



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εφαρμογή υβριδικού AC/DC Μικροδικτύου για την ενσωμάτωση
Οικιακών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων
σε Ευφυή Δίκτυα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΡ. ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέποντες: Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ανέστης Αναστασιάδης
Δ. Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εφαρμογή υβριδικού AC/DC Μικροδικτύου για την ενσωμάτωση
Οικιακών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων
σε Ευφυή Δίκτυα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΡ. ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέποντες: Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ανέστης Αναστασιάδης
Δ. Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Μαρτίου 2015.

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2015

.....

Χρήστος Αρ. Νικολόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χρήστος Αρ. Νικολόπουλος, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η σχεδίαση και ο έλεγχος της λειτουργίας ενός υβριδικού AC/DC ηλεκτρικού μικροδικτύου για την ενσωμάτωση οικιών με φωτοβολταϊκά πάνελ σε ένα ευφυές μικροδίκτυο.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Α. Αναστασιάδη για τις πολύτιμες συμβουλές, την καθοδήγηση και τις χρήσιμες υποδείξεις που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Αθήνα, Μάρτιος 2015

Χρήστος Αρ. Νικολόπουλος

Περίληψη

Τα ευφυή δίκτυα έχουν βρεθεί στο επίκεντρο των μελετών τα προηγούμενα χρόνια, όσον αφορά τα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος. Ο στόχος πίσω από όλες αυτές τις μελέτες είναι η σχεδίαση και η μοντελοποίηση ενός πιο αξιόπιστου και αποδοτικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι οι ενεργειακές ανάγκες της κοινωνίας αυξάνονται με γοργούς ρυθμούς. Χωρίς αμφιβολία η μελέτη των ευφυών δικτύων θα μας βοηθήσει όσον αφορά την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Ένα σημαντικό ποσοστό αυτής της ενέργειας προέρχεται από φωτοβολταϊκά πάνελ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύουμε να ενσωματώσουμε οικίες με φωτοβολταϊκά πάνελ, στο ηλεκτρικό δίκτυο, προτείνοντας τη δημιουργία ενός υβριδικού AC/DC μικροδικτύου διανομής. Το μικροδίκτυο αποτελείται από 30 οικίες οι οποίες ενσωματώνουν πάνελ με εγκατεστημένη ισχύ 3 KW, έξυπνους μετρητές για την καταγραφή των δεδομένων, DC και AC ζυγό για τη διανομή DC και AC ρεύματος αντίστοιχα, αντιστροφείς και ανορθωτές για εναλλαγή της ισχύος από DC σε AC και αντίστροφα, μικροεπεξεργαστή ικανό για παρακολούθηση και έλεγχο όλων των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο μικροδίκτυο, καθώς και συσσωρευτές για αποθήκευση ενέργειας. Το μικροδίκτυο σχεδιάστηκε με χρήση του πακέτου λογισμικού Matlab και στη συνέχεια δοκιμάσαμε τη λειτουργία του υλοποιώντας διάφορα σενάρια με πραγματικά δεδομένα παραγωγής και καταναλώσεων. Τα αποτελέσματα από τη χρήση του AC/DC μικροδικτύου δείχνουν μια σημαντική βελτίωση στη λειτουργία και την αξιοπιστία του δικτύου διανομής.

Abstract

Smart grids have been on the focus of studies over the last few years, as far as the power systems are concerned. These studies aim at designing and modeling a more reliable and efficient electricity network since the energy demands of the society have grown significantly over the last years. There is no doubt that the study of smart grids will help us with the integration of renewable energy sources (RES) in the current grid in an optimal way. During the past years the production and the demand for power coming from RES has arised dramatically. A significant value of this power comes from photovoltaic panels. In this thesis we aim to integrate homes with solar panels in the existing electrical network, proposing the creation of a hybrid AC/DC microgrid. This microgrid consists of 30 residences that integrate PV panels with an installed capacity of 3 KW, smart meters for recording data, DC and AC bus for distributing DC and AC power respectively, inverters and rectifiers to switch the power from DC to AC and vice versa, a microprocessor capable of monitoring and control of all the devices connected to the microgrid and batteries for energy storage. The microgrid was modelled using the Matlab software package and then it's operation was tested in various scenarios with real data, as far as the PV production and the load demands are concerned. The results from the use of AC/DC microgrid show a significant improvement in the functionality and reliability of the distribution network.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

Μικροδίκτυο, διεσπαρμένη παραγωγή, φωτοβολταϊκά, ΑΠΕ, DC δίκτυο, AC δίκτυο, συσσωρευτής, έξυπνος μετρητής, έλεγχος χρήστη, έλεγχος διαχειριστή δικτύου, αξιοπιστία, συντελεστής ισχύος, δίκτυο διανομής, αντιστροφέας, ανορθωτής, Matlab

KEY WORDS

Microgrid, distributed generation, photovoltaic, RES, DC network, AC network, battery, smart meter, user control, network administrator control, reliability, power factor, distribution network, inverter, rectifier, Matlab

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1: 15

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 15

1.1	Ιστορική Εξέλιξη.....	15	
1.2	Δομή του ΣΗΕ	16	
1.2.1	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας		20
1.2.2	Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας		22
1.2.3	Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας		25
1.3	Διεσπαρμένη Παραγωγή	27	
1.3.1	Εισαγωγή		27
1.3.2	Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής		28
1.3.3	Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής		31
1.3.4	Εμπόδια για τη διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής		33
1.3.5	Προϋποθέσεις για την αύξηση της διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής		36
1.4	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	37	
1.4.1	Εισαγωγή		37
1.4.2	Ενεργειακή Πολιτική		38
1.4.3	Χρηματοοικονομικό Πλαίσιο και Επιχειρηματικότητα		40

Κεφάλαιο 2: 45

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 45

2.1	Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία	45	
2.1.1	Δυνατότητα αξιοποίησης της Ηλιακής ενέργειας		48
2.2	Η Φωτοβολταϊκή μετατροπή	49	
2.2.1	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο		49
2.2.2	Η επαφή p-n		51
2.3	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	52	
2.3.1	Το ισοδύναμο κύκλωμα		52
2.3.2	Η καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου		54
2.3.3	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου		55
2.4	Αντιστροφείς.....	57	
2.4.1	Εισαγωγή		57
2.4.2	Κατηγορίες ΦΒ αντιστροφένων		59
2.4.3	Χαρακτηριστικά και τρόπος λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Αντιστροφένων		60
2.4.4	Εφαρμογές αντιστροφένων		63
2.5	Συσσωρευτές	64	

2.5.1	Η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας	64
2.5.2	Ανάλυση της δομής των συσσωρευτών	68
2.5.3	Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών	71
2.5.4	Διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης	71
2.5.5	Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών	72

Κεφάλαιο 3: 75

ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ-ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ 75

3.1	Μικροδίκτυα.....	75
3.1.1	Εισαγωγή	75
3.1.2	Πλεονεκτήματα Μικροδικτύων	78
3.1.3	Δομή μικροδικτύου	80
3.1.4	Έλεγχος Μικροδικτύου	83
3.1.5	Εφαρμογές αποκεντρωμένου και κεντρικού ελέγχου λειτουργίας μικροδικτύου	95
3.2	Ευφυή Δίκτυα	97
3.2.1	Εισαγωγή	97
3.2.2	Χαρακτηριστικά του Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου	100
3.2.3	Οφέλη του Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου	103
3.2.4	Έξυπνοι μετρητές	106
3.2.5	Αναμενόμενα οφέλη από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών	106
3.2.6	Εφαρμογές που προϋποθέτουν την ύπαρξη έξυπνων μετρητών	113

Κεφάλαιο 4: 117

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 117

4.1	Περιγραφή Μικροδικτύου.....	117
4.1.1	Εισαγωγή	117
4.1.2	Σχεδιασμός Συστήματος	119
4.1.3	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας –HEMS/NEMS	119
4.1.4	Η διανομή DC ισχύος στο μικροδίκτυο	122
4.1.5	Ο DC υποσταθμός και το κοινό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	123
4.1.6	Εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος	124
4.1.7	Έλεγχος του συστήματος	125
4.2	Μοντελοποίηση στο Matlab	131
4.3	Εκδόσεις και Χαρακτηριστικά των Υποσυστημάτων	135

4.3.1	Συνάρτηση pv_panel	135
4.3.2	Συνάρτηση dc_load	136
4.3.3	Συνάρτηση ac_load	136
4.3.4	Συνάρτηση nems	137
4.3.5	Συνάρτηση hems	137
4.3.6	Συνάρτηση battery	137
4.4	Εσωτερική δομή του αρχείου hometype.txt	138
4.5	Εσωτερική δομή του αρχείου Sun Luminance.txt.....	142
4.6	Εσωτερικές μεταβλητές της ρουτίνας Grid_Model	143

Κεφάλαιο 5: 147

ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 147

5.1	Χαρακτηριστικά των Προτεινόμενων Σεναρίων Προσομοίωσης	147
5.2	Σενάριο Προσομοίωσης 1	148
5.2.1	Παράμετροι Σεναρίου Προσομοίωσης 1	151
5.2.2	Αποτελέσματα Σεναρίου Προσομοίωσης 1	155
5.2.3	Συμπεράσματα από το Σενάριο Προσομοίωσης 1	173
5.3	Σενάριο Προσομοίωσης 2	176
5.3.1	Παράμετροι Σεναρίου Προσομοίωσης 2	178
5.3.2	Αποτελέσματα Σεναρίου Προσομοίωσης 2	183
5.3.3	Συμπεράσματα από το Σενάριο Προσομοίωσης 2	200
5.4	Σενάριο Προσομοίωσης 3	204
5.4.1	Παράμετροι Σεναρίου Προσομοίωσης 3	206
5.4.2	Αποτελέσματα Σεναρίου Προσομοίωσης 3	210
5.4.3	Συμπεράσματα από το Σενάριο Προσομοίωσης 3	227
5.5	Σενάριο Προσομοίωσης 4	231
5.5.1	Παράμετροι Σεναρίου Προσομοίωσης 4	233
5.5.2	Αποτελέσματα Σεναρίου Προσομοίωσης 4	237
5.5.3	Συμπεράσματα από το Σενάριο Προσομοίωσης 4	253

Κεφάλαιο 6: 257

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ 257

6.1	Γενικά Συμπεράσματα από την εφαρμογή των προσομοιώσεων στο μοντέλο του μικροδικτύου	257
6.2	Οι μηχανισμοί παραγωγής και διαχείρισης ισχύος στο μικροδίκτυο	260
6.3	Ο ρόλος και η λειτουργία των συσσωρευτών στο μικροδίκτυο	262
6.4	Η συνολικά ευσταθής λειτουργία του μικροδικτύου.....	264

6.5	Επιπλέον Συμπεράσματα- Μελλοντικές Επεκτάσεις του Μοντέλου	267
6.6	Χαρακτηριστικά Εκδόσεων του Grid_Model.....	270

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 273

Κεφάλαιο 1: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Ιστορική Εξέλιξη

Η εμφάνιση του ηλεκτρισμού δρομολόγησε τη δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση. Οι συνθήκες της παραγωγής άλλαξαν ριζικά με την εισαγωγή της νέας μορφής ενέργειας, που αντικατέστησε τον ατμό, το πετρέλαιο και το φωταέριο που χρησιμοποιούνταν κατά βάση μέχρι τότε. Η ηλεκτρική ενέργεια (ΗΕ) προσέφερε μεγάλη οικονομία και ασφάλεια καθώς και μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Όταν η ΗΕ άρχισε να παράγεται και να διανέμεται ευρύτερα, σηματοδοτήθηκε μια νέα εποχή, κατά την οποία η βιομηχανία, αλλά και οι πόλεις, έλαβαν νέα μορφή. Η παραγωγή ΗΕ ξεκίνησε την τελευταία 20ετία του 19ου αιώνα. Το 1881 λειτούργησε η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ισχύος 746 KW, στη Μεγάλη Βρετανία, μεταξύ Λονδίνου και Πόρτσμουθ. Τη γεννήτρια κινούσαν δύο υδρόμυλοι και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος εξαρτιόταν απολύτως από τις βροχοπτώσεις. Το 1882 εγκαταστάθηκε η πρώτη μονάδα παραγωγής ΗΕ στη Στουτγκάρδη της Γερμανίας. Η μονάδα παραγωγής της Στουτγκάρδης παρήγαγε ενέργεια ικανή να τροφοδοτήσει 30 λάμπες πυρακτώσεως.

Το πρώτο ηλεκτρικό δίκτυο ξεκίνησε στο Βερολίνο το 1885. Το δικαίωμα της εταιρείας παραγωγής αφορούσε την εγκατάσταση δικτύου σε απόσταση 800m από τη μονάδα παραγωγής. Τη δεκαετία 1880-1890 υπήρξε ραγδαία ανάπτυξη και εξέλιξη της νέας τεχνολογίας. Εφευρέτες και κατασκευαστές προσπάθησαν να επιλύσουν τα προβλήματα που συναντούσαν και να εξελίξουν τις μεθόδους και τις διαδικασίες.

Ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα έφθασε το 1889, όταν ιδιωτική εταιρεία κατασκεύασε την πρώτη μονάδα παραγωγής ΗΕ και φώτισε το ιστορικό κέντρο της πόλης της Αθήνας. Την ίδια χρονιά άρχισε και η ανάπτυξη της ηλεκτροπαραγωγής στην Οθωμανική Αυτοκρατορία. Το δικαίωμα ηλεκτροδότησης της οθωμανικής, τότε, Θεσσαλονίκης ανέλαβε η «Βελγική Εταιρεία».

Μέχρι το 1929 είχαν ηλεκτροδοτηθεί αρκετές μεγάλες για την εποχή. Στις περισσότερες απομακρυσμένες και αραιοκατοικημένες περιοχές όμως, ήταν οικονομικά ασύμφορο για τις μεγάλες εταιρείες να κατασκευάσουν μονάδες παραγωγής και την ηλεκτροδότηση ανέλαβαν ιδιώτες ή δημοτικές και κοινοτικές αρχές κατασκευάζοντας μικρά εργοστάσια. Το 1950 υπήρχαν στην Ελλάδα περίπου 400 εταιρείες παραγωγής ΗΕ. Ως πρωτογενή καύσιμα χρησιμοποιούσαν το πετρέλαιο και το γαιάνθρακα, αμφότερα εισαγόμενα από το εξωτερικό.

Η κατάτμηση της παραγωγής σε πολλές μικρές μονάδες, σε συνδυασμό με τα εισαγόμενα καύσιμα, εκτόξευσε την τιμή της ΗΕ στα ύψη, φθάνοντας στο τριπλάσιο μέχρι και πενταπλάσιο των τιμών που ίσχυαν σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Αυτά τα πρώτα χρόνια, η ΗΕ αποτελούσε ένα αγαθό πολυτελείας που τις περισσότερες φορές παρεχόταν με ωράριο και οι ξαφνικές διακοπές ήταν σύνηθες φαινόμενο.

Το 1950 ιδρύθηκε η ΔΕΗ και, ως εκ τούτου, οι δραστηριότητες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ΗΕ συγκεντρώθηκαν σε ένα δημόσιο φορέα. Αμέσως, η ΔΕΗ στράφηκε προς την αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας ενώ ξεκίνησε και η ενοποίηση των δικτύων μεταφοράς ΗΕ σε ένα εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα.

Οι βασικές δομές αυτού του Συστήματος διατηρούνται μέχρι σήμερα παρά τις σημαντικές αλλαγές που έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια [1].

1.2 Δομή του ΣΗΕ

Με τον όρο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) εννοούμε το σύστημα των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ΗΕ σε περιοχές εξυπηρέτησης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ΗΕ οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση, σταθερή συχνότητα και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης[2].

Για την ομαλή λειτουργία του το ΣΗΕ πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- πρέπει να παρέχει ΗΕ οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση
- πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί συνεχώς αυτή τη μεταβαλλόμενη ζήτηση (υπάρχει συνεχής χρονική μεταβολή της ζήτησης ενεργού και αέργου ισχύος)
- η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης
- η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη

Ένα σύστημα ΗΕ αποτελείται από τα μικρότερα υποσυστήματα, τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια:

➤ *Το σύστημα παραγωγής*

Περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και τους μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του ρεύματος υπό υπερυψηλή και υψηλή τάση. Η σύγχρονη βιομηχανία ΗΕ έχει βασισθεί στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων, σε ηλεκτρική μέσω θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών, αντίστοιχα.

➤ *Το σύστημα μεταφοράς*

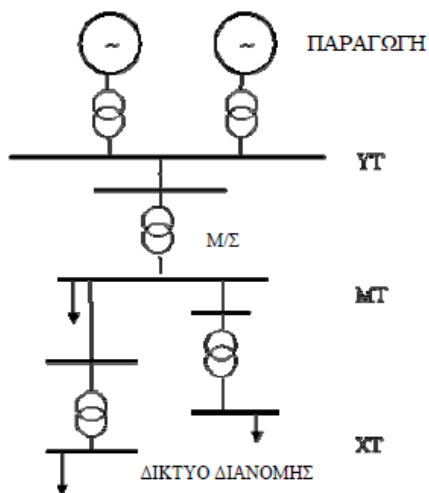
Το σύστημα μεταφοράς διασυνδέει όλους τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής, καθώς και διαφορετικά συστήματα μεταξύ τους και μεταφέρει μεγάλα μεγέθη ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις προς τα κέντρα κατανάλωσης. Αποτελεί τη «σπονδυλική στήλη» του συστήματος ΗΕ και λειτουργεί στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες. Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υπερυψηλής (ΥΥΤ) και υψηλής τάσης (ΥΤ), τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών καθώς και τους διάφορους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης που χρησιμοποιούνται.

➤ *Το σύστημα υπομεταφοράς*

Το σύστημα υπομεταφοράς μεταφέρει ισχύ σε μικρότερα μεγέθη και αποστάσεις υπό χαμηλότερη τάση από υποσταθμούς μεταφοράς σε υποσταθμούς διανομής μικρότερων κέντρων κατανάλωσης. Σημειώνεται ότι οι μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές τροφοδοτούνται συνήθως απευθείας από το σύστημα υπομεταφοράς.

➤ *Το σύστημα διανομής*

Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής ΗΕ μέσης και χαμηλής τάσης, στα οποία υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή. Μέσω των δικτύων διανομής η ΗΕ διανέμεται σε μικρότερες περιοχές στους καταναλωτές.



Σχήμα 1.1: Δομή Συστήματος ΗΕ, όπου φαίνονται ενδεικτικά οι ΥΤ, ΜΤ, ΧΤ, καθώς και Μ/Σ υποβιβασμού.

Συνεχίζοντας πρέπει να αναφερθεί πως ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί απομονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων και προσφέρει τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα.

Από την άποψη της έκτασης που καταλαμβάνουν τα ΣΗΕ μπορούν να διακριθούν σε «εθνικά συστήματα», «περιφερειακά συστήματα» και «ιδιωτικά συστήματα»,

ανάλογα με το αν καλύπτουν αντίστοιχα το σύνολο μιας χώρας, μια γεωγραφικής περιοχής ή τις ανάγκες ενός μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος.

Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι συνήθως οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους και γι' αυτό ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός τους θα πρέπει να είναι ενιαίος, με στόχο την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών της κατανάλωσης με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία τροφοδότησης. Η διανομή συνήθως διαφοροποιείται από την παραγωγή και τη μεταφορά και αναπτύσσεται χωριστά, καθώς εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής και των καταναλωτών τους οποίους καλείται να εξυπηρετήσει.

Αν και το μέγεθος των ΣΗΕ διαφέρει, υπάρχουν μεταξύ τους κοινά χαρακτηριστικά. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60 Hz. Χρησιμοποιούνται, όμως, σε ειδικές περιπτώσεις και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ΗΕ. Η τάση λειτουργίας παραμένει σταθερή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό.

Στα τριφασικά συστήματα η ροή της ενέργειας είναι συνεχής και κάνει τη λειτουργία τους πολύ πιο ομαλή και αποδοτική απ' ό,τι θα ήταν αν η ροή ήταν παλλόμενη, όπως συμβαίνει στα μονοφασικά συστήματα.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές, ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης.

Η συνολική κατανάλωση ΗΕ καθορίζει την ποσότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, ενώ η μορφή της καμπύλης ζήτησης περιγράφει χρονικά την απασχόληση των εγκαταστάσεων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής από τους καταναλωτές.

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζήτησης διαμορφώνουν το κόστος λειτουργίας μιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Το κόστος προοδευτικά αυξάνει από την παραγωγή προς τη διανομή γιατί μεσολαβούν πρόσθετες εγκαταστάσεις. Το κόστος καταβάλλεται από τους καταναλωτές σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της ζήτησής τους και με τα τιμολόγια που έχουν θεσπιστεί.

1.2.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για την παραγωγή της ΗΕ απαιτείται μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως η μετατροπή μιας μορφής ενέργειας πρώτα σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της ΗΕ που παρέχεται στον καταναλωτή προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με τη ροή ή την πτώση των υδάτων αλλά και από πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση ή από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) , όπως είναι ο άνεμος, τα θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η βιομάζα κ.α.

Η παραγωγή ΗΕ από την καύση ορυκτών καυσίμων, τη γεωθερμία και τη βιομάζα πραγματοποιείται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με τη χρησιμοποίηση ατμοηλεκτρικών και νηζελοηλεκτρικών σταθμών (εμβολοφόρες νηζελογεννήτριες και αεριοστρόβιλοι). Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσον για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλων, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι και αυτοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί στους οποίους όμως ο λέβητας έχει αντικατασταθεί από τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Αντιθέτως, οι νηζελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας.

Επίσης θερμική παραγωγή πραγματοποιείται σε σταθμούς συνδυασμένου κύκλου όπου έχουμε συνδυασμό λειτουργίας αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου και τα

θερμικά απόβλητα (καυσαέρια) του αεριοστροβίλου χρησιμοποιούνται στο ατμοηλεκτρικό μέρος του σταθμού.

Η θερμική παραγωγή χαρακτηρίζεται ως ένας έμμεσος τρόπος παραγωγής γιατί προηγούνται δύο στάδια μετατροπών (πχ από χημική σε θερμική με την καύση των ορυκτών καυσίμων και από θερμική σε μηχανική με τον ατμοστρόβιλο). Μέθοδοι παραγωγής όπου παρακάμπτεται το στάδιο μετατροπής σε μηχανική ενέργεια χαρακτηρίζονται ως άμεσοι. Τέτοιοι είναι οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, οι θερμιονικές γεννήτριες, οι μαγνητοϋδροδυναμικές γεννήτριες και οι κυψέλες καυσίμων.

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς η κινητική και η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των υδροστροβίλων και των γεννητριών. Διακρίνονται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς φυσικής ροής και ρυθμιζόμενης ροής, όπου είναι απαραίτητη η δημιουργία τεχνητών φραγμάτων. Στους αντλητικούς σταθμούς οι υδροστρόβιλοι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως αντλίες και οι γεννήτριες ως κινητήρες προκειμένου να αξιοποιούν χαμηλού κόστους ΗΕ κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου, για να αποταμιεύσουν νερό που θα χρησιμοποιηθεί σε ώρες αιχμής για την παραγωγή ενέργειας με υψηλό εναλλακτικό κόστος παραγωγής από άλλες πηγές. Ως μικρά υδροηλεκτρικά έργα χαρακτηρίζονται οι σταθμοί με εγκατεστημένη ισχύ μέχρι 10 MW ενώ ως υδροηλεκτρικά έργα πολλαπλού σκοπού οι σταθμοί οι οποίοι παράλληλα καλύπτουν και άλλες χρήσεις όπως άρδευση, ύδρευση, κ.ά. [2].

Όσον αφορά τις ΑΠΕ, οι πιο διαδεδομένες μορφές στα σημερινά ΣΗΕ είναι τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκοί πάρκα. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται σε κάποιον ζυγό του δικτύου. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο μέσω ενός ανεμοκινητήρα και στη συνέχεια σε ΗΕ μέσω των γεννητριών. Τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε δίκτυα που περιλαμβάνουν σταθμούς με υψηλό λειτουργικό κόστος και σε θέσεις με υψηλό αιολικό δυναμικό.

Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική με τη βοήθεια των ηλιακών κυψελών. Η αρχή λειτουργίας τους

στηρίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στόχος της εξέλιξης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι η μείωση του κόστους κατασκευής των ηλιακών κυψελών, η αύξηση της διάρκειας ζωής και η αύξηση του βαθμού απόδοσης ο οποίος σήμερα φτάνει το 15%. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί εγκαθίστανται συνήθως για την τροφοδότηση απομονωμένων καταναλώσεων.

1.2.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η μεταφορά ΗΕ περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ΗΕ από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Επίσης τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης (που κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση και δικά τους εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης) και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 10 MW.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) τάση και οι τάσεις των τριών φάσεων να βρίσκονται σε ισορροπία. Το κύμα της τάσης θα πρέπει να έχει ημιτονοειδή μορφή και η συχνότητα να είναι σταθερή. Η αποδοτικότητα θα πρέπει να πλησιάζει την τιμή η οποία συνεπάγεται ελάχιστο ετήσιο κόστος μεταφοράς. Η επίδραση του συστήματος μεταφοράς στις εγκαταστάσεις άλλων κοινωφελών επιχειρήσεων (πχ. τηλεφωνικών ή ραδιοφωνικών) θα πρέπει να περιορίζεται μεταξύ των αποδεκτών ορίων.

Η μεταφορά της ΗΕ γίνεται με υψηλά επίπεδα τάσης, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Επιπλέον η ισχύς η οποία μπορεί να μεταφερθεί από μια γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη

του τετραγώνου της τάσης. Κατά συνέπεια για την επίτευξη μεγάλων ισχύων μεταφοράς είναι αναγκαία τα υψηλά επίπεδα τάσης.

Οι τάσεις μεταφοράς που χρησιμοποιούνται διαφέρουν ανάλογα με την απόσταση και την ποσότητα της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Η μορφή των δικτύων μεταφοράς μπορεί να είναι διαμήκης ή κυκλική, ανάλογα με τη σχετική θέση των σταθμών παραγωγής ως προς τα κέντρα καταναλώσεως. Η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι κατά κανόνα βροχοειδής σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής.



Σχήμα 1.2: Γραμμές ΥΤ και Υποσταθμός Μεταφοράς ΥΤ

Το κόστος μεταφοράς αποτελεί τη συνισταμένη του κόστους εγκατάστασης, του κόστους απωλειών και του κόστους συντήρησης της γραμμής. Κριτήριο για την επιλογή μιας τάσης μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Αυτό σημαίνει ότι η εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας από μια περαιτέρω αύξηση της τάσης που επιλέγεται αντισταθμίζεται από τις αναγκαίες επιπρόσθετες επενδύσεις στη γραμμή και στο λοιπό εξοπλισμό.

Τα υλικά που γενικά χρησιμοποιούνται στους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Οι κύριες απαιτήσεις για τα αγωγιμα υλικά είναι η

υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, η υψηλή μηχανική αντοχή, το μικρό ειδικό βάρος, η χαμηλή οξειδωση στον αέρα και η ευχέρεια σύνδεσης των αγωγών.

Η απαιτούμενη διατομή ενός αγωγού καθορίζεται από το ρεύμα που τον διαρρέει, αφού η ωμική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του αγωγού. Ο αγωγός της γραμμής μεταφοράς θερμαίνεται από τις ωμικές απώλειες και η θερμότητα αυτή ακτινοβολείται στον αέρα, αναπτύσσοντας μια θερμοκρασία ισορροπίας στον αγωγό. Σε υψηλές θερμοκρασίες η μηχανική αντοχή του αγωγού μειώνεται και έτσι η θερμοκρασία ισορροπίας του δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο, συνήθως τους 100°C. Το αντίστοιχο ρεύμα αποτελεί το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο φόρτισης του αγωγού και ονομάζεται ικανότητα μεταφοράς ρεύματος του αγωγού.

Οι αγωγοί υψηλής τάσης των εναέριων γραμμών μεταφοράς αναρτώνται από τους πυλώνες της γραμμής δια μέσου σειράς μονωτήρων. Η αύξηση της μόνωσης για υψηλότερες τάσεις μεταφοράς αντιμετωπίζεται με την προσθήκη περισσότερων δίσκων στους αλυσσοειδείς μονωτήρες. Τη μόνωση μεταξύ αγωγών, όπως και μεταξύ αγωγών και γης, στις εναέριες γραμμές αποτελεί ο αέρας που υπάρχει μεταξύ τους.

Όσον αφορά την Ελλάδα, τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 kV, που μεταφέρουν ηλεκτρισμό, κυρίως από το σπουδαιότερο για την χώρα μας ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας. Στη περιοχή αυτή, παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας που στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, που καταναλώνεται περίπου το 65% της ΗΕ.

Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400 kV καθώς επίσης εναέριες, υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια των 150 kV που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66 kV.

Την 31η Δεκεμβρίου 2013 το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς αποτελείται από 11.232 χλμ. γραμμών μεταφοράς, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα:

ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (χλμ. όδευσης)

	400kV	Σ.Ρ. (D.C.) 400kV	150 kV	66 kV	ΣΥΝΟΛΟ
ΕΝΑΕΡΙΕΣ	2.647	107	8.152	39	10.945
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ	0,58		140	15	155
ΥΠΟΓΕΙΕΣ	30		101		131
ΣΥΝΟΛΟ	2.677	107	8.393	54	11.232

Πίνακας 1.1: Χλμ όδευσης Γραμμών Μεταφοράς, Ελλάδα - πηγή:ΑΔΜΗΕ

Σύμφωνα με στοιχεία του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς ΗΕ, την 31η Δεκεμβρίου 2013 σε 331 Υποσταθμούς και ΚΥΤ του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς ήταν εγκατεστημένοι 732 Μετασχηματιστές και Αυτομετασχηματιστές με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 55.391 MVA.[3]

1.2.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η διανομή ΗΕ περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου που απαιτούνται ώστε η ΗΕ να διανεμηθεί στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ΗΕ μέσω των οποίων αυτή φτάνει ως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, που περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης.

Η διάκριση μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ΗΕ και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται τώρα ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής.

Στα σύγχρονα συστήματα ΗΕ η αξία των εγκαταστάσεων διανομής κυμαίνεται περίπου στο 30% του συνόλου των εγκαταστάσεων, ενώ ακόμα μεγαλύτερη είναι η ποσοστιαία συμμετοχή στις δαπάνες εκμετάλλευσης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της διανομής είναι το πλήθος των στοιχείων που την αποτελούν. Επιπλέον, οι απώλειες ενέργειας στο επίπεδο της διανομής είναι περίπου διπλάσιες απ' ό τι στο επίπεδο της μεταφοράς [4].

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων και γενικότερα του τρόπου χωροταξικής διαμόρφωσης κάθε χώρας. Αυτό διαπιστώνεται και από το γεγονός ότι τα δίκτυα διανομής κάθε χώρας έχουν κατά γενικό κανόνα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, σε αντίθεση με τα δίκτυα μεταφοράς που είναι διεθνώς όμοια. Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε δίκτυα υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης. Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Τα εναέρια είναι λιγότερο δαπανηρά και σε αυτά η αποκατάσταση των βλαβών είναι ταχύτερη σε σχέση με τα υπόγεια. Ωστόσο στις πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων τα δίκτυα διανομής κατασκευάζονται συνήθως υπόγεια, διότι δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος, ώστε να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας από τα κτίρια, αλλά και για λόγους αισθητικής.

1.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή

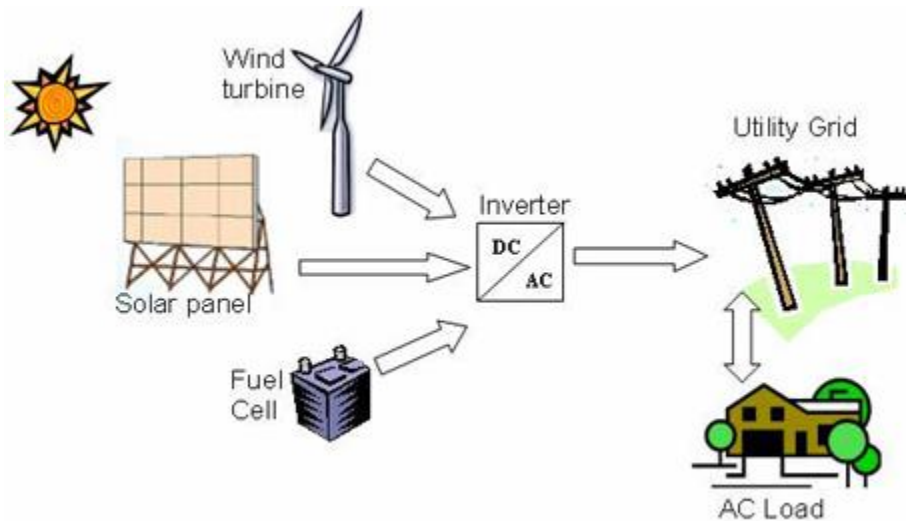
1.3.1 Εισαγωγή

Αναφερθήκαμε προηγουμένως στον τρόπο παραγωγής της ΗΕ η οποία τροφοδοτεί τα ΣΗΕ και καταλήγει στους καταναλωτές μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Η παραγωγή ενέργειας μέσω μεγάλων μονάδων (οι οποίες τροφοδοτούν κατά βάση τα διασυνδεδεμένα ΣΗΕ), ονομάζεται συγκεντρωτική. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για ένα διαφορετικό είδος παραγωγής, τη λεγόμενη διανεμημένη ή διεσπαρμένη παραγωγή.

Ως διανεμημένη ή διεσπαρμένη ή κατανεμημένη παραγωγή (DG – Distributed Generation) δύναται να ορισθεί η παραγωγή ΗΕ μικρής κλίμακας, εντός ενός δικτύου διανομής ή στο ακραίο τμήμα αυτού στην πλευρά του καταναλωτή [7]. Συνήθως στον ορισμό της συμπεριλαμβάνονται και κάποια ακόμα βασικά χαρακτηριστικά, όπως η ύπαρξη και εκμετάλλευση ΑΠΕ ή η Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας κ.α. Η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελεί την εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος της παραγωγής ΗΕ και διαφαίνεται ότι είναι ικανή να αποτελέσει την απάντηση στα μειονεκτήματα της συγκεντρωτικής παραγωγής. Το Ινστιτούτο των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineer Inc, IEEE), καθορίζει την διεσπαρμένη παραγωγή, ως παραγωγή ηλεκτρισμού από εγκαταστάσεις οι οποίες είναι σαφώς μικρότερες από τα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ΗΕ, έτσι ώστε να είναι δυνατή η διασύνδεσή τους σχεδόν σε κάθε σημείο του συστήματος ισχύος. Από άποψη ισχύος, η διεσπαρμένη παραγωγή κυμαίνεται κατά κανόνα σε ένα εύρος 1KW έως 100MW, ανά εγκατάσταση. Αν θέλουμε να συνοψίσουμε τα γενικότερα χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής θα μπορούσαμε να πούμε πως[20]:

- Η διεσπαρμένη παραγωγή δεν είναι κεντρικά σχεδιαζόμενη και αναπτυσσόμενη (από την εταιρεία ηλεκτρισμού ή κάποιον διαχειριστή).
- Δεν υπάρχει κεντρικός προγραμματισμός λειτουργίας των μονάδων από το διαχειριστή του συστήματος.

- Η ισχύς των μονάδων που εγκαθίστανται δεν υπερβαίνει τα 50-100 MW αλλά συνήθως είναι της τάξης κάποιων KW.
- Είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής ανάλογα με το πώς ορίζεται για κάθε υπό μελέτη σύστημα.



Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση διεσπαρμένης παραγωγής

1.3.2 Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής

Οι εγκαταστάσεις που ανήκουν στη διεσπαρμένη παραγωγή είναι κατά κανόνα μονάδες ΑΠΕ, στις οποίες εντάσσονται [5]:

➤ Τα Φ/Β συστήματα

Τα Φ/Β συστήματα αποτελούνται από συστοιχίες πάνελ (κατά βάση πυριτίου) που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική υπό συνεχή τάση (DC) και από κυκλώματα ισχύος-αντιστροφείς (inverters) που μετατρέπουν την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (AC), κατάλληλη για το δίκτυο. Η εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β συστημάτων κυμαίνεται συνήθως από μερικά KW έως μερικές εκατοντάδες MW στα πολύ μεγάλα Φ/Β πάρκα, τα οποία όμως λόγω της υψηλής ισχύος συνδέονται απευθείας στο σύστημα μεταφοράς (εντάσσονται στη διεσπαρμένη παραγωγή).

➤ *Οι Ανεμογεννήτριες (αιολικά πάρκα)*

Οι ανεμογεννήτριες αρχικά μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική μέσω ενός ανεμοκινητήρα (στην ουσία πρόκειται για ένα ρότορα με πτερύγια) και, στη συνέχεια, σε ηλεκτρική μέσω μιας γεννήτριας. Η ονομαστική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας κυμαίνεται συνήθως από 200 KW μέχρι 2MW. Όσον αφορά ανεμογεννήτριες που προορίζονται για υπεράκτια αιολικά πάρκα, η ονομαστική ισχύς μπορεί να φτάσει έως και 8MW. Η εγκατεστημένη ισχύς ενός αιολικού πάρκου κυμαίνεται από μερικά MW μέχρι 1-2GW, με τις πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις να απαιτούν την σύνδεση απευθείας στο σύστημα μεταφοράς και κατά συνέπεια να μην εντάσσονται στη διεσπαρμένη παραγωγή.

➤ *Οι μονάδες βιομάζας-βιοκαυσίμων*

Οι μονάδες βιομάζας βιοκαυσίμων είναι μικρές μονάδες παρόμοιες με τις συμβατικές με τη διαφορά ότι ως καύσιμο χρησιμοποιούν βιομάζα ή βιοκαύσιμο. Η βιομάζα (οργανική ύλη) είναι φυτικά υπολείμματα (π.χ. από αγροτικές εργασίες, δασοκομία, πριονίδια, πυρήνα ελιάς), ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα) και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων. Τα βιοκαύσιμα είναι υγρά ή αέρια καύσιμα που παράγονται από βιομάζα. Οι μονάδες εντάσσονται στις ΑΠΕ επειδή δεν αλλοιώνουν το ισοζύγιο του CO₂ (η βιομάζα έχει δεσμεύσει το CO₂ που πρόκειται να εκπέμψει κατά την καύση της) και, επιπλέον, δεν παράγουν τοξικά καυσαέρια, όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου. Η εγκατεστημένη ισχύ τους ποικίλει από μερικά KW μέχρι μερικά MW.

➤ *Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί*

Εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του νερού μετατρέποντας τη σε μηχανική και ακολούθως σε ηλεκτρική. Σε αντίθεση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, οι μικροί σταθμοί εκμεταλλεύονται την φυσική ροή και τις φυσικές υδατοπτώσεις του νερού χωρίς την κατασκευή τεχνητών λιμνών και μεγάλων

φραγμάτων. Επιπλέον, η εγκατεστημένη ισχύ τους φθάνει μέχρι τα 300KW. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια ανήκουν μεν στις ΑΠΕ αλλά δεν εντάσσονται στη διεσπαρμένη παραγωγή λόγω της ισχύος τους που φθάνει τις εκατοντάδες MW, και της σύνδεσής τους στο σύστημα μεταφοράς απευθείας.

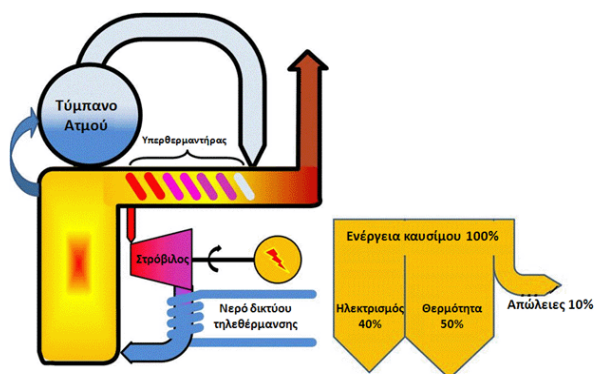
➤ *Οι γεωθερμικές πηγές*

Η γεωθερμική ενέργεια αφορά την παραγωγή ενέργειας από τη θερμότητα που είναι αποθηκευμένη κάτω από την επιφάνεια της γης. Η ενέργεια μεταφέρεται στην επιφάνεια με θερμική επαγωγή και με την είσοδο στο φλοιό της γης λειωμένου μάγματος από τα βαθύτερα στρώματά της. Θα μπορούσε να πει κάποιος ότι η γεωθερμική ενέργεια δεν είναι πραγματικά ανανεώσιμη, γιατί με την πάροδο του χρόνου το εσωτερικό της γης θα κρυώσει και η ραδιενεργή φθορά των στοιχείων που κρατούν το εσωτερικό της γης θερμό θα μειωθεί. Όμως, επειδή οι δεξαμενές γεωθερμίας είναι τεράστιες σε μέγεθος συγκριτικά με τις ανάγκες του ανθρώπου, η γεωθερμική ενέργεια είναι πρακτικά ανανεώσιμη. Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος να μειωθεί η ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα σημερινά γεωθερμικά πεδία παράγουν μόνο το 1/6 CO₂ σε σύγκριση με τις γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος που λειτουργούν με φυσικό αέριο, και καθόλου νιτρικά (NO_x) και θειικά (SO_x) αέρια. Για κάθε 1.000 MW ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχεται από γεωθερμικές πηγές εκπέμπονται 1 εκατομμύριο Kg λιγότερα τοξικά αέρια το χρόνο και 4 δισεκατομμύρια Kg λιγότερο CO₂, ενώ οι ρύποι αυτοί θα ήταν πολύ περισσότεροι αν σαν πρώτη ύλη χρησιμοποιούνταν άνθρακας. Στην Ισλανδία το 86% των αναγκών θέρμανσης καλύπτεται από γεωθερμικές πηγές .

➤ *Οι μονάδες Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού-θερμότητας (ΣΗΘ) (CHP Cogeneration)*

Στις μονάδες ΣΗΘ, η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε μηχανική και θερμική. Η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ΗΕ και η θερμική χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή ατμού, θερμού αέρα ή νερού. Το κύριο

πλεονέκτημα της ΣΗΘ είναι η καλύτερη αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου σε σύγκριση με τις απλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις που παράγουν ατμό ή θερμό νερό για τις ανάγκες κάποιου σταδίου της παραγωγικής τους διαδικασίας και ταυτόχρονα αγοράζουν το ρεύμα που χρειάζονται για άλλες διεργασίες από προμηθευτές ΗΕ. Επίσης, οι μονάδες ΣΗΘ αξιοποιούν καλύτερα το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου συγκριτικά με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής αποκλειστικά ρεύματος. Αν και στις μονάδες ΣΗΘ γίνεται συνήθως πρώτα η παραγωγή θερμότητας, είναι δυνατή η παραγωγή ΗΕ και ατμού (ή χρήσιμης θερμικής ενέργειας σε άλλη μορφή) με αντίστροφη σειρά και σε διάφορες αναλογίες. Απλοποιημένα, τα συστήματα συμπαραγωγής αποτελούνται από τρία βασικά μέρη, έναν κινητήρα για την οδήγηση μιας γεννήτριας (συνήθως ατμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος ή σε μικρότερες εφαρμογές εμβολοφόρος μηχανή εσωτερικής καύσης), την ίδια τη γεννήτρια, και έναν μηχανισμό ανάκτησης θερμότητας που συνήθως περιλαμβάνει κάποιον λέβητα.



Σχήμα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας ΣΗΘ και τηλεθέρμανσης

1.3.3 Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής

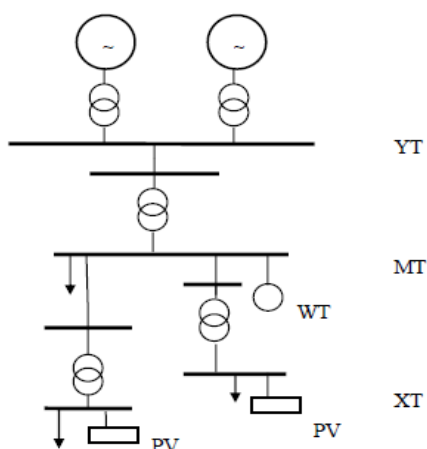
Η διεσπαρμένη παραγωγή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία έχουν οικονομικές, τεχνικές αλλά και περιβαλλοντικές προεκτάσεις.

Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι:

- Η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει μία ευρεία γκάμα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερος ειδικά τα τελευταία χρόνια. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Η παραγωγή της ενέργειας κοντά στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος (πάνω από το 30%) του συνολικού κόστους. Σχεδόν πάντα η διανεμημένη παραγωγή διασφαλίζει οικονομικά οφέλη για τους καταναλωτές, όπως μικρότερο συνολικό ενεργειακό κόστος αφού μέρος της καταναλισκόμενης ενέργειας καλύπτεται από ΑΠΕ.
- Χρησιμοποιώντας όλο και περισσότεροι καταναλωτές ανανεώσιμες πηγές διεσπαρμένης παραγωγής, μειώνεται το συνολικό φορτίο αιχμής της εταιρείας διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό η διεσπαρμένη παραγωγή βοηθά στην αποσυμφόρηση των ήδη υπάρχοντων γραμμών.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή προσφέρει πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής όπου ζουν και μπορούν έτσι να αξιοποιήσουν τις ΑΠΕ.
- Είναι αρκετά πιο πρακτικό και πιο εύκολο να βρεθούν τοποθεσίες για ΑΠΕ και άλλες διεσπαρμένες παραγωγές από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος, και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο.
- Τα σημαντικότερα τεχνικά οφέλη αξιοπιστίας που προσφέρει η διεσπαρμένη παραγωγή είναι υποστήριξη και σταθερότητα στην παροχή τάσης, αξιοπιστία άεργου ισχύος, εφεδρεία για απρόβλεπτα φαινόμενα και δυνατότητα αυτόνομης εκκίνησης (black start). Υπό προϋποθέσεις, η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εφεδρική ισχύς σε περίπτωση διακοπής ρεύματος, καθώς και σε περιπτώσεις βύθισης τάσης, ώστε να ενισχυθεί η ποιότητα της ισχύος που παρέχεται τοπικά. Πρέπει να σημειωθεί πως πολλοί καταναλωτές, όπως νοσοκομεία, τηλεπικοινωνιακά κέντρα, βιομηχανίες ημιαγωγών, εγκαταστάσεις επεξεργασίας τροφίμων, κ.ά., απαιτούν υψηλότερη ποιότητα ενέργειας από τη συνηθισμένη που προμηθεύεται το μεγαλύτερο μέρος των καταναλωτών. Για τους

καταναλωτές αυτούς η διακοπή ρεύματος ή η βύθιση τάσης μπορεί να έχει πολύ μεγάλες οικονομικές και όχι μόνο συνέπειες.

- Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ, αλλά και άλλων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, εκτός από την υψηλότερη απόδοση ενέργειας, μειώνει την ανάγκη για εισαγωγή ΗΕ.
- Η εκτεταμένη χρήση των ΑΠΕ βοηθά στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και άλλων επιβλαβών αερίων όπως είναι τα οξειδία του θείου και του αζώτου (SO_x , NO_x), συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.
- Η σωστή χωροθέτηση των σταθμών κατανεμημένης παραγωγής σε σχέση με την τοποθεσία και δυναμικότητα, μπορεί να βελτιώσουν ακόμη περισσότερο το περιβαλλοντικό ισοζύγιο της κατανεμημένης παραγωγής, μειώνοντας τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς.



Σχήμα 1.5: Δομή Συστήματος ΗΕ με διεσπαρμένη παραγωγή (Φ/Β πάνελ)

1.3.4 Εμπόδια για τη διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής

Εκτός βέβαια από τα πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής, υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα τα οποία εμποδίζουν την αυξημένη διείσδυση της στα συστήματα ΗΕ. Το βασικό πρόβλημα είναι το ότι η διεσπαρμένη παραγωγή

προσκρούει στους περιορισμούς που σχετίζονται με την ευστάθεια των συστημάτων και την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας.

Μια μονάδα παραγωγής ΗΕ πρέπει να συνδέεται στο δίκτυο με εξασφαλισμένη την τήρηση αυστηρών προδιαγραφών που αποσκοπούν στην ομαλή λειτουργία του δικτύου. Αυτές οι προδιαγραφές αφορούν [7]:

- Την επάρκεια των στοιχείων του δικτύου

Τα στοιχεία του δικτύου στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί η εγκατάσταση παραγωγής πρέπει να μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες λειτουργίας και προστασίας του δικτύου και της εγκατάστασης. Τα βασικά στοιχεία είναι ο Υ/Σ που εξυπηρετεί την εγκατάσταση, οι Μ/Σ, οι γραμμές του δικτύου και τα μέσα ζεύξης και προστασίας.

- Τη συμβολή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του σημείου σύνδεσης

Η ισχύς μιας μονάδας παραγωγής επηρεάζει την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου και, κατά συνέπεια, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που προκύπτουν σε ενδεχόμενα σφάλματα στο δίκτυο

- Τις αργές μεταβολές της τάσης

Έτσι ονομάζονται οι μεταβολές της τάσης μόνιμης κατάστασης του δικτύου που υπολογίζονται από την διακύμανση του μέσου όρου της τάσης σε διάστημα 10 min από την ονομαστική τιμή της τάσης. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να οφείλονται σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων παραγωγής ή σε μεταβολές του φορτίου του δικτύου

- Τις ταχείες μεταβολές της τάσης

Έτσι αποκαλούνται οποιεσδήποτε ταχείες μεταβολές της τάσης που παρατηρούνται χρονικές κλίμακες έως μερικά δευτερόλεπτα. Ταχείες μεταβολές συμβαίνουν λόγω χειρισμών στις εγκαταστάσεις παραγωγής (π.χ. ζεύξη-απόζευξη, αλλαγή γεννητριών) αλλά και εξαιτίας της μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου

- Τις εκπομπές flicker

Είναι το φαινόμενο της οπτικής ενόχλησης από την διακύμανση της φωτεινότητας (τρεμόπαιγμα) σε λαμπτήρες πυράκτωσης. Οφείλεται και αυτό σε διακυμάνσεις στην τάση που προκαλούν οι εγκαταστάσεις παραγωγής ΗΕ. Να σημειωθεί ότι οι κύριες πηγές εκπομπών έντονων flicker είναι οι Α/Γ.

- Τη δημιουργία αρμονικών συνιστωσών της τάσης και του ρεύματος

Η τάση και τα ρεύματα του δικτύου εμφανίζουν απόκλιση από την ιδεατή καθαρά ημιτονοειδή κυματομορφή. Οι εξάρσεις και οι βυθίσεις που εμφανίζονται στις κυματομορφές προσδίδουν πριονωτή μορφή είναι και αυτές μικρές κυματομορφές με αρμονικές συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας της τάσης ή του ρεύματος, οι οποίες μπορούν να εντοπιστούν και να αναλυθούν. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και τα μη γραμμικά κυκλώματα ισχύος προκαλούν τη δημιουργία αρμονικών συνιστωσών που πρέπει να καταπιέζονται.

Παρά την τήρηση των ανωτέρω προδιαγραφών για τη σύνδεση των μονάδων παραγωγής, η σύνδεσή τους στο δίκτυο διανομής μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά πηγάζουν από τη μορφή που έχει το δίκτυο διανομής, το οποίο είναι συνήθως ακτινικό ή βροχοειδές που λειτουργεί ως ακτινικό και όχι διασυνδεδεμένο, με αποτέλεσμα η ροή ισχύος να είναι προς μια κατεύθυνση. Μεγάλο πρόβλημα επίσης, είναι η αδυναμία του διαχειριστή να εμποτεύει σε πραγματικό χρόνο τις ροές ενέργειας εντός των δικτύων διανομής.

Τα πιο βασικά προβλήματα που παρατηρούνται είναι [7],[8] :

- Υπερτάσεις σε περιπτώσεις όπου τα εξυπηρετούμενα φορτία είναι χαμηλά, με αποτέλεσμα να απαιτείται συντονισμένη λειτουργία των μονάδων και ειδικός εξοπλισμός όπως οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ (Load Tap Changers, μεταβλητού λόγου μετασχηματισμού) για το συνεχή έλεγχο της τάσης
- Μεταβολές της συχνότητας του ΣΗΕ, η οποία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εξαρτάται κάθε στιγμή από το ισοζύγιο παραγωγής- κατανάλωσης. Οποιαδήποτε

απόκλιση από αυτή την ισορροπία μεταφράζεται είτε σε απόκλιση από την επιθυμητή συχνότητα του ευρωπαϊκού δικτύου των 50Hz, είτε σε μεγάλες ροές ισχύος στις γραμμές διασύνδεσης του τοπικού δικτύου με τα γειτονικά του, που επιφέρουν καταπόνηση του εξοπλισμού των δικτύων.

Επιπλέον μειονεκτήματα που αφορούν τη διεσπαρμένη παραγωγή είναι τα εξής:

- Το σχετικά υψηλό κόστος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής.
- Η αβεβαιότητα που διέπει την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ. Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων. Πρέπει να γίνεται μετεωρολογική πρόβλεψη, που δεν μπορεί όμως να προβλέψει ακριβώς την ποσότητα ισχύος που θα είναι δυνατό να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών όπως είναι για παράδειγμα ο άνεμος ή ο ήλιος. Έτσι υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ΑΠΕ, η διείσδυση είναι δηλαδή περιορισμένη και πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής.
- Η μεγάλη διείσδυση και χρήση σταθμών κατανεμημένης παραγωγής θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα τη υπολειτουργία των μεγάλων κεντρικών σταθμών παραγωγής ΗΕ, με αποτέλεσμα να αυξηθούν οι εκπομπές ρύπων ανά παραγόμενη κιλοβατώρα.

1.3.5 Προϋποθέσεις για την αύξηση της διείσδυσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η βασική προϋπόθεση για την αύξηση της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής στα ΣΗΕ είναι η εισαγωγή εποπτείας και ελέγχου στα δίκτυα διανομής, ώστε να καταστεί εφικτή η αποφυγή των προαναφερθέντων προβλημάτων

ευστάθειας. Τα τρέχοντα δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται από τον παθητικό τρόπο λειτουργίας τους, το χαμηλό επίπεδο αυτοματισμού και τις μειωμένες δυνατότητες κεντρικής διαχείρισης.

Επιπλέον η αύξηση της ευελιξίας της παραγωγής αλλά, κυρίως, η εισαγωγή ευελιξίας και στη ζήτηση κρίνονται απαραίτητες για το δυναμικό έλεγχο του ισοζυγίου παραγωγής και ζήτησης, που είναι πολύ σημαντικός για την ευστάθεια και την αξιοπιστία του δικτύου. Ένας τρόπος αύξησης της ευελιξίας της παραγωγής είναι ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και μικρών μονάδων παραγωγής με ικανότητα παροχής σταθερής ισχύος (π.χ. γεννήτριες βιοκαυσίμων), για άμεση ανταπόκριση στη ζήτηση.

Όμως, οι ανωτέρω λύσεις είναι κατά κανόνα οικονομικά ασύμφωρες. Για το λόγο, οι διαχειριστές των συστημάτων προσανατολίζονται στο να εφαρμόζουν μεθόδους που να εποπτεύουν και να ελέγχουν όχι μόνο την παραγωγή αλλά και την κατανάλωση ΗΕ. Η τάση για εξηλεκτρισμό των υπολοίπων τομέων κατανάλωσης ενέργειας και κυρίως των τομέων της θέρμανσης και των μεταφορών (ηλεκτρικά οχήματα) αυξάνουν την ευελιξία των φορτίων και παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου μεγάλου μέρους της ζήτησης. Με τη μετατροπή μέρους της ζήτησης από ανελαστική σε ευέλικτη επιτυγχάνεται η διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος χωρίς να υπάρχει ανάγκη εφεδρείας μέσω γεννητριών και χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του εξοπλισμού των δικτύων.

1.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειες

1.4.1 Εισαγωγή

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ορίζονται οι ακόλουθες πηγές ενέργειας:

- Ηλιακή Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια
- Βιομάζα
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Γεωθερμία

- Ενέργεια της Θάλασσας (παλιρροιακά κύματα)

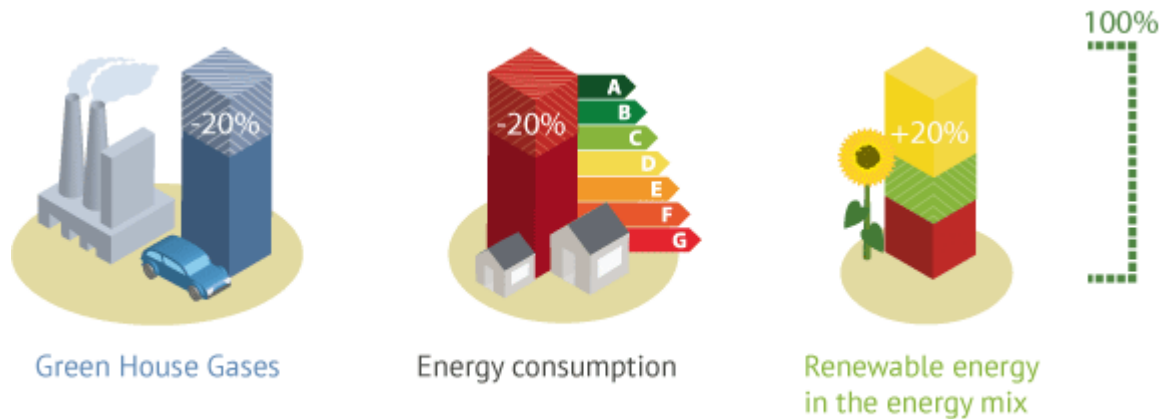
Η Ελλάδα διαθέτει πλούσιο δυναμικό σε ΑΠΕ [9]. Ως παράδειγμα αναφέρεται η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Η αιολική ενέργεια πρωταγωνιστεί στην ανάπτυξη των ΑΠΕ και παρουσιάζει σημαντικές επενδυτικές δυνατότητες στη χώρα μας. Το εξαιρετικά υψηλό αιολικό δυναμικό της χώρας κατατάσσεται μεταξύ των πλέον ελκυστικών στην Ευρώπη, με απόδοση πάνω από 8 μέτρα/δευτερόλεπτο ή/και 2,500 ώρες παραγωγής αιολικής ενέργειας, σε πολλά σημεία της χώρας. Η Ελλάδα παρουσιάζει επίσης ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου 1.400-1.800 (kWh/(m².yr) ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής.

1.4.2 Ενεργειακή Πολιτική

Ο τομέας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, τόσο στη χώρα μας όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Με κύρια ώθηση για την αξιοποίηση των ΑΠΕ την περιβαλλοντική, η παγκόσμια κοινότητα έχει αναγνωρίσει την ανάγκη ένταξης ανανεώσιμων πηγών τόσο στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής όσο και στους τομείς της θέρμανσης/ψύξης και μεταφορών. Σε αυτό το πλαίσιο χαράχθηκε και η Ευρωπαϊκή πολιτική για τις ΑΠΕ που με το στόχο του 20-20-20 έχει δώσει σαφή κατεύθυνση σε όλα τα κράτη μέλη. Ειδικότερα για τη χώρα μας, ο εθνικός σχεδιασμός για την επίτευξη του στόχου 20-20-20 όπως θεσμοθετήθηκε από το ΥΠΕΚΑ και σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές οδηγίες παρουσιάζονται στο σχήμα 1.6 [5]:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/ΕΚ
- 20% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ

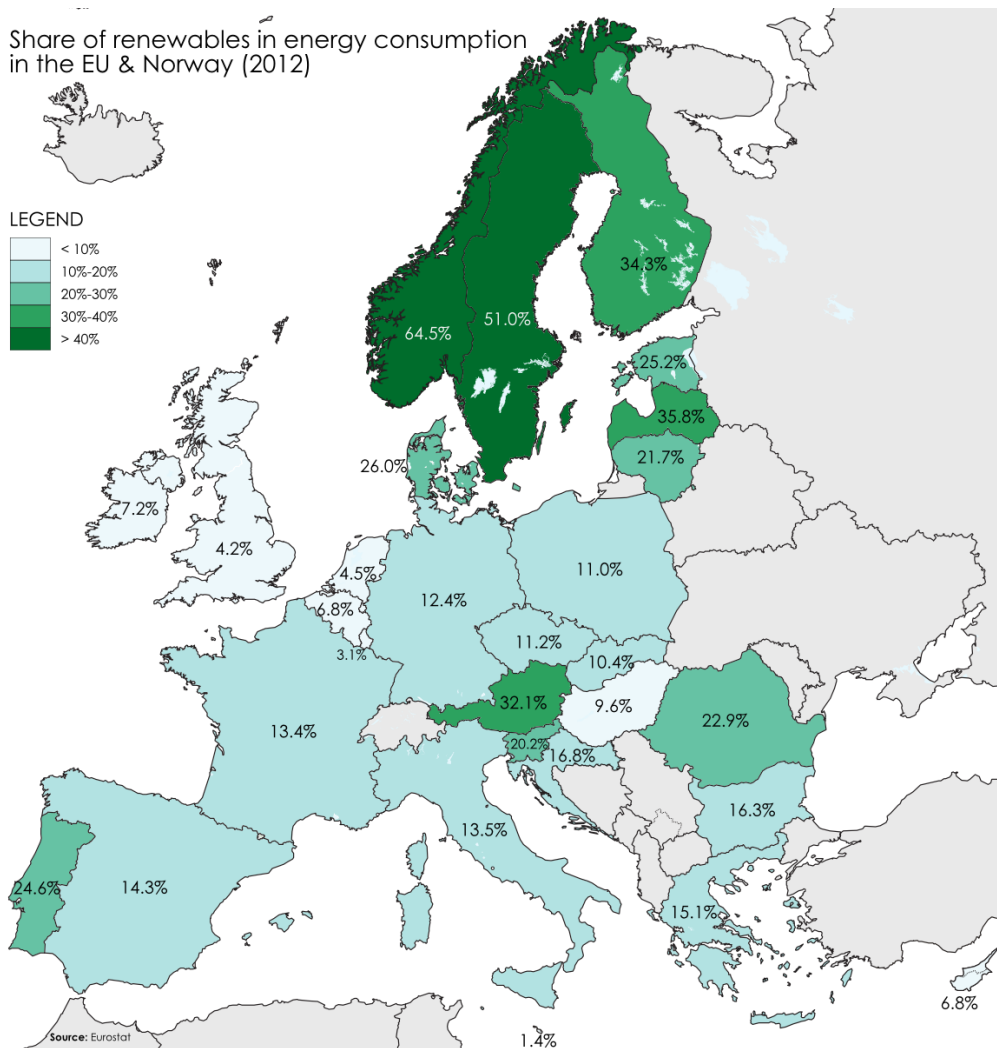
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας



Σχήμα 1.6: Γραφική αναπαράσταση του Ευρωπαϊκού στόχου 20-20-20

Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος και εξειδικεύεται σε 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10% στις μεταφορές.

Οι εθνικοί στόχοι για το 2020 είναι για τη μεν ηλεκτροπαραγωγή με την ανάπτυξη περίπου 13300MW από ΑΠΕ (από περίπου 4500MW σήμερα), όπου συμμετέχουν το σύνολο των τεχνολογιών με προεξέχουσες τα αιολικά πάρκα με 7500MW, υδροηλεκτρικά με 3000MW και τα ηλιακά με περίπου 2500MW, ενώ για τη θέρμανση και ψύξη με την ανάπτυξη των αντλιών θερμότητας, των θερμικών ηλιακών συστημάτων, αλλά και των εφαρμογών βιομάζας [5].



Σχήμα 1.7: Ποσοστό ενέργειας από ΑΠΕ σε σχέση με τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και στη Νορβηγία

1.4.3 Χρηματοοικονομικό Πλαίσιο και Επιχειρηματικότητα

Ως εκ τούτου σε πολλές χώρες παγκοσμίως δίνονται κίνητρα για να ενισχύσουν τις ιδιωτικές επενδύσεις σε ΑΠΕ. Για την επίτευξη των στόχων αναπτύχθηκε θεσμικό πλαίσιο με πληθώρα διατάξεων και φορέων. Επίσης, το χρηματοοικονομικό πλαίσιο υλοποίησης των έργων ΑΠΕ ηλεκτροπαραγωγής όπως έχει διαμορφωθεί, καλύπτει σε ορισμένες περιπτώσεις μέσω αναπτυξιακών νόμων μεγάλο μέρος του αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης και παρέχει την εγγυημένη πώληση όλης της

παραγόμενης ενέργειας σε εγγυημένη τιμή (feed in tariff) και για εγγυημένη χρονική περίοδο.

Στη χώρα μας η νομοθεσία του feed in tariff δεν είναι πια σε ισχύ από τον Δεκέμβριο του 2014, έχοντας αντικαταθεί από μία καινούρια τροπολογία που αφορά το συμψηφισμό της συνολικής παραγόμενης ισχύος από ΑΠΕ και της συνολικής κατανάλωσης (net metering). Το Net Metering αναφέρεται σε μια συμφωνία μεταξύ της εταιρείας ηλεκτρισμού και ενός καταναλωτή ηλεκτρικού ρεύματος, που εγκαθιστά ένα τοπικό σύστημα παραγωγής ΗΕ. Η συμφωνία προβλέπει ότι, αν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου καταμέτρησης, η παραγωγή ΗΕ είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση, το πλεόνασμα πιστώνεται στο επόμενο τιμολόγιο χρέωσης. Αν η παραγωγή είναι μικρότερη από την κατανάλωση, ο καταναλωτής χρεώνεται μόνο για τη διαφορά. Αν με το κλείσιμο ενός έτους από την εγκατάσταση του συστήματος παραγωγής, υπάρχει τελικά περίσσεια ενέργειας, αυτή χάνεται και η διαδικασία ξεκινά από την αρχή για το επόμενο έτος. Αν κατά τη διάρκεια ενός έτους το σύστημα παραγωγής παράγει ενέργεια ίση με τη συνολική ετήσια κατανάλωση, ο καταναλωτής δεν πληρώνει τίποτε στην εταιρεία ηλεκτρισμού.

Συμπερασματικά, η αρχική ανάγκη για απεξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και η μείωση των εκπομπών ρύπων έχει οδηγήσει τελικά σε πολιτικές αποφάσεις οι οποίες έχουν δημιουργήσει ένα ιδιαίτερο επιχειρηματικό πεδίο, το οποίο διαφαίνεται ιδιαίτερα ελκυστικό. Διαμορφώθηκε μία αγορά που περιλαμβάνει τους προμηθευτές πρώτων υλών, τους κατασκευαστές του εξοπλισμού, τους διανομείς του εξοπλισμού, τους σχεδιαστές - μηχανικούς, τους εγκαταστάτες, κατασκευαστικές εταιρείες, τις εταιρείες πιστοποίησης, επιχειρήσεις που αναλαμβάνουν την συντήρηση και παρακολούθηση των έργων ΑΠΕ, τους παραγωγούς ενέργειας από ΑΠΕ, τις εταιρείες διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας.

Για κάθε κράτος μέλος λοιπόν, ο τομέας των ΑΠΕ έχει κομβικό ρόλο στην επιχειρηματικότητα γιατί:

- Αποτελεί πεδίο στο οποίο εκδηλώνονται σημαντικές νέες και δυναμικές επιχειρηματικές πρωτοβουλίες
- Οι επιχειρηματικές προοπτικές του τομέα στην Ελλάδα διαφαίνονται σημαντικές μιας και τα προσφερόμενα προϊόντα/υπηρεσίες συχνά έρχονται να καλύψουν πάγιες και διαρκείς ανάγκες
- Παράγει και προάγει την καινοτομία σε όλο τον επιχειρηματικό κύκλο ζωής
- Καλείται να καλύψει σημαντικές υποχρεώσεις που απορρέουν από τις ευρωπαϊκές οδηγίες

Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση.

Προς το παρόν στην Ελλάδα, τόσο το θεσμικό όσο και το χρηματοοικονομικό πλαίσιο αφορά επενδύσεις στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ και δεν προβλέπει ιδιαίτερα κίνητρα για την εγκατάσταση συστημάτων θέρμανσης και ψύξης από ΑΠΕ. Όσο για το θεσμικό πλαίσιο, περιλαμβάνει πληθώρα διατάξεων και εμπλεκόμενων φορέων με αποτέλεσμα πολλές φορές να καθυστερούν ή να ματαιώνονται σημαντικές επενδύσεις.

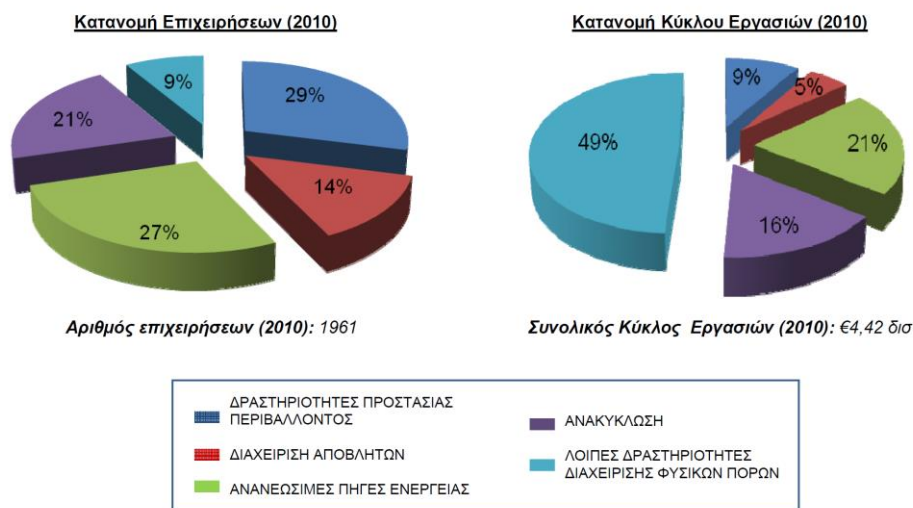
Δυνατά σημεία για την ανάπτυξη της επιχειρηματικότητας στον τομέα των ΑΠΕ στην Ελλάδα αποτελούν το υψηλό εθνικό δυναμικό σε ΑΠΕ, το ισχυρό θεσμικό πλαίσιο και τα υψηλά κονδύλια κοινοτικών και εθνικών πόρων.

Η εγχώρια αγορά στον τομέα των ΑΠΕ παρουσιάζει μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (2000-2010) στο 9% και παρά την ύφεση της ελληνικής οικονομίας, διακρίνεται από σταθεροποιητικές τάσεις. Περιλαμβάνει κυρίως τις εξής δραστηριότητες[10]:

- Αιολικά πάρκα
- Φωτοβολταϊκά πάρκα
- Μηχανήματα γεωθερμίας
- Μικρά υδροηλεκτρικά – Υδρογεννήτριες

- Βιοαέριο – Βιομάζα

Σε σχέση με τις λοιπές δραστηριότητες στον τομέα του περιβάλλοντος, οι ΑΠΕ μαζί με την Ανακύκλωση και τη Διαχείριση Αποβλήτων παρουσιάζουν τις σημαντικότερες επιδόσεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Επιδόσεις δραστηριοτήτων στον τομέα του Περιβάλλοντος – Ελλάδα, 2010 (πηγή ΣΕΒ)

Καθίσταται λοιπόν σαφές, πως ο κλάδος των ΑΠΕ αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα πεδία ανάπτυξης καινοτομιών, προσέλκυσης κεφαλαίων και δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας. Οι ΑΠΕ είναι ένας από τους κατ' εξοχήν τομείς που μπορούν να παράγουν προστιθέμενη αξία για τη χώρα, κινητοποιώντας επενδύσεις, στηρίζοντας την απασχόληση, συνεισφέροντας στα δημόσια έσοδα, στη βελτίωση του ενεργειακού μείγματος και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της ελληνικής οικονομίας.

Κεφάλαιο 2: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Καθορίζει τη θερμοκρασία στην επιφάνειά της και παρέχει ουσιαστικά το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των φυσικών συστημάτων. Με μία καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μία θερμοκρασία κοντά στους 5800°K . Η προσπίπτουσα ροή ενέργειας πάνω σε μία μονάδα επιφάνειας η οποία είναι κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από την ατμόσφαιρα, είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά: $S=1367\text{ W/m}^2$. Γενικά, η ισχύς από μία πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας, ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας [13].

Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτίνων από την ατμόσφαιρα της Γης, η ένταση τους ελαττώνεται, αφού τα φωτόνια σκεδάζονται στα μόρια της ατμόσφαιρας, στα πολύ μικρής διαμέτρου d σωματίδια, αλλά και στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματά της, όπως οι υδρατμοί, η σκόνη και ο καπνός. Ακόμα, ένα άλλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας. Παραδείγματος χάριν, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε η ένταση των ακτίνων αυτών, στην επιφάνεια της γης, να είναι εξαιρετικά μειωμένη και η καρκινογόνος δράση της αισθητά περιορισμένη. Έτσι, στην επιφάνεια της γης, φτάνουν τελικώς δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός:

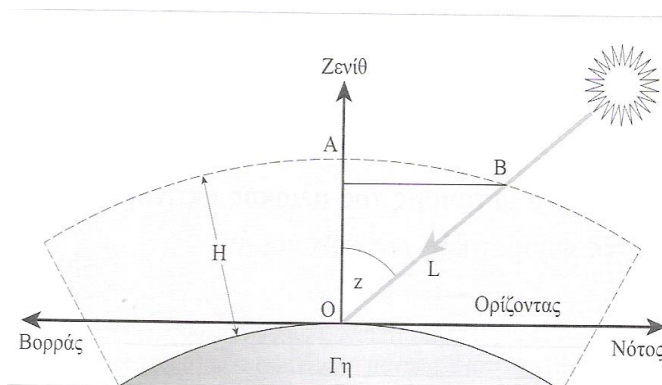
- η απευθείας ή άμεση B (Beam)
- η σκεδαζόμενη στα μόρια του αέρα, η οποία ονομάζεται διάχυτη D (Diffuse)

Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα). Τελικώς, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ή σ' έναν αισθητήρα, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και την ανακλώμενη από το έδαφος. Η συνολική αυτή ακτινοβολία αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία και συμβολίζεται με G (Global Irradiation).

Η ανακλώμενη ακτινοβολία εξαρτάται γενικά από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους και την πυκνότητα των νεφών, ενώ η ολική, απευθείας και διάχυτη, εξαρτώνται σε γενικές γραμμές από τους επόμενους παράγοντες:

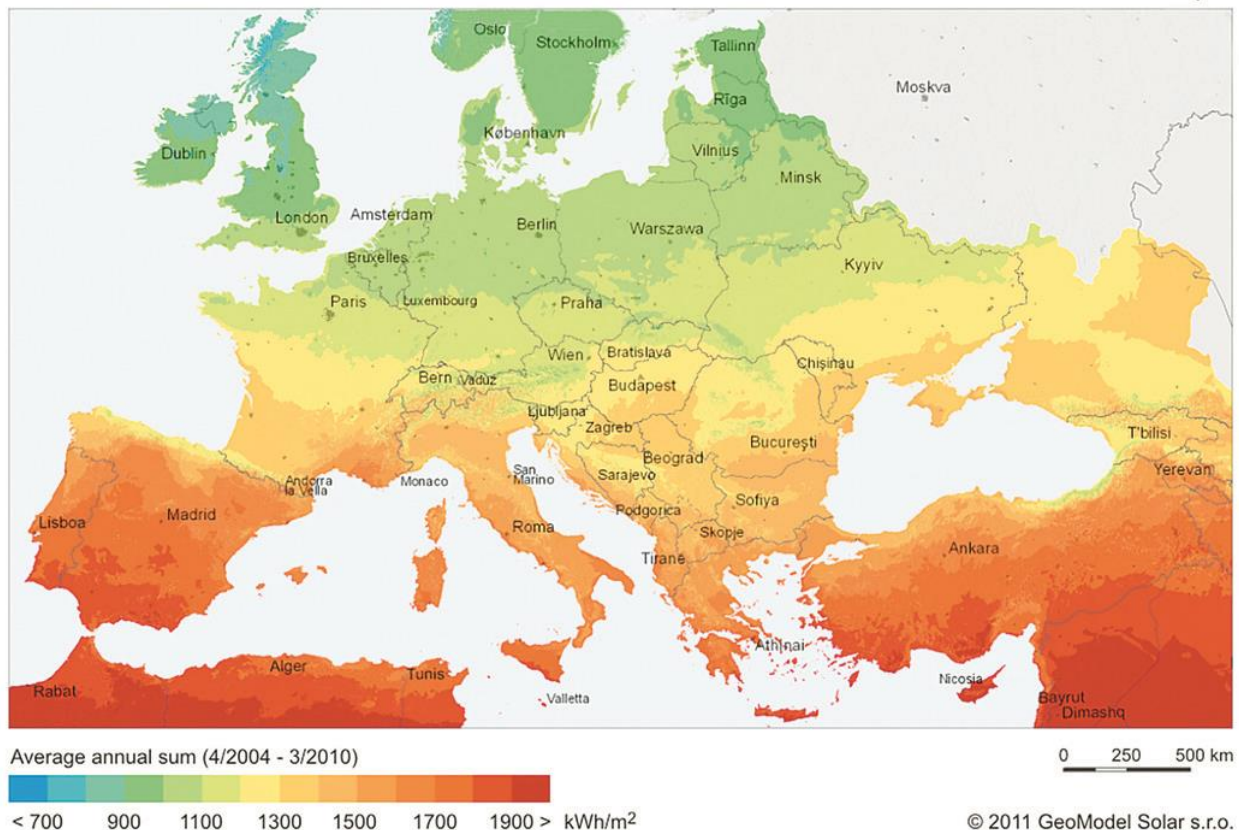
- τη σύσταση- κατάσταση της ατμόσφαιρας, τη δεδομένη χρονική στιγμή (π.χ. υγρασία ή ατμοσφαιρικά αιωρήματα)
- την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους
- τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνεια του συλλέκτη (ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας).

Κατά την ανατολή του ήλιου, η ζενίθια γωνία του ήλιου ($z=90^\circ - EL$, όπου EL (Elevation) το ύψος του ήλιου) είναι $z=90^\circ$ (σχήμα 2.1) και επομένως η ολική οριζόντια πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας G , καθορίζεται, κατά κύριο λόγο από τη διάχυτη συνιστώσα, D . Καθώς το ύψος του ήλιου αυξάνει, η απευθείας κάθετη ακτινοβολία, αυξάνει μέχρι το ηλιακό μεσημέρι, μετά από το οποίο ελαττώνεται, περίπου κατά συμμετρικό τρόπο [21].



Σχήμα 2.1: Το μήκος L που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα πάχους H και η ζενίθια γωνία z .

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη Γη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές. Οι περιοχές κοντά στον Ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από τις υπόλοιπες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (τα σύννεφα σκεδάζουν σε σημαντικό βαθμό τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν αποφασιστικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που διατίθεται και προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία (kW/m^2) αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια (συνήθως σε kWh/m^2). Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Χάρτης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας των χωρών της Ευρώπης.

Η χώρα μας συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών υψηλής ακτινοβολίας. Αυτό αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα σε σχέση με τις χώρες του ευρωπαϊκού βορρά, στην εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παραγωγή ΗΕ.

