαριά αποστάγματα πετρελαίου. Τα καύσιμα αυτά, που δεν αναμιγνύονται με αέρα, εγχέονται υπό μεγάλη πίεση, κατευθείαν μέσα στον κύλινδρο, κατά το τέλος του χρόνου συμπίεσης. Οι ντηζελομηχανές έχουν πολύ μεγάλο βαθμό συμπίεσης σε σχέση με τις μηχανές που λειτουργούν με σπινθήρα. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται πολύ μεγάλες θερμοκρασίες κατά το χρόνο συμπίεσης. Όσο η πίεση αυξάνεται στο χώρο της συμπίεσης, τόσο αυξάνεται και η θερμοκρασία, φτάνοντας σε ένα σημείο όπου προκαλείται έκρηξη του καυσίμου. Επίσης, οι ντηζελομηχανές υπόκεινται σε πολύ ξαφνικές αναφλέξεις καυσίμου. Οι δύο παραπάνω λόγοι κάνουν τις ντηζελομηχανές περισσότερο βαριές και αποδοτικές. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλή απόδοση, επομένως για την ίδια ισχύ είναι μικρότερες σε μέγεθος και περισσότερο οικονομικές. Ωστόσο, απαιτούν συχνή συντήρηση και οι εκπομπές τους θεωρούνται προβληματικές και επικίνδυνες για το περιβάλλον [2.13].

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Ι.Ε Φραγκιαδάκης, 'Φωτοβολταϊκά Συστήματα', 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2006.
- [2.2] Β.Κ Παπαδιάς, 'Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας', ΕΜΠ, Αθήνα 1985.
- [2.3] Π.Σ Γεωργιλάκη, *Ήλεκτρική Οικονομία*', Σημειώσεις μαθήματος, Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.
- [2.4] M.R Patel, 'Wind and Solar Power Systems', CRC, Press LLC, 1999.
- [2.5] Κ. Καγκαράκη, 'Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία', Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1987.
- [2.6] B. and R. Billinton, 'Evaluation of Different Operating Strategies in Small Stand-Alone Power Systems', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No 3, September 2005.
- [2.7] B. and R. Billinton, 'Incorporating Well-Being Analysis Considerations in Generating Systems Using Energy Storage', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No 1, March 2005.
- [2.8] R. Billinton, R. Karki, 'Cost-Effective Wind Energy Utilization for reliable Power Supply', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No 2, June 2004.
- [2.9] P. Lilienthal, T. Lambert, P.Gilman, 'Computer Modeling of Renewable Power Systems', Encyclopedia of Energy, Vol. 1, Published by Elsevier.
- [2.10] Ι.Κ Καλδέλλης, 'Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας', 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα 2005.
- [2.11] Π.Σ Γεωργιλάκη, 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας', Σημειώσεις μαθήματος, Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.
- [2.12] Χ. Φούσια, 'Μελέτη Τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Χαμηλού Κόστους για την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Απομονωμένες Περιοχές', Χανιά, Ιανουάριος 2006.
- [2.13] G.M Masters, '*Renewable and Efficient Electric Power Systems*', Wiley Interscience, 2004.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση της αξιοπιστίας συστημάτων δεν είναι μία νέα μεθοδολογία αξιολόγησης των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας αλλά έχει χρησιμοποιηθεί εκτενέστατα στο παρελθόν από τους διαχειριστές τους. Ωστόσο, στο παρελθόν, η σχεδίαση των συστημάτων βασιζόταν κυρίως σε εμπειρικές μεθόδους από την παρατήρηση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς του συστήματος. Αντίθετα, οι σημερινές τεχνικές ανάλυσης της αξιοπιστίας συστημάτων αξιοποιούν την εμπειρία της λειτουργίας των συστημάτων για την ανάπτυξη ρεαλιστικών μοντέλων προσομοίωσης της λειτουργίας τους και τον υπολογισμό ενός κατάλληλου συνόλου αριθμητικών δεικτών αξιοπιστίας.

Ένας πολύ διαδεδομένος και κοινά αποδεκτός ορισμός του όρου αξιοπιστία είναι ο ακόλουθος:

«Αξιοπιστία είναι η πιθανότητα ενός συστήματος να εκτελεί την αποστολή του επαρκώς για τη σχεδιαζόμενη χρονική περίοδο και τις επικρατούσες λειτουργικές συνθήκες.»

Για την περίπτωση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, πρωταρχική αποστολή είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές με το μικρότερο δυνατό κόστος και μία λογική στάθμη συνέχειας και ποιότητας. Η απαίτηση της ποιότητας αναφέρεται στην ανάγκη ικανοποίησης των προδιαγραφών παροχής της ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές, με συχνότητα και τάση τροφοδότησης που πρέπει να κυμαίνονται μέσα στα προδιαγραφόμενα όρια. Οι μηχανικοί σχεδίασης των συστημάτων έχουν λάβει στο παρελθόν και θα λαμβάνουν πάντοτε στο μέλλον σοβαρά υπόψη τους τις απαιτήσεις της λογικής στάθμης της συνέχειας και της ποιότητας της τροφοδότησης και για το λόγο αυτό τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν, από τη φάση σχεδίασης, πολλά επιπρόσθετα φυσικά και λειτουργικά στοιχεία, τα οποία παρέχουν τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές με αυξημένη στάθμη ασφάλειας και συνέχειας και υψηλότερη στάθμη ποιότητας. Η πιο φανερή ένδειξη αυτού του ενδιαφέροντος είναι ο πλεονασμός που υπάρχει σε όλους τους λειτουργικούς τομείς των συστημάτων και σε πολλές μορφές, όπως εφεδρεία στους σταθμούς παραγωγής, διασύνδεση με γειτονικά δίκτυα ή γώρες, επιπρόσθετα στοιγεία στα δίκτυα μεταφοράς – διανομής και απλά ή σύνθετα εναλλακτικά συστήματα τροφοδοτήσεων στο σύστημα διανομής. Αυτά τα πλεονάζοντα συστήματα έχουν εγκατασταθεί διότι η βασική φιλοσοφία σχεδίασης αναγνωρίζει και επομένως προβλέπει τις πιθανές βλάβες των στοιχείων του συστήματος και την ανάγκη να τεθούν εκτός λειτουργίας για προληπτική συντήρηση [3.1].

Η μελέτη της αξιοπιστίας γίνεται περισσότερο αναγκαία στα απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα όταν εμπλέκονται τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών. Σε αυτά τα συστήματα υπάρχουν πολλές παράμετροι που μπορούν να μειώσουν την απόδοση και την ποιότητα της τροφοδότησης στους καταναλωτές. Επίσης, οι εγκαταστάσεις αυτές λειτουργούν αυτοδύναμα για την τροφοδότηση καθορισμένων καταναλώσεων, χωρίς να συνδέονται με μεγάλα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα, από τα οποία θα μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια. Εκτός από τις πιθανές βλάβες στις παραγωγικές μονάδες, η τυχαία φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να προκαλέσει ασυνέχεια στην παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό οι διαχειριστές των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [3.2].

3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι υπολογισμού της αξιοπιστίας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας [3.3]:

- 1. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι.
- 2. Οι πιθανοτικές μέθοδοι.
- 3. Οι μέθοδοι προσομοίωσης.

Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι εφαρμόζονται κυρίως σε συστήματα με συμβατικά μέσα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος γίνεται με βάση σχετικά απλά και υποκειμενικά κριτήρια. Τα αιτιοκρατικά κριτήρια που συναντώνται συγνότερα είναι η ύπαρξη ενός προκαθορισμένου ποσοστού εφεδρείας ισγύος (ΠΕΙ), η ύπαρξη εφεδρείας ίση με την ισχύ της μεγαλύτερης μονάδας (IMM), αλλά και συνδυασμοί αυτών των δύο. Τα παραπάνω αιτιοκρατικά κριτήρια εμφανίζουν πολύ ελκυστικά χαρακτηριστικά, όπως η απλή εφαρμογή τους και η ακριβής κατανόηση τους. Επίσης, δίνουν τη δυνατότητα στους διαχειριστές ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας να αντεπεξέλθουν άμεσα σε περίπτωση αντιμετώπισης σοβαρών καταστάσεων, όπως οι απώλειες ισχύος και το φορτίο αιχμής. Χρησιμοποιούνται συχνά για την μέτρηση της αξιοπιστίας σε μικρά απομονωμένα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι δεν μπορούν να αναγνωρίσουν και κατά συνέπεια να απεικονίσουν εγγενείς αβεβαιότητες, όπως ο τυχαίος αριθμός βλαβών των συστατικών του συστήματος και η κυμαινόμενη ζήτηση του φορτίου από τους καταναλωτές, τα οποία έχουν καθοριστική επίδραση στην απόδοση και την αξιοπιστία ενός συστήματος. Ένα εξίσου σημαντικό μειονέκτημα των αιτιοκρατικών μεθόδων είναι ότι δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε συστήματα που περιέγουν μόνο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως αιολικούς και φωτοβολταϊκούς σταθμούς, αφού η ισχύς που παράγεται από αυτά δεν έχει μία προκαθορισμένη τιμή αλλά είναι τυχαία συνάρτηση που μεταβάλλεται συνεχώς από τις τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, όπου υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, το αιτιοκρατικό κριτήριο που χρησιμοποιείται ορίζεται από τον αριθμό αυτοδύναμων ημερών λειτουργίας της μπαταρίας (AAH). Το κριτήριο αυτό δηλώνει τον αριθμό των συνεχόμενων ημερών κατά τις οποίες το φορτίο του συστήματος μπορεί να καλυφθεί από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς παραγόμενη από τις ανεμογεννήτριες ή τα φωτοβολταϊκά. Η ικανότητα αποθήκευσης της μπαταρίας μπορεί επίσης να εκφραστεί ως αριθμός αυτοδύναμων ωρών λειτουργίας (ΑΑΩ). Το κριτήριο ΑΑΗ (ή ΑΑΩ) συμπεριφέρεται όπως και τα προηγούμενα αιτιοκρατικά κριτήρια, ενώ το κύριο μειονέκτημά του είναι πως δεν εφαρμόζεται σε συστήματα που βασίζονται μόνο σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [3.4].

Οι πιθανοτικές μέθοδοι ξεπερνούν τα περισσότερα προβλήματα που παρουσιάζουν οι αιτιοκρατικές μέθοδοι, καθώς αναγνωρίζουν την πιθανοτική φύση των παραμέτρων ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, επιτυγχάνοντας έτσι την κατάλληλη αποτίμηση του κινδύνου μη σωστής λειτουργίας του. Παρόλα αυτά, οι πιθανοτικές μέθοδοι δεν μπορούν να αναγνωρίσουν πλήρως τη χρονική μεταβολή κυμαινόμενων πηγών, όπως η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον, δεν μπορούν να παράσχουν κατανομές πυκνότητας πιθανότητας που σχετίζονται με τους διάφορους δείκτες αξιοπιστίας [3.2].

Οι μέθοδοι προσομοίωσης εφαρμόζονται για την εκτίμηση των δεικτών αξιοπιστίας, προσομοιώνοντας την πραγματική χρονική εξέλιξη των γεγονότων και την τυχαία συμπεριφορά ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η χρησιμοποίηση των μεθόδων προσομοίωσης καθιστά δυνατό τον ταυτόχρονο υπολογισμό ενός μεγάλου αριθμού δεικτών αξιοπιστίας και επίδοσης ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Οι τεχνικές προσομοίωσης συχνά αναφέρονται ως προσομοίωση Monte Carlo και μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

1. Μη διαδοχικές μέθοδοι. Θεωρούν κάθε χρονικό διάστημα ανεξάρτητο και επομένως δεν μπορούν να μοντελοποιήσουν χρονικές συσχετίσεις και διαδοχικά γεγονότα.

2. Διαδοχικές μέθοδοι. Χρησιμοποιούν κάθε χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (συνήθως μίας ώρας) σε χρονολογική σειρά.

Το κυριότερο πλεονέκτημα της προσομοίωσης Monte Carlo έναντι των πιθανοτικών μεθόδων είναι ότι παρέχει πληροφορίες για τις μέσες τιμές των δεικτών αξιοπιστίας. Οι πιθανοτικές μέθοδοι συνήθως υπολογίζουν τις αναμενόμενες τιμές των δεικτών αξιοπιστίας, ενώ οι μέθοδοι προσομοίωσης μπορούν να προβλέψουν τις διακυμάνσεις της απόδοσης του συστήματος για κάθε χρόνο. Ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος αποτελούσε ένα σημαντικό μειονέκτημα των μεθόδων αυτών στο παρελθόν. Ωστόσο, η κατασκευή ολοένα και ταχύτερων υπολογιστών έχει εξαλείψει το παραπάνω πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό [3.2].

3.2.1 Δείκτες αξιοπιστίας

Οι σημαντικότεροι δείκτες αξιοπιστίας που εφαρμόζονται στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι [3.2]:

1. Η πιθανότητα απώλειας φορτίου (ΠΑΦ). Αποτελεί έναν από τους παλαιότερους και βασικότερους δείκτες. Ορίζεται ως η πιθανότητα το φορτίο να υπερβεί την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Η αδυναμία του έγκειται στο γεγονός ότι ορίζει την πιθανότητα αντιμετώπισης προβλήματος αλλά όχι τη σοβαρότητά του. Για παράδειγμα, είτε ο βαθμός του προβλήματος είναι μικρότερος από 1 MW είτε μεγαλύτερος από 1000 MW, η τιμή του δείκτη ΠΑΦ είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Δηλαδή, δεν αναγνωρίζει το ποσό απώλειας του φορτίου.

2. Η αναμενόμενη απώλεια φορτίου (ΑΑΦ). Είναι ίσως ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος δείκτης για την μελλοντική λήψη απόφασης όσο αφορά το ποσό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Ορίζεται ως ο μέσος αριθμός ημερών, κατά τη διάρκεια των οποίων, το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο αιχμής αναμένεται να ξεπεράσει την διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύ. Εναλλακτικά, μπορεί να οριστεί ως ο μέσος αριθμός ωρών, που το ηλεκτρικό φορτίο αναμένεται να υπερβεί την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Εμφανίζει το ίδιο μειονέκτημα με το δείκτη ΠΑΦ.

3. Η αναμενόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια (AMTE). Ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που δεν μπορεί να τροφοδοτηθεί στους καταναλωτές, εξαιτίας εκείνων των περιπτώσεων, όπου το ηλεκτρικό φορτίο ξεπερνά την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Είναι περισσότερο ελκυστικός δείκτης από την ΑΑΦ, επειδή περιγράφει καλύτερα τόσο τη σοβαρότητα των ελλείψεων ηλεκτρικής ισχύος, όσο και την πιθανότητά τους να συμβούν. Για το λόγο αυτό, απεικονίζει ένα πιο ρεαλιστικό προφίλ του κινδύνου και αναμένεται η αύξηση της χρήσης της, καθώς περιορίζονται τα αποθέματα ενέργειας και αυξάνονται οι περιβαλλοντικοί έλεγχοι.

4. Ο δείκτης αναξιοπιστίας ενέργειας (ΔΑΕ). Ο δείκτης αυτός σχετίζεται άμεσα με την ΑΜΤΕ. Εξομαλύνει την τιμή της, διαιρώντας την με την ολική ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής

ενέργειας. Αυτό διασφαλίζει πως όλα τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, μικρά και μεγάλα, μπορούν να συγκριθούν επί ίσους όρους ενώ μπορούν να ανιχνευτούν χρονολογικές αλλαγές σε ένα σύστημα.

5. Τα λεπτά συστήματος (ΛΣ). Και αυτός ο δείκτης σχετίζεται με την ΑΜΤΕ, διαιρώντας την τιμή της με το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο αιχμής. Δεν αντιπροσωπεύει αληθινό χρόνο, αλλά θα ήταν ίσος με την ετήσια αναξιοπιστία του συστήματος αν όλες οι διακοπές παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας συνέπιπταν με το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο αιχμής. Στην πραγματικότητα, η ετήσια διάρκεια κατά την οποία το σύστημα δεν είναι αξιόπιστο είναι μεγαλύτερη από την τιμή των ΛΣ.

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΜΑΡΕΙΑΣ

Η αυξανόμενη χρήση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές απαιτεί σοβαρή μελέτη για την αξιοπιστία αυτών των μη συμβατικών πηγών ενέργειας. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται αιτιοκρατικές μέθοδοι για το σχεδιασμό αυτών των συστημάτων. Όμως, όπως προαναφέρθηκε, τα αιτιοκρατικά κριτήρια δεν αναγνωρίζουν την τυχαία φύση των ατμοσφαιρικών συνθηκών, τη συμπεριφορά του συστήματος και την κυμαινόμενη ζήτηση του ηλεκτρικού φορτίου. Οι πιθανοτικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, αφού αναγνωρίζουν την πιθανοτική φύση και την αβεβαιότητα των παραμέτρων ενός συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, οι σχεδιαστές των συστημάτων, πολλές φορές, αντιμετωπίζουν δυσκολία στην ερμηνεία και τη χρήση των δεικτών αξιοπιστίας. Μία καινούρια μέθοδος, γνωστή ως ανάλυση ευμάρειας, έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για να συνδυάσει τα αιτιοκρατικά κριτήρια με τις πιθανοτικές μεθόδους.

