



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

**Μελέτη διαστασιολόγησης και ενσωμάτωσης στο δίκτυο  
φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων υπό τον θεσμό της  
ιδιοκατανάλωσης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παπακωνσταντίνου Χ. Κωνσταντίνος**

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Απρίλιος 2015





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

**Μελέτη διαστασιολόγησης και ενσωμάτωσης στο δίκτυο  
φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων υπό τον θεσμό της  
ιδιοκατανάλωσης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παπακωνσταντίνου Χ. Κωνσταντίνος**

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Ν. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

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

.....  
Π. Γεωργιάκης  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Απρίλιος 2015



.....  
**Κωνσταντίνος Χ. Παπακωνσταντίνου**

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

Copyright © Κωνσταντίνος Χ. Παπακωνσταντίνου, 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.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Μεσσήνη για τις υποδείξεις και την καθοδήγηση του, καθώς και την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής, και για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Κλεφτάκη, για την καταλυτική του βοήθεια στο εργαστηριακό κομμάτι της εργασίας, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα παιδιά του εργαστηρίου που ήταν πάντα πρόθυμοι να με στηρίξουν και να με βοηθήσουν στην ολοκλήρωση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την πολύπλευρη στήριξη τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία ενσωματώνονται στο θεσμικό πλαίσιο της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption scheme), έχουν την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας για περαιτέρω αύξηση της ιδιοκατανάλωσης και αφορούν κυρίως οικιακούς/εμπορικούς καταναλωτές της Χαμηλής Τάσης (XT). Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιείται μελέτη διαστασιολόγησης και ενσωμάτωσης των εν λόγω συστημάτων στο δίκτυο αναπτύσσοντας μοντέλα προσομοιώσεων με τη χρήση του πακέτου λογισμικού Matlab.

Αρχικά, πραγματοποιείται αναφορά στην εξέλιξη της φ/β τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, στην ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας, καθώς επίσης και στα διάφορα θεσμικά εργαλεία ενίσχυσης των φ/β, δίνοντας έμφαση σε αυτά τα πλαίσια που επιτρέπουν την αυτοκατανάλωση της φ/β παραγωγής και την περαιτέρω αύξηση της ιδιοκατανάλωσης με τη χρήση αποθηκευτικών συστημάτων. Στη συνέχεια, αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των φ/β διατάξεων και εξηγούνται συνοπτικά οι επιδράσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών στη λειτουργία τους. Μελετώνται τα κύρια συστατικά των φ/β συστημάτων καθώς επίσης και οι επιπτώσεις, προϋποθέσεις της σύνδεσής τους στο δίκτυο XT. Ακόμη, εξετάζεται η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών συσσωρευτών, πραγματοποιείται η ταξινόμηση τους και μελετώνται τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους, δίνοντας έμφαση στις μπαταρίες μολύβδου οξέος, οι οποίες και αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Τέλος, μελετάται η μοντελοποίηση των συσσωρευτών με τη βοήθεια ενός ισοδύναμου κυκλώματος ικανού να αναπαραστήσει με ακρίβεια τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, αρχικά αναπτύχθηκε ένα μοντέλο σε γλώσσα Matlab που προσομοιώνει τη λειτουργία του συνολικού συστήματος για ένα έτος λαμβάνοντας υπόψη πραγματικά ωριαία δεδομένα παραγωγής και φορτίου. Τα αποτελέσματα που εξάγονται σε συνδυασμό με την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται μας δίνουν μία σαφή εικόνα για τα ενεργειακά αλλά και τα τεχνο-οικονομικά χαρακτηριστικά των συστημάτων που τελούν υπό τον θεσμό της ιδιοκατανάλωσης, αναδεικνύοντας τον βέλτιστο συνδυασμό φωτοβολταϊκού-αποθηκευτικού συστήματος, τόσο από πλευράς ενεργειακής αποδοτικότητας, όσο και από θέμα κόστους. Τέλος, η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος πραγματοποιήθηκε και στο γραφικό περιβάλλον Simulink του Matlab. Το μοντέλο επιτυγχάνει την ομαλή ενσωμάτωση των συστημάτων στο δίκτυο μέσω έξυπνων στρατηγικών διαχείρισης του αποθηκευτικού συστήματος λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα φ/β παραγωγής και φορτίου υψηλής χρονικής ανάλυσης. Ακόμη, εξετάζεται και αντιμετωπίζεται το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης λόγω της υψηλής φ/β διείσδυσης στα δίκτυα διανομής, προσομοιώνοντας ένα απλουστευμένο ακτινικό δίκτυο XT, καταγράφοντας τα επίπεδα των τάσεων στους διάφορους κόμβους και λαμβάνοντας υπόψη διάφορα σενάρια παραγωγής και ζήτησης.

**Λέξεις κλειδιά:** ιδιοκατανάλωση, φωτοβολταϊκά συστήματα, αυτοκατανάλωση, διεσπαρμένη παραγωγή, αποθήκευση ενέργειας, συσσωρευτής, ανάλυση ευαισθησίας, ανύψωση τάσης



# Abstract

This diploma thesis analyses residential PV battery systems operated under the self-consumption scheme in order to gain insights into their sizing and grid integration. For this purpose, two different simulation models were developed and system simulations were performed using the Matlab software package.

Initially, reference is made to the evolution of PV technology over the recent years and the need for energy storage is discussed. An overview of schemes that enable direct consumption of PV production is presented such as net-metering and self-consumption, emphasizing in the context of self-consumption and the further increase of it using storage systems.

After that, the basic characteristics of photovoltaic systems are mentioned, and the impacts of environmental conditions on their operation are briefly explained. We examine the major components of PV systems as well as the impacts of PV connection to LV networks, and the specifications for this connection are mentioned.

Furthermore, an introduction to the concept of energy storage in photovoltaic systems is made. The components, the principle of operation and the major characteristics of batteries are illustrated. Additionally, the several types of electrical batteries and their classification are presented, focusing on lead acid batteries which are the subject of this thesis. Finally, we examine battery model development using an electric circuit-based model capable of representing the electrical characteristics of batteries with accuracy.

Furthermore, a simulation model was developed and system simulations on a timescale of one hour were performed. A sensitivity analysis was conducted varying the PV system and battery size to identify appropriate system configurations taking into account their energetic assessment criteria. Based on the simulation results, an economic assessment of PV battery systems was carried out and the cost-optimal configurations for various cost scenarios were determined.

Another focus of this thesis is the integration of PV battery systems into the distribution grid. For this purpose Simulink is used, and the results of the voltage levels at the connection nodes are presented, by implementing various production-consumption scenarios in a LV network. Both meteorological and high temporal resolution load demand data sets were used as input for the simulation. Finally, the impact of different operation strategies on the voltage rise phenomenon caused by the penetration of PV generators to LV networks is investigated and appropriate control strategies of the battery system are identified to improve the grid integration of PV battery systems.

**Key-words:** PV battery systems, distributed generation, photovoltaic, self-consumption, storage systems, voltage support

# Περιεχόμενα

## Κεφάλαιο 1

<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>15</b>
1.1 Τα φωτοβολταϊκά σήμερα .....	16
1.2 Θεσμικά εργαλεία ενίσχυσης φωτοβολταϊκών.....	22
1.2.1 Το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης.....	24
1.2.2 Συμψηφισμός παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας .....	28
1.3 Η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας .....	31
1.3.1 Αποθήκευση ενέργειας στα αυτόνομα φ/β συστήματα.....	33
1.3.2 Αποθήκευση ενέργειας στα διασυνδεδεμένα φ/β συστήματα .....	34
1.4 Διάρθρωση της διπλωματικής .....	35

## Κεφάλαιο 2

<b>Φωτοβολταϊκά συστήματα.....</b>	<b>37</b>
2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια .....	37
2.2 Δυνατότητα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας .....	39
2.3 Λειτουργία φωτοβολταϊκών .....	40
2.3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....	41
2.3.2 Η επαφή p-n .....	44
2.3.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φ/β στοιχείου .....	45
2.3.4 Η καμπύλη V-I ενός φ/β στοιχείου .....	46
2.3.5 Επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών στη λειτουργία των φ/β .....	48
2.4 Αντιστροφείς .....	49
2.4.1 Κατηγορίες αντιστροφέων .....	49
2.4.2 Χαρακτηριστικά και τρόπος λειτουργίας φ/β αντιστροφέων.....	51
2.4.3 Εφαρμογές αντιστροφέων .....	53
2.5 Επιπτώσεις της σύνδεσης φωτοβολταϊκών στο δίκτυο .....	53
2.5.1 Αργές μεταβολές τάσης.....	54
2.5.2 Αύξηση της ισχύος ή στάθμης βραχυκύκλωσης.....	54
2.5.3 Ποιότητα ισχύος.....	55
2.5.4 Ευστάθεια συστήματος .....	56
2.5.5 Μέσα προστασίας συστήματος .....	56
2.5.6 Επάρκεια δικτύου .....	57
2.6 Προϋποθέσεις σύνδεσης φ/β παραγωγών στη ΧΤ .....	57

## **Κεφάλαιο 3**

<b>Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας .....</b>	<b>61</b>
3.1 Εισαγωγή στη δομή των μπαταριών.....	61
3.2 Ταξινόμηση μπαταριών .....	63
3.2.1 Πρωτογενείς μπαταρίες (μη επαναφορτιζόμενες).....	63
3.2.2 Δευτερογενείς μπαταρίες (επαναφορτιζόμενες) .....	65
3.3 Οι μπαταρίες στα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	66
3.3.1 Η λειτουργία των μπαταριών στα φωτοβολταϊκά συστήματα .....	67
3.3.2 Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν .....	68
3.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών.....	69
3.4.1 Χωρητικότητα .....	69
3.4.2 Τάση.....	70
3.4.3 Στάθμη φόρτισης.....	71
3.4.4 Βάθος εκφόρτισης .....	71
3.4.5 Κύκλος/κύκλος ζωής.....	72
3.4.6 Αποδοτικότητα.....	73
3.4.7 Ρεύμα μπαταρίας.....	74
3.4.8 Χρόνος ζωής.....	74
3.4.9 Ειδική ενέργεια / ενεργειακή πυκνότητα .....	74
3.4.10 Αυτοεκφόρτιση .....	75
3.4.11 Κατάσταση υγείας.....	75
3.4.12 Ρυθμός φόρτισης / εκφόρτισης .....	75
3.4.13 Ειδική ισχύς.....	76
3.4.14 Εσωτερική αντίσταση .....	76
3.4.15 Ειδικό βάρος.....	76
3.5 Μπαταρίες μολύβδου οξέος .....	76
3.6 Τύποι μπαταριών μολύβδου οξέος .....	78
3.6.1 Μπαταρίες μολύβδου οξέος ανοικτής ή κλειστής κατασκευής .....	78
3.6.2 Μπαταρίες μαζικής παραγωγής ή βιομηχανικού τύπου.....	82
3.7 Μοντελοποίηση συσσωρευτών .....	83

## **Κεφάλαιο 4**

<b>Μέθοδος διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων .....</b>	<b>87</b>
4.1 Εισαγωγή.....	87

4.2	Ανάλυση και προεπεξεργασία δεδομένων .....	88
4.2.1	Δεδομένα φορτίου .....	88
4.2.2	Δεδομένα φωτοβολταϊκής παραγωγής.....	91
4.2.3	Δεδομένα Συσσωρευτών .....	94
4.3	Τοπολογία συστήματος .....	95
4.4	Αλγόριθμος διαχείρισης ισχύος.....	96
4.5	Μέθοδος προσομοίωσης.....	99
4.5.1	Εξισώσεις και μεταβλητές.....	99
4.5.2	Ενεργειακά κριτήρια αξιολόγησης.....	105
4.5.3	Τεχνοοικονομικά κριτήρια αξιολόγησης .....	109
4.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης .....	114
4.7	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.....	119
4.7.1	Ενεργειακή αξιολόγηση .....	119
4.7.2	Οικονομική αξιολόγηση.....	125
4.7.3	Χρήσιμα συμπεράσματα .....	135

## **Κεφάλαιο 5**

### **Ενσωμάτωση στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων .....**

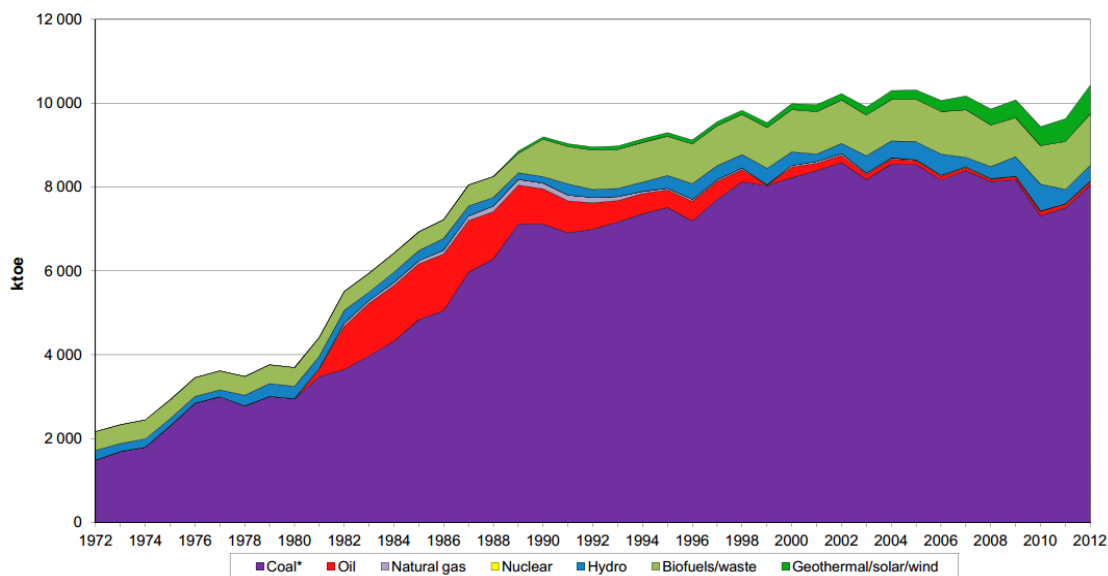
5.1	Εισαγωγή.....	139
5.2	Ανάλυση δεδομένων.....	141
5.2.1	Δεδομένα φορτίου .....	141
5.2.2	Δεδομένα φωτοβολταϊκής παραγωγής.....	144
5.3	Σύνδεση φωτοβολταϊκού συστήματος σε κόμβο δικτύου XT.....	145
5.4	Μέθοδος μοντελοποίησης .....	147
5.4.1	Δίκτυο διανομής.....	148
5.4.2	Εισαγωγή δεδομένων (‘Power Data’ block) .....	152
5.4.3	Υπολογισμός AC ρευμάτων ( ‘AC Currents’ block) .....	153
5.4.4	Μετρητές (‘Meter’ block) .....	156
5.4.5	Αποθηκευτικό σύστημα (‘Battery-Inverter’ block) .....	156
5.4.6	Μοντελοποίηση συστοιχίας μπαταριών (block ‘Battery’). .....	158
5.4.7	Λειτουργία αντιστροφεία (block ‘Inverter’) .....	165
5.4.8	Μονάδα ελέγχου (‘Control Unit’ block).....	166
5.5	Έλεγχος και λειτουργία .....	169

5.5.1	Εργαστηριακό μικροδίκτυο.....	169
5.5.2	Αποθηκευτικό σύστημα/Σύστημα ελέγχου μικροδικτύου .....	170
5.5.3	Εργαστηριακό πείραμα .....	172
5.5.4	Πείραμα στο Simulink .....	177
5.6	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	181
5.6.1	Στρατηγικές ελέγχου αποθηκευτικού συστήματος.....	181
5.6.2	Διαδικασία αποφόρτισης αποθηκευτικού συστήματος.....	187
5.6.3	Αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης της τάσης με χρήση αποθηκευτικών συστημάτων .....	192
<b>Κεφάλαιο 6</b>		
<b>Συμπεράσματα-Προοπτικές συνέχισης .....</b>		<b>221</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>		<b>225</b>

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση της ενέργειας από τη βιομηχανική επανάσταση και έπειτα έχει προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στην ισορροπία του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν προκύψει αυξανόμενες ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές επιδράσεις των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα που προέρχονται από την καύση των ορυκτών καυσίμων και από τη δημιουργία ραδιενεργών αποβλήτων από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Υπάρχουν ολοένα και ισχυρότερες ενδείξεις ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στις εκπομπές άνθρακα, οι οποίες προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από τις μεταφορές. Ενώ λοιπόν, η παγκόσμια οικονομία έχει γνωρίσει εδώ και δύο αιώνες μια σταθερή και πρωτοφανή ανάπτυξη που υποστηρίχθηκε από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων, καθώς οι ενεργειακές ανάγκες συνεχώς αυξάνουν, υπάρχει έντονη ανησυχία τόσο για την επάρκεια των ενεργειακών πηγών όσο και για τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η ανησυχία αυτή έχει ενισχυθεί τα τελευταία χρόνια και λόγω των συνεχώς αυξανόμενων τιμών των καυσίμων όπως χαρακτηριστικά συμβαίνει με τις τιμές του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του ουρανίου αλλά και του άνθρακα. Το γεγονός ότι τα ορυκτά καύσιμα είναι πεπερασμένα ενώ η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ολοένα και αυξάνεται (σχήμα 1.1) οδήγησε πολλές κυβερνητικές υπηρεσίες και διεθνείς οργανισμούς να εκπονήσουν μελέτες προς αναζήτηση και εκμετάλλευση άλλων ενεργειακών πηγών.



**Σχήμα 1.1** Εξέλιξη της πρωτογενούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ktOE (τόνοι ισοδυνάμου πετρελαίου) για τα έτη 1972-2012. Πηγή [www.iea.org](http://www.iea.org)

Πόλο έλξης αποτέλεσαν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) οι οποίες είναι ‘καθαρές’, ανεξάντλητες και δεν χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (σχήμα 1.2). Οι

ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ήπιες μορφές ενέργειας προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες και μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες [1]:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδατοπτώσεις
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια από παλίρροιες
- Ενέργεια από κύματα
- Ενέργεια από τους ωκεανούς



**Σχήμα 1.2** Ήπιες μορφές ενέργειας: Γεωθερμία, Ηλιακή, Υδροηλεκτρική

Για την εκμετάλλευση των παραπάνω ήπιων μορφών ενέργειας έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνολογίες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η ηλιακή ενέργεια ως η ήπια μορφή ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάμεσα στις άλλες τεχνολογίες, οι οποίες εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια είναι και η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, η οποία κερδίζει ευρεία αποδοχή ως ένας τρόπος διατήρησης και βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου χωρίς να βλάπτεται το περιβάλλον. Όλο και περισσότερες εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανταποκρίνονται στις επιθυμίες των καταναλωτών συμπεριλαμβάνοντας τα φωτοβολταϊκά στον παραγωγικό μηχανισμό.

## **1.1 Τα φωτοβολταϊκά σήμερα**

Όπως αναφέρθηκε, μία από τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας που θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο είναι η ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας που είναι φιλική προς το περιβάλλον. Αντίθετα από τα απολιθωμένα καύσιμα, η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη παντού στη γη. Είναι ελεύθερη και ανεπηρέαστη από τις αυξανόμενες τιμές ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους: για θέρμανση, φωτισμό και παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

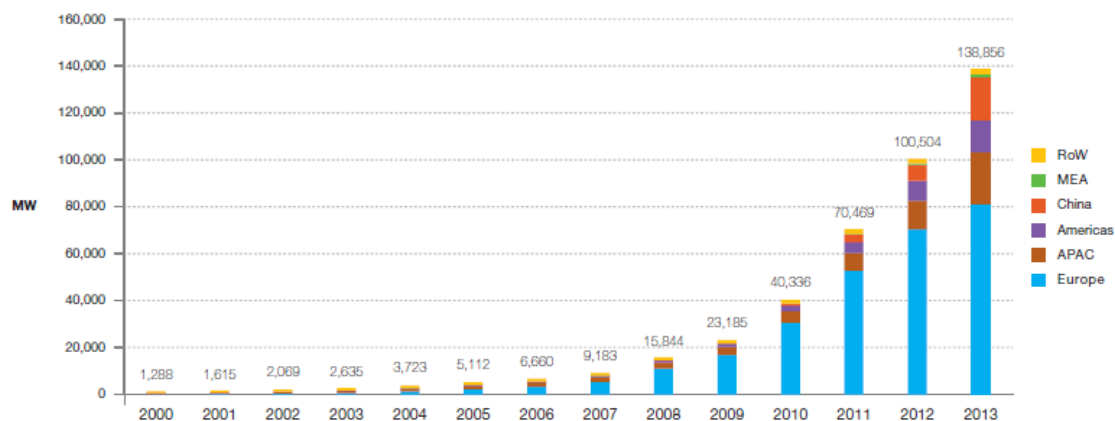




**Σχήμα 1.3** Εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάνελ στη στέγη οικίας για την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια

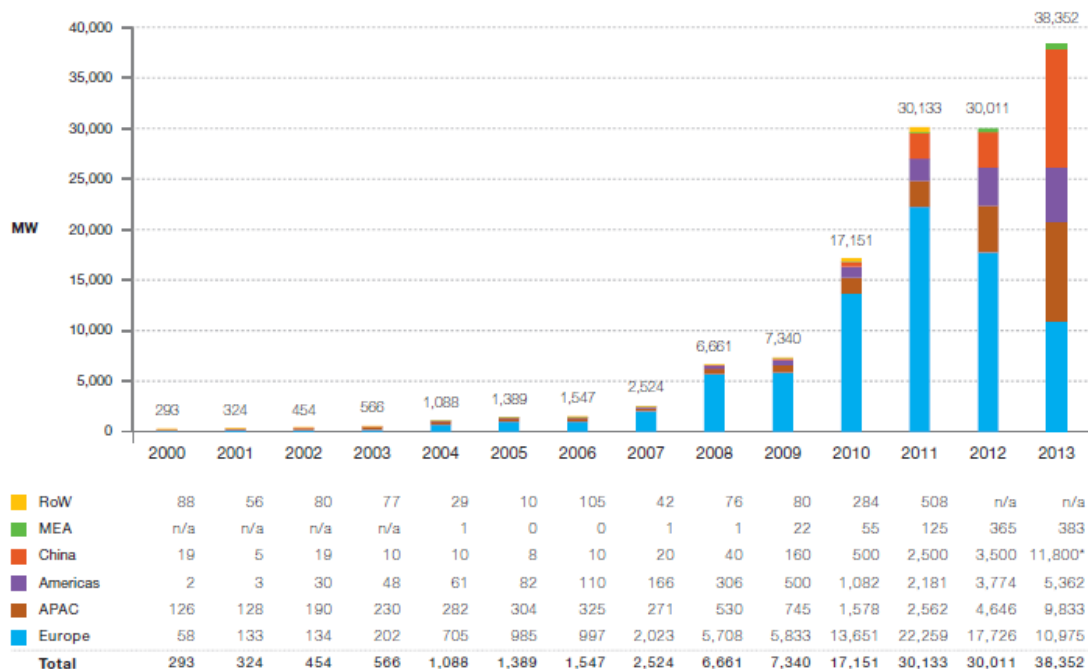
Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών (σχήμα 1.3). Το φως του ήλιου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας τα φωτοβολταϊκά ή ηλιακά κύτταρα. Τα φωτοβολταϊκά (φ/β) κύτταρα είναι συσκευές ημιαγωγών, συνήθως φτιαγμένες από πυρίτιο, οι οποίες δεν περιέχουν κανένα υγρό, διαβρωτική χημική ουσία ή κινούμενο μέρος. Παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με χρήση του φωτός, απαιτούν λίγη συντήρηση, δεν μολύνουν και λειτουργούν σιωπηλά, κάνοντας τη φωτοβολταϊκή ενέργεια την καθαρότερη και ασφαλέστερη μέθοδο ηλεκτρικής παραγωγής [2].

Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία παρήχθησαν στα τέλη της δεκαετίας του 50. Κατά την δεκαετία του 60 χρησιμοποιήθηκαν βασικά για την παραγωγή ενέργειας σε δορυφόρους. Αργότερα στα μέσα του 70 βελτιώσεις στον τρόπο παραγωγής τους, στην απόδοση και στην ποιότητα τους, οδήγησαν στην πτώση του κόστους τους με αποτέλεσμα να βρουν εφαρμογή σε συστήματα χαμηλής ισχύος κυρίως στην φόρτιση μπαταριών στην ναυσιπλοΐα και σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Στη δεκαετία του 80 έγιναν πηγή ενέργειας για διάφορες ηλεκτρικές συσκευές όπως είναι οι υπολογιστές τσέπης, ρολόγια, ραδιόφωνα κ.τ.λ. Μετά την ενεργειακή κρίση του 70, έγιναν αξιοσημείωτες προσπάθειες για την παραγωγή φωτοβολταϊκών για οικιακή και εμπορική χρήση και για τους δύο τύπους συστημάτων τα απομονωμένα και τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο. Σήμερα, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία εμφανίζει ραγδαία ανάπτυξη διεθνώς (σχήμα 1.4) [2].



**Σχήμα 1.4** Η εξέλιξη της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος σε MW τα έτη 2000 έως 2013. Πηγή [www.epia.org](http://www.epia.org)

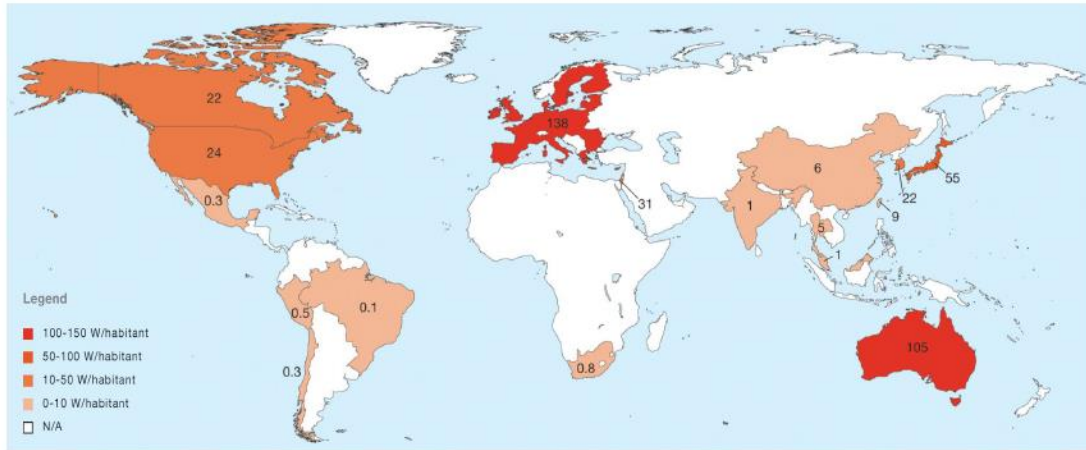
Ταυτόχρονα γίνεται μεγάλη προσπάθεια στον τομέα της έρευνας, με σκοπό την εξεύρεση νέων υλικών, αλλά και λιγότερο ενεργοβόρων διαδικασιών παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων, γεγονότα που από την μια θα αυξήσουν την απόδοση και από την άλλη θα μειώσουν το κόστος παραγωγής. Οι δύο τελευταίες παράμετροι αποτελούν και τα κύρια μειονεκτήματα της φ/β τεχνολογίας, τα οποία εμποδίζουν την περαιτέρω ανάπτυξή της.



**Σχήμα 1.5** Η εξέλιξη των παγκόσμιων εγκαταστάσεων ανά έτος σε MW έτη 2000 έως 2013 Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

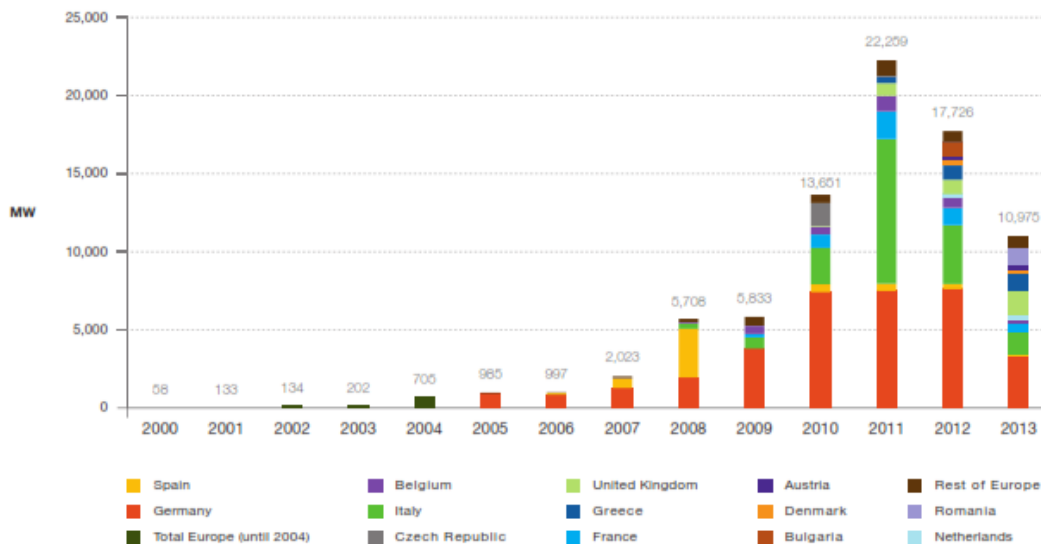
Από το 2008, η Ε.Ε. αποτελούσε μία από τις ισχυρότερες αγορές καταλαμβάνοντας το 80% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Και ενώ η Ευρώπη το 2011 καταμετρούσε το 74% στις νέες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων

παγκοσμίως, και περίπου το 55 % τον επόμενο χρόνο, το 2013 η περιοχή αυτή αποτελούσε μόνο το 29% όσον αφορά τις νέες εγκαταστάσεις. Το 2013 λοιπόν η ραγδαία ανάπτυξη προέκυψε για τις αναδυόμενες αγορές της Κίνας και της Ιαπωνίας [3]. Στο διάγραμμα του σχήματος 1.5 παρουσιάζεται η εξέλιξη των παγκόσμιων ετήσιων εγκαταστάσεων σε MW ανά τον κόσμο.



**Σχήμα 1.6** Η εγκατεστημένη φ/β ισχύς ανά κάτοικο σε όλο τον κόσμο Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

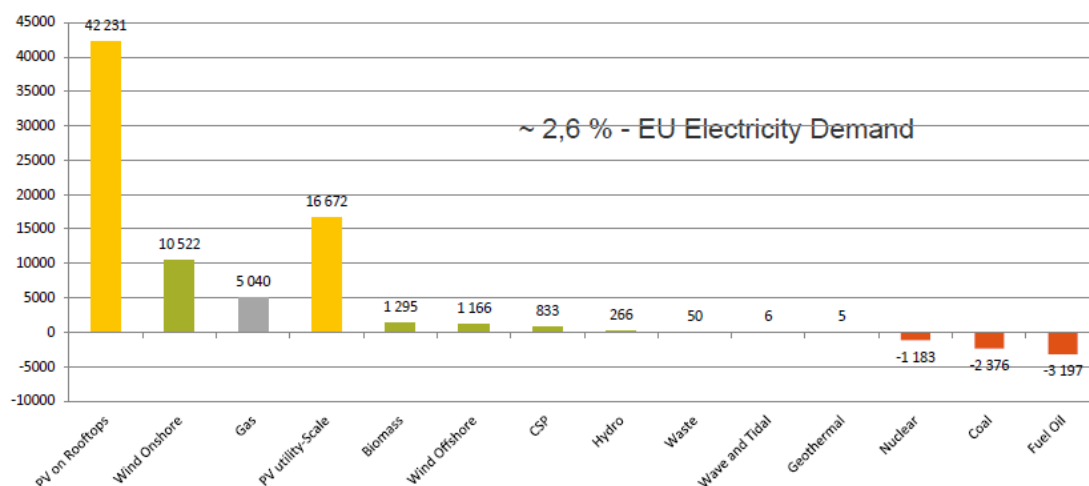
Όπως και να έχει η Ευρώπη ακόμα παραμένει ο ηγέτης της παγκόσμιας αγοράς με συνολική εγκατεστημένη ισχύ που κυμαίνεται στα 81.5 GW για το 2013 και αντικατοπτρίζει το 59% της συνολικής παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Στο σχήμα 1.6 παρακολουθούμε την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ ανά κάτοικο.



**Σχήμα 1.7** Η εξέλιξη της ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος των διασυνδεδεμένων φ/β συστημάτων στην Ευρώπη ανά χώρα τα έτη 2000 έως 2013 Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

Τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα ουσιαστικά συνθέτουν το μεγαλύτερο μέρος της εγκατεστημένης ισχύος στην Ε.Ε. κατέχοντας το 99.8% της συνολικής

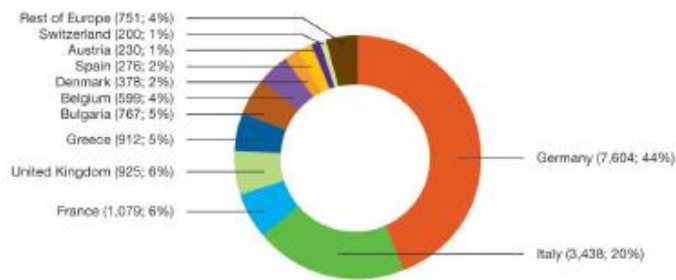
παραγωγής κατά τη διάρκεια του 2008, και το 98.7% στα τέλη του ίδιου έτους. Αντίθετα, τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν σχεδόν μόνο το 1% των εγκατεστημένων συστημάτων. Η δυναμική είσοδος της ελληνικής αγοράς, η σταθερή ανάπτυξη της αντίστοιχης γερμανικής (όπου κατείχε τη πρώτη θέση στη παγκόσμια αγορά για 14 χρόνια) και η αύξηση της ισχύος σε Ηνωμένο Βασίλειο, Πορτογαλία, Βέλγιο και Γαλλία συνέβαλλε στο υψηλό ποσοστό αυτό έως και το 2012. Ωστόσο, το 2013 παρατηρείται ισχυρή μείωση της εγκατεστημένης ισχύος (ακόμη και στις μεγαλύτερες αγορές τη Γερμανίας και της Ιταλίας) που οφείλεται κυρίως στο ασταθές πολιτικό και θεσμικό περιβάλλον των χωρών.



**Σχήμα 1.8** Η εγκατάσταση νέων χωρητικοτήτων από διάφορες πηγές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε MW από το 2000 και μετά Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

Στο σχήμα 1.8 παρακολουθούμε την εγκατάσταση νέων χωρητικοτήτων για την παραγωγή ηλεκτρισμού από διάφορες πηγές ενέργειας από το 2000 και έπειτα. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός πως τα φ/β στη στέγη αποτελούν την πρώτη πηγή ηλεκτρισμού που εγκαθίσταται τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη και συνολικά καλύπτουν το 2.6 % της συνολικής ζήτησης. Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζεται η διάτμηση της ευρωπαϊκής φωτοβολταϊκής αγοράς ανά κράτος (σε MW) και ανά τομέα (οικιακό, εμπορικό, βιομηχανικό, τοποθετημένα στο έδαφος) για το έτος 2012. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά το μεγαλύτερο ποσοστό ανήκει στην Γερμανία και την Ιταλία, όπου και οι δύο μαζί καλύπτουν το 64% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Ακόμη, ενδιαφέρον παρουσιάζει η Ελλάδα με ένα διόλου ευκαταφρόνητο ποσοστό τη τάξεως του 5%. Επιπλέον, ο οικιακός και εμπορικός τομέας καλύπτει το 53% των εγκατεστημένων συστημάτων. Ακόμη, στην Ευρώπη και για το έτος 2012 τα φ/β στη στέγη αυξήθηκαν από 65% σε 72% της εγχώριας ευρωπαϊκής αγοράς συγκριτικά με το 2011. Και σε απόλυτους αριθμούς, όσον αφορά τον οικιακό τομέα η εγκατεστημένη ισχύ αναπτύχθηκε από 2.9 σε 3.3 GW, ενώ ο εμπορικός/βιομηχανικός μειώθηκε από 7.6 σε 5.2 GW [4].

European PV market split in 2012 (MW; %)

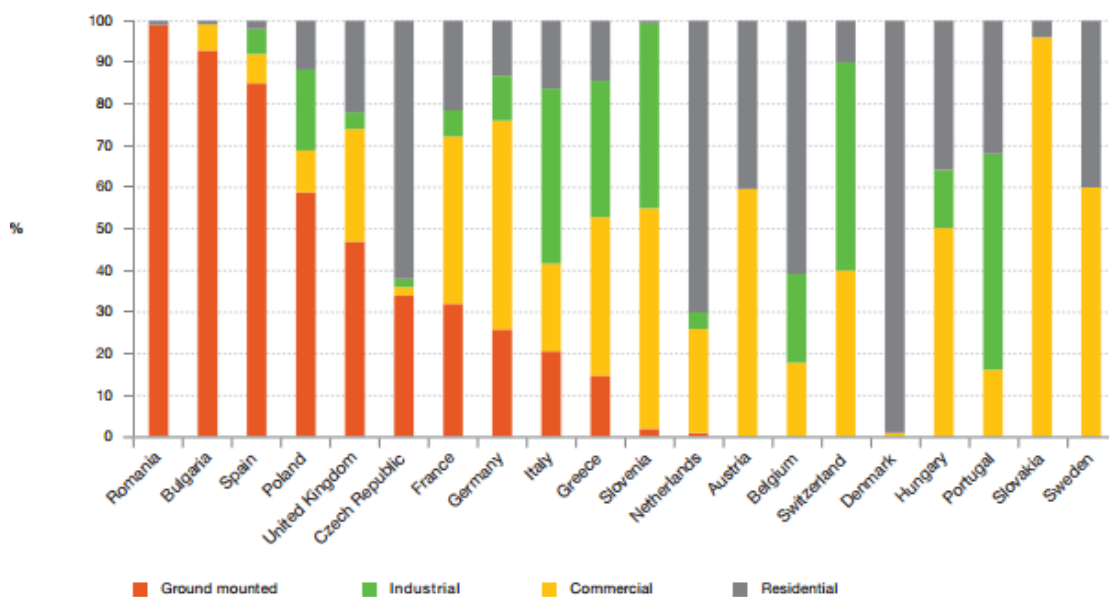


European PV market segmentation in 2012 (%)



Σχήμα 1.9 Η Ευρωπαϊκή αγορά φ/β ανά κράτος σε MW και ανά τομέα (%) το έτος 2012 Πηγή: www.epia.org

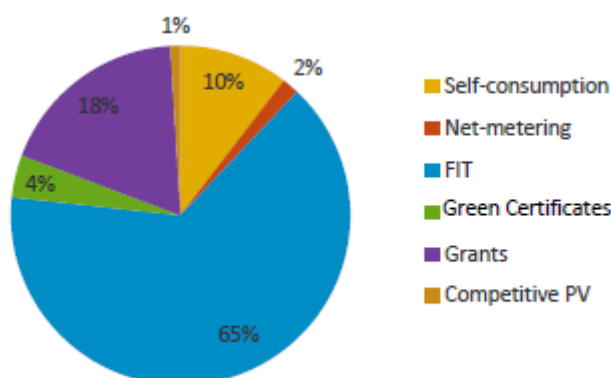
Τέλος, ο οικιακός τομέας έχει αναπτυχθεί ραγδαία σε κάποιες χώρες, όπως το Βέλγιο (όπου 1 στα 13 σπίτια είναι εξοπλισμένο με φωτοβολταϊκό σύστημα), η Δανία, η Ολλανδία αλλά και η Ελλάδα, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10 Η Ευρωπαϊκή φ/β συνολική εγκατεστημένη ισχύ ανά τομέα και ανά χώρα το 2013 Πηγή: www.epia.org

## 1.2 Θεσμικά εργαλεία ενίσχυσης φωτοβολταϊκών

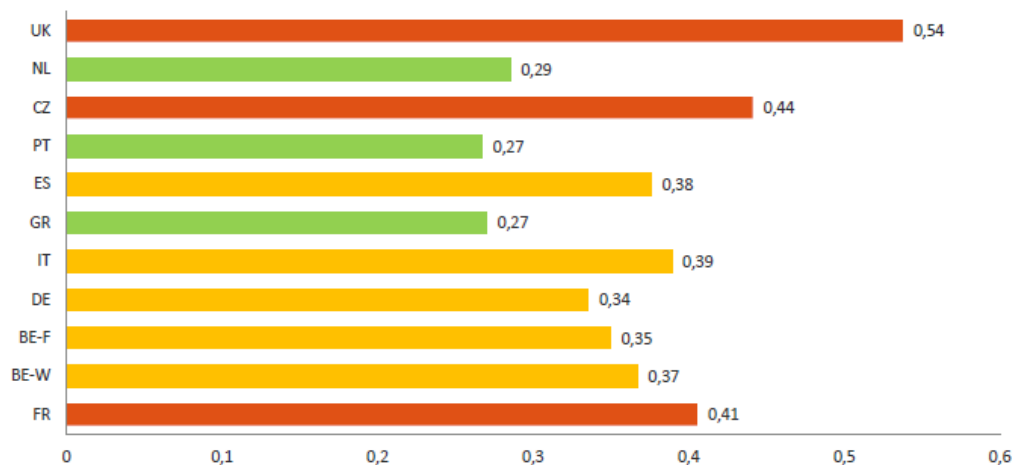
Είναι γεγονός, λοιπόν, μια μεγάλη στροφή διεθνώς, όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας τόσο από τις κυβερνήσεις όσο και από μεγάλες εταιρίες και επενδυτές. Οι αγορές φ/β συστημάτων στην Ευρώπη και τον υπόλοιπο κόσμο αναπτύσσονται με γοργούς ρυθμούς και όσον αφορά την ανταγωνιστικότητα συνολικά στον ενεργειακό τομέα. Η ραγδαία και ισχυρή μείωση του κόστους της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας σε συνδυασμό με την αύξηση του κόστους προμήθειας της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο έχει κάνει πιο ελκυστική πια την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά (grid parity – όταν το σταθμισμένο κόστος παραγωγής από ΑΠΕ είναι μικρότερο από το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο). Ωστόσο, στις περισσότερες χώρες η αγορά των φωτοβολταϊκών είναι άμεσα οδηγούμενη και εξαρτώμενη από το εκάστοτε θεσμικό πλαίσιο των χωρών αυτών. Σε κάθε χώρα το πλαίσιο που θα ενσωματώνεται πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ανάγκες της εκάστοτε αγοράς και να εισάγεται διαφορετικά ή να μετατρέπεται αν χρειαστεί στη πορεία αναλόγως, καθώς η πολιτική που ακολουθείται κάθε φορά επιφέρει τεράστιο αντίκτυπο στην ανάπτυξη του κλάδου. Για παράδειγμα, η μείωση της πολιτικής στήριξης οδήγησε σε μείωση ή στασιμότητα της αγοράς των φ/β σε πολλές χώρες όπως η Ελλάδα, η Ιταλία (σχήμα 1.7), το Βέλγιο, η Γαλλία, ενώ η εφαρμογή νέων πολιτικών εγγυημένων τιμών πώλησης (feed-in tariffs-FIT) οδήγησε σε θεαματική αύξηση των αγορών σε χώρες όπως η Κίνα ή η Ιαπωνία. Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζονται τα υπάρχοντα θεσμικά εργαλεία ενίσχυσης των διασυνδεδεμένων φ/β συστημάτων παγκοσμίως και το τμήμα της αγοράς που καταλαμβάνουν αντίστοιχα.



**Σχήμα 1.11** Θεσμικά εργαλεία ενίσχυσης διασυνδεδεμένων φ/β συστημάτων παγκοσμίως για το 2012 Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

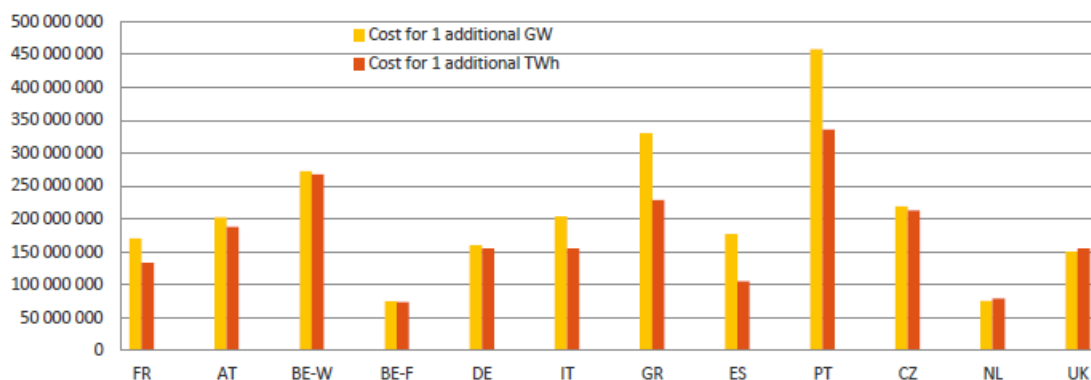
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.11, το θεσμικό πλαίσιο που επικρατεί παγκοσμίως είναι αυτό των εγγυημένων τιμών πώλησης ή FIT's σε συνδυασμό συνήθως με άλλες πρακτικές στήριξης όπως επιδοτήσεις (Grants) ή πιστοποιητικά πράσινης ενέργειας (Green Certificates). Στο πλαίσιο αυτό ο ιδιοκτήτης του φ/β συστήματος είναι υποχρεωμένος να επιστρέφει στο δίκτυο όλη την παραγόμενη ενέργεια και να

ανταμείβεται για κάθε kWh που παράγει στην εγγυημένη τιμή πώλησης (FIT) και για εγγυημένη χρονική περίοδο. Εναλλακτικά, αυτή τη στιγμή εξελίσσονται και άλλα θεσμικά πλαίσια ανάπτυξης. Στα πλαίσια αυτά ανήκουν το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption) το οποίο καταλαμβάνει ένα αξιοσημείωτο ποσοστό της τάξης του 10% και ο συμψηφισμός παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας (net-metering) που αντιστοιχεί σήμερα σε ένα πολύ μικρό ποσοστό (2%). Τέλος, τα διασυνδεδεμένα φ/β συστήματα που μπορούν να είναι αμιγώς ανταγωνιστικά (χωρίς κάποιο πλαίσιο στήριξης) δεν μπορούν να καταμετρηθούν.



**Σχήμα 1.12** Το κόστος των FIT στα διάφορα κράτη της Ευρώπης Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

Στο σχήμα 1.12 παρακολουθούμε το κόστος των FIT's σε διάφορα Ευρωπαϊκά κράτη για το 2013. Παρατηρείται ότι κάποιες χώρες επιβαρύνονται περισσότερο από κάποιες άλλες για να υποστηρίξουν τον θεσμό των εγγυημένων τιμών πώλησης, ενώ το μέσο κόστος στην Ευρώπη για μία παραγόμενη kWh που εγχέεται στο δίκτυο αντιστοιχεί στα 0.35 ευρώ/kWh [4]. Το σχήμα 1.13 παρουσιάζει το κόστος σε ευρώ που πρέπει να πληρώνουν ανά έτος τα ίδια κράτη για την περαιτέρω επιπρόσθετη εγκατάσταση 1 GW (ή 1 TWh) φωτοβολταϊκής ισχύος. Είναι χαρακτηριστικές οι διαφορές που προκύπτουν από τη μία χώρα στην άλλη.



**Σχήμα 1.13** Το κόστος σε ευρώ ανά έτος που επιβαρύνει τα κράτη για την επιπλέον εγκατάσταση 1 GW/ 1 TWh φ/β χωρητικότητας Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

Τα παραπάνω στοιχεία (δηλαδή το αυξημένο κόστος που επιβαρύνει τα κράτη για την υποστήριξη του θεσμού των FIT's) αναδεικνύουν την ανάγκη για την ανεύρεση νέων στρατηγικών και επιχειρηματικών μοντέλων ενίσχυσης της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Είναι επίσης πολύ σημαντικό τα νέα αυτά πλαίσια στήριξης να προσεγγίζουν την ανάπτυξη του κλάδου όχι μόνο από οικονομική αλλά και από ενεργειακή σκοπιά, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ωφέλιμη διαχείριση της ενέργειας, και από την πλευρά του ίδιου του καταναλωτή, με σκοπό την εξοικονόμηση της αλλά και τη δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών ώστε η εξοικονόμηση αυτή να είναι ταυτόχρονα και οικονομικά ελκυστική.

Το 1996, τέθηκε ως προς συζήτηση για πρώτη φορά η απελευθέρωση της ενέργειας αναδεικνύοντας ως κύριο στόχο: την εξασφάλιση προσιτών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για όλους τους Ευρωπαίους καταναλωτές και αντίστοιχα τις επιχειρήσεις, δίνοντας τους ταυτόχρονα τη δυνατότητα να επιλέγουν ελεύθερα τους προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας στη βάση των ανταγωνιστικών προσφορών [5].

Παρόλο που έως τώρα η κατάσταση έχει βελτιωθεί, απέχει πάρα πολύ από τον αρχικό της στόχο. Αυτή η διαδικασία, η οποία ξεκίνησε περίπου 19 χρόνια πριν, θα ολοκληρωθεί παρά μόνο όταν οι καταναλωτές και οι επιχειρήσεις θα είναι ελεύθεροι να επιλέγουν μεταξύ ενός κλασσικού προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας ή τον εαυτό τους· που σημαίνει ότι θα μπορούν να παράγουν και να καταναλώνουν τη δική τους ηλεκτρική ενέργεια, μία διαδικασία που ονομάζεται 'ιδιοκατανάλωση', από τη στιγμή που μία τέτοια επιλογή γίνει βέβαια και ανταγωνιστική συγκριτικά με τον συμβατικό πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας.

Όταν, λοιπόν, το θεσμικό πλαίσιο επιτρέπει την αυτοκατανάλωση της φωτοβολταϊκής παραγωγής, ο ιδιοκτήτης του φωτοβολταϊκού συστήματος δεν είναι υποχρεωμένος να επιστρέφει στο δίκτυο όλη την παραγόμενη ενέργεια (όπως ισχύει στην περίπτωση των FIT's). Αντίθετα, ο ιδιοκτήτης έχει την επιλογή να καταναλώνει επιτόπου το μερίδιο της παραγόμενης ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών του. Τα δύο θεσμικά πλαίσια που αναπτύσσονται αυτή τη στιγμή σε πολλές χώρες της Ευρώπης είναι το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption) και του συμψηφισμού παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας (net-metering) και τα οποία θα συζητηθούν αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.

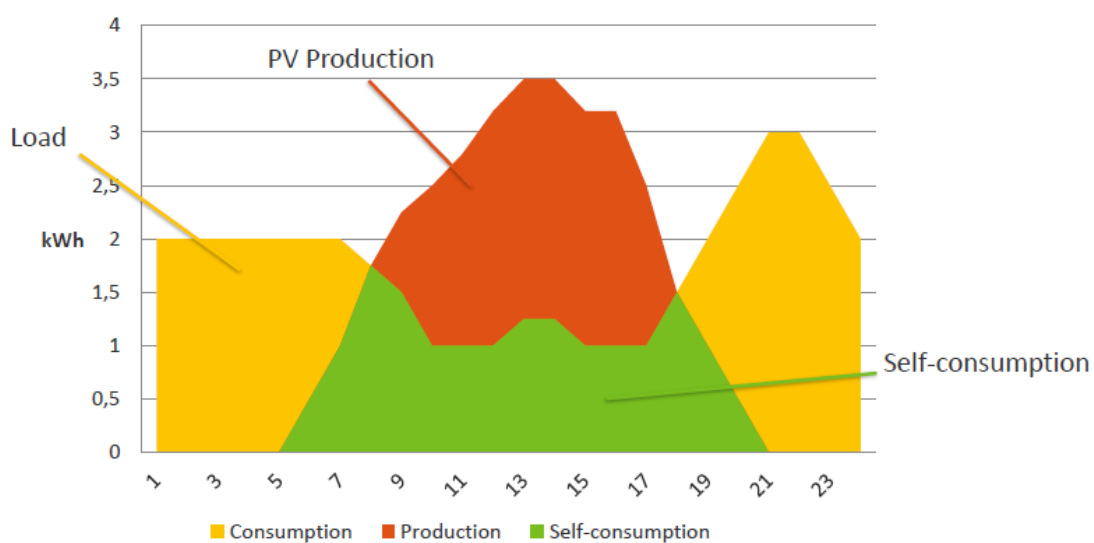
### **1.2.1 Το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης**

Για το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή στη διεθνή βιβλιογραφία κάποιος επακριβής ορισμός, παρά ένα γενικότερο πλαίσιο, το οποίο εξαρτάται και διαμορφώνεται αναλόγως από τις συνθήκες και τα κίνητρα του εκάστοτε εθνικού συστήματος που το ενσωματώνει, εκφράζοντας όμως την εξής κοινή λογική:



**PV Self-consumption:** Η δυνατότητα για κάθε είδους καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας να συνδέει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, αντίστοιχης χωρητικότητας με τη δική του/της κατανάλωση, στο δικό του/της σύστημα ή στο δίκτυο, για την εξυπηρέτηση της δικής του/της ή της επιτόπου κατανάλωσης, ενώ θα λαμβάνει αξία για τη μη καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια η οποία θα εγχέεται στο δίκτυο. [5]

Το σχήμα 1.14 παρουσιάζει τον τρόπο που επιτυγχάνεται η διαδικασία της ιδιοκατανάλωσης για έναν τυπικό οικιακό παραγωγό-καταναλωτή (prosumer).



**Σχήμα 1.14** Η διαδικασία της ιδιοκατανάλωσης της φ/β παραγωγής για ένα τυπικό οικιακό προφίλ

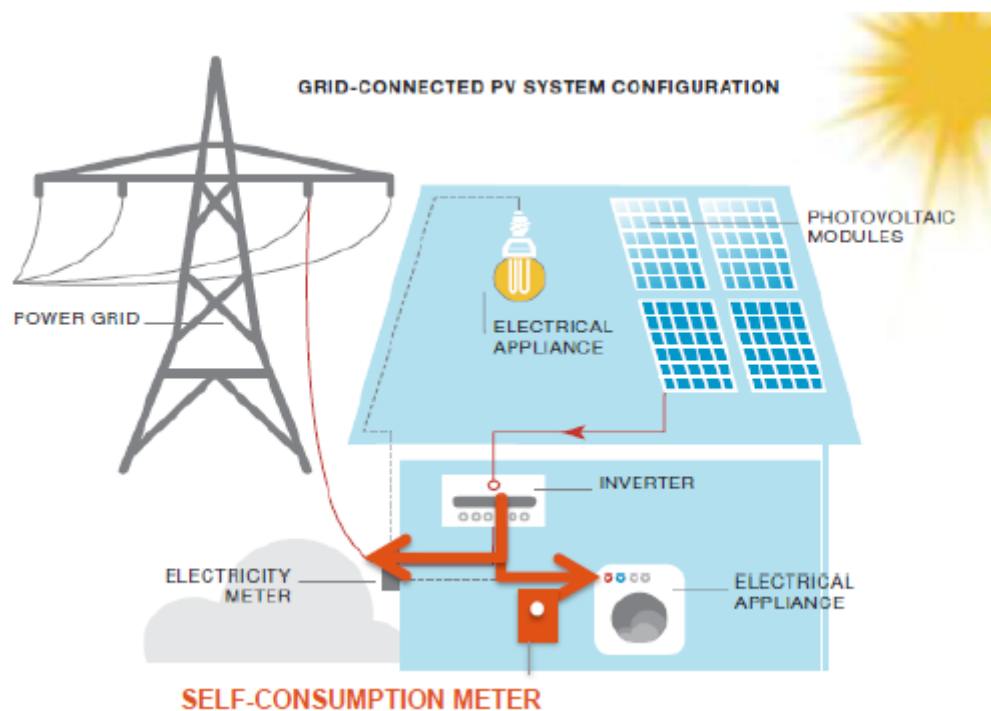
Η πρακτική εφαρμογή του μοντέλου της ιδιοκατανάλωσης πραγματοποιείται συνήθως με δύο διαφορετικούς τρόπους και σε εξάρτηση πάντα με τις εκάστοτε συνθήκες του εθνικού συστήματος που το ενσωματώνει:

- Απευθείας (direct), όπου η κάθε kWh που ιδιοκαταναλώνεται πριμοδοτείται έναντι κάποιας αξίας και μετράται σε πραγματικό χρόνο (Self-consumption premium)
- Έμμεσα (indirect), όπου η εγγυημένη τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ μικρότερη από το κόστος της λιανικής τιμής αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο

Για να γίνει πιο κατανοητός ο διαχωρισμός ανάμεσα σε αυτές τις δύο περιπτώσεις θα εξεταστεί το χαρακτηριστικό παράδειγμα της Γερμανίας. Η εξέλιξη λοιπόν στη Γερμανία, όσον αφορά το να δοθούν κίνητρα για την εφαρμογή της ιδιοκατανάλωσης, ξεκίνησε το 2011 με την πριμοδότηση κάθε kWh που ιδιοκαταναλωνόταν έναντι μίας αξίας (ταρίφας). Η αμοιβή αυτή αυξανόταν σημαντικά αν ο ιδιοκτήτης του φ/β συστήματος επιτύγχανε ρυθμούς ιδιοκατανάλωσης μεγαλύτερους του 30%, δίνοντας

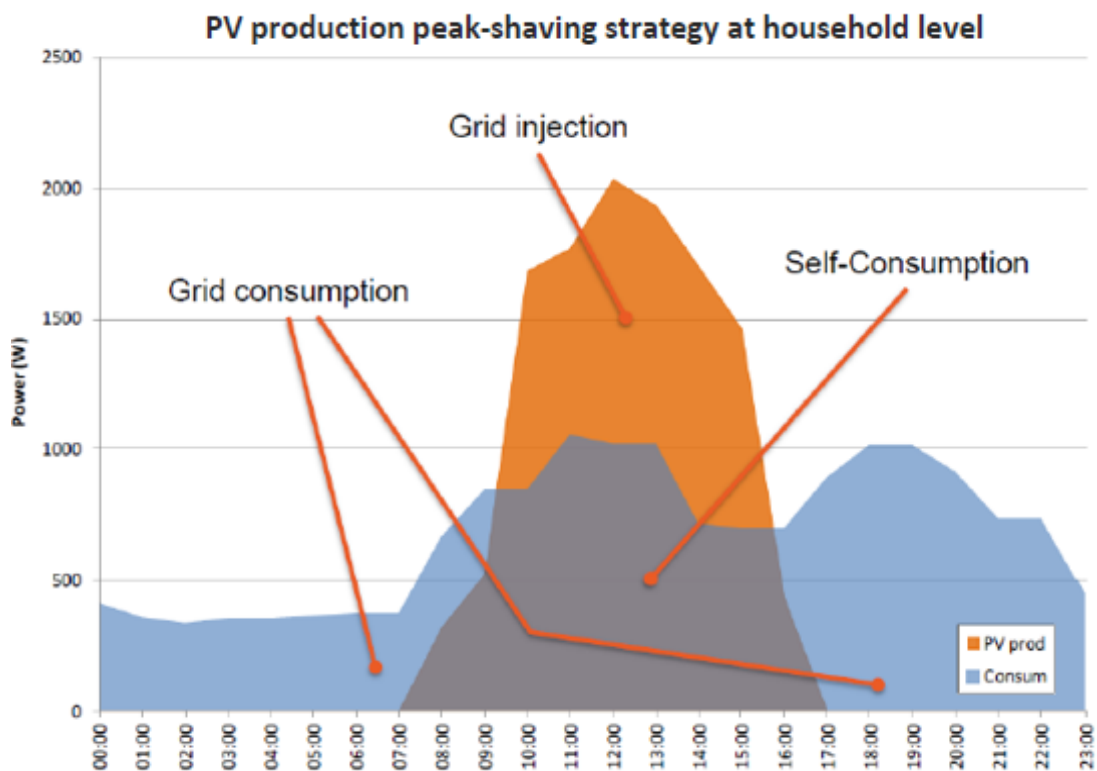
κίνητρο στους καταναλωτές να αυξάνουν την ιδιοκατανάλωση (π.χ. με τη χρήση αποθηκευτικού συστήματος). Από το 2012 και έπειτα, και εξαιτίας του ότι οι τιμές των FIT's "έπεσαν" κάτω από την λιανική τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, οι Γερμανικές αρχές αποφάσισαν να μην αποζημιώνουν την ιδιοκαταναλώμενη kWh. Αντιθέτως, με την λιανική τιμή του ρεύματος να είναι υψηλότερη στον οικιακό τομέα από ότι το κόστος της παραγόμενης kWh από ένα φ/β σύστημα, η ιδιοκατανάλωση τώρα πια γίνεται οικονομικά πιο ελκυστική από ότι η αμοιβή μέσω των FIT's. Ακόμη, με το λεγόμενο νόμο German Renewable Energy Act (EEG) που θεσπίστηκε το 2012 και υποχρέωνε κάθε ιδιοκτήτη φ/β συστήματος να περικόπτει ένα σημαντικό ποσοστό ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο (δες κεφάλαιο 5.1), η ιδιοκατανάλωση έγινε ακόμη πιο ελκυστική συγκριτικά με την πώληση όλης της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο (στην χαμηλή τιμή των FIT's).

Στο σχήμα 1.15 παρουσιάζεται η διαμόρφωση ενός διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος που λειτουργεί υπό τον θεσμό της ιδιοκατανάλωσης για το παράδειγμα μίας οικίας.



**Σχήμα 1.15** Η διαμόρφωση ενός διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος που λειτουργεί υπό τον θεσμό της ιδιοκατανάλωσης

Ακόμη, στα οφέλη του θεσμού της ιδιοκατανάλωσης προστίθενται η ανακούφιση του δικτύου διανομής από τη μείωση των αιχμών τις ώρες όπου μεγιστοποιείται η φ/β παραγωγή και την αποτροπή επιστροφής στο δίκτυο μεγάλων ποσοτήτων ισχύος (βοηθώντας ουσιαστικά και στην καταπολέμηση του φαινομένου ανύψωσης της τάσης, κεφάλαιο 5). Έτσι, αν σχεδιαστεί ορθά, η ιδιοκατανάλωση μπορεί να βοηθήσει στο προγραμματισμό και τη λειτουργία των δικτύων διανομής.



**Σχήμα 1.16** Η στρατηγική μείωσης της αιχμής της φ/β παραγωγής σε οικιακό επίπεδο με τη βοήθεια της ιδιοκατανάλωσης

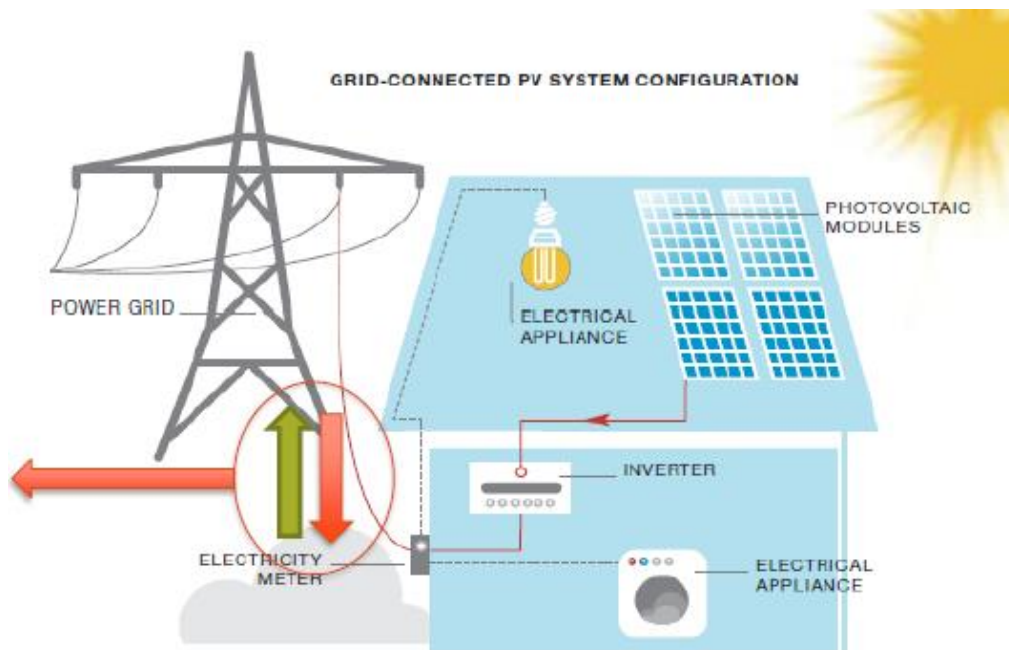
Πιο αναλυτικά, αρχικά μέσω της ιδιοκατανάλωσης μειώνεται το ποσό της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο τις μεσημεριανές ώρες (μεγιστοποίηση φ/β παραγωγής, σχήμα 1.16). Επιπλέον, αν συνδυαστεί και με άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη διεσπαρμένη παραγωγή (όπως αποθηκευτικά συστήματα, αντλίες θερμότητας κλπ.), η ιδιοκατανάλωση μπορεί να μειώσει αισθητά και τις αιχμές που παρουσιάζει η κατανάλωση τις απογευματινές ώρες. Σε αυτή τη λογική λοιπόν μπορούν αποφευχθούν κόστη για την ενίσχυση του δικτύου εξαιτίας της έντονης φωτοβολταϊκής διεύθυνσης.

Το χάσμα της ενεργειακής απόδοσης είναι μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις της ενεργειακής πολιτικής της Ε.Ε. Ο θεσμός της ιδιοκατανάλωσης λοιπόν μπορεί να συμβάλει σημαντικά στο πρόβλημα της ενεργειακής απόδοσης αφού επιβραβεύει άμεσα τις προσπάθειες των καταναλωτών για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Στα πλεονεκτήματα της ιδιοκατανάλωσης, λοιπόν, πρέπει να συγκαταλεχθεί το κίνητρο που δίνεται στους καταναλωτές να εξοικονομούν ενέργεια αλλάζοντας την ενεργειακή τους συμπεριφορά και αυξάνοντας την ενεργειακή τους αποδοτικότητα. Ταυτόχρονα, επιταχύνει την αγορά να αφομοιώσει εφαρμογές ενεργειακής βελτιστοποίησης όπως εφαρμογές παρακολούθησης της κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο για το 'έξυπνο' σπίτι, εγκατάσταση αποθηκευτικών συστημάτων κλπ. (real-time monitoring, in-house display applications). Ως εκ τούτου, με την υποστήριξη της ιδιοκατανάλωσης σαφέστερα από ό, τι συμβαίνει σήμερα, η ΕΕ μπορεί να επιταχύνει την υλοποίηση των στόχων της ενεργειακής αποδοτικότητας.

## 1.2.2 Συμψηφισμός παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας

Ο συμψηφισμός παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας (γνωστός με τον όρο net-metering) αποτελεί ένα από τα εργαλεία προώθησης της αυτοπαραγωγής και ιδιοκατανάλωσης με ΑΠΕ και εφαρμόζεται σε διάφορες χώρες, κυρίως για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών. Το net-metering επιτρέπει στον καταναλωτή να καλύψει ένα σημαντικό μέρος των ιδιοκαταναλώσεών του, ενώ παράλληλα του δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει το δίκτυο για έμμεση αποθήκευση της πράσινης ενέργειας [6].

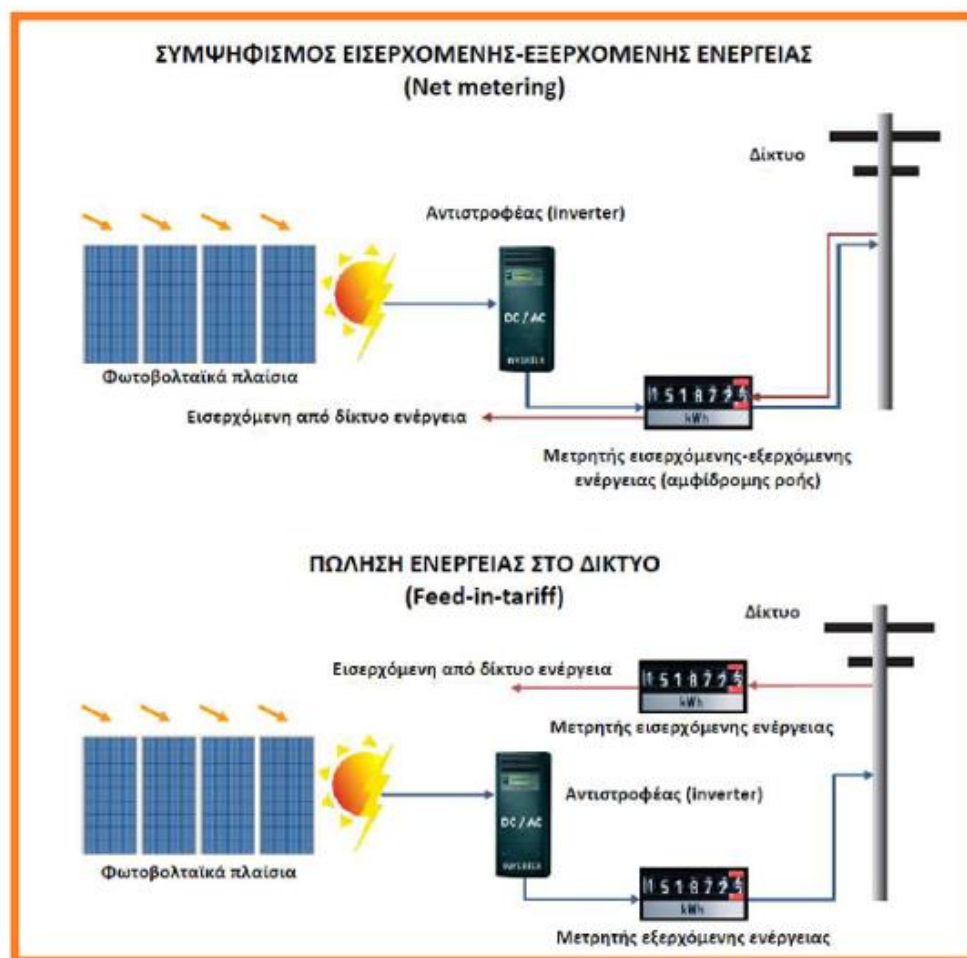
Ο όρος “net” προκύπτει από το γεγονός ότι η χρέωση/πίστωση του καταναλωτή αφορά στη διαφορά μεταξύ καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας σε μία ορισμένη χρονική περίοδο. Η περίοδος αυτή είναι συνήθως ο εκάστοτε κύκλος καταμέτρησης και τιμολόγησης της καταναλισκόμενης ενέργειας (για την Ελλάδα ένα έτος). Αν υπάρχει περίσσεια ενέργειας, αυτή συνήθως δεν χάνεται για τον καταναλωτή αλλά πιστώνεται λογιστικά για μια ορισμένη χρονική περίοδο (συνήθως ένα χρόνο αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που η λογιστική πίστωση γίνεται για 36-48 μήνες) οπότε και γίνεται η τελική εκκαθάριση. Στο σχήμα 1.17 παρουσιάζεται η διαμόρφωση ενός οικιακού διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος που λειτουργεί υπό το θεσμό του net-metering.



**Σχήμα 1.17** Η διαμόρφωση ενός διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος που λειτουργεί υπό το θεσμό του net-metering

Η τυχόν περίσσεια, όταν δεν εγχέεται στο δίκτυο χωρίς αποζημίωση (όπως είναι η αρχική πρόβλεψη της ισχύουσας στην Ελλάδα νομοθεσίας), μπορεί να τιμολογηθεί σε τιμές χονδρικής (αποφευγόμενο κόστος) ή/και λιανικής. Όταν η περίσσεια τιμολογείται έναντι κάποιου τιμήματος κοντά στην τιμή λιανικής, υπάρχει σε κάποιες

περιπτώσεις και κάποιο κόστος χρήσης δικτύου για τον καταναλωτή για τις υπηρεσίες έμμεσης αποθήκευσης που προσφέρει ο διαχειριστής δικτύου. Στον αντίποδα, στις ΗΠΑ, για λόγους προώθησης των ΑΠΕ, δεν επιτρεπόταν μέχρι πρόσφατα στους διαχειριστές να επιβάλλουν τέτοια τέλη στους χρήστες του net-metering (μοναδική εξαίρεση αποτελεί η Αριζόνα που θα επιβάλλει από 1/1/2014 τέλη χρήσης δικτύου 0,7 \$/kW). Δεδομένου ότι οι περισσότεροι μετρητές είναι αμφίδρομοι, η εφαρμογή του net-metering δεν απαιτεί συνήθως σημαντικά έξοδα από πλευράς του καταναλωτή, αφού δεν απαιτείται πρακτικά η εγκατάσταση και δεύτερου μετρητή (όπως ισχύει στην περίπτωση της καταμέτρησης και πώλησης της παραγόμενης πράσινης όταν χρησιμοποιούνται ως εργαλείο ενίσχυσης οι εγγυημένες τιμές πώλησης (feed-in tariffs), όπως ισχύει εδώ και χρόνια και στη χώρα μας, σχήμα 1.17.

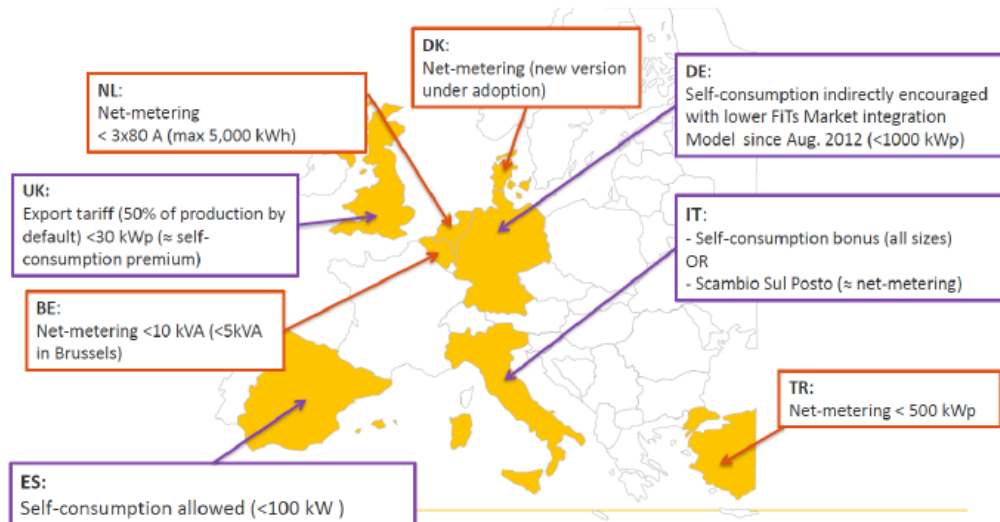


**Σχήμα 1.18** Οι διαφορές μεταξύ των προσεγγίσεων του net-metering και των εγγυημένων τιμών πώλησης (FIT)

Το 2012, το net-metering αφορούσε μόνο στο 2% των φωτοβολταϊκών συστημάτων που εγκαταστάθηκαν διεθνώς (σχήμα 1.11). Ο λόγος για τη μικρή συμβολή του net-metering έχει να κάνει με το γεγονός ότι στις περισσότερες χώρες η λιανική τιμή του ρεύματος είναι συνήθως χαμηλότερη από το κόστος παραγωγής της ηλιακής κιλοβατώρας και άρα δεν υπάρχει κίνητρο για τον καταναλωτή. Το net-metering αναπτύχθηκε λοιπόν εκεί όπου είτε υπάρχει κάποια επιπλέον επιδότηση για την

εγκατάσταση (περίπτωση ΗΠΑ) είτε η λιανική τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αρκετά υψηλή (περίπτωση Δανίας και Ολλανδίας). Σήμερα που το κόστος της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας έχει μειωθεί σημαντικά και οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αυξηθεί σε σχέση με το πρόσφατο παρελθόν, το net-metering αρχίζει να γίνεται πλέον ελκυστικό και για άλλες χώρες, όπως για παράδειγμα η Ελλάδα. Το σχήμα 1.18 περιγράφει τις διαφορές μεταξύ των προσεγγίσεων του θεσμού των FIT's και του net-metering αντιστοίχως .

Στο σχήμα 1.19 παρουσιάζεται μία συγκεντρωτική επισκόπηση των Ευρωπαϊκών χωρών που ενσωματώνουν, σήμερα, θεσμικά εργαλεία ενίσχυσης τα οποία επιτρέπουν την αυτοκατανάλωση της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας (net-metering/self-consumption model). Όπως παρατηρείται και από το σχήμα, σε κάποιες χώρες, υιοθετούνται μηχανισμοί που ακολουθούν αμιγώς το θεσμό του net-metering (όπως το Βέλγιο, η Δανία και η Ολλανδία), ενώ άλλες χώρες προάγουν μηχανισμούς που αξιοποιούν το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption schemes) ή ένα συνδυασμό και των δύο. Για παράδειγμα, στην Ισπανία ακολουθείται το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης από το 2011 κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις και για συστήματα που αφορούν εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη των 100 kW. Στην Ιταλία, και από το 2012, ο ιδιοκτήτης του φ/β συστήματος μπορεί είτε να αξιοποιήσει το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης στη περίπτωση του self-consumption premium (όπως και στο Ηνωμένο Βασίλειο) είτε μία παραλλαγμένη εφαρμογή net-metering (Scambio Sul Posto).



**Σχήμα 1.19** Επισκόπηση των Ευρωπαϊκών χωρών που επιτρέπουν την ιδιοκατανάλωση της φ/β παραγωγής Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

Σε γενικές γραμμές, η πρόσφατη εμπειρία δείχνει πως ο θεσμός του net-metering αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για να ξεκινήσει μία αγορά (να ενσωματώνει το θεσμό της αυτοκατανάλωσης της φ/β παραγωγής) ή για να αναπτύσσει ένα συγκεκριμένο τομέα ο οποίος αφορά περιορισμένη εγκατεστημένη ισχύ. Με την αυξανόμενη φωτοβολταϊκή διείσδυση, όμως, τα θεσμικά πλαίσια που επιτρέπουν το

net-metering ακολουθούνται συνήθως και από αναγκαστικές μετατροπές/ενισχύσεις του δικτύου διανομής, οι οποίες κοστίζουν και αποτελούν μακροπρόθεσμο εμπόδιο στην ανάπτυξη της αγοράς. Το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption) από την άλλη μεριά προλαμβάνει (όπως είδαμε στη προηγούμενη ενότητα) περιορισμούς όσον αφορά το δίκτυο διανομής και παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη μειώνοντας γενικότερα τα διάφορα κόστη στήριξης της αγοράς των φ/β και διευκολύνοντας τη μετάβαση από την εποχή των FIT's.

### 1.3 Η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας

Σε κάθε ηλεκτρικό δίκτυο, είτε ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο ή αυτόνομο (μεγάλης ή μικρής εγκατεστημένης ισχύος), πρέπει να πληρείται το ισοζύγιο ισχύος, που σημαίνει, η απορροφούμενη ενέργεια από τους καταναλωτές ρεύματος πρέπει να είναι η ίδια με εκείνη που παράγεται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (θερμικά, υδροηλεκτρικά, κλπ.). Η χρονική μεταβολή του φορτίου είναι σχετικά προβλέψιμη με τρόπο ώστε να είναι προσαρμοσμένη σε αυτήν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλές φορές και 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.