2.1.1 Δυνατότητα αξιοποίησης της Ηλιακής ενέργειας

Παρά τη γενικότερη αποδοχή της φωτοβολταϊκής ενέργειας ως εξαιρετικά φιλικής προς το περιβάλλον, υπάρχει αμφισβήτηση ως προς τη δυνατότητα αξιοποίησής της σε εφαρμογές που απαιτούν σημαντική ισχύ. Για την αντιμετώπιση της μειωμένης απόδοσης κατά τη διάρκεια συννεφιάς για μία ή περισσότερες μέρες επιλέγονται γενικά λύσεις που βασίζονται είτε σε χρησιμοποίηση συσσωρευτών μεγαλύτερης χωρητικότητας σε συνδυασμό με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, είτε υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών – ανεμογεννήτριας με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

Εξετάζοντας το θέμα από οικονομικής πλευράς, η δαπάνη παραγωγής 1 kWh από Φ/Β σύστημα βρίσκεται προς το παρόν σε υψηλά επίπεδα σε σύγκριση με την αντίστοιχη δαπάνη παραγωγής 1 kWh συμβατικής ΗΕ. Η εκ του προχείρου, όμως, σύγκριση του κόστους παραγωγής φωτοβολταϊκής και συμβατικής ΗΕ αποκρύπτει την πραγματική κατάσταση. Σύμφωνα μ' αυτήν, το ήδη επιβαρημένο περιβάλλον καθώς και η δυσοίωση προοπτική για την εξέλιξη των κλιματικών συνθηκών έχουν τη ρίζα τους στην καταχρηστική εκμετάλλευση των συμβατικών καυσίμων. Ο καταλογισμός της πάσης φύσεως επιδράσεων στον πλανήτη μας από τη χρήση των συμβατικών καυσίμων, εκφρασμένος σε κόστος δαπανών υγείας και γενικότερης δαπάνης περιορισμού της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, ανεβάζουν το πραγματικό κόστος της συμβατικής κιλοβατώρας, σύμφωνα με σχετικές μελέτες, μέχρι και 70% επιπλέον της τρέχουσας τιμής της.

Τα παραπάνω ενισχύουν την άποψη ότι η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της ηλιακής ενέργειας είναι επαρκής για να καλύψει τμήμα των σημερινών ενεργειακών αναγκών. Φαίνεται ικανή να συμβάλλει ρεαλιστικά στην αντικατάσταση μέρους της ήδη χρησιμοποιούμενης ενέργειας από συμβατικά

καύσιμα και βέβαια να αποτελέσει βασική συνιστώσα για τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες μας. Ταυτόχρονα αποτελεί την περισσότερο οικολογική λύση στο οξυμένο ενεργειακό πρόβλημα, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η συνεχώς αυξανόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος από την καύση του πετρελαίου και των παραγωγών του [12].

2.2 Η Φωτοβολταϊκή μετατροπή

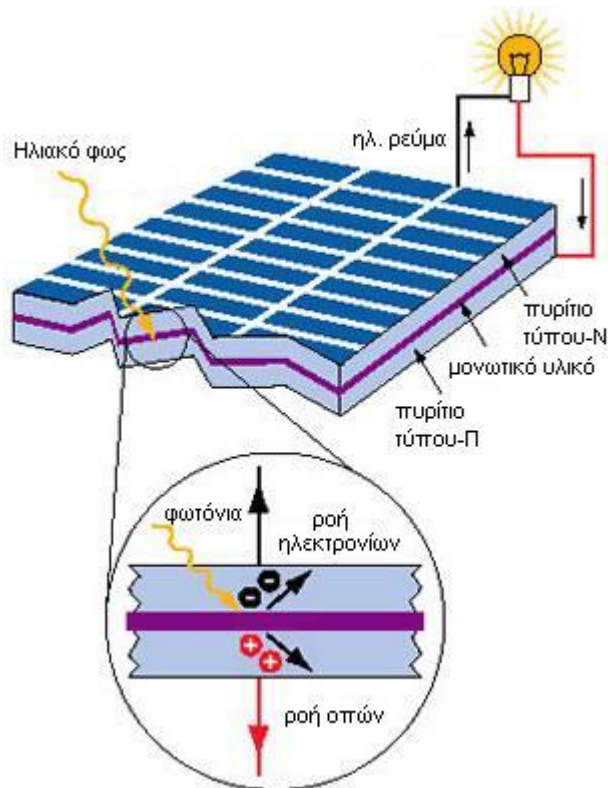
2.2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, αποτελεί τη βασική φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική. Ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο, το αρσενιούχο γάλλιο ή ο δισελινιοϊνδιούχος χαλκός, χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Το στοιχείο του κρυσταλλικού πυριτίου ωστόσο παραμένει το πιο διαδεδομένο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Πιο συγκεκριμένα το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β, λόγω της υφιστάμενης υποδομής για το συγκεκριμένο υλικό αυτό την τελευταία πενήταετία. Η τεχνολογία πάνω στο πυρίτιο οφείλεται στις πολλαπλές εφαρμογές του στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και στα Φ/Β πλαίσια που τροφοδοτούν δορυφόρους και υποστηρίχθηκε από μεγάλες κυβερνητικές και βιομηχανικές επενδύσεις. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός για την επεξεργασία του πυριτίου ώστε να έχει την απαιτούμενη καθαρότητα και κρυσταλλική δομή. Σε συνδυασμό με την αφθονία του στη γη και τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά, το πυρίτιο είναι ικανό και συμφέρον μέσο για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Το μόνο μειονέκτημα του πυριτίου είναι ότι είναι εύθραυστο και ως εκ τούτου απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων μεγάλου πάχους.

Όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, τότε ένα μέρος αυτού ανακλάται, ένα άλλο τη διαπερνά, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από το υλικό. Η απορρόφηση του φωτός, έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή του σε άλλη μορφή

ενέργειας, η οποία συνήθως είναι θερμότητα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, σε ΗΕ.



Σχήμα 2.3: Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται σε μεγάλο βαθμό η τεχνολογική πρόοδος του τομέα της ηλεκτρονικής και του τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια, δηλαδή "πακέτα" ηλιακής ενέργειας. Τα φωτόνια περικλείουν διαφορετικά ποσά ενέργειας, που αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος. Η τεχνολογία, μας έδωσε τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούν διόδους ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n με τη μορφή επίπεδης πλάκας. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας με ενέργεια ίση

ήμεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μπορεί να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο διαρκεί η πρόσπτωση της ακτινοβολίας, δημιουργείται περίσσεια φορέων, δηλαδή περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Οι φορείς αυτοί, κυκλοφορούν στο στερεό και αν δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, δέχονται την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p-n. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κατευθύνονται προς το τμήμα τύπου-n και οι οπές προς το τμήμα τύπου-p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Αν στους ακροδέκτες συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο (σχήμα 2.3). Τελικά, η όλη διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κυττάρου. Η ύπαρξη της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες της παραπάνω διάταξης, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

2.2.2 Η επαφή p-n

Στη συνέχεια, γίνεται μία σύντομη αναφορά στην αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τα άτομα των ημιαγώγιμων υλικών, όπως το πυρίτιο, το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον στα Φ/Β πάνελ, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς οι οποίοι είναι δυνατόν να σπάσουν υπό την επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας ή θερμότητας, οπότε απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς n) και αφήνουν κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς p). Οι σημαντικότερες ιδιότητες των διατάξεων ημιαγωγών, προέρχονται από τη διάχυση των φορέων τους. Βασική διάταξη για την εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών, είναι η ένωση p-n (positive-negative) η οποία σχηματίζεται όταν έρθουν σε επαφή ένα τμήμα ημιαγωγού τύπου-p με ένα τμήμα τύπου-n. Τότε, ένα μέρος από τις οπές του τμήματος τύπου-p διαχέεται προς το τμήμα τύπου-n, όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τμήματος τύπου-n

διαχέεται προς το τμήμα τύπου-p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι επίσης πολύ λιγότερα.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, η οποία ονομάζεται ζώνη εξάντλησης φορέων ή περιοχή αραιώσης. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα παραμένουν στη περιοχή τύπου-n και τα αρνητικά στην περιοχή τύπου-p. Έτσι, δημιουργείται ένα εσωτερικό των ημιαγωγών ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο αντιτίθεται στην κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, με συνέπεια η παραπάνω διάχυση να μη συνεχίζεται επ' άπειρον. Η αποκατάσταση της ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που ικανοποιούν το νόμο δράσης των μαζών.

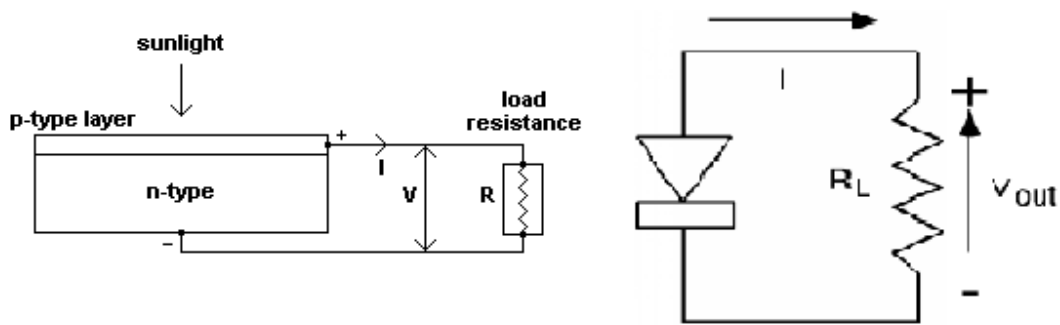
Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος. Η δίοδος μπορεί να είναι είτε ορθά ή ανάστροφα πολωμένη.

Στην πρώτη περίπτωση ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου-n της διόδου, και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου-p, ενώ αντίθετα στη δεύτερη ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου-p και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου-n.

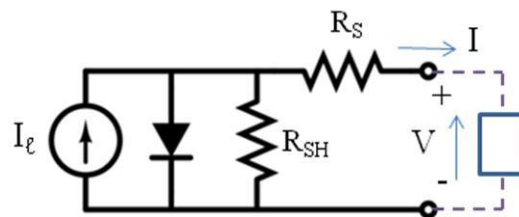
2.3 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

2.3.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου δίνεται στο Σχήμα 2.4 (απλό) και στο Σχήμα 2.5 (πλήρες ισοδύναμο). Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος (IL) σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του Φ/Β στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει αφενός την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του Φ/Β στοιχείου, η οποία τίθεται παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου, αφετέρου την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



Σχήμα 2.4: Απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου



Σχήμα 2.5: Πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου

Στο σχήμα 2.5 παρατηρούμε τις εξής αντιστάσεις:

- Παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση διαρροής, R_{sh} (Shuntresistance)

Η αντίσταση αυτή συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Η τιμή της σε πολύ καλής απόδοσης Φ/Β στοιχείων είναι μεγαλύτερη των $10^3 \Omega$.

- Σειριακή αντίσταση, R_s (Series resistance)

Η συγκεκριμένη αντίσταση αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή κατά τη διόδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το σώμα της διόδου και στις ωμικές

αντιστάσεις των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους. Άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της R_s είναι η δραστική ελάττωση της αντίστοιχης μέγιστης ισχύος που αποδίδει το στοιχείο. Τυπικές τιμές της R_s , για καλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία, βρίσκονται στο εύρος 0,1 Ω έως 0,3 Ω.

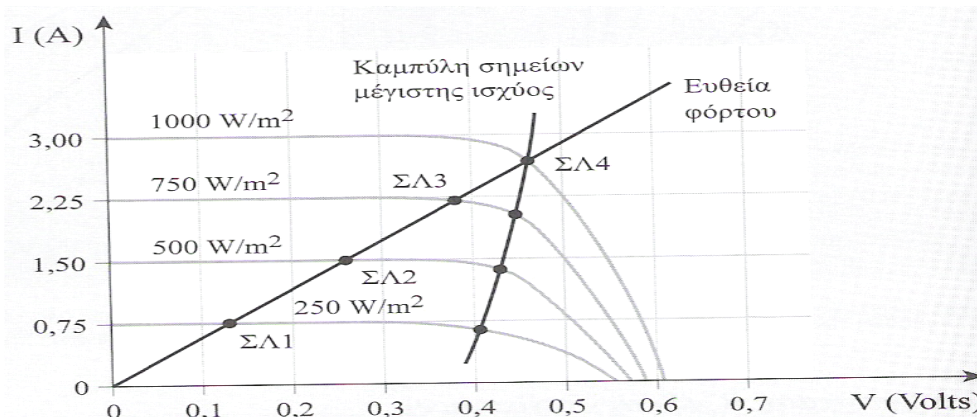
2.3.2 Η καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου

Για τον έλεγχο της αποδοτικής λειτουργίας ενός Φ/Β στοιχείου αλλά και για τον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών που συνδυάζονται μ' αυτό πρέπει να προσδιορισθούν τα σημεία μέγιστης ισχύος, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Γενικότερη επιδίωξη είναι το σημείο λειτουργίας του στοιχείου σε κάθε διαφορετική κατάσταση, που θα προκύψει π.χ. από μεταβολή της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας, να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος, P_m , για τη δεδομένη κατάσταση (Σχήμα 2.6, για την καμπύλη I-V, με $E = 1 \text{ kW/m}^2$).

Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται στην αντίσταση μόνο για ορισμένο επίπεδο ακτινοβολίας. Σε διαφορετικές τιμές αποδίδεται ισχύς μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη ισχύ. Στο σχήμα 2.6 τα σημεία ΣΛ1, ΣΛ2, ΣΛ3 και ΣΛ4 αποτελούν τα τέσσερα σημεία λειτουργίας αντίστοιχα των τεσσάρων τιμών έντασης της ακτινοβολίας. Μόνο το ΣΛ4 συμπίπτει με το ΣΜΙ της I-V, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $E = 1 \text{ kW/m}^2$ όπως προαναφέρθηκε.

Στις υπόλοιπες καμπύλες I-V τα δύο σημεία δεν συμπίπτουν. Για να συμβεί κάτι τέτοιο πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση, έτσι ώστε η νέα ευθεία φόρτου να περνά από το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της νέας καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος-τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος συμβολίζονται με I_m και V_m . Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το Φ/Β στοιχείο, υπό δεδομένη προσπίπτουσα

$$P_m = I_m \cdot V_m$$



Σχήμα 2.6: Η καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου

2.3.3 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου

Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά παρασκευασμένο Φ/Β στοιχείο, καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν, είναι

- το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}

Ονομάζεται το ρεύμα όταν ισχύει $V=0$ και αν θεωρήσουμε την αντίσταση R_s πολύ μικρή.

- η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc}

Ονομάζεται η τάση για $I=0$ και αν θεωρήσουμε την R_{sh} πολύ μεγάλη.

- Το σημείο μέγιστης ισχύος *MPP*

Υπάρχει μια τιμή της αντίστασης φορτίου, η οποία μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το σημείο στο οποίο η παραγόμενη ισχύς γίνεται μέγιστη, είναι γνωστό ως το γόνατο της I-V χαρακτηριστικής καμπύλης, *MPP* (Maximum Power Point). Οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος και της τάσης είναι οι ποσότητες I_m και V_m .

Η μέγιστη ισχύς είναι δηλαδή: $P_m = I_m \cdot V_m$

- Ο παράγων πλήρωσης FF

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_{MPP} (ή πιο απλά P_m) προς το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} επί την τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor) και είναι ένα μέτρο του πόσο «τετράγωνη» είναι η I-V καμπύλη. Είναι δηλαδή

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

Τυπικές τιμές βρίσκονται μεταξύ 0,6 (60%) και 0,85 (85%) και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας (καθώς η τάση ανοικτοκύκλωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία) και της ηλιακής ακτινοβολίας (καθώς το ρεύμα βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται γραμμικά μ' αυτή).

- η ενεργειακή απόδοση n

Όπως είδαμε μέχρι τώρα, οι βασικότερες παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία και συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών είναι ο συντελεστής πλήρωσης (FF), η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}). Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν και την απόδοση (n %) των φωτοβολταϊκών στοιχείων η οποία δίνεται από το λόγο της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος προς την προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ επί όλης της επιφάνειας. Είναι δηλαδή:

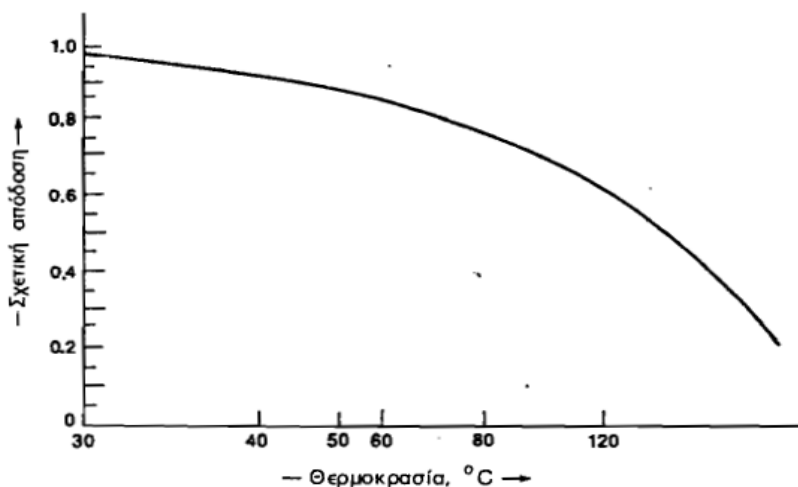
$$n_c = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}}$$

Όπου $P_{in} = E \cdot S$, (ισχύς ΗΜ ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός Φ/Β στοιχείου εμβαδού S με πυκνότητα ισχύος ίση με E).

Διαπιστώνουμε πως για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των FF , I_{sc} και V_{oc} να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

Η απόδοση του Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από τον χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό και

μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου που συνεπάγεται μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του συντελεστή πλήρωσης οπότε παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου [12].



Σχήμα 2.7: Σχετική απόδοση του φ/β στοιχείου συναρτήσει της θερμοκρασίας

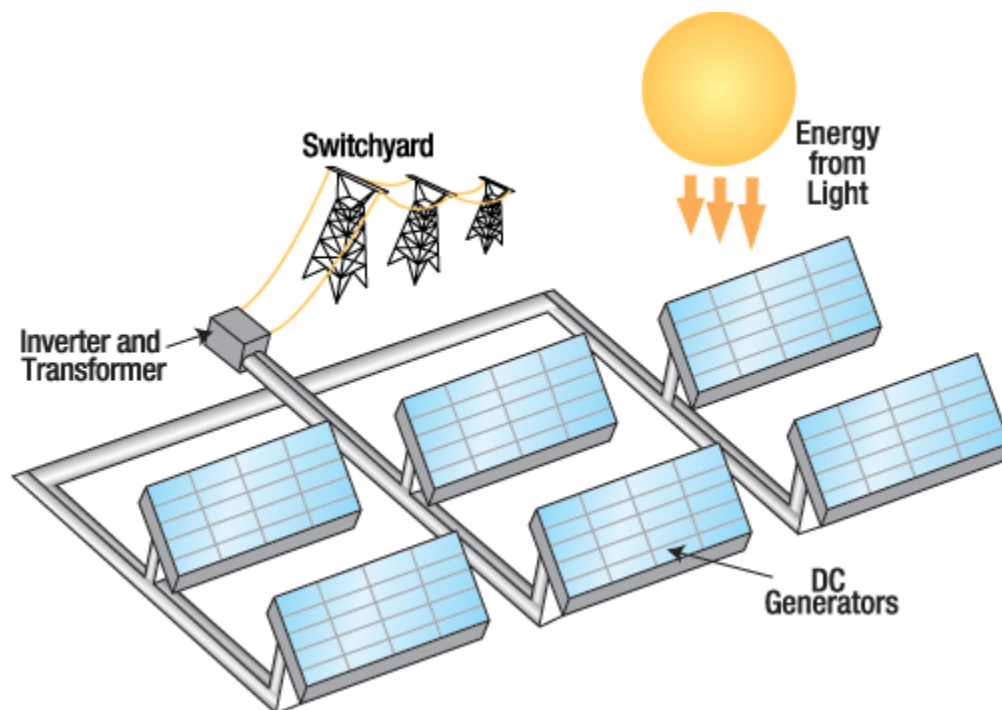
Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται με έναν θερμοκρασιακό διορθωτικό συντελεστή. Για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου στην συμβατική θερμοκρασία ο συντελεστής αυτός είναι ίσος με την μονάδα και μειώνεται κατά 0.005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας.

2.4 Αντιστροφείς

2.4.1 Εισαγωγή

Ως γνωστόν η ισχύς που παράγεται από τα Φωτοβολταϊκά πλαίσια (ΦΒ) είναι σε DC μορφή. Προκειμένου η ισχύς αυτή να χρησιμοποιηθεί για να καλυψει τις

ανάγκες μας μέσω της υπάρχουσας δομής του δικτύου ΗΕ θα πρέπει να μετατραπεί σε AC. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω κατάλληλων διατάξεων που ονομάζονται αντιστροφείς.



Σχήμα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση ΦΒ πάρκου με αντιστροφείς για επικοινωνία με το ανάντη AC δίκτυο

Ο αντιστροφέας (inverter) είναι η καρδιά του Φ/Β συστήματος και σε αυτόν αναφέρονται οι κώδικες και τα πρότυπα για τις προδιαγραφές κατασκευής, απόδοσης, ασφάλειας και σύνδεσης με το δίκτυο. Ένας ηλιακός αντιστροφέας, ή φωτοβολταϊκός αντιστροφέας, μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) εξόδου ενός φωτοβολταϊκού (PV) πλαισίου σε μια συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) που μπορεί να τροφοδοτήσει το δίκτυο ή ένα απομονωμένο φορτίο. Η μετατροπή αυτή γίνεται με τη χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Οι ηλιακοί αντιστροφείς έχουν ειδικές λειτουργίες προσαρμοσμένες για χρήση με φωτοβολταϊκές συστοιχίες, συμπεριλαμβανομένων της παρακολούθησης των τιμών μέγιστης ισχύος και της προστασίας αντι- νησιδοποίησης.

2.4.2 Κατηγορίες ΦΒ αντιστροφών

Οι Φ/Β αντιστροφείς μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Αντιστροφείς αυτόνομων συστημάτων, που χρησιμοποιούνται σε απομονωμένα συστήματα, όπου ο αντιστροφέας αντλεί ενέργεια από μπαταρίες οι οποίες φορτίζονται από φωτοβολταϊκά. Πολλοί μετατροπείς αυτόνομων συστημάτων ενσωματώνουν επίσης φορτιστές μπαταριών για να τροφοδοτήσουν την μπαταρία από μία AC πηγή, όταν είναι διαθέσιμη. Κανονικά, δεν διασυνδέονται με το δίκτυο, και ως εκ τούτου, δεν απαιτείται να έχουν προστασία αντι-νησιδοποίησης.
- Αντιστροφείς για σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο, οι οποίοι ταιριάζουν τη συχνότητα εξόδου τους με αυτή του δικτύου. Οι μετατροπείς αυτοί έχουν σχεδιαστεί ώστε να κλείσουν αυτόματα με την απώλεια της παροχής δικτύου, για λόγους ασφαλείας. Δεν παρέχει εφεδρική ισχύ σε περίπτωση διακοπής.
- Αντιστροφείς για μπαταρίες backup, οι οποίοι είναι ειδικοί μετατροπείς, σχεδιασμένοι για να μεταφέρουν την ενέργεια από μια μπαταρία, να διαχειρίζονται τη φόρτιση της μπαταρίας μέσω ενός ενσωματωμένου φορτιστή, και να εγχέουν την πλεονάζουσα ενέργεια στο δίκτυο. Αυτοί οι μετατροπείς είναι σε θέση να προμηθεύουν ενέργεια AC σε επιλεγμένα φορτία κατά τη διάρκεια μιας διακοπής της παροχής από το δίκτυο, και απαιτείται να έχουν προστασία αντι-νησιδοποίησης.

Οι κύριες κατηγορίες αντιστροφών σε σχέση με την πηγή που θεωρείται στην είσοδο τους είναι οι εξής:

- Αντιστροφείς πηγής τάσεως (στην DC πλευρά του αντιστροφέα υπάρχει πηγή DC τάσης)
- Αντιστροφείς πηγής ρεύματος (στην DC πλευρά του αντιστροφέα υπάρχει πηγή DC ρεύματος)

Οι αντιστροφείς VSI (Αντιστροφείς πηγής τάσεως) είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος αντιστροφέα και βρίσκει εφαρμογή στις περισσότερες βιομηχανικές διατάξεις. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε μηχανές πολύ υψηλής ισχύος.

Σχετικά με την τοπολογία των αντιστροφέων πηγής τάσεως, υπάρχουν διάφοροι τύποι ανάλογα με τον αριθμό και τη συνδεσμολογία των διακοπτικών στοιχείων που περιλαμβάνει η διάταξη του αντιστροφέα, μονοφασικοί αντιστροφείς ημιγέφυρας, μονοφασικοί αντιστροφείς γέφυρας και τριφασικοί αντιστροφείς.

2.4.3 Χαρακτηριστικά και τρόπος λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί, και συνδέουν τμήματα του Φ/Β συστήματος στο δίκτυο. Διαθέτουν προστασία (κλάση στεγανότητας) IP65 για εξωτερική τοποθέτηση (υπαίθρια εγκατάσταση). Σε περίπτωση που η προστασία των inverters είναι υποδεέστερη της IP65, τότε θα πρέπει να τοποθετηθούν μέσα σε κλιματιζόμενο οικίσκο/ερμάριο.

Θα πρέπει να διαθέτουν όλες τις απαραίτητες από τη ΔΕΗ ασφάλειες για την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και είναι πλήρως συμβατοί με τους σχετικούς κανονισμούς. Έχουν ενσωματωμένες όλες τις διατάξεις ηλεκτρονόμων ορίου τάσης, ορίου συχνότητας, ασυμμετρίας τάσης και υπερέντασης ενώ υποχρεωτικά διαθέτουν προστασία έναντι του φαινομένου της νησιδοποίησης κάτι που σημαίνει ότι θα διακόπτουν αυτόματα τη λειτουργία τους σε περίπτωση διακοπής του δικτύου ΔΕΗ.

Επιπλέον οι αντιστροφείς έχουν τις εξής παραμέτρους δικτύου:

- Εύρος τάσεως εναλλασσόμενου ρεύματος: +15% έως -20% επί της ονομαστικής τάσης (230V)

- Περιοχή συχνοτήτων εναλλασσόμενου ρεύματος: $\pm 0,5\%$ Hz της ονομαστικής (50Hz)
- Συντελεστής παραμόρφωσης ρεύματος: $< 4\%$
- DC-Current Injection: $< 0,5\%$ του ονομαστικού ρεύματος

Πολλοί κατασκευαστές αντιστροφών διαθέτουν δωρεάν στην ιστοσελίδα τους λογισμικά για τη διαστασιολόγηση του Φ/Β συστήματος. Ο σχεδιαστής μπορεί έτσι να συνδυάσει με τον βέλτιστο τρόπο τα Φ/Β πλαίσια με τους κατάλληλους αντιστροφείς και να υπολογίσει την αναμενόμενη παραγωγή, ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης της συστοιχίας. Τα λογισμικά αυτά είναι εύχρηστα και απλά, ενώ συνήθως περιλαμβάνουν αρκετές παραμέτρους που επηρεάζουν την Φ/Β παραγωγή.

Οι ηλιακοί αντιστροφείς χρησιμοποιούν την διαδικασία εντοπισμού του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPPT) για να πάρουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τα Φ/Β πάνελ. Τα Φ/Β στοιχεία παρουσιάζουν μια σύνθετη σχέση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της συνολική αντίστασης, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα μία μη γραμμική καμπύλη απόδοσης εξόδου. Ο σκοπός του συστήματος MPPT είναι να δοκιμάζει την έξοδο των στοιχείων και να καθορίσει το ζεύγος τάσης και ρεύματος που επιτυγχάνει τη μέγιστη ισχύ για κάθε δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor), ευρύτερα γνωστός με την συντομογραφία FF, είναι, όπως έχει αναφερθεί, μια παράμετρος η οποία, σε συνδυασμό με την τάση ανοικτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πάνελ, καθορίζει τη μέγιστη ισχύ από ένα Φ/Β στοιχείο. Ο παράγων πλήρωσης ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς το γινόμενο των της τάσης και του ρεύματος στο συγκεκριμένο σημείο.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι αλγορίθμων MPPT: perturb and observe, incremental conductance και constant voltage. Οι δύο πρώτες μέθοδοι που συχνά αναφέρονται ως μέθοδοι αναρρίχησης λόφου, βασίζονται στην καμπύλη της ισχύος συναρτήσε

της τάσης η οποία έχει θετική κλίση αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος και αρνητική στη δεξιά πλευρά αυτού.

Σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος από το δίκτυο, απαιτείται η απενεργοποίηση σε σύντομο χρονικό διάστημα των Φ/Β αντιστροφών. Αυτό αποτρέπει τους μετατροπείς από το να συνεχίσουν να τροφοδοτούν με τάση μικρά τμήματα του δικτύου, που καλούνται νησίδες. Οι τροφοδοτούμενες νησίδες παρουσιάζουν κίνδυνο για τους εργαζόμενους οι οποίοι μπορούν να αναμένουν ότι η περιοχή δεν τροφοδοτείται με ρεύμα, αλλά εξίσου σημαντικό είναι το ζήτημα ότι χωρίς την σταθερή τάση του δικτύου με την οποία συγχρονίζεται ο αντιστροφέας, η ισχύς εξόδου του μπορεί να μετατοπιστεί εκτός των επιτρεπόμενων τιμών.

Η ανίχνευση της παρουσίας ή της έλλειψης του δικτύου φαίνεται να είναι απλή διαδικασία, και στην περίπτωση ενός μεμονωμένου inverter, η απώλεια του δικτύου θα ανιχνευθεί αμέσως. Ωστόσο, εάν υπάρχουν δύο μετατροπείς σε μια δεδομένη νησίδα, τα πράγματα γίνονται πολύ πιο περίπλοκα. Είναι πιθανό ότι η έξοδος του ενός αντιστροφέα μπορεί να ερμηνευθεί ως τροφοδοσία του δικτύου από τον άλλον αντιστροφέα και αντίστροφα, έτσι ώστε οι δύο μονάδες να συνεχίσουν τη λειτουργία. Καθώς παρακολουθούν ο ένας την έξοδος του άλλου, και οι δύο μπορεί να ξεφύγουν από τα καθορισμένα όρια που επιβάλλονται στις συνδέσεις του δικτύου, δηλαδή της τάσης ή της συχνότητας.

Υπάρχει μια ευρεία ποικιλία των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν μια κατάσταση νησιδοποίησης. Κμία από αυτές δεν θεωρείται fool proof, και οι διαχειριστές του δικτύου εξακολουθούν να επιβάλλουν όρια στον αριθμό και τη συνολική ισχύ των συστημάτων ηλιακής ενέργειας που συνδέεται σε κάθε περιοχή. Ωστόσο, πολλές δοκιμές πεδίου έχουν αποτύχει να αποκαλύψουν τυχόν προβλήματα νησιδοποίησης στον πραγματικό κόσμο, και το θέμα παραμένει αμφιλεγόμενο εντός του κλάδου.

Οι τρεις βασικές λειτουργίες που εκτελεί ένας Φ/Β αντιστροφέας είναι οι εξής:

- Μετατροπή του ρεύματος σε εναλλασσόμενο.

- Μετασχηματισμός του ρεύματος σε ημιτονοειδή κυματομορφή με συγκεκριμένη συχνότητα.
- Ενίσχυση της τάσης της Φ/Β πηγής με μετατροπέα DC/DC.

Με βάση τις ανωτέρω λειτουργίες, καθορίζονται τα επιμέρους στοιχεία του αντιστροφέα και ως εκ τούτου προσδιορίζεται η απόδοση και οι απώλειες. Αντί του DC/DC μετατροπέα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής αλλά αυξάνει τις απώλειες. Άλλο στοιχείο που πρέπει να ενσωματωθεί στην έξοδο του αντιστροφέα είναι το φίλτρο που θα αποκόψει τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες που προκύπτουν από τη λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων, ώστε να λάβουμε στην έξοδο όσο το δυνατόν πιο καθαρό ημίτονο. Οι υψηλότερες μέγιστες αποδόσεις επιτυγχάνονται στους αντιστροφείς που δεν περιλαμβάνουν στην διάταξή τους μετασχηματιστή, με μέση μέγιστη απόδοση εμπορικών αντιστροφέων της τάξεως του 96,5%. Τις υψηλότερες ευρωπαϊκές αποδόσεις έχουν πάλι οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή. (~90%).

2.4.4 Εφαρμογές αντιστροφέων

Σήμερα υπάρχουν διάφορες εφαρμογές των διατάξεων αντιστροφέων DC/AC.

Ενδεικτικά αναφέρουμε τα εξής:

- Έλεγχος ταχύτητας ηλεκτρικών μηχανών AC
- Αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε δίκτυα (SVC-Static Var Compansator) ή ως ενεργά φίλτρα σε συστήματα μεταφοράς ισχύος (FACTS-Flexible AC Transmission Systems)
- Έλεγχος τάσης εξόδου σε αιολικά συστήματα
- Έλεγχος θερμοκρασίας με επαγωγή
- Γενικά σε συστήματα ΑΠΕ
- Διατάξεις Αδιάκοπης Παροχής Ισχύος (UPS-Uninterruptible Power Supplies)

2.5 Συσσωρευτές

2.5.1 Η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας

Σε κάθε ηλεκτρικό δίκτυο, είτε ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο ή αυτόνομο (μεγάλης ή μικρής εγκατεστημένης ισχύος, όπως τα νησιά, ανάλογα με το μέγεθος τους), πρέπει να πληρείτε το ισοζύγιο ισχύος, που σημαίνει, η απορροφούμενη ενέργεια από τους καταναλωτές ρεύματος πρέπει να είναι η ίδια, με μικρές παραλλαγές, με εκείνη που παράγεται από σταθμούς παραγωγής ΗΕ (θερμικά, υδροηλεκτρικά, κλπ.) .

Η χρονική μεταβολή του φορτίου είναι σχετικά προβλέψιμη με τρόπο ώστε να είναι προσαρμοσμένη σε αυτήν την παραγωγή ΗΕ. Για τεχνικούς λόγους, σε στιγμές με χαμηλό φορτίο, μεγάλες θερμικές μονάδες δεν μπορούν να μειώσουν την παραγωγή κάτω από ένα κατώφλι και έτσι τότε υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια στο δίκτυο.

Αύξηση της συμμετοχής της ΗΕ που προέρχεται από αιολική ενέργεια προκαλεί νέα τεχνικά προβλήματα στη διαχείριση του δικτύου, προκαλώντας σοβαρές χρονικές διακυμάνσεις στην παραγωγή των αιολικών πάρκων και την αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της παραγωγής από τα αιολικά πάρκα, λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, επίσης, δεν ρυθμίζουν τη ροή και η ενέργεια που παράγεται, καθώς η τελευταία εξαρτάται από την φυσική ροή του ποταμού (μεγάλη κατά τη διάρκεια των πλημμυρών και χαμηλή κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων). Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά έργα είναι μηδενική κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ την ημέρα εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες (ήλιος ή συννεφιά). Κατά συνέπεια, όλες αυτές οι ΑΠΕ έχουν το μειονέκτημα της χρονικής υστέρησης της παραγωγής που δεν μπορεί να είναι στον ανθρώπινο έλεγχο, σε σχέση με τη ζήτηση. Δημιουργείται, ως εκ τούτου, η ανάγκη για αποθήκευσης ΗΕ για μικρά και μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η ανάγκη για αποθήκευση προϋπήρχε, επειδή οι θερμικές μονάδες δεν είναι ευπροσάρμοστες και, μερικές φορές (τη νύχτα) η ισχύς που παράγεται

είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση. Ωστόσο, η ανάγκη για αποθήκευση θα αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον, λόγω της αυξημένης συμμετοχής των ΑΠΕ.

Η ανάγκη για την αποθήκευση ενέργειας υπήρχε κατά παράδοση, καθώς υπάρχουν τα τεχνικά ελάχιστα των μεγάλων θερμοηλεκτρικών σταθμών και η ανάγκη για την κάλυψη των λεγόμενων "αιχμών" φορτίου, δηλαδή των μικρών χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας, που το φορτίο αυξάνεται απότομα. Πλέον η ανάγκη για αποθήκευση προέρχεται και από την αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ, ιδίως των αιολικών πάρκων στο σύστημα παραγωγής .

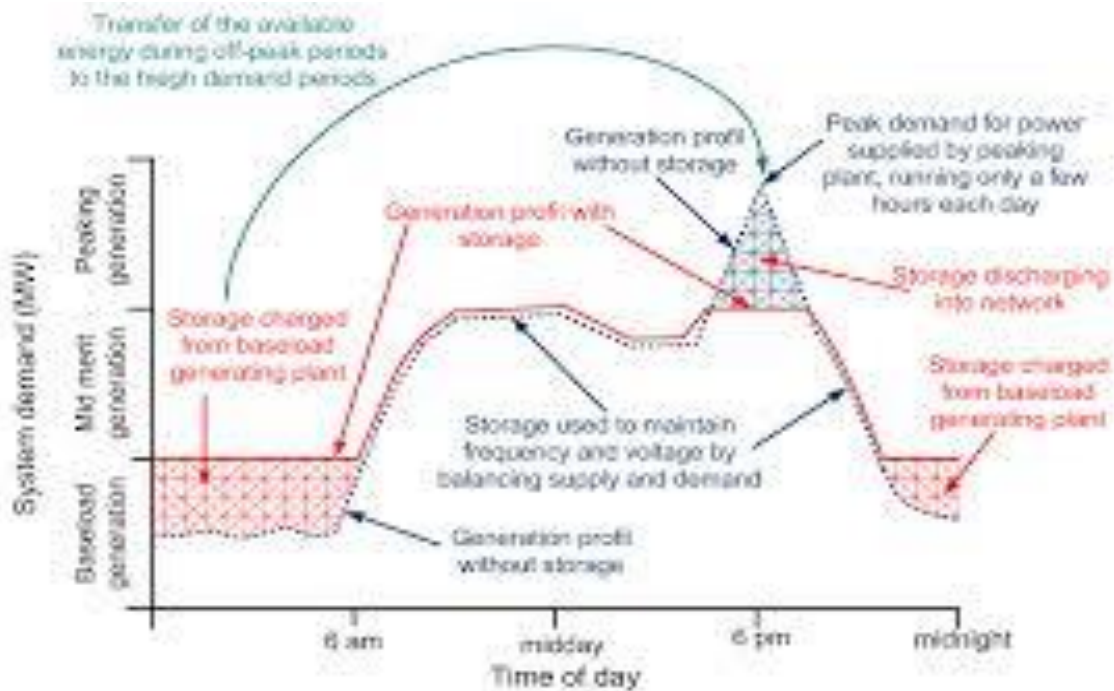
Ο διαχειριστής του δικτύου ΗΕ αντιμετωπίζει δύο ακραία προβλήματα:

- βέλτιστη ενσωμάτωση στο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ στις περιόδους χαμηλού φορτίου, κυρίως από αιολικά πάρκα (προβλήματα σταθερότητας σε υψηλή διείσδυση) και
- διαθεσιμότητα ισχύος και της ενέργειας σε σύντομο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια των περιόδων υψηλού φορτίου, και ιδίως σε φορτία αιχμής.

Η ανάγκη για την αποθήκευση μέρους της ενέργειας που προέρχεται από την παραγωγή των ανεμογεννητριών γίνεται όλο και πιο επιτακτική, καθώς η αναλογία αιολικής ενέργειας αρχίζει να πλησιάζει κάποια όρια πέρα από τα οποία προκαλεί προβλήματα στο δίκτυο ΗΕ. Ορισμένες περιοχές έχουν ήδη φτάσει στο όριο, έτσι ώστε η περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας μπορεί να γίνει μόνο αν συνδυαστεί με την αποθήκευση. Προφανώς, το πρόβλημα της διαχείρισης ενέργειας από ΑΠΕ είναι πολύ πιο έντονο και λιγότερο άκαμπτο σε μικρά συστήματα (νησιά), ακόμη και στο μέγεθος της Κρήτης.

Εν κατακλείδι, όταν μία από τις μονάδες που συμμετέχουν στην παραγωγή ενέργειας παράγει ΗΕ με υψηλή μεταβλητότητα, όπως στην περίπτωση μιας ανεμογεννήτριας, υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τη διαθεσιμότητα της ενέργειας ανά πάσα στιγμή ώστε να ανταποκριθεί στη ζήτηση και ένας τρόπος για να μειωθεί η αβεβαιότητα και να εξασφαλιστεί η παροχή ΗΕ στους καταναλωτές είναι μέσω της εγκατάστασης ενός ηλεκτρικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, που

επιτρέπει την προσαρμογή με τον παράτυπο χαρακτήρα της προμήθειας ΗΕ από τις ανεμογεννήτριες. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ΗΕ αυτή τη στιγμή είναι η χρήση των συστημάτων άντλησης.



Σχήμα 2.9: Παραγόμενη ισχύς από συμβατικές μονάδες με και χωρίς αποθήκευση ενέργειας

Το σχήμα 2.9 δείχνει πώς οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας εξομαλύνουν την ισχύ των συμβατικών μονάδων, μια τυπική μέρα του χρόνου. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην ισχύ του φορτίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, η οποία συμπίπτει με την απελευθέρωση ενέργειας στο κύτταρο των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής απουσία συσσώρευσης ενέργειας. Σε αντίθεση, η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην παραγωγή των συμβατικών μονάδων, όταν η λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει διατάξεις για την αποθήκευση ΗΕ. Παρατηρούμε ότι, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους αποθήκευσης, το εύρος λειτουργίας των συμβατικών μονάδων, είναι αυστηρά περιορισμένο, με αποτέλεσμα την οικονομική λειτουργία του συστήματος παραγωγής. Έτσι, εάν το φορτίο του συστήματος μειώνεται σημαντικά, κάτι που συμβαίνει συνήθως τη νύχτα, όπου οι συμβατικές

εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας παράγουν ενέργεια που υπερβαίνει το φορτίο, η περίσσεια αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Ως εκ τούτου, το επίπεδο απόδοσης διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Σε βραδινές ώρες στις οποίες το φορτίο παρουσιάζει αιχμές, αντί να ενεργοποιούνται οι εγκαταστάσεις παραγωγής που συνεπάγεται σημαντικές πρόσθετες δαπάνες ισχύος, το φορτίο τροφοδοτείται από τη διάταξη αποθήκευσης όπου προηγουμένως είχε αποθηκεύσει την περίσσεια ΗΕ.

Όσον αφορά τα οφέλη της αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσαμε να σημειώσουμε τα ακόλουθα:

- Μείωση του λειτουργικού κόστους και του αρχικού κεφαλαίου για την εγκατάσταση συμβατικών μονάδων
- Αύξηση της παραγωγής από ΑΠΕ
- Βελτιστοποίηση της χρήσης του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς και διανομής και ελαχιστοποίηση του κόστους για την ενίσχυση της
- Λειτουργία σε stand- alone εφαρμογές
- Παραγωγή ΗΕ μέσω οικολογικών μέσων
- Βελτίωση της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του συστήματος , παρέχοντας εφεδρική δύναμη .

Σε συνδυασμό με τις ΑΠΕ, η αποθήκευση της ΗΕ μπορεί να αυξήσει την τιμή της ΗΕ που παράγεται από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες, καθιστώντας δυνατή την κάλυψη της αιχμής της ζήτησης ΗΕ. Την ίδια στιγμή, η εξοικονόμηση ΗΕ μπορεί να διευκολύνει την ένταξη σε ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών ΑΠΕ (μη ρυθμιζόμενες), όπως η αιολική και η ηλιακή, στο δίκτυο. Οι διατάξεις των ΑΠΕ με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, παρέχουν ευελιξία με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων .

Η αποθήκευση ενέργειας παρέχει επίσης ευελιξία του δικτύου ΗΕ , όσον αφορά την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων. Ως πηγή της παραγωγής, η αποθήκευση της ΗΕ μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους και επενδύσεων κεφαλαίου. Παραδείγματα αποτελούν η στρεφόμενη εφεδρεία για την προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, η ρύθμιση συχνότητας για stand -alone μονάδες, αναβάλλοντας την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ΗΕ. Ωστόσο, η στρατηγική που βασίζεται σε συστήματα αποθήκευσης που είναι εγκατεστημένα μπορεί να κάνει καλύτερη χρήση του εξοπλισμού μεταφοράς και της υφιστάμενης κατανομής.

Επιπλέον, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές που είναι κοντά στο ανώτατο όριο, μειώνοντας το φορτίο αιχμής του υποσταθμού.

2.5.2 Ανάλυση της δομής των συσσωρευτών

Ένας συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα με την επιθυμητή χωρητικότητα ή την επιθυμητή τάση εξόδου(σύνδεση σε σειρά αυξάνει τη χωρητικότητα , ενώ παράλληλα σύνδεση αυξάνει την τάση). Ένα στοιχείο αποτελείται από τρία βασικά συστατικά:

- την άνοδο ή το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και είναι αυτό που οξειδώνεται (αποβάλλει ηλεκτρόνια) κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
- την κάθοδο ή θετικό ηλεκτρόδιο, το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται (προσλαμβάνει ηλεκτρόνια) κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
- τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος παρέχει το μέσο για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του στοιχείου μεταξύ ανόδου και καθόδου. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως ένα υγρό, όπως νερό ή κάποιος άλλος διαλύτης, με διαλυμένα άλατα,

οξέα ή αλκάλια, που μεταδίδει την ιοντική αγωγιμότητα. Μερικοί συσσωρευτές χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου.

Τα ηλεκτρόδια δεν έρχονται ποτέ σε επαφή μεταξύ τους, αλλά είναι ηλεκτρικώς συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω του ηλεκτρολύτη. Οι πιο επωφελής συνδυασμοί των υλικών της ανόδου και της καθόδου είναι εκείνοι που θα δώσουν υψηλή τάση στο στοιχείο και θα είναι οι ελαφρύτεροι. Ωστόσο τέτοιοι συνδυασμοί μπορεί να μην είναι πάντα πρακτικοί εξαιτίας διαφόρων παραγόντων, όπως η αντίδραση του υλικού με άλλα υλικά του στοιχείου, η πόλωση, η δυσκολία στο χειρισμό και το υψηλό κόστος. Η άνοδος επιλέγεται έχοντας υπόψη τις ακόλουθες ιδιότητες:

- αποτελεσματικότητα ως αναγωγικό μέσο (δηλαδή να προκαλεί αναγωγή, ενώ η ίδια οξειδώνεται)
- υψηλή απόδοση αμπερωρίων (πρακτική μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου, εκφράζει την ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μεταφέρεται από έναν αγωγό όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης ενός αμπέρ σε χρόνο μίας ώρας)
- καλή αγωγιμότητα
- σταθερότητα
- ευκολία κατασκευής και χαμηλό κόστος.

Κατάλληλα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί έως τώρα ως αρνητικά ηλεκτρόδια είναι το υδρογόνο, ο ψευδάργυρος και το λίθιο.

Η κάθοδος πρέπει

- να είναι ένας αποτελεσματικός οξειδωτικός παράγοντας (δηλαδή να προκαλεί οξείδωση, ενώ η ίδια ανάγεται)
- να είναι σταθερή όταν έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη
- να έχει ικανοποιητική τάση λειτουργίας.

Τα πιο συνηθισμένα υλικά για την κάθοδο είναι μεταλλικά οξειδία, ενώ για ειδικά συστήματα συσσωρευτών χρησιμοποιούνται αλογόνο, θείο και τα οξειδιά του και άλλα χημικά συστατικά που περιέχουν οξυγόνο και υδρογόνο ενωμένα με κάποιο άλλο χημικό στοιχείο.

Τέλος, ο ηλεκτρολύτης θα πρέπει:

- να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα, αλλά να μην είναι ηλεκτρικά αγωγίμος, καθώς τότε θα δημιουργούνταν εσωτερικά βραχυκυκλώματα.
- να μην αντιδρά με τα ηλεκτρόδια
- να μην επηρεάζεται από τη θερμοκρασία
- να είναι ασφαλής και χαμηλού κόστους.

Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδατικά διαλύματα, αλλά υπάρχουν σημαντικές εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα οι «θερμικές μπαταρίες» ή οι συσσωρευτές με λίθιο στην άνοδο, όπου ο ηλεκτρολύτης είναι τήγμα άλατος ή άλλοι μη υδατικοί ηλεκτρολύτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αποφυγή αντίδρασης με την άνοδο. Χωρικά, τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου είναι ηλεκτρικά απομονωμένα στα στοιχεία της μπαταρίας για να αποφεύγονται τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Σε πρακτικούς σχεδιασμούς των στοιχείων, υπάρχει μηχανισμός που διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια, με το διαχωριστή να είναι διαπερατός από τον ηλεκτρολύτη για να διατηρείται η ιοντική αγωγιμότητα. Επίσης, ηλεκτρικοί αγωγοί με δομή πλέγματος μπορούν να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για να μειώσουν την εσωτερική αντίσταση. Κάθε στοιχείο μπορεί να κατασκευασθεί σε διάφορες διατάξεις και σχήματα (κυλινδρικό, επίπεδο, πρισματικό) και για αυτό τα ηλεκτρόδια και ο ηλεκτρολύτης κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να χωρούν στο επιθυμητό σχήμα του στοιχείου του συσσωρευτή. Τα στοιχεία στη συνέχεια σφραγίζονται με διάφορους τρόπους για την αποφυγή διαρροής ή ξήρανσης των υλικών τους. Μερικά είναι εξοπλισμένα με συσκευές εξαερισμού ή άλλα μέσα που επιτρέπουν στα συγκεντρωμένα αέρια να διαφύγουν. Η κατασκευή

των ηλεκτροχημικών στοιχείων ολοκληρώνεται με κατάλληλα κιβώτια ή δοχεία, με μέσα σύνδεσης του ακροδέκτη και με τη σήμανσή τους[22].

2.5.3 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών

Ο συσσωρευτής ή μπαταρία είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια που περιέχεται στο ενεργό υλικό του, απευθείας σε ηλεκτρική, μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η διεργασία αυτή μπορεί να συνεχίζεται έως ότου διακοπεί το κύκλωμα ή κάποιο από τα αντιδρώντα στοιχεία εκλείψει. Καθώς η αντίδραση οξειδοαναγωγής στους συσσωρευτές γίνεται ηλεκτροχημικά, δεν υπόκειται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot που διέπονται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, με αποτέλεσμα οι μπαταρίες να έχουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση μετατροπής. Στις περιπτώσεις των επαναφορτιζόμενων συστημάτων, οι συσσωρευτές φορτίζονται ξανά, ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία.

2.5.4 Διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης

Κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης ενός επαναφορτιζόμενου στοιχείου, η ροή του ρεύματος (ροή των ηλεκτρονίων) αντιστρέφεται, η οξειδωση λαμβάνει χώρα στο θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) και αυτό που ανάγεται τώρα είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος). Καθώς εξ' ορισμού, η άνοδος είναι το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται η οξειδωση και η κάθοδος το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται η αναγωγή, το θετικό ηλεκτρόδιο είναι τώρα η άνοδος και το αρνητικό η κάθοδος.

Όσον αφορά την εκφόρτιση, όταν το ηλεκτροχημικό στοιχείο είναι συνδεδεμένο με ένα εξωτερικό φορτίο, ηλεκτρόνια ρέουν μέσω του εξωτερικού φορτίου από την άνοδο, η οποία προς την κάθοδο οξειδώνεται όπου δέχεται τα ηλεκτρόνια. Το ηλεκτρικό κύκλωμα ολοκληρώνεται με τον ηλεκτρολύτη και τη ροή ανιόντων

(αρνητικών ιόντων) και κατιόντων (θετικών ιόντων) προς την άνοδο και την κάθοδο, αντίστοιχα.

2.5.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών

Κάθε συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από διάφορα βασικά μεγέθη που αποτελούν τα χαρακτηριστικά του και συμβάλλουν μεταξύ άλλων στη δυνατότητα της σύγκρισης των διαφόρων τύπων συσσωρευτών και στην διαδικασία της επιλογής του κατάλληλου συσσωρευτή για κάθε εφαρμογή. Τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των συσσωρευτών και η σημασία τους αναφέρονται στη συνέχεια.

➤ Τάση

Η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου ονομάζεται τάση του ηλεκτροχημικού στοιχείου ή του συσσωρευτή. Η μονάδα μέτρησης της τάσης είναι τα Volts (V). Η τιμή της τάσης εξαρτάται από τη χημική σύνθεση των ηλεκτροδίων, τη συγκέντρωση των υλικών των ηλεκτροδίων και τη θερμοκρασία.

➤ Χωρητικότητα

Οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από την χωρητικότητά τους, δηλαδή την ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μπορούν να αποθηκεύσουν. Ως χωρητικότητα μιας μπαταρίας θεωρείται η ποσότητα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων που παράγονται από το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου και καταναλώνονται από το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου. Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Coulomb (C), επειδή όμως το 1 Coulomb είναι μικρή μονάδα, χρησιμοποιούνται τα Αμπερώρια (1 Ah=3600C). Για παράδειγμα, αν η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή είναι 10Ah, αυτό σημαίνει ότι ο συσσωρευτής μπορεί να παρέχει ρεύμα έντασης 1A για 10 ώρες ή 2A για 5 ώρες κ.ο.κ.. Η χωρητικότητα εξαρτάται από την ποσότητα των ενεργών υλικών του συσσωρευτή.

Ένα πολύ μικρό ηλεκτροχημικό στοιχείο έχει μικρότερη χωρητικότητα από ένα μεγαλύτερο στοιχείο ίδιας χημικής σύστασης. Επίσης, η χωρητικότητα επηρεάζεται από τις συνθήκες εκφόρτισης όπως είναι ο ρυθμός εκφόρτισης (μεγάλος ρυθμός εκφόρτισης συνεπάγεται μικρή χωρητικότητα συσσωρευτή), το ρεύμα εκφόρτισης, η τάση και η θερμοκρασία [18].

➤ *Ειδική ενέργεια / ενεργειακή πυκνότητα*

Ως ειδική ενέργεια ενός συσσωρευτή ορίζεται η ενεργειακή χωρητικότητα ανά μονάδα βάρους του συσσωρευτή (Wh/kg). Η θεωρητική ειδική ενέργεια είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα βάρους του ενεργού υλικού του συσσωρευτή. Οι πρακτικές τιμές της ειδικής ενέργειας είναι αρκετά χαμηλότερες από τις θεωρητικές. Για παράδειγμα, στο συσσωρευτή μολύβδου-οξέος που χρησιμοποιείται σε κάποιο όχημα αποδεικνύεται ότι μόνο το 26% του συνολικού του βάρους συμμετέχει στην παραγωγή ΗΕ. Ως ενεργειακή πυκνότητα ορίζεται η ενέργεια που παρέχεται ανά μονάδα όγκου του συσσωρευτή (Wh/L ή Wh/cm³) [19].

➤ *Ειδική ισχύς*

Η ειδική ισχύς ενός συσσωρευτή ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς ανά μονάδα βάρους που μπορεί να παραχθεί σε ένα μικρό χρονικό διάστημα. Είναι χαρακτηριστικό της χημικής σύστασης του συσσωρευτή και εξαρτάται κυρίως από την εσωτερική του αντίσταση. Έχει μονάδα μέτρησης το W/kg και καθορίζει το βάρος του συσσωρευτή που απαιτείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση [19].

➤ *Εσωτερική αντίσταση*

Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας συνήθως διαφέρει στη φόρτιση και την εκφόρτιση (χαμηλότερη στην εκφόρτιση και υψηλότερη στη φόρτιση). Εξαρτάται από τη χημική σύσταση της μπαταρίας και επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, το μέγεθος της μπαταρίας, την ηλικία της και το ρεύμα εκφόρτισης. Είναι απαραίτητο

η εσωτερική αντίσταση κάθε συσσωρευτή να είναι σημαντικά μικρότερη της αντίστασης του φορτίου. Διαφορετικά, καθώς αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή, η απόδοση του συσσωρευτή μειώνεται ενώ και η θερμική του ευστάθεια ελαττώνεται, διότι η ενέργεια που παρέχει η μπαταρία μετατρέπεται σε θερμότητα [19].

➤ *Βαθμός απόδοσης*

Οι απώλειες ενέργειας και ισχύος κατά την εκφόρτιση ή τη φόρτιση εμφανίζονται με τη μορφή απώλειας τάσης. Έτσι, η απόδοση του συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση ή τη φόρτιση μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της τάσης λειτουργίας του συσσωρευτή προς τη θερμοδυναμική του τάση. Η θερμοδυναμική τάση ορίζεται ως η τάση ανοιχτού κυκλώματος του συσσωρευτή σε θερμοκρασία 25°C και πίεση 1atm.

Κεφάλαιο 3: ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ-ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.1 Μικροδίκτυα

3.1.1 Εισαγωγή

Ένα μικροδίκτυο (Microgrid) προσδιορίζεται ως ένα εν δυνάμει ηλεκτρικά απομονωμένο σύνολο γεννητριών που τροφοδοτούν κατ' αποκλειστικότητα όλη τη ζήτηση ενός συνόλου καταναλωτών. Συμπεριλαμβάνει πηγές καταναλωμένης παραγωγής ισχύος από λίγα kW μέχρι 1- 2MW, συσκευές αποθήκευσης –όπως πυκνωτές, μπαταρίες, σφονδύλους- και ελέγξιμα φορτία. Τα μικροδίκτυα αποτελούν ένα είδος συστήματος ΗΕ που στο μέλλον αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο.

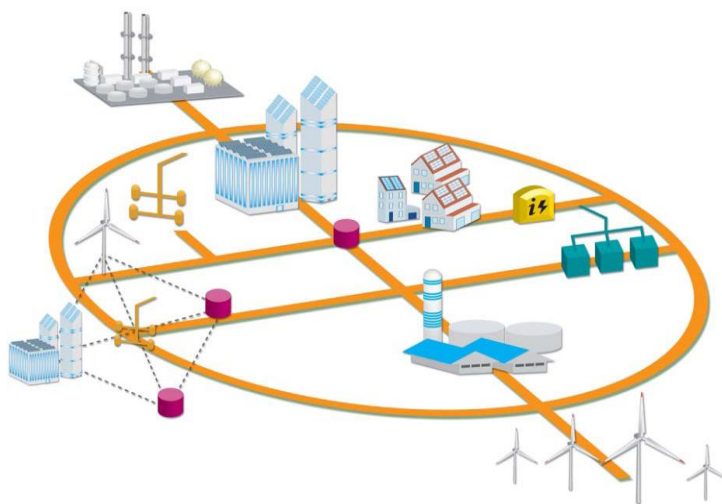
Ο σχεδιασμός του μικροδικτύου είναι ανεξάρτητος από το κεντρικό δίκτυο, ωστόσο μπορεί να υπάρχει διασύνδεση με αυτό, για ανταλλαγή ενέργειας. Τυπικές πηγές ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες ντίζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ΗΕ και ζεστού νερού (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες καυσίμου, οι γεωθερμικοί και οι ηλιοθερμικοί σταθμοί, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι μονάδες που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη βιομάζα, βιοντίζελ ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μια από τις παραπάνω φυσικές πηγές ενέργειας και να καλύπτει τις καταναλώσεις της περιοχής που εγκαθίσταται. Η κλίμακα του μικροδικτύου ποικίλει, από μια οικία που χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και γεννήτριας ντίζελ ή βιοκαυσίμων, ένα νοσοκομείο που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ΗΕ και ζεστού νερού, μέχρι και μια πόλη που τροφοδοτείται από σταθμούς βιομάζας, γεννήτριες ντίζελ και αιολικά πάρκα. Μια συνδυασμένη μάλιστα χρήση των νέων τεχνολογιών συμπαραγωγής και ΑΠΕ, θα μπορούσε ίσως να κάνει την τιμή της ΗΕ στο μικροδίκτυο ανταγωνιστική αυτής των κεντρικών δικτύων.

Δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων ενός μικροδικτύου, η παραγωγή και διανομή της ΗΕ γίνεται στη χαμηλή τάση, όπου ούτως ή άλλως δεν απαιτείται η μεταφορά της ΗΕ σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος δηλαδή των μονάδων παραγωγής είναι ουσιαστικά αυτό που σε τελική ανάλυση καθορίζει την στάθμη λειτουργίας. Το μέγεθος συνολικότερα των μονάδων παραγωγής και των φορτίων, καθορίζει εξάλλου και τον τρόπο διασύνδεσής του με άλλα μικροδίκτυα ή με το κεντρικό δίκτυο, στην μέση ή στην χαμηλή τάση. Είναι προφανές ότι η διασύνδεση στη μέση τάση απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ.

Βασικό γνώρισμα των μικροδικτύων είναι ο συντονισμένος έλεγχος τους, ώστε τελικά να εμφανίζονται στο ανάντη δίκτυο ως μία ενιαία οντότητα με το δικό της αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου το οποίο δεν επιβαρύνει τα συστήματα ελέγχου του ανάντη ευρισκόμενου δικτύου με τον έλεγχο κάθε μιας μονάδας ξεχωριστά. Ένα άλλο εξίσου βασικό, όσο και πρωτοποριακό, γνώρισμα των μικροδικτύων είναι η δυνατότητα τους να λειτουργούν όχι μόνο διασυνδεδεμένα με το ανάντη δίκτυο μέσης τάσης, που είναι και η συνήθης λειτουργία τους, αλλά και απομονωμένα (ή νησιδοποιημένα) όταν διακοπεί η διασύνδεση με το κύριο δίκτυο, με οργανωμένο και ελεγχόμενο τρόπο παρέχοντας στους καταναλωτές αυξημένη αξιοπιστία και βελτιωμένα επίπεδα ποιότητα ισχύος. Αυτή η δυνατότητα βεβαίως απαιτεί εξελιγμένες υποδομές προστασίας, ελέγχου και τηλεπικοινωνιών, προκειμένου να είναι σε θέση να απομονώσουν το μικροδίκτυο και να παράσχουν σταθερή, αυτόνομη λειτουργία. Η διαρκής όμως πρόοδος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και ελεγκτών των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής συμβάλλει ώστε τέτοια λειτουργία να γίνεται ολοένα και περισσότερο εύκολο να επιτευχθεί τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά.

Από την πλευρά του δικτύου, ένα μικροδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ελεγχόμενη οντότητα μέσα στο σύστημα ενέργειας που μπορεί να λειτουργεί όπως ένα συγκεντρωμένο φορτίο, μια μικρή πηγή ενέργειας ή σαν μια βοηθητική υπηρεσία που υποστηρίζει το δίκτυο. Από την πλευρά του καταναλωτή, τα μικροδίκτυα εκπληρώνουν τις ανάγκες τους σε θερμότητα και ηλεκτρισμό, όμοια με τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης, αλλά επιπροσθέτως ενισχύουν

και την τοπική αξιοπιστία, μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και βελτιώνουν την ποιότητα ενέργειας υποστηρίζοντας την τάση και μειώνοντας τις βυθίσεις της. Επίσης, δυνητικά, «ρίχνουν» τις τιμές του αποθέματος ενέργειας. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του μικροδικτύου είναι ότι, ενώ υπό ομαλές λειτουργεί διασυνδεδεμένο με το δίκτυο, μπορεί αυτόματα να τεθεί σε απομονωμένη λειτουργία σε περιπτώσεις σφαλμάτων του ανάντη δικτύου. Συνεπώς ένα μικροδίκτυο για το ανάντη ευρισκόμενο δίκτυό του αντιμετωπίζεται τόσο από άποψης αγοράς όσο και από τεχνική άποψη σαν ένα ενιαίο φορτίο ή σαν μία ενιαία παραγωγή η οποία με τα κατάλληλα οικονομικά κίνητρα μπορεί να προσφέρει και κάποιες βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο διανομής ιδιαίτερα σε περιόδους αιχμής ακόμη και τοπικού επιπέδου. Οι καταναλωτές που βρίσκονται συνδεδεμένοι στο μικροδίκτυο, όχι μόνο μπορούν όπως και πριν να ικανοποιήσουν τις ηλεκτρικές και θερμικές τους ανάγκες, αλλά μπορούν να απολαύσουν υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας, καλύτερη ποιότητα ισχύος με εξομαλυσμένη καμπύλη τάσης και να επιτύχουν ακόμη και ευνοϊκότερους οικονομικά όρους για την ικανοποίηση των αναγκών τους.



(β)

Σχήμα 3.1: Ένα τυπικό μικροδίκτυο

3.1.2 Πλεονεκτήματα Μικροδικτύων

Τα συνολικά πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει στη λειτουργία του συστήματος ένα μικροδίκτυο συμπεριλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα περιοχών, αναφέρονται στη συνέχεια [6]:

- Τη συνέχιση της παροχής ΗΕ εντός του μικροδικτύου σε περιπτώσεις κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου παροχής ΗΕ. Η δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας μπορεί να εξασφαλίσει στον καταναλωτή που ανήκει στο εκάστοτε μικροδίκτυο την αδιάλειπτη λειτουργία την ίδια ώρα όπου το ανάντη δίκτυο διανομής μπορεί να είναι σε ασταθή κατάσταση ή να έχει καταρρεύσει προσωρινά (black out).
- Την αποδοτικότερη παραγωγή ΗΕ, την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος με την ενσωμάτωση μονάδων συμπαραγωγής ΗΕ και θερμότητας (CHP), καθώς και με την εγκατάσταση αυτών κοντά στους καταναλωτές. Η τοπική κάλυψη του φορτίου συνεπάγεται ότι δεν παρεμβάλλονται ούτε μεγάλα μήκη γραμμών ούτε πολλοί ενδιάμεσοι καταναλωτές που αλλοιώνουν με τη χωρητική (ή επαγωγική αν πρόκειται για φορτία) συμπεριφορά τους τον συντελεστή ισχύος.
- Την πιο αξιόπιστη παροχή ΗΕ στους καταναλωτές εντός αυτού, το οποίο είναι ύψιστης σημασίας ζήτημα ιδιαίτερα για τους καταναλωτές, όπως νοσοκομεία κτλ., για τους οποίους είναι σημαντική η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας.
- Τη μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση χρησιμοποιώντας σε μεγάλο βαθμό – ΑΠΕ και γενικότερα νέες τεχνολογίες, φιλικότερες προς το περιβάλλον. Η ενσωμάτωση τοπικά παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας διαμορφώνει ευνοϊκότερους όρους για το περιβάλλον και την αειφόρο ανάπτυξη.
- Τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της προσαρμοστικότητας του συστήματος, αφού τα μικροδίκτυα ακολουθούν την αρχή της διεσπαρμένης παραγωγής, με αποτέλεσμα η ΗΕ να μην παράγεται αποκλειστικά από λίγες μεγάλες μονάδες.
- Τη μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών, όταν το μικροδίκτυο συμμετέχει σε πλήρως απελευθερωμένη αγορά ενέργειας.

- Την ενεργό διαχείριση των φορτίων (απόρριψη φορτίων), διαδικασία η οποία είναι σε θέση να βοηθά σημαντικά στην ευστάθεια του δικτύου αλλά και στην οικονομική λειτουργία του συστήματος.
- Από την πλευρά του χειριστή του Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης ή της Επιχείρησης Διανομής ΗΕ, η δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου από το Μικροδίκτυο προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Η δυνατότητα αναβολής επενδύσεων προς ενίσχυση του δικτύου και των κεντρικών σταθμών παραγωγής καθώς επίσης και η μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, ιδιαίτερα κατά τον χειρισμό των συμφορήσεων και την επαναφορά του συστήματος μετά από σβέση, είναι μερικά από αυτά.

Κάποιες από τις μεταβλητές που επηρεάζουν τις δυνατότητες ενός μικροδικτύου, από οικονομικής και τεχνικής απόψεως, αποτελούν:

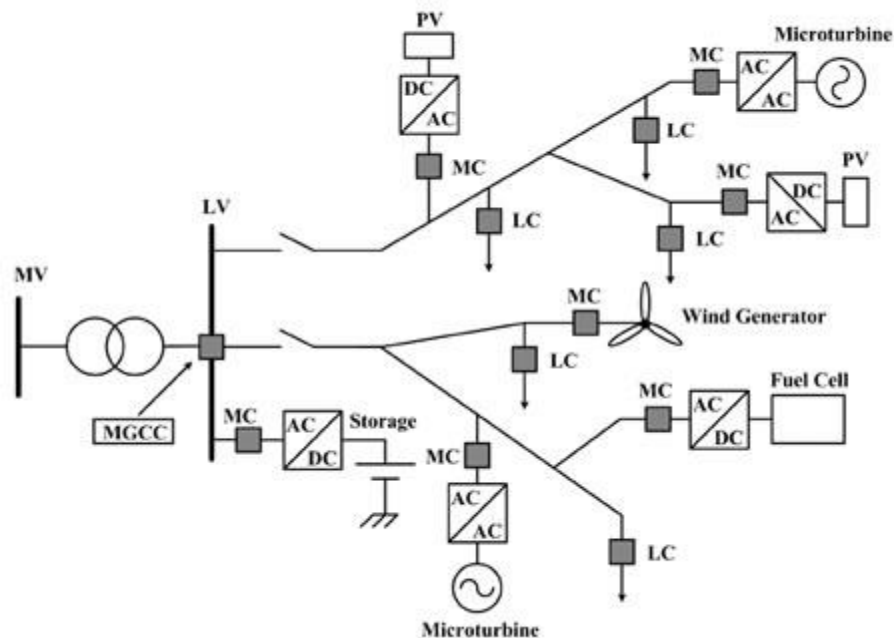
- Ο τύπος του φορτίου (οικιακό, βιομηχανικό, εμπορικό ή συνδυασμός τους).
- Ο αριθμός των καταναλωτών.
- Ο τύπος των πηγών διανεμημένης παραγωγής (φωτοβολταϊκές πηγές, αιολική ενέργεια, κυψέλη καυσίμου/fuelcell κτλ.).
- Το μέγεθος και ο αριθμός των μονάδων παραγωγής.
- Το επίπεδο της αξιοπιστίας του συστήματος. Ένας τρόπος μέτρησης του συγκεκριμένου μεγέθους μπορεί να είναι το ποσοστό ανεπάρκειας τροφοδοσίας των προβλεπόμενων φορτίων.

Το μικροδίκτυο είναι σχεδιασμένο για λειτουργία τόσο σε διασύνδεση με το δίκτυο όσο και σε απομονωμένη κατάσταση, σε έκτακτες περιπτώσεις (interconnected emergency mode). Η δυνατότητα διασύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο ΗΕ σε παραλληλισμένη λειτουργία καθιστά δυνατή την ανταλλαγή ενέργειας. Δηλαδή, την παροχή πλεονάζουσας ενέργειας σ' αυτό ή την απορρόφηση ενέργειας όταν οι μονάδες του μικροδικτύου δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση. Ακόμα, σε περίπτωση μόνιμα διασυνδεδεμένης λειτουργίας

είναι δυνατή η αξιόπιστη τροφοδότηση του μικροδικτύου από τις δικές του μονάδες σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου, βάσει της δυνατότητας λειτουργίας σε απομονωμένη κατάσταση. Σε περιπτώσεις παραλληλισμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί το μικροδίκτυο προβλήματα. Αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα της τάσης πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου και η απορροφόμενη ενέργεια να μην ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή. Ακόμα περισσότερο, σε ένα δεύτερο επίπεδο, το μικροδίκτυο μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παίζει υποστηρικτικό ρόλο ως προς το δίκτυο. Λειτουργία η οποία μπορεί για παράδειγμα να σημαίνει ότι το μικροδίκτυο θα απορροφά ή θα παρέχει ενεργό ή άεργο ισχύ όταν χρειάζεται για το κεντρικό δίκτυο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση απαιτείται η συντονισμένη λειτουργία και επικοινωνία μεταξύ των μονάδων ελέγχου του μικροδικτύου και του κεντρικού συστήματος.

3.1.3 Δομή μικροδικτύου

Η έννοια του μικροδικτύου επιτρέπει την υψηλή διεύθυνση της διεσπαρμένης παραγωγής χωρίς να απαιτείται εκ νέου σχεδιασμός ή ανακατασκευή του συστήματος διανομής. Πρόκειται για απομονωμένα συστήματα παραγωγής-διανομής δύο βαθμίδων που λειτουργούν τοπικά. Το σύμπλεγμα των φορτίων και των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, που λειτουργούν ως ενιαία ελεγχόμενη οντότητα, ξεπερνά τα μειονεκτήματα της ανεξάρτητης λειτουργίας Διεσπαρμένης Παραγωγής. Η γενική δομή για ένα μικροδίκτυο και η θέση του σε σχέση με το σύστημα διαχείρισης των δικτύων διανομής (DMS-Distribution Management System), παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2: Δομή Μικροδικτύου

Μια τέτοια διάρθρωση συστήματος ΗΕ, όπως το μικροδίκτυο, αναμένεται να έχει μεγάλη διείσδυση σε σχετικά πυκνοκατοικημένες περιοχές στις οποίες οι όροι όχλησης είναι αυστηρότεροι σε σύγκριση με πιο απομακρυσμένες ή ήδη υπάρχουσες βιομηχανικές περιοχές. Επομένως σε αυτά τα δίκτυα αναμένεται σημαντική διείσδυση πηγών ενέργειας πιο φιλικών προς το περιβάλλον συγκρινόμενα με τις μεγάλες κεντρικές μονάδες ενός συστήματος, όπως για παράδειγμα τα BIPV (Building Integrated PhotoVoltaics). Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι στις αγροτικές περιοχές δεν μπορεί να γίνει διείσδυση τέτοιων δικτύων. Σε μία τέτοια περίπτωση μπορεί να επιτευχθεί η εκμετάλλευση των τοπικών πηγών ενέργειας, όπως είναι τα μικρά υδροηλεκτρικά ή η βιομάζα.

Οι βασικές μονάδες που απαρτίζουν ένα μικροδίκτυο είναι [14]:

- Αντιστροφείς: Οι περισσότερες μικροπηγές του μικροδικτύου συνδέονται στο υπόλοιπο δίκτυο μέσω μετατροπέων. Οι αυξημένες δυνατότητες που προσφέρουν οι σύγχρονοι αντιστροφείς καθιστούν δυνατό τον έλεγχο της

παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος και κατά συνέπεια της τάσης και της συχνότητας σε απομονωμένη λειτουργία.

- Μονάδες Αποθήκευσης: Το βασικό πρόβλημα της ΗΕ είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί εύκολα σε εκτεταμένη κλίμακα. Σχεδόν όλη η κατανάλωση ΗΕ σήμερα είναι ταυτόχρονη με την παραγωγή της. Ωστόσο για την λειτουργία των μικροδικτύων, εφόσον αυτά περιλαμβάνουν μεγάλη παραγωγή από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η παρουσία μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

Οι βασικές μονάδες αποθήκευσης είναι:

- Ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή κοινώς μπαταρίες και κυρίως μπαταρίες μολύβδου οξέος, που αποτελούν μονάδες αποθήκευσης ΗΕ μετά την ηλεκτροχημική μετατροπή της.
- Μονάδες που λειτουργούν με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES), όπου ΗΕ χρησιμοποιείται για την συμπίεση ποσότητας αέρα η οποία στη συνέχεια κινώντας έναν στρόβιλο αναπαράγει την ΗΕ.
- Σφόνδυλοι (flywheels). Πρόκειται για διατάξεις όπου μέσω ενός κινητήρα-γεννήτριας μπορεί να γίνει αποθήκευση με την μορφή κινητικής ενέργειας σε μια στρεφόμενη μάζα.
- Υπεραγώγιμες διατάξεις. Εφαρμογές με διατάξεις που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση ενώ επίσης διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.
- Διατάξεις άντλησης. Η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές χρησιμοποιείται για άντληση νερού σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη. Κατόπιν η ΗΕ παράγεται όταν ζητηθεί με έναν υδροστρόβιλο.
- Μονάδες Ελέγχου: Για να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη, το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου θα πρέπει να είναι σε θέση να προσφέρει τα ακόλουθα :
 - Παροχή ΗΕ στα τοπικά φορτία.

- Συμμετοχή στις ενεργειακές αγορές με στόχο τη μείωση του λειτουργικού κόστους και την αύξηση των κερδών των ιδιοκτητών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.
- Κατά το δυνατόν αδιάλειπτη παροχή ενέργειας σε κρίσιμα φορτία.
- Συνεισφορά στη μείωση των ρύπων που οφείλονται στην τοπική ζήτηση.
- Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο τοπικό δίκτυο διανομής όπως έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος.
- Νησιδοποίηση και επανεκκίνηση του δικτύου μετά από σφάλμα στο ανάντη δίκτυο.

Ένα μικροδίκτυο θεωρείται ότι λειτουργεί ως τμήμα του δικτύου διανομής και μπορούν να διακριθούν τρία ιεραρχικά επίπεδα ελέγχου:

- Διαχειριστής δικτύου διανομής (DNO) και Διαχειριστής Αγοράς (MO).
- Κεντρικός ελεγκτής Μικροδικτύου (MGCC).
- Τοπικοί ελεγκτές (LC), οι οποίοι διακρίνονται σε ελεγκτές μικροπηγών (EM) και ελεγκτές φορτίου (ΕΦ).

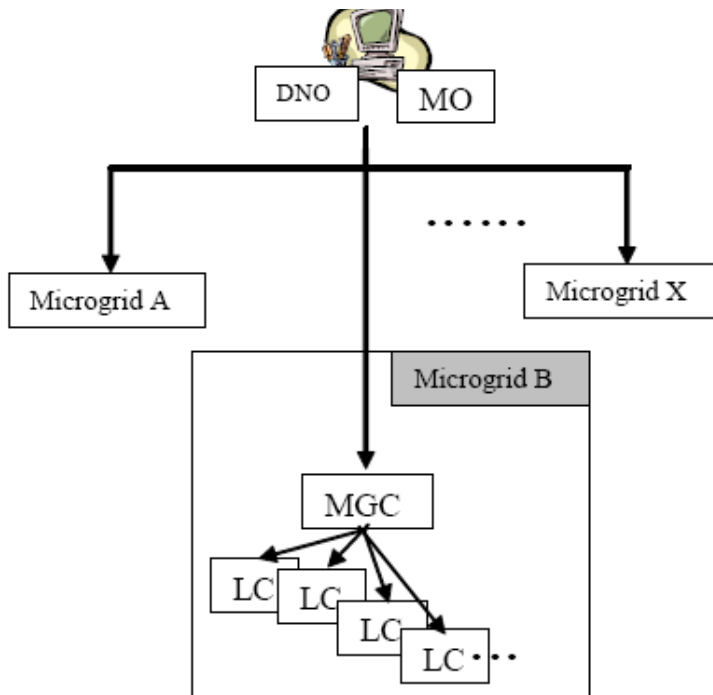
3.1.4 Έλεγχος Μικροδικτύου

Ο Διαχειριστής δικτύου διανομής είναι υπεύθυνος για την τεχνική λειτουργία του συστήματος στην χαμηλή και μέση τάση. Στο κομμάτι αυτό του δικτύου μπορεί να υπάρχουν περισσότερα του ενός μικροδίκτυα. Ο διαχειριστής της αγοράς (Market Operator-MO) είναι υπεύθυνος για την λειτουργία της αγοράς ενέργειας στην συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου διανομής. Είναι προφανές ότι, ανάλογα με το μοντέλο της αγοράς ενέργειας, μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι του ενός Διαχειριστές Αγοράς. Εντός ενός μικροδικτύου, συνεπώς, μπορεί να λειτουργεί μία αγορά και ένα σύνολο αρκετών μικρών τέτοιων αγορών θα διαπραγματεύονται με τον Διαχειριστή της αγοράς της περιοχής του. Αυτές οι δύο οντότητες (DNO/MO) δεν ανήκουν στο Μικροδίκτυο αλλά αποτελούν τους εκπροσώπους του δικτύου με

τους οποίους επικοινωνεί το κάθε Μικροδίκτυο Α έως Χ που ανήκει στο δίκτυο διανομής. Θα πρέπει να τονιστεί ότι παρά την αυτονομία του μικροδικτύου, εφόσον είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο Μέσης Τάσης, θα πρέπει να διατίθεται ένα ελάχιστο επίπεδο συντονισμού με τους DNO/MO ώστε αυτοί να το αντιλαμβάνονται ως ένα ενιαίο φορτίο. Οι διαχειριστές DNO/MO επικοινωνούν με το μικροδίκτυο μέσω του Κεντρικού ελεγκτή (Microgrid Central Controller-MGCC).

