



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΥΜΑΚΗ ΛΕΩΝΙΔΑ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ

ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ ΓΙΑΝΝΗΣ, Διδάκτορας

ΧΑΝΙΑ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2008

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 το Μάιο του 2007 και ολοκληρώθηκε το Νοέμβριο του 2008, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεωργιάκη Παύλου και του Διδάκτορα κ. Κατσίγιαννη Ιωάννη.

Με την ευκαιρία της παρουσίασης της εργασίας μου αυτής, θεωρώ χρέος μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν αποφασιστικά στην όλη μου προσπάθεια. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιάκη Παύλο, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το αντικείμενο των μικροδικτύων και με τη πολύτιμη βοήθεια του συνέβαλε στην επιτυχή διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Κατσίγιαννη Ιωάννη για τη βοήθειά του και το ενδιαφέρον του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που μου συμπαράσταθηκαν ηθικά αλλά και ψυχολογικά κατά τη διάρκεια όλης της φοιτητικής μου πορείας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λειτουργία μικροδικτύων, δηλαδή τμημάτων του δικτύου διανομής που λειτουργούν αυτόνομα και περιλαμβάνουν μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζουν ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Ένα από τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής τέτοιων συστημάτων, στον Ελληνικό χώρο, είναι η ηλεκτροδότηση μικρών κοινοτήτων οι οποίες βρίσκονται μακριά από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια αναφορά στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στις τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα μικροδίκτυα. Στη συνέχεια μοντελοποιείται ένα μικροδίκτυο που αποτελείται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και μια μηχανή diesel. Σκοπός της εργασίας είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της ενέργειας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μικροδίκτυα, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Ανεμογεννήτριες, Φωτοβολταϊκά, Μπαταρίες, Μηχανή Diesel, Κόστος Ενέργειας.

ABSTRACT

The operation of the microgrids, are parts of the distribution network which operate autonomously and include plants and storage of electricity, this shows special scientific interest. One of the most important fields of application of such systems, in Greece, is the electrification of small communities which are far from the electricity grid.

In the present diplomatic work is a reference of electricity systems and technologies that can be used by microgrids. Then we model a microgrid consisting of Wind Turbines photovoltaics, batteries and a diesel machine. The purpose of work is to minimize the cost of energy.

KEY WORDS

Microgrids, Distributed Generation, Wind Generators, Photovoltaics, Batteries, Diesel Generator, Cost of Energy.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Δομή της εργασίας	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Εισαγωγή	3
2.2	Περιγραφή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	3
2.3	Διεσπαρμένη παραγωγή και μικροδίκτυα	5
2.4	Βιβλιογραφία	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

3.1	Εισαγωγή	9
3.2	Φωτοβολταϊκά	10
	3.2.1 Παρακολούθηση τροχιάς ήλιου	10
	3.2.2 Χαρακτηριστική $I-V$	10
3.3	Ανεμογεννήτριες	13
	3.3.1 Άνεμος	13
	3.3.2 Ισχύς ανέμου	13
	3.3.3 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών	14
	3.3.4 Ισχύς ανεμογεννήτριας	16
3.4	Μηχανές εσωτερικής καύσης (diesel)	17
3.5	Μικρά υδροηλεκτρικά έργα	17
3.6	Κυψέλες καυσίμων	18
3.7	Βιομάζα	18
3.8	Βιβλιογραφία	20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

4.1	Εισαγωγή	21
4.2	Ανεμογεννήτριες	21
4.3	Φωτοβολταϊκά	23
4.4	Ντιζελογεννήτρια	28
4.5	Μπαταρίες	29
4.6	Στρατηγικές συνεργασίας στοιχείων μικροδικτύου	30
	4.6.1 Στρατηγική φόρτωσης κύκλου λειτουργίας	30
	4.6.2 Στρατηγική παρακολούθησης φορτίου	30
4.7	Αλγόριθμος μικροδικτύου	34
4.8	Οικονομικά	36
	4.8.1 Ετήσια κόστη	36
	4.8.2 Παραλλαγές για τον υπολογισμό ετήσιου κόστους στα υπόλοιπα στοιχεία	39

4.8.3	Κόστος ανά μονάδα ενέργειας	39
4.9	Βιβλιογραφία	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΕΝΑΡΙΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1	Εισαγωγή	41
5.2	Κοινά δεδομένα	41
5.3	Σύνδεση με το δίκτυο διανομής	42
	5.3.1 Συμπεράσματα	54
	5.3.2 Κόστος ενέργειας με βάση το HOMER	54
5.4	Απομονωμένο μικροδίκτυο	57
	5.4.1 Συμπεράσματα	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

65

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιείται ένα μικροδίκτυο. Το μικροδίκτυο αποτελείται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και μια μηχανή diesel. Σκοπός είναι να βρεθεί η παραγωγή ενέργειας της κάθε μονάδας, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της ενέργειας, υπό την προϋπόθεση ότι καλύπτεται η ζήτηση σε ενέργεια. Η μία περίπτωση που εξετάζεται θεωρεί ότι το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο και η άλλη περίπτωση θεωρεί ότι είναι απομονωμένο. Το μικροδίκτυο είναι δυνατόν είτε να αγοράζει είτε να πουλάει ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο, εφόσον είναι συνδεδεμένα.

1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.), τα μικροδίκτυα και η διεσπαρμένη παραγωγή.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται κάποιες τεχνολογίες από τις οποίες μπορεί να αποτελείται ένα μικροδίκτυο. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες, τις μηχανές εσωτερικής καύσης diesel, τα μικρά υδροηλεκτρικά δίκτυα, τις κυψέλες καυσίμων και τη βιομάζα.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση που έγινε στα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το μικροδίκτυο. Μοντελοποιούνται δηλαδή τα φωτοβολταϊκά, οι ανεμογεννήτριες και οι μπαταρίες. Επίσης μοντελοποιούνται και οι δύο στρατηγικές που εφαρμόστηκαν για την συνεργασία των στοιχείων του μικροδικτύου. Τέλος μοντελοποιείται η τακτική με την οποία υπολογίστηκε το κόστος ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 5 εξετάζονται διάφορα σενάρια. Σε κάθε σενάριο υπολογίζεται η ισχύς της μηχανής diesel, ο αριθμός των ανεμογεννητριών, η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών και ο αριθμός των μπαταριών που απαιτούνται ώστε το κόστος ενέργειας να είναι ελάχιστο. Επίσης καταγράφονται συμπεράσματα και παρατηρήσεις.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, το κεφάλαιο 6, αναφέρονται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν.

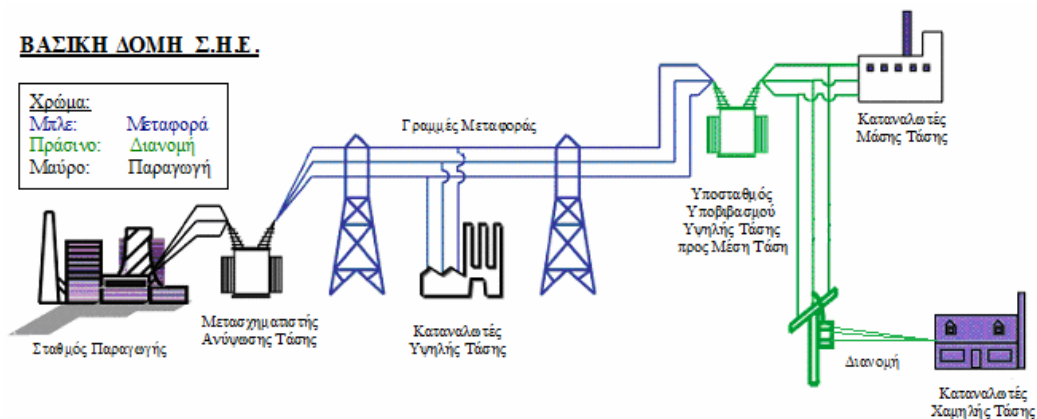
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.). Είναι μία από τις μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, τα σπίτια, τις επιχειρήσεις και τη μεταφορά. Έχει πολλά επιθυμητά χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως ότι είναι καθαρή, σχετικά εύκολο να μεταφερθεί από το σημείο της πηγής στο σημείο της κατανάλωσης και είναι ιδιαίτερα εύκαμπτη στη χρήση της. Είναι ζωτικής σημασίας για το σύγχρονο τρόπο ζωής [2.1]. Ο πρωταρχικός σκοπός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η τάση και η συχνότητα πρέπει να είναι σταθερές παρόλο που η ζήτηση μεταβάλλεται. Επίσης πολύ σημαντικό είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερο και να ρυπαίνει όσο γίνεται λιγότερο το περιβάλλον [2.2].

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τους σταθμούς παραγωγής, την μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και από το φορτίο. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [2.2].



Σχήμα 2.1: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν ανάλογα με το είδος της πρωτογενούς ενέργειας που μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, το είδος του καυσίμου που καταναλώνουν και την τεχνολογία. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται είτε από συμβατικούς είτε από ανανεώσιμους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά σε μερικούς από τους σταθμούς αυτούς. Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο σταθμός, τόσο φτηνότερη είναι η ενέργεια ανά kWh [2.2] [2.3].

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τους σταθμούς παραγωγής έχει χαμηλή τάση. Για να μεταφερθεί πιο οικονομικά η ενέργεια πρέπει πρώτα να ανυψωθεί η τάση με την βοήθεια των μετασχηματιστών ανύψωσης τάσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς της ενέργειας, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τάση μεταφοράς για οικονομικούς λόγους. Τελικά, η ενέργεια καταλήγει στους υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής τάσης προς μέση τάση. Γενικά, η τάση μεταφέρεται με τριφασικές γραμμές ή με γραμμές συνεχούς ρεύματος. Οι τριφασικές γραμμές μεταφέρουν μέχρι 750 kV και οι γραμμές συνεχούς ρεύματος μέχρι 533 kV.

Οι γραμμές μεταφοράς είναι είτε εναέριες είτε υπόγειες. Οι εναέριες γραμμές είναι πιο οικονομικές και επισκευάζονται εύκολα και γρήγορα. Ωστόσο πρέπει να υπάρχει δυνατότητα στήριξης σε πύργους. Για παράδειγμα, η μεταφορά ενέργειας σε νησιά γίνεται μόνο με υπόγεια καλώδια [2.3].

Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ενέργεια μεταφέρεται από το σύστημα μεταφοράς στους υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής τάσης προς μέση τάση. Μετά τους υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής τάσης προς μέση τάση η ενέργεια οδηγείται στο σύστημα διανομής μέσης τάσης και στους υποσταθμούς υποβιβασμού μέσης τάσης προς χαμηλή τάση. Το σύστημα διανομής μέσης τάσης είναι υπεύθυνο για την τροφοδότηση με ενέργεια των καταναλωτών μέσης τάσης. Η ενέργεια που φτάνει στους υποσταθμούς υποβιβασμού μέσης τάσης προς χαμηλή τάση καταλήγει τελικά στο σύστημα διανομής χαμηλής τάσης, το οποίο τροφοδοτεί με ενέργεια τους καταναλωτές χαμηλής τάσης [2.3].

Φορτίο

Το φορτίο αποτελείται από όλους τους καταναλωτές του Σ.Η.Ε. Έτσι οι καταναλωτές χωρίζονται σε καταναλωτές υψηλής τάσης, σε καταναλωτές μέσης τάσης και σε καταναλωτές χαμηλής τάσης. Καταναλωτές υψηλής τάσης είναι οι πολύ μεγάλες βιομηχανίες και μάλιστα τροφοδοτούνται κατευθείαν από το σύστημα μεταφοράς. Καταναλωτές μέσης τάσης είναι συνήθως μικρές βιομηχανίες. Αυτοί εξυπηρετούνται από το σύστημα διανομής μέσης τάσης. Τέλος οι καταναλωτές χαμηλής τάσης είναι τα σπίτια, τα μικρά καταστήματα και γενικότερα οι μεμονωμένοι

καταναλωτές. Αυτοί τροφοδοτούνται με ενέργεια από το σύστημα διανομής χαμηλής τάσης [2.3].

2.3 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

Η Διεσπαρμένη παραγωγή αναφέρεται σε μονάδες παραγωγής μικρής ισχύος, οι οποίες είναι κοντά στο κέντρο κατανάλωσης. Το κέντρο κατανάλωσης μπορεί να είναι ένα σπίτι, μια κοινότητα, μία βιομηχανία και οτιδήποτε άλλο καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια. Σε γενικές γραμμές, τα χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής είναι ότι δεν σχεδιάζονται από την κεντρική εταιρία ηλεκτρισμού, δεν υπάρχει κεντρικός προγραμματισμός λειτουργίας, έχουν σχετικά μικρή ισχύ και τέλος δεν υπάρχει συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσής της στο δίκτυο διανομής, αλλά προκύπτει μετά από έρευνα.

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής. Τα κυριότερα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Προστασία του περιβάλλοντος επειδή χρησιμοποιούνται και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Βελτιώνεται η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας και υπάρχει δυνατότητα εφεδρείας.
- Ελαττώνονται οι απώλειες κατά την μεταφορά και οι συμφορήσεις στην λειτουργία του δικτύου.
- Είναι συμφέρουσα επένδυση και στην περίπτωση αντικατάστασης παλαιωμένου εξοπλισμού.
- Είναι σχετικά εύκολο να βρεθεί μια τοποθεσία εγκατάστασης και ο χρόνος εγκατάστασης που απαιτείται είναι μικρός.

Υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής. Τα κυριότερα από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το αρχικό κόστος ανά KW είναι αρκετά υψηλό.
- Η πλειονότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι φιλικά προς το περιβάλλον και κατά συνέπεια περιορίζονται οι επιλογές.

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της διεσπαρμένης παραγωγής είναι ότι εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παράγει και θερμότητα, η οποία προέρχεται από την μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια (CHP). Η θερμότητα αυτή μειώνει την εκπομπή αέριων ρύπων και αυξάνει την αποδοτικότητα των πρωτογενών πηγών ενέργειας. Επίσης, η θερμότητα που παράγεται είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την παροχή θέρμανσης και ζεστού νερού στα κτίρια. Σήμερα συναντώνται μεσαίου μεγέθους εφαρμογές CHP σε βιομηχανικά συστήματα και σε σπίτια για οικιακή χρήση. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Αγγλία σχεδόν το 50% της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για θέρμανση και ζεστό νερό.

Ο συνδυασμός μικρών μονάδων παραγωγής με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και η σύνδεσή τους με το κεντρικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να οργανωθεί με τα μικροδίκτυα. Οι μονάδες παραγωγής είναι ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες. Η σύνδεση του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο είναι καθορισμένη και ελεγχόμενη. Συνήθως, οι μικροπηγές συνδέονται με το υπόλοιπο

δίκτυο μέσω μετατροπέων, οι οποίοι τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν σημαντική εξέλιξη. Οι σύγχρονοι μετατροπείς δίνουν την δυνατότητα να ελεγχθούν πάρα πολλές λειτουργίες, όπως η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος και κατά συνέπεια η τάση και η συχνότητα του δικτύου σε απομονωμένη λειτουργία. Αντίθετα, τα μεγάλα δίκτυα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται αποκλειστικά σε στρεφόμενες μάζες οι οποίες είναι απαραίτητες για την ευστάθεια του δικτύου. Το μικροδίκτυο είναι υποχρεωμένο να παρέχει στους καταναλωτές καλή ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργούν και χωρίς το κεντρικό δίκτυο.

Τα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων είναι παρόμοια με αυτά της διεσπαρμένης παραγωγής. Ένα από αυτά είναι η μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια (CHP). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης των συστημάτων στα επίπεδα 70-80%. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι η ανάπτυξη των μικροδικτύων είναι πιθανόν να συμβάλει στη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και να μετριαστεί η αλλαγή του κλίματος. Αυτό συμβαίνει διότι τα μικροδίκτυα λειτουργούν με βάση τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μικρές μονάδες παραγωγής που εκπέμπουν χαμηλά ποσοστά καυσαερίων. Ακόμη, η λειτουργία των μικροδικτύων βοηθάει να μειωθούν οι απώλειες και να γίνεται πιο σωστή διαχείριση της παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας. Ο καταναλωτής μπορεί να ωφεληθεί από το τοπικό επίπεδο παραγωγής με ποικίλους τρόπους, όπως με την αύξηση της αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος της παρεχόμενης ενέργειας και σε απελευθερωμένη αγορά με την μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών του αναγκών.

Τα πλεονεκτήματα του δικτύου διανομής μέσης τάσης από τα μικροδίκτυα είναι η δυνατότητα αναβολής επενδύσεων για την ενίσχυση των δικτύων μεταφοράς και διανομής, λιγότερες απώλειες ενέργειας και μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου [2.4].

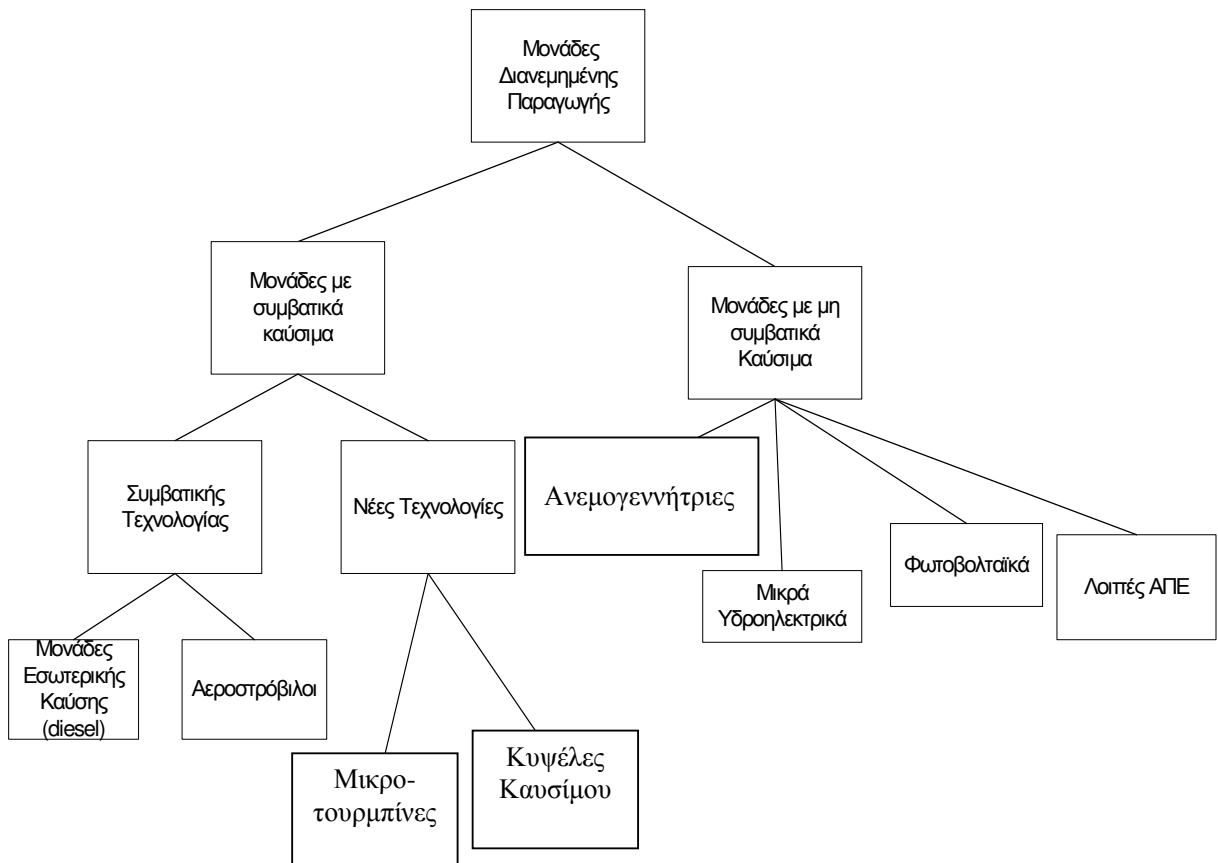
2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Leonard Leo Grigsby, *“The Electric Power Engineering Handbook”*, CRC Press, United States of America 2001.
- [2.2] Π Γεωργιάκης, *“Ηλεκτρική Οικονομία”*, Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά Σεπτέμβριος 2006.
- [2.3] Γ. Τσακινόπουλος, *“Μοντελοποίηση Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση των δικτύων Petri”*, Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2001.
- [2.4] www.elsevier.com/locate/rser, *“Can microgrids make a major contribution to UK energy supply?”*.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μικροδίκτυα χρησιμοποιούν συνήθως ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι κυριότερες από τις οποίες φαίνονται στο Σχήμα 3.1. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν τα βασικά στοιχεία του φωτοβολταϊκού και της ανεμογεννήτριας και θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε μερικές από τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής.