Ακόμη, αύξηση της συμμετοχής της ηλεκτρικής ενέργειας 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 παρουσιάζει διακυμάνσεις, καθώς η τελευταία εξαρτάται από την φυσική ροή του ποταμού (μεγάλη κατά τη διάρκεια των πλημμυρών και χαμηλή κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων). Αντίστοιχα, 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 ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 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 αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας 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.

Ο διαχειριστής του δικτύου αντιμετωπίζει λοιπόν δύο ακραία προβλήματα:

- Τη βέλτιστη ενσωμάτωση στο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές στις περιόδους χαμηλού φορτίου (π.χ. προβλήματα σταθερότητας εξαιτίας της υψηλής φ/β διεύθυνσης)

- Τη διαθεσιμότητα ισχύος και της ενέργειας σε σύντομο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια των περιόδων υψηλού φορτίου, και ιδίως σε φορτία αιχμής.

Η ανάγκη, λοιπόν, για την αποθήκευση μέρους της ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ γίνεται όλο και πιο επιτακτική, καθώς η αναλογία της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ αρχίζει να πλησιάζει κάποια όρια πέρα από τα οποία προκαλεί προβλήματα στο δίκτυο. Για παράδειγμα, ορισμένες περιοχές στην κεντρική Ευρώπη έχουν ήδη φτάσει στο όριο, έτσι ώστε η περαιτέρω ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας μπορεί να γίνει μόνο αν συνδυαστεί με την αποθήκευση. Εν κατακλείδι, όταν μία από τις μονάδες που συμμετέχουν στην παραγωγή ενέργειας παράγει ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή μεταβλητότητα, όπως στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών, 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 ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές είναι μέσω της εγκατάστασης ενός ηλεκτρικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

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 του
- Λειτουργία σε stand- alone εφαρμογές
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω οικολογικών μέσων
- Βελτίωση της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του συστήματος, παρέχοντας εφεδρική δύναμη

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

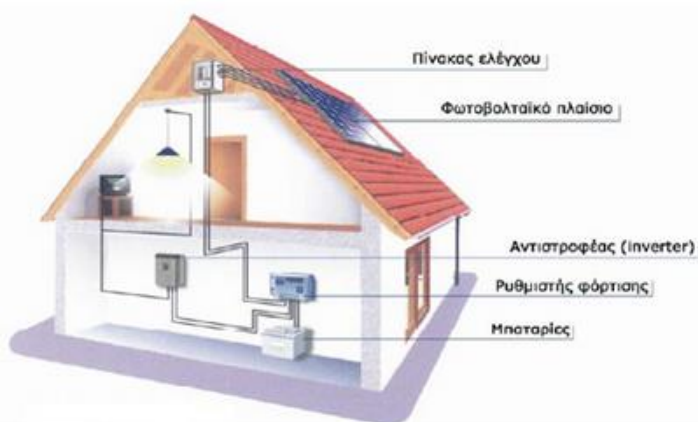
Η αποθήκευση ενέργειας παρέχει επίσης ευελιξία του δικτύου, όσον αφορά την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων. Ως πηγή της παραγωγής, η αποθήκευση μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους και επενδύσεων κεφαλαίου. Παραδείγματα αποτελούν η στρεφόμενη εφεδρεία για την προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, η ρύθμιση συχνότητας για stand-alone μονάδες, αναβάλλοντας την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής. 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.

### 1.3.1 Αποθήκευση ενέργειας στα αυτόνομα φ/β συστήματα

Ο σχεδιασμός ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος (stand-alone PV system) στηρίζεται στη μέση ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος και στη μέση ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται οι συλλέκτες στην επιλεγμένη κρίσιμη περίοδο λειτουργίας του (π.χ. ένα θερινό ή χειμερινό μήνα, μια εποχή του έτους ή και ολόκληρο το έτος). Όμως οι μέσες τιμές είναι στατιστικά μεγέθη που μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από ενδεχόμενες πραγματικές συνθήκες [7]. Επίσης, ένα αξιόπιστο σύστημα πρέπει να παρέχει επαρκή ηλεκτρική ενέργεια για την ικανοποίηση της ζήτησης και στα χρονικά διαστήματα που δεν υπάρχει αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία. Προφανώς, τα διαστήματα αυτά είναι κυρίως οι νυχτερινές ώρες, οι συνεφιασμένες ημέρες και οι χρονικές αιχμές τις κατανάλωσης. Η αυτονομία των συστημάτων αυτών λοιπόν απαιτεί μπαταρίες, στις οποίες θα αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και θα χρησιμοποιείται κατά τις βραδινές ώρες ή σε περιόδους όπου η ηλιακή ακτινοβολία δε θα είναι επαρκής για να καλύψει τις ανάγκες του συστήματος, σχήμα 1.20 [8].



**Σχήμα 1.20** Τα επιμέρους συστατικά ενός αυτόνομου φ/β συστήματος

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να προνοείται να αποθηκεύεται, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις και κυρίως το μέγιστο πλήθος των πιθανών συνεχών ημερών συνεφιάς, τις αιχμές της κατανάλωσης και το βαθμό αξιοπιστίας που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ή όχι βοηθητικών ενεργειακών πηγών. Συνήθως από τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα ζητείται να εξασφαλίζουν μια αυτοδυναμία τουλάχιστον 3 έως 10 ημερών περίπου [7].

Σε ειδικές περιπτώσεις, η φωτοβολταϊκή ενέργεια μπορεί, με νέα μετατροπή, να αποθηκευτεί σε μη ηλεκτρική μορφή. Π.χ. να κινήσει ηλεκτρικές αντλίες που

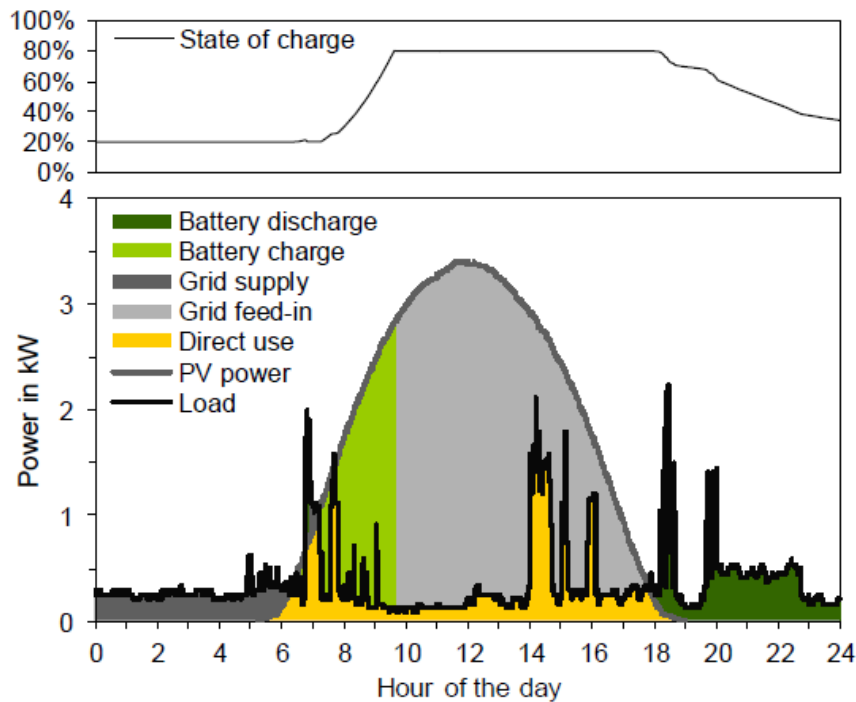
μεταφέρουν νερό σε υπερυψωμένες δεξαμενές, από όπου στη συνέχεια, με την πτώση του νερού, παράγεται πάλι ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Επίσης, μπορεί να ηλεκτρολύσει νερό και να παράγει υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύεται σε αεριοφυλάκια και χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως καύσιμο σε μικρούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα γίνεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

### **1.3.2 Αποθήκευση ενέργειας στα διασυνδεδεμένα φ/β συστήματα**

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία εγκαθίστανται από οικιακούς/εμπορικούς καταναλωτές και λειτουργούν υπό τον θεσμό της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption), σχήμα 1.15. Και σε αυτή τη περίπτωση είναι επιτακτική η χρήση των αποθηκευτικών συστημάτων. Εδώ λοιπόν το αποθηκευτικό σύστημα συμπεριφέρεται σαν ένα βοηθητικό ποσό ενέργειας για να εξαλείψει την αναντιστοιχία μεταξύ της διαθέσιμης από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ισχύος και της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος. Ακόμη, η ισχύς που παράγει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή συστοιχία κάθε στιγμή ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που προσκρούει σε αυτή (και είναι μηδέν το βράδυ). Στα περισσότερα ηλεκτρικά φορτία χρειάζεται να αποδίδεται ένα σταθερό ποσό ισχύος. Η μπαταρία παρέχει ισχύ όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν παράγει τίποτα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν παράγει λιγότερη ισχύ από όση απαιτεί το ηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, η μπαταρία, απορροφά την περίσσεια ισχύος από την φωτοβολταϊκή συστοιχία όταν αυτή παράγει περισσότερη ισχύ από ότι το φορτίο απαιτεί, αυξάνοντας ουσιαστικά τον ρυθμό της ιδιοκατανάλωσης. Για να γίνει πιο αντιληπτός ο τρόπος αξιοποίησης των αποθηκευτικών συστημάτων στα διασυνδεδεμένα φ/β συστήματα παρουσιάζεται το παράδειγμα του σχήματος 1.21, και το οποίο αφορά το ισοζύγιο ισχύος (σε kW) στη χρονική διάρκεια μίας ημέρας για έναν οικιακό καταναλωτή με φ/β σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 4 kWp και μπαταρία χωρητικότητας 4 kWh.

Το πλεόνασμα της ενέργειας που εμφανίζεται τις πρωινές ώρες, πέρα από το ποσό δηλαδή της ενέργειας που ιδιοκαταναλώνεται επιτόπου (Direct use), αποθηκεύεται στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές (Battery charge), όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.21, αυξάνοντας την ιδιοκατανάλωση και αποτρέποντας την έγχυση μεγάλων ποσοτήτων ισχύος στο δίκτυο. Ωστόσο, η ενέργεια που δεν μπορεί να αποθηκευτεί (λόγω των μέγιστων/ελάχιστων επιτρεπόμενων ορίων της κατάστασης φόρτισης-SOC των μπαταριών) εγχέεται αναγκαστικά στο δίκτυο (Grid feed-in). Μετά το δύση του ηλίου, το φορτίο καλύπτει τις απαιτήσεις του χρησιμοποιώντας την ενέργεια που είχε αποθηκευτεί στη μπαταρία κατά τη διάρκεια της ημέρας (Battery discharge), επιτυγχάνοντας περαιτέρω αυτονομία αλλά και αποφόρτωση του δικτύου τις ώρες αιχμής του φορτίου. Τις ώρες που η μπαταρία είναι άδεια ή πλήρως φορτισμένη, η ενέργεια που χρειάζεται για να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου αγοράζεται από το

δίκτυο (στην λιανική τιμή) ή αντίστοιχα όταν υπάρχει περίσσεια πωλείται στο δίκτυο (στην εγγυημένη τιμή πώλησης).



**Σχήμα 1.21** Το ισοζύγιο ισχύος σε kW και η κατάσταση φόρτισης (SOC) για ένα διασυνδεδεμένο φ/β σύστημα που τελεί υπό το θεσμό της ιδιοκατανάλωσης (για οικιακό καταναλωτή) στη χρονική διάρκεια μίας ημέρας

Φυσικά, αυτή η διαδικασία (δηλαδή η αξιοποίηση των αποθηκευτικών συστημάτων για την αύξηση της ιδιοκατανάλωσης) έχει νόημα μόνο για τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία λειτουργούν υπό το θεσμό της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption) και όπου η ιδιοκαταναλώμενη ενέργεια μετράται σε πραγματικό χρόνο, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 1.3. Αντίθετα, στο θεσμικό πλαίσιο του net-metering το δίκτυο χρησιμοποιείται σαν έμμεση αποθήκευση ενέργειας, επομένως η χρήση των αποθηκευτικών συστημάτων δεν έχει απολύτως κανένα νόημα.

## 1.4 Διάρθρωση της διπλωματικής

Σκοπός και στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των διασυνδεδεμένων φ/β συστημάτων τα οποία ενσωματώνονται στο θεσμικό πλαίσιο της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption scheme), έχουν την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας για περαιτέρω αύξηση της ιδιοκατανάλωσης και αφορούν κυρίως οικιακούς/εμπορικούς καταναλωτές της Χαμηλής Τάσης (ΧΤ).

Όπως είδαμε, στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** πραγματοποιείται εισαγωγή στην φωτοβολταϊκή τεχνολογία και στην εξέλιξη της τα τελευταία χρόνια. Στη συνέχεια, αναλύονται τα

θεσμικά εργαλεία ενίσχυσης που επιτρέπουν την αυτοκατανάλωση της φ/β παραγωγής, παρουσιάζονται τα οφέλη τους και εξετάζεται η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας τόσο στα αυτόνομα όσο και στα διασυνδεδεμένα φ/β συστήματα που αποτελούν και αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** μελετάται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και εξετάζεται η θεωρία των φ/β συστημάτων, ενώ στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** δίνονται ορισμοί και αναλύονται κάποια μεγέθη που σχετίζονται με τις μπαταρίες και τη λειτουργία τους. Η αναφορά στα μεγέθη αυτά είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να μπορεί ο αναγνώστης να παρακολουθήσει το περιεχόμενο των επόμενων κεφαλαίων. Ακόμη, μελετάται η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά των μπαταριών μολύβδου-οξέος, οι οποίες είναι μέχρι και σήμερα οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μπαταρίες στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** πραγματοποιείται μελέτη διαστασιολόγησης των οικιακών/εμπορικών διασυνδεδεμένων φ/β συστημάτων με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, αναπτύσσοντας και προσομοιώνοντας ένα πρόγραμμα στο Matlab. Αφού εισαχθούν πραγματικά ωριαία δεδομένα παραγωγής και φορτίου και επιλεχθεί η χωρητικότητα των μπαταριών, το πρόγραμμα προσομοιώνει τη λειτουργία του συνολικού συστήματος για ένα χρόνο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε συνδυασμό με την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται, μας δίνουν μία σαφή εικόνα για τα ενεργειακά αλλά και τα τεchnο-οικονομικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών και τη λειτουργία τους υπό τον θεσμό της ιδιοκατανάλωσης.

Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** εξετάζεται η ενσωμάτωση των παραπάνω συστημάτων στο δίκτυο χαμηλής τάσης και μελετάται το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης λόγω τη υψηλής φ/β διείσδυσης στα δίκτυα διανομής. Για την επίτευξη της παραπάνω διαδικασίας αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης στο γραφικό περιβάλλον Simulink του Matlab. Το μοντέλο αυτό δέχεται σαν εισόδους δεδομένα φ/β παραγωγής και οικιακού φορτίου υψηλής χρονικής ανάλυσης. Ταυτόχρονα, αφού επιλεχθεί η χωρητικότητα των μπαταριών, προσομοιώνεται η λειτουργία του συνολικού συστήματος παρουσιάζοντας διάφορες στρατηγικές ελέγχου του αποθηκευτικού συστήματος. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η ομαλή ενσωμάτωση των φ/β συστημάτων στα δίκτυα διανομής, αλλά και η καταπολέμηση του φαινομένου ανύψωσης της τάσης (με τη χρήση αποθηκευτικών συστημάτων), προσομοιώνοντας και μελετώντας ένα απλουστευμένο δίκτυο XT και λαμβάνοντας υπόψη διάφορα σενάρια παραγωγής και ζήτησης.

Τέλος, στο **6<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναφέρονται τα σημαντικότερα θέματα που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή, συζητούνται τα συμπεράσματα καθώς επίσης και οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη στο μέλλον.

## Κεφάλαιο 2

### Φωτοβολταϊκά συστήματα

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η μελέτη και η ανάλυση της θεωρίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια και στις δυνατότητες αξιοποίησης της. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, η λειτουργία του και θα εξεταστούν τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά. Ένα πολύ σημαντικό συστατικό των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελούν οι αντιστροφείς και οι οποίοι θα συζητηθούν εκτενώς. Τέλος, θα εξεταστούν οι επιπτώσεις αλλά και οι προϋποθέσεις της σύνδεσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στο δίκτυο.

#### 2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Μέσω της ηλιακής ενέργειας καθορίζεται η θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης και παρέχεται 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  $5800^{\circ}\text{K}$ . 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 [9].

Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτινών 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. Για παράδειγμα, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε η ένταση των ακτινών 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)

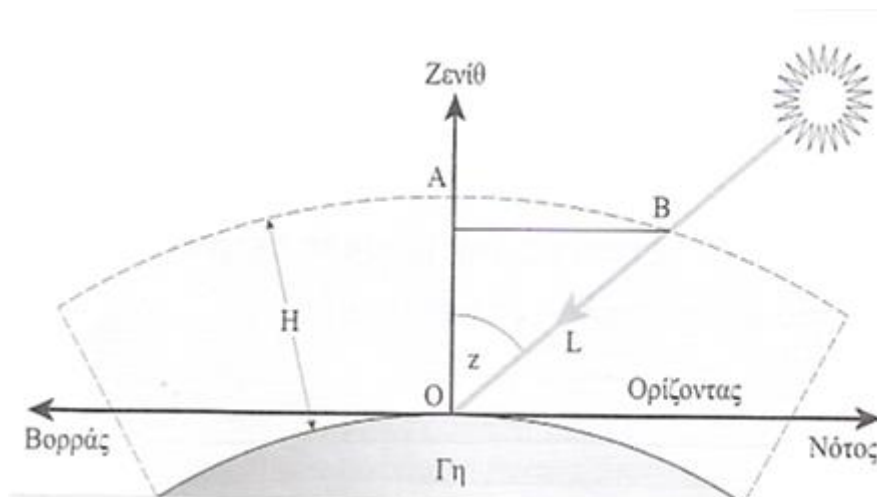
Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα). Τελικώς, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ή σ' έναν αισθητήρα, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και την

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)

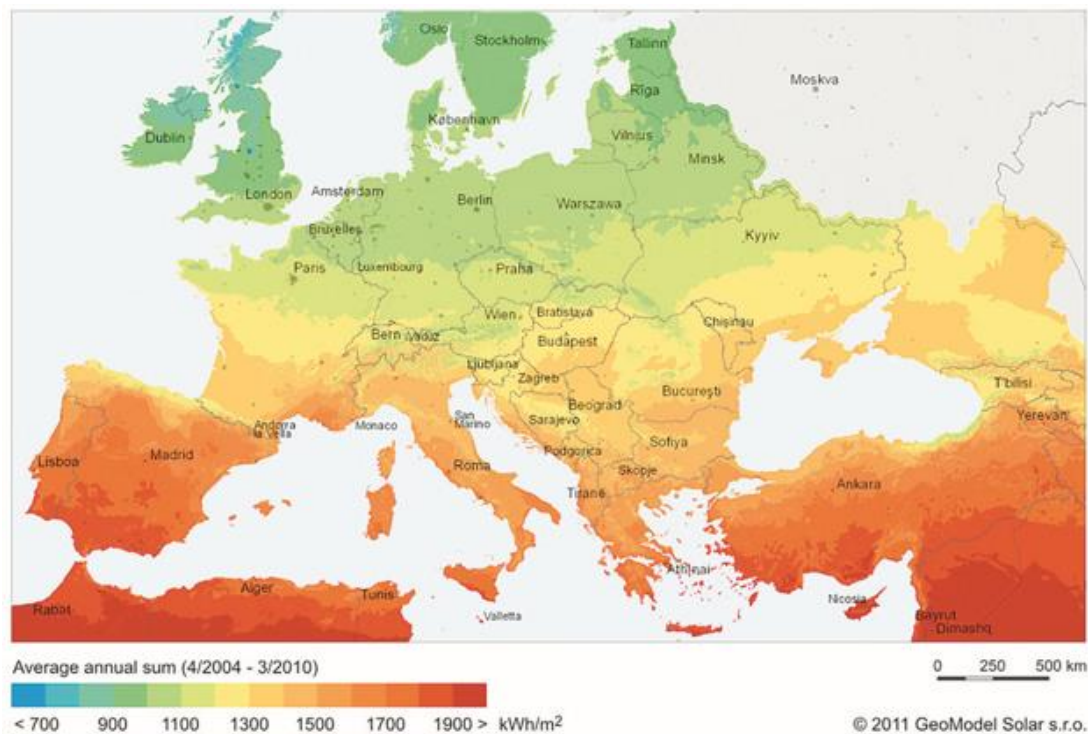
Κατά την ανατολή του ήλιου, η ζενίθια γωνία του ήλιου ( $z=90^\circ -EL$ , όπου  $EL$  (Elevation) το ύψος του ήλιου) είναι  $z=90^\circ$  (σχήμα 2.1) και επομένως η ολική οριζόντια πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας  $G$ , καθορίζεται, κατά κύριο λόγο από τη διάχυτη συνιστώσα,  $D$ . Καθώς το ύψος του ήλιου αυξάνει, η απευθείας κάθετη ακτινοβολία, αυξάνει μέχρι το ηλιακό μεσημέρι, μετά από το οποίο ελαττώνεται, περίπου κατά συμμετρικό τρόπο [10].



**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 [11] ανάλογα με την τοποθεσία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2. 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 ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2.2 Χάρτης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας των χωρών της Ευρώπης

## 2.2 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 ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκ του προχείρου, όμως, σύγκριση του κόστους παραγωγής φωτοβολταϊκής και συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας αποκρύπτει την πραγματική κατάσταση. Σύμφωνα μ' αυτήν, το ήδη επιβαρυνμένο περιβάλλον καθώς και η δυσοίωνη 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 κίλοβατώρας, 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].

### 2.3 Λειτουργία φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά (φ/β) συστήματα διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στο αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ, με πλεονεκτήματα που τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά στη νέα απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα στα πλαίσια της “πράσινης” ανάπτυξης που προωθείται παγκοσμίως. Τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα αυτά είναι τα εξής:

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή
- Μηδενική ρύπανση και πλήρης απουσία αποβλήτων ή άλλων άχρηστων παραπροϊόντων
- Αθόρυβη λειτουργία
- Υψηλή αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών συστημάτων
- Ελάχιστες απαιτήσεις επίβλεψης και συντήρησης
- Αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες (ισχυρούς άνεμους, ακραία χαλαζόπτωση κλπ.)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (τουλάχιστον 25 χρόνια)
- Σχετικά απλή μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες
- Εύκολη επέκταση της υπάρχουσας εγκατάστασης
- Δυνατότητα ανεξαρτησίας από τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής για απομακρυσμένες περιοχές (αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα)
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών, όσον αφορά την ισχύ. Από μερικά Watt μέχρι μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μερικών MW

Φυσικά, τα φ/β συστήματα έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία όμως στο σύνολο τους δεν είναι ικανά να αναιρέσουν τα πλεονεκτήματα, και να αποτελέσουν τροχοπέδη για την περαιτέρω ανάπτυξη τους:

- Υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, το οποίο οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο υψηλό κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων και πολύ λιγότερο στο



κόστος τις υπόλοιπης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός)

- Σε εφαρμογές που απαιτείται η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα), αυτή γίνεται με μη αποδοτικό τρόπο, με περιορισμένες δυνατότητες, ενώ και το κόστος των συσσωρευτών είναι υψηλό.
- Λόγω της μικρής πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, απαιτείται η χρησιμοποίηση μεγάλων σχετικά επιφανειών.
- Εξάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις καιρικές συνθήκες, που αποτελούν έναν απρόβλεπτο παράγοντα, επιτρέποντας μόνο εκτιμήσεις σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα (συνήθως ετήσια).

### 2.3.1 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 δισελενιοϊνδιούχος χαλκός, χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Το στοιχείο του κρυσταλλικού πυριτίου ωστόσο παραμένει το πιο διαδεδομένο φωτοβολταϊκό στοιχείο, σχήμα 2.3.

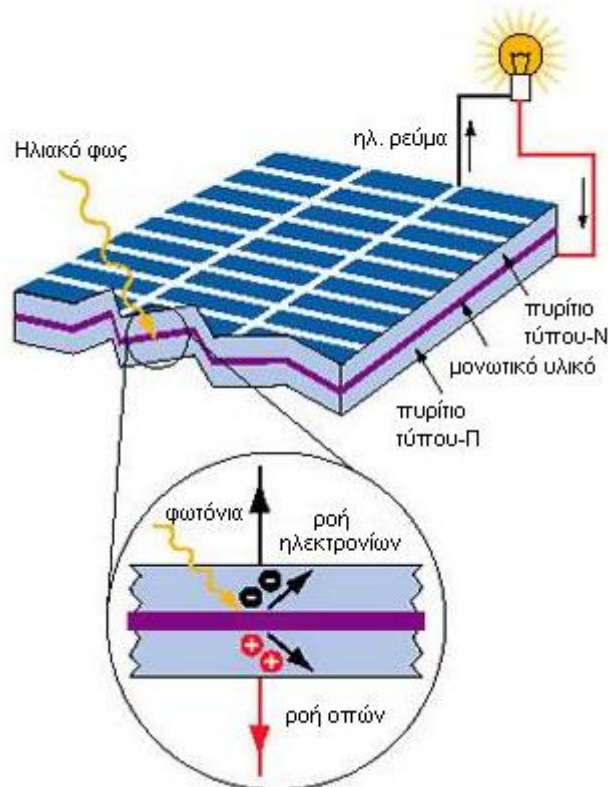


Σχήμα 2.3 Φωτοβολταϊκό στοιχείο (cell)

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 πενήκονταετία. Η τεχνογνωσία 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 ηλεκτρική ενέργεια.



**Σχήμα 2.4** Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η ηλιακή ενέργεια, προσπίπτοντας στη δίοδο p-n, διαχωρίζει οπές και ηλεκτρόνια δημιουργώντας διαφορά δυναμικού

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 ή μεγαλύτερη 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 2.4). 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 [12],[13].

Ανάλογα με και με το υλικό κατασκευής ή την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται, ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί να δώσει συνεχή τάση μέχρι 0,5-1,0 V και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά cm<sup>2</sup> της επιφάνειάς του. Η συνήθης ισχύς ενός κυττάρου είναι λίγο μικρότερη από 3 Watt, συνεπώς για να έχουμε μία χρήσιμη ποσότητα ισχύος, πρέπει να καταφύγουμε σε εν παραλλήλω και εν σειρά συνδεσμολογίες των φ/β στοιχείων. Το φ/β πλαίσιο (module), αποτελείται από έναν αριθμό προκαλωδιωμένων ηλιακών κελιών σε σειρά, πακεταρισμένων σε ανθεκτικά περιβλήματα. Ένα τυπικό πλαίσιο έχει 36 κελιά σε σειρά, και συχνά ονομάζεται πλαίσιο των 12 V, αν και συχνά έχει δυνατότητα να παράγει μεγαλύτερες τάσεις. Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή τους, το κόστος των φ/β πλαισίων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος των ηλιακών στοιχείων που περιέχουν. Τυπικές τιμές ισχύος εξόδου για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι 10-250 W<sub>p</sub>.



**Σχήμα 2.5** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Περισσότερα του ενός φ/β πλαισίου μπορούν να στηριχτούν στην ίδια μεταλλική κατασκευή σχηματίζοντας ένα φ/β πανέλο (panel). Περισσότερα του ενός πανέλα σχηματίζουν τη φ/β συστοιχία (array), όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 2.6** Φωτοβολταϊκό πανέλο (αριστερά) και φωτοβολταϊκή συστοιχία (δεξιά)

Για να παράγει μία συστοιχία φ/β στοιχείων ισχύ πρέπει να υπάρχει επαρκής ηλιακή ακτινοβολία, επομένως σε πολλές περιπτώσεις στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπάρχουν και μέσα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (ηλεκτρικοί συσσωρευτές). Οι συσσωρευτές επιτρέπουν την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας τις ώρες ακτινοβολίας, και την κατανάλωση αυτής κατά τις νυχτερινές ώρες ή σε διαστήματα συννεφιάς. Επίσης τα φορτία που τροφοδοτούνται από τη φ/β γεννήτρια απαιτούν εναλλασσόμενη τάση τροφοδότησης, οπότε είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός αντιστροφέα, που θα μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Ο αντιστροφέας αυτός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση της φ/β εγκατάστασης με το δίκτυο, ώστε να παρέχει σε αυτό την περίσσεια ισχύος. Όπως θα αναφερθεί και σε επόμενες ενότητες το ρόλο του αντιστροφέα αναλαμβάνει ο inverter.

### 2.3.2 Η επαφή p-n

Στη συνέχεια, γίνεται μία σύντομη αναφορά στην αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τα άτομα των ημιαγωγικών 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.

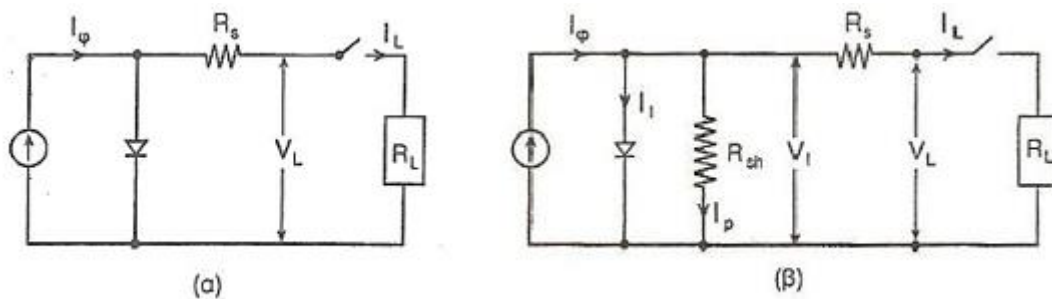
Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, η οποία ονομάζεται ζώνη εξάντλησης φορέων ή περιοχή αραίωσης. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα παραμένουν στη περιοχή τύπου-n και τα αρνητικά στην περιοχή τύπου-p. Έτσι, δημιουργείται ένα εσωτερικό των ημιαγωγών ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο αντισταθμίζεται 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.[12]

### 2.3.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φ/β στοιχείου

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου δίνεται στο σχήμα 2.7 (α) (απλοποιημένο) και στο σχήμα 2.7 (β) (πλήρες ισοδύναμο). Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο. Η πηγή εντάσεως παράγει το “φωτορεύμα” (photocurrent),  $I_{\phi}$ , το οποίο είναι ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. 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 2.7** (α) Το απλοποιημένο και (β) το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του φ/β στοιχείου

Στο σχήμα 2.7 (β) παρατηρούμε τις εξής αντιστάσεις:

- Παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση διαρροής,  $R_{sh}$  (Shunt resistance)

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 στοιχεία είναι μεγαλύτερη των  $10^3 \Omega$ .

- Σειριακή αντίσταση,  $R_s$  (Series resistance)

Η συγκεκριμένη αντίσταση αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή κατά τη δίοδο 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  $\phi/\beta$  στοιχεία, βρίσκονται στο εύρος 0,1  $\Omega$  έως 0,3  $\Omega$ .

### 2.3.4 Η καμπύλη V-I ενός $\phi/\beta$ στοιχείου

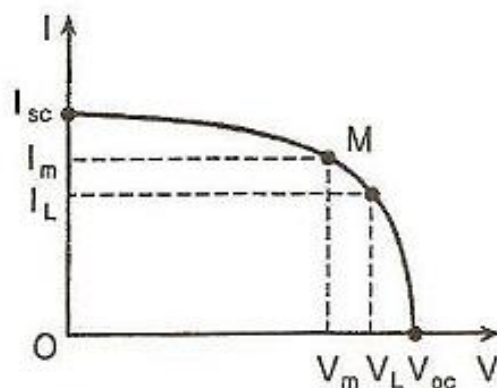
Πειραματικά προκύπτει ότι για μία ορισμένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, η χαρακτηριστική Τάσεως-Εντάσεως (V-I) ενός  $\phi/\beta$  στοιχείου έχει τη μορφή του σχήματος 2.8, όπου διακρίνονται:

$V_{oc}$ , η τάση ανοιχτοκυκλώματος,

$I_{sc}$ , η ένταση βραχυκυκλώσεως,

$V_m$  και  $I_m$ , η τάση και η ένταση της μέγιστης ισχύος  $P_m = V_m \cdot I_m$ , το σημείο στο οποίο η παραγόμενη ισχύς γίνεται μέγιστη, είναι γνωστό ως το γόνατο της V-I χαρακτηριστικής καμπύλης, MPP (Maximum Power Point).

$V_L$  και  $I_L$ , η τάση και η ένταση τυχόντος σημείου στο οποίο το  $\phi/\beta$  στοιχείο λειτουργεί, όταν παράγει ένταση  $I_L$  και ισχύ:  $P_L = V_L \cdot I_L$ .



**Σχήμα 2.8** Η χαρακτηριστική Τάσεως-Εντάσεως (V-I)

Όταν το  $\phi/\beta$  στοιχείο είναι ανοιχτοκυκλωμένο (δε συνδέεται φορτίο στα άκρα του), αναπτύσσεται μεταξύ των δύο του όψεων ένα αντίθετο ρεύμα, που αντισταθμίζει το φωτορεύμα, ενώ στα άκρα του εμφανίζεται η “η τάση ανοιχτού κυκλώματος”  $V_{oc}$ . Το  $\phi/\beta$  στοιχείο όμως παρουσιάζει κάποιες απώλειες, οι οποίες όπως αναφέραμε εκφράζονται με την παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Όταν στα άκρα του φ/β στοιχείου συνδεθεί μία αντίσταση (φορτίο  $R_L$ ), διαπιστώνεται ότι το φ/β στοιχείο παρουσιάζει πρόσθετες απώλειες, ενώ η τάση του μειώνεται, όσο η τιμή της  $R_L$  μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή εκφράζεται μέσω της αντίστασης σειράς  $R_s$ . Επομένως, με βάση το πλήρες ισοδύναμο του σχήματος 2.7 (β), αν  $V_L$  και  $I_L$  η τάση και ένταση στα άκρα του φορτίου  $R_L$ , η λειτουργία του φ/β στοιχείου θα εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_L = I_\phi - I_0 * \left[ \exp \left( V_L + R_s * \frac{I_L}{\mu} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_s * I_L}{R_{sh}}$$

Όπου,  $I_0$  το “ανάστροφο ρεύμα κόρου”,

$$\mu = \gamma * K * \frac{T}{e} = \text{μία σταθερά, με :}$$

$\gamma = 0$  συντελεστής ποιότητας της διόδου (συνήθως  $\gamma=1/2$ ),

$K = \eta$  σταθερά Boltzman,

$T = \eta$  απόλυτη θερμοκρασία του φ/β στοιχείου,

$e =$  το φορτίο του ηλεκτρονίου

Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα μπορεί να απλοποιηθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα αν ληφθεί υπόψη ότι οι απώλειες χωρίς φορτίο είναι πολύ μικρές, δηλαδή αγνοηθεί η  $R_{sh}$ , σχήμα 2.7 (α). [12]

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

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

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

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 ( $\eta$  %) των φωτοβολταϊκών στοιχείων η οποία δίνεται από το λόγο της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος προς την προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ επί όλης της επιφάνειας. Είναι δηλαδή

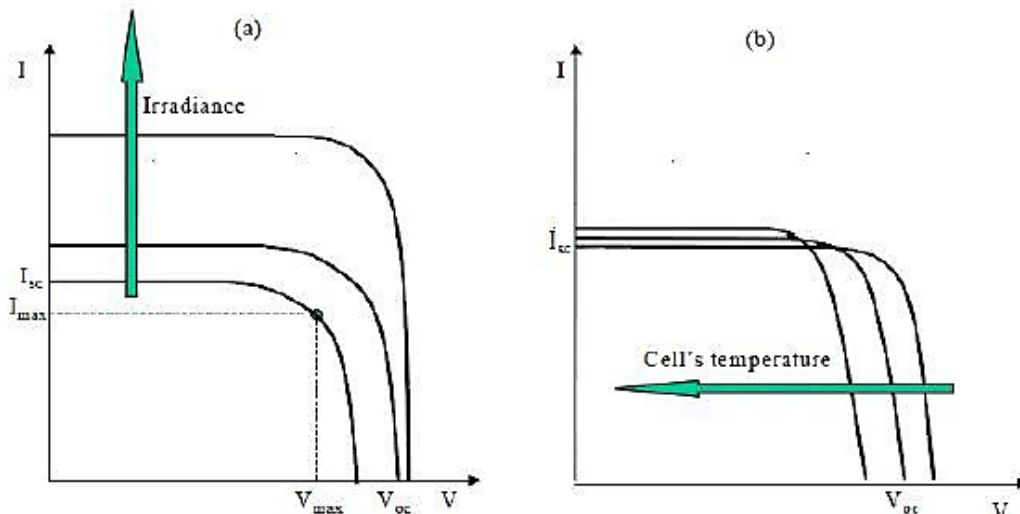
$$\eta_c = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m * V_m}{P_{in}} = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{P_{in}}$$

Όπου,  $P_{in} = E * S$  (ισχύς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός φ/β στοιχείου εμβαδού  $S$  με πυκνότητα ισχύος ίση με  $E$ ). [12]

### 2.3.5 Επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών στη λειτουργία των φ/β

Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο σχήμα 2.9 είναι εμφανής η εξάρτηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης από τις μεταβολές των δύο παραπάνω μεγεθών.

Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 2.9 (α) φαίνεται ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνει λογαριθμικά με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η τάση βραχυκύκλωσης γραμμικά. Στο σχήμα 2.9 (β) παρατηρούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως κύριο αποτέλεσμα τη γραμμική μείωση της τάσεως ανοιχτού κυκλώματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται πολύ λίγο. Η φορά των βελών στα παραπάνω σχήματα υποδεικνύει την αύξηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας αντίστοιχα. [12]



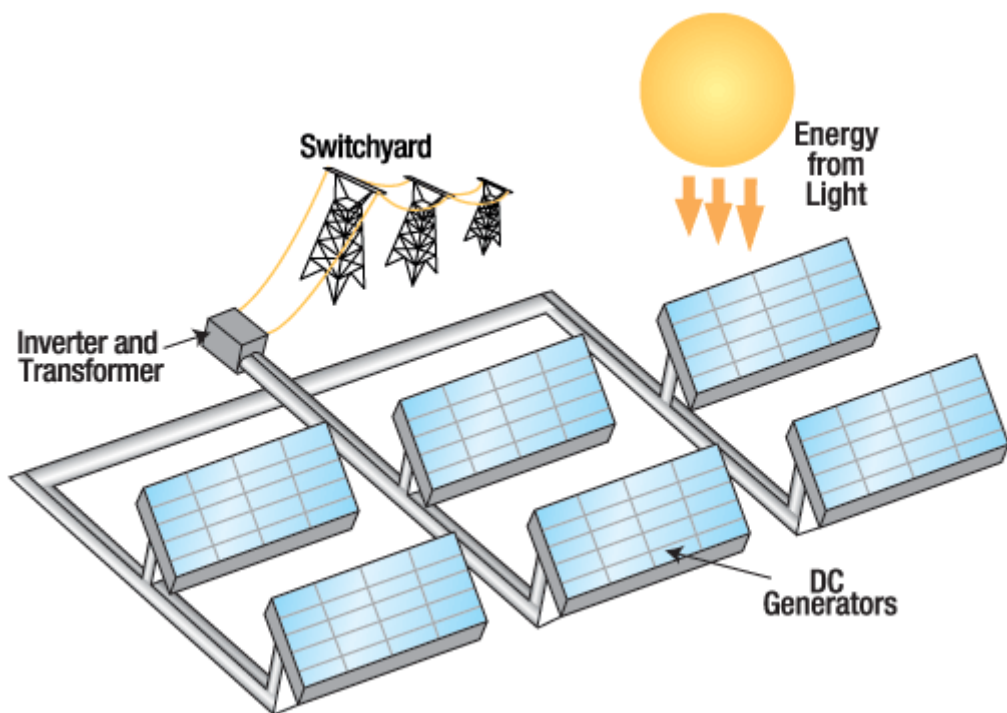
**Σχήμα 2.9** Επίδραση (α) της ακτινοβολίας και (β) της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική  $V-I$  του ηλιακού κυττάρου

Συνεπώς παρατηρούμε ότι με την αύξηση της ακτινοβολίας αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια, ενώ αντίθετα η αύξηση της θερμοκρασίας των πλαισίων επηρεάζει αρνητικά την παραγωγή.



## 2.4 Αντιστροφείς

Ως γνωστόν η ισχύς που παράγεται από τα φ/β πλαίσια είναι σε DC μορφή. Προκειμένου η ισχύς αυτή να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις ανάγκες μας μέσω της υπάρχουσας δομής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να μετατραπεί σε AC. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω κατάλληλων διατάξεων που ονομάζονται αντιστροφείς (inverters).



**Σχήμα 2.10** Σχηματική αναπαράσταση φ/β πάρκου με αντιστροφείς για επικοινωνία με το υπάρχον 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.

### 2.4.1 Κατηγορίες αντιστροφέων

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, είναι ειδικοί μετατροπείς, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν την ενέργεια από μια μπαταρία, να διαχειρίζονται τη φόρτιση της μπαταρίας μέσω ενός ενσωματωμένου φορτιστή, και να εγγέουν 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.



**Σχήμα 2.11** Φωτοβολταϊκός αντιστροφέας της εταιρίας SMA [14]

Οι κύριες κατηγορίες αντιστροφέων 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.

## 2.4.2 Χαρακτηριστικά και τρόπος λειτουργίας φ/β 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 ασφάλειες για την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και να 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.

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 αντιστροφέων 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 συναρτήσει 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. Καμία 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%).

### 2.4.3 Εφαρμογές αντιστροφέων

Σήμερα υπάρχουν διάφορες εφαρμογές των διατάξεων αντιστροφέων DC/AC.

Ενδεικτικά αναφέρουμε τα εξής:

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

## 2.5 Επιπτώσεις της σύνδεσης φωτοβολταϊκών στο δίκτυο

Τα σύγχρονα συστήματα διανομής ενέργειας είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδέχονται την συνολική ισχύ που χρειάζονται στους μετασχηματιστές (Μ/Σ) και να τη διανέμουν στους καταναλωτές. Η ροή ισχύος λοιπόν τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος ήταν πάντα από τα υψηλότερα στα χαμηλότερα επίπεδα τάσης (“συγκεντρωμένη” παραγωγή). Σήμερα με τη σημαντική διείσδυση των ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής (δισπαρμένη παραγωγή) η ροή ισχύος μπορεί να αναστραφεί. Η αλλαγή στη ροή της ενεργού και της άεργου ισχύος που προκαλείται από τη δισπαρμένη παραγωγή, έχει σημαντικές τεχνικές αλλά και οικονομικές επιπτώσεις στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα εξετάζονται κυρίως τα τεχνικά ζητήματα της σύνδεσης και της λειτουργίας της δισπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής, ενώ οι περισσότερες χώρες έχουν αναπτύξει κριτήρια και πρακτικές για να αντιμετωπίζουν τέτοιες περιπτώσεις. Γενικά, είναι σημαντικό να βεβαιώνεται ότι η δισπαρμένη παραγωγή δεν επηρεάζει την ποιότητα της ισχύος που παρέχεται στους καταναλωτές, θεωρώντας τις γεννήτριες σαν “αρνητικά” φορτία. Όσον αφορά τις οικονομικές επιπτώσεις τώρα αρχίζουν να μελετώνται και να γίνονται πιο εμφανής σε

εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως σε απελευθερωμένες αγορές, όπου και υπάρχει διαχωρισμός ανάμεσα στην παραγωγή και την διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.

### **2.5.1 Αργές μεταβολές τάσης**

Αν μία φ/β γεννήτρια συνδεθεί στο άκρο μιας γραμμής, τότε υπάρχει περίπτωση να αλλάξει η ροή ισχύος στο κύκλωμα, οπότε να αλλάξουν και οι τάσεις στους κόμβους. Καθώς στα φωτοβολταϊκά η παραγωγή ενέργειας σχετίζεται άμεσα με τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και μεταβάλλεται ανάλογα με αυτές, μπορεί να προκληθεί έντονη διακύμανση της τάσης στα σημεία σύνδεσης. Η χειρότερη δυνατή περίπτωση εμφανίζεται όταν το φορτίο βρίσκεται στην ελάχιστη τιμή του και η παραγωγή της γεννήτριας είναι στην μέγιστη δυνατή. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει το ενδεχόμενο να ανυψωθεί η τάση πάνω από τα επιθυμητά επίπεδα.. Με αυτό τον τρόπο προκαλούνται αργές μεταβολές της τάσης, οι οποίες είναι μεταβολές της τάσης που αφορούν την μόνιμη κατάσταση, οφείλονται σε αντίστοιχες διακυμάνσεις του φορτίου ή της παραγωγής και εκφράζονται μέσα από τιμές δεκαλέπτων. Το φαινόμενο αυτό θα μελετηθεί αναλυτικά και θα προσομοιωθεί και στο κεφάλαιο 5.

### **2.5.2 Αύξηση της ισχύος ή στάθμης βραχυκύκλωσης**

Η ισχύς ή στάθμη βραχυκύκλωσης είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους των δικτύων διανομής και σχετίζεται άμεσα με την επιλογή του εξοπλισμού και τις κατασκευές του δικτύου. Μέσω της στάθμης βραχυκύκλωσης εκφράζεται η αντοχή σε ρεύματα βραχυκύκλωσης και δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερβαίνεται το όριο της (για παράδειγμα η ισχύς βραχυκύκλωσης  $S_k=250\text{MVA}$  για το δίκτυο Μέσης Τάσης (MT) των 20kV). Ουσιαστικά το μέγεθος αυτό φανερώνει την σθεναρότητα και την ακαμψία του δικτύου. Όσο μικρότερη λοιπόν είναι η στάθμη βραχυκύκλωσης τόσο πιο ευαίσθητο είναι το δίκτυο σε μεταβολές της τάσης, καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ισοδύναμη αντίσταση του δικτύου στον αντίστοιχο ζυγό. Η διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ) γενικώς συνεισφέρει στα βραχυκυκλώματα και συνεπώς στην αύξηση της ισχύος βραχυκύκλωσης. Ωστόσο, όσον αφορά τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες, η συνεισφορά στα σφάλματα είναι περιορισμένη, καθώς τα ηλεκτρονικά ισχύος μέσω των οποίων συνδέονται αυτές στο δίκτυο, αποτρέπουν την παροχή ρευμάτων κατά πολύ μεγαλύτερων των ονομαστικών τους. Στις αστικές περιοχές όπου η στάθμη βραχυκύκλωσης πλησιάζει τα όρια των διακοπών, η αύξηση της μπορεί να είναι ένα σημαντικό εμπόδιο στην περαιτέρω ανάπτυξη της ΔΠ.

### 2.5.3 Ποιότητα ισχύος

Οι παράμετροι που θεωρούνται σημαντικές σχετικά με την ποιότητα ισχύος είναι:

- Οι μεταβολές της τάσης
- Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης

Ανάλογα με την περίπτωση η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί τόσο να βελτιώσει όσο και να επιδεινώσει την ποιότητα της τάσης που παρέχεται στους καταναλωτές του δικτύου. Ταχείες μεταβολές της τάσης είναι οποιεσδήποτε μεταβολές της RMS τιμής της τάσης, που συμβαίνουν σε χρονική διάρκεια ενός κύκλου έως και αρκετών δευτερολέπτων. Συνήθως συμβαίνουν λόγω χειρισμών στις εγκαταστάσεις παραγωγής ή και λόγω μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων. Η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να προκαλέσει μεταβατικές μεταβολές στην τάση αν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές ρεύματος κατά την ζεύξη και την απόζευξη των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Για παράδειγμα, η αποσύνδεση της γεννήτριας σε πλήρες φορτίο μπορεί να προκαλέσει πτώση τάσης. Ωστόσο, συγκεκριμένα στις φ/β γεννήτριας αυτό δε συμβαίνει συχνά καθώς κατά την ζεύξη ή απόζευξη από το δίκτυο λειτουργούν με μικρή ισχύ εξόδου. Συνήθως, οι φ/β γεννήτριες συνδέονται στο δίκτυο λίγο πριν την ανατολή του ηλίου και αποσυνδέονται λίγο μετά τη δύση του.

Μία άλλη διαταραχή που μπορεί να προκληθεί στην ποιότητα ισχύος είναι το flicker. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την οπτική ενόχληση λόγω διακυμάνσεων στην φωτεινότητα των λαμπτήρων πυράκτωσης. Η μεταβλητότητα της τάσης τροφοδοσίας, η οποία σχετίζεται άμεσα με την σύνδεση/αποσύνδεση της ΔΠ, οφείλεται συνήθως στις εκπομπές flicker. Η λειτουργία της ΔΠ μπορεί να προκαλέσει μεταβολές της τάσης στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ), αλλά και σε άλλα σημεία του δικτύου, παρενοχλώντας τους καταναλωτές λόγω του flicker. [49]

Ακόμη, καθώς η σύνδεση των εγκαταστάσεων της ΔΠ στο δίκτυο πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, μπορούν να εγχυθούν στο δίκτυο αρμονικές συνιστώσες, που έχουν ως αποτέλεσμα την ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος. Η βασική αρμονική συνιστώσα ονομάζεται θεμελιώδης (συχνότητας 50 Hz), ενώ οι συνιστώσες των οποίων η συχνότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους ονομάζονται αρμονικές. Αυτές προκαλούν προβλήματα τόσο στο ίδιο το δίκτυο, όσο και σε εγκαταστάσεις που συνδέονται με αυτό ή και ηλεκτρονικές συσκευές. Πρέπει λοιπόν να περιορίζεται η εκπομπή τους στα επιτρεπτά όρια, ώστε να μην παρενοχλείται η λειτουργία διαφόρων στοιχείων του δικτύου. Μέτρο της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης αποτελεί ο *συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης* (THD). Ο συντελεστής THD δίνεται από τη σχέση:

$$THD(\%) = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2},$$

όπου  $U_1$  είναι η RMS τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης (50 Hz), και  $U_h$  η RMS τιμή της αρμονικής τάξης  $h$  (συχνότητας  $hf_1$ ). Η τοποθέτηση φίλτρων είναι η συνηθέστερη μέθοδος εξάλειψής αρμονικών.

## 2.5.4 Ευστάθεια συστήματος

Στόχος της διεσπαρμένης παραγωγής είναι συνήθως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, συνεπώς δεν ενδιαφέρει η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Ωστόσο, στην περίπτωση σφάλματος όπου θα μειωθεί η τάση του δικτύου, και η φ/β γεννήτρια βγει εκτός λειτουργίας, το μόνο που θα χαθεί θα είναι μία βραχύχρονη περίοδος παραγωγής. Συνεπώς, όταν το σύστημα επιστρέψει στην ομαλή κατάσταση λειτουργίας η φ/β γεννήτρια θα επανασυνδεθεί αυτόματα.

Αντίθετα, αν η φ/β γεννήτρια θεωρηθεί ως πάροχος υποστήριξης για το σύστημα, η μεταβατική ευστάθεια στην περίπτωση αυτή γίνεται αξιοσημείωτη. Για παράδειγμα, αν μια μεγάλη μονάδα παραγωγής βγει εκτός λειτουργίας, θα υπάρξει πρόβλημα υποσυχνότητας στο σύστημα. Εάν τώρα λόγω της υποσυχνότητας αποσυνδεθεί και η φ/β γεννήτρια το πρόβλημα θα γίνει εντονότερο. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια σε κάποιες χώρες έχει αρχίσει να υπάρχει απαίτηση από τη ΔΠ να μην αποσυνδέεται αμέσως σε περίπτωση σφάλματος αλλά να μπορεί να συνεισφέρει στην αποκατάσταση του δικτύου. Αυτή η ικανότητα της φ/β γεννήτριας να μπορεί να παραμένει συνδεδεμένη σε περίπτωση σφάλματος και συνεπώς σε περίπτωση βύθισης της τάσης ονομάζεται Fault-Ride-Through (FRT). Η απαιτούμενη συμπεριφορά από τη ΔΠ εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες, το μέγεθος της βύθισης της τάσης καθώς επίσης και από τη διάρκεια της.

## 2.5.5 Μέσα προστασίας συστήματος

Η αμφίδρομη ροή ισχύος που οφείλεται στη διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στη λειτουργία των μέσων προστασίας του συστήματος, προκαλώντας ενδεχομένως ένα εσφαλμένο άνοιγμα διακόπτη. Οι προστασίες των φ/β γεννητριών θα πρέπει να συνεργάζονται με τις προστασίες του δικτύου, ώστε τα σφάλματα να γίνονται άμεσα αντιληπτά και να αντιμετωπίζονται το συντομότερο δυνατό. Ένα ζήτημα μεγάλης σημασίας αποτελεί το φαινόμενο της απομονωμένης λειτουργίας (νησιδοποίησης). Πρόκειται για μία ανεπιθύμητη κατάσταση στην οποία ένα τμήμα του δικτύου λειτουργεί απομονωμένα από το υπόλοιπο δίκτυο, δηλαδή συνεχίζει να ηλεκτροδοτείται παρότι το υπόλοιπο δίκτυο είναι ανενεργό. Στην περίπτωση αυτή προκαλούνται διακυμάνσεις στην τάση και τη συχνότητα με την οποία τροφοδοτούνται οι καταναλωτές. Επίσης υπάρχει σοβαρός κίνδυνος ασφάλειας για το προσωπικό που εργάζεται σε κάποιο τμήμα του δικτύου όπου υπάρχει νησιδοποίηση, καθώς θεωρείται ότι το τμήμα αυτό είναι ανενεργό μαζί με το υπόλοιπο δίκτυο, ενώ στην πραγματικότητα τροφοδοτείται με τάση. Επομένως είναι ιδιαίτερα σημαντικό η εγκατάσταση ΔΠ να ανιχνεύει τη νησιδοποίηση και να αποσυνδέεται. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης ρύθμισης των ηλεκτρονόμων που ανιχνεύουν την τάση και τη συχνότητα του δικτύου για τυχόν αντικανονικές συνθήκες λειτουργίας.



Όσον αφορά, την προστασία των φ/β γεννητριών από εσωτερικά σφάλματα, το ρεύμα σφάλματος που ρέει από το δίκτυο διανομής χρησιμοποιείται για την εύρεση του σφάλματος, και οι συνηθισμένες τεχνικές προστασίας είναι επαρκείς, οπότε πρόκειται για αρκετά εύκολη υπόθεση. Η προστασία του δικτύου διανομής ενώ βρίσκεται σε σφάλμα από το ρεύμα σφάλματος των γεννητριών είναι αρκετά πιο δύσκολη υπόθεση. Όπως προαναφέρθηκε, οι φ/β γεννήτριες συνεισφέρουν στο σφάλμα σχεδόν με τον ονομαστικό τους ρεύμα, οπότε οι προστασίες τους δεν είναι εύκολο να το αντιληφθούν και να αποσυνδέσουν τη γεννήτρια. Έτσι, είναι απαραίτητη η λειτουργία των προστασιών του δικτύου για την εκκαθάριση των σφαλμάτων και την απομόνωση της γεννήτριας.

### **2.5.6 Επάρκεια δικτύου**

Η επάρκεια του δικτύου αποτελεί βασική προϋπόθεση προκειμένου να συνδεθεί μία εγκατάσταση ΔΠ σε αυτό. Η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο μπορεί να επιφέρει υπερφόρτιση των υφιστάμενων γραμμών, υποσταθμών και μετασχηματιστών, οπότε πρέπει να προηγηθεί κατάλληλη μελέτη, ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση και η ομαλή λειτουργία μιας εγκατάστασης ΔΠ. [15]

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα πως η εισαγωγή των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο θα πρέπει να συμβαδίζει με ορισμένους κανόνες, που αποσκοπούν στην παροχή ενέργειας αποδεκτής ποιότητας προς τους καταναλωτές. Οι κανόνες αυτοί στηρίζονται σε διεθνή αλλά πολλές φορές και τοπικά πρότυπα που καθορίζουν τις προϋποθέσεις διασύνδεσης. Η σύνδεση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στο δίκτυο πρέπει να ακολουθεί αυτά τα πρότυπα, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους υπόλοιπους καταναλωτές, και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ δικτύου και εγκαταστάσεων. Ωστόσο, από όλες τις προαναφερθείσες διαταραχές στην τάση και την ποιότητα ισχύος, στη παρούσα διπλωματική εργασία, αφού μελετηθεί θα αντιμετωπιστεί το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης μέσω της διαδικασίας της αποθήκευσης της περίσσειας ισχύος σε συσσωρευτές (κεφάλαιο 5).

## **2.6 Προϋποθέσεις σύνδεσης φ/β παραγωγών στη ΧΤ**

Οι προϋποθέσεις που εξετάζονται για τη σύνδεση μιας μονάδας φωτοβολταϊκής παραγωγής στο δίκτυο ΧΤ σχετίζονται με:

- Την επάρκεια του δικτύου
- Τις επιπτώσεις στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ)
- Τη συμμετρική φόρτιση του δικτύου ΧΤ
- Τη συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης

### Επάρκεια του δικτύου

Η σύνδεση φωτοβολταϊκών σταθμών παραγωγής στο δίκτυο ΧΤ αποφορτίζει τις γραμμές και τους Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Αυτό συμβαίνει γιατί μέρος της ζητούμενης ισχύος από τα φορτία καλύπτεται από τους φ/β σταθμούς και συνεπώς ρέει μικρότερη ισχύς στους αγωγούς και τους μετασχηματιστές. Για το λόγο αυτό, η εξέταση της επάρκειας των στοιχείων του δικτύου αφορά μόνο τη συνολική συνδεδεόμενη παραγωγή, που δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την ονομαστική ικανότητα της γραμμής και του Μ/Σ. Το όριο φόρτισης των Μ/Σ είναι η ονομαστική ισχύς τους.

### Επιπτώσεις στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης

Οι προδιαγραφές που ελέγχονται στο ΣΚΣ είναι η ανύψωση της τάσης, η αρμονική παραμόρφωση και η έγχυση συνεχούς ρεύματος. Όπως έχει αναφερθεί, η σύνδεση μιας φ/β γεννήτριας σε μία γραμμή ΧΤ μπορεί να προκαλέσει ανύψωση τάσης λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος. Η ανύψωση αυτή εξαρτάται από την ισχύ του σταθμού, τη θέση του επί της γραμμής, καθώς και το φορτίο της. Με βάση το διεθνές πρότυπο EN 50160 [16], προσδιορίζεται ότι η ενεργός (RMS) τιμή της τάσης θα πρέπει να είναι στο  $\pm 10\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης για το 95% του χρόνου μέσα σε μία βδομάδα. Ακόμη, σύμφωνα με τις διατάξεις του διαχειριστή του δικτύου (ΔΕΔΔΗΕ), τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια τάσης έχουν τυπικές τιμές  $+15\%$  και  $-20\%$  της ονομαστικής τάσης αντίστοιχα. [17]

Η υψίσυχη διακοπτική λειτουργία των αντιστροφών που χρησιμοποιούνται στα φ/β συστήματα προκαλεί την εμφάνιση ανώτερων αρμονικών στην κυματομορφή του ρεύματος που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως έχει αναφερθεί, αυτές οι ανώτερες αρμονικές συνιστώσες είναι δυνατό να προκαλέσουν προβλήματα τόσο στο ίδιο το δίκτυο, όσο και σε εγκαταστάσεις που συνδέονται σε αυτό ή και σε παρακείμενες ηλεκτρικές συσκευές. Συνεπώς, θα πρέπει η έγχυση αρμονικών ρευμάτων στο ΣΚΣ να μην προκαλεί ουσιώδη παραμόρφωση στη τάση του δικτύου. Για αυτό θα πρέπει ο Συντελεστής Ολικής Παραμόρφωσης ρεύματος να μην υπερβαίνει το 5% ( $THD \leq 5\%$ ). [17]

Επίσης, κατά τη σύνδεση φωτοβολταϊκών μονάδων παραγωγής είναι δυνατό να υπάρχει έγχυση συνεχούς ρεύματος στο ΣΚΣ. Το ρεύμα αυτό μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση του σημείου λειτουργίας των Μ/Σ διανομής, και ενδεχομένως να οδηγήσει σε κορεσμό και υπερθέρμανση τους. Ορισμένοι αντιστροφείς χρησιμοποιούν Μ/Σ απομόνωσης, ώστε να αποφεύγεται η έγχυση συνεχούς ρεύματος στο δίκτυο. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν, θα πρέπει η συνιστώσα συνεχούς ρεύματος να μην υπερβαίνει το 0.5% της ονομαστικής τιμής του ρεύματος εξόδου ανά φάση του αντιστροφέα.

### Συμμετρική φόρτιση του δικτύου ΧΤ

Κατά τη σύνδεση των φ/β γεννητριών στο δίκτυο θα πρέπει να ελέγχεται η συμμετρική φόρτιση των φάσεων του δικτύου ΧΤ. Αυτό αφορά τόσο στην ισοκατανομή της ισχύος

μιας τριφασικής διάταξης στις τρεις φάσεις, όσο και στην σύνδεση περισσοτέρων τη μίας φ/β διατάξεων σε μία γραμμή ΧΤ, όπου θα πρέπει κατά το δυνατόν να ισοκαταναμηθούν στις τρεις φάσεις. Σύμφωνα για παράδειγμα με τις διατάξεις της ΔΕΗ το ποσοστό της ασυμμετρίας μεταξύ των τριών φασικών ρευμάτων δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20%. [17]

#### Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στο δίκτυο ΧΤ, μία συνδεδεμένη με το δίκτυο μονάδα φ/β παραγωγής συμβάλλει στο βραχυκύκλωμα με την ονομαστική της ισχύ. Δεδομένου της μικρής συνολικής ισχύος που μπορεί να συνδεθεί σε μία γραμμή ΧΤ, δεν αναμένεται η σύνδεση των φ/β γεννητριών να οδηγήσει σε υπερβάσεις των ορίων. Ο πίνακας 2.1 συνοψίζει τις απαιτήσεις που θα πρέπει να καλύπτονται για τη διασύνδεση ενός φ/β συστήματος στο δίκτυο σύμφωνα με το διαχειριστή του δικτύου διανομής:

**Πίνακας 2.1** Απαιτήσεις διασύνδεσης φ/β συστήματος στο δίκτυο

<b>Παράμετρος</b>	<b>Απαίτηση</b>
Τάση	Τήρηση του προτύπου EN 50160, καθώς επίσης και η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης στα άκρα του αντιστροφέα δεν πρέπει να υπερβαίνει το -20% ή το +15% της ονομαστικής τάσης του δικτύου (230 V) διαφορετικά να πραγματοποιείται απόζευξη εντός 0.5 sec
Συχνότητα	Η συχνότητα των ηλεκτρικών μεγεθών εξόδου του αντιστροφέα δεν πρέπει να υπερβαίνει περισσότερο από το $\pm 0.5$ Hz της ονομαστικής τιμής της συχνότητας του δικτύου. Σε περίπτωση υπέρβασης, η απόζευξη θα πραγματοποιείται εντός 0.5 sec
Αρμονικές	Η ολική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5%
Έγχυση συνεχούς ρεύματος	Η μέγιστη τιμή του εγχεόμενου συνεχούς ρεύματος εξόδου πρέπει να είναι το πολύ ίση με το 0.5% του ονομαστικού ρεύματος της εγκατάστασης
Αυτόματη επανάζευξη	Η επανάζευξη θα πρέπει να πραγματοποιείται μετά από τρία λεπτά



## Κεφάλαιο 3

### Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά, θα πραγματοποιηθεί συνοπτική παρουσίαση της δομής των συσσωρευτών, ενώ στη συνέχεια θα ταξινομηθούν σε κατηγορίες. Θα εξεταστεί η λειτουργία που επιτελούν σε εφαρμογές φ/β συστημάτων καθώς επίσης και οι απαιτήσεις που θα πρέπει να ικανοποιούν. Ακόμη, θα αναλυθούν τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των μπαταριών, δίνοντας έμφαση στις μπαταρίες μολύβδου οξέος που αποτελούν και αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Τέλος, θα εξεταστεί η μοντελοποίηση των συσσωρευτών μελετώντας το θεωρητικό υπόβαθρο των κυκλωματικών μοντέλων.

#### 3.1 Εισαγωγή στη δομή των μπαταριών

Ένας ηλεκτρικός συσσωρευτής (μπαταρία) είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια που εμπεριέχεται στα ενεργά υλικά της απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Στην περίπτωση ενός επαναφορτιζόμενου αποθηκευτικού συστήματος, η μπαταρία επαναφορτίζεται με αντιστροφή αυτής της διαδικασίας. Αυτός ο τύπος αντίδρασης που ονομάζεται οξειδοαναγωγή περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε άλλο δια μέσου ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Επειδή η μπαταρία μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική και δεν υπόκειται, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης, στους περιορισμούς του κύκλου Carnot (που υπαγορεύει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής) παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση στη μετατροπή ενέργειας. [18]

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

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

μπαταρίες χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου.

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 οξείδια, ενώ για ειδικά συστήματα συσσωρευτών χρησιμοποιούνται αλογόνο, θείο και τα οξείδιά 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 αγώγιμος, 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. [18]

## 3.2 Ταξινόμηση μπαταριών

Οι μπαταρίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, με βάση την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται, τις πρωτογενείς (μη επαναφορτιζόμενες) ή τις δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενες). Αυτές οι 2 μεγάλες κατηγορίες περιέχουν υποκατηγορίες που έχουν να κάνουν με συγκεκριμένες δομές ή σχεδιασμούς [18].

### 3.2.1 Πρωτογενείς μπαταρίες (μη επαναφορτιζόμενες)

Αυτές οι μπαταρίες δεν έχουν τη δυνατότητα εύκολης ή αποτελεσματικής επαναφόρτισης και, για το λόγο αυτό, εκφορτίζονται μια φορά και στη συνέχεια απορρίπτονται. Οι πρωτογενείς συσσωρευτές είναι μια βολική, συνήθως οικονομική και ελαφριά πηγή ενέργειας για φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές. Τα γενικά τους πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η ελάχιστη, είτε καθόλου, συντήρηση και η ευκολία στη χρήση.



**Σχήμα 3.1** Πρωτογενείς μπαταρίες κυλινδρικού στοιχείου

Οι πρωτογενείς μπαταρίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμό, φωτογραφικό εξοπλισμό, παιχνίδια, εφεδρικές μνήμες και μια σειρά από άλλες εφαρμογές. Γενικά, στα πλεονεκτήματα των πρωτογενών μπαταριών συγκαταλέγονται η καλή διάρκεια ζωής (shelf life), η υψηλή ενεργειακή

πυκνότητα σε χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς εκφόρτισης, η μικρή (ή καθόλου) ανάγκη για συντήρηση και η ευκολία στη χρήση. Παρόλο που μεγάλες πρωτογενείς μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές, σηματοδότηση, ενέργεια αναμονής (standby power) και αλλού, η συντριπτική πλειοψηφία των πρωτογενών μπαταριών είναι οι γνωστές σε όλους μας μπαταρίες ενός κυλινδρικού στοιχείου ή μπαταρίες που χρησιμοποιούν αυτά τα στοιχεία σαν συστατικά, σχήμα 3.1. Διάφοροι τύποι πρωτογενών συσσωρευτών, τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους και εφαρμογές που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1. [18]

**Πίνακας 3.1** Κύρια χαρακτηριστικά και εφαρμογές των πρωτογενών συσσωρευτών

<b>Τύπος συσσωρευτή</b>	<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>Εφαρμογές</b>
ψευδαργύρου-άνθρακα (Leclanche)	κοινοί, χαμηλού κόστους, διαθέσιμοι σε πολλά μεγέθη	φακοί, ραδιοφωνάκια, παιχνίδια, μικροαντικείμενα
Μαγνησίου	υψηλή χωρητικότητα, μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης	στρατιωτικοί ασύρματοι, πομποί εκτάκτου ανάγκης αεροσκαφών
αλκαλικοί μαγγανίου	οι πιο δημοφιλείς για γενική χρήση, μέτριο κόστος, καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	ο πιο κοινός πρωτογενής τύπος: χρησιμοποιούνται σε ποικιλία φορητών συσκευών που λειτουργούν με μπαταρίες
υδραργύρου	υψηλότερη χωρητικότητα κατ' όγκο μεταξύ των πρωτογενών, επίπεδη εκφόρτιση, καλή διάρκεια αποθήκευσης	ακουστικά βοηθήματα, ιατρικές συσκευές (βηματοδότες), ανιχνευτές, στρατιωτικός εξοπλισμός, περιορισμένη χρήση λόγω περιβαλλοντικής ρύπανσης
καδμίου-υδραργύρου	μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, καλή απόδοση σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα	περιορισμένη χρήση, ειδικές εφαρμογές που απαιτούν μεγάλης διάρκειας λειτουργία σε ακραίες θερμοκρασίες
οξειδίου αργύρου	υψηλότερη χωρητικότητα κατά βάρος μεταξύ των πρωτογενών, επίπεδη εκφόρτιση, καλή διάρκεια αποθήκευσης, δαπανηροί	ακουστικά βοηθήματα, φωτογραφικές μηχανές, ηλεκτρονικά ρολόγια, πύραυλοι, υποθαλάσσιες εφαρμογές και εφαρμογές σε διαστημόπλοια

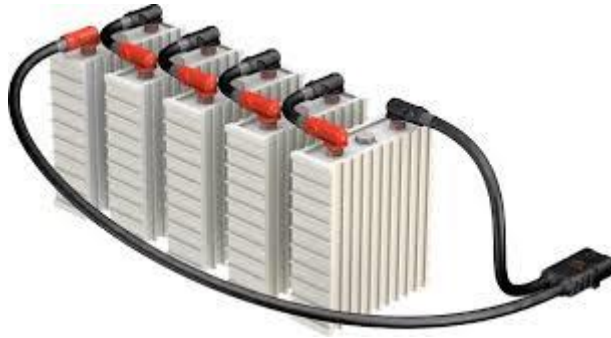


ψευδαργύρου-αέρα	υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, εξαρτώνται από περιβαλλοντικές συνθήκες, χαμηλό κόστος	ειδικές εφαρμογές, βομβητές, ακουστικά βοηθήματα, ιατρικές συσκευές
Λιθίου	υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, καλή απόδοση σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών	διάφορες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα: μετρητές (ενέργειας, νερού, αερίου) έως στρατιωτικές εφαρμογές
λιθίου με στερεό υλικό καθόδου	υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, ανταγωνιστικού κόστους, καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	αντικαθιστούν συμβατικούς συσσωρευτές σχήματος κουμπιού και κυλινδρικού σχήματος
λιθίου με στερεό ηλεκτρολύτη	πολύ μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, χαμηλής ισχύος	ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές, κυκλώματα μνήμης, δίοδοι

### 3.2.2 Δευτερογενείς μπαταρίες (επαναφορτιζόμενες)

Αυτές οι μπαταρίες μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά, μετά από την εκφόρτιση τους, στην αρχική τους κατάσταση με τη διαδικασία ροής ρεύματος μέσα από αυτές στην αντίθετη όμως κατεύθυνση από αυτή του ρεύματος εκφόρτισης. Είναι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και είναι επίσης γνωστές σαν “μπαταρίες αποθήκευσης” (storage batteries). Οι εφαρμογές των δευτερογενών μπαταριών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Εφαρμογές στις οποίες η δευτερογενής μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, που συνήθως είναι συνδεδεμένη και φορτίζεται από μια κύρια πηγή ενέργειας και μεταφέρει την ενέργειά της στο φορτίο όταν της ζητηθεί. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι συστήματα αυτοκινήτων και αεροσκαφών, πηγές ενέργειας αναμονής (UPS) για να μην υπάρξει αποτυχία σε περίπτωση ανάγκης, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα στάσιμης ενεργειακής αποθήκευσης (stationary energy storage – SES) για ηλεκτρική χρήση ανύψωσης φορτίου, σχήμα 3.2.
2. Εφαρμογές στις οποίες η δευτερογενής μπαταρία χρησιμοποιείται ή εκφορτίζεται ουσιαστικά σαν μια πρωτογενής μπαταρία, αλλά αντί να απορρίπτεται μετά τη χρήση επαναφορτίζεται. Οι δευτερογενείς μπαταρίες χρησιμοποιούνται κατ’ αυτό τον τρόπο, για παράδειγμα, σε φορητές ηλεκτρονικές καταναλώσεις, ηλεκτρικά εργαλεία, ηλεκτρικά οχήματα κλπ., για μείωση του κόστους (αφού μπορούν να επαναφορτιστούν αντί να αντικατασταθούν) και σε εφαρμογές που απαιτούν άντληση ενέργειας πέρα από τα όρια μιας πρωτογενής μπαταρίας.



**Σχήμα 3.2** Δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενες) μπαταρίες για συστήματα στάσιμης ενεργειακής αποθήκευσης

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

### 3.3 Οι μπαταρίες στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Μερικά παραδείγματα επαναφορτιζόμενων αποθηκευτικών συστημάτων είναι:

- Μολύβδου οξέος ( Lead acid)
- Νικελίου καδμίου (Nickel cadmium)
- Νικελίου σιδήρου (Nickel iron)
- Υδριδικές νικελίου (Nickel hydride)
- Ιόντων λιθίου (Li-on)

Από αυτές μόνο οι μολύβδου οξέος, οι ιόντων λιθίου και σε μικρότερο βαθμό οι νικελίου καδμίου χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα σήμερα. Οι μπαταρίες νικελίου σιδήρου σπάνια χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, και υποφέρουν από έναν ιδιαίτερα υψηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης κάτι το οποίο τις καθιστά ακατάλληλες για τις περισσότερες φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Οι υδριδικές μπαταρίες νικελίου και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου είναι σχετικά σύγχρονες εξελίξεις και οι κύριες εφαρμογές τους μέχρι σήμερα είναι σε υψηλής αξίας ηλεκτρονικά αγαθά όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αρχίζουν να γίνονται ευρέως διαθέσιμες και σε πιο μεγάλες χωρητικότητες (εκατοντάδες Ah) που απαιτούνται σε μικρά

(οικιακά κλπ.) φωτοβολταϊκά συστήματα. Είναι αρκετά πιο ακριβές ανά kWh σήμερα σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος και συχνά χρειάζονται μια κάπως περίπλοκη προστασία για το κύκλωμα φόρτισής τους, κάτι το οποίο δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί με τη μεταβλητή φύση των ρευμάτων φόρτισης των φωτοβολταϊκών. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, η πρόοδος που έχει σημειωθεί στις μπαταρίες λιθίου έχει ανοίξει το δρόμο για τη χρησιμοποίησή τους και σε μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα (χωρητικότητες χιλιάδων αμπερών). Μεγάλες εταιρίες ηλεκτρονικών αυξάνουν την παραγωγή μπαταριών ιόντων λιθίου και ήδη από το 2013 έχει προκύψει μαζική παραγωγή μπαταριών λιθίου που έχουν σχεδιαστεί για σπίτια που τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά συστήματα. Ωστόσο, η τιμή των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι ακόμα αρκετά υψηλή και θα πρέπει να περάσουν κάποια χρόνια πριν γίνουν πλήρως ανταγωνιστικές στην αγορά. Υπάρχουν και άλλοι τύποι επαναφορτιζόμενων μπαταριών υπό ανάπτυξη για μελλοντικές εφαρμογές μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα ή ανύψωση φορτίου. Δεν είναι εμπορικά διαθέσιμοι ακόμα, εκτός από κάποιες περιορισμένες περιπτώσεις. Δεν υπάρχει κάτι που να δηλώνει προς το παρόν ότι κάποιες από αυτές τις μπαταρίες θα έχουν τις απαιτούμενες ιδιότητες ή την τιμή για να είναι ανταγωνιστικές στα φωτοβολταϊκά συστήματα αλλά μπορούμε πάντα να ελπίζουμε.

### **3.3.1 Η λειτουργία των μπαταριών στα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Υπάρχουν τρεις κύριες λειτουργίες που μια μπαταρία επιτελεί σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα:

- Δρα σαν ένα βοηθητικό ποσό ενέργειας για να εξαλείψει την αναντιστοιχία μεταξύ της διαθέσιμης από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ισχύος και της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος. Η ισχύς που παράγει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή συστοιχία κάθε στιγμή ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που προσκρούει σε αυτή (μηδέν το βράδυ). Το αποθηκευτικό σύστημα παρέχει ισχύ όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν παράγει τίποτα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν παράγει λιγότερη ισχύ από όση απαιτεί το ηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, απορροφά την περίσσεια ισχύος από την φωτοβολταϊκή συστοιχία όταν αυτή παράγει περισσότερη ισχύ από ότι το φορτίο απαιτεί.
- Η μπαταρία παρέχει ένα αποθεματικό ενέργειας (αυτονομία του συστήματος) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια μερικών ημερών πολύ συννεφιασμένου καιρού, ή σε κάποια περίπτωση ανάγκης εάν παρουσιαστεί βλάβη σε κάποιο τμήμα του φωτοβολταϊκού συστήματος (αυτόνομα φ/β συστήματα).

Ακόμη, η μπαταρία αποτρέπει μεγάλες διακυμάνσεις τάσης. Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να αποδώσει ισχύ σε κάθε σημείο μεταξύ βραχυκυκλώματος και ανοικτού κυκλώματος, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτήν. Σε ένα σύστημα ονομαστικής τάσης 12V, για παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0V και περίπου 20V είναι πιθανό να προκύψει από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Πολλά φορτία δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα

τόσο μεγάλο εύρος τάσεων. Η τοποθέτηση μιας μπαταρίας μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του φορτίου διασφαλίζει ότι το φορτίο δε θα βλέπει τίποτα έξω από το εύρος τάσεων στο οποίο η μπαταρία μπορεί να λειτουργήσει – στην περίπτωση ενός συστήματος 12V από περίπου 9,5 V σε βαθιά εκφόρτιση μέχρι περίπου 16V υπό συνθήκες ακραίας φόρτισης (περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την συνδεσμολογία/τοπολογία των συστημάτων αναγράφονται στην αντίστοιχη ενότητα του κεφαλαίου 4). [19]

### 3.3.2 Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν

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

- Υψηλή ενεργειακή απόδοση
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (σε χρόνια)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής από την άποψη της απόδοσης χωρητικότητας
- Χαμηλό κόστος
- Καλή αποδοτικότητα φόρτισης ακόμα και σε πολύ μικρά ρεύματα
- Χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης
- Μικρές απαιτήσεις συντήρησης
- Υψηλή διαθεσιμότητα παγκοσμίως
- Υψηλή διαθεσιμότητα ενέργειας
- Εύκολη εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης
- Χαμηλή έκθεση σε ακατάλληλες συνθήκες
- Εύκολα ανακυκλώσιμη
- Χαμηλή τοξικότητα των υλικών
- Ασφαλής συμπεριφορά σε περίπτωση υπερφόρτισης ή βαθιάς εκφόρτισης
- Εύκολη επεκτασιμότητα τάσης και χωρητικότητας μέσω συνδέσεων σε σειρά και παράλληλα
- Μικρό χάσμα τάσης μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης (επιτρέπει τη σύνδεση φορτίων κατευθείαν στη μπαταρία)
- Ικανότητα γρήγορης φόρτισης
- Κανένα φαινόμενο μνήμης
- Χαμηλές εκρηκτικές δυνατότητες
- Υψηλή αξιοπιστία στη λειτουργία – πολύς χρόνος μεταξύ αστοχιών

Ο σχεδιασμός συστημάτων παροχής ενέργειας θα πρέπει να εξετάζει τις ιδιότητες και τις απαιτήσεις του συστήματος αποθήκευσης από την αρχή. Αν σχεδιαστεί το σύστημα και στη συνέχεια προστεθεί το σύστημα αποθήκευσης, θα έχουμε αμελήσει τις πολυάριθμες αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στη μπαταρία, τα περιφερειακά και συνολικά στο σχεδιασμό και τον έλεγχο όλου του συστήματος. Ως εκ τούτου, μόνο ένας

ολοκληρωμένος προγραμματισμός του συστήματος μας επιτρέπει να κάνουμε χρήση όλων των συνεργειών και να σχεδιάσουμε συστήματα τα οποία θα είναι σε θέση να λειτουργούν με το ελάχιστο κόστος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. [20]

### **3.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών**

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

#### **3.4.1 Χωρητικότητα**

Η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που μπορούν να αποθηκεύσουν οι μπαταρίες είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. 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. [18]. 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. [20]

Η χωρητικότητα της μπαταρίας ποικίλει, όπως αναφέραμε, για διάφορους ρυθμούς εκφόρτισης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα του στοιχείου. Χαμηλότεροι ρυθμοί εκφόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές μπαταριών συνήθως ορίζουν μερικούς ρυθμούς εκφόρτισης (σε αμπέρ) μαζί με τους χρόνους εκφόρτισης που συνδέονται με αυτούς (σε ώρες). Η χωρητικότητα της μπαταρίας για κάθε έναν από αυτούς τους ρυθμούς εκφόρτισης υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η ονομαστική χωρητικότητα για τις μπαταρίες μολύβδου οξέος (που αποτελούν και αντικείμενο αυτής της εργασίας) συνήθως καθορίζεται για ρυθμούς 8-, 10- ή 20-ωρών (C/8, C/10, C/20). Οι UPS μπαταρίες βαθμονομούνται σε 8 – ωρών χωρητικότητες και οι μπαταρίες τηλεπικοινωνιών σε 10 –ωρών χωρητικότητες [21].