Η ανάλυση ευμάρειας αποτελεί μία καινούρια μέθοδο αποτίμησης της αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η τεχνική δημιουργεί μία γέφυρα ανάμεσα στις αποδεκτές αιτιοκρατικές και πιθανοτικές μεθόδους και προσδιορίζει τους δείκτες που είναι χρήσιμοι σε πρακτικές εφαρμογές ανάλυσης αξιοπιστίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η έρευνα έχει επικεντρωθεί κυρίως, στην ανάπτυξη αναλυτικών μεθόδων για την ανάλυση ευμάρειας μεγάλων συστημάτων που χρησιμοποιούν συμβατικές πηγές ενέργειας. Οι αναλυτικές μέθοδοι, ωστόσο, δεν είναι εφαρμόσιμες σε συστήματα που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αυτά τα συστήματα η ανάλυση ευμάρειας επεκτείνεται με τη χρησιμοποίηση της προσομοίωσης Monte Carlo, η οποία αναγνωρίζει τη χρονική εξέλιξη της αιολικής και ηλιακής ενέργειας και μπορεί να εξάγει για κάθε χρονική στιγμή αποτελέσματα για την απόδοση του συστήματος.

Η βασική ιδέα της ανάλυσης ευμάρειας είναι αρκετά απλή και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Αυτή η μέθοδος περιγράφει την αξιοπιστία του συστήματος σε σχέση με τρεις διαφορετικές καταστάσεις, ορισμένες ως υγιής, οριακή και κατάσταση κινδύνου. Το σύστημα βρίσκεται στην υγιή κατάσταση, όταν έχει αρκετό περιθώριο εφεδρείας ηλεκτρικής ισχύος, ώστε να ικανοποιήσει ένα αιτιοκρατικό κριτήριο (ΠΕΙ, ΑΜΜ, ΑΑΩ, ΑΑΗ). Στην οριακή κατάσταση το σύστημα δεν αντιμετωπίζει δυσκολία να καλύψει τη ζήτηση του ηλεκτρικού φορτίου, ωστόσο δεν έχει και αρκετή εφεδρεία για να ικανοποιήσει το προκαθορισμένο αιτιοκρατικό κριτήριο. Το σύστημα κηρύσσεται σε κατάσταση κινδύνου σε περιπτώσεις όπου η ζήτηση των καταναλωτών ξεπερνά τη διαθέσιμη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.



Σχήμα 3.1: Μοντέλο ανάλυσης ευμάρειας

Η ανάλυση ευμάρειας ενσωματώνει τα αιτιοκρατικά κριτήρια σε μία πιθανοτική μέθοδο. Τα πραγματικά περιθώρια εφεδρείας που έχει το σύστημα συγκρίνονται με τα επιθυμητά περιθώρια που καθορίζουν τα αιτιοκρατικά κριτήρια για να μετρηθεί ο βαθμός της άνεσης που έχει το σύστημα. Οι βασικοί δείκτες της ανάλυσης ευμάρειας είναι η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται στην υγιή κατάσταση, στην οριακή και στην κατάσταση κινδύνου. Ο βαθμός της άνεσης που έχει ένα σύστημα όταν λειτουργεί μέσα στα αποδεκτά αιτιοκρατικά κριτήρια είναι η πιθανότητα υγιούς κατάστασης και ορίζεται ως ΠΥΚ. Η πιθανότητα οριακής κατάστασης, ΠΟΚ, προκύπτει όταν το σύστημα παραβιάζει τα επιθυμητά αιτιοκρατικά κριτήρια αλλά συγχρόνως μπορεί να τροφοδοτήσει τη ζήτηση του ηλεκτρικού φορτίου. Τέλος, ο κίνδυνος που σχετίζεται με την ανικανότητα του συστήματος να καλύψει το ηλεκτρικό φορτίο, ορίζεται από την πιθανότητα να είναι σε κατάσταση κινδύνου και συμβολίζεται με τον δείκτη αξιοπιστίας ΠΑΦ. Συμπληρωματικοί δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση του συστήματος είναι η αναμενόμενη απόλεια υγιούς κατάστασης (ΑΑΥΚ), που ορίζει το συνολικό αριθμό χρονικών στιγμών που το σύστημα δεν βρίσκεται στην υγιή κατάσταση.

3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Ε.Ν Διαλυνά, 'Ανάλυση Αξιοπιστίας Τεχνολογικών Συστημάτων', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1998.
- [3.2] R. Allan, R. Billinton, 'Probabilistic Assessment of Power Systems', IEEE, Vol. 88, No 2, February 2000.
- [3.3] R. Billinton, R. Karki, '*Capacity Reserve Assessment Using Well-Being Analysis*', IEEE Transaction on Power Systems, Vol.14, No 2, May 1999.
- [3.4] B. and R. Billinton, 'Incorporating Well-Being Analysis Considerations in Generating Systems Using Energy Storage', IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, No 1, March 2005.
- [3.5] A.M.Leita da Silva, L.A.F Manso, W.S Sales, L.C Resende, M.J. Aguiar, M.A. Matos, J.A Lopes, V. Miranda, 'Application of Monte Carlo Simulation to Generating System Well-Being Analysis Considering Renewable Sources', 8th International Conference on Prob. Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, September, 2004.

41

- [3.6] R. Billinton, R. Karki, 'Cost-Effective Wind Energy Utilization for reliable Power Supply', IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No 2, June 2004.
- [3.7] R. Billinton, R. Karki, 'Reliability' Cost Implications of Utilizing Photovoltaics in Small Isolated Power Systems', Published by Elsevier, Vol. 79, pp. 11-16, 2002.
- [3.8] R. Billinton, Y. Cui, 'Reliability Evaluation of Small Stand-Alone Wind Energy Conversion Systems Using a Time Series Simulation Model', IEEE Trans. Distrib., Vol. 150, No 1, January 2003

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές σχέσεις και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιηθεί ένα απομονωμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που περιέχει αιολική και φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Ένα σύνολο εξισώσεων επιτρέπει τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από τα αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα. Το σύστημα περιλαμβάνει, επίσης, ανάλογα με το είδος της κατανάλωσης και το βαθμό της απαιτούμενης αξιοπιστίας, συσσωρευτές για την αποθήκευση της περίσσειας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να χρησιμοποιείται όταν το σύστημα αδυνατεί να καλύψει το απαιτούμενο ηλεκτρικό φορτίο. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση ενός εφεδρικού ντηζελοκινητήρα, ο οποίος τίθεται σε λειτουργία για την αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων, όταν η παραγόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές αλλά και η αποθηκευμένη ενέργεια από τους συσσωρευτές δεν επαρκούν για την τροφοδότηση των καταναλωτών.

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO

Η μεταβλητή φύση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας αλλά και η λειτουργική πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τα υβριδικά συστήματα, καθορίζουν αναγκαία την εφαρμογή ενός στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο μπορεί να συνδυάσει και να απεικονίσει όλες τις εγγενείς αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στο σύστημα. Η μέθοδος αυτή, όπως αναφέρθηκε και στο 3° Κεφάλαιο ονομάζεται προσομοίωση Monte Carlo. Για τη μοντελοποίηση ενός απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργήθηκε κώδικας στο λογισμικό Matlab. Η κύρια ικανότητα του κώδικα είναι η προσομοίωση της λειτουργίας του απομονωμένου συστήματος για την μελέτη της συμπεριφοράς του σε ωριαία βάση. Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο τα συνστατικά μέρη του συστήματος (Α/Γ, Φ/Β, Μπαταρίες, Ντηζελοκινητήρας) μπορούν να συνδυαστούν και να λειτουργήσουν μαζί ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Τα συστήματα που περιλαμβάνουν μπαταρία και ντηζελοκινητήρα απαιτούν μια συγκεκριμένη στρατηγική για τη σειρά λειτουργίας των συστατικών αυτών. Στην εργασία αυτή, τα συστήματα που περιέχουν μπαταρία εφαρμόζουν ένα συγκεκριμένο μοντέλο, όσο αφορά τη διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας. Σύμφωνα με αυτή τη στρατηγική μόνο οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να φορτίσουν την μπαταρία και όχι ο ντηζελοκινητήρας. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί πόσο αξιόπιστο είναι ένα σύστημα που αξιοποιεί όσο γίνεται λιγότερο συμβατικές πηγές ενέργειας.

Το πρόγραμμα μοντελοποιεί διαφορετικούς σχηματισμούς συστημάτων, εκτελώντας προσομοίωση σε ωριαία βάση για εκατό χρόνια. Σκοπός της προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός της διαθέσιμης παραγόμενης ισχύος από τις ανανεώσιμες πηγές και η σύγκρισή της με το ηλεκτρικό φορτίο, κάθε ώρα του έτους, ώστε να αποφασιστεί τι πρέπει να γίνει με το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ισχύος, τις ώρες που υπάρχει περίσσεια ή αν θα επιστρατευτούν τα εφεδρικά συστήματα σε περιόδους έλλειψης, για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου [4.1].

Τα αποτελέσματα που εξάγονται σε ωριαία βάση, βοηθούν στον προσδιορισμό της απόδοσης του συστήματος και την εξαγωγή των απαιτούμενων δεικτών αξιοπιστίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος (σε ωριαία βάση) που παράγουν τα αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα. Επίσης, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν τα συστήματα αυτά και οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της αξιοπιστίας.

4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [4.2]:

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot P_p \cdot \left(\frac{I_T}{I_s}\right)$$
(4.1)

όπου P_p είναι η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού συστήματος (σε kW_p), δηλαδή η ονομαστική του ισχύς, Ι_T είναι το ποσό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους ηλιακούς συλλέκτες, I_s η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας (σε kW/m²) και f_{PV} είναι ο συντελεστής απωλειών, που μπορεί να εμφανίζει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Ο f_{PV} παίρνει τιμές μικρότερες ή ίσες με τη μονάδα. Σε πειραματικές συνθήκες, η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου αντιστοιχεί στη μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ όταν αυτό δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1kW/m². Ωστόσο στην πράξη, παράγοντες όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, η ρύπανση του αέρα, η λειτουργία του συστήματος σε διαφορετικές τάσεις, προκαλούν τη μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από το σύστημα. Όλοι αυτοί οι παράγοντες, λοιπόν, ενσωματώνονται σε ένα και μοναδικό δείκτη, για να αποτυπώσουν την επίδρασή τους στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως ο συντελεστής απωλειών ορίζεται συνήθως για την Ελλάδα ίσος με 80%. Επειδή όμως στην εργασία αυτή δεν λαμβάνονται υπόψη οι βλάβες που προκύπτουν στα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά τη διάρκεια του χρόνου, ο συντελεστής απωλειών μειώθηκε κατά 5% για να συμπεριλάβει την αναξιοπιστία που δημιουργούν πιθανές βλάβες στο σύστημα (f_{PV} =0.75).

Στην παραπάνω σχέση, η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται σε ωριαία βάση, είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία, *I_T*, που δέχονται οι ηλιακοί συλλέκτες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα σύνολο εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της.

4.3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη

Τα τεράστια ποσά ενέργειας που παράγονται από τον ήλιο, διασκορπίζονται προς κάθε κατεύθυνση και καταφθάνουν με τη μορφή ακτινοβολίας και στη γη. Για την αποτελεσματική αξιοποίηση της ενέργειας αυτής, επιβάλλεται να είναι γνωστές οι πληροφορίες για τη θέση του ήλιου αναφορικά με ένα σημείο στην επιφάνεια της γης. Με τον τρόπο αυτό γίνεται γνωστό, με μεγάλη ακρίβεια, το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάποια επιφάνεια, η οποία μπορεί να έχει τυχαία κλίση και προσανατολισμό, σε οποιοδήποτε σημείο της γης.

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία και αιωρούμενα σωματίδια. Ωστόσο, ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία.

Η γη, λοιπόν, περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο με ελλειπτική τροχιά, κάνοντας μία πλήρη περιστροφή κάθε 365 ημέρες. Ο ήλιος κάθε φορά καταλαμβάνει μία από τις εστίες της ελλειπτικής τροχιάς, η οποία έχει μικρή εκκεντρότητα. Το επίπεδο της γης στην τροχιά της ονομάζεται εκλειπτικό επίπεδο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 [4.3], η απόσταση της γης από τον ήλιο μεταβάλλεται περιοδικά κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της, που συμβαίνει περίπου στις 3 Ιουλίου και ονομάζεται αφήλιο ($152.1 \times 10^6 km$) και της ελάχιστης, που συμβαίνει περίπου στις 2 Ιανουαρίου και ονομάζεται περιήλιο ($147.1 \times 10^6 km$).



Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικές σχετικές θέσεις των μελών του συστήματος γης – ήλιου.

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η μεταβολή της γωνίας μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα της γης και ήλιου με το εκλειπτικό επίπεδο. Η γωνία αυτή είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη, αφού το επίπεδο του ισημερινού δε συμπίπτει με το επίπεδο της τροχιάς της γης και δίνει τη θέση του ήλιου, κατά την ηλιακή μεσημβρία, σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού. Το πώς μεταβάλλεται φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 4.2.

Στο σχήμα, η γη είναι σταθερή και περιστρέφεται γύρω από το βόριο-νότιο άξονά της, ενώ ο ήλιος είναι κάπου στο διάστημα μετακινούμενος αργά πάνω και κάτω με την πάροδο των εποχών. Ο ήλιος φτάνει στο ψηλότερο σημείο του στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο), και αυτή τη χρονική στιγμή μία ακτίνα από το κέντρο της γης σχηματίζει γωνία 23.45° με τον ισημερινό της γης. Τη μέρα αυτή ο ήλιος είναι ακριβώς πάνω από τον Τροπικό του Καρκίνου σε γεωγραφικό πλάτος 23.45°. Στις δύο ισημερίες ο ήλιος είναι ακριβώς πάνω από τον ισημερινό. Στις 21 Δεκεμβρίου ο ήλιος είναι 23.45° κάτω από τον ισημερινό, το οποίο προσδιορίζει το γεωγραφικό πλάτος που είναι γνωστό ως ο Τροπικός του Αιγόκερω. Η γωνία που σχηματίζουν οι γωνίες του ήλιου κατά τη μεσουράνησή του κάθε μέρα, με το επίπεδο του ισημερινού, ονομάζεται ηλιακή απόκλιση και συμβολίζεται με δ. Μεταβάλλεται ημιτονικά, μεταξύ των τιμών -23.45° και +23.45°, με το χρόνο, εκφρασμένο σε αριθμό ημερών, κατά τη διάρκεια του έτους [4.4]. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα και περιγράφει την ηλιακή απόκλιση δίνεται από την ακόλουθη σχέση [4.2]:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right)$$
(4.2)

όπου n είναι η μέρα του χρόνου.



Σχήμα 4.2: Ηλιακή απόκλιση

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται κυρίως με δύο γωνίες. Το ύψος του ήλιου, συμβολίζεται με β και είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα. Αντί για το ύψος, χρησιμοποιείται επίσης η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, η οποία ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου. Η δεύτερη χαρακτηριστική γωνία του ήλιου, το ηλιακό αζιμούθιο, θ , είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον όλιου και στον ήλιου. Η δεύτερη χαρακτηριστική γωνία του ήλιου, το ηλιακό αζιμούθιο, θ , είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Προς τα δεξιά από το νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές, και προς τα αριστερά αρνητικές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς, καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό [4.5].



Σχήμα 4.3: Η θέση του ήλιου περιγράφεται από τις γωνίες του ηλιακού ύψους β και του αζιμουθίου θ

Η ωριαία γωνία ω είναι αυτή που δίνει τη στιγμιαία θέση της γης σε σχέση με την περιστροφή της γύρω από τον άξονά της. Η γη πραγματοποιεί μία πλήρη περιστροφή (360°) σε 24 ώρες. Άρα κάθε ώρα πραγματοποιεί μια μετακίνηση σε τόξο 15°. Συνεπώς η ωριαία γωνία αλλάζει 15° κάθε ώρα. Μετράται στους πόλους του ουράνιου θόλου μεταξύ του μεσημβρινού του παρατηρητή (τοπικός μεσημβρινός) και του ηλιακού μεσημβρινού. Η ωριαία γωνία μηδενίζεται το μεσημέρι, παίρνει αρνητικές τιμές πριν το μεσημέρι ενώ θετικές τιμές μετά το μεσημέρι και στον κώδικα υπολογίζεται από τον τύπο [4.2]:

$$\omega = (t_s - 12) \cdot 15^\circ / hr \tag{4.3}$$

όπου t_s είναι η ηλιακή ώρα.