Οι λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή του Μικροδικτύου μπορούν να εκτείνονται από την απλή εποπτεία και καταγραφή της ενεργού και άεργου ισχύος που παρέχει κάθε διασπαρμένη πηγή, έως την πλήρη ευθύνη για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικροδικτύου, με την αποστολή σημάτων ελέγχου για την παραγωγή των μικροπηγών και των φορτίων.

Λεπτομέρειες για τη λειτουργία του κεντρικού ελεγκτή και τις ακολουθούμενες πολιτικές διαχείρισης πηγών και φορτίων δίνονται ακολούθως. Στο χαμηλότερο επίπεδο ελέγχου ανήκουν οι τοπικοί ελεγκτές (Local Controllers-LC). Οι τοπικοί ελεγκτές μπορούν να ελέγχουν μονάδες παραγωγής, οπότε και ονομάζονται Ελεγκτές Μονάδων (EM), συμπεριλαμβανομένων των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας αλλά και κάποια από τα φορτία, οπότε ονομάζονται Ελεγκτές Φορτίου (ΕΦ). Ο Ελεγκτής Μονάδας εκμεταλλεύεται τις ολοένα και αυξανόμενες δυνατότητες των ηλεκτρονικών ισχύος της διασύνδεσης των μικροπηγών. Μπορεί να εμπλουτιστεί με διάφορους βαθμούς ευφυΐας, από την απλή ανταλλαγή πληροφοριών με τον κεντρικό ελεγκτή, μέχρι την αυτόνομη λειτουργία κάθε μικροπηγής, ειδικά εάν εφαρμόζεται αποκεντρωμένος έλεγχος.



Σχήμα 3.3: Τα επίπεδα ελέγχου ενός μικροδικτύου.

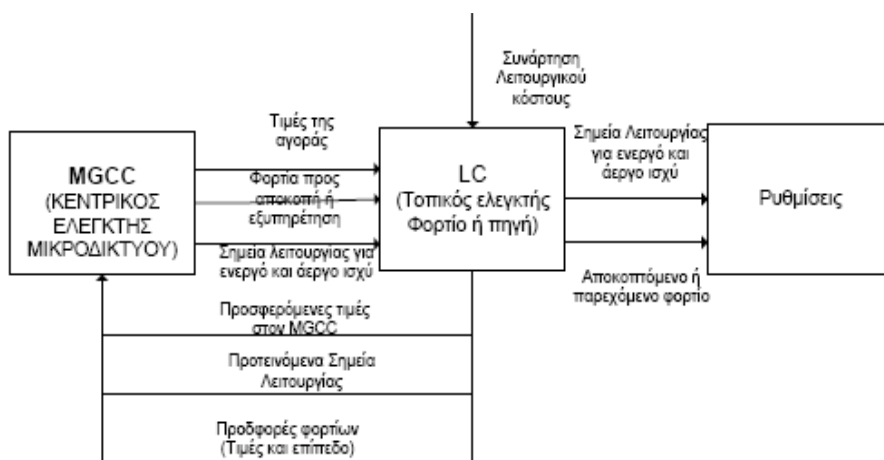
Μία επιπλέον επεξηγηματική κατασκευή μικροδικτύου φαίνεται στο σχήμα 3.3 Ένας MGCC (κεντρικός ελεγκτής μικροδικτύου) είναι στην κορυφή της ιεραρχίας ελέγχου του συστήματος. Στο δεύτερο επίπεδο των ελεγκτών στην ιεραρχία είναι οι ελεγκτές φορτίου (LC ή ΕΦ) και οι ελεγκτές των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής (GC ή ΕΜ). Το σημείο σύνδεσης του μικροδικτύου που ονομάζεται σημείο της κοινής ζεύξης (PCC), το οποίο βρίσκεται στην πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή και σε αυτό το σημείο το μικροδίκτυο πρέπει να πληροί τις ισχύουσες προδιαγραφές διασύνδεσης, όπως ορίζεται στο πρότυπο IEEE P1547. Για την απομόνωση του μικροδικτύου από το ανάντη δίκτυο, χρησιμοποιείται κύκλωμα διακόπτων υψηλής ταχύτητας LV (CB) ή στατικός διακόπτης, που καλείται συσκευή διαχωρισμού (SD). Ο κεντρικός ελεγκτής ανταλλάσει μηνύματα με τη μορφή των δεδομένων με τους ελεγκτές φορτίου και τους ελεγκτές των πηγών μέσω τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων, όπως φαίνεται στην διακεκομμένη γραμμή. Τα μηνύματα περιλαμβάνουν σημεία αναφοράς των ελεγκτών φορτίου και των ελεγκτών των μονάδων, την παρακολούθηση της ισορροπίας προσφοράς

και ζήτησης και τον προγραμματισμό αποτελεσματικής λειτουργίας των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής.

Είναι σαφές ότι για να λειτουργήσει το μικροδίκτυο, είναι σημαντικό να εξισορροπηθούν με συντονισμένο τρόπο, η προσφορά ισχύος από τις τοπικές διασπαρμένες μονάδες παραγωγής και από τη γραμμή διανομής Μέσης Τάσης με τη συνολική ζήτηση. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις που μπορούν να εφαρμοστούν, κυμαινόμενες από μια πλήρως αποκεντρωμένη προσέγγιση προς ένα κεντρικό έλεγχο ανάλογα με τις λειτουργίες του MGCC και των LCs.

➤ Κεντρικός Έλεγχος

Στον κεντρικό έλεγχο, οι ελεγκτές φορτίου (LC) ακολουθούν τις εντολές του κεντρικού ελεγκτή μικροδικτύου (MGCC), όταν το μικροδίκτυο συνδέεται με το κυρίως δίκτυο, και έχουν την αυτονομία να εκτελέσουν τοπική βελτιστοποίηση της ενεργού και άεργου ισχύος κατά την απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου. Η κύρια ευθύνη για τη μεγιστοποίηση της αξίας του μικροδικτύου και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ανατίθεται στον κεντρικό ελεγκτή. Ένα γενικό σχήμα ροής πληροφορίας μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και των τοπικών ελεγκτών σε ένα μικροδίκτυο παρουσιάζεται ως εξής:



Σχήμα 3.4: Ροή πληροφορίας μεταξύ κεντρικού ελεγκτή και τοπικών ελεγκτών σε ένα μικροδίκτυο

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του κεντρικού ελεγκτή είναι η ακόλουθη: Κάθε m λεπτά, π.χ. 15 λεπτά, αποστέλλονται στον MGCC οι προσφορές κάθε μονάδας και κάθε φορτίου για την επόμενη ώρα σε διαστήματα m λεπτών, αντίστοιχα πάντοτε με την εκάστοτε υπό εφαρμογή πολιτική. Αυτές οι προσφορές είναι βασισμένες στις τιμές ενέργειας στην ελεύθερη αγορά, στην ανάγκη για παραγωγή θερμότητας παράλληλα με την παραγωγή ηλεκτρισμού, στο κόστος παραγωγής της μονάδας, στο επιδιωκόμενο ποσοστό κέρδους από τον ιδιοκτήτη της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, ή από την αξία του φορτίου όπως την αντιλαμβάνεται ο καταναλωτής με χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού το επόμενο διάστημα. Οι προσφορές των φορτίων ακολουθούν τους ίδιους κανόνες με εκείνους των πηγών, δηλαδή κάθε m λεπτά υποβάλλουν προσφορές για την επόμενη ώρα σε βήματα των m λεπτών. Ο κεντρικός ελεγκτής προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου βασιζόμενος στα ακόλουθα:

- Την ακολουθούμενη πολιτική αγοράς.
- Την ακολουθούμενη πολιτική προσφοράς φορτίων.
- Τις τιμές της αγοράς ΗΕ.
- Τα τεχνικά όρια των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.
- Την πρόβλεψη φορτίου, αν κάτι τέτοιο απαιτείται.
- Την εκτίμηση παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.
- Τους πιθανώς υπάρχοντες περιορισμούς ασφαλείας του δικτύου.
- Τις προσφορές των μονάδων του μικροδικτύου.
- Τις προσφορές των καταναλωτών.
- Τους τυχόν περιορισμούς περιβαλλοντικής πολιτικής.
- Τα όρια παραγωγής για διατήρηση της τάσης.
- Το διεθνώς καθορισμένο Εμπόριο Ρύπων.
- Τη λειτουργία σε διασυνδεδεμένη ή νησιδοποιημένη λειτουργία.

Το καθορισμένο ως βέλτιστο σενάριο λειτουργίας επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των μικροπηγών και των ελέγξιμων φορτίων μέσα στο μικροδίκτυο με την αποστολή κατάλληλων σημάτων ελέγχου στους τοπικούς ελεγκτές, σήματα τα οποία περιέχουν :

- Τις τιμές της αγοράς.
- Τον αριθμό των προβλεπόμενων εν λειτουργία μονάδων.
- Τα σημεία λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής όπου μπορεί να ελεγχθεί η έξοδός τους, π.χ. στην περίπτωση των μικροτουρμπίνων.
- Τα φορτία που θα εξυπηρετηθούν ή θα αποκοπούν.

Η διαδικασία αυτή λειτουργεί επαναληπτικά κάθε m λεπτά για την επόμενη ώρα. Όσον αφορά στις τιμές της αγοράς, αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους τοπικούς ελεγκτές προκειμένου να προετοιμαστούν πιο κατάλληλα οι προσφορές τους στον κεντρικό ελεγκτή για τα επόμενα διαστήματα. Για τέτοιου τύπου διασύνδεση και συντονισμό μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και κάθε ενός από τους τοπικούς ελεγκτές, χρειάζεται αμφίδρομη επικοινωνία. Οι τοπικοί ελεγκτές στέλνουν την πληροφορία που απαιτείται από τον MGCC, σε μορφή .txt και .xml. Με όμοιο format αποστέλλεται η πληροφορία για τα σημεία λειτουργίας και για τις τιμές της αγοράς στους τοπικούς ελεγκτές. Η επικοινωνία μπορεί να γίνει είτε με την βοήθεια τηλεφωνικών γραμμών, φερέσυχνων ή ασύρματης επικοινωνίας, όπως οι τεχνολογίες GSM ή GPRS [12].

Για να μπορεί ο κεντρικός ελεγκτής να επιτυγχάνει την κατά το δυνατόν βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου, οι συναρτήσεις οι οποίες πρέπει να υλοποιούνται σε ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου είναι σε γενικές γραμμές οι εξής:

I. Πρόβλεψη φορτίου: Καθώς ο ορίζοντας βελτιστοποίησης είναι μερικές ώρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλές μέθοδοι όπως η persistent και η μέθοδος χρονοσειρών. Λόγω του μικρού αριθμών φορτίων, το σφάλμα της πρόβλεψης

αναμένεται να είναι σημαντικότερο από ότι στα μεγαλύτερα δίκτυα. Αν υπάρχουν προσφορές των φορτίων στον MGCC, τότε η ανάγκη για αλγορίθμους πρόβλεψης μειώνεται.

II. Πρόβλεψη παραγωγής από ΑΠΕ: Λόγω του δεδομένου υψηλού κόστους για την πρόβλεψή τους, δεν αναμένεται να έχουμε αξιόπιστη μετεωρολογική πληροφορία σε τέτοιου βεληνεκούς τοπικό επίπεδο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν παρόμοιες με την πρόβλεψη φορτίου μέθοδοι, λόγω του μικρού διαστήματος βελτιστοποίησης και της διαρκούς ανανέωσης των μετρήσεων για την τρέχουσα παραγωγή. Μάλιστα οι μέθοδοι τύπου persistent, που θεωρούν ότι η παραγωγή στο επόμενο χρονικό διάστημα αναμένεται να είναι ίση με την παραγωγή της προηγούμενης χρονικής περιόδου, έχουν αρκετά ικανοποιητική επίδοση στις προβλέψεις, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις αιολικής παραγωγής για τα μικρά διαστήματα που εξετάζονται.

III. Πρόβλεψη θερμικών αναγκών: Στη Βόρεια κυρίως Ευρώπη αναμένεται σημαντικός αριθμός εγκαταστάσεων Συμπαγωγής. Επομένως, η θερμική ζήτηση αναμένεται να μεταβάλλει τις προσφορές των παραγωγών αλλά και να επηρεάσει τη λειτουργία των μικροδικτύων. Αν ο τοπικός ελεγκτής διαχειρίζεται συνολικά τις ενεργειακές ανάγκες του μικροδικτύου, τέτοιου είδους διαδικασίες είναι απαραίτητες για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του. Η μεθοδολογία πρόβλεψης απαιτεί να εκτιμηθούν παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία. Ειδικότερα απαιτείται ο βαθμός συσχέτισης θερμικής ζήτησης με τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ώρα της ημέρας, και τον τύπο της (καθημερινή/σαββατοκύριακα), τις εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας αλλά και το είδους των θερμικών αναγκών της περιοχής.

IV. Οικονομική λειτουργία: Αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου να επιλεγούν οι οικονομικότερες προσφορές, τόσο από τα φορτία, όσο και από τις μονάδες παραγωγής. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις ρουτίνες επιλογής Ένταξης των Μονάδων παραγωγής-φορτίων (Unit Commitment) και της Οικονομικής Κατανομής (Economic Dispatch). Η πρώτη κατηγορία επιλέγει ποιες μονάδες είναι οικονομικά συμφέρουσες να λειτουργήσουν σε σχέση με την αγορά ΗΕ

ενώ η οικονομική κατανομή αποφασίζει τα σημεία λειτουργίας αυτών των μονάδων. Αν οι προσφορές των μονάδων είναι της μορφής Ax , όπου x η παραγωγή της κάθε μονάδας, η απόφαση εκφυλίζεται στην σύγκριση της παραμέτρου A με την τιμή της αγοράς και τις υπόλοιπες προσφορές των μονάδων. Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιούνται και οι δύο συναρτήσεις.

V. *Εκτίμηση ασφάλειας*: Η ειδοποιός διαφορά ενός μικροδικτύου από ένα σύνολο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι η ικανότητα για την κατά το δυνατόν αδιατάρακτη μετάβαση, από τη διασυνδεδεμένη στη νησιδοποιημένη λειτουργία, σε περίπτωση βλάβης του ανάντη δικτύου. Οι συναρτήσεις ασφαλείας έχουν ως στόχο να καθορίσουν ποιες μονάδες θα πρέπει να λειτουργούν ή ποια φορτία πρέπει να αποκοπούν προκειμένου να μπορούν να εξυπηρετηθούν τα κρίσιμα φορτία. Επομένως, οι συγκεκριμένες συναρτήσεις μπορούν να διακριθούν σε συναρτήσεις για την εκτίμηση της στατικής ασφαλείας του μικροδικτύου σε περίπτωση διαταραχής (steady state security) και σε συναρτήσεις on-line εκτίμησης της δυναμικής ασφαλείας. Οι τελευταίες με τη βοήθεια μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα και τα Δένδρα Απόφασης, συμβάλλουν στο να έχει δημιουργηθεί μια βάση γνώσης στον κεντρικό ελεγκτή, ώστε να γνωρίζει τις ασφαλείς και ανασφαλείς καταστάσεις του μικροδικτύου στην περίπτωση διακοπής της διασύνδεσης. Με τη βοήθεια προσομοιώσεων της δυναμικής συμπεριφοράς του μικροδικτύου, δημιουργείται η βάση γνώσης σχετικά με τη λειτουργία των τοπικών μονάδων παραγωγής, τη φόρτιση του δικτύου και τα δυναμικά χαρακτηριστικά των πηγών του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, κάποια ξαφνική αλλαγή στη λειτουργική κατάσταση του μικροδικτύου μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά και σύντομα ώστε να αποφευχθούν τυχούσες αποκλίσεις από την επιθυμητή συχνότητα και τάση λειτουργίας.

Ακόμα υλοποιούνται περαιτέρω Ειδικές Συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για τη διεκπεραίωση των παρακάτω στόχων:

- Εκτίμηση της πιθανότητας να παραβιάζονται οι τάσεις σε κάποιο κόμβο από τη λειτουργία του μικροδικτύου ή από την παραγωγή κάποιας τοπικής μονάδας παραγωγής.
- Μεταβολή της λειτουργίας του μικροδικτύου ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική ποσότητα των ρύπων που αποφεύγονται και να συμμετέχει το μικροδίκτυο στο εμπόριο ρύπων.
- Βελτιστοποίηση της λειτουργίας σε επείγουσες καταστάσεις. Αυτές οι συναρτήσεις περιλαμβάνουν μεθόδους για την επίτευξη ελέγχου σε περιόδους όπου το δίκτυο λειτουργεί απομονωμένο από το ανάντη ευρισκόμενο δίκτυο. Σε αυτήν την ομάδα συναρτήσεων περιλαμβάνονται και οι συναρτήσεις black start του μικροδικτύου.
- Ο βαθμός πολυπλοκότητας των επί μέρους συναρτήσεων για τον έλεγχο ενός μικροδικτύου είναι συνάρτηση του μεγέθους του και των αναμενόμενων κερδών που μπορούν να υπάρχουν από τη βελτίωση της επίδοσης των επί μέρους αλγορίθμων.

➤ Πλήρως Αποκεντρωμένος Έλεγχος

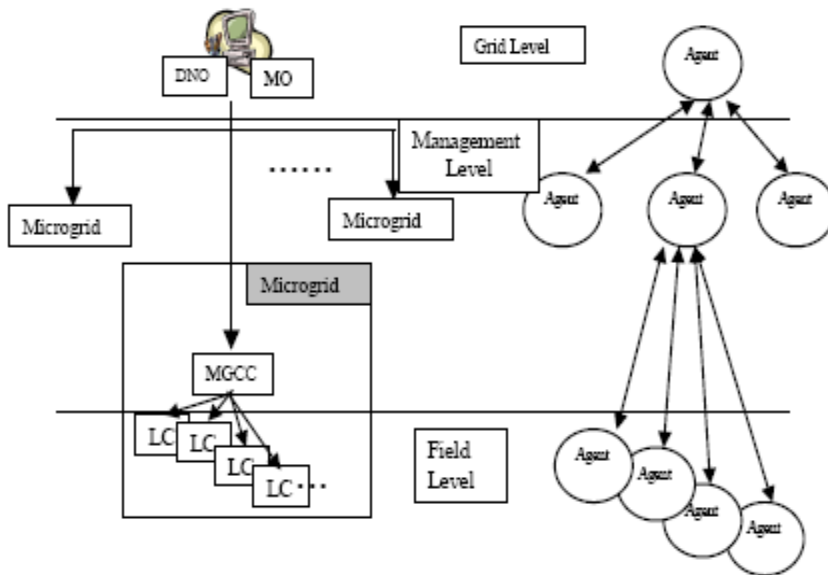
Η ιδέα είναι η απλοποίηση ενός πολύ σύνθετου προβλήματος με μεγάλο αριθμό μεταβλητών, όπως η βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός Συστήματος ΗΕ με πολλές μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Γι' αυτό το πρόβλημα διαιρείται σε πολλά επί μέρους προβλήματα τα οποία μπορούν να επιλυθούν το κάθε ένα ξεχωριστά, αξιοποιώντας την κατανεμημένη ευφυΐα που υπάρχει στις επί μέρους συνιστώσες ελέγχου.

Σε μια τέτοια μορφή ελέγχου επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή αυτονομία των επί μέρους συνιστωσών ελέγχου. Έτσι για παράδειγμα, η κύρια ευθύνη για τον έλεγχο του μικροδικτύου, ανατίθεται στους τοπικούς ελεγκτές των μονάδων (EM), οι οποίοι συνεργάζονται ή ακόμη και ανταγωνίζονται για να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή τους προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση και να εξάγουν πιθανώς το

μέγιστο ποσό ενέργειας στο δίκτυο μέσης τάσης λαμβάνοντας υπ' όψη τις τρέχουσες τιμές αγοράς. Υπό τέτοιες συνθήκες απαιτείται όχι μόνο ευφυΐα από τον κάθε ελεγκτή, αλλά και αυξημένες ικανότητες τοπικά, ώστε όλο το ελεγχόμενο δίκτυο να αποκτήσει ευφυΐα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα μπορεί να επιτευχθεί όχι μόνο η τοπική βελτιστοποίηση αλλά και σύγκλιση σε μια πολύ ικανοποιητική λύση δεδομένων και αντικρουόμενων συμφερόντων που μπορούν να υπάρχουν σε ένα μικροδίκτυο.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά που επιζητούμε στον αποκεντρωμένο έλεγχο μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση ενός ευφυούς πολυπρακτορικού συστήματος (Multi Agent Systems-MAS). Η τεχνολογία MAS έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές των Συστημάτων ΗΕ και χρησιμοποιεί υψηλού επιπέδου γλώσσα επικοινωνίας με συγκεκριμένη σημειολογία ώστε να ανταλλάσσονται όχι μόνο πληροφορίες αλλά και γνώση μεταξύ των πρακτόρων. Η ανταλλαγή των πληροφοριών και οι διαδικασίες μάθησης συμβάλλουν ώστε να επιτευχθεί ο τελικός στόχος, που είναι ο έλεγχος της διαδικασίας για την οποία χρησιμοποιούνται οι πράκτορες. Η ευφυΐα, την οποία αποκτά κάθε πράκτορας, τόσο από την βάση γνώσης που διαθέτει, τις τεχνικές μάθησης, π.χ. ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning), όσο κυρίως και από την επικοινωνία με τους γειτονικούς του πράκτορες, συμβάλλει στις μετέπειτα αποφάσεις του, που μπορούν να επηρεάζουν και όλο του το περιβάλλον. Μέσα από αυτή τη διαδικασία μάθησης και συνεχούς επικοινωνίας μπορεί να επιτευχθεί ένα σχεδόν βέλτιστο αποτέλεσμα ελέγχου.

Η αντιστοιχία μεταξύ της προσέγγισης των ευφυών πρακτόρων για τον έλεγχο του μικροδικτύου στα διάφορα επίπεδα ελέγχου και της αρχιτεκτονικής ελέγχου, παρουσιάζεται στο επόμενο σχηματικό διάγραμμα με τα τρία επίπεδα ελέγχου και την αντιστοίχισή τους με τα επίπεδα λειτουργίας του μικροδικτύου.



Σχήμα 3.5: Αντιστοίχιση επιπέδων ελέγχου για το μικροδίκτυο και προσέγγισης με σύστημα MAS

Στο ανώτερο επίπεδο ή επίπεδο δικτύου είναι το δίκτυο μέσης τάσης και ο πράκτορας που χρησιμοποιείται είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία μεταξύ του μικροδικτύου και των DNO/MO, ανταλλάσσοντας μηνύματα για τη λειτουργία της αγοράς ενέργειας. Στο ενδιάμεσο επίπεδο, το επίπεδο διαχείρισης, οι πράκτορες που συμμετέχουν είναι υπεύθυνοι για την οργανωμένη λειτουργία των ελεγκτών μονάδων παραγωγής και φορτίου, την συμμετοχή του κάθε μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας αλλά και την πιθανή συνεργασία του μικροδικτύου με άλλα γειτονικά μικροδίκτυα. Σε αυτό το επίπεδο ένας πράκτορας είναι επιφορτισμένος με το έργο των διαπραγματεύσεων με τον MO. Οι προσφορές όμως των φορτίων και των μονάδων παραγωγής είναι έργο των πρακτόρων που βρίσκονται στο αμέσως παρακάτω επίπεδο, το επίπεδο Εφαρμογής ή Field level, το οποίο είναι και η ψυχή του πολύ-πρακτορικού συστήματος ελέγχου. Οι πράκτορες αυτοί είναι οι τοπικοί ελεγκτές LCs. Η λειτουργία ενός τέτοιου ελεγκτή απαιτεί δύο τμήματα. Το εξωτερικό παρέχει το περιβάλλον επικοινωνίας με το μικροδίκτυο το οποίο ανταλλάσσει σημεία λειτουργίας (set points), προσφορές και εντολές. Αυτό το τμήμα είναι κοινό ώστε να είναι εφικτή η προτυποποίηση της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος και να υπάρχει κοινός κώδικας επικοινωνίας. Το εσωτερικό

τμήμα είναι επιφορτισμένο με την μετάδοση των εντολών που λαμβάνει ο πράκτορας στην φυσική μονάδα που ελέγχεται, μονάδα παραγωγής ή φορτίο. Επίσης αυτοί οι πράκτορες θα πρέπει να είναι σε θέση να συνεργάζονται και να λαμβάνουν υπ' όψιν τους άλλους τοπικούς ελεγκτές και άλλα ευφυή τμήματα του μικροδικτύου.

Συνοπτικά χαρακτηριστικές εργασίες που θα πρέπει να μπορούν να επιτελούν οι πράκτορες σε κάθε επίπεδο είναι :

Επίπεδο Εφαρμογής (Field Level): Έλεγχος ενεργού αέργου ισχύος, διαχείριση μπαταριών, έλεγχος τάσης, έλεγχος συχνότητας, λειτουργίες διακοπών κτλ.

Ενδιάμεσο επίπεδο (Management Level): Συμμετοχή στην αγορά, αποκοπή φορτίου, καταγραφή και παρακολούθηση ζητημάτων ασφαλείας και ποιότητας ισχύος, νησιδοποίηση και επανατροφοδότηση από το δίκτυο, εκκίνηση μετά από black out κτλ.

Επίπεδο δικτύου (Grid level): Συμμετοχή στην αγορά, αποφάσεις ζητημάτων ασφαλείας και ποιότητας ισχύος.

Επιπρόσθετες απαιτήσεις για την ανάπτυξη αυτής της αρχιτεκτονικής, είναι να μην απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στο λογισμικό ελέγχου εξαιτίας της αλλαγής προτεραιοτήτων και λειτουργιών στο μικροδίκτυο ή από την προσθήκη νέων συμμετεχόντων σε αυτό. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι πράκτορες να μπορούν να εκπαιδευτούν στα νέα αυτά μηνύματα που λαμβάνουν. Το έργο αυτό διευκολύνεται με την ανάπτυξη ελεγκτών στις τοπικές μονάδες παραγωγής με την μορφή "plug and play" ώστε να επιτελούν πολυσύνθετες λειτουργίες με μεγαλύτερο βαθμό ευφυΐας από την απλή ανταλλαγή σημείων λειτουργίας. Ήδη η έρευνα κατευθύνεται στον τομέα της ανάπτυξης τέτοιων ελεγκτών και την ενσωμάτωση ευφυών ελεγκτών στις μονάδες παραγωγής και φορτίου. Ο τελικός στόχος είναι ο έλεγχος να είναι ακόμη ευκολότερος ανεξάρτητα από τον προμηθευτή του τοπικού ελεγκτή της μονάδας παραγωγής και να προσαρμόζεται η συσκευή που προστίθεται άμεσα στο περιβάλλον λειτουργίας [27].

3.1.5 Εφαρμογές αποκεντρωμένου και κεντρικού ελέγχου λειτουργίας μικροδικτύου

Και στις δύο προσεγγίσεις ελέγχου λειτουργίας του μικροδικτύου υπάρχει σημαντική αποκέντρωση συγκριτικά με το να δίνονται από κάποιο κεντρικό σημείο οδηγίες για κάθε μια από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής ενός Συστήματος ΗΕ. Η διαφορά έγκειται στο βαθμό αποκέντρωσης που υπάρχει αλλά και στις δυνατότητες που είναι επιθυμητό να παρέχει ο MGCC. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος μπορεί να συμβάλλει ώστε όταν οι χρήστες του μικροδικτύου επιθυμούν να επιτύχουν τη βελτιστοποίηση των δικών τους πόρων ή πολύ περισσότερο, όταν τα συμφέροντα ενός χρήστη Α έρχονται σε αντίθεση με τα συμφέροντα ενός χρήστη Β, να συγκλίνει ο έλεγχος σε μία εφικτή λύση που κατά το δυνατόν θα ικανοποιεί και τα συμφέροντα των δύο. Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο με οικιακούς καταναλωτές ο ένας μπορεί να επιθυμεί να παράγει θερμότητα και να πουλήσει την περίσσεια ηλεκτρισμού ενώ κάποιος άλλος να έχει αυξημένες ανάγκες ηλεκτρισμού. Και οι δύο επιθυμούν να επιτύχουν το σκοπό τους με τον πλέον οικονομικό τρόπο, οπότε δε θα επιθυμούσαν να αλλάζει η παραγωγή τους από απομακρυσμένο σημείο και να μην μπορούν να πουλήσουν την περίσσεια της παραγωγής τους ή να αγοράσουν φθηνή ενέργεια.

Αυτός ο τρόπος λειτουργίας μπορεί να συμβάλλει, με την βοήθεια της αποκεντρωμένης ευφυΐας και την ενσωμάτωση ευφυών πρακτόρων σε μορφή "plug and play" συσκευών, στο να έχει ο έλεγχος χαμηλότερο κόστος στο βαθμό που περισσότερες εταιρίες προσπαθούν να αναπτύξουν τέτοιου είδους προϊόντα. Από την άλλη, όταν ο στόχος των συμμετεχόντων είναι η μεταξύ τους συνεργασία ώστε να μειωθεί συνολικά το κόστος ικανοποίησης των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών τους, ο κεντρικός έλεγχος ο οποίος μπορεί να συμπεριλάβει και ειδικές συναρτήσεις, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, παρουσιάζει πλεονεκτήματα. Τέτοιο παράδειγμα είναι ένα βιομηχανικό μικροδίκτυο. Επίσης ομάδες θερμοκηπιακών καλλιεργητών θα επιθυμούσαν να συνεργαστούν ώστε να επιτύχουν μείωση των δαπανών για τη θέρμανση και τον ηλεκτρισμό τους. Σε τέτοιο περιβάλλον λειτουργίας αναμένονται οι τελικοί χρήστες να επιλέξουν πιο

«κεντρική» φιλοσοφία λειτουργίας. Επιπρόσθετα, στο ανταγωνιστικό περιβάλλον της αγοράς είναι μάλλον απίθανο κάθε ένας μικρός καταναλωτής και κάτοχος πηγής διεσπαρμένης παραγωγής να μπορέσει με μικρή ισχύ να επιτύχει σημαντικά οφέλη σε σχέση με την οργανωμένη παρουσία πολλών μικρών παραγωγών διεσπαρμένης παραγωγής, οι οποίοι θα παρουσιάζονται ως μια οντότητα στην αγορά και θα μπορούσαν να διαπραγματεύονται με ευνοϊκότερους όρους την ικανοποίηση των ενεργειακών τους αναγκών. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο εταιρίες που θα μπορούν να αναλάβουν τη λειτουργία αυτών των παραγωγών και θα έχουν και το κατάλληλο προσωπικό που θα δικαιολογούσαν «κεντρική» αντιμετώπιση του ελέγχου. Υπό τέτοιες συνθήκες οι τοπικοί ελεγκτές δε θα ήταν τίποτε άλλο από απλοί μεταβιβαστές εντολών χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη ανάγκη ευφυΐας, όπως στον αποκεντρωμένο έλεγχο του μικροδικτύου.

Επειδή στον κεντρικό έλεγχο είναι εφικτό να υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες γνωστές στον κεντρικό ελεγκτή, σε αντίθεση με το τι γνωρίζει κάθε τοπικός ελεγκτής, και επειδή υπάρχει μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς, ο κεντρικός ελεγκτής μπορεί να υπολογίσει ένα βέλτιστο σετ αποφάσεων για την λειτουργία του μικροδικτύου. Η συνεργασία των τοπικών ελεγκτών μπορεί να επιτύχει αρκετά ικανοποιητικές λύσεις αλλά η λύση που επιτυγχάνεται είναι υπό-βέλτιστη. Υπάρχουν όμως προϋποθέσεις, που η λύση που επιτυγχάνεται να είναι η βέλτιστη και σε αποκεντρωμένο τρόπο λειτουργίας.

Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις συνοψίζονται στον κάτωθι πίνακα:

	Κεντρικός Έλεγχος	Αποκεντρωμένος Έλεγχος
Ιδιοκτησία Διεσπαρμένης Παραγωγής	Ένας ιδιοκτήτης ή συνεταιρισμένοι ιδιοκτήτες που φαίνονται ως οντότητα	Κατά κανόνα πολλοί ιδιοκτήτες
Στόχος Ελέγχου	Βελτιστοποίηση λειτουργίας ικανοποιώντας διάφορους περιορισμούς	Αβεβαιότητα για τις επιδιώξεις του κάθε χρήστη εκείνη τη στιγμή

Διαθεσιμότητα Προσωπικού Για Ειδικές Εργασίες π.χ. low level management	Συνηθισμένη	Σπάνια
Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	Μπορούν να υλοποιηθούν και εξεζητημένοι αλγόριθμοι	Χρήση απλών αλγορίθμων προκειμένου να μειωθεί το κόστος ελέγχου
Εγκατάσταση Νέας Μονάδας ή Οντότητας	Χρήση προσωπικού για την εγκατάσταση επικοινωνιακών εφαρμογών και προσθήκη στον Κεντρικό Ελεγκτή	Η συσκευή αναμένεται να είναι 'plug and play'. Οι χρήστες θα προσαρμοστούν με διαδικασίες μάθησης στα νέα δεδομένα
Βέλτιστη Λύση	Επιτυγχάνεται	Στην συντριπτική τους πλειοψηφία υπό-βέλτιστες λύσεις
Συμμετοχή Στην Αγορά	Συνεργασία όλων των μονάδων	Πολύ συχνά υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των μονάδων
Συμμετοχή Μικροδικτύου σε κρισιμότερες αποφάσεις ως τμήμα γενικού μοντέλου ελέγχου	Εφικτή	Μη εφικτή προς το παρόν

Πίνακας 3.1: Αντιπαραβολή χαρακτηριστικών κεντρικού και αποκεντρωμένου ελέγχου μικροδικτύου

3.2 Ευφυή Δίκτυα

3.2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί σημαντική αύξηση στη ζήτηση ενέργειας ανά τον κόσμο [23]. Αυτό οφείλεται τόσο στην αύξηση του πληθυσμού της γης όσο και στην αύξηση του βιοτικού επιπέδου. Αυτό που προκαλεί ανησυχία είναι η άποψη πως οι συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας είναι περιορισμένες και θα εξαντληθούν κάποια στιγμή. Επιπλέον υπάρχει μεγάλη απαίτηση να βρούμε εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας λόγω των προβλημάτων της που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή και τα αυξημένα επίπεδα CO₂ στην

ατμόσφαιρα που προκαλούνται από την παραγωγή ενέργειας με συμβατικούς τρόπους . Τα παραπάνω έχουν οδηγήσει σε μια σημαντική μελέτη και ανάπτυξη των ΑΠΕ [24] ,οι οποίες όμως παρά τις πολλές προσπάθειες, δεν έχουν καταφέρει να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Ένας από τους σημαντικότερους λόγους για αυτό, είναι η αβεβαιότητα που σχετίζεται με την παραγωγή από ΑΠΕ.

Τα Smart Grids (ευφυή δίκτυα) είναι μια πολυσυζητημένη έννοια όσον αφορά τα μελλοντικά συστήματα ισχύος. Ο στόχος από τη χρήση των ευφυών δικτύων είναι να ενσωματώσει τη λειτουργία των στοιχείων του δικτύου με ένα έξυπνο και ευέλικτο τρόπο για τη βέλτιστη λειτουργία των δικτύων [25].

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τον όρο Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο (ΕΗΔ) , ορισμένοι από τους οποίους επικεντρώνονται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά , άλλοι στα τεχνικά και άλλοι στα οφέλη που προκύπτουν από την υλοποίηση του.

- Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται στην Εφημερίδα της ΕΕ :

«το ΕΗΔ ορίζεται ως το αναβαθμισμένο δίκτυο ΗΕ στο οποίο έχουν προστεθεί αμφίδρομη ψηφιακή επικοινωνία μεταξύ καταναλωτή και προμηθευτή καθώς και έξυπνα συστήματα μέτρησης, παρακολούθησης και ελέγχου των παραμέτρων της ΗΕ.»

- Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (U.S. Department of Energy) αναφέρει :

«ως ΕΗΔ ορίζεται το σύνολο των τεχνολογιών που εκσυγχρονίζουν το παραδοσιακό ΣΗΕ. Οι τεχνολογίες αυτές χαρακτηρίζονται από τον απομακρυσμένο έλεγχο, τον αυτοματισμό και την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ καταναλωτή και παρόχου ΗΕ, με ενσωμάτωση υπολογιστικών συστημάτων. Τα ΕΗΔ εφαρμόζονται σε επίπεδο παραγωγής ΗΕ και φθάνουν μέχρι το επίπεδο καταναλωτή και στόχος τους είναι η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου.»

- Τέλος στο Electric Power Research Institute (EPRI) :

«ο όρος ΕΗΔ αναφέρεται στον εκσυγχρονισμό του ΣΗΕ ώστε να παρακολουθεί, να προστατεύει και αυτόματα να βελτιστοποιεί τη λειτουργία των διασυνδεδεμένων

στοιχείων του – από τη συγκεντρωτική και διεσπαρμένη παραγωγή μέσω του δικτύου μεταφοράς και διανομής, μέχρι τους βιομηχανικούς καταναλωτές, τα αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης κτιρίων, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και τους τελικούς καταναλωτές, συμπεριλαμβάνοντας τα ηλεκτρικά οχήματα και τις οικιακές συσκευές.»

Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να πούμε πως το έξυπνο δίκτυο αποτελεί ένα αμφίδρομο ηλεκτρικό και επικοινωνιακό δίκτυο το οποίο βελτιώνει την αξιοπιστία, την ασφάλεια και την αποδοτικότητα του ηλεκτρικού συστήματος όσον αφορά τη μικρή ή μεγάλη παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή αλλά και την αποθήκευση της ΗΕ. Περιλαμβάνει εφαρμογές hardware και λογισμικού για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών του δικτύου αλλά και για την υπερσύνδεση και ενσωμάτωση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής και τον έλεγχο του από τη μεριά του καταναλωτή [49].

Το κοινό χαρακτηριστικό που περιλαμβάνεται σε όλους ορισμούς του ΕΗΔ είναι η ενσωμάτωση τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών στα συστήματα ΗΕ. Ικανή και αναγκαία συνθήκη για το χαρακτηρισμό ενός ηλεκτρικού δικτύου ως «Ευφυούς» είναι η ύπαρξη ενός πολύ-επίπεδου στρώματος επικοινωνιών (communications layer) παράλληλα με το ενεργειακό στρώμα παραγωγής-μεταφοράς-διανομής και κατανάλωσης ΗΕ (power layer). Η συλλογή, η μεταφορά και η διαχείριση των ψηφιακών δεδομένων που αφορούν το ηλεκτρικό δίκτυο απαιτεί τηλεπικοινωνιακή υποδομή και κέντρα διαχείρισης του μεγάλου όγκου πληροφοριών. Η ύπαρξη αποδοτικής τηλεπικοινωνιακής υποδομής είναι μείζονος σημασίας για την αποδοτική εποπτεία και τον έλεγχο του συστήματος ΗΕ.



Σχήμα 3.6: Η έννοια του SmartGrid

3.2.2 Χαρακτηριστικά του Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός ΕΗΔ:

- Η αμφίδρομη ροή πληροφορίας περί της ΗΕ καθώς και η διαχείριση της πληροφορίας αυτής σχεδόν σε πραγματικό χρόνο (near-realtime).

Στο ΕΗΔ παράγεται διαρκώς σημαντικός όγκος πληροφοριών, άμεσα αξιοποιήσιμος από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς, το διαχειριστή των δικτύων διανομής, αλλά και τους παραγωγούς, προμηθευτές και καταναλωτές ΗΕ. Παράλληλα, υπάρχει αμφίδρομη ροή πληροφορίας μεταξύ των ανωτέρω φορέων, επιτυγχάνοντας υψηλού επιπέδου εποπτεία και έλεγχο όλων των παραμέτρων της ΗΕ. Σε επίπεδο κατανάλωσης, η διασύνδεση των συσκευών κατανάλωσης με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του καταναλωτή, καθώς και η διασύνδεση του συστήματος αυτού με τον προμηθευτή ΗΕ, επιτρέπει στον καταναλωτή να εποπτεύει την κατανάλωσή του, να επεμβαίνει σε πραγματικό χρόνο και να έχει ενεργή συμμετοχή στο κόστος της ΗΕ που καταναλώνει και στο ενεργειακό του αποτύπωμα. Ταυτόχρονα, η αμφίδρομη ροή αυτή προσφέρει τη δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου διανομής να διαχειρίζεται τη ζήτηση ΗΕ καθώς πλέον το δίκτυο εφοδιάζεται με ευελιξία και προσαρμοστικότητα.

- Το ΕΗΔ χαρακτηρίζεται από αυτόματη αποκατάσταση βλαβών και διαθέτει τη δυνατότητα αυτοϊασης (self healing).

Με τη χρησιμοποίηση εξελιγμένων αισθητήρων (sensors) και ευφυών ηλεκτρικών συσκευών (IED's) περιορίζεται η ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης σε έκτακτες περιπτώσεις όπως εκτεταμένες διακοπές της ΗΕ. Πλέον, το δίκτυο είναι σε θέση να προβλέπει ή να ανιχνεύει σφάλματα και αποκρίνεται να άμεσα. Με την συνεχή παρακολούθηση του συστήματος μεταφοράς και του δικτύου διανομής από τους διαχειριστές και έχοντας επιτύχει την βέλτιστη ανατροφοδότηση της ΗΕ, το ΕΗΔ ανταποκρίνεται καλύτερα στις διακοπές της παροχής ΗΕ με αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας του.

- Το ΕΗΔ αξιοποιεί βέλτιστα τον εξοπλισμό του ΣΗΕ

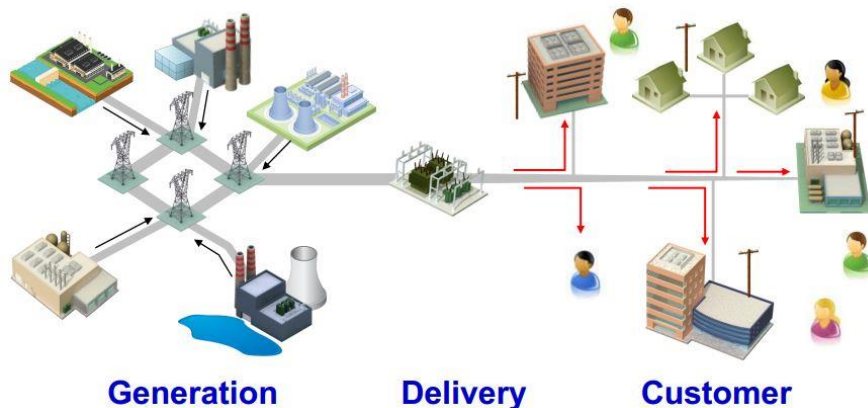
Μετατίθεται η επέκταση του δικτύου που απαιτεί την κατασκευή νέων γραμμών και νέων σταθμών παραγωγής ΗΕ, καθώς το ΕΗΔ βελτιστοποιεί τη ροή ισχύος μέσω των υφιστάμενων εγκαταστάσεων. Η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής καθώς και η δυνατότητα μείωσης της μέγιστης ζήτησης της ΗΕ που διευκολύνεται από την επικοινωνία και την ενεργειακή προσαρμογή των καταναλωτών, μειώνει την ανάγκη αύξησης της παραγωγής ΗΕ από τις μεγάλες μονάδες παραγωγής κατά ώρες αιχμής.

- Το ΕΗΔ χαρακτηρίζεται από υψηλή διείσδυση ΑΠΕ στο μείγμα παραγωγής ΗΕ

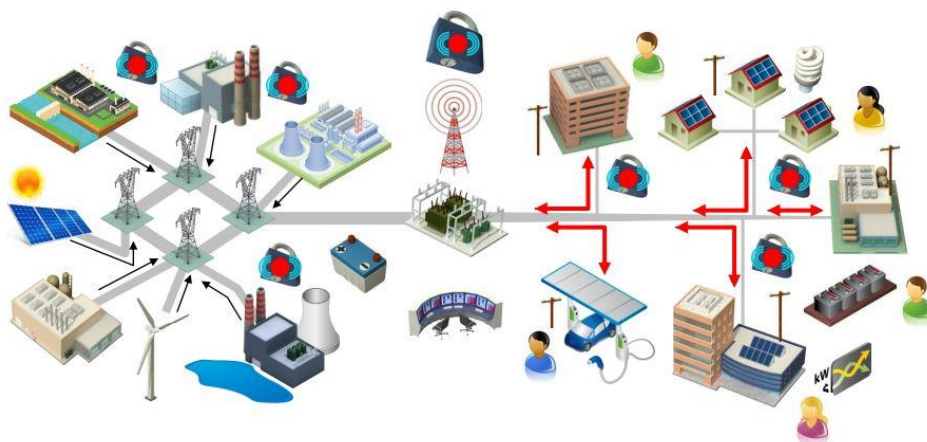
Ο τρόπος λειτουργίας του ΕΗΔ προσφέρει την κάλυψη των αναγκών ΗΕ κατά μεγάλο ποσοστό από ΑΠΕ. Η δυνατότητα της αμφίδρομης ροής της ΗΕ από και προς τα δίκτυα διανομής χωρίς κινδύνους για την αξιοπιστία του δικτύου και η δυνατότητα διατήρησης της ευστάθειας που διαθέτουν τα ΕΗΔ, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα αποθήκευσης ΗΕ και ελέγχου της ζήτησης, αυξάνουν κατά πολύ το ποσοστό διείσδυσης των ΑΠΕ.

- Η ενσωμάτωση έξυπνων μετρητών καθίσταται δυνατή την ευέλικτη τιμολόγηση

Οι έξυπνοι μετρητές μέσω της συνεχούς μετάδοσης δεδομένων κατανάλωσης σε κατάλληλες πλατφόρμες επικοινωνίες (π.χ. οθόνη συστήματος οικιακής διαχείρισης ενέργειας), παρουσιάζουν σε ένα διαδραστικό περιβάλλον την πραγματική κατανάλωση ΗΕ και το κόστος αυτής. Καταργούν την κατ' εκτίμηση χρέωση και επιβάλλουν την τιμολόγηση επί της πραγματοποιηθείσας κατανάλωσης ΗΕ. Προσφέρεται ακόμα η ευελιξία στο χρήστη να επιλέγει εξατομικευμένα προγράμματα και προμηθευτές με βάση τις οικονομικές τους προσφορές.



Σχήμα 3.7: Συμβατικό σύστημα ΗΕ



Σχήμα 3.8: Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο

Τα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά του ΕΗΔ σε αντιπαραβολή με τα χαρακτηριστικά του υπάρχοντος παραδοσιακού ηλεκτρικού δικτύου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.2. Από τη σύγκρισή τους προκύπτουν σημαντικές διαφορές.

Traditional Grid	Smart Grid
Electromechanical devices Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	Digital/microprocessor devices Ψηφιακός εξοπλισμός
Conventional meters Παραδοσιακοί μετρητές	Smart meters Έξυπνοι μετρητές
One kind of tariff Ενιαίος τρόπος τιμολόγησης ΗΕ	Flexible tariffs Ευέλικτη τιμολόγηση
Estimated billing Κατά προσέγγιση τιμολόγηση	Precise billing Ακριβής τιμολόγηση
Estimated load profile	Accurate forecasting

Εκτιμώμενο ενεργειακό προφίλ	Ακριβής πρόβλεψη φορτίων
One-way power flow Μονόδρομη ροή ισχύος	Two-ways power flow Αμφίδρομη ροή ισχύος
One-way information flow Μονόδρομη ροή πληροφορίας	Two-ways information flow Αμφίδρομη ροή πληροφορίας
Centralized generation Συγκεντρωτική παραγωγή	Distributed generation Διεσπαρμένη παραγωγή
Congestion and bottlenecks Φαινόμενα συμφόρησης και υπερφόρτωσης	Security and sustainability Ασφάλεια και βιωσιμότητα
Centralized control Συγκεντρωτικός έλεγχος	Optimal maintenance and operation Βέλτιστη συντήρηση και λειτουργία
Radial and loop topology Ακτινική και βροχοειδής τοπολογία	Network topology Τοπολογία δικτύου
Manual restoration Χειροκίνητη αποκατάσταση βλαβών/σφαλμάτων	Self-healing Αυτόματη αποκατάσταση
Limited integration of renewable energies Περιορισμένη διείσδυση ΑΠΕ	Full integration of renewable energies Πλήρης ενσωμάτωση ΑΠΕ
Differing regulatory Διαφορετική λειτουργία δικτύων ανά κράτος	Cross-border trading Διεθνώς διασυνδεδεμένα και συγχρονισμένα δίκτυα
Outdated structure Παρωχημένες υποδομές	Flexible structure Ευέλικτες υποδομές
	Real-time operations Χειρισμοί σε πραγματικό χρόνο
	Active customers participation Ενεργή συμμετοχή των χρηστών ΗΕ
	Monitoring real time status Απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο της κατάστασης του δικτύου
	Customers own generation Αυτοπαραγωγή ΗΕ καταναλωτών
	Smart house control Έλεγχος έξυπνης κατοικίας
	Power storage Αποθήκευση ενέργειας

Πίνακας 3.2: Αντιπαραβολή χαρακτηριστικών του συμβατικού ΣΗΕ με το ΕΗΔ

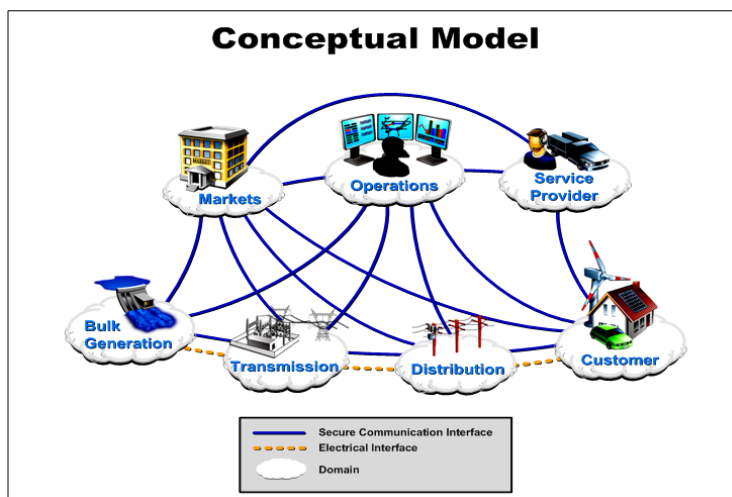
3.2.3 Οφέλη του Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου

Συγκεντρωτικά, τα οφέλη της μετάβασης από τα συμβατικά συστήματα ΗΕ στα ΕΗΔ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πολλούς τομείς. Τα οφέλη αυτά εντοπίζονται σε όλα τα τμήματα ενός συστήματος ΗΕ (παραγωγή, μεταφορά, διανομή, κατανάλωση, αγορά ΗΕ) και περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα

κεφάλαια. Οι τομείς που αναμένεται να βελτιωθούν λόγω μετάβασης στο ΕΗΔ είναι:

- Αξιοπιστία (Reliability)
 - ✓ Περιορίζεται ο κίνδυνος γενικής διακοπής (blackout) , ακόμα και στη περίπτωση όπου συμβεί γενική διακοπή ανιχνεύεται και απομονώνεται η διαταραχή με αποτέλεσμα την ταχεία αποκατάσταση του συστήματος. Ουσιαστικά ενισχύεται ο βαθμός της αδιάλειπτης παροχής ΗΕ.
 - ✓ Μείωση διακοπών ΗΕ (outages) και βελτίωση όλων των δεικτών αξιοπιστίας του ηλεκτρικού δικτύου (SAIDI, SAIFI , MAIDI, MAIFI).
- Αποδοτικότητα (efficiency)
 - ✓ Μείωση της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος λόγω ενσωμάτωσης μέσω αποθήκευσης ΗΕ.
 - ✓ Μείωση τόσο των απωλειών ΗΕ όσο και της ζήτησης αιχμής στα συστήματα μεταφοράς και στα δίκτυα διανομής μέσω του ελέγχου της ροής ισχύος.
 - ✓ Αύξηση της ικανότητας και δυναμικότητας του δικτύου στη μεταφορά και τη διανομή ΗΕ. Αυτό γίνεται μέσω της βέλτιστης αξιοποίησης των πόρων του υπάρχοντος δικτύου (increased capability) χωρίς την ανάγκη επέκτασής του.
 - ✓ Αποφόρτιση του δικτύου λόγω της μελλοντικής ευρείας ενσωμάτωσης των Ηλεκτρικών Οχημάτων (plug-in Electric Vehicles) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως πηγές.
- Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service)
 - ✓ Αύξηση της ευστάθειας (Stability) Διατήρηση συχνότητας και τάσης εντός των προκαθορισμένων ορίων και μείωση των διακυμάνσεων. Το όφελος αυτό καθίσταται ακόμα σημαντικότερο καθώς η αύξηση της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στο δίκτυο δημιουργεί διακυμάνσεις στη συχνότητα και την τάση των δικτύων διανομής.
 - ✓ Περιορισμός των αρμονικών παραμορφώσεων (harmonic distortion reduction).

- Περιβαλλοντικά οφέλη – αειφορία (environmental benefits – sustainability)
 - ✓ Μείωση εκπομπών CO₂ και λοιπών αερίων ρύπων .
 - ✓ Εξηλεκτρισμός της ενέργειας στους τομείς θέρμανσης και μεταφοράς.
 - ✓ Αποτροπή νέων επεμβάσεων στα φυσικά οικοσυστήματα που προκαλούνται από την εγκατάσταση νέων μεγάλων μονάδων παραγωγής ΗΕ .
- Οικονομικά οφέλη (Financial Benefits)
 - ✓ Καλύτερη αξιοποίηση των υφιστάμενων στοιχείων του δικτύου (Improved Asset Utilization), αναβολή νέων επενδύσεων στη παραγωγή ΗΕ και βελτιστοποιημένη λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής.
 - ✓ Εξοικονόμηση κεφαλαίων για επενδύσεις σε νέα δίκτυα μεταφοράς και διανομής (T&D capital savings) με αναβολές επενδύσεων σε υποδομές μεταφοράς – διανομής και με μείωση του κόστους βλαβών εξοπλισμού (λόγω μείωσης των βλαβών μειώνεται και το κόστος αποκατάστασης τους).
 - ✓ Περιορισμός της ρευματοκλοπής (Theft Reduction).
 - ✓ Μείωση δαπανών συντήρησης και λειτουργίας εγκαταστάσεων μεταφοράς και διανομής (T&D O&M Savings) μέσω της μείωσης του κόστους συντήρησης, του κόστους λειτουργίας και του κόστους ανάγνωσης και λειτουργίας των μετρητών.



Σχήμα 3.9: Εννοιολογική προσέγγιση Ευφυούς Δικτύου

3.2.4 Έξυπνοι μετρητές

Η ανάγκη παρακολούθησης της κατανάλωσης ΗΕ οδήγησε στη σχεδίαση και κατασκευή διατάξεων που έχουν τη δυνατότητα να μετρούν τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη (ηλεκτρικές τάσεις και ρεύματα) με την επιθυμητή ακρίβεια και να αξιοποιούν τις μετρήσεις αυτές προς υπολογισμό των υπολοίπων ηλεκτρικών μεγεθών της εγκατάστασης (π.χ. ενεργό και άεργη ισχύ). Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται έξυπνοι μετρητές ΗΕ (Smart Meters). Το γενικό χαρακτηριστικό των έξυπνων μετρητών είναι ότι πραγματοποιούν ψηφιακές μετρήσεις δειγματοληπτώντας τις τιμές ρεύματος και τάσης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ψηφιακά δεδομένα πραγματικού χρόνου διαθέσιμα προς επεξεργασία, αποθήκευση και μετάδοση.

Οι έξυπνοι μετρητές ΗΕ εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους υπάρχοντες συμβατικούς ηλεκτρομηχανικούς μετρητές. Οποιοσδήποτε μετρητής ΗΕς έχει τη δυνατότητα καταγραφής της καταναλισκόμενης ενέργειας. Ο έξυπνος μετρητής, όμως, εκτός του ότι μετρά με ακρίβεια την τάση και το ρεύμα, μπορεί μετά από κατάλληλη επεξεργασία να υπολογίζει και παρουσιάζει μεγέθη όπως η καταναλισκόμενη μέση ισχύς, ο συντελεστής ισχύος, οι αρμονικές τάσης και ρεύματος και άλλα μεγέθη που σχετίζονται με την ΗΕ που ενδεχομένως ενδιαφέρουν τους καταναλωτές και προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας [15].

3.2.5 Αναμενόμενα οφέλη από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών

Τα οφέλη που αναμένονται από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών είναι πολλά, αφορούν όλους τους τομείς της αγοράς ΗΕ και επηρεάζουν έμμεσα το κοινωνικό σύνολο. Τα κυριότερα από αυτά αναλύονται στη συνέχεια [16]:

- Οφέλη για τους καταναλωτές ΗΕ
- *Ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο*

Οι έξυπνοι μετρητές προσφέρουν στους καταναλωτές ΗΕ τη δυνατότητα να γνωρίζουν την πραγματική κατανάλωσή τους καθώς είναι σε θέση να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο (realtime metering). Σε αντίθεση με την παλαιότερη αναλογική τεχνολογία μέτρησης, οι έξυπνοι μετρητές είναι ψηφιακά συστήματα που μπορούν να μεταδίδουν περιοδικά (συνήθως ανά 15 min) πληροφορίες κατανάλωσης σε κατάλληλες πλατφόρμες επικοινωνίας (monitor συσκευής, οθόνη συστήματος οικιακής διαχείρισης ενέργειας, οθόνη υπολογιστή, εφαρμογή σε smartphone). Αυτές οι πλατφόρμες παρουσιάζουν σε ένα διαδραστικό φιλικό περιβάλλον γραφήματα με τη μέση κατανάλωση ΗΕ και το κόστος αυτής, τις πιθανές εκπομπές ρύπων και τις πολιτικές κατανάλωσης. Επομένως, οι καταναλωτές ΗΕ διαθέτουν την πλήρη εποπτεία του ενεργειακού τους προφίλ, αλλά και τη δυνατότητα μεταβολής του. Μέσω της διαρκούς πληροφόρησης και με χρήση κατάλληλων ICT εργαλείων, οι καταναλωτές θα είναι σε θέση να μειώσουν το ενεργειακό τους αποτύπωμα.

- *Δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας*

Εκτός από την πραγματοποίηση μετρήσεων και την αποστολή δεδομένων, οι έξυπνοι μετρητές διαθέτουν και τη δυνατότητα λήψης πληροφοριών/εντολών και αποτελούν την πύλη επικοινωνίας καταναλωτών ΗΕ με τους προμηθευτές ΗΕ. Κάθε καταναλωτής μπορεί να ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο από τον προμηθευτή του για την τιμή χρέωσης της kWh, για ενδεχόμενες προσφορές και εκπτώσεις, για θέματα ασφάλειας (έκτακτες διακοπές παροχής). Αντίστοιχα, και ο καταναλωτής είναι σε θέση να επικοινωνεί με τον προμηθευτή, αποστέλλοντας π.χ. αιτήσεις, παράπονα, ερωτήσεις.

- *Δυνατότητα λήψης εντολών*

Ο έξυπνος μετρητής μπορεί μέσω της πλατφόρμας επικοινωνίας να λάβει και αποθηκεύσει εντολές. Κάθε καταναλωτής ΗΕ, δηλαδή, όχι μόνο γνωρίζει το ενεργειακό του προφίλ, αλλά μπορεί να μεταβάλει, να προγραμματίσει και να κατευθύνει την κατανάλωση προς το συμφέρον του. Μπορεί, για παράδειγμα, να προγραμματίσει τις συσκευές του (π.χ. πλυντήριο, κλιματιστικά, εγκατάσταση φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου) να λειτουργούν οικονομικά μεταθέτοντας την

κατανάλωση ΗΕ σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Αυτή η δυνατότητα είναι κρίσιμη σε συνθήκες απελευθερωμένης αγοράς, όπου οι προμηθευτές ΗΕ προσφέρουν ευέλικτες διαδικασίες τιμολόγησης παρόμοιες με το ισχύον νυχτερινό τιμολόγιο, αλλά με την πρόσθετη δυνατότητα δυναμικής μεταβολής.

- *Δυνατότητα απομακρυσμένης εκκίνησης και διακοπής της σύνδεσης με το ΗΔ*

Ο καταναλωτής μπορεί κατά βούληση να ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τη σύνδεση, τόσο για λόγους ασφάλειας όσο και για λόγους εξοικονόμησης ΗΕ.

- *Ευκολότερη μετάβαση σε άλλο προμηθευτή ΗΕ*

Με τους έξυπνους μετρητές παρέχεται η δυνατότητα στους χρήστες να αλλάζουν πάροχο, με παρόμοιες διαδικασίες όπως αυτές της παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Αυτό θα συμβάλει αποφασιστικά στην ενίσχυση του ανταγωνισμού μεταξύ των προμηθευτών, άρα και στη μεγιστοποίηση του οφέλους για τους καταναλωτές ΗΕ.

- *Διαθεσιμότητα προηγμένων τιμολογιακών πολιτικών εκ μέρους των προμηθευτών ΗΕ*

Κατά πρώτον, καταργείται η κατ' εκτίμηση χρέωση της ΗΕ. Μέχρι τώρα, η χρέωση γίνεται για την ηλεκτρική ενέργεια που πιθανότατα έχει καταναλωθεί σε ένα δίμηνο μέχρι ο καταμετρητής του παρόχου να προσδιορίσει την ακριβή κατανάλωση. Ο νέος τρόπος τιμολόγησης επί πραγματοποιηθείσας κατανάλωσης ΗΕ θα προσφέρει την ευελιξία και τις προσφορές που προαναφέρθηκαν. Επιπλέον, στα πρότυπα της τηλεπικοινωνιακής αγοράς θα διατίθενται και προπληρωμένα προγράμματα που θα καθιστούν δυνατή την προπληρωμένη κατανάλωση ΗΕ με ελαχιστοποίηση των πάγιων χρεώσεων. Ο καταναλωτής θα γνωρίζει την ΗΕ που έχει καταναλώσει και αυτήν που του απομένει. Αυτός ο τρόπος χρέωσης θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε εξοχικές κατοικίες.

- *Δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας του ηλεκτρικού ρεύματος*

Οι έξυπνοι μετρητές ενσωματώνουν διατάξεις που επιτρέπουν τον αυτόματο έλεγχο και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού ρεύματος. Παρέχουν

λειτουργίες εξομάλυνσης της τάσης/συχνότητας και προστασίας από υπερτάσεις και υπερεντάσεις.

- *Συμβολή στην αύξηση της διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής ΗΕ στο δίκτυο μίας οικίας ή μιας επιχείρησης*

Με τους έξυπνους μετρητές γίνεται ευκολότερη η ενσωμάτωση μικρών μονάδων παραγωγής ΗΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι μικρές ανεμογεννήτριες, σε ένα ενιαίο ενεργειακό σύστημα μικρής κλίμακας. Στο σύστημα αυτό θα ρυθμίζεται η κατανάλωση, η παραγωγή από ΑΠΕ, η αποθήκευση και η ανάκτηση ενέργειας από μέσα αποθήκευσης (ηλεκτρικό αυτοκίνητο, συστοιχία συσσωρευτών), κατά βέλτιστο τρόπο ως προς όφελος του καταναλωτή.

➤ **Οφέλη για τους προμηθευτές ΗΕ**

- *Ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο*

Ο έξυπνος μετρητής αποστέλλει περιοδικά (συνήθως ανά 15 min) κρυπτογραφημένα δεδομένα για την κατανάλωση ΗΕ σε εξουσιοδοτημένα Κέντρα Λειτουργίας, παρέχοντας στον προμηθευτή ΗΕ τη δυνατότητα να γνωρίζει σε πραγματικό χρόνο το φορτίο του δικτύου που διαχειρίζεται.

- *Παραγωγή ψηφιακών δεδομένων*

Οι έξυπνοι μετρητές παράγουν ψηφιακά δεδομένα που μπορούν να αποθηκευθούν, να μεταδοθούν με αξιοπιστία και ασφάλεια, να ανακτηθούν, να υποστούν επεξεργασία και ανάλυση πολλών επιπέδων. Αυτά τα χαρακτηριστικά των ψηφιακών δεδομένων καθιστούν εφικτή την εφαρμογή πολιτικών ανταπόκρισης στη ζήτηση (Demand Response) και διαχείρισης του φορτίου (Load Management).

Οι προμηθευτές ΗΕ μπορεί να δημιουργήσουν βάσεις δεδομένων και με κατάλληλους αλγόριθμους επεξεργασίας της πληροφορίας να αποκτήσουν τη δυνατότητα αξιόπιστης πρόβλεψης των αναγκών των πελατών τους, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, και να αγοράσει τα αντίστοιχα απαιτούμενα μεγέθη ΗΕ που θα απαιτηθούν, με ικανοποιητική ακρίβεια. Ο

περιορισμός του επιπλέον κόστους λόγω της ακριβέστερης εκτίμησης της ζήτησης ΗΕ έχει άμεσο αντίκτυπο και στην τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές.

- *Αμφίδρομη επικοινωνία*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο έξυπνος μετρητής αποτελεί την πύλη επικοινωνίας του προμηθευτή και του καταναλωτή. Ο προμηθευτής ενημερώνει επί θεμάτων τιμολογίου, νέων προϊόντων, προσφορών και ασφάλειας και δέχεται την αντίστοιχη ανάδραση του καταναλωτή.

- *Γίνεται εφικτή η ευελιξία στην τιμολόγηση και η προσφορά νέων προϊόντων στους πελάτες*

Οι προμηθευτές αποκτούν τη δυνατότητα να προσφέρουν εξατομικευμένα προϊόντα που ανταποκρίνονται στις καταναλωτικές ανάγκες και συνήθειες των καταναλωτών και να αποζημιώνονται άμεσα. Η άμεση πληρωμή της καταναλισκόμενης ενέργειας από τους πελάτες προσφέρει την αναγκαία ρευστότητα στους προμηθευτές ώστε να μη χρειάζεται να καταφεύγουν σε δανεισμό για την προμήθεια ΗΕ από την χονδρεμπορική αγορά. Η αποδοτικότερη χρήση των κεφαλαίων και η αποφυγή πληρωμής τόκων δανεισμού εκ μέρους των προμηθευτών έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών για τον τελικό καταναλωτή.

- *Απομακρυσμένη εκκίνηση και διακοπή της σύνδεσης*

Μέσω των έξυπνων μετρητών παρέχεται η δυνατότητα στον πάροχο να εκκινεί και να διακόπτει την παροχή για λόγους ασφάλειας και προστασίας του δικτύου του καταναλωτή. Επιπλέον, σε περιπτώσεις μη τήρησης των υποχρεώσεων εκ μέρους κάποιου, μπορεί να διακόψει αμέσως την παροχή ΗΕ αλλά και να την αποκαταστήσει τάχιστα, εφόσον διευθετηθούν οι μεταξύ τους διαφορές.

- *Έγκαιρος εντοπισμός και επέμβαση σε περίπτωση κλοπής*

Στις περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις που συλλέγονται από τους μετρητές των καταναλωτών ΗΕ βρίσκονται σε αναντιστοιχία με τις ενδείξεις των μετρητών

παρεχόμενης ενέργειας του δικτύου διανομής, ο προμηθευτής ΗΕ έχει τη δυνατότητα να εντοπίσει ενδεχόμενη κλοπή ηλεκτρικής ενέργειας και να διακόψει αμέσως την παροχή.

- *Εξάλειψη της δαπάνης της συμβατικής διαδικασίας καταμέτρησης ΗΕ*

Με την εγκατάσταση των έξυπνων μετρητών, ο συμβατικός τρόπος καταμέτρησης της καταναλωθείσας ΗΕ από υπαλλήλους του παρόχου καταργείται. Παράλληλα, εξαλείφονται και οι περιπτώσεις ανθρώπινου λάθους κατά την καταγραφή που οδηγούν σε λανθασμένες χρεώσεις και προκαλούν προβλήματα στις σχέσεις μεταξύ προμηθευτών και καταναλωτών.

- *Οφέλη για το διαχειριστή του Δικτύου Διανομής*

- *Βελτίωση ποιότητας ρεύματος*

Ο διαχειριστής του συστήματος συλλέγοντας από τους έξυπνους μετρητές πληροφορίες για την ποιότητα του ρεύματος που προσφέρει, και σε συνδυασμό με τις μετρήσεις από τις άλλες μετρητικές διατάξεις που είναι εγκατεστημένες στο δίκτυο, μπορεί να ενημερωθεί, να εντοπίσει και να επέμβει άμεσα στα σημεία του δικτύου που αντιμετωπίζουν προβλήματα ως προς την τάση και τη συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (π.χ. από σφάλματα ή από χρήση βιομηχανικού εξοπλισμού). Ο διαχειριστής του συστήματος έχει, επίσης, τη δυνατότητα να θέσει σε λειτουργία διατάξεις εξομάλυνσης κατά εστιασμένο τρόπο με άμεσα αποτελέσματα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αποφεύγει πιθανές αποζημιώσεις σε πελάτες για καταστροφή μηχανημάτων και εξοπλισμού.

- *Πρόληψη σφαλμάτων και διακοπών ή άμεση αποκατάστασή τους*

Διαθέτοντας τη δυνατότητα άμεσης πληροφόρησης ο διαχειριστής μπορεί να προλαμβάνει σφάλματα, διακοπές και καταστροφές εξοπλισμού. Στην περίπτωση όπου τελικώς υπάρξουν βλάβες, επιταχύνεται ο εντοπισμός και η αποκατάσταση τους.

- *Οφέλη για το κοινωνικό σύνολο*

Στο σημείο αυτό είναι άξιο αναφοράς το γεγονός ότι οι έξυπνοι μετρητές αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία για την υλοποίηση του Έξυπνου Δικτύου ΗΕ (Smart Grid). Αυτό έχει ως απόρροια την έμμεση συμβολή των έξυπνων μετρητών στα ακόλουθα σημαντικά οφέλη που θα προκύψουν από την υλοποίηση του έξυπνου δικτύου.

- *Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας*, λόγω της βελτίωσης της καταναλωτικής συμπεριφοράς των καταναλωτών (όπως επιβεβαιώνεται από τα μέχρι σήμερα στοιχεία από την εφαρμογή σε άλλες χώρες, κυρίως στις ΗΠΑ).

- *Εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου του συστήματος*

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εξαγωγή και εύκολη διαχείριση και επεξεργασία των πληροφοριών κατανάλωσης ΗΕ παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής πολιτικών ανταπόκρισης στη ζήτηση (D-R) σε μεγάλη κλίμακα. Ως εκ τούτου, καθίσταται εφικτή η μετάθεση μέρους της κατανάλωσης ΗΕ σε περιόδους χαμηλότερης ζήτησης (load shifting) και η εξομάλυνση των μεγάλου κόστους αιχμών της καμπύλης φορτίου (peaks having). Σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση ΗΕ, επιτυγχάνεται μείωση της ανάγκης για επενδύσεις σε νέες μονάδες παραγωγής ΗΕ και σε επεκτάσεις του συστήματος μεταφοράς και διανομής για να ανταπεξέλθουν στη ζήτηση αιχμής.

- *Μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων*

Διαθέτοντας πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο, ελαχιστοποιούνται η παραγωγή πλεονάζουσας ΗΕ και οι απώλειες μεταφοράς και διανομής, και αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ στην παραγωγή ΗΕ. Το άμεσο αποτέλεσμα είναι μειωμένες εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα από τις θερμικές μονάδες.

- *Ευκολότερη εφαρμογή κοινωνικής πολιτικής*

Με την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών διευκολύνονται και επιταχύνονται οι διαδικασίες εφαρμογής κοινωνικής πολιτικής σε ευπαθείς ομάδες του πληθυσμού. Για παράδειγμα, αν κάποιος καταναλωτής έχει αυξημένες ανάγκες σε ενέργεια λόγω ασθένειας μπορεί άμεσα να επιδοτηθεί και να συνάψει ειδική συμφωνία με τον πάροχο [11].

3.2.6 Εφαρμογές που προϋποθέτουν την ύπαρξη έξυπνων μετρητών

Λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτουν οι έξυπνοι μετρητές, προσφέρουν τη δυνατότητα υλοποίησης σημαντικών εφαρμογών αυτοματισμού και έξυπνης διαχείρισης των συστημάτων ενός κτιρίου ή μιας εγκατάστασης. Οι δυνατότητες των έξυπνων μετρητών συμβάλλουν σημαντικά στην αποδοτική διαχείριση της ΗΕ μίας οικίας/επιχείρησης λόγω της συλλογής δεδομένων κατανάλωσης ΗΕ και της δυνατότητας αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ των διαχειριστών ενός κτιρίου και των προμηθευτών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κυριότερες από αυτές τις εφαρμογές [28].

- Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας για Κτίρια (Energy Management System (EMS) for buildings)

Η εγκατάσταση ενός συστήματος ενεργειακής διαχείρισης (Energy Management System–EMS) αποσκοπεί στην επιτήρηση ή και τον αυτόματο έλεγχο των ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών εγκαταστάσεων ενός κτιρίου και καθιστά δυνατή την ανάλυση δεδομένων και τη ρύθμιση παραμέτρων των εγκαταστάσεων από ένα κέντρο ελέγχου. Παράλληλα, προσφέρει την παρακολούθηση και καταγραφή της ενεργειακής συμπεριφοράς των συστημάτων που είναι εγκατεστημένα στο κτίριο, καθώς και τη δημιουργία αρχείου με στατιστικά στοιχεία.

Ένα σύστημα EMS αποτελείται από ένα Κεντρικό Σταθμό Παρακολούθησης και Ελέγχου, τα αισθητήρια όργανα, τις διατάξεις εκτέλεσης εντολών, καθώς και κατάλληλη τηλεπικοινωνιακή υποδομή. Ο προγραμματισμός και η διαχείριση του συστήματος EMS γίνεται μέσω του κεντρικού σταθμού ελέγχου.

- Συστήματα Απεικόνισης και Εύκολης Πρόσβασης σε πληροφορίες ΗΕ (In-Home Displays and Access to Energy Info (IHD))

Καθώς το ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο (ΕΗΔ) εξελίσσεται, αναδύονται και νέες τεχνολογίες συλλογής πληροφοριών. Μια κατηγορία έξυπνων συσκευών που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα In-Home-Displays (IHDs). Τα IHDs παρέχουν

βασικές πληροφορίες, όπως παρακολούθηση κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, ωριαίο κόστος ΗΕ και ωριαία κατανάλωση, αξιοποιώντας κατάλληλα τα δεδομένα των έξυπνων μετρητών. Ορισμένα IHDs είναι σε θέση να παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες, όπως καταγραφή του ενεργειακού προφίλ το τελευταίο 24ωρο ή ακόμα τον τελευταίο μήνα, πρόβλεψη κόστους και κατανάλωσης, μηνιαία αιχμή, εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες κλπ.

Με την ανάπτυξη και της τεχνολογίας αναδεικνύονται και νέοι εναλλακτικοί τρόποι παροχής πληροφοριών προς τους καταναλωτές. Συσκευές που είναι ήδη σε ευρεία χρήση, όπως laptop, smartphone, PC, tablets, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν προς το σκοπό αυτό.

- Εφαρμογές και Συσκευές Άμεσης Σύνδεσης στο Δίκτυο EMS (Grid-Ready Appliances and Devices (DR-Ready))

Η απαίτηση για την υλοποίηση έξυπνου δικτύου οδηγεί σταδιακά τις βιομηχανίες ηλεκτρικών συσκευών στη σχεδίαση προϊόντων που θα ενσωματώνουν τεχνολογίες επικοινωνίας και ελέγχου (DR-Ready). Στις μέχρι τώρα υλοποιήσεις έξυπνων δικτύων απαιτείται ειδικός εξοπλισμός (έξυπνοι ρευματοδότες) στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση, ώστε να είναι σε θέση οι ηλεκτρικές συσκευές να ενσωματωθούν στο συνολικό σύστημα διαχείρισης της ενέργειας. Το πρόσθετο αυτό κόστος αναμένεται να μειωθεί σημαντικά τα αμέσως επόμενα χρόνια με την ευρεία διάθεση των DR-Ready συσκευών. Επιπλέον, τόσο ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός όσο και το κόστος των εξαρτημάτων θα παρέχονται σε χαμηλότερες τιμές, όπως συμβαίνει με κάθε νέα τεχνολογία.

- Ανοικτό Σύστημα Αυτόματης Απόκρισης Ζήτησης (Open Automated Demand Response (open-ADR))

Ένα σύστημα αυτόματης απόκρισης της ζήτησης (Automated demand response - ADR) αξιοποιεί τα δεδομένα που προέρχονται από προηγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας κτιρίων. Η διακίνηση των δεδομένων αυτών μπορεί να γίνει είτε μέσω του Internet είτε με κάποια άλλη μορφή τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης. Τα σημερινά συστήματα DR δεν παρέχουν αυτή τη δυνατότητα. Η ανάγκη για

Άμεση επικοινωνία όλων των συσκευών και διατάξεων σε πραγματικό χρόνο (machine-to-machine (M2M) communication) οδηγούν στην ανάπτυξη ανοικτών συστημάτων αυτόματης διαχείρισης ζήτησης (Open-ADR). Τέτοια συστήματα διαχείρισης ενέργειας κτιρίων είναι προγραμματισμένα να μειώνουν το στιγμιαίο συνολικό φορτίο μιας κτιριακής εγκατάστασης, με βάση τα σήματα ελέγχου που θα δέχονται. Θα μπορούν, επίσης, να αποστέλλουν στους προμηθευτές ΗΕ πληροφορίες κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο.

Προϋπόθεση για να χρησιμοποιηθεί ένα open-ADR είναι να διαθέτουν τα κτίρια προηγμένα συστήματα EMS ή να μισθώνουν υπηρεσίες EMS από κάποιον πάροχο.

Κεφάλαιο 4:

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

4.1 Περιγραφή Μικροδικτύου

4.1.1 Εισαγωγή

Η πλέον προτιμώμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας από τους καταναλωτές, ιδιαίτερα σε ηλιόλουστες περιοχές του κόσμου, είναι η ηλιακή ενέργεια [33]. Λόγω της εύκολης εγκατάστασης και των μηδαμινών αναγκών συντήρησης, τα οικιακά ΦΒ συστήματα είναι πολύ διαδεδομένα σε παγκόσμιο επίπεδο. Παρέχουν μια τοπική πηγή ενέργειας για τους καταναλωτές, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους, αποφεύγοντας επίσης τις απώλειες μεταφοράς.

Η διαστασιολόγηση των διαφόρων στοιχείων, όπως η εγκατεστημένη ισχύς των ΦΒ πάνελ, γίνεται κατά κανόνα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη [34-35].

Συνήθως αυτά τα οικιακά ΦΒ πάνελ οροφής, συνδέονται με το δίκτυο χρησιμοποιώντας πολλαπλούς αντιστροφείς, κατάσταση που συχνά δημιουργεί προβλήματα εμφάνισης «αρμονικών» στο δίκτυο. Επιπλέον, υπάρχει μία σημαντική απώλεια ενέργειας εξαιτίας των πολλαπλών μετατροπών ισχύος, από DC που παράγεται στα ηλιακά ΦΒ πάνελ, σε AC που μεταφέρεται στο δίκτυο διανομής και πάλι, κατά πάσα πιθανότητα, σε DC, εντός των οικιών για την χρησιμοποίηση της από τις διάφορες οικιακές συσκευές.

Πρέπει να σημειωθεί πως τα τελευταία χρόνια, με την μεγάλη αύξηση της δημοτικότητας των ηλεκτρονικών ισχύος, οι περισσότερες συσκευές χρησιμοποιούν πλέον DC ως πηγή παροχής ισχύος για την λειτουργία τους [36]. Συχνά αναγκάζονται να χρησιμοποιήσουν φθηνούς και μη αποτελεσματικούς μηχανισμούς ανόρθωσης για να λάβουν έτσι την απαιτούμενη DC ισχύ για την λειτουργία τους [37]. Η DC μορφή ενέργειας χρησιμοποιείται σε συσκευές, όπως: λαμπτήρες LED, τηλεοράσεις, φορτιστές κινητών συσκευών, υπολογιστές,

συστήματα αναπαραγωγής ήχου, κλπ. Βασισμένη σε όλα τα παραπάνω, η παρούσα εργασία προτείνει την μείωση των πολλαπλών μετατροπών και την εναλλακτική εφαρμογή ενός υβριδικού AC/DC μικροδικτύου για την κάλυψη αυτών των αναγκών.