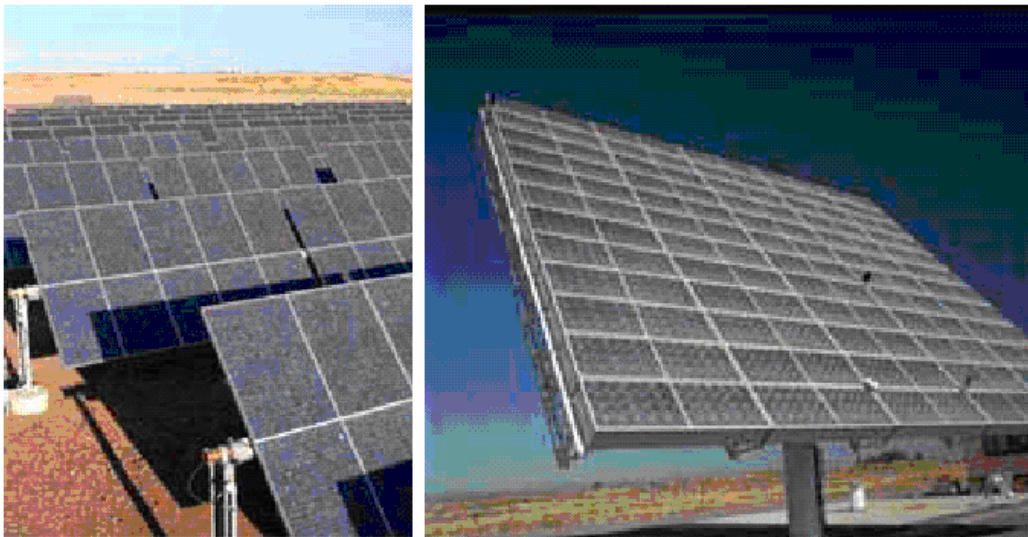
Σχήμα 3.1: Τεχνολογίες μονάδων διανεμημένης παραγωγής.

3.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

Το φωτοβολταϊκό είναι μια συσκευή που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική τάση και ρεύμα. Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών βασίζεται στους ημιαγωγούς, οι οποίοι κάνουν την παραπάνω μετατροπή. Παράγουν συνεχή τάση και η μετατροπή της σε εναλλασσόμενη γίνεται με τη βοήθεια ενός αντιστροφέα. Η απόδοσή τους κυμαίνεται μεταξύ 8-12% και εξαρτάται κυρίως από την τεχνολογία τους, από τη θέση του ήλιου, από το αν είναι ξάστερος ο ουρανός, από την καθαριότητα των φωτοβολταϊκών και από την θερμοκρασία [3.1] [3.2].

3.2.1 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΗΛΙΟΥ

Η βάση του συλλέκτη μπορεί να είναι ακίνητη ή να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου. Οι βάσεις που κινούνται χωρίζονται σε βάσεις ιχνηλασίας με δύο άξονες, οι οποίες ακολουθούν τις γωνίες αζιμούθιου και ύψους του ήλιου και σε βάσεις ιχνηλασίας με ένα άξονα που ακολουθούν τη μία από τις δύο παραπάνω γωνίες. (Οι δύο αυτές γωνίες αναλύονται στη παράγραφο 4.2). Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται οι δύο κατηγορίες κινούμενης βάσης. Τα συστήματα με κινούμενη βάση είναι πιο αποδοτικά αλλά είναι ακριβότερα και έχουν υψηλότερο κόστος συντήρησης [3.1] [3.3].



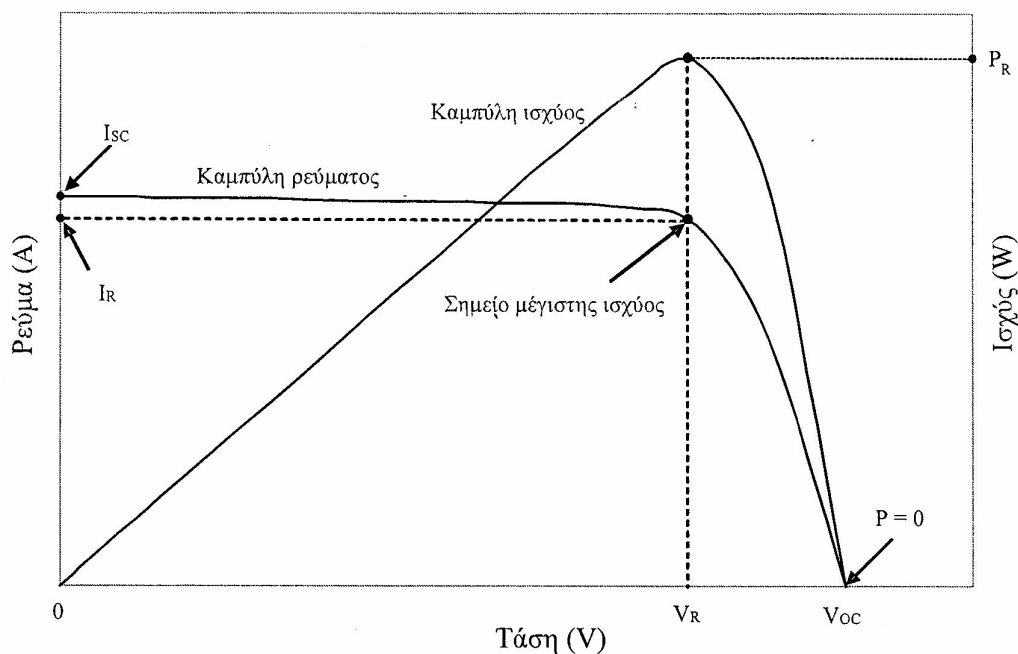
Σχήμα 3.2: Βάσεις ιχνηλασίας με ένα άξονα (αριστερά) και βάσεις ιχνηλασίας με δύο άξονες (δεξιά).

3.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ $I-V$

Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει μια χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος $I-V$ η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή. Η χαρακτηριστική $I-V$ δείχνει για κάθε τάση του φωτοβολταϊκού πόσο είναι το ρεύμα σε πρότυπες συνθήκες. Οι πρότυπες συνθήκες αναφέρονται σε ηλιακή ένταση 1 kW/m^2 , λόγο μάζας αέρα AM 1,5 και θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου δεν είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (ο τρόπος υπολογισμού της

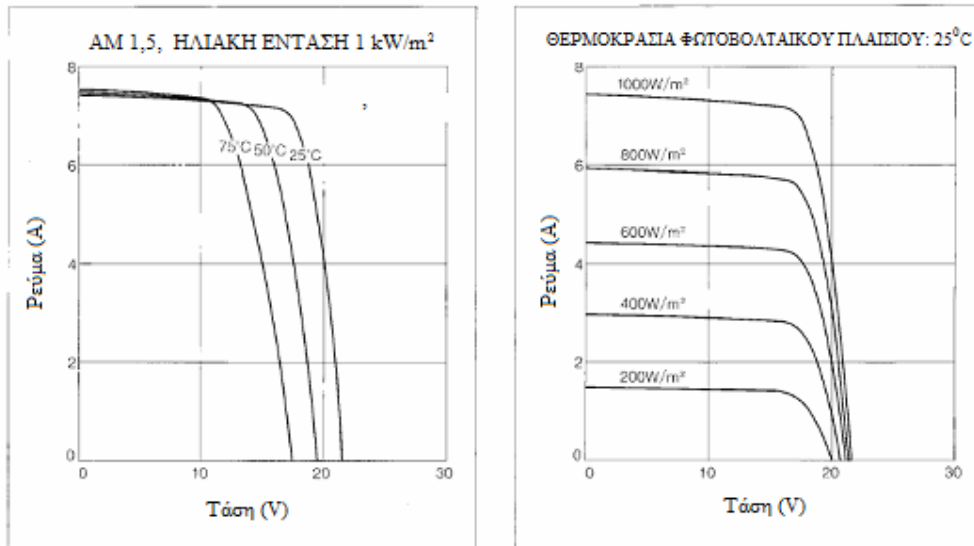
θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου δίνεται στο τέλος της ενότητας). Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, όταν οι συνθήκες δεν είναι πρότυπες αλλάζει η χαρακτηριστική $I-V$. Είναι πολύ σημαντική επειδή η ισχύς ισούται με το γινόμενο του ρεύματος I επί της τάσης V , οπότε αν είναι γνωστή μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς P για κάθε συνδυασμό $I-V$. Επίσης μπορεί να βρεθεί για ποιο συνδυασμό $I-V$ προκύπτει η μέγιστη ισχύς. Η μέγιστη ισχύς αντιστοιχεί σε ονομαστικό ρεύμα I_R και ονομαστική τάση V_R . Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική $I-V$ και η καμπύλη ισχύος της.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3 όταν η τάση ή το ρεύμα είναι μηδέν, τότε και η ισχύς είναι μηδέν, αφού $P=V \cdot I$. Η τάση είναι μηδέν στο βραχυκύκλωμα, δηλαδή όταν οι ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού είναι βραχυκυκλωμένοι. Το ρεύμα που διαρρέει το φωτοβολταϊκό στην περίπτωση αυτή ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} . Το ρεύμα είναι μηδέν στο ανοικτοκύκλωμα, δηλαδή όταν οι ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού είναι ανοιχτοί. Η τάση στο ανοικτοκύκλωμα ονομάζεται τάση ανοικτοκύκλωσης V_{OC} . Τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης, όσο και η τάση ανοικτοκύκλωσης δίνονται από τον κατασκευαστή του φωτοβολταϊκού.

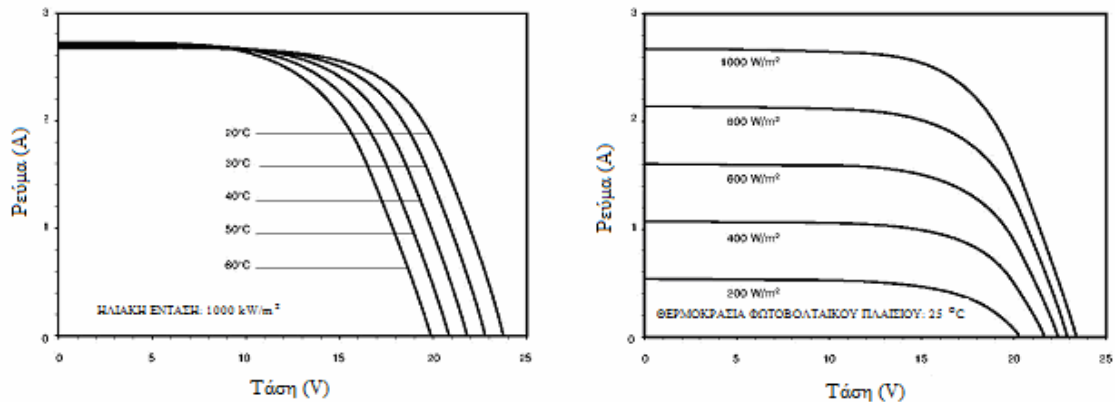


Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστική $I-V$ και καμπύλη ισχύος της.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η χαρακτηριστική $I-V$ αλλάζει μορφή όταν οι συνθήκες δεν είναι πρότυπες. Πιο συγκεκριμένα, όταν μειώνεται η ηλιακή ένταση, τότε το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} μειώνεται ανάλογα ενώ η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{OC} μειώνεται λογαριθμικά. Όταν μειώνεται η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου, τότε η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{OC} αυξάνεται αρκετά και το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται ελάχιστα. Το Σχήμα 3.4 και το Σχήμα 3.6 δείχνουν πως αλλάζουν οι χαρακτηριστικές $I-V$ όταν αλλάζει η θερμοκρασία και η ηλιακή ένταση. Πρόκειται για το φωτοβολταϊκό Keyocera KC-120-1 και το Shell ST40.



Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστική $I-V$ υπό διάφορες θερμοκρασίες και χαρακτηριστική $I-V$ υπό διάφορες ηλιακές εντάσεις για το μοντέλο Keyocera KC-120-1.



Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστική $I-V$ υπό διάφορες θερμοκρασίες χαρακτηριστική $I-V$ υπό διάφορες ηλιακές εντάσεις για το μοντέλο Shell ST40.

Αναφέρθηκε πριν ότι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου δεν είναι ίδια με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όμως εξαρτάται από αυτήν. Εξαρτάται επίσης από την ηλιακή ένταση και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^{\circ}}{0.8} \right) S \quad (2.1)$$

Στην παραπάνω σχέση T_{cell} είναι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε βαθμούς κελσίου, T_{amb} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε βαθμούς

κελσίου, S η ηλιακή ένταση σε kW/m^2 και ο δείκτης $NOCT$ είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Για το δείκτη $NOCT$ πρέπει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος να είναι $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, η ηλιακή ένταση $0,8\text{ kW/m}^2$ και η ταχύτητα του ανέμου 1 m/s [3.1]. Στο κεφάλαιο 4.2 παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία υπολογισμού της ενέργειας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά.

3.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Η απόδοσή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την τεχνολογία τους, την πυκνότητα του αέρα, το ύψος του πύργου και βέβαια από την ισχύ του ανέμου. Έχουν εξελιχθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια, ωστόσο το αρχικό κόστος που απαιτείται για την εγκατάστασή τους είναι υψηλό σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής [3.2].

3.3.1 ΑΝΕΜΟΣ

Η ταχύτητα του ανέμου δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια. Μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους και από περιοχή σε περιοχή. Ωστόσο αν μετράται κάθε μία ώρα για τρία έως πέντε έτη μπορεί να γίνει μια καλή πρόβλεψη για το μέλλον. Μετά από πολλές μετρήσεις σε πολλές περιοχές του κόσμου, διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί με ικανοποιητική προσέγγιση την κατανομή Weibull [3.1].

3.3.2 ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΟΥ

Η κινητική ενέργεια E του ανέμου με μάζα m και ταχύτητα U δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2}mU^2 \quad (2.2)$$

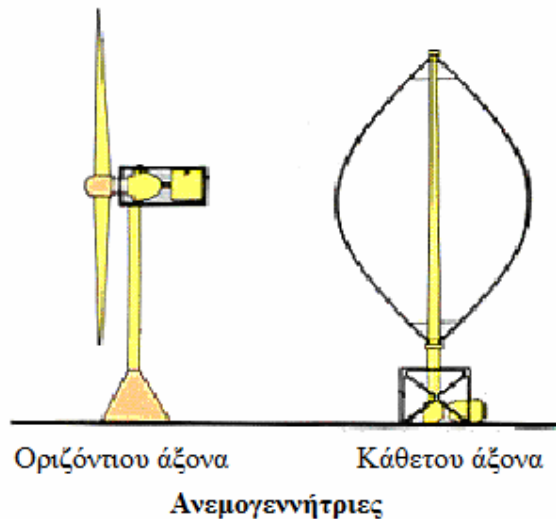
Η ισχύς P μίας ποσότητας ανέμου ισούται με την ανά μονάδα χρόνου κινητική ενέργεια που περιέχεται σε αυτήν, επομένως:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \frac{m}{t} U^2 = \frac{1}{2} (\rho A U) U^2 \Rightarrow P = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.3)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ανέμου και A το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής μέσα από την οποία περνάει η μάζα του ανέμου [3.1].

3.3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμοκινητήρες χωρίζονται σε οριζόντιου άξονα και κατακόρυφου άξονα όπως δείχνει το Σχήμα 3.6. Οι ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα υπερτερούν και χρησιμοποιούνται περισσότερο. Ένας άλλος διαχωρισμός των ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σύμφωνα με το παραπάνω κριτήριο μπορούν να διαχωριστούν σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας του δρομέα και σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας του δρομέα. Όλες οι ανεμογεννήτριες παράγουν τάση σταθερής συχνότητας.



Σχήμα 3.6: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κάθετου άξονα.

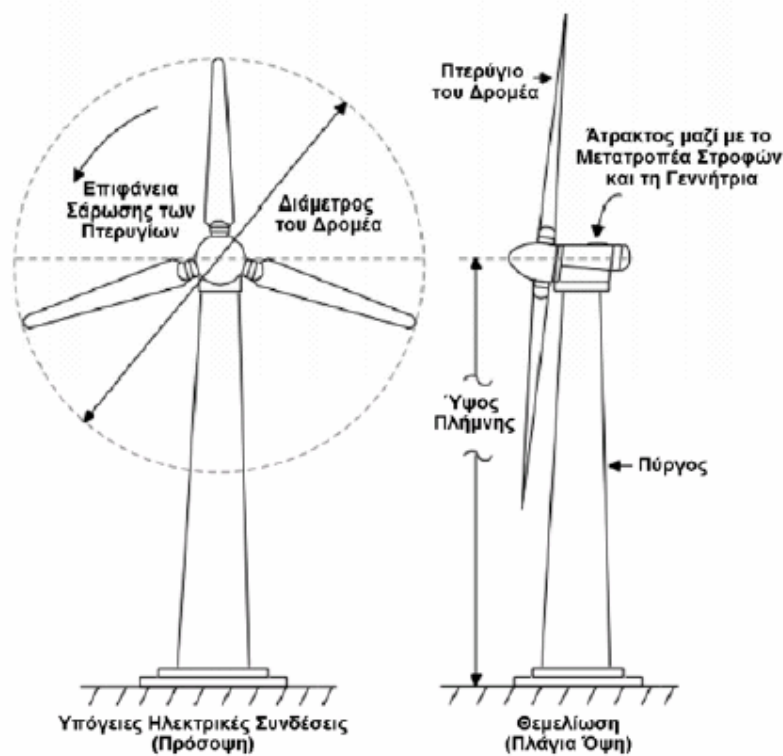
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τρία βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας και φαίνονται στο Σχήμα 3.7.

1. Ο δρομέας αποτελείται από τα πτερύγια. Ο δρομέας κινεί την ηλεκτρογεννήτρια μέσω ενός άξονα και για αυτό το λόγο πρέπει να κινείται γρήγορα. Γενικά, όσο λιγότερα πτερύγια έχει ο δρομέας, τόσο γρηγορότερα κινείται. Έτσι αποτελείται συνήθως από δύο ή τρία πτερύγια. Οι μεγάλοι δρομείς μπορούν να παράγουν ισχύ τάξης μεγέθους μερικών MW.
2. Η άτρακτος περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, τον μετατροπέα των στροφών, την ηλεκτρογεννήτρια, άξονες, συνδέσμους, κάλυμμα ατράκτου και αρκετές φορές ένα μηχανικό δισκόφρενο και ένα σύστημα εκτροπής. Ο μετατροπέας των στροφών μαζί με μια γεννήτρια αυξάνουν τη συχνότητα του δρομέα. Η συχνότητα του δρομέα είναι συνήθως 0,5 Hz ενώ η συχνότητα ενός δικτύου είναι 50 Hz. Η ηλεκτρογεννήτρια μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το σύστημα εκτροπής. Πρόκειται για ένα σύστημα που ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα με την κατεύθυνση του ανέμου, έτσι ώστε να απορροφήσει η ανεμογεννήτρια όσο το δυνατόν περισσότερη ισχύ από τον άνεμο.

3. Ο πύργος στηρίζει την άτρακτο και τον δρομέα. Το ύψος του πύργου επηρεάζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας. Αυτό συμβαίνει επειδή στην επιφάνεια του εδάφους υπάρχουν εμπόδια που επιβραδύνουν την ταχύτητα του ανέμου. Η επιβράδυνση μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, αν το έδαφος έχει πολλά εμπόδια, δηλαδή αν είναι τραχύ. Τα εμπόδια μπορεί να είναι δέντρα, σπίτια ή οτιδήποτε άλλο. Η σχέση που δίνει την εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου από την τραχύτητα και το ύψος του πύργου είναι:

$$\frac{U}{U_0} = \left[\frac{H}{H_0} \right]^a \quad (2.3)$$

όπου U και U_0 η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H και H_0 αντίστοιχα. Το a αναφέρεται στη τραχύτητα του εδάφους [3.1] [3.3].



Σχήμα 3.7: Βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας.

3.3.4 ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Όπως υπολογίστηκε και στην παράγραφο 3.3.2, η ισχύς του ανέμου είναι:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.4)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής μέσα από την οποία περνάει η μάζα του ανέμου. Αν η ανεμογεννήτρια είναι οριζόντιου άξονα και η διάμετρος του πτερυγίου είναι D , τότε το A είναι:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.5)$$

και η ισχύς του ανέμου είναι:

$$P = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} U^3 \quad (2.6)$$

Αν η απόδοση του δρομέα είναι C_p , τότε η μηχανική ισχύς P_m που λαμβάνει ο δρομέας είναι:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A U^3 C_p \quad (2.7)$$

Τελικά, ένα ποσοστό της μηχανικής ισχύς μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ P_e , το οποίο εξαρτάται από το συνολικό βαθμό απόδοσης της ανεμογεννήτριας n_t [3.1]:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A U^3 C_p n_t \quad (2.8)$$

3.4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ (DIESEL)

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης μετατρέπουν κάποιο καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μηχανές diesel ανάλογα με τον μέγιστο αριθμό στροφών ανά λεπτό (σ.α.λ) που αναπτύσσουν μπορούν να ταξινομηθούν σε αργόστροφες, σε μεσαίων στροφών και σε πολύστροφες οι οποίες φτάνουν τις 350, τις 1200 και τις 5000 στροφές ανά λεπτό ανάλογα. Επίσης διακρίνονται ανάλογα με την ισχύ που αποδίδουν ανά κύλινδρο. Έτσι, μηχανές που αποδίδουν μέχρι 25 ίππους ανά κύλινδρο είναι μικρής ισχύος, μηχανές που αποδίδουν από 25 έως 200 ίππους ανά κύλινδρο είναι μέσης ισχύος και μηχανές που αποδίδουν πάνω από 200 ίππους ανά κύλινδρο είναι υψηλής ισχύος [3.4]. Έχουν συνήθως μια χρήσιμη διάρκεια ζωής 30.000 ωρών, αλλά αυτό μπορεί να μειωθεί δραστικά εάν η συντήρηση είναι φτωχή. Η αποδοτικότητα εξαρτάται από την τεχνολογία, τον τύπο καυσίμων και τη φόρτωση της μηχανής. Έναντι των γεννητριών ανανεώσιμης ενέργειας, οι μηχανές diesel έχουν πολύ χαμηλότερες δαπάνες (\$300-600/kW) και παράγουν ισχύ κατά απαίτηση.