Η χωρητικότητα όλων των μπαταριών μολύβδου οξέος (για δεδομένη τελική τάση) μειώνεται στις χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει λόγω πολλών παραγόντων μεταξύ των οποίων είναι η αυξημένη αντίσταση και ο μειωμένος ρυθμός διάχυσης στον ηλεκτρολύτη. Το δεύτερο φαινόμενο σημαίνει ότι οι μπαταρίες μολύβδου οξέος με μεγάλο απόθεμα οξέος τείνουν να χάνουν περισσότερη χωρητικότητα στις χαμηλές θερμοκρασίες από ότι αυτές που έχουν μικρότερο όγκο οξέος. Οι ονομαστικές χωρητικότητες συνήθως αναφέρονται σε θερμοκρασία λειτουργίας 20° C.

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

### 3.4.2 Τάση

Η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος και η διάθεση του σε ένα εξωτερικό κύκλωμα οφείλεται στη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου. Αυτή η διαφορά δυναμικού, η οποία μετρείται σε Volts αναφέρεται ως τάση του στοιχείου ή της μπαταρίας. Ένα μόνο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού συνήθως 2 V υπό φορτίο. Ένα πλήρως εκφορτισμένο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού περίπου 1.75 V, ανάλογα με το ρυθμό εκφόρτισης [21]. Η τάση ισορροπίας ενός στοιχείου είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας. Η τάση ανοικτού κυκλώματος (open circuit voltage-OCV) μπορεί να μετρηθεί εάν κανένα εξωτερικό ρεύμα δε διαρρέει τη μπαταρία. Αυτή ταυτίζεται με την τάση ισορροπίας αν όλες οι εσωτερικές υπερτάσεις (που προκαλούνται κυρίως από διαδικασίες διάχυσης) έχουν σταθεροποιηθεί. Ο χρόνος για να επιτευχθεί αυτό το στάδιο εξαρτάται από την τεχνολογία της μπαταρίας και τις συνθήκες λειτουργίας και κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι πολλές ώρες. Η OCV μιας μπαταρίας εξαρτάται από το πρότυπο δυναμικό των χρησιμοποιούμενων ενεργών υλικών και το ποσό του φορτίου που απομένει. Το λίθιο χρησιμοποιείται ευρέως ως άνοδος σε πρωτογενείς και δευτερογενείς μπαταρίες γιατί προσφέρει το υψηλότερο πρότυπο δυναμικό από όλες τις χημείες των μπαταριών [22]. Η τάση του στοιχείου υπό φορτίο, ή τάση κλειστού κυκλώματος (CCV), εξαρτάται από το ρεύμα, τη στάθμη φόρτισης και το ιστορικό του στοιχείου, όπως τη διάρκεια ζωής του ή το χρόνο αποθήκευσης.

Η τελική τάση φόρτισης (end-of-charge voltage) καθορίζει ένα άνω όριο για την τάση. Η φόρτιση μιας μπαταρίας δε σταματά όταν φτάσει την τελική τάση φόρτισης (όπως συμβαίνει με την τελική τάση εκφόρτισης – end-of-discharge voltage), αλλά το ρεύμα φόρτισης μειώνεται κατάλληλα για να διατηρεί την τελική τάση φόρτισης με πάροδο του χρόνου (η ανάλυση και η μοντελοποίηση αυτής της διαδικασία παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5).

### 3.4.3 Στάθμη φόρτισης

Η στάθμη φόρτισης ή κατάσταση φόρτισης (state of charge – SOC) μας πληροφορεί για τη χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή και εκφράζεται μέσω ποσοστού. Εκατό τοις εκατό στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ 0% στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η ονομαστική χωρητικότητα έχει εκφορτιστεί [20]. Για τη λειτουργία και τη διαχείριση της ενέργειας στα συστήματα παραγωγής ενέργειας, η χωρητικότητα της μπαταρίας και η στάθμη φόρτισης θα λέγαμε πως αποτελούν τις πιο σημαντικές παραμέτρους.

Η μετρούμενη χωρητικότητα μιας μπαταρίας μπορεί να είναι μικρότερη ή ακόμα και μεγαλύτερη από την ονομαστική χωρητικότητα που δίνεται από τον κατασκευαστή. Επίσης, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η μετρούμενη χωρητικότητα μειώνεται όλο και περισσότερο λόγω των επιπτώσεων της γήρανσης. Εξαιτίας των συνθηκών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (στοχαστικά φαινόμενα), οι μπαταρίες πολλές φορές δεν επαναφορτίζονται πλήρως (π.χ. γιατί ο αριθμός των ωρών φόρτισης είναι περιορισμένος). Η μέγιστη στάθμη φόρτισης λοιπόν που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη φυσιολογική λειτουργία του συστήματος ονομάζεται στάθμη φόρτισης πλήρους ακτινοβολίας (solar-full state of charge). Επίσης, το σύστημα καθορίζει ένα κριτήριο τέλους εκφόρτισης για να αποφευχθεί η βαθειά εκφόρτιση της μπαταρίας και κατά συνέπεια η επιτάχυνση της γήρανσης, το οποίο συνήθως διαφέρει από τα κριτήρια τέλους εκφόρτισης που χρησιμοποιούνται στους ελέγχους της χωρητικότητας. Έτσι, η πρακτική χωρητικότητα της μπαταρίας είναι μικρότερη από τη μετρούμενη χωρητικότητα [20]. Επομένως, η ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται ως η χωρητικότητα για εκφόρτιση 10 ωρών (C/10). Αυτή είναι η βάση και για τον καθορισμό της στάθμης φόρτισης. Η ονομαστική χωρητικότητα δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ η μετρούμενη χωρητικότητα μεταβάλλεται με το χρόνο αλλά και τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας και συντήρησης των μπαταριών.

### 3.4.4 Βάθος εκφόρτισης

Το βάθος εκφόρτισης (depth of discharge – DOD) είναι το κλάσμα ή το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Το αντίθετο, δηλαδή, από τη στάθμη φόρτισης που όπως είδαμε παραπάνω είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που είναι ακόμα διαθέσιμο στη μπαταρία. Στον πίνακα 3.2 φαίνεται η απλή σχέση μεταξύ των δύο:

**Πίνακας 3.2** Σχέση μεταξύ SOC και DOD

Στάθμη φόρτισης (SOC)	Βάθος εκφόρτισης (DOD)
100%	0%
75%	25%
50%	50%
25%	75%
0%	100%

Παρόλα αυτά, αυτές οι τιμές για τη στάθμη φόρτισης και το βάθος εκφόρτισης συνήθως αναφέρονται στην ονομαστική χωρητικότητα (π.χ. τη χωρητικότητα για το ρυθμό των 10 ωρών). Για χαμηλότερα ρεύματα εκφόρτισης, μπορεί να συναντήσουμε αναφορές για DOD μεγαλύτερο του 100%. Αυτό απλά σημαίνει ότι η μπαταρία μπορεί να παράγει περισσότερο από το 100% της ονομαστικής της χωρητικότητας σε ρυθμούς εκφόρτισης χαμηλότερους από τον ονομαστικό ρυθμό εκφόρτισης [19].

### 3.4.5 Κύκλος/κύκλος ζωής

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

Ο κύκλος ζωής εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το βάθος του κάθε κύκλου. Έτσι, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όταν αναλύουμε τον κύκλο ζωής που δίνεται από τους κατασκευαστές της μπαταρίας. Συνήθως μετριέται σε σχετικά μεγάλα ρεύματα (μικρούς χρόνους εκφόρτισης) και το αναγραφόμενο DOD συχνά αναφέρεται στη χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη σε αυτό το μικρό χρόνο εκφόρτισης. Για παράδειγμα, έστω ότι στο φυλλάδιο δεδομένων του προϊόντος αναγράφει πως η μπαταρία δίνει κύκλο ζωής 400 κύκλων για 50% DOD. Σχολαστικότερη παρατήρηση των στοιχείων που δίνει ο κατασκευαστής δείχνουν ότι αυτό έγινε για ρυθμό εκφόρτισης 5 ωρών και το DOD που αναγράφεται αναφέρεται στη χωρητικότητα για αυτό το ρυθμό. Η ονομαστική χωρητικότητα αυτής της μπαταρίας όμως έχει υπολογιστεί για ρυθμό εκφόρτισης 20 ωρών και η χωρητικότητα για ρυθμό εκφόρτισης 5 ωρών είναι το 85% της ονομαστικής χωρητικότητας. Παρόλο που ο κύκλος εργασιών της χωρητικότητας είναι  $400 \times 50\% = 200$  για τον ρυθμό των 5 ωρών, όταν αναφερόμαστε στις πραγματικές Ah είναι μόνο  $400 \times 50\% \times 85\% = 170$  για την ονομαστική χωρητικότητα (για ρυθμό 20 ωρών). Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να περιμένουμε μόνο 340 κύκλους σε 50% DOD για την ονομαστική χωρητικότητα, όχι 400.



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

Τα πρώτα χρόνια του σχεδιασμού φωτοβολταϊκών συστημάτων, η εύκολη λύση για την αύξηση της ζωής της μπαταρίας όταν αυτή ήταν απογοητευτικά χαμηλή σε κάποιες περιπτώσεις, ήταν η αναζήτηση μιας μπαταρίας με αυξημένο κύκλο ζωής. Δυστυχώς, ο κύκλος ζωής δεν είναι ο μόνος παράγοντας που καθορίζει το χρόνο ζωής της μπαταρίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα και σε μερικές περιπτώσεις αυτή η αλλαγή οδηγούσε σε ακόμα μικρότερο χρόνο ζωής [19].

### 3.4.6 Αποδοτικότητα

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

Η αποδοτικότητα ενέργειας είναι ο λόγος της ενέργειας που εκφορτίζεται από μια μπαταρία προς την ενέργεια που φορτίζεται σε μια μπαταρία μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο [19]. Η ενεργειακή αποδοτικότητα μιας μπαταρίας είναι χαμηλότερη από την αποδοτικότητα αμπερ – ωρών διότι οι μπαταρίες εκφορτίζονται σε χαμηλότερη τάση από ότι φορτίζονται. Επειδή η αποδοτικότητα αμπερ – ωρών είναι κοντά στη μονάδα, θεωρείται πιο βολικό να δουλεύουμε σε Ah όταν υπολογίζουμε πόση φόρτιση χρειάζεται για να αντικατασταθεί ένα συγκεκριμένο ποσό εκφόρτισης σε φωτοβολταϊκούς (και άλλους) υπολογισμούς. Παρόλα αυτά, επειδή η αποδοτικότητα αμπερ – ωρών για μια πλήρη επαναφόρτιση είναι πάντα ελάχιστα μικρότερη της μονάδας, πρέπει να τροφοδοτηθεί η μπαταρία με λίγο περισσότερες Ah από όσες πραγματικά καταναλώνονται στη διαδικασία φόρτισης. Αυτό το επιπρόσθετο φορτίο, ή η υπερφόρτιση, καταναλώνεται από άλλες, ανεπιθύμητες, χημικές αντιδράσεις μέσα στη μπαταρία. Στις μπαταρίες μολύβδου οξέος και νικελίου καδμίου, αυτές είναι η παραγωγή αερίων οξυγόνου από το νερό στο θετικό ηλεκτρόδιο και στις ανοικτές μπαταρίες, η παραγωγή αερίων υδρογόνου από το νερό στο αρνητικό ηλεκτρόδιο [19].

### 3.4.7 Ρεύμα μπαταρίας

Τα ρεύματα μπαταρίας δίνονται συνήθως σε σχέση με το μέγεθος της μπαταρίας. Ο λόγος είναι ότι οι εντάσεις και οι εξαρτώμενες από το ρεύμα ηλεκτρικές ιδιότητες σχετίζονται με συγκεκριμένα φορτία στα ηλεκτρόδια όσον αφορά τα ενεργά υλικά. Για μεγαλύτερες χωρητικότητες που έχουν δημιουργηθεί από την παράλληλη σύνδεση ηλεκτροδίων ή κυττάρων ή από μεγαλύτερα ηλεκτρόδια, η κανονικοποίηση του ρεύματος ως προς την χωρητικότητα είναι ένα κατάλληλο μέτρο. Ως εκ τούτου, τα ρεύματα μπαταρίας εκφράζονται ως πολλαπλάσια της χωρητικότητας σε αμπερ – ώρες ή ως πολλαπλάσια του ρεύματος εκφόρτισης που καθορίζεται από τη χωρητικότητα. Για μια μπαταρία με χωρητικότητα  $C = 100 \text{ Ah}$ , ένα ρεύμα  $10 \text{ A}$  ορίζεται ως  $0.1 \times C$  ή  $C/10$ . Στο παράδειγμα, τα  $10 \text{ A}$  καλούνται  $C - \text{rate}$ . Το  $I_{10}$  είναι το ρεύμα που εκφορτίζει μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία μέσα σε  $10$  ώρες στην καθορισμένη τελική τάση εκφόρτισης. Η τυπική ονοματολογία για τη χωρητικότητα είναι  $C_x$ , όπου  $x$  είναι ο χρόνος μέσα στον οποίο η μπαταρία εκφορτίζεται. Για παράδειγμα,  $C_{10}=10 \text{ h} \times I_{10}=100 \text{ Ah}$ ,  $I_{10}=10 \text{ A}=0.1 \times C_{10}$ . [20]

### 3.4.8 Χρόνος ζωής

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

### 3.4.9 Ειδική ενέργεια / ενεργειακή πυκνότητα

Ως ειδική ενέργεια ενός συσσωρευτή ορίζεται η ενεργειακή χωρητικότητα ανά μονάδα βάρους του συσσωρευτή ( $\text{Wh/kg}$ ). 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 ηλεκτρικής ενέργειας. Ως ενεργειακή πυκνότητα ορίζεται η ενέργεια που παρέχεται ανά μονάδα όγκου του συσσωρευτή (Wh/L ή Wh/cm<sup>3</sup>). [21]

### 3.4.10 Αυτοεκφόρτιση

Αυτοεκφόρτιση ονομάζεται η απώλεια φορτίου σε μια μπαταρία αν αυτή αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για υπολογίσιμο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, σε μια πρωτογενή μπαταρία που είναι τοποθετημένη στο ράφι ενός καταστήματος για μερικά χρόνια δε θα έχει απομείνει ολόκληρη η χωρητικότητά της. Για επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης συνήθως αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό χωρητικότητας που χάνεται ανά μήνα όταν αρχίζουμε με μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, πρέπει όμως να αναφέρεται μαζί με τη θερμοκρασία της μπαταρίας. Σε πολλές περιπτώσεις, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης διπλασιάζεται για κάθε αύξηση 10° C στη θερμοκρασία της μπαταρίας.

Στους περισσότερους υπολογισμούς για φωτοβολταϊκές μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης των προτιμώμενων τύπων μπαταριών είναι χαμηλός (μεταξύ 1 και 4% ανά μήνα σε θερμοκρασία 20 – 25° C ) και η αυτοεκφόρτιση απαιτεί τόσο μικρό ποσοστό επιπρόσθετης φόρτισης συγκριτικά με το φορτίο (ή ακόμα και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό ελέγχου) που μπορεί εύκολα να αγνοηθεί [19].

### 3.4.11 Κατάσταση υγείας

Η κατάσταση της υγείας ορίζεται σαν ο λόγος της πραγματικά μετρούμενης χωρητικότητας και της ονομαστικής χωρητικότητας. Η κατάσταση υγείας υποδεικνύει σε ποιο βαθμό η μπαταρία είναι ακόμα ικανή να πληροί τις απαιτήσεις του συστήματος. Σύμφωνα με τα πρότυπα, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι στο τέλος της ζωής τους αν η κατάσταση της υγείας τους είναι κάτω από 80%. Παρόλα αυτά, οι μπαταρίες μπορούν να λειτουργήσουν για πολύ περισσότερο, οι μέρες αυτονομίας τους όμως μειώνονται αναλόγως. Μπαταρίες που λειτουργούν σε κατάσταση υγείας περίπου 50% συναντώνται συχνά κυρίως σε υβριδικά συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν τις ενεργειακές τους απαιτήσεις όταν χρειαστεί και από άλλα μέσα (γεννήτριες κλπ.). Αυτό έχει και σαν συνέπεια το μερίδιο της γεννήτριας να αυξάνεται [20].

### 3.4.12 Ρυθμός φόρτισης / εκφόρτισης

Οι ρυθμοί εκφόρτισης και φόρτισης είναι βολικές κλίμακες για τη σύγκριση ρευμάτων στα οποία φορτίζονται οι μπαταρίες, ανεξάρτητα από τη χωρητικότητά τους.

Εκφράζονται ως ένας αριθμός ωρών, π.χ. ο ρυθμός 10 ωρών, 240 ωρών κλπ. Το ρεύμα στο οποίο αντιστοιχούν είναι η κατάλληλη ολική χωρητικότητα εκφόρτισης διαιρεμένη με τον αριθμό των ωρών[19]:

$$\text{Ρυθμός} = \frac{\text{Χωρητικότητα}(Ah)}{\text{χρόνος}(h)}$$

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

### **3.4.13 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. [21]

### **3.4.14 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].

### **3.4.15 Ειδικό βάρος**

Ειδικό βάρος (specific gravity) ονομάζεται ο λόγος ενός διαλύματος προς έναν ίσο όγκο νερού σε μια καθορισμένη θερμοκρασία. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται σαν δείκτης για τη στάθμη φόρτισης ενός στοιχείου ή μιας μπαταρίας [21].

## **3.5 Μπαταρίες μολύβδου οξέος**

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος (lead acid, L-A) εφευρέθηκαν το 1859 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Plante και είναι ο πιο παλιός τύπος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Είναι εμπορικά διαθέσιμες για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας για περισσότερο από έναν αιώνα. Έχουν αποτελέσει, και παραμένουν ακόμα και σήμερα, το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγωγή τους και η χρήση τους συνεχίζουν να αυξάνονται και σήμερα, ενώ οι πωλήσεις τους αντιπροσωπεύουν περίπου το 40% με 45% της αξίας των πωλήσεων όλων των συσσωρευτών παγκοσμίως. Η ευρεία χρήση των συγκεκριμένων μπαταριών σε πολλούς σχεδιασμούς, μεγέθη και επίπεδα τάσης οφείλεται στην χαμηλή τιμή και στην ευκολία της κατασκευής τους σε τοπικό γεωγραφικό επίπεδο.

Σχεδόν το 60% του βάρους των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος είναι μόλυβδος ή συστατικά του, και αποτελούν τη βασικότερη χρήση του μολύβδου παγκοσμίως. Στις αρχές του 2000, η συνολική ζήτηση μολύβδου για όλους τους τύπους των μπαταριών μολύβδου-οξέος αποτελούσε το 88% της συνολικής κατανάλωσης μολύβδου στις ΗΠΑ. Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, καθορίζονται ο σχεδιασμός, το μέγεθος, οι ποσότητες και οι τύποι των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή τους. [23]

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών από SLI μπαταρίες σε αυτοκίνητα και φορτηγά μέχρι UPS, από μπαταρίες ανύψωσης φορτίου για σταθεροποίηση του δικτύου μέχρι μπαταρίες έλξης (περονοφόρα ανυψωτικά οχήματα και άλλα) και φυσικά αυτόνομα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Διαφορετικοί σχεδιασμοί έχουν αναπτυχθεί για διαφορετικές εφαρμογές έτσι ώστε να καλύπτονται οι κάθε είδους απαιτήσεις.

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι μακράν ο φθηνότερος τύπος μπαταρίας συγκριτικά με όλα τα άλλα άμεσα διαθέσιμα συστήματα αποθήκευσης με κατάλληλα χαρακτηριστικά ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που θέτει ένα σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι η μπαταρία μολύβδου οξέος είναι η λιγότερο ακριβή μπαταρία αποθήκευσης για κάθε σχεδόν εφαρμογή, τα χαρακτηριστικά και η απόδοσή της είναι πολύ ικανοποιητικά. Ένα αρκετά σημαντικό μειονέκτημα των μπαταριών μολύβδου οξέος είναι το χαμηλό ειδικό σταθμικό ενεργειακό περιεχόμενο λόγω του υψηλού μοριακού βάρους του μολύβδου. Παρόλα αυτά, αυτή δεν είναι μια παράμετρος μεγάλης σημασίας για τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αφού η μπαταρία είναι γενικά σταθερή [20].



**Σχήμα 3.3** Συσσωρευτής τύπου μολύβδου οξέος (βαθείας εκφόρτισης της εταιρείας Victron energy)

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος αποτέλεσαν για πολλά χρόνια την πρώτη επιλογή στα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και με αρκετά καλή αποτελεσματικότητα. Ωστόσο η δυναμική ανάπτυξη των μπαταριών ιόντων λιθίου και

η πολύ καλή απόδοση που παρουσιάζουν ίσως αντικαταστήσουν σε ένα βαθμό (όταν και η τιμή τους στην αγορά γίνει ακόμη πιο ανταγωνιστική) το παραπάνω τύπο μπαταριών στο μέλλον.

### **3.6 Τύποι μπαταριών μολύβδου οξέος**

Πολλοί διαφορετικοί τύποι μπαταριών μολύβδου οξέος κατασκευάζονται για διαφορετικές εφαρμογές. Η αγορά των φωτοβολταϊκών σήμερα δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δικαιολογεί την κατασκευή ενός ριζικά διαφορετικού σχεδιασμού μπαταρίας μολύβδου οξέος από αυτούς που κατασκευάζονται σε μεγάλες ποσότητες για άλλες χρήσεις, αν και κάποιοι ελαφρώς τροποποιημένοι “ηλιακοί” τύποι μπαταριών είναι διαθέσιμοι. Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις μπαταρίες μολύβδου οξέος με δύο τρόπους:

- Ανοικτή ή κλειστή κατασκευή
- Μαζικής παραγωγής ή βιομηχανικοί τύποι

Υπάρχει μια ευρεία γκάμα μπαταριών μολύβδου οξέος από τις οποίες μπορούμε να επιλέξουμε όταν σχεδιάζουμε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και υπάρχει πάντα ένας συμβιβασμός ανάμεσα στο κόστος και στο προσδόκιμο ζωής της μπαταρίας.

#### **3.6.1 Μπαταρίες μολύβδου οξέος ανοικτής ή κλειστής κατασκευής**

Γενικά, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος διακρίνονται σε δύο τύπους με βάση τη μέθοδο κατασκευής τους. Αυτές οι μπαταρίες είναι οι ανοικτού τύπου ή πλημμυρισμένες ή εξαεριζόμενες (flooded/vented) και οι κλειστού τύπου ή σφραγισμένες (sealed). Οι ανοικτές και οι κλειστές μπαταρίες διαφέρουν επίσης και στη λειτουργία τους. Όλες οι μπαταρίες μολύβδου οξέος παράγουν αέρια υδρογόνου και οξυγόνου (αεριοποίηση) στα ηλεκτρόδια κατά τη φόρτιση μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ηλεκτρόλυση. Αυτά τα αέρια δραπέτευουν από ένα ανοικτό στοιχείο ενώ το κλειστό στοιχείο είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε τα αέρια να συγκρατούνται και να ανασυνδυάζονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αέρια υδρογόνου είναι εκρηκτικά στον αέρα μόνο σε 4% κατ’ όγκο. Οι ανοικτού και κλειστού τύπου μπαταρίες μολύβδου οξέος παρουσιάζονται παρακάτω.

##### **Ανοικτού τύπου μπαταρίες μολύβδου οξέος**

Τα ανοικτά στοιχεία είναι εκείνα στα οποία τα ηλεκτρόδια/πλάκες είναι βυθισμένα στον ηλεκτρολύτη. Εφόσον τα αέρια που δημιουργούνται κατά την φόρτιση διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα, πρέπει περιστασιακά να προστίθεται αποσταγμένο νερό για να επαναφέρει τον ηλεκτρολύτη στο απαιτούμενο επίπεδο. Το πιο γνωστό παράδειγμα μπαταρίας μολύβδου οξέος ανοικτού τύπου είναι η 12 V μπαταρία αυτοκινήτου.

Προς το τέλος της φόρτισης και κατά την υπερφόρτιση, ο ηλεκτρολύτης θεικού οξέος στις μπαταρίες μολύβδου οξέος υποβάλλεται σε ηλεκτρόλυση για την παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου. Κατά συνέπεια, το επίπεδο του ηλεκτρολύτη πέφτει και η συγκέντρωση του θεικού οξέος αυξάνεται. Και οι δύο αυτές συνέπειες είναι επιβλαβείς για την απόδοση της μπαταρίας και θα οδηγήσουν τελικά στην καταστροφή της αν αυτό το πρόβλημα δεν αντιμετωπιστεί με τη συμπλήρωση με αποσταγμένο νερό. Η ανάγκη για συχνή συμπλήρωση νερού έχει περιορίσει στο παρελθόν τις εφαρμογές στις οποίες οι μπαταρίες μολύβδου οξέος μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Έτσι, οι κατασκευαστές χρησιμοποίησαν δύο μεθόδους για την αποφυγή της συμπλήρωσης με νερό [21]:

- Την ανάπτυξη μπαταριών μερικού ανασυνδυασμού, στις οποίες με προσοχή στο σχεδιασμό της μπαταρίας (νέα κράματα μολύβδου για το πλέγμα κλπ.) και με χρήση πιο εξειδικευμένων μεθόδων φόρτισης, η παραγωγή αερίων περιορίζεται στο ελάχιστο και αποφεύγεται η συμπλήρωση.
- Την ανάπτυξη μπαταριών πλήρους ανασυνδυασμού, στις οποίες όσο υδρογόνο και οξυγόνο παράγεται κατά την αεριοποίηση ανασυνδυάζεται πλήρως σε νερό αποφεύγοντας έτσι απώλεια του όγκου του ηλεκτρολύτη.

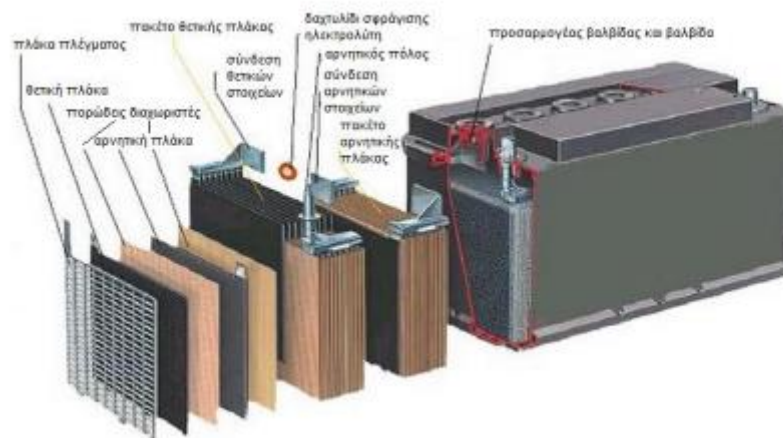
Και οι δύο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ενός εύρους μπαταριών κλειστού τύπου που χρησιμοποιούνται πλέον σε ολοένα αυξανόμενες εφαρμογές.

### **Κλειστού τύπου μπαταρίες μολύβδου οξέος**

Αυτός ο τύπος μπαταριών “φυλακίζει” τον ηλεκτρολύτη αλλά έχει ένα άνοιγμα ή μια βαλβίδα για να επιτρέπει στα αέρια να διαφεύγουν εάν η εσωτερική πίεση ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο. Τυπικά όρια για την πίεση είναι από 2 έως 5 psi (1 psi=0.068 atm), ανάλογα με το σχεδιασμό της μπαταρίας. Κατά τη φόρτιση, μια μπαταρία μολύβδου οξέος παράγει αέρια οξυγόνου στο θετικό ηλεκτρόδιο [21].

Οι κλειστές μπαταρίες μολύβδου οξέος, οι οποίες συχνά αναφέρονται ως μπαταρίες μολύβδου οξέος ρυθμιζόμενες από βαλβίδα (valve regulated lead acid, VRLA), είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε το οξυγόνο που παράγεται κατά τη φόρτιση να εγκλωβίζεται και να ανασυνδυάζεται στη μπαταρία. Αυτό συμβαίνει επειδή το κενό μεταξύ των πλακών δεν είναι τελείως γεμάτο με οξύ και έτσι το οξυγόνο που παράγεται στο θετικό ηλεκτρόδιο μπορεί να φτάσει στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και να μετατραπεί ξανά σε νερό. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται κύκλος ανασυνδυασμού του οξυγόνου (oxygen recombination cycle) και λειτουργεί καλά όσο ο ρυθμός φόρτισης δεν είναι πολύ μεγάλος. Εάν το ρεύμα φόρτισης είναι πολύ μεγάλο, τότε το οξυγόνο θα δημιουργήσει πίεση στο εσωτερικό του στοιχείου και τελικά η βαλβίδα ασφαλείας θα απελευθερώσει οξυγόνο (και μικρή ποσότητα οξέος) στην ατμόσφαιρα. Αυτό θα οδηγήσει σε μόνιμη απώλεια νερού.

Αξίζει να σημειωθεί πως, ενώ ο όρος “ρυθμιζόμενες από βαλβίδα” χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει το σύνολο των μπαταριών κλειστού τύπου, όλες οι μπαταρίες κλειστού τύπου δεν είναι VRLA. Μερικοί σχεδιασμοί μπαταριών χρησιμοποιούν πώματα που αντικαθίστανται ή άλλους μηχανισμούς για την ανακούφιση της μπαταρίας από την υπερβολική πίεση. Οι μπαταρίες κλειστού τύπου αναπτύχθηκαν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για να ελαττωθεί η συντήρηση που απαιτούσαν οι μπαταρίες κατά τη λειτουργία τους. Αφού τα επίπεδα του ηλεκτρολύτη διατηρούνται μέσω της παγίδευσης και του ανασυνδυασμού των αερίων που εκλύονται, δε θα έπρεπε να υπάρχει η ανάγκη προσθήκης αποσταγμένου νερού κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Για το λόγο αυτό, συχνά οι μπαταρίες αυτές θεωρείται ότι λειτουργούν χωρίς συντήρηση. Στην πραγματικότητα, όλες οι πρακτικές συντήρησης που εφαρμόζονται στις μπαταρίες ανοικτού τύπου μπορούν να εφαρμοστούν και στις μπαταρίες κλειστού τύπου. Η μόνη εξαίρεση είναι ότι τα επίπεδα του ηλεκτρολύτη δεν μπορούν και δεν πρέπει να χρειάζονται συντήρηση.



**Σχήμα 3.7** Δομή VRLA συσσωρευτή

#### Πλεονεκτήματα:

- Ευκολία στη συντήρηση
- Δεν εμφανίζουν φαινόμενα μνήμης (σε σχέση με τις μπαταρίες νικελίου καδμίου)
- Υψηλή αποδοτικότητα φόρτισης
- Η στάθμη φόρτισης μπορεί συνήθως να καθοριστεί μετρώντας την τάση
- Σχετικά χαμηλό κόστος
- Διαθέσιμες από μικρές μονάδες ενός στοιχείου (2 V) μέχρι μεγάλες μπαταρίες των 48 V

#### Μειονεκτήματα:

- Δεν πρέπει να αποθηκεύονται σε κατάσταση εκφόρτισης
- Σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
- Χαμηλότερος κύκλος ζωής από ότι οι κλειστές μπαταρίες νικελίου καδμίου



- Καταστροφή λόγω θερμότητας μπορεί να συμβεί με εσφαλμένη φόρτιση ή ακατάλληλη διαχείριση της θερμότητας
- Μεγαλύτερη ευαισθησία σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας από ότι οι συμβατικές μπαταρίες μολύβδου οξέος

Υπάρχουν δύο τύποι VRLA μπαταριών, ο τύπος AGM και ο τύπος gel.

### Τύπος AGM

Αυτός ο τύπος μπαταρίας παίρνει το όνομά του από ένα απορροφητικό στρώμα γυαλιού (absorbent glass mat – AGM) που χρησιμοποιεί ανάμεσα στις σφικτά τοποθετημένες επίπεδες πλάκες. Όλο το οξύ απορροφάται από το γυάλινο διαχωριστικό στρώμα, του οποίου όμως οι πόροι δε γεμίζουν πλήρως. Οι άδειοι (ή σχεδόν άδειοι) πόροι παρέχουν ένα μονοπάτι ώστε το οξυγόνο που σχηματίζεται στο θετικό ηλεκτρόδιο κατά τη φόρτιση να κατευθυνθεί προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο για ανασυνδυασμό. Οι AGM μπαταρίες αναπτύχθηκαν κυρίως για να έχουν μια καλή επίδοση σε υψηλό ρεύμα (μικρός χρόνος εκφόρτισης). Περιέχουν πολύ μικρή ποσότητα οξέος, κάτι το οποίο σημαίνει ότι είναι πολύ επιρρεπείς σε απώλειες νερού που συμβαίνουν κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Αντίθετα, αντιστέκονται αρκετά καλά στο να παγώσουν, αφού υπάρχει χώρος για επέκταση μέσα στην AGM [19].

### Τύπος gel

Στις gel μπαταρίες μολύβδου οξέος, το θειικό οξύ αναμειγνύεται με σκόνη πυριτίου και σχηματίζει μια παχιά πάστα ή ζελέ (gel). Το πρόσφατα αναμειγμένο gel χύνεται στο δοχείο του στοιχείου πριν στερεοποιηθεί. Καθώς το gel στεγνώνει, σχηματίζονται μικροσκοπικές ρωγμές που επιτρέπουν τη διέλευση του αερίου μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου που απαιτείται για τη διαδικασία του ανασυνδυασμού. Αυτός ο σχηματισμός ρωγμών μπορεί να συμβεί κατά τα πρώτα στάδια της ζωής της μπαταρίας έτσι ώστε και υδρογόνο και οξυγόνο να μπορούν να εκλυθούν από τη βαλβίδα ασφαλείας μιας καινούριας μπαταρίας. Όσον αφορά το παραπάνω, πρέπει να δίνεται προσοχή στις οδηγίες του κατασκευαστή κυρίως αυτές που αφορούν τις απαιτήσεις εξαερισμού.

Αντίθετα από τις AGM μπαταρίες, οι gel μπαταρίες μπορεί να είναι κατασκευασμένες είτε με επίπεδες είτε με σωληνωτές πλάκες στο θετικό ηλεκτρόδιο. Το gel παρέχει ένα καλύτερο μέσο για την αγωγή της θερμότητας από τις πλάκες στα τοιχώματα του στοιχείου από ότι οι AGM μπαταρίες, επομένως η θερμότητα που παράγεται κατά την υπερφόρτιση χάνεται πιο αποτελεσματικά. Η ικανότητα να διατηρείται υψηλό ρεύμα (κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση) δεν είναι τόσο καλή για τις μπαταρίες gel όσο για τις AGM μπαταρίες, αυτό όμως συνήθως δεν είναι πρόβλημα για τη χρήση τους σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, υποφέρουν σε ένα βαθμό από απώλεια νερού αλλά αφού υπάρχει περισσότερο οξύ από ότι σε μία ισοδύναμη AGM μπαταρία, η μείωση του χρόνου ζωής τους δεν θα είναι τόσο σοβαρή [19].

### 3.6.2 Μπαταρίες μαζικής παραγωγής ή βιομηχανικού τύπου

Οι μαζικής παραγωγής μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι κατά βάση ο τύπος που χρησιμοποιείται σε αυτοκίνητα για χρήση εκκίνησης, φωτισμού και ανάφλεξης (SLI). Έχουν σχετικά λεπτές επίπεδες πλάκες που είναι βελτιστοποιημένες για να παράγουν τα υψηλά ρεύματα που χρειάζονται για την εκκίνηση μιας μηχανής οχήματος. Αντίθετα, οι λεπτές πλάκες δεν οδηγούν σε μεγάλη διάρκεια ζωής σε καμία άλλη εφαρμογή, η οποία περιλαμβάνει είτε κύκλους φόρτισης εκφόρτισης είτε λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι περισσότερες SLI μπαταρίες είναι ανοικτού τύπου. Για φορητά και σκάφη, κατασκευάζονται μπαταρίες με πιο χοντρές πλάκες και με κάποιες τροποποιήσεις μπορούν να αποτελέσουν μια καλή φωτοβολταϊκή μπαταρία για ελαφριά χρήση (σπάνιους ή όχι βαθείς κύκλους, όχι λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες). Μπαταρίες κλειστού τύπου με σχετικά χοντρές πλάκες κατασκευάζονται για χρήσεις όπως σε αμαξάκια του γκολφ, αναπηρικά καροτσάκια κλπ. Παρ'όλο που δεν είναι τόσο μαζικής παραγωγής όσο οι SLI μπαταρίες, είναι ικανές να κατασκευάζονται σε αρκετά μεγάλες ποσότητες με σχετικά χαμηλό κόστος.

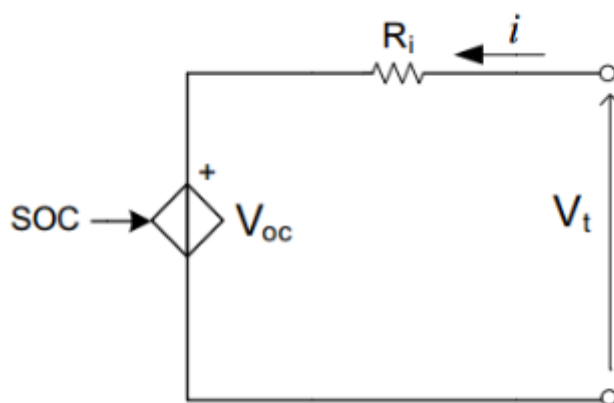
Οι βιομηχανικές μπαταρίες κατασκευάζονται γενικά για δύο κατηγορίες εφαρμογών: κατάσταση αναμονής και βαθείς κύκλοι. Ειδικά στην Ευρώπη, η κατασκευή των σωληνωτών πλακών (tubular plates) συχνά χρησιμοποιείται και για τους δύο τύπους. Η μπαταρία αναμονής με σωληνωτές πλάκες, είτε ανοικτού τύπου είτε τύπου gel, είναι συχνά η μπαταρία που επιλέγεται για μεγαλύτερα φωτοβολταϊκά συστήματα όπου απαιτείται η υψηλότερη δυνατή διάρκεια ζωής για μια μπαταρία μολύβδου οξέος. Η μπαταρία με σωληνωτές πλάκες διατίθεται επίσης από ορισμένους κατασκευαστές σε εκδόσεις “ηλιακές” ή βαθέων κύκλων. Βέβαια, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί ο κύκλος ζωής, σχεδόν πάντα μειώνουν τη ζωή αναμονής και αυτό γενικά σημαίνει ότι δίνουν μικρότερο χρόνο λειτουργίας σε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα εκτός εάν υπάρχουν απαιτήσεις βαθέων κύκλων όπως στην περίπτωση των διασυνδεδεμένων. Βιομηχανικές μπαταρίες μολύβδου οξέος με πολύ χοντρές επίπεδες πλάκες κατασκευάζονται επίσης για χρήση σε αναμονή και είναι διαθέσιμες σε ανοικτούς, gel ή AGM τύπους. Το πάχος των επίπεδων πλακών τους καθορίζει το μέγιστο χρόνο ζωής τους σε κατάσταση αναμονής, και είναι σύνηθες για τέτοιες βιομηχανικές μπαταρίες να περιγράφονται από τον κατασκευαστή με προσδόκιμο ζωής 5, 10 ή ακόμα και 20 χρόνια. Αυτά φυσικά αναφέρονται στο σχεδιασμό για λειτουργία κάτω από βέλτιστες συνθήκες και όχι αυτές των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Οι βιομηχανικές μπαταρίες μολύβδου οξέος υψηλής χωρητικότητας είναι κυρίως διαθέσιμες σε μονά στοιχεία των 2V, τα οποία συναρμολογούνται σε μπαταρίες με την απαιτούμενη τάση ενώ οι βιομηχανικές μπαταρίες χαμηλής χωρητικότητας διατίθενται συνήθως σε μονάδες των 6 η 12 V.

### 3.7 Μοντελοποίηση συσσωρευτών

Ερευνητές σε όλο τον κόσμο αναπτύσσουν πληθώρα μοντέλων συσσωρευτών ακολουθώντας διαφορετική προσέγγιση και βαθμούς πολυπλοκότητας. Προσπαθούν να αποδώσουν τη συμπεριφορά των διαφόρων συστημάτων συσσωρευτών για συγκεκριμένο σκοπό, που μπορεί να ποικίλει από το σχεδιασμό του ίδιου του συσσωρευτή, τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του και την πρόβλεψη της απόδοσής του μέχρι τη προσομοίωση ενός ολόκληρου συστήματος.

Στη βιβλιογραφία γίνεται αναφορά σε τρεις διαφορετικούς τύπους μοντέλων συσσωρευτών: στα πειραματικά, στα ηλεκτροχημικά και στα κυκλωματικά μοντέλα. Τα πειραματικά και τα ηλεκτροχημικά μοντέλα δεν ενδείκνυται για τη μοντελοποίηση των δυναμικών στοιχείων της μπαταρίας με σκοπό την ακριβή περιγραφή του SOC (στάθμη φόρτισης) ενός αποθηκευτικού συστήματος. Αντιθέτως, τα μοντέλα βασισμένα στη περιγραφή του κυκλώματος μπορούν να αποδώσουν το SOC με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το πιο απλό ηλεκτρικό μοντέλο αποτελεί μία ιδανική πηγή τάσης σε σειρά μία εσωτερική αντίσταση, σχήμα 3.8 [25].



Σχήμα 3.8 Απλοποιημένο ηλεκτρικό μοντέλο συσσωρευτή [25]

Ωστόσο, αυτό το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη το SOC. Ο Shepherd [27] ανέπτυξε ένα μοντέλο βασισμένο σε μία εξίσωση που περιγράφει την ηλεκτροχημική συμπεριφορά της μπαταρίας απευθείας σε όρους τερματικής τάσης, τάσης ανοιχτού κυκλώματος (OCV), εσωτερικής αντίστασης, ρεύματος αποφόρτισης και κατάστασης φόρτισης SOC. Και αυτό το ίδιο μοντέλο εφαρμόζεται τόσο στη διαδικασία της φόρτισης όσο και της εκφόρτισης. Το μοντέλο Shepherd (ελαφρώς παραλλαγμένο<sup>1</sup>) χρησιμοποιεί και το γραφικό περιβάλλον Simulink του Matlab για την προσομοίωση διαφόρων τύπων επαναφορτιζόμενων μπαταριών το οποίο χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία και παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 5.4.6 του κεφαλαίου 5.

<sup>1</sup> Ωστε να επιλύονται τα σφάλματα (algebraic loop errors) που παρουσιάζονται στις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου (closed loop simulations) [50]

Το κυκλωματικό ισοδύναμο του σχήματος 3.8 αποτελείται από μία ελεγχόμενη πηγή τάσης  $V_{OC}$  σε σειρά με την ισοδύναμη εσωτερική αντίσταση  $R_i$  του ηλεκτροχημικού στοιχείου του συσσωρευτή. Η τάση  $V_t$  είναι η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Η μόνη μεταβλητή του συστήματος είναι η SOC (state of charge, κατάσταση φόρτισης), η οποία ορίζεται από τον τύπο [25]:

$$SOC = \frac{Q}{Q_{nom}} \quad (3.1)$$

Όπου,

$Q$  η πραγματική χωρητικότητα που είναι αποθηκευμένη στη μπαταρία, (Ah)

$Q_{nom}$  η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας, (Ah)

Εάν εξαιρέσουμε την απόδοση του συσσωρευτή κατά τη φόρτιση, η κατάσταση φόρτισης SOC συναρτήσει του χρόνου γίνεται:

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{i}{Q_{nom}} \quad (3.2)$$

Όπου,  $i$  είναι το ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης.

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$  της μπαταρίας σύμφωνα με τη βιβλιογραφία δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_{OC}(Q) = V_0 - K \frac{Q_{nom}}{Q_{nom} - Q} + A * e^{(-B*Q)} \quad (3.3)$$

Όπου,

$A$  το εκθετικό εύρος ζώνης (V)

$B$  η εκθετική αντίστροφη χρονική σταθερά (Ah)

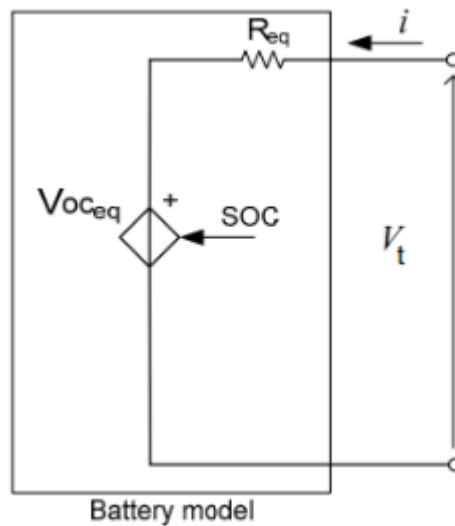
$V_0$  η σταθερή τάση της μπαταρίας (V)

$K$  η πόλωση της τάσης (V)

Είναι προφανές από την τελευταία σχέση (3.3) ότι η τάση του συσσωρευτή είναι συνάρτηση της πραγματικής χωρητικότητας  $Q$ , η οποία είναι μία άλλη έκφραση της κατάστασης χωρητικότητας SOC, σύμφωνα με τη σχέση (3.2). Η τάση  $V_t$  στους ακροδέκτες της μπαταρίας προκύπτει εύκολα, εάν προσθέσουμε στη (3.3) την πτώση τάσης που προκαλείται λόγω της εσωτερικής αντίστασης του συσσωρευτή.

$$V_t = V_{OC} + i * R_i \quad (3.4)$$

Η πτώση τάσης θεωρείται θετική κατά τη διάρκεια της φόρτισης και αρνητική κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή αναγράφεται στα datasheets του κατασκευαστή.



**Σχήμα 3.9** Το ολοκληρωμένο μοντέλο μπαταριών βασιζόμενο στη μοντελοποίηση κατά Shepherd

Για αναλυτικότερες πληροφορίες σχετικά με το παραλλαγμένο μοντέλο που χρησιμοποιεί το Simulink και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προχωρήστε στο κεφάλαιο 5 και την ενότητα 5.4.5 και 5.4.6.



## Κεφάλαιο 4

### Μέθοδος διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκών- αποθηκευτικών συστημάτων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν και καθορίζουν την επιλογή του μεγέθους της χωρητικότητας των συσσωρευτών σε ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα ποικίλουν και διαμορφώνουν την ενεργειακή επάρκεια και το τελικό κόστος του συστήματος [28]. Για το σκοπό αυτό, θα διερευνηθούν και θα αναλυθούν οι κυριότεροι εξ' αυτών των παραγόντων μέσω της μοντελοποίησης και των προσομοιώσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων - συσσωρευτών λαμβάνοντας υπόψη τόσο ενεργειακά όσο και τεχνοοικονομικά κριτήρια [29].

#### 4.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται συνήθως στη μέση ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος και στη μέση ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται οι συλλέκτες στην επιλεγμένη κρίσιμη περίοδο λειτουργίας του (π.χ. ένα θερινό ή χειμερινό μήνα, μια εποχή του έτους ή και ολόκληρο το έτος). Όμως οι μέσες τιμές είναι στατιστικά μεγέθη που μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από ενδεχόμενες πραγματικές συνθήκες. Για να μπορέσει να γίνει η διαστασιολόγηση του συστήματος με σαφήνεια θα πρέπει η ροή ενέργειας δια μέσω αυτού να είναι αποτελεσματική και να αντιδρά επαρκώς στις δυναμικές μεταβολές του φορτίου. Σκοπός της διαστασιολόγησης είναι μέσω του συγκεκριμένου σχεδιασμού που έχουμε επιλέξει να επιτύχουμε ένα βέλτιστο συνολικά σύστημα τόσο από τεχνικής, όσο και από οικονομικής άποψης. Η σωστή διαστασιολόγηση μας δίνει λοιπόν εγγυήσεις για την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος χωρίς να υπερβάλλει σε επενδύσεις εξοπλισμού μεγάλης ποσότητας.

Για να επιτευχθούν όλα τα παραπάνω αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης στο πρόγραμμα Matlab. Στο παρόν κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση και η προεπεξεργασία των δεδομένων (μετεωρολογικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, δεδομένα οικιακού φορτίου, συσσωρευτών), η διαμόρφωση του συστήματος και η περιγραφή του αλγόριθμου διαχείρισης τη ισχύος. Θα καθοριστούν οι παράμετροι και τα όρια του συστήματος καθώς επίσης και τα κριτήρια (ενεργειακά, τεχνοοικονομικά) για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Τέλος, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας, μέσω της οποίας θα αποτυπωθούν οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στη λειτουργία και τη συμπεριφορά των προς εξέταση συστημάτων.

## 4.2 Ανάλυση και προεπεξεργασία δεδομένων

Για να προσομοιωθεί επαρκώς η λειτουργική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων απαιτούνται πραγματικά και αξιόπιστα μετεωρολογικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας. Ταυτόχρονα, για να απεικονιστούν οι τυπικές διακυμάνσεις της ηλεκτρικής κατανάλωσης των οικιακών φορτίων απαιτούνται χρονοσειρές φορτίου με υψηλή χρονική ανάλυση [30].

Η ορθή διαστασιολογήση του συστήματος προϋποθέτει την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του έτσι ώστε να ληφθούν υπόψιν οι μεταβολές της ηλιοφάνειας και του φορτίου στις διαφορετικές εποχές του έτους. Χρησιμοποιώντας δεδομένα υψηλής χρονικής ανάλυσης (π.χ. μετρήσεις ανά 5 λεπτά ή ανά λεπτό) θα επιτυγχάναμε υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων, όμως θα αυξανόταν υπερβολικά ο χρόνος προσομοίωσης. Το γεγονός αυτό θα καθιστούσε αδύνατη την ολοκλήρωση της ανάλυσης ευαισθησίας (απαιτείται πολλαπλή επανάληψη των προσομοιώσεων) καθώς η επεξεργαστική ισχύς και η μνήμη του υπολογιστή<sup>2</sup> στον οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις δεν επαρκεί για να διαχειριστεί ένα τόσο μεγάλο όγκο δεδομένων. Τόσο μεγάλους χρόνους προσομοίωσης μπορούν να διαχειριστούν πιο εξελιγμένα υπολογιστικά συστήματα.

Στη παρούσα μελέτη λοιπόν θα χρησιμοποιηθούν μετρήσεις ηλιοφάνειας και μετρήσεις οικιακών φορτίων με τιμές ανά μία ώρα (8760 τιμές/έτος). Οι μετρήσεις του φορτίου προέκυψαν σαν μέση τιμή από μετρήσεις ανά 15 λεπτά. Τα δεδομένα της ηλιοφάνειας προέρχονται από το National Renewable Energy Laboratory (NREL), ενώ τα δεδομένα του οικιακού φορτίου από ένα μέσο καταναλωτή στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών<sup>3</sup>. Αξίζει να σημειωθεί πως η Πολιτεία της Καλιφόρνια ανήκει στις περιοχές που εξομοιώνουν τις συνθήκες του Μεσογειακού κλίματος<sup>4</sup>, δηλαδή εμφανίζουν κλιματολογικές συνθήκες ίδιες ή παρόμοιες με αυτές των περιοχών που επικρατούν στις ακτές της Μεσόγειου Θάλασσας.

### 4.2.1 Δεδομένα φορτίου

Όπως προαναφέρθηκε, το προφίλ του φορτίου διαμορφώνεται από ένα μέσο καταναλωτή της εταιρείας παροχής ηλεκτρισμού Pacific Gas and Electricity Company στο Σαν Φρανσίσκο της Καλιφόρνια κατά τη διάρκεια του έτους 2013. Τα δεδομένα υπάρχουν αναρτημένα στην ιστοσελίδα<sup>5</sup> της εταιρείας στην κατηγορία Dynamic Load Profiles όπου και επιλέχθηκε το E4.

---

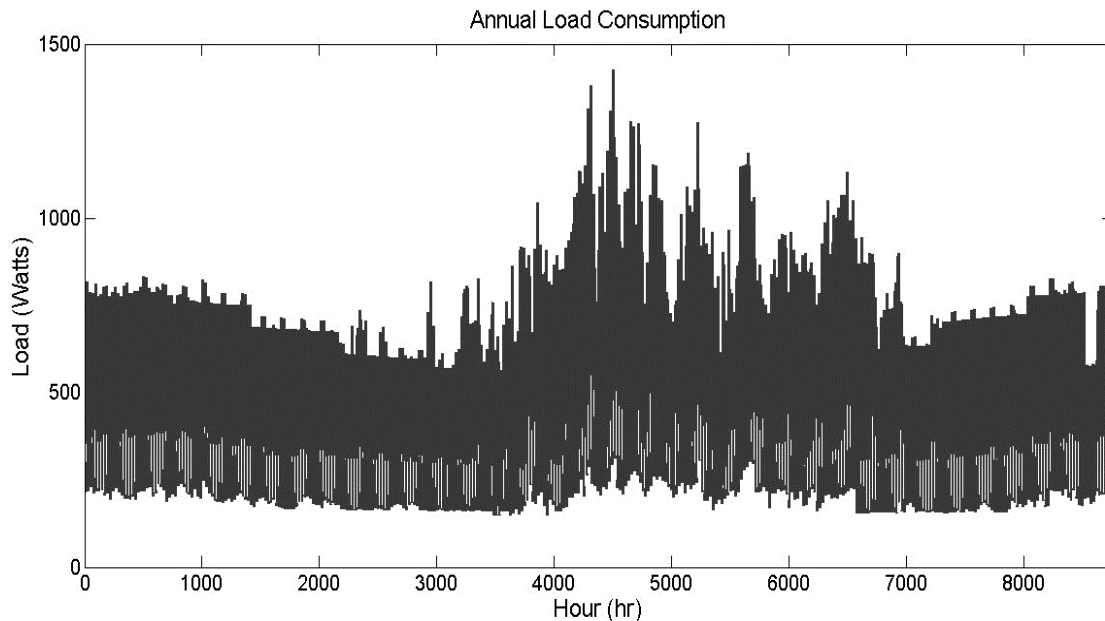
<sup>2</sup> Φορητός Υπολογιστής(laptop) με επεξεργαστή Celeron-Dual Core 2.09GHz, 2.11 GHz και Μνήμη 4GB

<sup>3</sup> Εταιρεία Παροχής Ηλεκτρισμού Pacific Gas and Electric, San Fransisco, USA

<sup>4</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Mediterranean\\_climate](http://en.wikipedia.org/wiki/Mediterranean_climate)

<sup>5</sup> [http://www.pge.com/tariffs/energy\\_use\\_prices.shtml](http://www.pge.com/tariffs/energy_use_prices.shtml)





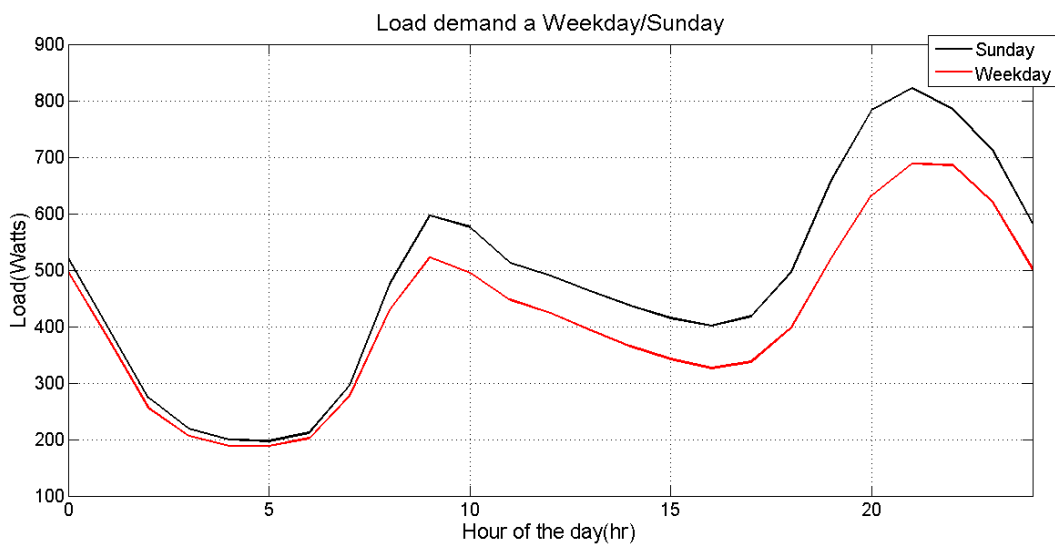
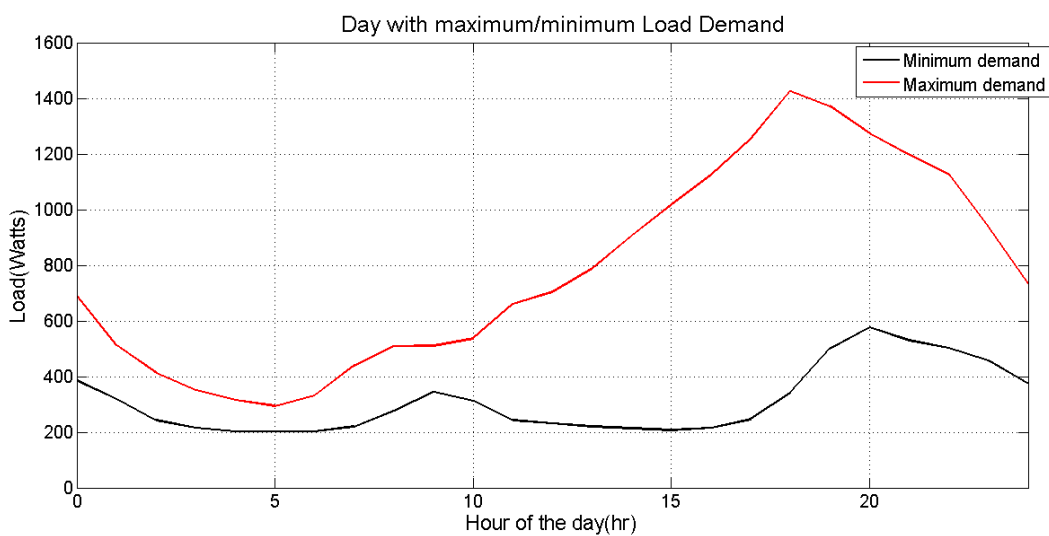
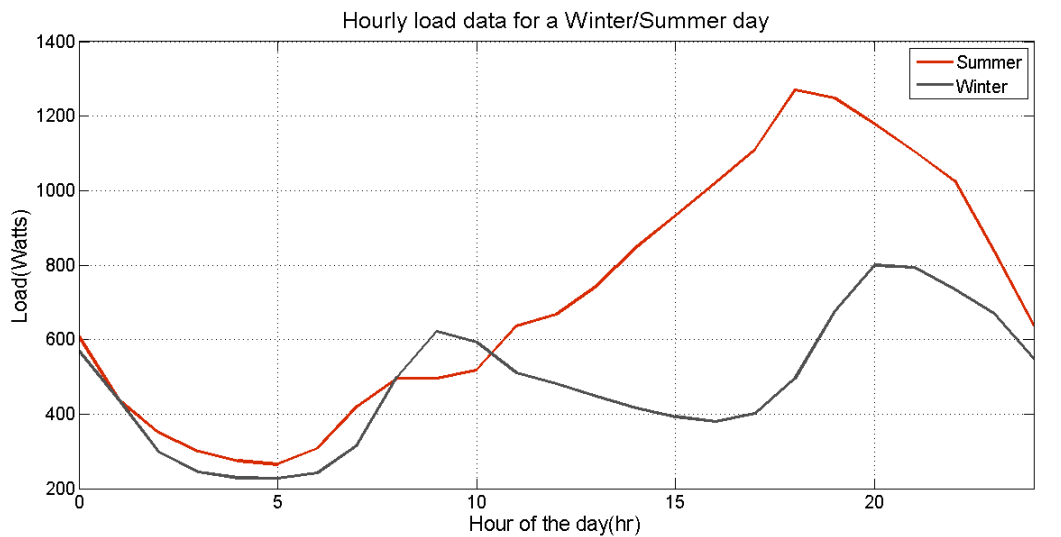
**Σχήμα 4.1** Το προφίλ του φορτίου στη διάρκεια ενός έτους

Οι συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε στη διάρκεια ενός έτους ανέρχεται στις 4000 kWh/έτος, όπου θεωρείται το μέσο τυπικό φορτίο ενός καταναλωτή στην Ελλάδα, σύμφωνα και με έρευνα<sup>6</sup> για το δήμο Αμαρουσίου της Αθήνας το 2009. Από και στο εξής, όποτε γίνεται αναφορά στο φορτίο θα εννοούμε την τυπική καμπύλη του σχήματος 4.1 στην οποία θα σταθμίζονται και όλες οι μεταβλητές. Στο σχήμα 4.2 (α) παρουσιάζονται οι ωριαίες τιμές της ενεργειακής κατανάλωσης μίας χειμερινής και μίας καλοκαιρινής μέρας οι οποίες επιλέχθηκαν τυχαία. Παρατηρούμε υψηλότερη κατανάλωση την καλοκαιρινή μέρα, με μία αυξητική τάση που ξεκινάει από τις πρωινές ώρες και κορυφώνεται αργά το βράδυ. Πιθανότατα οι υψηλότερες τιμές του οικιακού φορτίου τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως επαληθεύεται και από το σχήμα 4.1, να οφείλονται στη εκτεταμένη χρήση συστημάτων κλιματισμού. Την καλοκαιρινή και τη χειμερινή μέρα καταναλώθηκαν αντίστοιχα 17,42 και 11,75 kWh.

Το σχήμα 4.2 (β) παρουσιάζει τη μέρα με το μέγιστο και το ελάχιστο φορτίο ή πιο συγκεκριμένα την 186<sup>η</sup> και την 357<sup>η</sup> μέρα του έτους αντίστοιχα. Τη μέρα με τη μέγιστη και την ελάχιστη ζήτηση καταναλώθηκαν συνολικά 19,05 kWh και 7,45 kWh. Η μέγιστη στιγμιαία ωριαία κατανάλωση ανέρχεται περίπου σε 1400 W ενώ η ελάχιστη σε 200 W.

Τέλος, στο 4.2 (γ) απεικονίζεται η διαφορά της ζήτησης του φορτίου μεταξύ μίας καθημερινής μέρα της εβδομάδας και μίας μέρας του σαββατοκύριακου (συγκεκριμένα Κυριακής). Η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για όλο το έτος ανέρχεται σε 11,18 kWh.

<sup>6</sup> <http://www.cres.gr/pepesecc/apotelesmata.html>



**Σχήμα 4.2** (α) Ωριαίο προφίλ φορτίου μια τυχαία χειμερινή/καλοκαιρινή μέρα (β) ωριαίο προφίλ φορτίου της μέρας με τη μέγιστη/ελάχιστη κατανάλωση (γ) ωριαίο προφίλ φορτίου μιας καθημερινής/Κυριακής

## 4.2.2 Δεδομένα φωτοβολταϊκής παραγωγής

Για να παραχθούν τα δεδομένα της DC ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος χρησιμοποιήθηκαν τόσο το συνολικό μέγεθος της εγκατεστημένης του ισχύος όσο και τα δεδομένα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και η επίδραση της θερμοκρασίας και άλλων εξωτερικών παραγόντων. Οι χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν και μεταβάλλονται ανάλογα με το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος, μας επιτρέπουν να υλοποιήσουμε ποικίλα σενάρια και να διαμορφώσουμε το συνολικό σύστημα αναλόγως.

Τα δεδομένα λήφθηκαν με τη βοήθεια του υπολογιστικού εργαλείου (PV watts calculator) που προτείνει το National Renewable Energy Laboratory<sup>7</sup>. Έστω ότι το σύστημα που θέλουμε να εγκαταστήσουμε στην οροφή μιας κατοικίας έχει μέγιστη ισχύ 4 kWp.

**Πίνακας 1** Είσοδοι του PV Watt Calculator

Μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς (kWp)	4
Τύπος πλαισίων	Σταθερής κλίσης, οροφής-στεγής
Κλίση πλαισίων (μοίρες)	30
Αζιμούθια γωνία (μοίρες)	0 (180 σύμβαση του Calculator)
DC-to-AC παράγοντας γήρανσης <sup>8</sup>	1.1
Απόδοση φ/β στοιχείου	15 %

Αφού δώσουμε σαν εισόδους την τοποθεσία και κάποιες άλλες παραμέτρους που θα μας ζητηθούν περαιτέρω και περιγράφονται στον πίνακα 1, η DC ισχύς εξόδου υπολογίζεται αυτόματα και παρατίθεται σε ωριαία δεδομένα για τη διάρκεια ενός τυπικού έτους.

Σε γενικές γραμμές η DC ισχύς εξόδου της συστοιχίας είναι ανάλογη προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων όμως επηρεάζει την παραγόμενη ενέργεια, καθώς όσο η θερμοκρασία αυξάνει τόσο μειώνεται η παραγωγή της συστοιχίας. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα εξαρτάται από τη θέση του ήλιου σε σχέση με τη συστοιχία, τη νέφωση ή και τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πάνελ εξαρτάται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την κίνηση του αέρα γύρω από τη συστοιχία.

Το PV Watts Calculator μέσω του IWEC (The ASHRAE International Weather for Energy Calculations<sup>9</sup>) παρέχει πληροφορίες σχετικά με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο επιλεγμένο σημείο και για τις καιρικές συνθήκες σε αυτή την περιοχή,

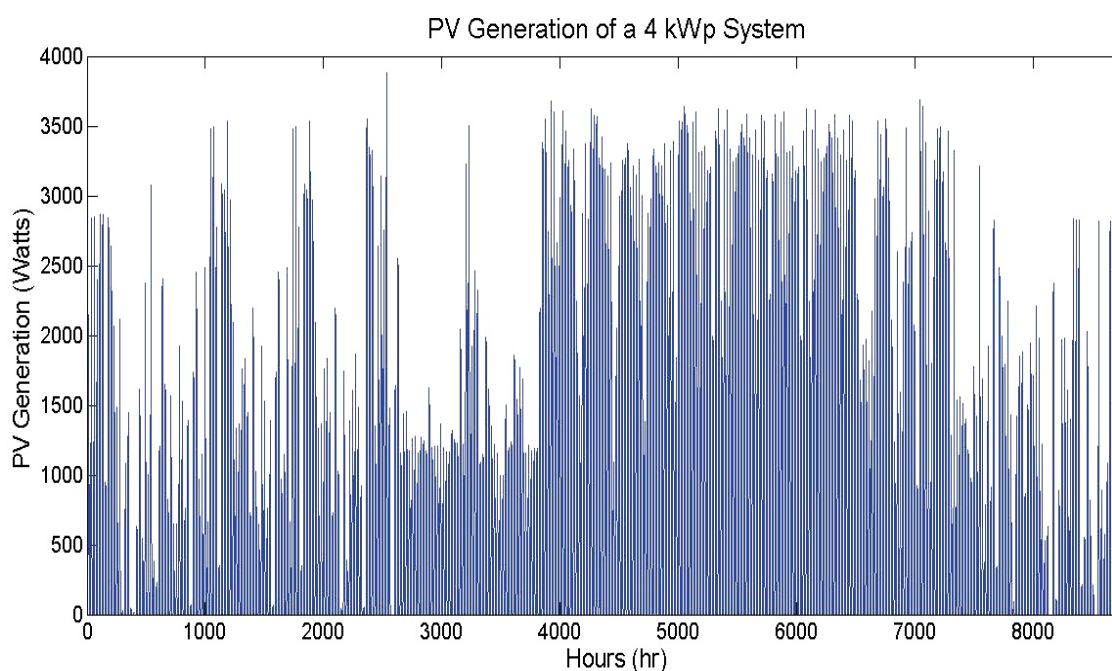
<sup>7</sup> [pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php](http://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php)

<sup>8</sup> <http://rredc.nrel.gov/solar/calculators/pvwatts/version1/change.html#derate>

<sup>9</sup> <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/climate-data-center>

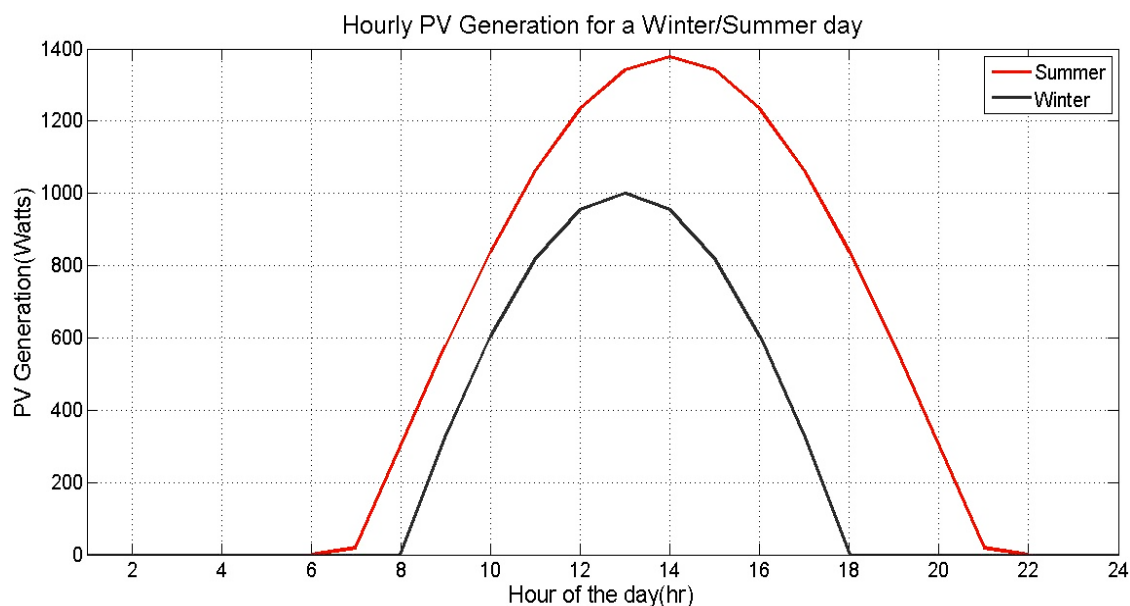
συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας του ανέμου. Παρέχει, επίσης, τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής, το υψόμετρο και τη ζώνη ώρας της τοποθεσίας. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω πληροφορίες προσομοιώνει και υπολογίζει τις τιμές των γωνιών που περιγράφουν τη θέση του ήλιου σε σχέση με τη διάταξη για κάθε ώρα του έτους. Στη συνέχεια, αυτές οι τιμές σε συνδυασμό με τις πληροφορίες σχετικά με τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων του επιτρέπουν να υπολογίσει την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο ζητούμενο σημείο. Τέλος, χρησιμοποιεί τη θερμοκρασία και την ταχύτητα ανέμου για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων της συστοιχίας.

Στη μελέτη που θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια, η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου θα θεωρηθεί 15%. Για το βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη κλίση του φωτοβολταϊκού πλαισίου για τη μέγιστη παραγωγή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι περίπου  $0^{\circ}$  (κατεύθυνση προς νότο). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια σταθερής κλίσης, επιτυγχάνεται για Νότιο προσανατολισμό<sup>10</sup> και κλίση περίπου  $30^{\circ}$ .



**Σχήμα 4.3** Ετήσια φωτοβολταϊκή παραγωγή συστήματος 4 kWp στην Αθήνα

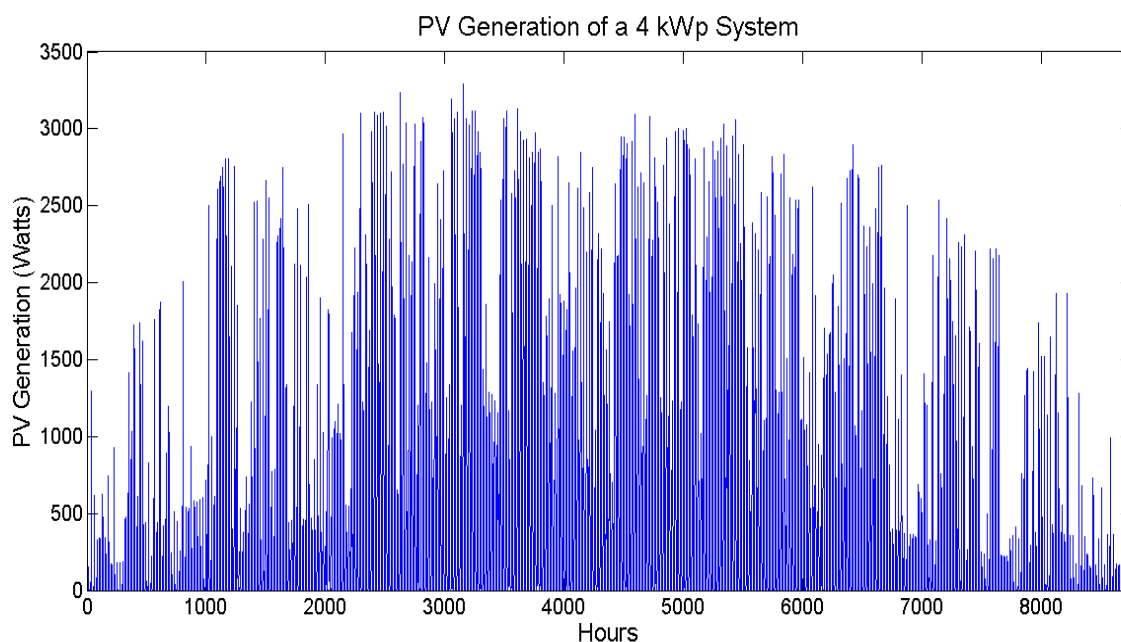
<sup>10</sup> [www.cres.gr/kape/pdf/odigos\\_pv\\_systimaton.pdf](http://www.cres.gr/kape/pdf/odigos_pv_systimaton.pdf)



**Σχήμα 4.4** Φωτοβολταϊκή παραγωγή χειμερινής και καλοκαιρινής μέρας

Τα σχήματα 4.3 και 4.4 απεικονίζουν την συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για τη διάρκεια ενός έτους και την παραγωγή μίας χειμερινής και μίας καλοκαιρινής μέρας αντίστοιχα, ενός συστήματος εγκατεστημένης ισχύος 4 kWp στην περιοχή της Αθήνας με συντεταγμένες  $37.9^{\circ}\text{N}$ ,  $23.73^{\circ}\text{E}$  (η τοποθεσία, οι μέρες όπως και η μέγιστη ισχύς του συστήματος επιλέχθηκαν τυχαία). Παρατηρείται πως η διάρκεια της ηλιοφάνειας είναι αισθητά μεγαλύτερη την καλοκαιρινή μέρα (αφού ο ήλιος φαίνεται να δύει περίπου στις εννιά το βράδυ σε σύγκριση με τη χειμερινή που δύει γύρω στις έξι το απόγευμα). Η συνολική παραγωγή ενέργειας για το σύστημα του σχήματος 4.3 ανέρχεται στις 5651 kWh/έτος. Ενώ, η μέση ημερήσια παραγωγή αντιστοιχεί σε 15,48 kWh.

Στο σχήμα 4.5 απεικονίζεται η συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για τη διάρκεια ενός έτους, ενός συστήματος εγκατεστημένης ισχύος 4 kWp, στην περιοχή του Βερολίνου με συντεταγμένες  $52.47^{\circ}\text{N}$ ,  $13.4^{\circ}\text{E}$ . Η κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων θεωρήθηκε  $35^{\circ}$  για αυτή την περίπτωση. Η συνολική παραγωγή για το σύστημα είναι 3765 kWh/έτος, όπου και παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφορά από την αντίστοιχη ετήσια παραγωγή στην Αθήνα. Το παραπάνω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς το ηλιακό δυναμικό της Γερμανίας είναι πολύ πιο χαμηλό από το αντίστοιχο της Ελλάδας. Στις προσομοιώσεις θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα φωτοβολταϊκής παραγωγής συστημάτων που αφορούν εγκαταστάσεις τόσο στη Γερμανία όσο και στην Ελλάδα.



**Σχήμα 4.5** Ετήσια φωτοβολταϊκή παραγωγή συστήματος 4 kWp στο Βερολίνο

### 4.2.3 Δεδομένα Συσσωρευτών

Στην παρούσα μελέτη το μέγεθος της χωρητικότητας των μπαταριών θα μεταβάλλεται ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος επιδιώκοντας την εύρεση του συνδυασμού που θα επιφέρει τη μεγαλύτερη ενεργειακή αξιοπιστία και το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Τις προδιαγραφές για τις ανάγκες της προσομοίωσης πληρούσαν δύο τύποι συσσωρευτών, οι μολύβδου - οξέος και οι ιόντων λιθίου. Συγκριτικά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αν και έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής και υψηλότερη απόδοση, είναι σχετικά μία νέα τεχνολογία (αρκετά πιο ακριβή σε σύγκριση με τις άλλες) που βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη. Βέβαια, αναμένεται σε μεταγενέστερο χρόνο ο τύπος αυτών των μπαταριών να επικρατήσει με την επικείμενη σταδιακή μείωση του κόστους του. Αντίθετα, οι μπαταρίες μολύβδου - οξέος θεωρούνται οι πλέον διαδεδομένες λόγω της ωριμότητας της τεχνολογίας τους και της πολύ καλής σχέσης απόδοσης-τιμής που παρουσιάζουν. Έχοντας λοιπόν υπόψιν όλα τα παραπάνω και αναζητώντας τον καταλληλότερο τύπο μπαταριών για την εφαρμογή μας καταλήξαμε στις μπαταρίες τύπου μολύβδου-οξέος.