4.3.2 Ηλιακή και ωρολογιακή ώρα

Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να γίνει διαχωρισμός της ηλιακής ώρας από την ωρολογιακή ώρα t_c . Η επιφάνεια της γης διαιρείται σε 24 ωριαίες ατράκτους, γωνιακού εύρους 15° η καθεμία, τις οποίες ονομάζουμε ζώνες ή ατράκτους. Οι κάτοικοι των χωρών που βρίσκονται μέσα σε μια ζώνη χρησιμοποιούν, στις καθημερινές τους ασχολίες, τον ίδιο χρόνο, αυτόν δηλαδή που αναφέρεται στον κεντρικό μεσημβρινό κάθε ζώνης, ο οποίος αποτελεί τον επίσημο χρόνο της χώρας. Ως μηδενική ζώνη ορίστηκε αυτή που έχει ως κεντρικό μεσημβρινό, αυτόν του Greenwich, ο οποίος αποτελεί τον μεσημβρινό αναφοράς (0°). Επίσης η ελλειπτική τροχιά της γης προκαλεί το μήκος μιας ηλιακής μέρας (από το ένα ηλιακό μεσημέρι στο επόμενο ηλιακό μεσημέρι) να μεταβάλλεται στη διάρκεια του έτους. Καθώς, λοιπόν, η γη γυρίζει γύρω από την τροχιά της, η διαφορά μεταξύ μίας μέρας 24 ωρών και μιας ηλιακής μέρας μεταβάλλεται ακολουθώντας μία εξίσωση που ονομάζεται εξίσωση της ώρας και δίνεται από τον τύπο:

$$E = 3.82 \cdot \begin{pmatrix} 0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B \\ -0.014615 \cdot \cos 2B - 0.04089 \cdot \sin 2B \end{pmatrix}$$
(4.4)

όπου E (σε ώρες) η διαφορά μεταξύ μίας μέρας 24 ωρών και μίας ηλιακής μέρας, n ο αριθμός της μέρας και B (σε μοίρες) είναι το ημερήσιο τόξο που διαγράφει το κέντρο της κατά την περιφορά της γύρω από τον ήλιο και δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{360 \cdot (n-1)}{365} \tag{4.5}$$

Έτσι λοιπόν ο υπολογισμός της ηλιακής ώρας από την ωρολογιακή ώρα μπορεί να γίνει εύκολα με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$t_{s} = t_{c} + \frac{L_{loc}}{15^{\circ}/hr} - T_{c} + E$$
(4.6)

όπου t_s είναι η ηλιακή ώρα, t_c η ωρολογιακή ώρα, L_{loc} είναι το τοπικό γεωγραφικό μήκος (σε μοίρες), T_c είναι ο μεσημβρινός τοπικής ώρας και E η διαφορά μεταξύ μίας μέρας 24 ωρών και μίας ηλιακής μέρας (σε ώρες) [4.4].

4.3.3 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες: την κλίση και την αζιμούθια γωνία (Σχήμα 4.4). Η κλίση του συλλέκτη β_{σ} , είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα. Δείχνει πόσο γέρνει ο συλλέκτης και μπορεί να πάρει τιμές από 0° μέχρι 180°. Για γωνίες $\beta_{\sigma} > 90°$ το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.

Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη, θ_{σ} , είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι $+180^{\circ}$. Η γωνία -180° (που συμπίπτει με την γωνία $+180^{\circ}$) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία -90° προς την ανατολή, η γωνία 0° προς το νότο και η γωνία $+90^{\circ}$ προς τη δύση.



Σχήμα 4.4: Θέση ηλιακού συλλέκτη ως προς τον ήλιο. Η γωνία φ είναι η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.

Οι συλλέκτες συνήθως τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία. Τα μεγέθη αυτά επιλέγονται ώστε η γωνία πρόσπτωσης, φ , της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους. Για το βόρειο ημισφαίριο, έχει υπολογιστεί πως η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, β_{σ} , για όλη τη διάρκεια του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου εγκατάστασης και η αζιμούθια γωνία είναι 0° (προς το νότο).

Σε αυτό το σημείο μπορεί να προσδιοριστεί η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών σε μια επιφάνεια οποιουδήποτε προσανατολισμού χρησιμοποιώντας την επόμενη εξίσωση [4.2]:

$$\cos \varphi = \sin \delta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta_{\sigma}$$

$$-\sin \delta \cdot \cos \psi \cdot \sin \beta_{\sigma} \cdot \cos \theta_{\sigma}$$

$$+\cos \delta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta_{\sigma} \cdot \cos \omega$$

$$+\cos \delta \cdot \sin \psi \cdot \sin \beta_{\sigma} \cdot \cos \theta_{\sigma} \cdot \cos \omega$$

$$+\cos \delta \cdot \sin \beta_{\sigma} \cdot \sin \theta_{\sigma} \cdot \sin \omega$$
(4.7)

όπου β_{σ} είναι η κλίση του συλλέκτη, θ_{σ} είναι η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη, ψ το γεωγραφικό πλάτος, δ η ηλιακή απόκλιση και ω η γωνία ώρας. Για κάθε ώρα λοιπόν το πρόγραμμα υπολογίζει τη γωνία πρόπτωσης των ηλιακών ακτινών και στη συνέχεια υπολογίζει την ζενιθιακή γωνία, $\cos\varphi_z$, δηλαδή την γωνία πρόσπτωσης που σχηματίζεται

ανάμεσα στις ηλιακές ακτίνες και την οριζόντια επιφάνεια του συλλέκτη, σύμφωνα με την εξίσωση [4.2]:

$$\cos\varphi_z = \cos\psi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\psi \cdot \sin\delta \tag{4.8}$$

Στη συνέχεια το πρόγραμμα υπολογίζει το ποσό της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας που ωτάνει σε ένα σημείο της ατμόσφαιρας της γης. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται από μέρα σε μέρα και από χρόνο σε χρόνο επειδή η απόσταση γης – ήλιου μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο εξαιτίας της εκκεντρικότητας της τροχιάς της γης. Για να υπολογιστεί η εξωγήινη κάθετη ακτινοβολία, που προσδιορίζεται ως το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια στο πάνω μέρος της ατμόσφαιρας χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση [4.2]:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot n}{365}\right) \tag{4.9}$$

όπου n είναι η μέρα του χρόνου και G_{sc} είναι η ηλιακή σταθερά, η τιμή της οποίας είναι 1.367 kW/m^2 .

Για τον υπολογισμό της εξωγήινης οριζόντιας ακτινοβολίας, που ορίζεται ως το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια στα εξωτερικά στρώματα της ατμόσφαιρας, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση [4.2]:

$$G_o = G_{on} \cdot \cos \phi_z \tag{4.10}$$

όπου φ_z είναι η ζενιθιακή γωνία που παρουσιάστηκε στην εξίσωση (4.8).

Αφού η προσομοίωση γίνεται σε ωριαία βάση, είναι χρήσιμο να ανάγουμε και την εξίσωση σε ωριαία βάση για να υπολογιστεί η μέση ωριαία εξωγήινη οριζόντια ακτινοβολία, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [4.2]:

$$I_o = \frac{12}{\pi} \cdot G_{on} \cdot \left[\cos\psi \cdot \cos\delta \cdot (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{180} \cdot \sin\psi \cdot \sin\delta\right]$$
(4.11)

όπου ω_1 είναι η γωνία ώρας στην αρχή της ώρας και ω_2 στο τέλος της ώρας.

Η παραπάνω εξίσωση δίνει τη μέση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια στα εξωτερικά στρώματα της ατμόσφαιρας. Στο πρόγραμμα εισάγεται η χρονοσειρά της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης. Επομένως, μπορεί να υπολογιστεί ένας δείκτης που υπολογίζει το ποσό της ηλιακής εξωγήινης ακτινοβολίας που τελικά διαπερνά την ατμόσφαιρα και φτάνει στην επιφάνεια της γης. Αυτός ο δείκτης ονομάζεται δείκτης καθαρότητας, k_{τ} , και υπολογίζεται σε ωριαία βάση σύμφωνα με την εξίσωση [4.2]:

$$k_T = \frac{I}{I_o} \tag{4.12}$$

όπου Ι είναι το ποσό της ολικής οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης για κάθε ώρα του έτους και εισάγεται στο πρόγραμμα από τα δεδομένα. Ο δείκτης καθαρότητας, λοιπόν, καθορίζει τη διαπερατότητα που έχει η ατμόσφαιρα για κάθε ώρα του έτους.

4.3.4 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης

Στο σημείο αυτό, είναι δυνατό να διακριθεί η ολική ηλιακή ακτινοβολία που καταφτάνει στη γη με βάση τον τρόπο διάδοσής της μέσα στην ατμόσφαιρα. Διακρίνονται δύο τύποι της ακτινοβολίας: η άμεση και η διάχυτη. Η άμεση ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς ή με ελάχιστη σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Διαδίδεται ευθύγραμμα, με μια γωνία, και υποτάσσεται στους νόμους της οπτικής. Η διάχυτη ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που καταφτάνει στην επιφάνεια της γης με αλλαγμένη διεύθυνση, αφού έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα και ανάκλαση από το έδαφος. Έτσι, φτάνει στην επιφάνεια της γης με διαφορετικές τυχαίες διευθύνσεις από όλο τον ουράνιο θόλο. Το άθροισμα των παραπάνω τμημάτων της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν στην επιφάνεια της γης είναι η ολική ακτινοβολία.

$$I = I_b + I_d \tag{4.13}$$

όπου I_b είναι η άμεση ακτινοβολία και I_d η διάχυτη.

Η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται από εποχή σε εποχή, αλλά και κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου. Έχει παρατηρηθεί πως το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας σημειώνεται κατά το ηλιακό μεσημέρι, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της τροχιάς του στον ουρανό σε σχέση με τον ορίζοντα, ανεξάρτητα από την εποχή.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας για ένα εικοσιτετράωρο, για τρεις χαρακτηριστικές ημερομηνίες του έτους (καλοκαίρι, άνοιξη και φθινόπωρο, χειμώνας). Το Σχήμα 4.5 αναφέρεται σε συνθήκες όπου δεν επικρατεί καθόλου νέφωση, για αυτό και διακρίνεται μια σχετικά ομαλή διακύμανση της ακτινοβολίας. Ως «ώρα ημέρας» θεωρείται η «ηλιακή ώρα» και ως «μεσημέρι» το «ηλιακό μεσημέρι».



Σχήμα 4.5: Ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς την επίδραση της νέφωσης

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη (Σχήμα 4.6). Οι απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης, το γρήγορο πέρασμα ενός σμήνους πουλιών ή ενός αεροπλάνου μέσα από τη δέσμη του ηλιακού φωτός που δέχεται ο συλλέκτης, καταγράφεται σαν μία πολύ οξεία στιγμιαία πτώση της έντασης της ακτινοβολίας. Παρατηρούνται, ακόμη, εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.



Σχήμα 4.6: Ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, με την επίδραση της νέφωσης

Γνωρίζοντας την ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μπορούν με τη βοήθεια του δείκτη καθαρότητας να υπολογιστούν τα δύο μέρη που την αποτελούν. Η παρακάτω σχέση δίνει την διάχυτη ακτινοβολία, *I*_d, ως συνάρτηση του δείκτη καθαρότητας:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.09 \cdot k_T, & \gamma \alpha \quad k_T \le 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604 \cdot k_T + 4.388 \cdot k_T^2 - 16.638 \cdot k_T^3 + 12.336 \cdot k_T^4 & \gamma \alpha \quad 0.22 < k_T \le 0.80 \\ 0.165 & \gamma \alpha \quad k_T > 0.80 \end{cases}$$
(4.14)

Στη συνέχεια υπολογίζεται και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, διαχωρίζοντάς τη από την διάχυτη που βρίσκεται από τον προηγούμενο τύπο. Η επόμενη σχέση προσδιορίζει ένα δείκτη που δείχνει την αναλογία της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ως προς την άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια [4.2].

$$R_b = \frac{\cos\phi}{\cos\phi_z} \tag{4.15}$$

Ο δείκτης ανισοτροπίας, συμβολίζεται με A_i, και είναι ο βαθμός εκπομπής της άμεσης ακτινοβολίας. Αυτός ο παράγοντας χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το ποσό της περιβάλλουσας διάχυτης ακτινοβολίας. Ο δείκτης ανισοτροπίας δίνεται από την ακόλουθη σχέση [4.2]:

$$A_i = \frac{I_b}{I_o} \tag{4.16}$$

Ο τελικός παράγοντας που χρειάζεται να διευκρινιστεί είναι το γεγονός πως περισσότερη διάχυτη ακτινοβολία έρχεται από τον ορίζοντα παρά από το υπόλοιπο μέρος του ουρανού. Αυτός ο παράγοντας σχετίζεται άμεσα με τη συννεφιά και τη νέφωση και για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση [4.2]:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \tag{4.17}$$

Σε αυτό το σημείο είναι δυνατός ο υπολογισμός της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη [4.2]:

$$I_{T} = (I_{b} + I_{d} \cdot A_{i}) \cdot R_{b} + I_{d} \cdot (1 - A_{i}) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta_{\sigma}}{2}\right) \cdot \left[1 + f \cdot \sin^{3}\left(\frac{\beta_{\sigma}}{2}\right)\right] + I \cdot \rho_{g} \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta_{\sigma}}{2}\right)$$

$$(4.18)$$

όπου ρ_s είναι ένας συντελεστής ανάκλασης του εδάφους, ίσος με 0.2.

Επομένως, μετά και τον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε έναν ηλιακό συλλέκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος (4.1) για να υπολογιστεί η ωριαία παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα.

4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Έχει ήδη αναφερθεί ότι οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Σκοπός της μοντελοποίησης της αιολικής ενέργειας είναι η περιγραφή των στατιστικών δεδομένων του ανέμου για μία συγκεκριμένη περιοχή, ώστε να εκτιμηθεί το ποσό της ισχύος που μπορεί να παράγει μία ανεμογεννήτρια μέσα στο επιθυμητό χρονικό διάστημα. Η ένταση του ανέμου μεταβάλλεται (κατά κανόνα αυξάνεται) με την αύξηση του ύψους, στο οποίο γίνεται η καταγραφή του αιολικού δυναμικού. Οι ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες σε επίπεδη πεδιάδα, ενώ σε μεγάλη απόσταση γύρω από αυτές δεν υπάρχουν δέντρα και θάλασσα. Ο συντελεστής τραχύτητας, *a*, για μία τέτοια περιοχή θεωρείται ίσος με 1/7. Τα ανεμολογικά δεδομένα ενός έτους για τη συγκεκριμένη τοποθεσία ακολουθούν την κατανομή Weibull και αναφέρονται στο ύψος αναφοράς, δηλαδή σε ύψος $H_o=10m$. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου για την περιοχή που μελετήθηκε.

Στην περιοχή που εξετάζεται, ο άνεμος πνέει σχεδόν με σταθερή ταχύτητα, υπάρχουν ωστόσο περίοδοι που οι άνεμοι πνέουν πολύ πιο ισχυροί από τις περισσότερο τυπικές ταχύτητες που συσσωρεύονται κοντά στην κορυφή της σ.π.π. Η παράμετρος σχήματος c είναι ίση με 2. Επειδή ήταν δύσκολο να βρεθούν ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής για διάρκεια προσομοίωσης εκατό ετών, δημιουργήθηκε αλγόριθμος, ο οποίος παράγει ανεμολογικά δεδομένα σε ωριαία βάση για εκατό χρόνια. Αρχικά, ο αλγόριθμος παράγει για κάθε ώρα του έτους και για τα εκατό χρόνια της προσομοίωσης, ανεμολογικά δεδομένα που ακολουθούν την κατανομή Weibull με παράμετρο σχήματος c=2 και παράμετρο κλίμακας k=7. Οι τιμές που προκύπτουν αντιστοιχούν στο ύψος αναφοράς (δηλαδή $H_o=10$ m). Στη συνέχεια, σύμφωνα με τον τύπο 2.10, προκύπτουν τα ανεμολογικά δεδομένα που αντιστοιχούν στο επιθυμητό ύψος, δηλαδή εκείνο που είναι τοποθετημένες οι ανεμογεννήτριες (H=40m). Με βάση αυτά τα ανεμολογικά δεδομένα γίνονται στη συνέχεια οι υπολογισμοί για την ισχύ που παράγουν οι ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 4.6: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull με c=2 και k=7.

Επίσης, για κάθε ώρα του έτους και για όλα τα χρόνια της προσομοίωσης δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος υπολογίζει την κατάσταση κάθε ανεμογεννήτριας. Κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις επόμενες δύο καταστάσεις: λειτουργία, βλάβη. Ο μέσος ρυθμός βλάβης, MPB, για την ανεμογεννήτρια έχει οριστεί ίσος με 4%, με μέσο χρόνο βλάβης, $MXB_{A\Gamma}$, ίσο με 1920 ώρες και μέσο χρόνο επισκευής, $MXE_{A\Gamma}$, ίσο με 80 ώρες. Και για τις δύο περιπτώσεις οι πιθανότητες του χρόνου βλάβης, ΧΒ_{ΑΓ}, και του χρόνου επισκευής, ΧΕ_{ΔΓ}, ακολουθούν την εκθετική κατανομή. Ο χρόνος βλάβης υποδεικνύει τη χρονική στιγμή που αναμένεται να χαλάσει μία ανεμογεννήτρια ενώ ο χρόνος επισκευής είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται να επισκευαστεί. Επομένως στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να επισκευαστεί η ανεμογεννήτρια, τίθεται εκτός λειτουργίας και δεν παράγει ηλεκτρική ισχύ. Οι χρόνοι βλάβης και επισκευής μιας ανεμογεννήτριας δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις [4.6]:

$$XB_{\rm A\Gamma} = -MXB_{\rm A\Gamma} \cdot \ln x_1 \tag{4.19}$$

$$XE_{\rm A\Gamma} = -MXE_{\rm A\Gamma} \cdot \ln x_2 \tag{4.20}$$

όπου x_1 , x_2 είναι τυχαίοι αριθμοί μεταξύ 0 και 1.

Μετά τον υπολογισμό των χρόνων βλάβης και επισκευής, οι τιμές που προκύπτουν στρογγυλοποιούνται προς τον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό. Για κάθε ανεμογεννήτρια, λοιπόν, υπάρχει ένας τυχαίος αριθμός βλαβών, οι οποίες είναι πιθανό να συμβούν μέσα σε ένα χρόνο. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει για κάθε ώρα του έτους τον αριθμό των ανεμογεννητριών που βρίσκονται σε λειτουργία. Οι βλάβες αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα γιατί μπορούν να μειώσουν αισθητά την αξιοπιστία του συστήματος.