Με το υβριδικό AC/DC μικροδίκτυο αυξάνεται η αξιοπιστία, καθώς αυτό αποκτά διπλό δίκτυο διανομής. Για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συνολικού συστήματος είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός αλγορίθμου ελέγχου της ροής ισχύος τόσο από την πλευρά του χρήστη, όσο και από την πλευρά του διαχειριστή του δικτύου.

Σε ένα βαθμό ή ιδέα για τον αλγόριθμο ελέγχου, αλλά και για άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου προσομοίωσης αντλήθηκε από δημοσίευση του Eindhoven University of Technology [17]. Η εφαρμογή του συστήματος και ο αλγόριθμος ελέγχου υλοποιήθηκαν με χρήση του πακέτου λογισμικού Matlab [38].

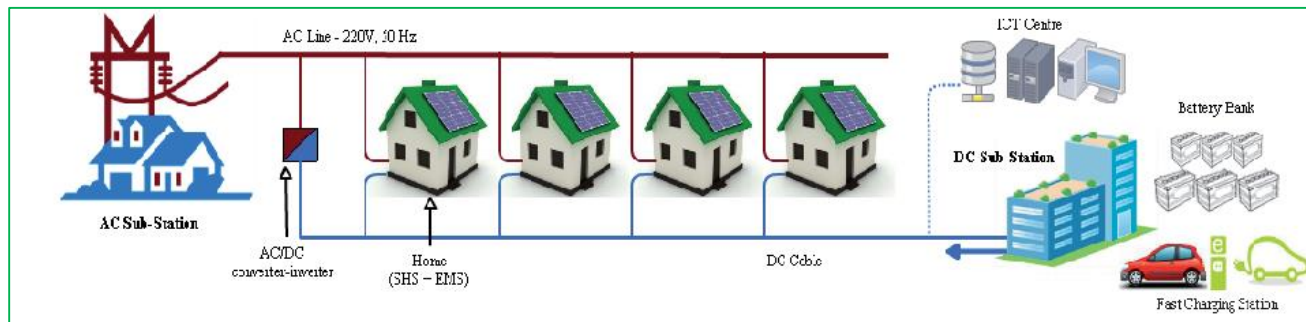
Ένα σημαντικό θέμα που εξετάζεται, είναι ο ρόλος των χρηστών στην λειτουργία του μικροδικτύου. Με την εγκατάσταση των ηλιακών ΦΒ συστημάτων, στις στέγες των σπιτιών, οι χρήστες συμμετέχουν στην παραγωγή ενέργειας στο σύστημα. Είναι λοιπόν σημαντικό να τους δοθεί η δυνατότητα ελέγχου της χρήσης της ενέργειας που οι ίδιοι παράγουν, καθώς επίσης και να τους δοθεί η δυνατότητα να επιτελέσουν ένα μικρό έλεγχο επί του δικτύου [39]. Αυτό μπορεί να γίνει αντικείμενο διαχείρισης μέσω ενός τοπικού συστήματος σε κάθε κόμβο ή οικία που συμμετέχει στο σχηματισμό του δικτύου. Αυτή η δυνατότητα συνδυαζόμενη με τα εγκατεστημένα ΦΒ πάνελ μπορεί να ονομαστεί ως «Οικιακό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας» (“Home Energy Management System” - HEMS), και περιγράφεται με περισσότερη λεπτομέρεια στην συνέχεια της εργασίας.

Εκτός από το HEMS, στο μικροδίκτυο λειτουργεί ένα ακόμα σύστημα διαχείρισης ενέργειας, συνολικά για όλους τους καταναλωτές. Το σύστημα αυτό ονομάζεται «Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας του Διαχειριστή του Δικτύου» (“Network Energy Management System” - NEMS), και είναι επιφορτισμένο με την εποπτεία και τον έλεγχο του συνολικού συστήματος και όχι της κάθε οικίας τοπικά. Στις επόμενες

παραγράφους θα δούμε περαιτέρω λεπτομέρειες για τον τρόπο λειτουργίας του NEMS.

4.1.2 Σχεδιασμός Συστήματος

Το σύστημα αποτελείται από το υπάρχον AC δίκτυο το οποίο συζεύγνυται με το DC δίκτυο διανομής, χρησιμοποιώντας μετατροπείς AC/DC. Το DC δίκτυο συνδέεται σε ένα κέντρο διανομής, το οποίο φιλοξενεί το κοινό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση συσσωρευτών. Και τα δύο δίκτυα, AC και DC, συνδέονται με τις οικίες του μικροδικτύου, μέσω του HEMS. Το HEMS αποτελεί τον κόμβο, ο οποίος συνδέει τα ηλιακά οικιακά ΦΒ πάνελ με το δίκτυο, δίνοντας την δυνατότητα στον χρήστη να επεμβαίνει επί του συστήματος ισχύος. Το μικροδίκτυο ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα των DC τεχνολογιών, κάνοντας το σύστημα πιο αξιόπιστο και ευσταθές, παρέχοντας παράλληλα ουσιαστικά ένα διπλό δίκτυο διανομής (AC/DC). Η άποψη ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.1: Προτεινόμενη έποψη συστήματος με χρήση AC-DC υβριδικού συστήματος διανομής

4.1.3 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας –HEMS/NEMS

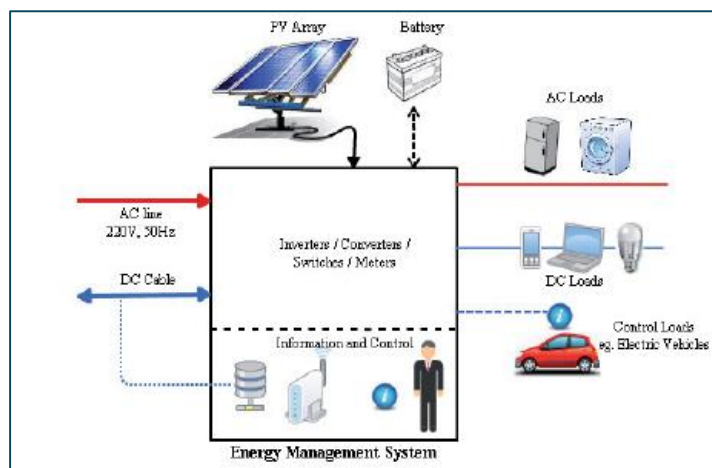
Η εγκατάσταση ενός συστήματος ενεργειακής διαχείρισης (Energy Management System–EMS) αποσκοπεί στην επιτήρηση και τον αυτόματο έλεγχο των ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών εγκαταστάσεων ενός κτιρίου και καθιστά

δυνατή την ανάλυση δεδομένων και τη ρύθμιση παραμέτρων των εγκαταστάσεων από ένα κέντρο ελέγχου. Παράλληλα, προσφέρει την παρακολούθηση και καταγραφή της ενεργειακής συμπεριφοράς των συστημάτων που είναι εγκατεστημένα στο κτίριο, καθώς και τη δημιουργία αρχείου με στατιστικά στοιχεία.

Ένα σύστημα EMS αποτελείται από ένα Κεντρικό Σταθμό Παρακολούθησης και Ελέγχου, τα αισθητήρια όργανα, τις διατάξεις εκτέλεσης εντολών, καθώς και κατάλληλη τηλεπικοινωνιακή υποδομή. Ο προγραμματισμός και η διαχείριση του συστήματος EMS γίνεται μέσω του κεντρικού σταθμού ελέγχου.

Στο υπό σχεδιασμό μικροδίκτυο διακρίνουμε δύο οντότητες με τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

Η οντότητα HEMS σε αυτήν την εργασία, αναφέρεται ως «Οικιακό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας» και αποτελεί ένα σύστημα το οποίο ενεργεί ως εργαλείο διασύνδεσης ανάμεσα σε διαφορετικά τμήματα του οικιακού δικτύου. Τα οικιακά ΦΒ πάνελ, συνδέονται απευθείας σε αυτήν την οντότητα. Οι γραμμές διασύνδεσης των AC και DC δικτύων κατευθύνονται στα αντίστοιχα AC και DC οικιακά φορτία διαμέσου της οντότητας HEMS. Ένας επιπρόσθετος συσσωρευτής υποστήριξης μπορεί επίσης να συνδεθεί σε αυτήν την τοπολογία, καθώς και διάφορα «έξυπνα φορτία», όπως το ηλιακό αυτοκίνητο (Σχήμα 4.2):



Σχήμα 4.2: Αρχιτεκτονική του Οικιακού Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας

Πέρα από το γεγονός ότι αποτελεί ένα μηχανισμό διασύνδεσης για την κάθε οικία, το HEMS έχει την ικανότητα να μετατρέπει την ισχύ από AC σε DC όταν και όποτε χρειαστεί κάτι τέτοιο. Είναι επιπλέον εφοδιασμένο με DC-DC μετατροπείς. Τα επίπεδα τάσης του DC δικτύου διανομής είναι κατά κανόνα υψηλότερα από τα αντίστοιχα οικιακά επίπεδα, καθώς υψηλότερο επίπεδο τάσης επιτρέπει την καλύτερη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις [40].

Η οντότητα HEMS αποτελεί επίσης το κέντρο ελέγχου και διαχείρισης πληροφορίας για τα όρια της επικράτειας μίας οικίας. Συλλέγει και παρακολουθεί την κατάσταση του συστήματος και επιτρέπει στον χρήστη να λάβει αποφάσεις βασισμένες σε πληροφορίες για τις τρέχουσες καταναλώσεις ισχύος. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την λειτουργία του οικιακού δικτύου μέσω ενός προκαθορισμένου συνόλου εντολών που βασίζονται στην τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και στις οικιακές ενεργειακές απαιτήσεις. Η προσφερόμενη λειτουργικότητα μπορεί επιπλέον να βελτιωθεί, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από παραμέτρους όπως το κόστος, η πρόβλεψη του καιρού, η πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών των φορτίων της οικίας, κλπ, χρησιμοποιώντας για τον σκοπό αυτό πιο σύνθετους αλγορίθμους και ειδικά σήματα ελέγχου. Το τελευταίο χαρακτηριστικό διασφαλίζει την βέλτιστη λειτουργικότητα του δικτύου και ενδυναμώνει τον ρόλο του χρήστη στον χειρισμό των ενεργειακών του αναγκών της οικίας.

Η οντότητα NEMS αναφέρεται ως «Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας Δικτύου» και αποτελεί ένα σύστημα το οποίο ενεργεί ως εργαλείο διασύνδεσης ανάμεσα στον AC και στο DC ζυγό του μικροδικτύου καθώς και στη συστοιχία των συσσωρευτών. Το NEMS είναι επιφορτισμένο με τη συλλογή και την καταγραφή των δεδομένων ζήτησης και παραγωγής συνολικά στο μικροδίκτυο και είναι αυτό που ελέγχει τις ροές ισχύος στους ζυγούς. Είναι εφοδιασμένο με ανορθωτές/αντιστροφείς ικανούς για μετατροπή της AC ισχύος σε DC και αντίστροφα και με βάση τον αλγόριθμο που υλοποιεί, και στον οποίο θα αναφερθούμε στη συνέχεια, επιτρέπει στο διαχειριστή του δικτύου να λάβει αποφάσεις που θα βελτιώσουν τη λειτουργία του. Η κύρια ευθύνη του διαχειριστή του δικτύου είναι να αποφασίζει τα ελάχιστα και τα μέγιστα επίπεδα ισχύος που το ανάντη δίκτυο είναι διατεθειμένο να διαθέσει

προς το μικροδίκτυο. Η απόφαση αυτή του διαχειριστή του δικτύου μπορεί να βασιστεί σε πιθανοτικά μοντέλα που υπάρχουν και αφορούν την κατανάλωση των χρηστών ανά κλάση και εποχή καθώς και την παραγωγή από τα ΦΒ πάνελ με βάση τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν.

Στη συγκεκριμένη εργασία ο αλγόριθμος του NEMS , σχεδιάστηκε με βάση τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ανάντη δικτύου, αλλά σε κάποια μελλοντική προσθήκη επιπλέον παράμετροι όπως το κόστος θα μπορούσαν να ενσωματωθούν.

Αξίζει να σημειωθεί πως τόσο το HEMS όσο και το NEMS, έχουν τη δυνατότητα να παράξουν σήματα «συναγερμού», ειδοποιώντας με τον τρόπο αυτό τον οικιακό χρήστη ή το διαχειριστή του δικτύου αντίστοιχα , σε περιπτώσεις που αυτό απαιτείται, όπως για παράδειγμα όταν το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών είναι αρκετά μικρό και η εξωτερικά από το μικροδίκτυο παρεχόμενη ισχύς δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών των οικιών.

4.1.4 Η διανομή DC ισχύος στο μικροδίκτυο

Το δίκτυο DC βοηθάει στην μείωση των ενεργειακών απωλειών που οφείλονται σε μετατροπές ενέργειας από AC σε DC και αντίστροφα αυξάνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος. Επιπρόσθετα, παρέχει ένα δίκτυο υποδομής για το μικροδίκτυο μέσα στο υπάρχον σύστημα για ανταλλαγή ενέργειας. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης των οικιών με τους συσσωρευτές οι οποίοι επίσης λειτουργούν με DC, μειώνοντας τις ανάγκες διασύνδεσης και μετατροπής ενέργειας από το AC δίκτυο.

Ένα δίκτυο DC είναι ευκολότερο να ελεγχθεί και να παρακολουθηθεί σε σχέση με το AC, καθώς στην λειτουργία του δεν υπεισέρχονται αρμονικές συχνότητες [41]. Οι γραμμές μεταφοράς του DC δικτύου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία και μετάδοση δεδομένων παρέχοντας ασφαλή κανάλια επικοινωνίας εντός του δικτύου [42].

Τα δίκτυα DC είναι ήδη σε φάση εφαρμογής σε διάφορες πιλοτικές περιοχές. Αρκετά πλοία καθώς και υποβρύχια τροφοδοτούνται αποκλειστικά χρησιμοποιώντας δίκτυα DC. Διάφορες κοινότητες και οικισμοί που βρίσκονται απομονωμένοι από το AC δίκτυο ισχύος έχουν αρχίσει επίσης να χρησιμοποιούν τις DC τεχνολογίες. Επίσης, σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, παρατηρείται πως σε πολλά κέντρα συλλογής και διαχείρισης δεδομένων η μετάβαση σε DC λειτουργία, θα μπορούσε να είναι μέχρι και 20% πιο αποδοτική από την χρήση της αντίστοιχης AC ενέργειας [44].

Το DC δίκτυο συνδέεται με το AC δίκτυο διαμέσου μίας συσκευής ανορθωτή-αντιστροφέα, η οποία είναι ικανή για αμφίδρομη μετατροπή ισχύος. Αυτό καθιστά το δίκτυο πιο ευσταθές και αξιόπιστο ως προς την λειτουργία του.

Το επαγόμενο κόστος από το επιπρόσθετο DC δίκτυο, αποτελεί ένα ανοικτό αντικείμενο έρευνας και θα πρέπει να συνυπολογιστεί σε περίπτωση ρεαλιστικής πραγμάτωσης του μικροδικτύου. Οι διαδικασίες τυποποίησης των επιπέδων της τάσης λειτουργίας των DC συσκευών, οι μηχανισμοί ασφαλείας και η μεγάλης κλίμακας εφαρμογή αυτών των ιδεών, αποτελούν ουσιαστικά εμπόδια για την αποδοχή των DC δικτύων σε μαζικό επίπεδο [45].

4.1.5 Ο DC υποσταθμός και το κοινό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Το DC δίκτυο συνδέει τις οικίες με το DC υποσταθμό. Αυτός συμπεριλαμβάνει το σύστημα κοινής αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ισχύος από τα ΦΒ συστήματα κατά τις χρονικές φάσεις της ημέρας, προσφέροντας την δυνατότητα για χρήση αυτής κατά τις νυχτερινές ώρες. Ο DC υποσταθμός μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως γρήγορος σταθμός φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα. Αυτή η εφαρμογή θα μπορούσε να διοχετεύσει αποδοτικά ενέργεια, μειώνοντας το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών σε περίπτωση που αυτοί είναι κοντά στην πλήρη φόρτιση.

Οι υποσταθμοί επίσης μπορούν να λειτουργήσουν ως κέντρα συλλογής πληροφοριών και διαχείρισης δεδομένων που αφορούν το DC δίκτυο. Ο

υποσταθμός μπορεί να παρακολουθήσει την λειτουργία διαφορετικών τμημάτων του συστήματος και να αποφασίζει για την λειτουργία του DC δικτύου, στοχεύοντας στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας αυτής. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει μέσω ενεργειών του Διαχειριστή του Δικτύου.

4.1.6 Εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος

Όπως έχει αναφερθεί, τα ηλιακά ΦΒ πάνελ συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σε οικιακά περιβάλλοντα απομονωμένα από τα εξωτερικά δίκτυα παροχής ισχύος. Το προτεινόμενο σύστημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για σενάρια προσομοίωσης χωρίς εξωτερικό δίκτυο παροχής ισχύος, ελεγχόμενο έτσι από τις μονάδες HEMS, οι οποίες βασίζονται στην οικιακή παραγωγή ισχύος μέσω των ΦΒ πάνελ και σε ένα οικουμενικό ή και ατομικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Τέτοιου τύπου συστήματα μπορούν αποκλειστικά να βασιστούν στην εσωτερική DC ισχύ τους, μειώνοντας την εξωτερική ζήτηση AC ισχύος σε μηδενικά επίπεδα.

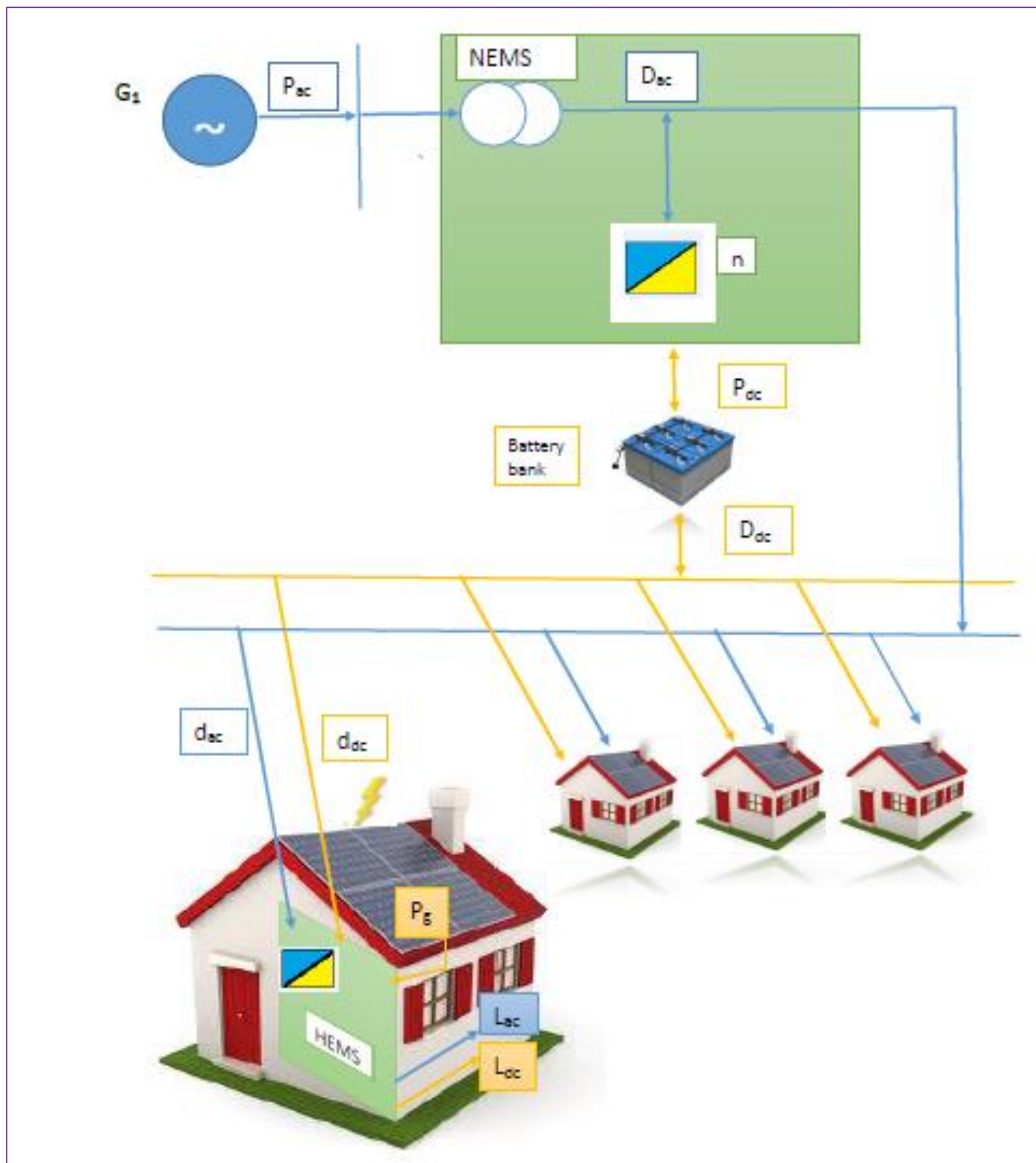
Εκτός από εφαρμογές που είναι απομονωμένες από εξωτερικά δίκτυα παροχής ισχύος, τα ηλιακά ΦΒ πάνελ έχουν εφαρμοσθεί με αυξανόμενο ρυθμό σε οικίες για εφαρμογές οι οποίες συνδέονται και με εξωτερικά δίκτυα. Το τρέχον σύστημα χρησιμοποιεί αντιστροφείς για την διοχέτευση της τοπικά παραγόμενης ισχύος προς το δίκτυο, αλλά προβλέπει διάφορες εναλλακτικές. Το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί και να λειτουργήσει σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας υπό το διαφορετικό καθεστώς των απαιτήσεων κάθε χρήστη. Η λειτουργία μπορεί να αλλάξει για περιοχές που είναι πολύ καλά συνδεδεμένες σε εξωτερικά δίκτυα παροχής ισχύος και το δίκτυο είναι αξιόπιστο. Σε αναπτυσσόμενες περιοχές το προσφερόμενο εξωτερικό δίκτυο είναι ασθενές και διακοπές παροχής ενέργειας σε τέτοια περιβάλλοντα είναι συνηθισμένο φαινόμενο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το σύστημα θα μπορούσε να τεθεί σε διαφορετική λειτουργία έχοντας μία μεγαλύτερη δυνατότητα για συσσώρευση της τοπικά παραγόμενης ενέργειας.

4.1.7 Έλεγχος του συστήματος

Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, το σύστημα είναι αρκετά ευέλικτο και μπορεί να ελεγχθεί από αρκετές παραμέτρους λειτουργίας που διαχειρίζεται ο Διαχειριστής Δικτύου ή ακόμα και ο απλός οικιακός χρήστης. Αυτές οι παράμετροι θα μπορούσαν να συμπεριλαμβάνουν την ενέργεια που παράγεται από τα ηλιακά ΦΒ συστήματα, το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών του συστήματος (SOC), τις απαιτήσεις των AC και DC φορτίων, την τιμή κόστους της ισχύος, την επιλογή ΑΠΕ ή του εξωτερικού δικτύου παροχής ισχύος από τον χρήστη, κλπ. Σε αυτήν την εργασία οι διαδικασίες ελέγχου έχουν επικεντρωθεί για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Το σχήμα 4.3 στη συνέχεια, δείχνει τις ροές ισχύος κατά μήκος της τοπολογίας του δικτύου με παραμέτρους οι οποίες εισάγονται στον πίνακα 4.1:

Μεταβλητή	Περιγραφή
P_g	Ισχύς που παράγεται από το ΦΒ σύστημα ανά οικία (pv panel)
L_{dc}	Οικιακό DC φορτίο
L_{ac}	Οικιακό AC φορτίο
d_{dc}	Οικιακή Απαίτηση από το DC δίκτυο
d_{ac}	Οικιακή Απαίτηση από το AC δίκτυο
$D_{dc}=\Sigma d_{dc}$	Συνολικές Οικιακές Απαιτήσεις από το DC δίκτυο
$D_{ac}=\Sigma d_{ac}$	Συνολικές Οικιακές Απαιτήσεις από το AC δίκτυο
P_{min}	Ελάχιστο επίπεδο παρεχόμενης ισχύος προς το grid από το AC δίκτυο
P_{max}	Μέγιστο επίπεδο παρεχόμενης ισχύος προς το grid από το AC δίκτυο
$P_{ac}(t)$	Πραγματική παρεχόμενη ισχύς στο grid από το AC δίκτυο συναρτήσεως του χρόνου
$P_{dc}(t)$	Πραγματική παρεχόμενη ισχύς στο δίκτυο από τις μπαταρίες (συσσωρευτές του grid) συναρτήσεως του χρόνου
H	Συντελεστής απόδοσης των μετατροπέων
SOC	Επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών.

Πίνακας 4.1: Περιγραφή των σημάτων ελέγχου και τα σύμβολα για την ροή ισχύος

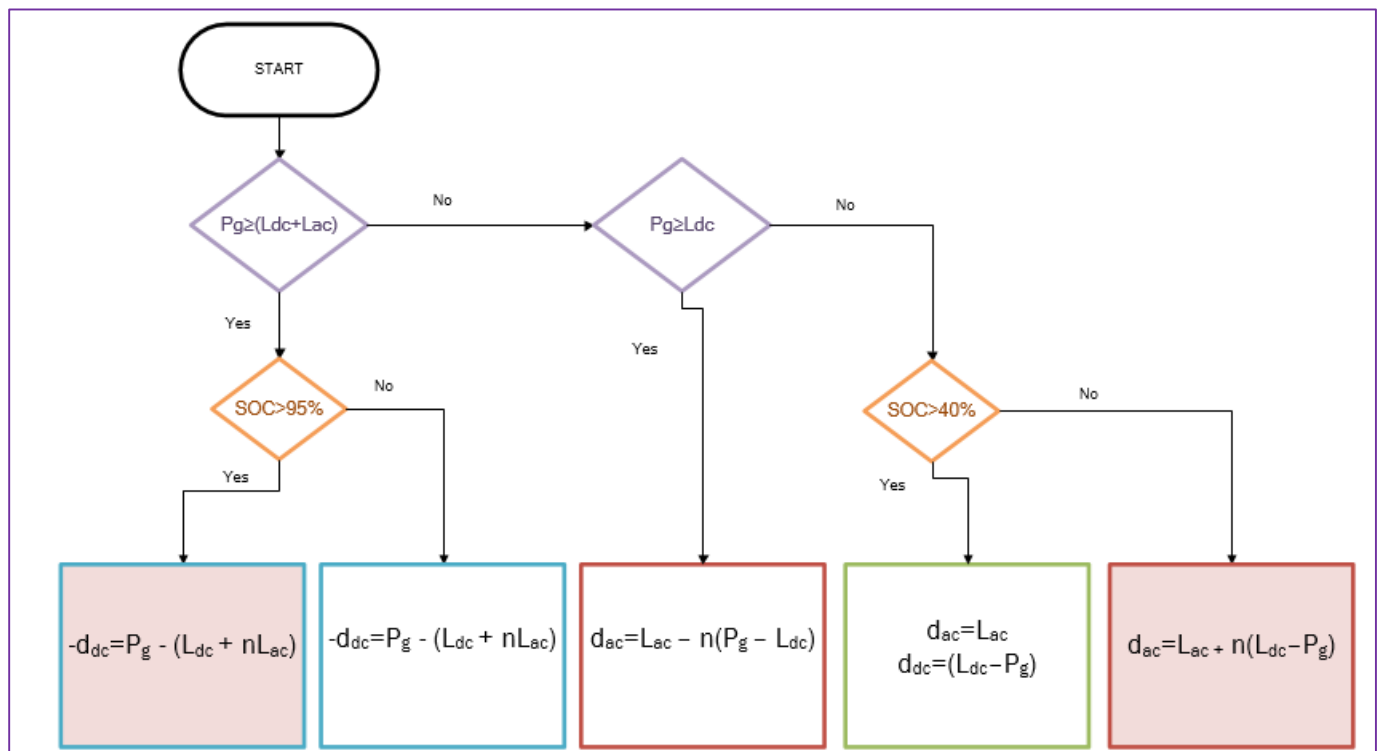


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροών ισχύος κατά μήκος της τοπολογίας του μικροδικτύου

Όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν δύο πιθανά σύνολα παραμέτρων ελέγχου για το σύστημα. Το πρώτο αφορά τον Διαχειριστή Δικτύου. Αυτοί οι έλεγχοι διασφαλίζουν ότι το δίκτυο λειτουργεί βέλτιστα και αξιόπιστα. Το δεύτερο επίπεδο ελέγχου αφορά τον χρήστη, ο οποίος μπορεί να επιλέξει τον τρόπο χρήσης της ενέργειας. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από την πλευρά του χρήστη και του δικτύου παρουσιάζονται στην συνέχεια.

➤ Έλεγχος Χρήστη

Ένας ειδικός αλγόριθμος έχει σχεδιαστεί για να περιγράψει τον έλεγχο του χρήστη επί του συστήματος (Σχήμα 4.4):



Σχήμα 4.4: Αλγόριθμος του ελέγχου χρήστη από την οντότητα HEMS

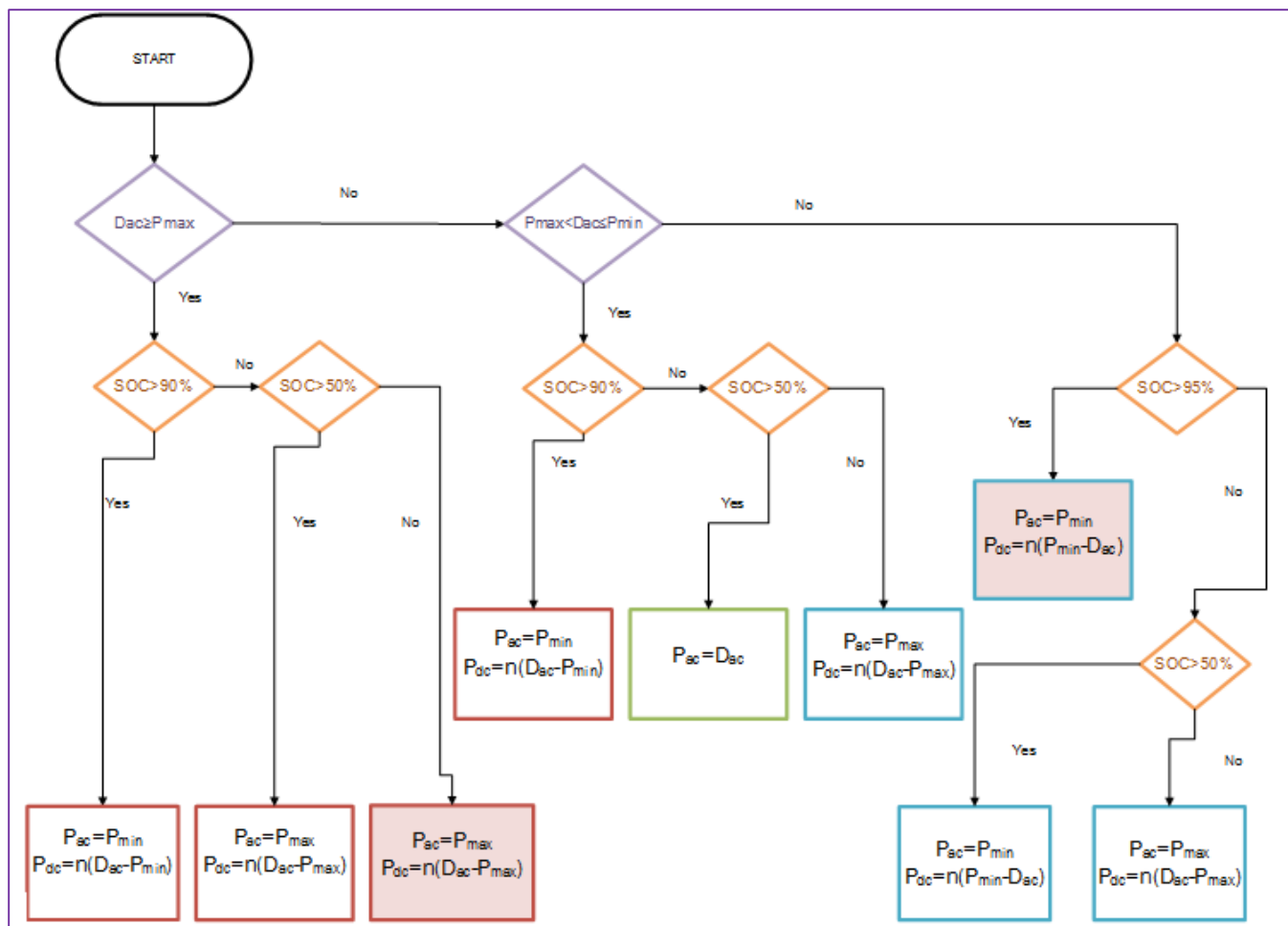
- Όταν η ισχύς που παράγεται από τα ΦΒ συστήματα ξεπερνά τις συνδυασμένες απαιτήσεις των φορτίων του συστήματος, το πλεόνασμα ισχύος αποθηκεύεται στους συσσωρευτές. Εάν το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή (SOC) ξεπερνά

το 95% τότε παράγεται ένας συναγερμός προς το δίκτυο (κατάσταση 1). Κατά την διάρκεια αυτού του συναγερμού απαιτείται μία μη αυτοματοποιημένη διαδικασία για να διατηρήσει το σύστημα σε ισορροπία. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει αύξηση της χωρητικότητας του συσσωρευτή ή διοχέτευση της ισχύος σε βοηθητικές συσκευές ή ακόμη και διοχέτευση αυτής της πλεονάζουσας ισχύος πίσω προς το εξωτερικό δίκτυο τροφοδοσίας του πλέγματος. Εάν το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή (SOC) είναι μικρότερο από το 95% τότε το σήμα συναγερμού είναι ανενεργό και το πλεόνασμα ισχύος αποθηκεύεται στους συσσωρευτές (κατάσταση 2).

- Όταν η παραγόμενη ενέργεια ξεπερνά τις απαιτήσεις των DC φορτίων αλλά είναι χαμηλότερη από τις συνολικές απαιτήσεις, τότε οι απαιτήσεις των AC φορτίων καλύπτονται από το εξωτερικό AC δίκτυο. Η παραγόμενη ενέργεια πρώτα καλύπτει τις απαιτήσεις των DC φορτίων και μετά η εναπομείνασα ενέργεια χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση των AC απαιτήσεων. Οι εναπομείνασες μη καλυπτόμενες AC απαιτήσεις καλύπτονται από το εξωτερικό AC δίκτυο (κατάσταση 3).
- Όταν η παραγόμενη ισχύς δεν είναι ικανή να αντιμετωπίσει τις ενεργειακές απαιτήσεις των DC φορτίων, ελέγχεται η κατάσταση του επιπέδου φόρτισης SOC του συσσωρευτή. Εάν το SOC είναι μεγαλύτερο από το 40% τότε η DC ισχύς καλύπτεται από την αποθηκευμένη ενέργεια και οι AC απαιτήσεις καλύπτονται από το AC δίκτυο (κατάσταση 4). Στην περίπτωση όπου το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή είναι χαμηλότερο του 40% τότε το σύστημα τροφοδοτείται από το εξωτερικό AC δίκτυο και παράγεται ένα σήμα συναγερμού για μια μη αυτοματοποιημένη παρέμβαση προς το σύστημα (κατάσταση 5).

➤ Έλεγχος Δικτύου

Ομοίως προς τον έλεγχο χρήστη, ένας αλγόριθμος έχει σχεδιαστεί για να περιγράψει τον έλεγχο του συστήματος (Σχήμα 4.5):



Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος ελέγχου του Διαχειριστή Δικτύου

- Όταν οι συνολικές απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες από την μέγιστη τιμή της εξωτερικά προσφερόμενης ενέργειας και η κατάσταση του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερη του 90%, η ελάχιστη εξωτερική ενέργεια παρέχεται προς το σύστημα και οι υπόλοιπες απαιτήσεις καλύπτονται από την ενέργεια των συσσωρευτών (κατάσταση 1). Αυτό προστατεύει την υπερφόρτιση των συσσωρευτών. Εάν το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερο του 50% αλλά χαμηλότερα του 90% τότε η μέγιστη εξωτερικά προβλεπόμενη ισχύς παρέχεται από το δίκτυο και οι υπόλοιπες απαιτήσεις καλύπτονται από την αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος (κατάσταση 2). Εάν το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών είναι μικρότερο του 50% τότε ενεργοποιείται ένας συναγερμός προς το δίκτυο και στην περίπτωση αυτή

απαιτούνται μη αυτοματοποιημένες αποφάσεις για την εξισορρόπηση της λειτουργίας του συστήματος (κατάσταση 3). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση του επιπέδου της εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος (απόφαση του διαχειριστή του δικτύου), ή με μείωση των συνολικών επιπέδων ζήτησης (απόφαση των χρηστών του μικροδικτύου).

- Όταν οι απαιτήσεις είναι μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης εξωτερικά προσφερόμενης ενέργειας, εάν το SOC είναι μεγαλύτερο από 90% το ελάχιστο επίπεδο ισχύος τροφοδοτείται από το εξωτερικό AC δίκτυο και οι υπόλοιπες απαιτήσεις ισχύος καλύπτονται από τους συσσωρευτές (κατάσταση 4). Εάν το SOC είναι μεγαλύτερο από 50% αλλά χαμηλότερο από 90%, η παρεχόμενη ισχύς από το εξωτερικό AC δίκτυο προορίζεται για την κάλυψη των AC αναγκών του συστήματος (κατάσταση 5). Στην περίπτωση που το SOC είναι μικρότερο από 50% η μέγιστη ισχύς παρέχεται από το εξωτερικό δίκτυο και η εναπομείνουσα ισχύς μετά την κάλυψη των αναγκών χρησιμοποιείται για την φόρτιση των συσσωρευτών (κατάσταση 6).
- Όταν οι απαιτήσεις ισχύος είναι μικρότερες από το χαμηλότερο όριο της εξωτερικά προσφερόμενης ισχύος και το SOC των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερο από 95%, το ελάχιστο επίπεδο ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο μπορεί να διοχετευθεί για την κάλυψη των αναγκών και η εναπομείνουσα ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση των συσσωρευτών. Το σήμα συναγερμού για το δίκτυο ενεργοποιείται στην περίπτωση αυτή (κατάσταση 7). Εάν το SOC είναι μεταξύ 95% και 50% τότε το σήμα συναγερμού είναι απενεργοποιημένο (κατάσταση 8). Εάν τέλος το SOC είναι χαμηλότερο από 50% τότε η εξωτερικά προσφερόμενη ενέργεια από το AC δίκτυο γίνεται μέγιστη και η πλεονάζουσα ενέργεια χρησιμοποιείται για την φόρτιση των συσσωρευτών (κατάσταση 9).

4.2 Μοντελοποίηση στο Matlab

Για την επαλήθευση της λειτουργικότητας του προτεινόμενου συστήματος δημιουργήθηκε ένα μοντέλο που συνδυάζει την λειτουργία των διάφορων οντοτήτων που συνθέτουν το μικροδίκτυο. Το μοντέλο αποτελείται από διαφορετικά δομικά στοιχεία (συναρτήσεις), οι οποίες προσομοιάζουν την ηλεκτρική λειτουργία κάθε ανεξάρτητου στοιχείου του συστήματος. Το δίκτυο διανομής DC ισχύος, θεωρείται ότι λειτουργεί με τάση στο επίπεδο των 200V, ενώ τα αντίστοιχα DC οικιακά υποδίκτυα λειτουργούν σε 48V. Τα ηλιακά ΦΒ πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση για την παραγωγή ρεύματος θεωρούνται να λειτουργούν σε ένα σταθερό DC περιβάλλον στα 48V, και η παραγόμενη ισχύς από αυτά μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλονται στην πορεία του χρόνου οι συνθήκες φωτεινότητας των ΦΒ συστημάτων. Τα φορτία AC και DC προσομοιώθηκαν θεωρώντας ότι είναι περίπου ίσα μεταξύ τους και μεταβαλλόμενα σε 24ωρη βάση, και προήλθαν από πραγματικά δεδομένα όπως και οι παραγωγές των οικιακών ΦΒ πάνελ. Το μικροδίκτυο αποτελείται από 30 οικίες κάθε μια από τις οποίες έχει οικιακά ΦΒ πάνελ οροφής εγκατεστημένης ισχύος 3 KW. Για το DC δίκτυο και την υλοποίησή του, χρησιμοποιήθηκαν μετράτορες υψηλής απόδοσης για την μετατροπή των επιπέδων τάσεων ανάμεσα στα σημεία όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Ομοίως, οι αντιστροφείς που συνδέθηκαν ανάμεσα στα AC και DC δίκτυα, επέτρεπαν αμφίδρομες μετατροπές εκεί όπου αυτό απαιτείτο. Σε μια ρεαλιστική πραγμάτωση του μικροδικτύου, η λειτουργία των μετατροπέων θα καθοριζόταν από τα επίπεδα τάσεων στους αντίστοιχους κόμβους, ανάλογα με τα περιβάλλοντα λειτουργίας. Κάτι τέτοιο είναι δυνατόν μέσω των σύγχρονων ηλεκτρονικών διατάξεων που είναι σήμερα διαθέσιμες. Πιο συγκεκριμένα μέσω ελέγχου του επιπέδου των τάσεων στους ζυγούς οι ηλεκτρονικές διατάξεις των αντιστροφέων έχουν τη δυνατότητα να ελέγξουν τη ροή ισχύος από και προς το εξωτερικό δίκτυο παροχής.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι εσωτερικές διεργασίες, μεταβλητές και δομές του μοντέλου AC/DC Grid Model, στην γλώσσα περιγραφής Matlab με στόχο την κατανόηση και τη διευκόλυνση του αναγνώστη. Να σημειωθεί

πως ως εσωτερικές μεταβλητές του κώδικα ορίζουμε τις μεταβλητές οι οποίες δημιουργούνται τοπικά και χρησιμοποιούνται βοηθητικά (εσωτερικά) από τις ρουτίνες που παράγουν τα αλγοριθμικά αποτελέσματα με βάση τις συνθήκες εισόδου (παραμέτροι εισόδου) της ρουτίνας `grid_modelv1.7`.

Η ρουτίνα `grid_modelv1_7` βασίζει την λειτουργία της σε δεδομένα τα οποία προέρχονται από παραμέτρους στο αρχικό τμήμα του αρχείου καθώς και από εξωτερικά αρχεία μεταβλητών (`.txtfiles`). Για την λειτουργία του κυρίως μοντέλου προσομοίωσης έχουν δημιουργηθεί οι ακόλουθες συναρτήσεις:

- *ac_load.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί το AC φορτίο κάθε οικίας (home) η οποία συμμετέχει στο AC/DC grid. Η έξοδος της συνάρτησης είναι οι τιμές της ισχύος που καταναλίσκεται επί του AC φορτίου για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σημειώνεται πως η συνολική ισχύς επί των AC φορτίων θεωρήθηκε ίση με το μισό της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος, η οποία προέκυψε από δεδομένα της εταιρείας Southern California Edison για το 2014.
- *ac_load_calcl*. Η συνάρτηση δέχεται σαν είσοδο την ισχύ που καταναλίσκεται επί του AC φορτίου και μπορεί να υπολογίσει την ωμική αντίσταση (R) και την επαγωγική αντίδραση (X) για κάθε ώρα λειτουργίας. Ο συντελεστής ισχύος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1], σύμφωνα με στοιχεία που προέκυψαν από τα δεδομένα της εταιρείας Southern California Edison για το 2014.
- *ac2dc.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί τις σχέσεις μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος από εναλλασσόμενη (AC) σε συνεχή (DC) για τις ανάγκες μετατροπής/λειτουργίας των οντοτήτων που συμμετέχουν στο AC/DC grid.
- *battery.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί το μοντέλο λειτουργίας ενός συσσωρευτή που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ενέργειας στο AC/DC grid. Ο συσσωρευτής αυξάνει ή μειώνει το φορτίο του, ανάλογα με τις ροές ισχύος που εισέρχονται ή εξέρχονται σε αυτόν.

- *dc_load.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί την συνάρτηση περιγραφής του φορτίου DC μιας οικίας (home) που συμμετέχει στο AC/DC grid. Η έξοδος της συνάρτησης είναι οι τιμές της ισχύος που καταναλίσκεται επί του DC φορτίου για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σημειώνεται πως η συνολική ισχύς επί των DC φορτίων θεωρήθηκε ίση με το μισό της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος, η οποία προέκυψε από δεδομένα της εταιρείας Southern California Edison για το 2014.
- *dc_load_calcl*. Η συνάρτηση δέχεται σαν είσοδο την ισχύ που καταναλίσκεται επί του DC φορτίου και μπορεί να υπολογίσει την ωμική αντίσταση (R) για κάθε ώρα λειτουργίας.
- *dc2dc.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί τις σχέσεις μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος από συνεχή (DC) ενός επιπέδου (voltage) σε συνεχή (DC) άλλου επιπέδου για τις ανάγκες μετατροπής/λειτουργίας των οντοτήτων που συμμετέχουν στο AC/DC grid (DC Δίκτυο Διανομής – Τοπικές Οικιακές Καταναλώσεις).
- *pv_panel.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί την λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- *hems.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί τους περιορισμούς και τις λειτουργίες του Home Energy Management System.
- *nems.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί τους περιορισμούς και τις λειτουργίες του Network Energy Management System.
- *I_calc.m*. Η συνάρτηση υλοποιεί τους υπολογισμούς φωτεινότητας για τις διάφορες χρονικές φάσεις διέγερσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων (Irridation) βασισμένη σε παρεμβολή των γειτονικών επιπέδων φωτεινότητας για τις δεδομένες χρονικές στιγμές της ημέρας.
- *home_model.m*. Η συνάρτηση ενοποιεί το βασικό περιβάλλον μιας οικίας (home), η οποία μετέχει στο grid. Η συνάρτηση περιλαμβάνει εντός της (ιεραρχικά) τις οντότητες *pv_panel.m*, *dc_load.m*, *ac_load.m* και *hems.m*. Αυτά είναι και τα δομικά στοιχεία, που συνθέτουν την εσωτερική δομή μίας οικίας που μετέχει στο grid.

- *grid_model.m*. Το αρχείο συνθέτει το συνολικό περιβάλλον λειτουργίας του AC/DC grid. Αναλυτικά το grid αποτελείται από έναν οριζόμενο από τον χρήστη αριθμό οικιών (homes), nems.m, battery.m μαζί με τον ορισμό των δικτύων διανομής για AC/DC μορφή ενέργειας.

Χρήσιμες παράμετροι για την συνολική λειτουργία του περιβάλλοντος προσομοίωσης ορίζονται εντός του αρχείου *grid_model.m* στο τμήμα της επικεφαλίδας (header) του αρχείου. Επιπλέον για τον ορισμό των παραμέτρων του μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιούνται δύο αρχεία αναφοράς:

- Αρχεία .txt που βρίσκονται εντός του φακέλου home types. Τα αρχεία αυτά περιλαμβάνουν αναλυτικές παραμέτρους για τον καθορισμό ζωνών με ομάδες οικιών και ορίζουν παραμέτρους όπως το πλήθος των οικιών σε κάθε ζώνη, τιμές για το DC και AC φορτίο ανά οικία, τύπος των PV panels του ΦΒ συστήματος, κλπ.
- Αρχεία .txt που βρίσκονται εντός του φακέλου Sun Luminance. Τα αρχεία αυτά κανονίζουν σε 24ωρη βάση την φωτεινότητα που δέχονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα για την λειτουργία τους από τον ήλιο.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την αναλυτική δομή αυτών των αρχείων θα δοθούν στις παραγράφους που ακολουθούν. Η τελική εκδόση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ονομάστηκε *grid_modelv1_7* και επιπλέον των λειτουργιών που υποστηρίζονται στις προηγούμενες εκδόσεις της *grid_model.m*, η έκδοση *v1_7* υποστηρίζει για το μικροδίκτυο, την ικανότητα προσομοίωσης για χρονικό διάστημα που δεν υφίσταται τον περιορισμό της χρονικής διάρκειας των 24h, δηλ. η λειτουργία του μοντέλου επεκτείνεται σε περισσότερες της μίας ημέρας. Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει την δυνατότητα στον χρήστη της επιβολής ρεαλιστικότερων σεναρίων προσομοίωσης με μεγάλη διάρκεια. (Η ικανότητα προσομοίωσης του συστήματος εξαρτάται από την εγκατεστημένη μνήμη RAM του υπολογιστή, αλλά και από εσωτερικές μεταβλητές όπως το βήμα προσομοίωσης και το πλήθος των οικιών του μικροδικτύου). Επίσης

θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τους υπολογισμούς φωτεινότητας καθώς και των AC/DC φορτίων το σύστημα προσομοίωσης θεωρεί ότι τα αρχικά αρχεία που καλύπτουν την λειτουργία για ένα 24ωρο επαναλαμβάνονται περιοδικά για να καλύψουν την χρονική διάρκεια των επιπλέον ημερών της προσομοίωσης.

4.3 Εκδόσεις και Χαρακτηριστικά των Υποσυστημάτων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι τρέχουσες εκδόσεις των υποσυστημάτων που είναι υλοποιημένες σε μορφή συναρτήσεων για την λειτουργία του AC/DC gridmodel. Οι βασικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση των συναρτήσεων και τον χειρισμό των γραφικών παραστάσεων στο δίκτυο, παρατέθηκαν στον πίνακα 4.1.

4.3.1 Συνάρτηση `pn_panel`

Στην περίπτωση όπου η μεταβλητή `bypass_P_I` έχει τεθεί σε τιμή διαφορετική από 1, οι εκδόσεις λειτουργούν με τον ακόλουθο τρόπο:

Version 1.0: Η συνάρτηση περιλαμβάνει ελέγχους (validity checks) επί των ορισμάτων εισόδου της. Η συνάρτηση διαβάζει το διάνυσμα `P_I_vec` που αποτελεί την χαρακτηριστική λειτουργίας του panel (συνδυασμός προσπίτουσας πυκνότητας φωτεινής ισχύος ανά μονάδα εμβαδού και παραγόμενα επίπεδα ηλεκτρικής ισχύος). Υπολογίζει την ενεργό φωτεινότητα I ως γινόμενο της πυκνότητας χεμβαδόν, $I/S \times S$ όπου S το εμβαδόν του πάνελ του ΦΒ. Με χρήση γραμμικής παρεμβολής και του συντελεστή απόδοσης, υπολογίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του στοιχείου. Η τρέχουσα ηλεκτρική ισχύς συγκρίνεται με το μέγιστο επίπεδο `P_max` που είναι επιτρεπτό για την λειτουργία του στοιχείου και κβαντίζεται σε αυτήν την τιμή εφόσον η παραγόμενη ισχύς ξεπερνά το επίπεδο αυτό. Η συνάρτηση επιστρέφει την τελική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, την τάση λειτουργίας και το ρεύμα του στοιχείου.

Version 1.1: Η συνάρτηση περιλαμβάνει τα προηγούμενα χαρακτηριστικά της v1.0 και επιπλέον και έναν συντελεστή θερμοκρασιακής απόδοσης του ΦΒ που υλοποιείται εσωτερικά στην συνάρτηση με βάση την τρέχουσα τιμή της θερμοκρασίας των πάνελ. Το θερμοκρασιακό μοντέλο μεταβάλλει την απόδοση του panel συναρτήσει της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας αυτού

Στην περίπτωση όπου η μεταβλητή `bypass_P_I` έχει τεθεί σε τιμή 1, το μοντέλο για `pv_panel` δεν χρησιμοποιεί τους υπολογισμούς φωτεινότητας για την παραγωγή ενέργειας αλλά διαβάζει απευθείας τις τιμές για την παραγωγή από τα αρχεία `home_type.txt`. Αυτό δίνει την δυνατότητα της απευθείας ανάθεσης για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Όλη η υπόλοιπη λειτουργικότητα η οποία περιγράφεται στις εκδόσεις παραμένει.

4.3.2 Συνάρτηση `dc_load`

Version 1.0: Η συνάρτηση περιλαμβάνει ελέγχους (validity checks) επί των ορισμάτων εισόδου της. Η συνάρτηση ανάλογα με την κατάσταση της μεταβλητής ON/OFF State (δηλ. εάν το φορτίο μετέχει ή όχι στην κατανάλωση), υπολογίζει την καταναλισκόμενη ισχύ από την ωμική τιμή του φορτίου, την τάση λειτουργίας του στοιχείου και το καταναλισκόμενο ρεύμα επ'αυτού.

4.3.3 Συνάρτηση `ac_load`

Version 1.0: Η συνάρτηση περιλαμβάνει ελέγχους (validity checks) επί των ορισμάτων εισόδου της. Η συνάρτηση ανάλογα με την κατάσταση της μεταβλητής ON/OFF State (δηλ. εάν το φορτίο μετέχει ή όχι στην κατανάλωση), έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει την αναπτυσσόμενη ισχύ (P,Q) από την φαινόμενη τιμή του φορτίου (R,X), την τιμή του Συντελεστή Ισχύος (Σ.Ι.), την τάση λειτουργίας του στοιχείου και το καταναλισκόμενο ρεύμα επ'αυτού.

4.3.4 Συνάρτηση nems

Version 1.0: Η συνάρτηση περιλαμβάνει ελέγχους (validity checks) επί των ορισμάτων εισόδου της. Η συνάρτηση υπολογίζει τις απαιτήσεις P_dc, P_ac και nems_alertsignal σύμφωνα με το πρωτόκολλο χειρισμού που έχει υλοποιηθεί.

Ο αλγόριθμος απόφασης του συγκεκριμένου μοντέλου παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.1.7.

4.3.5 Συνάρτηση hems

Version 1.0: Η συνάρτηση περιλαμβάνει ελέγχους (validity checks) επί των ορισμάτων εισόδου της. Η συνάρτηση υπολογίζει τις απαιτήσεις d_dc, d_ac και hems_alertsignal σύμφωνα με το πρωτόκολλο χειρισμού που έχει υλοποιηθεί.

Ο αλγόριθμος απόφασης της συγκεκριμένης οντότητας παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.1.7.

4.3.6 Συνάρτηση battery

Version 1.0: Η συνάρτηση περιλαμβάνει ελέγχους (validity checks) επί των ορισμάτων εισόδου της. Η συνάρτηση λειτουργεί με την χρήση δύο διεπαφών (interfaces): της φόρτισης και της εκφόρτισης της μπαταρίας. Η συνάρτηση υπολογίζει την κατάσταση φόρτισης (SOC), το ρεύμα φόρτισης, το ρεύμα κατανάλωσης επί του συσσωρευτή και την διαθέσιμη ισχύ που περισσεύει μετά την πλήρη φόρτιση (P_spare-αν υπάρχει).

Version 1.1: Επιπλέον στο μοντέλο του συσσωρευτή, υλοποιούνται συγκεκριμένα όρια που αφορούν το επιτρεπόμενο επίπεδο φόρτισης ανά πάσα στιγμή. Τα ανώτατο όριο φόρτισης, με βάση τον αλγόριθμο υλοποίησης, έχει τεθεί στο 90% του μέγιστου επιπέδου φόρτισης που έχει ο συσσωρευτής, ενώ το κατώτατο όριο πρέπει να σημειωθεί πως δεν λαμβάνει κάποια συγκεκριμένη τιμή (δεδομένου ότι υπάρχει περίπτωση το μικροδίκτυο να έχει ανάγκη να χρησιμοποιήσει την ισχύ των συσσωρευτών προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες του, ακόμα και αν αυτό συνεπάγεται το επίπεδο φόρτισης να φτάσει σε τιμές της τάξης του 30% ή και

μικρότερες). Βέβαια, σε περίπτωση που το επίπεδο φόρτισης πέσει κάτω από συγκεκριμένες τιμές, ενεργοποιείται το σήμα συναγερμού και ο διαχειριστής του δικτύου καλείται να προβεί σε συγκεκριμένες ενέργειες, όπως για παράδειγμα να αυξήσει τα επίπεδα ισχύος που παρέχονται στο μικροδίκτυο από το ανάντη δίκτυο.

Οι τιμές αυτές κυμαίνονται στα επίπεδα του 40% και εξαρτώνται από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο αλγόριθμος του NEMS τη δεδομένη στιγμή.

Ο λόγος που θέλουμε να κρατάμε το επίπεδο φόρτισης σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών, είναι ότι με τον τρόπο αυτό (αποφεύγοντας δηλαδή τις πολύ βαθιές φορτίσεις και εκφορτίσεις) αυξάνουμε τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών.

4.4 Εσωτερική δομή του αρχείου hometype.txt

Τα αρχεία hometype.txt περιλαμβάνουν πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση και τον καθορισμό των οντοτήτων των οικιών (homes) που μετέχουν στο AC/DC grid. Το σύστημα υποστηρίζει συνολικά μέχρι 8 διαφορετικούς τύπους οικιών (χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το πλήθος αυτών των τύπων δεν μπορεί να επεκταθεί εφόσον αυτό κριθεί αναγκαίο για την επέκταση των δυνατοτήτων και της λειτουργικότητας του μοντέλου). Το κάθε αρχείο συμπεριλαμβάνει τους παρακάτω τύπους παραμέτρων:

Γραμμή του αρχείου	Όνομα παραμέτρου	Παρατηρήσεις
1	Hometype_file_version	Η μεταβλητή ορίζει την έκδοση του αρχείου (υποστηρίζεται μόνο η τιμή 1.0) με στόχο να προετοιμάζει το σύστημα για την εσωτερική δομή του αρχείου που ακολουθεί κατά την ανάγνωση των μεταβλητών εντός του.
2	Homes	Πλήθος των οικιών που μετέχουν στο συγκεκριμένο τύπο hometype.
3-10	Reserved	Οι γραμμές του αρχείου δεσμεύτηκαν για μελλοντική επέκταση (περιλαμβάνουν τιμή 0 κατά την ανάγνωση του αρχείου).

11	Version_pv	Η μεταβλητή ορίζει την έκδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Το περιβάλλον προσομοίωσης για την εν λόγω μεταβλητή δέχεται τιμή 1.0 -> στην βασική έκδοση του ΦΒ συστήματος και 1.1 -> η οποία επιπλέον της 1.0 επιτρέπει και χρήση θερμοκρασιακών συντελεστών για την απόδοση του συστήματος.
12	P_I_vector_length	Η μεταβλητή ορίζει το μήκος του διανύσματος που φέρει τα ζεύγη τιμών (I,P), όπου I: η καμπύλη φωτεινότητας και P: η καμπύλη της ηλεκτρικής απόδοσης. Τα ζεύγη (I,P) ορίζουν την καμπύλη φωτεινότητας - ηλεκτρικής ισχύος του ΦΒ συστήματος. Στην περίπτωση που η μεταβλητή bypass_P_I έχει τεθεί σε τιμή 1 (ενεργοποιώντας την κατάργηση των υπολογισμών φωτεινότητας) τότε η μόνη επιτρεπτή τιμή για το μήκος των διανυσμάτων είναι η τιμή 24, αναθέτοντας απευθείας ηλεκτρική ισχύ στο pv_panel (μία τιμή ανά ώρα της ημέρας).
13	P_vector	Τιμές του διανύσματος ηλεκτρικής ισχύος σε Watt. Στην περίπτωση που η μεταβλητή bypass_P_I έχει τεθεί σε τιμή 1 (ενεργοποιώντας την κατάργηση των υπολογισμών φωτεινότητας) τότε το διάνυσμα φέρει υποχρεωτικά 24 τιμές που αντιστοιχούν στην ηλεκτρική ισχύ που απευθείας ανατίθενται στο pv_panel (μία τιμή ανά ώρα της ημέρας)..
14	I_vector	Τιμές φωτεινότητας. Στην περίπτωση που η μεταβλητή bypass_P_I έχει τεθεί σε τιμή 1 (ενεργοποιώντας την κατάργηση των υπολογισμών φωτεινότητας) τότε το διάνυσμα δεν φέρει καμία πληροφορία για τους υπολογισμούς φωτεινότητας και πρέπει να τίθεται σε μηδενική τιμή (24 μηδενικές τιμές για το συνολικό μήκος του).
15	bypass_P_I	Η μεταβλητή bypass_P_I εφόσον έχει τεθεί σε τιμή 1, καταργεί τους υπολογισμούς φωτεινότητας για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής ισχύος στο pv_panel module. Οι τιμές της ηλεκτρικής ισχύος ανατίθενται στην περίπτωση αυτή απευθείας στο pv_panel μέσω του διανύσματος P_vector το οποίο από

		πυκνότητα ηλεκτρικής ισχύος ανά μονάδα φωτεινότητας μετατρέπεται σε απευθείας τιμή ηλεκτρικής ισχύος. Το μέγεθος του διανύσματος που καθορίζεται από την μεταβλητή <code>P_I_vector_length</code> θα πρέπει να πάρει τιμή 24, δίνοντας έτσι 24 τιμές ηλεκτρικής ισχύος στο <code>pv_panel</code> , οι οποίες αναλογούν μία σε κάθε ώρα της ημέρας.
16	<code>S_panel</code>	Εμβαδόν των ΦΒ συλλεκτών. Χρησιμοποιείται για να εξαγάγει την συνολική ηλιακή φωτεινότητα και να υπολογίσει την συνολική φωτεινή ισχύ που δέχεται το στοιχείο.
17	<code>n_eff_pv</code>	Συντελεστή απόδοσης του ΦΒ συστήματος [0,1].
18	<code>Voltage_op_pv</code>	Τιμή της τάσης λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου (V).
19	<code>P_max_pv</code>	Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ από το ΦΒ στοιχείο (Watt). Το ΦΒ στοιχείο δεν μπορεί να ξεπεράσει την συγκεκριμένη ηλεκτρική ισχύ ασχέτως φωτεινότητας που δέχεται δίνοντας στην έξοδο του αυτήν την μέγιστη τιμή.
20	<code>Temp_pv_vector</code>	Το διάνυσμα ορίζει την θερμοκρασία του ΦΒ πάνελ (η οποία χρησιμοποιείται από την έκδοση 1.1 της συνάρτησης του <code>pv_panel</code>), για να ρυθμίσει την απόδοση του ΦΒ όπως αυτή εξαρτάται από την θερμοκρασία (°C). Για τους προκύπτοντες συντελεστές απόδοσης βλέπε εσωτερικά την <code>pv_panel.m</code> συνάρτηση.
21-30	Reserved	Οι γραμμές του αρχείου δεσμεύτηκαν για μελλοντική επέκταση (περιλαμβάνουν τιμή 0 κατά την ανάγνωση του αρχείου).
31	<code>Version_dc_load</code>	Η παράμετρος καθορίζει την έκδοση για τον τύπο της συνάρτησης <code>dc_load</code> . Σε αυτήν την φάση υποστηρίζεται μόνο η 1.0. Η μεταβλητή χρησιμοποιείται για μελλοντική επέκταση των λειτουργιών της συνάρτησης <code>dc_load</code> .
32	<code>ON/OFF_Load_State</code>	Η μεταβλητή με τιμή 1 ενεργοποιεί το DC φορτίο που περιλαμβάνεται στις οικίες (homes) για το δεδομένο <code>hometype</code> . Με τιμή 0 το DC φορτίο απενεργοποιείται καθόλη την διάρκεια του σεναρίου προσομοίωσης.
33	<code>Voltage_load_dc</code>	Η μεταβλητή ορίζει την τάση λειτουργίας του DC φορτίου (V).
34	<code>R_load_dc_vector</code>	Το διάνυσμα δέχεται πλήθος 24 τιμών που ορίζουν την τιμή του φορτίου DC load της

		ομάδας των οικιών σε κάθε ώρα της διάρκειας της ημέρας. Με την πάροδο του χρόνου το περιβάλλον προσομοίωσης διαβάζει την σωστή τιμή του φορτίου όπως μεταβάλλονται οι ανάγκες της οικίας σε 24ωρη βάση. Οι τιμές του R_load_dc_vector υπολογίζονται πριν την προσομοίωση με χρήση της υποσυνάρτησης dc_load_calcl, η οποία δέχεται ως είσοδο τις τιμές ισχύος που καταναλίσκονται επί των DCφορτίων.
35-40	Reserved	Οι γραμμές του αρχείου δεσμεύτηκαν για μελλοντική επέκταση (περιλαμβάνουν τιμή 0 κατά την ανάγνωση του αρχείου).
41	Version_ac_load	Η παράμετρος καθορίζει την έκδοση για τον τύπο της συνάρτησης ac_load. Σε αυτήν την φάση υποστηρίζεται μόνο η τιμή 1.0. Η μεταβλητή χρησιμοποιείται για μελλοντική επέκταση των λειτουργιών της συνάρτησης ac_load.
42	ON/OFF_Load_State	Η μεταβλητή με τιμή 1 ενεργοποιεί το AC φορτίο που περιλαμβάνεται στις οικίες (homes) για το δεδομένο hometype. Με τιμή 0 το AC φορτίο απενεργοποιείται καθόλη την διάρκεια του σεναρίου προσομοίωσης.
43	Voltage_load_ac	Η μεταβλητή ορίζει την τάση λειτουργίας του AC φορτίου (V-rms).
44	R_load_ac_vector	Το διάνυσμα δέχεται πλήθος 24 τιμών που ορίζουν την τιμή του ωμικού τμήματος R του φορτίου AC load της ομάδας των οικιών σε κάθε ώρα της διάρκειας της ημέρας. Με την πάροδο του χρόνου το περιβάλλον προσομοίωσης διαβάζει την σωστή τιμή του φορτίου όπως μεταβάλλονται οι ανάγκες της οικίας σε 24ώρη βάση. Οι τιμές του R_load_ac_vector υπολογίζονται πριν την προσομοίωση με χρήση της υποσυνάρτησης ac_load_calcl, η οποία δέχεται ως είσοδο τις τιμές ισχύος που καταναλίσκονται επί των AC φορτίων. Ο συντελεστής ισχύος που είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1].
45	X_load_ac_vector	Το διάνυσμα δέχεται πλήθος 24 τιμών που ορίζουν την τιμή του X (αντιδραστικού) φορτίου AC load της ομάδας των οικιών σε κάθε ώρα της διάρκειας της ημέρας. Με την πάροδο του χρόνου το περιβάλλον

		προσομοίωσης διαβάζει την σωστή τιμή του φορτίου όπως μεταβάλλονται οι ανάγκες της οικίας σε 24ωρη βάση, μεταβάλλοντος το συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) του φορτίου. Οι τιμές του X_load_ac_vector υπολογίζονται πριν την προσομοίωση με χρήση της υποσυνάρτησης ac_load_calcl, η οποία δέχεται ως είσοδο τις τιμές ισχύος που καταναλώνονται επί των AC φορτίων. Ο συντελεστής ισχύος που είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1].
46-50	Reserved	Οι γραμμές του αρχείου δεσμεύτηκαν για μελλοντική επέκταση (περιλαμβάνουν τιμή 0 κατά την ανάγνωση του αρχείου).
51	Version_hems	Η μεταβλητή ορίζει την έκδοση της συνάρτησης hems.m που χρησιμοποιείται από το περιβάλλον προσομοίωσης για τον χειρισμό της ενέργειας στην οικία. Σε αυτήν την φάση υποστηρίζεται μόνο η έκδοση 1.0.
52-	Reserved	Οι γραμμές του αρχείου δεσμεύτηκαν για μελλοντική επέκταση (περιλαμβάνουν τιμή 0 κατά την ανάγνωση του αρχείου).

Πίνακας 4.2: Εσωτερική δομή του αρχείου *hometype.txt*

Πριν την εφαρμογή προσομοιώσεων από το συνολικό μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος, θα πρέπει να καθορίζονται κατάλληλα οι τιμές που περιλαμβάνονται στα αρχεία *hometype.txt* για να καθοριστούν οι ζητούμενες παράμετροι. Το περιβάλλον προσομοίωσης περιλαμβάνει εσωτερικούς ελέγχους (validity checks) που εξετάζουν την εγκυρότητα αυτών των μεταβλητών για την αποφυγή λαθών ειδοποιώντας με κατάλληλα μηνύματα στο παράθυρο εκτέλεσης (execution panel) για τυχόν λανθασμένες επιλογές του χρήστη.

4.5 Εσωτερική δομή του αρχείου *Sun Luminance.txt*

Το αρχείο περιλαμβάνει 24 ζεύγη τιμών φωτεινότητας για κάθε ώρα τις ημέρας δηλαδή σύνολο 24 τιμών, προσομοιάζοντας την λειτουργία φωτεινότητας των ΦΒ

συστημάτων καθόλη την διάρκεια μιας ημέρας. Τα αρχεία αυτά μπορούν να καθορίσουν διαφορετικές εποχιακές συνθήκες αλλάζοντας για την λειτουργία του grid τα επαγόμενα επίπεδα ηλεκτρικής ισχύος που παράγονται από τα ΦΒ συστήματα. Αναλυτικά η δομή του αρχείου παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Γραμμή του αρχείου	Όνομα παραμέτρου	Παρατηρήσεις
1-24	[Hour_Day,Irridation]	Ζεύγη χρονικών στιγμών και επιπέδων φωτεινότητας για κάθε ώρα της ημέρας. Συνολικά 24 ζεύγη που χρησιμοποιούνται για να προσομοιάσουν τις συνθήκες φωτεινότητας που δέχεται το ΦΒ πάνελ.
25-	Reserved	Οι γραμμές του αρχείου δεσμεύτηκαν για μελλοντική επέκταση (περιλαμβάνουν τιμή 0 κατά την ανάγνωση του αρχείου).

Πίνακας 4.3: Εσωτερική δομή του αρχείου SunLuminance.txt

4.6 Εσωτερικές μεταβλητές της ρουτίνας Grid_Model

Οι εσωτερικές μεταβλητές του κώδικα Matlab για την ρουτίνα Grid Model περιλαμβάνονται στην επικεφαλίδα του αρχείου grid_model.m και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Παράμετρος	Παρατηρήσεις
home_types	Η μεταβλητή ορίζει το πλήθος των διαφορετικών οικιών που μετέχουν στο grid. Η μεταβλητή παίρνει ακέραιες τιμές μεταξύ 1 – 8.
time_start	Χρονική στιγμή έναρξης της προσομοίωσης για την ημέρα (ώρα έναρξης προσομοίωσης). Ελάχιστη τιμή 0.00 -> 12:00 π.μ.
time_stop	Χρονική στιγμή λήξης της προσομοίωσης για την ημέρα (ώρα λήξης προσομοίωσης). Από την v1_5 και μετά υποστηρίζεται

	προσομοίωση και για διάρκεια μεγαλύτερη της ημέρας δηλ τιμή μεγαλύτερη του 24.
time_step	Χρονικό βήμα προσομοίωσης σε ώρες. Δεκαδικός αριθμός. Π.χ. 0.1 -> σε βήμα 1hx0.1 = 6 min.
I_calc_version	Έκδοση του υπολογιστή φωτεινότητας για το σύστημα (τώρα υποστηρίζεται η έκδοση 1.0).
n_hems	Συντελεστής απόδοσης του HEMS συστήματος [0,1].
module_id_nems	Ακέραιος αριθμός που ορίζει έναν μοναδικό αριθμό που αντιστοιχεί στην οντότητα του NEMS στοιχείου του grid.
version_nems	Έκδοση του στοιχείου NEMS του συστήματος (τώρα υποστηρίζεται η έκδοση 1.0).
P_min	Ελάχιστη AC διαθέσιμη ισχύ από τις γεννήτριες παραγωγής.
P_max	Μέγιστη AC διαθέσιμη ισχύ από τις γεννήτριες παραγωγής.
n_nems	Συντελεστής απόδοσης του NEMS συστήματος [0,1].
SOC_Init	Αρχικό επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών του grid. Επιτρεπτές τιμές μεταξύ [0,1].
version_batt	Έκδοση των συσσωρευτών του συστήματος (τώρα υποστηρίζεται η έκδοση 1.0/1.1).
Voltage_chg	Τάση του interface φόρτισης των συσσωρευτών (48 V)
Voltage_cons	Τάση του interface εκφόρτισης των συσσωρευτών (200 V στο DC δίκτυο διανομής).
n_chg	Συντελεστής απόδοσης της φόρτισης [0,1].
Q_max	Μέγιστο φορτίο (σε Cb) που μπορεί να αποθηκευθεί στους συσσωρευτές.
Black_backg	Η μεταβλητή με τιμή 'γ' χρησιμοποιεί μαύρο background για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, ενώ με τιμή 'n' χρησιμοποιεί το «κλασσικό» λευκό background.
plot_???	Οι μεταβλητές plot ενεργοποιούν (τιμή 'γ') ή απενεργοποιούν (τιμή 'n') την εμφάνιση γραφικών παραστάσεων για ένα μέγεθος.

inspect_module	Ακέραιος αριθμός, ο οποίος αντιστοιχεί στην μοναδική τιμή καθε στοιχείου στο grid για την παρακολούθηση των μεταβλητών του.
inspect_hometype	Ακέραιος αριθμός για την παρακολούθηση του κατάλληλου hometype από το σύστημα.
Luminance_file	Όνομα Luminance file που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της ηλιακής φωτεινότητας για το δεδομένο διάστημα προσομοίωσης.
Home_type 1-8_file	Ορισμός των αρχείων hometypes που θα χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό του τύπου των οικιών που θα προσομοιωθούν στο grid.

Πίνακας 4.4: Εσωτερικές μεταβλητές της ρουτίνας Grid_Model

Κεφάλαιο 5: **ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

5.1 Χαρακτηριστικά των Προτεινόμενων Σεναρίων Προσομοίωσης

Για την αξιοποίηση και την εμπάθυνση στον τρόπο λειτουργίας του περιβάλλοντος προσομοίωσης `grid_model.m` επιλέξαμε να προσομοιώσουμε 4 διαφορετικούς τύπους σεναρίων, στοχεύοντας στην ανάδειξη και την παρατήρηση ειδικών χαρακτηριστικών από την λειτουργία του συνολικού συστήματος. Τα χαρακτηριστικά των σεναρίων προσομοίωσης παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν στην συνέχεια της παραγράφου. Μια αναλυτική κατηγοριοποίηση των σεναρίων μπορεί να βασιστεί στα επίπεδα παραγωγής των ΦΒ συστημάτων, καθώς και στα επίπεδα απαίτησης για καταναλώσεις των DC/AC φορτίων που απαιτούνται από το μικροδίκτυο:

- **Σενάριο Προσομοίωσης 1:** «Καλοκαιρινές συνθήκες λειτουργίας των ΦΒ συστημάτων με υψηλά επίπεδα παραγωγής ισχύος και χαμηλά φορτία κατανάλωσης του μικροδικτύου»
- **Σενάριο Προσομοίωσης 2:** «Καλοκαιρινές συνθήκες λειτουργίας των ΦΒ συστημάτων με χαμηλά επίπεδα παραγωγής ισχύος και υψηλά φορτία κατανάλωσης του μικροδικτύου»
- **Σενάριο Προσομοίωσης 3:** «Χειμερινές συνθήκες λειτουργίας των ΦΒ συστημάτων με υψηλά επίπεδα παραγωγής ισχύος και χαμηλά φορτία κατανάλωσης του μικροδικτύου»
- **Σενάριο Προσομοίωσης 4:** «Χειμερινές συνθήκες λειτουργίας των ΦΒ συστημάτων με χαμηλά επίπεδα παραγωγής ισχύος και υψηλά φορτία κατανάλωσης του μικροδικτύου»

Στην συνέχεια και κατά την διάρκεια των παραγράφων που ακολουθούν, θα περιγραφούν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των παραπάνω σεναρίων, που αναφέρονται στον ακριβή καθορισμό των παραμέτρων που απαιτούνται για την εφαρμογή προσομοίωσης από το περιβάλλον που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Επιπλέον από την εφαρμογή της διαδικασίας προσομοιώσεως παρουσιάζονται τα γραφικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα, δίνοντας έτσι την δυνατότητα για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των σεναρίων.

5.2 Σενάριο Προσομοίωσης 1

Αναλυτικός Τίτλος και Περιγραφή του σεναρίου: «Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μικροδικτύου για υψηλά επίπεδα παραγωγής ΦΒ ισχύος και χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης, για καλοκαιρινή περίοδο λειτουργίας».

Στα πλαίσια του σεναρίου αξίζει να παρατηρηθεί ότι τα φορτία του μικροδικτύου μεταβάλλονται κατά προκαθορισμένο τρόπο σε επιθυμητά επίπεδα καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης και η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα διατηρείται σε σχετικά υψηλά επίπεδα λόγω της καλοκαιρινής περιόδου που επιλέχθηκε για το σενάριο προσομοίωσης. Το σενάριο προσομοίωσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ευνοϊκό όσον αφορά στην διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος διότι αναφέρεται σε χαμηλές καταναλώσεις φορτίων, οπότε η παραγωγή εσωτερικά σε συνδυασμό με την εξωτερική παροχή AC ισχύος επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών του μικροδικτύου. Τα δεδομένα ηλεκτρικής παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα προέκυψαν με την χρήση του διαδικτυακού PVCalculator – PVWatts -που διατίθεται δωρεάν από το NREL (National Renewable Energy Laboratory των ΗΠΑ)-για την πόλη των Αθηνών (Ελλάδα) και συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ώρα	Φωτεινότητα(W/m ²)	Θερμοκρασία Πάνελ(°C)	DC έξοδος(W)
0	0	25.2	0
1	0	24.4	0
2	0	25	0
3	0	24	0
4	0	22.4	0
5	8.616098	22.628	23.66757
6	73.06102	25.672	179.161
7	224.4813	30.927	554.4602
8	412.5693	35.722	1039.737
9	590.3362	40.304	1479.219
10	730.2412	43.11	1813.064
11	815.5937	52.086	1933.458
12	848.8291	44	2100.023
13	819.0476	49.669	1966.937
14	734.8669	51.436	1746.544
15	594.9071	48.118	1431.976
16	417.7439	40.512	1027.765
17	229.2811	37.55	546.6828
18	79.24985	33.493	192.5049
19	9.401415	29.072	25.05156
20	0	29	0
21	0	28	0
22	0	27.8	0
23	0	28	0

Πίνακας 5.1: Παραγωγή Υψηλών επιπέδων Ηλεκτρικής Ισχύος σε ΦΒ σύστημα για την καλοκαιρινή περίοδο με βάση τον PVWatts Calculator

Τα DC και τα AC φορτία των οικιών του μικροδικτύου θεωρήθηκαν περίπου ίσα μεταξύ τους για κάθε χρονική στιγμή του σεναρίου προσομοίωσης και οι αθροιστικές τιμές τους συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές των φορτίων προέκυψαν με χρήση των δεδομένων που διαθέτει η εταιρεία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας , Southern California Edison και αφορούν οικιακές καταναλώσεις.