Μειονεκτήματα είναι η εξάρτησή τους από τα καύσιμα, οι δαπάνες μεταφορών, οι δαπάνες αποθήκευσης και οι εκπομπές. Είναι ο πιο κοινός τύπος γεννήτριας που χρησιμοποιείται στα μικρά και απομακρυσμένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Είναι εύκολα διαθέσιμοι στις περισσότερες μεγάλες κωμοπόλεις και σε πόλεις στις αναπτυσσόμενες χώρες. Υπάρχουν συνήθως καθιερωμένα ανταλλακτικά και ένα δίκτυο συντήρησης τόσο στα αστικά όσο και στα αγροτικά κέντρα [3.5].

3.5 ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ

Οι υδατοπτώσεις χρησιμοποιούνται αρκετά χρόνια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή όμως τα μεγάλα φράγματα μπορεί να βλάψουν το περιβάλλον υπάρχουν νόμοι που απαγορεύουν τη κατασκευή μεγάλων φραγμάτων. Στην Ελλάδα η υδροηλεκτρική παραγωγή δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει τα 10 MW [3.2]. Συνήθως για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ένα φράγμα σε έναν ποταμό ώστε να διατηρήσει μία μεγάλη ποσότητα νερού. Στη συνέχεια, το νερό απελευθερώνεται και από τις γεννήτριες παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Μπορεί όμως να παραχθεί ενέργεια και με την φυσική ροή του ποταμού. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι ανάλογη της παροχής του νερού και της υψομετρικής διαφοράς που καλύπτει το νερό. Είναι προφανές ότι ανάλογη ισχύς μπορεί να παραχθεί τόσο από μια μεγάλη ποσότητα νερού που πέφτει από μικρό ύψος, όσο και από μια μικρή ποσότητα νερού που πέφτει από μεγάλο ύψος. Στη πρώτη περίπτωση, οι διαστάσεις των επιμέρους συνιστωσών του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού θα είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές της δεύτερης περίπτωσης. Κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μικρών υδροηλεκτρικών έργων είναι η υψηλή τους απόδοση, η αυτόνομη λειτουργία τους, η αξιοπιστία τους και η άριστη ποιότητα ενέργειας που παράγουν αφού δεν έχει διακυμάνσεις. Ακόμη έχουν άριστη διαχρονική συμπεριφορά και μεγάλη διάρκεια ζωής. Επίσης, έχουν μικρό χρόνο απόσβεσης εξαιτίας του χαμηλού κόστους συντήρησης και λειτουργίας και επειδή δεν έχουν κόστος πρώτης ύλης. Τέλος, είναι φιλικά προς το περιβάλλον, αφού δεν εκπέμπουν ρύπους και μπορούν να ικανοποιήσουν ταυτόχρονα και άλλες ανάγκες νερού όπως ύδρευσης και άρδευσης [3.4] [3.6].

3.6 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Οι κυψέλες καυσίμων είναι μία ηλεκτροχημική συσκευή ενεργειακής μετατροπής που μετατρέπει το υδρογόνο και το οξυγόνο σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καύση. Έχουν ποικίλες εφαρμογές όπως παραγωγή ενέργειας και θερμότητας για ξενοδοχεία, νοσοκομεία και σπίτια. Επίσης, έχουν εφαρμογή στην αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας, στις μεταφορές με διαστημόπλοια, υποβρύχια, τραίνα και λεωφορεία. Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις φορητές συσκευές ισχύος όπως είναι τα φορητά τηλέφωνα, οι φορητοί υπολογιστές, οι κάμερες και οι φορητές συσκευές ήχου. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης των κυψελών καυσίμων είναι υψηλό και περίπου \$4000 / kW.

Οι κυψέλες καυσίμων έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Έχουν ελάχιστες εκπομπές ρύπων επομένως είναι φιλικές προς το περιβάλλον, δεν έχουν κινητά μέρη που συνεπάγεται ήσυχη λειτουργία και μικρή συντήρηση. Επίσης, έχουν μεγάλη απόδοση στην μετατροπή ηλεκτρισμού της τάξης του 49-65%. Σαν αέριο ή υγρό, το υδρογόνο μπορεί εύκολα να μεταφερθεί, να αποθηκευτεί και τελικά να χρησιμοποιηθεί. Ακόμη, το υγρό υδρογόνο είναι η ασφαλέστερη και πιο οικονομική επιλογή για την κίνηση της ενέργειας από τους ωκεανούς. Το υδρογόνο είναι το πιο ασφαλές από όλα τα καύσιμα επειδή είναι 14 φορές ελαφρότερο από τον αέρα και γι' αυτό διαχέεται ταχέως στην ατμόσφαιρα στην περίπτωση ενός ατυχήματος ενώ τα άλλα καύσιμα έχουν μεγάλο χρόνο επικινδυνότητας έως ότου ξεφύγουν από τη θέση τους [3.5] [3.7].

Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες για τις κυψέλες καυσίμων και διακρίνονται ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη τους. Μερικοί από τους διαφορετικούς τύπους ηλεκτρολυτών περιλαμβάνουν το φωσφορικό οξύ (PAFC), το λειωμένο ανθρακικό άλας (MCFC), το στερεό οξειδίο (SOFC) και τη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC). Η τεχνολογία PAFC είναι σήμερα διαθέσιμη στο εμπόριο και η απόδοσή της είναι αρκετά υψηλή. Λειτουργεί σε θερμοκρασία μεταξύ 150 με 200 °C ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η απόδοσή της πέφτει πάρα πολύ. Τα μειονεκτήματα των PAFC είναι το μεγάλο μέγεθος και βάρος τους, ο ακριβός καταλύτης, το χαμηλό ρεύμα που παράγουν και η ισχύς τους, η οποία είναι συγκρίσιμη με αυτή άλλων τύπων κυψελών καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου PEMFC λειτουργούν σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες και η ισχύ που παράγουν κυμαίνεται μεταξύ των 50 και 250 kW και είναι αρκετή για να καλύψει καθημερινές ανάγκες όπως την κίνηση ενός οχήματος. Ο κύριος λόγος που είναι ικανές να καλύψουν καθημερινές ανάγκες είναι ότι προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ακόμη ότι η έρευνα όσον αφορά την τροφοδότηση οχημάτων είναι αυτή τη στιγμή επικεντρωμένη κυρίως σε αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου [3.8].

3.7 ΒΙΟΜΑΖΑ

Βιομάζα είναι οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς και με κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας [3.8]. Ουσιαστικά, πρόκειται για τα υπολείμματα της φυτικής, ζωικής και δασικής παραγωγής, τα παραπροϊόντα που προέρχονται από τη βιομηχανική επεξεργασία αυτών, τα αστικά λύματα και τα σκουπίδια. Είναι ανανεώσιμη πηγή

ενέργειας. Κάθε χρόνο παράγονται σε όλο το πλανήτη 172 δισεκατομμύρια τόνοι βιομάζας και το ενεργειακό της περιεχόμενο είναι δέκα φορές μεγαλύτερο από αυτό που καταναλώνεται. Το μεγαλύτερο μέρος της βιομάζας που παράγεται παραμένει ανεκμετάλλευτο, αφού μόνο το ένα έβδομο της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από τη βιομάζα και αφορά κυρίως παραδοσιακές χρήσεις όπως καυσόξυλα.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη βιομάζα είναι ότι είναι φιλική προς το περιβάλλον και πιο συγκεκριμένα αποτρέπει το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με το διοξείδιο του θείου. Επίσης, μειώνεται η ενεργειακή εξάρτηση από τρίτες χώρες. Τέλος, εξασφαλίζεται η εργασία και η συγκράτηση των αγροτικών πληθυσμών στις παραμεθόριες και τις άλλες γεωργικές περιοχές, δηλαδή η βιομάζα συμβάλλει στην περιφερειακή ανάπτυξη.

Τα μειονεκτήματα της βιομάζας είναι ο μεγάλος όγκος της και η μεγάλη περιεκτικότητά της σε υγρασία. Επίσης, είναι η δυσκολία στη συλλογή, στη μεταποίηση, στη μεταφορά και αποθήκευσή της. Ακόμη, οι εγκαταστάσεις και ο εξοπλισμός που απαιτούνται για την αξιοποίηση της βιομάζας είναι πολύ δαπανηρές. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η εποχιακή παραγωγή της. Εξαιτίας των παραπάνω μειονεκτημάτων το κόστος της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα παραμένει υψηλό σε σχέση με το πετρέλαιο. Υπάρχουν όμως ήδη εφαρμογές στις οποίες η αξιοποίηση της βιομάζας παρουσιάζει οικονομικά οφέλη. Επιπλέον, το πρόβλημα αυτό βαθμιαία εξαλείφεται, αφ' ενός λόγω της ανόδου των τιμών του πετρελαίου, αφ' ετέρου και σημαντικότερο, λόγω της βελτίωσης και ανάπτυξης των τεχνολογιών αξιοποίησης της βιομάζας. Τέλος, χρειάζεται κάθε φορά να συνυπολογίζεται το περιβαλλοντικό όφελος, το οποίο αν και συχνά δεν μπορεί να αποτιμηθεί με οικονομικά μεγέθη, εντούτοις είναι ουσιαστικής σημασίας για την ποιότητα της ζωής και το μέλλον της ανθρωπότητας.

3.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Π. Γεωργιλάκης, “*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*”, Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά Σεπτέμβριος 2006.
- [3.2] A.Tsikalakis, I.Tassiou, N.Hatziargyriou , “*Impact Of Energy Storage In The Secure And Economic Operation Of Small Islands*”, Proc. of MedPower04, MED04/CH33 Lemessos, November 2004.
- [3.3] http://www.cres.gr/kape/education/ODHGOS_TERESs.pdf, “*Οδηγός τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε.*”.
- [3.4] <http://georgepehli.googlepages.com/DieselEngines.pdf>, “*Μηχανές εσωτερικής καύσης*”.
- [3.5] http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-12272004-141318/unrestricted/Dissertation_Final_v1.pdf, “*A Study of Remote Area Internet Access with Embedded Power Generation*”.
- [3.6] <http://ape.chania.teicrete.gr/ape/hydraulika/hydropernf.htm>, “*Τρόπος λειτουργίας μικρών υδροηλεκτρικών*”.
- [3.7] <http://tee-milou.kyk.sch.gr/daidalos2005/Fuelcell.htm>, “*Κυψέλη Καυσίμου*”.
- [3.8] <http://el.wikipedia.org/wiki>, “*Βικιπαίδεια*”.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μικροδίκτυο στο πρόγραμμα αποτελείται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και μια μηχανή εσωτερικής καύσης diesel. Για το συντονισμό των παραπάνω μονάδων παραγωγής και των μπαταριών ακολουθείται είτε η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας (Cycle-charging-strategy ή SOC-strategy) είτε η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου (Load-following-strategy). Στο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί η τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά δεν είναι ίδια με την τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες. Η τιμή πώλησης της ενέργειας στο κεντρικό δίκτυο ορίζεται από όποιον χρησιμοποιεί το λογισμικό. Επίσης, στο λογισμικό θεωρείται ότι μόνο η ενέργεια που προέρχεται από τις τεχνολογίες Α.Π.Ε. μπορεί να πουληθεί στο κεντρικό δίκτυο. Ακόμη δεν είναι υποχρεωτικό να πουληθεί όλη η ενέργεια που προέρχεται από τις τεχνολογίες Α.Π.Ε. στο κεντρικό δίκτυο. Είναι δυνατόν να πουληθεί μόνο ένα μέρος της ενέργειας στο κεντρικό δίκτυο. Ο στόχος του λογισμικού είναι να καλύψει μια συγκεκριμένη ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Οι παραπάνω δυνατότητες διαφοροποιούν το λογισμικό αυτό από άλλα λογισμικά. Για παράδειγμα, στο λογισμικό HOMER η ενέργεια που προέρχεται από διαφορετικές τεχνολογίες πωλείται στην ίδια τιμή στο κεντρικό δίκτυο.

Στο κεφάλαιο αυτό θα μοντελοποιηθούν οι μονάδες παραγωγής, οι μπαταρίες και οι στρατηγικές όπως μοντελοποιούνται και στο πρόγραμμα. Επίσης θα αναλυθούν οι δυνατότητες του λογισμικού.

4.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι ανεμογεννήτριες διαφορετικών εταιριών δεν δίνουν την ίδια καμπύλη ισχύος για ίδιες ταχύτητες ανέμου, ακόμα και αν έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ. Ωστόσο μπορεί να υποτεθεί ότι οι ανεμογεννήτριες ξεκινούν να δίνουν ισχύ από μια ταχύτητα έναρξης V_{in} . Από την ταχύτητα V_{in} μέχρι την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας V_R η ισχύς αυξάνεται. Από την ταχύτητα V_R μέχρι την ταχύτητα παύσης V_{out} η ανεμογεννήτρια δίνει την ονομαστική της ισχύ που είναι και η μέγιστη. Πέρα από την V_{out} η ανεμογεννήτρια δεν δίνει καθόλου ισχύ. Η ανεμογεννήτρια σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου δεν λειτουργεί εξαιτίας του μεγάλου φορτίου που δημιουργείται. Αυτό γίνεται για να μην πάθει βλάβη. Μια τυπική καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με $V_{in}=3$ m/s, $V_R=12$ και $V_{out}=22$ m/s φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας $P_g(V)$ προκύπτει από τον τύπο:

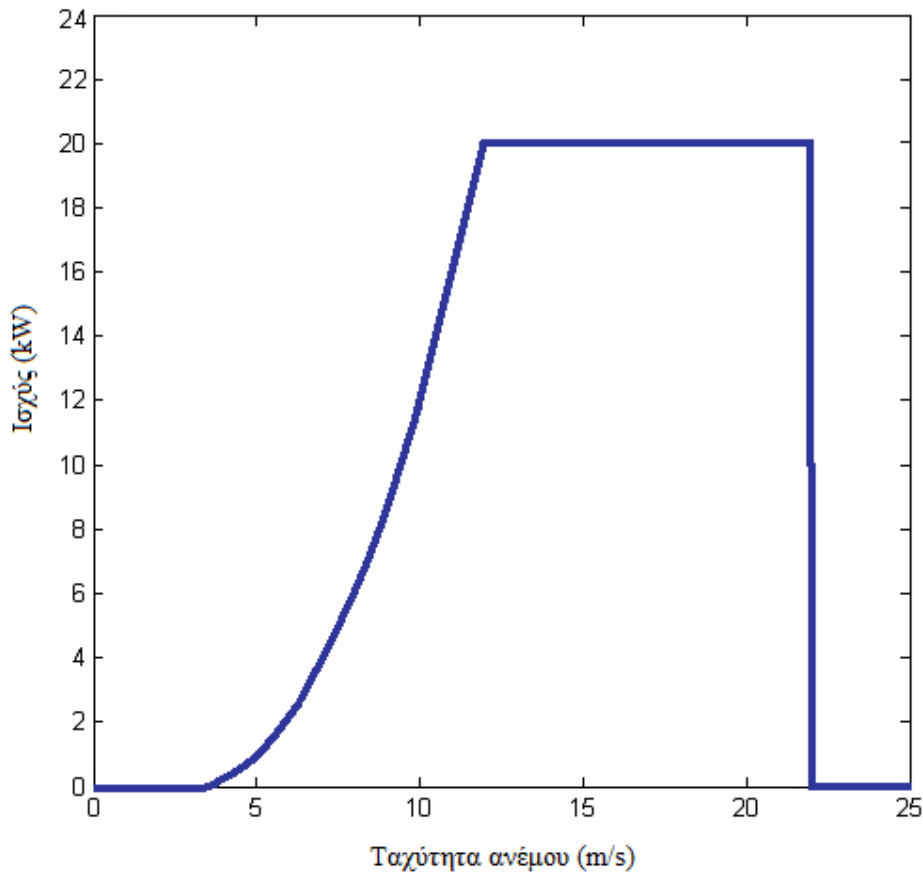
$$P_g(V) = \begin{cases} 0 & \text{για } V < V_{in} \\ A + BV + CV^2 & \text{για } V_{in} < V < V_R \\ P_R & \text{για } V_R < V < V_{out} \\ 0 & \text{για } V > V_{out} \end{cases} \quad (4.1)$$

όπου τα A , B , C υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} A + B V_{out} + C V_{in}^2 &= 0 \\ A + B V_R + C V_R^2 &= P_R \\ A + B V_C + C V_C^2 &= P_R V_C^3 / V_R^3 \end{aligned} \quad (4.2)$$

με

$$V_C = (V_{in} + V_R)/2 \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.1: Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας.

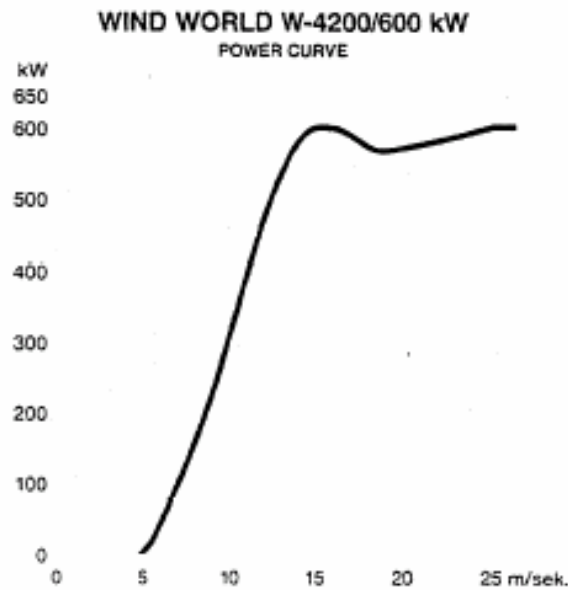
Μια πραγματική καμπύλη ισχύος δεν έχει ακριβώς την ίδια μορφή αλλά προσεγγίζεται αρκετά καλά με τις παραπάνω υποθέσεις. Για παράδειγμα η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας WIND WORLD W-4200/600 kW παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.

Στη συνέχεια θεωρώντας ότι η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί την κατανομή Weibull $P(u)$, η μέση ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι:

$$P_g = \int_{V=0}^{V_{out}} P_g(V)P(u)dV \quad (4.4)$$

και με αντικατάσταση προκύπτει:

$$P_g = \int_{V_{in}}^{V_{out}} (A + BV = CV^2) \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) dV + P_R [P(V < V_{out}) - P(V \leq V_R)] \quad (4.5)$$



Σχήμα 4.2: Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας WIND WORLD W-4200/600.

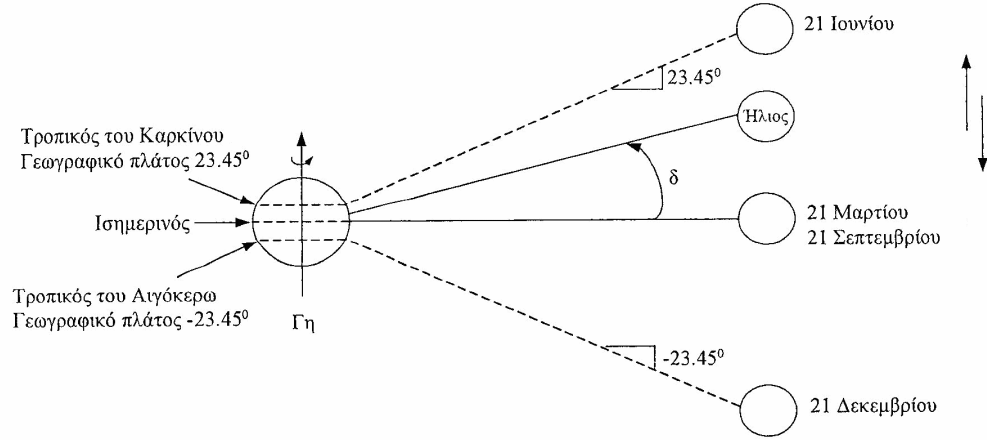
4.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

Παρακάτω θα υπολογιστεί η ενέργεια που δίνει το φωτοβολταϊκό κάθε ώρα. Στη συνέχεια περιγράφονται οι παράμετροι που απαιτούνται ώστε να βρεθεί η ισχύς ανά ώρα και δίνονται και οι τύποι των παραμέτρων αυτών. Επειδή η ισχύς υπολογίζεται ανά ώρα ισούται με την ενέργεια.

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του ισημερινού και της ευθείας γραμμής που ενώνει το κέντρο του ήλιου με το κέντρο της γης ονομάζεται ηλιακή απόκλιση δ . Σχηματικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3 και δίνεται από τον τύπο:

$$\delta = 23,45 \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right] \quad (4.6)$$

όπου n είναι η ημέρα του χρόνου με $n=1$ την 1 Ιανουαρίου και $n=365$ την 31 Δεκεμβρίου. Το n θα χρησιμοποιηθεί και σε άλλους τύπους.