Όπως αναφέρθηκε στο 2° κεφάλαιο, η ισχύς του ανέμου αυξάνεται με τον κύβο της ταγύτητάς του. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες είναι σγεδιασμένες να διακόπτουν τη λειτουργία τους για μεγάλες ταχύτητες ανέμου κυρίως για λόγους ασφαλείας της εγκατάστασης. Ένας ακόμη λόγος είναι πως η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε συνθήκες

πολύ ισχυρών ανέμων, σύμφωνα με τον κυβικό νόμο που διέπει την ισχύ του ανέμου, θα επέφερε πολύ μεγάλες ποσότητες ισχύος και η λειτουργία της εγκατάστασης θα ήταν ασύμφορη τον υπόλοιπο χρόνο, όπου δεν θα έπνεαν τόσο δυνατοί άνεμοι. Έτσι λοιπόν, για ταχύτητες ανέμου που κυμαίνονται ανάμεσα στην ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, V_{ex} , και την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας, V_{out} , η ανεμογεννήτρια παράγει την ονομαστική της ισχύ, P_R ανεξάρτητα από την ταχύτητα που έχει ο άνεμος [4.7].

$$P_{wT} = P_R \qquad \gamma \iota \alpha \qquad V_R \le V_w \le V_{out} \tag{4.21}$$

Για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια είναι μηδενική, δηλαδή η ανεμογεννήτρια δεν λειτουργεί [4.7].

$$P_{wT} = 0 \qquad \gamma \iota \alpha \qquad V_w > V_{out} \tag{4.22}$$

Η αποδιδόμενη ισχύς είναι επίσης μηδενική, όταν επικρατούν πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, λόγω σχεδιαστικών περιορισμών ή των τριβών που υφίσταται η ανεμογεννήτρια. Απαιτείται λοιπόν μία ελάχιστη ταχύτητα ανέμου, η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας, ώστε να παραχθεί ένα ποσό ισχύος από την ανεμογεννήτρια [4.7].

$$P_{WT} = 0 \qquad \gamma \iota \alpha \qquad V_w < V_{in} \tag{4.23}$$

Επομένως, η ισχύς που αποδίδει μία ανεμογεννήτρια αποτελεί μία απλή συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό όμως δεν ισχύει στην περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας, V_{in}, και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, V_R. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν δύο τρόποι για να υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια:

1" μέθοδος:

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνότερα και υπολογίζει την ισχύ που αποδίδει μία ανεμογεννήτρια σύμφωνα με τη σχέση [4.7]:

$$P_{WT} = a + b \cdot V_w + c \cdot V_w^2 \qquad \gamma \iota \alpha \qquad V_{in} < V_w < V_R \tag{4.24}$$

Σε απλοποιημένη μορφή το μοντέλο αυτό υποθέτει γραμμική αύξηση της ισχύος, με ελάχιστη τιμή τη μηδενική, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ($V_w = V_{in}$), και μέγιστη τιμή την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας P_R , ,όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της ανεμογεννήτριας ($V_w = V_R$). Οι ακόλουθες σχέσεις δίνουν τις τιμές των παραμέτρων a, b και c, σύμφωνα με το απλοποιημένο μοντέλο:

$$a = \frac{P_R \cdot V_{in}}{V_{in} - V_R} \tag{4.25}$$

$$b = \frac{P_R}{V_R - V_{in}} \tag{4.26}$$

$$c = 0 \tag{4.27}$$

Ωστόσο, το απλοποιημένο μοντέλο υπολογισμού των παραμέτρων a, b και c, υπερεκτιμά το ποσό της ισχύος που παράγεται από την ανεμογεννήτρια. Μία περισσότερο ακριβής προσέγγιση μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που ακολουθούν, όπου οι παράμετροι της εξίσωσης (4.24) δίνονται από τους τύπους [4.7]:

$$a = \frac{P_R \cdot V_{in} \cdot \left[V_a - 2 \cdot V_R \cdot \left(\frac{V_a}{V_R}\right)^3\right]}{2 \cdot (V_R - V_a)^2}$$
(4.28)

$$b = \frac{P_R \cdot \left[V_R - 3 \cdot V_a + 4 \cdot V_a \cdot \left(\frac{V_a}{V_R}\right)^3 \right]}{2 \cdot \left(V_R - V_a\right)^2}$$
(4.29)

$$c = \frac{P_R \cdot \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{V_a}{V_R}\right)^3\right]}{2 \cdot \left(V_R - V_a\right)^2}$$
(4.30)

όπου V_a είναι το σημείο του μέσου και δίνεται από τη σχέση:

_

$$V_a = \frac{(V_{in} + V_R)}{2}$$
(4.31)

Η παραγόμενη ισχύς που υπολογίζεται σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις είναι χαμηλότερη από την ισχύ που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του απλοποιημένου γραμμικού μοντέλου. Αν και η εξίσωση (4.24) συχνά παρέχει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα για την παραγόμενη ισχύ με τιμές των παραμέτρων a, b και c από τις εξισώσεις (4.28), (4.29), (4.30), σε σχέση με τις εξισώσεις (4.25), (4.26), (4.27), μπορεί ωστόσο να δώσει και λανθασμένα αποτελέσματα. Σε περίπτωση που η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας, V_{in} , είναι μικρότερη από το 26% της ονομαστικής ταχύτητας λειτουργίας, V_R , και οι τιμές των παραμέτρων a, b και c υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.28), (4.29), (4.30), η εξίσωση μπορεί να δώσει αρνητική τιμή για την παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας.

2^η μέθοδος:

Η δεύτερη μέθοδος είναι περισσότερο ακριβής από το απλό γραμμικό μοντέλο, ενώ δεν παράγει αρνητικές τιμές για την παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας. Για το λόγο αυτό είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί η ισχύς που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια σε αυτή την εργασία. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η παραγόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση [4.7]:

$$P_{WT} = a + b \cdot V_w^c \qquad \gamma \iota \alpha \qquad V_{in} < V_w < V_R \tag{4.32}$$

όπου οι παράμετροι a και b υπολογίζονται ως εξής:

$$a = \frac{P_R \cdot V_{in}^c}{V_{in}^c - V_R^c}$$
(4.33)

$$b = \frac{P_R}{V_R^c - V_{in}^c} \tag{4.34}$$

ενώ η παράμετρος c είναι η παράμετρος σχήματος από την κατανομή Weibull.

Η εξίσωση (4.32) δεν είναι τόσο αισιόδοξο μοντέλο όσο το απλό γραμμικό μοντέλο και ποτέ δεν υπολογίζει αρνητική παραγόμενη ισχύ.

Συνοψίζοντας, ο κώδικας που δημιουργήθηκε υπολογίζει σύμφωνα με τη 2^η μέθοδο το ποσό της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται κάθε ώρα από τις ανεμογεννήτριες, λαμβάνοντας υπόψη και τον αριθμό των ανεμογεννητριών που δεν έχουν υποστεί βλάβη τη συγκεκριμένη ώρα και λειτουργούν κανονικά. Η ακόλουθη σχέση περιγράφει μαθηματικά τη διαδικασία που ακολουθήθηκε:

όπου P_{WT} είναι η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από το σύστημα των ανεμογεννητριών (σε kW), N είναι ο αριθμός των ανεμογεννητριών που λειτουργούν τη συγκεκριμένη ώρα και οι παράμετροι a και b υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.33) και (4.34) [4.7].

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Η ύπαρξη συσκευών αποθήκευσης ενέργειας είναι πολύ σημαντική για ένα απομονωμένο σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όταν υπάρχει εφεδρικός ντηζελοκινητήρας, οι μπαταρίες εξοικονομούν καύσιμο, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια σε χρονικές περιόδους που δεν υπάρχει μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας στο σύστημα. Επίσης, αποθηκεύοντας προσωρινά την ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να μειωθεί σημαντικά η συχνότητα εκκινήσεων του κινητήρα και επομένως ο κίνδυνος για βλάβη. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι απλά ένα ποσό ενέργειας (σε kWh) το οποίο εισέρχεται και εξέρχεται από τη μπαταρία. Οι μονάδες μέτρησης της ικανότητας αποθήκευσης είναι οι Ah. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά τους υπολογισμούς σε αυτές τις μονάδες δεν χρησιμοποιείται πουθενά ο όρος της τάσης που είναι συνεχώς αυξομειούμενος. Όμως χάριν ευκολίας και επειδή γενικά θα χρησιμοποιηθούν μέσες τιμές θα θεωρηθεί ότι η τάση παραμένει σταθερή. Έτσι οι μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι Wh.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος που αναφέρεται στις μπαταρίες είναι το βάθος εκφόρτισης. Αυτό ορίζεται ως το ποσοστό του αποθηκευμένου στην μπαταρία, ηλεκτρικού φορτίου, το οποίο αποδίδεται προς το σύστημα του φορτίου, κατά τη διάρκεια της φάσης εκφόρτισης ενός κύκλου λειτουργίας του συστήματος. Για παράδειγμα αν μια μπαταρία έχει ονομαστική τιμή χωρητικότητας 200 Wh και βάθος αποφόρτισης 70%, τότε η αποτελεσματική χωρητικότητα θα είναι $200 \cdot 0.70 = 140Wh$ [4.8].

4.6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Σκοπός σε αυτή την εργασία είναι η μελέτη αξιοπιστίας συστημάτων, τα οποία έχουν μεγάλο βαθμό διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας εφεδρικός ντηζελοκινητήρας, ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας. Ωστόσο, η ικανότητα ενός ντηζελοκινητήρα να παράγει τη ζητούμενη ηλεκτρική ισχύ και η γρήγορη ανταπόκρισή του σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό φορτίο κάνει τους συμβατικούς κινητήρες πολύτιμα συστατικά των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα όταν περιέχουν τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένας εφεδρικός ντηζελοκινητήρες πολύτιμα συστατικά των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα όταν περιέχουν τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένας εφεδρικός ντηζελοκινητήρας προσφέρει μεγάλη ανακούφιση στα συστήματα αυτά, καθώς μπορεί να παράγει άμεσα εφεδρική ισχύ κατά περιόδους που η παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά είναι ανεπαρκής για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου. Για κινητήρες με παλινδρομική μηχανή σταθερής ταχύτητας, η κατανάλωση καυσίμου είναι γραμμική συνάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει και δίδεται από την ακόλουθη σχέση, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7 [4.9]:

$$F = F_0 + F_1 \cdot P \tag{4.36}$$

όπου F είναι η κατανάλωση καυσίμου, F_0 και F_1 είναι σταθερές και P είναι η ηλεκτρική ισχύς που καλείται να παράγει ο ντηζελοκινητήρας. Οι τιμές των F_0 και F_1 είναι οι ακόλουθες:

$$F_1 = A,$$

$$A = 0.246 liters / kWh$$
(4.37)

$$F_0 = B \cdot P_{R,dsl},$$

$$B = 0.08415 liters / kWh$$
(4.38)



Σχήμα 4.7: Γραμμική σχέση της κατανάλωσης καυσίμου με την παραγόμενη ισχύ

Για τη διατήρηση της καλής κατάστασης της μηχανής, οι ντηζελοκινητήρες σταθερής ταχύτητας τυπικά δεν λειτουργούν κάτω από το 30% της ονομαστικής τους ισχύος, $P_{R,dsl}$. Ωστόσο, τα περισσότερα μοντέλα θεωρούν ότι ο ντηζελοκινητήρας χρειάζεται αντικατάσταση ή γενική επιθεώρηση και επισκευή μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας. Για το λόγο αυτό ορίστηκε μέσος ρυθμός βλάβης 5% για τον ντηζελοκινητήρα, με MXB_{dsl} =950

ώρες και MXE_{dsl} =50 ώρες. Επομένως κάθε ώρα που ελέγχεται αν είναι αναγκαία η λειτουργία του ντηζελοκινητήρα, ελέγχεται επίσης αν μπορεί να λειτουργήσει ή αν είναι σε κατάσταση επισκευής. Για τη μοντελοποίηση των ρυθμών βλάβης και επισκευής ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδιος με αυτόν που εφαρμόστηκε στις ανεμογεννήτριες [4.9].

4.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Αφού υπολογιστεί η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές για κάθε ώρα του έτους (στα συστήματα που περιέχουν αιολικά και φωτοβολταϊκά η παραγόμενη ισχύς είναι το άθροισμα τους), γίνεται σύγκριση της παραγόμενης ισχύος σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο που απαιτείται να καλυφθεί τη συγκεκριμένη ώρα. Αν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση των καταναλωτών, τότε το σύστημα έχει περίσσεια ισχύος, η οποία αποθηκεύεται στις μπαταρίες για να χρησιμοποιηθεί ξανά όταν υπάρχει έλλειψη. Αν οι μπαταρίες είναι γεμάτες, τότε καταγράφεται το ποσό της ηλεκτρικής ισχύος που δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και άρα χάνεται. Αν η παραγόμενη ισχύς δεν επαρκεί για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου τότε εξετάζονται τα εφεδρικά συστήματα για να διαπιστωθεί αν μπορούν να εξυπηρετήσουν το σύστημα. Στην περίπτωση αυτή η ζήτηση των καταναλωτών δεν καλύπτεται μόνο από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η στρατηγική που ακολουθείται είναι η εξής:

Αρχικά εξετάζεται η χωρητικότητα της μπαταρίας. Αν η μπαταρία έχει διαθέσιμη ισχύ ώστε να καλύψει το ηλεκτρικό φορτίο, τότε την παρέχει στο σύστημα και αδειάζει όσο χρειάζεται. Αν η χωρητικότητα της μπαταρίας βρίσκεται στο κατώτατο επίπεδο και δεν μπορεί να ανακουφίσει το σύστημα, τότε μόνο αρχίζει η λειτουργία του ντηζελοκινητήρα. Ωστόσο, πριν ξεκινήσει η λειτουργία του, γίνεται έλεγχος της κατάστασης του. Αν ο κινητήρας είναι σε κατάσταση βλάβης τη δεδομένη στιγμή τότε δεν μπορεί να λειτουργήσει και το σύστημα δεν μπορεί να αντεπεξέλθει στο ζητούμενο ηλεκτρικό φορτίο. Στην περίπτωση αυτή καταγράφεται το ποσό της ισχύος που δεν μπορεί να παραχθεί. Αν ωστόσο ντηζελοκινητήρας μπορεί να λειτουργήσει τότε διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

Η απαιτούμενη ισχύς είναι μικρότερη από το 30% της ονομαστικής ισχύος που αποδίδει ο κινητήρας. Αυτό συμβαίνει, όπως έχει αναφερθεί, για την αποφυγή βλάβης της μηχανής. Τότε ο ντηζελοκινητήρας λειτουργεί αναγκαστικά στο 30% της ονομαστικής του ισχύος και η ισχύς που παράγεται χρησιμοποιείται εν μέρει για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου και για να φορτίσει την μπαταρία, η οποία αφού έχει τεθεί σε λειτουργία ο κινητήρας είναι άδεια. Αυτή είναι και η μόνη περίπτωση που η μπαταρία μπορεί να φορτιστεί από το ντηζελοκινητήρα. Το σύστημα τελικά καλύπτει το απαιτούμενο φορτίο.

Η απαιτούμενη ισχύς κυμαίνεται ανάμεσα στο 30% της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα και την μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει. Σε αυτή την περίπτωση ο ντηζελοκινητήρας παράγει την ισχύ που χρειάζεται για να καλυφθεί το φορτίο. Το σύστημα τελικά τροφοδοτεί την ζήτηση των καταναλωτών.

Η απαιτούμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο ντηζελοκινητήρας. Τότε ο ντηζελοκινητήρας λειτουργεί στην μέγιστη ισχύ, ωστόσο υπάρχει ένα ποσό ισχύος που δεν μπορεί να καλυφθεί το οποίο και καταγράφεται. Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα δεν καταφέρνει να εξυπηρετήσει την ζήτηση των καταναλωτών.

Για κάθε ώρα λειτουργίας του ντηζελοκινητήρα καταγράφεται επίσης η κατανάλωση καυσίμου. Εφόσον τίθεται σε λειτουργία ο ντηζελοκινητήρας θα μπορούσε να παράγει ισχύ για να γεμίσει και τις μπαταρίες. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει γιατί απώτερος σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων που αξιοποιούν όσο το δυνατό λιγότερο τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Επίσης, στα συστήματα που δεν έχουν τη

δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ισχύος η εφεδρική ισχύς παρέχεται μόνο από τον ντηζελοκινητήρα [4.8].

4.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΜΑΡΕΙΑΣ

Για την αποτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος, λοιπόν, αναπτύχθηκε η διαδοχική μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo, σύμφωνα με την οποία η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς και το ηλεκτρικό φορτίο έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι επιθυμητοί δείκτες αξιοπιστίας. Στο σχήμα οι χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς ξεπερνά το ηλεκτρικό φορτίο, συμβολίζονται ως T_i, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, οι χρονικές περίοδοι συμβολίζονται ως t_i και τότε η ζήτηση δεν καλύπτεται από το σύστημα.

Η παραγόμενη ισχύς και το ηλεκτρικό φορτίο μοντελοποιούνται με βήμα μιας ώρας στη συγκεκριμένη ανάλυση. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα ή μικρότερα βήματα, αν απαιτείται. Όταν το σύστημα διαθέτει συσκευές αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, η στρατηγική λειτουργίας της μπαταρίας είναι πως κάθε ώρα που η παραγόμενη ισχύς υπερβαίνει το ηλεκτρικό φορτίο, η περίσσεια ενέργειας αποθηκεύεται στη μπαταρία και χρησιμοποιείται όταν υπάρχει έλλειψη ισχύος. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στη μπαταρία υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας.