Πιο συγκεκριμένα, οι συσσωρευτές που επιλέχθηκαν ήταν τύπου μολύβδου-αντιμονίου βαθιάς εκφόρτισης<sup>11</sup> (Long life flooded tubular plate batteries). Αυτό που διαφοροποιεί το συγκεκριμένο τύπο μπαταριών από τους υπόλοιπους είναι στην ουσία η προσθήκη αντιμονίου στις πλάκες μολύβδου. Όπως αναφέρθηκε εκτενέστερα και σε

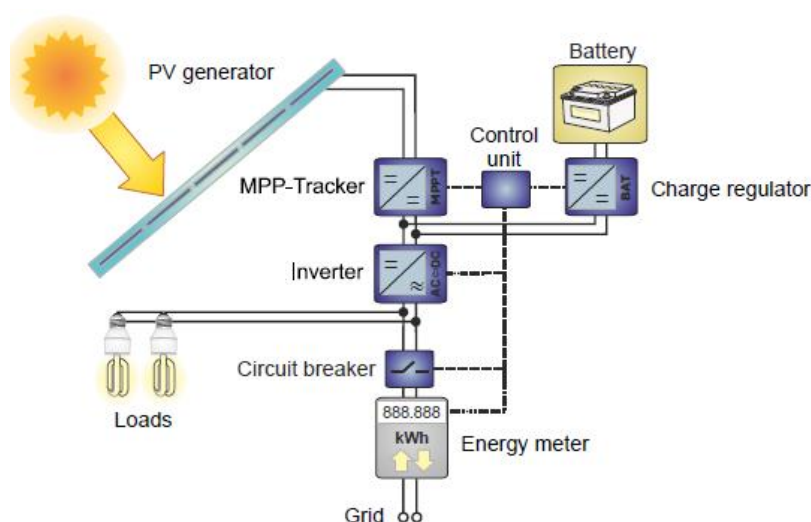
<sup>11</sup> <http://www.victronenergy.gr/upload/documents/Datasheet-OPzS-batteries-EN.pdf>

προηγούμενο κεφάλαιο, η προσθήκη αντιμονίου προσδίδει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, πράγμα που επιτρέπει μεγάλο βάθος εκφόρτισης (έως και 80%) και ταυτόχρονα μεγάλο χρόνο ζωής (πάνω από 1500 κύκλους στο αντίστοιχο βάθος αποφόρτισης).

Αναπτύσσοντας λοιπόν το μοντέλο της μπαταρίας κάναμε κάποιες θεωρήσεις. Για όλες τις προσομοιώσεις η ονομαστική τάση της μπαταρίας ( $V_{nom}$ ) δεν ξεπερνάει τα 12V. Ο βαθμός αυτό-εκφόρτισης (self-discharging factor) θεωρείται 3% ανά μήνα. Ως ονομαστικός ρυθμός φόρτισης θεωρείται ο ρυθμός φόρτισης των 10 ωρών (C/10). Οι βαθμοί απόδοσης της φόρτισης/αποφόρτισης (charge/discharge efficiencies) θεωρήθηκαν 90%. Το κόστος επένδυσης του φορτιστή/αντιστροφέα της μπαταρίας ανέρχεται στα 600 €/kW και ο χρόνος ζωής του φτάνει τα 10 χρόνια [31]. Τέλος, το κόστος επένδυσης της μπαταρίας ισούται με 200\$/kWh (160 €/kWh) [32]. Αναλυτικές πληροφορίες για τους συσσωρευτές μολύβδου – αντιμονίου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις μπορούν να βρεθούν στο αναλυτικό φυλλάδιο δεδομένων (data sheet) του κατασκευαστή [36].

### 4.3 Τοπολογία συστήματος

Η τοπολογία των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις κάθε εγκατάστασης. Συνήθως όμως παρατηρούμε δύο συνδεσμολογίες συστημάτων· τα AC συνδεδεμένα (AC coupled) και τα DC συνδεδεμένα (DC coupled) [28].

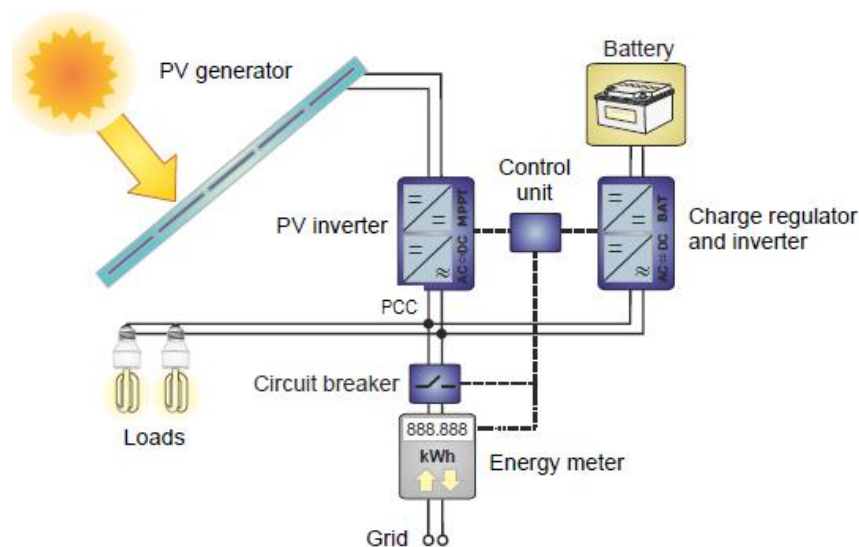


Σχήμα 4.6 DC Συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

Στα DC συνδεδεμένα συστήματα πραγματοποιείται η άμεση φόρτιση των μπαταριών μέσω του ρυθμιστή φόρτισης χρησιμοποιώντας απευθείας την συνεχή τάση που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Σε αυτή την περίπτωση ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) εγκαθίσταται μεταξύ των πάνελ και της μπαταρίας,

όπως βλέπουμε και στο σχήμα. Τόσο η φωτοβολταϊκή γεννήτρια όσο και η μπαταρία χρησιμοποιούν στη συνέχεια έναν κοινό αντιστροφέα για τη μετατροπή της παραγόμενης συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τροφοδοτώντας είτε τα φορτία είτε το δίκτυο μέσω του αμφίδρομου μετρητή ενέργειας.

Εναλλακτικά, όπως θα θεωρηθεί και στην παρούσα μελέτη, το σύστημα αποθήκευσης συνδέεται απευθείας στο σημείο κοινής σύνδεσης (ή AC ζυγό) μέσω ξεχωριστού αντιστροφέα (σχήμα 4.7). Ο φορτιστής/αντιστροφέας εκτός από το να μετατρέπει το ρεύμα ελέγχει και την φόρτιση ή την αποφόρτιση της μπαταρίας, η οποία παραμένει καθ' όλη τη λειτουργία της σε συνεχή (DC) συνθήκες.



**Σχήμα 4.7** AC συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

Η μονάδα ελέγχου που είναι εγκατεστημένη και στα δύο συστήματα παρακολουθεί και διαχειρίζεται την ροή ισχύος. Στην τοπολογία του σχήματος 4.7 η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, το δίκτυο, τα φορτία και η συστοιχία μπαταριών συνδέονται στο σημείο κοινής σύνδεσης (Place of common couple-PCC).

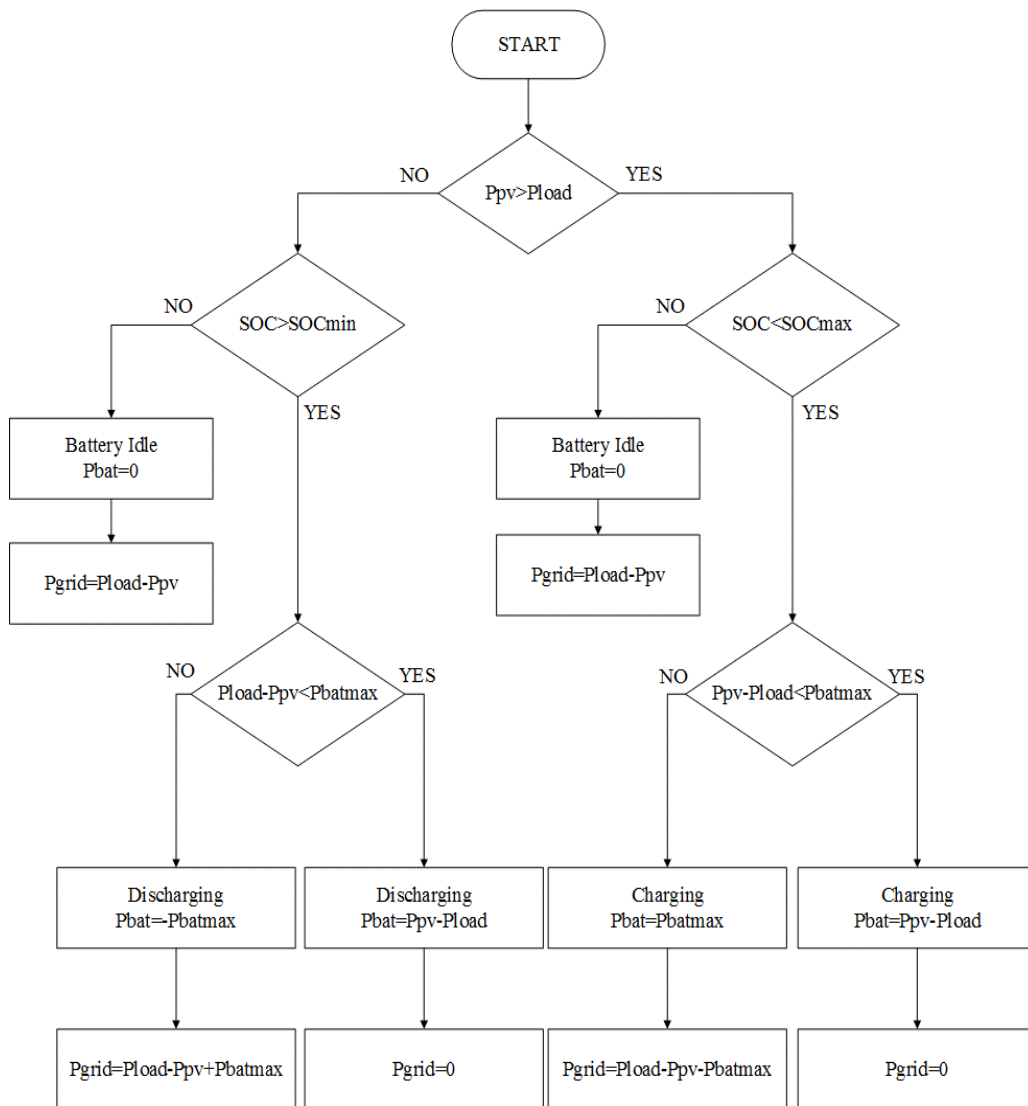
#### 4.4 Αλγόριθμος διαχείρισης ισχύος

Ο βασικός στόχος του αλγόριθμου διαχείρισης της ισχύος και της στρατηγικής που ακολουθήθηκε είναι η βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και κατ' επέκταση η μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης [33]. Επίσης, η λειτουργία του αλγόριθμου αυτού αποσκοπεί στη βέλτιστη διαχείριση του αποθηκευτικού συστήματος, μέσω της οποίας διατηρείται η καλή υγεία του και επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του. Η διαδικασία ξεκινά αφού εισαχθούν τα δεδομένα. Ο αλγόριθμος δέχεται σαν είσοδο την παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύ και την απαιτούμενη ισχύ του καταναλωτή για τη διάρκεια ενός έτους σε τιμές που μεταβάλλονται ανά ώρα ( $\Delta t=1\text{hour}$ , 8760 τιμές/έτος). Ακόμη, εισάγεται η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής



ενέργειας από το δίκτυο παροχής (ή και η τιμή πώλησης της περίσσειας παραγόμενης) καθώς επίσης και η χωρητικότητα των συσσωρευτών.

Κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας, και εξ' αιτίας των μεταβαλλόμενων μετεωρολογικών συνθηκών, η αποδιδόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα αλλάζει. Συνεπώς, αλλάζει και η ροή ενέργειας διαμέσου του συστήματος. Αν υπάρχει περίσσεια φωτοβολταϊκή ενέργεια και η κατάσταση φόρτισης το επιτρέπει ( $SOC < SOC_{max}$ ), φορτίζεται η μπαταρία χωρίς να ξεπερνά τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης, ενώ η υπόλοιπη εγχέεται στο δίκτυο συνήθως έναντι κάποιας αξίας. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται όταν η ισχύς που απαιτεί το φορτίο είναι μεγαλύτερη από την διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή. Τότε αν υπάρχει διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια ( $SOC > SOC_{min}$ ), η μπαταρία αποφορτίζεται με βάση το όριο αποφόρτισης και αν τα φορτία δεν ικανοποιήσουν την ζήτηση τους, αγοράζεται η επιπλέον ενέργεια από τον πάροχο, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα ροής ισχύος του σχήματος 4.8. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι κύριες μεταβλητές του αλγόριθμου διαχείρισης ισχύος.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα ροής ισχύος

**Πίνακας 2** Κύριες μεταβλητές του αλγόριθμου διαχείρισης ισχύος

Μεταβλητές		Τιμή
$P_{pv}$	Η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύς	Πάντα θετική
$P_{load}$	Η ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο	Πάντα θετική
$P_{bat}$	Η ισχύς φόρτισης/αποφόρτισης της μπαταρίας	Θετική/αρνητική
$P_{batmax}$	Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς της μπαταρίας	Θετική/αρνητική
$P_{grid}$	Η ισχύς λήψης ή τροφοδοσίας του δικτύου	Θετική/αρνητική

Μία από τις κύριες μεταβλητές του συστήματος είναι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC). Όταν η μπαταρία φτάνει στην κατάσταση πλήρους φόρτισης ( $SOC \geq SOC_{max}$ ), θα διακόπτεται η ροή ρεύματος από τη συστοιχία προς τη μπαταρία αποτρέποντας την υπερφόρτιση της. Η μπαταρία σε αυτή την περίπτωση είτε θα παραμένει σε αδράνεια είτε θα μπορεί να τροφοδοτεί το φορτίο και η περίσσεια φωτοβολταϊκή ενέργεια θα εγχέεται στο δίκτυο. Αντίστοιχα, όποτε η μπαταρία προσεγγίζει την κατάσταση πλήρους εκφόρτισης ( $SOC \leq SOC_{min}$ ) θα αποσυνδέεται άμεσα από τα ηλεκτρικά φορτία, τα οποία τώρα θα προμηθεύονται την ενέργεια που χρειάζονται από το δίκτυο. Επιπλέον, η περίσσεια παραγόμενη ενέργεια όταν υπάρχει μπορεί να αποθηκεύεται στην μπαταρία. Για την ενδιάμεση κατάσταση φόρτισης ( $SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$ ) ο αλγόριθμος θα επιδιώκει την μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης υπό τον περιορισμό του μέγιστου ρυθμού φόρτισης/αποφόρτισης.

Η απότομη και γρήγορη φόρτιση της μπαταρίας (αν και μερικές φορές είναι ωφέλιμη ή κρίνεται απαραίτητη) είναι μία από τις αιτίες πρόωμης γήρανσης. Τα υψηλά ρεύματα ανεβάζουν την θερμοκρασία στο εσωτερικό της μπαταρίας με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η χημική αποσύνθεση και να μικραίνει ο χρόνος ζωής της. Γενικά, συνιστάται το ρεύμα φόρτισης να μην ξεπερνά το ρυθμό φόρτισης C/10 ή το 10% της ονομαστικής χωρητικότητας του συσσωρευτή. Επιπλέον, οι υψηλοί ρυθμοί εκφόρτισης επιδρούν καταλυτικά στην αποδιδόμενη χωρητικότητα του συσσωρευτή (όσο αυξάνεται ο ρυθμός εκφόρτισης τόσο μειώνεται η συνολική αποδιδόμενη ενέργεια, φαινόμενο Peukert) [18],[21].

Συμπερασματικά, στη παρούσα μοντελοποίηση τίθενται οι εξής αρχές/περιορισμοί: δεν θα επιτρέπεται η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του αποθηκευτικού συστήματος και του δικτύου, επιτυγχάνοντας έτσι την αύξηση της ιδιοκατανάλωσης. Συνεπάγεται πως η μπαταρία θα φορτίζεται αποκλειστικά και μόνο από την περισσευούμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια, ενώ θα αποφορτίζεται μονάχα στο φορτίο, αυξάνοντας ταυτόχρονα την αυτονομία του συστήματος. Επιπλέον, ο αλγόριθμος θα αποτρέπει την υπερφόρτιση ή την υπερεκφόρτιση των συσσωρευτών και θα διατηρεί το ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης κάτω από τον ονομαστικό (C/10), αυξάνοντας έτσι την διάρκεια ζωής τους [18].

## 4.5 Μέθοδος προσομοίωσης

Η μοντελοποίηση αυτή έχει εφαρμογή σε καταναλωτές της χαμηλής τάσης με φωτοβολταϊκά μικρής ισχύος (π.χ. στην οροφή) για την εξυπηρέτηση οικιακών ή εμπορικών φορτίων. Σε αυτές τις εφαρμογές στόχος είναι να ελαχιστοποιείται το κόστος επένδυσης του αποθηκευτικού συστήματος (ή ισότιμα η χωρητικότητα της), ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο για την κάλυψη των φορτίων (αύξηση της ιδιοκατανάλωσης/αυτονομίας). Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη σωστή διαστασιολόγηση της μπαταρίας είναι το φαινόμενο της γήρανσης. Στο μοντέλο αυτό προσομοιώνεται το φαινόμενο της γήρανσης, πραγματοποιείται ανάλυση του κόστους του και προσεγγίζεται ο χρόνος ζωής των μπαταριών. Ακόμη, θα παρουσιαστούν τα κριτήρια με βάση τα οποία θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί αναλυτική περιγραφή των εξισώσεων και των μεταβλητών του μοντέλου προσομοίωσης που αναπτύχθηκε. Αξίζει να σημειωθεί πως στο μοντέλο αυτό οι έννοιες ισχύς και ενέργεια είναι ταυτόσημες λόγω της ωριαίας δειγματοληψίας ( $\Delta T=1h$ ) που χρησιμοποιήθηκε.

### 4.5.1 Εξισώσεις και μεταβλητές

#### Ροή Ενέργειας

Αρχικά, η παραγόμενη από την φωτοβολταϊκή συστοιχία ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στον AC ζυγό μέσω του αντιστροφέα που την μετατρέπει από συνεχή (DC) σε εναλλασσόμενη (AC). Άρα,

$$P_{PV,AC}(t) = \eta_{inv} * P_{PV,DC}(t) \quad (4.1)$$

Όπου,

$P_{PV,DC}$  η ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών πάνελ (W)

$P_{PV,AC}$  η ισχύς έγχυσης στον AC ζυγό (W)

$\eta_{inv}$  ο συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα (%)

Η ισχύς φόρτισης και αποφόρτισης που μεταφέρεται από και προς την μπαταρία στη διάρκεια μίας ώρας μπορεί να ληφθεί από την εξίσωση (4.2).

$$P_{DC,bat}(t) = \frac{E_{bat}(t) - E_{bat}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Όπου,

$P_{DC,bat}$  ο ρυθμός ισχύος φόρτισης/αποφόρτισης της μπαταρίας (W)

$E_{bat}$  η αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία (Wh)

Κατά την διαδικασία της φόρτισης ( $P_{DC,bat} > 0$ ) η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας αυξάνεται, ενώ αντίστοιχα όταν η μπαταρία εκφορτίζεται ( $P_{DC,bat} < 0$ ) η αποθηκευμένη ενέργεια της μειώνεται.

Όπως στην εξίσωση (4.1), όπου πραγματοποιείται η μετατροπή της παραγόμενης DC φωτοβολταϊκής ισχύος σε AC, έτσι απαιτείται και η μετατροπή της DC ισχύος των μπαταριών σε AC μέσω του φορτιστή/αντιστροφέα για την τροφοδοσία των φορτίων (αποφόρτιση). Αντίστοιχα, για τη διαδικασία της φόρτισης ο αντιστροφέας λαμβάνει την AC ισχύ από τον AC ζυγό και αφού την μετατρέψει σε DC τροφοδοτεί τη μπαταρία όπως περιγράφει και η σχέση (4.3). Ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα των μπαταριών  $\eta_{bat}$  λαμβάνει την ίδια τιμή τόσο στη φόρτιση όσο και στην εκφόρτιση. Επομένως,

$$P_{AC,bat}(t) = \begin{cases} \eta_{bat} P_{DC,bat}(t), & P_{DC,bat} < 0 \\ \frac{P_{DC,bat}(t)}{\eta_{bat}}, & P_{DC,bat} > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Όπου,

$P_{AC,bat}$  η ισχύς φόρτισης/αποφόρτισης που εγχέεται στον AC ζυγό (W)

$P_{DC,bat}$  η ισχύς φόρτισης/αποφόρτισης της μπαταρίας (W)

$\eta_{bat}$  ο βαθμός απόδοσης αντιστροφέα της μπαταρίας (%)

### Κατάσταση φόρτισης

Ο βαθμός φόρτισης της μπαταρίας SOC εξαρτάται από το ποσό της ισχύος φόρτισης ή αποφόρτισης που τροφοδοτεί ή λαμβάνει η μπαταρία για τη διάρκεια μίας ώρας

[4.12]. Στη μελέτη αυτή λαμβάνεται υπόψιν και ο βαθμός αυτό-εκφόρτισης της μπαταρίας  $\alpha$ .

Φόρτιση,

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t) * (1 - \alpha) + \eta_{charge} \frac{P_{DC,bat}(t)}{C_{actual}(t) * V_{nom}} \Delta t \quad (4.4)$$

Αποφόρτιση,

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t) * (1 - \alpha) + \eta_{discharge} \frac{P_{DC,bat}(t)}{C_{actual}(t) * V_{nom}} \Delta t \quad (4.5)$$

Όπου,

$C_{actual}$  η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας (Ah)

$P_{DC,bat}$  η ισχύς φόρτισης ή αποφόρτισης της μπαταρίας (W)

$\alpha$  ο βαθμός αυτό-εκφόρτισης (%)

$V_{nom}$  η ονομαστική τάση της μπαταρίας (V)

### Μέγιστος ρυθμός φόρτισης/αποφόρτισης

Όπως περιγράφηκε και στον αλγόριθμο διαχείρισης της ισχύος, στο μοντέλο αυτό τίθεται περιορισμός της ισχύος που απορροφάται ή αποδίδεται από τη μπαταρία. Πιο αναλυτικά, ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών δεν επιτρέπεται να υπερβεί τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης που προκύπτει από την σχέση (4.6).

$$P_{DC,ch,max}(t) = P_{DC,disch,max}(t) = \frac{C_{actual}(t) * V_{nom}}{t_{min}} \quad (4.6)$$

Όπου,

$P_{DC,ch,max}$  ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης της μπαταρίας (W)

$P_{DC,disch,max}$  ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτισης της μπαταρίας (W)

$t_{min}$  οι ελάχιστες ώρες φόρτισης/εκφόρτισης (hours)

### Διαστασιολόγηση του αντιστροφέα μπαταριών

Η διαστασιολόγηση του αντιστροφέα μπαταριών  $B_{inverter,size}$  έγινε με βάση τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να απορροφήσει ή να αποδώσει η μπαταρία, όπως υπολογίζεται και από τη σχέση (4.6). Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται ενδεικτικά διαθέσιμα προϊόντα φορτιστών/αντιστροφέων της εταιρίας Victron Energy τα οποία αντιστοιχίζονται στους μέγιστους ρυθμούς φόρτισης/εκφόρτισης των μπαταριών. Αναλυτικές πληροφορίες σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αντιστροφέων μπορούν να αναζητηθούν στο Παράρτημα Δ.

**Πίνακας 4** Διαστασιολόγηση του αντιστροφέα μπαταριών

Μέγιστος ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης $P_{DC,ch,max}/P_{DC,disch,max}$ (W)	Προϊόντα της εταιρίας Victron Energy
< 800	MultiPlus C 12/800/35-16
< 1200	MultiPlus C 12/1200/50-16
< 1600	MultiPlus C 12/1600/70-16
< 2100	MultiPlus C 12/2000/80-30
< 3000	MultiPlus 12/3000/120-16

### Μοντέλο γήρανσης

Η εξίσωση (4.7) περιγράφει τις συνολικές απώλειες της χωρητικότητας των συσσωρευτών εξ' αιτίας της γήρανσης κατά την διαδικασία της φόρτισης και της αποφόρτισης και λήφθηκε από το [9].

$$E_{loss,cum}(t) = \begin{cases} E_{loss,cum}(t - \Delta t) - ZP_{DC,bat}\Delta t, & P_{DC,bat} < 0 \\ E_{loss,cum}(t - \Delta t), & P_{DC,bat} > 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Όπου,

$E_{loss,cum}$	οι συνολικές απώλειες χωρητικότητας των συσσωρευτών (Wh)
$Z$	ο συντελεστής γήρανσης

Η διαδικασία της γήρανσης μοντελοποιείται μέσω των γραμμικών απωλειών και του βάθους εκφόρτισης, σύμφωνα με τα [37], [38]. Ο συντελεστής γήρανσης είναι μία θετική σταθερά της οποίας η τιμή εξαρτάται από την τεχνολογία της μπαταρίας. Στο [39] παρουσιάζονται γραμμικοί συντελεστές γήρανσης διαφόρων τεχνολογιών συμπεριλαμβανομένων και των μπαταριών μολύβδου – οξέος. Τα αποτελέσματα προέρχονται από πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν στο Εθνικό Ινστιτούτο Ηλιακής Ενέργειας (INES) της Γαλλίας. Συγκεκριμένα, η τιμή του συντελεστή γήρανσης για τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος είναι  $3 * 10^{-4}$ .

Το ποσό της ενέργειας που χάνεται ανά ώρα μεταφράζεται μέσω της μεταβλητής  $E_{loss}$ .

$$E_{loss}(t) = E_{loss,cum}(t) - E_{loss,cum}(t - 1) \quad (4.8)$$

Όπου,

$E_{loss}$	οι απώλειες χωρητικότητας για τη διάρκεια μίας ώρας (Wh)
------------	--

Οι συνολικές απώλειες χωρητικότητας ενημερώνονται σε κάθε βήμα. Έτσι, μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογίζουμε ανά πάσα στιγμή την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα των συσσωρευτών  $C_{actual}$ , η οποία μετράται σε Ah. Η τιμή της προκύπτει αφαιρώντας από την ονομαστική χωρητικότητα το συνολικό ποσό της ενέργειας που χάθηκε έως την ζητούμενη χρονική στιγμή  $t$ , όπως περιγράφεται και από την σχέση (4.9).

$$C_{actual}(t) = C_{nom} - \frac{E_{loss,cum}(t)}{V_{nom}} \quad (4.9)$$

Όπου,

$C_{nom}$	η ονομαστική χωρητικότητα (Ah)
$C_{actual}$	η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα (Ah)
$E_{loss,cum}$	οι συνολικές απώλειες χωρητικότητας (Wh)

$V_{nom}$  η ονομαστική τάση της μπαταρίας (V)

### Λειτουργικό κόστος συσσωρευτών

Στα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα με αποθήκευση ενέργειας προκύπτουν αφενός οικονομικά οφέλη (λόγω της μεγιστοποίησης της ιδιοκατανάλωσης της παραγόμενης ενέργειας ή από την πώληση της περίσσειας παραγόμενης στο δίκτυο), αφετέρου δημιουργούνται νέα κόστη προς τον ιδιοκτήτη του συστήματος, όπως τα λειτουργικά κόστη της μπαταρίας.

Οι απώλειες χωρητικότητας που οφείλονται, όπως περιγράφηκε και παραπάνω, στη διαδικασία της εκφόρτισης θα προστίθενται μέρα με τη μέρα και κάποια χρόνια μετά η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας θα φτάσει στο τέλος της. Θεωρώντας λοιπόν γνωστό το κόστος επένδυσής της μπαταρίας και τη διάρκεια ζωής της, το κόστος εξ' αιτίας της γήρανσης μπορεί να υπολογιστεί και είναι σημαντικό να συμπεριληφθεί στην οικονομική αξιολόγηση της μελέτης.

Η αναφορά [40] παρουσιάζει την εξίσωση που μεταφράζει τις απώλειες χωρητικότητας των συσσωρευτών σε κόστος οποιαδήποτε χρονική στιγμή κατά τη λειτουργία του συστήματος ως εξής:

$$BCL_{cost}(t) = \frac{E_{loss}(t) * B_{invest,cost}}{(1 - SOH_{min}) * 10^3} \quad (4.10)$$

Όπου,

$BCL_{cost}$  το κόστος απώλειας της χωρητικότητας της μπαταρίας (€)

$B_{invest,cost}$  το κόστος επένδυσης της μπαταρίας (€/kWh)

Η ελάχιστη κατάσταση υγείας των συσσωρευτών  $SOH_{min}$  για την εύρεση του κόστους θεωρείται μηδέν σε αυτή την μελέτη καθώς το μοντέλο της γήρανσης θεωρείται ιδανικό σύμφωνα με το [34]. Παρόλα αυτά μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε βήμα διαιρώντας την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα  $C_{actual}$  από την ονομαστική  $C_{nom}$  όπως περιγράφεται από την εξίσωση (4.11).

$$SOH(t) = \frac{C_{actual}(t)}{C_{nom}} \quad (4.11)$$



Όπου,

$SOH$  η κατάσταση υγείας των συσσωρευτών

$C_{nom}$  η ονομαστική χωρητικότητα (Ah)

$C_{actual}$  η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα (Ah)

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι μεταβλητές εισόδου της μεθόδου προσομοίωσης που ακολουθήθηκε.

**Πίνακας 3** Μεταβλητές εισόδου στην μέθοδο προσομοίωσης

<b>Μεταβλητή</b>		<b>Τιμή</b>
$Z$	Συντελεστής γήρανσης	$3 \cdot 10^{-4}$
$SOC_{max}$	Μέγιστος βαθμός φόρτισης	90%
$SOC_{min}$	Ελάχιστος βαθμός φόρτισης	20%
$\alpha$	Βαθμός αυτό-εκφόρτισης	3% ανά μήνα
$t_{min}$	Ελάχιστος χρόνος φόρτισης/αποφόρτισης	10 ώρες
$\eta_{inv}$	Βαθμός απόδοσης $\phi/\beta$ αντιστροφέα	97%
$\eta_{bat}$	Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα μπαταριών	94%
$\eta_{ch} / \eta_{disch}$	Βαθμός απόδοσης φόρτισης/αποφόρτισης	90%
$V_{nom}$	Ονομαστική τάση μπαταριών	12 V
$\Delta t$	Τιμή δειγματοληψίας	1 ώρα
DOD	Βάθος εκφόρτισης	80%
$r$	Πραγματικό επιτόκιο αναγωγής	4%
$N_{inv}$	Διάρκεια ζωής αντιστροφέα	10 χρόνια
$B_{invest,cost}$	Κόστος επένδυσης μπαταρίας	160 €/kWh
$B_{inverter,cost}$	Κόστος επένδυσης αντιστροφέα μπαταριών	600 €/kW

## 4.5.2 Ενεργειακά κριτήρια αξιολόγησης

### Βαθμός της ιδιοκατανάλωσης (self-consumption rate)

Βασικό κριτήριο αξιολόγησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων με αποθήκευση ενέργειας αποτελεί ο βαθμός της ιδιοκατανάλωσης (*Self-consumption rate*). Ως βαθμός της ιδιοκατανάλωσης  $S$  (%) ορίζεται ο λόγος της φωτοβολταϊκής ενέργειας που χρησιμοποιείται απευθείας για την τροφοδοσία των φορτίων ή της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για την φόρτιση της μπαταρίας προς τη συνολική παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια. Επομένως,

$$S = \frac{E_{DU} + E_{DC,bat,ch}}{E_{PV}} \quad (4.12)$$

Όπου,

$E_{DU}$  η φωτοβολταϊκή ενέργεια που χρησιμοποιείται απευθείας (kWh)

$E_{DC,bat,ch}$  η συνολική ενέργεια φόρτισης της μπαταρίας (kWh)

$E_{PV}$  η συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)

$S$  ο βαθμός ιδιοκατανάλωσης (%)

### **Βαθμός αυτονομίας (degree of self-sufficiency)**

Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο είναι ο λεγόμενος *βαθμός αυτονομίας* (degree of self-sufficiency) του συστήματος, ο οποίος περιγράφει το ποσό της κατανάλωσης του φορτίου που τροφοδοτήθηκε από το φωτοβολταϊκό σύστημα ή τους συσσωρευτές. Ο βαθμός αυτονομίας  $D$  (%) υπολογίζεται από την παραγόμενη ενέργεια που χρησιμοποιείται απευθείας στα φορτία, την συνολική ενέργεια που αποφορτίζεται από την μπαταρία και τη συνολική ζήτηση του φορτίου ως εξής:

$$D = \frac{E_{DU} + E_{DC,bat,disch}}{E_{LOAD}} \quad (4.13)$$

Όπου,

$E_{DU}$  η φωτοβολταϊκή ενέργεια που χρησιμοποιείται απευθείας (kWh)

$E_{DC,bat,disch}$  η συνολική ενέργεια αποφόρτισης της μπαταρίας (kWh)

$E_{LOAD}$  η συνολική ζήτηση του φορτίου (kWh)

$D$  ο βαθμός αυτονομίας (%)

### **Κύκλοι ζωής/αποθήκευσης (storage cycles)**

Για να αξιολογηθεί η λειτουργία του αποθηκευτικού συστήματος είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης του συσσωρευτή (ένας κύκλος ισοδυναμεί με μια εκφόρτιση που ακολουθείται από μια φόρτιση), ο οποίος

εκφράζεται με το ποσό της DC ενέργειας αποφόρτισης της μπαταρίας προς την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα  $E_{BU}$  [28]:

$$\eta_c = \frac{E_{DC,bat,disch}}{E_{BU}} \quad (4.14)$$

Όπου,

$E_{BU}$	η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα του συσσωρευτή (kWh)
$E_{DC,bat,disch}$	η συνολική ενέργεια αποφόρτισης της μπαταρίας (kWh)
$\eta_c$	ο αριθμός των κύκλων αποθήκευσης της μπαταρίας

Προσοχή, η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα  $E_{BU}$  δεν είναι ισότιμη με την  $C_{actual}$  που αναφέρθηκε σε προηγούμενο σημείο. Η  $C_{actual}$  εκφράζει τη χωρητικότητα σε Ah που μένει στη μπαταρία μετά από τις απώλειες που υφίσταται σε κάθε βήμα προσομοίωσης εξαιτίας της γήρανσης. Ενώ, η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα  $E_{BU}$  εκφράζει το ποσό της ονομαστικής χωρητικότητας σε kWh, το οποίο αξιοποιείται για την φόρτιση ή την εκφόρτιση της μπαταρίας και εξαρτάται από τη μέγιστη και ελάχιστη επιτρεπόμενη κατάσταση φόρτισης [28]. Δηλαδή,

$$E_{BU} = (SOC_{max} - SOC_{min}) * C_{nom} * V_{nom} \quad (4.15)$$

Όπου,

$SOC_{max}$	μέγιστη επιτρεπόμενη κατάσταση φόρτισης (%)
$SOC_{min}$	ελάχιστη επιτρεπόμενη κατάσταση φόρτισης (%)
$C_{nom}$	η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή (Ah)
$V_{nom}$	η ονομαστική τάση της μπαταρίας (V)

### **Χρόνος ζωής συσσωρευτών (Lifetime of batteries)**

Ο χρόνος ζωής των μπαταριών ορίζεται σαν τη διάρκεια ικανοποιητικής επίδοσης που μετράται σε χρόνια (float ή ημερολογιακός χρόνος ζωής) ή σαν τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης (κύκλος ζωής). Το κριτήριο τέλους ζωής των μπαταριών καθορίζεται συνήθως από το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η μπαταρία το 80% της αρχικής της χωρητικότητας. Ο χρόνος ζωής των μπαταριών, επηρεάζεται από έναν

αριθμό συνθηκών, μεταξύ αυτών από τη θερμοκρασία κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση, το DOD, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης, τη μέθοδο ελέγχου της φόρτισης, την έκθεση σε υπερφόρτιση και/ή υπερεκφόρτιση και τη διάρκεια και τις συνθήκες αποθήκευσης. Επίσης, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης τυπικά αυξάνεται καθώς μειώνεται το DOD.

Μέσω της σχέσης (4.7) υπολογίσαμε της συνολικές απώλειες της χωρητικότητας του συσσωρευτή για τη διάρκεια ενός έτους. Έτσι, θεωρώντας ότι αυτές οι απώλειες θα παραμένουν ίδιες και για τα υπόλοιπα έτη υπολογίζουμε τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών ως εξής:

$$Lifetime_{degradation} = \frac{C_{nom} * 0,2 * V_{nom}}{E_{loss,cum}} \quad (4.16)$$

Όπου,

$C_{nom}$  η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή (Ah)

$V_{nom}$  η ονομαστική τάση της μπαταρίας (V)

$E_{loss,cum}$  οι συνολικές απώλειες χωρητικότητας (Wh)

Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών υπολογίστηκε θεωρώντας πως το τέλος ζωής της μπαταρίας προκύπτει όταν η μπαταρία φτάσει το 80 % της ονομαστικής της χωρητικότητας εξ' αιτίας των απωλειών της χωρητικότητας που οφείλονται στο φαινόμενο της γήρανσης. [35]

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του χρόνου ζωής των μπαταριών μπορεί να προκύψει από τους κύκλους ζωής που δίνονται από τον κατασκευαστή τους. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας υπολογίσει τους ετήσιους κύκλους αποθήκευσης  $\eta_c$  από τη σχέση (4.14) και γνωρίζοντας από το data sheet των μπαταριών (OPzS Solar μολύβδου – αντιμονίου [36]) ότι για βάθος εκφόρτισης DOD ίσο με 80 % οι κύκλοι αποθήκευσης περιορίζονται σε 1500, ο χρόνος ζωής των μπαταριών με βάση τους κύκλους δίνεται από την εξίσωση (4.17).

$$Lifetime_{cycles} = \frac{\eta_{c,max}}{\eta_c} \quad (4.17)$$

Όπου,

$\eta_{c,max}$  ο αριθμός κύκλων αποθήκευσης από τον κατασκευαστή στο αντίστοιχο βάθος εκφόρτισης DOD

$\eta_c$  οι ετήσιοι κύκλοι αποθήκευσης

Οι δύο παραπάνω τρόποι υπολογισμού του χρόνου ζωής φτάνουν σε κοντινά αποτελέσματα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της εκτίμησης του χρόνου ζωής με τη δεύτερη μέθοδο είναι πιο αισιόδοξα. Ο κατασκευαστής συνήθως μετράει το κύκλο ζωής σε σχετικά μεγάλα ρεύματα (μικρούς χρόνους εκφόρτισης) και το αναγραφόμενο DOD συχνά αναφέρεται στη χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη σε αυτό το μικρό χρόνο εκφόρτισης. Όπως και να έχει στην παρούσα μελέτη ο χρόνος ζωής των μπαταριών θα θεωρείται ότι υπολογίζεται από την εξίσωση (4.17) λαμβάνοντας υπόψη τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των μπαταριών που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση.

### 4.5.3 Τεχνοοικονομικά κριτήρια αξιολόγησης

Μετά τα ενεργειακά κριτήρια, μέσω των οποίων αξιολογείται η εύρυθμη λειτουργία και η ενεργειακή επάρκεια των φωτοβολταϊκών συστημάτων με αποθήκευση, θα οριστούν και τα τεχνοοικονομικά κριτήρια, τα οποία αξιολογούν την εκάστοτε διαμόρφωση του συστήματος από οικονομική πλευρά, αναδεικνύοντας έτσι τον βέλτιστο οικονομικά συνδυασμό φωτοβολταϊκού συστήματος-χωρητικότητας μπαταρίας.

Η οικονομική αξιολόγηση διεξάγεται ακολουθώντας την μέθοδο της ετήσιας αξίας ή πιο συγκεκριμένα μέσω του κριτηρίου του *ομοιόμορφου ισοδύναμου ετήσιου κόστους* (*uniform annual equivalent cost*). Το κριτήριο αυτό χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων, με τη λογική ότι το χαμηλό κόστος λειτουργίας είναι ένα από τα κλειδιά της επιτυχίας ενός προσοδοφόρου επενδυτικού σχεδίου. Επιπλέον, αξιοποιείται ως κριτήριο με δεδομένο ότι κόστος χαμηλότερο από το μέσο κόστος των ανταγωνιστών (στην περίπτωση μας ανταγωνιστής μπορεί να θεωρηθεί ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας), σημαίνει υψηλότερα ποσοστά βιωσιμότητας της επένδυσης σε περιόδους κρίσης της αγοράς (λόγω μείωσης των τιμών της ζήτησης) (Torgies, 1998). Για την εφαρμογή του κριτηρίου απαιτείται η αναγωγή όλων των σταθερών και μεταβλητών δαπανών, συμπεριλαμβανομένων των επενδυτικών, σε ετήσια βάση. Εάν υπάρχουν οφέλη, τα οποία διαφοροποιούνται στα δύο σχέδια τότε αυτά συνυπολογίζονται ως κόστη προσημασμένα αρνητικά (Τσώλας, 2002, Αποστολίδης, 1986).

Το συνολικό ισοδύναμο ετήσιο κόστος προκύπτει από την παρούσα αξία της συνολικής ροής κόστους (έξοδα επένδυσης συν καθαρά κόστη λειτουργίας και συντήρησης) επί τον συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (CRF) ως εξής:

$$\text{Συνολικό ισοδύναμο ετήσιο κόστος} = \left( \sum_{t=0}^n \frac{(C_t + OC_t)}{(1+r)^t} \right) * \left( \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right) \quad (4.18)$$

Όπου,

$t = 0$  το έτος αναφοράς

$C_t$  τα συνολικά έξοδα επένδυσης στην περίοδο  $t$

$OC_t$  τα συνολικά καθαρά κόστη λειτουργίας και συντήρησης στην περίοδο

$r$  το επιτόκιο αναγωγής

$n$  η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του έργου σε έτη

### Κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος

Η διάρκεια οικονομικής ζωής της επένδυσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σχεδόν συμπίπτει με την αναμενόμενη ζωή λειτουργίας του και θεωρείται στην παρούσα μελέτη τα είκοσι χρόνια ( $n = 20$ ), τόση θα θεωρείται και η διάρκεια ζωής του συνολικού συστήματος. Το κόστος επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος προκύπτει ως εξής:

$$PV_{cost} = PV_{invest, cost} * PV_{system, size} \quad (4.19)$$

Όπου,

$PV_{invest, cost}$  το κόστος επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος (€/kWp)

$PV_{system, size}$  το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος (kWp)

Τα ετήσια κόστη του φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελούνται από τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, τα οποία παραμένουν σταθερά για όλη τη διάρκεια της επένδυσης και υπολογίζονται από την σχέση (4.20).

$$PV_{oper, cost} = PV_{invest, cost} * PV_{system, size} * 1.5\% \quad (4.20)$$

Όπου,

$PV_{oper,cost}$  τα κόστη λειτουργίας/συντήρησης σταθμισμένα στο κόστος επένδυσης

Το κόστος του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα ενσωματώνεται στο κόστος επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ενώ, τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης ανέρχονται στο 1.5 % του συνολικού κόστους επένδυσης ανά έτος [28].

### Κόστος συστήματος αποθήκευσης

Για να υπολογιστεί το ετήσιο κόστος του συστήματος αποθήκευσης ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με την παραπάνω. Πιο αναλυτικά, αφού υπολογιστούν τα ετήσια λειτουργικά κόστη  $BCL_{annual,cost}$  από την σχέση (4.10) και το κόστος του αντιστροφέα που θα χρησιμοποιηθεί, προστίθενται στο κόστος επένδυσης της μπαταρίας το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$B_{cost} = B_{invest,cost} * E_{nom} \quad (4.21)$$

Όπου,

$B_{invest,cost}$  το κόστος επένδυσης του συσσωρευτή (€/kWh)

$E_{nom}$  η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας (kWh)

Η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας  $E_{nom}$  μετράται σε ενέργεια (kWh) και υπολογίζεται από την σχέση (4.22).

$$E_{nom} = \frac{C_{nom} * V_{nom}}{10^3} \quad (4.22)$$

Όπου,

$C_{nom}$  η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας (Ah)

$V_{nom}$  η ονομαστική τάση της μπαταρίας (V)

Επομένως, το κόστος του συνολικού αποθηκευτικού συστήματος προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση (4.23):

$$B_{system,cost} = B_{cost} + BCL_{annual,cost} + B_{inverter,cost} * B_{inverter,size} \quad (4.23)$$

Όπου,

$B_{cost}$  το κόστος επένδυσης της μπαταρίας (€)

$BCL_{annual,cost}$  τα λειτουργικά κόστη της μπαταρίας στο τέλος του έτους (€)

$B_{inverter,cost}$  το κόστος επένδυσης του αντιστροφέα της μπαταρίας (€/kW)

$B_{inverter,size}$  το μέγεθος του αντιστροφέα των μπαταριών (kW)

Αξίζει να σημειωθεί πως σε αντίθεση με τα ετήσια λειτουργικά κόστη του φωτοβολταϊκού συστήματος τα οποία παραμένουν σταθερά, το συνολικό κόστος του συστήματος αποθήκευσης  $B_{system,cost}$  μεταβάλλεται ανά έτος. Για παράδειγμα, οι συσσωρευτές ή ο αντιστροφέας των μπαταριών θα πρέπει να αντικατασταθούν μετά από κάποια χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος επένδυσης του αντιστροφέα θα πρέπει να συμπεριληφθεί ξανά στον υπολογισμό της παρούσας αξίας εκτός από το πρώτο αλλά και το δέκατο έτος (αφού η διάρκεια της ζωής του ανέρχεται σε δέκα χρόνια). Αντίστοιχα, αφού προσεγγιστεί ο χρόνος ζωής των μπαταριών μέσω της σχέσης (4.11) υπολογίζεται πόσες φορές πρέπει να αντικατασταθεί η μπαταρία στην διάρκεια της οικονομικής ζωής της επένδυσης. Σταθερά κόστη για κάθε έτος στους παρακάτω υπολογισμούς θεωρούνται μόνο τα λειτουργικά κόστη της μπαταρίας  $BCL_{annual,cost}$ .

### **Κόστος προμήθειας ενέργειας από το δίκτυο**

Το μέσο ετήσιο κόστος  $C_{GRID}$  (€) για την προμήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο υπολογίζεται από την μέση λιανική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό ετήσιο φορτίο και το βαθμό αυτονομίας:

$$C_{GRID} = p_{GRID,AVG} * E_{LOAD} * (1 - D) \quad (4.24)$$

Όπου,



$p_{GRID,AVG}$	η μέση λιανική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh)
$E_{LOAD}$	το συνολικό ετήσιο φορτίο (kWh)
$D$	ο βαθμός αυτονομίας (%)

Η μέση τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο  $p_{GRID,AVG}$  υπολογίζεται θεωρώντας αύξηση της λιανικής τιμής  $p_{GRID}$  κατά 2% ανά έτος για τα επόμενα είκοσι χρόνια [28].

### Κέρδος πώλησης περίσσειας φωτοβολταϊκής ενέργειας

Εκτός από τις δαπάνες για το φωτοβολταϊκό σύστημα, το σύστημα αποθήκευσης και την προμήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, στην οικονομική αξιολόγηση πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα έσοδα που προκύπτουν από την έγχυση της περισσευούμενης παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο μέσω των εγγυημένων τιμών πώλησης (Feed-in tariffs). Τα ετήσια έσοδα  $R_{PV}$  μετρούνται σε ευρώ και υπολογίζονται από την σχέση (4.25) ως εξής:

$$R_{PV} = p_{FIT} * E_{PV} * (1 - S) \quad (4.25)$$

Όπου,

$E_{PV}$	η συνολική παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια (kWh)
$p_{FIT}$	η εγγυημένη τιμή πώλησης (€/kWh)
$S$	ο βαθμός ιδιοκατανάλωσης (%)

### Συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος

Ο υπολογισμός του συνολικού ετήσιου ισοδύναμου κόστους του συστήματος  $PVBS_{cost}$  προϋποθέτει τον υπολογισμό της παρούσας αξίας της συνολικής ροής κόστους και του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου όπως περιγράφηκε και στη σχέση (4.18).

Η παρούσα αξία της συνολικής ροής κόστους περιλαμβάνει τα κόστη επένδυσης και τα λειτουργικά κόστη ή κόστη συντήρησης του φωτοβολταϊκού και αποθηκευτικού συστήματος αντίστοιχα, τα έσοδα (κόστη προσημασμένα αρνητικά) που προκύπτουν από την πώληση της περίσσειας παραγόμενης ενέργειας και τις δαπάνες για την

προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ανά έτος. Η σχέση (4.18) λοιπόν μετασχηματίζεται μέσω των σχέσεων (4.19) έως (4.24) ως εξής:

$$PVBS_{cost} = \left( \sum_{t=0}^n \frac{(PV_{cost} + PV_{oper, cost} + B_{system, cost} + C_{GRID} - R_{PV})}{(1+r)^t} \right) * CRF \quad (4.26)$$

Όπου,

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (4.27)$$

Ο υπολογισμός λοιπόν των εξόδων και των εσόδων που σχετίζονται με την κατανάλωση ή την παραγωγή ενέργειας σε ένα νοικοκυριό μας επιτρέπει να συγκρίνουμε τις αποδόσεις συστημάτων διαφορετικών συνθέσεων. Για να διευκολύνουμε την διαδικασία της σύγκρισης, θα ορίσουμε την μέση τιμή του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας  $p_{EL}$  του συστήματος, η οποία αποτελεί ένα μέγεθος που θα λειτουργεί σαν μέτρο σύγκρισης για τον προσδιορισμό της βέλτιστη διαμόρφωσης του συστήματος με το ελάχιστο κόστος. Η μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει από το λόγο του συνολικού ετήσιου ισοδύναμου κόστους  $PVBS_{cost}$  προς το συνολικό ετήσιο φορτίο  $E_{LOAD}$ .

$$p_{EL} = \frac{PVBS_{cost}}{E_{LOAD}} \quad (4.28)$$

Όπου,

$PVBS_{cost}$  το συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος (€)

$E_{LOAD}$  το συνολικό ετήσιο φορτίο (kWh)

$p_{EL}$  η μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh)

#### 4.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας για τη διάρκεια

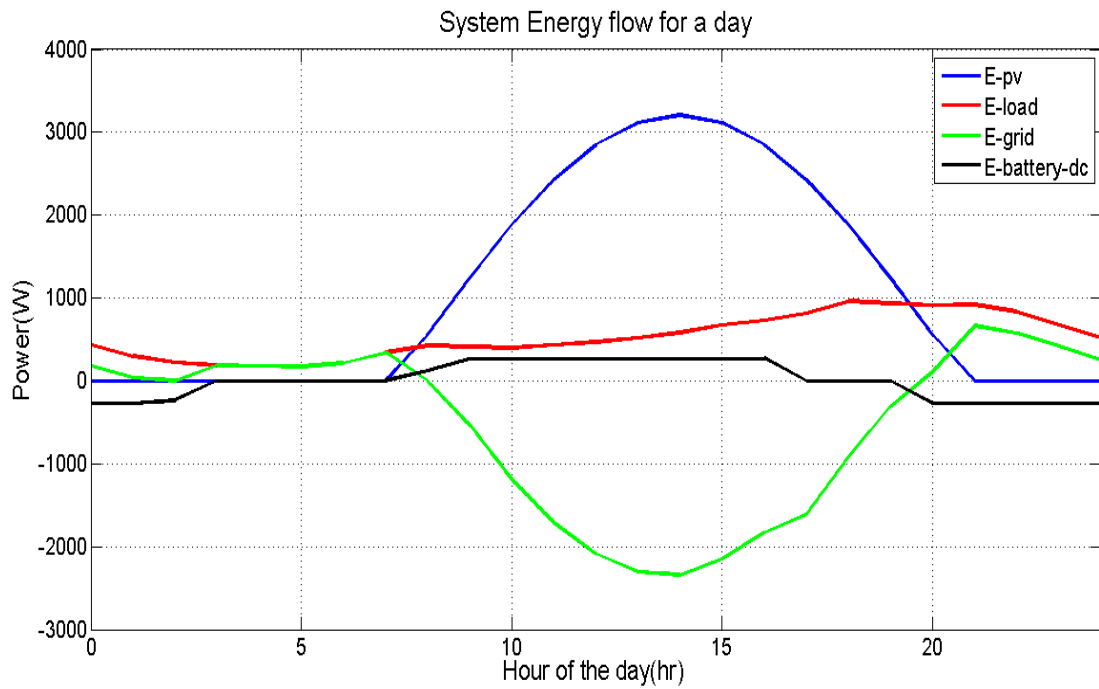
ενός έτους, ακολουθώντας το μοντέλο και τις εξισώσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως. Σκοπός αυτής της προσομοίωσης είναι να αποτυπωθεί με σαφήνεια η συμπεριφορά και η λειτουργία του συστήματος, καθώς επίσης και η ροή ενέργειας δια μέσου αυτού και των επιμέρους συστατικών που το αποτελούν. Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης θα μας δώσουν μία γενική εικόνα του ρόλου και του σκοπού που επιτελεί η χρήση των συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα και θα μας εισάγουν στην ανάλυση ευαισθησίας που θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο υποκεφάλαιο.

Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί η διαμόρφωση του συστήματος. Η ετήσια συνολική κατανάλωση της οικίας στην οποία θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα και οι συσσωρευτές ανέρχεται σε 4000 kWh (σχήμα 4.1), όπου και θεωρούμε το τυπικό φορτίο ενός μέσου καταναλωτή. Η εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο εγκαθίσταται σε μία οικία του Βερολίνου, θεωρούμε ότι είναι 4 kWp (η ετήσια παραγωγή του απεικονίζεται στο σχήμα 4.3) και πλαισιώνεται από μία συστοιχία μπαταριών αξιοποιήσιμης χωρητικότητας 2 kWh. Η διαμόρφωση του συστήματος συνοψίζεται στον πίνακα 5.

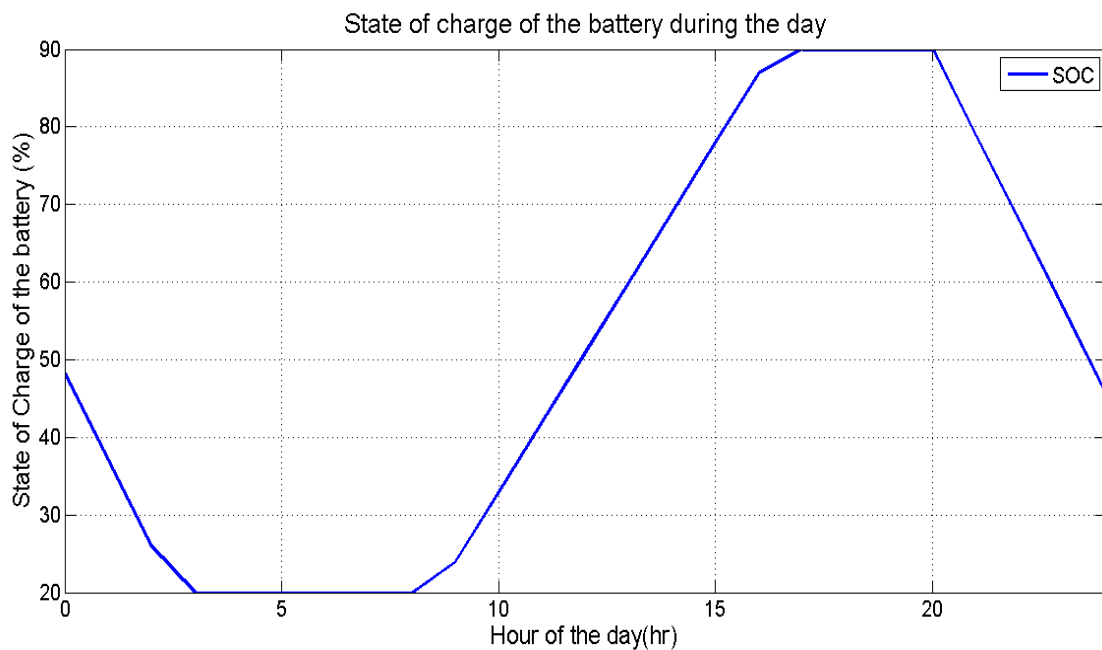
**Πίνακας 4** Διαμόρφωση του συστήματος προσομοίωσης

Εγκατεστημένη φ/β ισχύς (kWp)	4
Ετήσια κατανάλωση φορτίου (kWh)	4000
Αξιοποιήσιμη Χωρητικότητα συσσωρευτών (kWh)	2

Η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα των συσσωρευτών  $E_{BU}$  προκύπτει από τη σχέση (4.15) για  $SOC_{max}$  και  $SOC_{min}$  στο 90% και 20 % αντίστοιχα και ονομαστική χωρητικότητα  $E_{nom}$  ίση με 2,856 kWh (ή 238 Ah). Οι μεταβλητές εισόδου του συνολικού συστήματος παρουσιάζονται και στον πίνακα 3 της ενότητας 4.5.1. Στο σχήμα 4.9 απεικονίζεται η ροή ενέργειας στο σύστημα στη διάρκεια μίας τυχαία επιλεγμένης καλοκαιρινής ημέρας του έτους. Όπως παρατηρείται και από το σχήμα, η μπαταρία αρχικά είναι άδεια, και το φορτίο καλύπτει τις ανάγκες του αγοράζοντας την ενέργεια που χρειάζεται από το δίκτυο. Στη συνέχεια, η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των καταναλώσεων και αυτή που περισσεύει φορτίζει την μπαταρία με μέγιστο ρυθμό φόρτισης τα 286 W. Η φόρτιση της μπαταρίας σταματά όταν προσεγγιστεί η υψηλότερη επιτρεπόμενη κατάσταση φόρτισης ( $SOC \leq 90$ ) και μπαίνει σε κατάσταση αδράνειας, όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.10. Γύρω στις οκτώ το απόγευμα οι απαιτήσεις του φορτίου ξεπερνούν την διαθέσιμη παραγωγή και έτσι η μπαταρία μπαίνει στη διαδικασία της αποφόρτισης, διατηρώντας σταθερό τον ρυθμό εκφόρτισης.



**Σχήμα 4.9** Ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος στη διάρκεια μίας ημέρας



**Σχήμα 4.10** Κατάσταση φόρτισης SOC των μπαταριών στη διάρκεια μίας μέρας

Τόσο η διαδικασία της φόρτισης, όσο και η διαδικασία της αποφόρτισης διαρκούν τουλάχιστον δέκα ώρες ( $t_{\min}=10h$ ). Όταν η μπαταρία φτάσει τη χαμηλότερη επιτρεπόμενη κατάσταση φόρτισης ( $SOC \geq 20$ ), αποσυνδέεται από τα φορτία τα οποία τώρα θα στραφούν ξανά στο δίκτυο για την προμήθεια των αναγκών τους.

Στο τέλος του έτους μπορούν να υπολογιστούν οι συνολικές απώλειες χωρητικότητας που οφείλονται στο φαινόμενο της γήρανσης και το επικείμενο κόστος τους. Ακόμη, υπολογίζονται οι ετήσιοι κύκλοι αποθήκευσης και κατ' επέκταση η διάρκεια ζωής των μπαταριών. Οι συνολικές απώλειες χωρητικότητας ανέρχονται σε 138 Wh ανά έτος, επομένως το κόστος εξ 'αιτίας των απωλειών προκύπτει από τη σχέση (4.10) και υπολογίζεται σε 21,97 € ανά έτος (λειτουργικά κόστη μπαταριών). Η διάρκεια ζωής των μπαταριών υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (4.17), από όπου λαμβάνουμε την τιμή 6 έτη. Αυτό σημαίνει πως η μπαταρία θα πρέπει να αντικατασταθεί τρεις φορές στη διάρκεια ζωής της επένδυσης (στο τέλος του 6<sup>ου</sup>, του 12<sup>ου</sup> και του 18<sup>ου</sup> έτους αντίστοιχα).

Όσον αφορά τα ενεργειακά κριτήρια αξιολόγησης, ο βαθμός ιδιοκατανάλωσης του συστήματος και ο βαθμός αυτονομίας του ανέρχεται σε 54.65 % και 47.44 % αντίστοιχα, ενώ οι κύκλοι αποθήκευσης της μπαταρίας υπολογίζονται στους 229 ανά έτος.

Για να υπολογιστεί το ετήσιο ισοδύναμο κόστος  $PVBS_{cost}$  του συνολικού συστήματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κόστη επένδυσης και τα κόστη λειτουργίας του φωτοβολταϊκού και του αποθηκευτικού συστήματος αντίστοιχα. Παράλληλα, στον υπολογισμό πρέπει να συμπεριληφθεί το μέσο ετήσιο κόστος για την προμήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, καθώς επίσης και τα έσοδα από την πώληση της περίσσειας παραγόμενης ενέργειας μέσω των εγγυημένων τιμών πώλησης, όπως προκύπτουν και από τις σχέσεις (4.24) και (4.25). Θεωρώντας πως το κόστος επένδυσης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας (συμπεριλαμβανομένου και του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα) ανέρχεται σε 1800 €/kWp [16] (σε αυτή την τιμή δεν συνυπολογίζονται οι φόροι), το συνολικό ισοδύναμο ετήσιο κόστος του συστήματος ισούται με 1278 €. Αν διαιρέσουμε το  $PVBS_{cost}$  με το ετήσιο συνολικό φορτίο, όπως προκύπτει και από τη σχέση (4.28), η μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας  $p_{EL}$  για το νοικοκυριό ισούται με 0,3132 €/kWh. Η νέα μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει για το νοικοκυριό είναι μικρότερη από αυτή που θα ίσχυε (0.34 kWh) αν δεν είχε εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα με τις μπαταρίες, χαρακτηρίζοντας έτσι την επένδυση ως συμφέρουσα. Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται οι μεταβλητές εισόδου και τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης του συστήματος.

**Πίνακας 5** Μεταβλητές εισόδου και αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης

<b>Μεταβλητές εισόδου</b>		<b>Τιμή</b>
$B_{invest,cost}$	Κόστος επένδυσης μπαταρίας	160 €/kWh
$B_{inverter,cost}$	Κόστος επένδυσης αντιστροφέα μπαταριών	600 €/kW
$PV_{invest,cost}$	Κόστος επένδυσης φ/β συστήματος	1800 €/kWp
$PV_{system,size}$	Το μέγεθος του φ/β συστήματος	4 kWp
$PV_{oper,cost}$	Το κόστος λειτουργίας του φ/β συστήματος	1,5 %
$\rho_{FIT}$	Η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας	0.15 €/kWh
$\rho_{GRID,AVG}$	Η μέση λιανική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας	0.34 €/kWh
<b>Αποτελέσματα</b>		<b>Αξία</b>
S	Βαθμός ιδιοκατανάλωσης	54.65 %
D	Βαθμός αυτονομίας	47.44 %
$\eta_c$	Κύκλοι αποθήκευσης	229 ανά έτος
$PV_{cost}$	Το κόστος επένδυσης του φ/β συστήματος	7200 €
$B_{cost}$	Το κόστος επένδυσης της μπαταρίας	456,96 €
$BCL_{annual,cost}$	Τα λειτουργικά κόστη της μπαταρίας στο τέλος του έτους	21,97 €
$C_{GRID}$	Το μέσο ετήσιο κόστος προμήθειας ενέργειας	729,36 €
$R_{PV}$	Το κέρδος πώλησης της περίσσειας παραγόμενης ενέργειας ανά έτος	248,44 €
$PVBS_{cost}$	Το συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος	1278 €
$\rho_{EL}$	Η μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας	0.3132 €/kWh

Για την πραγματοποίηση της οικονομικής αξιολόγησης έγιναν οι εξής υποθέσεις. Αρχικά, η μέση λιανική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας  $\rho_{GRID,AVG}$  προκύπτει από την τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία, η οποία είναι 0.28 €/kWh (σύμφωνα με το [28]) και θεωρώντας αύξηση 2 % για κάθε χρόνο έως και το τέλος της οικονομικής ζωής της επένδυσης που είναι τα είκοσι χρόνια. Αντίστοιχα, η εγγυημένη τιμή πώλησης προκύπτει για τον ιδιοκτήτη του συστήματος από το [28] και ανέρχεται σε 0,15 €/kWh. Στην ανάλυση ευαισθησίας που θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια θα ληφθούν υπόψη διαφορετικά σενάρια προσέγγισης της αυτοκατανάλωσης, αναδεικνύοντας έτσι τη σημασία που έχει το οικονομικό πλαίσιο που περιβάλλει το συνολικό σύστημα προς εγκατάσταση και γενικότερα την συνολική οικονομική επένδυση.

## 4.7 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε και τα δεδομένα εισόδου που περιγράφηκαν προηγουμένως θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις συστημάτων διαφορετικής διαμόρφωσης, στα οποία θα μεταβάλλεται είτε η χωρητικότητα των μπαταριών, είτε η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς, είτε ακόμη και το θεσμικό/οικονομικό πλαίσιο που τα περιβάλλει.

### 4.7.1 Ενεργειακή αξιολόγηση

Η λειτουργική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων-συσσωρευτών και συνεπώς τα ενεργειακά κριτήρια αξιολόγησης τους επηρεάζονται από ποικίλους παράγοντες. Η ανάδειξη αυτών των παραγόντων προκύπτει από την ανάλυση ευαισθησίας. Η πραγματοποίηση της διαδικασίας αυτής προϋποθέτει την θεώρηση ορισμένων υποθέσεων και την υλοποίηση διαφορετικών σεναρίων. Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας της ενεργειακής συμπεριφοράς των συστημάτων στη Γερμανία, στην οποία αυτή τη στιγμή το θεσμικό πλαίσιο επιτρέπει την αυτοκατανάλωση. Στη συνέχεια θα μελετηθεί η συμπεριφορά της λειτουργίας των εγκατεστημένων συστημάτων στην Ελλάδα. (πίνακας 6). Για την πραγματοποίηση των παρακάτω προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα τόσο του Βερολίνου όσο και της Αθήνας.

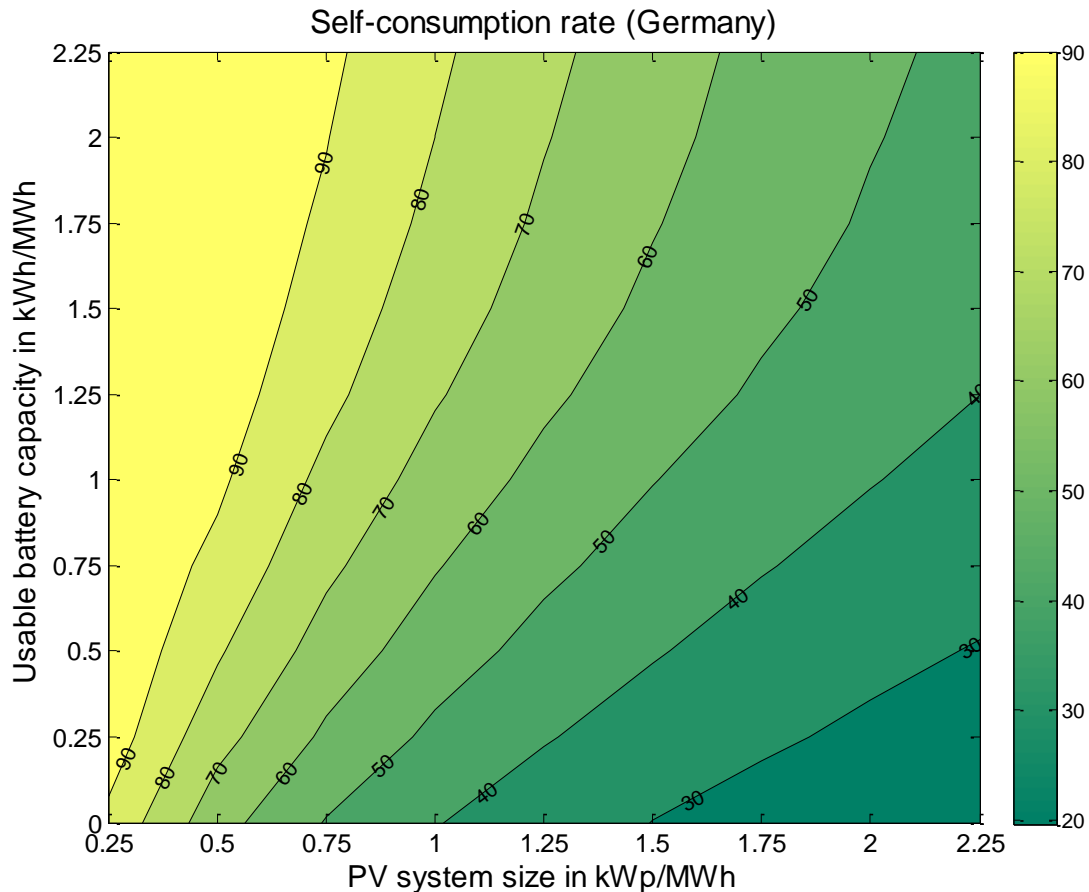
**Πίνακας 6** Σενάριο οικονομικής αξιολόγησης

	<b>Θεσμικό πλαίσιο αυτοκατανάλωσης</b>
<b>Σενάριο 1</b>	Εφαρμογή στη Γερμανία
<b>Σενάριο 2</b>	Εφαρμογή στην Ελλάδα

### **Σενάριο 1** Εφαρμογή στη Γερμανία

#### *Ανάλυση Ευαισθησίας*

Το αντίκτυπο της μεταβολής του μεγέθους του φωτοβολταϊκού συστήματος και της χωρητικότητας των μπαταριών στις ετήσιες τιμές του βαθμού της ιδιοκατανάλωσης και του βαθμού αυτονομίας απεικονίζεται στο σχήμα 4.11 και 4.12. Τόσο η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς όσο και η χωρητικότητα των μπαταριών σταθμίζονται στην ετήσια συνολική ζήτηση του φορτίου. Έτσι επιτρέπεται η εκτίμηση των ενεργειακών κριτηρίων σε εγκαταστάσεις συστημάτων με διαφορετική συνολική ετήσια ζήτηση. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 4.11, ο βαθμός της ιδιοκατανάλωσης μειώνεται όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς.

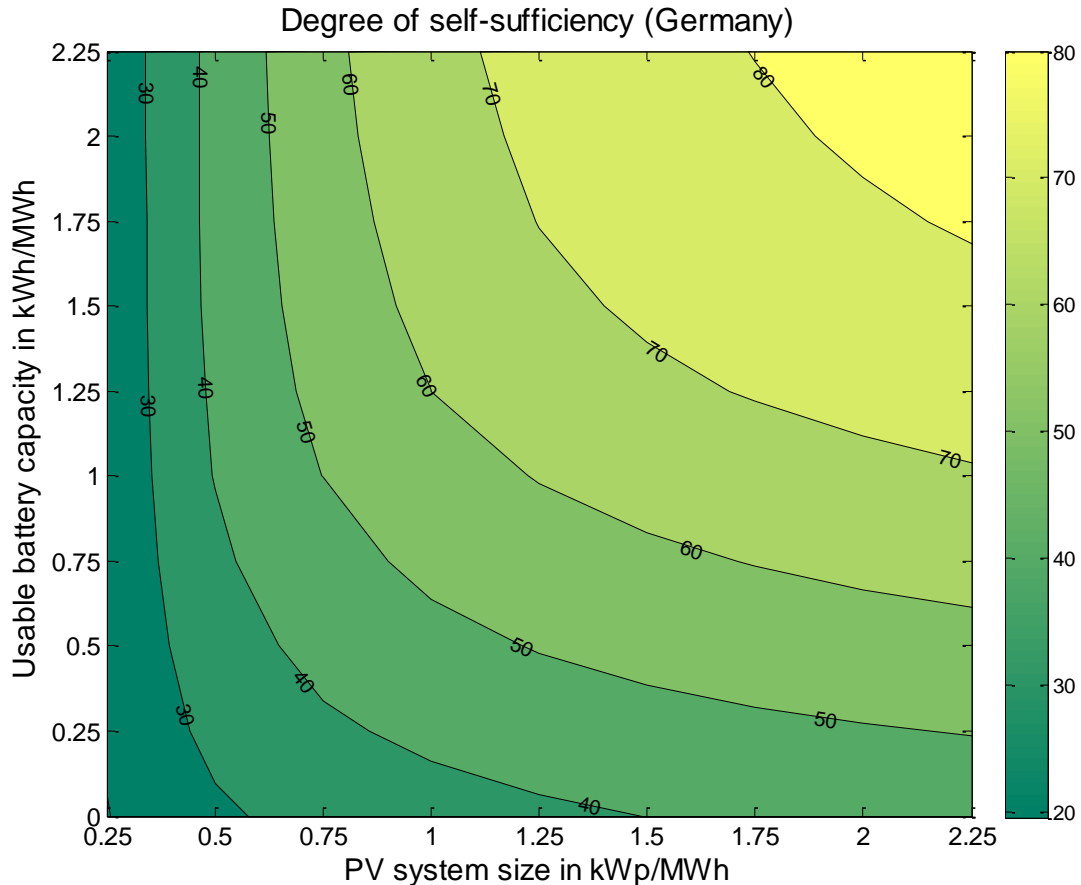


**Σχήμα 4.11** Ο ετήσιος βαθμός ιδιοκατανάλωσης σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών σταθμισμένα στην ετήσια ζήτηση του φορτίου σε MWh στη Γερμανία

Αντίθετα η αύξηση του μεγέθους της φωτοβολταϊκής ισχύος οδηγεί σε αύξηση του βαθμού αυτονομίας, σχήμα 4.12. Από την άλλη, η αύξηση της χωρητικότητας των μπαταριών οδηγεί σε αύξηση και των δύο προαναφερθέντων κριτηρίων. Με 1 kWp/MWh μέγεθος φωτοβολταϊκού συστήματος και χωρίς την χρήση συσσωρευτών ο βαθμός της ιδιοκατανάλωσης ανέρχεται περίπου στο 40 %, ενώ ο βαθμός αυτονομίας στο 36%. Για μία οικία με ετήσιο φορτίο τις 4 MWh (όπως αυτή που εξετάζεται) το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος που της αντιστοιχεί είναι τα 4 kWp.

Αν στο σύστημα προστεθεί 1 kWh/MWh αξιοποιήσιμης χωρητικότητας τότε αυτομάτως ο βαθμός ιδιοκατανάλωσης και ο βαθμός αυτονομίας διαμορφώνονται στο 66 % και στο 56 % αντίστοιχα. Παραπάνω αύξηση του μεγέθους της μπαταρίας από 1.5 kWh/MWh οδηγεί σε μικρές σχετικά αυξήσεις και στον βαθμό ιδιοκατανάλωσης αλλά και στον βαθμό αυτονομίας. Αυτό συμβαίνει διότι τα πολύ μεγάλα αποθηκευτικά συστήματα δεν αποφορτίζονται πλήρως κατά τη διάρκεια της νύχτας και έτσι δεν είναι τελείως άδεια μέχρι το επόμενο πρωί.

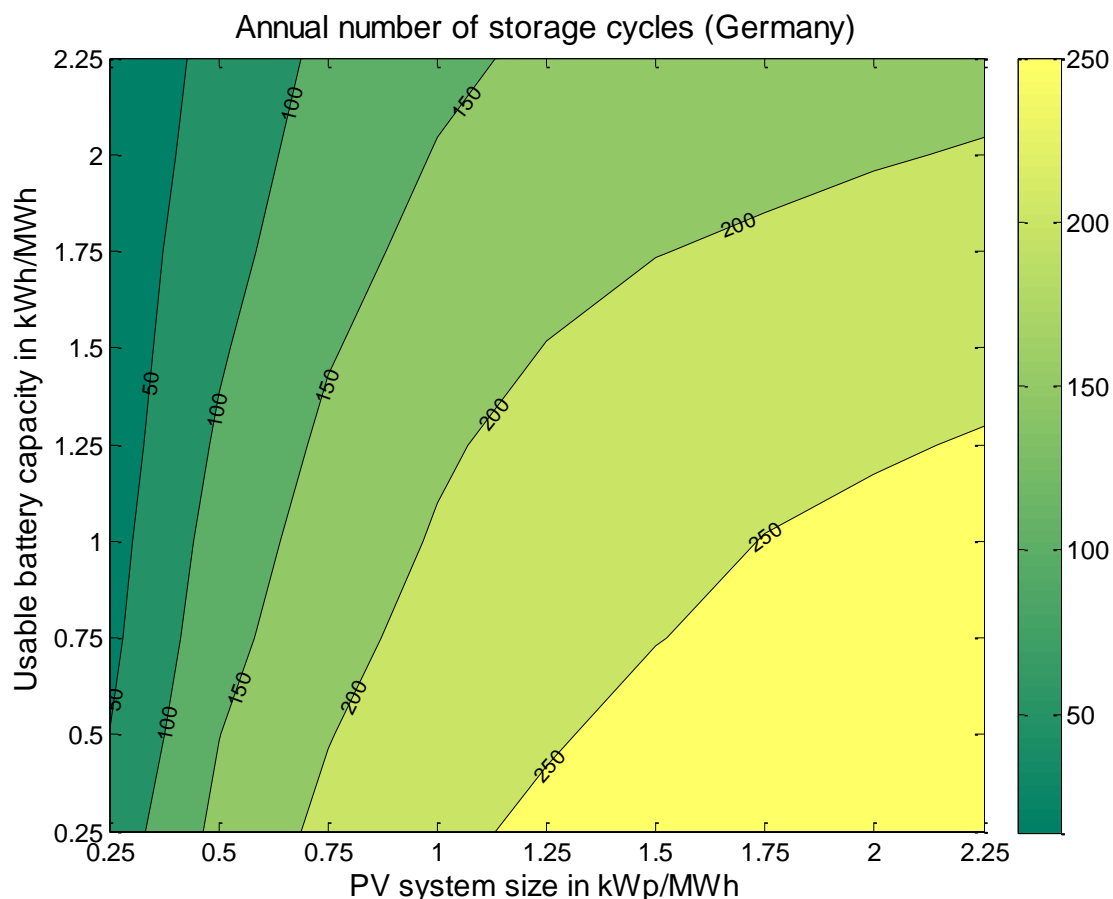




**Σχήμα 4.12** Ο ετήσιος βαθμός αυτονομίας σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών σταθμισμένα στην ετήσια ζήτηση του φορτίου σε MWh

Αξίζει να σημειωθεί πως οι διαμορφώσεις συστημάτων με αξιοποιήσιμη χωρητικότητα που ξεπερνά τις 2 kWh/MWh συνίσταται να αποφεύγονται, καθώς το κλάσμα του ετήσιου φορτίου που τροφοδοτείται από το φωτοβολταϊκό σύστημα και τη μπαταρία δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω. Έτσι λοιπόν η χωρητικότητα της μπαταρίας θα πρέπει να επιλεγεί με βάση τόσο την εγκατεστημένη ισχύ του φωτοβολταϊκού όσο και την ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης.