Σχήμα 4.3: Εναλλακτική όψη με σταθερή τη γη και τον ήλιο να κινείται πάνω κάτω.

Εκτός από την τοπική ώρα υπάρχει και η ηλιακή ώρα. Η ηλιακή ώρα μετριέται σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι και είναι πολύ σημαντική για τη μελέτη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ηλιακό μεσημέρι παρατηρείται όταν ο ήλιος είναι στο ψηλότερο σημείο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για να βρεθεί η σχέση μεταξύ της τοπικής και της ηλιακής ώρας πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η εξίσωση της ώρας E . Η εξίσωση της ώρας εκφράζει τη διαφορά μεταξύ μιας μέρας με 24 ώρες και μιας ηλιακής μέρας σε ώρες. Η διαφορά αυτή δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους εξαιτίας της ελλειπτικής τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο. Η εξίσωση της ώρας E δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E = 3,82 \begin{pmatrix} 0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - \\ 0,014615 \cos(2B) - 0,04089 \sin(2B) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

όπου
$$B = \frac{360(n-1)}{365} \quad (4.8)$$

Τελικά, η σχέση μεταξύ της τοπικής και ηλιακής τοπικής ώρας δίνεται από τον τύπο:

$$t_s = t_c + \frac{L_{loc}}{15 \text{ deg/hr}} - T_c + E \quad (4.9)$$

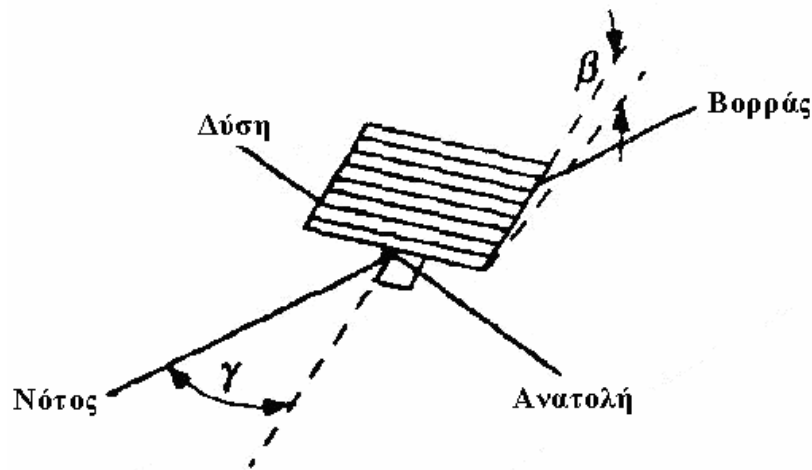
όπου t_c είναι η τοπική ώρα, L_{loc} το τοπικό γεωγραφικό μήκος σε μοίρες και $T_c = 2$.

Η γωνία ώρας περιγράφει τις μοίρες που πρέπει να περιστραφεί η γη για να έρθει το ηλιακό μεσημέρι. Η γωνία ώρας είναι μηδέν το ηλιακό μεσημέρι, αρνητική πριν το ηλιακό μεσημέρι, και θετική μετά το ηλιακό μεσημέρι. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξίσωση ώρας προκύπτει από το ότι η γη περιστρέφεται 15 μοίρες ανά ώρα. Η γωνία ώρας είναι:

$$\omega = (t_s - 12)15 \text{ deg/hr} \quad (4.10)$$

Η γωνία πρόσπτωσης θ είναι η γωνία μεταξύ της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας και του συλλέκτη. Για τον υπολογισμό της απαιτείται προηγουμένως ο προσδιορισμός ορισμένων άλλων γωνιών. Η γωνία κλίσης του συλλέκτη ονομάζεται β και παίρνει τιμές από 0 έως 180 μοίρες, η γωνία αζιμούθιου γ περιγράφει τη στροφή του συλλέκτη με θετικές τιμές από νότο προς ανατολή και αρνητικές από νότο προς δύση και το ϕ είναι το γεωγραφικό πλάτος. Έτσι η γωνία πρόσπτωσης θ είναι:

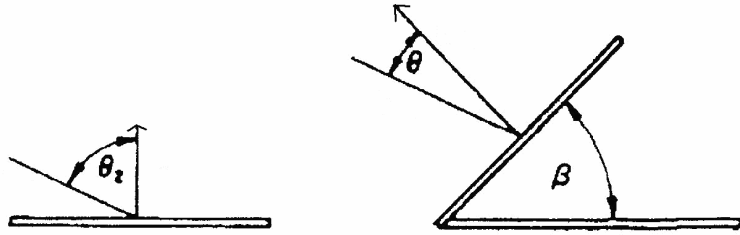
$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (4.11)$$



Σχήμα 4.4: Γωνία αζιμούθιου γ και γωνία κλίσης β .

Μια άλλη σημαντική γωνία είναι η γωνία πρόσπτωσης σε οριζόντιο συλλέκτη θ_z . Αυτή μπορεί να υπολογιστεί αν η γωνία κλίσης του συλλέκτη β γίνει μηδέν:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.5: Γωνία πρόσπτωσης θ_z σε οριζόντιο επίπεδο και υπό κλίση β .

Η εξωγήινη ηλιακή ένταση και λίγο έξω από την ατμόσφαιρα είναι:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (4.13)$$

όπου G_{sc} είναι μια ηλιακή σταθερά με τιμή $1,367 \text{ kW/m}^2$.

Αν η εξωγήινη ηλιακή ένταση υπολογιστεί ανά ώρα, τότε η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$I_o = \frac{12}{\pi} G_{on} \left(\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (4.14)$$

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

Ο δείκτης καθαρότητας ορίζεται ως η οριζόντια ηλιακή ένταση που φτάνει στην επιφάνεια της γης I προς την εξωγήινη ηλιακή ένταση I_o ανά ώρα:

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (4.15)$$

Η οριζόντια ηλιακή ένταση που φτάνει στην επιφάνεια της γης αποτελείται από την απευθείας ακτινοβολία I_b και την διάχυτη ακτινοβολία I_d . Η απευθείας ακτινοβολία δεν έχει διασπορά στην ατμόσφαιρα και είναι ευθεία από την ατμόσφαιρα μέχρι την επιφάνεια της γης. Η διάχυτη ακτινοβολία έχει διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα και έχει αλλάξει διεύθυνση. Προφανώς, το άθροισμα της απευθείας και διάχυτης ακτινοβολίας δίνουν την οριζόντια ηλιακή ένταση:

$$I = I_b + I_d \quad (4.16)$$

Για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$\frac{I_d}{I} \begin{cases} 1 - 0,009k_T & \text{για } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1694k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 & \text{για } k_T < 0,22 \leq 0,80 \\ 0,165 & \text{για } k_T > 0,80 \end{cases} \quad (4.17)$$

Ο συντελεστής κλίσης της ηλιακής ακτινοβολίας R_b περιγράφει την αναλογία μεταξύ της απευθείας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια και της απευθείας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια με κλίση. Οι δύο αυτές ακτινοβολίες φαίνονται και στο Σχήμα 4.5. Ο συντελεστής κλίσης της ηλιακής ακτινοβολίας R_b δίνεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (4.18)$$

Επειδή στον συλλέκτη προσπίπτει περισσότερη απευθείας ακτινοβολία από ότι διάχυτη απαιτείται ένας συντελεστής για το σκοπό αυτό:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (4.19)$$

Στο συλλέκτη φτάνει ένα μέρος της συνολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης και η ανακλώμενη ακτινοβολία. Δηλαδή στο συλλέκτη φτάνει ένα μέρος της απευθείας, ένα μέρος της διάχυτης και η ανακλώμενη ακτινοβολία. Η ανακλώμενη ακτινοβολία είναι ακτινοβολία που ανακλάται στο έδαφος με αντανάκλαση ρ και καταλήγει στο έδαφος. Το ρ ονομάζεται συντελεστής αντανάκλασης και η ανακλώμενη ακτινοβολία μπορεί να προκύψει από την απευθείας και την διάχυτη ακτινοβολία. Η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη είναι:

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho_s \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4.20)$$

όπου $A_i = I_b / I_o$ (4.21)

Τελικά η ισχύς που παραδίδει το φωτοβολταϊκά ανά ώρα είναι:

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \left(\frac{I_t}{I_s} \right) \quad (4.22)$$

όπου f_{PV} είναι ένας συντελεστής απωλειών, Y_{PV} είναι η ονομαστική ισχύς του φωτοβολταϊκού και I_s είναι η ηλιακή ένταση ενός ήλιου και ίση με 1 kW/m^2 [4.1] [4.2].

4.4 ΝΤΙΖΕΛΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Στο μικροδίκτυο χρησιμοποιείται και μια ντιζελογεννήτρια. Η κατανάλωση πετρελαίου F της ντιζελογεννήτριας είναι ανάλογη της ισχύος P :

$$F = F_0 + F_i P \quad (4.23)$$

Το F_0 είναι μια σταθερά και δίνεται από τον τύπο:

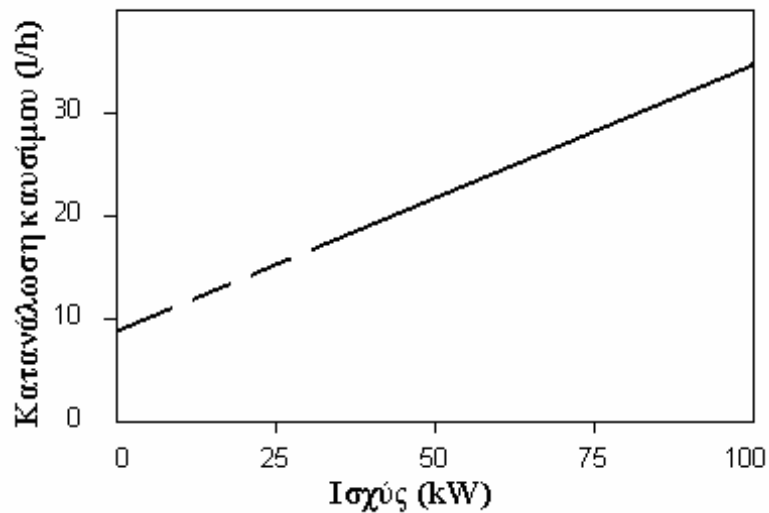
$$F_0 = B P_{max} \quad (4.24)$$

Το B είναι συνήθως 0,08415 λίτρα/kWh ενώ το P_{max} είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει η ντιζελογεννήτρια. Το F_i είναι ανάλογο της ισχύος της ντιζελογεννήτριας και είναι συνήθως 0,246 λίτρα/kWh. Πολλές φορές το F_i συμβολίζεται ως A .

Η ντιζελογεννήτρια δεν μπορεί να δώσει πολύ λίγη ισχύ. Θεωρείται ότι η ελάχιστη ισχύς που μπορεί να δώσει είναι το 30% της μέγιστης, δηλαδή:

$$P_{min} = 30\% P_{max} \quad (4.25)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι η ντιζελογεννήτρια φθείρεται πολύ κατά την εκκίνηση. Μια τυπική καμπύλη κατανάλωσης – ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6 [4.3].



Σχήμα 4.6: Τυπική καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου ντιζελογεννήτριας.

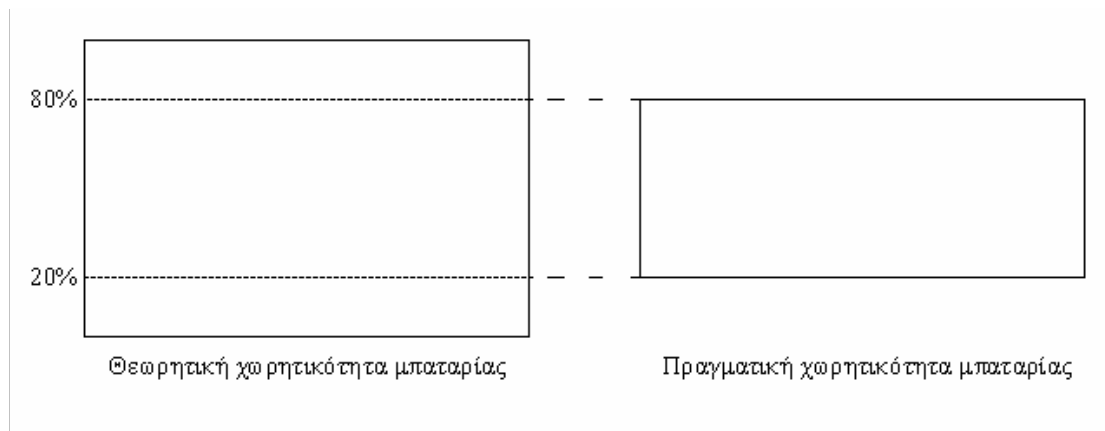
4.5 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Υπάρχουν πολλά μέσα αποθήκευσης, αλλά τα πιο συνηθισμένα σήμερα είναι οι μπαταρίες. Έτσι και στο μικροδίκτυο υπάρχουν μπαταρίες, ώστε να μην χάνεται ενέργεια. Στη συνέχεια αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε η μπαταρία στην παρούσα εργασία. Η χωρητικότητα της μπαταρίας μετριέται σε Ah και αν πολλαπλασιαστεί με την τάση της μπαταρίας βρίσκεται η θεωρητική ενέργεια σε kWh που μπορεί να αποθηκεύσει η μπαταρία. Αν και στην πραγματικότητα η τάση της μπαταρίας ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, υποτίθεται ότι παραμένει σταθερή. Επίσης, υποτίθεται ότι ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης είναι απεριόριστος.

Η μπαταρία έχει ένα κατώτατο (I_{min}) και ένα ανώτατο (I_{max}) όριο φόρτισης, το οποίο δίνεται σε ποσοστό της θεωρητικής χωρητικότητας σε ενέργεια της μπαταρίας. Επομένως, δεν μπορεί να εκφορτιστεί πλήρως ούτε να φορτιστεί πλήρως εκτός και αν το κατώτατο και το ανώτατο όριο φόρτισης είναι 0% και 100% αντίστοιχα. Για να υπολογιστεί λοιπόν η πραγματική χωρητικότητα της μπαταρίας σε kWh αφαιρείται από το ανώτατο το κατώτατο όριο φόρτισης, διαιρείται με εκατό και μετά πολλαπλασιάζεται με την θεωρητική ενέργεια της μπαταρίας:

$$\text{πραγματική χωρητικότητα} = \text{θεωρητική χωρητικότητα} \frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{100} \quad (4.26)$$

Σχηματικά η παραπάνω διαδικασία με κατώτατο όριο φόρτισης 20% και ένα ανώτατο όριο φόρτισης 80% φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Πραγματική και θεωρητική χωρητικότητα μπαταρίας.

Ακόμη, η μπαταρία έχει ένα βαθμό απόδοσης n_{bat} . Αυτό σημαίνει ότι αν ζητηθεί από την μπαταρία ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας X , τότε η μπαταρία πρέπει να δώσει παραπάνω ενέργεια και ίση με X/n_{bat} , αφού ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος της μονάδας. Ο βαθμός απόδοσης θεωρείται ότι αφορά μόνο την εκφόρτιση. Στην φόρτιση θεωρείται ότι όλη η ενέργεια εισέρχεται στην μπαταρία χωρίς απώλειες. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μετριέται σε kWh που εισέρχονται σε αυτήν.

Στην περίπτωση που υπάρχουν πολλές μπαταρίες για να βρεθεί η πραγματική χωρητικότητα σε ενέργεια όλων των μπαταριών πολλαπλασιάζεται η πραγματική χωρητικότητα της μιας μπαταρίας με τον αριθμό των μπαταριών. Ομοίως, για να

υπολογιστεί η διάρκεια ζωής όλων των μπαταριών πολλαπλασιάζεται η διάρκεια ζωής της μιας μπαταρίας με τον αριθμό των μπαταριών.

Ο τρόπος με τον οποίο δίνουν και παίρνουν ενέργεια οι μπαταρίες εξαρτάται από τη στρατηγική. Στην εργασία μοντελοποιούνται δύο στρατηγικές, η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας και η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου οι οποίες αναπτύσσονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.6. Σε γενικές γραμμές, αν ακολουθηθεί η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας, τότε η μηχανή diesel ξεκινάει να δουλεύει όταν η ενέργεια της μπαταρίας φτάσει στο κατώτατο όριο εκφόρτισης. Η μηχανή diesel δίνει μέγιστη ισχύ έως ότου η μπαταρία φτάσει σε ένα άνω όριο φόρτωσης SOC_{max} , οπότε και παύει να λειτουργεί. Αν ακολουθηθεί η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου, τότε η μηχανή diesel και πάλι ξεκινάει να δουλεύει όταν η ενέργεια της μπαταρίας φτάσει στο κατώτατο όριο εκφόρτισης αλλά δίνει μόνο όση ενέργεια απαιτείται για να καλυφθεί το φορτίο. Απαραίτητη προϋπόθεση για να εφαρμοστούν οι παραπάνω στρατηγικές είναι να υπάρχει μηχανή diesel στο μικροδίκτυο [4.2] [4.3].

4.6 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

Το μικροδύκτιο όπως αναφέρθηκε, αποτελείται από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες, και μία μηχανή diesel. Υπάρχουν πολλοί τρόποι ώστε να συνεργαστούν τα παραπάνω συστατικά μεταξύ τους. Δύο από αυτούς τους τρόπους είναι η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας και η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι δύο αυτές στρατηγικές.

4.6.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

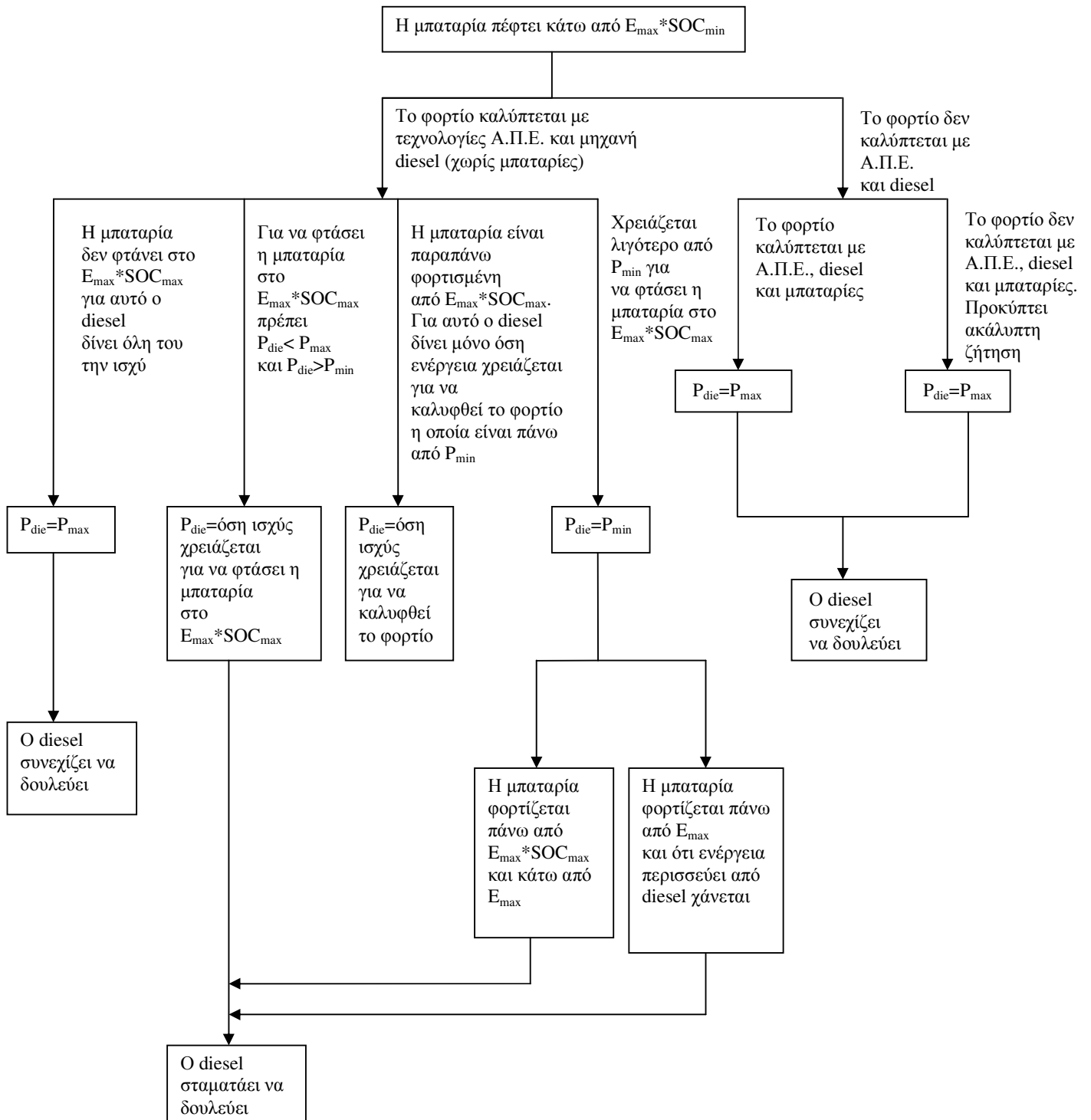
Σε αυτή τη στρατηγική η μπαταρία ξεκινάει γεμάτη και δεν πέφτει ποτέ κάτω από το κατώτατο όριο εκφόρτισης SOC_{min} . Αν μπορούν να καλύψουν το φορτίο οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. και η μπαταρία, τότε το κάνουν. Αν οι Α.Π.Ε. και μπαταρία δεν μπορούν να καλύψουν το φορτίο, τότε η μπαταρία δεν δίνει καθόλου ενέργεια και ξεκινάει να δουλεύει η μηχανή diesel με όλη της την ισχύ P_{max} . Καθώς η μηχανή diesel δουλεύει, οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. δίνουν κανονικά την ενέργειά τους. Η μηχανή diesel συνεχίζει να δουλεύει με P_{max} μέχρι η μπαταρία να φτάσει ή να ξεπεράσει το SOC_{max} , οπότε σταματάει τελείως να δουλεύει. Κατά τη διάρκεια που δουλεύει η μηχανή diesel, (δηλαδή πριν φτάσει η μπαταρία στο SOC_{max}) αν το φορτίο καλύπτεται από τις τεχνολογίες Α.Π.Ε. και τη μηχανή diesel, τότε η υπόλοιπη ενέργεια δίνεται για να φορτωθεί η μπαταρία. Αν η ενέργεια που απαιτείται για να φτάσει η μπαταρία στο SOC_{max} είναι λιγότερη από αυτήν που περισσεύει από τις τεχνολογίες Α.Π.Ε. και τη μηχανή diesel, τότε η μηχανή diesel δίνει όση ενέργεια χρειάζεται για να φτάσει η μπαταρία στο 100%. Για παράδειγμα, έστω ότι το φορτίο είναι $Load=55$ kWh, η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι $E_{maxb}=42$ kWh, η μπαταρία έχει ενέργεια $E_{realb}=25$ kWh, ότι $SOC_{max}=0,8$, ότι η ενέργεια που δίνουν οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. είναι $A.P.E.=40$ kWh και ότι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να δώσει η μηχανή diesel είναι $P_{max}=50$ kWh. Σε αυτή τη περίπτωση η μηχανή diesel δίνει όση ενέργεια χρειάζεται για να καλυφθεί το φορτίο ($Load - A.P.E.=55$ kWh - 40 kWh = 15 kWh) συν όση χρειάζεται για να γεμίσει τελείως η μπαταρία (42 kWh - 25

kWh =17 kWh). Δηλαδή η μηχανή diesel δίνει συνολικά $15 \text{ kWh} + 17 \text{ kWh} = 32 \text{ kWh}$ $< 50 \text{ kWh}$. Αν έδινε P_{max} θα προέκυπτε περίσσευμα ενέργειας. Αν στην προηγούμενη περίπτωση η ελάχιστη ενέργεια που μπορεί να παράγει η μηχανή diesel ήταν $P_{min}=35 \text{ kWh}$, τότε θα προέκυπτε περίσσευμα ενέργειας 2 kWh .