Οι δείκτες αξιοπιστίας της ανάλυσης ευμάρειας μπορούν να υπολογιστούν καταγράφοντας τη διάρκεια απώλειας φορτίου t_i και τη διάρκεια που η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από το ηλεκτρικό φορτίο T_i . Όπως αναφέρθηκε και στο 3° κεφάλαιο, οι τρεις καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το σύστημα είναι η υγιής, η οριακή και η κατάσταση κινδύνου. Το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση κινδύνου όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν επαρκεί για την τροφοδότηση των καταναλωτών, δηλαδή κατά τις περιόδους t_i . Μένει, λοιπόν, να διαχωριστεί η οριακή από την υγιή κατάσταση τις περιόδους T_i , όπου το σύστημα μπορεί να καλύψει το ηλεκτρικό φορτίο. Η διαδικασία είναι διαφορετική για συστήματα που περιέχουν μπαταρίες και για συστήματα που δεν παρέχουν αυτή τη δυνατότητα. Στη συνέχεια περιγράφεται η στρατηγική που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του κώδικα.



Σχήμα 4.8: Σχηματική περιγραφή της προσομοίωσης του ηλεκτρικού φορτίου και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

4.8.1 Συστήματα με αποθήκευση ενέργειας

Για τα συστήματα που έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόστηκε η ακόλουθη μέθοδος: αν η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες, EAM, είναι ίση ή μεγαλύτερη από τη μέση τιμή του ηλεκτρικού φορτίου, MΦ, ή από το φορτίο αιχμής, ΦΑ, πολλαπλασιασμένο με το αποδεκτό αιτιοκρατικό κριτήριο AAΩ, η κατάσταση του συστήματος είναι υγιής και η αντίστοιχη διάρκεια συμβολίζεται με $T_i(Y)$ για κάθε υγιή κατάσταση. Από την άλλη μεριά, κάθε φορά που η EAM είναι μικρότερη από το MΦ ή το ΦΑ πολλαπλασιασμένο με το AAΩ, το σύστημα βρίσκεται σε οριακή κατάσταση και η αντίστοιχη διάρκεια συμβολίζεται με $T_i(O)$. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται μαθηματικά από τις σχέσεις [4.10]:

$$T_{i} = \begin{cases} T_{i}(Y), \ \alpha \nu \ \text{EAM} \ge \text{AA}\Omega \cdot \text{M}\Phi \ (\dot{\eta} \ \Phi\text{A}) \\ \\ T_{i}(O), \ \alpha \nu \ \text{EAM} < \text{AA}\Omega \cdot \text{M}\Phi \ (\dot{\eta} \ \Phi\text{A}) \end{cases}$$
(4.39)

4.8.2 Συστήματα χωρίς αποθήκευση της ενέργειας

Στην περίπτωση που το σύστημα δεν παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, το αιτιοκρατικό κριτήριο που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό της υγιούς από την οριακή κατάσταση είναι το περιθώριο ποσοστού εφεδρικής ισχύος, ΠΕΙ. Πιο συγκεκριμένα, κάθε ώρα ελέγχεται αν η ισχύς που αποδίδουν οι ανανεώσιμες τεχνολογίες και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να λειτουργήσει ο ντηζελοκινητήρας είναι αρκετή για να εξυπηρετηθεί το αιτιοκρατικό κριτήριο. Η διαδικασία περιγράφεται καλύτερα από τις ακόλουθες σγέσεις [4.11]:

$$T_{i} = \begin{cases} T_{i}(Y), \quad \alpha \nu \quad \left(P_{sys} + P_{dsl,R}\right) \ge \left(1 + \Pi EI\right) \cdot P_{load} \\ T_{i}(O), \quad \alpha \nu \quad \left(P_{sys} + P_{dsl,R}\right) < \left(1 + \Pi EI\right) \cdot P_{load} \end{cases}$$

$$(4.40)$$

όπου $T_i(Y)$ είναι η διάρκεια που το σύστημα βρίσκεται στην υγιή κατάσταση, $T_i(O)$ η διάρκεια που βρίσκεται στην οριακή κατάσταση, P_{sys} η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές, P_{load} το φορτίο που καλείται να καλύψει το σύστημα, ΠΕΙ το αιτιοκρατικό κριτήριο και $P_{dsl,R}$ η ονομαστική ισχύς του ντηζελοκινητήρα.

4.8.3 Δείκτες αξιοπιστίας

Ο συνολικός αριθμός που το σύστημα βρίσκεται στην υγιή κατάσταση n(Y), στην οριακή n(O) και την κατάσταση κινδύνου n(K), καταγράφονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για να υπολογιστούν οι δείκτες αξιοπιστίας της ανάλυσης ευμάρειας χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Pi Y K = \frac{1}{8760 \cdot N} \sum_{i=1}^{n(Y)} T_i(Y)$$
(4.41)

$$\Pi OK = \frac{1}{8760 \cdot N} \sum_{i=1}^{n(O)} T_i(O)$$
(4.42)

$$\Pi A \Phi = \frac{1}{8760 \cdot N} \sum_{i=1}^{n(K)} t_i$$
(4.43)

όπου ΠΥΚ είναι η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται στη υγιή κατάσταση, ΠΟΚ η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται στην οριακή κατάσταση, ΠΑΦ είναι η πιθανότητα απώλειας φορτίου και N είναι τα χρόνια της προσομοίωσης.

Ένας συμπληρωματικός δείκτης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και δείχνει την ανταπόκριση του συστήματος, είναι η αναμενόμενη απώλεια της υγιούς κατάστασης, AAYK, που ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

AAYK = 8760 -
$$\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{n(Y)} T_i(Y)$$
 (4.44)

Συνοψίζοντας, το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε υπολογίζει για κάθε ώρα την κατάσταση του συστήματος και στο τέλος της προσομοίωσης παρέχει πληροφορίες για τις μέσες τιμές των δεικτών αξιοπιστίας. Προβλέπονται με αυτό τον τρόπο οι διακυμάνσεις της απόδοσης του συστήματος για κάθε χρόνο και με την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο είναι δυνατή η μελέτη της αξιοπιστίας του συστήματος και ο βαθμός ανταπόκρισής του σε ένα συνεχώς αυξανόμενο φορτίο κατανάλωσης.

4.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] F.A Farret, M.G Simoes, 'Integration of Alternative Sources of Energy', Wiley, New Jersey, 2006.
- [4.2] HOMER, 'The Micropower Optimization Model'. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>http://www.nrel.gov.homer</u>.
- [4.3] Ι.Ε Φραγκιαδάκης, 'Φωτοβολταϊκά Συστήματα', 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2006.
- [4.4] Π.Σ Γεωργιλάκη, 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας', Σημειώσεις μαθήματος, Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.
- [4.5] Κ. Καγκαράκη, 'Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία', Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1987.
- [4.6] A.M.Leita da Silva, L.A.F Manso, W.S Sales, L.C Resende, M.J. Aguiar, M.A. Matos, J.A Lopes, V. Miranda, 'Application of Monte Carlo Simulation to Generating System Well-Being Analysis Considering Renewable Sources', 8th International Conference on Prob. Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, September, 2004.
- [4.7] W.R. Powell, 'An analytical expression for the average output power of a wind machine', Solar Energy, Vol. 26, pp. 77-80, Great Britain, 1981.
- [4.8] C.D Barley, C.B Winn, 'Optimal Dispatch Strategy in Remote Hybrid Power Systems', Solar Energy, Vol. 58, No 4-6, pp. 165-179, 1996.
- [4.9] P. Lilienthal, T. Lambert, P.Gilman, 'Computer Modeling of Renewable Power Systems', Encyclopedia of Energy, Vol. 1, Published by Elsevier.
 B. and R. Billinton, 'Incorporating Well-Being Analysis Considerations in
- [4.10] *Generating Systems Using Energy Storage'*, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, No 1, March 2005.

62

- [4.11] R. Billinton, R. Karki, '*Capacity Reserve Assessment Using Well-Being Analysis*', IEEE Transaction on Power Systems, Vol.14, No 2, May 1999.
- [4.12] J.G McGowan, J.F. Manwell, S.R Connors, 'Wind/ Diesel Energy Systems: Review of Design Options and Recent Developments', Solar Energy, Vol. 41, No 6, pp. 561-575, USA, 1998.
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αξιοπιστίας των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που μελετήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται οι δείκτες αξιοπιστίας για ένα απομονωμένο σύστημα το οποίο περιλαμβάνει μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπαταρίες και έναν εφεδρικό ντηζελοκινητήρα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ανάλυση και για διάφορους σχηματισμούς απομονωμένων συστημάτων με σκοπό την σύγκριση της απόδοσής τους. Τα σενάρια που αναπτύχθηκαν διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εξετάζονται συστήματα με δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στη δεύτερη κατηγορία τα συστήματα που δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται αναλυτικά τα συστήματα που μελετήθηκαν. Το βασικό Σενάριο είναι ένα απομονωμένο σύστημα που αποτελείται από τρεις ανεμογεννήτριες με ονοματική ισχύ 20 kW η καθεμία, μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια με ισχύ αιχμής 40 kW_p, έναν εφεδρικό ντηζελοκινητήρα με ονομαστική ισχύ 25 kW και τέλος μπαταρίες με συνολική χωρητικότητα 600 kWh (Σενάριο 2). Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα συστατικά και των υπόλοιπων Σεναρίων που δημιουργήθηκαν με σκοπό τη σύγκρισή τους όσο αφορά την αξιοπιστία που εμφανίζει το καθένα [5.1].

Το ηλεκτρικό φορτίο αιχμής που καλούνται να τροφοδοτήσουν τα συστήματα αυτά είναι 50 kW. Στο Σχήμα 5.1, παρουσιάζεται η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του ετήσιου φορτίου αιχμής, που είναι αντίστοιχο με το φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Σε όλα τα συστήματα η συνολική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι 100 kW. Η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη από το φορτίο αιχμής. Ωστόσο, αυτό είναι απόλυτα φυσιολογικό δεδομένου ότι όταν χρησιμοποιούνται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δεν υπάρχει δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος όποτε αυτή ζητηθεί. Κάθε ώρα, η παραγωγή είναι άμεση συνάρτηση των ατμοσφαιρικών καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή.

5.2.1 Δείκτες αξιοπιστίας

Για κάθε Σενάριο, λοιπόν, εφαρμόστηκε η ανάλυση ευμάρειας για την αποτίμηση της αξιοπιστίας του. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

| Σενάριο | Συστατικά | Αριθμός | Ονομαστική Ισχύς |
|---------|------------------|---------|---------------------|
| | A/Γ | 5 | 20kW |
| 1 | Ντηζελοκινητήρας | 1 | 25kW |
| | Μπαταρία | 120 | 5kWh |
| | A/Γ | 3 | 20kW |
| 2 | Ф/В | 1 | 40kWp |
| | Ντηζελοκινητήρας | 1 | 25kW |
| | Μπαταρία | 120 | 5kWh |
| | Ф/В | 1 | $100 kW_p$ |
| 3 | Ντηζελοκινητήρας | 1 | 25kW |
| | Μπαταρία | 120 | 5kWh |
| 4 | A/Γ | 5 | 20kW |
| 4 | Ντηζελοκινητήρας | 1 | 25kW |
| 5 | Ф/В | 1 | 100kW _p |
| 5 | Ντηζελοκινητήρας | 1 | 25kW [°] |

Πίνακας 5.1: Δεδομένα των διαφορετικών Σεναρίων που μελετήθηκαν.



Σχήμα 5.1: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το ετήσιο φορτίο αιχμής.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι βασικοί δείκτες της ανάλυσης ευμάρειας για τα πέντε διαφορετικά συστήματα που απασχόλησαν αυτή την εργασία. Οι βασικοί δείκτες παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, και είναι η πιθανότητα υγιούς κατάστασης, ΠΥΚ, η πιθανότητα οριακής κατάστασης, ΠΟΚ, η πιθανότητα απώλειας φορτίου, ΠΑΦ και η αναμενόμενη απώλεια της υγιούς κατάστασης, ΑΑΥΚ. Φαίνεται ξεκάθαρα πως τα επίπεδα άνεσης για κάθε σύστημα είναι διαφορετικά. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η αξιοπιστία που αποδίδουν οι ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις πηγές ενέργειας που παρέχει η τοποθεσία που είναι εγκατεστημένες [5.2]. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευμάρειας που αφορούν τα συστήματα με δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 1, 2 και 3), ενώ

στο Σχήμα 5.3 οι δείκτες αξιοπιστίας που αφορούν τα επόμενα δύο σενάρια (4 και 5), που δεν περιλαμβάνουν συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.

| Σενάριο | ПҮК | ПОК | ПАФ | ΑΑΥΚ ώρες/ χρόνο |
|---------|--------|--------|--------|---------------------|
| 1 | 0.9796 | 0.0190 | 0.0015 | 178.97 |
| 2 | 0.7072 | 0.2643 | 0.0285 | 2565.04 |
| 3 | 0.0812 | 0.5807 | 0.3380 | 8048.36 |
| 4 | 0.7318 | 0.0837 | 0.1845 | 2349.87 |
| 5 | 0.3695 | 0.1991 | 0.4314 | 5523.26 |

Πίνακας 5.2: Οι βασικοί δείκτες αξιοπιστίας για τα πέντε διαφορετικά συστήματα.



Σχήμα 5.2: Οι βασικοί δείκτες της ανάλυσης ευμάρειας για τα Σενάρια 1, 2 και 3.



Σχήμα 5.3: Οι βασικοί δείκτες της ανάλυσης ευμάρειας για τα Σενάρια 4 και 5.

Από τα συστήματα που έχουν μπαταρίες εκείνο που παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα αξιοπιστίας είναι το σύστημα που περιέχει μόνο ανεμογεννήτριες (Σενάριο 1). Το σύστημα αυτό είναι πολύ αξιόπιστο σε σχέση με τα άλλα δύο αφού έχει ελάχιστη πιθανότητα να εμφανιστεί στην κατάσταση κινδύνου, της τάξεως του 0.15%. Παρουσιάζει δε, τη μεγαλύτερη πιθανότητα να βρίσκεται στην υγιή κατάσταση (97.96%). Στον αντίποδα, βρίσκεται το σύστημα που περιέχει μόνο φωτοβολταϊκή τεχνολογία (Σενάριο 3). Το σύστημα αυτό παρουσιάζει πολύ μικρό ποσοστό εμφάνισης της υγιούς κατάστασης (8.12%) και βρίσκεται κυρίως στην οριακή κατάσταση με πιθανότητα 58.07%. Το μεγάλο ποσοστό της εμφάνισης κατάστασης κινδύνου (33.8%) έχει σημαντικό αντίκτυπο στο σύστημα, αφού μειώνει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία του. Αυτό μπορεί να συμβαίνει επειδή τα φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν μηδαμινή έως και καθόλου ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ανάμεσα στα δύο αυτά συστήματα βρίσκεται εκείνο που αποτελείται από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες (Σενάριο 2). Το σύστημα αυτό παρουσιάζει μειωμένο ρυθμό εμφάνισης της υγιούς κατάστασης (70.72%), ωστόσο θεωρείται αρκετά αξιόπιστο επειδή η μείωση αυτή έχει κατανεμηθεί περισσότερο στο ποσοστό εμφάνισης της οριακής κατάστασης και εμφανίζει επίσης αρκετά μικρό κίνδυνο απώλειας του ηλεκτρικού φορτίου (2.85%).

Για τα συστήματα που δεν έχουν μπαταρίες η απόδοσή τους μειώνεται σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα που έχουν αποθηκευτικές συσκευές. Για παράδειγμα, συγκρίνοντας το Σενάριο 1 (Α/Γ, ντηζελοκινητήρας, μπαταρία) με το Σενάριο 4 (Α/Γ, ντηζελοκινητήρας) συμπεραίνεται πόσο σημαντική είναι η χρήση συσσωρευτών στα απομονωμένα συστήματα όταν υπάρχουν ανανεώσιμες πηγές. Η πιθανότητα υγιούς κατάστασης μειώνεται σημαντικά στο Σενάριο 4 (73.18%) σε σγέση με το Σενάριο 1 που το σύστημα παρουσιάζει πολύ καλή αξιοπιστία. Βέβαια, το σύστημα δεν χάνει εντελώς την αξιοπιστία του, αφού η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στην αύξηση της πιθανότητας οριακής κατάστασης (8.37%). Όπως έχει αναφερθεί, επιτυχία του συστήματος θεωρείται η λειτουργία του στην υγιή και οριακή κατάσταση [5.2]. Όσο αφορά το Σενάριο 5 (Φ/Β, ντηζελοκινητήρας) παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η αύξηση της πιθανότητας υγιούς κατάστασης (36.95%) σε σχέση με το αντίστοιγο σύστημα που έγει μπαταρίες (Σενάριο 3). Από αυτά τα αποτελέσματα συμπεραίνεται πως δεν έχουν όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τις ίδιες ανάγκες εφεδρικής ισχύος. Σύμφωνα με την στρατηγική που ακολουθήθηκε για την φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας, οι μπαταρίες δεν φορτίζονται από τον ντηζελοκινητήρα. Επίσης ο ντηζελοκινητήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι σχετικά μικρής ισχύος λόγω της ανάγκης για τη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων με όσο γίνεται περισσότερη διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας. Επομένως, είναι λογικό στο Σενάριο 3 (Φ/Β με μπαταρία), τις νυχτερινές ώρες που δεν παράγεται καθόλου ηλεκτρική ενέργεια, οι μπαταρίες να αδειάζουν σταδιακά για την εξυπηρέτηση του ηλεκτρικού φορτίου, ενώ τις ώρες της ημέρας να μην μπορούν να γεμίσουν επειδή η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν επαρκεί και για την κάλυψη του φορτίου και για την φόρτιση της μπαταρίας. Αντίθετα, στο Σενάριο 5 (Φ/Β χωρίς μπαταρία) κάθε ώρα που το απαιτούμενο φορτίο υπερβαίνει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ μπαίνει σε λειτουργία ο ντηζελοκινητήρας για την ανακούφιση του συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί βέβαια πως το αιτιοκρατικό κριτήριο που χρησιμοποιείται για τα συστήματα με μπαταρία (ΑΑΩ) είναι διαφορετικό από εκείνο που γρησιμοποιείται για τα συστήματα χωρίς μπαταρία (ΠΕΙ). Για το λόγο αυτό είναι φυσιολογικό ένα σύστημα που έχει μπαταρία να παρουσιάζει διαφορετικές τιμές της ΠΥΚ και της ΠΟΚ από το αντίστοιχο σύστημα που δεν έχει μπαταρία. Ωστόσο, η αναμενόμενη απώλεια φορτίου παραμένει στις ίδιες περίπου τιμές, αφού δεν εξαρτάται από τα αιτιοκρατικά κριτήρια. Έτσι λοιπόν, και για το Σενάριο 5, η αύξηση του δείκτη ΠΑΦ (43.14%) οφείλεται στην απουσία της μπαταρίας.