Εκτός από τον βαθμό ιδιοκατανάλωσης και αυτονομίας οι κύκλοι αποθήκευσης της μπαταρίας πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ενεργειακή αξιολόγηση. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.13 οι κύκλοι αποθήκευσης επηρεάζονται άμεσα από τη διαμόρφωση του φωτοβολταϊκού συστήματος-μπαταρίας. Σε γενικές γραμμές, οι μπαταρίες σε συνδυασμό με πολύ μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα επιτυγχάνουν λίγους κύκλους το χρόνο που σύμφωνα με το σχήμα φτάνουν περίπου τους 150. Αυτό συμβαίνει διότι στα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα η περίσσεια ενέργεια που απαιτείται για να φορτιστεί η μπαταρία είναι μικρή. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το μέγεθος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας περισσότερη ενέργεια είναι διαθέσιμη για την φόρτιση των μπαταριών και άρα αυξάνονται οι κύκλοι αποθήκευσης.



**Σχήμα 4.13** Οι ετήσιοι κύκλοι αποθήκευσης σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών σταθμισμένα στην ετήσια ζήτηση του φορτίου σε MWh

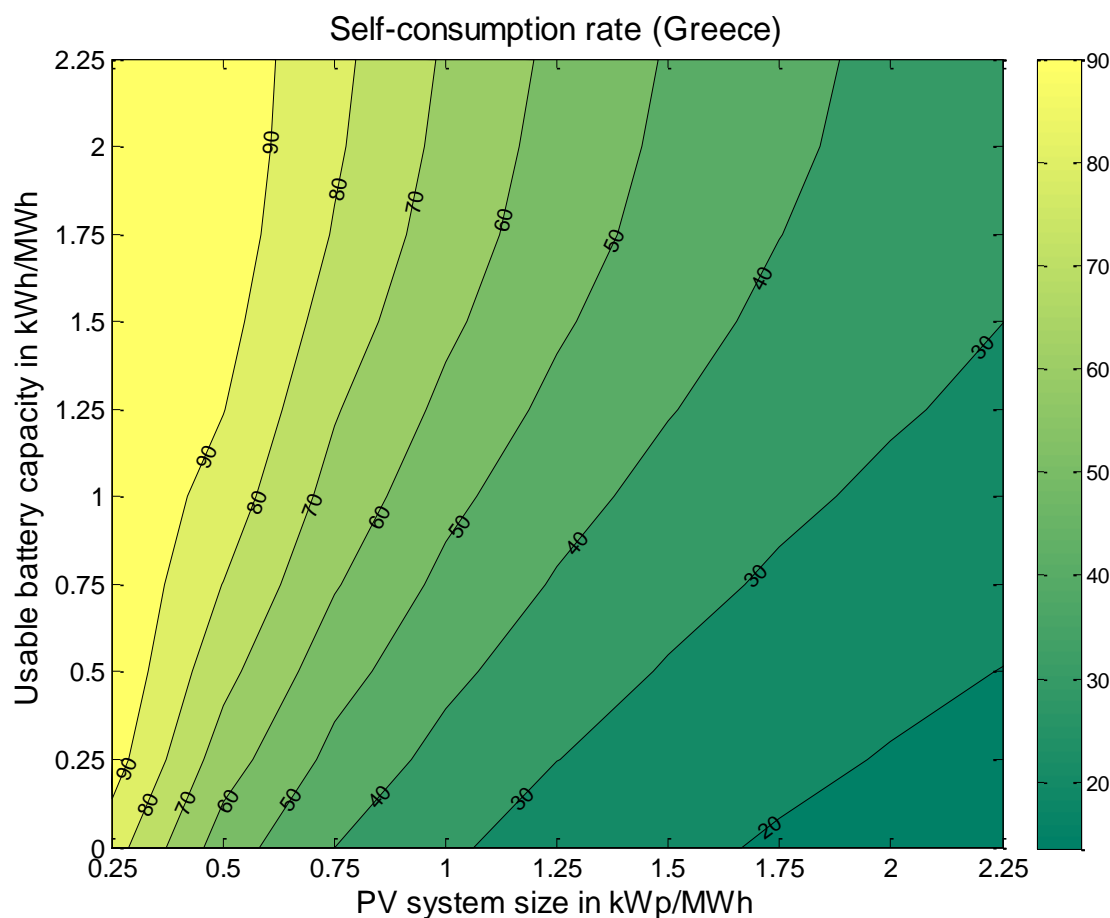
Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με 1 kWp/MWh ισχύ και 1 kWh/MWh αξιοποιήσιμης χωρητικότητας φτάνει περίπου τους 200 κύκλους το χρόνο. Όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς και κατά συνέπεια και η περίσσεια παραγόμενη ενέργεια τόσο αυξάνονται και οι κύκλοι αποθήκευσης. Υψηλότερες τιμές για τους κύκλους αποθήκευσης παρατηρούνται σε διαμορφώσεις συστημάτων με μικρή χωρητικότητα μπαταριών. Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης αναμένεται να φτάσουν πιο γρήγορα το μέγιστο αριθμό κύκλων και έτσι εμφανίζουν μικρότερο χρόνο ζωής. Η διάρκεια ζωής των μπαταριών λοιπόν εξαρτάται άμεσα από τους κύκλους αποθήκευσης και την διαμόρφωση του συστήματος.

## Σενάριο 2 Εφαρμογή στην Ελλάδα

### Ανάλυση Ευαισθησίας

Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται ο ετήσιος βαθμός της ιδιοκατανάλωσης σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών για συστήματα που εγκαθίστανται στην Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της

Αθήνας με συντεταγμένες 37.9<sup>0</sup>N, 23.73<sup>0</sup>E. Όπως και προηγουμένως, η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς και η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα των μπαταριών σταθμίζονται στο φορτίο.

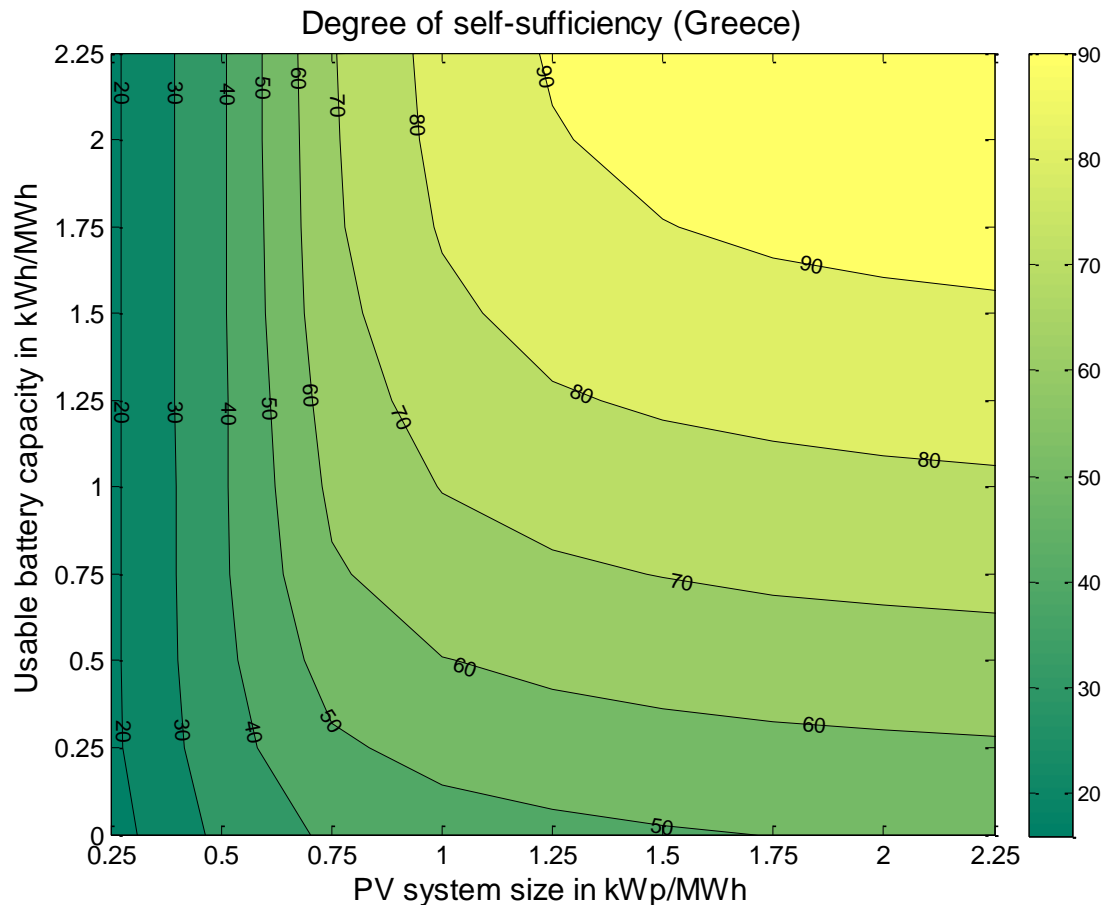


**Σχήμα 4.14** Ο ετήσιος βαθμός ιδιοκατανάλωσης σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών σταθμισμένα στην ετήσια ζήτηση του φορτίου σε MWh στην Ελλάδα

Σε αυτή την περίπτωση ο βαθμός ιδιοκατανάλωσης και ο βαθμός αυτονομίας (σχήμα 4.15) των εγκατεστημένων συστημάτων λαμβάνουν διαφορετικές τιμές σε σύγκριση με το σενάριο της Γερμανίας. Ειδικότερα, για μέγεθος εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος 1 kWp/MWh και χωρίς την χρήση συσσωρευτών ο ετήσιος βαθμός ιδιοκατανάλωσης και ο βαθμός αυτονομίας λαμβάνουν τις τιμές 31 % και 46% αντίστοιχα. Αυξάνοντας την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα κατά 1 kWh/MWh τα ενεργειακά κριτήρια λαμβάνουν πλέον τις τιμές 53 % και 70 %. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αντίστοιχη ενεργειακή ανάλυση της Γερμανίας μπορούμε να κάνουμε της εξής παρατηρήσεις.

Αρχικά, τα συστήματα που εγκαθίστανται στην Ελλάδα παρουσιάζουν γενικά μικρότερες τιμές στους βαθμούς της ιδιοκατανάλωσης ενώ παρέχουν αντίστοιχα μεγαλύτερους βαθμούς αυτονομίας συγκριτικά με τα αποτελέσματα της Γερμανίας. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στην μειωμένη ηλιοφάνεια και συνεπώς στη μειωμένη

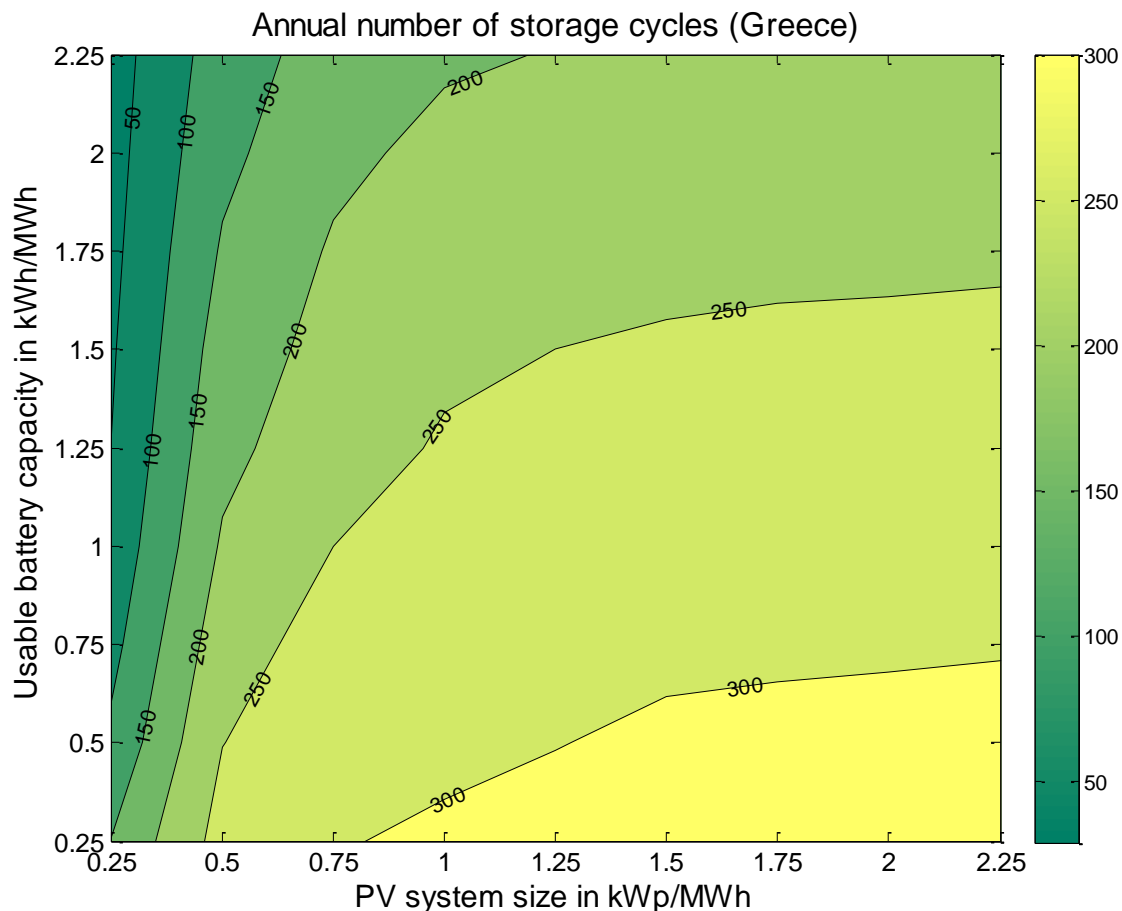
φωτοβολταϊκή παραγωγή που αποδίδει ένα σύστημα στην Γερμανία από ότι το αντίστοιχο του στην Ελλάδα. Στο σχήμα 4.12 παρατηρείται πως ο συνδυασμός μεγάλων φωτοβολταϊκών συστημάτων με μεγάλης χωρητικότητας μπαταρίες προσεγγίζει την πλήρη αυτονομία του συστήματος. Επομένως, ενώ στα Ελληνικά δεδομένα έχει νόημα η εγκατάσταση μεγάλων φωτοβολταϊκών συστημάτων-συσσωρευτών ικανών να διαχειριστούν την αυξημένη παραγωγή, κάτι τέτοιο δεν ισχύει και για την Γερμανία όπου η παραγωγή είναι περιορισμένη και η πλήρης αυτονομία δεν μπορεί να επιτευχθεί στις αντίστοιχες χωρητικότητες μπαταριών.



**Σχήμα 4.15** Ο ετήσιος βαθμός αυτονομίας σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών σταθμισμένα στην ετήσια ζήτηση του φορτίου σε MWh στην Ελλάδα

Στο σχήμα 4.13 απεικονίζονται οι ετήσιοι κύκλοι αποθήκευσης ενός συστήματος στην Ελλάδα σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών. Παρατηρείται πως για 1 kWp/MWh φωτοβολταϊκή ισχύ και 1 kWh/MWh αξιοποιήσιμης χωρητικότητας η μπαταρία φτάνει τους 260 κύκλους ανά έτος. Στο σενάριο της Γερμανίας και υπό τις ίδιες συνθήκες το αποθηκευτικό σύστημα προσέγγισε τους 200 κύκλους στο τέλος του έτους. Αυτή η παρατήρηση συμπληρώνει την προηγούμενη ερμηνεία που δόθηκε ότι δηλαδή λόγω της αυξημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής τα αποθηκευτικά συστήματα στην Ελλάδα

διαχειρίζονται μεγαλύτερο όγκο ισχύος και συνεπώς θα εμφανίζουν περισσότερους κύκλους στις αντίστοιχες συνθέσεις συστημάτων.



**Σχήμα 4.13** Οι ετήσιοι κύκλοι αποθήκευσης σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών σταθμισμένα στην ετήσια ζήτηση του φορτίου σε MWh στην Ελλάδα

Αξίζει να σημειωθεί πως τα παραπάνω αποτελέσματα επηρεάζονται από την τεχνολογία του συστήματος, το μοντέλο προσομοίωσης, τα δεδομένα που εισήχθησαν καθώς επίσης και από τους περιορισμούς του συστήματος. Επίσης, πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των ενεργειακών κριτηρίων παίζουν η χρονική κατανομή του φορτίου και η φωτοβολταϊκή παραγωγή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε κάθε περίπτωση, τα παραπάνω αποτελέσματα προσομοίωσης μπορούν να προσεγγίσουν την λειτουργία και τη συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων-συσσωρευτών σε εφαρμογές οικιακών ή μικρών εμπορικών φορτίων στην Γερμανία και στην Ελλάδα ακολουθώντας το μοντέλο της αυτοκατανάλωσης.

#### 4.7.2 Οικονομική αξιολόγηση

Μετά την ενεργειακή αξιολόγηση διαφορετικών διαμορφώσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων-συσσωρευτών, θα διεξαχθεί ανάλυση ευαισθησίας για την οικονομική

αξιολόγηση τους, αναδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τον συνδυασμό που επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση του κόστους (cost-optimum configuration). Στα σενάρια που θα διεξαχθούν, αφού ληφθεί υπόψη η θεώρηση κάποιων υποθέσεων, εξετάζονται οι επιπτώσεις των διαφορετικών προσεγγίσεων της εφαρμογής της αυτοκατανάλωσης με βάση τις τιμές αγοράς/πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο επικείμενο κόστος των συστημάτων στη Γερμανία, όπου και το υπάρχων θεσμικό πλαίσιο επιτρέπει την αυτοκατανάλωση. Επίσης εξετάζονται και οι επιπτώσεις που θα έχουν στις αντίστοιχες επενδύσεις, οι μελλοντικές μεταβολές του κόστους επένδυσης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων-μπαταριών και των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούν.

## **Σενάριο Εφαρμογή στη Γερμανία**

### **Υποθέσεις**

Για τον προσδιορισμό του συστήματος με τη βέλτιστη διαμόρφωση πρέπει να γίνουν οι εξής υποθέσεις. Τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από την περιοχή τη Βερολίνου με συντεταγμένες  $52.47 \text{ N}^{\circ}$ ,  $13.4 \text{ E}^{\circ}$ . Ο υπολογισμός της αποδοτικότητας της οικονομικής επένδυσης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας σταθερό επιτόκιο αναγωγής ίσο με 4 %. Για το φωτοβολταϊκό σύστημα η διάρκεια ζωής θεωρείται τα 20 χρόνια. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας επίσης δεν μπορεί να υπερβεί τα 20 χρόνια (όπως επισημαίνεται και στο φυλλάδιο του κατασκευαστή [11]). Τα ετήσια λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης του φωτοβολταϊκού συστήματος σταθμίζονται στο συνολικό κόστος επένδυσης του και ανέρχονται στο 1.5 %. Το κόστος επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος θεωρείται  $1800 \text{ €/kWp}$  σύμφωνα με το [16]. Τα λειτουργικά κόστη της μπαταρίας ανά έτος προκύπτουν από την σχέση (4.12) και από τη διαδικασία της γήρανσης που παρουσιάστηκε εκτενώς στην ενότητα 4.5.1. Τα κόστη επένδυσης των μπαταριών και του αντιστροφέα ανέρχονται σε  $160 \text{ €/kWh}$  και  $600 \text{ €/kW}$  αντίστοιχα.

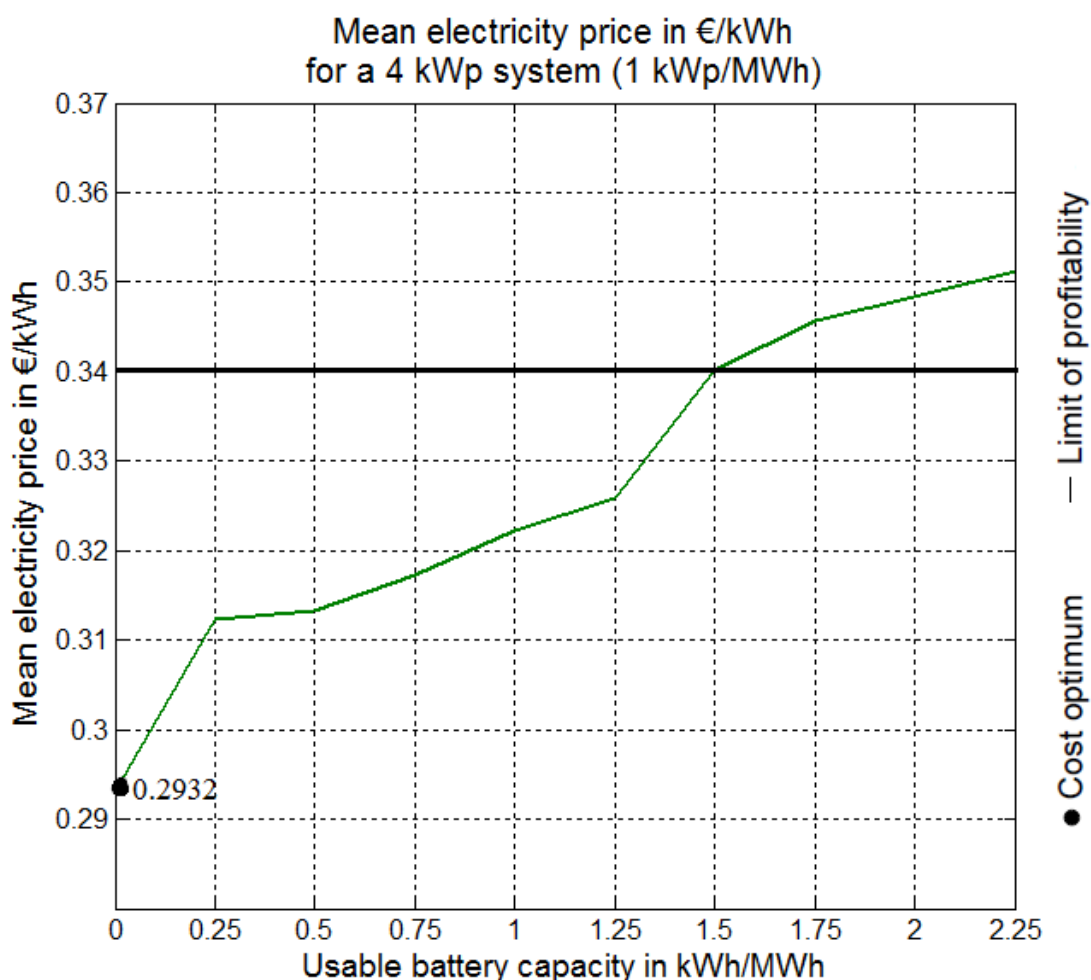
Η μέση λιανική τιμή του ρεύματος για μία οικία στην Γερμανία είναι  $0.34 \text{ €/kWh}$ . Η τιμή αυτή προκύπτει από την τωρινή τιμή των  $0.28 \text{ €/kWh}$  και θεωρώντας αύξηση 2 % ανά έτος για τα επόμενα 20 χρόνια. Ως εκ τούτου, η υπόθεση της μέσης λιανικής τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει άμεσα την οικονομική αξιολόγηση. Ακόμη, η εγγυημένη τιμή πώλησης στη Γερμανία διαμορφώνεται στα  $0,15 \text{ €/kWh}$ .

### *Ανάλυση Ευαισθησίας*

Επειδή η κερδοφορία της επένδυσης εξαρτάται από το συνολικό ετήσιο κόστος που προκύπτει για το εγκατεστημένο σύστημα και επιβαρύνει τον καταναλωτή για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάλυση ευαισθησίας θα φανερώσει τη κατάλληλη διαμόρφωση του συστήματος με το ελάχιστο κόστος. Η μέση τιμή του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας  $p_{EL}$  (σχέση 4.28) ορίστηκε αναλυτικά στην ενότητα 4.5.3 και

αποτελεί ένα μέγεθος που λειτουργεί σαν μέτρο σύγκρισης για τον προσδιορισμό της βέλτιστη διαμόρφωσης του συστήματος με το ελάχιστο κόστος.

Το σχήμα 4.14 παρουσιάζει την εξάρτηση της μέσης τιμής κόστους ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εγκατεστημένης ισχύος 4 kWp σε μεταβολή της χωρητικότητας των μπαταριών. Η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς και η χωρητικότητα των μπαταριών σταθμίζονται στην ετήσια συνολική ζήτηση του φορτίου. Έτσι, εφόσον οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε φορτίο 4 MWh (σχήμα 4.1), η σταθμισμένη στο φορτίο εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς των 4 kWp αντιστοιχεί σε 1 kWp/MWh.

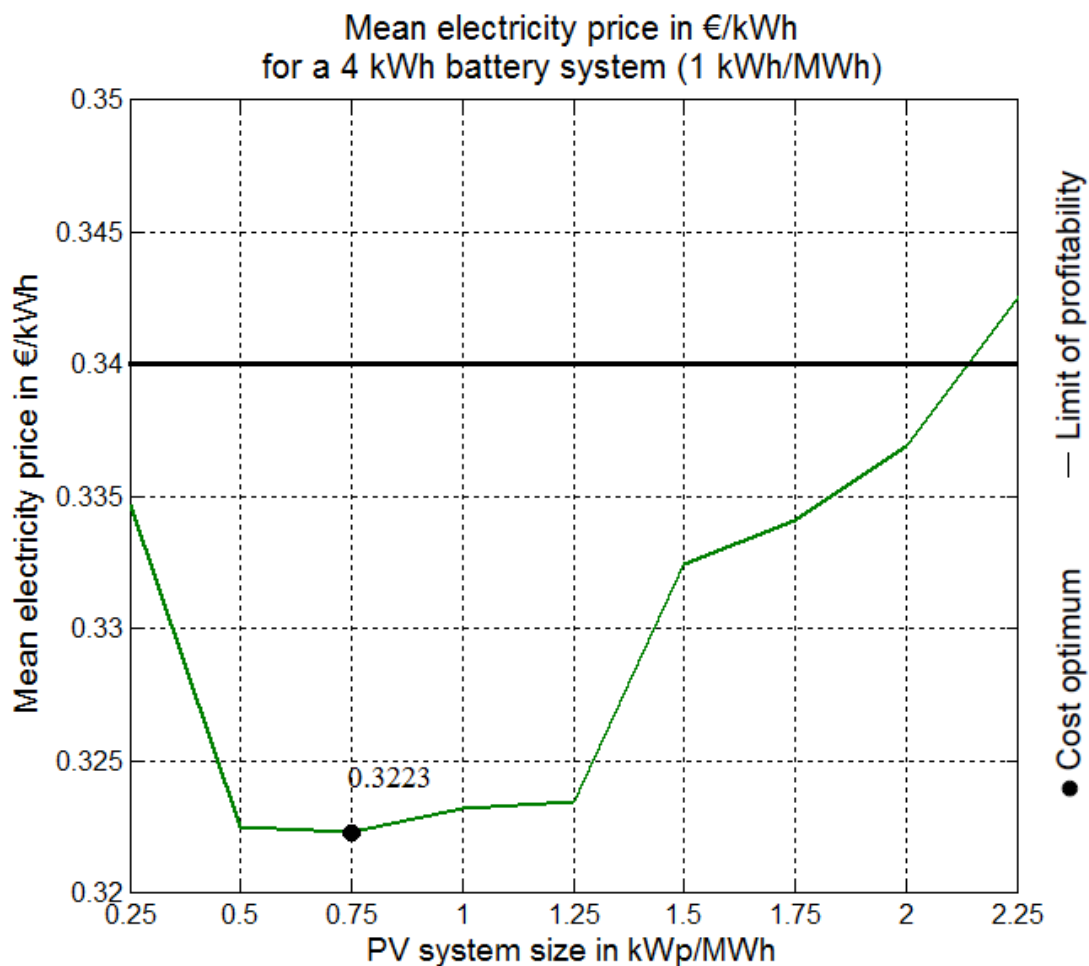


**Σχήμα 4.14** Η μέση τιμή κόστους ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος 4 kWp σε μεταβολή της χωρητικότητας της μπαταρίας σταθμισμένης στο φορτίο

Αν στην οικία δεν έχει εγκατασταθεί κάποιο σύστημα, η μέση τιμή κόστους  $p_{EL}$  θα ισούται με τη μέση λιανική τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, που ανέρχεται στα 0.34 €/kWh. Η επένδυση σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με συσσωρευτές, λοιπόν, θα είναι οικονομικά αποδεκτή μόνο αν η συνολική διαμόρφωση του συστήματος ρίχνει την  $p_{EL}$  κάτω από το όριο των 0.34 €/kWh. Ως εκ τούτου, το

όριο της κερδοφορίας εξαρτάται άμεσα από το μέσο όρο της λιανικής αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.14, με την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος 1 kWp/MWh (4 kWp) και χωρίς τη χρήση μπαταριών μειώνεται η μέση τιμή κόστους, λαμβάνοντας την χαμηλότερη τιμή της στα 0.2932 €/kWh. Στην παρούσα κατάσταση κόστους και για τη συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύ, η επένδυση σε ένα αποθηκευτικό σύστημα αποδίδει για χωρητικότητες μπαταριών μικρότερες του 1,5 kWh/MWh και οι πιο χαμηλές τιμές συστημάτων λαμβάνονται για πολύ μικρές χωρητικότητες μπαταριών (0.25-0.5 kWh/MWh). Γενικά, παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η χωρητικότητα των μπαταριών τόσο αυξάνεται και η μέση τιμή κόστους, αφού λόγω της αύξησης της χωρητικότητας αυξάνεται και το αναμενόμενο κόστος επένδυσης.

Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η εξάρτηση της μέσης τιμής κόστους  $p_{EL}$  ενός συστήματος αποθήκευσης αξιοποιήσιμης χωρητικότητας 1 kWh/MWh (4 kWh) σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος σταθμισμένης στο φορτίο.

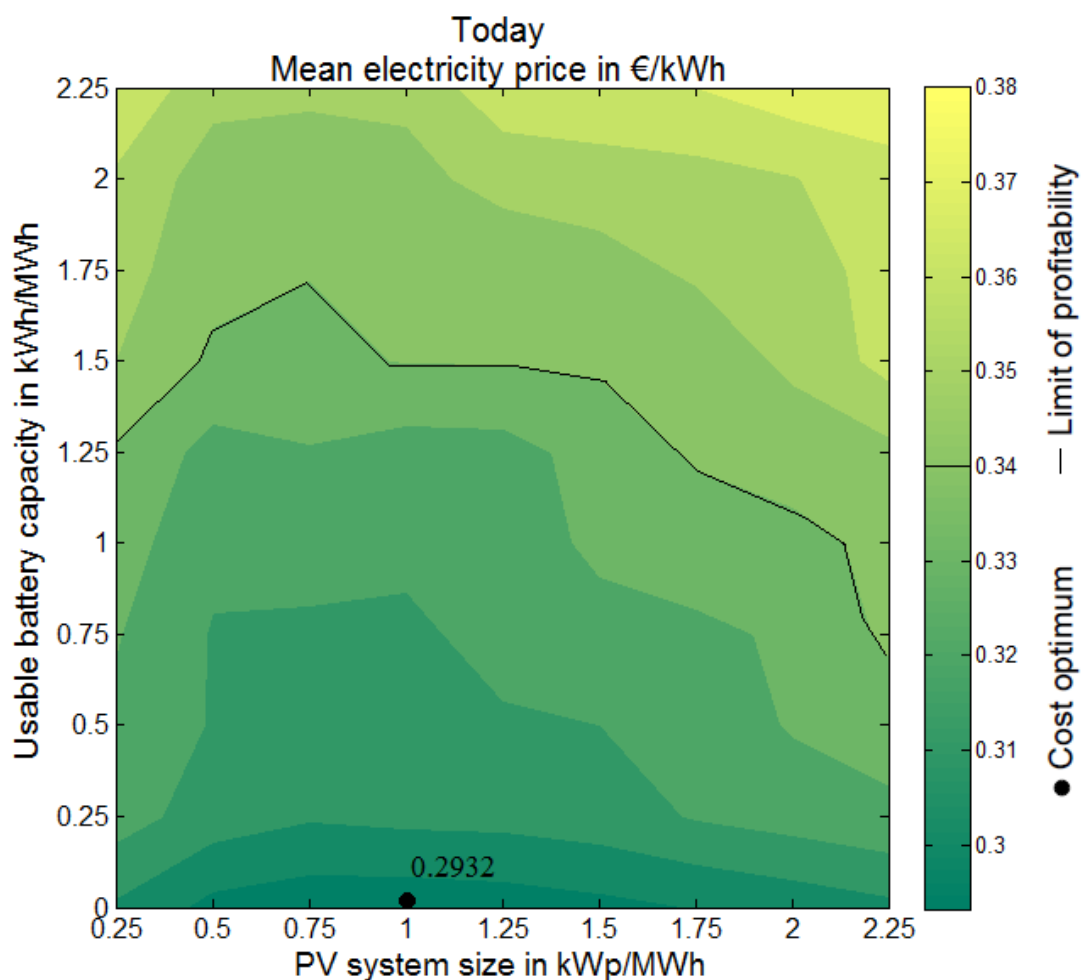


**Σχήμα 4.15** Η μέση τιμή κόστους ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος μπαταριών 4 kWh σε μεταβολή της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος σταθμισμένης στο φορτίο



Διατηρώντας τώρα σταθερή την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα των μπαταριών στις 4 kWh και μεταβάλλοντας την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ παρατηρείται πως η μικρότερη τιμή κόστους λαμβάνεται για το φωτοβολταϊκό σύστημα των 0,75 kWp/MWh. Ειδικότερα, για εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ από 0.5 έως και 1.25 kWp/MWh το κόστος παραμένει στα ίδια περίπου επίπεδα. Η συμπεριφορά αυτή του κόστους μπορεί να δικαιολογηθεί αφενός εξαιτίας του ότι τα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν μικρότερο κόστος επένδυσης αφετέρου ότι στα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα και για τη συγκεκριμένη χωρητικότητα μπαταριών αυξάνει σημαντικά ο βαθμός της ιδιοκατανάλωσης (δες σχήμα 4.11). Αντίθετα, τα πολύ μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν αυξημένο κόστος και αυτό διότι αδυνατούν να αξιοποιήσουν την χωρητικότητα των 4 kWh, παρουσιάζοντας έτσι αντίστοιχα μικρούς βαθμούς αυτονομίας.

Για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά της μέσης τιμής κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας σε εξάρτηση της μεταβαλλόμενης εγκατεστημένης ισχύος και της μεταβαλλόμενης χωρητικότητας των μπαταριών παρουσιάζεται το σχήμα 4.16, το οποίο και αφορά την τωρινή κατάσταση κόστους στη Γερμανία.



**Σχήμα 4.16** Η τωρινή μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία

Όπως και προηγουμένως, η επένδυση σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με συσσωρευτές θα είναι οικονομικά αποδεκτή μόνο αν η συνολική διαμόρφωση του συστήματος ρίχνει την  $p_{EL}$  κάτω από το όριο των 0.34 €/kWh. Η ελάχιστη τιμή της μέσης τιμής κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνεται για μέγεθος εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος 1 kWp/MWh και χωρίς την εγκατάσταση αποθηκευτικού συστήματος, όπως επισημαίνεται και από τη μαύρη τελεία του σχήματος. Παρατηρείται πως η επένδυση σε αποθηκευτικά συστήματα υπό αυτές τις συνθήκες κόστους έχει νόημα για σχετικά μικρές χωρητικότητες μπαταριών ανεξάρτητα από το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος. Ακόμη οι διαμορφώσεις συστημάτων με το μικρότερο δυνατό κόστος περιορίζονται γύρω από φωτοβολταϊκά συστήματα με μικρά μεγέθη εγκατεστημένης ισχύος, που επιτρέπουν υψηλότερους βαθμούς ιδιοκατανάλωσης. Συνδυάζοντας φωτοβολταϊκά συστήματα με συστήματα αποθήκευσης μεγάλης χωρητικότητας η μέση τιμή κόστους αυξάνεται πάνω από τα 0,34 €/kWh.

Για να προσδιοριστεί το αντίκτυπο της μελλοντικής εξέλιξης των εγγυημένων τιμών πώλησης αλλά και του κόστους των συστατικών που αποτελούν το φωτοβολταϊκό σύστημα με τις μπαταρίες, θα διεξαχθεί ανάλυση ευαισθησίας για διαφορετικά σενάρια όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα 7.

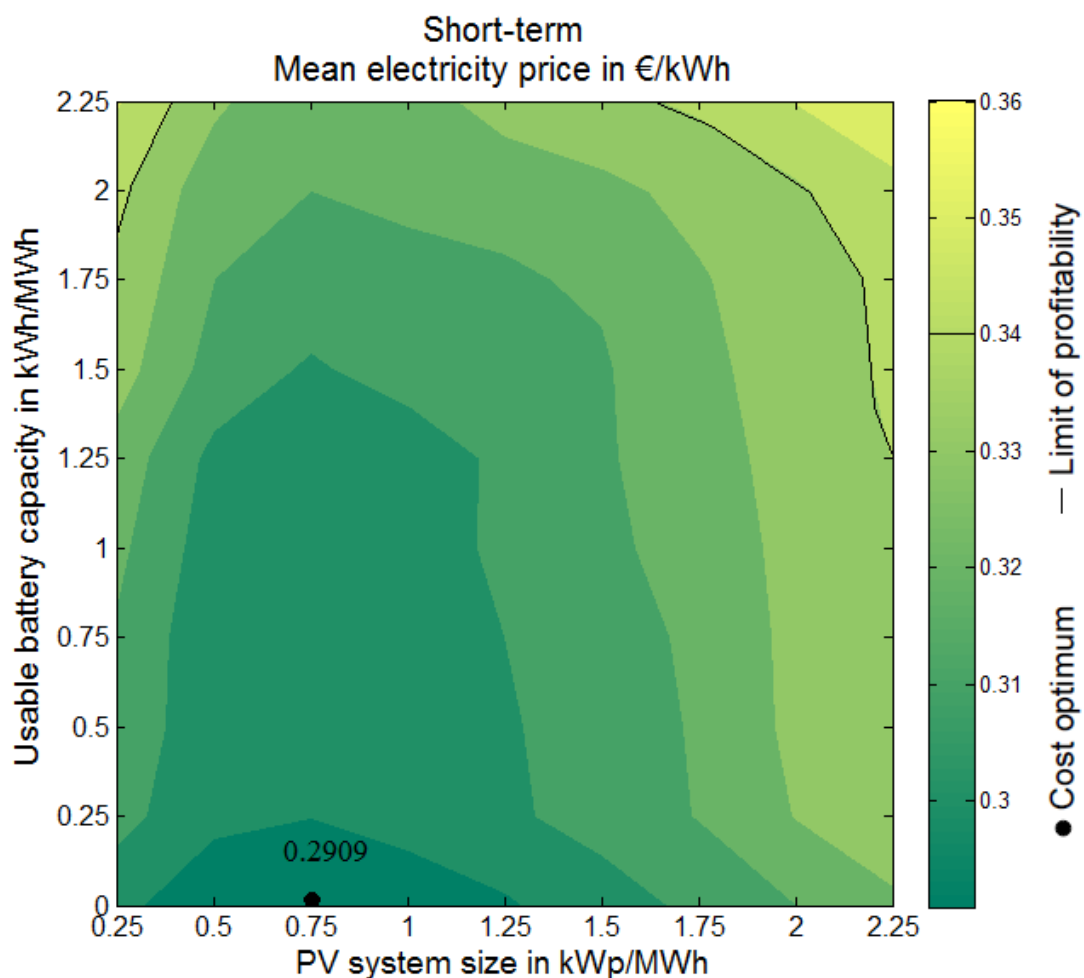
**Πίνακας 7** Σενάρια μελλοντικής εξέλιξης του κόστους και των FIT για τα φωτοβολταϊκά συστήματα με μπαταρίες στην Γερμανία [28],[31]

	Today	Short-term	Long-term
PV system costs in €/kWp	1800	1500	1000
Battery costs in in €/kWh	160	150	140
Inverter costs in €/kW	600	400	200
Feed-in tariff in €/kWh	0.15	0.10	0.05

Για το κοντινό μέλλον ο ρυθμός μείωσης των εγγυημένων τιμών πώλησης FIT αναμένεται να είναι πιο υψηλός από τον αντίστοιχο ρυθμό μείωσης των τιμών του κόστους επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Αναμένεται έτσι η περαιτέρω συρρίκνωση των cost-optimum συστημάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρότερης εγκατεστημένης ισχύος λόγω του ότι αυξάνεται ο βαθμός της ιδιοκατανάλωσης. Αναλυτικότερα, το κόστος επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος διαμορφώνεται στα 1500 €/kWp και η αποζημίωση για την περίσσεια παραγόμενη ενέργεια στα 0.10 €/kWh. Το κόστος επένδυσης των συσσωρευτών υποθέτουμε πως θα μεταβληθεί ελάχιστα καθώς οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποτελούν ήδη ώριμη τεχνολογία και σαν προϊόν βρίσκονται στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Από την άλλη αναμένουμε μείωση όσον αφορά τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιεί το αποθηκευτικό σύστημα και έτσι από 600 €/kW η νέα τιμή προσαρμόζεται στα 400 €/kW.

Στο σχήμα 4.17 απεικονίζεται η μεταβολή στην μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας για το βραχυπρόθεσμο σενάριο. Εδώ, η μέση τιμή κόστους λαμβάνει την χαμηλότερη τιμή για μέγεθος φωτοβολταϊκού συστήματος 0,75 kWp/MWh και πάλι χωρίς την εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης και ανέρχεται στα 0,2909 €/kWh.

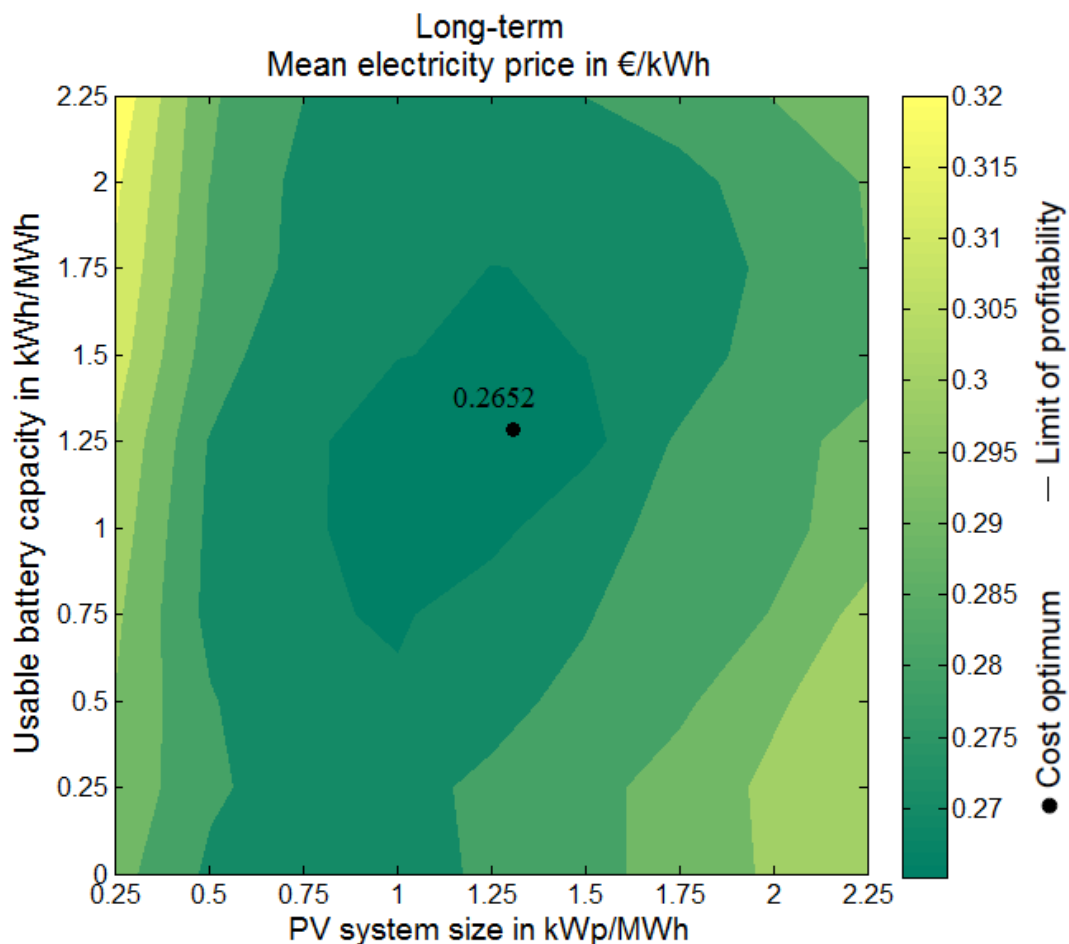
Η μείωση λοιπόν των εγγυημένων τιμών πώλησης οδήγησε στη συσσώρευση των συνδυασμών με το ελάχιστο κόστος γύρω από φωτοβολταϊκά συστήματα με μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ και η ταυτόχρονη μείωση του κόστους επένδυσης των συστημάτων επέτρεψε την κερδοφορία περισσότερων συνδυασμών, αξιοποιώντας και αποθηκευτικά συστήματα με μεγαλύτερες χωρητικότητες. Ακόμη, παρατηρείται πως συνδυάζοντας ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μεγέθους από 0.5 έως 1.25 kWp/MWh με οποιαδήποτε χωρητικότητα μπαταριών η μέση τιμή κόστους δεν παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον cost-optimum συνδυασμό. Επίσης, από το σχήματα 4.16 και 4.17 φαίνεται πως όσο πέφτουν οι τιμές του κόστους του συνολικού συστήματος και διευρύνεται η διαφορά της μέσης λιανικής τιμής ρεύματος από τις εγγυημένες τιμές πώλησης τόσο πιο ευνοϊκή και οικονομικά αποδοτική είναι η χρήση αποθηκευτικών συστημάτων για μεγαλύτερο εύρος χωρητικότητας.



**Σχήμα 4.17** Η βραχυπρόθεσμη μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας

Στο μακροπρόθεσμο σενάριο τα κόστη αναμένονται να είναι 1000 €/kWp, 200 €/kW και 140 €/kWh για το φωτοβολταϊκό σύστημα, τον αντιστροφέα και την μπαταρία αντίστοιχα. Η αποζημίωση για την παραγόμενη ενέργεια που εγχέεται στο δίκτυο πέφτει στην τιμή των 0.05 €/kWh. Το σχήμα 4.18 αποκαλύπτει τον οικονομικότερο συνδυασμό λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω υποθέσεις για τη μελλοντική μεταβολή

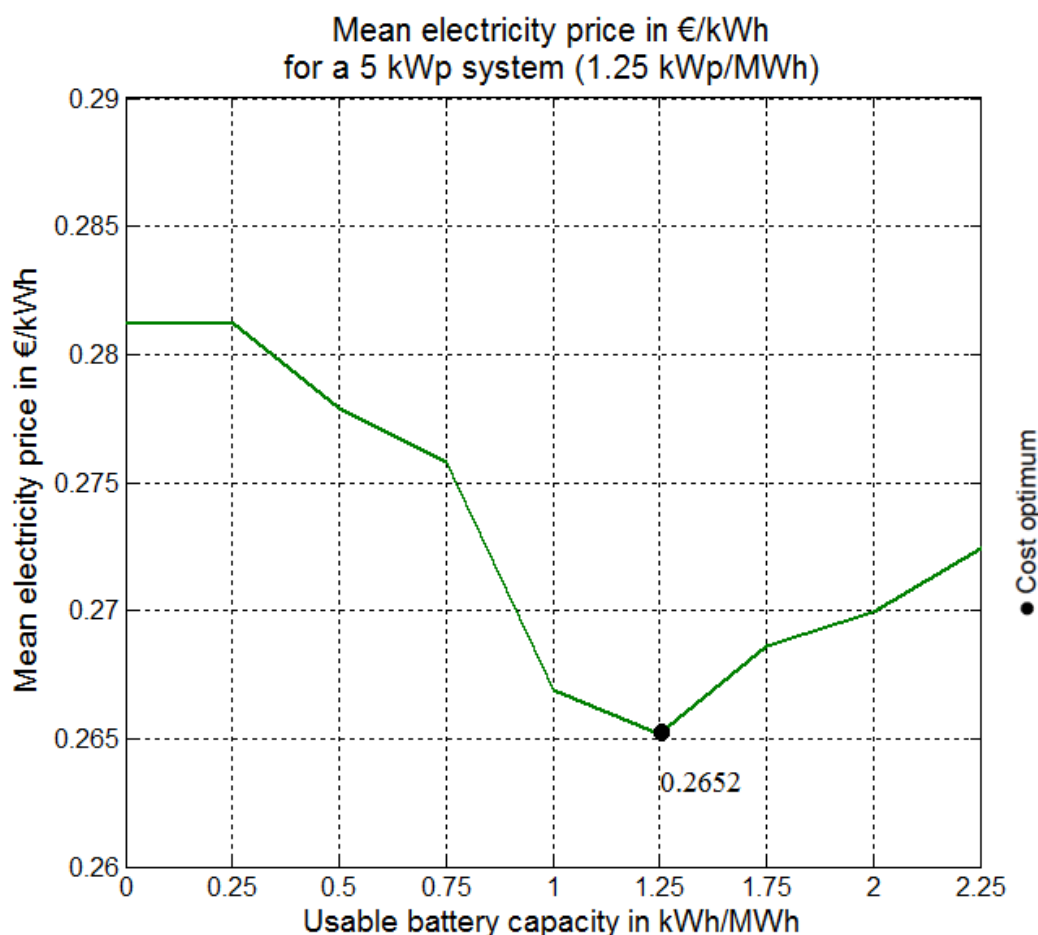
του κόστους. Τώρα πια η βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος βρίσκεται για μέγεθος εγκατεστημένης ισχύος 1,25 kWp/MWh και αξιοποιήσιμη χωρητικότητα μπαταριών 1,25 kWh/MWh. Επομένως, η χρήση αποθηκευτικού συστήματος είναι πια πιο ελκυστική από την εγκατάσταση ενός συστήματος χωρίς μπαταρίες. Συμπερασματικά, παρατηρούμε πως η επικείμενη μείωση του κόστους και των εγγυημένων τιμών πώλησης κάνει πιο ελκυστική τη χρήση της μπαταρίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα, ιδίως σε αυτές τις διαμορφώσεις συστημάτων που επιτρέπουν την μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης. Αυτό συμβαίνει διότι όσο οι εγγυημένες τιμές πώλησης παραμένουν υψηλές, τα έσοδα από την περίσσεια παραγόμενη ενέργεια είναι σημαντικά, επιτρέποντας την κερδοφορία και σε μεγαλύτερες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, με την πτώση των εγγυημένων τιμών πώλησης τα κέρδη για τους ιδιοκτήτες προκύπτουν από την μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης και της αυτονομίας, για αυτό και οι συνδυασμοί με το ελάχιστο κόστος παρατηρούνται γύρω από το 1 kWp/MWh, όπου δηλαδή η εγκατεστημένη ισχύς και συνεπώς η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια ταυτίζεται με τη ζήτηση του φορτίου (στην περίπτωση αυτή της μελέτης τις 4MWh).



**Σχήμα 4.18** Η μακροπρόθεσμη μέση τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας

Αντίστοιχα, φωτοβολταϊκά συστήματα με μεγέθη εγκατεστημένης ισχύος που ξεπερνά τα 2 kWp/MWh χωρίς μπαταρία, ενώ δείχνουν να μπορούν να ανταγωνιστούν τη τιμή

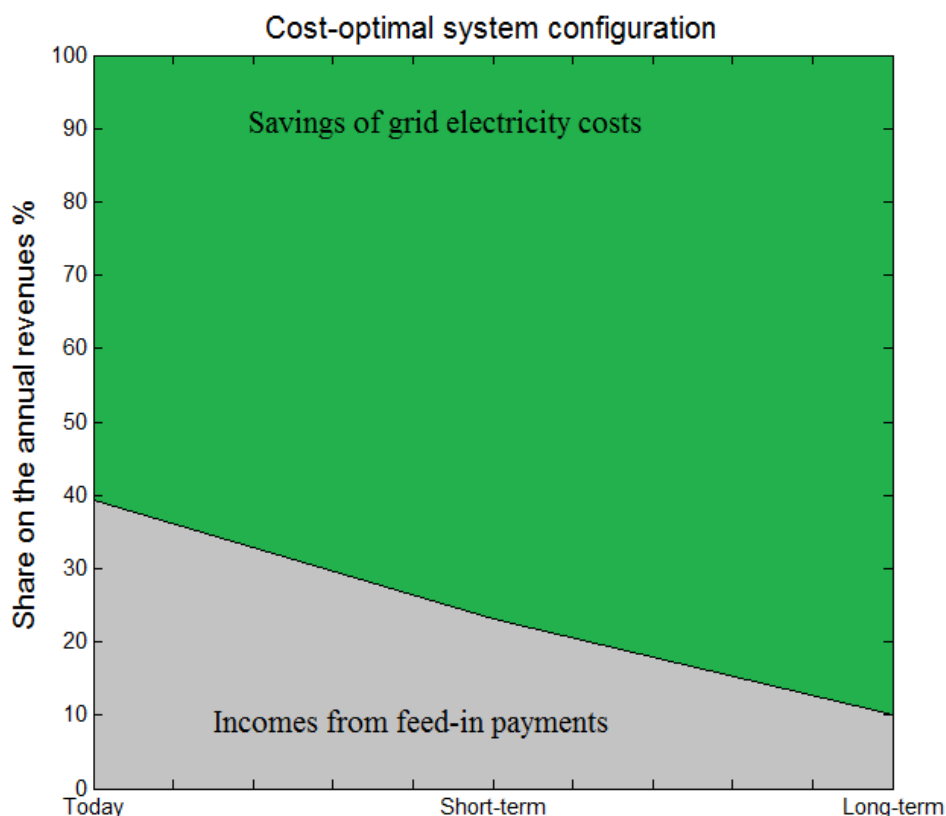
της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου, έχουν σημαντικά αυξημένο κόστος σε σύγκριση με τον cost-optimum συνδυασμό λόγω των χαμηλών βαθμών ιδιοκατανάλωσης που παρουσιάζουν. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί πως στο μακροπρόθεσμο σενάριο είναι οικονομικά αποδεκτές συνθέσεις συστημάτων οι οποίες επιτρέπουν βαθμούς αυτονομίας ακόμη και πάνω από το 70% (δες σχήμα 4.12). Όπως και να έχει, στο μέλλον θα είναι οικονομικά αποδεκτό ένα πολύ μεγάλο εύρος συστημάτων όσον αφορά το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος τους και των συσσωρευτών.



**Σχήμα 4.19** Η μέση τιμή κόστους ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος 5 kWp σε μεταβολή της χωρητικότητας της μπαταρίας σταθμισμένης στο φορτίο για το μακροπρόθεσμο σενάριο

Το σχήμα 4.19 απεικονίζει την εξάρτηση της μέσης τιμής κόστους ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εγκατεστημένης ισχύος 5 kWp σε μεταβολή της χωρητικότητας των μπαταριών σταθμισμένης στο φορτίο όσον αφορά το μακροπρόθεσμο σενάριο. Σε αυτή την κατάσταση κόστους και για τη συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύ παρατηρείται πως είναι κερδοφόροι όλοι οι συνδυασμοί μπαταριών. Αξίζει να σημειωθεί πως σε αντίθεση με την τωρινή κατάσταση κόστους και σε σύγκριση με το σχήμα 4.14, η μέση τιμή κόστους παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά. Σε αυτή τη περίπτωση η μέση τιμή κόστους μειώνεται όσο

αυξάνεται η χωρητικότητα των μπαταριών μέχρι να λάβει και την ελάχιστη τιμή της (0.2652 €/kWh) που αντιστοιχεί σε χωρητικότητα 1,25 kWh/MWh, ενώ στη πορεία αυξάνεται. Όπως σχολιάστηκε και προηγουμένως, αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο ότι πλέον τα έσοδα δεν προκύπτουν από τις εγγυημένες τιμές πώλησης αλλά από τη μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης και την απεξάρτηση από το δίκτυο (αύξηση της αυτονομίας). Για αυτό το λόγο είτε οι μικρές χωρητικότητες (χαμηλοί βαθμοί ιδιοκατανάλωσης, μικρή διάρκεια ζωής), είτε οι πολύ μεγάλες χωρητικότητες (αυξημένο κόστος επένδυσης, δεν αδειάζουν ώστε να είναι έτοιμες για χρήση την επόμενη μέρα) παρουσιάζουν μεγαλύτερο κόστος.



**Σχήμα 4.20** Η συνεισφορά των εσόδων στην αποπληρωμή των cost-optimal συνδυασμών για τα διάφορα σενάρια

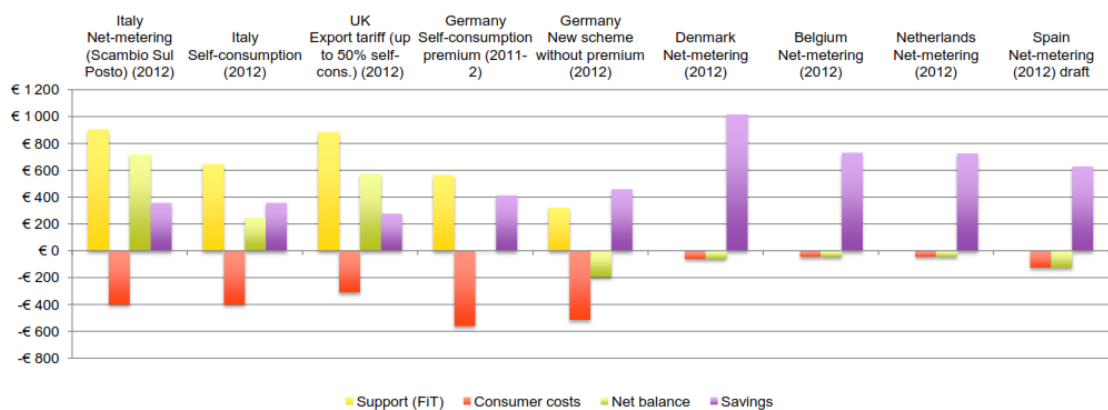
Το σχήμα 4.20 παρουσιάζει τον τρόπο χρηματοδότησης για την αποπληρωμή των επενδύσεων των cost-optimum συνδυασμών όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και για τα διάφορα σενάρια προσέγγισης. Ενώ, τα έσοδα από την έγχυση της περίσσειας ενέργειας στο δίκτυο συμβάλλουν σημαντικά σήμερα στην αποπληρωμή των συστημάτων, στο μέλλον η συμβολή αυτή θα μειωθεί σημαντικά. Με την επικείμενη μείωση των εγγυημένων τιμών πώλησης τα έσοδα προκύπτουν πλέον από την εξοικονόμηση χρημάτων λόγω της σταδιακής απεξάρτησης και το αποφευγόμενο κόστος αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Τα συστήματα που θα επιτρέπουν την μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης και αφετέρου της αυτονομίας θα είναι στο μέλλον τα πιο κερδοφόρα. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως τόσο η κερδοφορία όσο και οι οικονομικά αποδοτικότεροι συνδυασμοί συστημάτων που

παρουσιάστηκαν προηγουμένως μπορούν παρά μόνο να εκτιμηθούν, αφού η μελλοντική εξέλιξη των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και η ζήτηση του φορτίου δεν μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια.

### 4.7.3 Χρήσιμα συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, στην παραπάνω μελέτη πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων (PV-battery systems), μέσω της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης τους, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα ενεργειακά όσο και τα τεχνο-οικονομικά τους κριτήρια στα πλαίσια του θεσμού της ιδιοκατανάλωσης. Ακόμη, η ανάλυση ευαισθησίας που διεξάχθηκε, μεταβάλλοντας το μέγεθος του φ/β και του αποθηκευτικού συστήματος αντίστοιχα, αποκάλυψε τον κατάλληλο συνδυασμό φ/β συστήματος-μπαταρίας και από πλευρά ενεργειακής απόδοσης αλλά και από θέμα κόστους. Ο σχεδιασμός των συστημάτων παροχής ενέργειας θα πρέπει να εξετάζει τις ιδιότητες και τις απαιτήσεις του συστήματος αποθήκευσης από την αρχή και μόνο ένας ολοκληρωμένος προγραμματισμός του συστήματος μας επιτρέπει να κάνουμε χρήση όλων των συνεργειών για να σχεδιάσουμε συστήματα τα οποία θα είναι σε θέση να λειτουργούν με το ελάχιστο κόστος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους.

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως αν εξετάσουμε την εγκατάσταση ενός φ/β-αποθηκευτικού συστήματος που τελεί υπό τον θεσμό της ιδιοκατανάλωσης καθαρά σαν οικονομική επένδυση, τότε τα κίνητρα που δίνονται στους καταναλωτές από το εθνικό σύστημα που περιβάλλει την επένδυση, παίζουν πολύ σπουδαίο ρόλο και καθορίζουν την βιωσιμότητα της επένδυσης αυτής. Τα κίνητρα αυτά εκφράζονται συνήθως μέσω της μορφής εσόδων που προέρχονται από διάφορες επιδοτήσεις ή φορο-ελαφρύνσεις (για παράδειγμα στην Γερμανία επιδοτείται η αγορά του αποθηκευτικού συστήματος, ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο επιδοτείται αδρά η ιδιοκαταναλώμενη kWh) και μπορούν να αντικαταστήσουν τα έξοδα από τα κόστη για την αναβάθμιση του δικτύου διανομής. Ακόμη, οι επιμέρους απαιτήσεις και οι ανάγκες της κάθε χώρας, όσον αφορά τα προβλεπόμενα επίπεδα της φ/β ανάπτυξης και διείσδυσης ανά τομέα (οικιακό, εμπορικό, βιομηχανικό κλπ.), καθορίζουν και επηρεάζουν άμεσα την εξέλιξη της αγοράς των φ/β και την βιωσιμότητα αυτών των επενδύσεων. Συνήθως στο μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης απαιτείται περαιτέρω οικονομική στήριξη των επενδύσεων, καθώς η απόσβεση τους διαρκεί μεγαλύτερη χρονική περίοδο από ότι στον θεσμό των FIT's ή του net-metering. Η παραπάνω διαπίστωση επαληθεύεται και μέσω του σχήματος 4.21, το οποίο παρουσιάζει τις ετήσιες ταμειακές ροές ενός εγκατεστημένου συστήματος 3.3 kWp σε φορτίο 3500 kWh ενσωματώνοντας το στα υπάρχοντα θεσμικά πλαίσια διαφόρων Ευρωπαϊκών κρατών που επιτρέπουν την αυτοκατανάλωση της φ/β παραγωγής μέσω του θεσμού του net-metering ή του self-consumption.



**Σχήμα 4.21** Οι ετήσιες ταμειακές ροές ενός εγκατεστημένου συστήματος 3.3 kWp (φορτίου 3500kWh) στα υπάρχοντα θεσμικά πλαίσια net-metering και self-consumption στην Ευρώπη Πηγή: [www.epia.org](http://www.epia.org)

Από το σχήμα παρατηρείται πως τα έσοδα, που για την περίπτωση του net-metering εκφράζονται σαν αποφευγόμενο κόστος (savings), είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα έσοδα στο θεσμό της ιδιοκατανάλωσης (ιδίως σε περιπτώσεις όπου δεν επιδοτείται απευθείας η ιδιοκαταναλώμενη kWh ή όταν οι εγγυημένες τιμές πώλησης της περίσσειας ενέργειας είναι ιδιαίτερα χαμηλές) δημιουργώντας τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την προσέλκυση αυτών των επενδύσεων. Ωστόσο, στο θεσμό του net-metering το δίκτυο διανομής μπορεί να επιβαρυνθεί από τα κόστη για την αναβάθμιση του, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις υψηλής φ/β διεύθυνσης, και η επιβάρυνση αυτή μπορεί να μετακυλήσει μετέπειτα στους καταναλωτές μέσω φόρων. Αντίθετα, αν το μοντέλο της ιδιοκατανάλωσης σχεδιαστεί ορθά μπορεί να βοηθήσει στο προγραμματισμό και τη λειτουργία των δικτύων διανομής, στην αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας (και σε επίπεδο καταναλωτών αλλάζοντας την ενεργειακή τους συμπεριφορά και δίνοντας τους κίνητρα για χρήση “έξυπνων” συσκευών, μπαταριών για αύξηση ιδιοκατανάλωσης, προγραμμάτων DSM κλπ.) επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα αύξηση της αυτονομίας και συνεπώς ανεξαρτησία σχετικά με τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας συμπεριλαμβανομένης και της φορολογίας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η διαστασιολόγηση των φ/β συστημάτων διαφέρει ανάλογα με το θεσμικό πλαίσιο που ακολουθείται, αφού στο net-metering μας ενδιαφέρει η συνολική παραγωγή, ενώ στο self-consumption η βελτιστοποίηση των επιπέδων της ιδιοκατανάλωσης.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, η παραπάνω ανάλυση ανέδειξε ότι τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων στο θεσμό της ιδιοκατανάλωσης, δηλαδή ο βαθμός της ιδιοκατανάλωσης και ο βαθμός αυτονομίας, εξαρτώνται άμεσα τόσο από το μέγεθος της εγκατεστημένης φ/β ισχύος όσο και από το μέγεθος των συσσωρευτών. Ταυτόχρονα, η ανάλυση κόστους που πραγματοποιήθηκε, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, αποκάλυψε τη διαμόρφωση του συστήματος με το ελάχιστο κόστος (δηλαδή τον cost-optimum συνδυασμό) αλλά και την άμεση εξάρτησή του από τις εκάστοτε συνθήκες κόστους. Διαπιστώθηκε ότι το βέλτιστο μέγεθος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης θα



συρρικνωθεί σε συστήματα μικρής κλίμακας που αποδίδουν μεγαλύτερους βαθμούς ιδιοκατανάλωσης, καθώς τα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας στις εγγυημένες τιμές πώλησης (FIT's) θα παίξουν ασήμαντο ρόλο στο μέλλον. Συνδυάζοντας ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 5 kWp με ένα αποθηκευτικό σύστημα αξιοποιήσιμης χωρητικότητας 5 kWh (η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε ένα μέσο ετήσιο συνολικό φορτίο 4 MWh) ο ετήσιος βαθμός της ιδιοκατανάλωσης στη Γερμανία αγγίζει το 60%. Μελλοντικά και όσον αφορά το μακροπρόθεσμο σενάριο ο συνδυασμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων με αποθηκευτικά συστήματα δεν θα είναι απλά επικερδής αλλά και η βέλτιστη οικονομική λύση.



## Κεφάλαιο 5

### Ενσωμάτωση στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων

Τα σύγχρονα δίκτυα διανομής ενέργειας έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να αποδέχονται τη συνολική ισχύ που απαιτείται από τα φορτία και να την διανέμουν στους καταναλωτές. Σήμερα με τη σημαντική διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής η ροή ισχύος μπορεί να αναστραφεί μετατρέποντας το δίκτυο διανομής από ένα παθητικό δίκτυο, το οποίο τροφοδοτεί αδιάληπτα το φορτίο, σε ένα ενεργό σύστημα όπου η ροή ισχύος και οι τάσεις καθορίζονται από τη διείσδυση και τα επιμέρους φορτία. Στα δίκτυα διανομής που παρουσιάζουν υψηλή φωτοβολταϊκή διείσδυση παρατηρείται συνήθως αύξηση των τάσεων και αντιστροφή της ροής ισχύος από το δίκτυο χαμηλής στο δίκτυο μέσης τάσης [42]. Ήδη σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες όπως η Γερμανία, το Βέλγιο, η Ισπανία και άλλες, το δίκτυο διανομής και ιδιαίτερα το δίκτυο χαμηλής τάσης εμφανίζει προβλήματα στην ποιότητα της τάσης τροφοδοσίας εξαιτίας των υψηλών επιπέδων της φωτοβολταϊκής διείσδυσης [43]. Η εύρυθμη λοιπόν ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο δίκτυο χαμηλής τάσης και η αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης της τάσης με τη βοήθεια των αποθηκευτικών συστημάτων κρίνεται σήμερα αναγκαία και θα μελετηθεί στο παρών κεφάλαιο μέσω της μοντελοποίησης και των προσομοιώσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων - συσσωρευτών στο γραφικό περιβάλλον Simulink του Matlab.

#### 5.1 Εισαγωγή

Οι συνθήκες που ευνοούν το φαινόμενο της αντιστροφής της ισχύος σε ένα ζυγό του δικτύου είναι συνήθως η υψηλή παραγωγή και το χαμηλό φορτίο. Αυτές οι καταστάσεις μπορούν να συμβούν σε καθημερινή βάση και μπορεί να προκαλέσουν φαινόμενα ανύψωσης της τάσης στους διάφορους ζυγούς. Για να αποφευχθεί η παραπάνω διαδικασία είναι σκόπιμο να βρεθούν λύσεις οι οποίες θα αυξάνουν την κατανάλωση του φορτίου του σπιτιού σε περιόδους υψηλής ηλιοφάνειας διατηρώντας έτσι τη τάση σε χαμηλά επίπεδα.

Στη Γερμανία η πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (περίπου 13 GW) συνδέεται στη χαμηλή τάση προκαλώντας προβλήματα στην ποιότητα της τάσης τροφοδοσίας σε διάφορες περιοχές καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου [44]. Για την αντιμετώπιση λοιπόν αυτών των φαινομένων, από τον Ιανουάριο του 2012, ο διαχειριστής του δικτύου υποχρεώνει όλους τους ιδιοκτήτες των φωτοβολταϊκών συστημάτων να περιορίζουν την ενεργό ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο με βάση συγκεκριμένα όρια τα οποία θεσπίζονται μέσω του λεγόμενου German Act [45]. Πιο αναλυτικά, η ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο ανά πάσα στιγμή δεν επιτρέπεται να ξεπερνά το 70% της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού

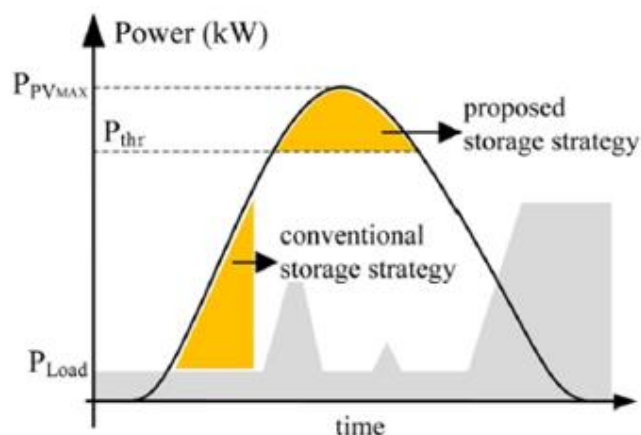
συστήματος. Αυτό αυτομάτως σημαίνει μία περικοπή της ενεργού ισχύος κατά 30% σε περιόδους όπου μεγιστοποιείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή. Άλλες εναλλακτικές λύσεις για τον περιορισμό της εγγεόμενης ενεργού ισχύος αποτελούν η μετατόπιση του φορτίου (Load Shifting) όπως και η αποθήκευση της περισσευούμενης ενέργειας σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (Energy Storage) με σκοπό την αύξηση της ιδιοκατανάλωσης.

Η τελευταία λέξη της τεχνολογίας στη διαχείριση ενέργειας για καταναλωτές ΧΤ με εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή έχει κυρίως επικεντρωθεί στη λεγόμενη διαχείριση της ζήτησης (Demand Side Management). Μέσω των προγραμμάτων του DSM καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της ζήτησης των ηλεκτρικών φορτίων και η κατανομή τους σε περιόδους με υψηλή φωτοβολταϊκή παραγωγή μειώνοντας έτσι και την εγγεόμενη φωτοβολταϊκή παραγωγή στο δίκτυο. Επειδή όμως ο αριθμός των ηλεκτρικών φορτίων που μπορούν να μετακινηθούν είναι περιορισμένος και επειδή δεν χρησιμοποιούνται αναγκαστικά όλες οι ηλεκτρικές συσκευές σε καθημερινή βάση (π.χ. πλυντήριο ρούχων) η αύξηση της ιδιοκατανάλωσης προκύπτει από την περαιτέρω αξιοποίηση των αποθηκευτικών συστημάτων. Όπως παρουσιάστηκε εκτενώς και στο κεφάλαιο 4, συνδυάζοντας ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εγκατεστημένου ισχύος 5 kWp με ένα αποθηκευτικό σύστημα αξιοποιήσιμης χωρητικότητας 5 kWh (η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε ένα μέσο ετήσιο συνολικό φορτίο 4 MWh) ο ετήσιος βαθμός της ιδιοκατανάλωσης στη Γερμανία αγγίζει το 60%.

Βέβαια, ο συμβατικός αλγόριθμος διαχείρισης της ισχύος της μπαταρίας με σκοπό την μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης προϋποθέτει την φόρτιση της μπαταρίας ακριβώς από τη στιγμή που η φωτοβολταϊκή παραγωγή ξεπεράσει το απαιτούμενο φορτίο. Αυτή η στρατηγική όμως δεν αποτρέπει την εμφάνιση προβλημάτων στην ποιότητα της τάσης τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της μέγιστης φωτοβολταϊκής παραγωγής όπου λαμβάνει χώρα τις μεσημεριανές ώρες (12:00-14:00), αφού το αποθηκευτικό σύστημα φορτίζεται πλήρως ήδη από τις πρωινές ώρες (ιδιαίτερα τις μέρες με υψηλή ηλιοφάνεια), πολύ πιο πριν εμφανιστεί η μεγιστοποίηση της φωτοβολταϊκής παραγωγής. Στην παρούσα μελέτη λοιπόν θα παρουσιαστεί και θα μελετηθεί μία νέα στρατηγική ελέγχου και διαχείρισης του αποθηκευτικού συστήματος η οποία δίνει προτεραιότητα στη φόρτιση των μπαταριών τις ώρες κατά τις οποίες μεγιστοποιείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή. Σε αυτή τη περίπτωση το αποθηκευτικό σύστημα ενεργοποιείται όταν η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύς ξεπεράσει το κατώφλι ισχύος  $P_{thr}$  που έχει οριστεί, όπως παρουσιάζεται συνοπτικά και στο σχήμα 5.1.

Στο παρών κεφάλαιο, λοιπόν, αρχικά θα πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος στο γραφικό περιβάλλον Simulink του Matlab. Στη συνέχεια θα αναλυθεί η λειτουργική συμπεριφορά του συστήματος ενσωματώνοντας το στο δίκτυο ΧΤ και τηρώντας τις προϋποθέσεις που επιβάλλει ο διαχειριστής του δικτύου λαμβάνοντας διάφορα σενάρια παραγωγής και ζήτησης. Τέλος, θα μελετηθούν διάφορες στρατηγικές ελέγχου της μπαταρίας με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της ανύψωσης της τάσης αναδεικνύοντας έτσι το σημαντικό ρόλο που θα παίξουν στο μέλλον τα αποθηκευτικά συστήματα στη διεσπαρμένη παραγωγή και κατ'

επέκταση στην ανακούφιση των δικτύων διανομής λόγω της υψηλής φωτοβολταϊκής διείσδυσης.