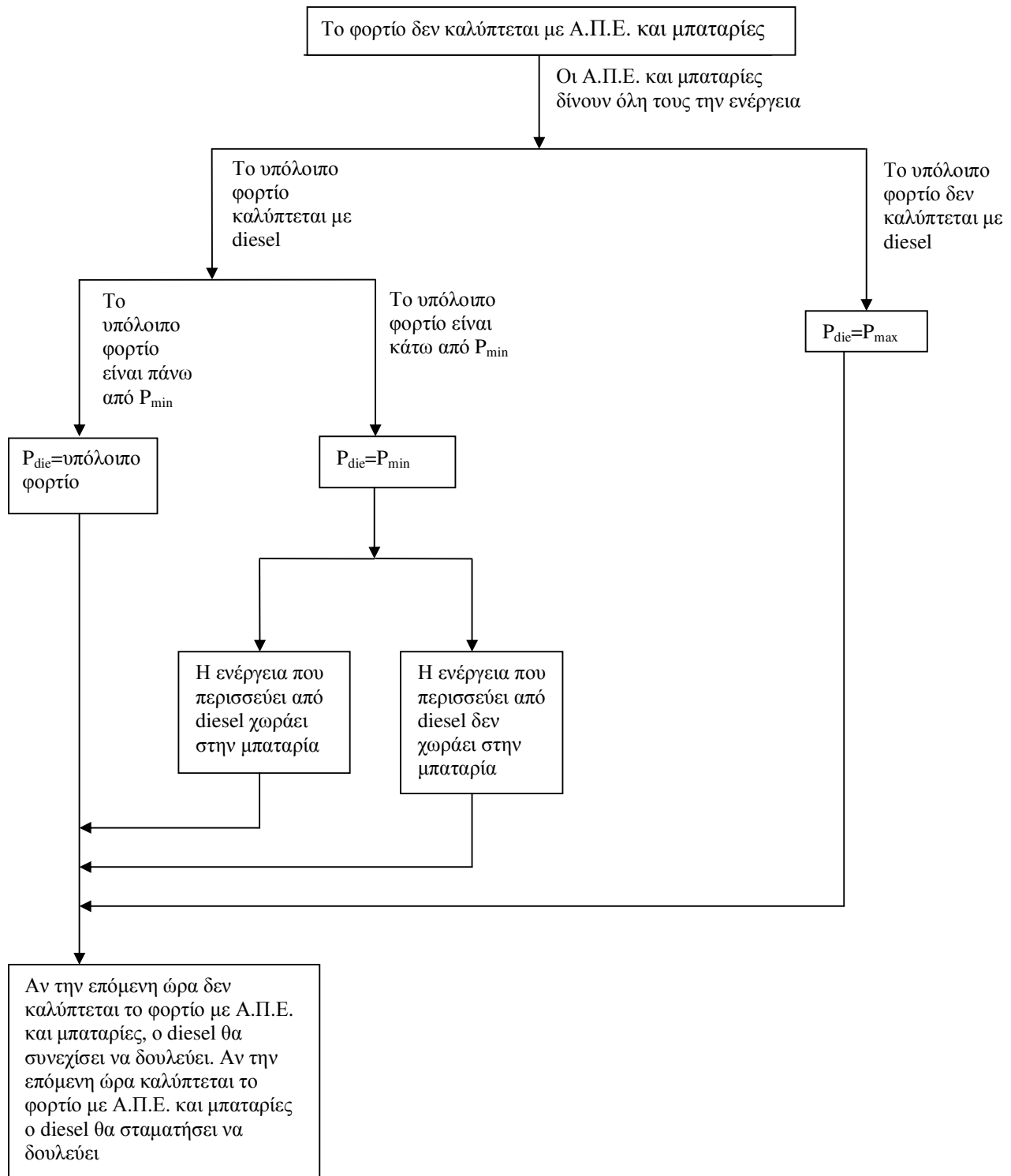
Μοναδική περίπτωση που δουλεύουν οι τεχνολογίες Α.Π.Ε., η μηχανή diesel και μπαταρία μαζί είναι όταν οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. και η μηχανή diesel δεν μπορούν να καλύψουν το φορτίο. Αν και πάλι δεν μπορεί να καλυφθεί το φορτίο, τότε προκύπτει ανικανοποίητη ζήτηση. Όταν δεν δουλεύει η μηχανή diesel και οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. υπερκαλύπτουν από μόνες τους το φορτίο, τότε η υπόλοιπη ενέργεια δίνεται για να φορτωθεί η μπαταρία. Με άλλα λόγια, η μηχανή diesel ξεκινάει να δουλεύει με P_{max} όταν $SOC = SOC_{min}$ και σταματάει όταν $SOC = SOC_{max}$. Η παραπάνω στρατηγική παρουσιάζεται με διάγραμμα στο Σχήμα 4.8.

4.6.2 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Σε αυτή τη στρατηγική η μπαταρία ξεκινάει γεμάτη και δεν πέφτει ποτέ κάτω από το κατώτατο όριο φόρτισης SOC_{min} . Όταν μπορεί να καλυφθεί το φορτίο χωρίς την μηχανή diesel, τότε καλύπτεται χωρίς την μηχανή diesel. Όταν δεν μπορεί να καλυφθεί το φορτίο χωρίς την μηχανή diesel τότε οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. και η μπαταρία δίνουν όλη τους την ενέργεια και η μηχανή diesel δίνει όση ενέργεια λείπει για να καλυφθεί το φορτίο. Αν όμως η ενέργεια που λείπει για να καλυφθεί το φορτίο είναι λιγότερη από την ελάχιστη ενέργεια που μπορεί να παράγει η μηχανή diesel, δηλαδή P_{min} , τότε η ενέργεια που περισσεύει από την μηχανή diesel δίνεται για να φορτωθεί η μπαταρία. Αν αφού φορτωθεί η μπαταρία περισσεύει πάλι ενέργεια, τότε υπάρχει περίσσευμα ενέργειας. Η μηχανή diesel έχει και ένα μέγιστο όριο ενέργειας που μπορεί να παράγει, το P_{max} . Αν οι τεχνολογίες Α.Π.Ε., η μπαταρία και η μηχανή diesel δεν μπορούν να καλύψουν το φορτίο, τότε προκύπτει ανικανοποίητη ζήτηση. Η παραπάνω στρατηγική παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.8: Διαγραμματική παρουσίαση της στρατηγικής φόρτισης κύκλου λειτουργίας.



Σχήμα 4.8: Διαγραμματική παρουσίαση της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου.

4.7 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

Το μικροδίκτυο που εξετάζεται μπορεί να είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο, δηλαδή τη Δ.Ε.Η. Στη παράγραφο αυτή θα εξεταστεί πότε είναι συμφέρουσα η αγορά ενέργειας από τη Δ.Ε.Η. και η ποσότητα αυτής της ενέργειας. Το φορτίο πρέπει να καλύπτεται είτε αγοράζοντας ενέργεια από τη Δ.Ε.Η., είτε από τις πηγές του μικροδικτύου. Επίσης είναι εφικτό να πωλείται η ενέργεια που παράγεται από τις τεχνολογίες Α.Π.Ε. του μικροδικτύου στη Δ.Ε.Η. και μετά να αγοράζεται από την Δ.Ε.Η., αν έτσι προκύπτει κέρδος. Προφανώς, η ενέργεια που προέρχεται από την μηχανή diesel και τις μπαταρίες δεν μπορεί να πουληθεί στη Δ.Ε.Η. επειδή δεν είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες τιμές αγοράς και πώλησης έτσι ώστε να γίνει πιο κατανοητή η στρατηγική [4.4]. Έστω λοιπόν ότι η ενέργεια που προέρχεται από φωτοβολταϊκά πωλείται προς $T_{pv}=0,45$ €/kWh και η ενέργεια που προέρχεται από ανεμογεννήτριες πωλείται προς $T_{wt}=0,0846$ €/kWh στη Δ.Ε.Η. Ακόμη, η τιμή αγοράς ενέργειας από τη Δ.Ε.Η. είναι $T_{grid}=0,05$ €/kWh για μέση τάση και $T_{grid}=0,095$ €/kWh για χαμηλή τάση. Οι παραπάνω τιμές παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1 και 4.2.

Πίνακας 4.1: Τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Πηγή ενέργειας	Τιμή πώλησης στο δίκτυο (€/kWh)
Φωτοβολταϊκά	0,45
Ανεμογεννήτριες	0,0846

Πίνακας 4.2: Τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο.

Τάση	Τιμή αγοράς από το δίκτυο (€/kWh)
Μέση τάση	0,05
Χαμηλή τάση	0,095

Όπως παρατηρείται, η ενέργεια που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά πωλείται σε υψηλότερη τιμή στη Δ.Ε.Η. από την τιμή αγοράς ενέργειας από τη Δ.Ε.Η. Αυτό συμβαίνει και για τη μέση και για τη χαμηλή τάση, δηλαδή $T_{pv} > T_{grid} \Rightarrow 0,45\text{€} > 0,05\text{€}$ (μέση τάση) και $0,45\text{€} > 0,095\text{€}$ (χαμηλή τάση). Αφού λοιπόν η τιμή πώλησης ενέργειας στη Δ.Ε.Η. είναι μεγαλύτερη από τη τιμή αγοράς ενέργειας από

τη Δ.Ε.Η. πωλείται όλη η ενέργεια που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά στη Δ.Ε.Η. και μετά αγοράζεται από τη Δ.Ε.Η. όση ενέργεια χρειάζεται για να καλυφθεί το φορτίο. Τα ετήσια έσοδα ($AnCost_{gridpv}$) στην παραπάνω περίπτωση είναι:

$$AnCost_{gridpv} = \text{sum}(P_{pv}) * T_{pv} - Eload_{pv} * T_{grid} \quad (4.27)$$

όπου $\text{sum}(P_{pv})$ είναι η ετήσια παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών και $Eload_{pv}$ είναι το φορτίο που πρέπει να καλύψουν τα φωτοβολταϊκά.

Όπως και στα φωτοβολταϊκά έτσι και στις ανεμογεννήτριες, αν η τιμή πώλησης είναι υψηλότερη από την τιμή αγοράς, τότε πωλείται όλη η ενέργεια που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες στη Δ.Ε.Η. και στη συνέχεια αγοράζεται από τη Δ.Ε.Η. όση ενέργεια χρειάζεται για να καλυφθεί το φορτίο. Το παραπάνω ενδεχόμενο ισχύει μόνο στην περίπτωση της μέσης τάσης αφού $T_{wt} > T_{grid} \Rightarrow 0,0846\text{€} > 0,05\text{€}$. Άρα τα ετήσια έσοδα είναι:

$$AnCost_{gridwt} = \text{sum}(E_{wft}) * T_{wt} - \text{sum}(Eload_{wft}) T_{grid} \quad (4.28)$$

όπου $\text{sum}(E_{wft})$ είναι η ετήσια παραγωγή ενέργειας των ανεμογεννητριών και $\text{sum}(Eload_{wft})$ είναι το φορτίο που πρέπει να καλύψουν οι ανεμογεννήτριες.

Αν η τιμή πώλησης της ενέργειας που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες είναι χαμηλότερη από την τιμή αγοράς ενέργειας από τη Δ.Ε.Η., τότε χρησιμοποιείται όλη η ενέργεια που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες στο μικροδίκτυο και πωλείται στη Δ.Ε.Η. ενέργεια μόνο αν περισσεύει ($\text{sum}(Elefter_{wt})$). Για να πουληθεί η ενέργεια που περισσεύει, η μηχανή diesel δεν πρέπει να δουλεύει. Στο παράδειγμα αυτό συμβαίνει στη χαμηλή τάση όπου $T_{wt} < T_{grid} \Rightarrow 0,0846\text{€} < 0,095\text{€}$. Σύμφωνα με το παραπάνω ενδεχόμενο τα ετήσια έσοδα ($AnCost_{gridwt}$) είναι:

$$AnCost_{gridwt} = \text{sum}(Elefter_{wt}) * T_{wt} \quad (4.29)$$

Στη συνέχεια, θα εξεταστεί πότε συμφέρει να αγοράζεται ενέργεια από τη Δ.Ε.Η. αντί να την παράγει η μηχανή diesel. Το κόστος ανά kW που παράγει η μηχανή diesel δεν είναι σταθερό, αλλά αυξάνεται όσο αυξάνονται οι ώρες λειτουργίας του. Η μηχανή diesel δουλεύει για όσο χρόνο το κόστος ανά kWh που παράγει είναι μικρότερο από το κόστος ανά kWh που πουλάει την ενέργεια η Δ.Ε.Η. Από την ώρα που το κόστος ανά kWh της μηχανής diesel γίνει μεγαλύτερο από το κόστος ανά kWh της Δ.Ε.Η. σταματάει να δουλεύει η μηχανή diesel και όση ενέργεια θα παρήγαγε η μηχανή diesel από τη ώρα αυτή και μετά αγοράζεται από τη Δ.Ε.Η. Η ενέργεια αυτή που αγοράζεται από τη Δ.Ε.Η. αντί να την παράγει η μηχανή diesel (*griddie*) κοστίζει ανά έτος:

$$AnCost_{griddie} = griddie * T_{grid} \quad (4.30)$$

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας πρέπει να καλύπτεται όλο το φορτίο. Οπότε στην περίπτωση που δεν επαρκούν οι σταθμοί παραγωγής και οι μπαταρίες του μικροδικτύου για να καλυφθεί το φορτίο, τότε υποχρεωτικά

αγοράζεται ενέργεια από τη Δ.Ε.Η. για να καλυφθεί όλο το φορτίο. Αν το φορτίο που δεν καλύπτεται με τα μέσα του μικροδικτύου είναι sum_{LOLE} , τότε τα ετήσια κόστη για να καλυφθεί το sum_{LOLE} είναι:

$$AnCost_{gridLOLE} = sum_{LOLE} * T_{grid} \quad (4.31)$$

4.8 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογιστεί το κόστος ανά kWh όλου του μικροδικτύου. Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα να υπολογιστούν τα ετήσια έξοδα και έσοδα του μικροδικτύου. Έχουν ήδη υπολογιστεί μερικά στο προηγούμενο κεφάλαιο 4.7. Τα ετήσια έξοδα των συστατικών του μικροδικτύου, δηλαδή του φωτοβολταϊκού, της ανεμογεννήτριας, της μπαταρίας και της ντιζελογεννήτριας υπολογίζονται με σχεδόν τον ίδιο τρόπο. Ωστόσο υπάρχουν κάποιες μικρές παραλλαγές στον τρόπο υπολογισμού τους. Για παράδειγμα, η διάρκεια ζωής της μηχανής diesel δίνεται από τον κατασκευαστή σε ώρες λειτουργίας και όχι σε έτη. Επειδή όμως για να υπολογιστούν τα ετήσια κόστη της μηχανής diesel απαιτείται η διάρκεια ζωής του σε έτη, πρέπει να μετατραπεί σε έτη η διάρκεια ζωής του. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί ο γενικός τρόπος υπολογισμού των ετήσιων κοστών των συστατικών του μικροδικτύου και αφού υπολογιστούν θα αναφερθούν οι ιδιαιτερότητες του κάθε συστατικού.

4.8.1 ΕΤΗΣΙΑ ΚΟΣΤΗ

i : ποσοστό επιτοκίου

R_{proj} : διάρκεια ζωής project, δηλαδή όλου του μικροδικτύου.

$componet$: συστατικό μικροδικτύου (μπαταρία ή φωτοβολταϊκό ή ανεμογεννήτρια ή μηχανή diesel).

R_{comp} : διάρκεια ζωής συστατικού σε έτη.

n : μονάδες συστατικού (ονομαστική ισχύς για φωτοβολταϊκό και μέγιστη ισχύ για μηχανή diesel).

C_{capPU} : αρχικό κόστος μιας μονάδας.

C_{repPU} : κόστος αντικατάστασης στο τέλος ζωής της μονάδας.

OM_{PU} : κόστη λειτουργίας μιας μονάδας.

Το αρχικό κόστος C_{cap} , το κόστος αντικατάστασης C_{rep} και τα ετήσια κόστη λειτουργίας OM όλων των μονάδων που αγοράζονται προκύπτουν αν πολλαπλασιαστούν με τον αριθμό των μονάδων:

$$C_{cap} = C_{capPU} * n \quad (4.32)$$

$$C_{rep} = C_{repPU} * n \quad (4.33)$$

$$OM = OM_{PU} * n \quad (4.33)$$

Μετατροπή αρχικού κόστους σε ετήσιο.

Τα παραπάνω κόστη πρέπει να μετατραπούν σε ετήσια. Μόνο τα κόστη λειτουργίας OM είναι ήδη ετήσια. Για να μετατραπεί λοιπόν το αρχικό συνολικό κόστος C_{cap} σε ετήσιο κόστος γίνεται η υπόθεση ότι παίρνεται ένα δάνειο ίσο με C_{cap} ότι το επιτόκιο είναι i και ότι ξεπληρώνεται όταν τελειώσει η διάρκεια ζωής του project. Έτσι η ετήσια δόση C_{acap} δίνεται από την σχέση:

$$C_{acap} = C_{cap} * CRF(i, R_{proj}) \quad (4.34)$$

Το $CRF(i, R_{proj})$ είναι ο μετασχηματιστής που πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το αρχικό κεφάλαιο ώστε να βρεθεί η ετήσια δόση. Δίνεται από τον τύπο:

$$CRF(i, N) = \frac{i * (i+1)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (4.35)$$

όπου N είναι τα χρόνια αποπληρωμής του δανείου, δηλαδή $N=R_{proj}$

Μετατροπή κόστους αντικατάστασης στο τέλος ζωής σε ετήσιο.

Η διάρκεια ζωής του project δεν είναι υποχρεωτικά ίδια με τη διάρκεια ζωής του συστατικού. Οπότε, αν η διάρκεια ζωής του project είναι μεγαλύτερη από τη διάρκεια ζωής του συστατικού, τότε το συστατικό θα πρέπει να αντικατασταθεί όταν τελειώσει η διάρκεια ζωής του. Αυτό έχει κάποιο κόστος που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αντίστοιχα, αν η διάρκεια ζωής του project είναι μικρότερη από τη διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού, τότε όταν τελειώσει η διάρκεια ζωής του project, το φωτοβολταϊκό θα έχει κάποια αξία που επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη. Για τον υπολογισμό των παραπάνω απαιτείται ένας παράγοντας που δίνεται από τη σχέση:

$$f_{rep} = \begin{cases} CRF(i, R_{proj}) / CRF(i, R_{comp}) & , \quad \alpha\nu \quad R_{comp} > 0 \\ 0 & , \quad \alpha\nu \quad R_{comp} = 0 \end{cases} \quad (4.36)$$

Η διάρκεια ζωής που απομένει στο συστατικό όταν τελειώσει η διάρκεια ζωής του project είναι:

$$R_{rem} = R_{comp} - (R_{proj} - R_{rep}) \quad (4.37)$$

$$\text{όπου} \quad R_{rep} = R_{comp} \text{INT} \frac{R_{proj}}{R_{comp}} \quad (4.38)$$

όπου η συνάρτηση INT στρογγυλοποιεί έναν πραγματικό αριθμό στον αμέσως μικρότερο ακέραιο.