5.2.2 Κατανάλωση καυσίμου

Το κύριο πλεονέκτημα της ηλιακής και αιολικής ενέργειας είναι η σημαντική μείωση του κόστους λειτουργίας των συστημάτων που τις αξιοποιούν λόγω της εξοικονόμησης των συμβατικών καυσίμων [5.3]. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου για κάθε Σενάριο (Σχήμα 5.4) Επίσης παρουσιάζεται η ωριαία κατανάλωση καυσίμου που έχει ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μόνο συμβατικές πηγές ενέργειας.

 τα πέντε σενάρια και το συμβατικό σύστημα.

 Σενάριο
 Κατανάλωση (lt/ h)

 1
 0.0179

 2
 0.5225

 3
 4.6306

 4
 2.9136

 5
 5.6966

14.7687

Συμβατικό σύστημα

Πίνακας 5.3: Τιμές ωριαίας κατανάλωσης για



Σχήμα 5.4: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου για διαφορετικούς σχηματισμούς συστημάτων.

Φαίνεται ξεκάθαρα πως τα συστήματα που έχουν μπαταρίες (Σενάρια 1, 2 και 3) καταναλώνουν πολύ λιγότερη ποσότητα καυσίμου από τα συστήματα που δεν έχουν μπαταρία (Σενάρια 4 και 5). Επίσης, όλα τα ανανεώσιμα συστήματα καταναλώνουν πολύ λιγότερο καύσιμο σε σχέση με το συμβατικό σύστημα (14.7687 lt/ kWh). Επιπλέον, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το Σενάριο 1 (Α/Γ, ντηζελοκινητήρας, μπαταρία), το οποίο παρουσιάζει πολύ μικρή κατανάλωση καυσίμου (0.0179 lt/ kWh) σε σχέση με το Σενάριο 4 (Α/Γ, ντηζελοκινητήρας), το οποίο επειδή δεν έχει μπαταρία χρησιμοποιεί περισσότερο τον ντηζελοκινητήρα σε περιπτώσεις έκτακτων αναγκών. Αυτό συμβαίνει, σε μικρότερο βαθμό βέβαια, και για τα Σενάρια 3 και 5 (Φ/Β με μπαταρία και χωρίς μπαταρία αντίστοιχα). Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί πως το βασικό Σενάριο 2 παρουσιάζει επίσης πολύ χαμηλή ωριαία κατανάλωση καυσίμου. Τέλος, για τα Σενάρια 1 και 2 είναι πολύ σημαντικό το γεγονός πως εμφανίζουν μεγάλη αξιοπιστία αν και χρησιμοποιούν ελάχιστα συμβατικές πηγές ενέργειας.

Η ικανότητα παραγωγής επαρκούς ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να θεωρείται ένα σύστημα αξιόπιστο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες στα απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιοι παράγοντες μπορούν να θεωρηθούν η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας, το ηλεκτρικό φορτίο, τα επίπεδα διείσδυσης ανανεώσιμης ενέργειας, η διαθεσιμότητα των πηγών ενέργειας που παρέχει μία τοποθεσία, ο αναγκαστικός ρυθμός βλάβης των παραγωγικών μονάδων του συστήματος και το αιτιοκρατικό κριτήριο που χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της αξιοπιστίας [5.2]. Οι επιδράσεις των παραμέτρων που αναφέρθηκαν για τους τρεις σχηματισμούς συστημάτων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

5.3.1 Επίδραση της μπαταρίας

Όπως αναφέρθηκε, το αιτιοκρατικό κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε για το διαχωρισμό της υγιούς από την οριακή κατάσταση στο απομονωμένο σύστημα εξαρτάται από την ικανότητα της μπαταρίας να παρέχει επαρκή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όταν είναι απαραίτητο [5.1]. Η υποστήριξη του συστήματος από τους συσσωρευτές αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα, που επηρεάζει άμεσα την καλή κατάσταση των απομονωμένων συστημάτων. Τα τρία συστήματα που περιλαμβάνουν μπαταρίες (Σενάρια 1, 2 και 3) εξετάστηκαν σε συνδυασμό με διαφορετικά επίπεδα χωρητικότητας που μπορεί να έχει η μπαταρία, με σκοπό να εκτιμηθεί η επίδρασή της στην ανάλυση ευμάρειας. Οι δείκτες αξιοπιστίας της ανάλυσης ευμάρειας καθορίστηκαν ως συνάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας. Στα Σχήματα 5.5, 5.6 και 5.7, φαίνονται οι πιθανότητες των τριών καταστάσεων (υγιής, οριακή, κινδύνου) για τα τρία βασικά σενάρια που εξετάστηκαν, σε σχέση με διαφορετικά επίπεδα χωρητικότητας της μπαταρίας κυμαίνεται από 400 kWh έως 800 kWh. Όπως φαίνεται, σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα εμφάνισης της υγιούς κατάστασης αυξάνεται όσο αυξάνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας.



Σχήμα 5.5: ΠΥΚ συναρτήσει της χωρητικότητας της μπαταρίας για τα τρία διαφορετικά Σενάρια.

Τα σχήματα δείχνουν ξεκάθαρα πως η αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας για ένα δεδομένο σύστημα επιδρά, ακόμη και σε μικρό βαθμό, θετικά στην αξιοπιστία του συστήματος. Για το Σενάριο 1, όπου το σύστημα αποτελείται μόνο από ανεμογεννήτριες, η πιθανότητα υγιούς κατάστασης αγγίζει το 99% για χωρητικότητα μπαταρίας 800kWh ενώ η

70

πιθανότητα το σύστημα να βρεθεί στην κατάσταση κινδύνου σχεδόν εξαλείφεται (ΠΑΦ=0.07%). Το Σενάριο 1 δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο πρόβλημα όσο μειώνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας. Για χωρητικότητα 400 kWh το ποσοστό εμφάνισης της υγιούς κατάστασης είναι 93.3% ενώ η πιθανότητα το σύστημα να μην μπορέσει να αντεπεξέλθει στη ζήτηση του ηλεκτρικού φορτίου είναι αρκετά μικρή και ίση με 0.27%. Επομένως, το σύστημα με τις ανεμογεννήτριες (Σενάριο 1) μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα όταν υπάρχει σχετικά μικρή χωρητικότητα στις μπαταρίες.



Σχήμα 5.6: ΠΟΚ συναρτήσει της χωρητικότητας της μπαταρίας για τα τρία διαφορετικά Σενάρια.



Σχήμα 5.7: ΠΑΦ συναρτήσει της χωρητικότητας της μπαταρίας για τα τρία διαφορετικά Σενάρια.

Αντίθετα στο Σχήμα 5.5 φαίνεται πως το σύστημα που αποτελείται μόνο από φωτοβολταϊκά (Σενάριο 3) δεν βελτιώνεται αισθητά από την αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, το Σενάριο 3 παρουσιάζει ελάχιστη αύξηση του ποσοστού εμφάνισης της υγιούς κατάστασης και αντίστοιχα ελάχιστη μείωση του ποσοστού εμφάνισης της κατάστασης κινδύνου όσο αυξάνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας (Σχήμα 5.7). Αυτό οφείλεται κυρίως στη συγκεκριμένη στρατηγική που εφαρμόστηκε για τη μοντελοποίηση των απομονωμένων συστημάτων. Η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα να μην παράγουν ηλεκτρική ισχύ τις νυχτερινές ώρες, κατά τις οποίες ωστόσο υπάρχει ζήτηση των καταναλωτών, έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αξιοπιστία του συστήματος. Η μικρή αξιοπιστία του συστήματος οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι οι μπαταρίες φορτίζονται μόνο από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και όχι από το ντηζελοκινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις νυχτερινές ώρες, που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν μπορούν να αποδώσουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ, οι μπαταρίες να αδειάζουν προσπαθώντας να ισορροπήσουν το σύστημα κατά τη διάρκεια του έτους. Επίσης ο ντηζελοκινητήρας έχει αρκετά μικρή ονομαστική ισχύ σε μια προσπάθεια να διερευνηθεί το σύστημα με την ελάχιστη δυνατή χρήση συμβατικής ενέργειας [5.3]. Όλοι οι παραπάνω λόγοι ευθύνονται για την λειτουργία του συστήματος στην οριακή κατάσταση τον περισσότερο χρόνο της προσομοίωσης. Ο συνδυασμός ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών (Σενάριο 2) δίνει καλύτερα αποτελέσματα από αυτά που δίνει το Σενάριο 3. Όσο αυξάνεται η γωρητικότητα της μπαταρίας το σύστημα καταλήγει περισσότερο στην υγιή κατάσταση και λιγότερο στην κατάσταση κινδύνου. Για χωρητικότητα μπαταρίας ίση με 800 kWh, η πιθανότητα εμφάνισης του συστήματος στην υγιή κατάσταση είναι 74.3% ενώ η πιθανότητα απώλειας φορτίου είναι αρκετά μικρή και ίση με 2.6%. Το σύστημα θεωρείται αρκετά αξιόπιστο αφού βρίσκεται με μεγάλη συγγότητα στην υγιή και την οριακή κατάσταση. Στους Πίνακες 5.4, 5.5 και 5.6 φαίνονται αναλυτικά οι δείκτες αξιοπιστίας για τα τρία διαφορετικά Σενάρια.

Πίνακας 5.4: ΠΥΚ για τα τρία διαφορετικά Σενάρια και νια διάφορα επίπεδα γωρητικότητας μπαταρίας

| fa olayopa chineoa kapitiko titas phatapias. | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|
| Χωρητικότητα Μπαταρίας (kWh) | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | | |
| Σενάριο 1 | 0.9333 | 0.9644 | 0.9796 | 0.9853 | 0.9902 | | |
| Σενάριο 2 | 0.6200 | 0.6727 | 0.7072 | 0.7206 | 0.7427 | | |
| Σενάριο 3 | 0.0768 | 0.0801 | 0.0812 | 0.0817 | 0.0819 | | |

Πίνακας 5.5: ΠΟΚ για τα τρία διαφορετικά Σενάρια και για διάφορα επίπεδα γωρητικότητας μπαταρίας.

| Χωρητικότητα Μπαταρίας (kWh) | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|
| Σενάριο 1 | 0.0640 | 0.0337 | 0.0190 | 0.0136 | 0.0091 | | |
| Σενάριο 2 | 0.3490 | 0.2970 | 0.2643 | 0.2510 | 0.2303 | | |
| Σενάριο 3 | 0.5873 | 0.5824 | 0.5807 | 0.5809 | 0.5806 | | |

Πίνακας 5.6: ΠΑΦ για τα τρία διαφορετικά Σενάρια και νια διάφορα επίπεδα γωρητικότητας υπαταρίας

| για διαφορά επιπεδά χωρητικότητας μπαταρίας. | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|
| Χωρητικότητα Μπαταρίας (kWh) | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | | |
| Σενάριο 1 | 0.0027 | 0.0019 | 0.0015 | 0.0011 | 0.0007 | | |
| Σενάριο 2 | 0.0310 | 0.0303 | 0.0285 | 0.0284 | 0.0269 | | |
| Σενάριο 3 | 0.3360 | 0.3375 | 0.3380 | 0.3374 | 0.3375 | | |

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η αναμενόμενη απώλεια της υγιούς κατάστασης σε σχέση με την χωρητικότητα της μπαταρίας για τα τρία διαφορετικά Σενάρια. Ιδιαίτερα για τα Σενάρια 1 και 2, η προσθήκη συσσωρευτών μεγαλύτερης χωρητικότητας μειώνει την τιμή της ΑΑΥΚ. Η αναμενόμενη απώλεια της υγιούς κατάστασης είναι ένας εξίσου σημαντικός δείκτης αξιοπιστίας, που δείχνει τις συνολικές ώρες που το σύστημα δεν μπορεί να βρεθεί στην υγιή κατάσταση (Πίνακας 5.7).

72

| Ymb | Trikorifias | marapias. | | | |
|---------------------------------|-------------|-----------|------|------|------|
| Χωρητικότητα Μπαταρίας (kWh) | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Σενάριο 1 | 584 | 311 | 179 | 129 | 86 |
| Σενάριο 2 | 3329 | 2867 | 2565 | 2447 | 2253 |
| Σενάριο 3 | 8087 | 8058 | 8048 | 8044 | 8042 |

Πίνακας 5.7: ΑΑΥΚ για τα τρία διαφορετικά Σενάρια και για διάφορα επίπεδα χωρητικότητας μπαταρίας.

Φαίνεται λοιπόν, πως το Σενάριο 3 που περιέχει φωτοβολταϊκά δεν μπορεί να βελτιώσει την κατάστασή του όσο και αν αυξάνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας, πράγμα που συμβαίνει στα άλλα δύο Σενάρια. Παρατηρείται λοιπόν, πως η μπαταρία δεν μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία του συστήματος με τη στρατηγική που εφαρμόστηκε. Για το λόγο αυτό συμπεραίνεται πως τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα απέδιδαν καλύτερα με μια διαφορετική στρατηγική της μπαταρίας. Μια τέτοια στρατηγική θα μπορούσε να είναι η φόρτιση της μπαταρίας, όχι μόνο από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά και κάθε φορά που λειτουργεί ο κινητήρας [5.3]. Με τον τρόπο αυτό οι μπαταρίες θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν το σύστημα. Ωστόσο, η στρατηγική αυτή δεν εφαρμόστηκε γιατί, όπως προαναφέρθηκε, έπρεπε να μελετηθεί η συμπεριφορά συστημάτων, που χρησιμοποιούν όσο το δυνατόν λιγότερο συμβατικές πηγές ενέργειας.

Τα συστήματα που έχουν ανεμογεννήτριες ωστόσο (Σενάρια 1 και 2) συμπεριφέρονται πολύ καλά, όσο αφορά το βαθμό ανταπόκρισής τους στο ηλεκτρικό φορτίο και φαίνεται πως η χρήση μπαταρίας με την στρατηγική που εφαρμόστηκε παρουσιάζει πολύ καλούς δείκτες αξιοπιστίας.



Σχήμα 5.8: ΑΑΥΚ συναρτήσει της χωρητικότητας της μπαταρίας για τα τρία διαφορετικά Σενάρια.

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που καλούνται να επιλύσουν οι διαχειριστές απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ασυνέχεια της λειτουργίας του ντηζελοκινητήρα. Όπως αναφέρθηκε στο 2° Κεφάλαιο, ο μεγάλος αριθμός κύκλων εκκίνησης – διακοπής της λειτουργίας του κινητήρα μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον κινητήρα. Η προσθήκη μπαταριών στα υβριδικά συστήματα μπορεί να μειώσει το πρόβλημα αυτό σε κάποιο βαθμό [5.3]. Τα Σχήματα 5.9, 5.10 και 5.11 δείχνουν τον ετήσιο μέσο αριθμό ωρών λειτουργίας του ντηζελοκινητήρα σαν συνάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας, που

74 **ΚΕΦ.5** ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

κυμαίνεται από 400 kWh έως 800 kWh, για τα τρία Σενάρια που περιέχουν μπαταρίες. Συμπεραίνεται λοιπόν, πως ο ετήσιος αριθμός ωρών λειτυργίας του κινητήρα μειώνεται όσο αυξάνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας. Ειδικά για το Σενάριο 1, η μείωση είναι πολύ σημαντική αφού ο ντηζελοκινητήρας φτάνει να λειτουργεί μόνο 14 φορές κατά μέσο όρο το χρόνο για χωρητικότητα μπαταρίας 800 kWh. Η μείωση είναι εμφανής και για τα άλλα δύο Σενάρια (2 και 3).

Στον Πίνακα 5.8 φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα.

| Πίνακας 5.8: Ετήσιος αριθμός ωρών λειτουργίας του ντηζελοκινητήρα. | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh) | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Σενάριο 1 | 840.20 | 788.80 | 749.30 | 706.08 | 661.08 |
| Σενάριο 2 | 68.54 | 37.20 | 29.60 | 20.90 | 14.48 |
| Σενάριο 3 | 5418.36 | 5378.07 | 5382.32 | 5368.55 | 5377.06 |



Σχήμα 5.9: Ετήσιος αριθμός ωρών λειτουργίας του ντηζελοκινητήρα συναρτήσει της χωρητικότητας της μπαταρίας για το Σενάριο 1.



Σχήμα 5.10: Ετήσιος αριθμός ωρών λειτουργίας του ντηζελοκινητήρα συναρτήσει της χωρητικότητας της μπαταρίας για το Σενάριο 2.