**Σχήμα 5.1** Σύγκριση μεταξύ συμβατικής και προτεινόμενης μεθόδου διαχείρισης του αποθηκευτικού συστήματος [46]

## 5.2 Ανάλυση δεδομένων

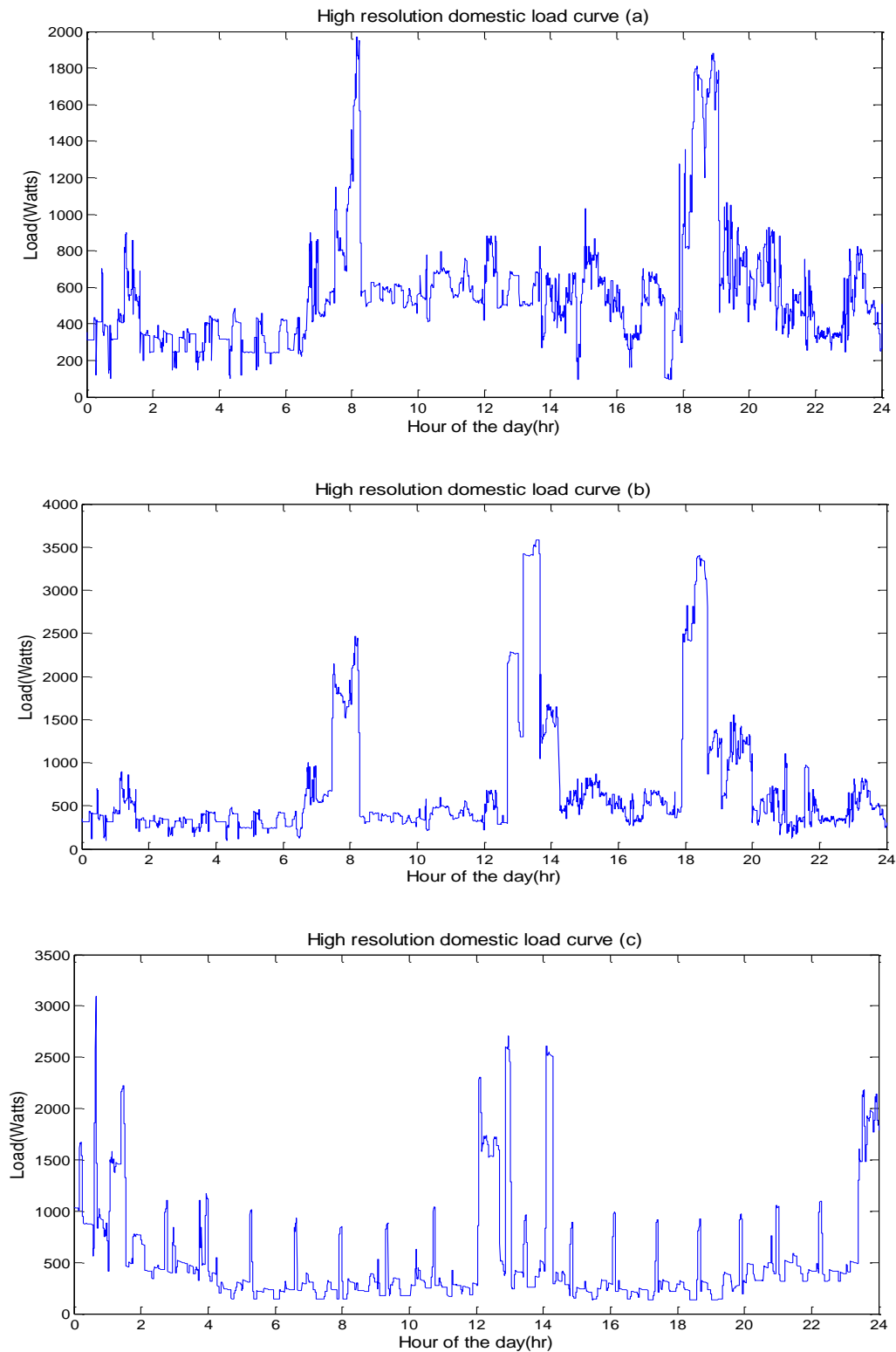
Για να προσομοιωθεί με σαφήνεια και επάρκεια η συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων-συσσωρευτών σε ανάδραση με το δίκτυο απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων υψηλής χρονικής ανάλυσης. Σε αντίθεση με την μοντελοποίηση που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 4 με αφορμή την διαστασιολόγηση των εν λόγω συστημάτων και όπου εισήχθησαν ωριαία δεδομένα φωτοβολταϊκής παραγωγής και φορτίου, στο παρόν κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα που προκύπτουν από μετρήσεις ανά λεπτό τόσο για την φωτοβολταϊκή παραγωγή όσο και για το ηλεκτρικό φορτίο. Τα δεδομένα λοιπόν υψηλής χρονικής ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθούν επιτρέπουν την απεικόνιση των δυναμικών μεταβολών και των διακυμάνσεων του φορτίου και της παραγωγής καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

### 5.2.1 Δεδομένα φορτίου

Η εταιρεία παροχής ηλεκτρισμού EDF Energy<sup>12</sup> που δραστηριοποιείται κυρίως στο Ηνωμένο Βασίλειο κυκλοφόρησε το 2012 ένα σετ δεδομένων το οποίο περιέχει τις ενεργειακές μετρήσεις ενός νοικοκυριού στη Γαλλία για τη χρονική διάρκεια τεσσάρων ετών. Οι παραπάνω μετρήσεις είναι διαθέσιμες σε μορφή χρονοσειρών με χρονική ανάλυση ενός λεπτού και αφορούν την συνολική ενεργό ισχύ που καταναλώνει το νοικοκυριό. Στο σετ δεδομένων εμπεριέχονται επίσης δεδομένα της άεργου ισχύος, της τάσης και των ρευμάτων. Το ολοκληρωμένο σετ δεδομένων είναι διαθέσιμο από το UCI Machine Learning Repository<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> <http://www.edfenergy.com/>

<sup>13</sup> <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Individual+household+electric+power+consumption>

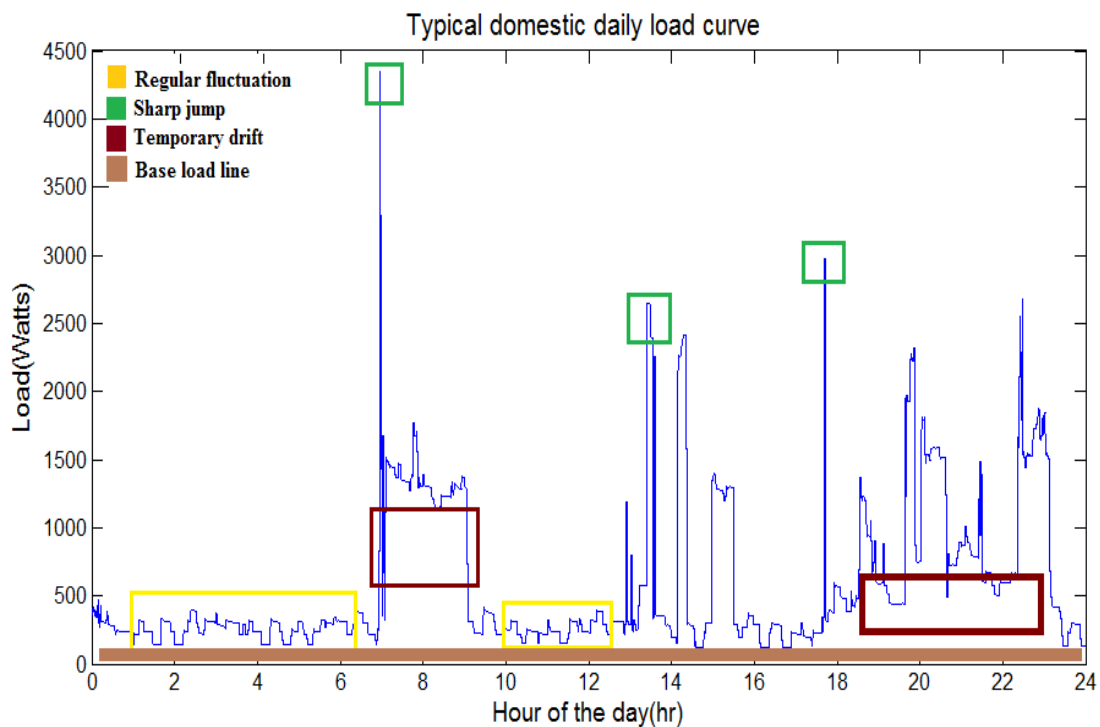


**Σχήμα 5.2** Τυπικές καμπύλες φορτίου υψηλής χρονικής ανάλυσης (ανά λεπτό)

Στο σχήμα 5.2 απεικονίζονται οι ηλεκτρικές καταναλώσεις του νοικοκυριού για διαφορετικές (τυχαία επιλεγμένες) ημέρες του έτους 2012. Οι χρονοσειρές αυτές του οικιακού φορτίου παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά από αυτή που παρατηρήθηκε στις καμπύλες του φορτίου που προέκυπταν από τα ωριαία δεδομένα

της ενότητας 4.2.1. Στις χρονοσειρές των φορτίων υψηλής χρονικής ανάλυσης μπορούν να παρατηρηθούν οι διακυμάνσεις της ισχύος που οφείλονται στο άνοιγμα ή το κλείσιμο των διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, ενώ στις τρεις αυτές ενδεικτικές καμπύλες παρατηρείται έντονη διαφορά όσον αφορά το μέγεθος της ισχύος κάθε χρονική στιγμή και την κατανομή των επιμέρους καταναλώσεων στη διάρκεια της μέρας και οι τρεις καμπύλες παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται πως όλες οι καμπύλες παρουσιάζουν αιχμές. Επίσης, οι αιχμές αυτές παρατηρούνται τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες (καμπύλη α) ή και τις μεσημεριανές (καμπύλη β). Οι απότομες αυτές αιχμές (short jumps) συνήθως οφείλονται σε ηλεκτρικές συσκευές όπως ο ηλεκτρικός φούρνος, ο φούρνος μικροκυμάτων, ο θερμοσίφωνας κ.α. και έχουν συνήθως μικρή διάρκεια. Ακόμη, δεν εμφανίζονται κατ' ανάγκη κάθε μέρα ή την ίδια χρονική στιγμή αλλά πολλές φορές τείνουν να έχουν παρόμοια συμπεριφορά. [30]



**Σχήμα 5.3** Βασικά χαρακτηριστικά του οικιακού φορτίου

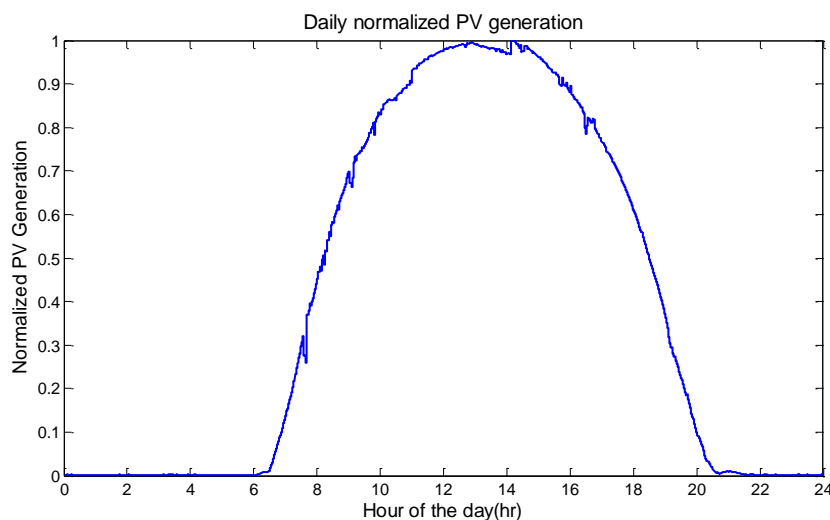
Και στις τρεις καμπύλες μπορούν να παρατηρηθούν συχνές, μικρές ισχύος διακυμάνσεις περίπου ίδιας συχνότητας. Αυτές ονομάζονται τυπικές διακυμάνσεις (regular fluctuations) και μπορούν να βρεθούν σε όλες τις καμπύλες των οικιακών καταναλωτών. Οφείλονται συνήθως στις συσκευές που παρουσιάζουν θερμική αδράνεια όπως το ψυγείο και οι καταψύκτες. Αυτές οι συσκευές δεν επηρεάζονται από το προφίλ ή τη συμπεριφορά των ενοίκων της οικίας για αυτό το λόγο και εμφανίζονται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Σαν προσωρινή μετατόπιση (temporary drift) ορίζεται το μοτίβο του σχήματος βουνού που συμβαίνει την ίδια στιγμή κάθε μέρα για κάθε νοικοκυριό. Αυτά τα μοτίβα λαμβάνουν χώρα συνήθως το πρωί ή το αργά το απόγευμα. Έχουν σχετικά μικρό μέγεθος και διαρκούνε από είκοσι λεπτά έως και μερικές ώρες. Αυτή η συμπεριφορά του φορτίου εξαρτάται άμεσα από τις συνήθειες και τις δραστηριότητες των ενοίκων και οφείλεται στην θέρμανση, το μαγείρεμα, τη διασκέδαση (τηλεόραση, Η/Υ) αλλά και το φωτισμό.

Τέλος, άλλο ένα κοινό χαρακτηριστικό αποτελεί η γραμμή βάσης φορτίου (base load line) και στην οποία ο καταναλωτής δεν ασκεί κανένα απολύτως έλεγχο. Αυτή η γραμμή αντανακλά τη χρήση των ηλεκτρικών φορτίων που είναι διαρκώς σε λειτουργία όπως οι φορτιστές των κινητών τηλεφώνων, τα ηλεκτρικά ρολόγια ή οι συσκευές που βρίσκονται σε αναμονή. Το σχήμα 5.3 απεικονίζει μία τυπική καμπύλη οικιακού φορτίου στην οποία συνοψίζονται όλα τα παραπάνω κοινά χαρακτηριστικά των οικιακών φορτίων.

## 5.2.2 Δεδομένα φωτοβολταϊκής παραγωγής

Τα δεδομένα της φωτοβολταϊκής παραγωγής προέρχονται από την Κρήτη και αφορούν μετρήσεις ανά λεπτό της εξόδου του αντιστροφέα ενός εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού συστήματος. Η φωτοβολταϊκή παραγωγή λοιπόν εκφράζεται μέσω της μετρούμενης ισχύος στην AC πλευρά του φωτοβολταϊκού συστήματος και η κανονικοποιημένη καμπύλη της ημερήσιας παραγωγής της απεικονίζεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Κανονικοποιημένη ημερήσια φωτοβολταϊκή παραγωγή



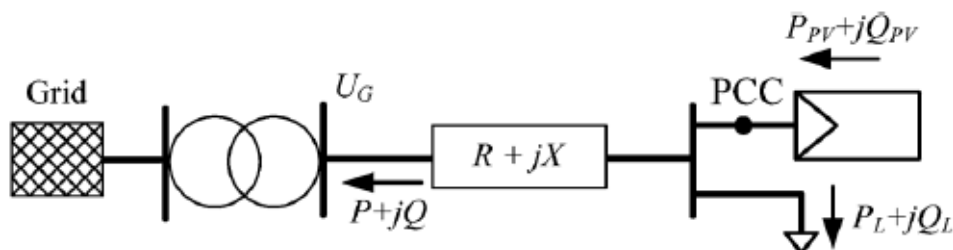
### 5.3 Σύνδεση φωτοβολταϊκού συστήματος σε κόμβο δικτύου XT

Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια ή γενικότερα η διεσπαρμένη παραγωγή συνδεθεί σε μία γραμμή του ακτινικού δικτύου XT, η ενεργός ισχύς που παράγει μειώνει τη ροή ισχύος από τον υποσταθμό MT/XT. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της πτώσης τάσης, που οφείλεται στην κυκλοφορία ενεργού ισχύος που καταναλώνουν τα φορτία, κατά μήκος της γραμμής. Σε περίπτωση όμως που η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο, έχουμε αντιστροφή ροής ισχύος, δηλαδή από τη γεννήτρια στον υποσταθμό, και αυτό προκαλεί ανύψωση τάσης κατά μήκος της γραμμής.

Οι τέσσερις ακραίες περιπτώσεις λειτουργίας που προκύπτουν είναι:

1. Ελάχιστη παραγωγή και Μέγιστο φορτίο
2. Ελάχιστη παραγωγή και Ελάχιστο φορτίο
3. Μέγιστη παραγωγή και Μέγιστο φορτίο
4. Μέγιστη παραγωγή και Ελάχιστο φορτίο

Στην πράξη όσον αφορά το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης, ο τελευταίος συνδυασμός μέγιστης παραγωγής και ελάχιστου φορτίου είναι καθοριστικής σημασίας για το μέγεθος της φωτοβολταϊκής παραγωγής που μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο. Έτσι λοιπόν κατά τη σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε ένα κόμβο του δικτύου XT το μέγεθος της τάσης στο ΣΚΣ (σημείο κοινής σύνδεσης-PCC) είναι πιθανό να αυξηθεί, ιδιαίτερα εκείνες τις ώρες της ημέρας όπου μεγιστοποιείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή και το φορτίο λαμβάνει τις μικρότερες τιμές του [47].



Σχήμα 5.5 Σύνδεση φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο δίκτυο

Στο σχήμα 5.5 απεικονίζεται η σύνδεση μίας φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο δίκτυο διανομής. Το δίκτυο αποτελείται από τον ζυγό του υποσταθμού με τάση  $U_G$ , μία γραμμή με σύνθετη αντίσταση  $Z = R + jX$ , και το ζυγό με τάση  $U_{PCC}$  στον οποίο έχει συνδεθεί η μονάδα φωτοβολταϊκής παραγωγής καθώς και το φορτίο. Η ενεργός και άεργος ισχύς του φωτοβολταϊκού είναι  $P_{PV}$  και  $Q_{PV}$  αντίστοιχα. Ομοίως τα  $P_L$  και  $Q_L$  αντιπροσωπεύουν την ενεργό και άεργο ισχύ της ζήτησης του φορτίου. Η σχέση (5.1) περιγράφει τη μεταβολή της τάσης  $\Delta \tilde{U}$  συναρτήσει της σύνθετης αντίστασης του δικτύου  $\tilde{Z}$  και σε περίπτωση εγχεόμενου φωτοβολταϊκού ρεύματος  $\tilde{I}$  ως εξής:

$$\Delta\tilde{U} = \tilde{I}(R + jX) = \frac{P - jQ}{U_G^*} (R + jX) = \frac{PR + QX}{U_G^*} + j \frac{PX - QR}{U_G^*} \quad (5.1)$$

Και άρα,

$$\tilde{U}_{PCC} = \tilde{U}_G + \Delta\tilde{U} = \tilde{U}_G + \frac{PR + QX}{U_G^*} + j \frac{PX - QR}{U_G^*} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} P &= P_{PV} - P_L \\ Q &= Q_{PV} - Q_L \end{aligned} \quad (5.3)$$

Όπου,

$\Delta\tilde{U}$  το διάνυσμα της μεταβολής της τάσης στο ζυγό

$\tilde{I}$  το διάνυσμα του ρεύματος

$\tilde{U}_G, U_G^*$  το διάνυσμα της τάσης του δικτύου και ο συζυγής του

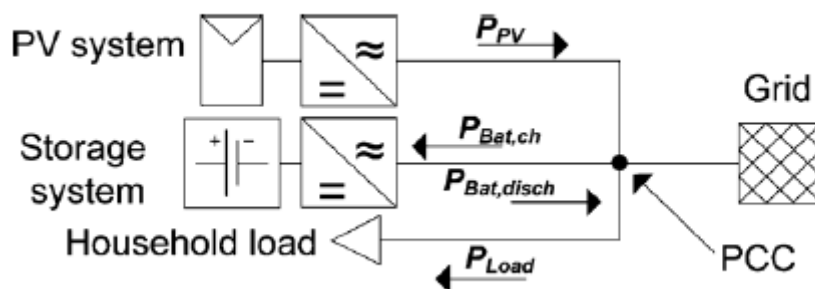
$R, X$  η αντίσταση και η αντίδραση της γραμμής

Από τον τύπο (5.2) προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Η ενεργός ισχύς που παράγει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια και η δυνατότητα της να χειριστεί την άεργο ισχύ (να την παράγει ή να την καταναλώσει) είναι καθοριστικής σημασίας για την τάση που αναπτύσσεται στο ΣΚΣ. Επίσης, μεγάλο ρόλο παίζει η αντίσταση  $R$  και η αντίδραση  $X$  της γραμμής. Η τιμή τους εξαρτάται και καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της γραμμής (διατομή, μήκος κλπ.). Αξίζει να αναφερθεί πως στα δίκτυα διανομής ΧΤ, όπως στην περίπτωση μας, ισχύει  $R \gg X$ , οπότε μεταβολές στην ενεργό ισχύ έχουν μεγαλύτερη επίδραση. Αντίθετα, στα δίκτυα διανομής ΜΤ ο επαγωγικός χαρακτήρας της γραμμής είναι περισσότερο έντονος από τον ωμικό. Σε αυτή τη περίπτωση η μεταβολή της άεργου ισχύος έχει μεγαλύτερη επίδραση στην τάση σε σύγκριση με την ενεργό ισχύ.

Οι απαιτήσεις λοιπόν που θα πρέπει να καλύπτονται για τη διασύνδεση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στο δίκτυο ΧΤ, σύμφωνα με τις οδηγίες του διαχειριστή του δικτύου, αφορούν το πρότυπο EN 50160 [48]. Με βάση λοιπόν το πρότυπο αυτό προσδιορίζεται ότι η ενεργός (RMS) τιμή της τάσης θα πρέπει να είναι στο  $\pm 10\%$  της ονομαστικής τιμής της για το 95% του χρόνου μέσα σε μία βδομάδα ή να παραμένει κάτω από το  $+15\%$  της τάσης του δικτύου  $U_G$  για όλη τη διάρκεια λειτουργίας.

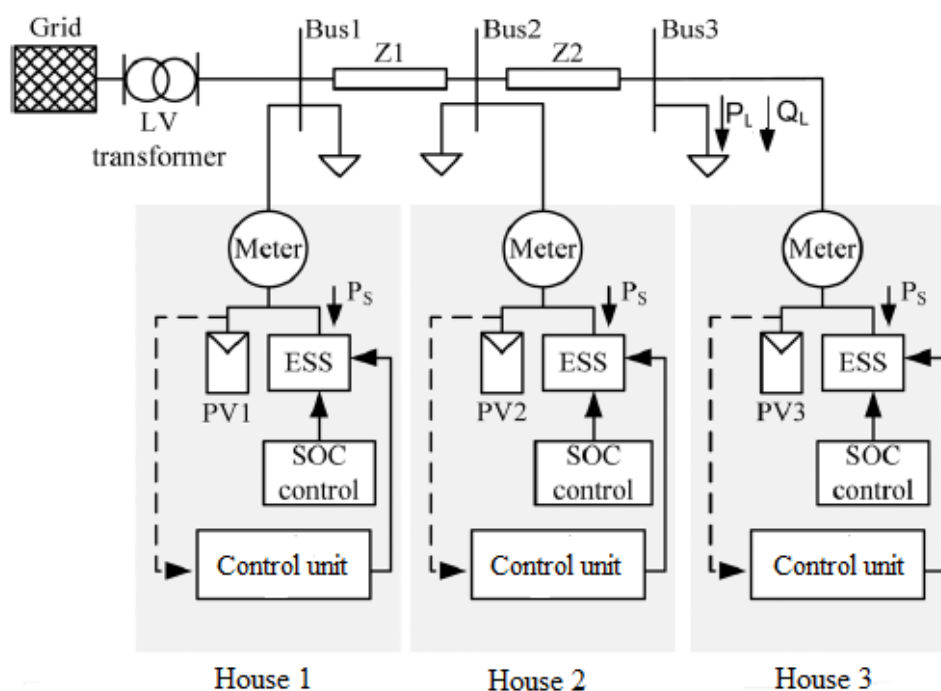
## 5.4 Μέθοδος μοντελοποίησης

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος στο γραφικό περιβάλλον Simulink του Matlab. Το σύστημα το οποίο αποτελείται από τη μονάδα της φωτοβολταϊκής παραγωγής, το αποθηκευτικό σύστημα και το φορτίο του σπιτιού συνδέεται στο δίκτυο XT μέσω του σημείου κοινής σύνδεσης (PCC) όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 Σύνδεση συστήματος στο δίκτυο XT

Το διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό-αποθηκευτικό σύστημα του σχήματος 5.6 ακολουθεί την AC συνδεσμολογία που παρουσιάστηκε αναλυτικά και στην ενότητα 4.3. Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία και τον φωτοβολταϊκό αντιστροφέα ο οποίος μετατρέπει την DC παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύ σε AC.



Σχήμα 5.7 Τοπολογία συστήματος

Ταυτόχρονα, η συστοιχία μπαταριών η οποία παραμένει συνεχώς σε DC συνθήκες συνδέεται μέσω του αντιστροφέα μπαταριών στο σημείο κοινής σύνδεσης και αποτελούν μαζί το συνολικό αποθηκευτικό σύστημα.

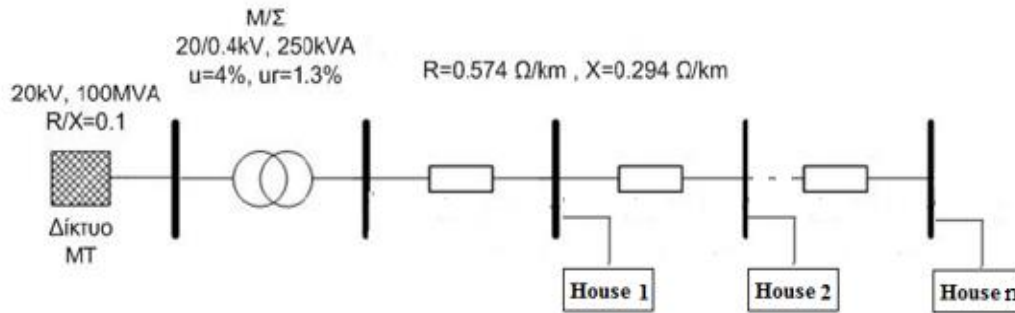
Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η συνολική τοπολογία του συστήματος προς εξέταση. Τόσο η AC ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος όσο και η AC ισχύς εισόδου/εξόδου του αποθηκευτικού συστήματος (energy storage system-ESS) παρακολουθείται από μετρητές πραγματικού χρόνου (Meter) και μία μονάδα ελέγχου (Control unit) που ρυθμίζει την λειτουργία του συστήματος με βάση την παραγωγή και τη ζήτηση αλλά και τη στρατηγική διαχείρισης του ESS που έχει επιλεγθεί. Το δίκτυο που μελετάται αποτελείται από ένα μετασχηματιστή MT/XT, από εναέριες γραμμές μεταφοράς, καθώς και από τις καταναλώσεις/παραγωγές των ζυγών αλλά και από τα επιμέρους αποθηκευτικά συστήματα που τους συνοδεύουν. Η μοντελοποίηση λοιπόν του συνολικού συστήματος προϋποθέτει την μοντελοποίηση των επιμέρους συστατικών του.

### **Τύπος προσομοίωσης**

Αρχικά, στο μοντέλο προσομοίωσης απαιτείται να επιλεγθεί ο τύπος προσομοίωσης, ο οποίος καθορίζει και τον τρόπο επίλυσης. Μέσω του block 'powergui' το Simulink δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τον τύπο προσομοίωσης σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε μοντελοποίησης. Στο παρόν μοντέλο επιλέχθηκε ο τύπος 'phasors', καθώς συγκριτικά με τους άλλους τύπους προσομοίωσης (Continuous, Discrete) ο συγκεκριμένος τρόπος επίλυσης μείωνε αισθητά τον χρόνο προσομοίωσης. Σε αυτό τον τρόπο επίλυσης όλα τα σήματα (ρεύματα, τάσεις κλπ.) εκφράζονται από τους αντίστοιχους φασιθέτες τους και από τη συχνότητα τους που επιλέγεται στα 50 Hz.

#### **5.4.1 Δίκτυο διανομής**

Για να γίνει εφικτή η προσομοίωση του συστήματος πρέπει να προηγηθεί ο υπολογισμός των στοιχείων της τοπολογίας του δικτύου διανομής. Το δίκτυο τροφοδοσίας MT αποτελείται από μία ιδανική πηγή τάσης, μία σύνθετη αντίσταση  $Z_C$  λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης του δικτύου MT, την σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή MT/XT και από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Η τοπολογία του δικτύου τροφοδοσίας απεικονίζεται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9 Η τοπολογία του δικτύου τροφοδοσίας

**Υπολογισμός στοιχείων τοπολογίας [49]**

Ισχύς βραχυκύκλωσης

Η ισχύς βραχυκύκλωσης είναι 100MVA. Συνεπώς έχουμε:

$$X_s = \frac{(400V)^2}{100 * 10^6 VA} = 16 * 10^{-4} \Omega \quad (5.4)$$

Όπου, 400 V είναι η πολική τάση. Προκύπτει  $R_s = 0.1 * X_s = 16 * 10^{-5} \Omega$ . Επίσης,

$$L_s = \frac{X_s}{100 * \pi} = 5,093 * 10^{-6} H \quad (5.5)$$

Μετασηματιστής ΜΤ/ΧΤ

Ο μετασηματιστής έχει τάση βραχυκύκλωσης  $u = 4\%$ . Συνεπώς,

$$Z_{M/\Sigma} = 0.04 * \frac{(400V)^2}{250 * 10^3 VA} = 0.0256 \Omega \quad (5.6)$$

Επίσης, η σχετική ωμική τάση βραχυκύκλωσης είναι  $u_r = 1.3\%$ . Με βάση αυτό έχουμε:

$$R_{M/\Sigma} = 0.013 * \frac{(400V)^2}{250 * 10^3 VA} = 0.00832 \Omega \quad (5.7)$$

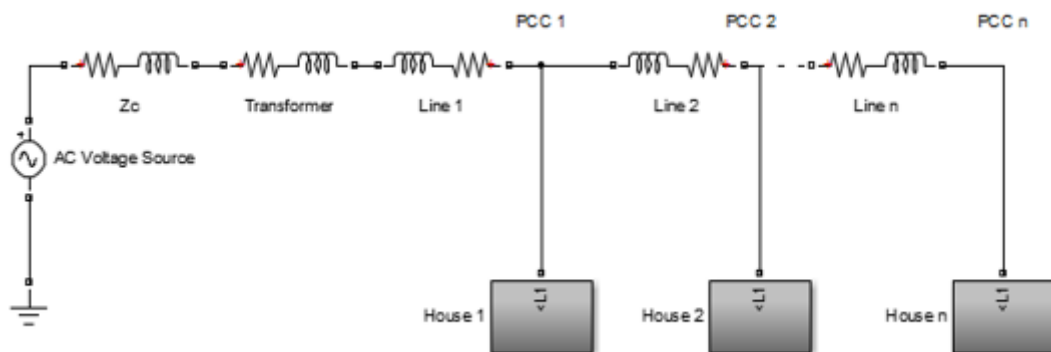
$$X_{M/\Sigma} = \sqrt{0.0256^2 - 0.00832^2} = 0.02421 \Omega \quad (5.8)$$

Τέλος προκύπτει:

$$L_{M/\Sigma} = \frac{X_{M/\Sigma}}{100 * \pi} = 77,063 * 10^{-6} H \quad (5.9)$$

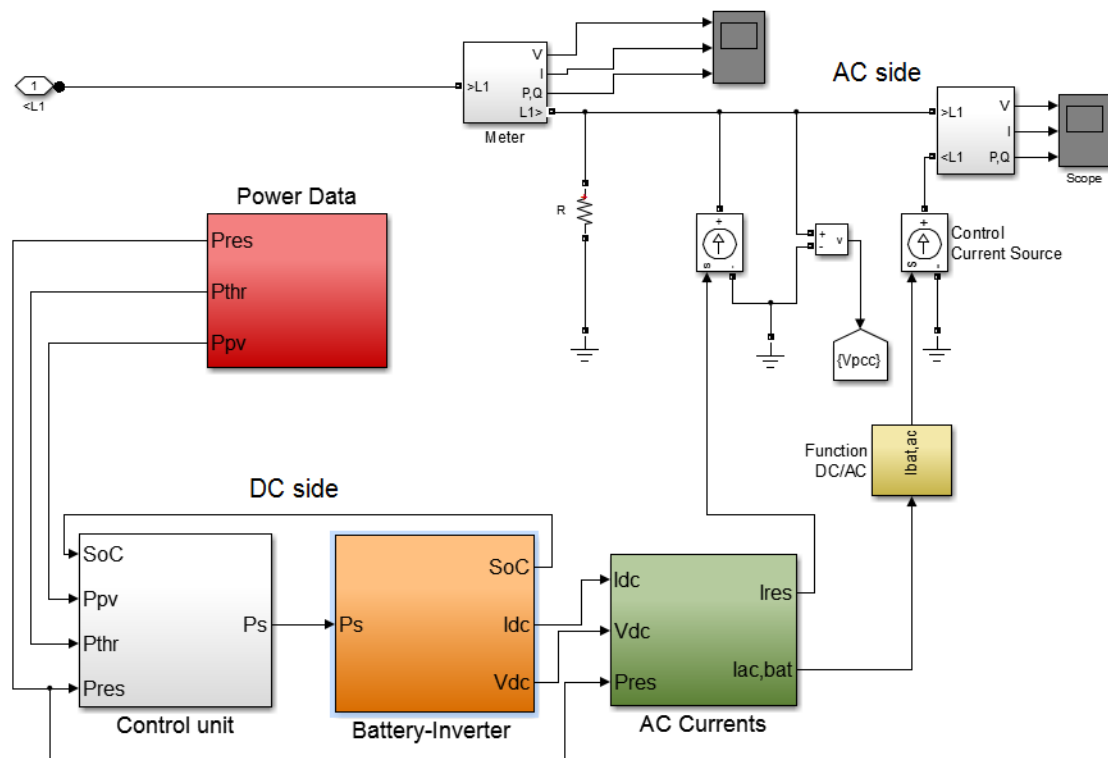
Οι γραμμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι γυμνοί αγωγοί αλουμινίου  $4 \times 35 \text{mm}^2$ , όπου  $R = 0.574 \frac{\Omega}{\text{km}}$  και  $X = 0.294 \frac{\Omega}{\text{km}}$ . Συνεπώς, ο λόγος  $R/X=1.95$ , δηλαδή η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι σχεδόν διπλάσια της επαγωγικής αντίδρασης.

Στο σχήμα 5.10 εικονίζεται η τοπολογία τροφοδοσίας του δικτύου στο Simulink με τα στοιχεία που προέκυψαν από τον υπολογισμό των εξισώσεων (5.4) έως και (5.9).



**Σχήμα 5.10** Η προσομοιωμένη τοπολογία του δικτύου τροφοδοσίας στο Simulink

Στο block 'AC Voltage Source' εισάγεται το πλάτος της τάσης (peak amplitude), η γωνία (phase) και η συχνότητα της (Hz). Στα πεδία που εμφανίζονται συμπληρώνονται οι τιμές  $230 * \sqrt{2} \text{ V}$ ,  $0^\circ$  μοίρες και  $50 \text{ Hz}$  αντίστοιχα. Στα blocks με ονομασία 'House 1' έως και 'House n' προσομοιώνεται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού και του αποθηκευτικού συστήματος, της μονάδας ελέγχου και των μετρητών. Τα περιεχόμενα του block 'House' εικονίζονται συνοπτικά στο σχήμα 5.11 για να αναλυθούν περαιτέρω στις επόμενες ενότητες.



**Σχήμα 5.11** Συνοπτική παρουσίαση των περιεχομένων του block ‘House’

Το block ‘House’ αποτελείται αρχικά από το block ‘Power Data’ στο οποίο εισάγονται και επεξεργάζονται τα δεδομένα της ενεργού ισχύος (παραγωγής, φορτίου). Στη συνέχεια, η παραγόμενη ισχύς και η ζητούμενη ισχύς του φορτίου μεταφράζονται σε ρεύμα μέσω του block ‘AC Currents’. Ακόμη, το block αυτό είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό του AC ρεύματος της μπαταρίας όπως προκύπτει από την έξοδο του αντιστροφέα. Οι τιμές των ρευμάτων που θα προκύψουν εισάγονται στα blocks ‘Control Current Source’, τα οποία βρίσκονται στην AC πλευρά της μοντελοποίησης και αποτελούν μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος που μετατρέπει την τιμή του σήματος εισόδου σε ρεύμα AC. Ακόμη, στην AC πλευρά του συστήματος παρατηρούνται τα blocks των μετρητών, τα οποία παρακολουθούν τις RMS τιμές των ρευμάτων, της τάσης αλλά και τις τιμές της ενεργού και άεργου ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης αλλά και στην AC πλευρά της εξόδου του αποθηκευτικού συστήματος. Στη DC πλευρά της παρούσας μοντελοποίησης βρίσκεται το block ‘Battery-Inverter’, το οποίο προσομοιώνει τη συνολική λειτουργία του αποθηκευτικού συστήματος δηλαδή της συστοιχίας αλλά και του αντιστροφέα των μπαταριών. Τέλος, μέσω του block ‘Control Unit’, δηλαδή της μονάδας ελέγχου, πραγματοποιείται η επιθυμητή διαχείριση του αποθηκευτικού συστήματος ανάλογα με τη στρατηγική που ακολουθείται.

## 5.4.2 Εισαγωγή δεδομένων ('Power Data' block)

Στη παρούσα μελέτη η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο αποτελείται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια και τον φωτοβολταϊκό αντιστροφέα, μεταφράζεται μέσω των δεδομένων της φωτοβολταϊκής παραγωγής όπως προέκυψαν από την έξοδο του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα. Η αναλυτική μοντελοποίηση λοιπόν των επιμέρους συστατικών του φωτοβολταϊκού συστήματος δεν πραγματοποιείται σε αυτή την εργασία, αφενός γιατί στο παρών μοντέλο προσομοίωσης μελετάται η συμπεριφορά του συνολικού συστήματος στη μόνιμη κατάσταση, αφετέρου διότι κύριο αντικείμενο αυτής της μελέτης είναι η βέλτιστη διαχείριση των αποθηκευτικών συστημάτων.

Αφού λοιπόν εισαχθούν τα κανονικοποιημένα δεδομένα της φωτοβολταϊκής παραγωγής (κανονικοποιημένη καμπύλη του σχήματος 5.4) στο μοντέλο προσομοίωσης, πολλαπλασιάζονται σε κάθε βήμα με το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος διαμορφώνοντας την επιθυμητή ισχύ (συνάρτηση Gain). Στη συνέχεια, εισάγονται τα δεδομένα του φορτίου (ημερήσια καμπύλη του σχήματος 5.2). Τόσο η διαθέσιμη φωτοβολταϊκή ισχύς όσο και η απαιτούμενη ισχύς του φορτίου εισάγεται στο μοντέλο με τη βοήθεια του block 'from workspace', όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.10. Η απαιτούμενη ισχύς του φορτίου  $P_{load}$  αφαιρείται σε κάθε βήμα προσομοίωσης από τη παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύ  $P_{PV}$ , δημιουργώντας τη μεταβλητή που εκφράζει τη διαφορά τους  $P_{res}$ . Άρα,

$$P_{res} = P_{pv} - P_{load} \quad (5.10)$$

Όπου,

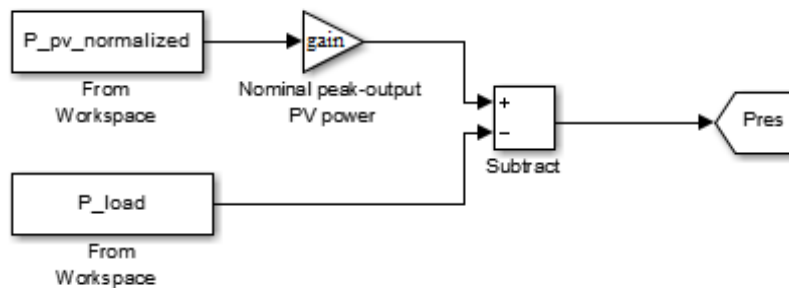
$P_{pv}$  η AC παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύς (Watts)

$P_{load}$  η απαιτούμενη ισχύς του φορτίου (Watts)

Μέσω της μεταβλητής  $P_{res}$  εκφράζεται η προτεραιότητα της παρούσας μοντελοποίησης να τροφοδοτεί άμεσα το φορτίο από τη διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή (ιδιοκατανάλωση) και η περίσσεια όταν υπάρχει, είτε να αποθηκεύεται (αύξηση της ιδιοκατανάλωσης), είτε να εγχέεται στο δίκτυο. Οι μεταβλητές  $P_{pv}$  και  $P_{load}$  θεωρούνται πάντα θετικές. Έτσι, όταν η μεταβλητή  $P_{RES}$  έχει θετικό πρόσημο ( $P_{pv} > P_{load}$ ) τότε υπάρχει διαθέσιμη περίσσεια παραγόμενη ενέργεια η οποία μπορεί να διατεθεί για τη φόρτιση της μπαταρίας, ενώ όταν έχει αρνητικό πρόσημο ( $P_{pv} < P_{load}$ ) σημαίνει αυτομάτως ότι η παραγόμενη ισχύς αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου το οποίο θα στραφεί είτε στη μπαταρία είτε στο δίκτυο για τη



τροφοδότηση του. Η εισαγωγή και η επεξεργασία των δεδομένων παρουσιάζεται στο σχήμα 5.12 το οποίο και αποτελεί τα περιεχόμενα του block ‘Power data’.



Σχήμα 5.12 Περιεχόμενα του block ‘Power data’ στο οποίο εισάγονται και επεξεργάζονται τα δεδομένα παραγωγής και φορτίου

### 5.4.3 Υπολογισμός AC ρευμάτων ( ‘AC Currents’ block)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το block ‘AC Currents’ είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό των τιμών των ρευμάτων που θα εγχυσθούν στο σημείο κοινής σύνδεσης μέσω των ελεγχόμενων πηγών ρεύματος του σχήματος 5.11. Στο block υπολογίζονται δύο ρεύματα. Το μεν  $I_{res}$  το οποίο προκύπτει από την ενεργό ισχύ  $P_{res}$  και εκφράζει τη παραγωγή και τη ζήτηση του νοικοκυριού, το δε  $I_{bat,ac}$  το οποίο εκφράζει το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα των μπαταριών. Αξίζει να σημειωθεί πως η βιβλιοθήκη ‘SimPowerSystems’ του Simulink στις προσομοιώσεις τύπου ‘phasors’ χρησιμοποιεί όλες τις ποσότητες στο μέγιστο πλάτος τους.

#### Υπολογισμός $I_{res}$

Η τιμή του ρεύματος υπολογίζεται ως εξής. Αφού δεν υπάρχει άεργος ισχύος ( $Q=0$ ), η συνολική φαινόμενη ισχύς θα είναι ίση με την ενεργό ισχύ  $P_{res}$ . Επομένως, ισχύει:

$$S = P_{res} = \frac{V_{pcc,peak}}{\sqrt{2}} * \frac{I_{res,peak}^*}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} * V_{pcc,peak} * I_{res,peak}^* \quad (5.11)$$

$$I_{res,peak} = \left( 2 * \frac{P_{res}}{V_{pcc,peak}} \right)^* , \quad I_{res} = I_{res,peak} \quad (5.12)$$

Όπου,

$V_{pcc,peak}$  ο φασιθέτης της τάσης στο PCC στο μέγιστο πλάτος (V)

$I_{res,peak}$  ο φασιθέτης του ρεύματος στο PCC στο μέγιστο πλάτος(A)

$I_{res,peak}^*$  ο συζυγής του φασιθέτη του ρεύματος

### Υπολογισμός $I_{bat,ac}$

Έχοντας γνωστό το DC ρεύμα φόρτισης ή αποφόρτισης της μπαταρίας  $I_{DC}$  και τη τάση στους ακροδέκτες της  $V_{DC}$  μπορεί να υπολογιστεί το AC ρεύμα  $I_{bat,ac}$  που εγχέεται ή απορροφάται από το σημείο κοινής σύνδεσης ως εξής:

$$V_{DC} * I_{DC} = \frac{V_{pcc,peak}}{\sqrt{2}} * \frac{I_{bat,ac,peak}^*}{\sqrt{2}} \quad (5.13)$$

$$I_{bat,ac,peak} = \left( \frac{2 * V_{DC} * I_{DC}}{V_{pcc,peak}} \right)^* \quad (5.14)$$

Όπου,

$V_{DC}$  η DC τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας (V)

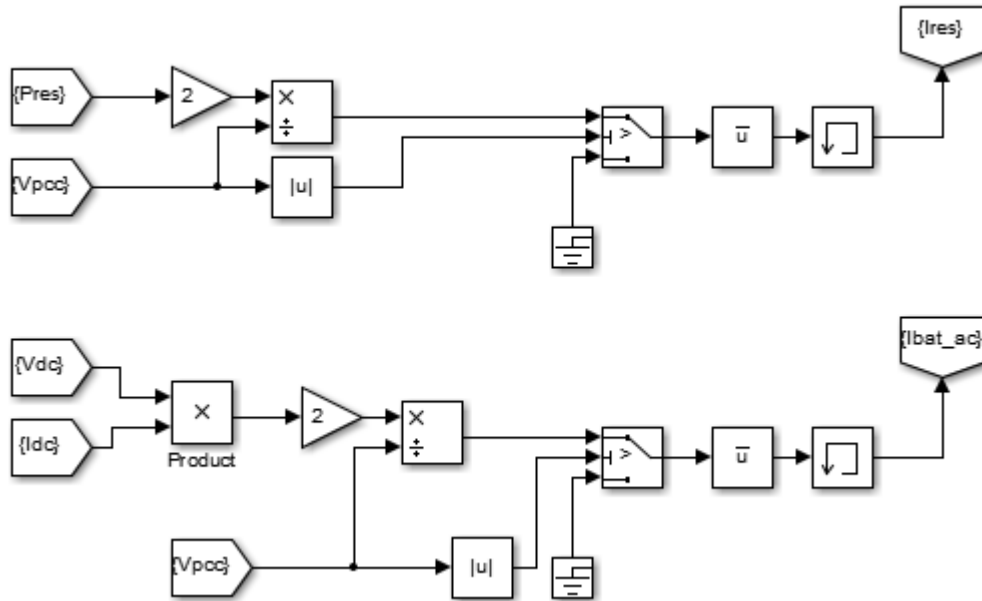
$I_{DC}$  το DC ρεύμα φόρτισης ή αποφόρτισης της μπαταρίας (A)

$V_{pcc,peak}$  ο φασιθέτης της τάσης στο PCC στο μέγιστο πλάτος (V)

$I_{bat,ac,peak}$  ο φασιθέτης του AC ρεύματος της μπαταρίας στο PCC στο μέγιστο πλάτος (A)

$I_{bat,ac,peak}^*$  ο συζυγής του AC ρεύματος της μπαταρίας

Στο σχήμα 5.13 απεικονίζονται τα περιεχόμενα του block ‘AC Currents’, τα οποία και αποτελούν τη μοντελοποίηση των εξισώσεων (5.12) και (5.14). Αξίζει να σημειωθεί πως σε περίπτωση που η τιμή της τάσης  $V_{pcc}$  γίνει μηδέν, η διαίρεση με το μηδέν αποφεύγεται μέσω του ‘ground terminator block’ και με τη βοήθεια του block ‘switch’.



**Σχήμα 5.13** Περιεχόμενα του block ‘AC Currents’

Η υπολογιζόμενη τιμή του ρεύματος  $I_{bat,ac}$  εξαρτάται όμως από το DC ρεύμα φόρτισης ή αποφόρτισης της μπαταρίας, σχέση 5.14. Κατά τη διαδικασία της φόρτισης το  $I_{DC}$  λαμβάνει αρνητικές τιμές ( $I_{DC} < 0$ ), ενώ όταν η μπαταρία αποφορτίζεται λαμβάνει θετικές ( $I_{DC} > 0$ ). Ταυτόχρονα, στον υπολογισμό του  $I_{bat,ac}$  πρέπει να συμπεριληφθούν οι βαθμοί απόδοσης της φόρτισης/αποφόρτισης  $\rho_i$  και  $\rho_o$  οι οποίοι λαμβάνουν τις τιμές 0.9 και 0.95 αντίστοιχα.

Φόρτιση,

$$I_{bat,ac} = \left( \frac{I_{bat,ac,peak}}{\rho_i} \right) < 0 \quad (5.15)$$

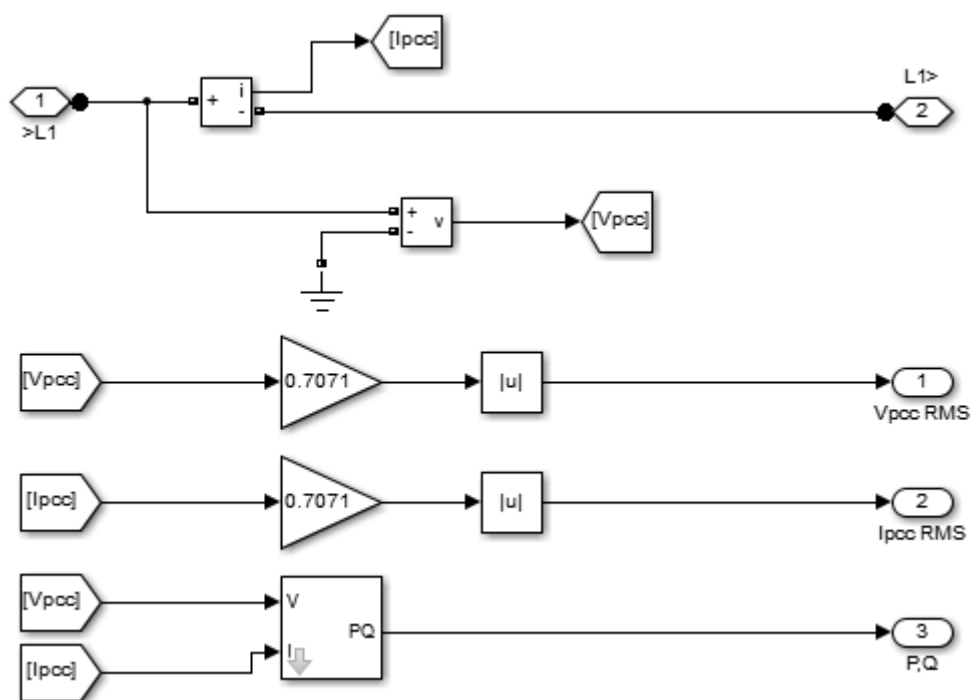
Αποφόρτιση,

$$I_{bat,ac} = (I_{bat,ac,peak} * \rho_o) > 0 \quad (5.16)$$

Η παραπάνω διαδικασία δηλαδή η μοντελοποίηση των εξισώσεων (5.15) και (5.16) πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης DC/AC, όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.11.

#### 5.4.4 Μετρητές ('Meter' block)

Στα block 'Meter' οι RMS τιμές του ρεύματος και της τάσης αλλά και η ενεργός/άεργος ισχύς που παράγεται ή καταναλώνεται παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.11, έχουν εγκατασταθεί δύο μετρητές στην AC πλευρά της συνδεσμολογίας, στο σημείο κοινής σύνδεσης αλλά και στην έξοδο του αποθηκευτικού συστήματος. Τα περιεχόμενα του block παρουσιάζονται στο σχήμα 5.14.



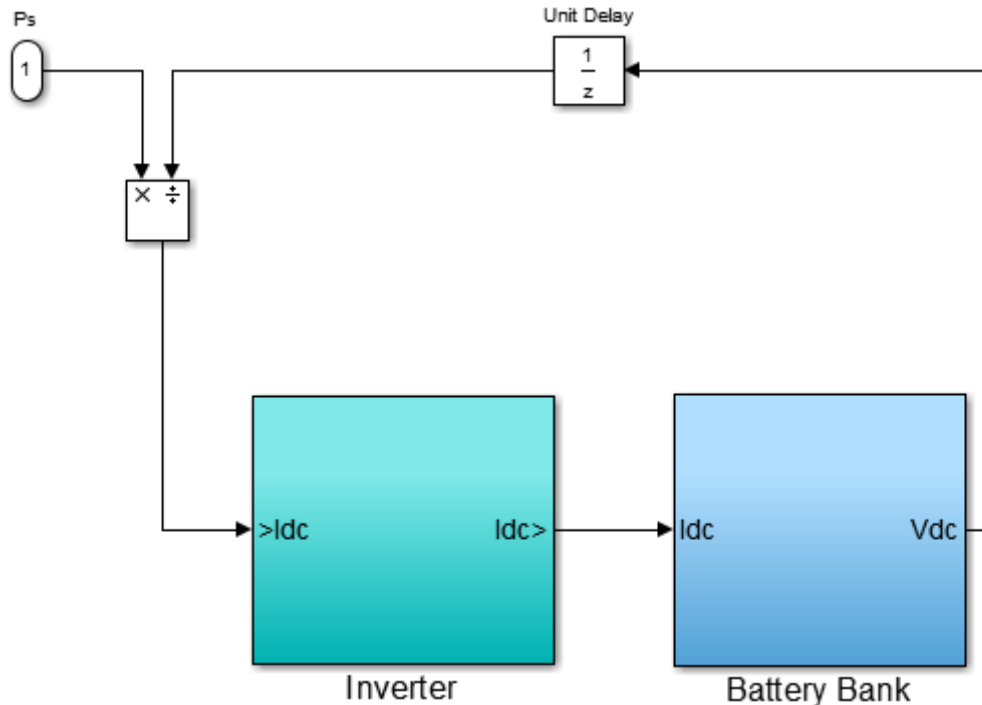
Σχήμα 5.14 Περιεχόμενα του block 'Meter'

Το μιγαδικό AC σήμα της τάσης και του ρεύματος μετράται από ένα ιδανικό βολτόμετρο και ένα ιδανικό αμπερόμετρο αντίστοιχα. Στη συνέχεια, τα δύο αυτά σήματα διαιρούνται με το  $\sqrt{2}$  και λαμβάνεται το μέτρο τους, προκύπτοντας έτσι η RMS τους τιμή. Η ενεργός/άεργος ισχύς προκύπτει μέσω του block 'active/reactive power phasor type' που μπορεί να αναζητηθεί στη βιβλιοθήκη 'Simscape' του Simulink.

#### 5.4.5 Αποθηκευτικό σύστημα ('Battery-Inverter' block)

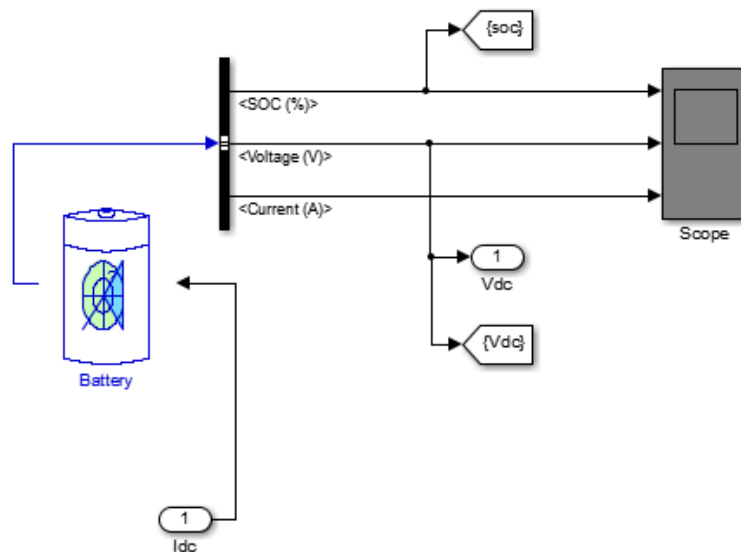
Η μοντελοποίηση του συνολικού αποθηκευτικού συστήματος προϋποθέτει τη μοντελοποίηση των επιμέρους συστατικών του. Το 'Battery-Inverter' block του σχήματος 5.11 αποτελείται από το 'Battery' block και το 'Inverter' block, τα οποία προσομοιώνουν τη λειτουργία της συστοιχίας των μπαταριών και του αντιστροφέα αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.15.

Αρχικά, μέσω της μονάδας ελέγχου προκαθορίζεται η τιμή της ισχύος  $P_s$  που θα διατεθεί ή θα απορροφηθεί από το αποθηκευτικό σύστημα σύμφωνα με την αντίστοιχη, στο κάθε βήμα προσομοίωσης, παραγωγή και ζήτηση του νοικοκυριού και τη στρατηγική ελέγχου που ακολουθείται.



**Σχήμα 5.15** Περιεχόμενα του block ‘Battery-Inverter’

Στη συνέχεια, το set point της ισχύος  $P_s$  διαιρείται από τη τερματική τάση της μπαταρίας  $V_{DC}$  διαμορφώνοντας το ρεύμα φόρτισης ή αποφόρτισης  $I_{DC}$ , το οποίο ελέγχεται πρωτίστως από τον αντιστροφέα και τη προσομοιωμένη λειτουργία του μέσω του ‘Inverter’ block. Το block ‘Unit delay’ καθυστερεί το σήμα της τάσης, για ένα βήμα προσομοίωσης, αντιμετωπίζοντας έτσι τα σφάλματα που προκύπτουν στο Simulink (algebraic loop errors) σε μοντελοποιήσεις κλειστών βρόγχων.

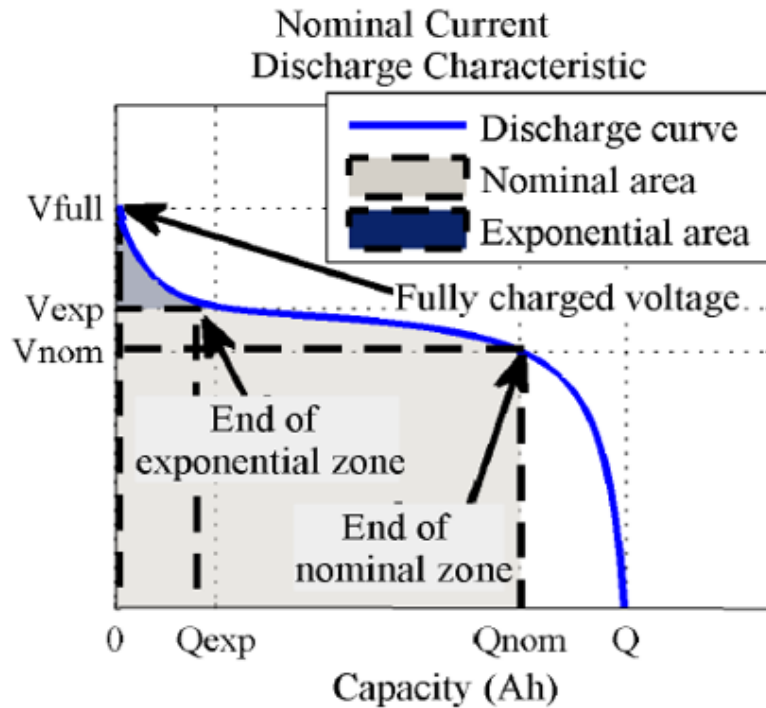


Σχήμα 5.16 Περιεχόμενα του block 'Battery Bank'

#### 5.4.6 Μοντελοποίηση συστοιχίας μπαταριών (block 'Battery')

Στο σχήμα 5.16 εικονίζονται τα περιεχόμενα του block 'Battery Bank'. Όπως παρατηρείται, για τη μοντελοποίηση των μπαταριών χρησιμοποιήθηκε το block 'Battery' της βιβλιοθήκης 'Simscape'. Το block αυτό μπορεί να προσομοιώσει τη λειτουργία διαφόρων τύπων επαναφορτιζόμενων μπαταριών μέσω ενός παραμετροποιήσιμου δυναμικού μοντέλου. Το block δέχεται σαν είσοδο το σήμα του ρεύματος φόρτισης/αποφόρτισης και εμφανίζει σαν έξοδο την κατάσταση φόρτισης αλλά και την αντίστοιχη θερμοκρασιακή τάση της μπαταρίας σε κάθε βήμα προσομοίωσης.

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύσσεται περιγράφει την ηλεκτροχημική συμπεριφορά της μπαταρίας μέσω της θερμοκρασιακής τάσης  $V_{DC}$  συναρτήσει της στάθμης φόρτισης (SOC) λαμβάνοντας υπόψη τη τάση ανοιχτοκύκλωσης (OCV), την εσωτερική της αντίσταση καθώς επίσης και το ρεύμα αποφόρτισης στη βάση μιας μη-γραμμικής συνάρτησης που συσχετίζει το ρεύμα αποφόρτισης με τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια του συσσωρευτή. Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζεται μία τυπική καμπύλη αποφόρτισης, στην οποία διακρίνονται τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή περιγράφει την εκθετική πτώση της τάσης όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη. Αυτή η περιοχή είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη ανάλογα με τον τύπο μπαταριών που προσεγγίζεται. Η επόμενη περιοχή εκφράζει την χωρητικότητα που εξάγεται από την μπαταρία έως ότου η τάση πέσει κάτω από την ονομαστική της τιμή. Τέλος, η τρίτη περιοχή περιγράφει την απότομη πτώση τάσης κατά την πλήρη εκφόρτιση της.



**Σχήμα 5.17** Τυπική καμπύλη αποφόρτισης

Οι τιμές που λαμβάνει η τερματική τάση στις παραπάνω περιοχές περιγράφονται από τις εξισώσεις (5.17), (5.18) και (5.19). Στη παρούσα μελέτη εξετάζεται ο τύπος μπαταριών μολύβδου-οξέος, συνεπώς οι επόμενες εξισώσεις προσομοιώνουν τη λειτουργική συμπεριφορά του προαναφερθέντος τύπου μπαταριών και μόνο.

Αποφόρτιση

$$V_{DC} = E_0 - R * i - K \frac{Q}{Q - it} it - K \frac{Q}{Q - it} i^* + Exp(t) \quad (5.17)$$

Φόρτιση

$$V_{DC} = E_0 - R * i - K \frac{Q}{Q - it} it - K \frac{Q}{it - 0.1Q} i^* + Exp(t) \quad (5.18)$$

Όπου,

$V_{DC}$  η τερματική τάση της μπαταρίας (V)

$E_0$  η σταθερή τάση της μπαταρίας (V)

$K$	η πόλωση της τάσης (V/(Ah))
$Q$	η χωρητικότητα των μπαταριών (Ah)
$it$	η συνολική χωρητικότητα φόρτισης/αποφόρτισης που εξάγεται από τη μπαταρία (Ah) ( $it = \int idt$ )
$i$	το ρεύμα που διαρρέει τη μπαταρία (A)
$i^*$	το ρεύμα από την έξοδο του φίλτρου (A) (δυναμικές μεταβολές χαμηλής συχνότητας)
$R$	η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας ( $\Omega$ )

Η δυναμικές μεταβολές της τερματικής τάσης εξαιτίας του ρεύματος και της μεταβαλλόμενης τάσης ανοιχτοκύκλωσης περιγράφονται από τη λεγόμενη πόλωση τάσης (polarization voltage), η οποία αποτελεί συνάρτηση του SOC και τη λεγόμενη πόλωση αντίστασης (polarization resistance) [50]. Ο όρος  $K \frac{Q}{Q-it} it$  εκφράζει τη πόλωση τάσης και ο όρος  $K \frac{Q}{Q-it} i^*$  τη πόλωση αντίστασης. Η συνάρτηση μεταφοράς  $Exp(t)$  εκφράζει την εκθετική ζώνη του σχήματος 5.17 αλλά και το φαινόμενο υστέρησης που αναπτύσσεται στη περιοχή αυτή στη διάρκεια των κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης και περιγράφεται από το δυναμικό μη-γραμμικό σύστημα της εξίσωσης (5.19). Η εκθετική τάση αυξάνει όσο η μπαταρία φορτίζεται, χωρίς να επηρεάζεται από το SOC. Όταν η μπαταρία αποφορτίζεται, η εκθετική τάση μειώνεται αμέσως, σχήμα 5.18.

$$Exp(t) = B * |i(t)| * (-Exp(t) + Au(t)) \quad (5.19)$$

Όπου,

$Exp(t)$  η τάση στην εκθετική ζώνη (V)

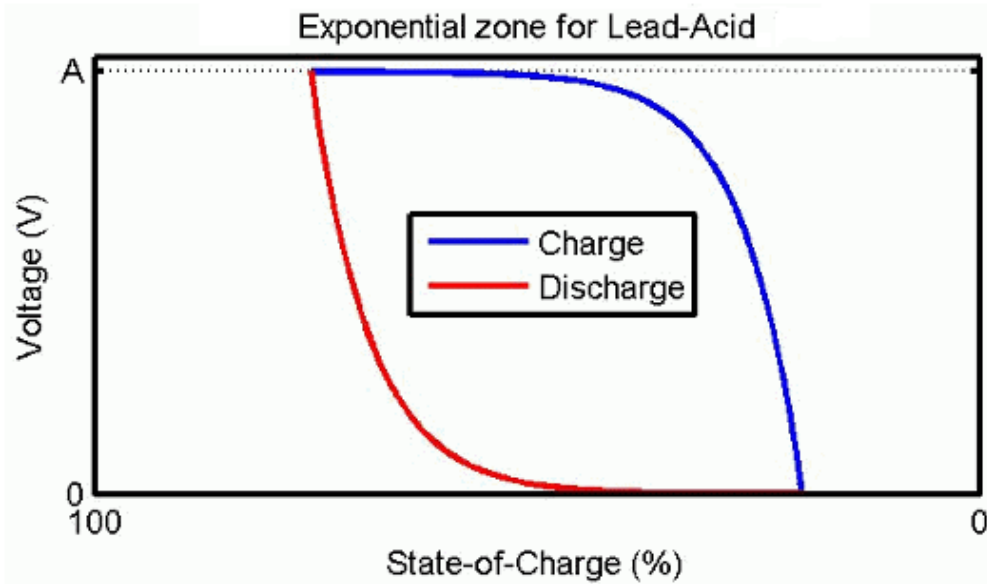
$i(t)$  το ρεύμα που διαρρέει τη μπαταρία (A)

$u(t)$  η διαδικασία φόρτισης ( $u(t) = 1$ ) ή η διαδικασία αποφόρτισης ( $u(t) = 0$ )

$A$  το εκθετικό εύρος ζώνης (V)

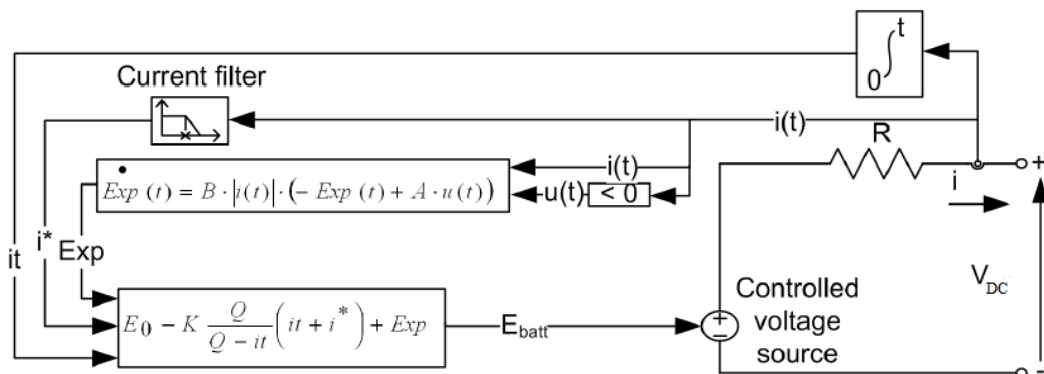
$B$  η εκθετική αντίστροφη χρονική σταθερά (Ah)<sup>-1</sup>





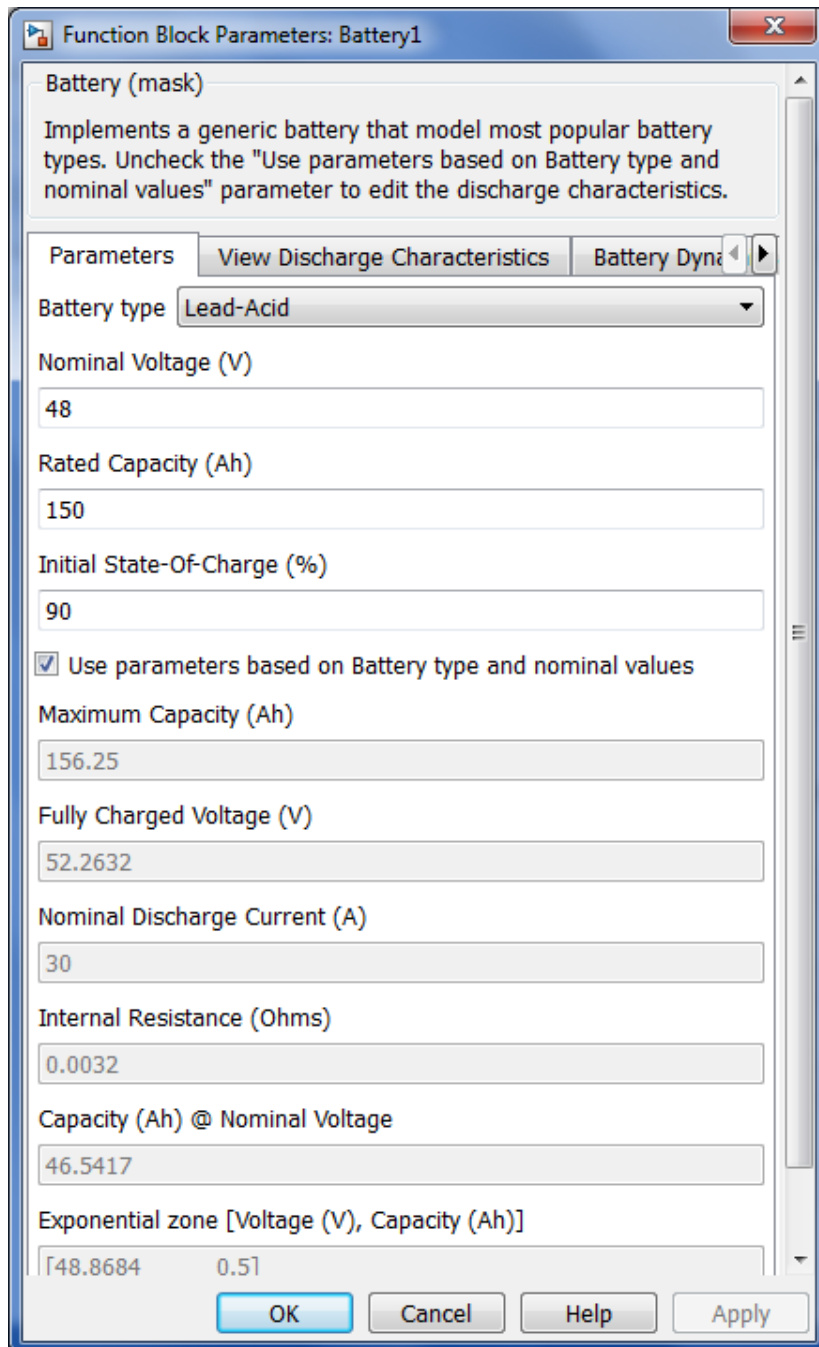
**Σχήμα 5.18** Φαινόμενο υστέρησης στην εκθετική περιοχή για μπαταρίες τύπου μολύβδου-οξέος

Στο σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των εξισώσεων του μοντέλου προσομοίωσης της μπαταρίας για τον τύπο μολύβδου-οξέος που επιλέχθηκε και για τη διαδικασία της αποφόρτισης.



**Σχήμα 5.19** Μοντέλο μπαταρίας μολύβδου-οξέος (περιεχόμενα του block 'Battery')

Τελικά, στο block 'Battery' εισάγονται οι τιμές της ονομαστικής τάσης των μπαταριών, της ονομαστικής χωρητικότητας και της αρχικής κατάστασης φόρτισης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και το block υπολογίζει τις απαιτούμενες για τη μοντελοποίηση παραμέτρους του σχήματος 5.17. Στο σχήμα 5.20 παρουσιάζεται το παράθυρο διαλόγου του block και οι αυτόματα υπολογιζόμενες τιμές των παραμέτρων μίας μπαταρίας ονομαστικής χωρητικότητας 150 Ah ( $Q_{rated}$ ) σε ρυθμό εκφόρτισης C/5 (30 A), ονομαστικής τάσης 48 V ( $V_{nom}$ ) και αρχικής κατάστασης φόρτισης 90% (Initial State-of-charge).



**Σχήμα 5.20** Παράθυρο διαλόγου του block ‘Battery’

Αφού λοιπόν επιλεγθεί ο τύπος της μπαταρίας (μολύβδου-οξέος) και εισαχθούν οι ονομαστικές τιμές της τάσης και της χωρητικότητας της ( $V_{nom}$ ,  $Q_{rated}$ ) υπολογίζονται οι παρακάτω παράμετροι του μοντέλου προσομοίωσης της μπαταρίας, όπως φαίνονται και στο σχήμα 5.17 και 5.20:

$Q_{max}$  η μέγιστη θεωρητική χωρητικότητα της μπαταρίας (Ah) ( $= 105\% * Q_{rated}$ )

$V_{full}$  η τάση της μπαταρίας όταν έχει φορτιστεί πλήρως για δεδομένο ρεύμα αποφόρτισης (V)

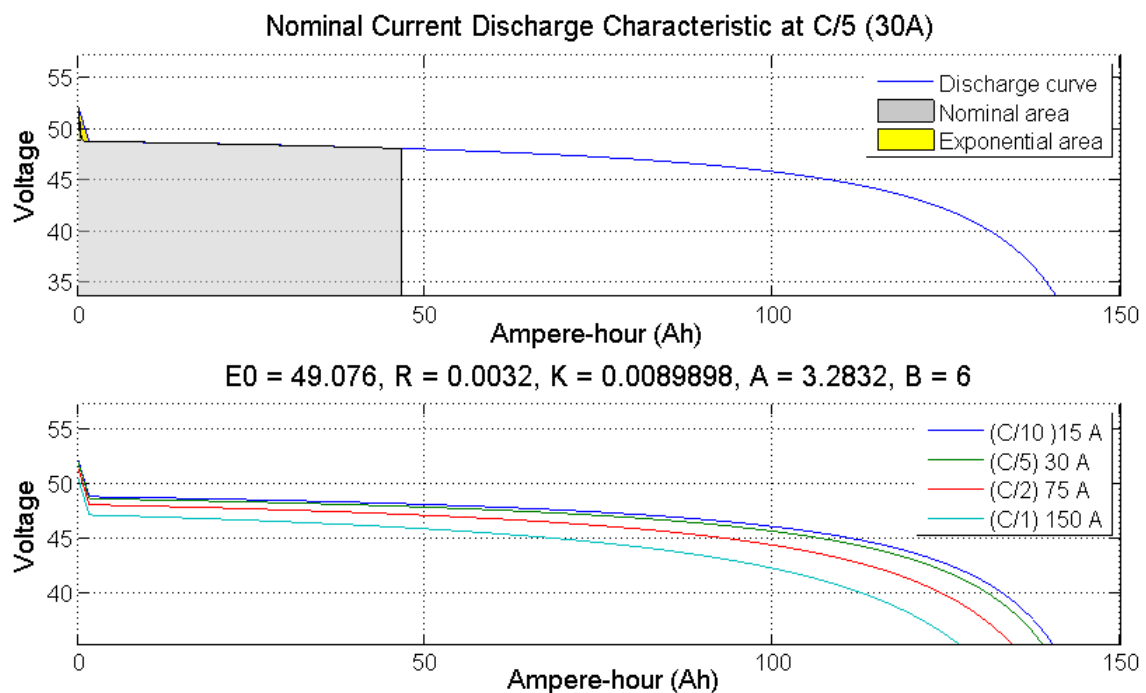
$I_{nom}$  το ονομαστικό ρεύμα αποφόρτισης (A) (το block υπολογίζει τη καμπύλη αποφόρτισης με βάση τον ονομαστικό ρυθμό αποφόρτισης C/5)

$R$  η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας ( $\Omega$ ), της οποίας η τιμή αντιστοιχεί στο 1% τη ονομαστικής ισχύος ( $V_{nom} * Q_{rated}$ ). Η τιμή της θεωρείται σταθερή στη διάρκεια των κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης και δεν μεταβάλλεται με το πλάτος του ρεύματος

$Q_{nom}$  η χωρητικότητα που εξάγεται από τη μπαταρία μέχρις ότου η τάση της μπαταρίας να πέσει κάτω από την ονομαστική της τιμή. Η τιμή αυτής της χωρητικότητας βρίσκεται ανάμεσα από τη  $Q_{exp}$  και τη  $Q_{max}$

$V_{exp}$  η εκθετική τάση που αντιστοιχεί στο τέλος της εκθετικής περιοχής. Η τιμή της βρίσκεται ανάμεσα από τη  $V_{nom}$  και τη  $V_{full}$

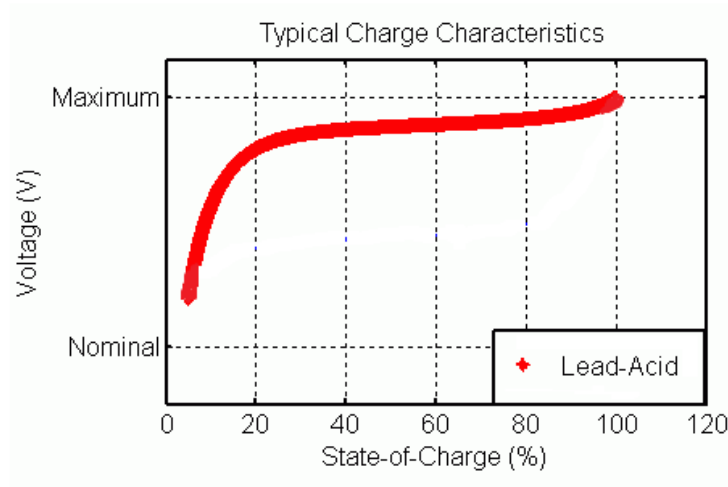
$Q_{exp}$  η εκθετική χωρητικότητα που αντιστοιχεί στο τέλος της εκθετικής περιοχής. Η τιμή της βρίσκεται ανάμεσα από το 0 και τη  $Q_{nom}$



**Σχήμα 5.21** Οι χαρακτηριστικές ρευμάτων αποφόρτισης διαφόρων ρυθμών και οι παράμετροι του μοντέλου μπαταρίας με ονομαστική χωρητικότητα και τάση 150 Ah και 48 V αντίστοιχα

Στο σχήμα 5.21 απεικονίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη αποφόρτισης της μπαταρίας 48V/150Ah η οποία αντιστοιχεί στον ονομαστικό ρυθμό αποφόρτισης (C/5). Διαχωρίζεται η εκθετική περιοχή από την ονομαστική περιοχή και παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου. Αξίζει να σημειωθεί πως οι παράμετροι του μοντέλου προκύπτουν από τη χαρακτηριστική καμπύλη αποφόρτισης στο ονομαστικό ρεύμα (C/5) και θεωρούνται ίδιες και για τη διαδικασία της φόρτισης.

Στο σχήμα 5.22 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη φόρτισης για τον επιλεγμένο τύπο μπαταριών.



**Σχήμα 5.22** Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος φόρτισης για τον τύπο μπαταριών μολύβδου-οξέος

Η κατάσταση φόρτισης (SOC) υπολογίζεται σε κάθε βήμα προσομοίωσης μέσω της εξίσωσης (5.20) ως εξής:

$$SOC = 100\left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt\right) \quad (5.20)$$

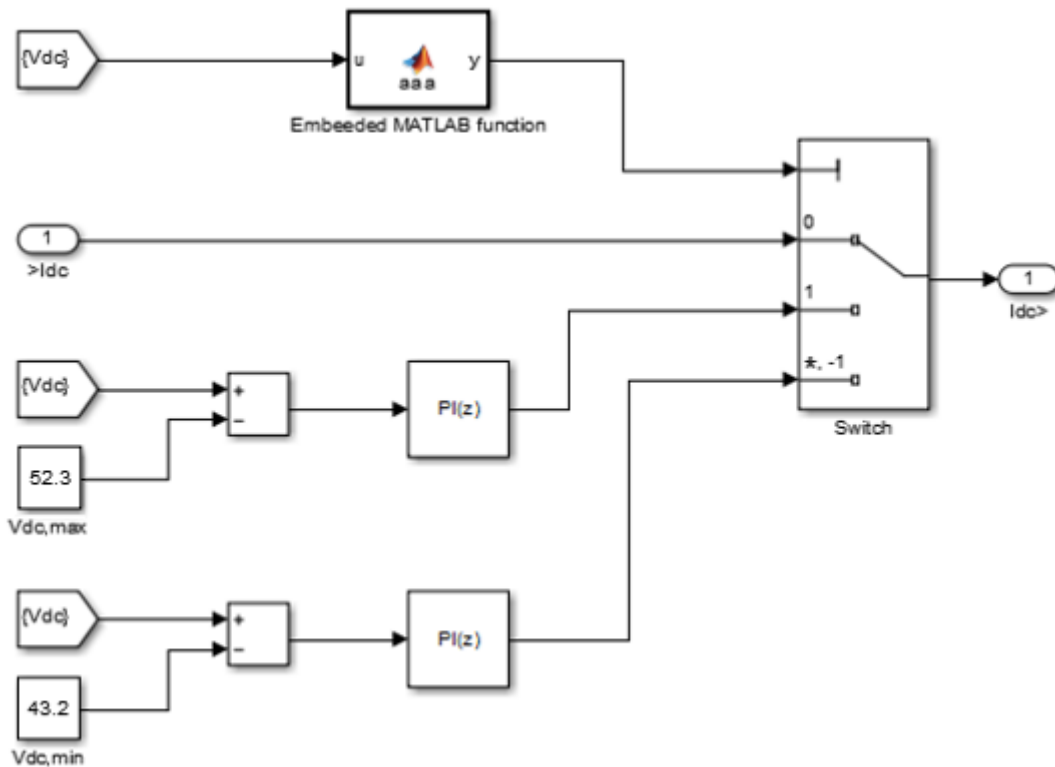
Οι τιμές που λαμβάνει μεταβάλλονται στο διάστημα από 0 έως και 100 %, θεωρώντας τη μπαταρία πλήρως φορτισμένη στο 100% και τελείως άδεια στο 0%. Ωστόσο, στη παρούσα μοντελοποίηση το τέλος της φόρτισης/αποφόρτισης θα πραγματοποιείται σε  $SOC_{max}$  90% και  $SOC_{min}$  20% αντίστοιχα.

#### Όρια και υποθέσεις

- Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας θεωρείται σταθερή στη διάρκεια των κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης και δεν μεταβάλλεται με το πλάτος του ρεύματος
- Η χωρητικότητα της μπαταρίας δεν μεταβάλλεται με το πλάτος του ρεύματος (δεν ισχύει το φαινόμενο Peukert)
- Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία και την αυτό-εκφόρτιση της μπαταρίας
- Η ελάχιστη χωρίς φορτίο τάση της μπαταρίας είναι μηδέν Volts και η μέγιστη τάση της ισούται με  $2 * E_0$
- Η ελάχιστη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 0 Ah και η μέγιστη είναι  $Q_{max}$

### 5.4.7 Λειτουργία αντιστροφέα (block ‘Inverter’)

Το block ‘Inverter’ του σχήματος 5.15 προσομοιώνει τη λειτουργία του αντιστροφέα και ελέγχει το ρεύμα εισόδου/εξόδου της μπαταρίας  $I_{DC}$  μέσω δύο ελεγκτών. Τα περιεχόμενα του block παρουσιάζονται στο σχήμα 5.23.