Hour	Total Load(W)
0	512.25139

1	466.68301
2	438.39919
3	422.68596
4	428.97125
5	451.75544
6	485.53889
7	514.60837
8	566.46204
9	622.24402
10	681.9543
11	766.80576
12	864.2278
13	955.36455
14	1041.0017
15	1113.2825
16	1168.2789
17	1157.2796
18	1075.5708
19	1026.0741
20	978.9344
21	860.29949
22	717.30907
23	590.81755

Πίνακας 5.2: Ωριαίες τιμές καταναλώσεων ανά οικία

5.2.1 Παράμετροι Σεναρίου Προσομοίωσης 1

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Παράμετρος	Τιμή	Παρατηρήσεις
Hometype_file_version	1.0	
Homes	30	
Version_pv	1.1	
P_I_vector_length	24	
P_vector	0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 23.66757 179.161 554.4602 1039.737 1479.219 1813.064 1933.458 2100.023 1966.937 1746.544 1431.976 1027.765 546.6828 192.5049 25.0515 0.0 0.0 0.0 0.0	Διάγραμμα παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος μέσω PV Watts που αντιστοιχεί σε καλοκαιρινό μήνα.
I_vector	0.0 0.0	Επίπεδα φωτεινότητας τα οποία δεν χρησιμοποιούνται από το μοντέλο (bypass_P_I=1)
bypass_P_I	1	
S_panel	1.0	Δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο εφόσον bypass_P_I=1.
n_eff_pv	0.95	
Voltage_op_pv	48	
P_max_pv	3000	

Temp_pv_vector	25.2 24.4 25 24 22.4 22.628 25.672 30.927 35.722 40.304 43.11 52.086 44 49.669 51.436 48.118 40.512 37.55 33.493 29.072 29 28 27.8 28	Θερμοκρασία ΦΒ πάνελ για τη διάρκεια του 24ώρου
Version_dc_load	1.0	
ON/OFF_Load_State	1.0	
Voltage_load_dc	48	
R_load_dc_vector	9.4029 10.3110 11.0044 11.3980 11.2024 10.6484 9.9024 9.3518 8.5163 7.7516 7.0595 6.2858 5.5748 5.0485 4.6324 4.3232 4.1257 4.1633 4.4795 4.6988 4.9194 5.6028 6.7117 8.1653	Υπολογισμένο διάνυσμα Αντιστάσεων για τα DC φορτία κάθε οικίας (υπολογισμένο από την υποσυνάρτηση dc_load_calcl. Οι τιμές του R_load_dc_vector υπολογίζονται πριν την προσομοίωση με χρήση της υποσυνάρτησης dc_load_calcl, η οποία δέχεται ως είσοδο τις τιμές ισχύος που καταναλίσκονται επί των DC φορτίων).
Version_ac_load	1.0	
ON/OFF_Load_State	1	
Voltage_load_ac	230	
R_load_ac_vector	187.6505 205.7731 226.5463 234.6493 223.5620 212.5064 176.8170 172.8782 161.0113 146.5532 146.8150 130.7252	Υπολογισμένο διάνυσμα Αντιστάσεων για τα AC φορτία κάθε οικίας (υπολογισμένο από την

	115.9380	100.7516	92.4463	86.2761	υποσυνάρτηση
	78.0016	78.7120	79.9860	93.7717	ac_load_calcl. Οι τιμές
	98.1744	115.3446	138.1729		του R_load_ac_vector
	162.9514				υπολογίζονται πριν την
					προσομοίωση με χρήση
					της υποσυνάρτησης
					ac_load_calcl, η οποία
					δέχεται ως είσοδο τις
					τιμές ισχύος που
					καταναλίσκονται επί των
					AC φορτίων. Ο
					συντελεστής ισχύος που
					είναι απαραίτητος για
					τον υπολογισμό παίρνει
					τιμές στο διάστημα
					[0,9,1].)
X_load_ac_vector	61.6777	67.6343	46.0022	47.6476	Υπολογισμένο διάνυσμα
	73.4813	69.8475	109.5813	93.3098	Αντιδράσεων για τα AC
	77.9813	70.9789	20.9200	18.6273	φορτία κάθε οικίας
	16.5203	33.1154	30.3856	28.3576	(υπολογισμένο από την
	37.7779	38.1220	49.5709	30.8213	υποσυνάρτηση
	32.2684	23.4217	28.0572	53.5595	ac_load_calcl. Οι τιμές
					του X_load_ac_vector
					υπολογίζονται πριν την
					προσομοίωση με χρήση
					της υποσυνάρτησης
					ac_load_calcl, η οποία
					δέχεται ως είσοδο τις
					τιμές ισχύος που
					καταναλίσκονται επί των
					AC φορτίων. Ο
					συντελεστής ισχύος που

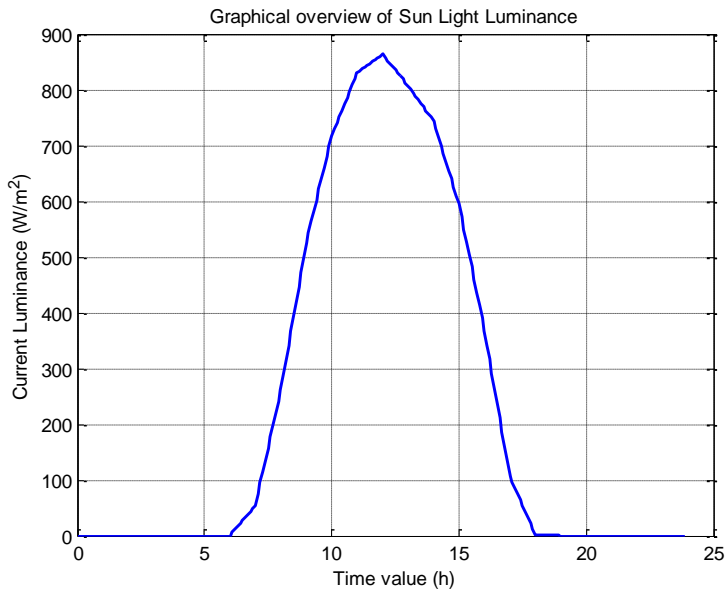
		είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1].)
Version_hems	1.0	
Time_start	0.0	
Time_stop	23.99	
Time_step	0.1	
I_calc_version	1.0	Δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο εφόσον bypass_P_I=1.
n_hems	0.95	
version_nems	1.0	
P_min	0	
P_max	9000	
n_nems	0.88	
SOC_Init	0.60	
version_batt	1.1	
Voltage_chg	48	
Voltage_cons	200	
n_chg	0.85	
Q_max	7200000	

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά Σεναρίου Προσομοίωσης 1

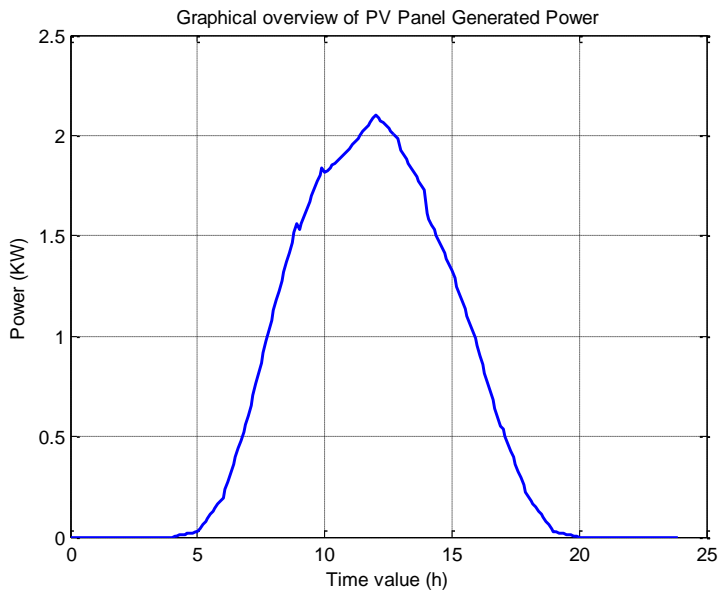
Οι τιμές του παραπάνω πίνακα χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του σεναρίου προσομοίωσης. Στην συνέχεια ακολουθούν τα γραφικά και αριθμητικά αποτελέσματα από την προσομοίωση.

5.2.2 Αποτελέσματα Σεναρίου Προσομοίωσης 1

Τα αποτελέσματα από το σενάριο προσομοίωσης 1 για καλοκαιρινούς μήνες προσομοίωσης με χαμηλές καταναλώσεις φορτίων, (γραφικές παραστάσεις και αριθμητικές τιμές) παρουσιάζονται στην συνέχεια.

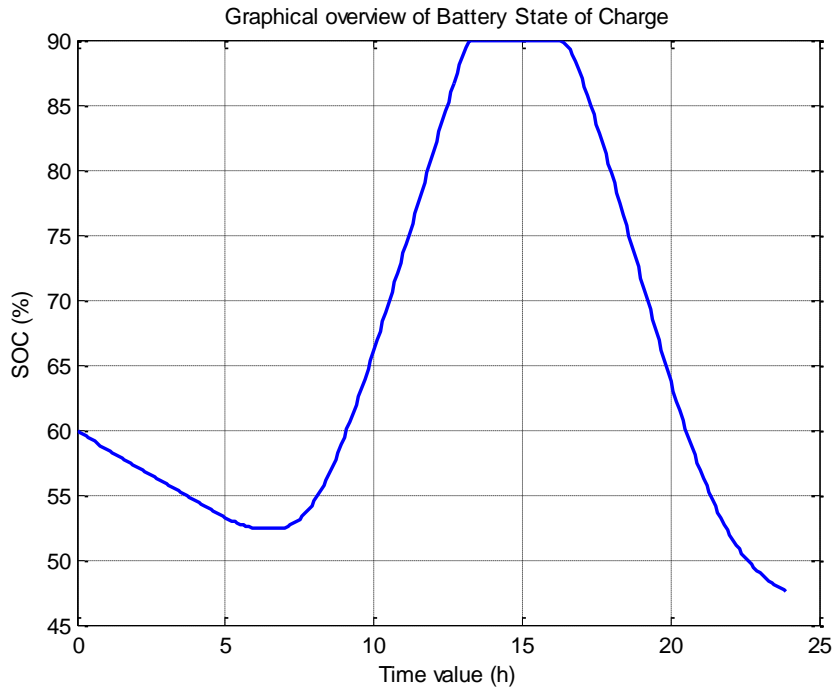


Σχήμα 5.1: Γραφική παράσταση της Ηλιακής Φωτεινότητας για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης



Σχήμα 5.2: Γραφική παράσταση της Ηλεκτρικής Ισχύος του ΦΒ Συστήματος

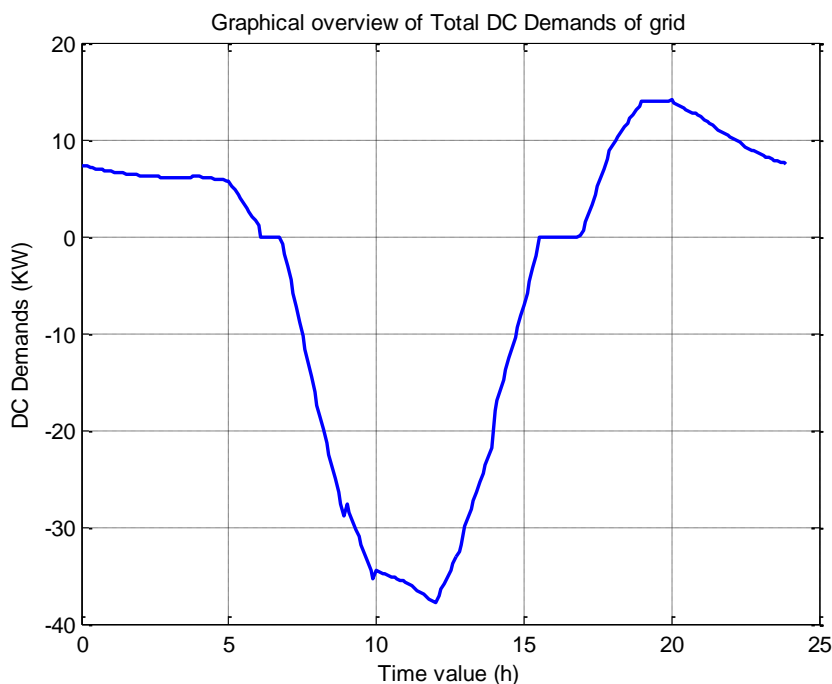
Από το διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος ενός τυπικού ΦΒ συστήματος που ανήκει σε μία από τις οικίες του μικροδικτύου, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μία μονότονη αυξητική συμπεριφορά στα παραγόμενα ποσά ενέργειας καθώς διερχόμαστε από τις πρωϊνές ώρες της ημέρας προς την διάρκεια των μεσημβρινών ωρών. Οι μέγιστες τιμές στην παραγωγή ισχύος που εμφανίζει το ΦΒ σύστημα ανέρχονται σε τιμή 2.1 kW η οποία είναι σχετικά υψηλή για ένα καλής ποιότητας ΦΒ πάνελ, τιμή η οποία κατά κύριο λόγο χαρακτηρίζει και τον τύπο του συγκεκριμένου σεναρίου προσομοίωσης (υψηλή παραγωγή ισχύος). Στην συνέχεια και καθώς απομακρυνόμαστε από το μέγιστο των μεσημβρινών ωρών, το σύστημα παραγωγής εμφανίζει μία μονοτονικά φθίνουσα συμπεριφορά, η οποία δικαιολογείται από την φάση δύσεως του ηλίου για το γεωγραφικό πλάτος της πόλης των Αθηνών (όπου θεωρούμε ότι είναι εγκατεστημένο το μικροδίκτυο παραγωγής). Η ελάχιστη τιμή παραγωγής ισχύος καταλήγει στο μηδέν (θεωρώντας ότι δεν έχουμε άλλες εξωτερικές επιδράσεις στον μηχανισμό παραγωγής ισχύος από φωτεινή ακτινοβολία, π.χ. επίπεδα παραγόμενης ισχύος από την αστρική φωτεινότητα, ή από το προκύπτον φως από την σελήνη, φωτορύπανση πόλης, κλπ). Η συμπεριφορά του διαγράμματος παραγωγής ισχύος είναι κατά προσέγγιση μία θετική ημιπερίοδος ημιτόνου με καθαρή περιοδική συμπεριφορά στην περίπτωση που θα χρειαζόταν να εξαχθεί μία μαθηματική φόρμουλα περιγραφής της εν λόγω ισχύος. Θα πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη ότι το διάγραμμα παραγόμενης ισχύος αφορά ενδεικτικά σε ένα ΦΒ πάνελ από μία οικία του μικροδικτύου.



Σχήμα 5.3: Γραφική παράσταση της Κατάστασης Φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών

Από το διάγραμμα φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου κατά την χρονική εκτέλεση του σεναρίου παρατηρούμε ότι αρχικά το σύστημα εκκινεί με ποσοστό φόρτισης 60%. Κατά τις αρχικές πρωϊνές ώρες της προσομοίωσης το σύστημα αποδίδει ενέργεια από τους συσσωρευτές για την κάλυψη των αναγκών ισχύος των οικιών του δικτύου, διότι στην φάση αυτή τα ΦΒ συστήματα δεν αποδίδουν ακόμη ενέργεια προς το σύστημα. Η φάση αυτή καταλήγει σε ένα ποσοστό φόρτισης της τάξης του 52.5% για τους συσσωρευτές. Κατά τις μεσημβρινές ώρες, όπου η παροχή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα του μικροδικτύου είναι υψηλή και σημαντική για την λειτουργία του μικροδικτύου, η φόρτιση των συσσωρευτών οδηγείται στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο φόρτισης (90%). Η τιμή αυτή επιλέχθηκε για να βοηθήσει τους συσσωρευτές του μικροδικτύου έτσι ώστε να εμφανίσουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (lifecycle) αποφεύγοντας μία πλήρη 100% φόρτιση η οποία μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτιση καταστρέφοντας τις συστοιχίες των συσσωρευτών. Το ποσοστό αυτό θα διατηρηθεί καθόλη την διάρκεια της ημέρας όπου υπάρχει μέγιστη προσφορά ισχύος από τα ΦΒ συστήματα. Αντίστοιχα όπως

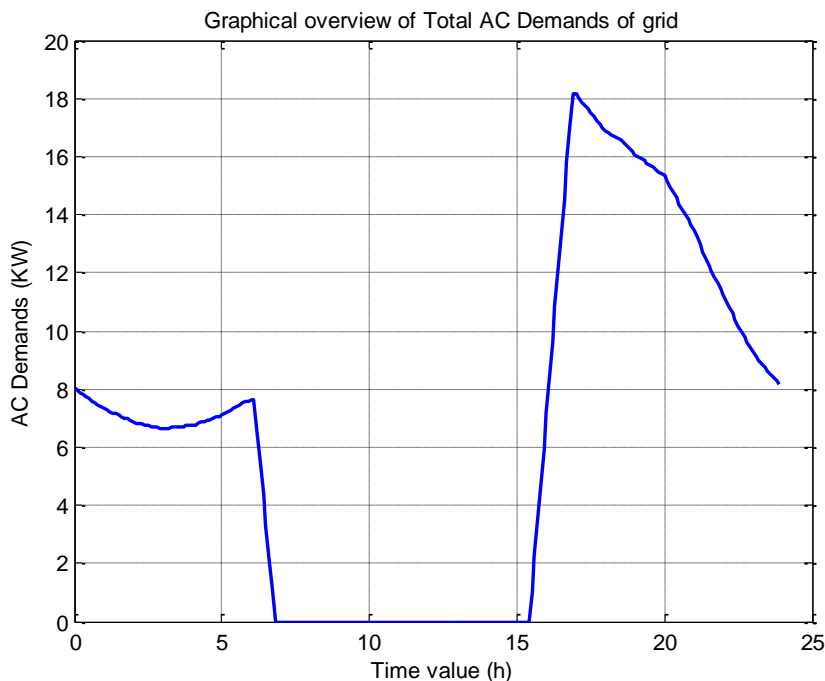
θα γίνει εμφανές, κατά τις ίδιες ώρες η πλεονάζουσα παραγόμενη ισχύς η οποία δεν μπορεί να διοχετευθεί σε κατανάλωση ή προς τους συσσωρευτές, αποδεδεσμεύεται ως Spare Power (πλεονάζουσα ισχύς) και μπορεί να διατεθεί για τον δημοτικό φωτισμό, κίνηση ηλεκτρικών μηχανών και οχημάτων, θέρμανση ύδατος για κάθε χρήση, κλπ. Μετά τις μεσημβρινές ώρες η παρεχόμενη ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για να διατηρήσει τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών και κατά κύριο λόγο η παραγόμενη ισχύς διατίθεται για την κάλυψη των φορτίων του συστήματος. Τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών εμφανίζονται να μειώνονται οδηγούμενα πάλι προς ένα επίπεδο φόρτισης λίγο χαμηλότερο της τάξης του 50%.



Σχήμα 5.4: Γραφική παράσταση των συνολικών απαιτήσεων DC του μικροδικτύου

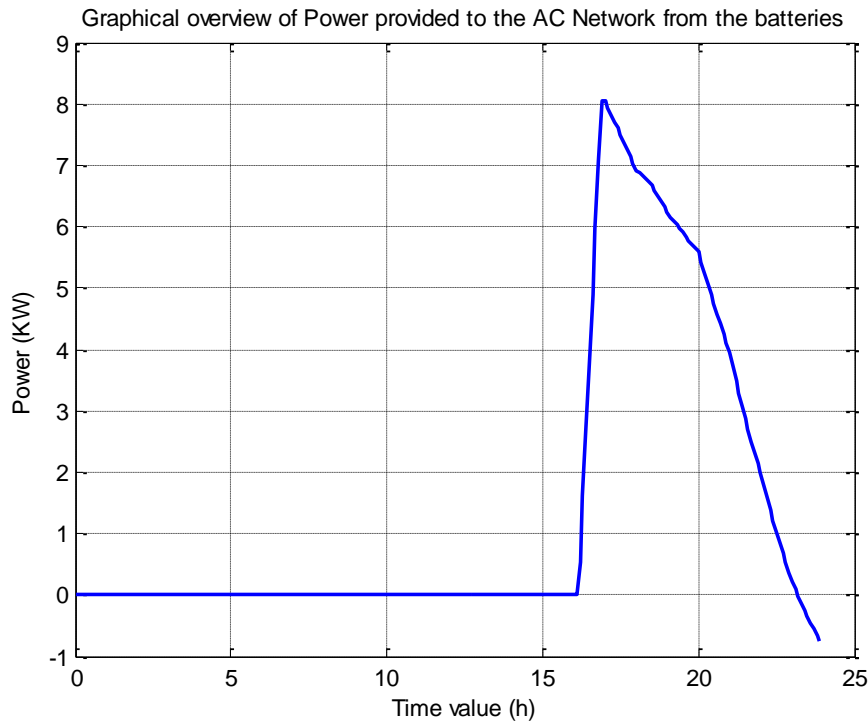
Από το διάγραμμα των DC απαιτήσεων φορτίου $D_{dc} = \sum(L_{dc} - P_g)$ κατά τις πρωϊνές ώρες οι απαιτήσεις στο μικροδίκτυο ανέρχονται στα επίπεδα των 7kW διότι τα ΦΒ συστήματα δεν παράγουν καθόλου ενέργεια κατά τις ώρες αυτές. Στην συνέχεια και εφόσον τα ΦΒ συστήματα ενεργοποιούνται, τα επίπεδα απαίτησης ισχύος για την κάλυψη των DC φορτίων μειώνονται και καταλήγουν σε μηδενικές απαιτήσεις

γύρω στις 6 π.μ. Στην συνέχεια της προσομοίωσης και πλησιάζοντας κατά τις μεσημβρινές ώρες η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα επαρκεί για την πλήρη κάλυψη των DC φορτίων παράγοντας και επιπλέον ενέργεια, η οποία θα οδηγήσει στην διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου. Η μέγιστη επιστρεφόμενη ισχύς που τα ΦΒ συστήματα αποδίδουν στο μικροδίκτυο, ανέρχεται (αφού καλύψει τα DC φορτία) σε επίπεδα 37 kW. Κατά την πορεία της φάσης προσομοίωσης η παραγόμενη ισχύς αρχίζει να μειώνεται μονοτονικά από το προηγούμενο μέγιστο, φτάνοντας οριακά κατά τις απογευματινές ώρες της προσομοίωσης στην κάλυψη των DC αναγκών του μικροδικτύου (μηδενική τιμή DC αναγκών). Το σενάριο καταλήγει με πέρασμα σε τιμές οι οποίες δεν μπορούν να καλυφθούν από την παραγωγή των ΦΒ συστημάτων κατά τις νυχτερινές ώρες και υποχρεωτικά καλύπτονται από παροχή ενέργειας από τους συσσωρευτές και το εξωτερικό AC δίκτυο.



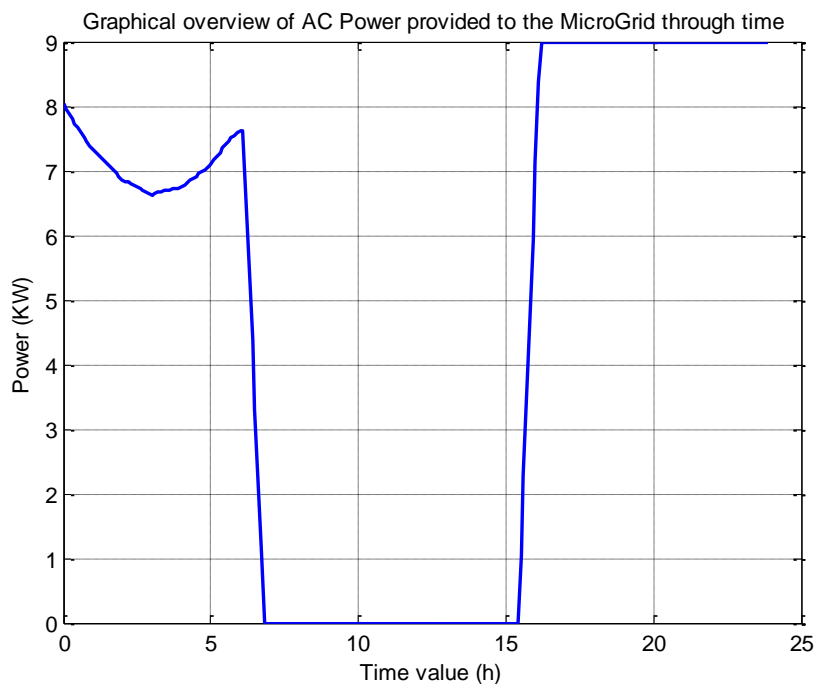
Σχήμα 5.5: Γραφική παράσταση των συνολικών AC απαιτήσεων του μικροδικτύου

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη των απαιτήσεων D_{AC} για την κάλυψη των AC φορτίων του μικροδικτύου. Τα φορτία αυτά με βάση τους κανόνες για το πρωτόκολλο λειτουργίας (HEMS/NEMS) του μικροδικτύου, θα πρέπει να καλυφθούν είτε αυτόνομα από τους συσσωρευτές του μικροδικτύου εφόσον τα επίπεδα ισχύος των συσσωρευτών είναι αρκετά υψηλά, είτε να καλυφθούν κατά μέρος ή και εξ'ολοκλήρου με χρήση εξωτερικής παροχής ισχύος από το AC δίκτυο. Όπως θα φανεί και από το διάγραμμα παροχής ισχύος προς τους συσσωρευτές που ακολουθεί στη συνέχεια, στο μικροδίκτυο υπάρχει κατά χρονικές στιγμές προσφορά εξωτερικής AC ισχύος. Η συγκεκριμένη προσφορά καλύπτει κατά ένα μέρος τις AC ανάγκες φορτίου του μικροδικτύου κρατώντας για όλο το πρωινό χρονικό διάστημα, όπου τα ΦΒ συστήματα λόγω ελλείψεως φωτεινότητας είναι εκτός λειτουργίας. Κατά τις ώρες αυτές τα φορτία των AC απαιτήσεων κρατούνται σχετικά σταθερά στο επίπεδο των 8 kW για το μικροδίκτυο. Στην συνέχεια και εφόσον η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα αρχίζει να συνεισφέρει σημαντικά στην ενέργεια του συστήματος, οι απαιτήσεις των AC φορτίων μηδενίζονται εφόσον αυτά αρχίζουν να καλύπτονται (με μετατροπή ισχύος DC σε AC) από την παραγόμενη ενέργεια, η περίσσεια των οποίων καταλήγει στους συσσωρευτές. Οι μηδενικές απαιτήσεις για τα AC φορτία συνεχίζουν να διατηρούνται μέχρι και την 3 μ.μ. ώρα της προσομοίωσης όπου τα επίπεδα παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα αρχίζουν να μειώνονται. Αυτό συντελεί σε μία γραμμική αύξηση των απαιτήσεων, εφόσον αυτές δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν από την παρεχόμενη ισχύ στους συσσωρευτές καταλήγοντας στην μέγιστη τιμή απαίτησης των 18 kW κατά τις απογευματινές ώρες. Οι απαιτήσεις αρχίζουν να μειώνονται δεδομένης της μείωσης ζήτησης των AC φορτίων των οικιών.



Σχήμα 5.6: Γραφική παράσταση της ισχύος που αποδίδεται στο AC δίκτυο από τους συσσωρευτές

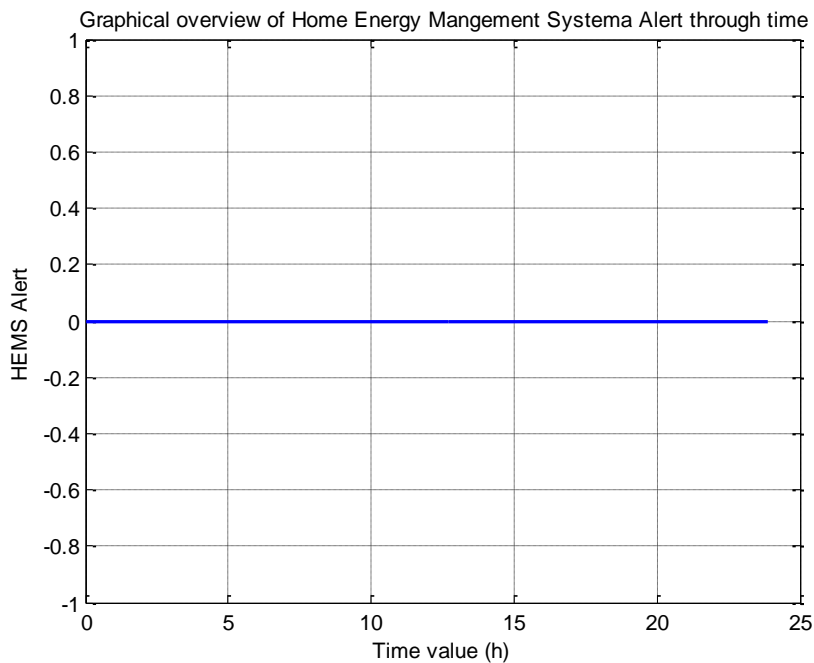
Το διάγραμμα παρουσιάζει την προσφορά ισχύος προς το εξωτερικό AC δίκτυο από τους συσσωρευτές του μικροδικτύου καθόλη την διάρκεια της χρονικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι κατά το μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης το εξωτερικό AC δίκτυο δεν χρειάζεται να λαμβάνει ενέργεια από τους συσσωρευτές για την λειτουργία του συστήματος και την κάλυψη φορτίων. Κατά την πορεία της προσομοίωσης και μετά την 3 μ.μ. οι συσσωρευτές φαίνεται να αποδίδουν ενέργεια για την κάλυψη των AC αναγκών του μικροδικτύου δεδομένου ότι οι συσσωρευτές ήδη βρίσκονται σε υψηλό επίπεδο φόρτισης (της τάξης του 90%). Αυτή η παρεχόμενη ισχύς τείνει να καταλήξει πάλι σε μηδενική τιμή καθώς οι συσσωρευτές εκφορτίζονται καλύπτοντας τις ενεργειακές ανάγκες των φορτίων και ο αλγόριθμος ελέγχου για το δίκτυο περνάει από την κατάσταση 2 στην κατάσταση 6.



Σχήμα 5.7: Γραφική παράσταση της ισχύος που αποδίδεται από το AC δίκτυο προς το μικροδίκτυο.

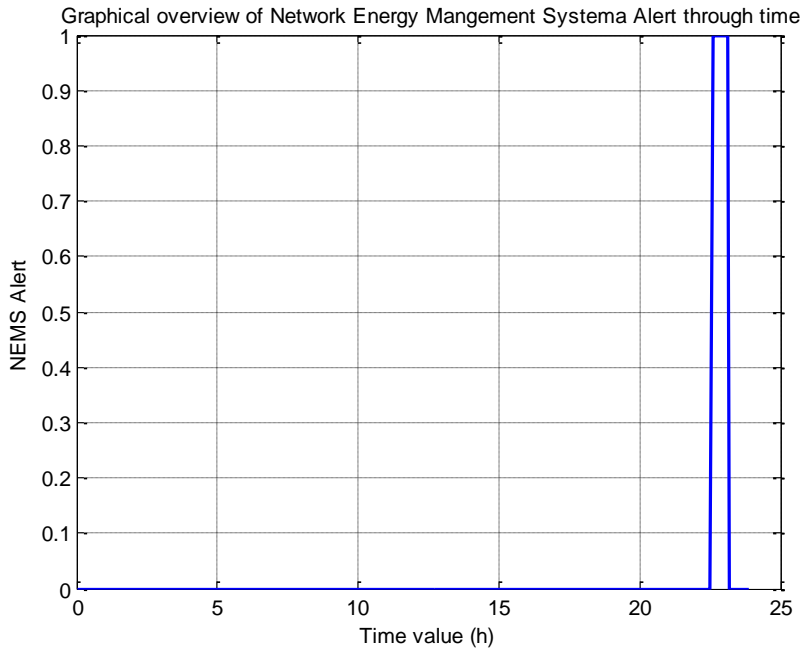
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την συνολική προσφορά ισχύος από το εξωτερικό AC δίκτυο προς συνολικά το μικροδίκτυο (κάλυψη συσσωρευτών και DC/AC φορτίων του μικροδικτύου). Κατα τις πρωϊνές ώρες παρατηρούμε ότι η συνολικά προσφερόμενη ισχύς καλύπτει αθροιστικά τα AC φορτία του μικροδικτύου, με βάση τον αλγόριθμο ελέγχου του NEMS. Πρέπει να επισημάνουμε ότι από τις προδιαγραφές του σεναρίου προσομοίωσης το εξωτερικό δίκτυο ορίζεται να έχει την ικανότητα παροχής ισχύος που ανήκει στο διάστημα $P_{\min}=0$ έως $P_{\max}=9$ kW. Η προσφερόμενη ισχύς από το εξωτερικό δίκτυο αρχίζει να μειώνεται με σχετικά ομαλό γραμμικό και μονότονο τρόπο κατά την φάση όπου τα ΦΒ συστήματα αρχίζουν να τίθενται σε λειτουργία, προσφέροντας στο μικροδίκτυο σημαντικά ποσοστά ισχύος. Το γεγονός αυτό καταλήγει στην προσφορά μηδενικού επιπέδου ισχύος προς το μικροδίκτυο για όλο το χρονικό διάστημα από 7 π.μ. μέχρι και 4 μ.μ. Στην φάση αυτή τα επίπεδα παροχής ισχύος από τα ΦΒ συστήματα αρχίζουν να μειώνονται λόγω μείωσης των επιπέδων φωτεινότητας κατά την πάροδο της ημέρας, αυξάνοντας έτσι την προσφορά ισχύος από το εξωτερικό AC

δίκτυο. Το φαινόμενο αυτό κορυφώνεται σύντομα οδηγώντας στο μέγιστο απαίτησης των 9 kW. Οι απαιτήσεις των φορτίων αρχίζουν να μειώνονται, όσο προχωράει η προσομοίωση προς τις νυχτερινές ώρες. Με βάση αυτές τις απαιτήσεις φορτίου, καθώς και τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών, παρατηρούμε από το διάγραμμα καταστάσεων του NEMS, πως η εξωτερικά παρεχόμενη ισχύς θα διατηρείται στα μέγιστα επίπεδα.



Σχήμα 5.8: Γραφική παράσταση σημάτων συναγερμού από το HEMS.

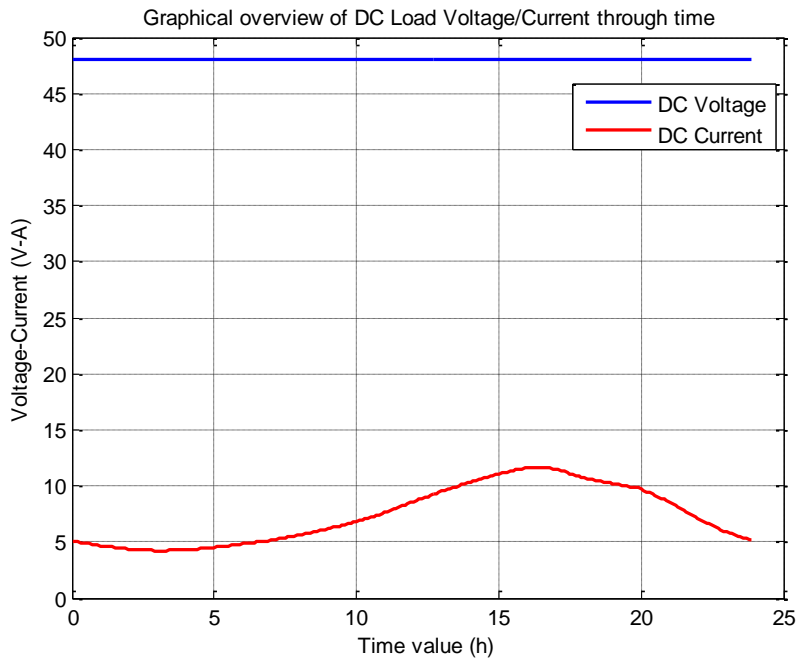
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το σήμα συναγερμού από την οντότητα HEMS μίας οικίας του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι αυτό το σήμα δεν ενεργοποιείται καθόλου σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης δεδομένου ότι από το HEMS πρωτόκολλο χειρισμού, η οικία ποτέ δεν περιέρχεται σε καθεστώς φόρτισης των συσσωρευτών $> 95\%$ ή $< 40\%$.



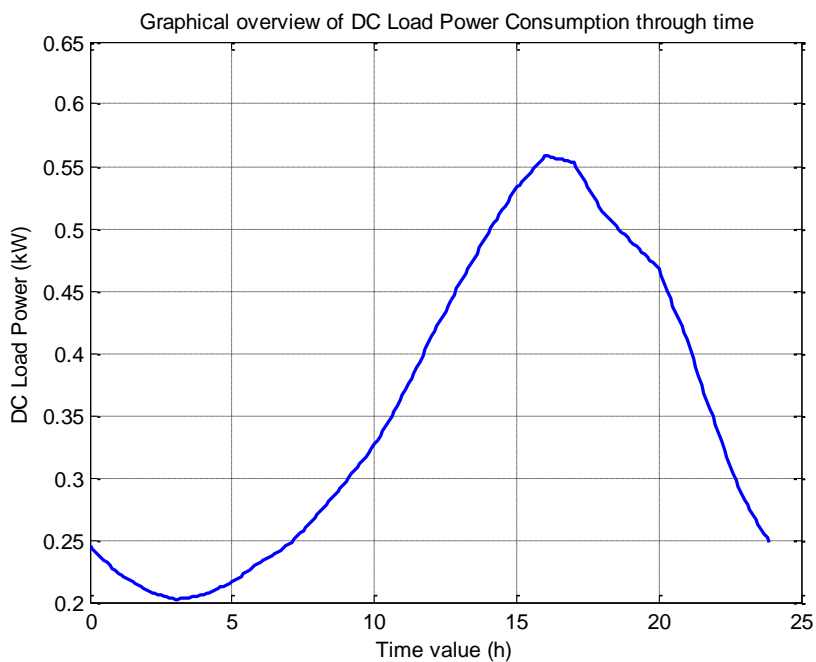
Σχήμα 5.9: Γραφική παράσταση σημάτων συναγερμού από το NEMS

Το διάγραμμα του προηγούμενου σχήματος παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη του σήματος συναγερμού από την οντότητα NEMS διαχείρισης ενέργειας του συστήματος. Παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο σήμα ενεργοποιείται γύρω στις 10:30 μ.μ. κατά την διάρκεια του σεναρίου με βάση το πρωτόκολλο διαχείρισης και λήψης αποφάσεων από το NEMS. Η οντότητα NEMS βρίσκεται σε κατάσταση 3 όπως θα φανεί και στο αντίστοιχο διάγραμμα καταστάσεων, κατάσταση η οποία δηλώνει ότι οι συσσωρευτές βρίσκονται σε καθεστώς φόρτισης μικρότερο του 50% και οι AC ανάγκες του μικροδικτύου δεν μπορούν να καλυφθούν από την μέγιστη τιμή παροχής ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο. Το σήμα συναγερμού επανέρχεται σε ανενεργή κατάσταση διότι οι απαιτήσεις AC φορτίων του μικροδικτύου μειώνονται με την πάροδο του χρόνου πέφτοντας σε επίπεδα χαμηλότερα της εξωτερικά προσφερόμενης ισχύος από το AC δίκτυο. Το νόημα των συναγερμών είναι η λήψη συγκεκριμένων ενεργειών, προκειμένου να συνεχιστεί η απόσκοπη λειτουργία του μικροδικτύου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως αναφέρθηκε, οι απαιτήσεις AC φορτίων του μικροδικτύου μειώνονται με την πάροδο του χρόνου πέφτοντας σε επίπεδα χαμηλότερα της εξωτερικά προσφερόμενης ισχύος από το

AC δίκτυο, αλλά σε μια διαφορετική κατάσταση, ο διαχειριστής του δικτύου θα μπορούσε να αυξήσει τα επίπεδα παροχής ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο προς το μικροδίκτυο, προκειμένου να ανταπεξέλθει στις ανάγκες των χρηστών.

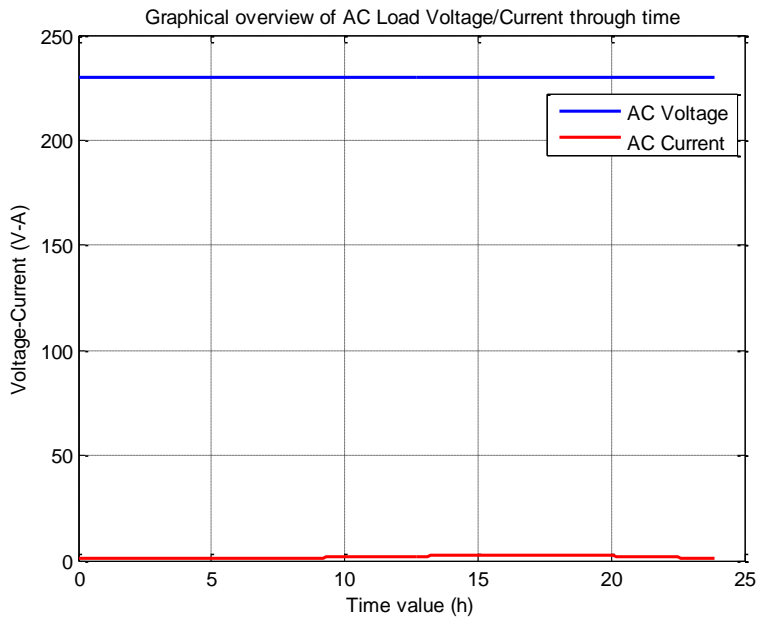


Σχήμα 5.10: Γραφική παράσταση των DC ρευμάτων/τάσεων ανά οικία

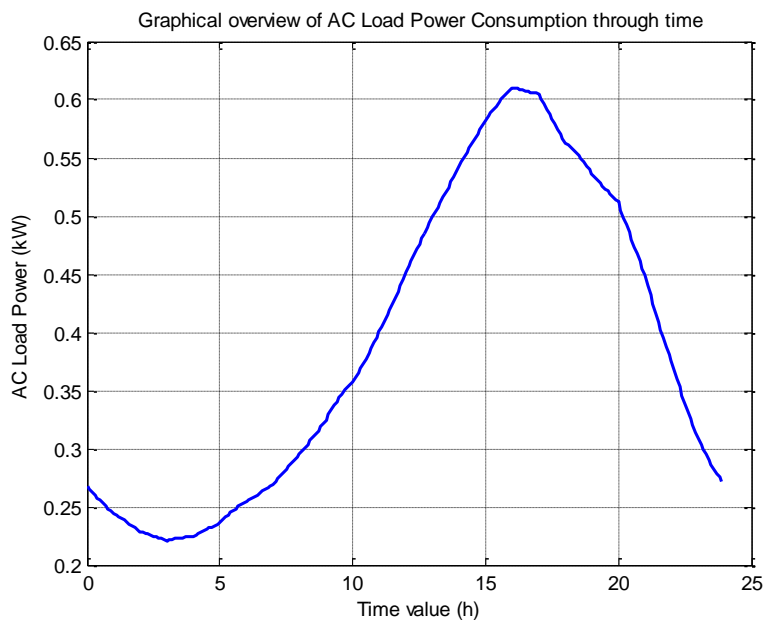


Σχήμα 5.11: Γραφική παράσταση των DC φορτίων ανά οικία

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν τις απαιτήσεις φορτίου DC, καθώς και την τάση και το ρεύμα λειτουργίας για κάθε οικία του μικροδικτύου. Παρατηρούμε πως η DC τάση λειτουργίας για το επίπεδο των οικιών διατηρείται σταθερή στα 48 V , ενώ τα ρεύματα δεν παίρνουν ιδιαίτερα μεγάλες τιμές.

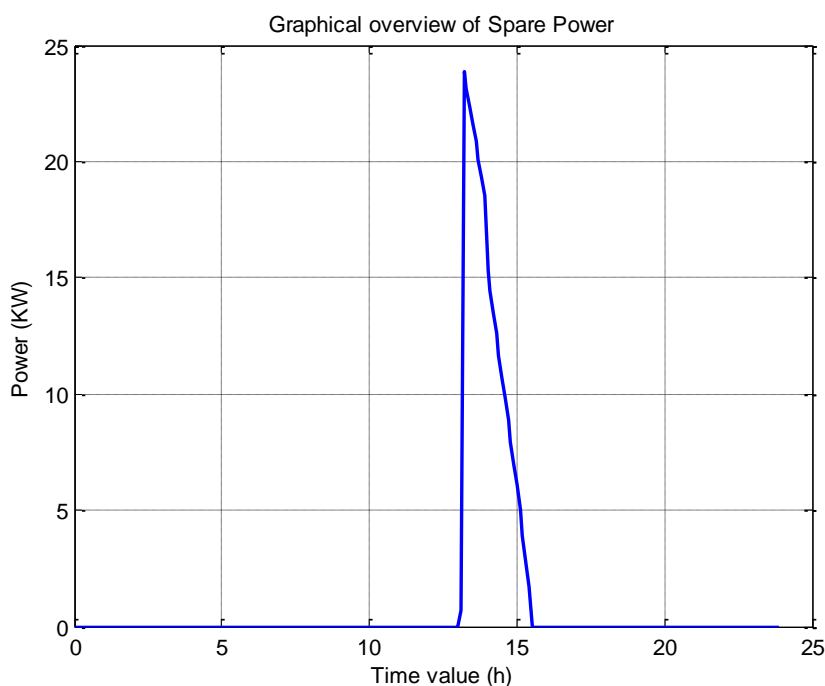


Σχήμα 5.12: Γραφική παράσταση των AC ρευμάτων/τάσεων ανά οικία



Σχήμα 5.13: Γραφική παράσταση των AC φορτίων ανά οικία

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν τις τάσεις και τα ρεύματα ανά οικία τα οποία ανακύπτουν ανά οικία από τις καταναλώσεις των AC φορτίων, καθώς και τις συνολικές απαιτήσεις σε AC φορτίο. Η τάση λειτουργίας για το AC δίκτυο θεωρείται τα 230 V (rms), ενώ τα ρεύματα δεν ξεπερνούν τα 10 A.



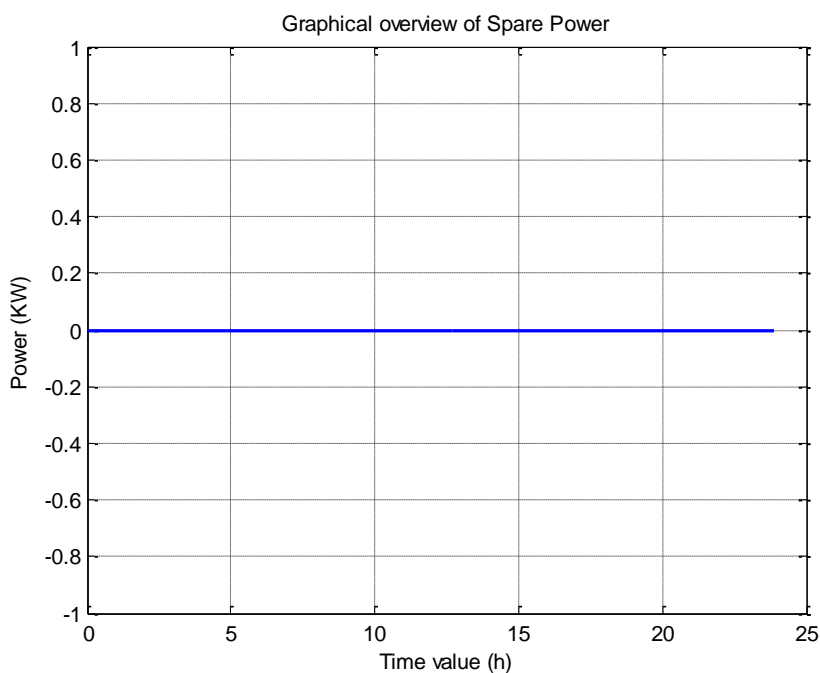
Σχήμα 5.14: Γραφική παράσταση πλεονάζουσας ισχύος του μικροδικτύου

Το διάγραμμα της πλεονάζουσας ισχύος (spare power) προκύπτει αφαιρώντας από την συνολικά παραγόμενη και παρεχόμενη ισχύ προς το μικροδίκτυο, τις καταναλώσεις των DC/AC φορτίων καθώς και την διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών (με μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό της τάξης του 90%). Η ισχύς που πλεονάζει όπως παρουσιάζεται και από το διάγραμμα αφορά κυρίως στις μεσημβρινές ώρες όπου το μικροδίκτυο έχει περίσσεια παραγωγής ενέργειας από τα ΦΒ συστήματα. Η ισχύς αυτή παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή της τάξης των 24 kW κατά την χρονική στιγμή κατά τις 12 μ.μ. και στην συνέχεια πέφτει σε μηδενικά επίπεδα λίγο μετά από τις 3 μ.μ. Η συνολική ενέργεια που πλεονάζει στο σύστημα θα μπορούσε να ενταμιευθεί στην περίπτωση που το μικροδίκτυο διέθετε

μεγαλύτερη σε χωρητικότητα συστοιχία συσσωρευτών έτσι ώστε να διατεθεί κατά τις βραδινές ώρες απαλλάσσοντας το εξωτερικό AC δίκτυο από την ανάγκη προσφοράς ισχύος κατά τις ώρες αυτές. Εναλλακτικά όπως γίνεται σε εφαρμογές οικισμών παραγωγής/κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος η περίσσεια ισχύος μπορεί να επιστραφεί προς το δίκτυο του φορέα διανομής ενέργειας ή να διατεθεί σε τοπικές ή ευρύτερες εφαρμογές όπως θέρμανση/ψύξη νερού και διάθεση του για θέρμανση/ψύξη σε οικίες ή δρόμους/κοινόχρηστους χώρους, κάλυψη αναγκών ψύξης, κάλυψη αναγκών ύδρευσης και συγκέντρωσης νερού με χρήση αντλιών, κλπ.

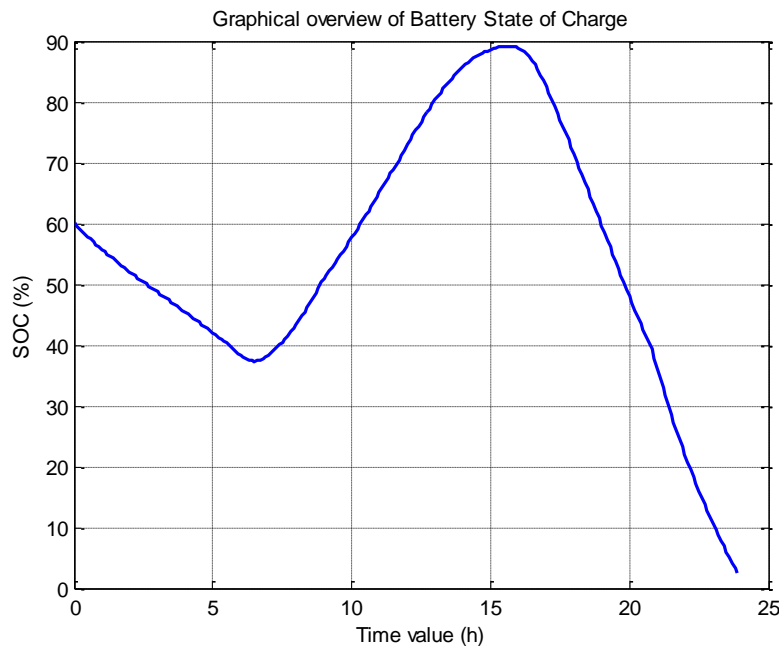
Εναλλακτικά, και αν θέλουμε να μηδενιστεί η πλεονάζουσα ισχύς για οποιοδήποτε λόγο, θα πρέπει ο διαχειριστής του δικτύου να θέσει τα επίπεδα εξωτερικής παροχής ισχύος σε μικρότερες τιμές από τις αυτές που ισχύουν στο σενάριο που μελετάμε ($P_{min}=0 \text{ kW}$, $P_{max}=9 \text{ kW}$).

Πιο συγκεκριμένα αν στο ίδιο ακριβώς σενάριο θέσουμε $P_{min}=0 \text{ kW}$, $P_{max}=4 \text{ kW}$, η πλεονάζουσα ισχύς θα είχε μηδενικές τιμές, όπως φέεται και στο επόμενο διάγραμμα.



Σχήμα 5.15: Γραφική παράσταση πλεονάζουσας ισχύος του μικροδικτύου με $P_{min}=0 \text{ KW}$ και $P_{max}=4 \text{ KW}$

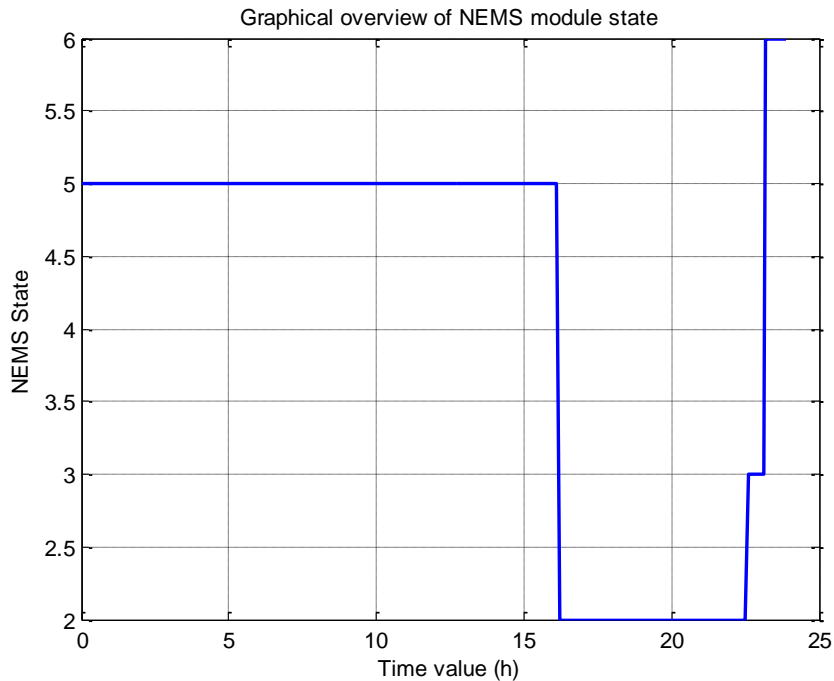
Στην παραπάνω περίπτωση το διαγραμμα του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών θα είχε την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 5.16: Γραφική παράσταση της Κατάστασης Φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών με $P_{min}=0$ KW και $P_{max}=4$ KW

Παρατηρούμε πως με τα καινούρια όρια στην εξωτερική παροχή ισχύος, το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών δεν φτάνει στο ανώτατο επιτρεπόμενο όριο (90%), αλλά στο τέλος του 24ώρου πλησιάζει το 0%. Προφανώς και κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι σε σχέση με πριν, μειώθηκαν τα επίπεδα εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος (μέρος της οποίας χρησιμοποιείται και για τη φόρτιση των συσσωρευτών). Από το συγκεκριμένο παράδειγμα γίνεται και εμφανές το πόσο σημαντικός είναι και ο ρόλος του διαχειριστή του δικτύου, για την ομαλή λειτουργία του μικροδικτύου. Πιο συγκεκριμένα σε μια ρεαλιστική πραγμάτωση του περιβάλλοντος που μελετάμε, ο διαχειριστής θα μπορούσε να ξεκινήσει να λειτουργεί το μικροδίκτυο με $P_{min}=0$ KW και $P_{max}=4$ KW, αλλά σε περίπτωση συναγερμού (που θα παραγόταν αν το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών ήταν κάτω από 50% και το P_{max} ήταν μικρότερο από τη ζήτηση τη δεδομένη στιγμή, σύμφωνα με τον υλοποιημένο αλγόριθμο ελέγχου), θα έπρεπε να αυξήσει τα

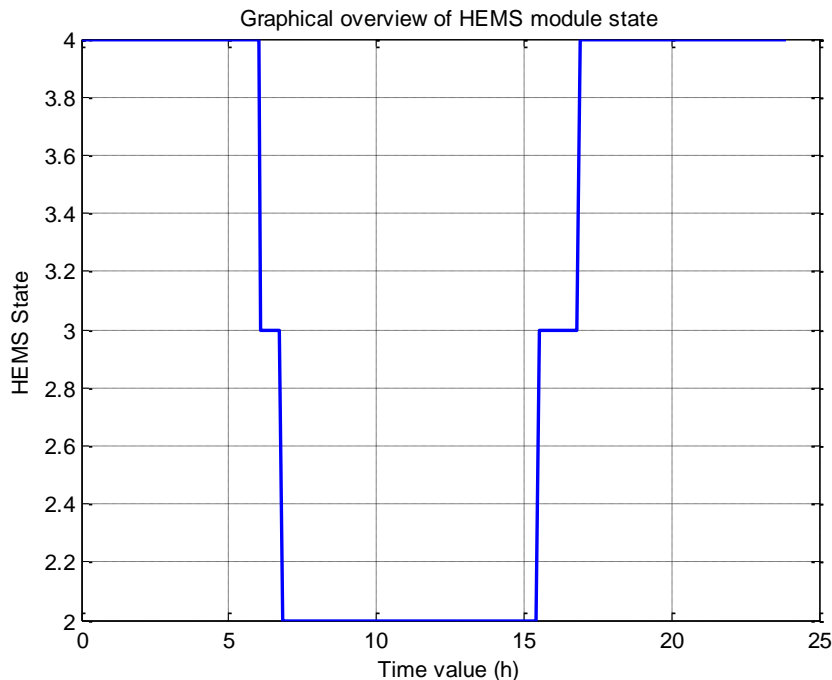
επίπεδα P_{min}, P_{max} , προκειμένου ένα μέρος της ισχύς του ανάντη δικτύου να φορτίσει τους συσσωρευτές.



Σχήμα 5.17: Γραφική παράσταση των καταστάσεων του NEMS

Συνεχίζοντας με το σενάριο προσομοίωσης 1, το διάγραμμα 5.17 παρουσιάζει τις καταστάσεις μετάβασης με βάση τον ορισμό του NEMS πρωτοκόλλου για την λειτουργία των οικιών του μικροδικτύου. Παρατηρείται ότι κατά τις πρωινές ώρες το μικροδίκτυο φαίνεται να παραμένει σταθερά στην κατάσταση 5. Με αντιστοίχιση των συνθηκών για την περιγραφή αυτής της κατάστασης παρατηρούμε ότι η κατάσταση 5 αντιστοιχεί σε απαιτήσεις D_{AC} μεταξύ του επιπέδου P_{min} και P_{max} και $SOC > 50\%$. Σε αυτήν την περίπτωση το μικροδίκτυο οδηγεί το εξωτερικό δίκτυο παροχής AC ισχύος σε προσφορά ενέργειας για την διατήρηση του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών. Αύξηση του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών σε ποσοστό 90% με ταυτόχρονη μεταβολή των απαιτήσεων των AC φορτίων οδηγούν στην κατάσταση 2 όπου οι απαιτήσεις D_{AC} είναι μεγαλύτερες της προσφερόμενης P_{max} από το εξωτερικό δίκτυο. Στην συνέχεια το σύστημα μετά την φάση εκφόρτισης των συσσωρευτών και την πτώση του επιπέδου τους κάτω

από 50% και δεδομένου ότι τα φορτία AC βρίσκονται εκτός κάλυψης διέρχεται από την κατάσταση 3, η οποία είναι και η αιτία για ένα σύντομο σήμα συναγερμού προς τον διαχειριστή του δικτύου, καταλήγοντας τελικά στην κατάσταση 6, όπου οι ανάγκες των AC φορτίων έχουν περιέλθει εντός ζώνης κάλυψης P_{min} και P_{max} αλλά τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών είναι μικρότερα του 50%.

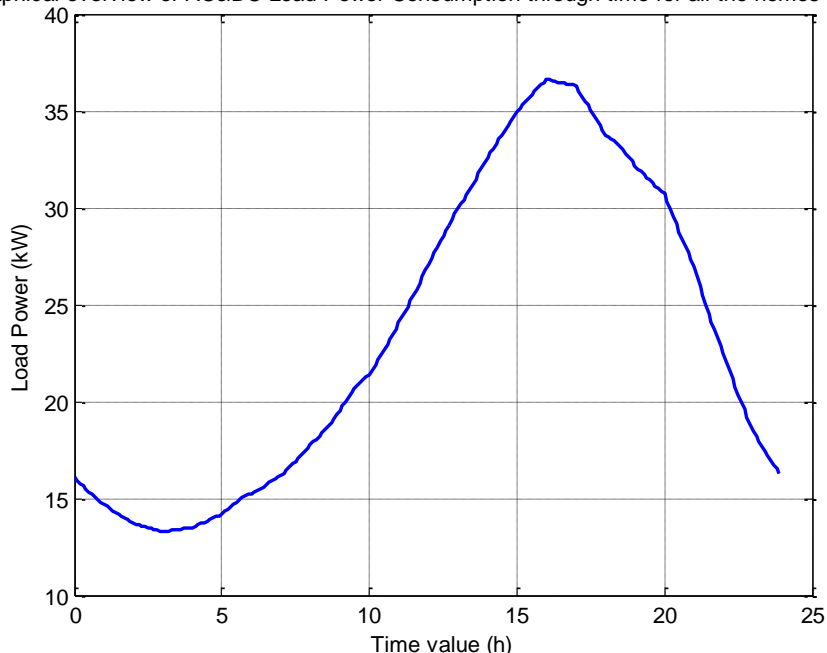


Σχήμα 5.18: Γραφική παράσταση των καταστάσεων του HEMS

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις μεταβάσεις καταστάσεων με βάση το πρωτόκολλο διαχείρισης ενεργειών HEMS για κάθε οικία του μικροδικτύου. Παρατηρείται ότι κατά τις πρωινές ώρες το HEMS της οικίας βρίσκεται στην κατάσταση 4 όπου η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των DC φορτίων και οι συσσωρευτές βρίσκονται σε κατάσταση $SOC > 40\%$. Σε αυτήν την φάση τα DC φορτία καλύπτονται από τους συσσωρευτές ενώ τα AC φορτία ανατίθενται για κάλυψη στο εξωτερικό AC δίκτυο. Στην συνέχεια, ο αλγόριθμος ελέγχου για την κάθε οικία του μικροδικτύου φτάνει στην κατάσταση 2 όπου η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα είναι αρκετά υψηλή και μπορεί να καλύψει τις συνολικές απαιτήσεις των DC/AC φορτίων συνολικά περνώντας για

πολύ λίγο από την κατάσταση 3 όπου η παραγόμενη ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για την πλήρη κάλυψη των DC/AC φορτίων. Οι μεταβάσεις αυτές είναι συμμετρικά αντιστρέψιμες κατά τις φάσεις όπου τα ΦΒ συστήματα μετά την απόδοση του μέγιστου της ισχύος εισέρχονται σε φάσεις μη παραγωγής λόγω δύσεως του ηλίου, οπότε και το HEMS επανέρχεται στην αρχική κατάσταση 4.

Graphical overview of AC&DC Load Power Consumption through time for all the homes in the g



Σχήμα 5.19: Γραφική παράσταση των συνολικών AC/DC απαιτήσεων για το σύνολο των οικιών του μικροδικτύου

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει γραφικά καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης για το μικροδίκτυο τις συνολικές απαιτήσεις φορτίων (AC και DC), όπως αυτές μεταβάλλονται σε διάφορες χρονικές φάσεις. Παρατηρούμε ότι τα επιβαλλόμενα σενάρια προσομοίωσης είναι αρκετά ρεαλιστικά μεταβάλλοντας τις απαιτήσεις συνολικού φορτίου από μία σχετικά χαμηλή τιμή κατά τις πρωινές ώρες λειτουργίας του μικροδικτύου, σε αυξανόμενες τιμές προς τις μεσημβρινές ώρες. Εκεί παρουσιάζεται ένα μέγιστο της τάξης των 35 KW. Στην συνέχεια οι απαιτήσεις ισχύος μειώνονται φθάνοντας ξανά στην περιοχή των 15 KW που ήταν και οι αρχικές απαιτήσεις κατά τις πρωινές ώρες της προσομοίωσης.

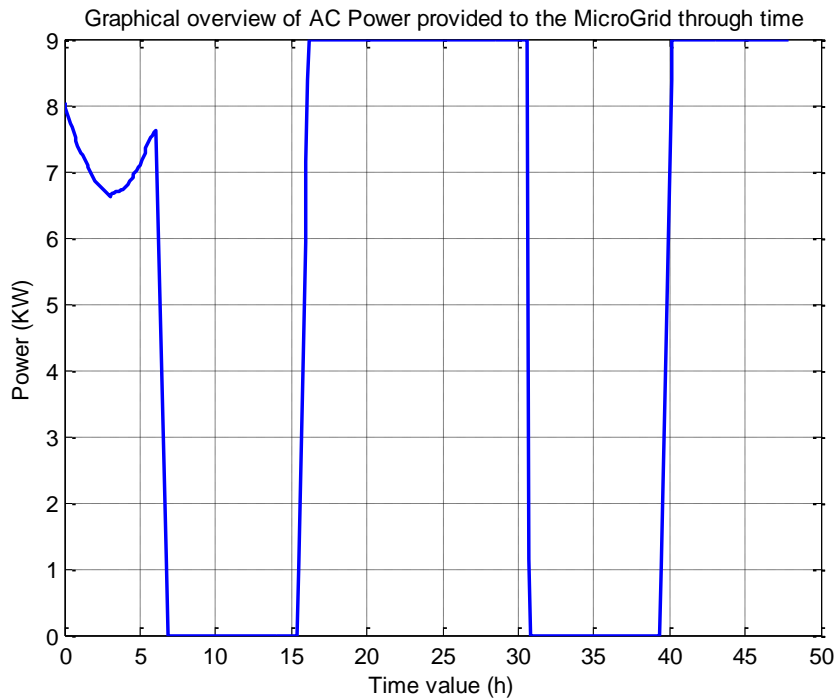
5.2.3 Συμπεράσματα από το Σενάριο Προσομοίωσης 1

Το βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου σεναρίου προσομοίωσης είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών 30 οικιών οι οποίες μετέχουν στην δομή ενός μικροδικτύου με χρήση ΦΒ συστημάτων με σχετικά υψηλό επίπεδο παραγωγής ισχύος. Το σενάριο προσομοίωσης αφορά σε καλοκαιρινή εποχή προσομοίωσης, διασφαλίζοντας μέγιστες τιμές στην παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα. Όπως παρατηρήσαμε και από την ανάλυση των επιμέρους διαγραμμάτων από την προσομοίωση, το σύστημα εκκινεί από ένα επίπεδο φόρτισης 60% για τις συστοιχίες των συσσωρευτών του. Κατά τις πρωινές ώρες όπου οι απαιτήσεις των ενεργειακών αναγκών του μικροδικτύου δεν μπορούν να καλυφθούν από την παραγωγή των ΦΒ συστημάτων, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το εξωτερικό AC δίκτυο και από τους συσσωρευτές. Το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών διατηρείται παρά την εκφόρτιση σε επίπεδο άνω του 50% κατά τις πρωινές ώρες. Στην συνέχεια και εφόσον η παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ συστήματα αρχίζει να δίνει υψηλή τιμή ισχύος, η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του δικτύου μεταβιβάζεται προς τους συσσωρευτές ενώ ταυτόχρονα τα επίπεδα φόρτισης τους αυξάνουν από την περίσσεια ενέργειας. Κατά τις μεσημβρινές ώρες έχει επιτευχθεί και η μέγιστη επιτρεπτή τιμή φόρτισης η οποία για λόγους ασφαλείας και διατήρησης του επιπέδου λειτουργικότητας (life cycle) των συσσωρευτών καθορίστηκε στο 90%. Το μικροδίκτυο παρέχει την πλεονάζουσα ισχύ του, η οποία παράγεται κατά τις μεσημβρινές ώρες έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί είτε για επιστροφή προς το AC δίκτυο είτε για να παρέχει την κάλυψη φορτίων κοινωφελών αναγκών (π.χ. ύδρευση, θέρμανση, ψύξη του οικισμού, κλπ). Κατά την έλευση του απογεύματος η απόδοση των ΦΒ συστημάτων παύει να δίνει ικανοποιητικά επίπεδα ισχύος για την λειτουργία του συστήματος, οπότε το σύστημα εξαναγκάζεται σε χρήση της εξωτερικά προσφερόμενης ενέργειας. Αυτό συνεχίζεται με παράλληλη εκφόρτιση των συσσωρευτών για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μέχρι τις βραδινές ώρες.

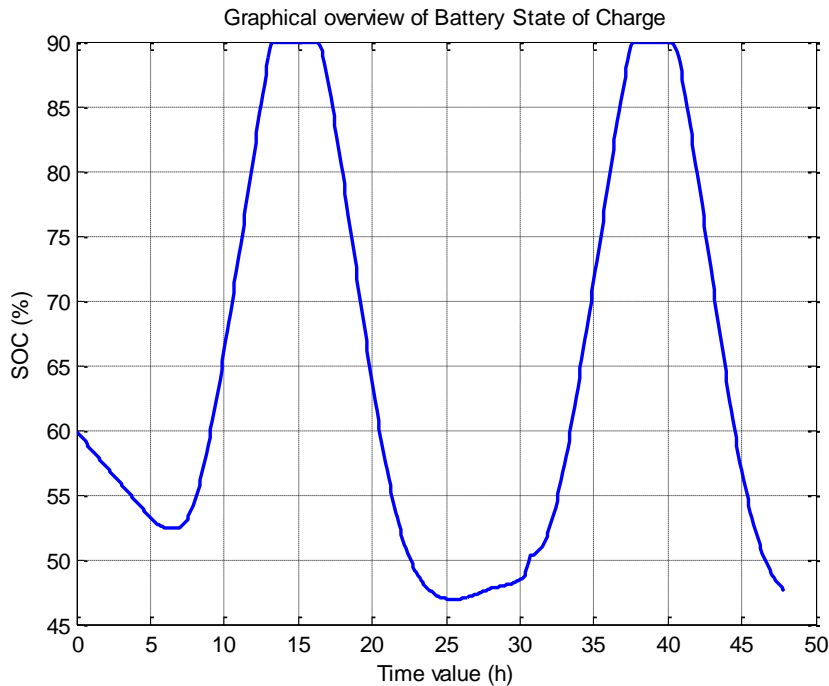
Το μικροδίκτυο με τα παραπάνω επίπεδα παροχής εξωτερικής ισχύος $[P_{\min}, P_{\max}] = [0, 9]$ KW δεν μπορεί να διατηρήσει ευσταθώς την λειτουργία του,

διασφαλίζοντας σταθερά επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών του για χρονικό διάστημα προσομοίωσης το οποίο υπερβαίνει την χρονική διάρκεια της μιας ημέρας, όπως αποδुकνύεται από το γεγονός ότι το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών έχει μειωθεί, έστω και για λίγο, μετά από 24 ώρες λειτουργίας του μικροδικτύου.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα χρονικής προσομοίωσης του μικροδικτύου για χρονικό διάστημα δύο ημερών διατηρώντας περιοδικά τις ίδιες συνθήκες προσομοίωσης όσον αφορά στην παραγωγή και κατανάλωση από το μικροδίκτυο.



Σχήμα 5.20: Γραφική παράσταση της εξωτερικά παρεχόμενης AC ισχύος που απαιτείται για την λειτουργία του μικροδικτύου



Σχήμα 5.21: Γραφική παράσταση του επιπέδου φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών

Η τελευταία παρατήρηση μπορεί να επαληθευτεί και από τα παραπάνω δύο διαγράμματα που αφορούν στην γραφική παρουσίαση της εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος (AC) στο microgrid καθώς και του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών, για διάρκεια προσομοίωσης μεγαλύτερης της μίας ημέρας και εφόσον οι συσσωρευτές έχουν περιέλθει σε επίπεδα φόρτισης της τάξης του 50% ,έχοντας ξεκινήσει από επίπεδα φόρτισης του 60%.

Αξίζει να σημειωθεί πως αν αυξηθούν τα όρια προσφοράς ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο παροχής ισχύος, η ευσταθής λειτουργία είναι εφικτή.

Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι ανάγκες προσφερόμενης εξωτερικά AC ισχύος κατά την διέλευση στην δεύτερη ημέρα προσομοίωσης απαιτούν σημαντική ενεργοποίηση και προσφορά της μέγιστης δυνατής ισχύος για την διατήρηση της λειτουργικότητας και την κάλυψη των αναγκών του μικροδικτύου. Επίσης τα επίπεδα και η διάρκεια παραγωγής πλεονάζουσας ισχύος παραμένει σε ανάλογα επίπεδα και για την διέλευση της δεύτερης ημέρας προσομοίωσης.

5.3 Σενάριο Προσομοίωσης 2

Αναλυτικός Τίτλος και Περιγραφή του σεναρίου: «Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μικροδικτύου για χαμηλά επίπεδα παραγωγής ΦΒ ισχύος και υψηλά επίπεδα κατανάλωσης, για καλοκαιρινή περίοδο λειτουργίας».

Στο σενάριο αυτό, τα φορτία του μικροδικτύου μεταβάλλονται κατά προκαθορισμένο τρόπο σε επιθυμητά επίπεδα καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης και η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα διατηρείται σε σχετικά χαμηλότερα επίπεδα για καλοκαιρινή περίοδο σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Το σενάριο προσομοίωσης είναι δυσμενές όσον αφορά στην διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος διότι αναφέρεται σε υψηλές καταναλώσεις φορτίων συνδυαζόμενες με χαμηλές παραγωγές. Το σενάριο αυτό σε συνδυασμό με το προηγούμενο αναμένεται να καταδείξει την επάρκεια λειτουργίας του συστήματος του μικροδικτύου για την καλοκαιρινή περίοδο. Τα δεδομένα ηλεκτρικής παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα προέκυψαν με την χρήση του διαδικτυακού PV Calculator – PVWatts διατίθεται δωρεάν από το NREL (National Renewable Energy Laboratory των ΗΠΑ) για την πόλη των Αθηνών (Ελλάδα) και συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ώρα	Φωτεινότητα(W/m ²)	Θερμοκρασία Πάνελ(°C)	DC έξοδος(W)
0	0	23.9	0
1	0	23.4	0
2	0	22.9	0
3	0	22.5	0
4	0	22	0
5	0	23.1	0
6	31.91	22.338	73.55118
7	197.968	31.505	407.8765
8	422.698	38.817	875.1353
9	603.875	43.338	1248.695
10	695.674	45.405	1430.67
11	732.864	46.193	1502.074
12	706.536	45.742	1451.604

13	605.823	43.346	1260.138
14	465.118	38.731	990.1174
15	317.478	34.067	690.8885
16	171.239	29.483	380.3162
17	84.525	27.121	190.5009
18	11.333	24.772	25.82647
19	0	25.4	0
20	0	25.1	0
21	0	24.8	0
22	0	24.3	0
23	0	23.7	0

Πίνακας 5.4: Παραγωγή Χαμηλών επιπέδων Ηλεκτρικής Ισχύος σε ΦΒ σύστημα για την καλοκαιρινή περίοδο με βάση τον PVWatts Calculator

Τα DC και τα AC φορτία των οικιών του μικροδικτύου θεωρήθηκαν για άλλη μια φορά περίπου ίσα μεταξύ τους για κάθε χρονική στιγμή του σεναρίου προσομοίωσης και οι αθροιστικές τιμές τους συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές των φορτίων προέκυψαν με χρήση των δεδομένων που διαθέτει η εταιρεία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, Southern California Edison και αφορούν οικιακές καταναλώσεις.

Hour	Total Load(W)
0	570.47139
1	519.72394
2	488.22552
3	470.7264
4	477.72604
5	503.09977
6	540.72289
7	573.09626
8	630.84337
9	692.96525

10	759.46192
11	853.95718
12	962.45174
13	1063.9466
14	1159.3169
15	1239.8128
16	1301.0598
17	1288.8104
18	1197.8149
19	1142.6927
20	1090.1953
21	958.07696
22	798.83494
23	657.96701

Πίνακας 5.5: Ωριαίες τιμές καταναλώσεων ανά οικία

5.3.1 Παράμετροι Σεναρίου Προσομοίωσης 2

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Παράμετρος	Τιμή	Παρατηρήσεις
Hometype_file_version	1.0	
Homes	30	
Version_pv	1.1	
P_I_vector_length	24	
P_vector	0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	Διάνυσμα παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος μέσω

	73.55118	407.8765	PVWatts που αντιστοιχεί σε καλοκαιρινό μήνα.
	875.1353	1248.695	
	1430.67	1502.07	
	1451.604	1260.138	
	990.1174	690.8885	
	380.3162	190.5009	
	25.82647	0.0 0.0 0.0	
	0.0 0.0		
I_vector	0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	Επίπεδα φωτεινότητας τα οποία δεν χρησιμοποιούνται από το μοντέλο (bypass_P_I=1)
bypass_P_I	1		
S_panel	1.0		Δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο εφόσον bypass_P_I=1.
n_eff_pv	0.95		
Voltage_op_pv	48		
P_max_pv	3000		
Temp_pv_vector	23.9 23.4 22.9 22.5	22 23.1 22.338 31.505	Θερμοκρασία ΦΒ πάνελ κατά τη διάρκεια του 24ώρου.
	38.817 43.338 45.405	46.193 45.742 43.346	
	38.731 34.067 29.483	27.121 24.772 25.4 25.1	
	24.8 24.3 23.7		
Version_dc_load	1.0		
ON/OFF_Load_State	1.0		
Voltage_load_dc	48		

R_load_dc_vector	8.0698	8.8578	9.4299	Υπολογισμένο διάνυσμα Αντιστάσεων για τα DC φορτία κάθε οικίας (υπολογισμένο από την υποσυνάρτηση dc_load_calcl..Οι τιμές του R_load_dc_vector υπολογίζονται πριν την προσομοίωση με χρήση της υποσυνάρτησης dc_load_calcl, η οποία δέχεται ως είσοδο τις τιμές ισχύος που καταναλίσκονται επί των DC φορτίων).
	9.7826	9.6377	9.1523	
	8.5125	8.0321	7.2974	
	6.6432	6.0601	5.3899	
	4.7893	4.3270	3.9708	
	3.7130	3.5382	3.5719	
	3.8432	4.0286	4.2226	
	4.8049	5.7627	6.9967	
Version_ac_load	1.0			
ON/OFF_Load_State	1			
Voltage_load_ac	230			
R_load_ac_vector	176.0184	193.2067		Υπολογισμένο διάνυσμα Αντιστάσεων για τα AC φορτία κάθε οικίας (υπολογισμένο από την υποσυνάρτηση ac_load_calcl. Οι τιμές του R_load_ac_vector υπολογίζονται πριν την προσομοίωση με χρήση της υποσυνάρτησης ac_load_calcl, η οποία δέχεται ως είσοδο τις τιμές ισχύος που καταναλίσκονται επί των
	212.1802	220.1172		
	210.2192	199.6306		
	166.1309	162.2869		
	150.7934	137.2758		
	137.7495	122.5139		
	108.8636	94.3809		
	86.6122	80.9885		
	73.1145	73.8094		
	75.0042	87.8722		
	92.1045	108.1145		
	129.666	152.6116		

			AC φορτίων.Ο συντελεστής ισχύος που είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1].)
X_load_ac_vector	57.8544	63.5040	Υπολογισμένο διάνυσμα
	43.0850	44.6967	Αντιστάσεων για τα AC
	69.0957	65.6154	φορτία κάθε οικίας
	102.9587	87.5932	(υπολογισμένο από την
	73.0326	66.4857	υποσυνάρτηση
	19.6282	17.4573	ac_load_calcl. Οι τιμές
	15.5122	31.0215	του X_load_ac_vector
	28.4681	26.6196	υπολογίζονται πριν την
	35.4110	35.7475	προσομοίωση με χρήση
	46.4834	28.8822	της υποσυνάρτησης
	30.2733	21.9536	ac_load_calcl, η οποία
	26.3299	50.1610	δέχεται ως είσοδο τις
			τιμές ισχύος που
			καταναλίσκονται επί των
			AC φορτίων. Ο
			συντελεστής ισχύος που
			είναι απαραίτητος για τον
			υπολογισμό παίρνει τιμές
			στο διάστημα [0.9,1].)
Version_hems	1.0		
Time_start	0.0		
Time_stop	23.99		
Time_step	0.1		
I_calc_version	1.0		Δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο εφόσον bypass_P_I=1.
n_hems	0.95		

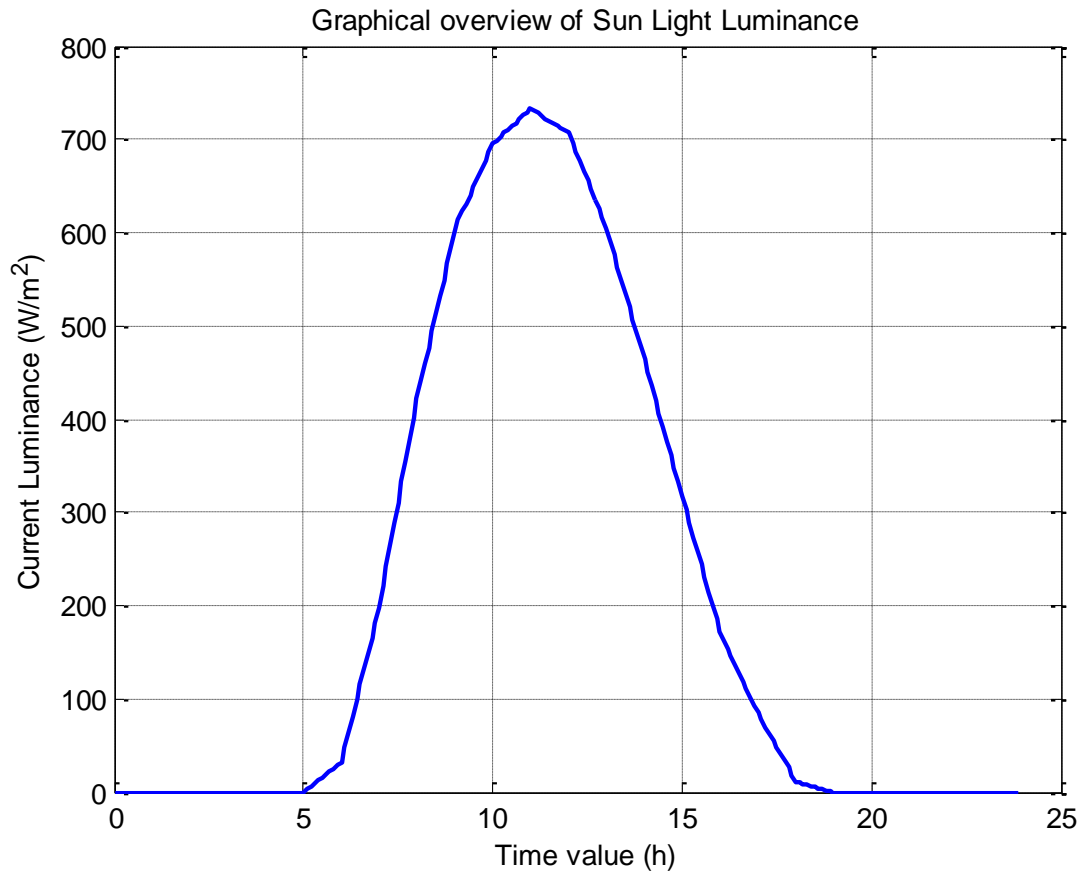
version_nems	1.0
P_min	4000
P_max	16000
n_nems	0.88
SOC_Init	0.60
version_batt	1.1
Voltage_chg	48
Voltage_cons	200
n_chg	0.85
Q_max	7200000

Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά Σεναρίου Προσομοίωσης 2

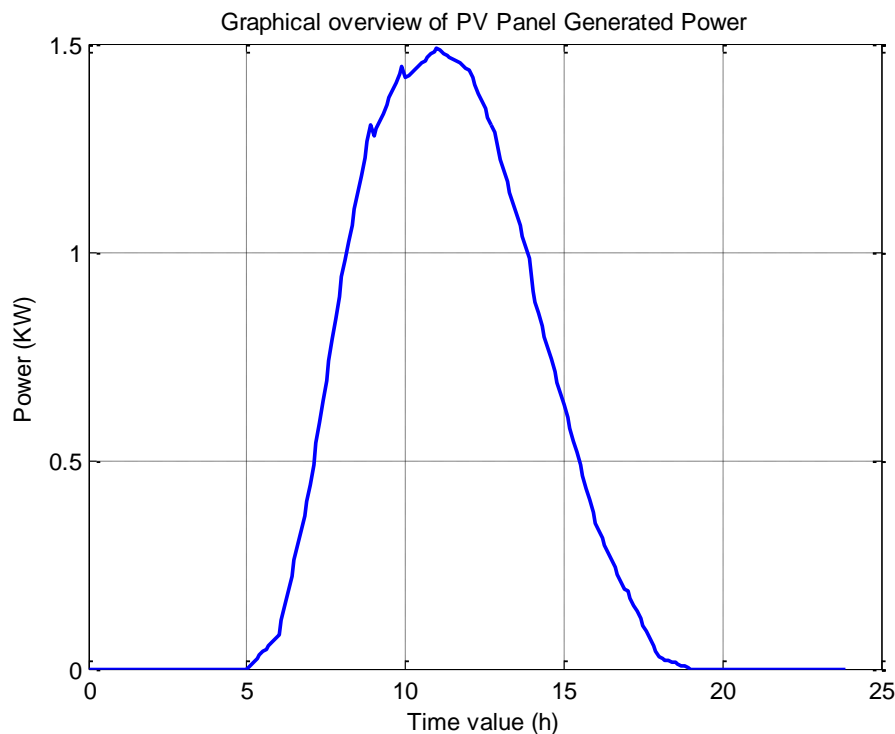
Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι προσομοίωσης του συγκεκριμένου σεναρίου, εκτός από τις μεταβολές που επιβάλλουν στα επίπεδα των DC/AC φορτίων του μικροδικτύου και στα επίπεδα παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα, επιπλέον διαφοροποιούν την μέγιστη και την ελάχιστη προσφερόμενη ισχύ από το εξωτερικό AC δίκτυο. Η τελευταία μεταβολή σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο είναι αναγκαία δεδομένης της αλλαγής των συνθηκών (μειωμένη παραγωγή και αυξημένα επίπεδα φορτίου). Εξάλλου σε μια ρεαλιστική πραγμάτωση του μικροδικτύου, ο διαχειριστής ενέργειας θα είναι επιφορτισμένος με το να ορίζει τα μέγιστα και τα ελάχιστα επίπεδα παροχής ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να γίνει με χρήση πιθανοτικών μοντέλων που αφορούν τόσο τις οικιακές καταναλώσεις των χρηστών του μικροδικτύου, όσο και τις παραγωγές από τα οικιακά ΦΒ πάνελ με βάση τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον δεδομένα, όπως η «θέληση» του εξωτερικού παρόχου να προσφέρει ισχύ κάποιες συγκεκριμένες ώρες θα μπορούσε επίσης να ληφθεί υπόψιν, αν και όταν πρόκειται για ένα μικροδίκτυο 30 οικιών, κάτι τέτοιο δεν κρίνεται απαραίτητο.