Σχήμα 5.11: Ετήσιος αριθμός ωρών λειτουργίας του ντηζελοκινητήρα συναρτήσει της χωρητικότητας της μπαταρίας για το Σενάριο 3.

5.3.2 Επίδραση του ηλεκτρικού φορτίου

Το ηλεκτρικό φορτίο που καλείται να καλύψει ένα απομονωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την ανάλυση ευμάρειας. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι συνήθως χρησιμοποιούν το φορτίο αιχμής ως κριτήριο για την ανάλυση αξιοπιστίας ενός συστήματος. Ωστόσο, το ηλεκτρικό φορτίο μεταβάλλεται σε ωριαία βάση και για το λόγο αυτό πρέπει να διερευνάται από τους διαχειριστές των απομονωμένων συστημάτων. Το μεταβαλλόμενο προφίλ του ηλεκτρικού φορτίου καθώς και το φορτίο αιχμής επιδρούν σημαντικά στην αξιοπιστία του συστήματος [5.2]. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση του ηλεκτρικού φορτίου, αρχικά για τα Σενάρια 1, 2 και 3, που έχουν δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια για τα Σενάρια 4 και 5, που δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα. Το ηλεκτρικό φορτίο αιχμής κυμαίνεται από 30kW έως 70kW με ίσα βήματα των 5 kW. Τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.9, 5.10, 5.11 και 5.12.

Τα Σχήματα 5.12, 5.13 και 5.14 απεικονίζουν τις πιθανότητες εμφάνισης κάθε κατάστασης (υγιής, οριακή, κινδύνου) σε σχέση με το ετήσιο φορτίο αιχμής. Όπως φαίνεται στα σχήματα, τα Σενάρια 1 και 2 αποδίδουν βέλτιστα για φορτίο αιχμής 30 και 35 kW με ελάχιστη πιθανότητα εμφάνισης της κατάστασης κινδύνου. Το Σενάριο 1 παρουσιάζει πολύ καλή αξιοπιστία μέχρι και για φορτίο αιχμής 60 kW. Για φορτίο αιχμής μεγαλύτερο των 60 kW θα πρέπει να μελετηθεί η εγκατάσταση και άλλων αιολικών μονάδων ή η αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας. Στα ίδια επίπεδα βρίσκεται και το Σενάριο 2. Το Σενάριο 3 εμφανίζει ωστόσο, αρκετά χαμηλή πιθανότητα απώλειας φορτίο αιχμής, εμφανίζει αρκετά υψηλή πιθανότητα υγιούς κατάστασης (49.56%) σε σχέση με το βασικό Σενάριο 2.

| Ζεναρία και για διαφορές τιμές του φορτίου αιχμής. | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Ετήσιο Φορτίο Αιχμής (kW) | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 | |
| 30 | 1 | 0.9979 | 0.4956 | 0.9370 | 0.8494 | |
| 35 | 0.9998 | 0.9880 | 0.3417 | 0.8850 | 0.7310 | |
| 40 | 0.9995 | 0.9511 | 0.2198 | 0.8358 | 0.6117 | |
| 45 | 0.9958 | 0.8528 | 0.1331 | 0.7815 | 0.4827 | |
| 50 | 0.9796 | 0.7072 | 0.0812 | 0.7314 | 0.3695 | |
| 55 | 0.9406 | 0.5205 | 0.0469 | 0.6857 | 0.3039 | |
| 60 | 0.8591 | 0.2874 | 0.0261 | 0.6470 | 0.2618 | |
| 65 | 0.7330 | 0.1238 | 0.0145 | 0.6113 | 0.2360 | |
| 70 | 0.5754 | 0.0460 | 0.0071 | 0.5775 | 0.2078 | |

Πίνακας 5.9: ΠΥΚ για τα πέντε διαφορετικά Σενάρια και για διάφορες τιμές του φορτίου αιγμής.

Πίνακας 5.10: ΠΟΚ για τα πέντε διαφορετικά Σενάρια και για διάφορες τιμές του φορτίου αιχμής.

| | | | 2 1 1 | 701 1 2 | |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ετήσιο Φορτίο Αιχμής (kW) | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 |
| 30 | 0 | 0.0021 | 0.4778 | 0.0377 | 0.0937 |
| 35 | 0.0002 | 0.0115 | 0.5839 | 0.0565 | 0.1350 |
| 40 | 0.0005 | 0.0465 | 0.6409 | 0.0644 | 0.1547 |
| 45 | 0.0040 | 0.1367 | 0.6417 | 0.0772 | 0.1927 |
| 50 | 0.0190 | 0.2643 | 0.5807 | 0.0839 | 0.1989 |
| 55 | 0.0547 | 0.4203 | 0.4943 | 0.0831 | 0.1565 |
| 60 | 0.1283 | 0.6069 | 0.4065 | 0.0825 | 0.1060 |
| 65 | 0.2374 | 0.7120 | 0.3480 | 0.0801 | 0.0727 |
| 70 | 0.3682 | 0.7259 | 0.3062 | 0.0796 | 0.0648 |

Πίνακας 5.11: ΠΑΦ για τα πέντε διαφορετικά Σενάρια και για διάφορες τιμές του φορτίου αιχμής.

| | | | | / 41 1 2 | |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ετήσιο Φορτίο Αιχμής (kW) | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 |
| 30 | 0 | 0 | 0.0266 | 0.0253 | 0.0568 |
| 35 | 0 | 0.0005 | 0.0744 | 0.0585 | 0.1340 |
| 40 | 0 | 0.0024 | 0.1393 | 0.0997 | 0.2337 |
| 45 | 0.0002 | 0.0105 | 0.2252 | 0.1413 | 0.3246 |
| 50 | 0.0015 | 0.0285 | 0.3380 | 0.1847 | 0.4316 |
| 55 | 0.0047 | 0.0593 | 0.4588 | 0.2312 | 0.5396 |
| 60 | 0.0126 | 0.1056 | 0.5674 | 0.2705 | 0.6322 |
| 65 | 0.0297 | 0.1641 | 0.6375 | 0.3086 | 0.6912 |
| 70 | 0.0564 | 0.2281 | 0.6868 | 0.3429 | 0.7274 |

Πίνακας 5.12: ΑΑΥΚ για τα πέντε διαφορετικά Σενάρια και για διάφορες τιμές του φορτίου αιγμής.

| Ετήσιο Φορτίο Αιχμής (kW) | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 30 | 0 | 19 | 4418 | 551 | 1318 |
| 35 | 2 | 105 | 5767 | 1007 | 2356 |
| 40 | 5 | 428 | 6834 | 1438 | 3401 |
| 45 | 37 | 1289 | 7594 | 1913 | 4531 |
| 50 | 178 | 2565 | 8048 | 2352 | 5523 |
| 55 | 520 | 4200 | 8349 | 2753 | 6098 |
| 60 | 1234 | 6241 | 8531 | 3092 | 6466 |
| 65 | 2339 | 7675 | 8633 | 3405 | 6692 |
| 70 | 3719 | 8356 | 8698 | 3701 | 6939 |

Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται καλύτερα η επίδραση του ετήσιου φορτίου αιχμής. Για τα Σενάρια 2 και 3 η AAYK αυξάνεται σχεδόν γραμμικά όταν το φορτίο αιχμής είναι μικρότερο από μία συγκεκριμένη τιμή, στην περίπτωση αυτή 50kW. Όταν το φορτίο αιχμής ξεπερνά αυτή την τιμή η AAYK αυξάνεται απότομα. Σε αυτή την περίπτωση ίσως είναι αναγκαία η προσθήκη περισσότερων συσκευών αποθήκευσης ενέργειας για την ανακούφιση του συστήματος ή επιπλέον ανανεώσιμων τεχνολογιών στο σύστημα.



Σχήμα 5.12: ΠΥΚ για τα Σενάρια 1, 2 και 3 συναρτήσει του ετήσιου φορτίου αιχμής.



Σχήμα 5.13: ΠΟΚ για τα Σενάρια 1, 2 και 3 συναρτήσει του ετήσιου φορτίου αιχμής.



Σχήμα 5.14: ΠΑΦ για τα Σενάρια 1, 2 και 3 συναρτήσει του ετήσιου φορτίου αιχμής.



Σχήμα 5.15: ΑΑΥΚ για τα Σενάρια 1, 2 και 3 συναρτήσει του ετήσιου φορτίου αιχμής.

Στα Σχήματα 5.16, 5.17 και 5.18 απεικονίζονται οι πιθανότητες εμφάνισης κάθε κατάστασης (υγιής, οριακή, κινδύνου) σε σχέση με το ετήσιο φορτίο αιχμής για τα Σενάρια 4 και 5, τα οποία δεν έχουν μπαταρίες. Όπως φαίνεται στα σχήματα, το Σενάρια 4, που αποτελείται από ανεμογεννήτριες, έχει πολύ καλή απόδοση για φορτίο αιχμής 30 kW (με ΠΥΚ=93.7% και ΠΑΦ=2.53%) και αρκετά καλή απόδοση για φορτίο αιχμής που φτάνει και τα 45 kW. Όταν το φορτίο αιχμής ξεπεράσει τα 50 kW η πιθανότητα απώλειας φορτίου αυξάνεται σημαντικά και το σύστημα χάνει αισθητά την αξιοπιστία του. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 5.19, όπου ή αναμενόμενη απώλεια υγιούς κατάστασης αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του ετήσιου φορτίου αιχμής.



Σχήμα 5.16: ΠΥΚ για τα Σενάρια 4 και 5 συναρτήσει του ετήσιου φορτίου αιχμής.



Σχήμα 5.17: ΠΟΚ για τα Σενάρια 4 και 5 συναρτήσει του ετήσιου φορτίου αιχμής.

Το Σενάριο 5, που αποτελείται από φωτοβολταϊκά, παρουσιάζει αρκετά καλή απόδοση για φορτίο αιχμής 30 kW (με ΠΥΚ=84.9% και ΠΑΦ=5.68%). Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει για φορτίο αιχμής μεγαλύτερο των 40 kW όπου η αναμενόμενη απώλεια φορτίου αυξάνεται σημαντικά και το σύστημα φαίνεται να μην μπορεί να αντεπεξέλθει στο ηλεκτρικό φορτίο. Το Σχήμα 5.19 απεικονίζει καλύτερα αυτό το φαινόμενο, καθώς φαίνεται πως η αναμενόμενη απώλεια της υγιούς κατάστασης αυξάνεται απότομα για φορτίο αιχμής που ξεπερνά τα 40 kW.



Σχήμα 5.18: ΠΑΦ για τα Σενάρια 4 και 5 συναρτήσει του ετήσιου φορτίου αιχμής.



Σχήμα 5.19: ΑΑΥΚ για τα Σενάρια 4 και 5 συναρτήσει του ετήσιου φορτίου αιχμής.

5.3.3 Επίδραση της ανανεώσιμης ενέργειας

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως βασίζονται στις παραγωγικές δυνατότητες των συστημάτων που φαίνονται στον Πίνακα 5.1 για συγκεκριμένη χωρητικότητα μπαταρίας και προκαθορισμένο ηλεκτρικό φορτίο. Ωστόσο, σε περίπτωση που αναμένεται μελλοντική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου θα πρέπει να προστίθενται στο σύστημα επιπλέον παραγωγικές μονάδες, ώστε να διατηρείται η αξιοπιστία του σε καλά επίπεδα. Εξαιτίας του υψηλού κόστους των καυσίμων και των επιπτώσεων των συμβατικών παραγωγικώς μονάδων στο περιβάλλον, η προσθήκη ανανεώσιμων τεχνολογιών μπορεί να είναι ευεργετική σε μικρές απομονωμένες περιοχές, τόσο για την αξιοπιστία του συστήματος

όσο και για οικονομικούς λόγους [5.2]. Στη συνέχεια παρουσιάζεται πόσο μπορεί να επηρεάσει η εγκατάσταση περισσότερων ανανεώσιμων παραγωγικών μονάδων, ένα απομονωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υπολογίστηκαν οι δείκτες της ανάλυσης ευμάρειας για το βασικό σύστημα (Σενάριο 2) για να διαπιστωθεί πόσο μπορεί να επηρεάσει η πρόσθεση μιας ανεμογεννήτριας ή μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας το σύστημα. Τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά στους ακόλουθους πίνακες.

| ενεργειας απο ανεμογεννητριες και φωτοβολταικα. | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--|--|--|--|
| Διείσδυση Ανανεώσιμης Ενέργειας (kW) | Επιπλέον Α/Γ | Επιπλέον Φ/Β | | | | |
| 0 | 0.0011 | 0.0011 | | | | |
| 20 | 0.0015 | 0.0011 | | | | |
| 40 | 0.0024 | 0.0011 | | | | |
| 60 | 0.2838 | 0.0019 | | | | |
| 80 | 0.8438 | 0.0213 | | | | |
| 100 | 0.9804 | 0.0812 | | | | |
| 120 | 0.9971 | 0.1810 | | | | |
| 140 | 0.9996 | 0.2794 | | | | |
| 160 | 0.9999 | 0.3751 | | | | |
| 180 | 1 | 0.4487 | | | | |
| 200 | 1 | 0.5134 | | | | |
| 220 | 1 | 0.5613 | | | | |

Πίνακας 5.13: ΠΥΚ για διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά.

| Πίνακας 5. | 14: ПОК ⁻ | για διείσδυση | ανανεώσιμης |
|-------------|-----------------------------|----------------|-------------|
| νέονειας απ | ó avenove | white the rate | ωτοβολταϊκά |

| ενεργειας απο ανεμογεννητριες και φωτορολταικα. | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--|--|--|--|--|
| Διείσδυση Ανανεώσιμης Ενέργειας (kW) | Επιπλέον Α/Γ | Επιπλέον Φ/Β | | | | | |
| 0 | 0.2488 | 0.2488 | | | | | |
| 20 | 0.5801 | 0.3611 | | | | | |
| 40 | 0.7512 | 0.4788 | | | | | |
| 60 | 0.6256 | 0.5389 | | | | | |
| 80 | 0.1428 | 0.5782 | | | | | |
| 100 | 0.0184 | 0.5827 | | | | | |
| 120 | 0.0027 | 0.5393 | | | | | |
| 140 | 0.0003 | 0.4854 | | | | | |
| 160 | 0.0001 | 0.4217 | | | | | |
| 180 | 0 | 0.3708 | | | | | |
| 200 | 0 | 0.3269 | | | | | |
| 220 | 0 | 0.2952 | | | | | |

| Διείσδυση Ανανεώσιμης Ενέργειας (kW) | Επιπλέον Α/Γ | Επιπλέον Φ/Β |
|---|--------------|--------------|
| 0 | 0.75 | 0.75 |
| 20 | 0.4184 | 0.6377 |
| 40 | 0.2463 | 0.5201 |
| 60 | 0.0906 | 0.4592 |
| 80 | 0.0134 | 0.4005 |
| 100 | 0.0013 | 0.3361 |
| 120 | 0.0002 | 0.2798 |
| 140 | 0 | 0.2352 |
| 160 | 0 | 0.2032 |
| 180 | 0 | 0.1805 |
| 200 | 0 | 0.1569 |
| 220 | 0 | 0.1435 |

Πίνακας 5.15: ΠΑΦ για διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά.

Πίνακας 5.16: ΑΑΥΚ για διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά

| Διείσδυση Ανανεώσιμης Ενέργειας (kW) | Επιπλέον Α/Γ | Επιπλέον Φ/Β |
|---|--------------|--------------|
| 0 | 8750 | 8750 |
| 20 | 8747 | 8750 |
| 40 | 8738 | 8750 |
| 60 | 6273 | 8743 |
| 80 | 1368 | 8573 |
| 100 | 171 | 8042 |
| 120 | 25 | 7174 |
| 140 | 3 | 6312 |
| 160 | 1 | 5474 |
| 180 | 0 | 4829 |
| 200 | 0 | 4262 |
| 220 | 0 | 3843 |



Σχήμα 5.20: ΠΥΚ συναρτήσει της ανανεώσιμης ενέργειας που διεισδύει στο σύστημα.



Σχήμα 5.21: ΠΟΚ συναρτήσει της ανανεώσιμης ενέργειας που διεισδύει στο σύστημα.



Σχήμα 5.22: ΠΑΦ συναρτήσει της ανανεώσιμης ενέργειας που διεισδύει στο σύστημα.



Σχήμα 5.23: ΑΑΥΚ συναρτήσει της ανανεώσιμης ενέργειας που διεισδύει στο σύστημα.

Όπως φαίνεται στα σχήματα και τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία του συστήματος.

Όσο αφορά τις ανεμογεννήτριες, η πιθανότητα υγιούς κατάστασης αυξάνεται σχεδόν κατακόρυφα για διείσδυση ανανεώσιμης ισχύος από 60 kW και πάνω, ενώ για ισχύ μεγαλύτερη των 100 kW οι ανεμογεννήτριες αποδίδουν αξιοπιστία που αγγίζει το 100%. Η πιθανότητα απώλειας φορτίου, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.15, μηδενίζεται για ισχύ μεγαλύτερη των 120 kW.

Αντίθετα, η προσθήκη επιπλέον φωτοβολταϊκών γεννητριών, ενώ φαίνεται πως αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος, δεν ενδείκνυται για τη συγκεκριμένη τοποθεσία που είναι εγκατεστημένο το σύστημα και με τον τρόπο που φορτίζεται η μπαταρία. Η πιθανότητα της απώλειας φορτίου δεν μειώνεται αισθητά ακόμη και όταν η ισχύς αιχμής από τα φωτοβολταϊκά φτάσει τις 220 kW_p.