Σχήμα 5.23 Περιεχόμενα του block ‘Inverter’

Οι ελεγκτές του σχήματος 5.23 δέχονται σαν είσοδο τη τερματική τάση της μπαταρίας  $V_{DC}$  και υπολογίζουν για κάθε χρονική στιγμή τους κλάδους της σχέσης (5.21), δίνοντας τους ως είσοδο σε ένα διακόπτη ‘switch’ ως εξής:

$$I_{DC} = \begin{cases} k(V_{DC} - V_{DC,min}), & V_{DC} \leq V_{DC,min} \\ I_{DC}, & V_{DC,min} < V_{DC} \leq V_{DC,max} \\ k(V_{DC} - V_{DC,max}), & V_{DC} > V_{DC,max} \end{cases} \quad (5.21)$$

Όπου,

$V_{DC}$  η τερματική τάση της μπαταρίας

$V_{DC,max}$  η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση της μπαταρίας (τέλος φόρτισης)

$V_{DC,min}$  η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση της μπαταρίας (τέλος αποφόρτισης)

Το block ‘Embedded MATLAB function’ αποφασίζει με βάση το διάστημα στο οποίο ανήκει η τερματική τάση της μπαταρίας, ποιος κλάδος της συνάρτησης (5.21) αντιστοιχεί στην επιθυμητή έξοδο  $I_{DC}$ , και στέλνει στο διακόπτη το κατάλληλο σήμα, ώστε να γίνει η σωστή επιλογή. Ακολουθεί ο κώδικας στο MATLAB για την υλοποίηση του block αυτού:

```
if (u<=43.2)
    y = -1;
elseif (u>43.2 && u<=52.3)
    y = 0;
else
    y = 1;
end
```

Συνεπώς, αν η τιμή της τερματικής τάσης της μπαταρίας πέσει κάτω από το όριο  $V_{DC,min}$  που έχει θεσπιστεί, ενεργοποιείται ο ελεγκτής ο οποίος διατηρεί σταθερή την τιμή της τάσης  $V_{DC}$ , περιορίζοντας το ρεύμα αποφόρτισης και άρα της ισχύος εξόδου του αποθηκευτικού συστήματος. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει ο PI ελεγκτής (PI controller), η έξοδος του οποίου είναι ουσιαστικά ο παράγοντας  $k$  του τύπου (5.21). Αντίστοιχα, όταν η τερματική τάση της μπαταρίας λάβει μεγαλύτερη τιμή από την οριακή τιμή της  $V_{DC,max}$ , ο PI ελεγκτής διατηρεί ξανά σταθερή τη τερματική τάση των μπαταριών, μειώνοντας το ρεύμα φόρτισης και συνεπώς την ισχύ που εγχέεται στη μπαταρία. Διαφορετικά όταν η τάση της μπαταρίας βρίσκεται στο διάστημα εντός των ορίων το ρεύμα φόρτισης/αποφόρτισης δεν μεταβάλλεται και οι ελεγκτές παραμένουν σε αδράνεια.

#### 5.4.8 Μονάδα ελέγχου (‘Control Unit’ block)

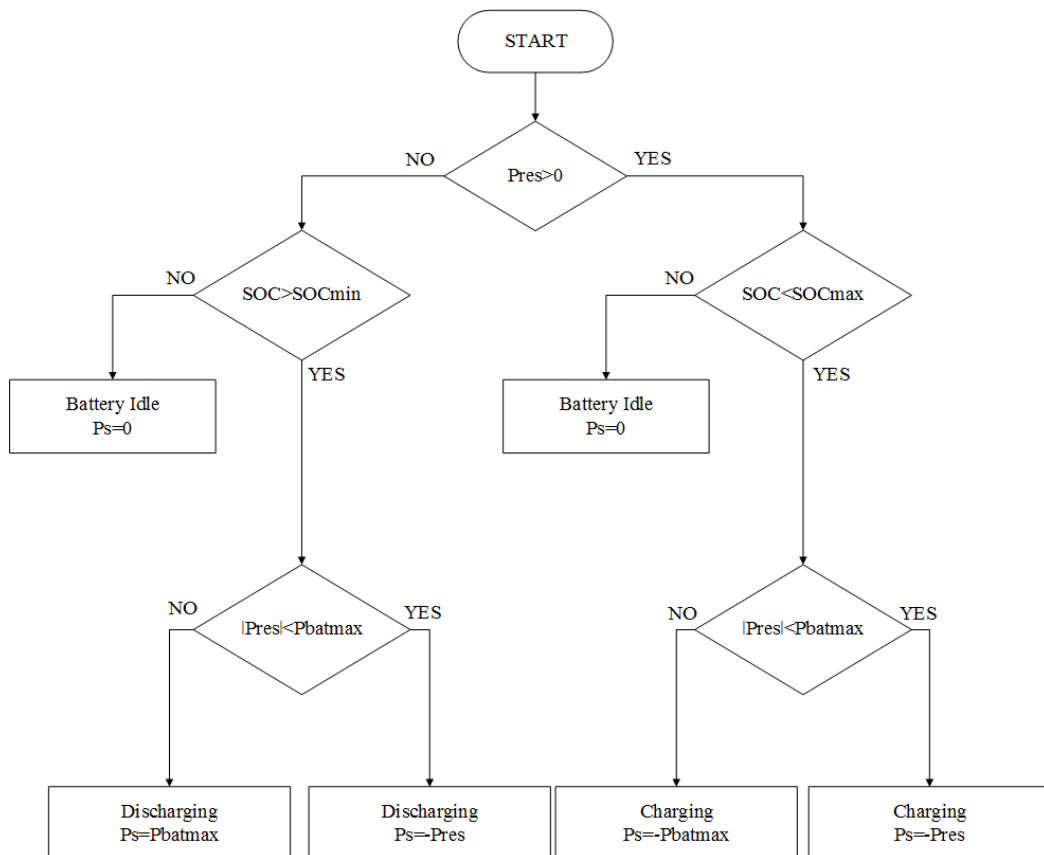
Η μονάδα ελέγχου, της οποίας η λειτουργία μοντελοποιείται μέσω του block ‘Control Unit’ του σχήματος 5.11, είναι υπεύθυνη για την υλοποίηση των στρατηγικών ελέγχου της μπαταρίας και τον καθορισμό του set point της ισχύος  $P_s$  που θα διατεθεί για την φόρτιση ή την αποφόρτιση της αντίστοιχα.

Στη παρούσα μελέτη θα παρουσιαστούν και θα συγκριθούν δύο διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου του αποθηκευτικού συστήματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1. Η λειτουργία της συμβατικής στρατηγικής (conventional storage strategy) δίνει προτεραιότητα στην άμεση φόρτιση της μπαταρίας από τη στιγμή που υπάρχει διαθέσιμη περίσσεια παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια, αυξάνοντας την ιδιοκατανάλωση και αποτρέποντας την επιστροφή ισχύος στο δίκτυο XT. Ωστόσο, μειονέκτημα αυτής της στρατηγικής αποτελεί το γεγονός ότι η μπαταρία θα έχει πιθανότατα φορτιστεί πλήρως ήδη από τις πρωινές ώρες (ειδικά τις μέρες με υψηλή

ηλιοφάνεια) υποχρεώνοντας τον καταναλωτή να εφαρμόσει περικοπή της ενεργού ισχύος (German act) τις ώρες όπου μεγιστοποιείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή (μεσημεριανές ώρες). Αντίθετα, στη προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου (proposed storage strategy) η διαδικασία της φόρτισης ξεκινά από τη στιγμή όπου η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύς ξεπεράσει το κατώφλι ισχύος  $P_{thr}$ , του οποίου η τιμή καθορίζεται με βάση το German act και αντιστοιχεί στο 70% της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος. Με αυτό τον τρόπο ο ιδιοκτήτης του φωτοβολταϊκού συστήματος εκμεταλλεύεται όλη τη διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή και κατά συνέπεια αποφεύγεται η περικοπή της ενεργού ισχύος και οι απώλειες ενέργειας που συνεπάγονται.

### Συμβατική στρατηγική ελέγχου (Conventional storage strategy)

Ο αλγόριθμος που υλοποιεί τη συμβατική στρατηγική ελέγχου της μπαταρίας παρουσιάζεται στο σχήμα 5.24. Ο αλγόριθμος διαχειρίζεται το ποσό της ισχύος που προκύπτει, σε κάθε βήμα προσομοίωσης, με τη βοήθεια της μεταβλητής  $P_{RES}$ . Μέσω της μεταβλητής αυτής, η οποία εκφράζει τη διαφορά της απαιτούμενης ισχύος του φορτίου από την παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύ (σχέση 5.10), καθορίζεται το set point της ισχύος  $P_s$  που θα διατεθεί ή θα απορροφηθεί από τη μπαταρία λαμβάνοντας υπόψη τη κατάσταση φόρτισης (SOC) και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ φόρτισης/αποφόρτισης  $P_{batmax}$ .

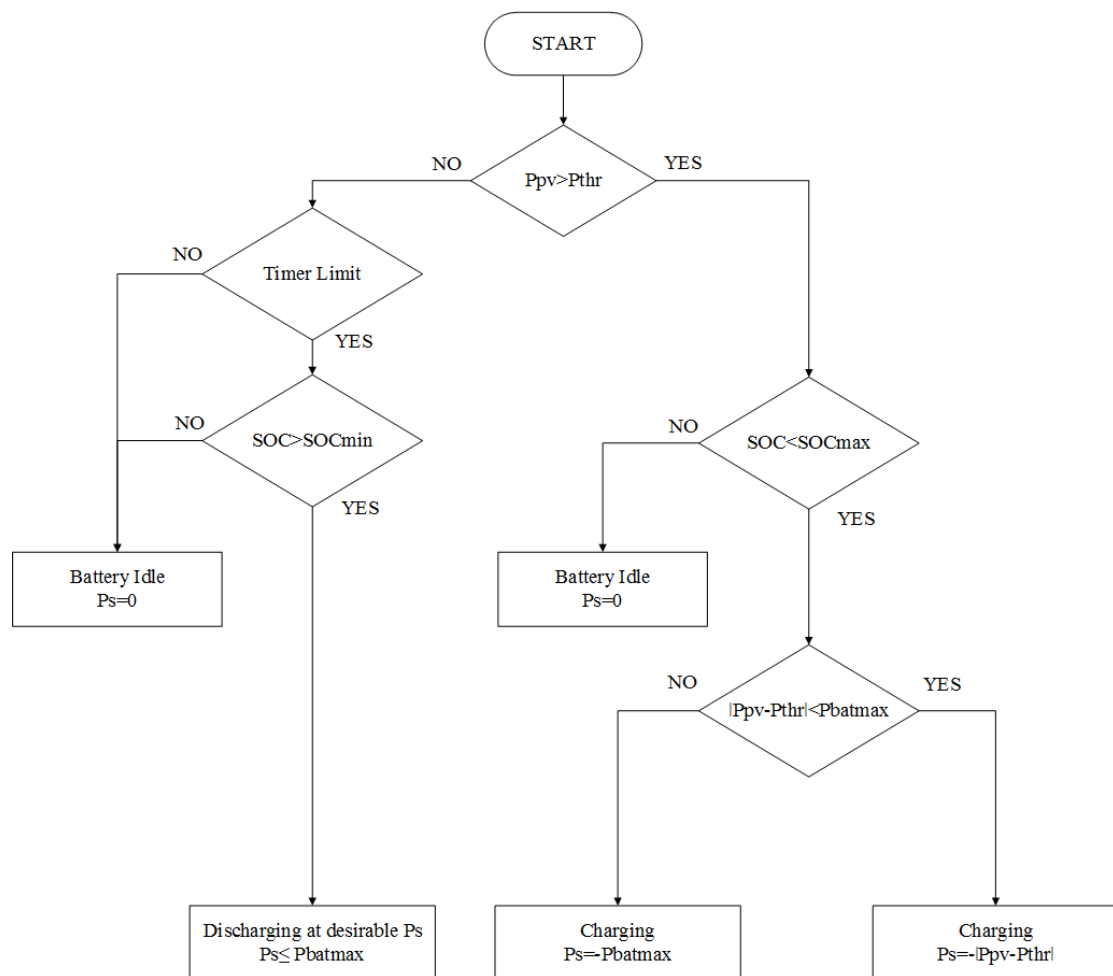


Σχήμα 5.23 Αλγόριθμος συμβατικής στρατηγικής ελέγχου της μπαταρίας

Πιο αναλυτικά, ο αλγόριθμος αρχικά δίνει προτεραιότητα στην τροφοδοσία των ηλεκτρικών φορτίων. Στη συνέχεια, αν υπάρχει περίσσεια παραγόμενη ισχύς ( $P_{res} > 0$ ) και η κατάσταση φόρτισης το επιτρέπει ( $SOC < SOC_{max}$ ), η μπαταρία φορτίζεται από την περίσσεια παραγόμενη ισχύ τηρώντας το όριο της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος φόρτισης/αποφόρτισης  $P_{batmax}$ . Αντίστοιχα, αν οι απαιτήσεις του φορτίου ξεπερνούν την διαθέσιμη φωτοβολταϊκή ισχύ ( $P_{res} < 0$ ), αφού ελεγχθεί η κατάσταση φόρτισης ( $SOC > SOC_{min}$ ) και το αντίστοιχο όριο της μέγιστης ισχύος φόρτισης/αποφόρτισης, ξεκινά η αποφόρτιση της μπαταρίας.

### Προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου (Proposed storage strategy)

Για να μειωθούν τα προφίλ των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης σε περιόδους υψηλής φωτοβολταϊκής διείσδυσης, το αποθηκευτικό σύστημα σε κάθε σπίτι θα πρέπει να φορτίζεται σε εκείνο το χρονικό διάστημα της ημέρας όπου μεγιστοποιείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1. Ο αλγόριθμος που υλοποιεί τη προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου της μπαταρίας παρουσιάζεται στο σχήμα 5.24.



Σχήμα 5.24 Αλγόριθμος προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου της μπαταρίας



Σε αυτή τη περίπτωση, αφού τροφοδοτηθούν και πάλι τα φορτία (τηρώντας τη διαδικασία της ιδιοκατανάλωσης), η φόρτιση δεν ξεκινά αμέσως αλλά μόνο από τη στιγμή που η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύ ξεπεράσει το κατώφλι της ισχύος  $P_{thr}$  και το οποίο αντιστοιχεί στο 70% της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος. Αν λοιπόν η κατάσταση φόρτισης το επιτρέπει (διαφορετικά το αποθηκευτικό σύστημα παραμένει σε αδράνεια), η μπαταρία φορτίζεται και το set point της ισχύος που θα διατεθεί στη μπαταρία λαμβάνει την τιμή  $P_s = P_{pv} - P_{thr}$ , ελέγχοντας πρωτίστως αν η τιμή αυτή ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ φόρτισης/αποφόρτισης  $P_{batmax}$ . Όσον αφορά τη διαδικασία της αποφόρτισης, στη προκειμένη περίπτωση ο αλγόριθμος επιτρέπει στον ιδιοκτήτη του συστήματος να επιλέξει το χρονικό όριο κατά το οποίο επιθυμεί να ξεκινήσει την εκφόρτιση της μπαταρίας (για παράδειγμα κατά τη δύση του ηλίου), καθώς επίσης και το set point της ισχύος που θα της δοθεί με σεβασμό πάντα το όριο της μέγιστης ισχύος φόρτισης/αποφόρτισης.

Σε κάθε περίπτωση, ο ιδιοκτήτης του συστήματος μπορεί να επιλέγει κάθε φορά ποια από τις δύο στρατηγικές να ακολουθήσει επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα την αύξηση της ιδιοκατανάλωσης αλλά και τη στήριξη της τάσης, έχοντας στη διάθεση του προβλέψεις της ηλιοφάνειας και του φορτίου για την επόμενη μέρα.

## 5.5 Έλεγχος και λειτουργία

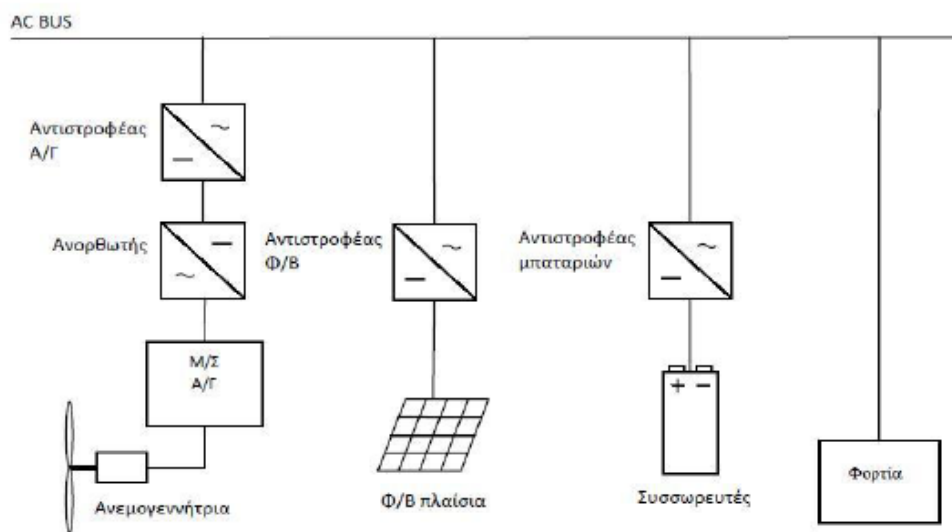
Στη παρούσα ενότητα, και προτού παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων, θα πραγματοποιηθούν κάποια ενδεικτικά πειράματα στο συνολικό αποθηκευτικό σύστημα της μοντελοποίησης (συστοιχία μπαταριών/αντιστροφέα) αναλύοντας έτσι και ελέγχοντας τη λειτουργική του συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν στο εργαστηριακό μικροδίκτυο της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

### 5.5.1 Εργαστηριακό μικροδίκτυο

Το μικροδίκτυο του εργαστηρίου ηλεκτρικών μετρήσεων της σχολής έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί τόσο ως σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παρέχεται στο κεντρικό δίκτυο, όσο και ως αυτόνομο σύστημα ικανό να καλύψει ζήτηση ισχύος 3,3 KVA και αιχμής 4,3 KVA. Το μικροδίκτυο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος 1,1 KWp, αντιστροφέα DC/AC για τα φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια ισχύος 850 W με τον αντιστροφέα της, συσσωρευτές μολύβδου οξέος 2V/250Ah, πρωτότυπο αντιστροφέα για τους συσσωρευτές, διατάξεις ελέγχου και φορτία.

Κεντρικό συστατικό του μικροδικτύου είναι ο αντιστροφέας των συσσωρευτών. Ο αντιστροφέας μας επιτρέπει να ρυθμίσουμε την τάση και τη συχνότητα, και να

εξασφαλίσουμε ομοιόμορφο διαμοιρασμό της ισχύος στα διάφορα φορτία, όταν βρισκόμαστε σε αυτόνομη λειτουργία. Στην περίπτωση διασυνδεδεμένης λειτουργίας, όπως αυτής που εξετάζεται, το κεντρικό δίκτυο είναι αυτό που καθορίζει την τάση και τη συχνότητα, οπότε ο αντιστροφέας εξασφαλίζει τη σωστή ανταπόκριση του εργαστηριακού μικροδικτύου στις επιθυμητές παραμέτρους. Η παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω των ελεγκτών, που αναπτύσσονται και ενσωματώνονται στους αντιστροφείς, και οι οποίοι μπορούν να ρυθμίσουν την ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο, να ελέγξουν τα χαρακτηριστικά του, και να ανταποκρίνονται ταχύτατα στις ενδεχόμενες μεταβολές διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του συστήματος [51].



**Σχήμα 5.25** Σχηματικό διάγραμμα του εργαστηριακού μικροδικτύου

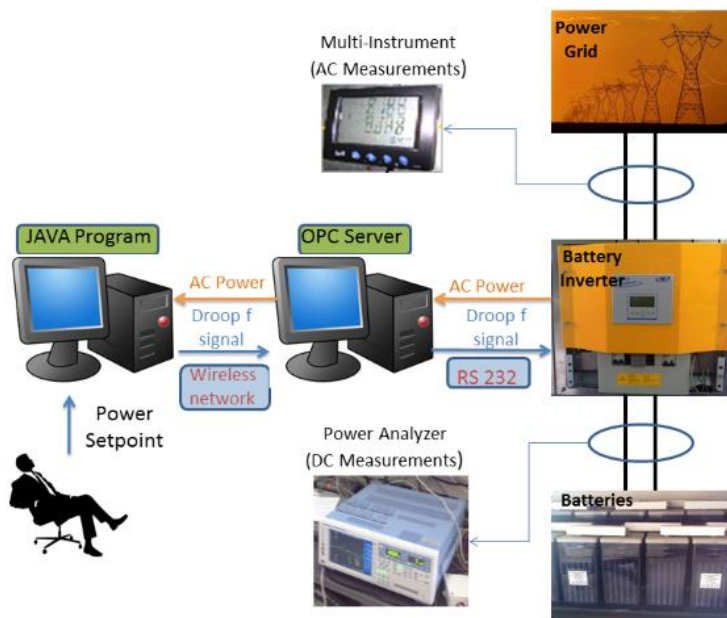
### 5.5.2 Αποθηκευτικό σύστημα/Σύστημα ελέγχου μικροδικτύου

Η συστοιχία των μπαταριών του μικροδικτύου αποτελείται από 30 FLA κελιά των 2V, 250 Ah (C/10), συνδεδεμένα στη σειρά (OpzS-Solar 250 LA). Λόγω του ότι οι μπαταρίας είναι αρκετά παλιές (10 χρόνια) και εξαιτίας της έλλειψης τακτικής συντήρησης αναμένεται να έχουν και μειωμένη επίδοση.



**Σχήμα 5.26** Αποθηκευτικό σύστημα εργαστηριακού μικροδικτύου

Η συστοιχία των μπαταριών ονομαστικής τάσης 60V/250Ah συνδέεται σε ένα μονοφασικό αντιστροφέα μπαταριών (SMA Sunny Island 4500) μέγιστης ισχύος 4.5 kW και 60 V τάσης εισόδου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.26. Όλα τα πειράματα διεξάγονται σε διασυνδεδεμένη λειτουργία με το κεντρικό δίκτυο.



**Σχήμα 5.27** Σύστημα ελέγχου ενεργού ισχύος αποθηκευτικού συστήματος εργαστηριακού μικροδικτύου

Στο σχήμα 5.27 παρουσιάζεται το σύστημα ελέγχου της ενεργού ισχύος του αποθηκευτικού συστήματος. Ο έλεγχος της ενεργού ισχύος πραγματοποιείται μέσω της αλλαγής των χαρακτηριστικών της καμπύλης στατισμού της συχνότητας (droopf) του αντιστροφέα. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της παραπάνω διαδικασίας είναι γραμμένο σε γλώσσα JAVA. Το λογισμικό λαμβάνει το επιθυμητό set point της ισχύος από το χρήστη και μεταβάλλει κατάλληλα την τιμή της ονομαστικής συχνότητας της καμπύλης στατισμού. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται βήμα προς βήμα, που σημαίνει ότι η ισχύς μεταβάλλεται κατά ένα σταθερό βήμα κάθε 5 δευτερόλεπτα. Έτσι προστατεύεται το σύστημα από απότομες μεταβολές της ισχύος καθώς επίσης και από επικείμενα λάθη του λογισμικού. Το χρονικό διάστημα των 5 δευτερολέπτων διασφαλίζει ότι το λογισμικό θα προλάβει να υπολογίσει το σήμα ελέγχου, να το στείλει στον αντιστροφέα μέσω του OPC server και πάλι πίσω στο λογισμικό JAVA, πραγματοποιώντας τη διαδικασία της ανάδρασης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ένα σταθερό σύστημα ελέγχου της ενεργού ισχύος, η οποία όμως δεν παραμένει διαρκώς σταθερή, όπως θα παρουσιαστεί και μέσω των πειραμάτων.

Ο μετρητής της DC ισχύος (Power Analyzer-YOKOGAWA WT3000) που χρησιμοποιείται λαμβάνει τις πειραματικές μετρήσεις από την DC πλευρά του αντιστροφέα, ενώ οι AC μετρήσεις της εξόδου του αντιστροφέα προκύπτουν από το μετρητικό όργανο (multi-instrument DEIF), το οποίο μετρά τάση, ρεύμα,

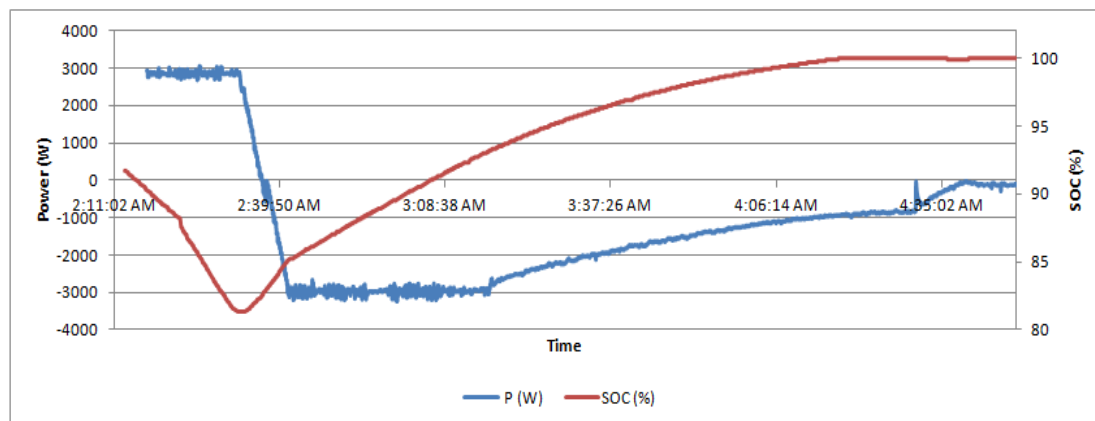
ενεργό/άεργο ισχύ, THD της τάσης και συντελεστή ισχύος. Ακόμη, οι πειραματικές μετρήσεις, ελέγχονται, επεξεργάζονται και αποθηκεύονται από το λογισμικό LabVIEW με δυνατότητα δειγματοληψίας ενός 1 Hz. Τέλος, μετρήσεις λαμβάνονται και από τον αντιστροφέα των μπαταριών, οι οποίες αφορούν το αμιγώς αποθηκευτικό σύστημα (κατάσταση φόρτισης SOC, τύπος φόρτισης, κατάσταση της μπαταρίας κλπ.).

### 5.5.3 Εργαστηριακό πείραμα

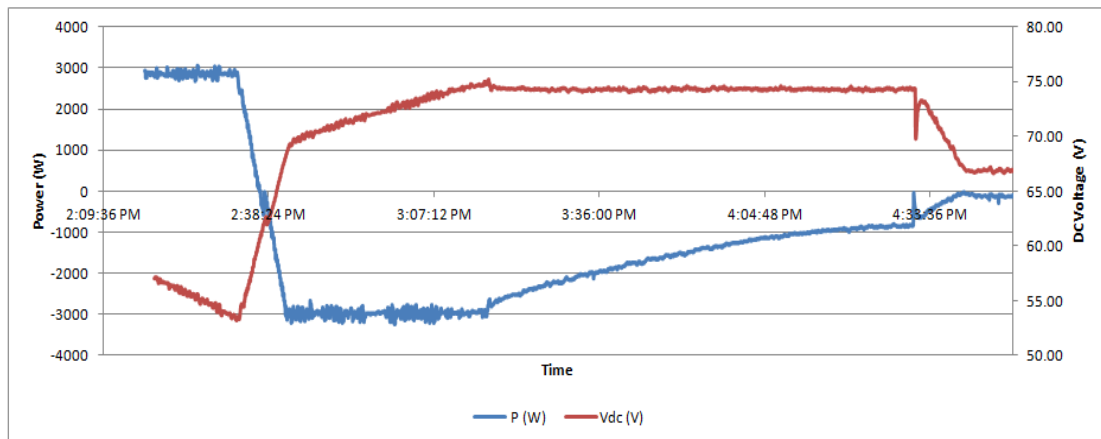
Τα πειράματα που θα πραγματοποιηθούν στη συνέχεια αποδεικνύουν πως το τέλος της φόρτισης/αποφόρτισης των μπαταριών δεν καθορίζεται μόνο από το μέγιστο/ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο της κατάστασης φόρτισης ( $SOC_{max}$ ,  $SOC_{min}$ ) αλλά πρωτίστως από το μέγιστο/ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο της τερματικής τάσης των μπαταριών ( $V_{DC,max}$ ,  $V_{DC,min}$ ). Ο ελεγκτής φόρτισης αποτρέπει την υπέρμετρη υπερφόρτιση της μπαταρίας περιορίζοντας τη ροή ρεύματος από τη συστοιχία στη μπαταρία όταν αυτή φτάνει στην κατάσταση πλήρους φόρτισης. Η ρύθμιση της φόρτισης επιτυγχάνεται συνήθως με τον περιορισμό της τάσης της μπαταρίας σε μια μέγιστη τιμή, που συχνά αναφέρεται ως σημείο ρύθμισης της τάσης (voltage regulation set point – VR) [52].

#### Πείραμα 1

Αρχικά οι μπαταρίες φορτίζονται πλήρως (SOC=92%). Στη συνέχεια αποφορτίζονται στη μέγιστη ισχύ 3 kW έως ότου προκύψει το τέλος αποφόρτισης και ξανά φορτίζονται στη μέγιστη ισχύ (3 kW) ώσπου το SOC λάβει την τιμή 92 %.



**Σχήμα 5.28** Πείραμα 1: Κατάσταση φόρτισης (%) και ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου



**Σχήμα 5.29** Πείραμα 1: DC τάση (V) και ισχύς (Watts) συναρτήσεως του χρόνου

Τα σχήματα 5.28 και 5.29 παρουσιάζουν πως η τερματική τάση των μπαταριών και το SOC μεταβάλλονται με το χρόνο. Η ενεργός ισχύς απεικονίζεται και στα δύο σχήματα με μπλε γραμμή. Οι μπαταρίες αρχικά φορτίστηκαν μέχρι το SOC να λάβει την τιμή 92% και το οποίο θεωρείται το μέγιστο SOC για αυτό το σετ πειραμάτων. Στη συνέχεια, αποφορτίζονται στα 3 kW για περίπου 25 λεπτά όπου ο αντιστροφέας διακόπτει τη φόρτιση τους, θεωρώντας πως είναι άδειες. Η ένδειξη του SOC δεν είναι ο λόγος που διακόπηκε η φόρτιση τους, καθώς στο τέλος της φόρτισης το SOC έλαβε την τιμή 81%. Στην ουσία η φόρτιση διακόπηκε διότι η τερματική τάση των μπαταριών προσέγγισε το ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο της τάσης και του οποίου η τιμή ανέρχεται στα 55 V. Μπορούμε με ασφάλεια λοιπόν να υποθέσουμε πως το τέλος φόρτισης προκύπτει όταν η τάση των μπαταριών πέσει κάτω από το όριο των 55 V. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα γρήγορα όταν οι μπαταρίες αποφορτίζονται σε μεγάλες ισχύς αποτρέποντας την εξαγωγή και συνεπώς την εκμετάλλευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Στη συνέχεια, το σύστημα αλλάζει τη λειτουργία του και φορτίζει τις μπαταρίες στη μέγιστη ισχύ (3 kW). Παρατηρείται πως η διαδικασία της φόρτισης διαρκεί περισσότερο από τη διαδικασία της αποφόρτισης. Στο σχήμα 5.29 παρατηρείται ακόμη πως όταν η τάση των μπαταριών φτάσει το όριο των 75 V (τάση αεριοποίησης 2.5V/cell) η ισχύς φόρτισης περιορίζεται σταδιακά διατηρώντας σταθερή την τάση. Το πείραμα τελειώνει περίπου 90 λεπτά αργότερα όταν το αποθηκευτικό σύστημα αποφασίζει ότι οι μπαταρίες δεν θα φορτιστούν επιπλέον.

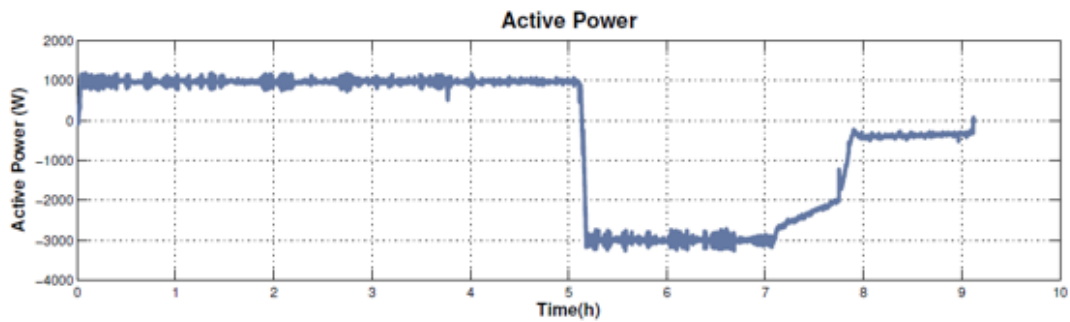
## Πείραμα 2

Υποθέτοντας πως το τέλος φόρτισης πραγματοποιείται όταν η τάση και η ισχύς λάβουν τις τιμές 68 V (VR) και -300 W αντίστοιχα, η αποφόρτιση σταματά όταν προσεγγιστεί το ελάχιστο όριο της τάσης των 55 V. Το δεύτερο πείραμα χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος όπου πραγματοποιούνται συνδυασμοί φορτίσεων/εκφορτίσεων και η μέγιστη ισχύς λαμβάνεται στη διαδικασία της φόρτισης και το δεύτερο όπου η μέγιστη ισχύς λαμβάνεται στη διαδικασία της αποφόρτισης.

### Πρώτο μέρος

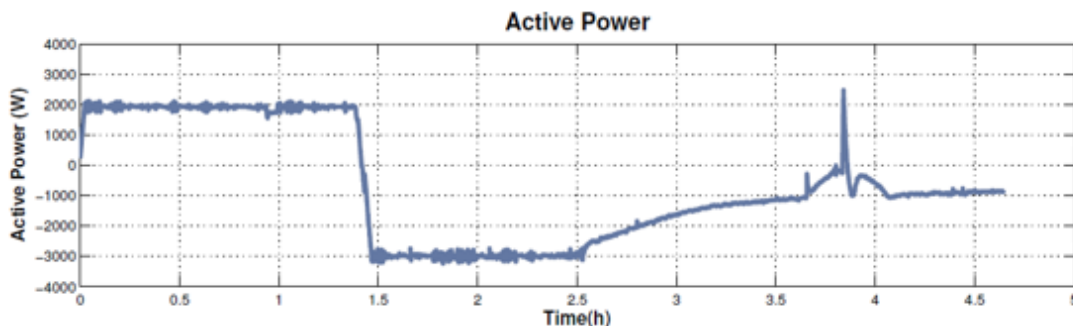
Το πείραμα ξεκινά με τις μπαταρίες πάντα πλήρως φορτισμένες. Στα σχήματα 5.30 έως 5.32 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μέσω της ενεργούς ισχύος (W) συναρτήσει του χρόνου (h). Στο σχήμα 5.30 η αποφόρτιση πραγματοποιείται με ισχύ 1 kW, ενώ στο σχήμα 5.31 και 5.32 η αποφόρτιση πραγματοποιείται με ισχύ 2 και 3 kW αντίστοιχα. Αντίθετα, και στα τρία διαγράμματα η ισχύς φόρτισης διατηρείται σταθερή και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της δηλαδή τα 3 kW.

➤ *Αποφόρτιση με 1 kW, Φόρτιση με 3 kW*



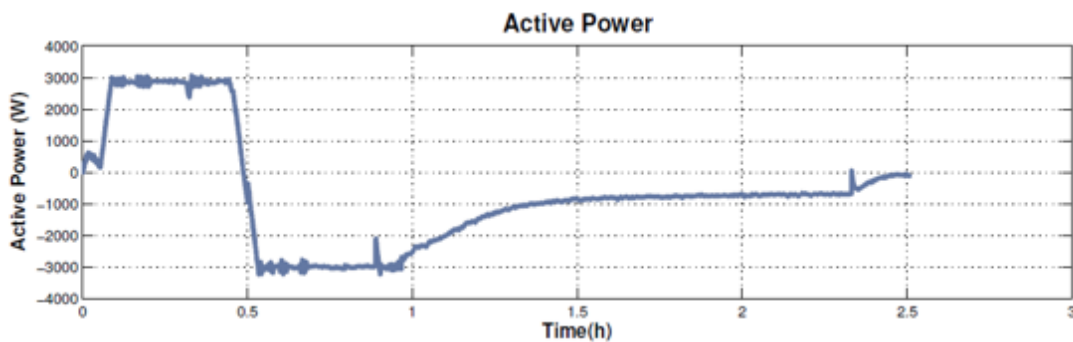
**Σχήμα 5.30** Πείραμα 2 (πρώτο μέρος): Ενεργός ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου

➤ *Αποφόρτιση με 2 kW, Φόρτιση με 3 kW*



**Σχήμα 5.31** Πείραμα 2 (πρώτο μέρος): Ενεργός ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου

➤ *Αποφόρτιση με 3 kW, Φόρτιση με 3 kW*

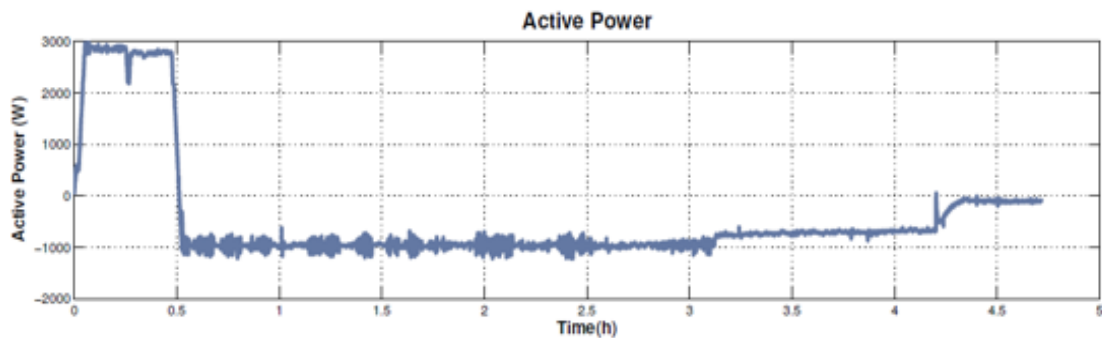


**Σχήμα 5.32** Πείραμα 2 (πρώτο μέρος): Ενεργός ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου

## Δεύτερο μέρος

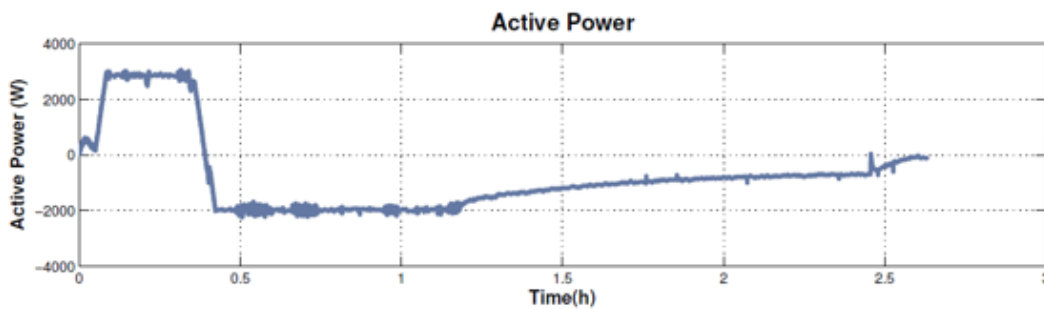
Οι μπαταρίες αρχικά φορτίζονται πλήρως όπως και πριν. Στο δεύτερο μέρος του πειράματος η αποφόρτιση θα πραγματοποιείται στη μέγιστη ισχύ αποφόρτισης και θα ακολουθείται από φορτίσεις διαφόρων ρυθμών. Στα σχήματα 5.33 έως 5.35 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μέσω της ενεργούς ισχύος (W) συναρτήσει του χρόνου (h).

- *Αποφόρτιση με 3 kW, Φόρτιση με 1 kW*



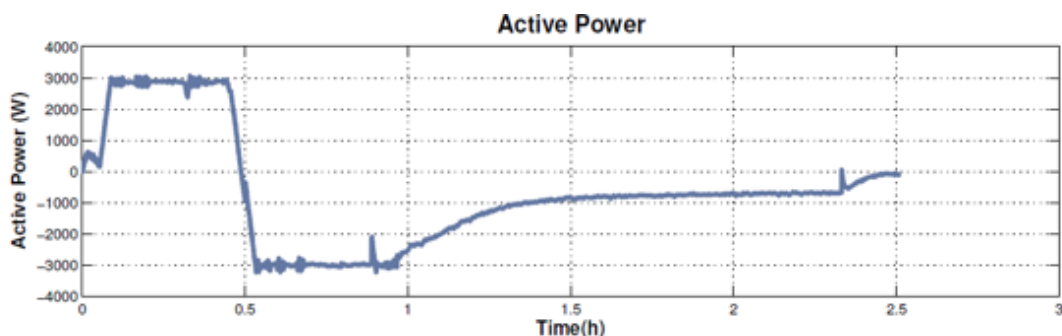
**Σχήμα 5.33** Πείραμα 2 (δεύτερο μέρος): Ενεργός ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου

- *Αποφόρτιση με 3 kW, Φόρτιση με 2 kW*



**Σχήμα 5.34** Πείραμα 2 (δεύτερο μέρος): Ενεργός ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου

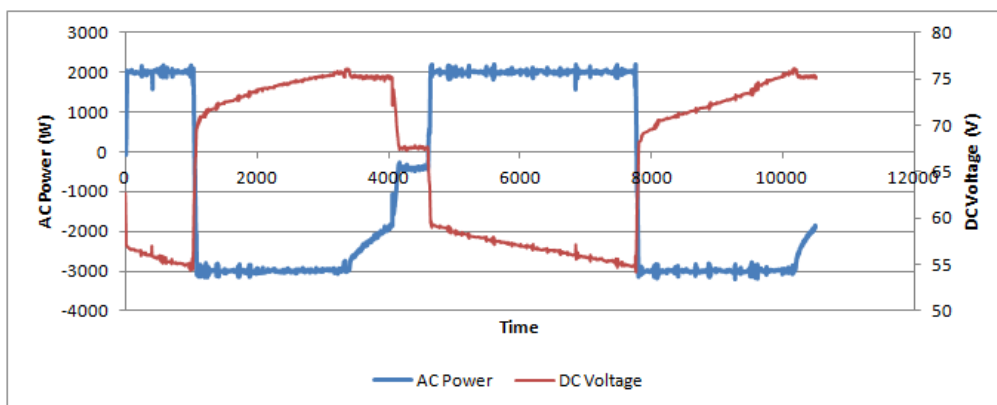
- *Αποφόρτιση με 3 kW, Φόρτιση με 3 kW*



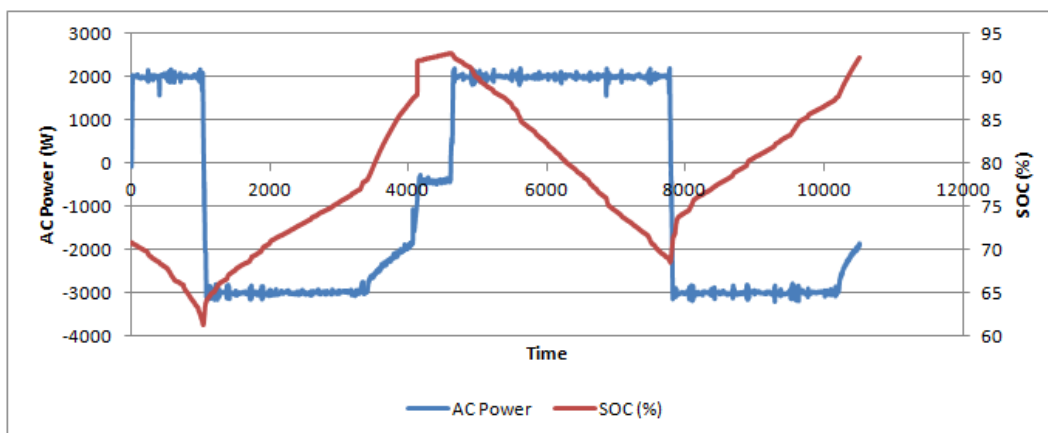
**Σχήμα 5.35** Πείραμα 2 (δεύτερο μέρος): Ενεργός ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου

### Πείραμα 3

Στην αρχή αυτού του πειράματος η τιμή του SOC όπως προέκυψε από τον αντιστροφέα ανερχόταν στο 71%. Αποφασίστηκε αρχικά να αποφορτιστεί η μπαταρία με ισχύ 2 kW και στη συνέχεια να φορτιστεί με ισχύ 3 kW πριν ξεκινήσει το κυρίως πείραμα. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας το SOC λαμβάνει την τιμή 92% όπου και ξεκινά το κυρίως πείραμα. Το set point της ισχύος που δίνεται στη μπαταρία ανέρχεται στα 2 kW όπου ξεκινά η αποφόρτιση της. Η θερμοκρασία των μπαταριών φτάνει το όριο των 55 V και η αποφόρτιση σταματά όταν το SOC είναι 69%. Ακολουθείται μία φόρτιση στα 3 kW, ώσπου η τάση της μπαταρίας φτάνει τα 75 V και τότε ο αντιστροφέας περιορίζει την ισχύ φόρτισης σταδιακά διατηρώντας σταθερή την τάση της μπαταρίας, έως ότου αποφασιστεί κάποια στιγμή να διακοπεί η φόρτιση εντελώς. Τελικά το SOC λαμβάνει την τιμή 92%. Στα σχήματα 5.36 και 5.37 εικονίζονται τα αποτελέσματα του πειράματος. Στο σχήμα 5.36 παρουσιάζεται η AC ισχύς και η DC τάση των μπαταριών συναρτήσει του χρόνου (h), ενώ στο σχήμα 5.37 παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης SOC και η DC τάση συναρτήσει του χρόνου, όπως προκύπτουν από τις αντίστοιχες φορτίσεις/εκφορτίσεις του πειράματος.



Σχήμα 5.36 Αποφόρτιση 2kW, Φόρτιση 3 kW: AC ισχύς και DC τάση συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 5.37 Αποφόρτιση 2kW, Φόρτιση 3 kW: κατάσταση φόρτισης SOC και DC τάση συναρτήσει του χρόνου



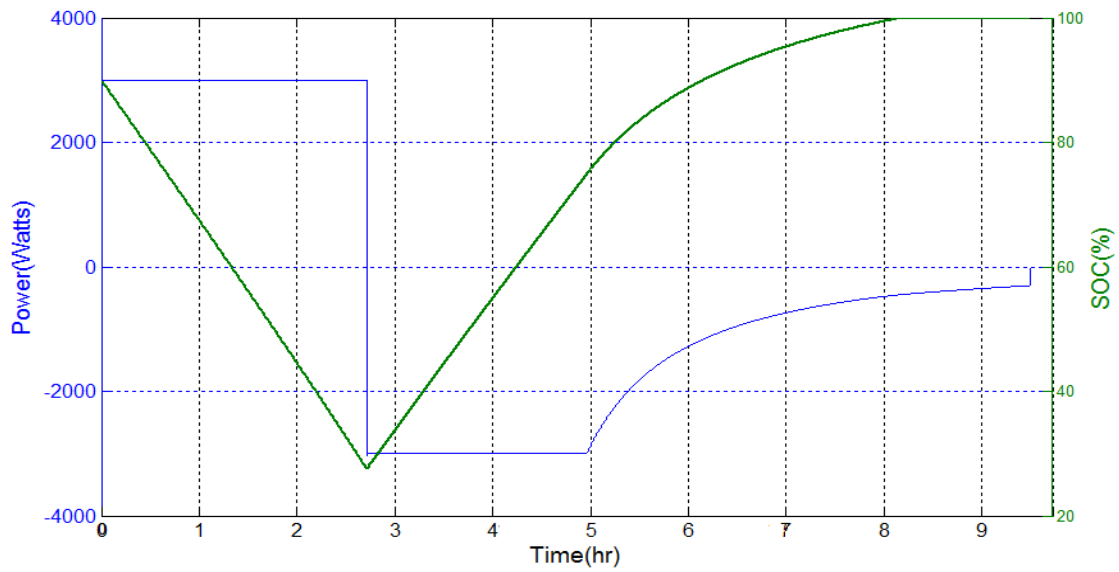
Αξίζει να σημειωθεί πως στο πείραμα 1 και 3 δεν επιλέχθηκε κάποιο σημείο ρύθμισης της τάσης (voltage regulation set point) ή αλλιώς κάποιο μέγιστο όριο, σε αντίθεση με το πείραμα 2 όπου το μέγιστο όριο έλαβε την τιμή 68 V. Παρατηρείται πως στα πειράματα 1 και 3 ο αντιστροφέας περιορίζει το ρεύμα φόρτισης όταν η τάση προσεγγίσει περίπου την τάση αεριοποίησης (2.5 V/cell δηλαδή 75 V για μία μπαταρία 60 V). Το τέλος τη αποφόρτισης σε όλα τα πειράματα προκύπτει από το ελάχιστο όριο της τάσης που ανέρχεται περίπου στο 1.80 με 1.85 V/cell δηλαδή περίπου στα 55 V για μία μπαταρία 60 V (ανάλογα με το ρυθμό εκφόρτισης που της επιβάλλεται).

#### **5.5.4 Πείραμα στο Simulink**

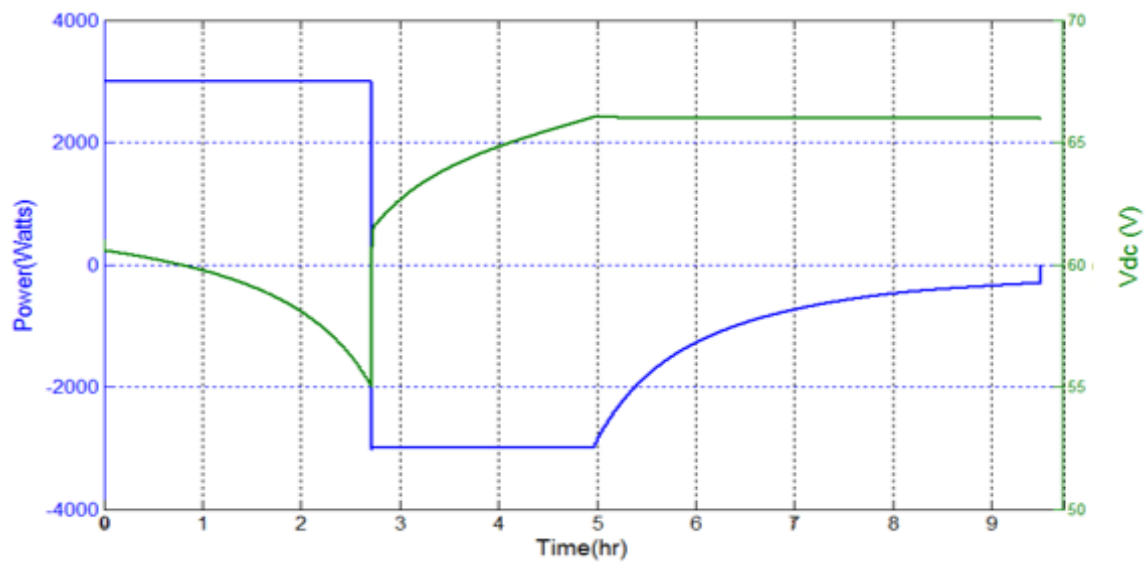
Σε αντιστοιχία με τα παραπάνω εργαστηριακά πειράματα, θα διεξαχθούν τα πειράματα στο Simulink, με βάση πάντα τη μοντελοποίηση του συστήματος που πραγματοποιήθηκε στις προηγούμενες ενότητες. Η συστοιχία των μπαταριών επιλέγεται να έχει ονομαστική τάση και χωρητικότητα 60 V και 250 Ah αντίστοιχα. Το ελάχιστο όριο της τερματικής τάσης των μπαταριών (δηλαδή το όριο της τάσης που δηλώνει το τέλος αποφόρτισης) λαμβάνει τη τιμή 55 V. Για το μέγιστο όριο φόρτισης (σημείο ρύθμισης της τάσης) επιλέγεται η τιμή 66 V και ισχύς -300 W.

##### **Πείραμα 1**

Η μπαταρία θεωρείται αρχικά ότι είναι πλήρως φορτισμένη (initial state of charge 90%). Στη συνέχεια αποφορτίζεται με σταθερή ισχύ 3 kW, ώσπου να προσεγγιστεί το όριο της τάσης που δηλώνει το τέλος της αποφόρτισης (55 V). Έπειτα ξανά φορτίζεται με σταθερή ισχύ 3 kW (μέγιστη ισχύς) έως ότου φτάσει το μέγιστο όριο της τάσης (66 V) όπου ενεργοποιείται ο ελεγκτής διατηρώντας σταθερή την τάση και μειώνοντας το ρεύμα φόρτισης σταδιακά. Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 5.38 και 5.39. Τα σχήματα 5.38 και 5.39 παρουσιάζουν πως η τερματική τάση των μπαταριών και το SOC μεταβάλλονται με το χρόνο.



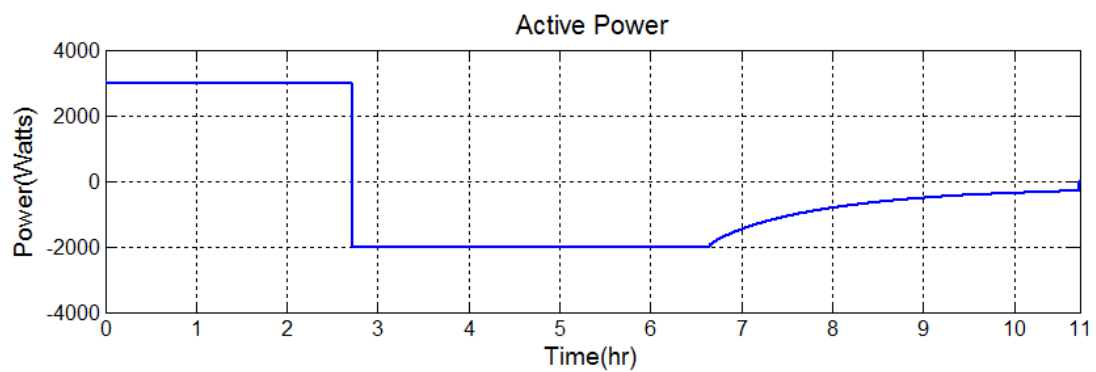
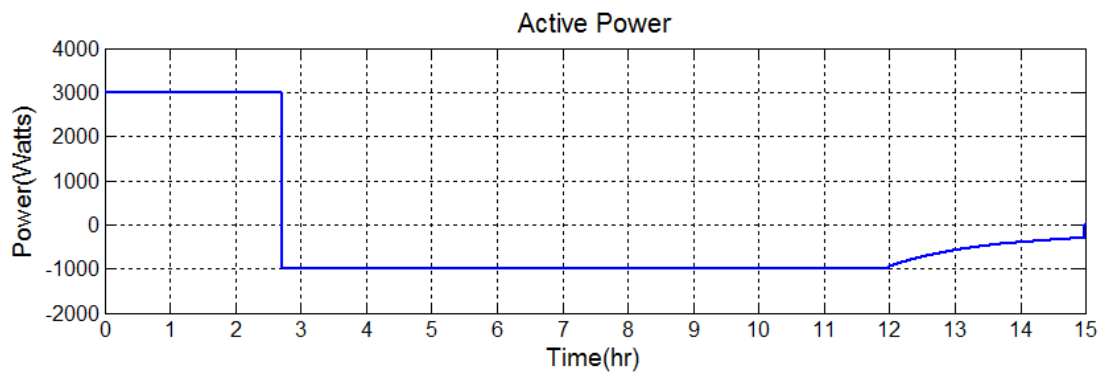
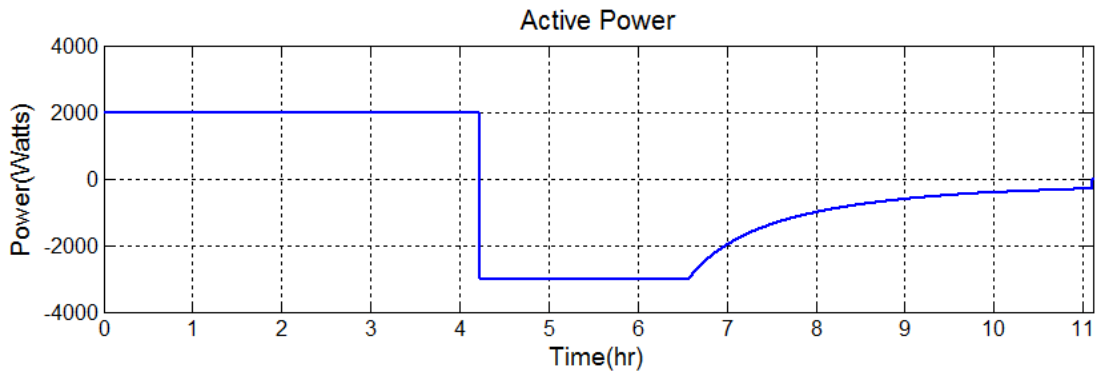
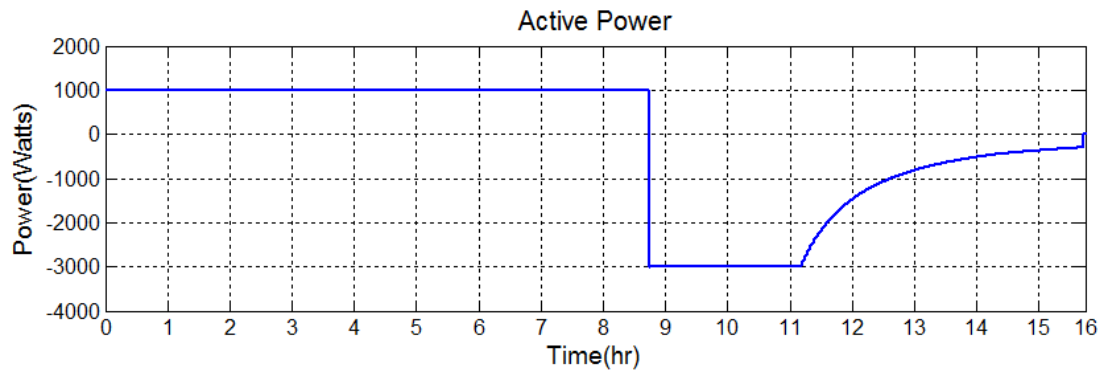
Σχήμα 5.38 Κατάσταση φόρτισης (%) και ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου (hr)



Σχήμα 5.39 DC τάση (V) και ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου (hr)

## Πείραμα 2

Στο σχήμα 5.40 παρουσιάζεται η ενεργός ισχύς συναρτήσει του χρόνου για διάφορους συνδυασμούς φορτίσεων/εκφορτίσεων της μπαταρίας.



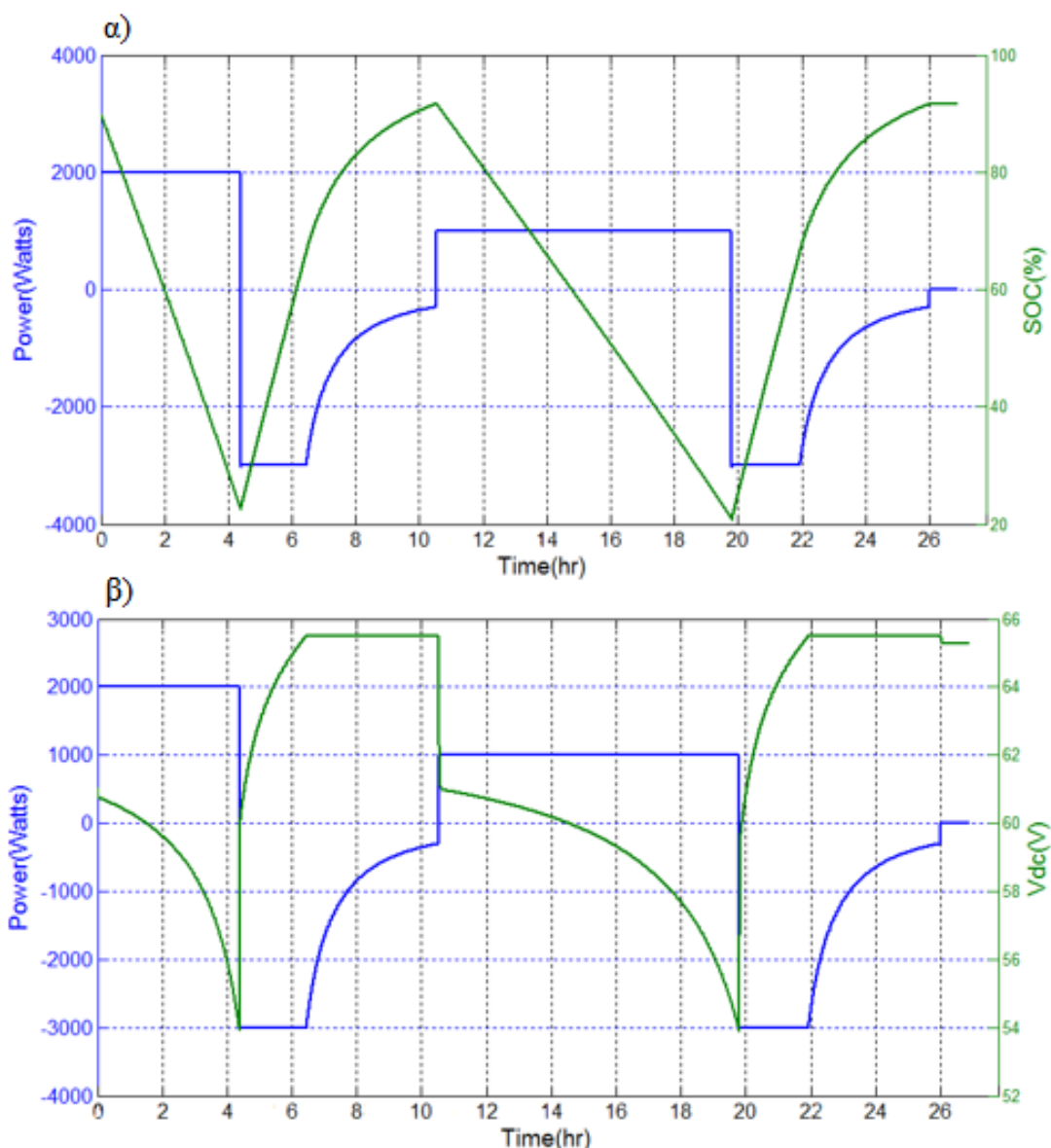
**Σχήμα 5.40** Πείραμα 1: Η ενεργός ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου (hr) διαφόρων ρυθμών φορτίσεων/εκφορτίσεων

Στα πρώτα δύο διαγράμματα του σχήματος 5.40 η μέγιστη ισχύς (3 kW) λαμβάνεται κατά τη φόρτιση, ενώ στα επόμενα δύο που ακολουθούν η μέγιστη ισχύς λαμβάνεται

στη διαδικασία της αποφόρτισης. Η μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη (90%) πριν αρχίσει η εκφόρτιση της.

### Πείραμα 3

Στο παρακάτω πείραμα θα ακολουθηθεί παρόμοια διαδικασία. Αρχικά, η ένδειξη του SOC λαμβάνει την τιμή 90%. Ξεκινά μία αποφόρτιση της μπαταρίας με ισχύ 2 kW για να φορτιστεί πλήρως ξανά στη μέγιστη ισχύ. Στη συνέχεια αποφορτίζεται με 1 kW και επαναφορτίζεται στη μέγιστη ισχύ. Αξίζει να αναφερθεί πως σε αυτό το πείραμα θα λάβουμε διαφορετικές τιμές για το μέγιστο/ελάχιστο όριο φόρτισης/αποφόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, το  $V_{DC,max}$  θα λάβει την τιμή των 64 V, ενώ το  $V_{DC,min}$  θα ανέρχεται στα 54 V.



Σχήμα 5.41 α) Κατάσταση φόρτισης (%) και ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου (hr) β) DC τάση (V) και ισχύς (Watts) συναρτήσει του χρόνου (hr)

Από το σχήμα 5.41 προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Όπως προαναφέρθηκε, στο παραπάνω πείραμα μειώθηκαν τα όρια της μέγιστης/ελάχιστης επιτρεπόμενης τάσης. Παρατηρείται έτσι πως το SOC στη διαδικασία της φόρτισης δεν φτάνει ποτέ το 100%, όπως συνέβαινε στο πείραμα 1 (σχήμα 5.38), αλλά προσεγγίζει το 92%. Ταυτόχρονα, το τέλος της φόρτισης προκύπτει τώρα πια για SOC γύρω στο 22%. Η φόρτιση στα παραπάνω πειράματα σταματούσε όταν ισχύς έφτανε το όριο των -300 W. Συμπερασματικά, η μοντελοποίηση του συνολικού αποθηκευτικού συστήματος στο Simulink και τα αποτελέσματα του πειραμάτων που εξάχθηκαν παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του πραγματικού συστήματος του εργαστηριακού μικροδικτύου. Αξίζει να υπενθυμίσουμε πως δεν αναμέναμε την ίδια ακριβώς λειτουργική συμπεριφορά (π.χ. διαφορές στη διάρκεια φόρτισης/εκφόρτισης), αλλά παρόμοια, καθώς οι μπαταρίες του εργαστηρίου είναι παλιές και παρουσιάζουν ιδιαίτερα μειωμένη απόδοση.

## **5.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων**

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου που αναπτύχθηκε, μέσω ενός απλουστευμένου ακτινικού δικτύου στο οποίο συνδέονται φωτοβολταϊκές μονάδες, φορτία και συστήματα αποθήκευσης. Στόχος των προσομοιώσεων είναι ο ορθός έλεγχος της λειτουργικής συμπεριφοράς του αποθηκευτικού συστήματος με σκοπό τη ταυτόχρονη αύξηση της ιδιοκατανάλωσης και τη καταπολέμηση του φαινομένου ανύψωσης της τάσης λόγω της αντιστροφής ροής ισχύος στο δίκτυο. Αρχικά, θα εφαρμοστούν και θα συγκριθούν οι στρατηγικές ελέγχου του αποθηκευτικού συστήματος που συζητήθηκαν στην ενότητα 5.4.8. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τρόποι διαχείρισης του αποθηκευτικού συστήματος (κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης), οι οποίοι θα συμβάλλουν στην ανακούφιση του δικτύου τις ώρες αιχμής (ελάχιστη παραγωγή/μέγιστο φορτίο) και θα προετοιμάζουν το αποθηκευτικό σύστημα έτσι ώστε να είναι έτοιμο για χρήση την επόμενη μέρα. Τέλος, θα προσομοιωθεί το δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη διάφορα σενάρια παραγωγής και ζήτησης, μελετώντας ταυτόχρονα τα χαρακτηριστικά του δικτύου και με σεβασμό πάντα τα όρια των γραμμών μεταφοράς και του μετασχηματιστή.

### **5.6.1 Στρατηγικές ελέγχου αποθηκευτικού συστήματος**

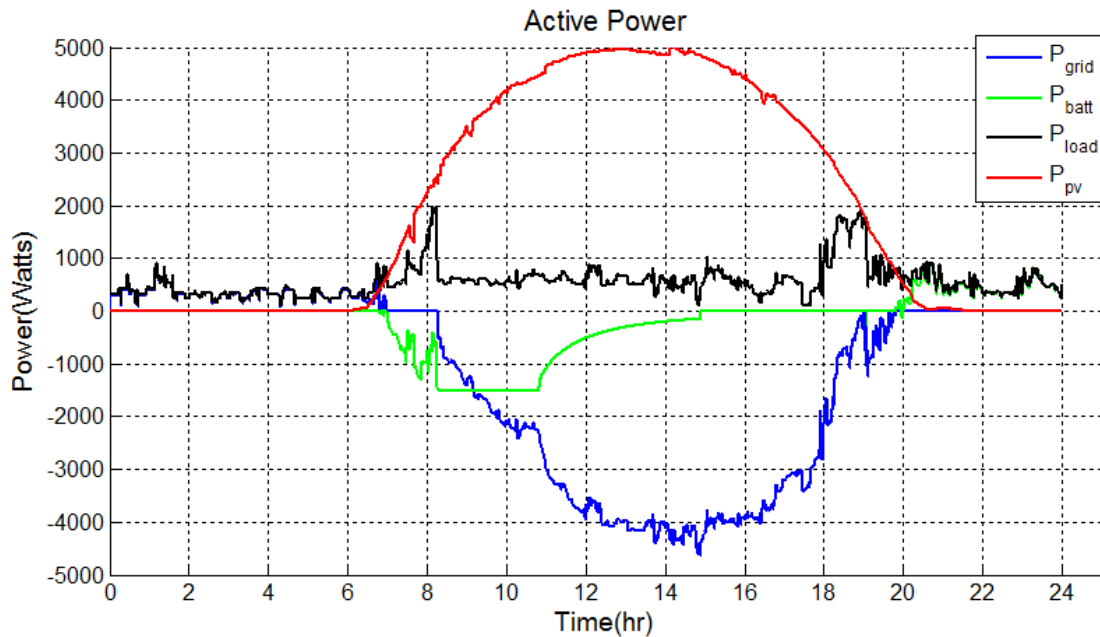
Σε αυτή τη παράγραφο θα προσομοιωθεί η λειτουργία του συνολικού συστήματος για τη διάρκεια μίας ημέρας. Η μονάδα ελέγχου θα υλοποιεί τους αλγόριθμους των στρατηγικών διαχείρισης των αποθηκευτικών συστημάτων που συζητήθηκαν στην ενότητα 5.4.8. Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ενεργού ισχύος και το πως αυτή κατανέμεται στα επιμέρους συστατικά του συστήματος κατά τη λειτουργία του, υλοποιώντας τον αλγόριθμο της *συμβατικής στρατηγικής ελέγχου*, σχήμα 5.23. Στη συνέχεια, η μονάδα ελέγχου θα υλοποιεί την *προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου* μέσω του αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στο σχήμα 5.24. Η μπαταρία που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις έχει αξιοποιήσιμη χωρητικότητα 5 kWh (σχέση 4.15). Πιο

αναλυτικά, η ονομαστική της τάση και χωρητικότητα ανέρχεται σε 48V/150Ah αντίστοιχα (σχήμα 5.21). Η φωτοβολταϊκή παραγωγή και το φορτίο που θα χρησιμοποιηθούν στη προσομοίωση συζητήθηκαν στη ενότητα 5.2. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι κύριες μεταβλητές και τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης.

**Πίνακας 1** Κύριες μεταβλητές μεθόδου προσομοίωσης

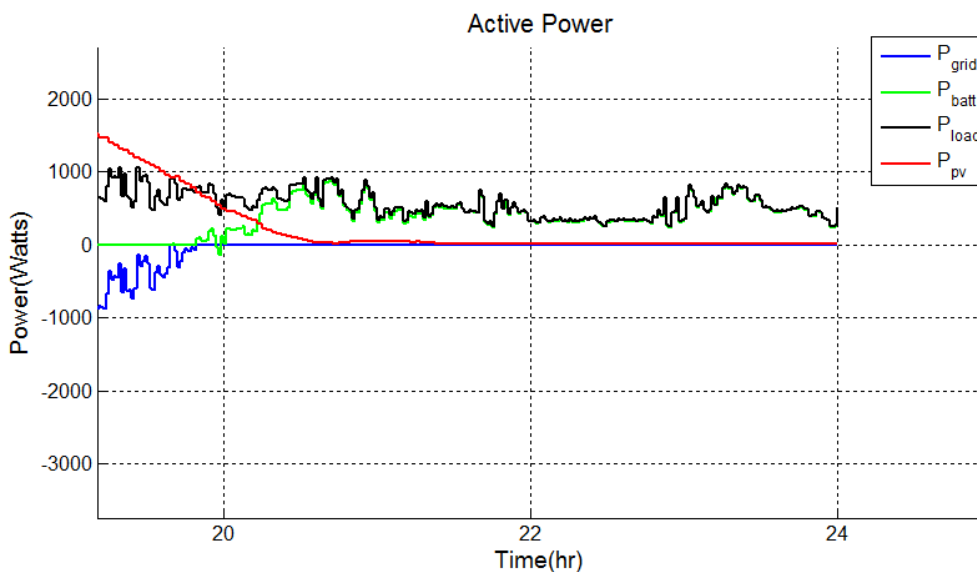
<b>Μεταβλητή</b>		<b>Τιμή</b>
$PV_{peak}$ Output	Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β συστήματος	5 kWp
$SOC_{max}$	Μέγιστος βαθμός φόρτισης	90%
$SOC_{min}$	Ελάχιστος βαθμός φόρτισης	20%
$\rho_i$	Βαθμός απόδοσης φόρτισης	90%
$\rho_o$	Βαθμός απόδοσης αποφόρτισης	95%
$V_{nom}$	Ονομαστική τάση μπαταριών	48 V
$C_{nom}$	Ονομαστική χωρητικότητα μπαταριών (C/5)	150Ah
$E_{BU}$	Αξιοποιήσιμη χωρητικότητα μπαταριών	5kWh
$V_{DC,max}$	Μέγιστο όριο τάσης (φόρτιση)	52.3 V
$V_{DC,min}$	Ελάχιστο όριο τάσης (αποφόρτιση)	43.2 V
$P_{batmax}$	Μέγιστη ισχύς φόρτισης/αποφόρτισης	1.44kW
Initial SOC	Αρχική κατάσταση φόρτισης	20%

Στο σχήμα 5.42 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συνολικού συστήματος για τη διάρκεια μίας τυχαίας μέρας, χρησιμοποιώντας τη *συμβατική στρατηγική ελέγχου*. Αρχικά, η μπαταρία είναι άδεια και το δίκτυο καλύπτει τις απαιτήσεις του φορτίου. Κάποια στιγμή, η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύς ξεπερνά τη ζήτηση του φορτίου ( $P_{res} > 0$ ) και τότε αρχίζει η διαδικασία της φόρτισης με σεβασμό πάντα στη μέγιστη ισχύ φόρτισης  $P_{batmax}$ . Όταν η τερματική τάση της μπαταρίας  $V_{DC}$  προσεγγίσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση φόρτισης  $V_{DC,max}$  μπαίνει σε λειτουργία ο ελεγκτής, ο οποίος διατηρεί σταθερή την τάση της μπαταρίας, περιορίζοντας την ισχύ φόρτισης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.42.

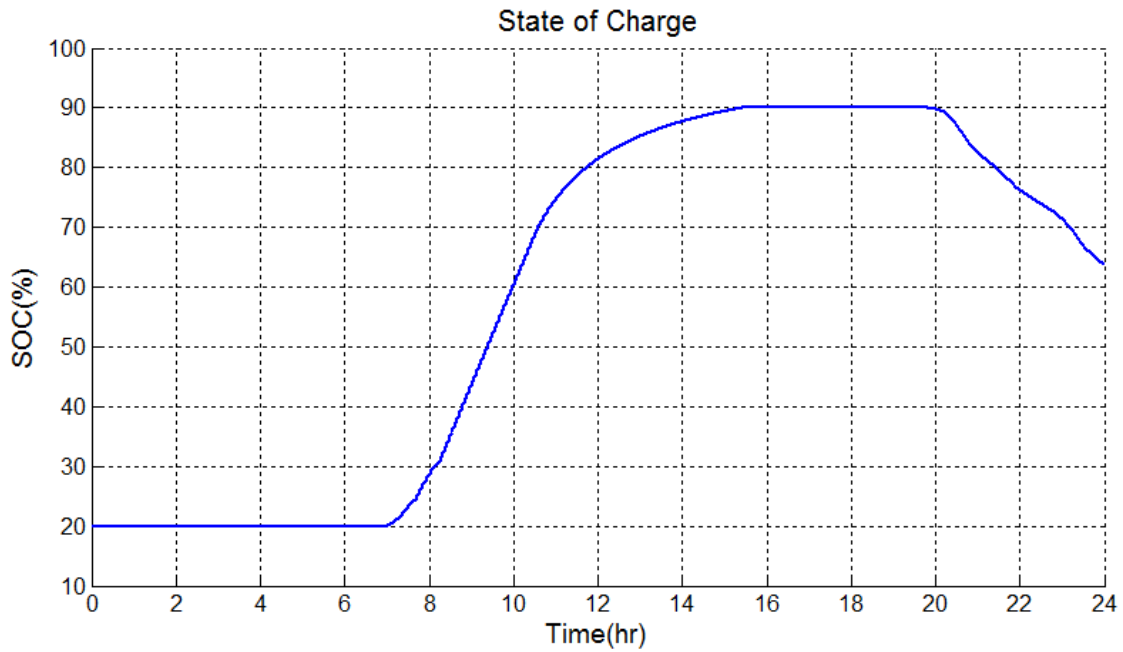


**Σχήμα 5.42** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για τη διάρκεια μίας ημέρας (συμβατική στρατηγική ελέγχου)

Παρατηρείται πως η μπαταρία έχει ήδη φορτίσει από τις πρωινές ώρες και παραμένει σε αδράνεια τις ώρες όπου μεγιστοποιείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή (12:00-14:00). Στη συνέχεια, γύρω στις οκτώ το απόγευμα η απαιτούμενη ισχύς των ηλεκτρικών φορτίων ξεπερνά τη διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή ( $P_{res} < 0$ ) και η μπαταρία ξεκινά τη διαδικασία της αποφόρτισης. Η μπαταρία αποφορτίζεται πάνω στο φορτίο αποτρέποντας τη λήψη ενέργειας από το δίκτυο ( $P_{grid} = 0$ ) και αυξάνοντας συνεπώς την αυτονομία του συστήματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.43. Η κατάσταση φόρτισης σε όλη τη διάρκεια της ημέρας εικονίζεται στο σχήμα 5.44.

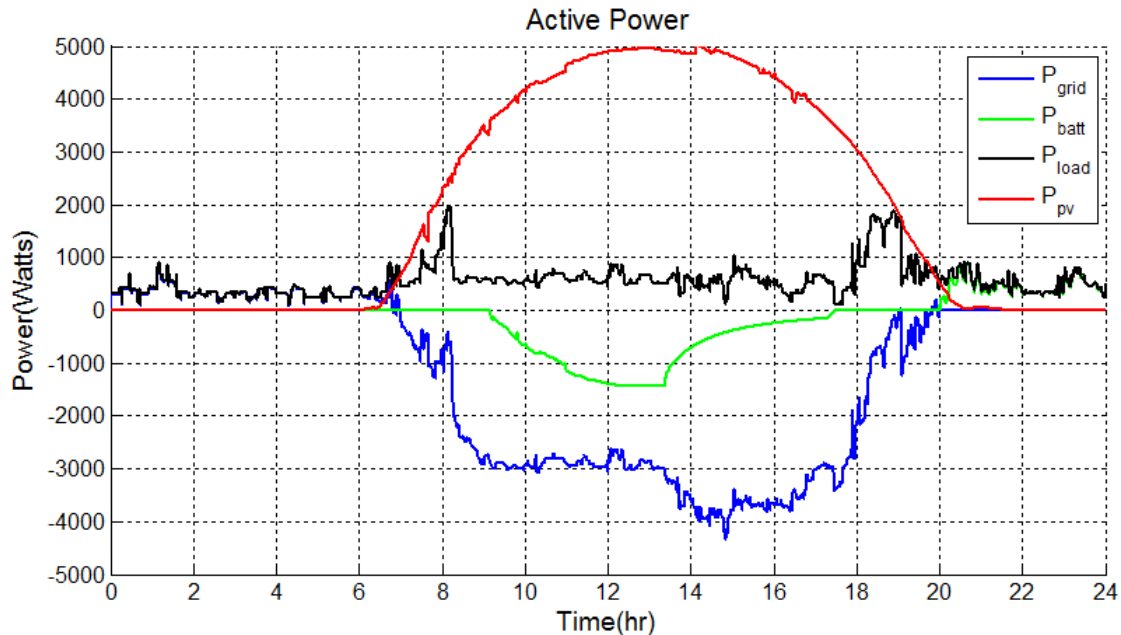


**Σχήμα 5.43** Αποφόρτιση της μπαταρίας πάνω στο φορτίο (συμβατική στρατηγική ελέγχου)



**Σχήμα 5.44** Η κατάσταση φόρτισης SOC (%) στη διάρκεια της ημέρας (συμβατική στρατηγική ελέγχου)

Στο σχήμα 5.45 παρουσιάζεται η προσομοιωμένη λειτουργία του φωτοβολταϊκού-αποθηκευτικού συστήματος μέσω της ενεργού ισχύος για τη διάρκεια της ίδιας ημέρας χρησιμοποιώντας τη προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου.