5.3.2 Αποτελέσματα Σεναρίου Προσομοίωσης 2

Τα αποτελέσματα από το σενάριο προσομοίωσης 2 για καλοκαιρινούς μήνες προσομοίωσης με υψηλές καταναλώσεις φορτίων συνδυαζόμενες με χαμηλότερα επίπεδα παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα, (γραφικές παραστάσεις και αριθμητικές τιμές) παρουσιάζονται στην συνέχεια.

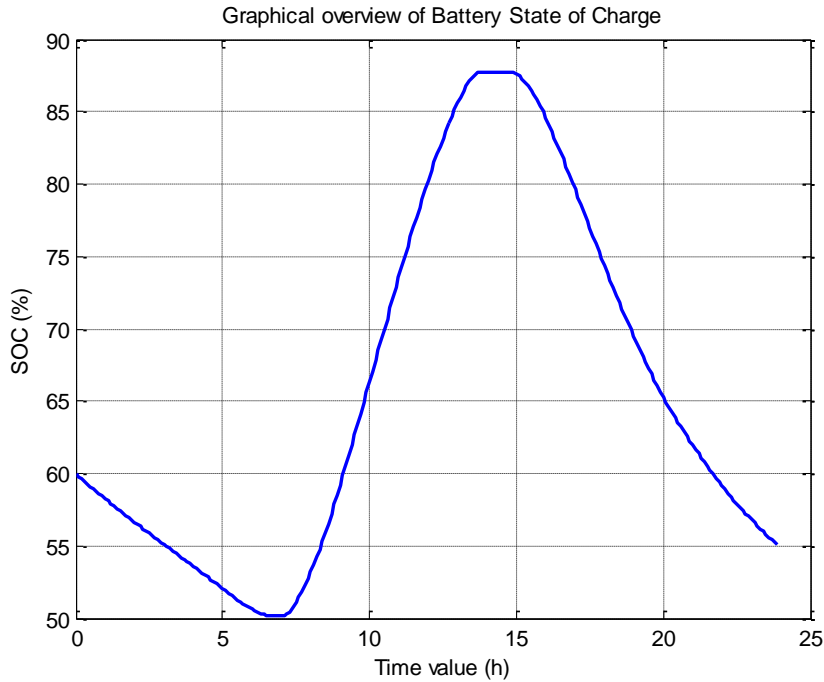


Σχήμα 5.22: Γραφική παράσταση της Ηλιακής Φωτεινότητας για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης



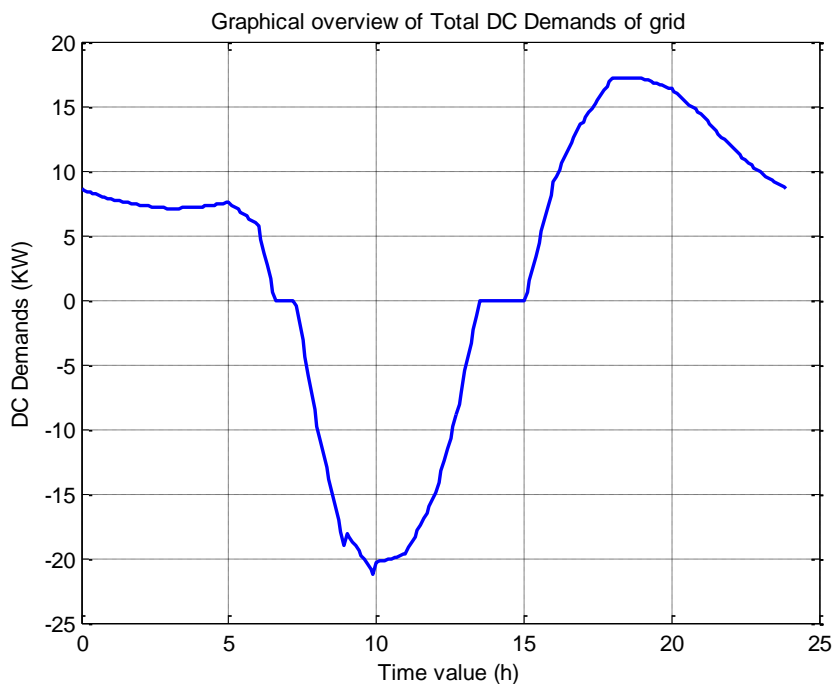
Σχήμα 5.23: Γραφική παράσταση της Ηλεκτρικής Ισχύος του ΦΒ Συστήματος

Από το διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος ενός ΦΒ συστήματος που ανήκει σε μια από τις οικίες του μικροδικτύου, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μία κλασσική μονότονη αυξητική συμπεριφορά στα παραγόμενα ποσά ενέργειας καθώς διερχόμαστε από τις πρωϊνές ώρες της ημέρας προς την διάρκεια των μεσημβρινών ωρών. Οι μέγιστες τιμές στην παραγωγή ισχύος που εμφανίζει το ΦΒ σύστημα ανέρχονται σε τιμή 1.5 KW, η οποία είναι χαμηλότερη σε σχέση με την ισχύ που παραγόταν από τα ΦΒ συστήματα στο προηγούμενο σενάριο. Στην συνέχεια και καθώς απομακρυνόμαστε από το μέγιστο των μεσημβρινών ωρών, το σύστημα παραγωγής εμφανίζει μία μονοτονικά φθίνουσα συμπεριφορά, η οποία δικαιολογείται από την φάση δύσεως του ηλίου για το γεωγραφικό πλάτος της πόλης των Αθηνών (όπου θεωρούμε ότι είναι εγκατεστημένο το μικροδίκτυο παραγωγής).



Σχήμα 5.24: Γραφική παράσταση της Κατάστασης Φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών

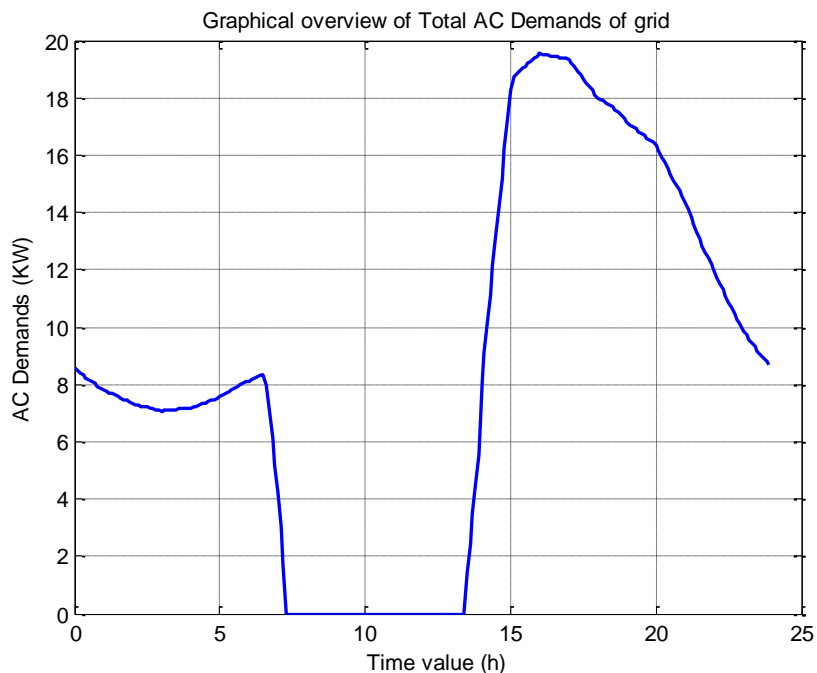
Από το διάγραμμα φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου κατά την χρονική εκτέλεση του σεναρίου παρατηρούμε ότι αρχικά το σύστημα εκκινεί με ποσοστό φόρτισης 60%. Κατά τις αρχικές πρωινές ώρες της προσομοίωσης, το σύστημα αποδίδει ενέργεια από τους συσσωρευτές για την κάλυψη των αναγκών ισχύος των οικιών του δικτύου, διότι στην φάση αυτή τα ΦΒ συστήματα δεν παράγουν ακόμη ενέργεια για να την αποδώσουν στο μικροδίκτυο. Η φάση αυτή καταλήγει σε ένα ποσοστό φόρτισης της τάξης του 50% για τους συσσωρευτές. Κατά τις μεσημβρινές ώρες, όπου η παροχή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα του μικροδικτύου καθίσταται σημαντική για την λειτουργία του, η φόρτιση των συσσωρευτών αγγίζει το 87.5% χωρίς να προλάβει να φτάσει στο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο του 90% που επιτρέπει το μικροδίκτυο. Μετά τις μεσημβρινές ώρες η παρεχόμενη ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για να διατηρήσει τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών και κατά κύριο λόγο η παραγόμενη ισχύς διατίθεται για την κάλυψη των φορτίων του συστήματος. Τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών εμφανίζονται να μειώνονται σταδιακά οδηγούμενα πάλι προς ένα επίπεδο φόρτισης λίγο χαμηλότερο της τάξης του 55%.



Σχήμα 5.25: Γραφική παράσταση των συνολικών απαιτήσεων DC του μικροδικτύου

Από το διάγραμμα των DC απαιτήσεων φορτίου $D_{dc} = \sum(L_{dc} - P_g)$, κατά τις πρωινές ώρες οι απαιτήσεις στο μικροδίκτυο ανέρχονται μεσοσταθμικά στα επίπεδα των 7 KW διότι τα ΦΒ συστήματα δεν παράγουν καθόλου ενέργεια κατά τις ώρες αυτές. Στην συνέχεια και εφόσον τα ΦΒ συστήματα ενεργοποιούνται, τα επίπεδα απαίτησης ισχύος για την κάλυψη των DC φορτίων μειώνονται σταδιακά και καταλήγουν σε μηδενικές απαιτήσεις γύρω στις 2 π.μ. Στην συνέχεια της προσομοίωσης και πλησιάζοντας κατά τις μεσημβρινές ώρες η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα επαρκεί για την πλήρη κάλυψη των DC φορτίων παράγοντας και επιπλέον ενέργεια η οποία θα οδηγήσει στην διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου. Η μέγιστη επιστρεφόμενη ισχύς που τα ΦΒ συστήματα αποδίδουν στο μικροδίκτυο, ανέρχεται (αφού καλύψει τα DC φορτία) σε επίπεδα 20 KW που είναι σαφώς χαμηλότερη τιμή σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Στην συνέχεια και κατά την πορεία της φάσης προσομοίωσης η παραγόμενη ισχύς αρχίζει να μειώνεται μονοτονικά από το προηγούμενο μέγιστο, φτάνοντας οριακά κατά τις απογευματινές ώρες της προσομοίωσης στην κάλυψη των DC αναγκών του μικροδικτύου (μηδενική τιμή DC αναγκών). Το σενάριο

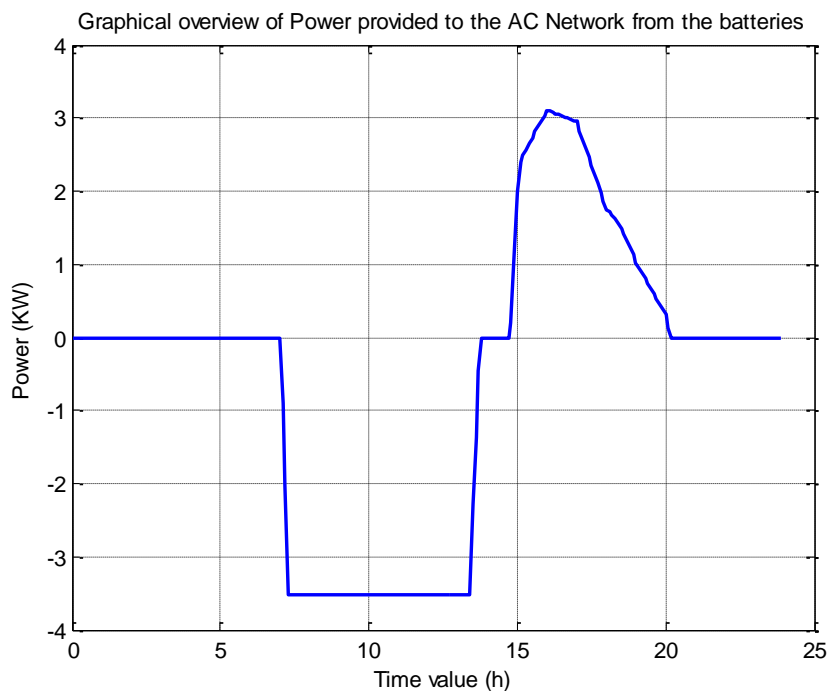
καταλήγει με πέρασμα σε τιμές για τα AC/DC φορτία, οι οποίες δεν μπορούν να καλυφθούν από την παραγωγή των ΦΒ συστημάτων κατά τις νυχτερινές ώρες (με μέγιστη τιμή τις 17 KW) και υποχρεωτικά καλύπτονται από παροχή ενέργειας από τους συσσωρευτές και το εξωτερικό AC δίκτυο.



Σχήμα 5.26: Γραφική παράσταση των συνολικών απαιτήσεων AC του μικροδικτύου

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη των απαιτήσεων D_{AC} για την κάλυψη των AC φορτίων του μικροδικτύου. Όπως θα φανεί και από το διάγραμμα παροχής ισχύος από/προς τους συσσωρευτές που ακολουθεί στη συνέχεια, στο μικροδίκτυο υπάρχει κατά χρονικές στιγμές προσφορά εξωτερικής AC ισχύος. Η συγκεκριμένη προσφορά καλύπτει κατά ένα μέρος τις AC ανάγκες φορτίου του μικροδικτύου κρατώντας για όλο το πρωινό χρονικό διάστημα όπου τα ΦΒ συστήματα λόγω ελλείψεως φωτεινότητας είναι εκτός λειτουργίας. Κατά τις ώρες αυτές τα φορτία των AC απαιτήσεων κρατούνται σχετικά σταθερά στο επίπεδο των 8 KW για το μικροδίκτυο. Στην συνέχεια και εφόσον η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα αρχίζει να συνεισφέρει σημαντικά στην ενέργεια του

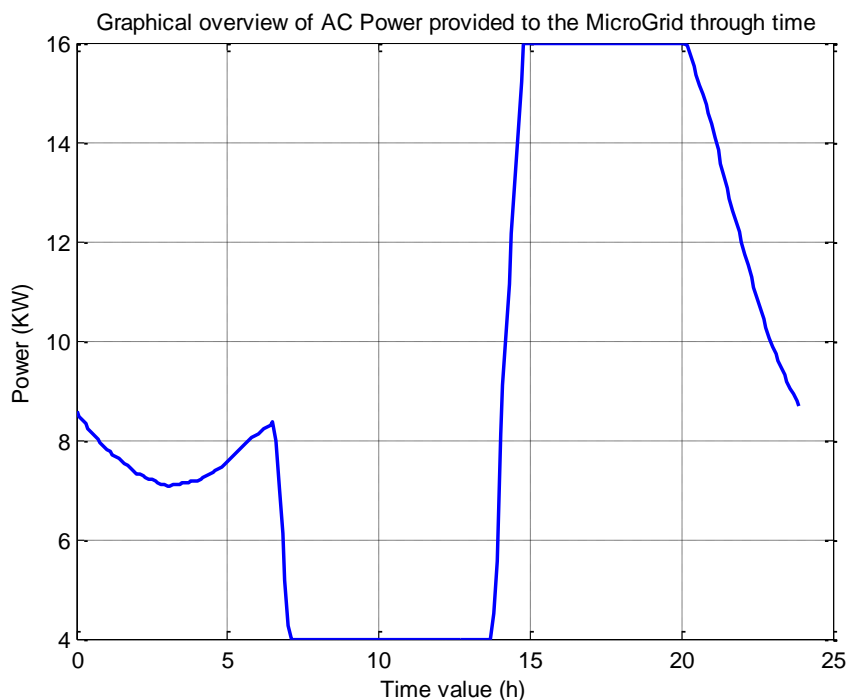
συστήματος, οι απαιτήσεις των AC φορτίων μηδενίζονται εφόσον αυτά αρχίζουν να καλύπτονται από την παραγόμενη ενέργεια η περίσσεια των οποίων καταλήγει στους συσσωρευτές. Οι μηδενικές απαιτήσεις για τα AC φορτία συνεχίζουν να διατηρούνται μέχρι και την 1 μ.μ. ώρα της προσομοίωσης όπου τα επίπεδα παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα αρχίζουν να μειώνονται. Αυτό συντελεί σε μία γραμμική αύξηση των απαιτήσεων εφόσον αυτές δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν από την παρεχόμενη ισχύ στους συσσωρευτές καταλήγοντας στην μέγιστη τιμή απαίτησης των 19.5 KW κατά τις απογευματινές ώρες. Οι απαιτήσεις αρχίζουν να μειώνονται δεδομένης της μείωσης ζήτησης των AC φορτίων.



Σχήμα 5.27: Γραφική παράσταση της ισχύος που αποδίδεται στο AC δίκτυο από τους συσσωρευτές

Το διάγραμμα παρουσιάζει την προσφορά ισχύος προς το εξωτερικό AC δίκτυο από τους συσσωρευτές του μικροδικτύου καθόλη την διάρκεια της χρονικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι κατά το αρχικό τμήμα της προσομοίωσης το εξωτερικό AC δίκτυο δεν χρειάζεται να λάβει ενέργεια από τους συσσωρευτές για την λειτουργία του συστήματος και την κάλυψη των DC αναγκών του μικροδικτύου (αυτό βέβαια δεν ισχύει για τα AC φορτία του μικροδικτύου). Κατά την πορεία της

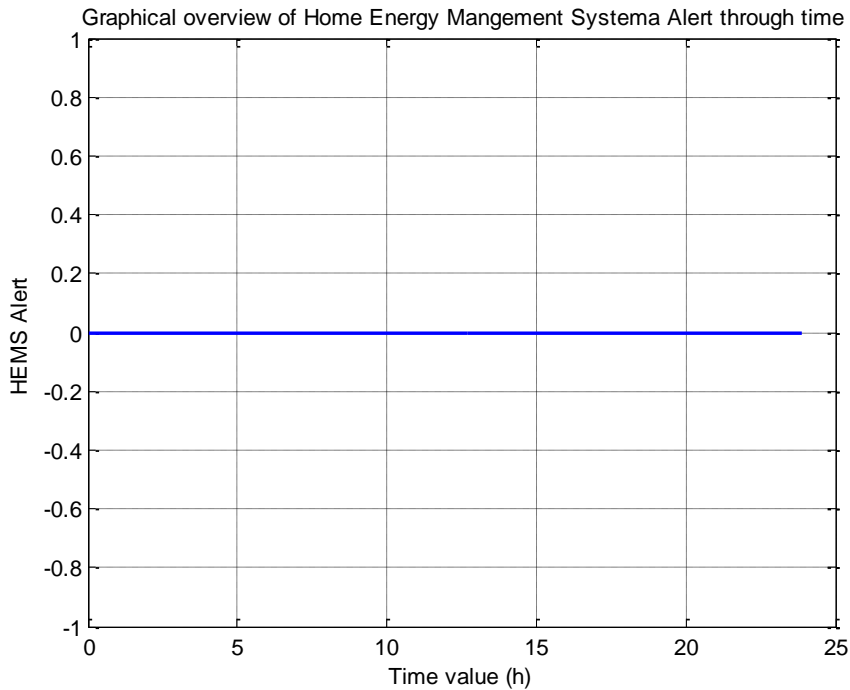
προσομοίωσης και μετά την 6 π.μ. το εξωτερικό δίκτυο μέσω των συσσωρευτών φαίνεται να αποδίδει ενέργεια για την κάλυψη των DC/AC αναγκών του μικροδικτύου δεδομένου ότι οι συσσωρευτές και το φορτίο τους δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών. Αυτή η παρεχόμενη ισχύς τείνει να καταλήξει πάλι σε μηδενική τιμή καθώς το σύστημα ελέγχου του δικτύου μεταβαίνει στην κατάσταση 5. Μετά την 3 μ.μ., και σύμφωνα πάντα με τον αλγόριθμο απόφασης του NEMS, που ρυθμίζει τη ροή ισχύος στο μικροδίκτυο και τώρα βρίσκεται στην κατάσταση 2, οι συσσωρευτές παρέχουν ενέργεια προς το AC δίκτυο, η οποία χρησιμοποιείται για την κάλυψη των AC φορτίων. Στην συνέχεια η προσφερόμενη ισχύς από το AC δίκτυο προς την συστοιχία των συσσωρευτών μηδενίζεται και διατηρείται σε αυτό το επίπεδο για όλο το υπόλοιπο χρονικό διάστημα μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.28: Γραφική παράσταση της ισχύος που αποδίδεται από το AC δίκτυο προς το μικροδίκτυο.

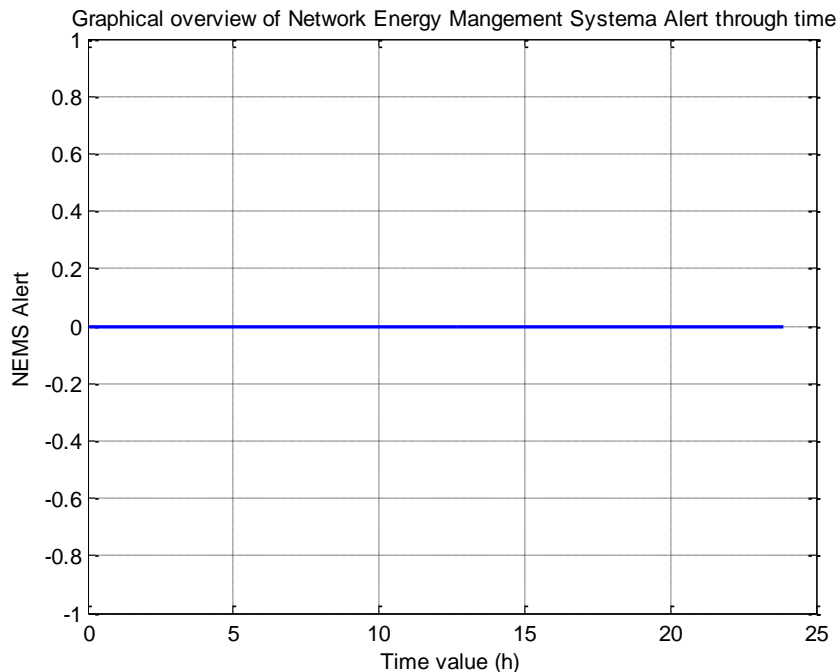
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την συνολική προσφορά ισχύος από το εξωτερικό AC δίκτυο προς συνολικά το μικροδίκτυο (κάλυψη συσσωρευτών και DC/AC φορτίων του μικροδικτύου). Κατα τις πρωινές ώρες παρατηρούμε ότι η

συνολικά προσφερόμενη ισχύς καλύπτει αθροιστικά τα AC φορτία του μικροδικτύου. Πρέπει να επισημάνουμε ότι από τις προδιαγραφές του σεναρίου προσομοίωσης το εξωτερικό δίκτυο ορίζεται να έχει την ικανότητα παροχής ισχύος που ανήκει στο διάστημα $P_{\min}=4$ KW έως $P_{\max}=16$ KW. Η προσφερόμενη ισχύς από το εξωτερικό δίκτυο αρχίζει να μειώνεται με σχετικά ομαλό, γραμμικό και μονότονο τρόπο κατά την φάση όπου τα ΦΒ συστήματα αρχίζουν να τίθενται σε λειτουργία, προσφέροντας στο μικροδίκτυο σημαντικά ποσοστά ισχύος. Το γεγονός αυτό καταλήγει στην προσφορά μηδενικού επιπέδου ισχύος προς το μικροδίκτυο για όλο το χρονικό διάστημα από 7 π.μ. μέχρι και 1 μ.μ. δηλ. στην χρονική περίοδο αυτή το μικροδίκτυο είναι αυτόνομο σε ενεργειακές καλύψεις προσφέροντας εσωτερικά την απαιτούμενη ενέργεια για την κάλυψη των φορτίων του. Στην συνέχεια τα επίπεδα παροχής ισχύος από τα ΦΒ συστήματα αρχίζουν να μειώνονται λόγω μείωσης των επιπέδων φωτεινότητας κατά την πάροδο της ημέρας, αυξάνοντας έτσι γραμμικά τις απαιτήσεις των φορτίων που για την κάλυψη τους οδηγούνται σταδιακά σε προσφορά ισχύος από το εξωτερικό AC δίκτυο. Το φαινόμενο αυτό κορυφώνεται σύντομα οδηγώντας στο μέγιστο απαίτησης των 16 KW από το εξωτερικό δίκτυο. Οι απαιτήσεις αρχίζουν να μειώνονται παρέχοντας κάλυψη αυτών από τους συσσωρευτές για το υπόλοιπο της προσομοίωσης που αφορά κατά κύριο λόγο στις νυχτερινές ώρες όπου τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών είναι υψηλά (>50%) και οι σχετικές απαιτήσεις των φορτίων για κάλυψη εξακολουθούν να είναι σημαντικές.



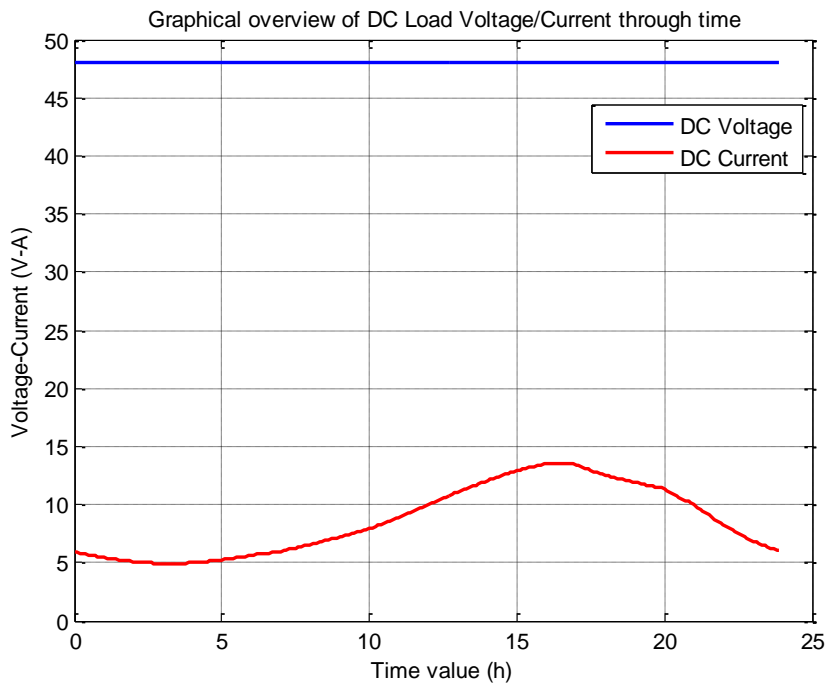
Σχήμα 5.29: Γραφική παράσταση σημάτων συναγερμού από το HEMS

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το σήμα συναγερμού από την οντότητα HEMS μίας οικίας του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι αυτό το σήμα δεν ενεργοποιείται καθόλου σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης δεδομένου ότι από το HEMS πρωτόκολλο χειρισμού, η οικία ποτέ δεν περιέρχεται σε καθεστώς φόρτισης των συσσωρευτών $> 95\%$ ή $< 40\%$.

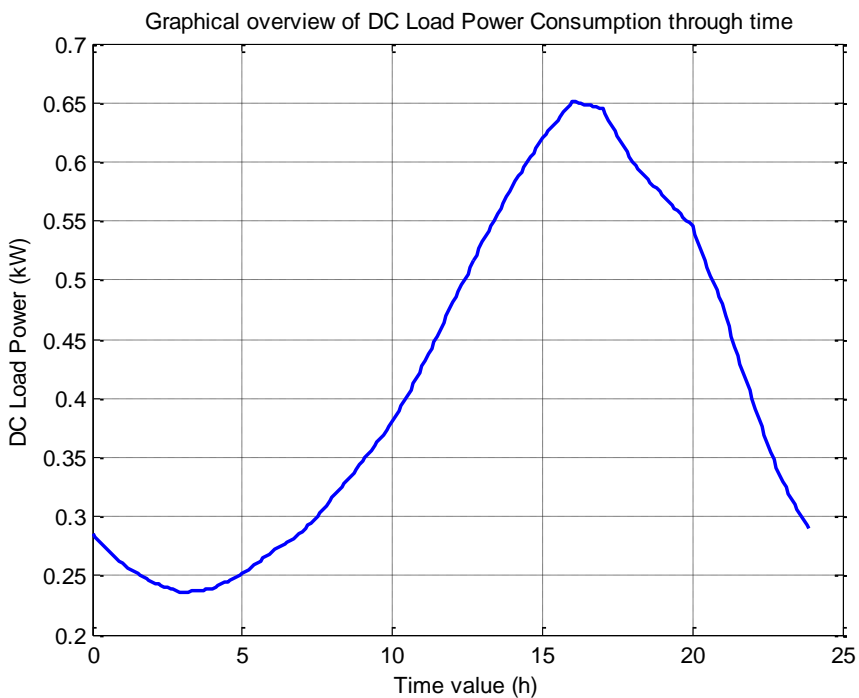


Σχήμα 5.30: Γραφική παράσταση σημάτων συναγερμού από το NEMS

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το σήμα συναγερμού από την οντότητα NEMS του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι αυτό το σήμα δεν ενεργοποιείται καθόλου σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης δεδομένου ότι από το NEMS πρωτόκολλο χειρισμού, το σύστημα δεν περιήλθε ποτέ σε καθεστώς φόρτισης των συσσωρευτών $> 95\%$ ή $< 50\%$.

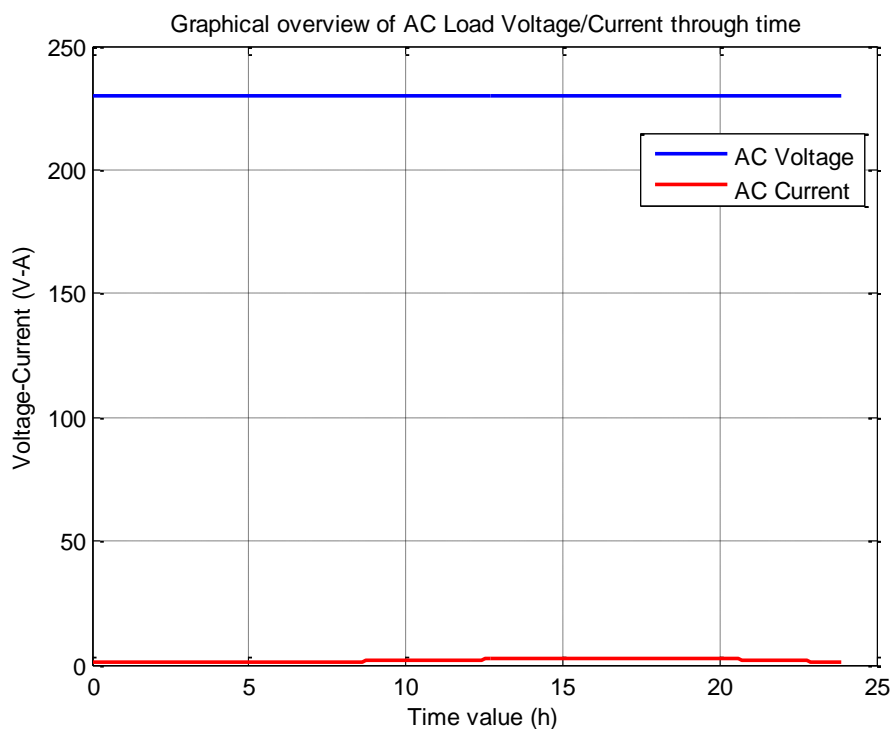


Σχήμα 5.31: Γραφική παράσταση των DC ρευμάτων/τάσεων ανά οικία

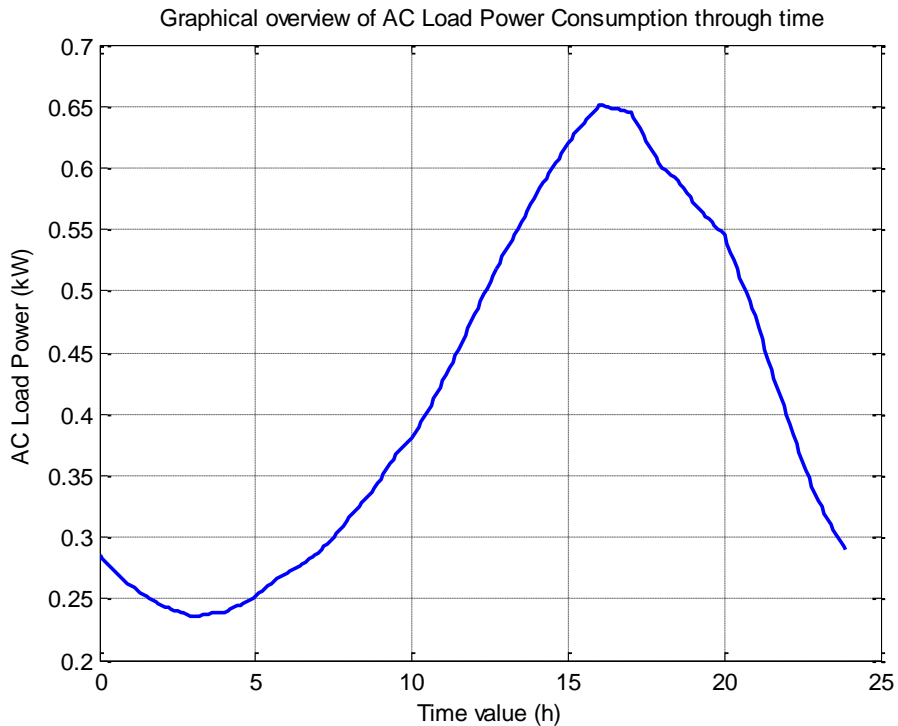


Σχήμα 5.32: Γραφική παράσταση των DC φορτίων ανά οικία

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν τις απαιτήσεις φορτίου DC, καθώς και την τάση και το ρεύμα λειτουργίας για κάθε οικία του μικροδικτύου. Η απαιτούμενη ισχύς για την κάλυψη των DC αναγκών σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης είναι υψηλότερες σε σχέση με το προηγούμενο, ενώ και πάλι έχει γίνει η σύμβαση πως η ισχύς που καταναλώνεται στο DC φορτίο κάθε οικίας ισούται με το μισό της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος (η ισχύς που καταναλώνεται στο AC φορτίο κάθε οικίας αποτελεί το άλλο μισό). Παρατηρούμε ότι τα επίπεδα συνεχούς τάσης λειτουργίας της οικίας ανέρχονται σε 48V, ενώ τα ρεύματα δεν ξεπερνούν τα 15A.



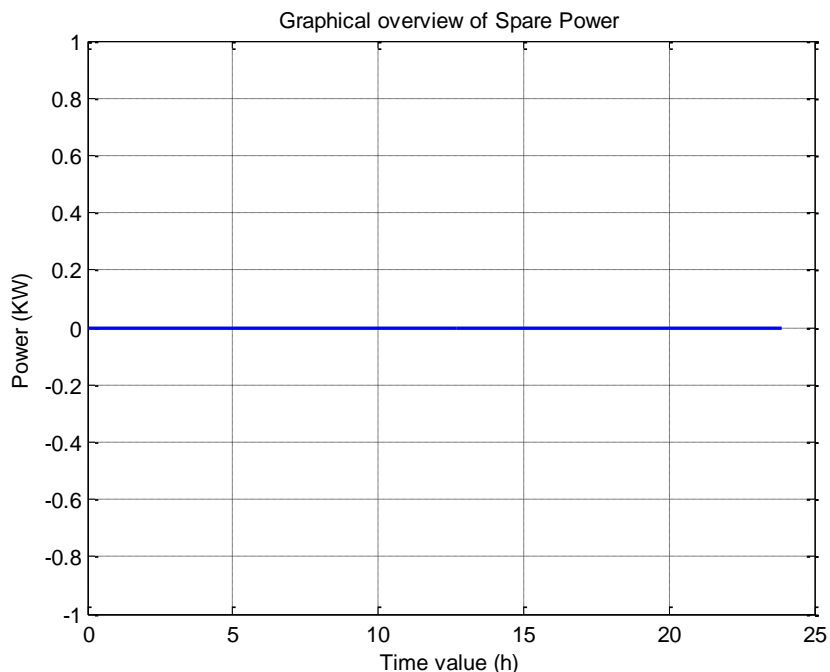
Σχήμα 5.33: Γραφική παράσταση των AC ρευμάτων/τάσεων ανά οικία



Σχήμα 5.34: Γραφική παράσταση των AC φορτίων ανά οικία

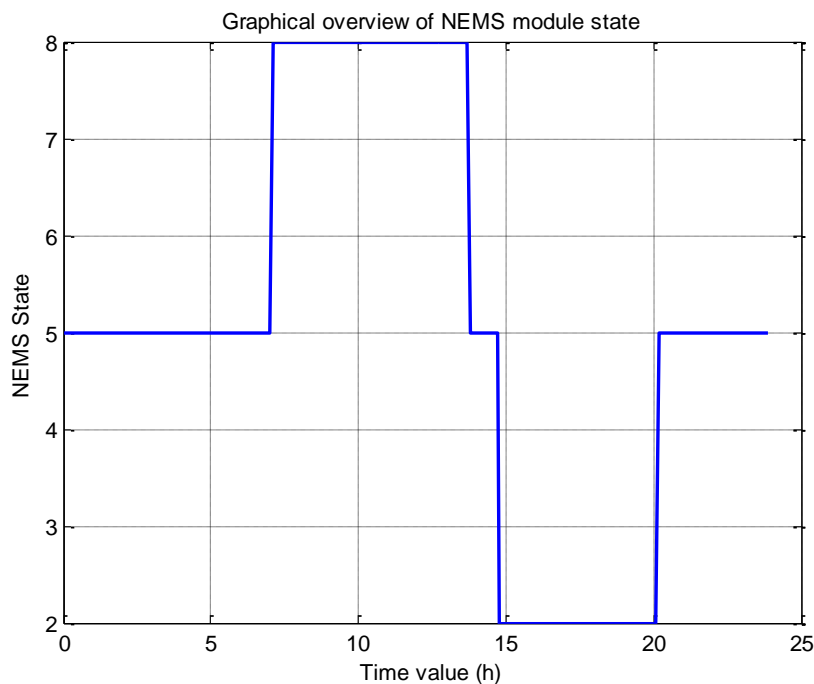
Το διάγραμμα παρουσιάζει τις καταναλώσεις ισχύος των AC φορτίων ανά οικία που μετέχει στο μικροδίκτυο καθώς και την τάση και το ρεύμα λειτουργίας για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Η τάση λειτουργίας για το AC δίκτυο θεωρείται τα 230V (rms), ενώ τα ρεύματα δεν ξεπερνούν τα 10A.

Παρατηρούμε ότι οι AC απαιτήσεις των φορτίων είναι σχετικά χαμηλές για τις πρώτες πρωϊνές ώρες και αρχίζουν να αυξάνονται κατά την διάρκεια της ημέρας. Καταλήγουν σε μία μέγιστη τιμή και στην συνέχεια για τις βραδινές ώρες προσομοίωσης επανέρχονται σε χαμηλότερα επίπεδα. Η ισχύς που καταναλώνεται στο AC φορτίο κάθε οικίας εκτιμήθηκε ίσο με το μισό της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος (η ισχύς που καταναλώνεται στο DC φορτίο κάθε οικίας αποτελεί το άλλο μισό).



Σχήμα 5.35: Γραφική παράσταση πλεονάζουσας ισχύος του μικροδικτύου

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το μικροδίκτυο δεν εμφανίζει περίσσεια ισχύος σε καμία χρονική φάση της προσομοίωσης. Αυτό έχει επιτευχθεί επιλέγοντας κατάλληλα τα επίπεδα εξωτερικής παροχής ισχύος P_{\min} και P_{\max} από το AC δίκτυο. Το γεγονός αυτό δεικνύει ότι είναι δυνατόν να υπάρξει κατάλληλος συντονισμός των απαιτήσεων και των παραγωγών από το ΦΒ σύστημα έτσι ώστε να μην υπάρχει απώλεια ή σπατάλη της εξωτερικά/εσωτερικά παρεχόμενης ισχύος στο μικροδίκτυο.

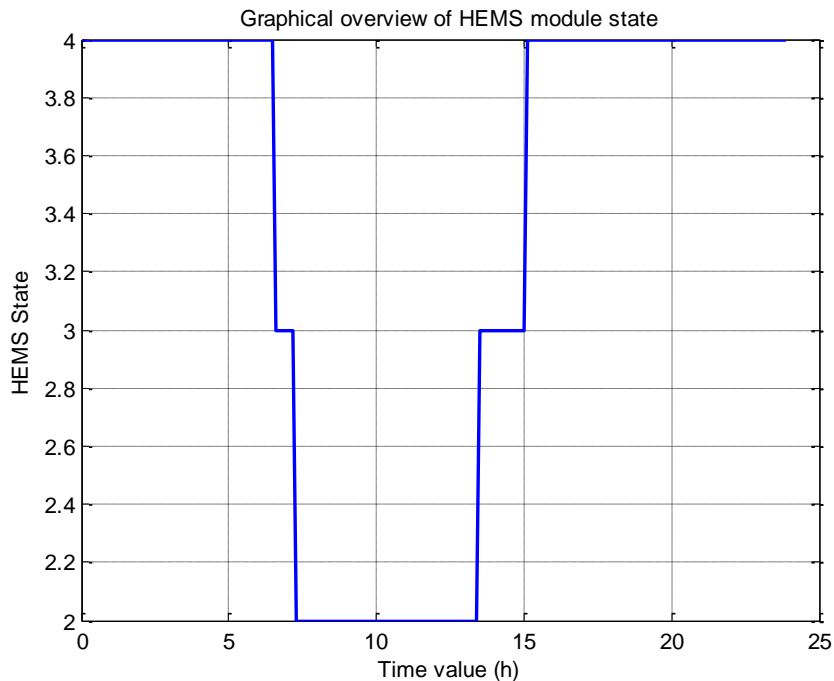


Σχήμα 5.36: Γραφική παράσταση των καταστάσεων του NEMS

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις καταστάσεις μετάβασης με βάση τον ορισμό του NEMSπρωτοκόλλου για την λειτουργία των οικιών του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι κατά τις πρωινές ώρες το μικροδίκτυο φαίνεται να παραμένει σταθερά στην κατάσταση 5. Με αντιστοίχιση των συνθηκών για την περιγραφή αυτής της κατάστασης παρατηρούμε ότι η κατάσταση 5 αντιστοιχεί σε απαιτήσεις D_{AC} μεταξύ του επιπέδου P_{min} και P_{max} και $SOC > 50\%$. Σε αυτήν την περίπτωση το μικροδίκτυο οδηγεί το εξωτερικό δίκτυο παροχής AC ισχύος σε προσφορά ενέργειας για την διατήρηση του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών. Στην συνέχεια το σύστημα διαχείρισης NEMS μεταβαίνει στην κατάσταση 8 όπου λόγω προσφοράς εξωτερικής ισχύος προς το σύστημα έχουμε καταλήξει σε D_{AC} το οποίο είναι μικρότερο της P_{min} και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερη του 50%.

Αύξηση του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών σε ποσοστό 50% με ταυτόχρονη μεταβολή των απαιτήσεων των AC φορτίων οδηγούν στην κατάσταση 2 όπου οι απαιτήσεις D_{AC} είναι μεγαλύτερες της προσφερόμενης P_{max} από το

εξωτερικό δίκτυο. Στην συνέχεια το σύστημα μετά την φάση εκφόρτισης των συσσωρευτών καταλήγει ξανά στην κατάσταση 5 όπου θα παραμείνει για όλη την υπόλοιπη διάρκεια του σεναρίου προσομοίωσης.

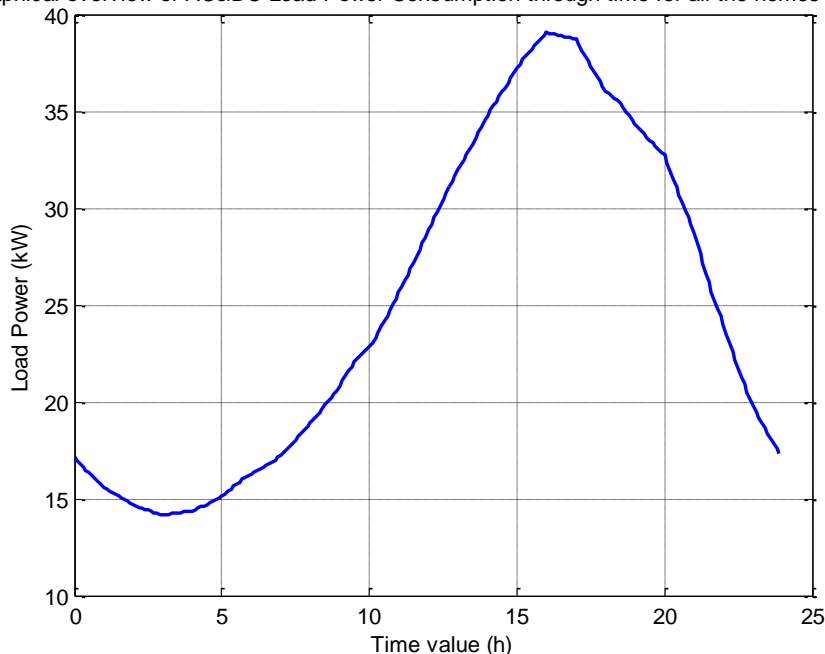


Σχήμα 5.37: Γραφική παράσταση των καταστάσεων του HEMS

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις μεταβάσεις καταστάσεων με βάση το πρωτόκολλο διαχείρισης ενεργειών HEMS για κάθε οικία του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι κατά τις πρωινές ώρες το HEMS της οικίας βρίσκεται στην κατάσταση 4 όπου η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των DC φορτίων και η κατάσταση $SOC > 40\%$. Σε αυτήν την φάση τα DC φορτία καλύπτονται από τους συσσωρευτές ενώ τα AC φορτία ανατίθενται στο εξωτερικό AC δίκτυο. Στην συνέχεια οι οικίες του μικροδικτύου έρχονται σε κατάσταση 2 όπου η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα είναι αρκετά υψηλή και μπορεί να καλύψει τις συνολικές απαιτήσεις των DC/AC φορτίων παραμένοντας για πολύ λίγο μεταβατικά στην κατάσταση 3 όπου η παραγόμενη ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για την πλήρη κάλυψη των DC/AC φορτίων. Οι μεταβάσεις αυτές είναι συμμετρικά αντιστρέψιμες κατά τις φάσεις όπου τα ΦΒ συστήματα μετά

την απόδοση του μέγιστου της ισχύος εισέρχονται σε φάσεις μη παραγωγής λόγω δύσεως του ηλίου, οπότε και το HEMS επανέρχεται στην αρχική κατάσταση 4 για το υπόλοιπο της διάρκειας προσομοίωσης.

Graphical overview of AC&DC Load Power Consumption through time for all the homes in the g



Σχήμα 5.38: Γραφική παράσταση των συνολικών AC/DC απαιτήσεων για το σύνολο των οικιών του μικροδικτύου

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει γραφικά καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης για το μικροδίκτυο, τις συνολικές απαιτήσεις φορτίων (ACκαι DC), όπως αυτές μεταβάλλονται σε διάφορες χρονικές φάσεις. Παρατηρούμε ότι τα επιβαλλόμενα σενάρια προσομοίωσης είναι αρκετά ρεαλιστικά μεταβάλλοντας τις απαιτήσεις συνολικού φορτίου από μία σχετικά χαμηλή τιμή κατά τις πρωινές ώρες λειτουργίας του μικροδικτύου, σε αυξανόμενες τιμές προς τις μεσημβρινές ώρες. Εκεί παρουσιάζεται ένα μέγιστο της τάξης των 39 KW μεγαλύτερες από το προηγούμενο σενάριο. Στην συνέχεια οι απαιτήσεις ισχύος μειώνονται φθάνοντας ξανά στην περιοχή των 15 KW που ήταν και οι αρχικές απαιτήσεις κατά τις πρωινές ώρες της προσομοίωσης.

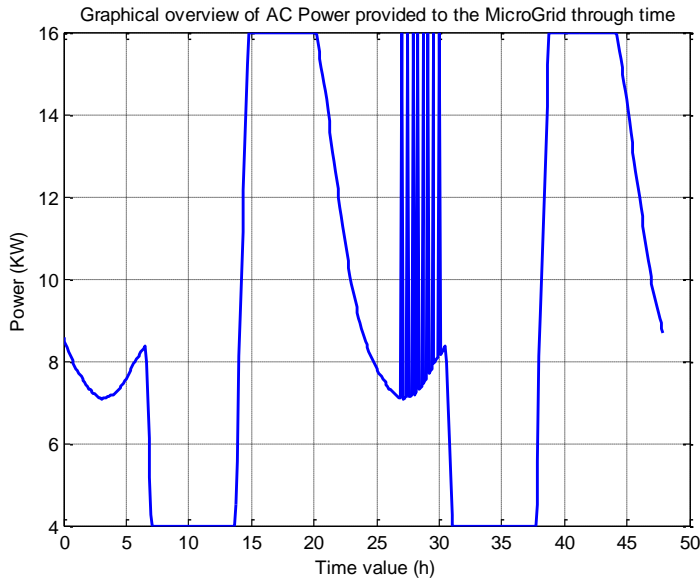
5.3.3 Συμπεράσματα από το Σενάριο Προσομοίωσης 2

Το βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου σεναρίου προσομοίωσης είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών 30 οικιών οι οποίες μετέχουν στην δομή ενός μικροδικτύου με χρήση ΦΒ συστημάτων με χαμηλό επίπεδο παραγωγής ισχύος και υψηλές απαιτήσεις φορτίων. Το σενάριο προσομοίωσης αφορά σε καλοκαιρινή εποχή προσομοίωσης διασφαλίζοντας όμως όχι πολύ υψηλές τιμές στην παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα.

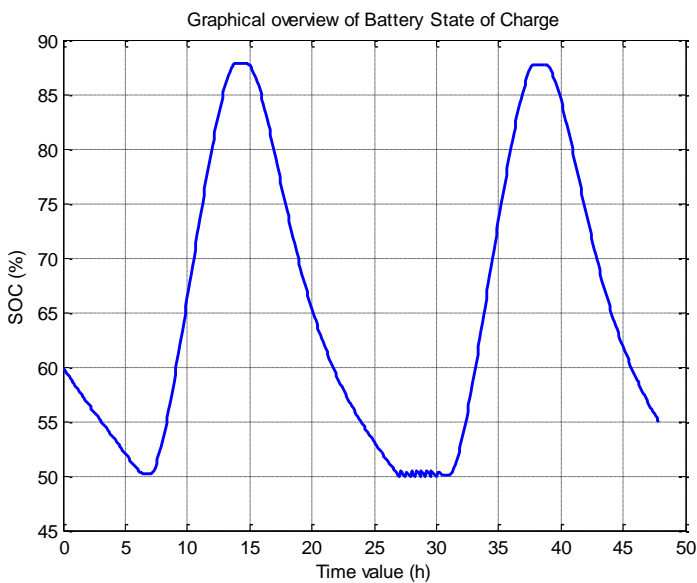
Όπως παρατηρήσαμε και από την ανάλυση των επιμέρους διαγραμμάτων από την προσομοίωση, το σύστημα εκκινεί από ένα επίπεδο φόρτισης της τάξης του 60% για τις συστοιχίες των συσσωρευτών του. Κατά τις πρωινές ώρες όπου οι απαιτήσεις των ενεργειακών αναγκών του μικροδικτύου δεν μπορούν να καλυφθούν από την παραγωγή των ΦΒ συστημάτων, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται ποσοστιαία από το εξωτερικό AC δίκτυο και από τους συσσωρευτές. Το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών διατηρείται πάνω από 50% κατά τις πρωινές ώρες παρά την διαδικασία εκφόρτισης. Στην συνέχεια και εφόσον η παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ συστήματα αρχίζει να δίνει υψηλή τιμή ισχύος, η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του δικτύου μεταβιβάζεται σταδιακά προς τους συσσωρευτές αποδεσμεύοντας πόρους από την εξωτερικά παρεχόμενη ισχύ, ενώ ταυτόχρονα τα επίπεδα φόρτισης τους αυξάνουν. Κατά τις μεσημβρινές ώρες έχει επιτευχθεί και η μέγιστη τιμή φόρτισης η οποία δεν πετυχαίνει την επιτρεπόμενη μέγιστη τιμή φόρτισης των συσσωρευτών (90%) αλλά ανέρχεται μέχρι το 87.5%. Το μικροδίκτυο δεν παράγει πλεονάζουσα ισχύ κατά την διάρκεια προσομοίωσης του σεναρίου, παρά το γεγονός ότι τα επίπεδα P_{min} και P_{max} είναι αυξημένα σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο στα επίπεδα των 4 KW και 16 KW αντίστοιχα, λόγω των αρκετά υψηλότερων αναγκών φορτίου του μικροδικτύου.

Το μικροδίκτυο με τα παραπάνω επίπεδα παροχής εξωτερικής ισχύος [P_{min}, P_{max}] = [4,16] KW μπορεί να διατηρήσει ευσταθώς την λειτουργία του, διασφαλίζοντας σταθερά επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών του για χρονικό διάστημα προσομοίωσης το οποίο υπερβαίνει την χρονική διάρκεια της μιας ημέρας.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα της εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος και του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου για χρονικό διάστημα δύο ημερών διατηρώντας τις ίδιες συνθήκες προσομοίωσης όσον αφορά στην παραγωγή και κατανάλωση από το μικροδίκτυο.



Σχήμα 5.39: Γραφική παράσταση της εξωτερικά παρεχόμενης AC ισχύος που απαιτείται για την λειτουργία του μικροδικτύου

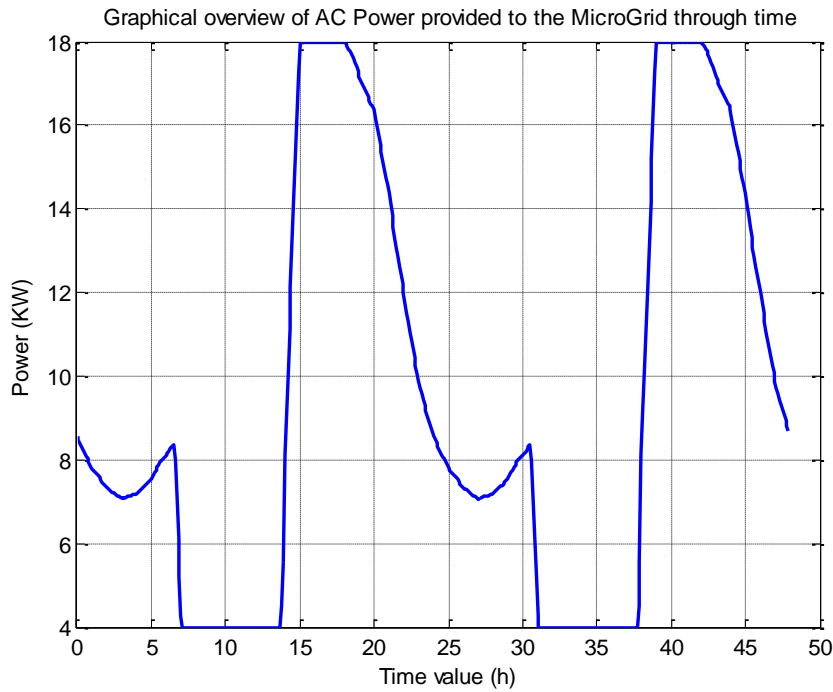


Σχήμα 5.40: Γραφική παράσταση του επιπέδου φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών

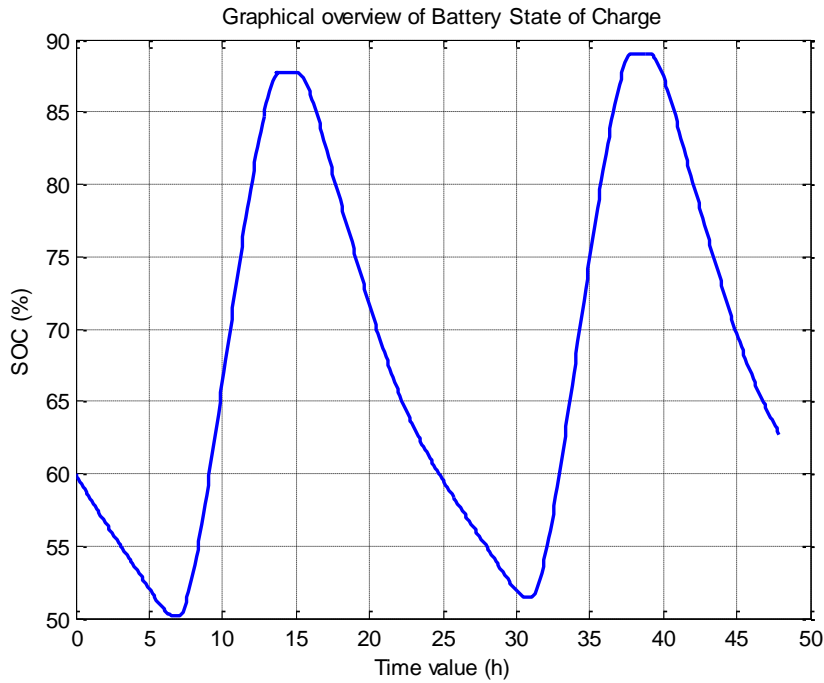
Η τελευταία παρατήρηση μπορεί να επαληθευτεί και από τα παραπάνω δύο διαγράμματα που αφορούν στην γραφική παρουσίαση της εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος (AC) στο μικροδίκτυο, καθώς και του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών, για διάρκεια προσομοίωσης μεγαλύτερης της μίας ημέρας και εφόσον οι συσσωρευτές έχουν περιέλθει σε επίπεδα φόρτισης της τάξης του 55% σχετικά κοντά στην περιοχή από όπου και εκκίνησαν στην αρχή του σεναρίου προσομοίωσης (μετά τον μεταβατικό κύκλο του πρώτου 24ώρου, το διάγραμμα του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών επαναλαμβάνεται πανομοιότυπο).

Η ταλαντωτική συμπεριφορά που εμφανίζεται στο διάγραμμα παροχής AC ισχύος προς το μικροδίκτυο, οφείλεται στην διαχείριση των αποφάσεων από την οντότητα και το πρωτόκολλο διαχείρισης του NEMS που θέτει ως όριο απόφασης για την διαχείριση της εξωτερικής προσφοράς ισχύος την κατάσταση φόρτισης του 50% των συσσωρευτών. Στις φάσεις όπου το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών πέφτει χαμηλότερα από την τιμή του 50% το δίκτυο κάνει χρήση της εξωτερικά προσφερόμενης ενέργειας η οποία λόγω της ελάχιστης προσφερόμενης τιμής των 4 KW, φορτίζει τους συσσωρευτές καταλήγοντας σε σύντομο χρονικό διάστημα σε τιμή μεγαλύτερη του 50%. Σε αυτό το στάδιο η εξωτερική παροχή ισχύος με βάση τους κανόνες λειτουργίας του NEMS διακόπτεται μέχρι να ξαναεμφανιστεί η συνθήκη κατάστασης φόρτισης μικρότερης του 50%, οπότε και το σύστημα επανεργοποιείται. Τα σύντομα αυτά χρονικά διαστήματα όπου η εξωτερικά προσφερόμενη AC ισχύς παρέχεται και διακόπτεται από την διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών δημιουργούν την εμφάνιση αυτών των ταλαντωτικών φαινομένων. Τα φαινόμενα αυτά θα μπορούσαν να αποφευχθούν αλλάζοντας τα επίπεδα απόφασης της οντότητας NEMS, ή χαμηλώνοντας τα επίπεδα της εξωτερικά προσφερόμενης ενέργειας έτσι ώστε η διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών να γίνει χρονικά πιο ομαλά. Το τελευταίο διευκολύνει τον διαχειριστή ενέργειας του μικροδικτύου διότι συμβάλλει και σε μικρότερα ρεύματα φόρτισης που συντείνουν στην αύξηση της χρονικής διάρκειας ζωής των συσσωρευτών.

Ενδεικτικά παραθέτουμε το διάγραμμα της εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος για και του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών για $P_{min}=4$ KW και $P_{max}=18$ KW.



Σχήμα 5.41: Γραφική παράσταση της εξωτερικά παρεχόμενης AC ισχύος που απαιτείται για την λειτουργία του μικροδικτύου για για $P_{min}=4$ KW και $P_{max}=18$ KW



Σχήμα 5.42: Γραφική παράσταση του επιπέδου φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών για $P_{min}=4$ KW και $P_{max}=18$ KW

Παρατηρούμε πως με τα καινούρια επίπεδα εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος, οι συσσωρευτές καταλήγουν σε υψηλότερα επίπεδα φόρτισης με το πέρας των 48 ωρών, ενώ η ισχύς που παρέχεται από το ανάντη δίκτυο δεν παρουσιάζει την ταλαντωτική συμπεριφορά της προηγούμενης περίπτωσης.

5.4 Σενάριο Προσομοίωσης 3

Αναλυτικός Τίτλος και Περιγραφή του σεναρίου: «Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μικροδικτύου για υψηλά επίπεδα παραγωγής ΦΒ ισχύος και χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης, για χειμερινή περίοδο λειτουργίας».

Τα φορτία του μικροδικτύου μεταβάλλονται κατά προκαθορισμένο τρόπο σε επιθυμητά επίπεδα καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης και η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα διατηρείται σε σχετικά υψηλά επίπεδα για χειμερινή περίοδο. Το σενάριο προσομοίωσης είναι ευνοϊκό, όσον αφορά στην διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος διότι αναφέρεται σε χαμηλές καταναλώσεις φορτίων και υψηλή σχετικά φωτοβολταϊκή παραγωγή. Τα δεδομένα ηλεκτρικής παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα προέκυψαν με την χρήση του διαδικτυακού PV Calculator – PVWatts - ο οποίος διατίθεται δωρεάν από το NREL (National Renewable Energy Laboratory των ΗΠΑ)-για την πόλη των Αθηνών (Ελλάδα) και συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ώρα	Φωτεινότητα(W/m^2)	Θερμοκρασία Πάνελ($^{\circ}C$)	DC έξοδος(W)
0	0	3	0
1	0	4.2	0
2	0	4.2	0
3	0	4	0
4	0	3.8	0
5	0	4	0
6	0	3	0

7	53.278	2.819	110.3289
8	260.968	8.732	577.5064
9	524.716	15.196	1167.165
10	717.752	18.285	1601.612
11	830.906	23.841	1815.761
12	863.257	22.383	1901.302
13	807.331	24.024	1764.043
14	743.868	21.483	1639.753
15	595.341	21.355	1296.406
16	368.388	16.73	786.4408
17	105.522	14.726	208.9226
18	0.97	6.468	2.296057
19	0	7	0
20	0	6	0
21	0	6	0
22	0	6	0
23	0	5.5	0

Πίνακας 5.7: Παραγωγή Υψηλών επιπέδων Ηλεκτρικής Ισχύος σε ΦΒ σύστημα για την Χειμερινή περίοδο με βάση τον PVWatts Calculator

Τα DC και τα AC φορτία των οικιών του μικροδικτύου θεωρήθηκαν για άλλη μια φορά περίπου ίσα μεταξύ τους για κάθε χρονική στιγμή του σεναρίου προσομοίωσης και οι αθροιστικές τιμές τους συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές των φορτίων προέκυψαν με χρήση των δεδομένων που διαθέτει η εταιρεία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, Southern California Edison και αφορούν οικιακές καταναλώσεις.

Hour	Total Load(W)
0	569.7511
1	511.91628
2	468.93095
3	440.79509

4	430.63492
5	435.32423
6	462.67853
7	497.0668
8	537.70749
9	569.7511
10	591.63455
11	583.81903
12	574.44041
13	554.12007
14	547.08611
15	558.02783
16	601.79472
17	750.28952
18	796.40106
19	801.09037
20	772.95451
21	715.90125
22	630.71212
23	529.89197

Πίνακας 5.8: Ωριαίες τιμές καταναλώσεων ανά οικία

5.4.1 Παράμετροι Σεναρίου Προσομοίωσης 3

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Παράμετρος	Τιμή	Παρατηρήσεις
Hometype_file_version	1.0	
Homes	30	
Version_pv	1.1	
P_I_vector_length	24	
P_vector	0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 110.3289 577.5064 1167.165 1601.612 1815.761 1901.302 1764.043 1639.753 1296.406 786.4408 208.9226 2.296057 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	Διάνυσμα παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος μέσω PVWatts που αντιστοιχεί σε καλοκαιρινό μήνα.
I_vector	0.0 0.0	Επίπεδα φωτεινότητας τα οποία δεν χρησιμοποιούνται από το μοντέλο (bypass_P_I=1)
bypass_P_I	1	
S_panel	1.0	Δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο εφόσον bypass_P_I=1.
n_eff_pv	0.95	
Voltage_op_pv	48	
P_max_pv	3000	
Temp_pv_vector	3 4.2 4.2 4 3.8 4 3 2.819 8.732 15.196 18.285 23.841 22.383 24.024 21.483 21.355 16.73 14.726 6.468 7	

	6	6	6	5.5
Version_dc_load	1.0			
ON/OFF_Load_State	1.0			
Voltage_load_dc	48			
R_load_dc_vector	8.4097	9.3598	Υπολογισμένο διάνυσμα	
	10.1974	10.9101	Αντιστάσεων για τα DC	
	11.1009	11.0065	φορτία κάθε οικίας	
	10.3611	9.6387	(υπολογισμένο από την	
	8.9085	8.4198	υποσυνάρτηση	
	8.0936	8.2101	dc_load_calcl..Οι τιμές του	
	8.3412	8.6461	R_load_dc_vector	
	8.7581	8.5864	υπολογίζονται πριν την	
	7.9621	6.3862	προσομοίωση με χρήση της	
	6.1776	6.1339	υποσυνάρτησης	
	6.3065	6.8908	dc_load_calcl, η οποία	
	7.6739	9.0579	δέχεται ως είσοδο τις τιμές	
			ισχύος που καταναλίσκονται	
			επί των DC φορτίων).	
Version_ac_load	1.0			
ON/OFF_Load_State	1			
Voltage_load_ac	230			
R_load_ac_vector	167.8286	186.7891	Υπολογισμένο διάνυσμα	
	209.9318	224.6046	Αντιστάσεων για τα AC	
	221.5370	219.6532	φορτία κάθε οικίας	
	185.0070	178.1816	(υπολογισμένο από την	
	168.4259	159.1873	υποσυνάρτηση ac_load_calcl.	
	168.3212	170.7444	Οι τιμές του	
	173.4704	172.5458	R_load_ac_vector	
	174.7824	171.3562	υπολογίζονται πριν την	
	150.5339	120.7384	προσομοίωση με χρήση της	
	110.3067	122.4109	υποσυνάρτησης	
			ac_load_calcl, η οποία	

	125.8554	141.8591	δέχεται ως είσοδο τις τιμές
	157.9803	180.7461	ισχύος που καταναλίσκονται επί των AC φορτίων.Ο συντελεστής ισχύος που είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1].)
X_load_ac_vector	55.1626	61.3946	Υπολογισμένο διάνυσμα
	42.6285	45.6079	Αντιστάσεων για τα AC
	72.8157	72.1965	φορτία κάθε οικίας
	114.6570	96.1723	(υπολογισμένο από την
	81.5724	77.0979	υποσυνάρτηση ac_load_calcl.
	23.9845	24.3298	Οι τιμές του
	24.7182	56.7131	X_load_ac_vector
	57.4482	56.3220	υπολογίζονται πριν την
	72.9069	58.4763	προσομοίωση με χρήση της
	68.3620	40.2345	υποσυνάρτησης
	41.3667	28.8057	ac_load_calcl, η οποία
	32.0793	59.4084	δέχεται ως είσοδο τις τιμές ισχύος που καταναλίσκονται επί των AC φορτίων.Ο συντελεστής ισχύος που είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1].)
Version_hems	1.0		
Time_start	0.0		
Time_stop	23.99		
Time_step	0.1		
I_calc_version	1.0		Δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο εφόσον bypass_P_I=1.

n_hems	0.95
version_nems	1.0
P_min	0
P_max	5000
n_nems	0.88
SOC_Init	0.60
version_batt	1.1
Voltage_chg	48
Voltage_cons	200
n_chg	0.85
Q_max	7200000

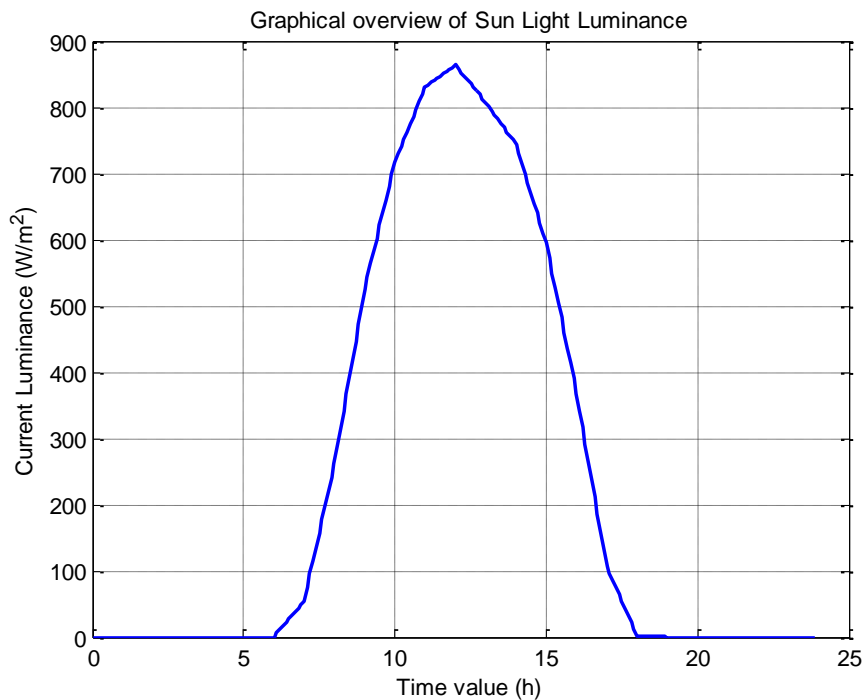
Πίνακας 5.9: Χαρακτηριστικά Σεναρίου Προσομοίωσης 3

Από τα χαρακτηριστικά του σεναρίου προσομοίωσης που συνοψίζονται στον παραπάνω πίνακα, αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις χρονικές μεταβολές παραγωγής ενέργειας και των αντίστοιχων φορτίων, στο σενάριο έχουν μεταβληθεί τα ελάχιστα και μέγιστα επίπεδα προσφοράς ισχύος από το εξωτερικό AC δίκτυο. Αυτά έχουν τεθεί στα 0 KW και 5 KW αντίστοιχα διασφαλίζοντας την επαρκή λειτουργία του μικροδικτύου για ένα ημερήσιο σενάριο προσομοίωσης.

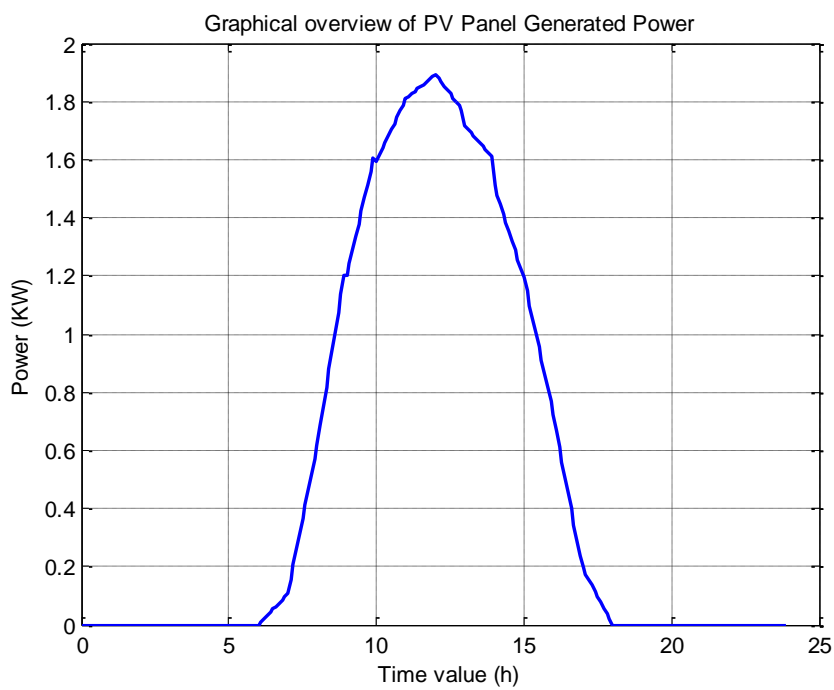
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο διαχειριστής του δικτύου είναι υπεύθυνος για την επιλογή των επιπέδων μέγιστης και ελάχιστης εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος.

5.4.2 Αποτελέσματα Σεναρίου Προσομοίωσης 3

Τα αποτελέσματα από το σενάριο προσομοίωσης 3 για χειμερινούς μήνες προσομοίωσης με χαμηλές καταναλώσεις φορτίων συνδυαζόμενες με υψηλότερα επίπεδα παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα, (γραφικές παραστάσεις και αριθμητικές τιμές) παρουσιάζονται στην συνέχεια.