Αν υποθεθεί ότι η αξία του συστατικού όταν τελειώσει η διάρκεια ζωής του project είναι ανάλογη με την R_{rem} , τότε η αξία του συστατικού όταν τελειώσει η διάρκεια ζωής του project είναι:

$$S = C_{rep} \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (4.39)$$

Τελικά, τα ετήσια κόσθη αντικατάστασης δίνονται από τη σχέση:

$$C_{arep} = C_{rep} * f_{reppv} * SFF(t, R_{comp}) - S * SFF(i, R_{proj}) \quad (4.40)$$

όπου $SFF(j, N)$ είναι ένας μετασχηματιστής που μετατρέπει ένα μελλοντικό ποσό διαθέσιμο μετά από N έτη σε ένα ετήσιο ποσό. Με άλλα λόγια, αν θέλει κάποιος να υπολογίσει πόσα χρήματα πρέπει να καταθέσει σε μια τράπεζα που δίνει τόκο i ώστε μετά από N έτη να έχει ένα ποσό F , τότε πρέπει να πολλαπλασιαστεί το ποσό F με τον μετασχηματιστή $SFF(i, N)$. Ο μετασχηματιστής $SFF(i, N)$ δίνεται από τη σχέση:

$$SFF(i, N) = \frac{i}{(i+1)^N - 1} \quad (4.41)$$

Συνολικά ετήσια κόσθη συστατικού

Τα συνολικά ετήσια κόσθη του συστατικού (C_{comp}) προκύπτουν προφανώς αν προστεθούν τα κόσθη C_{cap} , C_{rep} και OM :

$$AnCost_{cap} = C_{cap} + C_{rep} + OM \quad (4.42)$$

4.8.2 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΕΤΗΣΙΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΤΑ ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το κόστος των φωτοβολταϊκών εξαρτάται από την ισχύ που αποδίδουν σε πρότυπες συνθήκες. Έτσι τα κόστη C_{capPU} , C_{repPU} και OM_{PU} στα φωτοβολταϊκά πρέπει να δίνονται ανά μονάδα ισχύος που αποδίδουν σε πρότυπες συνθήκες. Στη συνέχεια, τα παραπάνω κόστη πολλαπλασιάζονται με την ονομαστική ισχύ του φωτοβολταϊκού Y_{pv} , ώστε να βρεθούν τα κόστη C_{cap} , C_{rep} και OM .

Η διάρκεια ζωής της ντιζελογεννήτριας δίνεται σε ώρες που μπορεί να λειτουργήσει. Άρα για να βρεθεί η διάρκεια ζωής σε έτη διαιρείται η διάρκεια ζωής σε ώρες με τις ώρες λειτουργίας σε ένα έτος. Όσον αφορά τα κόστη, τα C_{capPU} και C_{repPU} αναφέρονται ανά μονάδα ισχύος που αποδίδουν, όπως και στα φωτοβολταϊκά. Για να βρεθούν τα κόστη C_{cap} , C_{rep} στην ντιζελογεννήτρια πρέπει να πολλαπλασιαστούν τα C_{capPU} , C_{repPU} με την μέγιστη ισχύ P_{max} που μπορεί να αποδώσει. Όμως τα ετήσια κόστη λειτουργίας OM_{PU} είναι ανάλογα με τις ώρες που λειτουργεί σε ένα έτος ($OM_{PU}=OM$ για κινητήρα diesel). Οπότε, αν για παράδειγμα, η μία ώρα λειτουργίας κοστίζει 0,2€, τότε οι 3000 ώρες λειτουργίας κοστίζουν $0,2€/hr*3000 hr = 600€$. Τέλος, στα συνολικά ετήσια κόστη πρέπει να προστεθούν και τα ετήσια κόστη των καυσίμων.

Στις μπαταρίες η διάρκεια ζωής δεν δίνεται σε έτη αλλά στην συνολική ενέργεια φόρτισης σε kWh που μπορούν να δεχτούν. Για να μετατραπεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε έτη, διαιρείται η διάρκεια ζωής σε kWh με τα kWh που λαμβάνει η μπαταρία σε ένα έτος.

Στις ανεμογεννήτριες δεν υπάρχει καμία αλλαγή στον τρόπο υπολογισμού του ετήσιου κόστους. Οι ανεμογεννήτριες αγοράζονται σε μονάδες, όπου κάθε μονάδα έχει μια συγκεκριμένη ονομαστική ισχύ. Επίσης, η διάρκεια ζωής τους δίνεται σε έτη.

4.8.3 ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα συνολικά ετήσια έξοδα των συστατικών του μικροδικτύου $AnCost_{proj}$ είναι:

$$AnCost_{proj} = AnCost_{pv} + AnCost_{wt} + AnCost_b + AnCost_{die} \quad (4.43)$$

όπου $AnCost_{pv}$, $AnCost_{wt}$, $AnCost_b$ και $AnCost_{die}$ είναι τα συνολικά ετήσια έξοδα των φωτοβολταϊκών, των ανεμογεννητριών, των μπαταριών και της μηχανής diesel αντίστοιχα.

Αν στο $AnCost_{proj}$ προστεθούν τα ετήσια κόστη και αφαιρεθούν τα ετήσια κέρδη που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 4.7, τότε προκύπτουν τα συνολικά ετήσια κόστη του μικροδικτύου. Το ποσό που προκύπτει διαιρείται με το συνολικό φορτίο που πρέπει να ικανοποιήσει το μικροδίκτυο ($sum(Load)$) για να προκύψει το κόστος ανά kWh (COE) [4.5] [4.6] :

$$COE = \frac{AnCost_{proj} + AnCost_{griddie} + AnCost_{gridLOFE} - AnCost_{gridpv} - AnCost_{gridwt}}{sum(Load)} \quad (4.43)$$

4.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] John A. Duffie, William A Beckman, “*Solar engineering of thermal processes*”, Second edition, New York June 1980.
- [4.2] Π. Γεωργιλάκης, “*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*”, Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά Σεπτέμβριος 2006.
- [4.3] C. Dennis Barley, C. Byron Winn, “*Optimal Dispatch Strategy in remote hybrid power systems*”, Solar Energy, Vol. 58, no 4-6, pp 165-179, 1996.
- [4.4] www.rae.gr, “*Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας*”.
- [4.5] <http://www.nrel.gov/homer>, “*HOMER*”.
- [4.6] Γ. Δούνιος, Β. Μουστάκης, “*Μεθοδολογίες λήψης οικονομοτεχνικών αποφάσεων*”, Εκδόσεις Πυξίδα, Χίος 2002.

ΣΕΝΑΡΙΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται συνολικά έξι σενάρια από τα οποία τα τέσσερα θεωρούν ότι το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το σύστημα διανομής της Δ.Ε.Η. και τα άλλα δυο θεωρούν ότι το μικροδίκτυο είναι απομονωμένο. Για κάθε σενάριο το πρόγραμμα αναζητεί τον βέλτιστο συνδυασμό των συστατικών του μικροδικτύου με κριτήριο το κόστος της ενέργειας.

5.2 ΚΟΙΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για όλα τα σενάρια που ακολουθούν θεωρείται ότι οι μπαταρίες και η ντιζελογεννήτρια έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2. Επίσης, για όλα τα σενάρια ο άνεμος, η ακτινοβολία και το φορτίο είναι κοινά, έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Το μέγιστο φορτίο είναι 47,6 kW, ενώ το συνολικό φορτίο που πρέπει να καλυφθεί είναι 174790,1096 kW. Ακόμη, η μέγιστη ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι 100 kW_p, η μέγιστη ισχύς της ντιζελογεννήτριας είναι 50 kW, ο μέγιστος αριθμός ανεμογεννητριών είναι 10 μονάδες και ο μέγιστος αριθμός μπαταριών είναι 160 μονάδες. Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 4.1 του προηγούμενου κεφαλαίου. Η αγορά των συστατικών υποτίθεται ότι έγινε με σύναψη δανείου με επιτόκιο 8%. Τέλος, στην στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας ισχύει ότι $SOC_{max}=80\%$ και $SOC_{min}=30\%$.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά ντιζελογεννήτριας.

Αρχικό κόστος	Κόστος αντικατάστασης	Ετήσια κόστη λειτουργίας	Κόστος καυσίμου	Διάρκεια ζωής	Ελάχιστη απόδοση ως ποσοστό μέγιστης απόδοσης
150 €/kW	150 €/kW	0,2 €/kWh	0,6 €/L	20000 hrs	30%

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά μπαταρίας.

Αρχικό κόστος	Κόστος αντικατάστασης	Ετήσια κόστη λειτουργίας	Χωρητικότητα	Διάρκεια ζωής	Βαθμός απόδοσης
1000 €/unit	1000 €/unit	50 €/unit	6 kWh (1000 Ah)	10000 kWh	85%

5.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Στα δύο πρώτα σενάρια που ακολουθούν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το σύστημα διανομής χαμηλής τάσης και στα άλλα δύο με το σύστημα διανομής μέσης τάσης. Στο σύστημα διανομής χαμηλής τάσης το μικροδίκτυο μπορεί να αγοράσει ενέργεια από τη Δ.Ε.Η. σε τιμή $T_{grid}=0,095$ €/kWh, ενώ στο σύστημα διανομής χαμηλής τάσης $T_{grid}=0,05$ €/kWh. Σε όλα τα σενάρια η τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά (T_{pv}) είναι 0,45 €/kWh και η τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες (T_{wt}) είναι 0,0846 €/kWh (οι τιμές δίνονται και στον Πίνακα 4.1). Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές, όλη η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πωλείται στη Δ.Ε.Η. Αυτό συμβαίνει, επειδή $T_{pv}>T_{grid}$. Ακόμη, αναφέρεται ότι δεν υπάρχει ακάλυπτο φορτίο. Τέλος, η στρατηγική που εφαρμόζεται είναι η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου αλλά συγκρίνεται με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

Σενάριο 1

Στο πρώτο σενάριο, το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης, επομένως η τιμή αγοράς ενέργειας από τη Δ.Ε.Η. (T_{grid}) είναι 0,095 €/kWh. Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4.7, αυτό σημαίνει ότι μόνο η ενέργεια που περισσεύει από τις ανεμογεννήτριες πωλείται στη Δ.Ε.Η., αφού $T_{wt}<T_{grid} \Rightarrow 0,0846\text{€}<0,095\text{€}$. Τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.3 και 5.4 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού.

Αρχικό κόστος	Κόστος αντικατάστασης	Ετήσια κόστη λειτουργίας	Διάρκεια ζωής
5000 €/kW _p	5000 €/kW _p	0 €	20 έτη

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας.

Αρχικό κόστος	Κόστος αντικατάστασης	Ετήσια κόστη λειτουργίας	Ονομαστική ισχύς	Διάρκεια ζωής
15000 €/unit	15000 €/unit	1000 €/unit	20 kW	20 έτη

Στη συνέχεια, φαίνονται τα τριάντα καλύτερα και τα τριάντα χειρότερα αποτελέσματα για τα παραπάνω δεδομένα.

Πίνακας 5.5: Τριάντα καλύτερα αποτελέσματα για σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

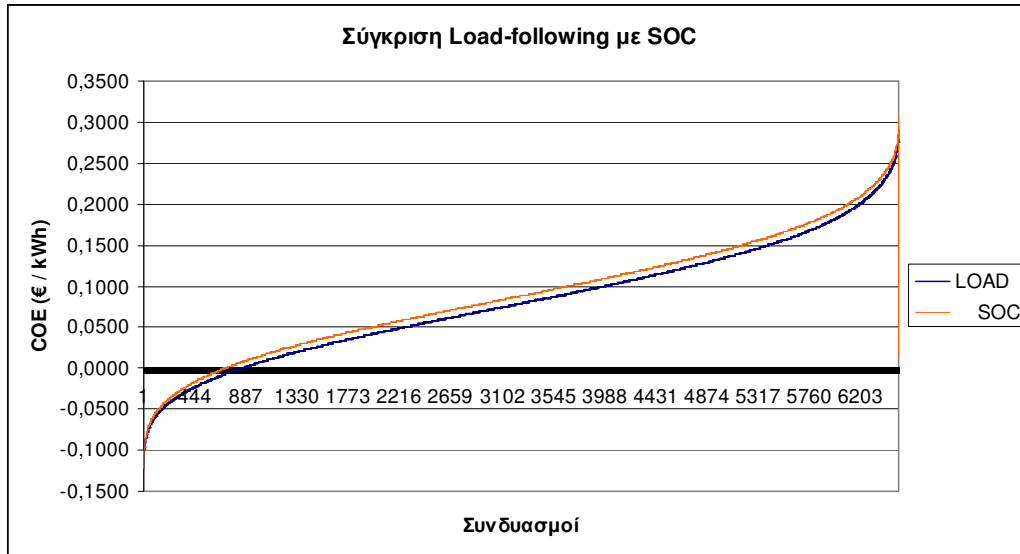
A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπαταρίες	Φ/B	A/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Αρχικό κόστος (€)
1	-0,1219	0	100	10	0	650000
2	-0,1135	0	100	9	0	635000
3	-0,1091	0	90	10	0	600000
4	-0,1051	0	100	8	0	620000
5	-0,1035	0	100	10	10	651500
6	-0,1007	0	90	9	0	585000
7	-0,0991	20	100	10	0	670000
8	-0,0966	0	100	7	0	605000
9	-0,0963	0	80	10	0	550000
10	-0,0943	0	100	9	10	636500
11	-0,0923	0	90	8	0	570000
12	-0,0908	0	100	10	20	653000
13	-0,0906	20	100	9	0	655000
14	-0,0903	0	90	10	10	601500
15	-0,0896	20	100	10	10	671500
16	-0,0881	0	100	6	0	590000
17	-0,0879	0	80	9	0	535000
18	-0,0864	20	90	10	0	620000
19	-0,0851	0	100	8	10	621500
20	-0,0838	0	90	7	0	555000
21	-0,0835	0	70	10	0	500000
22	-0,0831	20	100	10	20	673000
23	-0,0820	20	100	8	0	640000
24	-0,0816	40	100	10	0	690000
25	-0,0812	0	100	9	20	638000
26	-0,0811	0	90	9	10	586500
27	-0,0805	20	100	9	10	656500
28	-0,0796	0	100	5	0	575000
29	-0,0795	0	80	8	0	520000
30	-0,0792	0	100	10	30	654500

Το ελάχιστο κόστος ενέργειας είναι $-0,1219$ €/kWh, το οποίο προκύπτει για αγορά φωτοβολταϊκών με ονομαστική ισχύ 100 kW_p και δέκα ανεμογεννητριών. Το αρχικό κόστος της παραπάνω επένδυσης είναι 650000 €. Το ελάχιστο κόστος ενέργειας είναι αρνητικό που σημαίνει ότι προκύπτει κέρδος από την πώληση της ενέργειας. Με άλλα λόγια τα έσοδα είναι μεγαλύτερα από τα έξοδα. Έσοδα προκύπτουν για δύο λόγους. Πρώτον, επειδή όλη η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πωλείται στη Δ.Ε.Η., αφού $T_{pv} > T_{grid}$ και δεύτερον, επειδή η ενέργεια που περισσεύει από τις ανεμογεννήτριες πωλείται επίσης στη Δ.Ε.Η.

Πίνακας 5.6: Τριάντα χειρότερα αποτελέσματα για σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπαταρίες	Φ/B	Α/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Αρχικό κόστος (€)
1	0,2559	160	10	0	10	211500
2	0,2574	140	0	1	40	161000
3	0,2580	140	10	0	40	196000
4	0,2583	160	0	2	30	194500
5	0,2586	160	0	3	50	212500
6	0,2586	160	10	0	20	213000
7	0,2588	160	20	0	40	266000
8	0,2601	160	10	1	40	231000
9	0,2608	140	0	0	30	144500
10	0,2613	160	0	1	20	178000
11	0,2616	120	0	0	50	127500
12	0,2628	160	0	2	40	196000
13	0,2631	140	0	1	50	162500
14	0,2643	140	10	0	50	197500
15	0,2643	160	10	0	30	214500
16	0,2650	160	10	1	50	232500
17	0,2651	160	20	0	50	267500
18	0,2660	160	0	1	30	179500
19	0,2671	160	0	2	50	197500
20	0,2682	160	0	0	10	161500
21	0,2690	140	0	0	40	146000
22	0,2704	160	0	0	20	163000
23	0,2722	160	0	1	40	181000
24	0,2728	160	10	0	40	216000
25	0,2756	160	0	0	30	164500
26	0,2765	140	0	0	50	147500
27	0,2779	160	0	1	50	182500
28	0,2792	160	10	0	50	217500
29	0,2839	160	0	0	40	166000
30	0,2913	160	0	0	50	167500

Τέλος, στο Σχήμα 5.1 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.



Σχήμα 5.1: Σύγκριση στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

Σενάριο 2

Σε αυτό το σενάριο, το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το σύστημα διαμονής μέσης τάσης, επομένως η τιμή αγοράς ενέργειας από τη Δ.Ε.Η. (T_{grid}) είναι 0,05 €/kWh. Άρα οι ανεμογεννήτριες πωλούν όλη την ενέργεια που παράγουν στη Δ.Ε.Η. επειδή $T_{wt} > T_{grid} \Rightarrow 0,0846 \text{ €} > 0,05 \text{ €}$. Τα κόστη και τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών είναι ίδια με το προηγούμενο σενάριο, δηλαδή δίνονται στους Πίνακες 5.3 και 5.4. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα τριάντα καλύτερα και τα τριάντα χειρότερα σενάρια.

Πίνακας 5.7: Τριάντα καλύτερα αποτελέσματα για σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο μέσης τάσης.

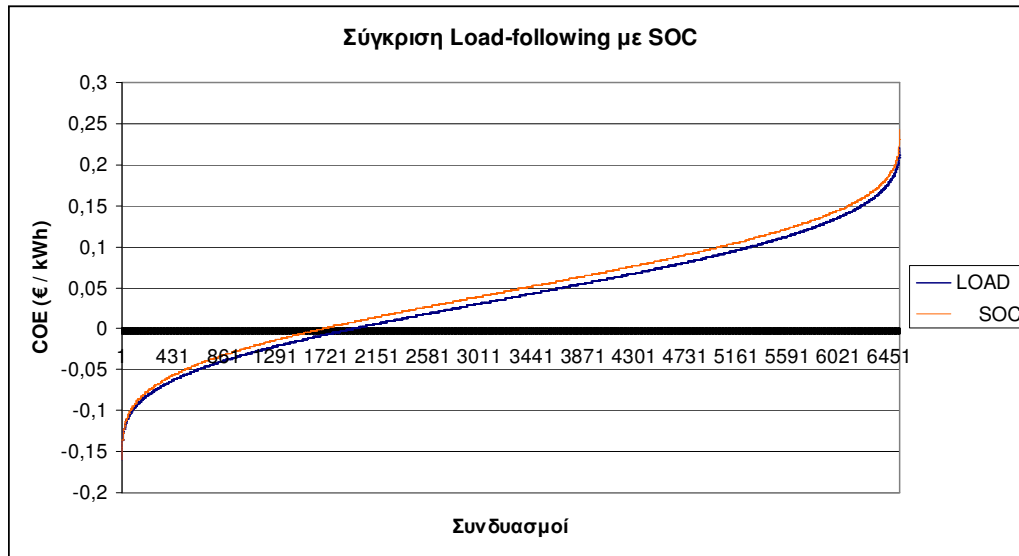
A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπαταρίες	Φ/Β	Α/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Αρχικό κόστος (€)
1	-0,1606	0	100	10	0	650000
2	-0,1523	0	100	9	0	635000
3	-0,1478	0	90	10	0	600000
4	-0,1440	0	100	8	0	620000
5	-0,1395	0	90	9	0	585000
6	-0,1380	20	100	10	0	670000
7	-0,1367	0	100	10	10	651500
8	-0,1357	0	100	7	0	605000
9	-0,1350	0	80	10	0	550000
10	-0,1312	0	90	8	0	570000
11	-0,1297	20	100	9	0	655000
12	-0,1275	0	100	9	10	636500
13	-0,1275	0	100	6	0	590000
14	-0,1267	0	80	9	0	535000
15	-0,1257	20	100	10	10	671500
16	-0,1253	20	90	10	0	620000
17	-0,1234	0	90	10	10	601500
18	-0,1229	0	90	7	0	555000
19	-0,1222	0	70	10	0	500000
20	-0,1217	0	100	10	20	653000
21	-0,1213	20	100	8	0	640000
22	-0,1207	40	100	10	0	690000
23	-0,1192	0	100	5	0	575000
24	-0,1184	0	80	8	0	520000
25	-0,1183	0	100	10	30	654500
26	-0,1182	0	100	8	10	621500
27	-0,1177	20	100	10	20	673000
28	-0,1169	20	90	9	0	605000
29	-0,1166	20	100	9	10	656500
30	-0,1163	0	100	10	40	656000

Το ελάχιστο κόστος ενέργειας είναι $-0,1606$ €/kWh, το οποίο προκύπτει όπως και στο προηγούμενο σενάριο για αγορά φωτοβολταϊκών με ονομαστική ισχύς 100 kW_p και δέκα ανεμογεννητριών και με αρχικό κόστος επένδυσης 650000 €. Το ελάχιστο κόστος είναι αρνητικό επειδή τα έσοδα είναι μεγαλύτερα από τα έξοδα. Σε αυτό το σενάριο πωλείται και πάλι όλη η ενέργεια που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά στη Δ.Ε.Η. Επίσης, πωλείται όλη η ενέργεια που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες στη Δ.Ε.Η., σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο όπου πωλείται μόνο η ενέργεια που περίσσευε από τις ανεμογεννήτριες στη Δ.Ε.Η. Για αυτό το λόγο, το ελάχιστο κόστος ενέργειας είναι σε αυτό το σενάριο μικρότερο από το προηγούμενο σενάριο.