Για το λόγο αυτό σε περίπτωση μελλοντικής ανάπτυξης της εγκατάστασης η προσθήκη περισσότερων ανεμογεννητριών είναι περισσότερο συμφέρουσα και αποτελεσματική σε σχέση με την εναλλακτική των φωτοβολταϊκών.

Οι δείκτες αξιοπιστίας που παρουσιάζουν τα συστήματα που έχουν ανεμογεννήτριες σε αυτήν την εργασία είναι πολύ ελκυστικοί. Αυτό φαίνεται και από την σχηματική απεικόνιση της AAYK (Σχήμα 5.23) σε σχέση με τη διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας. Για ισχύ μεγαλύτερη των 100 kW η τιμή της AAYK είναι πάρα πολύ μικρή. Αντίθετα, η τιμή της AAYK δεν βελτιώνεται σε τέτοιο βαθμό με την προσθήκη φωτοβολταϊκών γεννητριών.

Στο Σχήμα 5.24 απεικονίζεται η επίδραση των ανανεώσιμων πηγών στην κατανάλωση του καυσίμου για συστήματα που δεν περιέχουν μπαταρία. Όπως είναι αναμενόμενο η κατανάλωση καυσίμου μειώνεται όσο αυξάνεται η ανανεώσιμη ενέργεια που υπεισέρχεται στο σύστημα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.17. Η κατανάλωση καυσίμου είναι σχεδόν μηδενική για ισχύ μεγαλύτερη των 100 kW. Ωστόσο και τα φωτοβολταϊκά εξοικονομούν σημαντική ποσότητα καυσίμου όσο αυξάνεται η ισχύς τους.

| με την ανανεώσιμη ενέργεια που διεισδύει στο σύστημα | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Διείσδυση Ανανεώσιμης Ενέργειας (kW) | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | |
| Επιπλέον Α/Γ | 6.4291 | 4.0422 | 1.4940 | 0.2169 | 0.0195 | 0.0021 | |
| Επιπλέον Φ/Β | 7.4700 | 6.9831 | 6.2075 | 5.4013 | 4.6010 | 3.8563 | |

Πίνακας 5.17: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου (l/h) σε σχέση



Σχήμα 5.24: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της ανανεώσιμης ενέργειας που διεισδύει στο σύστημα

5.3.4 Επίδραση του αιτιοκρατικού κριτηρίου

Η μεγαλύτερη συνεισφορά της προτεινόμενης ανάλυσης αξιοπιστίας είναι η ενσωμάτωση ενός συμβατικού αιτιοκρατικού κριτηρίου σε μία πιθανοτική μέθοδο [5.2]. Οι δείκτες αξιοπιστίας της ανάλυσης ευμάρειας μπορούν να αξιοποιηθούν μελλοντικά από τους διαχειριστές των απομονωμένων συστημάτων με σκοπό την ανάλυση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και της ορθής λειτουργίας των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Τα επιθυμητά περιθώρια εφεδρείας πρέπει να καθορίζονται έτσι ώστε να διατηρείται η υγιής κατάσταση του συστήματος και να περιορίζεται στο ελάχιστο η κατάσταση κινδύνου. Τα αποδεκτά επίπεδα για τις τρεις καταστάσεις του συστήματος είναι αποφάσεις που λαμβάνονται από τους διαχειριστές με βάση κυρίως οικονομικά κριτήρια. Επίσης σε διαφορετικές εφαρμογές απομονωμένων συστημάτων μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικά αιτιοκρατικά κριτήρια για το σχεδιασμό της παραγωγής και της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το κάθε κριτήριο έχει ωστόσο διαφορετικές επιδράσεις στις λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος [5.3].

Aιτιοκρατικό κριτήριο $AA\Omega$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΑΑΩ, για τιμές από 1 έως 7, στις τρεις καταστάσεις που μπορεί να υποπέσει το σύστημα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στα Σχήματα 5.25, 5.26, 5.27 και δείχνουν την μεταβολή των τριών καταστάσεων σε σχέση με το κριτήριο ΑΑΩ.



Σχήμα 5.25: ΠΥΚ συναρτήσει του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΑΑΩ

Στο Σχήμα 5.25 φαίνεται ότι η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται στην υγή κατάσταση μειώνεται όσο αυξάνεται η τιμή του ΑΑΩ, ενώ η πιθανότητα το σύστημα να βρεθεί στην οριακή κατάσταση αυξάνεται (Σχήμα 5.26). Επίσης η πιθανότητα απώλειας φορτίου παραμένει σταθερή με την αύξηση του δείκτη ΑΑΩ και για τους τρεις σχηματισμούς συστημάτων που εξετάστηκαν (Σχήμα 5.27). Επομένως, συμπεραίνεται πως η πιθανότητα υγιούς κατάστασης σχετίζεται άμεσα με το αποδεκτό αιτιοκρατικό κριτήριο. Όσο πιο απαιτητικό είναι το αιτιοκρατικό κριτήριο, τόσο λιγότερη είναι η υγιής κατάσταση του συστήματος. Αντίθετα η πιθανότητα απώλειας φορτίου είναι σταθερή τιμή για μία συγκεκριμένη τοποθεσία για τα απομονωμένα συστήματα, με δεδομένες συνθήκες παραγωγής, αποθήκευσης και ηλεκτρικού φορτίου. Στους Πίνακες 5.18, 5.19 και 5.20 φαίνονται αναλυτικά οι δείκτες της ανάλυσης ευμάρειας.

| για διαφορετικές τιμές του αιτιοκρατικού κριτηρίου | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| ΑΑΩ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Σενάριο 1 | 0.9934 | 0.9920 | 0.9855 | 0.9796 | 0.9728 | 0.9665 | 0.9531 |
| Σενάριο 2 | 0.8390 | 0.7806 | 0.7408 | 0.7072 | 0.6745 | 0.6378 | 0.6045 |
| Σενάριο 3 | 0.2399 | 0.1692 | 0.1167 | 0.08812 | 0.0561 | 0.0363 | 0.0252 |

Πίνακας 5.18: ΠΥΚ για τα Σενάρια 1, 2, 3 και

Πίνακας 5.19: ΠΟΚ για τα Σενάρια 1, 2, 3 και

| για διαφορετικές τιμές του αιτιοκρατικού κριτηριού | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| ΑΑΩ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| Σενάριο 1 | 0.0054 | 0.0070 | 0.0135 | 0.0190 | 0.0258 | 0.0323 | 0.0457 | |
| Σενάριο 2 | 0.1325 | 0.1896 | 0.2302 | 0.2643 | 0.2972 | 0.3332 | 0.3661 | |
| Σενάριο 3 | 0.4234 | 0.4925 | 0.5458 | 0.5807 | 0.6079 | 0.6273 | 0.6384 | |

Πίνακας 5.20: ΠΑΦ για τα Σενάρια 1, 2, 3 και

| για διαφορετικές τιμές του αιτιοκρατικού κριτηρίου | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| ΑΑΩ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| Σενάριο 1 | 0.0013 | 0.0009 | 0.0013 | 0.0015 | 0.0014 | 0.0011 | 0.0012 | |
| Σενάριο 2 | 0.0285 | 0.0298 | 0.0290 | 0.0285 | 0.0284 | 0.0290 | 0.0295 | |
| Σενάριο 3 | 0.3367 | 0.3383 | 0.3375 | 0.3380 | 0.3360 | 0.3364 | 0.3364 | |

Όπως είναι αναμενόμενο το σύστημα με τις ανεμογεννήτριες (Σενάριο 1) αποδίδει πολύ καλή πιθανότητα υγιούς κατάστασης ακόμη και για τη μεγαλύτερη τιμή του ΑΑΩ, ενώ αντίθετα το σύστημα με τα φωτοβολταϊκά (Σενάριο 3) παρουσιάζει πολύ μικρή πιθανότητα υγιούς κατάστασης ακόμη και για τη μικρότερη τιμή του ΑΑΩ. Η πιθανότητα απώλειας φορτίου είναι σταθερή, με μέση τιμή 0.337%, και θεωρείται πολύ υψηλή. Ωστόσο η πιθανότητα οριακής κατάστασης αυξάνεται και για το Σενάριο 3 και φτάνει τη μέγιστη τιμή για δείκτη ΑΑΩ ίσο με την τιμή 7. Το σύστημα που περιέχει ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά (Σενάριο 2) βρίσκεται στην ενδιάμεση κατάσταση και αποδίδει αρκετά καλή πιθανότητα υγιούς κατάστασης για ΑΑΩ ίσο με 1.



Σχήμα 5.26: ΠΟΚ συναρτήσει του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΑΑΩ



Σχήμα 5.27: ΠΑΦ συναρτήσει του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΑΑΩ

Αιτιοκρατικό κριτήριο ΠΕΙ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΠΕΙ, για τιμές από 0 έως 0.5, στις τρεις καταστάσεις που μπορεί να υποπέσει το σύστημα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στα Σχήματα 5.28, 5.29, 5.30 και δείχνουν την μεταβολή των τριών καταστάσεων σε σχέση με το κριτήριο ΠΕΙ.



Σχήμα 5.28: ΠΥΚ συναρτήσει του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΠΕΙ

Στο Σχήμα 5.28 φαίνεται ότι η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται στην υγή κατάσταση μειώνεται όσο αυξάνεται η τιμή του ΠΕΙ, ενώ η πιθανότητα το σύστημα να βρεθεί στην οριακή κατάσταση αυξάνεται (Σχήμα 5.29). Επίσης η πιθανότητα απώλειας φορτίου παραμένει σταθερή με την αύξηση του δείκτη ΠΕΙ και για τους τρεις σχηματισμούς συστημάτων που εξετάστηκαν (Σχήμα 5.30). Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η πιθανότητα απώλειας φορτίου δεν επηρεάζεται από το αιτιοκρατικό κριτήριο. Επομένως, συμπεραίνεται πως η πιθανότητα υγιούς κατάστασης σχετίζεται άμεσα με το αποδεκτό αιτιοκρατικό κριτήριο, ακριβώς όπως συμβαίνει και για το κριτήριο ΑΑΩ. Όσο πιο απαιτητικό είναι το αιτιοκρατικό κριτήριο, τόσο λιγότερη είναι η υγιής κατάσταση του συστήματος. Αντίθετα η πιθανότητα απώλειας φορτίου λαμβάνει σταθερή τιμή για μία συγκεκριμένη τοποθεσία για τα απομονωμένα συστήματα, με δεδομένες συνθήκες παραγωγής, αποθήκευσης και ηλεκτρικού φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί πως για μηδενικό ποσοστό εφεδρικής ισχύος (ΠΕΙ=0), η πιθανότητα οριακής κατάστασης είναι μηδενικό ποσοστό εφεδρικής ισχύος (ΠΕΙ=0), η πιθανότητα οριακής κατάστασης είναι μηδενικό ποσοστό εφεδρικής ισχύος (ΠΕΙ=0), πιθανότητα οριακής κατάστασης είναι μηδενικό ποσοστό εφεδρικής ισχύος (ΠΕΙ=0), πιθανότητα οριακής κατάστασης είναι μηδενικό ποσοστο εφεδρικής ισχύος (ΠΕΙ=0), πιθανότητα οριακής κατάστασης είναι μηδενικό ποσοστο εφεδρικής ισχύος (ΠΕΙ=0), πιθανότητα οριακής κατάστασης είναι μηδενική, καθώς σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει διαχωρισμός της οριακής από την υγή κατάσταση (Σχήμα 5.29). Στους Πίνακες 5.21, 5.22 και 5.23 φαίνονται αναλυτικά οι δείκτες της ανάλυσης ευμάρειας.



Σχήμα 5.29: ΠΥΚ συναρτήσει του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΠΕΙ



Σχήμα 5.30: ΠΥΚ συναρτήσει του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΠΕΙ

| Πίνακας 5.21: ΠΥΚ γ | ια τα Σενάρια 4, 5 και |
|---------------------|------------------------|
|---------------------|------------------------|

| για διαφορετικές τιμές του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΠΕΙ | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| ΠΕΙ | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | |
| Σενάριο 4 | 0.8152 | 0.7716 | 0.7319 | 0.6951 | 0.6622 | 0.6318 | |
| Σενάριο 5 | 0.5700 | 0.4615 | 0.3706 | 0.3119 | 0.2764 | 0.2523 | |

Πίνακας 5.22: ΠΟΚ για τα Σενάρια 4, 5 και

| για διαφορετικές τιμές του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΠΕΙ | | | | | | | |
|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| ΠΕΙ | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | |
| Σενάριο 4 | 0 | 0.0436 | 0.0839 | 0.1207 | 0.1530 | 0.1836 | |
| Σενάριο 5 | 0 | 0.1080 | 0.1999 | 0.2559 | 0.2924 | 0.3172 | |

| για διαφορετικές τιμές του αιτιοκρατικού κριτηρίου ΠΕΙ | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| ΠΕΙ | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | |
| Σενάριο 4 | 0.1848 | 0.1848 | 0.1842 | 0.1842 | 0.1849 | 0.1845 | |
| Σενάριο 5 | 0.4300 | 0.4305 | 0.4296 | 0.4322 | 0.4313 | 0.4305 | |

Πίνακας 5.23: ΠΑΦ για τα Σενάρια 4, 5 και

5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] R. Billinton, R. Karki, 'Cost-Effective Wind Energy Utilization for Reliable Power Supply', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No 2, June 2004.
- [5.2] B. and R. Billinton, 'Incorporating Well-Being Analysis Considerations in Generating Systems Using Energy Storage', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No 1, March 2005.
- [5.3] B. and R. Billinton, 'Evaluation of Different Operating Strategies in Small Stand-Alone Power Systems', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No 3, September 2005.
- [5.4] C.D Barley, C.B Winn, 'Optimal Dispatch Strategy in Remote Hybrid Power Systems', Solar Energy, Vol. 58, No 4-6, pp. 165-179, 1996.
- [5.5] R. Billinton, Y. Cui, 'Reliability Evaluation of Small Stand-Alone Wind Energy Conversion Systems Using a Time Series Simulation Model', IEEE Transactions Distribution, Vol. 150, No 1, January 2003

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo για την ανάλυση της αξιοπιστίας απομονωμένων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Κύριος σκοπός ήταν ο υπολογισμός των δεικτών αξιοπιστίας της ανάλυσης ευμάρειας, οι οποίοι αναγνωρίζουν την τυχαία φύση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας, τις διακυμάνσεις του ηλεκτρικού φορτίου, τις βλάβες των παραγωγικών μονάδων και γενικά τη λειτουργία του συστήματος. Η προσομοίωση Monte Carlo καθιστά δυνατό τον ταυτόχρονο υπολογισμό ενός μεγάλου αριθμού δεικτών αξιοπιστίας και παρέχει πληροφορίες τόσο για τις μέσες τιμές τους όσο και για την κατανομή των τιμών τους. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί με αυτό τον τρόπο είναι εφικτή η πρόβλεψη της διακύμανσης της απόδοσης ενός συστήματος.

Για την τοποθεσία που μελετήθηκε δεν ενδείκνυται η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με τη στρατηγική που εφαρμόστηκε για τη λειτουργία της μπαταρίας, οι δείκτες αξιοπιστίας έδειξαν πως το σύστημα κυμαίνεται κυρίως στην οριακή κατάσταση και έχει αρκετά αυξημένες πιθανότητες να μην μπορέσει να αντεπεξέλθει στην ζήτηση των καταναλωτών. Η χρήση των φωτοβολταϊκών θα απέδιδε καλύτερα αν οι μπαταρίες φόρτιζαν, όχι μόνο από τις ανανεώσιμες πηγές αλλά και από τη λειτουργία του εφεδρικού ντηζελοκινητήρα. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρειάζονται ντηζελοκινητήρα πολύ μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για να έχουν καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, πρωταρχικός σκοπός ήταν η ελαχιστοποίηση των συμβατικών καυσίμων και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ντηζελοκινητήρας μικρής ισχύος.

Τα συστήματα που περιέχουν μόνο ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν πάρα πολύ καλούς δείκτες αξιοπιστίας. Ειδικά τα συστήματα που έχουν δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν ελάχιστη πιθανότητα να μην μπορέσουν να τροφοδοτήσουν το ηλεκτρικό φορτίο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η επίδραση της μπαταρίας είναι πολύ σημαντική και αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία των συστημάτων. Επίσης, η μπαταρία σε υβριδικά συστήματα είναι αρκετά συμφέρουσα αφού μειώνει σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό εκκινήσεων του εφεδρικού ντηζελοκινητήρα και επομένως την πιθανότητα εμφάνισης βλάβης του. Όσο αφορά την κατανάλωση καυσίμου, η μπαταρία μειώνει αισθητά την κατανάλωση καυσίμου, κυρίως στα συστήματα που περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες.

Τέλος, τα συστήματα που περιέχουν φωτοβολταϊκή και αιολική τεχνολογία βρίσκονται σε μια ενδιάμεση κατάσταση. Παρουσιάζουν πολύ καλύτερους δείκτες αξιοπιστίας από τα συστήματα που περιέχουν μόνο φωτοβολταϊκά και χειρότερους από τα συστήματα που περιέχουν μόνο ανεμογεννήτριες. Τα φωτοβολταϊκά μειώνουν την αξιοπιστία του συστήματος. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως για μελλοντική αξιοποίηση της περιοχής συνίσταται η χρήση αιολικών συστημάτων, τα οποία σύμφωνα με τα τοπικά ατμοσφαιρικά δεδομένα μπορούν να αποδώσουν καλύτερα και να παράγουν αξιόπιστα ηλεκτρική ενέργεια για τους καταναλωτές.