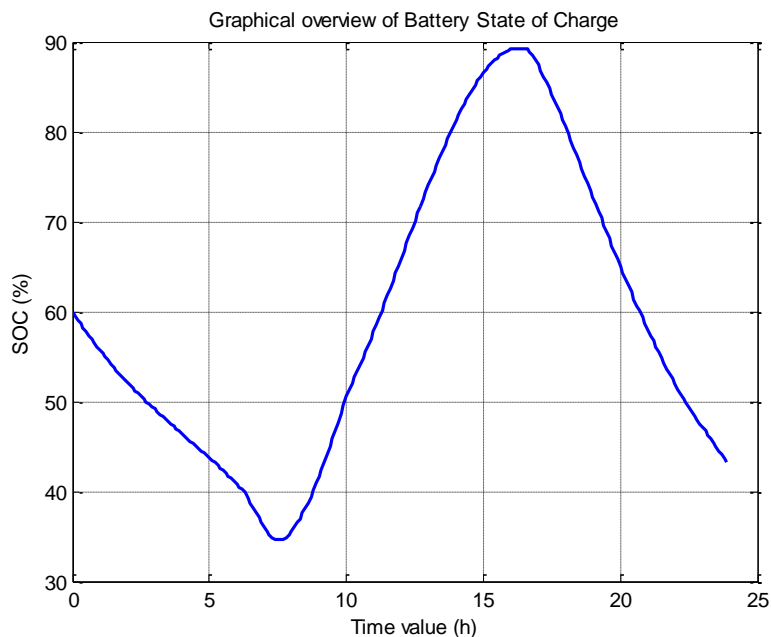


Σχήμα 5.43: Γραφική παράσταση της Ηλιακής Φωτεινότητας για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης



Σχήμα 5.44: Γραφική παράσταση της Ηλεκτρικής Ισχύος του ΦΒ Συστήματος

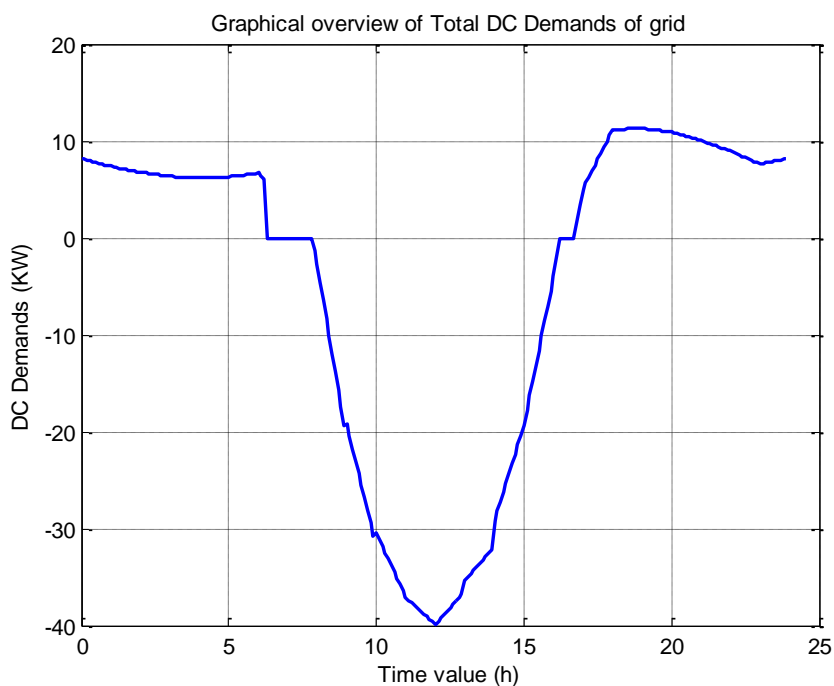
Από το διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος ενός ΦΒ συστήματος που ανήκει σε μία από τις οικίες του μικροδικτύου, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μία μονότονη αυξητική συμπεριφορά στα παραγόμενα ποσά ενέργειας καθώς διερχόμαστε από τις πρωϊνές ώρες της ημέρας προς την διάρκεια των μεσημβρινών ωρών. Οι μέγιστες τιμές στην παραγωγή ισχύος που εμφανίζει το ΦΒ σύστημα σε τιμή 1.9 KW. Στην συνέχεια και καθώς απομακρυνόμαστε από το μέγιστο των μεσημβρινών ωρών, το σύστημα παραγωγής εμφανίζει μία μονοτονικά φθίνουσα συμπεριφορά, η οποία δικαιολογείται από την φάση δύσεως του ηλίου για το γεωγραφικό πλάτος της πόλης των Αθηνών (όπου θεωρούμε ότι είναι εγκατεστημένο το μικροδίκτυο παραγωγής).



Σχήμα 5.45: Γραφική παράσταση της Κατάστασης Φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών

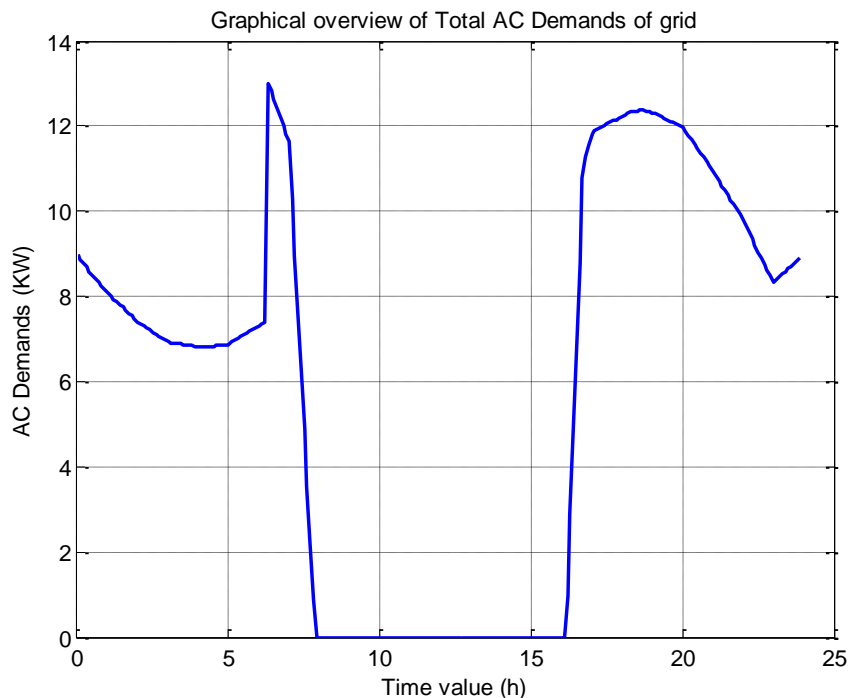
Από το διάγραμμα φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου κατά την χρονική εκτέλεση του σεναρίου παρατηρούμε ότι αρχικά το σύστημα εκκινεί με ποσοστό φόρτισης της τάξης του 60%. Κατά τις αρχικές πρωϊνές ώρες της προσομοίωσης το σύστημα αποδίδει ενέργεια από τους συσσωρευτές για την κάλυψη των αναγκών ισχύος των οικιών του δικτύου, διότι στην φάση αυτή τα ΦΒ συστήματα

δεν παράγουν ακόμη ενέργεια για να την αποδώσουν στο μικροδικτύο. Η φάση αυτή καταλήγει σε ένα ποσοστό φόρτισης της τάξης του 35% για τους συσσωρευτές. Η διαρκής εκφόρτιση των συσσωρευτων βασίζεται στο γεγονός ότι η εξωτερικά παρεχόμενη AC ισχύς δεν επαρκεί για την διατήρηση του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών παράλληλα με την εξυπηρέτηση και κάλυψη των AC φορτίων. Κατά τις μεσημβρινές ώρες, όπου η παροχή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα του μικροδικτύου καθίσταται σημαντική για την λειτουργία του μικροδικτύου, η φόρτιση των συσσωρευτών οδηγείται στο 88% χωρίς να προλάβει να φορτίσει τους συσσωρευτές στο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο του 90% που επιτρέπει το μικροδικτύο. Μετά τις μεσημβρινές ώρες η παρεχόμενη ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για να διατηρήσει τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών και κατά κύριο λόγο η παραγόμενη ισχύς διατίθεται για την κάλυψη των φορτίων του συστήματος. Τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών εμφανίζονται να μειώνονται όπως ήταν αναμενόμενο, οδηγούμενα πάλι προς ένα επίπεδο φόρτισης λίγο χαμηλότερο της τάξης του 45%.



Σχήμα 5.46: Γραφική παράσταση των συνολικών απαιτήσεων DC του μικροδικτύου

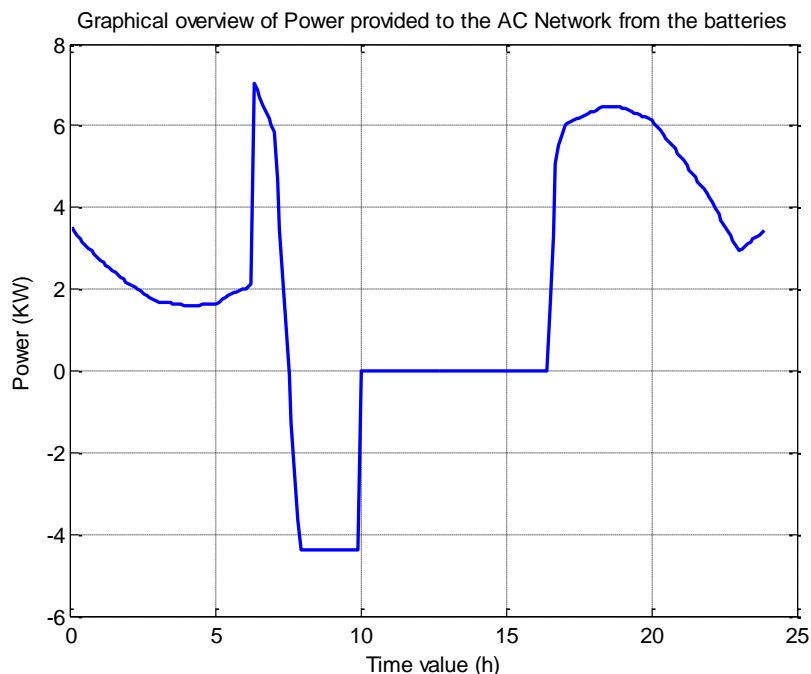
Από το διάγραμμα των DC απαιτήσεων φορτίου $D_{dc} = \Sigma(P_g - L_{dc})$, κατά τις πρωινές ώρες οι απαιτήσεις στο μικροδίκτυο ανέρχονται στα επίπεδα των 8 KW διότι τα ΦΒ συστήματα δεν παράγουν καθόλου ενέργεια κατά τις ώρες αυτές. Στην συνέχεια και εφόσον τα ΦΒ συστήματα ενεργοποιούνται, τα επίπεδα απαίτησης ισχύος για την κάλυψη των DC φορτίων μειώνονται και καταλήγουν σε μηδενικές απαιτήσεις γύρω στις 6 π.μ. Στην συνέχεια της προσομοίωσης και πλησιάζοντας κατά τις μεσημβρινές ώρες η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα επαρκεί για την πλήρη κάλυψη των DC φορτίων παράγοντας και επιπλέον ενέργεια η οποία θα οδηγηθεί στην διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου. Η μέγιστη επιστρεφόμενη ισχύς που τα ΦΒ συστήματα αποδίδουν στο μικροδίκτυο, ανέρχεται (αφού καλύψει τα DC φορτία) σε επίπεδα 40 KW που είναι σαφώς αρκετά υψηλή τιμή. Στην συνέχεια και κατά την πορεία της φάσης προσομοίωσης η παραγόμενη ισχύς αρχίζει να μειώνεται μονοτονικά από το προηγούμενο μέγιστο, φτάνοντας οριακά κατά τις απογευματινές ώρες της προσομοίωσης στην κάλυψη των DC αναγκών του μικροδικτύου (μηδενική τιμή DC αναγκών). Το σενάριο καταλήγει με πέρασμα σε τιμές για τα φορτία οι οποίες δεν μπορούν να καλυφθούν από την παραγωγή των ΦΒ συστημάτων κατά τις νυχτερινές ώρες (με μέγιστη τιμή τις 11 KW) και υποχρεωτικά καλύπτονται από παροχή ενέργειας από τους συσσωρευτές και το εξωτερικό AC δίκτυο.



Σχήμα 5.47: Γραφική παράσταση των συνολικών απαιτήσεων AC του μικροδικτύου

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη των απαιτήσεων D_{AC} για την κάλυψη των AC φορτίων του μικροδικτύου. Όπως θα φανεί και από το διάγραμμα παροχής ισχύος προς τους συσσωρευτές που ακολουθεί στο επόμενο διάγραμμα, στο μικροδίκτυο υπάρχει σταθερή και διαρκής προσφορά εξωτερικής AC ισχύος. Η συγκεκριμένη προσφορά καλύπτει κατά ένα μέρος τις AC ανάγκες φορτίου του μικροδικτύου κρατώντας για μεγάλο χρονικό διάστημα όπου τα ΦΒ συστήματα λόγω ελλείψεως φωτεινότητας είναι εκτός λειτουργίας. Κατά τις ώρες αυτές τα φορτία των AC απαιτήσεων κρατούνται σχετικά σταθερά στο επίπεδο των 8 KW για το μικροδίκτυο. Στην συνέχεια και εφόσον η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα αρχίζει να συνεισφέρει σημαντικά στην ενέργεια του συστήματος, οι απαιτήσεις των AC φορτίων μηδενίζονται εφόσον αυτά αρχίζουν να καλύπτονται από την παραγόμενη ενέργεια η περίσσεια των οποίων καταλήγει στους συσσωρευτές. Οι μηδενικές απαιτήσεις για τα AC φορτία συνεχίζουν να διατηρούνται μέχρι και την 4 μ.μ. ώρα της προσομοίωσης όπου τα επίπεδα παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα αρχίζουν να μειώνονται. Αυτό συντελεί σε μία

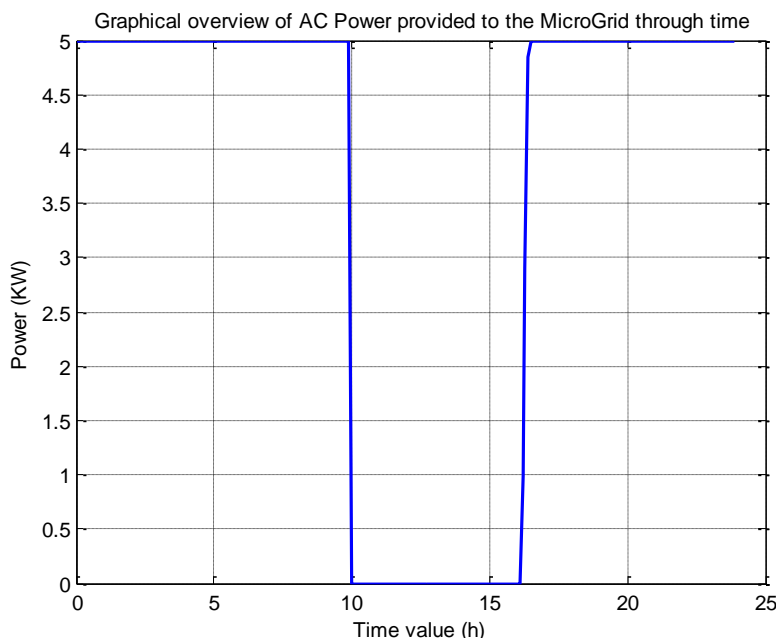
γραμμική αύξηση των απαιτήσεων εφόσον αυτές δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν από την παρεχόμενη ισχύ στους συσσωρευτές καταλήγοντας στην μέγιστη τιμή απαίτησης των 12.5 KW κατά τις απογευματινές ώρες. Οι απαιτήσεις στη συνέχεια της προσομοίωσης αρχίζουν να μειώνονται δεδομένης της μείωσης ζήτησης των AC φορτίων του μικροδικτύου.



Σχήμα 5.48: Γραφική παράσταση της ισχύος που αποδίδεται στο AC δίκτυο από τους συσσωρευτές

Το διάγραμμα παρουσιάζει την προσφορά ισχύος στο εξωτερικό AC δίκτυο από τους συσσωρευτές του μικροδικτύου καθόλη την διάρκεια της χρονικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι κατά το αρχικό τμήμα της προσομοίωσης το εξωτερικό AC δίκτυο δεν μπορεί να καλύψει με την προσφερόμενη ενέργεια τις ανάγκες του AC φορτίου και για τον λόγο αυτό οι συσσωρευτές καλύπτουν και αυτό το έλλειμμα ισχύος της τάξης των 2 KW. Κατά την πορεία της προσομοίωσης και λίγο πριν την 10 π.μ. υπάρχει μια προσφορά ισχύος προς τους συσσωρευτές για μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή η παρεχόμενη ισχύς τείνει να καταλήξει σε μηδενική τιμή καθώς ο αλγόριθμος ελέγχου του NEMS μεταβαίνει από την

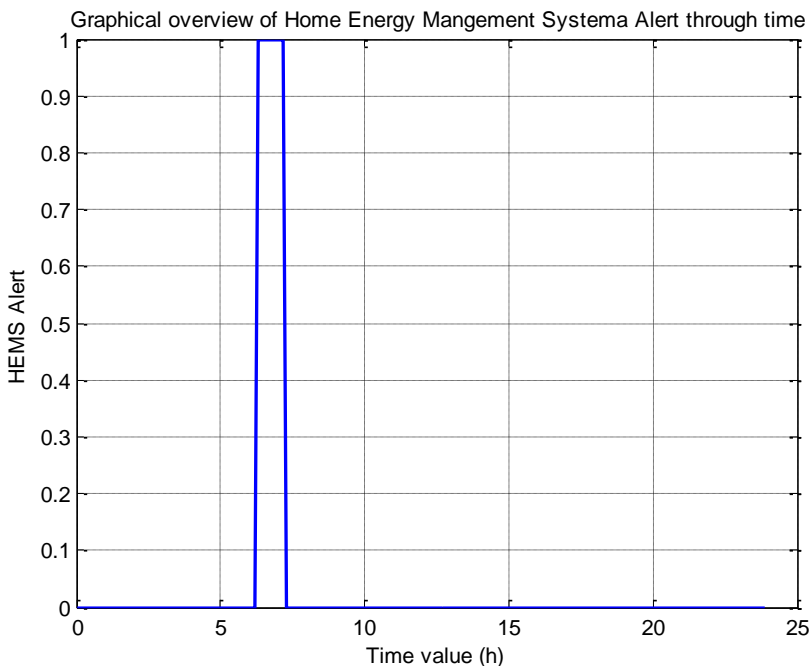
κατάσταση 6 στην 5, λόγω προσφοράς ισχύος που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών. Η προσφερόμενη ισχύς α διατηρείται σε μηδενικό επίπεδο μέχρι τις 4 μ.μ. και στην συνέχεια οι συσσωρευτές αποδίδουν και πάλι ισχύ (έως και 6 KW) για την κάλυψη των αναγκών των φορτίων του δικτύου.



Σχήμα 5.49: Γραφική παράσταση της ισχύος που αποδίδεται από το AC δίκτυο προς το μικροδίκτυο

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την συνολική προσφορά ισχύος από το εξωτερικό AC δίκτυο προς συνολικά το μικροδίκτυο (κάλυψη συσσωρευτών και DC/AC φορτίων του μικροδικτύου). Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι σχεδόν για ολόκληρη την διάρκεια του σεναρίου προσομοίωσης το εξωτερικό AC δίκτυο παρέχει το μέγιστο της ισχύος P_{max} των 5 KW που μπορεί να διαθέσει προς το μικροδίκτυο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η δεδομένη ισχύς δεν είναι δυνατόν να καλύψει το σύνολο των AC αναγκών του μικροδικτύου με αποτέλεσμα αυτά να καλύπτονται από τους συσσωρευτές. Η μόνη χρονική φάση όπου η εξωτερική προσφορά ισχύος πέφτει στα επίπεδα του $P_{min}=0$ KW είναι για το

χρονικό διάστημα από 10 π.μ. έως 4 μ.μ. όπου η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα είναι ικανοποιητική για την συνολική κάλυψη των αναγκών του μικροδικτύου (AC/DC φορτία καθώς και φόρτιση των συσσωρευτών).

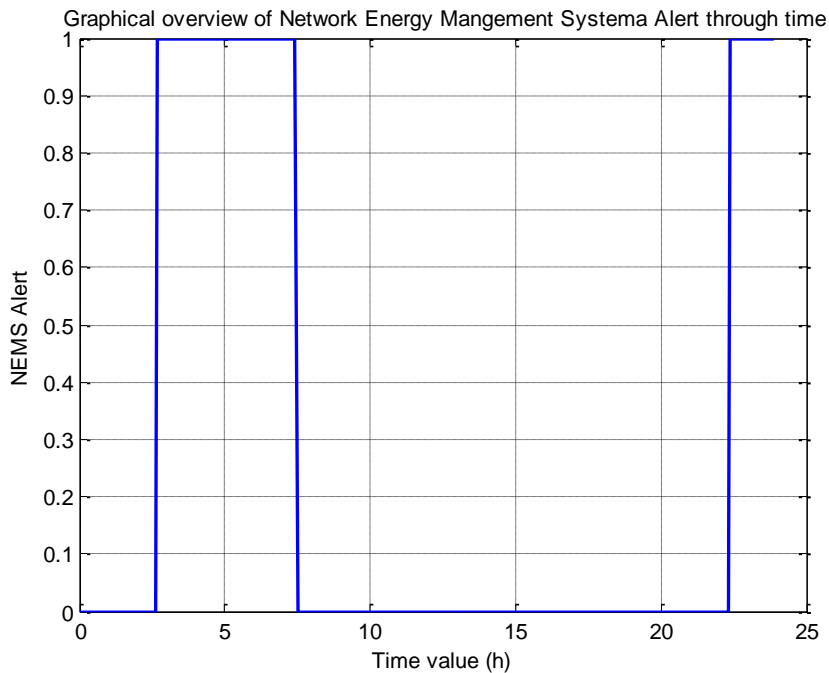


Σχήμα 5.50: Γραφική παράσταση σημάτων συναγερμού από το HEMS

Το διάγραμμα του προηγούμενου σχήματος παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη του σήματος συναγερμού από την οντότητα HEMS διαχείρισης ενέργειας της οικίας. Παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο σήμα ενεργοποιείται και διατηρείται ενεργό για περίπου 1 ώρα, ξεκινώντας από την 6 π.μ. Η οντότητα HEMS, εκείνη τη στιγμή, βρίσκεται σε κατάσταση 5 όπως θα φανεί και στο αντίστοιχο διάγραμμα καταστάσεων, κατάσταση η οποία δηλώνει ότι οι συσσωρευτές βρίσκονται σε καθεστώς φόρτισης μικρότερο του 40% και η παραγωγή από τα ΦΒ πάνελ δεν επαρκεί ούτε για τα DC φορτία της οικίας με αποτέλεσμα να χρειάζεται η συνδρομή των συσσωρευτών και πιθανώς του εξωτερικού AC δικτύου. Το σήμα συναγερμού επανέρχεται σε ανενεργή κατάσταση διότι με την πάροδο του χρόνου η παραγωγή από τα ΦΒ πάνελ αυξάνεται αισθητά. Το νόημα των συναγερμών είναι η λήψη

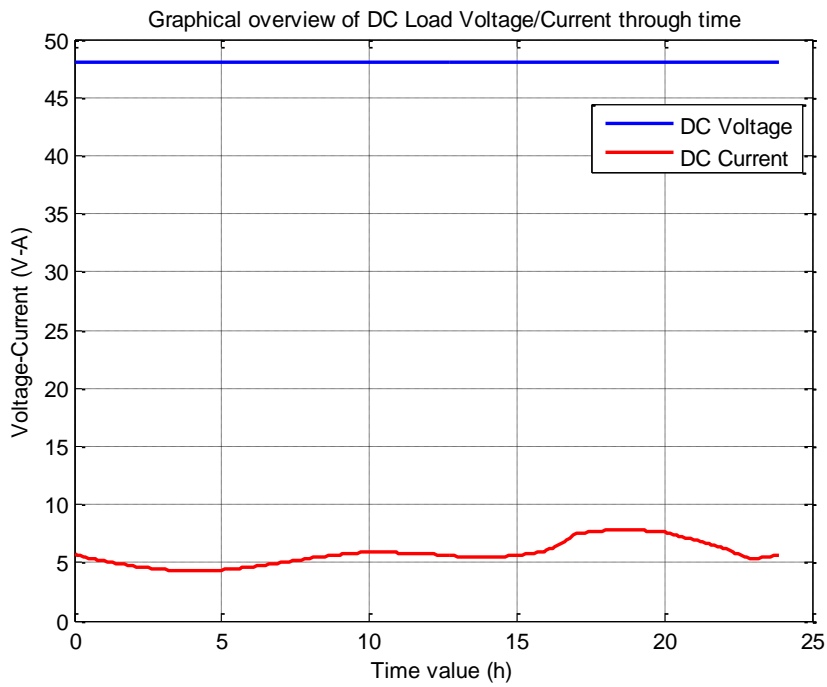
συγκεκριμένων ενεργειών, προκειμένου να συνεχιστεί η απόσκοπη λειτουργία του μικροδικτύου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο χρήστης θα μπορούσε να επιλέξει κάποια λειτουργία (από ένα προκαθορισμένο σετ εντολών) όπου οι ανάγκες για DC φορτία είναι μειωμένες.

Σε περίπτωση πάντως που δεν επιθυμεί κάτι τέτοιο, μπορεί να συνεχίσει κανονικά τις καταναλώσεις του, και το AC δίκτυο θα συνδράμει.

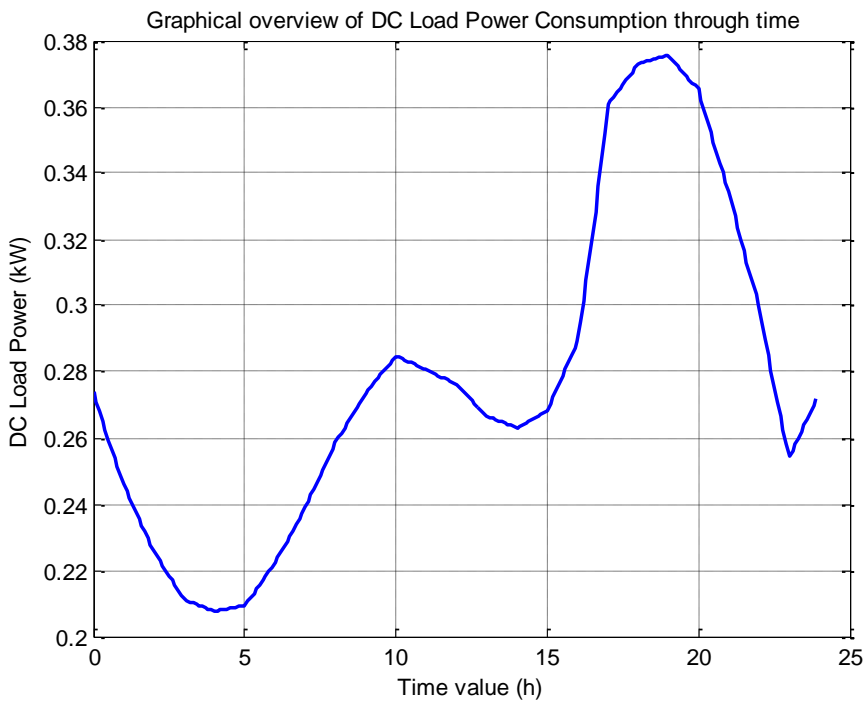


Σχήμα 5.51: Γραφική παράσταση σημάτων συναγερμού από το NEMS

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το σήμα συναγερμού από την οντότητα NEMS του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι αυτό το σήμα ενεργοποιείται στις χρονικές φάσεις της προσομοίωσης από 2.30 έως 7.30 π.μ. και μετά την 10 μ.μ. διότι τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών είναι μικρότερα του 50% και οι απαιτήσεις των AC φορτίων του μικροδικτύου δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν από την εξωτερικά προσφερόμενη AC ισχύ. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από το ότι η οντότητα NEMS, εκείνη τη στιγμή, βρίσκεται στην κατάσταση 5 όπως θα φανεί και στο αντίστοιχο διάγραμμα καταστάσεων.

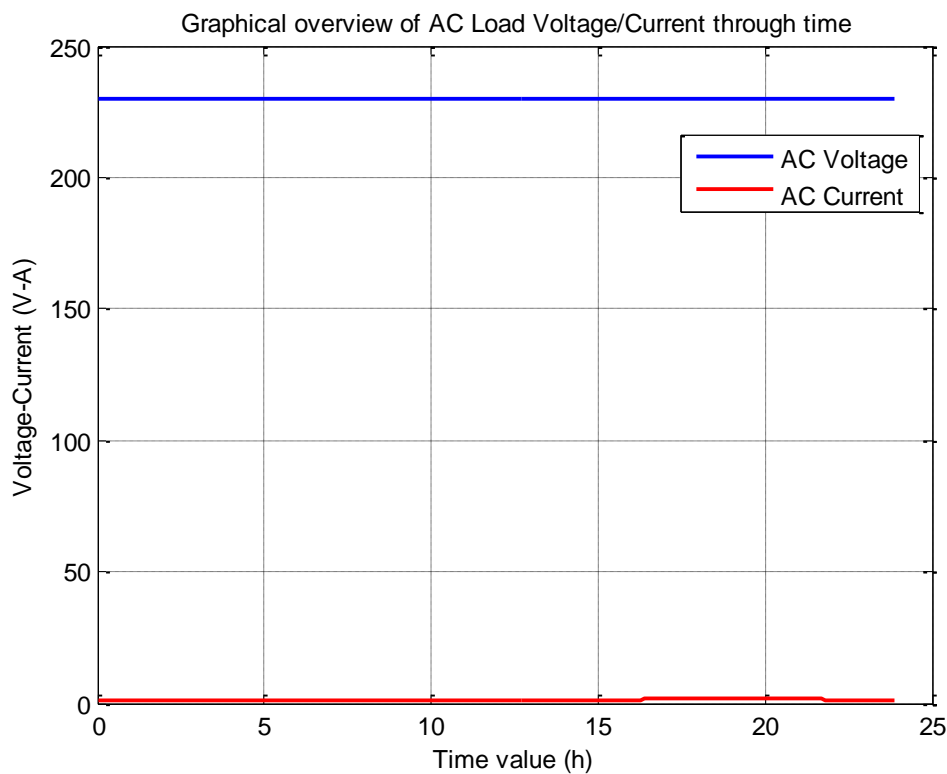


Σχήμα 5.52: Γραφική παράσταση των DC ρευμάτων/τάσεων ανά οικία

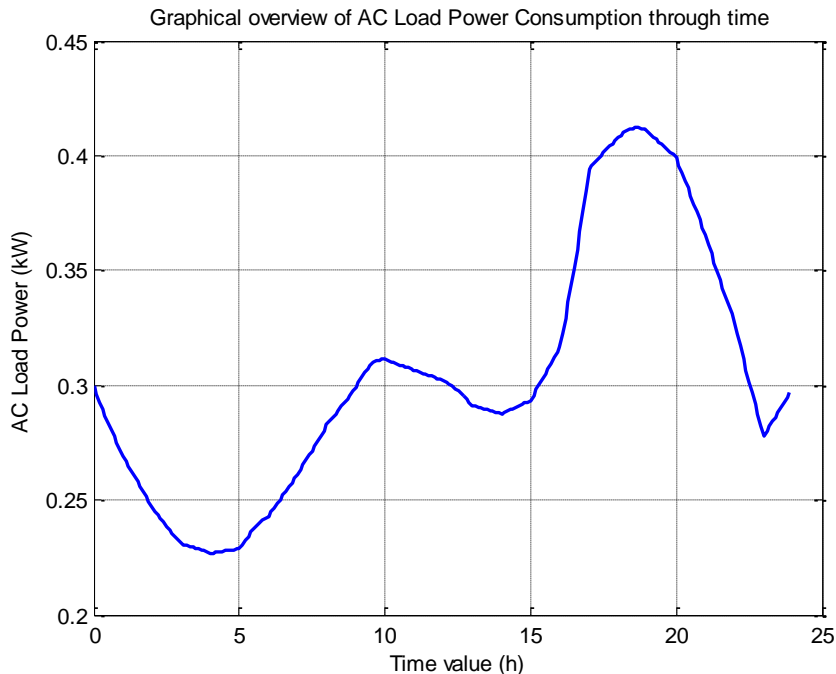


Σχήμα 5.53: Γραφική παράσταση των DC φορτίων ανά οικία

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν τις απαιτήσεις φορτίου DC, καθώς και την τάση και το ρεύμα λειτουργίας για κάθε οικία του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι οι καταναλώσεις ισχύος των DC φορτίων είναι αντίστροφη των τιμών των αντιστάσεων, όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως. Η απαιτούμενη ισχύς για την κάλυψη των DC αναγκών σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης δεν είναι μονοτονική και εμφανίζει διακυμάνσεις για διαφορετικές χρονικές στιγμές.

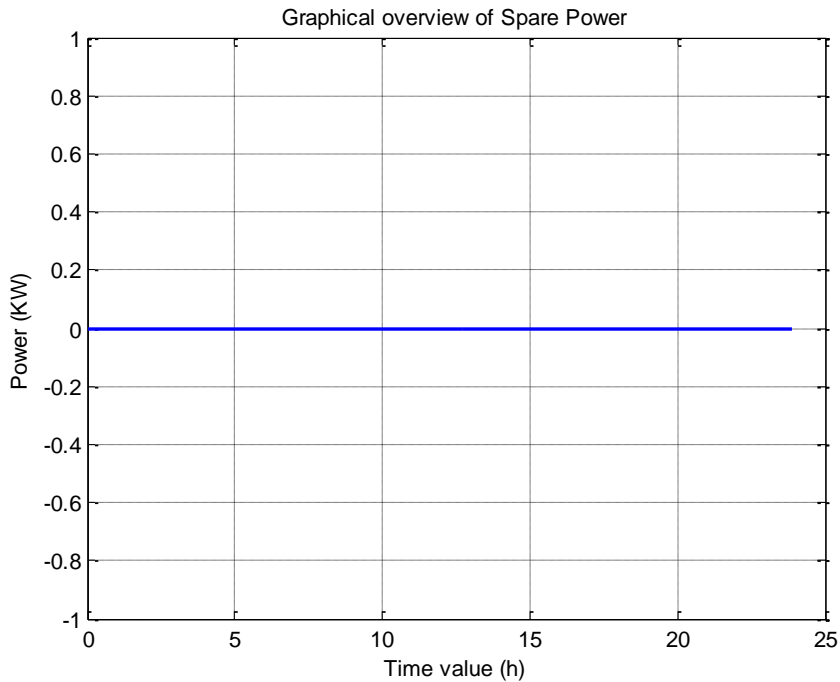


Σχήμα 5.54: Γραφική παράσταση των AC ρευμάτων/τάσεων ανά οικία



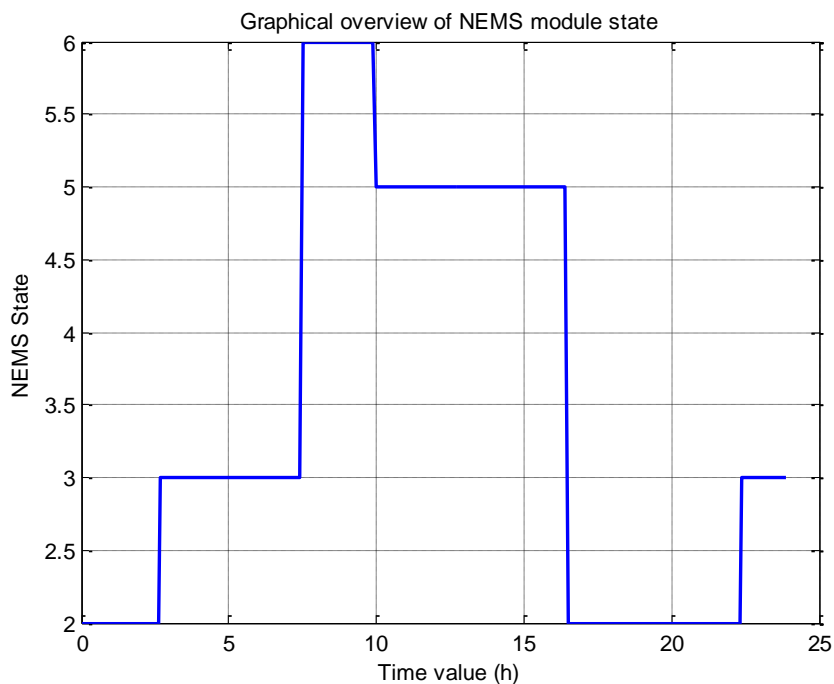
Σχήμα 5.55: Γραφική παράσταση των AC φορτίων ανά οικία

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν ανά οικία τις καταναλώσεις ισχύος των AC φορτίων καθώς και τις τάσεις και τα ρεύματα. Η τάση λειτουργίας για το AC δίκτυο θεωρείται τα 230V (rms), ενώ τα ρεύματα δεν ξεπερνούν τα 10A. Παρατηρούμε ότι οι AC απαιτήσεις των φορτίων είναι σχετικά χαμηλές για τις πρώτες πρωινές ώρες και αρχίζουν να αυξομειώνονται κατά την διάρκεια της ημέρας. Καταλήγουν σε μία μέγιστη τιμή και στην συνέχεια για τις βραδινές ώρες προσομοίωσης της λειτουργίας για το μοντέλο της οικίας επανέρχονται σε χαμηλότερα επίπεδα.



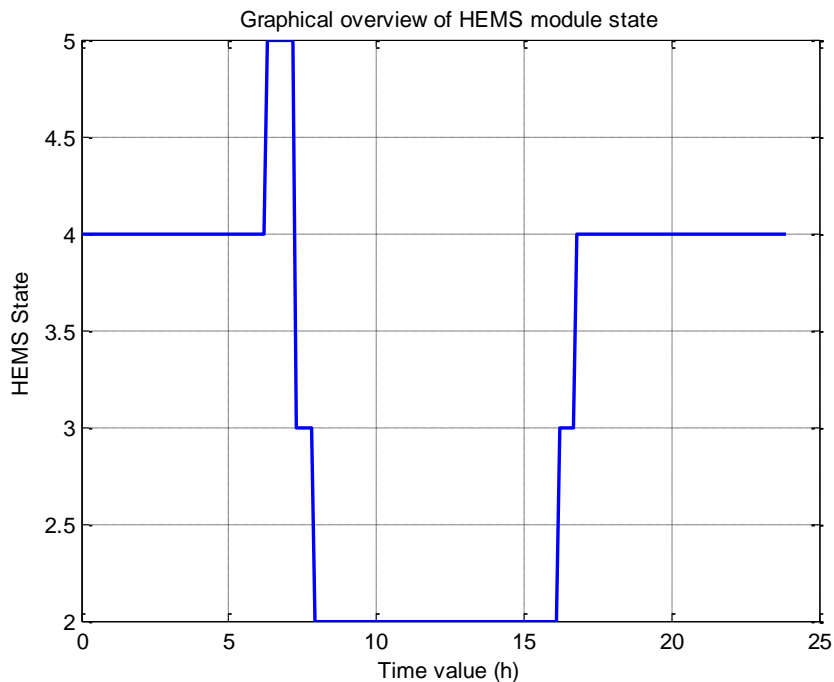
Σχήμα 5.56: Γραφική παράσταση πλεονάζουσας ισχύος του μικροδικτύου

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το μικροδίκτυο δεν εμφανίζει περίσσεια ισχύος σε καμία χρονική φάση της προσομοίωσης. Αυτό έχει επιτευχθεί επιλέγοντας κατάλληλα τα επίπεδα εξωτερικής παροχής ισχύος P_{\min} και P_{\max} από το AC δίκτυο. Το γεγονός αυτό δεικνύει ότι είναι δυνατόν να υπάρξει κατάλληλος συντονισμός των απαιτήσεων και των παραγωγών από το ΦΒ σύστημα έτσι ώστε να μην υπάρχει απώλεια ή σπατάληση της εξωτερικά/εσωτερικά παρεχόμενης ισχύος στο μικροδίκτυο. Στο συγκεκριμένο σενάριο και όπως θα αποδειχθεί στον έλεγχο ευσταθούς λειτουργίας, η εξωτερικά προσφερόμενη ενέργεια δεν περακεί και χρειάζεται περαιτέρω αύξηση της για την κάλυψη του μικροδικτύου.



Σχήμα 5.57: Γραφική παράσταση των καταστάσεων του NEMS

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις καταστάσεις μετάβασης με βάση τον ορισμό του NEMS πρωτοκόλλου για την λειτουργία των οικιών του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι κατά τις πρωινές ώρες το μικροδίκτυο φαίνεται να παραμένει αρχικά στην κατάσταση 2. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερη του 50% αλλά η εξωτερική AC ισχύς δεν καλύπτει τις AC ανάγκες των φορτίων του μικροδικτύου. Στην συνέχεια το σύστημα μεταβαίνει σε κατάσταση 3 όπου τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών πέφτουν κάτω από 50%. Στην συνέχεια το σύστημα μεταβαίνει σε κατάσταση 6 διότι οι AC απαιτήσεις έρχονται εντός των ορίων μέγιστης παρεχόμενης ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο και τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών παραμένουν κάτω από 50%. Η άνοδος του επιπέδου φόρτισης πάνω από 50% φέρνει το NEMS σε κατάσταση 5. Στην πορεία το σύστημα επανέρχεται στην κατάσταση 2 λόγω της αύξησης της απαίτησης των AC φορτίων του δικτύου, ενώ στο τέλος της καταλήγει στην κατάσταση 3 λόγω περαιτέρω εκφόρτισης των συσσωρευτών (SOC<50%).



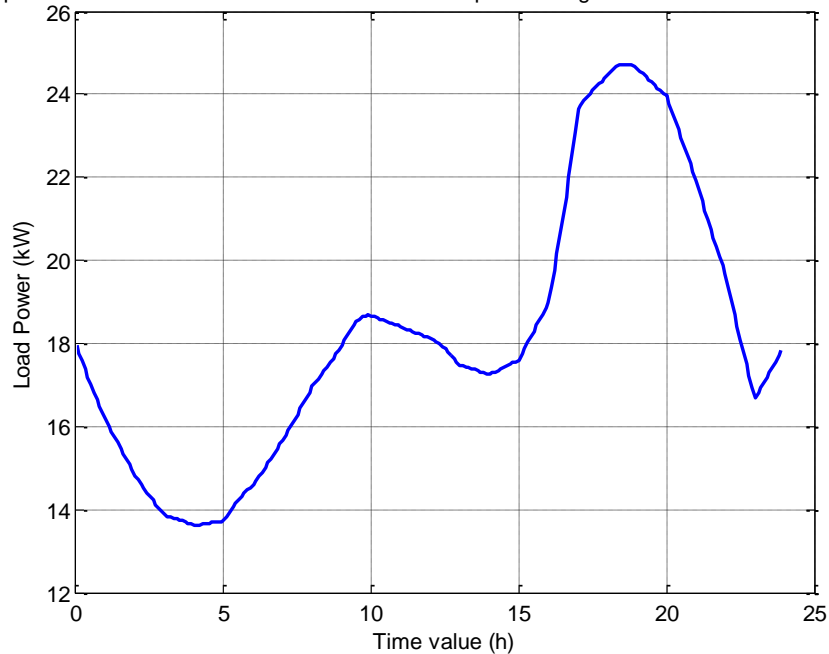
Σχήμα 5.58: Γραφική παράσταση των καταστάσεων του HEMS

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις μεταβάσεις καταστάσεων με βάση το πρωτόκολλο διαχείρισης ενεργειών HEMS για κάθε οικία του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι κατά τις πρωινές ώρες το HEMS της οικίας βρίσκεται στην κατάσταση 4 όπου η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των DC φορτίων και η κατάσταση $SOC > 40\%$. Σε αυτήν την φάση τα DC φορτία καλύπτονται από τους συσσωρευτές ενώ τα AC φορτία ανατίθενται στο εξωτερικό AC δίκτυο. Στην συνέχεια το HEMS μεταβαίνει σε κατάσταση 5 διότι η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για να καλύψει ούτε αποκλειστικά της DC αλλά ούτε και τις AC ανάγκες φορτίων του μικροδικτύου.

Στην συνέχεια οι οικίες του μικροδικτύου έρχονται μετά από ένα γρηγορο μεταβατικό φαινόμενο σε κατάσταση 2 όπου η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα είναι αρκετά υψηλή και μπορεί να καλύψει τις συνολικές απαιτήσεις των DC/AC φορτίων παραμένοντας για πολύ λίγο μεταβατικά στην κατάσταση 3 όπου η παραγόμενη ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για την πλήρη κάλυψη των DC/AC φορτίων. Οι μεταβάσεις αυτές είναι συμμετρικά αντιστρέψιμες

κατά τις φάσεις όπου τα ΦΒ συστήματα μετά την απόδοση του μέγιστου της ισχύος εισέρχονται σε φάσεις μη παραγωγής λόγω δύσεως του ηλίου, οπότε και το HEMS επανέρχεται στην αρχική κατάσταση 4.

Graphical overview of AC&DC Load Power Consumption through time for all the homes in the g



Σχήμα 5.59: Γραφική παράσταση των συνολικών AC/DC απαιτήσεων για το σύνολο των οικιών του μικροδικτύου

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει γραφικά καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης για το μικροδίκτυο τις συνολικές απαιτήσεις φορτίων (AC και DC), όπως αυτές μεταβάλλονται σε διάφορες χρονικές φάσεις. Παρατηρούμε ότι τα επιβαλλόμενα σενάρια προσομοίωσης είναι αρκετά ρεαλιστικά μεταβάλλοντας τις απαιτήσεις συνολικού φορτίου από μία σχετικά χαμηλή τιμή κατά τις πρωινές ώρες λειτουργίας του μικροδικτύου, σε αυξανόμενες τιμές προς τις μεσημβρινές ώρες. Εκεί παρουσιάζεται ένα μέγιστο της τάξης των 25 KW. Στην συνέχεια οι απαιτήσεις ισχύος μειώνονται φθάνοντας ξανά στην περιοχή των 18 KW που ήταν και οι αρχικές απαιτήσεις κατά τις πρωινές ώρες της προσομοίωσης. Οι παραπάνω

μεταβολές δεν είναι μονοτονικές αλλά εμφανίζουν αυξομειώσεις κατά τα μεταβατικά στάδια όπως προβλέπει ο σχεδιασμός του σεναρίου.

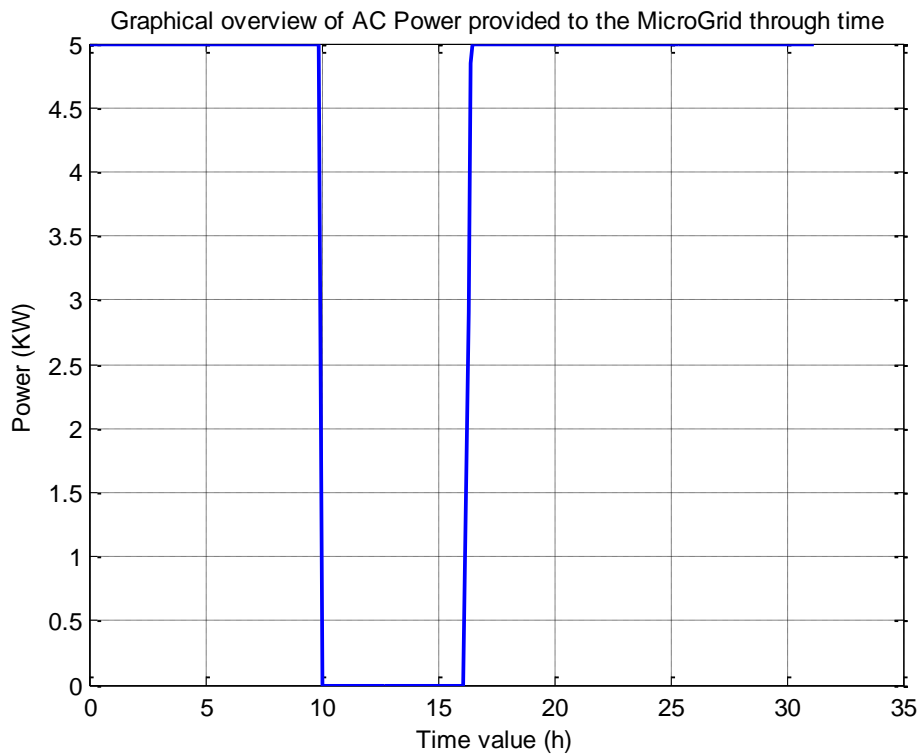
5.4.3 Συμπεράσματα από το Σενάριο Προσομοίωσης 3

Το βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου σεναρίου προσομοίωσης είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών 30 οικιών οι οποίες μετέχουν στην δομή ενός μικροδικτύου με χρήση ΦΒ συστημάτων με υψηλό επίπεδο παραγωγής ισχύος και χαμηλές αλλά αυξομειούμενες απαιτήσεις φορτίων. Το σενάριο προσομοίωσης αφορά σε χειμερινή εποχή προσομοίωσης διασφαλίζοντας υψηλές τιμές στην παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα. Όπως παρατηρήσαμε και από την ανάλυση των επιμέρους διαγραμμάτων από την προσομοίωση, το σύστημα εκκινεί από ένα επίπεδο φόρτισης 60% για τις συστοιχίες των συσσωρευτών του. Κατά τις πρωινές ώρες όπου οι απαιτήσεις των ενεργειακών αναγκών του μικροδικτύου δεν μπορούν να καλυφθούν από την παραγωγή των ΦΒ συστημάτων, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το εξωτερικό AC δίκτυο και από τους συσσωρευτές. Το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών διατηρείται πάνω από 40% κατά τις πρωινές ώρες. Στην συνέχεια και εφόσον η παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ συστήματα αρχίζει να δίνει υψηλή τιμή ισχύος, η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του δικτύου μεταβιβάζεται προς τους συσσωρευτές ενώ ταυτόχρονα τα επίπεδα φόρτισης τους αυξάνουν. Κατά τις μεσημβρινές ώρες έχει επιτευχθεί και η μέγιστη τιμή φόρτισης η οποία δεν πετυχαίνει την επιτρεπόμενη μέγιστη τιμή (90%) αλλά ανέρχεται μέχρι το 88%. Το μικροδίκτυο δεν παράγει πλεονάζουσα ισχύ λόγω των χαμηλών επιπέδων προσφοράς εξωτερικής AC ισχύς η οποία σε αρκετές φάσεις δεν επαρκεί για την πλήρη κάλυψη AC/DC αναγκών αναγκάζοντας την προσφορά ισχύος από τους συσσωρευτές προς το μικροδίκτυο.

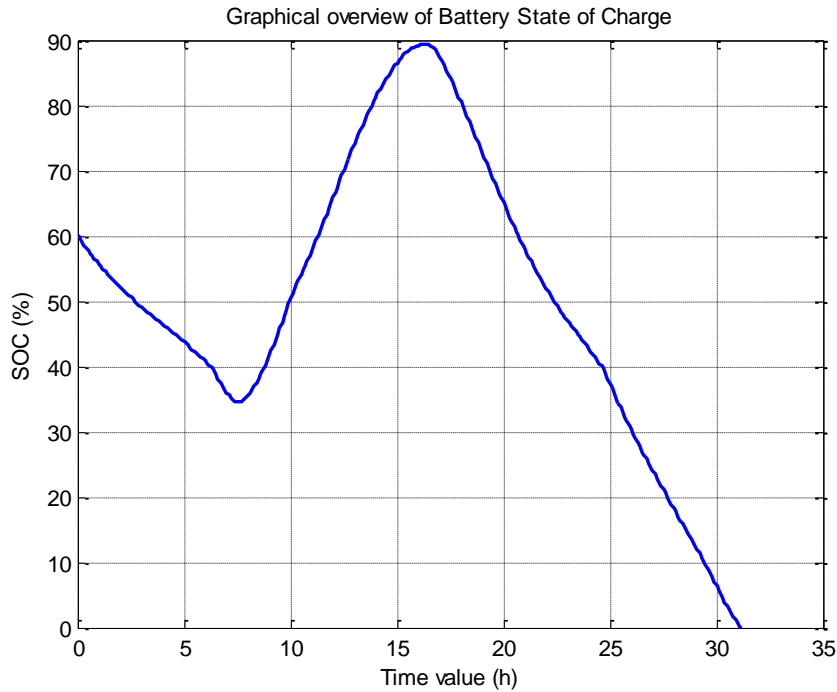
Το μικροδίκτυο με τα παραπάνω επίπεδα παροχής εξωτερικής ισχύος [P_{min}, P_{max}] = [0,5] KW δεν μπορεί να διατηρήσει ευσταθώς την λειτουργία του, διασφαλίζοντας σταθερά επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών του για χρονικό

διάστημα προσομοίωσης το οποίο υπερβαίνει την χρονική διάρκεια της μιας ημέρας.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα χρονικής προσομοίωσης του μικροδικτύου για χρονικό διάστημα δύο ημερών διατηρώντας τις ίδιες συνθήκες προσομοίωσης όσον αφορά στην παραγωγή και κατανάλωση από το μικροδίκτυο.



Σχήμα 5.60: Γραφική παράσταση της εξωτερικά παρεχόμενης AC ισχύος που απαιτείται για την λειτουργία του μικροδικτύου

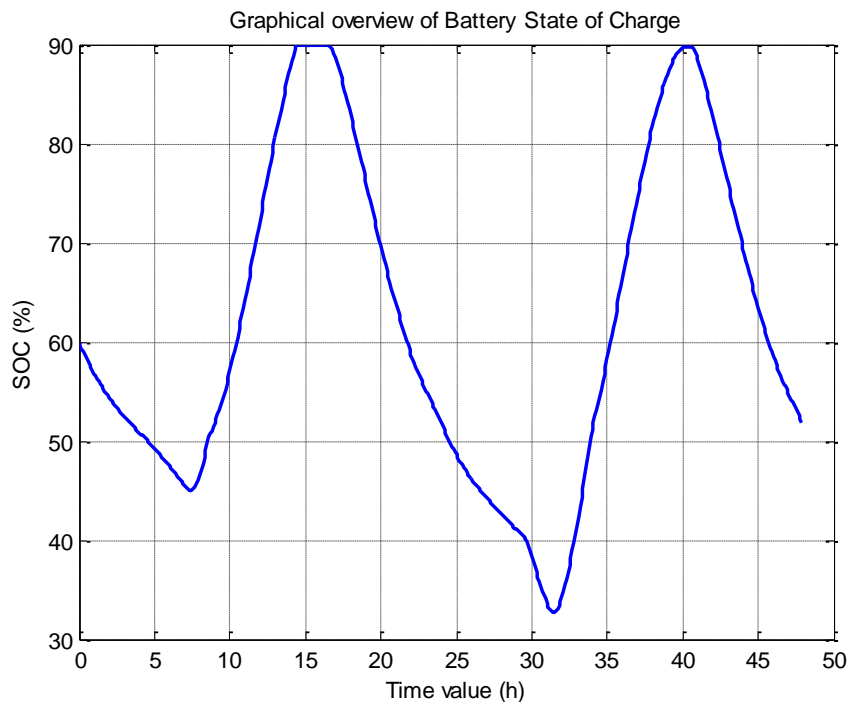


Σχήμα 5.61: Γραφική παράσταση του επιπέδου φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών

Παρατηρούμε ότι η προσομοίωση με βάση τα προηγούμενα διαγράμματα έχει διακοπεί στην χρονική στιγμή κοντά στην 7 π.μ. ώρα της 2^{ης} ημέρας. Αυτό οφείλεται στο ότι τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών έχουν πέσει στο 0% ενώ η εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια των 5 KW δεν επαρκεί για την κάλυψη των DC/AC αναγκών του μικροδικτύου. Το συγκεκριμένο σενάριο θα μπορούσε να καταλήξει σε ευσταθή λειτουργία με κατάλληλη αύξηση του επιπέδου P_{\min} και P_{\max} , δηλ. της προσφερόμενης ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο. Σε μια ρεαλιστική πραγμάτωση του σεναρίου, ο διαχειριστής του δικτύου θα μπορούσε να αυξήσει τα επίπεδα P_{\min} και P_{\max} , βασιζόμενος στα σήματα συναγερμού που λαμβάνει λόγω του χαμηλού επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών.

Επιπλέον διασφάλιση περισσότερης ενέργειας και ενταμίευση της στους συσσωρευτές θα μπορούσε να ανακύψει με χρήση διαφορετικού πρωτοκόλλου ελέγχου το οποίο εκτιμώντας το χαμηλό επίπεδο των συσσωρευτών, δεν θα άφηνε «νεκρές» περιόδους δεδομένου του χαμηλού ποσού μέγιστης ισχύος το οποίο παρέχει το εξωτερικό AC δίκτυο.

Ενδεικτικά παρατίθεται το διάγραμμα του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών, αυξάνοντας το P_{max} στα επίπεδα του 6.5 KW και διατηρώντας το $P_{min}=0$.



Σχήμα 5.62: Γραφική παράσταση του επιπέδου φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών με $P_{max}=6.5$ KW και $P_{min}=0$ KW

Όπως είναι φανερό, με τα καινούρια επίπεδα εξωτερικά παρεχόμενης ισχύος, η φόρτιση των συσσωρευτών διατηρείται στο τέλος της προσομοίωσης των 48 ωρών σε επίπεδα πάνω από 50%. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρατηρούμε επίσης πως κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας, οι συσσωρευτές φορτίζονται μέχρι τα ανώτατα επίπεδα του 90%, απελευθερώνοντας με τον τρόπο αυτό πλεονάζουσα ισχύ, η οποία θα μπορούσε να γυρίσει πίσω στο ανάντη δίκτυο ή να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις ανάγκες των κατοίκων για θέρμανση, δημοτικό φωτισμό κτλ.

5.5 Σενάριο Προσομοίωσης 4

Αναλυτικός Τίτλος και Περιγραφή του σεναρίου: «Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μικροδικτύου για χαμηλά επίπεδα παραγωγής ΦΒ ισχύος και υψηλά επίπεδα κατανάλωσης, για χειμερινή περίοδο λειτουργίας».

Τα φορτία του μικροδικτύου μεταβάλλονται κατά προκαθορισμένο τρόπο σε επιθυμητά επίπεδα καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης και η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για την χειμερινή περίοδο. Το σενάριο προσομοίωσης είναι δυσμενές όσον αφορά στην διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος διότι αναφέρεται σε υψηλές καταναλώσεις φορτίων. Τα δεδομένα ηλεκτρικής παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα προέκυψαν με την χρήση του διαδικτυακού PV Calculator – PVWatts, ο οποίος διατίθεται δωρεάν από το NREL (National Renewable Energy Laboratory των ΗΠΑ) για την πόλη των Αθηνών (Ελλάδα) και συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ώρα	Φωτεινότητα(W/m ²)	Θερμοκρασία Πάνελ(°C)	DC έξοδος(W)
0	0	9.5	0
1	0	9.2	0
2	0	9	0
3	0	8.9	0
4	0	8.8	0
5	0	8.7	0
6	0	8.8	0
7	0.97	6.873	2.365341
8	37.325	7.954	90.61826
9	114.952	10.226	275.8275
10	192.474	12.407	457.3611
11	193.903	12.872	460.6064
12	174.162	12.775	413.9355
13	132.412	12.001	315.8092
14	129.109	11.816	308.1843
15	94.055	10.81	225.5089
16	33.071	8.971	79.93458
17	0.97	7.186	2.362727
18	0	9	0
19	0	8.6	0

20	0	8.4	0
21	0	8.3	0
22	0	8.1	0
23	0	7.9	0

Πίνακας 5.10: Παραγωγή Χαμηλών επιπέδων Ηλεκτρικής Ισχύος σε ΦΒ σύστημα για την Χειμερινή περίοδο με βάση τον PVWatts Calculator

Τα DC και τα AC φορτία των οικιών του μικροδικτύου θεωρήθηκαν για άλλη μια φορά περίπου ίσα μεταξύ τους για κάθε χρονική στιγμή του σεναρίου προσομοίωσης και οι αθροιστικές τιμές τους συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές των φορτίων προέκυψαν με χρήση των δεδομένων που διαθέτει η εταιρεία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, Southern California Edison και αφορούν οικιακές καταναλώσεις.

Hour	Total Load(W)
0	637.9803
1	573.21961
2	525.08667
3	493.58147
4	482.20459
5	487.45546
6	518.08551
7	556.59187
8	602.09938
9	637.9803
10	662.48434
11	653.7329

12	643.23117
13	620.47741
14	612.60111
15	624.85313
16	673.86122
17	840.13867
18	891.77219
19	897.02305
20	865.51785
21	801.63231
22	706.24157
23	593.34793

Πίνακας 5.11: Ωριαίες τιμές καταναλώσεων ανά οικία

5.5.1 Παράμετροι Σεναρίου Προσομοίωσης 4

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Παράμετρος	Τιμή	Παρατηρήσεις
Hometype_file_version	1.0	
Homes	30	
Version_pv	1.1	
P_I_vector_length	24	
P_vector	0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2.365341 90.61826	Διάνυσμα παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος μέσω

	275.8275	457.3611		PVWatts που αντιστοιχεί σε καλοκαιρινό μήνα.			
	460.6064	413.9355					
	315.8092	308.1843					
	225.5089	79.93458					
	2.362727	0.0	0.0	0.0			
	0.0	0.0	0.0				
I_vector	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Επίπεδα φωτεινότητας τα οποία δεν χρησιμοποιούνται από το μοντέλο (bypass_P_I=1)
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
bypass_P_I	1						
S_panel	1.0						Δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο εφόσον bypass_P_I=1.
n_eff_pv	0.95						
Voltage_op_pv	48						
P_max_pv	3000						
Temp_pv_vector	9.5	9.2	9	8.9	8.8	8.7	
	8.8	6.873	7.954	10.226			
	12.407	12.872	12.775				
	12.001	11.816	10.81				
	8.971	7.186	9	8.6	8.4		
	8.3	8.1	7.9				
Version_dc_load	1.0						
ON/OFF_Load_State	1.0						
Voltage_load_dc	48						
R_load_dc_vector	7.2092	8.0500	8.7761				Υπολογισμένο διάνυσμα Αντιστάσεων για τα DC φορτία κάθε οικίας (υπολογισμένο από την
	9.3499	9.5380	9.4682				
	8.8868	8.2782	7.6436				
	7.2063	6.9504	7.0379				

	7.1738	7.4210	7.5164	υποσυνάρτηση
	7.3690	6.8329	5.4806	dc_load_calcl..Οι τιμές του
	5.1633	5.1331	5.3199	R_load_dc_vector
	5.7439	6.5197	7.7602	υπολογίζονται πριν την
				προσομοίωση με χρήση
				της υποσυνάρτησης
				dc_load_calcl, η οποία
				δέχεται ως είσοδο τις τιμές
				ισχύος που
				καταναλίσκονται επί των
				DC φορτίων).
Version_ac_load	1.0			
ON/OFF_Load_State	1			
Voltage_load_ac	230			
R_load_ac_vector	157.2483		175.5879	Υπολογισμένο διάνυσμα
	197.4708		210.3807	αντιστάσεων για τα AC
	208.0436		206.5217	φορτία κάθε οικίας
	173.4359		167.2607	(υπολογισμένο από την
	157.9471		148.9115	υποσυνάρτηση
	157.9867		159.9750	ac_load_calcl. Οι τιμές του
	163.0632		161.8675	R_load_ac_vector
	163.9481		160.7337	υπολογίζονται πριν την
	141.1964		113.2520	προσομοίωση με χρήση
	100.7664		111.9639	της υποσυνάρτησης
	116.0382		129.2431	ac_load_calcl, η οποία
	146.6991	169.2657		δέχεται ως είσοδο τις τιμές
				ισχύος που
				καταναλίσκονται επί των
				AC φορτίων.Ο
				συντελεστής ισχύος που
				είναι απαραίτητος για τον

			υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1].)
X_load_ac_vector	51.6850	57.7129	Υπολογισμένο διάνυσμα Αντιστάσεων για τα AC φορτία κάθε οικίας (υπολογισμένο από την υποσυνάρτηση ac_load_calcl. Οι τιμές του X_load_ac_vector υπολογίζονται πριν την προσομοίωση με χρήση της υποσυνάρτησης ac_load_calcl, η οποία δέχεται ως είσοδο τις τιμές ισχύος που καταναλίσκονται επί των AC φορτίων.Ο συντελεστής ισχύος που είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό παίρνει τιμές στο διάστημα [0.9,1].)
	40.0981	42.7196	
	68.3806	67.8804	
	107.4859	90.2778	
	76.4973	72.1212	
	22.5119	22.7952	
	23.2352	53.2033	
	53.8871	52.8306	
	68.3845	54.8504	
	62.4494	36.8008	
	38.1399	26.2439	
	29.7885	55.6350	
Version_hems	1.0		
Time_start	0.0		
Time_stop	23.99		
Time_step	0.1		
I_calc_version	1.0		Δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο εφόσον bypass_P_I=1.
n_hems	0.95		
version_nems	1.0		
P_min	11000		
P_max	16000		

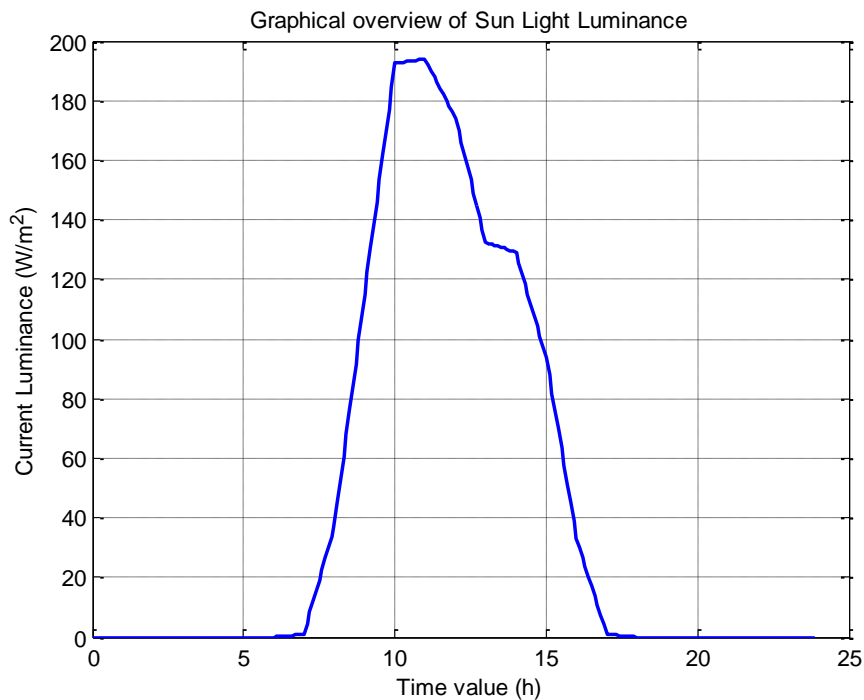
n_nems	0.88
SOC_Init	0.60
version_batt	1.1
Voltage_chg	48
Voltage_cons	200
n_chg	0.85
Q_max	7200000

Πίνακας 5.12: Χαρακτηριστικά Σεναρίου Προσομοίωσης 4

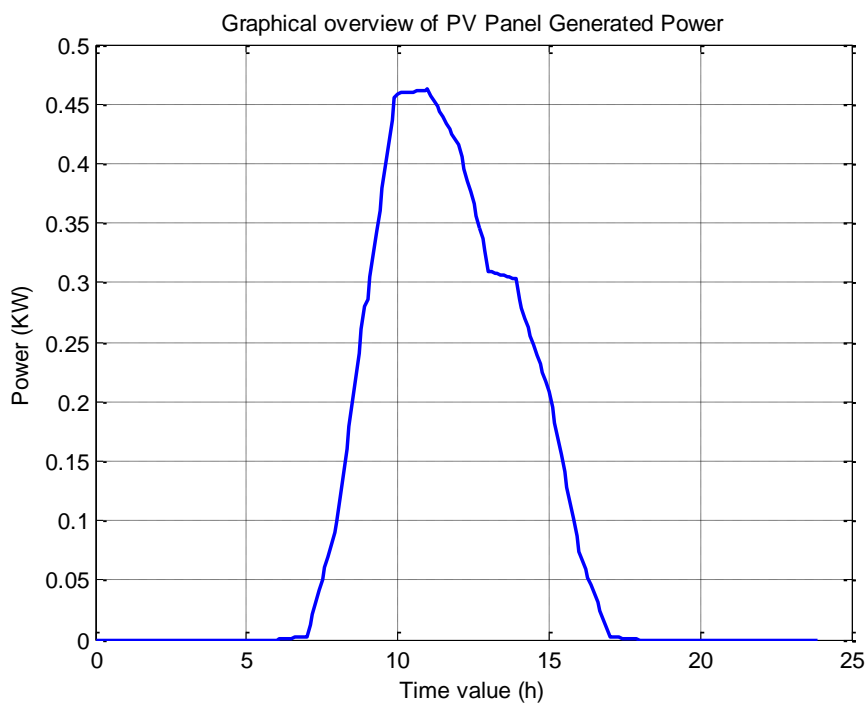
Από τα χαρακτηριστικά του σεναρίου προσομοίωσης, αξίζει να παρατηρηθεί το προσφερόμενο επίπεδο ελάχιστης και μέγιστης ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο AC. Συγκεκριμένα για την προσομοίωση του σεναρίου έχει επιλεγεί τιμή ελαχίστου 11 KW και τιμή μέγιστου 16 KW. Η τιμή ελαχίστου παρά το γεγονός ότι εμφανίζεται να είναι υψηλή αποδεικνύεται αναγκαία για την επίτευξη ομαλής λειτουργίας, δεδομένου ότι στο σενάριο η εσωτερική παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα είναι χαμηλή ενώ οι απαιτήσεις των φορτίων DC/AC του μικροδικτύου είναι αρκετά μεγάλες (δυσμενές σενάριο προσομοίωσης).

5.5.2 Αποτελέσματα Σεναρίου Προσομοίωσης 4

Τα αποτελέσματα από το σενάριο προσομοίωσης 4 για χειμερινούς μήνες προσομοίωσης με υψηλές καταναλώσεις φορτίων συνδυαζόμενες με χαμηλότερα επίπεδα παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα, (γραφικές παραστάσεις και αριθμητικές τιμές) παρουσιάζονται στην συνέχεια.

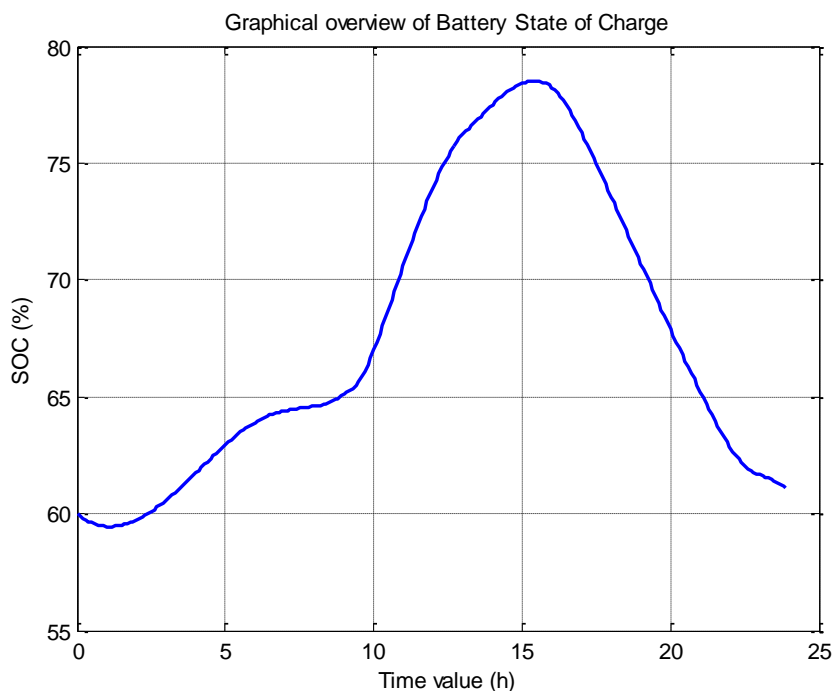


Σχήμα 5.63: Γραφική παράσταση της Ηλιακής Φωτεινότητας για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης



Σχήμα 5.64: Γραφική παράσταση της Ηλεκτρικής Ισχύος του ΦΒ Συστήματος

Από το διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος ενός ΦΒ συστήματος που ανήκει σε μία από τις οικίες του μικροδικτύου, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μία μονότονη αύξουσα και στην συνέχεια φθίνουσα συμπεριφορά, η οποία παρομοιάζεται με τα προηγούμενα σενάρια. Η διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σε αυτό το σενάριο σαφώς μικρότερη και συνυφασμένη με χαμηλότερα επίπεδα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τα ΦΒ πάνελ.

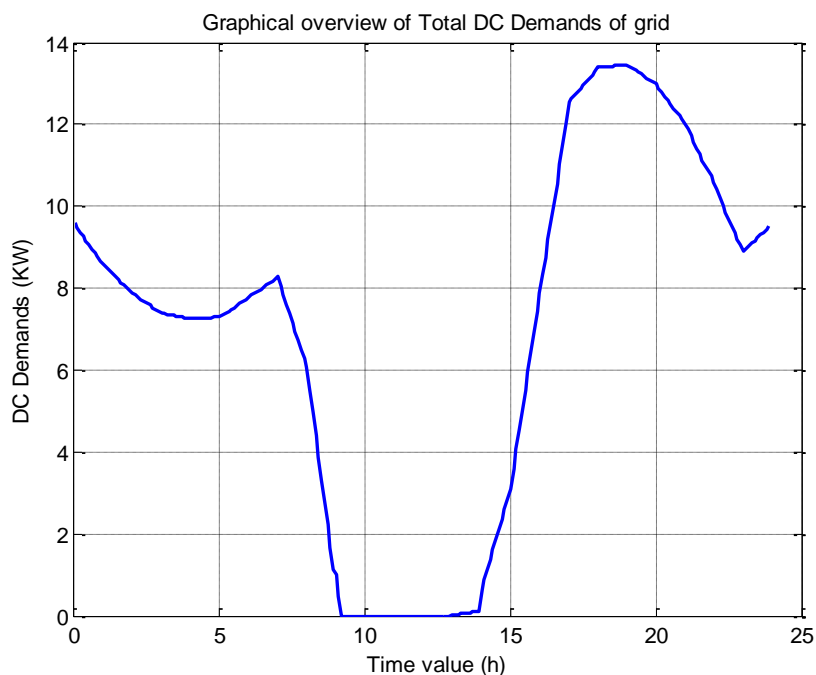


Σχήμα 5.65: Γραφική παράσταση της Κατάστασης Φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών

Από το διάγραμμα φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου κατά την χρονική εκτέλεση του σεναρίου παρατηρούμε ότι αρχικά το σύστημα εκκινεί με ποσοστό φόρτισης 60%. Κατά τις αρχικές πρωϊνές ώρες της προσομοίωσης το σύστημα αποδίδει ενέργεια από τους συσσωρευτές για την κάλυψη των αναγκών ισχύος των οικιών του δικτύου, για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Όμως εξαιτίας των υψηλών επιπέδων παροχής ισχύος από το εξωτερικό AC δίκτυο, μέρος αυτής διοχετεύεται για την φόρτιση των συσσωρευτών με αποτέλεσμα να παρατηρούμε

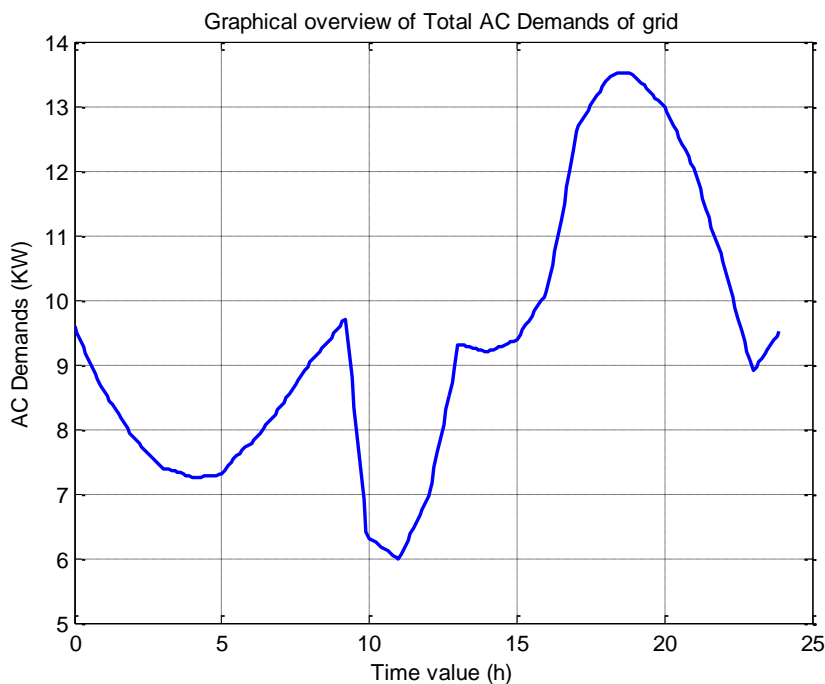
αύξηση του επιπέδου φόρτισης παρά το γεγονός ότι τα ΦΒ συστήματα δεν έχουν ακόμη τεθεί σε φάση παραγωγής (πρώτες πρωινές ώρες). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την συνεχή αύξηση των επιπέδων φόρτισης η οποία συνεχίζεται επίσης ομαλά και μονοτονικά κατά την φάση ενεργοποίησης των ΦΒ συστημάτων μετά τις 7 π.μ. Η αύξηση του επιπέδου φόρτισης κορυφώνεται κατά τις 3 μ.μ. οπότε πετυχαίνει και την μέγιστη τιμή των 77.5% η οποία είναι χαμηλότερη από τα μέγιστα επιτρεπτά όρια φόρτισης του 90% με τα περιθώρια ασφαλείας που προβλέπεται για τους συσσωρευτές.

Μετά τις μεσημβρινές ώρες η παρεχόμενη ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για να διατηρήσει τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών και κατά κύριο λόγο η παραγόμενη ισχύς διατίθεται για την κάλυψη των φορτίων του συστήματος. Τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών εμφανίζονται να μειώνονται οδηγούμενα πάλι προς ένα επίπεδο φόρτισης λίγο χαμηλότερο της τάξης του 60%.



Σχήμα 5.66: Γραφική παράσταση των συνολικών σπαπιτήσεων DC του μικροδικτύου

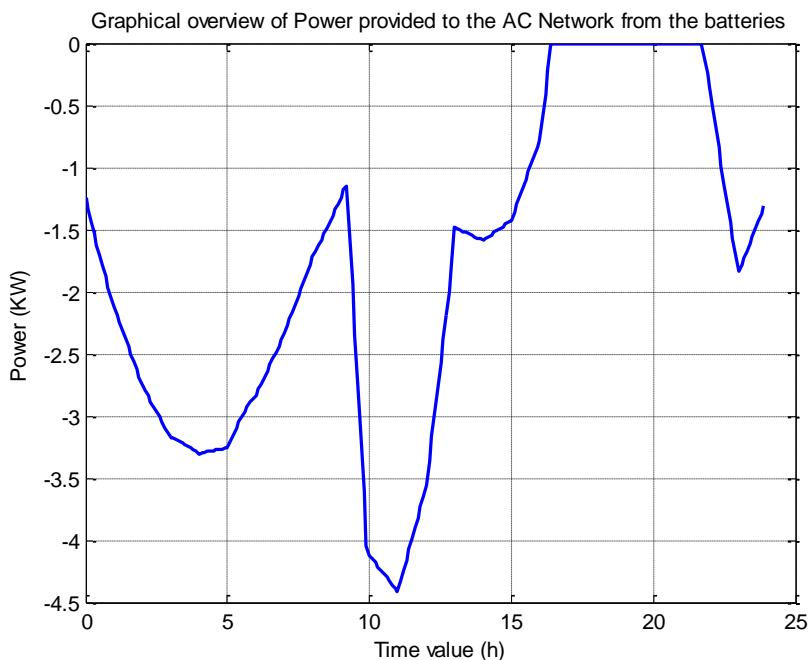
Από το διάγραμμα των DC απαιτήσεων φορτίου $D_{dc} = \sum(P_g - L_{dc})$, κατά τις πρωϊνές ώρες οι απαιτήσεις στο μικροδίκτυο ανέρχονται στα επίπεδα των 8 KW διότι τα ΦΒ συστήματα δεν παράγουν καθόλου ενέργεια κατά τις ώρες αυτές. Στην συνέχεια και εφόσον τα ΦΒ συστήματα ενεργοποιούνται, τα επίπεδα απαίτησης ισχύος για την κάλυψη των DC φορτίων μειώνονται και καταλήγουν σε μηδενικές απαιτήσεις γύρω στις 9 π.μ. Στην συνέχεια της προσομοίωσης και πλησιάζοντας κατά τις μεσημβρινές ώρες η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ συστήματα επαρκεί για την πλήρη κάλυψη των DC φορτίων παράγοντας και επιπλέον ενέργεια η οποία θα οδηγηθεί στην διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου. Η μέγιστη επιστρεφόμενη ισχύς που τα ΦΒ συστήματα αποδίδουν στο μικροδίκτυο, ανέρχεται (αφού καλύψει τα DC φορτία) σε επίπεδα 13 KW που είναι σαφώς υψηλή τιμή. Στην συνέχεια και κατά την πορεία της φάσης προσομοίωσης η παραγόμενη ισχύς αρχίζει να μειώνεται μονοτονικά από το προηγούμενο μέγιστο, φτάνοντας οριακά κατά τις απογευματινές ώρες της προσομοίωσης στην κάλυψη των DC αναγκών του μικροδικτύου (μηδενική τιμή DC αναγκών). Το σενάριο καταλήγει με πέρασμα σε τιμές για τα φορτία οι οποίες δεν μπορούν να καλυφθούν από την παραγωγή των ΦΒ συστημάτων κατά τις νυχτερινές ώρες (με μέγιστη τιμή τις 11 KW) και υποχρεωτικά καλύπτονται από παροχή ενέργειας από τους συσσωρευτές και το εξωτερικό AC δίκτυο.