Πίνακας 5.8: Τριάντα χειρότερα αποτελέσματα για σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο μέσης τάσης.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπαταρίες	Φ/Β	Α/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Αρχικό κόστος (€)
1	0,1941	140	0	0	20	143000
2	0,1952	160	10	0	10	211500
3	0,1954	160	20	0	50	267500
4	0,1957	160	0	3	40	211000
5	0,1961	140	0	0	30	144500
6	0,1966	160	10	1	40	231000
7	0,1967	160	10	0	20	213000
8	0,1969	140	0	1	50	162500
9	0,1974	160	0	3	50	212500
10	0,1980	160	0	2	10	191500
11	0,1987	160	0	2	20	193000
12	0,1990	160	10	1	50	232500
13	0,1993	160	10	0	30	214500
14	0,2004	160	0	2	30	194500
15	0,2005	140	0	0	40	146000
16	0,2013	160	0	1	10	176500
17	0,2025	160	0	2	40	196000
18	0,2027	160	0	1	20	178000
19	0,2045	160	10	0	40	216000
20	0,2046	160	0	2	50	197500
21	0,2051	160	0	1	30	179500
22	0,2059	140	0	0	50	147500
23	0,2078	160	0	0	10	161500
24	0,2084	160	0	1	40	181000
25	0,2086	160	10	0	50	217500
26	0,2089	160	0	0	20	163000
27	0,2109	160	0	0	30	164500
28	0,2118	160	0	1	50	182500
29	0,2154	160	0	0	40	166000
30	0,2207	160	0	0	50	167500

Στο Σχήμα 5.2 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.



Σχήμα 5.2: Σύγκριση στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

Σενάριο 3

Το τρίτο σενάριο, θεωρεί ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιδοτούνται, οπότε τα κόστη είναι πιο χαμηλά και παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.9 και 4.10. Επίσης, θεωρεί ότι το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το σύστημα διανομής χαμηλής τάσης, επομένως $T_{wt} < T_{grid} \Rightarrow 0,0846 \text{ €} < 0,095 \text{ €}$ και μόνο η ενέργεια που περισσεύει από τις ανεμογεννήτριες πωλείται στο δίκτυο.

Πίνακας 5.9: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού.

Αρχικό κόστος	Κόστος αντικατάστασης	Ετήσια κόστη λειτουργίας	Διάρκεια ζωής
2500 €/kW _p	2500 €/kW _p	0 €	20 έτη

Πίνακας 5.10: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας.

Αρχικό κόστος	Κόστος αντικατάστασης	Ετήσια κόστη λειτουργίας	Ονομαστική ισχύς	Διάρκεια ζωής
8000 €/unit	8000 €/unit	1000 €/unit	20 kW	20 έτη

Στους Πίνακες 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται οι τριάντα καλύτερα και οι τριάντα χειρότεροι συνδυασμοί.

Πίνακας 5.11: Τριάντα καλύτερα αποτελέσματα για σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο χαμηλής τάσης και με επιδότηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπαταρίες	Φ/Β	A/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Αρχικό κόστος (€)
1	-0,3084	0	100	10	0	330000
2	-0,2959	0	100	9	0	322000
3	-0,2899	0	100	10	10	331500
4	-0,2856	20	100	10	0	350000
5	-0,2834	0	100	8	0	314000
6	-0,2810	0	90	10	0	305000
7	-0,2773	0	100	10	20	333000
8	-0,2767	0	100	9	10	323500
9	-0,2761	20	100	10	10	351500
10	-0,2730	20	100	9	0	342000
11	-0,2708	0	100	7	0	306000
12	-0,2696	20	100	10	20	353000
13	-0,2685	0	90	9	0	297000
14	-0,2680	40	100	10	0	370000
15	-0,2657	0	100	10	30	334500
16	-0,2642	20	100	10	30	354500
17	-0,2635	0	100	9	20	325000
18	-0,2635	0	100	8	10	315500
19	-0,2629	20	100	9	10	343500
20	-0,2622	40	100	10	10	371500
21	-0,2622	0	90	10	10	306500
22	-0,2620	20	100	10	40	356000
23	-0,2603	20	100	8	0	334000
24	-0,2583	0	100	6	0	298000
25	-0,2583	20	90	10	0	325000
26	-0,2582	20	100	10	50	357500
27	-0,2580	40	100	10	20	373000
28	-0,2561	20	100	9	20	345000
29	-0,2560	0	90	8	0	289000
30	-0,2552	40	100	9	0	362000

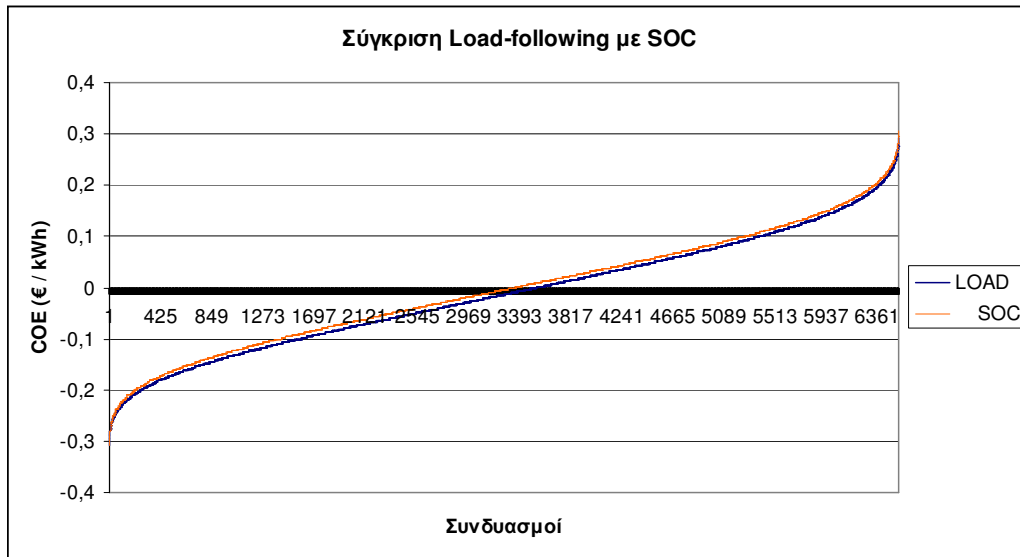
Το ελάχιστο κόστος ενέργειας είναι $-0,3084$ €/kWh, το οποίο προκύπτει για αγορά φωτοβολταϊκών με ονομαστική ισχύ 100 kW_p και δέκα ανεμογεννητριών. Το

αρχικό κόστος της παραπάνω επένδυσης είναι 330000 €. Το ελάχιστο κόστος ενέργειας είναι αρνητικό που σημαίνει ότι προκύπτει κέρδος από την πώληση της ενέργειας. Είναι αρνητικό για τους ίδιους λόγους που ήταν αρνητικό στο σενάριο ένα.

Πίνακας 5.12: Τριάντα χειρότερα αποτελέσματα για σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο χαμηλής τάσης και με επιδότηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπαταρίες	Φ/B	A/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Αρχικό κόστος (€)
1	0,2464	160	10	1	50	200500
2	0,2468	100	0	0	50	107500
3	0,2471	140	0	1	30	152500
4	0,2477	160	0	2	20	179000
5	0,2498	140	10	0	50	172500
6	0,2498	160	10	0	30	189500
7	0,2501	160	0	2	30	180500
8	0,2502	160	0	1	10	169500
9	0,2533	140	0	1	40	154000
10	0,2534	140	0	0	10	141500
11	0,2542	120	0	0	40	126000
12	0,2546	160	0	2	40	182000
13	0,2556	140	0	0	20	143000
14	0,2573	160	0	1	20	171000
15	0,2583	160	10	0	40	191000
16	0,2590	160	0	2	50	183500
17	0,2590	140	0	1	50	155500
18	0,2608	140	0	0	30	144500
19	0,2616	120	0	0	50	127500
20	0,2620	160	0	1	30	172500
21	0,2646	160	10	0	50	192500
22	0,2682	160	0	1	40	174000
23	0,2682	160	0	0	10	161500
24	0,2690	140	0	0	40	146000
25	0,2704	160	0	0	20	163000
26	0,2739	160	0	1	50	175500
27	0,2756	160	0	0	30	164500
28	0,2765	140	0	0	50	147500
29	0,2839	160	0	0	40	166000
30	0,2913	160	0	0	50	167500

Στο Σχήμα 5.3 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.



Σχήμα 5.3: Σύγκριση στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

Σενάριο 4

Το τελευταίο σενάριο θεωρεί, όπως και το προηγούμενο, ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιδοτούνται. Τα χαρακτηριστικά και τα κόστη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ίδια με το τρίτο σενάριο και φαίνονται στους πίνακες 5.9 και 5.10. Το μόνο που αλλάζει είναι ότι το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το σύστημα διανομής μέσης τάσης, οπότε $T_{wt} > T_{grid} \Rightarrow 0,0846 \text{ €} > 0,05 \text{ €}$ άρα όλη η ενέργεια που παράγουν οι ανεμογεννήτριες πωλείται στη Δ.Ε.Η. Τα τριάντα καλύτερα και τα τριάντα χειρότερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.13 και 5.14.

Πίνακας 5.12: Τριάντα καλύτερα αποτελέσματα για σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο μέσης τάσης και με επιδότηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

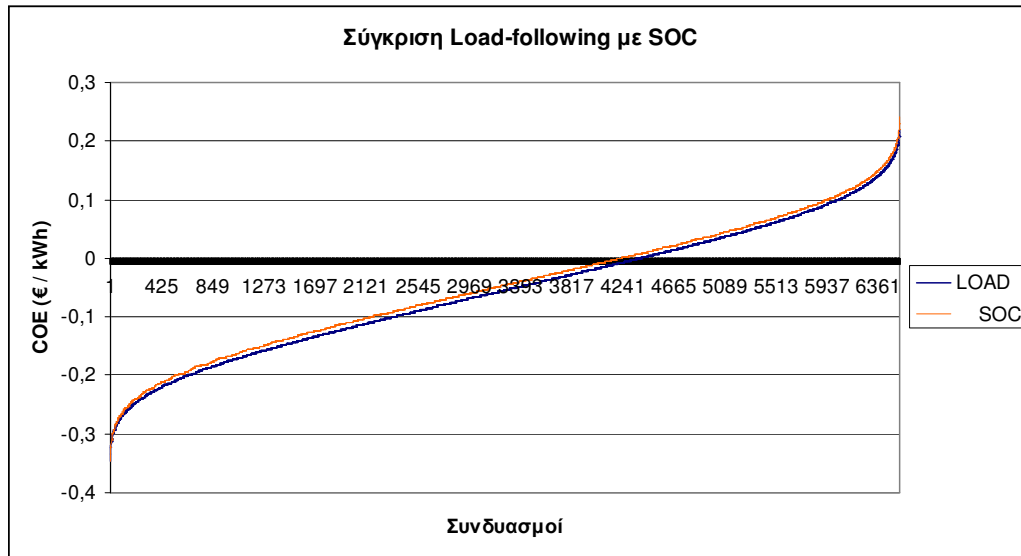
A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπαταρίες	Φ/Β	Α/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Αρχικό κόστος (€)
1	-0,3470	0	100	10	0	330000
2	-0,3346	0	100	9	0	322000
3	-0,3245	20	100	10	0	350000
4	-0,3231	0	100	10	10	331500
5	-0,3223	0	100	8	0	314000
6	-0,3196	0	90	10	0	305000
7	-0,3121	20	100	10	10	351500
8	-0,3120	20	100	9	0	342000
9	-0,3099	0	100	7	0	306000
10	-0,3098	0	100	9	10	323500
11	-0,3081	0	100	10	20	333000
12	-0,3073	0	90	9	0	297000
13	-0,3071	40	100	10	0	370000
14	-0,3047	0	100	10	30	334500
15	-0,3041	20	100	10	20	353000
16	-0,3027	0	100	10	40	336000
17	-0,3008	0	100	10	50	337500
18	-0,2996	40	100	10	10	371500
19	-0,2995	20	100	8	0	334000
20	-0,2989	20	100	9	10	343500
21	-0,2981	20	100	10	30	354500
22	-0,2976	0	100	6	0	298000
23	-0,2971	20	90	10	0	325000
24	-0,2965	0	100	8	10	315500
25	-0,2958	20	100	10	40	356000
26	-0,2953	0	90	10	10	306500
27	-0,2949	0	90	8	0	289000
28	-0,2945	40	100	9	0	362000
29	-0,2944	40	100	10	20	373000
30	-0,2942	0	100	9	20	325000

Το ελάχιστο κόστος ενέργειας είναι $-0,3470$ €/kWh, το οποίο προκύπτει και πάλι για αγορά φωτοβολταϊκών με ονομαστική ισχύ 100 kW_p και δέκα ανεμογεννητριών. Το αρχικό κόστος της παραπάνω επένδυσης είναι 330000 €. Το ελάχιστο κόστος ενέργειας είναι αρνητικό και σε αυτό το σενάριο, που σημαίνει ότι προκύπτει κέρδος από την πώληση της ενέργειας. Είναι αρνητικό για τους ίδιους λόγους που ήταν αρνητικό στο σενάριο δύο.

Πίνακας 5.12: Τριάντα χειρότερα αποτελέσματα για σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο μέσης τάσης και με επιδότηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπαταρίες	Φ/Β	Α/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Αρχικό κόστος (€)
1	0,1838	140	0	1	20	151000
2	0,1847	160	10	0	30	189500
3	0,1851	160	0	3	50	191500
4	0,1857	120	0	0	40	126000
5	0,1861	140	0	1	30	152500
6	0,1895	140	0	1	40	154000
7	0,1898	160	0	2	10	177500
8	0,1899	160	10	0	40	191000
9	0,1906	160	0	2	20	179000
10	0,1910	120	0	0	50	127500
11	0,1923	160	0	2	30	180500
12	0,1928	140	0	1	50	155500
13	0,1929	140	0	0	10	141500
14	0,1940	160	10	0	50	192500
15	0,1941	140	0	0	20	143000
16	0,1943	160	0	2	40	182000
17	0,1961	140	0	0	30	144500
18	0,1964	160	0	2	50	183500
19	0,1972	160	0	1	10	169500
20	0,1987	160	0	1	20	171000
21	0,2005	140	0	0	40	146000
22	0,2010	160	0	1	30	172500
23	0,2044	160	0	1	40	174000
24	0,2059	140	0	0	50	147500
25	0,2077	160	0	1	50	175500
26	0,2078	160	0	0	10	161500
27	0,2089	160	0	0	20	163000
28	0,2109	160	0	0	30	164500
29	0,2154	160	0	0	40	166000
30	0,2207	160	0	0	50	167500

Στο Σχήμα 5.4 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.



Σχήμα 5.4: Σύγκριση στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

5.3.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρείται από τα παραπάνω αποτελέσματα ότι για όλα τα σενάρια η βέλτιστη πολιτική είναι η αγορά φωτοβολταϊκών με ονομαστική ισχύ 100 kW_p και 10 ανεμογεννητριών οι οποίες έχουν συνολική ονομαστική ισχύ 200 kW. Οι αριθμοί αυτοί είναι οι μέγιστοι επιτρεπτοί. Αυτό συμβαίνει επειδή η ενέργεια που παράγουν οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. πωλείται στην Δ.Ε.Η., άρα προκύπτουν έσοδα. Επίσης, παρατηρείται ότι υπάρχουν συνδυασμοί που ενώ έχουν μεγαλύτερο αρχικό κόστος από τη βέλτιστη πολιτική, έχουν μεγαλύτερο κόστος ενέργειας από τη βέλτιστη πολιτική. Τέλος, συμπεραίνεται ότι η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου δίνει συνδυασμούς με χαμηλότερο κόστος ενέργειας από ότι η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

5.3.2 ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ HOMER

Η φιλοσοφία του HOMER είναι διαφορετική από αυτή του αλγορίθμου της παρούσας εργασίας, οπότε δεν είναι δυνατόν να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των κοστών ενέργειας που υπολογίζει το HOMER και των κοστών ενέργειας της ενότητας 5.3.

Σε όλα τα σενάρια της ενότητας 5.3 το λογισμικό βρήκε ότι η βέλτιστη λύση προκύπτει για 10 ανεμογεννήτριες και για φωτοβολταϊκά με ισχύ 100 kW_p. Σύμφωνα με το HOMER αν το μικροδίκτυο έχει φωτοβολταϊκά με ισχύ 100 kW_p και 10 ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 20 kW η καθεμία (Generic 20 kW), τότε η συνολική ενέργεια που παράγουν οι ανεμογεννήτριες σε ένα έτος είναι 618063 kWh και η συνολική ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά είναι 137659 kWh, όπως

φαίνεται στον πίνακα 5.13. Το συνολικό φορτίο που πρέπει να ικανοποιηθεί είναι 174835 kWh.

Τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών που απαιτούνται στα παρακάτω σενάρια για να υπολογίσει το HOMER τα ετήσια έξοδα των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην ενότητα 5.2. Δηλαδή για τα σενάρια ένα και δύο χρειάζονται οι πίνακες 5.3 και 5.4 και για τα σενάρια τρία και τέσσερα χρειάζονται οι πίνακες 5.9 και 5.10. Τέλος, επισημαίνεται ότι οι τιμές πώλησης και αγοράς ενέργειας δίνονται στους πίνακες 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.13: Παραγωγή ενέργειας με βάση το HOMER.

Πηγή ενέργειας	Παραγωγή ενέργειας σε ένα έτος (kWh)
Ανεμογεννήτριες	618063
Φωτοβολταϊκά	137659

Σενάριο 1: Σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

Σε αυτό το σενάριο όλη η ενέργεια που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά πωλείται στο δίκτυο προς 0,45 €/kWh. Γίνεται η υπόθεση ότι η ζήτηση ικανοποιείται από την ενέργεια που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες. Τέλος θεωρείται ότι η ενέργεια που περισσεύει από τις ανεμογεννήτριες (618063 kWh-174838 kWh) πωλείται στο δίκτυο σε τιμή 0,095 €/kWh. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα ετήσια έσοδα από την πώληση της ενέργειας είναι:

$$137659*0,45+(618063-174838)*0,095=104053 \text{ €}$$

Σύμφωνα με το HOMER, τα ετήσια έξοδα των ανεμογεννητριών είναι 25278 € και των φωτοβολταϊκών είναι 50926 €. Αν τα δύο παραπάνω ετήσια έξοδα αφαιρεθούν από τα ετήσια έσοδα (104053 €) τότε προκύπτουν τα συνολικά ετήσια έσοδα:

$$104053-25278-50926=27849 \text{ €}$$

Επομένως το κόστος της ενέργειας είναι:

$$\begin{aligned} \text{Κόστος ενέργειας} &= \text{ετήσια έσοδα/ζήτηση} = -27849/174838 \Rightarrow \\ &\text{Κόστος ενέργειας} = -0,159 \text{ €/kWh} \end{aligned}$$

Σενάριο 2: Σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο μέσης τάσης.

Το μόνο που διαφέρει σε αυτό το σενάριο από το προηγούμενο είναι ότι η τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο είναι 0,05 €/kWh. Σε αυτή την περίπτωση, επειδή η τιμή πώλησης ενέργειας που προέρχεται από ανεμογεννήτριες είναι υψηλότερη από την τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο, πωλείται όλη η ενέργεια που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες στο δίκτυο (618063 kWh*0,0846 €/kWh)

και αγοράζεται όση χρειάζεται. Η ενέργεια που χρειάζεται είναι η ζήτηση (174838 kWh*0,05 €/kWh). Η ενέργεια που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά (137659 kWh) πωλείται στο δίκτυο προς 0,45 €/kWh. Σύμφωνα με τα παραπάνω τα ετήσια έσοδα από την πώληση της ενέργειας είναι:

$$137659*0,45+618063*0,0846-174838*0,05=105492,78 \text{ €}$$

Όμοιας με το σενάριο 1 τα ετήσια έξοδα των ανεμογεννητριών είναι 25278 € και των φωτοβολταϊκών είναι 50926 €. Άρα τα συνολικά ετήσια έσοδα είναι:

$$105492,78-25278-50926=29288,78 \text{ €}$$

Επομένως το κόστος της ενέργειας είναι:

$$\begin{aligned} \text{Κόστος ενέργειας} &= \text{ετήσια έσοδα/ζήτηση } 29288,78/174838 \Rightarrow \\ \text{Κόστος ενέργειας} &= -0,168 \text{ €/kWh} \end{aligned}$$

Σενάριο 3: Σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο χαμηλής τάσης και με επιδότηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Όπως και στο σενάριο 1 τα ετήσια έσοδα είναι 104053 €.

Με βάση το HOMER, τα ετήσια έξοδα των ανεμογεννητριών είναι 18148 € και των φωτοβολταϊκών είναι 25463 €. Αν τα δύο παραπάνω ετήσια έξοδα αφαιρεθούν από τα ετήσια έσοδα (104053 €) τότε προκύπτουν τα συνολικά ετήσια έσοδα:

$$104053-18148-25463=60442 \text{ €}.$$

Επομένως το κόστος της ενέργειας είναι:

$$\begin{aligned} \text{Κόστος ενέργειας} &= \text{ετήσια έσοδα/ζήτηση} = -60442/174838 \Rightarrow \\ \text{Κόστος ενέργειας} &= -0,346 \text{ €/kWh} \end{aligned}$$

Σενάριο 4: Σύνδεση μικροδικτύου στο δίκτυο μέσης τάσης και με επιδότηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Όπως και στο σενάριο 2, επειδή η τιμή πώλησης ενέργειας που προέρχεται από ανεμογεννήτριες είναι υψηλότερη από την τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο, πωλείται όλη η ενέργεια που προέρχεται από ανεμογεννήτριες στο δίκτυο και αγοράζεται όση χρειάζεται. Η ενέργεια που χρειάζεται είναι η ζήτηση. Σύμφωνα με τα παραπάνω τα ετήσια έσοδα από την πώληση της ενέργειας είναι:

$$137659*0,45+618063*0,0846-174838*0,05=105492,78 \text{ €}$$

Όμοια με το σενάριο 3, τα ετήσια έξοδα των ανεμογεννητριών είναι 18148 € και των φωτοβολταϊκών είναι 25463 €. Αν τα δύο παραπάνω ετήσια έξοδα

αφαιρεθούν από τα ετήσια έσοδα (105492,78 €) τότε προκύπτουν τα συνολικά ετήσια έσοδα:

$$105492,78-18148-25463=61881,78 \text{ €}$$

Επομένως το κόστος της ενέργειας είναι:

$$\begin{aligned} \text{Κόστος ενέργειας} &= \text{ετήσια έσοδα/ζήτηση} = -61881,78 / 174838 \Rightarrow \\ \text{Κόστος ενέργειας} &= -0,354 \text{ €/kWh} \end{aligned}$$

Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι σε όλα τα σενάρια το κόστος ενέργειας είναι αρνητικό και μικρότερο από αυτό που υπολογίζει ο αλγόριθμος στην ενότητα 5.3. Επίσης παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των κοστών ενέργειας της ενότητας 5.3 και των κοστών ενέργειας με βάση το HOMER είναι σχετικά μικρή.

5.4 ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

Παρακάτω θεωρούνται δυο σενάρια όπου το δίκτυο δεν είναι συνδεδεμένο με το σύστημα διανομής. Όμως το μικροδίκτυο πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον το 99% του συνολικού φορτίου, άρα το ελάχιστο ακάλυπτο φορτίο πρέπει να είναι $174790,1096 * 0,01 = 1747,9011 \text{ kWh}$. Στους πίνακες που ακολουθούν LOLE είναι οι ώρες που έμεινε ακάλυπτο το φορτίο και LOEE είναι τα kWh ακάλυπτου φορτίου. Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι στα δύο σενάρια που ακολουθούν στο κόστος ενέργειας παρανομαστής είναι το φορτίο που καλύπτεται και όχι το συνολικό φορτίο. Αρχικά εφαρμόζεται η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας και μετά συγκρίνεται με την στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Σενάριο 1

Στο πρώτο σενάριο, τα δεδομένα των συστατικών του μικροδικτύου δίνονται από τους Πίνακες 5.1, 5.2, 5.3 και 5.4. Στους Πίνακες 5.14 και 5.15 δίνονται τα τριάντα καλύτερα και χειρότερα σενάρια αντίστοιχα.

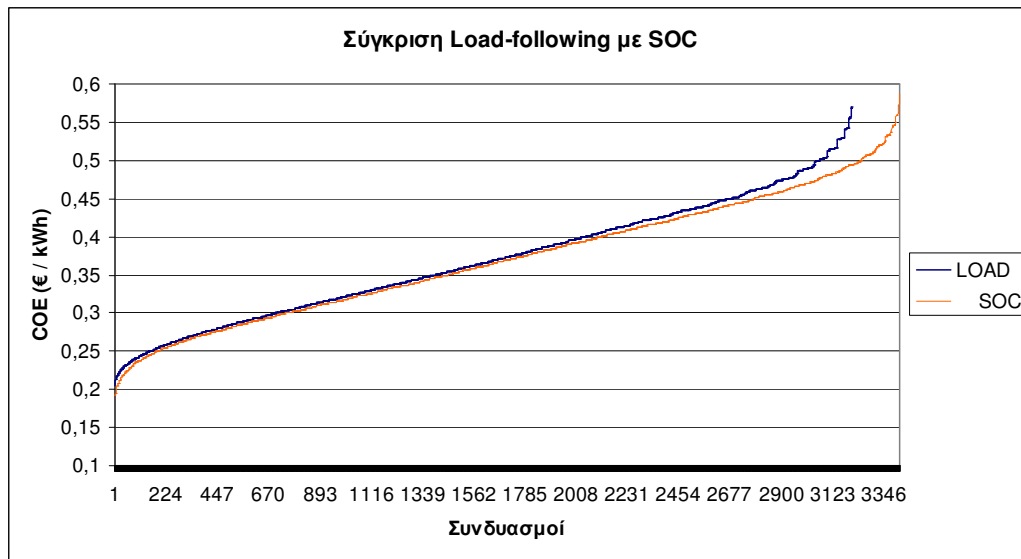
Πίνακας 5.14: Τριάντα καλύτερα αποτελέσματα.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπατ.	Φ/Β	A/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Ωρες λειτουργίας diesel	LOEE	LOLE	Αρχικό κόστος (€)
1	0,1905	20	0	3	40	2674	21	64,93	71000
2	0,1927	20	0	4	40	2430	4	22,77	86000
3	0,1934	20	0	3	50	2242	0	0,00	72500
4	0,1945	20	0	2	40	3063	16	37,49	56000
5	0,1954	20	0	4	50	2041	0	0,00	87500
6	0,1971	20	0	2	50	2589	0	0,00	57500
7	0,1998	20	0	5	40	2228	11	47,70	101000
8	0,2021	20	10	3	30	2975	213	1195,51	119500
9	0,2032	20	0	5	50	1871	0	0,00	102500
10	0,2033	20	10	2	30	3399	249	1340,64	104500
11	0,2049	20	10	3	40	2369	5	30,45	121000
12	0,2057	40	0	3	40	2497	28	81,74	91000
13	0,2064	20	10	4	30	2707	210	1050,54	134500
14	0,2071	20	10	2	40	2709	8	38,24	106000
15	0,2074	40	0	4	40	2248	23	55,41	106000
16	0,2082	20	10	4	40	2154	6	14,30	136000
17	0,2082	20	10	3	50	1996	0	0,00	122500
18	0,2082	20	0	6	40	2108	16	48,12	116000
19	0,2111	20	0	6	50	1769	0	0,00	117500
20	0,2114	20	10	2	50	2307	0	0,00	107500
21	0,2114	20	0	1	40	3770	35	98,97	41000
22	0,2118	40	0	3	50	2083	0	0,00	92500
23	0,2119	40	0	5	40	2055	17	59,26	121000
24	0,2120	40	0	2	40	2911	26	95,18	76000
25	0,2133	40	0	4	50	1855	0	0,00	107500
26	0,2138	40	0	2	50	2416	0	0,00	77500
27	0,2141	20	10	4	50	1814	0	0,00	137500
28	0,2147	20	0	1	50	3175	0	0,00	42500
29	0,2160	20	10	5	30	2512	178	953,60	149500
30	0,2174	20	20	2	30	3008	134	747,04	154500

Πίνακας 5.15: Τριάντα χειρότερα αποτελέσματα.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπατ.	Φ/Β	A/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Ωρες λειτουργίας diesel	LOEE	LOLE	Αρχικό κόστος (€)
1	0,5451	160	90	10	50	102	0	0,00	767500
2	0,5453	140	100	9	40	151	0	0,00	781000
3	0,5456	160	100	8	40	138	0	0,00	786000
4	0,5458	120	100	10	40	184	0	0,00	776000
5	0,5460	140	100	9	50	122	0	0,00	782500
6	0,5462	140	100	8	20	908	50	320,12	763000
7	0,5462	160	90	9	20	913	36	272,51	748000
8	0,5464	160	100	8	50	113	0	0,00	787500
9	0,5467	120	100	10	50	152	0	0,00	777500
10	0,5482	160	100	7	20	939	54	403,27	768000
11	0,5491	160	90	10	30	318	0	0,00	764500
12	0,5494	120	100	10	30	355	3	21,23	774500
13	0,5501	140	100	9	30	352	4	8,66	779500
14	0,5507	160	100	8	30	341	3	3,28	784500
15	0,5581	120	100	10	20	853	43	325,61	773000
16	0,5585	140	100	10	40	130	1	2,47	796000
17	0,5586	160	100	9	40	113	0	0,00	801000
18	0,5591	160	100	9	50	89	0	0,00	802500
19	0,5592	140	100	10	50	106	0	0,00	797500
20	0,5593	140	100	9	20	871	37	258,58	778000
21	0,5593	160	90	10	20	870	36	225,04	763000
22	0,5603	160	100	8	20	872	32	239,23	783000
23	0,5629	140	100	10	30	313	0	0,00	794500
24	0,5632	160	100	9	30	294	5	31,91	799500
25	0,5711	160	100	10	40	77	0	0,00	816000
26	0,5715	160	100	10	50	56	0	0,00	817500
27	0,5724	140	100	10	20	831	33	222,02	793000
28	0,5734	160	100	9	20	835	30	181,40	798000
29	0,5760	160	100	10	30	255	3	15,04	814500
30	0,5862	160	100	10	20	778	23	164,66	813000

Στο Σχήμα 5.5 συγκρίνεται η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας με την στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

Σενάριο 2

Σε αυτό το σενάριο, οι τιμές των τεχνολογιών Α.Π.Ε. είναι πιο χαμηλές επειδή επιδοτούνται. Τα χαρακτηριστικά των συστατικών του μικροδικτύου δίνονται από τους Πίνακες 5.1, 5.2, 5.9 και 5.10. Στους Πίνακες 5.16 και 5.17 δίνονται τα 30 καλύτερα και χειρότερα σενάρια αντίστοιχα.

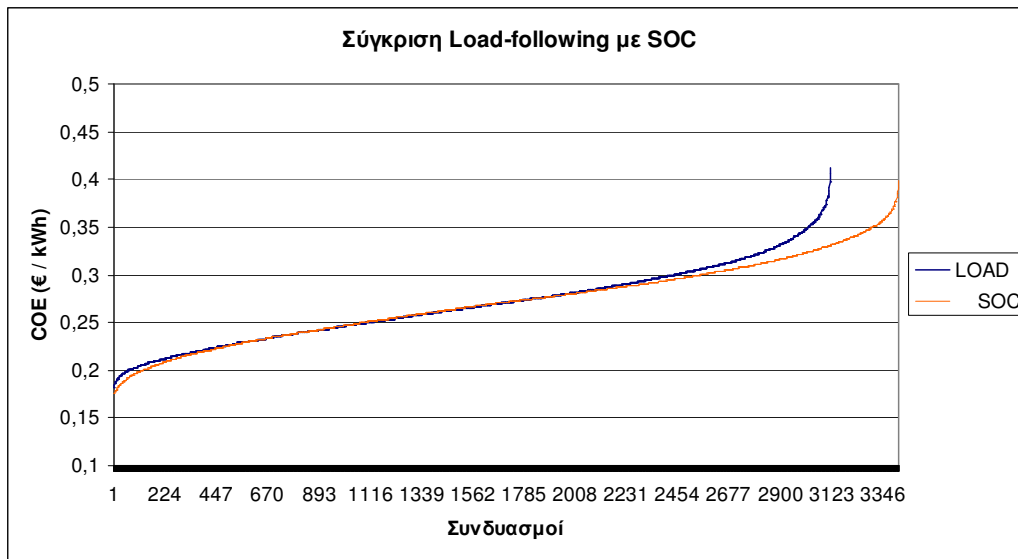
Πίνακας 5.16: Τριάντα καλύτερα αποτελέσματα με επιδότηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπατ.	Φ/Β	A/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Ωρες λειτουργίας diesel	LOEE	LOLE	Αρχικό κόστος (€)
1	0,1751	20	10	3	30	2975	213	1195,51	73500
2	0,1753	20	10	4	30	2707	210	1050,54	81500
3	0,1763	20	0	4	40	2430	4	22,77	58000
4	0,1771	20	20	3	30	2642	140	753,23	98500
5	0,1773	20	10	4	40	2154	6	14,30	83000
6	0,1781	20	10	3	40	2369	5	30,45	75000
7	0,1782	20	0	3	40	2674	21	64,93	50000
8	0,1783	20	20	4	30	2404	102	504,36	106500
9	0,1790	20	20	3	40	2088	4	20,11	100000
10	0,1791	20	0	4	50	2041	0	0,00	59500
11	0,1794	20	0	5	40	2228	11	47,70	66000
12	0,1799	20	20	2	30	3008	134	747,04	90500
13	0,1804	20	10	2	30	3399	249	1340,64	65500
14	0,1809	20	10	5	30	2512	178	953,60	89500
15	0,1812	20	0	3	50	2242	0	0,00	51500
16	0,1812	20	30	3	30	2359	95	547,22	123500
17	0,1814	20	10	3	50	1996	0	0,00	76500
18	0,1828	20	0	5	50	1871	0	0,00	67500
19	0,1831	20	10	5	40	1986	6	33,61	91000
20	0,1831	20	20	4	40	1901	1	1,60	108000
21	0,1832	20	10	4	50	1814	0	0,00	84500
22	0,1834	20	30	2	30	2690	98	551,22	115500
23	0,1837	20	0	6	40	2108	16	48,12	74000
24	0,1840	20	20	5	30	2213	73	477,22	114500
25	0,1841	20	20	2	40	2398	6	23,01	92000
26	0,1844	20	10	2	40	2709	8	38,24	67000
27	0,1844	20	10	5	50	1661	0	0,00	92500
28	0,1848	20	20	3	50	1770	0	0,00	101500
29	0,1850	20	20	4	50	1608	0	0,00	109500
30	0,1856	20	10	6	30	2367	161	827,54	97500

Πίνακας 5.17: Τριάντα χειρότερα αποτελέσματα με επιδότηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

A/A	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Μπατ.	Φ/Β	A/Γ	Ισχύς diesel (kW)	Ωρες λειτουργίας diesel	LOEE	LOLE	Αρχικό κόστος (€)
1	0,3681	160	100	8	50	113	0	0,00	481500
2	0,3687	160	90	9	30	362	0	0,00	461500
3	0,3689	160	100	0	30	2107	86	596,73	414500
4	0,3690	160	10	0	50	3499	0	0,00	192500
5	0,3693	160	90	8	20	957	48	368,10	452000
6	0,3713	120	100	10	20	853	43	325,61	453000
7	0,3720	140	100	10	40	130	1	2,47	476000
8	0,3723	160	100	8	30	341	3	3,28	478500
9	0,3724	140	90	10	20	881	53	316,19	448000
10	0,3726	160	90	10	40	128	0	0,00	471000
11	0,3728	140	100	10	50	106	0	0,00	477500
12	0,3732	160	90	10	50	102	0	0,00	472500
13	0,3736	160	100	7	20	939	54	403,27	469000
14	0,3745	160	80	10	20	936	65	446,80	443000
15	0,3762	160	100	9	40	113	0	0,00	488000
16	0,3765	140	100	10	30	313	0	0,00	474500
17	0,3766	160	0	0	50	3839	0	0,00	167500
18	0,3766	140	100	9	20	871	37	258,58	465000
19	0,3767	160	100	9	50	89	0	0,00	489500
20	0,3772	160	90	10	30	318	0	0,00	469500
21	0,3781	160	90	9	20	913	36	272,51	460000
22	0,3808	160	100	9	30	294	5	31,91	486500
23	0,3818	160	100	8	20	872	32	239,23	477000
24	0,3847	160	100	10	40	77	0	0,00	496000
25	0,3850	160	100	10	50	56	0	0,00	497500
26	0,3857	140	100	10	20	831	33	222,02	473000
27	0,3872	160	90	10	20	870	36	225,04	468000
28	0,3896	160	100	10	30	255	3	15,04	494500
29	0,3908	160	100	9	20	835	30	181,40	485000
30	0,3995	160	100	10	20	778	23	164,66	493000

Στο Σχήμα 5.6 συγκρίνεται η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας με την στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.



Σχήμα 5.6: Σύγκριση στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου με στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

5.4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για το πρώτο σενάριο, ο βέλτιστος συνδυασμός είναι 20 μπαταρίες, κανένα φωτοβολταϊκό, 3 ανεμογεννήτριες και μέγιστη ισχύς ντιζελογεννήτριας 40 kW. Με αυτόν το συνδυασμό το ελάχιστο κόστος είναι 0,1905 €/kWh. Το ακάλυπτο φορτίο είναι πολύ λίγο, μόλις 64,93 kWh και σε ποσοστό είναι $100 \cdot 64,93 / 174790,1 = 0,0371\%$. Άρα, συνολικά καλύπτεται το $100 - 0,0371 = 99,9628\%$, σχεδόν όλο δηλαδή. Επομένως, το δίκτυο είναι πολύ αξιόπιστο. Παρατηρείται ότι υπάρχουν συνδυασμοί που ενώ έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος και περισσότερο ακάλυπτο φορτίο, έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.5 η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας δίνει μικρότερα κόστη ενέργειας από την στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Στο δεύτερο σενάριο, ο βέλτιστος συνδυασμός είναι 20 μπαταρίες, 10 kW_p ισχύς φωτοβολταϊκών, 3 ανεμογεννήτριες και 30 kW μέγιστη ισχύς ντιζελογεννήτριας με ελάχιστο κόστος ενέργειας 0,1751 €/kWh. Το ακάλυπτο φορτίο είναι 1195,51 kWh, δηλαδή καλύπτεται το 99,316% του φορτίου. Από το Σχήμα 5.6 παρατηρείται ότι η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου δίνει καλύτερα αποτελέσματα για κόστη ενέργειας που βρίσκονται στη μέση. Πάντως το χαμηλότερο κόστος ενέργειας δίνεται και πάλι από την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν συνολικά έξι σενάρια. Στα τέσσερα πρώτα το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με τη Δ.Ε.Η. και στα δύο τελευταία είναι αποκεντρωμένο. Στα τέσσερα πρώτα σενάρια είναι δυνατόν το μικροδίκτυο είτε να αγοράζει είτε να πουλάει ενέργεια στη Δ.Ε.Η., αρκεί να καλύπτεται η ζήτηση σε ενέργεια. Σε όλα τα σενάρια, η στρατηγική συνεργασίας των στοιχείων του μικροδικτύου είναι η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου αλλά στη συνέχεια συγκρίνεται με τη στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας με τη βοήθεια διαγράμματος. Κάθε διάγραμμα περιέχει όλους τους συνδυασμούς των στοιχείων του μικροδικτύου που προκύπτουν από τις δύο στρατηγικές. Επίσης, σε κάθε σενάριο δίνονται σε μορφή πινάκων οι τριάντα καλύτεροι και οι τριάντα χειρότεροι συνδυασμοί για τη στρατηγική παρακολούθησης φορτίου.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι στη περίπτωση που το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο, τότε το ελάχιστο κόστος προκύπτει αν η παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών είναι μέγιστη και δεν περιέχονται καθόλου μπαταρίες και μηχανή diesel. Επίσης, παρατηρείται ότι το ελάχιστο κόστος είναι αρνητικό που σημαίνει ότι απορρέει κέρδος. Τα παραπάνω συμβαίνουν επειδή η ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να πουληθεί στο κεντρικό δίκτυο. Επίσης, παρουσιάζει ενδιαφέρον ότι το αρχικό κόστος και το κόστος της ενέργειας δεν είναι αντιστρόφως ανάλογα. Με άλλα λόγια, μεγαλύτερο αρχικό κόστος δεν συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος ενέργειας. Γενικά, η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας.

Στην περίπτωση που το μικροδίκτυο δεν είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο, αλλά είναι απομονωμένα τα συμπεράσματα είναι διαφορετικά. Για να προκύψει το ελάχιστο κόστος ενέργειας απαιτείται μικρή παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες και μεγάλη παραγωγή ενέργειας από τη μηχανή diesel και απαιτούνται και μπαταρίες. Όμως η ισχύς της μηχανής diesel δεν είναι η μέγιστη δυνατή, δηλαδή 50 kW. Η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας δίνει χαμηλότερο κόστος ενέργειας από τη στρατηγική παρακολούθησης φορτίου. Όπως και στην περίπτωση που το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο, το αρχικό κόστος εγκατάστασης δεν είναι αντιστρόφως ανάλογο με το κόστος της ενέργειας.