Σχήμα 5.67: Γραφική παράσταση των συνολικών απαιτήσεων AC του μικροδικτύου

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη των απαιτήσεων D_{AC} για την κάλυψη των AC φορτίων του μικροδικτύου. Όπως θα φανεί και από το διάγραμμα παροχής ισχύος προς τους συσσωρευτές που ακολουθεί στη συνέχεια, στο μικροδίκτυο υπάρχει σταθερή και διαρκής προσφορά εξωτερικής AC ισχύος. Η συγκεκριμένη προσφορά καλύπτει κατά ένα μέρος τις AC ανάγκες φορτίου του μικροδικτύου για μεγάλο χρονικό διάστημα όπου τα ΦΒ συστήματα λόγω ελλείψεως φωτεινότητας είναι εκτός λειτουργίας. Κατά τις ώρες αυτές τα φορτία των AC απαιτήσεων κρατούνται σχετικά σταθερά στο επίπεδο των 8 KW για το μικροδίκτυο. Στην συνέχεια και εφόσον η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα αρχίζει να συνεισφέρει σημαντικά στην ενέργεια του συστήματος, οι AC απαιτήσεις προς το δίκτυο μειώνονται. Οι χαμηλές απαιτήσεις της τάξης των 6 KW διατηρούνται για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 1 ώρα γύρω από τις 10 π.μ.), όπου τα επίπεδα παραγωγής από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκούν (δεδομένης της αύξησης του συνολικού φορτίου των καταναλωτών). Αυτό συντελεί σε μία γραμμική αύξηση των απαιτήσεων εφόσον αυτές δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν από την παρεχόμενη ισχύ στους συσσωρευτές καταλήγοντας στην

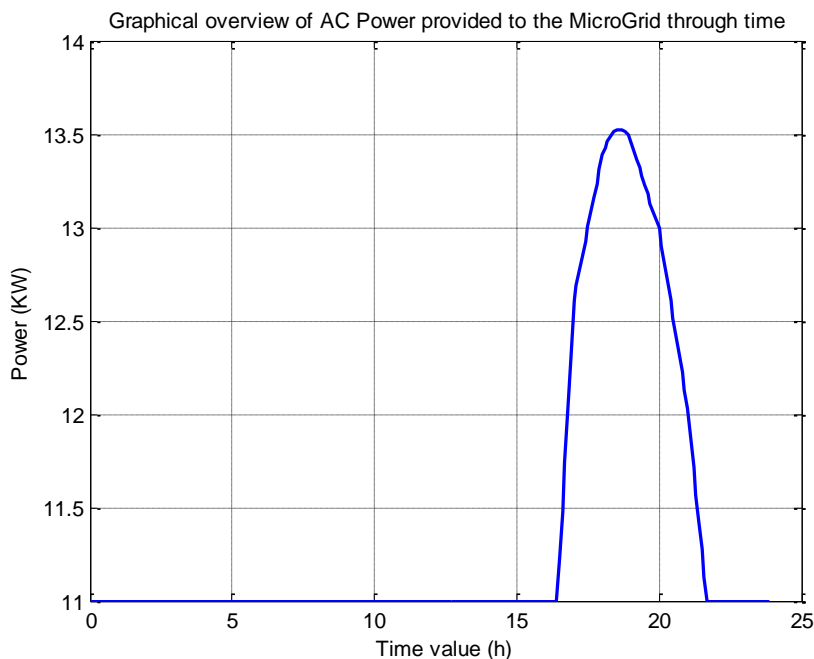
μέγιστη τιμή απαίτησης των 13.5 KW κατά τις απογευματινές ώρες. Οι απαιτήσεις αρχίζουν να μειώνονται δεδομένης της μείωσης ζήτησης των AC φορτίων των χρηστών του μικροδικτύου.



Σχήμα 5.68: Γραφική παράσταση της ισχύος που αποδίδεται στο AC δίκτυο από τους συσσωρευτές

Το διάγραμμα παρουσιάζει την προσφορά ισχύος προς το εξωτερικό AC δίκτυο από τους συσσωρευτές του μικροδικτύου καθόλη την διάρκεια της χρονικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι για οι τιμές στο παραπάνω διάγραμμα είναι μονίμως αρνητικές, γεγονός που σημαίνει πως η ροή ισχύος έχει φορά από το AC δίκτυο προς τους συσσωρευτές. Ήδη από τις πρωινές ώρες που τα ΦΒ συστήματα δεν είναι σε λειτουργία το εξωτερικό AC δίκτυο παρέχει ισχύ για την φόρτιση των συσσωρευτών, ισχύς η οποία κορυφώνεται στα 3.5 KW γύρω στις 5 π.μ. Η παροχή ισχύος προς τους συσσωρευτές μειώνεται δεδομένου ότι αρχίζουν να ενεργοποιούνται τα ΦΒ συστήματα τα οποία αποδίδουν ενέργεια προς τους συσσωρευτές. Όμως οι απαιτήσεις των φορτίων του μικροδικτύου εξαναγκάζουν το σύστημα για την κάλυψη των αναγκών να διαθέσει και πάλι μέρος της ενέργειας του AC εξωτερικού δικτύου, ποσό το οποίο κορυφώνεται στα 4.5 KW περίπου στις

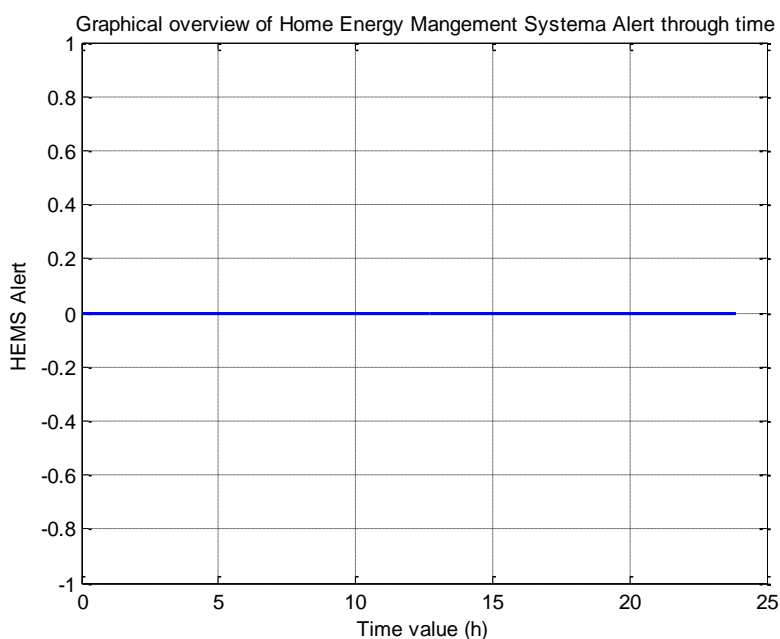
11 π.μ. Μέχρι στιγμής ο αλγόριθμος ελέγχου για το NEMS βρίσκεται στην κατάσταση 8. Στην συνέχεια τα επίπεδα παροχής εξωτερικής ισχύος προς τους συσσωρευτές μειώνονται και καταλήγουν σε μηδενισμό γύρω στις 4 μ.μ. , λόγω της αύξησης των AC απαιτήσεων του μικροδικτύου, γεγονός που οδηγεί τον αλγόριθμο ελέγχου για το NEMS στην κατάσταση 5. Επανεμφάνιση ισχύος για την φόρτιση των συσσωρευτών παρατηρείται κατά τις 10 μ.μ. (μετάβαση στην κατάσταση 8 ξανά) και στην συνέχεια η απαιτούμενη ισχύ για την φόρτιση αυξάνεται γραμμικά.



Σχήμα 5.69: Γραφική παράσταση της ισχύος που αποδίδεται από το AC δίκτυο προς το μικροδίκτυο

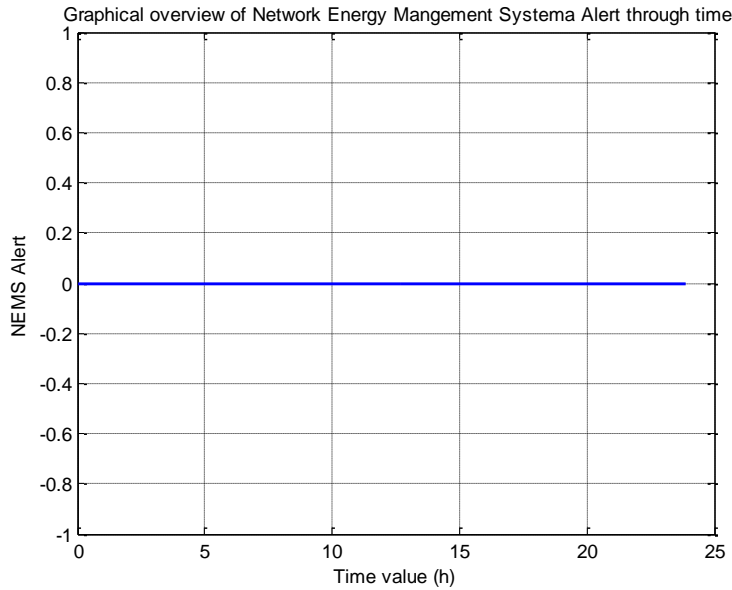
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την συνολική προσφορά ισχύος από το εξωτερικό AC δίκτυο προς συνολικά το μικροδίκτυο (κάλυψη DC/AC φορτίων του μικροδικτύου). Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το εξωτερικό δίκτυο παρέχει σημαντικά ποσά ισχύος για όλη την διάρκεια της ημέρας, η οποία κορυφώνεται από τις 4 μ.μ. έως και 10 μ.μ. διότι στις φάσεις αυτές η ενέργεια των συσσωρευτών μειώνεται και οι ενεργειακές απαιτήσεις των AC φορτίων δεν μπορούν να

καλυφθούν απευθείας από αυτούς. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπως μπορεί να φανεί και από τη γραφική παράσταση των καταστάσεων του NEMS, βρισκόμαστε στην κατάσταση 5, όπου η συνολική εξωτερικά παρεχόμενη ισχύς προς το μικροδίκτυο, ακολουθεί τις συνολικές απαιτήσεις του συστήματος σε AC(D_{AC}).



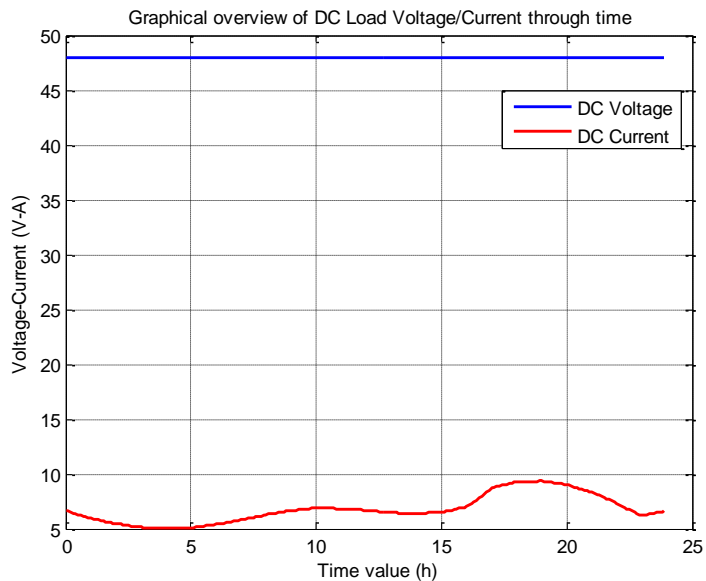
Σχήμα 5.70: Γραφική παράσταση σημάτων συναγερμού από το HEMS

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το σήμα συναγερμού από την οντότητα HEMS μίας οικίας του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι αυτό το σήμα συναγερμού δεν ενεργοποιείται διότι το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών δεν καταλήγει σε επίπεδο χαμηλότερο του 40% καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

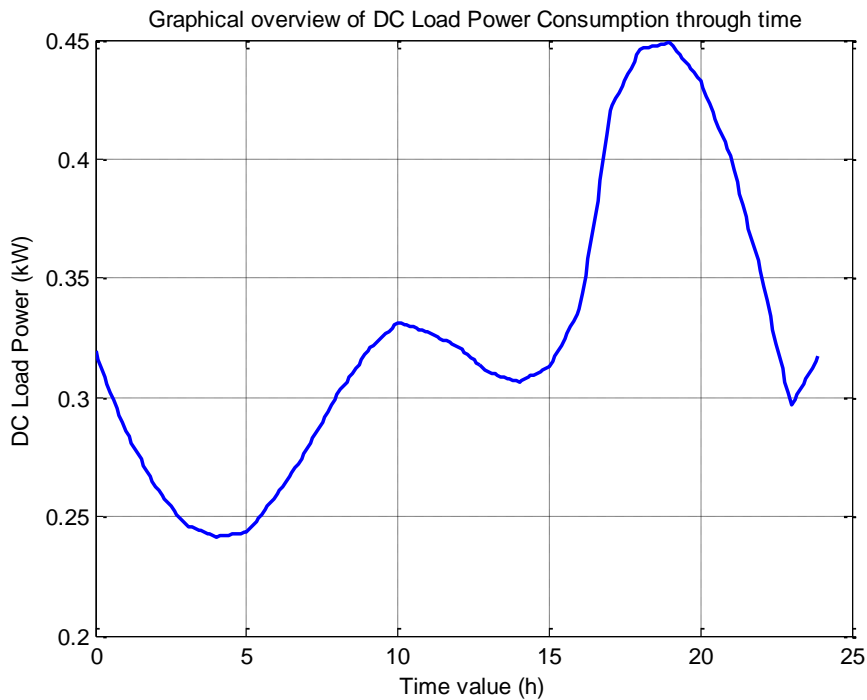


Σχήμα 5.71: Γραφική παράσταση σημάτων συναγερμού από το NEMS

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το σήμα συναγερμού από την οντότητα NEMS του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι αυτό το σήμα δεν ενεργοποιείται διότι τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών παραμένουν εντός του διαστήματος 50 – 95%.

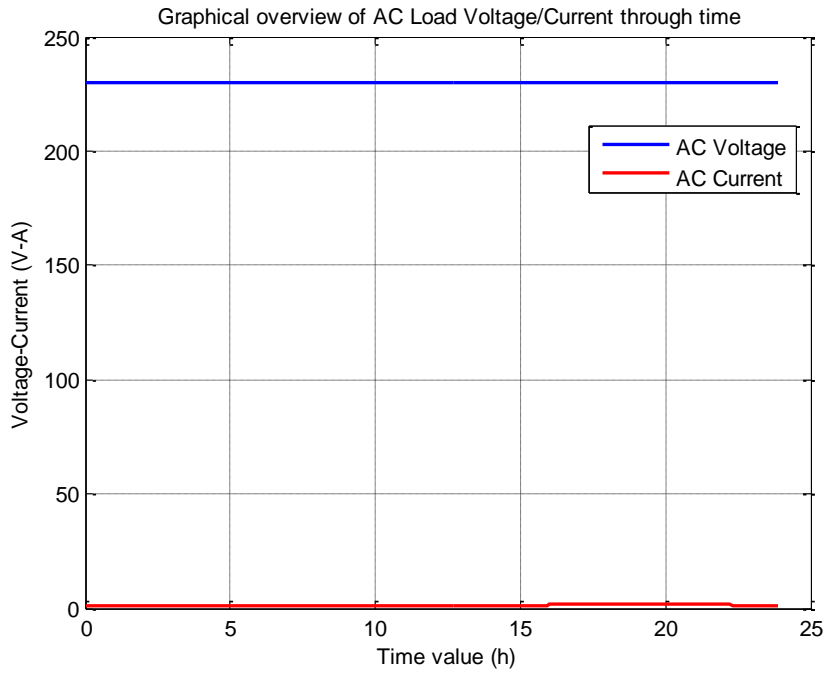


Σχήμα 5.72: Γραφική παράσταση των DC ρευμάτων/τάσεων ανά οικία

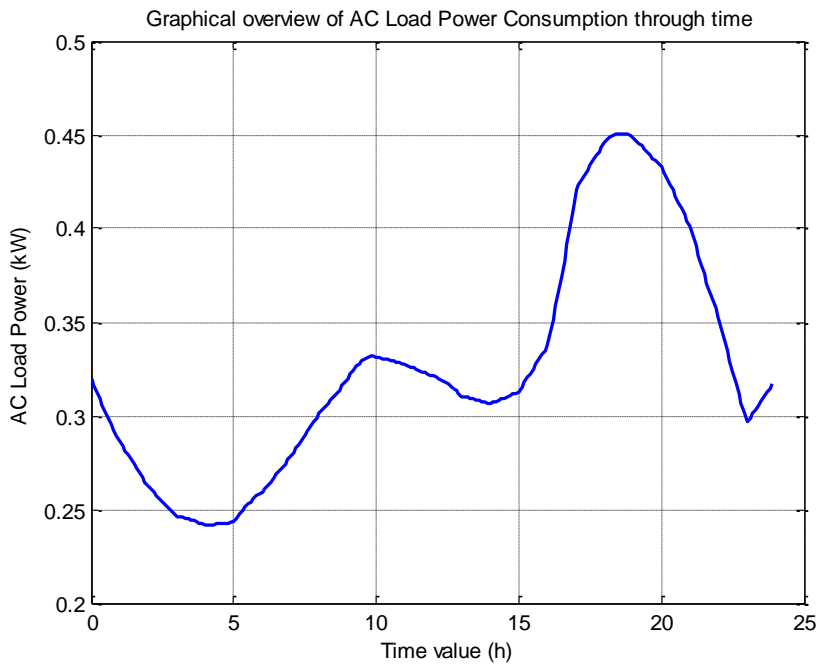


Σχήμα 5.73: Γραφική παράσταση των DC φορτίων ανά οικία

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν τις απαιτήσεις φορτίου DC, καθώς και την τάση και το ρεύμα λειτουργίας για κάθε οικία του μικροδικτύου. Η απαιτούμενη ισχύς για την κάλυψη των DC αναγκών σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης δεν είναι μονοτονική και εμφανίζει διακυμάνσεις. Όπως και σε όλα τα παραπάνω σενάρια, η οικιακή συνεχής τάση λειτουργίας ισούται με 48 V.



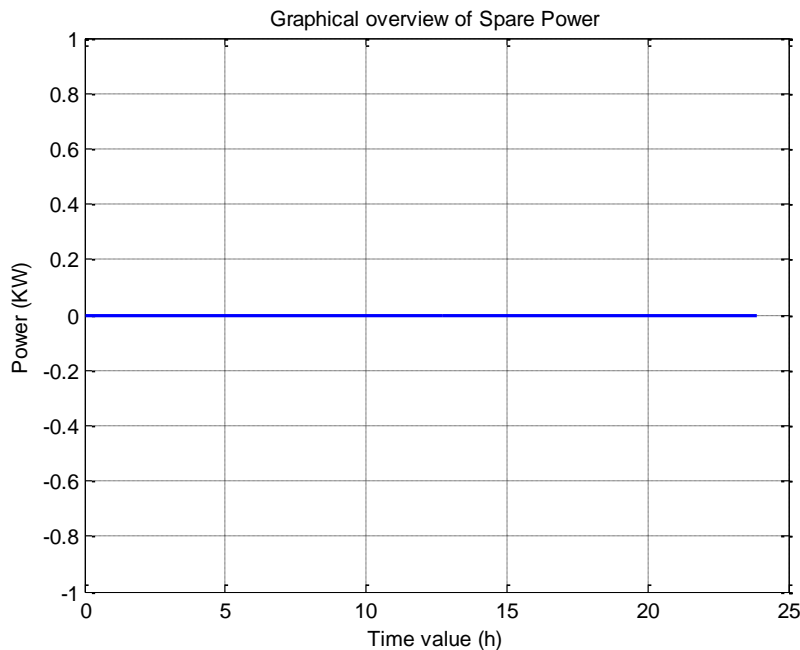
Σχήμα 5.74: Γραφική παράσταση των AC ρευμάτων/τάσεων ανά οικία



Σχήμα 5.75: Γραφική παράσταση των AC φορτίων ανά οικία

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν τις καταναλώσεις ισχύος των AC φορτίων ανά οικία καθώς και τις τάσεις και τα ρεύματα τα οποία ανακλύπτον από τις καταναλώσεις των AC φορτίων. Η τάση λειτουργίας για το AC δίκτυο θεωρείται τα 230V (rms), ενώ τα ρεύματα δεν ξεπερνούν τα 10A.

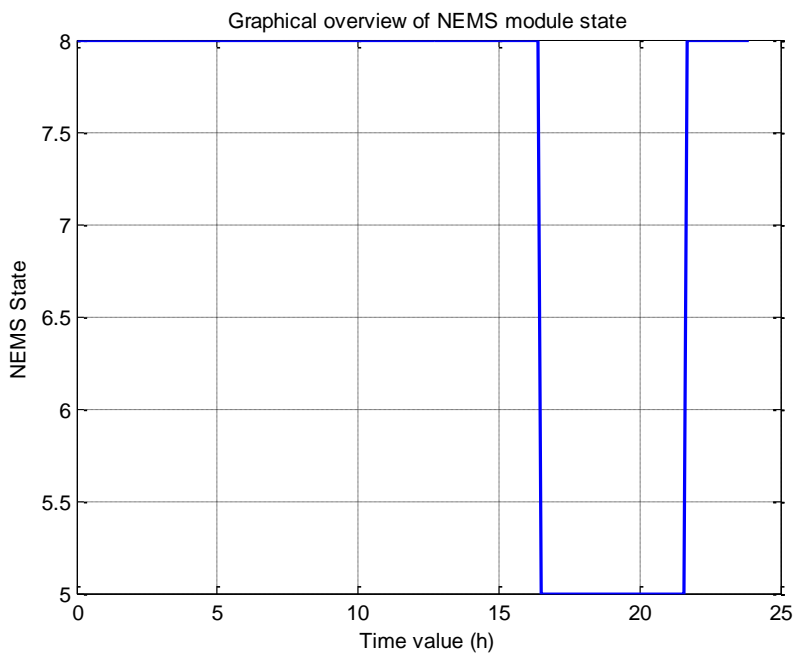
Παρατηρούμε ότι οι AC απαιτήσεις των φορτίων είναι σχετικά υψηλές για τις πρώτες πρωινές ώρες και αρχίζουν να αυξομειώνονται κατά την διάρκεια της ημέρας. Καταλήγουν σε μία μέγιστη τιμή και στην συνέχεια για τις βραδινές ώρες προσομοίωσης της λειτουργίας για το μοντέλο της οικίας επανέρχονται σε σχετικά υψηλά επίπεδα της τάξης των 300W ανά οικία.



Σχήμα 5.76: Γραφική παράσταση πλεονάζουσας ισχύος του grid

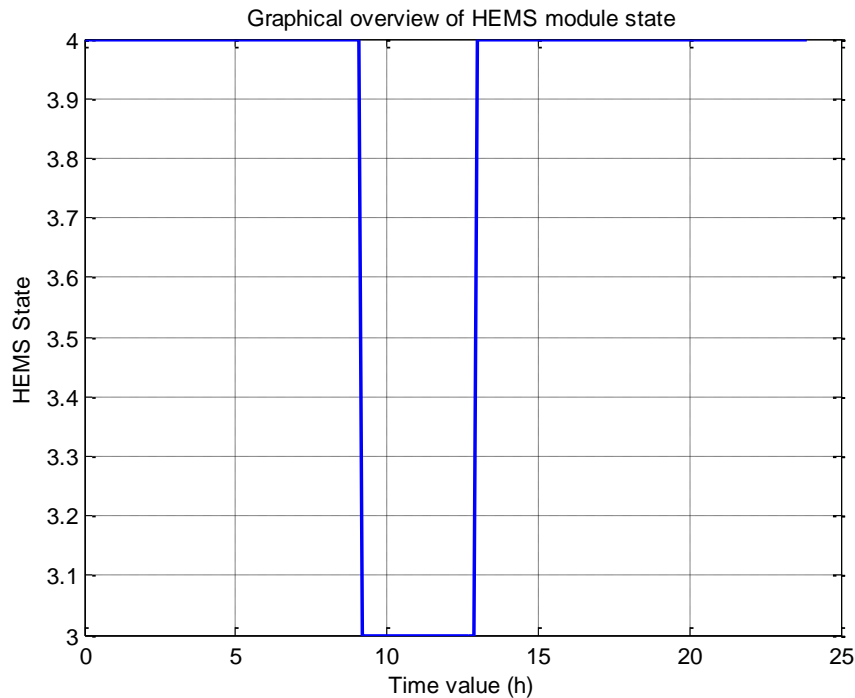
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το μικροδίκτυο δεν εμφανίζει περίσσεια ισχύος σε καμία χρονική φάση της προσομοίωσης. Αυτό έχει επιτευχθεί επιλέγοντας κατάλληλα τα επίπεδα εξωτερικής παροχής ισχύος P_{\min} και P_{\max} από το AC δίκτυο. Το γεγονός αυτό δεικνύει ότι είναι δυνατόν να υπάρξει κατάλληλος συντονισμός των απαιτήσεων και των παραγωγών από το ΦΒ σύστημα έτσι ώστε

να μην υπάρχει απώλεια ή σπατάλη της εξωτερικά/εσωτερικά παρεχόμενης ισχύος στο μικροδίκτυο.



Σχήμα 5.77: Γραφική παράσταση των καταστάσεων του NEMS

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις καταστάσεις μετάβασης με βάση τον ορισμό του NEMS πρωτοκόλλου για την λειτουργία των οικιών του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι κατά τις πρωϊνές ώρες στο μικροδίκτυο η άνοδος του επιπέδου φόρτισης πάνω από 50% φέρνει το NEMS στην κατάσταση 8. Στην συνέχεια και μετά τις 4 μ.μ. οι απαιτήσεις AC των φορτίων του μικροδικτύου είναι μηλότερες του προσφερόμενου επιπέδου P_{min} και αυτό φέρνει το σύστημα στην κατάσταση 5, όπου το σύστημα θα παραμείνει περίπου μέχρι την 10 μ.μ. και στην συνέχεια θα επιστρέψει στην αρχική κατάσταση 8 από την οποία και εκκίνησε στην αρχική φάση της προσομοίωσης.

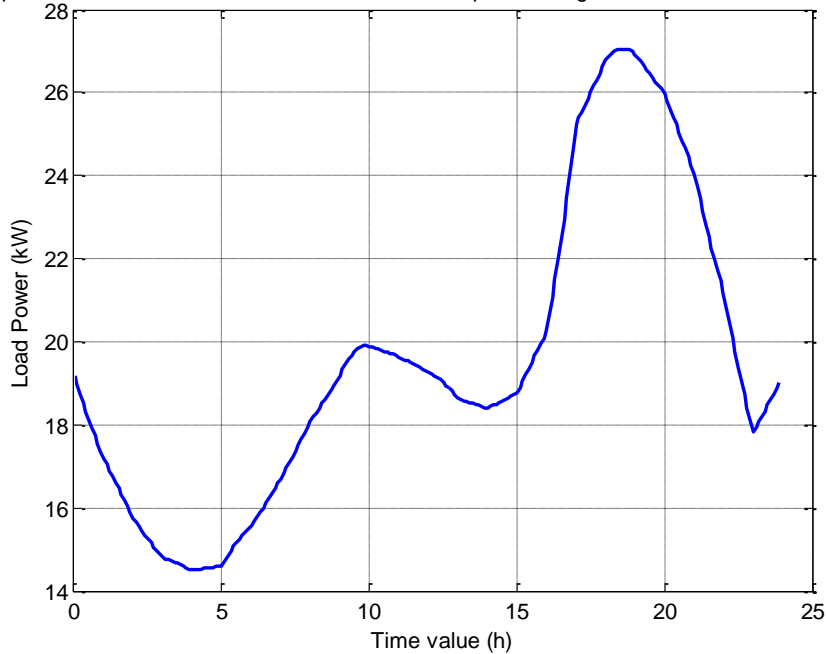


Σχήμα 5.78: Γραφική παράσταση των καταστάσεων του HEMS

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις μεταβάσεις καταστάσεων με βάση το πρωτόκολλο διαχείρισης ενεργειών HEMS για κάθε οικία του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι κατά τις πρωινές ώρες το HEMS της οικίας βρίσκεται στην κατάσταση 4 όπου η παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των DC φορτίων και η κατάσταση $SOC > 40\%$. Σε αυτήν την φάση τα DC φορτία καλύπτονται από τους συσσωρευτές ενώ τα AC φορτία ανατίθενται στο εξωτερικό AC δίκτυο.

Στην συνέχεια το σύστημα θα παραμείνει μεταβατικά στην κατάσταση 3 όπου η παραγόμενη ενέργεια από τα ΦΒ συστήματα δεν επαρκεί για την πλήρη κάλυψη των DC/AC φορτίων. Οι μεταβάσεις αυτές είναι συμμετρικά αντιστρέψιμες κατά τις φάσεις όπου τα ΦΒ συστήματα μετά την απόδοση του μέγιστου της ισχύος εισέρχονται σε φάσεις μη παραγωγής λόγω δύσεως του ηλίου, οπότε και το HEMS επανέρχεται στην αρχική κατάσταση 4.

Graphical overview of AC&DC Load Power Consumption through time for all the homes in the g



Σχήμα 5.79: Γραφική παράσταση των συνολικών AC/DC απαιτήσεων για το σύνολο των οικιών του μικροδικτύου

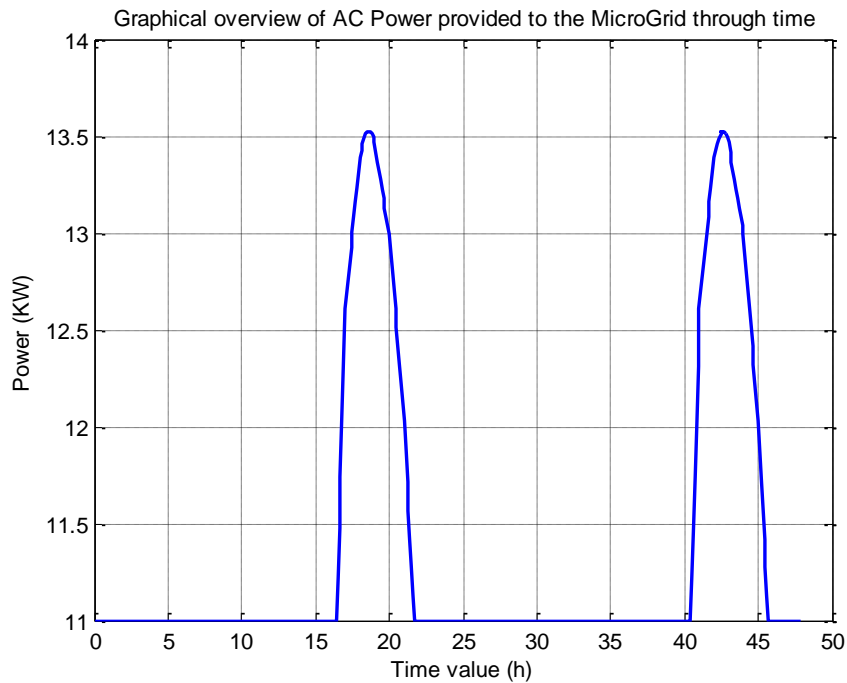
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει γραφικά καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης για το μικροδίκτυο τις συνολικές απαιτήσεις φορτίων (AC και DC), όπως αυτές μεταβάλλονται σε διάφορες χρονικές φάσεις. Παρατηρούμε ότι τα επιβαλλόμενα σενάρια προσομοίωσης είναι αρκετά ρεαλιστικά μεταβάλλοντας τις απαιτήσεις συνολικού φορτίου από μία σχετικά υψηλή τιμή κατά τις πρωινές ώρες λειτουργίας του μικροδικτύου, σε αυξανόμενες τιμές προς τις μεσημβρινές ώρες. Εκεί παρουσιάζεται ένα μέγιστο της τάξης των 27 KW. Στην συνέχεια οι απαιτήσεις ισχύος μειώνονται φθάνοντας ξανά στην περιοχή των 18 KW που ήταν και οι αρχικές απαιτήσεις κατά τις πρωινές ώρες της προσομοίωσης. Οι παραπάνω μεταβολές δεν είναι μονοτονικές αλλά εμφανίζουν αυξομειώσεις κατά τα μεταβατικά στάδια όπως προβλέπει ο σχεδιασμός του σεναρίου. Οι υψηλές τιμές του φορτίου δικαιολογούν και τον χαρακτηρισμό του σεναρίου προσομοίωσης ως καταναλώσεις με υψηλό φορτίο και χαμηλή παραγωγή ενέργειας.

5.5.3 Συμπεράσματα από το Σενάριο Προσομοίωσης 4

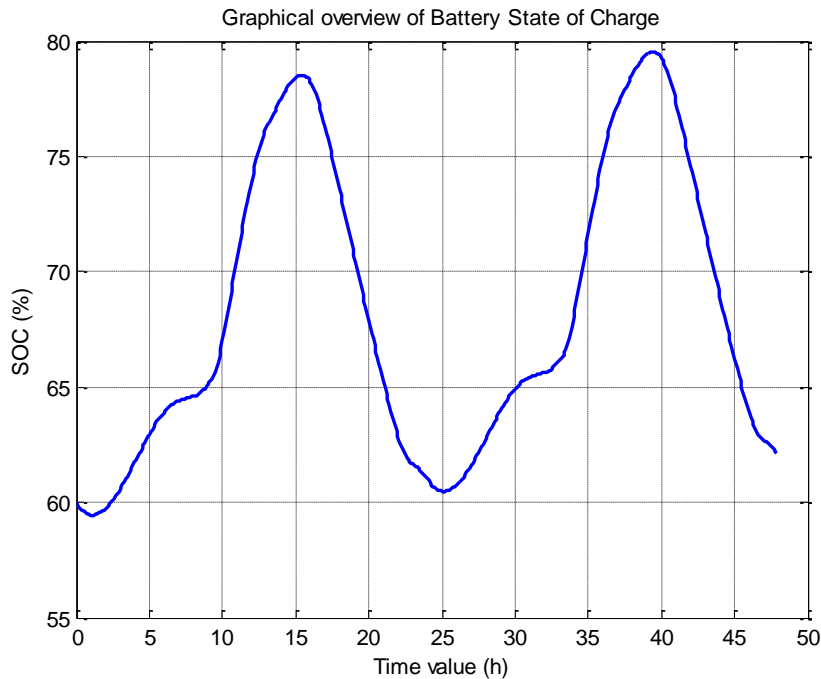
Το βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου σεναρίου προσομοίωσης είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών 30 οικιών οι οποίες μετέχουν στην δομή ενός μικροδικτύου με χρήση ΦΒ συστημάτων με χαμηλό επίπεδο παραγωγής ισχύος και σχετικά υψηλές, αλλά και αυξομειούμενες απαιτήσεις φορτίων. Το σενάριο προσομοίωσης αφορά σε χειμερινή εποχή προσομοίωσης διασφαλίζοντας χαμηλά επίπεδα στην παραγωγή ισχύος από τα ΦΒ συστήματα. Όπως παρατηρήσαμε και από την ανάλυση των επιμέρους διαγραμμάτων από την προσομοίωση, το σύστημα εκκινεί από ένα επίπεδο φόρτισης 60% για τις συστοιχίες των συσσωρευτών του. Κατά τις πρωινές ώρες όπου οι απαιτήσεις των ενεργειακών αναγκών του μικροδικτύου δεν μπορούν να καλυφθούν από την παραγωγή των ΦΒ συστημάτων, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το εξωτερικό ACδίκτυο και από τους συσσωρευτές. Επιπλέον ισχύς παρέχεται από το εξωτερικό δίκτυο για την φόρτιση των συσσωρευτών. Το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών διατηρείται πάνω από 60% κατά τις πρωινές ώρες. Στην συνέχεια και εφόσον η παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ συστήματα αρχίζει να δίνει παραγόμενη ισχύ, η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του δικτύου μεταβιβάζεται προς τους συσσωρευτές ενώ ταυτόχρονα τα επίπεδα φόρτισης τους αυξάνουν. Κατά τις μεσημβρινές ώρες έχει επιτευχθεί και η μέγιστη τιμή φόρτισης η οποία δεν υπερβαίνει την επιτρεπόμενη μέγιστη τιμή φόρτισης, αλλά ανέρχεται μέχρι το 77,5%. Το μικροδίκτυο δεν παράγει πλεονάζουσα ισχύ λόγω των σταθμισμένων επιπέδων προσφοράς εξωτερικής AC ισχύος η οποία σε αρκετές φάσεις δεν επαρκεί για την πλήρη κάλυψη AC/DC αναγκών αναγκάζοντας την προσφορά ισχύος από τους συσσωρευτές προς το μικροδίκτυο.

Το μικροδίκτυο με τα παραπάνω επίπεδα παροχής εξωτερικής ισχύος [P_{min}, P_{max}] = [11,16] KW μπορεί να διατηρήσει ευσταθώς την λειτουργία του, διασφαλίζοντας σταθερά επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών του για χρονικό διάστημα προσομοίωσης το οποίο υπερβαίνει την χρονική διάρκεια της μιας ημέρας.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα χρονικής προσομοίωσης του μικροδικτύου για χρονικό διάστημα δύο ημερών διατηρώντας τις ίδιες συνθήκες προσομοίωσης όσον αφορά στην παραγωγή και κατανάλωση από το μικροδίκτυο.



Σχήμα 5.80: Γραφική παράσταση της εξωτερικά παρεχόμενης AC ισχύος που απαιτείται για την λειτουργία του μικροδικτύου



Σχήμα 5.81: Γραφική παράσταση του επιπέδου φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών

Παρατηρούμε ότι η προσομοίωση με την δεδομένη προσφορά εξωτερικής ισχύος AC και τις εσωτερικές παραγωγές ισχύος από τα ΦΒ συστήματα, διατηρεί σε ίδια και οριακά μεγαλύτερα επίπεδα την φόρτιση των συσσωρευτών για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης. Το τελευταίο συνηγορεί στην ευσταθή λειτουργία του συστήματος, παρά το γεγονός ότι σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης, το σημαντικό μέρος της κάλυψης των οφρτίων του μικροδικτύου βασίζεται στην εξωτερικά παρεχόμενη AC ισχύ, δεδομένου ότι τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας μέσω των ΦΒ συστημάτων είναι μειωμένα.

Κεφάλαιο 6: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

6.1 Γενικά Συμπεράσματα από την εφαρμογή των προσομοιώσεων στο μοντέλο του μικροδικτύου

Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η γενικότερη ανάλυση και η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων από την προηγούμενη εφαρμογή των σεναρίων προσομοίωσης στο μοντέλο του μικροδικτύου. Τα σεναρία προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ως στόχο να καταδείξουν τα γενικότερα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του μοντέλου του μικροδικτύου κάτω από διαφορετικές συνθήκες παραγωγής, κατανάλωσης και εξωτερικά παρεχόμενης ενέργειας. Όπως έχει διαφανεί από την προσομοίωση των προηγούμενων σεναρίων το σύστημα σταθεροποιεί τις αιχμές στις απαιτήσεις ισχύος από το ανάντη δίκτυο, μετατρέποντας την λειτουργία του σε πιο αξιόπιστη. Επιπλέον η αξιοπιστία του συνολικού συστήματος αυξάνεται, λόγω της υπαρξης του διπλού δικτύου διανομής (AC και DC). Ο χειρισμός και η διάθεση των ποσών ενέργειας εντός του μικροδικτύου, βασίζονται κατά κύριο λόγο στις εκπορευόμενες ενέργειες από τις μηχανές καταστάσεων που υλοποιούνται από τα πρωτόκολλα και τις συνθήκες απόφασης για τις οντότητες NEMS και HEMS.

Οι οντότητες HEMS αποτελούν τις βασικές μονάδες απόφασης σε επίπεδο κλίμακας οικίας για την διαχείριση της τοπικά παραγόμενης ενέργειας που βασίζεται στα οικιακά ΦΒ συστήματα. Η οντότητα HEMS χρησιμοποιεί τοπικά για την κάλυψη των αναγκών των DC φορτίων της οικίας, μέρος της παραγόμενης ισχύος από το ΦΒ σύστημα, ενώ επιστρέφει το πλεόνασμα ενέργειας για περαιτέρω διάθεση και διαχείριση στην οντότητα NEMS, η οποία είναι επιφορτισμένη με τον ρόλο της διαχείρισης και διάθεσης της ενέργειας για την κάλυψη των συνολικών αναγκών του μικροδικτύου. Η οντότητα NEMS διαχειρίζεται και αποφασίζει βασισμένη στα επίπεδα της ενταμιευμένης DC ενέργειας η οποία βρίσκεται στους συσσωρευτές

συνδυάζοντας αυτήν με την εξωτερικά παρεχόμενη AC ισχύ προς το μικροδίκτυο. Κατά κύριο κανόνα και με βάση τα προσυμφωνημένα πρωτόκολλα διαχείρισης και λειτουργίας, η κάλυψη των AC αναγκών του μικροδικτύου διοχετεύεται στο εξωτερικό AC δίκτυο όταν τα επίπεδα DC ενταμιευμένης ενέργειας είναι σχετικά χαμηλά και δεν επαρκούν μέσω της διαδικασίας μετατροπής DC σε AC για την κάλυψη τους. Στην περίπτωση όπου τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών του μικροδικτύου είναι αρκετά υψηλά, οι τρέχουσες AC ανάγκες του μικροδικτύου καλύπτονται με τις διαδικασίες μετατροπής από DC σε AC, χωρίς να επιβαρύνονται οι εξωτερικοί πόροι παροχής ισχύος προς το μικροδίκτυο.

Οι παραπάνω συνθήκες απόφασης έχουν διαφανεί κατά την εφαρμογή των προηγούμενων σεναρίων προσομοίωσης και μελετήθηκαν/αναλύθηκαν διεξοδικά στις παραγράφους που αναφέρονται στα θέματα της προσομοίωσης των σεναρίων.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα συνολικά από την εφαρμογή και των τεσσάρων προηγούμενων προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Χαρακτηριστικό	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Simulation Duration	0 - 23.9900	0 - 23.9900	0 - 23.9900	0 - 23.9900
Number of Home Types	1	1	1	1
Number of Homes per Type	30	30	30	30
Max D_DC Load value (KW)	14.0505	17.1925	11.2685	13.4655
Max D_AC Load value (KW)	18.1623	19.5351	13.0167	13.5253
Peak P_dc value (KW)	8.0628	3.1109	7.0547	0
Peak P_ac value (KW)	9	16	5	13.5253
Average Power produced in PV panels (KW)	0.6675	0.4367	0.5277	0.1095
Average AC Power used from network (KW)	4.9941	9.2717	3.6822	11.3767

Average DC Power Load per Home (KW)	0.3563	0.4152	0.2772	0.3248
Average AC Power Load per Home (KW)	0.3898	0.4157	0.3033	0.3252
Average Power Total Load (KW)	22.3835	24.9275	17.4159	19.5015
Total Spare Energy (KWh)	30.1800	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 6.1: Συνολικά Αριθμητικά αποτελέσματα των Σεναρίων Προσομοίωσης

Από τον πίνακα γίνεται εμφανές ότι τα τέσσερα σενάρια αφορούν σε καταστάσεις παραγωγής ισχύος από τα ΦΒ συστήματα που εναλλάσσονται από υψηλή σε χαμηλή παραγωγή, καθώς τα εσωτερικά φορτία επίσης μεταβάλλονται από χαμηλά σε υψηλά. Τα σενάρια προσομοίωσης έχουν επομένως διαμορφωθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να καταδεικνύουν επίπεδα ευμενούς – δυσμενούς παραγωγής-κατανάλωσης για το μικροδίκτυο. Είναι επίσης εμφανές πως σε όλα τα σενάρια η εξωτερικά από το μικροδίκτυο παρεχόμενη ισχύς έχει τιμές μικρότερες από το συνολικό φορτίο, καθώς χρησιμοποιείται και η παραγόμενη ισχύς από τα ΦΒ πάνελ, είτε απευθείας ή αφού πρώτα αποθηκευτεί στους συσσωρευτές. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι με βάση τα αποτελέσματα που τυπώνει το πρόγραμμα έχουμε:

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Average AC Power used from network (KW)	4.9941	9.2717	3.6822	11.3767
Average Power Total Load (KW)	22.3835	24.9275	17.4159	19.5015
Average AC Power used from network per Home (KW)	0.16647	0.309057	0.12274	0.379223

Average Power Total Load per Home (KW)	0.746117	0.830917	0.58053	0.65005
Energy per day (KWh)	13.91153	12.52464	10.98686	6.499848

Πίνακας 6.2: Ποσό ενέργειας που κερδίζει ο χρήστης τη μέρα, ανά σενάριο

Οι τιμές των παραμέτρων Average AC Power used from network per Home και Average Power Total Load per Home, προκύπτουν από τις αντίστοιχες τιμές των Average AC Power used from network και Average Power Total Load, διαιρεμένες με το 30 (αριθμός οικιών στο μικροδίκτυο).

Η παράμετρος Energy per day (KWh), αφορά στη συνολική ενέργεια που κερδίζει (με την έννοια ότι δεν προέρχεται από πηγή εξωτερικά του μικροδικτύου) ο χρήστης τη μέρα, και υπολογίζεται ως η διαφορά των Average Power Total Load per Home και Average AC Power used from network per Home, πολλαπλασιασμένη επί 24.

Σημειώνεται πως οι παραπάνω τιμές αφορούν τα συγκεκριμένα σενάρια που παρουσιάστηκαν και δεν αποτελούν τη βέλτιστη λειτουργία όσον αφορά την οικονομία στην εξωτερικά παρεχόμενη ισχύ, καθώς στόχος μας σε κάθε σενάριο ήταν να καταδείξουμε τον τρόπο λειτουργίας του μοντέλου, διαμορφώνοντας αντίστοιχα τις κατάλληλες παραμέτρους.

Τα ειδικά συμπεράσματα από την εφαρμογή των σεναρίων προσομοίωσης παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

6.2 Οι μηχανισμοί παραγωγής και διαχείρισης ισχύος στο μικροδίκτυο

Από τα σενάρια προσομοίωσης έχει καταστεί εμφανές ότι όσο το δυνατόν υψηλότερη η παραγωγή ισχύος από τα οικιακά ΦΒ συστήματα, τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα διατήρησης και υποστήριξης υψηλότερων φορτίων από το μικροδίκτυο. Επιπρόσθετα και συνεπικουρικά της εσωτερικής παραγωγής ισχύος από τα ΦΒ συστήματα, προσπίπτει και η εξωτερική παροχή ισχύος από το AC

δίκτυο. Στόχος του εξωτερικά συνδυναζόμενου AC δικτύου είναι η παροχή ισχύος προς το μικροδίκτυο σε χρονικές φάσεις όπου η εσωτερικά παραγόμενη και η αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές, δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών των φορτίων. Οι χρονικές στιγμές καθώς και τα επίπεδα απορρόφησης των προσφερόμενων εξωτερικά επιπέδων ισχύος, αποτελούν αντικείμενο ρύθμισης της οντότητας NEMS.

Η οντότητα NEMS είναι επιφορτισμένη με το συνολικό συντονισμό και την διαχείριση όλης της ενέργειας του μικροδικτύου, λαμβάνοντας αποφάσεις που ως στόχο έχουν την ευσταθή λειτουργία του συστήματος. Σημαντικός ως προς το σημείο αυτό είναι ο καθορισμός των επιπέδων ελάχιστης και μέγιστης $[P_{min}, P_{max}]$ εξωτερικά προσφερόμενης ισχύος προς το μικροδίκτυο. Τα σενάρια προσομοίωσης έδειξαν ότι το μικροδίκτυο θα κάνει χρήση της εξωτερικά προσφερόμενης ενέργειας στην φάση όπου η εσωτερικά παραγόμενη καθώς και η ενταμιευμένη ενέργεια δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών και η μετάβαση σε αυτές τις φάσεις δεν είναι απαραίτητα «ομαλές» διότι οι αλγόριθμοι απόφασης βασίζονται στην αναγκαιότητα της κάλυψης των συνολικών φορτίων χωρίς να επικεντρώνουν στην ομαλή απορρόφηση επιπέδων ισχύος από και προς το μικροδίκτυο. Μικρά ποσά προσφερόμενης εξωτερικά ενέργειας σε συνδυασμό με χαμηλά επίπεδα παραγωγής ισχύος από τα ΦΒ συστήματα μπορούν να οδηγήσουν σε ασταθή λειτουργία ή καταστάσεις εκτός ελέγχου για το δίκτυο, ενώ μεγάλα ποσά προσφερόμενης εξωτερικά ενέργειας σε φάσεις όπου η εσωτερικά προσφερόμενη δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών μπορούν να οδηγήσουν σε «ταλαντωτική» συμπεριφορά (σενάριο 3). Η «ταλαντωτική» συμπεριφορά προκαλεί σύντομες απορροφήσεις εξωτερικά προσφερόμενων επιπέδων ενέργειας λόγω των συνθηκών απόφασης της διαχείρισης που προβλέπονται από τις οντότητες των NEMS και HEMS. Το παραπάνω χαρακτηριστικό καταδεικνύει ότι τα επίπεδα απόφασης της οντότητας NEMS που βασίζονται στα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών (SOC) θα πρέπει να καθορισθούν με ιδιαίτερη προσοχή, διότι επιδρούν καθοριστικά στην λειτουργία του μικροδικτύου. Οι προσομοιώσεις επίσης καταδεικνύουν ότι οι μεταβάσεις στην λήψη των αποφάσεων θα πρέπει να γίνονται

ομαλά χωρίς να δημιουργούν περίσσεια ενέργειας για το μικροδίκτυο ή ακόμη χειρότερα πλεονάσματα ενέργειας τα οποία θα πρέπει να επιστραφούν στο εξωτερικά συνδεδεμένο AC δίκτυο. Επιπλέον η ταλαντωτική συμπεριφορά στην ανταλλαγή τέτοιων ποσών ενέργειας θα πρέπει να αποτραπεί και ένας τρόπος προς την επίτευξη αυτής της λειτουργίας, είναι η επίδραση και ο ρόλος του διαχειριστή (administrator του μικροδικτύου), ο οποίος ενεργοποιείται με την δημιουργία των σημάτων συναγερμού από τις οντότητες των HEMS και NEMS.

Ο διαχειριστής ενέργειας του μικροδικτύου αποτελεί μία ανοιχτή οντότητα στην δομή και την λειτουργία του μικροδικτύου, ο ρόλος και οι δυνατότητες παρέμβασης της οποίας είναι ανοιχτός και θα μπορούσε με περαιτέρω διερεύνηση να καθορισθεί. Το συγκεκριμένο σημείο μπορεί να αποτελέσει επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας με στόχο την αυτοματοποιημένη εφαρμογή ενεργειών παρέμβασης (interventions) στο σύστημα μειώνοντας την αναγκαιότητα λήψεων απόφασης σε ανθρώπινο επίπεδο.

6.3 Ο ρόλος και η λειτουργία των συσσωρευτών στο μικροδίκτυο

Η λειτουργία των συσσωρευτών (μπαταριών) στο μικροδίκτυο είναι επιφορτισμένη με την ενταμίευση της περίσσειας της παραγόμενης DC ενέργειας από τα ΦΒ συστήματα. Είναι πολύ σημαντικό οι συσσωρευτές, σε ένα τέτοιας κλίμακας μικροδίκτυο να είναι αξιόπιστοι ως προς την λειτουργικότητα τους, με σχετικά μεγάλο κύκλο ζωής (life cycle), διασφαλίζοντας στο μικροδίκτυο ομαλή λειτουργία και απρόσκοπτη αποθήκευση και ανάκληση ενέργειας. Σημαντική επίσης είναι η διαστασιολόγηση (Ah =αμπερο-ώρα φορτίου) δηλ. του μεγέθους φορτίου των συσσωρευτών έτσι ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει ικανοποιητικά τις ανάγκες του μικροδικτύου.

Δύο σημαντικές παράμετροι θα πρέπει να συνδυαστούν για την λήψη απόφασης στην εκλογή των συσσωρευτών:

- ✓ ικανοποιητική χωρητικότητα φορτίου, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ικανότητα παροχής σημαντικών ποσών ισχύος στο μικροδίκτυο

- ✓ καθορισμός των επιπέδων (SoC thresholds) κατά τις φάσεις φόρτισης-εκφόρτισης, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής των συσσωρευτών.

Όπως αποδείχθηκε από την διαδικασία εφαρμογής προσομοιώσεων για τον καθορισμό του παράγοντα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη το πλήθος των οικιών που μετέχουν στο μικροδίκτυο, το σύνολο των ΦΒ συστημάτων παραγωγής, τα επίπεδα παραγωγής ισχύος από τα ΦΒ πάνελ, οι ιδιαίτερες κλιματολογικές συνθήκες και η ηλιοφάνεια ανά εποχή καθώς και μία μέση εκτίμηση των φορτίων κατανάλωσης του συστήματος. Για την κάλυψη του παράγοντα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το συνεχές ρεύμα για την παραγωγή και ανάκληση της ενέργειας, εμφανίζει αρκετές απώλειες κατά την μετάδοση του λόγω του μηχανισμού διάθεσης, ο οποίος μεταφέρει τους φορείς ενέργειας σε όλο τον όγκο του αγωγού και όχι επιδερμικά. Επομένως, υψηλά επίπεδα τάσης για την φόρτιση και διανομή σε συνδυασμό με καλής ποιότητας αγωγούς μετάδοσης με χαμηλά επίπεδα αντίστασης μειώνουν τα ποσά απώλειας ενέργειας. Στο περιβάλλον προσομοίωσης οι διεπαφές λειτουργίας των συσσωρευτών τέθηκαν στα 48V. Τέλος, ο παράγοντας για την εκλογή των συσσωρευτών αναφέρεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τα οποία επιδέχεται κάθε υλικό με βάση τις παρεχόμενες προδιαγραφές από τον κατασκευαστή του, οι οποίες επιτρέπουν περιορισμένους κύκλους πλήρους αποφόρτισης χωρίς καταστροφή του υλικού. Επομένως, συνιστά ευθύνη του διαχειριστή ενέργειας του μικροδικτύου, να μην εκθέτει το σύστημα των συσσωρευτών σε ακραίες συνθήκες υπερφόρτισης ή εκφόρτισης δηλ. να μην επιτρέπει φόρτιση της τάξης άνω του 90% καθώς και κύμανση εκφορτίσεων με διαστήματα εύρους μεγαλύτερα του 40 – 50% από την μέγιστη τιμή φόρτισης. Το τελευταίο διασφαλίζει την μακροβιότητα των συσσωρευτών ως ζωτικού υλικού λειτουργίας του μικροδικτύου, συμβάλλοντας στην μείωση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης του εξοπλισμού καθώς και στην γρήγορη απόσβεση του κόστους υλοποίησης δομών μικροδικτύου. Τα σενάρια προσομοίωσης που επιβλήθηκαν διασφαλίζουν και τον συγκεκριμένο παράγοντα, δεδομένου ότι οι προβλεπόμενες μεταβολές στο φορτίο των

συσσωρευτών δεν υπερβαίνουν το 90% της μέγιστης τιμής του συσσωρευτή καθώς επίσης δεν επιτρέπουν εκφόρτιση εκτός χαμηλών ορίων (οδηγώντας σε πλήρη εκφόρτιση).

Στο σημείο αυτό σημαντική θα ήταν η συνεισφορά για την υλοποίηση σε πρακτικό επίπεδο, περιοριστών ρεύματος (current limiters) οι οποίοι δεν θα επιτρέπουν την ανάπτυξη ρευμάτων φόρτισης-εκφόρτισης εκτός ορίων λειτουργίας. Ο ρόλος και η εγκατάσταση τέτοιων περιορισμών στο σύστημα αποτελεί έναν παράγοντα ο οποίος θα επιδράσει επίσης στον σχεδιασμό και την λήψη αποφάσεων από την οντότητα NEMS του μικροδικτύου.

Στην οργάνωση των συσσωρευτών του μικροδικτύου, επιπλέον από τους προηγούμενους παράγοντες που αναφέρθηκαν, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι μηχανισμοί που θα πρέπει να υποστηριχθούν έτσι ώστε ένα μικροδίκτυο να μπορεί να επεκταθεί στο άμεσο μέλλον φιλοξενώντας μεγαλύτερο αριθμό οικιών από αυτές με τις οποίες εκκίνησε στο αρχικό στάδιο σχεδιασμού του.

Στα πλαίσια εφαρμογής των σεναρίων προσομοίωσης οι χωρητικότητες σε φορτίο της μονάδας των συσσωρευτών του μικροδικτύου τέθηκε για όλα τα σενάρια στο επίπεδο των $7200000 \text{ Cb} = 2000 \text{ Ah}$, τιμή η οποία είναι ικανοποιητική εφόσον αναχθεί στο πλήθος των οικιών του μικροδικτύου οπότε αναλογούν κατά μέσο όρο 66 Ah φορτίου για κάθε οικία σε ημερήσια βάση. Η συγκεκριμένη εκλογή της παραμέτρου έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα στην εφαρμογή προσομοιώσεων για όλα τα σενάρια κρατώντας τα επίπεδα φόρτισης (σε συνδυασμό με την εξωτερικά παρεχόμενη ισχύ) σε ικανοποιητικά για την λειτουργία του μικροδικτύου, επίπεδα.

6.4 Η συνολικά ευσταθής λειτουργία του μικροδικτύου

Όπως φάνηκε και από την εφαρμογή των σεναρίων προσομοίωσης στο μικροδίκτυο, εξίσου σημαντική από την λειτουργικότητα σε ημερήσια βάση, η οποία διασφαλίστηκε στα επίπεδα προσομοιώσεων 24ωρης διάρκειας, είναι και η εξακολουθητική σταθερή λειτουργία του μικροδικτύου κατά την χρονική εξέλιξη

και διαδοχή μεγαλύτερων χρονικών διαστημάτων. Οι μηχανισμοί προσομοίωσης που υποστηρίχθηκαν και υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δίνουν την δυνατότητα εφαρμογής προσομοιώσεων για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα που υπερβαίνουν την διάρκεια μίας ημέρας. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα θεωρεί, για απλούστευση των παραμέτρων διαχείρισης και καθορισμού, ότι χρησιμοποιεί σε περιοδική βάση τις ίδιες συνθήκες ηλιοφάνειας καθώς και εισαγωγής φορτίων στο μικροδίκτυο.

Η ευσταθής λειτουργία του μικροδικτύου θεωρώντας ότι τυχόν αλλαγές και διολισθήσεις στις συνθήκες της λειτουργίας θα επέλθουν σε χρονικό επίπεδο σχετικά ομαλά (π.χ. αλλαγή των εποχών σε ένα δεδομένο γεωγραφικό σημείο που εντοπίζεται το μικροδίκτυο), έχει ως στόχο να καταδείξει ότι η υλοποίηση τέτοιας κλίμακας εγχειρημάτων είναι δυνατή ακόμη και αν απαιτεί μικρές μεταβολές και διορθωτικές ενέργειες από τον διαχειριστή του συστήματος.

Στα προηγούμενα σενάρια προσομοίωσης επιβλήθηκε έλεγχος ευσταθούς λειτουργίας ο οποίος κατέδειξε ότι εφόσον οι εσωτερικά επιβαλλόμενες συνθήκες που είναι υπεύθυνες για την λειτουργία του μικροδικτύου δεν μεταβάλλονται, με κατάλληλη εκλογή των παραμέτρων λειτουργίας και συντονισμού αυτών, το μικροδίκτυο λειτουργεί ευσταθώς εμφανίζοντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Σταθερά επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών του συστήματος μετά την παρέλευση ημερήσιων κύκλων λειτουργίας
- Περιοδικές και ομοιόμορφες εναλλαγές ενεργειών παρέμβασης από το εξωτερικά διασυνδεδεμένο AC δίκτυο

Βασιζόμενοι σε αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούμε να ορίσουμε την έννοια της «ευσταθούς λειτουργίας» του μικροδικτύου ότην βάση επίτευξης αυτών των χαρακτηριστικών. Βασισμένοι λοιπόν στην επίτευξη των ανωτέρω χαρακτηριστικών η προσομοίωση κατέδειξε ότι η λειτουργία του μικροδικτύου μπορεί να είναι ευσταθής διασφαλίζοντας συνεχή λειτουργία του μικροδικτύου.

Ειδικότερα στο σενάριο προσομοίωσης 3 καταδείχθηκε ότι χαμηλή εκλογή των επιπέδων εξωτερικά προσφερόμενης ισχύος AC μπορεί να οδηγήσει, ειδικότερα κατά τις ώρες όπου τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών είναι χαμηλά, σε διακοπή της λειτουργίας του μικροδικτύου.

Για την αποτροπή και επίλυση τέτοιων συμβάντων σε ένα πραγματικό δίκτυο, θα πρέπει εξαρχής ή δυναμικά να ελέγχονται και να λαμβάνονται αποφάσεις για τα επίπεδα μέγιστης και ελάχιστης παροχής AC ενέργειας στο μικροδίκτυο. Αυτό υποδεικνύει την χρήση ειδικών σημάτων συναγερμού όπως αυτά τα οποία προβλέπονται και δημιουργούνται από την οντότητα του NEMS για ενδεχόμενη προειδοποίηση «μη επαρκούς λειτουργίας». Οι αποφάσεις αυτές είναι αρμοδιότητα του εκάστοτε διαχειριστή του δικτύου. Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, καταδεικνύεται πως με αλλαγή των παραμέτρων προσομοίωσης P_{min}, P_{max} , το μικροδίκτυο μπορεί να συνεχίσει κανονικά τη λειτουργία του.

Ένα γενικότερο συμπέρασμα από την διεξαγωγή προσομοιώσεων με χρήση του μοντέλου του μικροδικτύου, είναι ότι η ευσταθής λειτουργία ενός τοπικού δικτύου μπορεί πάντοτε να διασφαλιστεί, με χρήση μίας μέσης εκτίμησης για την μέγιστη ενέργεια P_{max} που μπορεί να ζητηθεί από το μικροδίκτυο. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να είναι υποστηριζόμενη από ανάλογες τιμές των μεγεθών για αντίστοιχες εποχιακές/χρονικές περιόδους έτσι ώστε να υπάρχουν επαρκή αριθμητικά δεδομένα εκτίμησης της λειτουργίας σε συνδυασμό με κάποια περιθώρια ασφαλείας για την διακύμανση των παραπάνω εκτιμήσεων. Η ελάχιστη προσφερόμενη ενέργεια P_{min} μπορεί πάντοτε να τεθεί σε τιμή μηδέν, αφήνοντας τα επίπεδα διαχείρισης της απαιτούμενης εξωτερικής ενέργειας στην οντότητα NEMS, ή εναλλακτικά να καθορισθεί στον ελάχιστο βαθμό ζήτησης όπου τα ΦΒ συστήματα δεν δύνανται να παρέχουν ενέργεια, με στόχο την διασφάλιση της λειτουργίας των φορτίων για αυτά τα χρονικά διαστήματα.

Τα σενάρια προσομοίωσης κατέδειξαν ότι η ρύθμιση της εξωτερικά προσφερόμενης AC ενέργειας είναι δυνατή, διασφαλίζοντας μηδενικά ή σχετικά χαμηλά επίπεδα πλεονάζουσας ισχύος (spare power), η οποία είναι γενικά ανεπιθύμητη από το μικροδίκτυο και πιθανώς να δημιουργεί προβλήματα στην επιστροφή της προς το

εξωτερικό AC δίκτυο. Σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ελαχιστοποίηση της εν λόγω ισχύος επιτυγχάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο βέλτιστα αποτελέσματα και επάρκεια λειτουργίας του μικροδικτύου με χρήση ελάχιστων πόρων. Το τελευταίο συντελεί σε μία διαδικασία «βελτιστοποίησης» των επιλογών και των παραμέτρων του μικροδικτύου στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση των εξωτερικών καταναλώσεων ισχύος, προσβλέποντας όσο το δυνατόν στην εσωτερικά παραγόμενη από τα ΦΒ συστήματα.

6.5 Επιπλέον Συμπεράσματα– Μελλοντικές Επεκτάσεις του Μοντέλου

Από την εφαρμογή των σεναρίων προσομοίωσης και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και δεδομένα που ανέκυψαν τόσο σε αριθμητική όσο και σε γραφικές αναπαραστάσεις προέκυψαν, εκτός των παραπάνω, και τα ακόλουθα συμπεράσματα για την λειτουργία του μικροδικτύου:

- Οι κλιματολογικές και γεωγραφικές συνθήκες σε συνδυασμό με την επιλογή των ΦΒ συστημάτων επηρεάζουν σημαντικά τα επίπεδα εσωτερικής παραγωγής ενέργειας σε μία δομή μικροδικτύου.
- Το πλήθος των οικιών ως παραγωγών/καταναλωτών ενέργειας που μετέχουν στην δομή του μικροδικτύου «βαραίνει» διπλά την λειτουργία του, άλλοτε διασφαλίζοντας επαρκή ποσά ενέργειας που περισσεύουν προς διάθεση μετά την κάλυψη των οικιακών αναγκών και άλλοτε επιβαρύνοντας το σύστημα από την αναγκαιότητα κάλυψης των απαιτήσεων τους.
- Η προσομοίωση των διεργασιών ενός μικροδικτύου είναι ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα το οποίο για να καθορίσει βέλτιστα τους βαθμούς ελευθερίας που το μοντέλο διαθέτει, θα πρέπει να προσομοιωθεί εκτενώς με ενεδωλεχή γνώση της σημαντικότητας των διεργασιών που επιτελούνται στο μικροδικτύο.
- Ο ρόλος και το μέγεθος των συστημάτων των συσσωρευτών είναι σημαντικός στοχεύοντας σε αποθήκευση και ανάκληση ενέργειας από το σύστημα. Η

διαστασιολόγηση των συσσωρευτών επηρεάζεται από παραμέτρους λειτουργίας όπως καταδεικνύει και η ανάλυση σε προηγούμενη παράγραφο.

- Η δυναμική λήψη αποφάσεων από πλευράς ενός μικροδικτύου εμπλέκει τον διαχειριστή του συστήματος, ο ρόλος και οι δράσεις του οποίου καθορίζονται από τους μηχανισμούς των σημάτων συναγερμού που ανακλύπουν από τις μονάδες HEMS και NEMS του μικροδικτύου.
- Η οργάνωση ενός μικροδικτύου το οποίο παράγει ενέργεια βασισμένο σε τοπικούς οικιακούς μηχανισμούς ΦΒ συστημάτων ικανοποιεί κατά προτεραιότητα τις DC οικιακές ανάγκες. Η στόχευση των AC αναγκών αποτελεί αντικείμενο διαχείρισης της βαθμίδας NEMS, η οποία αποφασίζει για τον μηχανισμό διάθεσης ισχύος.
- Οι συνθήκες και τα κατώφλια απόφασης της οντότητας NEMS (thresholds) επιδρούν σημαντικά στην λήψη αυτοματοποιημένων αποφάσεων καθώς και στην εμφάνιση ή εξάλειψη ανεπιθύμητων φαινομένων στην λειτουργία του μικροδικτύου.
- Η εφαρμογή σεναρίων με διαφορετικά επίπεδα παραγωγής και κατανάλωσης για τα μοντέλα των οικιών που μετέχουν στο μικροδίκτυο κατέδειξε ότι η κάλυψη των εσωτερικών αναγκών ενός μικροδικτύου είναι δυνατή με μικρή συνεισφορά εξωτερικής παροχής ισχύος από ένα AC δίκτυο. Επιπλέον τα επίπεδα παροχής εξωτερικής ισχύος θα πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά και ίσως δυναμικά με παρέμβαση του διαχειριστή του συστήματος για να διασφαλιστεί η εύρυθμη και ευσταθής λειτουργία του μικροδικτύου διασυνεχώς. Μικρές μεταβολές σε εσωτερικές και εξωτερικές παραμέτρους του μικροδικτύου μπορούν να αντιμετωπισθούν με κάποια επίπεδα ανοχών στην παροχή ισχύος προς το σύστημα (εσωτερικά παραγώμενη + εξωτερικά παρεχόμενη).

Μελλοντικές επεκτάσεις και παρεμβάσεις στα επίπεδα προσομοιώσεων του μοντέλου θα μπορούσαν να διερευνήσουν περαιτέρω θέματα και ειδικές συνθήκες λειτουργίας που σχετίζονται με τα παρακάτω ζητήματα:

- Επίδραση των κλιματολογικών και γεωγραφικών συνθηκών και παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ συστήματα με στόχο την κατάδειξη της ευσταθούς λειτουργίας σε χρονικές προσομοιώσεις βάθους ετών για την εγκατάσταση του μικροδικτύου.
- Συνδυασμός και εισαγωγή χρονικά ασυνεχών τύπων φορτίων με γρήγορες μεταβολές για μεγάλους καταναλωτές όπως βιοτεχνίες, βιομηχανικές μονάδες, κλπ, οι οποίες συμμετέχουν στον ορισμό του μικροδικτύου, με στόχο την διασφάλιση της παροχής απρόσκοπτης ισχύος προς τους οικιακούς καταναλωτές. Επιπλέον σενάρια αυτής της μορφής θα μπορούσαν να συντελέσουν σημαντικά στην διερεύνηση των αλλαγών που απαιτούνται στην λειτουργία των οντοτήτων HEMS και NEMS όταν στην λειτουργία του μικροδικτύου υπεισέρχονται μεγάλα φορτία κατανάλωσης.
- Επέκταση και αλλαγή των συνθηκών απόφασης για την οντότητα του NEMS, η οποία θα έχει ως στόχο να διερευνήσει την ομαλότητα συνθηκών μετάβασης στην παροχή ισχύος από και προς το μικροδίκτυο για την αποφυγή ταλαντωτικών φαινομένων στην διαχείριση της ισχύος του εξωτερικού δικτύου.

Κλείνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι η διερεύνηση της λειτουργίας ενός μικροδικτύου, όπως αυτό που περιγράφεται, αποτελεί μία μελλοντική μελέτη η οποία είναι ρεαλιστική και κατά συνέπεια εφαρμόσιμη, η οποία αναμένεται να αποτελέσει σύγχρονη τάση για την οργάνωση και διαχείριση στην τοπική παραγωγή ενέργειας. Το γεγονός αυτό ενισχύεται από την σύγχρονη στροφή στις συνθήκες αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας, η οποία βασίζεται σε τοπική κλίμακα και η οποία έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη κατά τις τελευταίες δεκαετίες, βασιζόμενη σε ΑΠΕ, τόσο από ΦΒ όσο και συστημάτων ανεμογεννητριών ή και άλλες πηγές. Επομένως, θεωρούμε ότι η προσέγγιση στην βάση μιας μαθηματικοποίησης για ένα τόσο εκτενές και πολυπαραμετρικό πρόβλημα, όπως είναι η οργάνωση και η διαχείριση ενός μικροδικτύου, αναμένεται να βρει άμεση εφαρμογή και εξέλιξη, εκφράζοντας μία μελλοντική τεχνολογική καμπή στους μηχανισμούς παραγωγής και διαχείρισης της ΗΕ.

6.6 Χαρακτηριστικά Εκδόσεων του Grid_Model

Στην παράγραφο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των εκδόσεων του grid_model όπως αυτά υλοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας:

Grid_model_v1_0: Βασική έκδοση

Grid_model_v1_4: Επέκταση της ικανότητας προσομοίωσης του περιβάλλοντος για χρονική διάρκεια μεγαλύτερη των 24h. Χρωματικές επεκτάσεις για τα γραφήματα προσομοίωσης.

Grid_model_v1_5_01: Στην παρούσα έκδοση υπάρχει επέκταση της λειτουργικότητας του μοντέλου των pv_panel με απευθείας ανάθεση της ηλεκτρικής ισχύος στο panel χωρίς να γίνονται υπολογισμοί φωτεινότητας. Στόχος η διευκόλυνση και απευθείας ανάθεση ηλεκτρικής ισχύος όπως παράγεται στο panel χωρίς την χρήση καμπυλών Pelec-I.

Grid_model_v1_5_02: Στην παρούσα έκδοση έχουν προστεθεί τα ακριβή σενάρια προσομοίωσης όπως αυτά καθορίστηκαν. Η παραγωγή ισχύος βασίστηκε στον διαθέσιμο διαδικτυακό calculator PVWatts του Εθνικού Ινστιτούτου Ανανεώσιμων Πηγών των Η.Π.Α., ενώ οι τιμές των φορτίων προέκυψαν με χρήση των δεδομένων της εταιρείας Southern California Edison για οικιακές καταναλώσεις. Οι τιμές των ΦΒ πάνελ τέθηκαν στα 3 KW παραγωγής και έτσι προέκυψαν για όλο τον χρόνο οι ενδεικνυόμενες τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το ΦΒ σύστημα.

Grid_model_v1_7_00: Στην παρούσα, τελική έκδοση έχει προστεθεί η λειτουργικότητα εκτύπωσης αριθμητικών αποτελεσμάτων από την εφαρμογή των σεναρίων προσομοίωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βουρνάς Κ. Και Παππαδιάς Β., Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας- Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος, Αθήνα: Σ. Αθανασόπουλος ΣΙΑ Ο.Ε., 2010
- [2] Βουρνάς και Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Ε.Μ.Π., 2001
- [3] ΑΔΜΗΕ, Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, [Ηλεκτρονικό]. Available: www.admie.gr
- [4] HadiSaadat, Power system analysis, PSA Publishing, 2004
- [5] ΥΠΕΚΑ, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής 111, Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, [Ηλεκτρονικό]. Available: www.ypeka.gr
- [6] Αικατερίνη Βαλαλάκη, Επίδραση της τιμολόγησης των ΑΠΕ στα Μικροδίκτυα, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 2010
- [7] Παπαθανασίου Σταύρος, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές, ΕΜΠ
- [8] Janaka Ekanayake, Kithsiri Liyanage and Jianzhong Wu, SMART GRID Technology And Applications, United Kingdom,

ISBN 978-0-470-97409-4:WILEY, 2012

[9] ΤΟΤΕΕ, Τεχνικές Οδηγίες Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας,
Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών,
[Ηλεκτρονικό]. Available: <http://portal.tee.gr/>

[10] ΣΕΒ, Σύνδεσμος Ελλήνων Βιομηχάνων,
Δραστηριότητες στους Τομείς των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας,
[Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.sev.org.gr/>

[11] Αντώνης Καρακούσης, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Μετάβαση στο Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο και Ανάπτυξη του Ευφυούς Συστήματος
Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Φεβρουάριος 2015

[12] Κ.Θ.Δέρβος, Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις,
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009

[13] Thomas Markvart, Ηλεκτρισμός από Ηλιακή Ενέργεια, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2003

[14] Ανέστης Γ. Αναστασιάδης, Συμβολή στην Διαχείριση Μικροδικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας
με Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Συστημάτων Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού
και Θερμότητας, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2014

[15] Νικόλαος, Μανωλάς, Σχεδίαση Έξυπνου Μετρητή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2012

[16] Käbisch S., Schmitt, A. Winter, M. Heuer, Interconnections and Communications of Electric Vehicles and Smart Grids, First IEEE International Conference, pp. 161-166

[17] B. Alipuria, B. Asare Bediako, J.G.Slootweg, W.L.Kling, Application of DC micro-grids for integration of solar home systems in smart grids, Eindhoven University of Technology, October 2013

[18] David Linden, Thomas B. Reddy, Handbook of Batteries, McGraw-Hill, 3rd ed., New York, 2002

[19] MIT Electric Vehicle Team, A Guide to Understanding Battery Specifications, December 2008 [Ηλεκτρονικό]. Available: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf

[20] Κωνσταντίνος Παγώνης-Βιολέτα Αργυροπούλου, Επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στα μεγέθη ενός Μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2011

[21] Γεώργιος Τσόλκας, Ετήσια ενεργειακή απόδοση πλαισίων λεπτού φιλμ και ισοδύναμη μοντελοποίηση, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Φεβρουάριος 2011

[22] Ναταλία Ιγγλέζου, Ανάλυση Λειτουργίας και Μοντελοποίηση Συσσωρευτών, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

[23] International Energy Agency, World Energy Outlook 2010, April 2012,

[Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.iea.org/publications>

[24] M. Wolsink, The research agenda on social acceptance of distributed generation in smart grids: Renewable as common pool resources, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16.1,pp 822-835, January 2012

[25] J.G. Slootweg, M.M.A.M. Van der Meijden, J.D. Knigee, E. Veldman, Demystifying smart grids connection with smart metering, CIRED , June 2011

[26] Käbisch, S. Schmitt, A. Winter, M. Heuer, Interconnections and Communications of Electric Vehicles and Smart Grids, First IEEE International Conference, pp. 161-166

[27] Αντώνιος Γ. Τσικαλάκης, Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2008.

[28] EPRI, Estimating the Cost and Benefits of the Smart Grid, EPRI, Palo Alto USA, March 2011

[29] C. Hertzog, Smart Grid Dictionary, GreenSpring Marketing LLC,2009

- [30] K. Moslehi, A reliability perspective of the smart grid, Smart Grid, IEEE Transactions, vol. 1.1, pp. 57-64, June 2010
- [31] J. Gao, et al., A survey of communication/networking in Smart Grids, Future generation computer systems, vol. 28.2, February 2012
- [32] I. Koutsopoulos, V. Hatzi and L. Tassiulas, Optimal energy storage control policies for smart Grids, IEEE – Smart grid communications international conference, pp. 475-480, October 2011
- [33] Live Science Survey, Top 10 Alternative Energy Resources, March 2012, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.livescience.com/>
- [34] M. Bond, R.J. Fuller, L. Aye, Sizing solar home systems for optimal development impact, Elsevier Energy Policy, vol. 42, pp.699-709, March 2012
- [35] M.M.H. Bhuiyan, M.A. Asgar, Sizing of a stand-alone photovoltaic system at Dhaka, Elsevier Renewable Energy, vol. 28.6, pp. 929-938, May 2003
- [36] Lu. D.D.-C.: Agelidis, V.G., Photovoltaic-Battery Powered DC Bus System for Common Portable Electronic Devices, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 24, Issue: 3, 2009
- [37] D. Hammerstrom, Ac versus dc distribution systems. Did we get it right?, Piscataway, NJ, USA, June 2007

[38] MathWorks, Matlab – The language of technical computing,

[Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

[39] H. Dick, H. Eden, G. Fischer and J. Zietz, Empowering users to become designers: Using Metadesign environments to enable and motivate sustainable energy decisions, Colorado University, 2012

[40] Shah, K., Sehnai, K., Smart DC micro-grid for efficient utilization of distributed renewable energy, IEEE - EnergyTech ; Cleveland, OH, pp. 1-6, May 2011

[41] Sarker, M.J. Asare-Bediako, B. Sloomweg, J.G. Kling, W.L. Alipuria, B., DC micro-grid with distributed generation for rural electrification, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012

[42] A.Pinomaa, J.Ahola, Power-line communication based network architecture for LVDC distribution system, Power line communication and its applications, IEEE, 2011

[43] T Shibata, K Sakai and Y Okabe, Design and implementation of an on-demand DC grid in Home, IEEE, 2011

[44] Ton M., Fortenbery B., Tschudi W., DC Power for Improved Data Center Efficiency, Lawrence Berkeley National Laboratory Report, U.S. Department of Energy, Washington,

DC, 2007

[45] M.Saeedifard, M.Graovac, R.F.Dias, R.Iravani, DC power systems: Challenges and Opportunities, IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 2010, pp 1-7