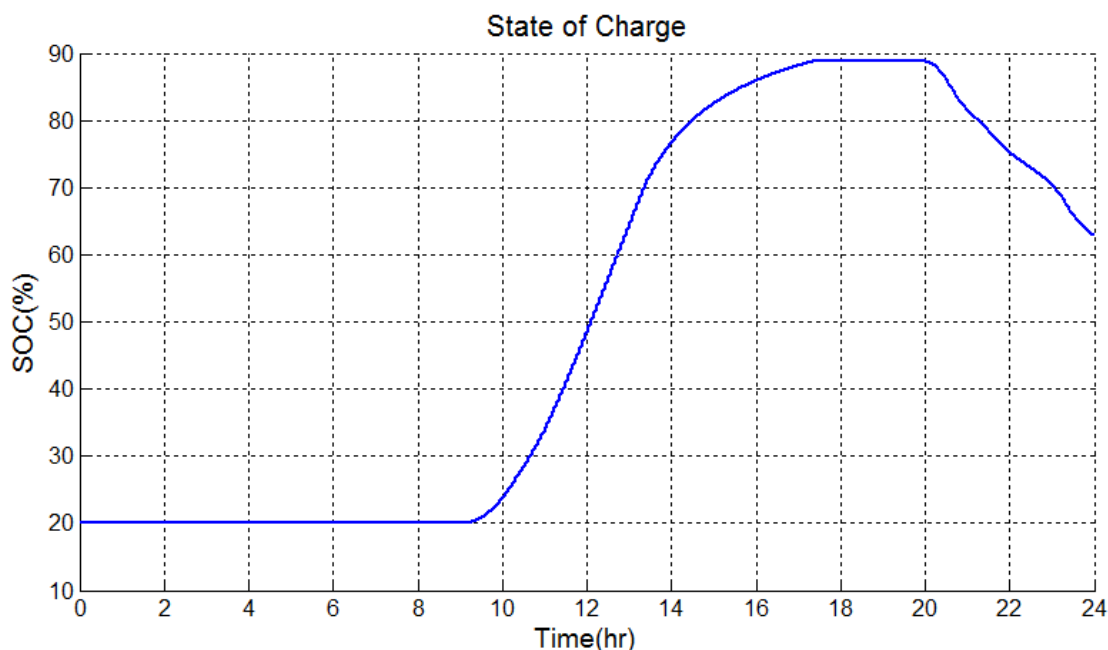


**Σχήμα 5.45** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για τη διάρκεια μίας ημέρας (προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου)

Στο σχήμα 5.46 εικονίζεται η κατάσταση φόρτισης για όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος στο χρονικό διάστημα μίας ημέρας. Η μπαταρία αρχικά είναι άδεια



και η φόρτιση της ξεκινά λίγο μετά τις 9 η ώρα το πρωί όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του σχήματος 5.46.

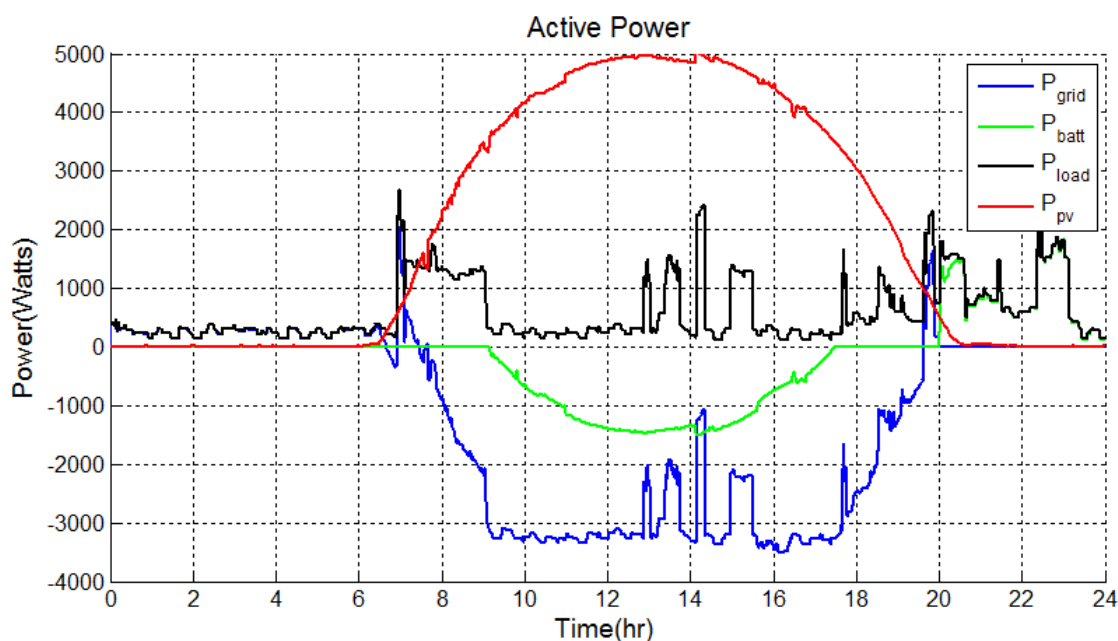


**Σχήμα 5.46** Η κατάσταση φόρτισης SOC (%) στη διάρκεια της ημέρας (προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου)

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο στρατηγικών ελέγχου παρατηρείται πως στη προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου η διαδικασία της φόρτισης ξεκινά περίπου δύο ώρες αργότερα από ότι στη συμβατική στρατηγική ελέγχου, αποτρέποντας έτσι την περικοπή ενεργού ισχύος και την αντιστροφή μεγάλης ροής ισχύος στο δίκτυο τις ώρες της μέγιστης φωτοβολταϊκής παραγωγής. Ακόμη όμως παρατηρείται πως η χωρητικότητα της μπαταρίας που επιλέχθηκε (150 Ah ή 5 kWh αξιοποιήσιμης χωρητικότητας) δεν αρκεί για να απορροφήσει όλη την ισχύ που υπερβαίνει το κατώφλι ισχύος  $P_{thr}$  (70% της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος). Αυτό συμβαίνει διότι, ενώ επιλέχθηκε η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα των 5 kWh με βάση τη διαστασιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 4 για την ηλιοφάνεια της Γερμανίας, στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται Ελληνικά δεδομένα φωτοβολταϊκής παραγωγής επομένως (σύμφωνα και με τα σχήματα 4.14, 4.15) η χωρητικότητα της μπαταρίας πρέπει να αυξηθεί για να τηρείται επαρκώς το German act. Αξίζει να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη τιμή του  $P_{thr}$  (και συνεπώς οι κανονισμοί του German act) τηρούνται με σκοπό την κατανόηση και έχουν συμβολική σημασία, αφού η τιμή αυτή εξαρτάται, τόσο από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής, όσο και από τα επίπεδα της φ/β διεύθυνσης, την ηλιοφάνεια και από πολλούς ακόμα παράγοντες για τον προσδιορισμό των οποίων απαιτείται ξεχωριστή μελέτη.

Από το σχήμα 5.47 παρατηρείται πως αυξάνοντας τη χωρητικότητα της μπαταρίας κατά 60 Ah (48V/210Ah), διαθέτουμε συνολικά 7 kWh αξιοποιήσιμης χωρητικότητας (ή 10 kWh συνολικής χωρητικότητας), τηρείται επαρκώς το German act, δηλαδή

αποθηκεύεται στη μπαταρία όλη η ενέργεια που προκύπτει αν ξεπεραστεί το κατώφλι ισχύος του 70% της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος.

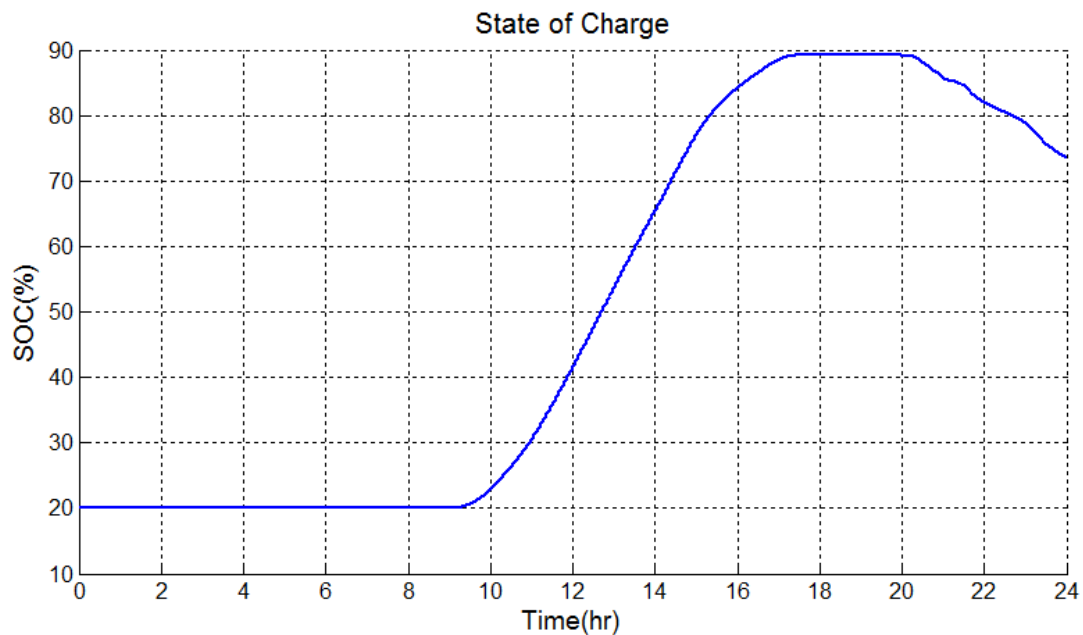


**Σχήμα 5.47** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) με χρήση μπαταρίας 48V/210Ah (προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου)

### Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά μπαταρίας

$V_{nom}$	Ονομαστική τάση μπαταριών	48 V
$C_{nom}$	Ονομαστική χωρητικότητα μπαταριών (C/5)	210 Ah
$E_{BU}$	Αξιοποιήσιμη χωρητικότητα μπαταριών	7 kWh
$P_{batmax}$	Μέγιστη ισχύς φόρτισης/αποφόρτισης	2 kW

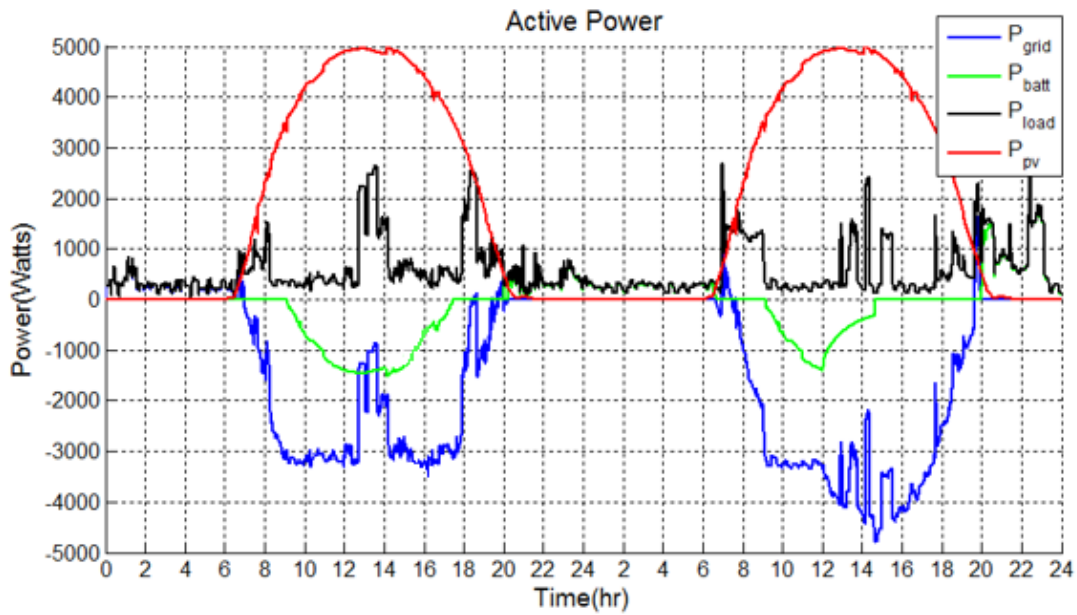
Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς φόρτισης/αποφόρτισης  $P_{batmax}$  λαμβάνει την τιμή 2000 W ( $C/5 A * 48 V$ ). Για τη διαδικασία της αποφόρτισης η μπαταρία και σε αυτή τη προσομοίωση ακολουθεί τη ζήτηση του φορτίου. Άλλοι τρόποι αποφόρτισης θα παρουσιαστούν σε επόμενη ενότητα. Στο σχήμα 5.48 παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης στη διάρκεια της ημέρας (για το φορτίο επιλέχθηκε τυχαία διαφορετική καμπύλη).



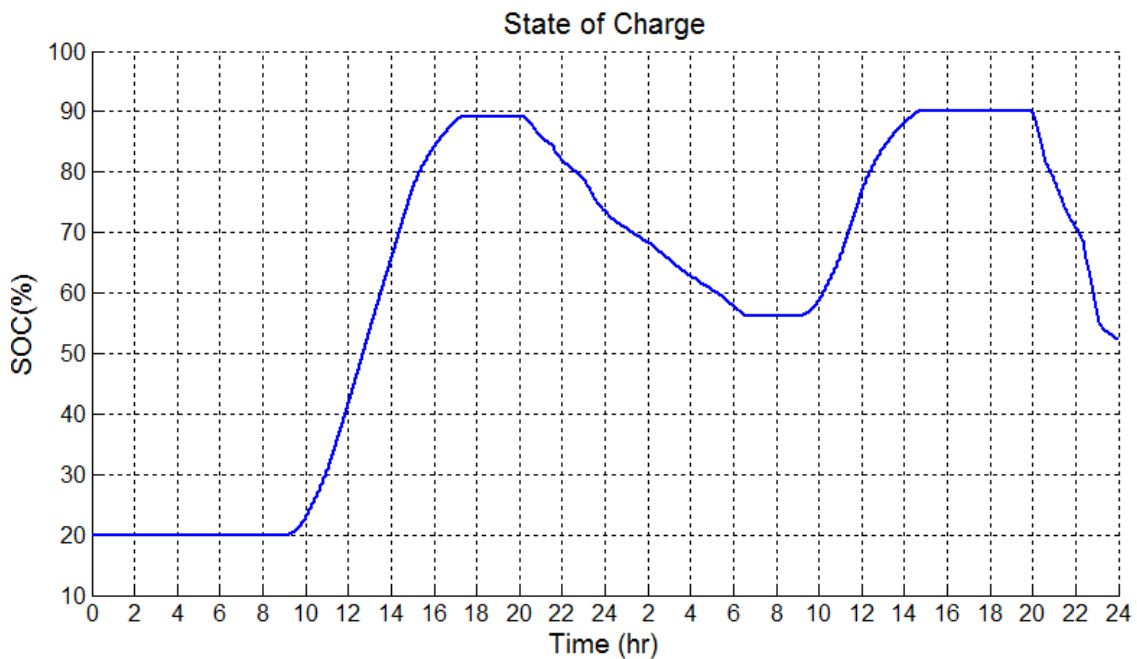
**Σχήμα 5.48** Η κατάσταση φόρτισης SOC (%) στη διάρκεια της ημέρας για τη μπαταρία 210 Ah (προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου)

### 5.6.2 Διαδικασία αποφόρτισης αποθηκευτικού συστήματος

Σε αυτή τη παράγραφο θα παρουσιαστούν τρόποι αποφόρτισης της μπαταρίας οι οποίοι θα εξυπηρετούν αναλόγως κάθε φορά τις ανάγκες του συνολικού συστήματος. Όπως είδαμε σε προηγούμενες προσομοιώσεις η αποφόρτιση της μπαταρίας μπορεί να γίνεται πάνω στο φορτίο ακολουθώντας σε κάθε βήμα προσομοίωσης τις απαιτήσεις του. Επιπλέον, η μπαταρία θα μπορούσε να αποφορτίζεται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, που θα επιλέγονταν με βάση τις ώρες της ημέρας όπου το φορτίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του και η παραγωγή την ελάχιστη (συνήθως βραδινές ώρες της ημέρας), επιτυγχάνοντας την ανακούφιση του δικτύου και την αποφόρτωση του. Διαφορετικά, σε περίπτωση όπου το φορτίο είναι πολύ χαμηλό ή ελάχιστο τις ώρες αποφόρτισης (π.χ. γιατί οι ένοικοι του σπιτιού λείπουν σε διακοπές) η μπαταρία θα αποφορτίζεται με τέτοιο τρόπο όπου θα διασφαλίζεται ότι θα είναι άδεια και έτοιμη για χρήση το επόμενο πρωί. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων και την σαφή παρουσίαση των αποτελεσμάτων, οι προσομοιώσεις θα πραγματοποιούνται σε χρονική διάρκεια δύο ημερών.



**Σχήμα 5.49** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για τη διάρκεια δύο ημερών (η μπαταρία αποφορτίζεται πάνω στο φορτίο)

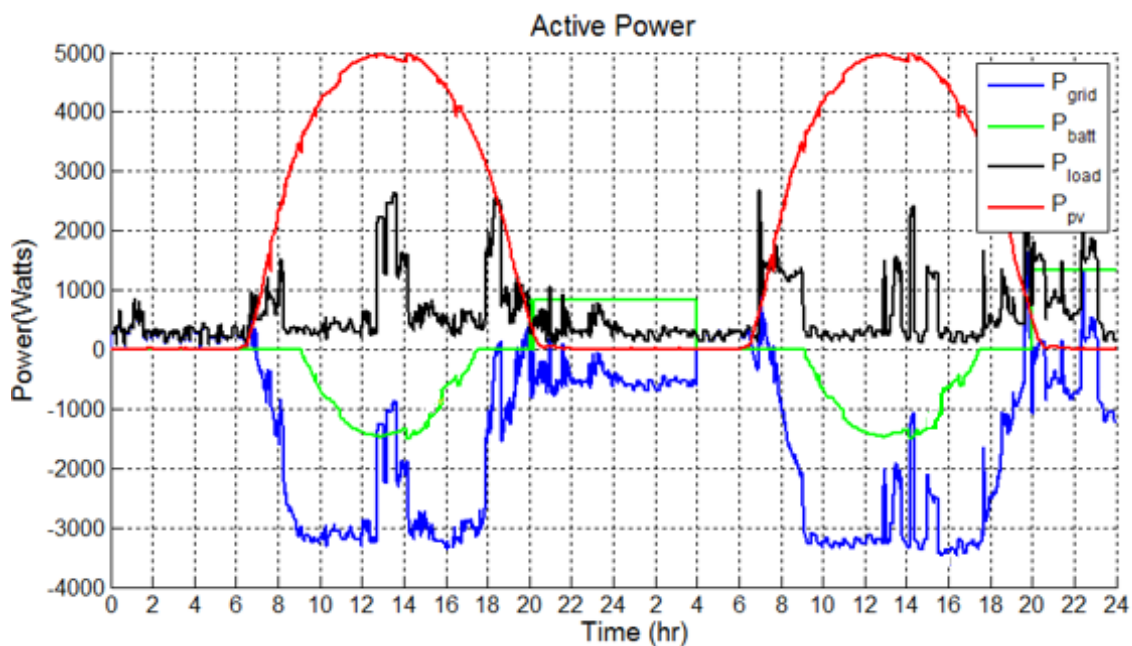


**Σχήμα 5.50** Η κατάσταση φόρτισης SOC (%) στη διάρκεια δύο ημερών (η μπαταρία αποφορτίζεται πάνω στο φορτίο)

Στο σχήμα 5.49 και 5.50 παρουσιάζεται η κατανομή της ενεργού ισχύος στα συστατικά του συστήματος και η κατάσταση φόρτισης SOC σε χρονική διάρκεια δύο ημερών. Αρχικά η μπαταρία είναι άδεια και στη συνέχεια φορτίζεται με βάση τον αλγόριθμο που εξυπηρετεί τη *προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου*. Όπως παρατηρείται και στα σχήματα, η διαδικασία της εκφόρτισης ξεκινά γύρω στις οκτώ το απόγευμα όπου και ακολουθεί τη ζήτηση του φορτίου. Η μπαταρία αποφορτίζεται της βραδινές ώρες αλλά όχι πλήρως, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.50, όπου η ένδειξη του SOC λαμβάνει την

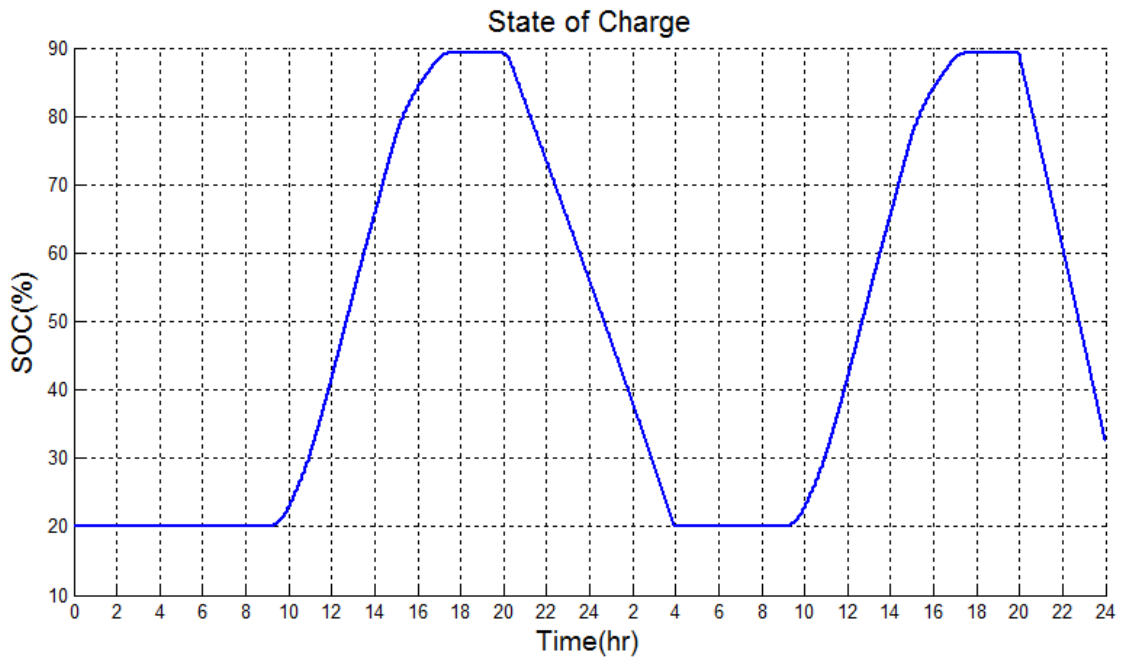
τιμή 57% . Στη συνέχεια, η μπαταρία παραμένει σε αδράνεια μέχρι η φωτοβολταϊκή ισχύς της επόμενης μέρας να φτάσει το κατώφλι της ισχύος  $P_{thr}$  και να ξεκινήσει η νέα φόρτιση. Την επόμενη μέρα, και εφόσον η μπαταρία δεν είχε αδειάσει πλήρως το προηγούμενο βραδύ, το σύστημα μας δεν μπορεί να τηρήσει το German act και η μπαταρία φορτίζεται ήδη πλήρως από τις 12:00-13:00 το μεσημέρι.

Στις περιπτώσεις λοιπόν όπου ο ιδιοκτήτης του συστήματος μπορεί να προβλέψει τη ζήτηση του φορτίου (π.χ. ιστορικό καταναλωτικού προφίλ) ή γνωρίζει ότι το φορτίο θα είναι ιδιαίτερα χαμηλό (π.χ. διακοπές), μέσω του αλγόριθμου της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου, θα ρυθμίζεται το set point της ισχύος  $P_s$  που θα δίνεται στη μπαταρία έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι θα είναι άδεια την επόμενη μέρα.



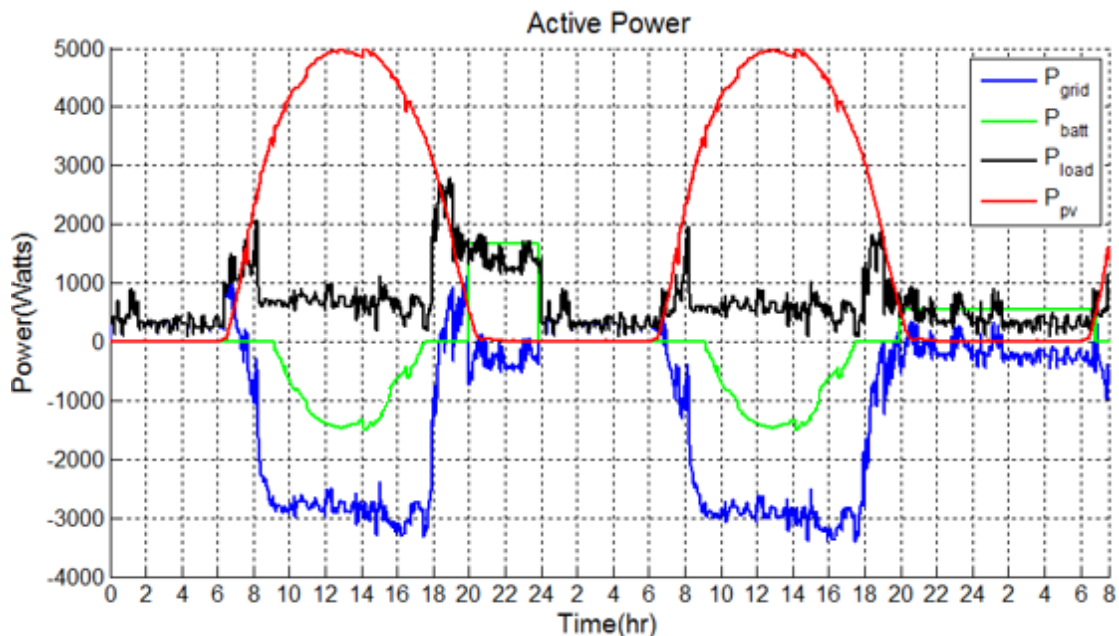
**Σχήμα 5.51** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για τη διάρκεια δύο ημερών (η μπαταρία αποφορτίζεται με συγκεκριμένο set point ισχύος  $P_s$ )

Πραγματικά, όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.51 και 5.52 η μπαταρία αποφορτίζεται πλήρως τις βραδινές ώρες και είναι έτοιμη για χρήση την επόμενη μέρα. Πιο αναλυτικά, το  $P_s$  επιλέχθηκε με βάση τις επιθυμητές ώρες αποφόρτισης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η μπαταρία να εκφορτιστεί σε 8 ώρες και της δόθηκε το ανάλογο set point ισχύος (η επιλογή των οκτώ ωρών ήταν τυχαία). Αντίστοιχα, το βράδυ της επόμενης μέρας το set point που επιλέχθηκε έγινε με βάση τον ρυθμό εκφόρτισης των 5 ωρών. Και στις δύο περιπτώσεις η διαδικασία της αποφόρτισης επιλέγεται να ξεκινά μόλις δύσει ο ήλιος δηλαδή κατά τις 20:00 το απόγευμα. Το σχήμα 5.52 επιβεβαιώνει τόσο ότι η μπαταρία αποφορτίζεται πλήρως τις βραδινές ώρες όσο και ότι η διάρκεια αποφόρτισης συνάδει με τον αντίστοιχο ρυθμό αποφόρτισης (8 ώρες, 5 ώρες για κάθε μέρα αντίστοιχα).



**Σχήμα 5.52** Η κατάσταση φόρτισης SOC (%) στη διάρκεια δύο ημερών (η μπαταρία αποφορτίζεται με συγκεκριμένο set point ισχύος  $P_s$ )

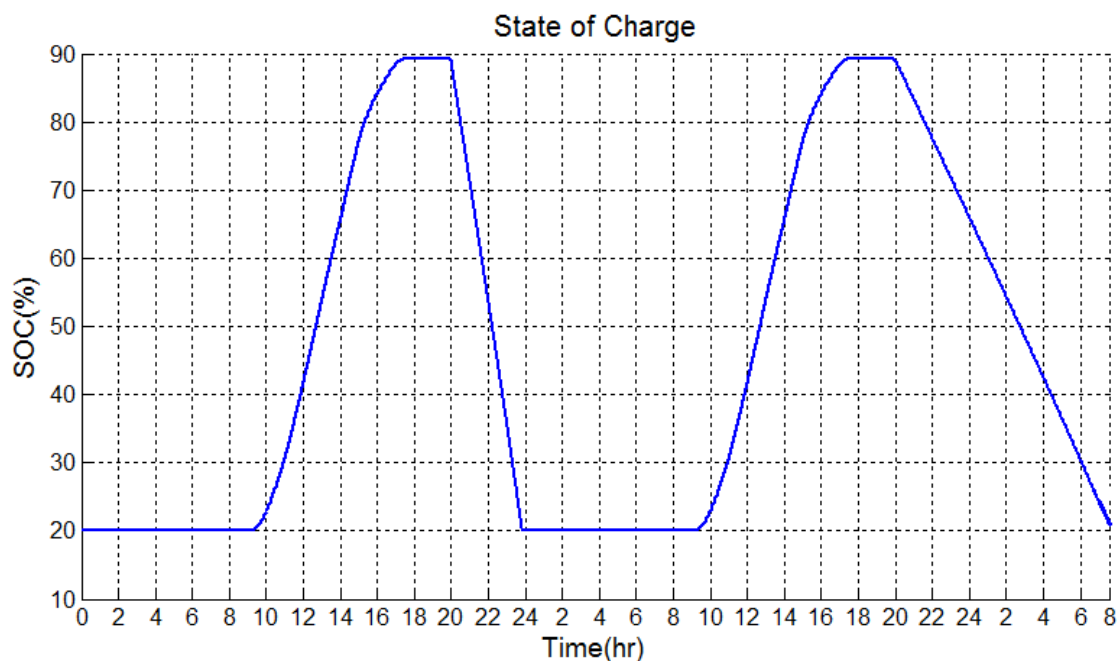
Στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του σχήματος 5.53 η μπαταρία αρχικά αποφορτίζεται σε ρυθμό εκφόρτισης 4 ωρών ανακουφίζοντας το δίκτυο (τις ώρες όπου μεγιστοποιείται το ηλεκτρικό φορτίο), ενώ την επόμενη μέρα όπου το φορτίο παραμένει χαμηλό επιλέγεται να αποφορτιστεί σε χρονικό διάστημα 12 ωρών.



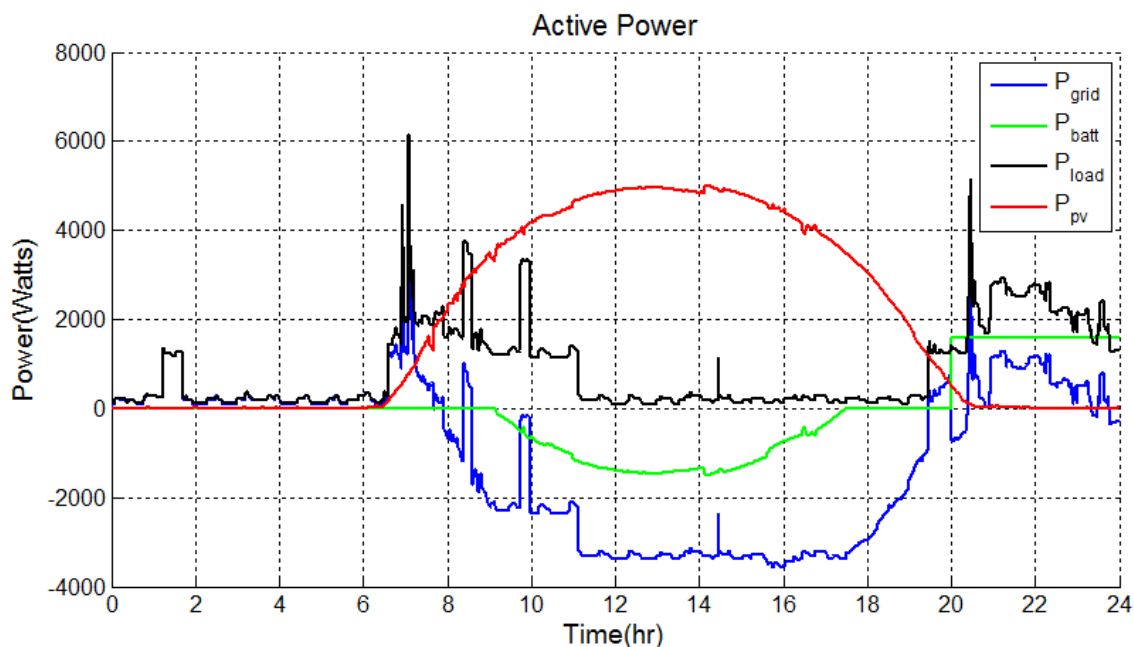
**Σχήμα 5.53** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για τη διάρκεια δύο ημερών (η μπαταρία αποφορτίζεται με συγκεκριμένο set point ισχύος  $P_s$ )

Από το σχήμα 5.54 παρατηρείται πως η μπαταρία αδειάζει πλήρως κάθε φορά, προετοιμάζοντας την έτσι κατάλληλα για τη φόρτιση που πρόκειται να ακολουθήσει

με συνέπεια τη τήρηση των ορίων που θέτει κάθε φορά ο διαχειριστής του δικτύου (στη συγκεκριμένη μελετάται το German act) και την αποφυγή περικοπής της ενεργού ισχύος.



**Σχήμα 5.54** Η κατάσταση φόρτισης SOC (%) στη διάρκεια δύο ημερών (η μπαταρία αποφορτίζεται με συγκεκριμένο set point ισχύος  $P_S$ )



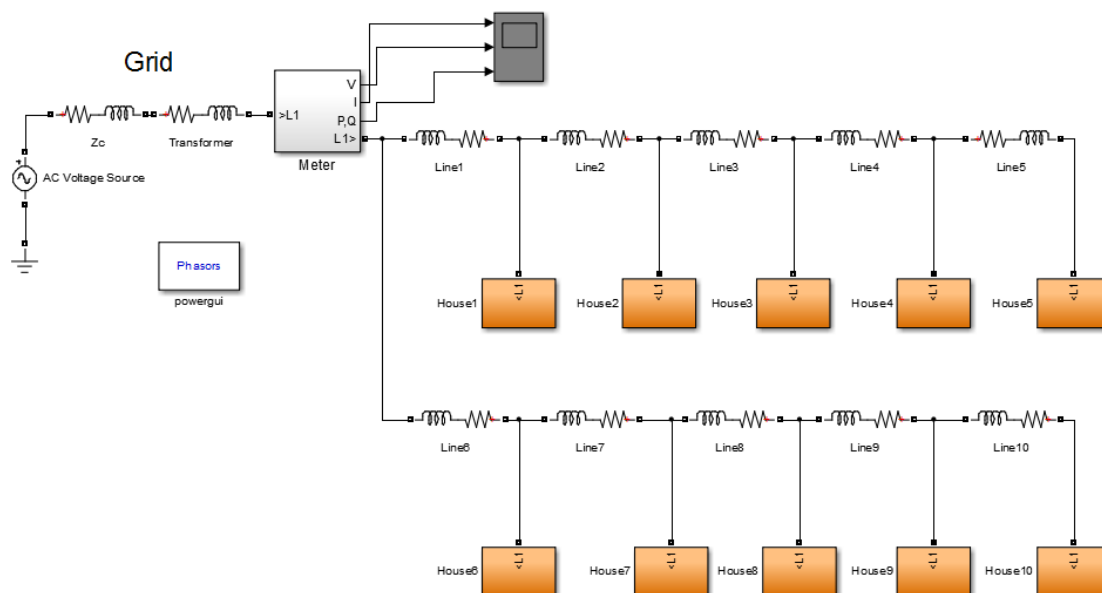
**Σχήμα 5.55** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για τη διάρκεια μίας ημέρας (αποφόρτιση με σκοπό την αποφυγή βύθισης της τάσης)

Ανακεφαλαιώνοντας, η διαδικασία της αποφόρτισης των μπαταριών θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται πρωτίστως η πλήρης εκφόρτιση της

(ώστε να είναι έτοιμη για την φόρτιση της επόμενης μέρας). Ακόμη, αν είναι γνωστή ή μπορεί να προβλεφθεί η επικείμενη ζήτηση του φορτίου τότε η εκφόρτιση της μπορεί να επιλέγεται κατάλληλα ώστε να προστατεύεται το δίκτυο από τυχόν καταπόνηση και να αποφεύγεται η βύθιση της τάσης στα σημεία κοινής σύνδεσης.

### 5.6.3 Αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης της τάσης με χρήση αποθηκευτικών συστημάτων

Στα δίκτυα διανομής που παρουσιάζουν υψηλή φωτοβολταϊκή διείσδυση παρατηρείται συνήθως αύξηση των τάσεων και αντιστροφή της ροής ισχύος από το δίκτυο χαμηλής στο δίκτυο μέσης τάσης. Τα προβλήματα στην ποιότητα της τάσης τροφοδοσίας παρουσιάζονται πιο συχνά στα δίκτυα χαμηλής τάσης και η αντιμετώπιση τους κρίνεται αναγκαία τόσο για την επάρκεια όσο για και για την αξιοπιστία του συνολικού δικτύου διανομής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου ανύψωσης της τάσης. Ωστόσο, αντικείμενο αυτής της εργασίας αποτελεί η καταπολέμηση του φαινομένου με τη βοήθεια της αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας (πέρα από αυτή που ιδιοκαταναλώνεται από το φορτίο) σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές μεμονωμένα για κάθε καταναλωτή της χαμηλής τάσης με εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή (Decentralized Storage). Στην παρούσα παράγραφο λοιπόν θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω της καταγραφής των επιπέδων των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης, ενός απλουστευμένου ακτινικού δικτύου στο οποίο συνδέονται φωτοβολταϊκές μονάδες, οικιακά φορτία και αποθηκευτικά συστήματα λαμβάνοντας διάφορα σενάρια παραγωγή και ζήτησης.



**Σχήμα 5.56** Η μοντελοποίηση στο γραφικό περιβάλλον του Simulink ενός απλουστευμένου ακτινικού δικτύου στο οποίο συνδέονται φ/β μονάδες, οικιακά φορτία και συστήματα αποθήκευσης



Στο σενάριο 1.1 που θα υλοποιηθεί στη συνέχεια δεν θα εγκατασταθούν αποθηκευτικά συστήματα και το προσομοιωμένο δίκτυο ΧΤ θα θεωρηθεί πως βρίσκεται σε αγροτική περιοχή. Το δίκτυο (σχήμα 5.56) αποτελείται από ένα Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ, από εναέριες γραμμές μεταφοράς, καθώς και από τις παραγωγές και τις καταναλώσεις των ζυγών. Οι προσομοιώσεις θα πραγματοποιηθούν για τη χρονική διάρκεια μίας ημέρας.

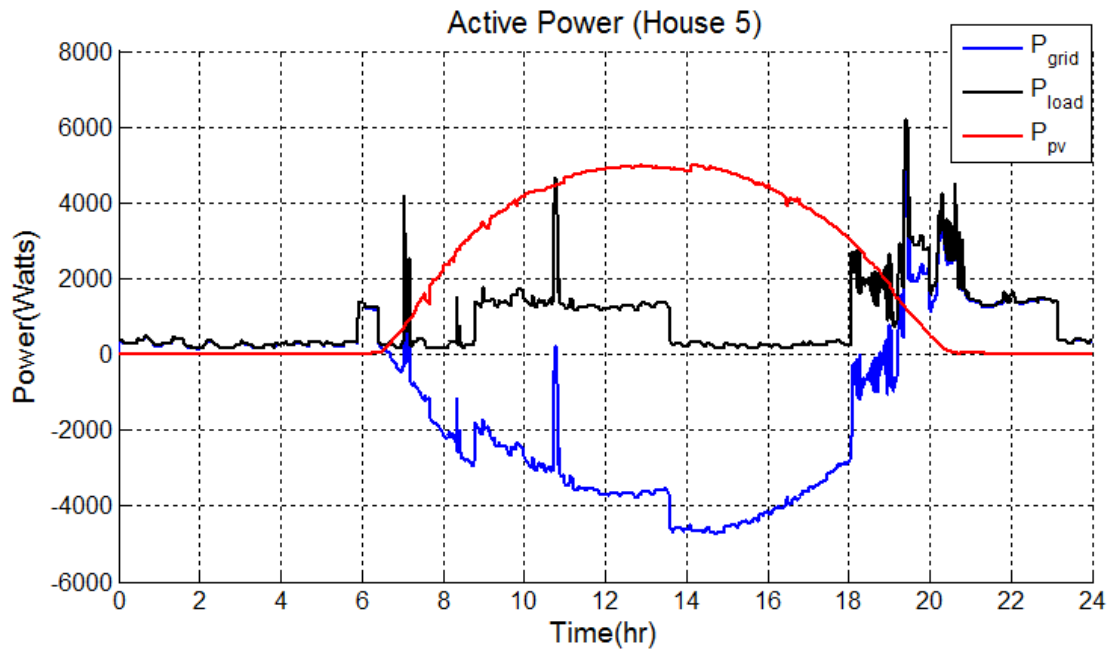
**Πίνακας 3** Κύριες μεταβλητές μεθόδου προσομοίωσης

<b>Μεταβλητή</b>		<b>Τιμή</b>
$PV_{peak}$ Output	Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β συστήματος	5 kWp
$SOC_{max}$	Μέγιστος βαθμός φόρτισης	90%
$SOC_{min}$	Ελάχιστος βαθμός φόρτισης	20%
$\rho_i$	Βαθμός απόδοσης φόρτισης	90%
$\rho_o$	Βαθμός απόδοσης αποφόρτισης	95%
$V_{nom}$	Ονομαστική τάση μπαταριών	48 V
$C_{nom}$	Ονομαστική χωρητικότητα μπαταριών (C/5)	210 Ah
E <sub>BU</sub>	Αξιοποιήσιμη χωρητικότητα μπαταριών	7 kWh
$V_{DC,max}$	Μέγιστο όριο τάσης (φόρτιση)	52.3 V
$V_{DC,min}$	Ελάχιστο όριο τάσης (αποφόρτιση)	43.2 V
$P_{batmax}$	Μέγιστη ισχύς φόρτισης/αποφόρτισης	2 kW
Initial SOC	Αρχική κατάσταση φόρτισης	20%

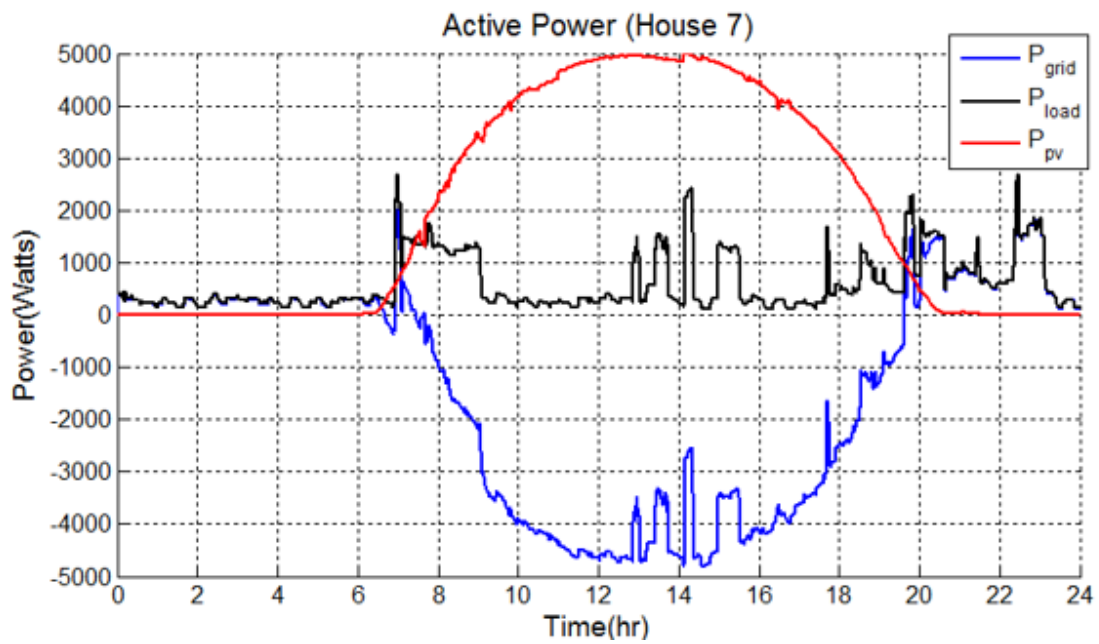
## Σενάριο 1.1

Καθώς στις αγροτικές περιοχές υπάρχει άφθονος χώρος για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκής παραγωγής και η απόσταση μεταξύ των οικιών είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις αστικές περιοχές, προκύπτει ότι σε αγροτικά δίκτυα είναι πολύ μεγαλύτερη η πιθανότητα παραβίασης των επιτρεπτών ορίων της τάσης [53].

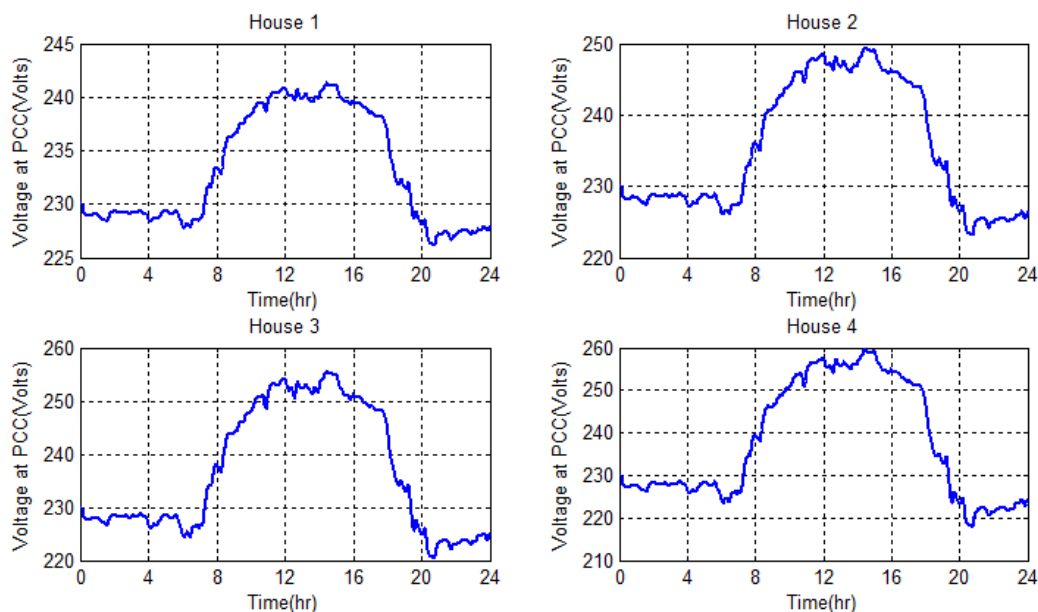
Σε αυτό το πρώτο σετ σεναρίων, τόσο η εγκατεστημένη ισχύς των σπιτιών όσο και το μήκος των γραμμών τους θα λαμβάνουν τις ίδιες τιμές με σκοπό την ευκολότερη κατανόηση της εξάρτησης των επιπέδων των τάσεων στους κόμβους από τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, σε όλα τα σπίτια έχουν εγκατασταθεί φωτοβολταϊκά συστήματα εγκατεστημένης ισχύος 5 kWp. Ταυτόχρονα, το μήκος όλων των γραμμών μεταφοράς (Line1 έως και Line10) ανέρχεται στα 200 m. Στο σχήμα 5.57 και 5.58 παρουσιάζεται το ισοζύγιο της ενεργού ισχύος για τις οικίες 5 και 7 (οι οποίες επιλέχθηκαν τυχαία).



**Σχήμα 5.57** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 5 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 1.1)

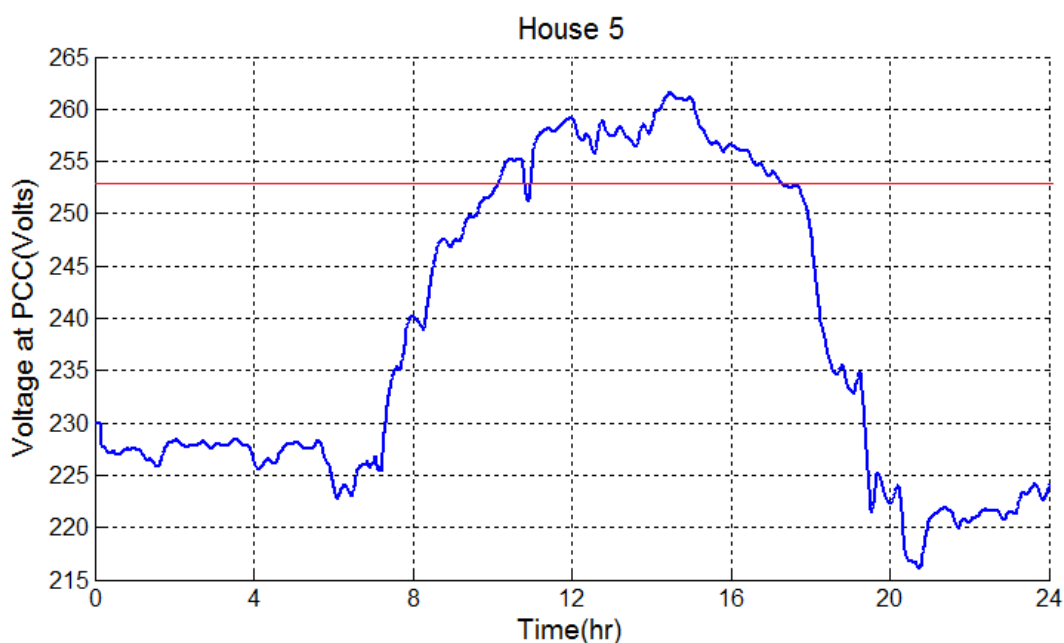


**Σχήμα 5.58** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 7 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 1.1)



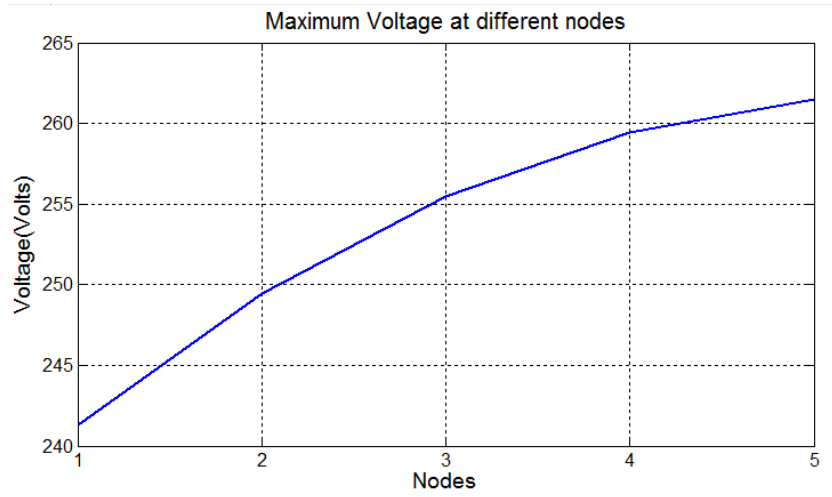
**Σχήμα 5.59** Οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 1 έως 4 (Σενάριο 1.1)

Στο σχήμα 5.59 εικονίζονται οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων όπως διαμορφώθηκαν στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) 1 έως 4 για τη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας των συστημάτων. Από τα διαγράμματα του σχήματος 5.59 παρατηρείται πως όσο απομακρυνόμαστε από το Μ/Σ τόσο αυξάνεται η τιμή των τάσεων στα PCC. Στο σχήμα 5.60 εικονίζεται το προφίλ της τάσης στο PCC της οικίας 5. Όπως παρατηρείται από τα σχήματα 5.59 και 5.60, η τάση λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές στον ζυγό 5, δηλαδή στον πιο απομακρυσμένο κόμβο.



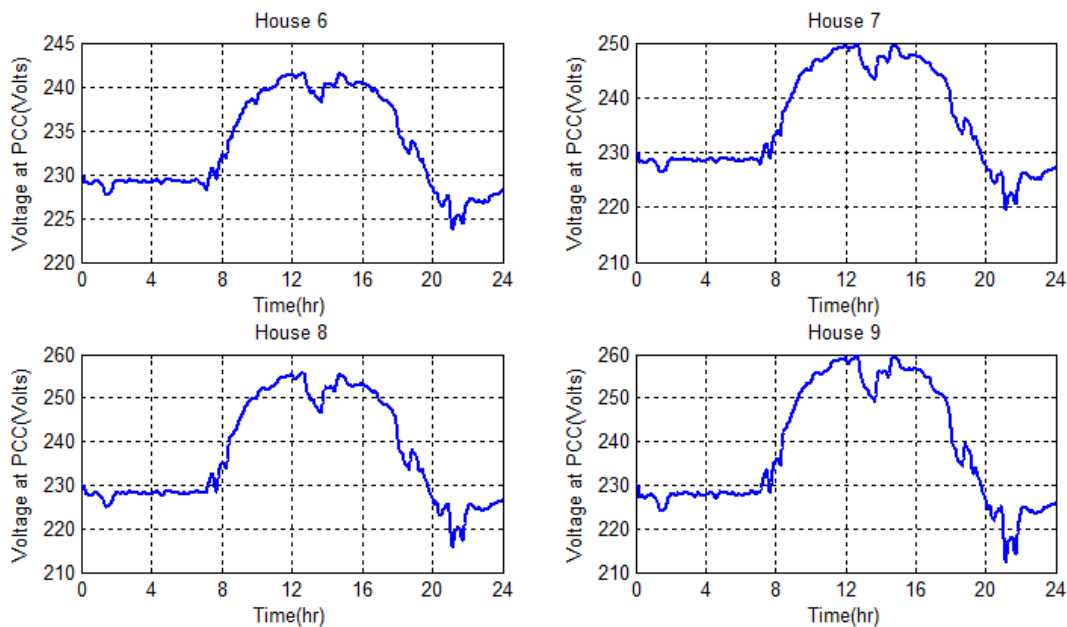
**Σχήμα 5.60** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 5 (Σενάριο 1.1)

Στο σχήμα 5.61 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές όπως καταγράφηκαν στους αντίστοιχους κόμβους του δικτύου για τη διάρκεια της ημέρας. Το διάγραμμα του σχήματος επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που προέκυψε προηγουμένως, δηλαδή πως όσο απομακρυνόμαστε από τον Μ/Σ τα επίπεδα των τάσεων λαμβάνουν όλο και πιο υψηλές τιμές.



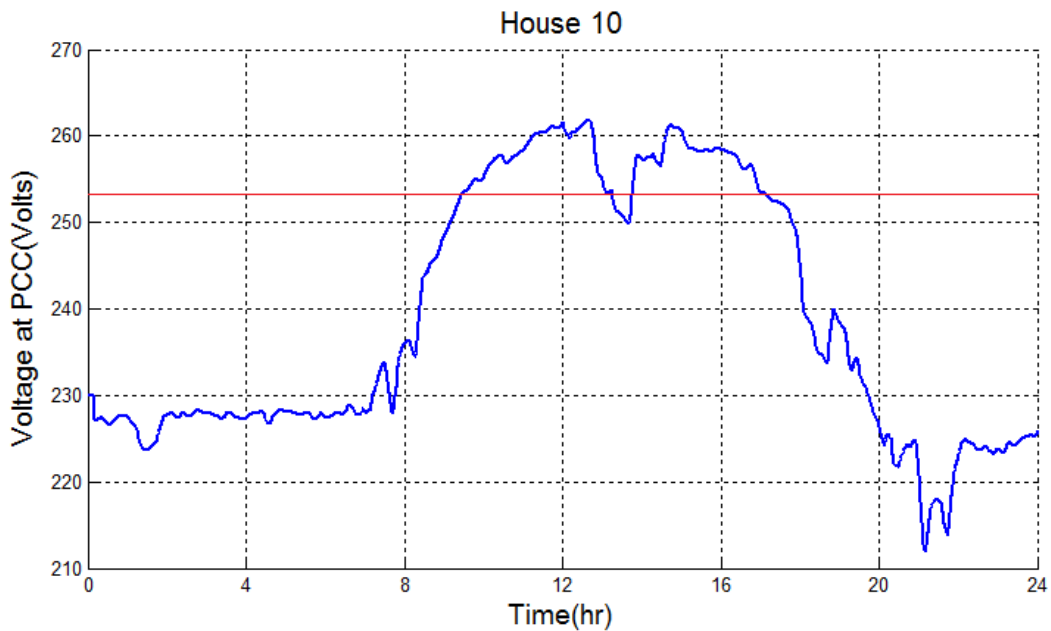
**Σχήμα 5.61** Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 1-5 (Σενάριο 1.1)

Όπως παρατηρείται επίσης από το σχήμα 5.61 στις οικίες 1 και 2 δεν υπήρξε παραβίαση των ορίων των τάσεων, σε αντίθεση με τις οικίες 3, 4 και 5.



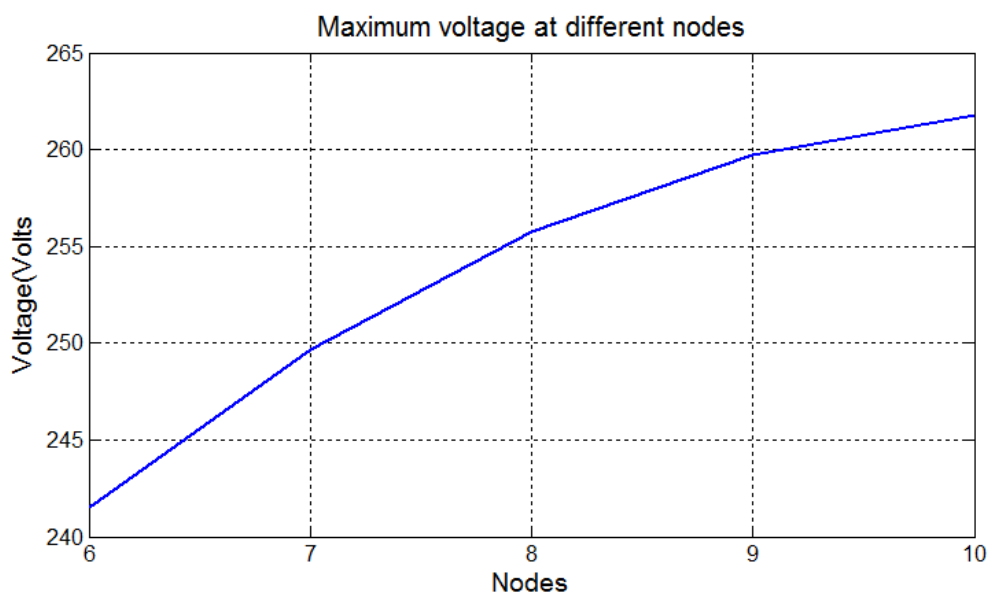
**Σχήμα 5.62** Οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 6 έως 9 (Σενάριο 1.1)

Στο σχήμα 5.62 παρουσιάζονται τα προφίλ των τάσεων όπως διαμορφώθηκαν στους κόμβους 6 έως και 9.



**Σχήμα 5.63** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 5 (Σενάριο 1.1)

Και σε αυτή τη περίπτωση τα προφίλ των τάσεων παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όπως πριν. Δηλαδή οι τιμές των τάσεων αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από το Μ/Σ (αφού αυξάνονται τα συνολικά μήκη των γραμμών μεταφοράς δηλαδή το R και το X της εξίσωσης (5.2)). Το σχήμα 5.62 παρουσιάζει το προφίλ της τάσης για τον κόμβο 10. Στους κόμβους 6 και 7 οι τάσεις παρέμειναν μεταξύ των επιτρεπτών ορίων, ενώ στους κόμβους 8, 9 και 10 παραβιάστηκε το πάνω όριο των 253 V. Στο σχήμα 5.63 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές όπως καταγράφηκαν στους κόμβους του δικτύου 6 έως 10 για τη διάρκεια της ημέρας.



**Σχήμα 5.64** Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 6-10 (Σενάριο 1.1)

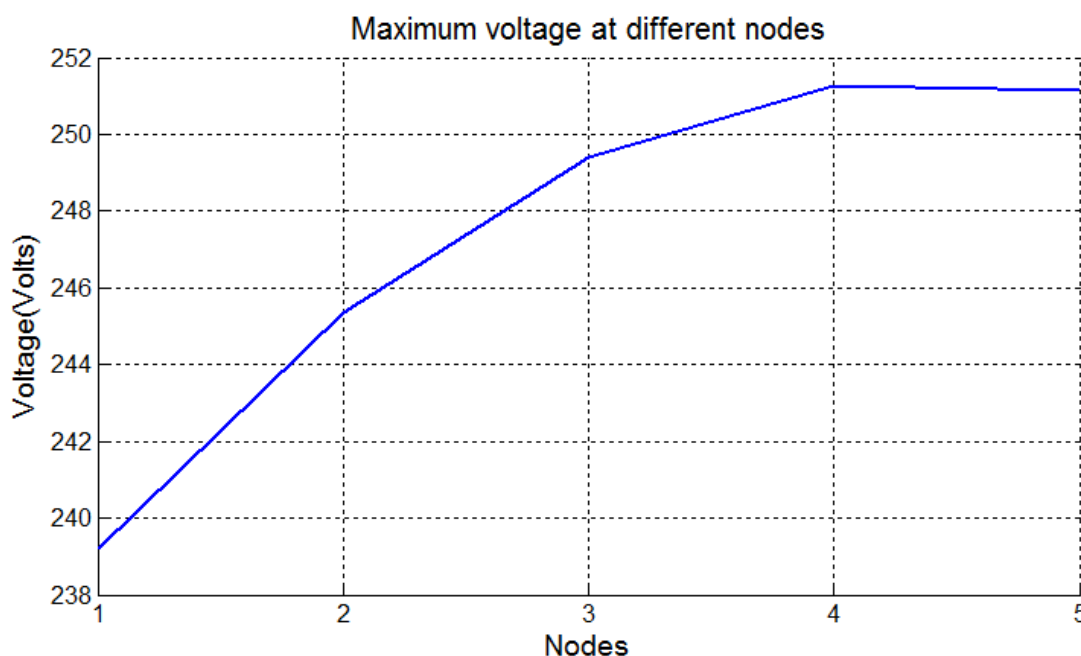
Παρατηρείται πως οι τάσεις στα PCC λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τις ώρες όπου μεγιστοποιείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή. Αν, επίσης, τις ώρες αυτές το φορτίο λαμβάνει μικρές τιμές (μέγιστη παραγωγή-ελάχιστο φορτίο), όπως φαίνεται και στα διαγράμματα των σχημάτων 5.57 και 5.58 (π.χ. 10:00-12:00 και 12:00-14:00 αντίστοιχα), τότε το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης επιδεινώνεται.

## Σενάριο 1.2

Στο σενάριο αυτό δεν θα εγκατασταθεί φωτοβολταϊκό σύστημα στους “χειρότερους” (πιο απομακρυσμένους) κόμβους του δικτύου 5 και 10. Έτσι αφού καταγραφούν ξανά τα επίπεδα των τάσεων, θα αναλυθεί η συμπεριφορά του δικτύου μέσω των σχημάτων 5.65 και 5.66 που παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές στους αντίστοιχους κόμβους.

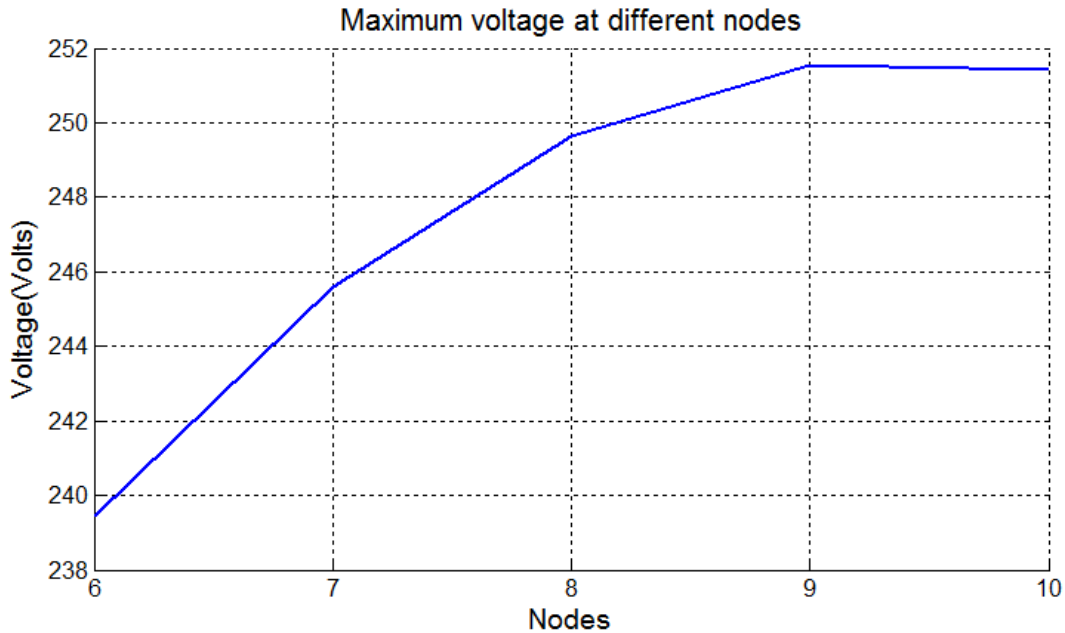
Όπως παρατηρείται λοιπόν στα διαγράμματα των σχημάτων 5.65 και 5.66, η μη εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στον πιο απομακρυσμένο κόμβο λύνει στην ουσία το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης. Χαρακτηριστικά η μέγιστη τιμή του κόμβου 5 (ή και 10) είναι μικρότερη από τον αμέσως προηγούμενο. Ακόμη, όπως φαίνεται στα σχήματα σε κανένα ζυγό δεν υπάρχει παραβίαση των ορίων.

Ωστόσο, τα δίκτυα διανομής ΧΤ παρουσιάζουν χαώδη συμπεριφορά και πολλές φορές ούτε ο διαχειριστής του δικτύου δεν έχει επαρκή στοιχεία για τα χαρακτηριστικά τους. Ακόμη, δεν θα μπορούσε να αποτραπεί κάποιος από το να εγκαταστήσει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα επειδή δημιουργείται πρόβλημα στις γραμμές μεταφοράς, το Μ/Σ ή στο δίκτυο διανομής γενικότερα.



Σχήμα 5.65 Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 1-5 (Σενάριο 1.2)

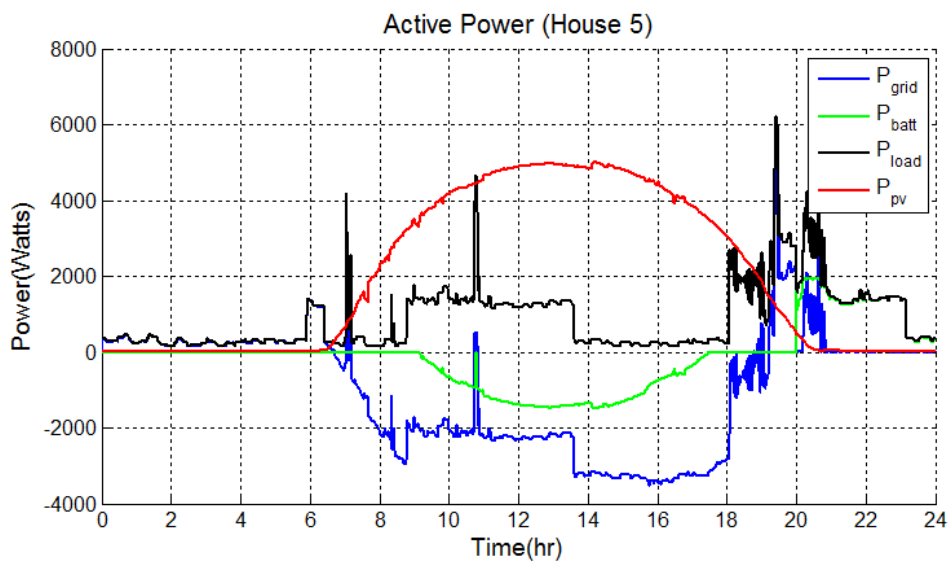
Έτσι, πρέπει ο διαχειριστής να προβεί σε άλλες λύσεις, όπως την αναβάθμιση του δικτύου κλπ. Μία από αυτές είναι το λεγόμενο decentralized storage που μελετάται στη παρούσα εργασία.



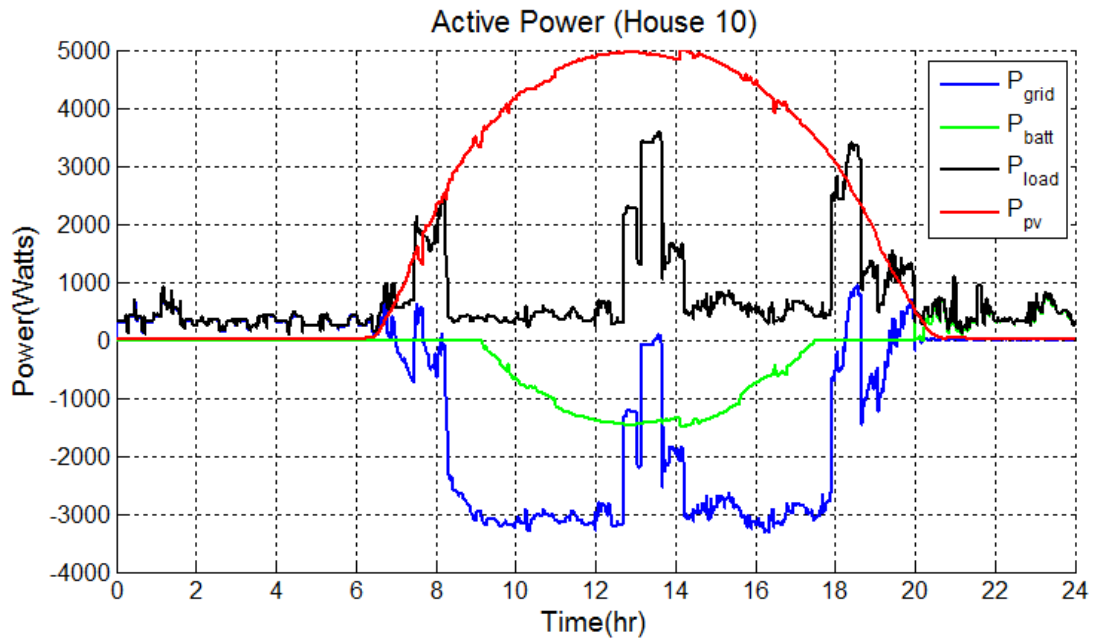
Σχήμα 5.66 Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 6-9 (Σενάριο 1.2)

### Σενάριο 1.3

Στο σενάριο αυτό θα εγκατασταθούν αποθηκευτικά συστήματα μόνο στους πιο απομακρυσμένους κόμβους 5 και 10. Τα σχήματα 5.67 και 5.68 εικονίζουν το ισοζύγιο της ενεργού ισχύος για τα σπίτια 5 και 10 αντίστοιχα.

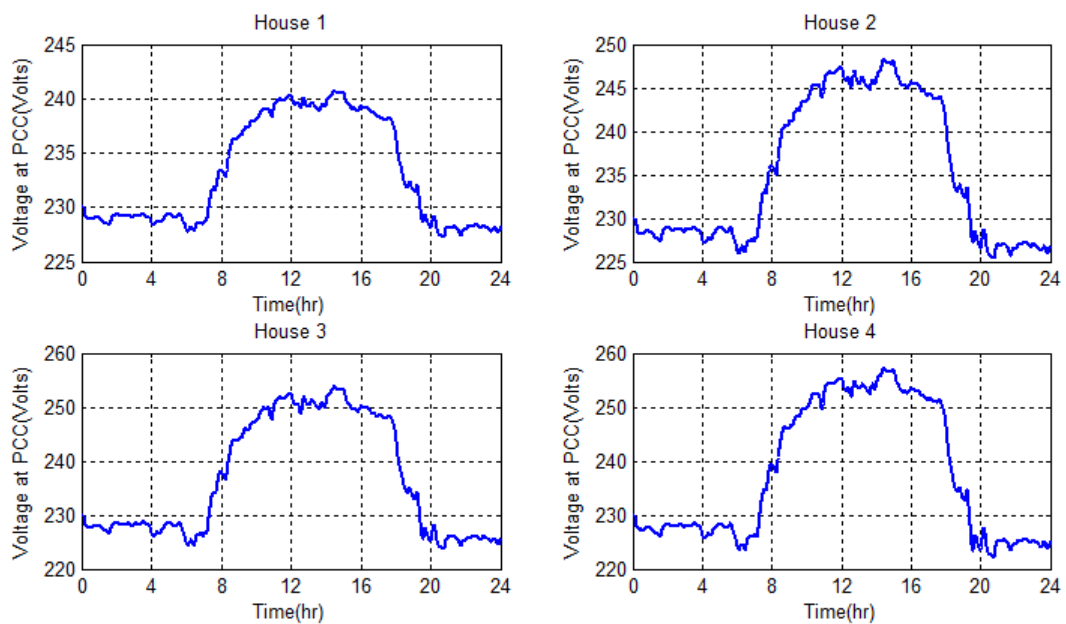


Σχήμα 5.67 Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 5 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 1.3)



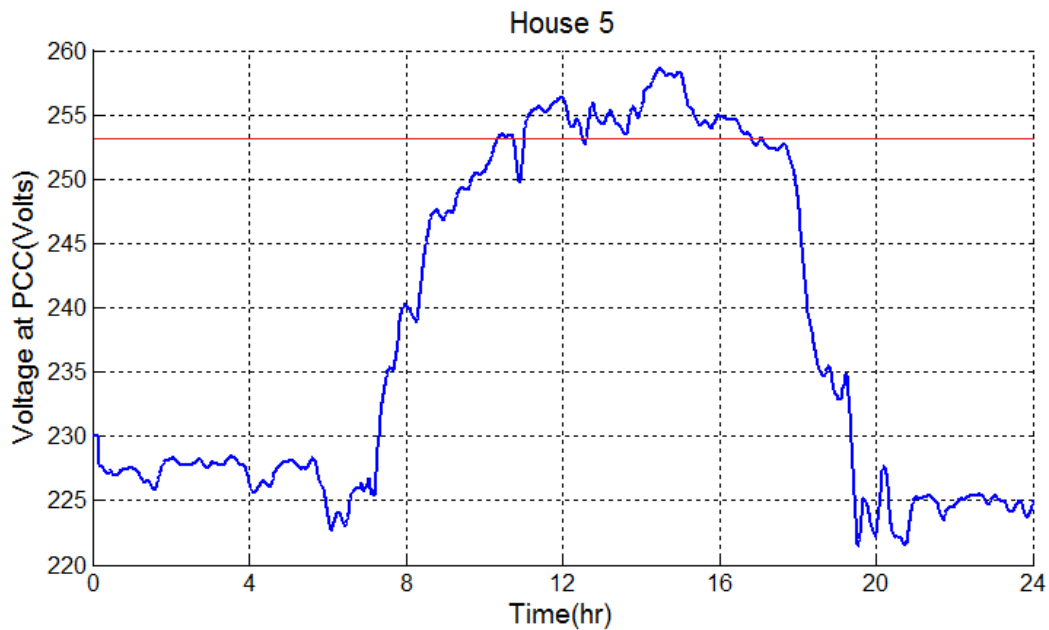
**Σχήμα 5.68** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 10 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 1.3)

Στα διαγράμματα των σχημάτων 5.69 και 5.70 εικονίζονται τα προφίλ των τάσεων στους κόμβους 1 έως 5 μέσω των δεκαλέπτων RMS τιμών τους. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του σεναρίου 1.3 (εγκατάσταση αποθηκευτικών συστημάτων στους πιο απομακρυσμένους κόμβους) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του σεναρίου 1.1 (σχήματα 5.59 και 5.60) παρατηρείται έντονη διαφορά στις τιμές των τάσεων, ωστόσο το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης παραμένει.



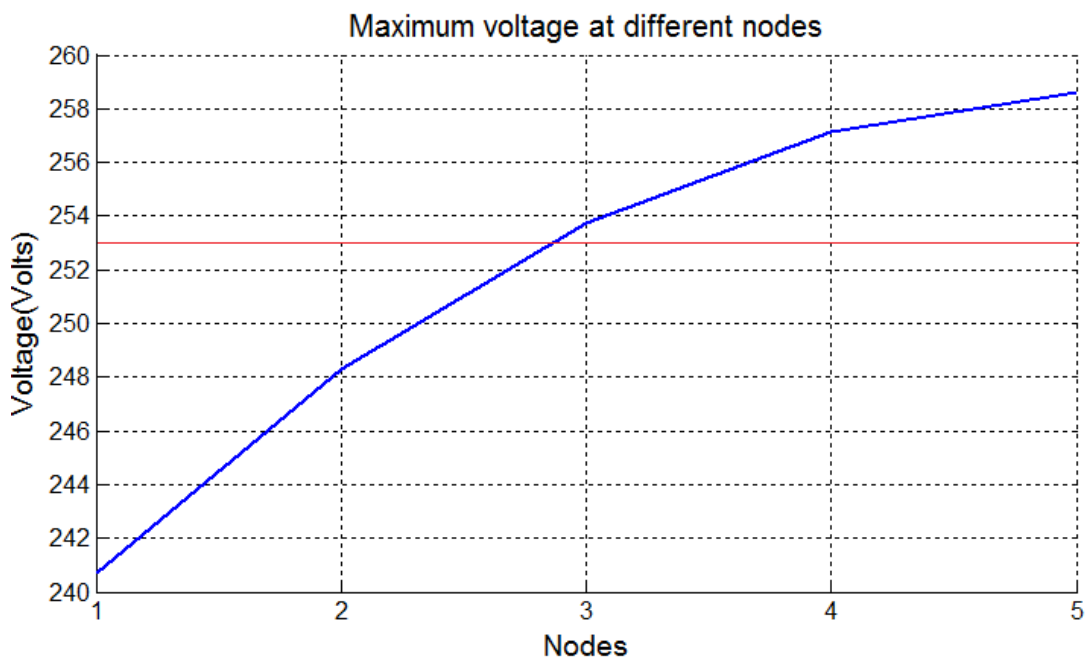
**Σχήμα 5.69** Οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 1 έως 4 (Σενάριο 1.3)





**Σχήμα 5.70** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 5 (Σενάριο 1.3)

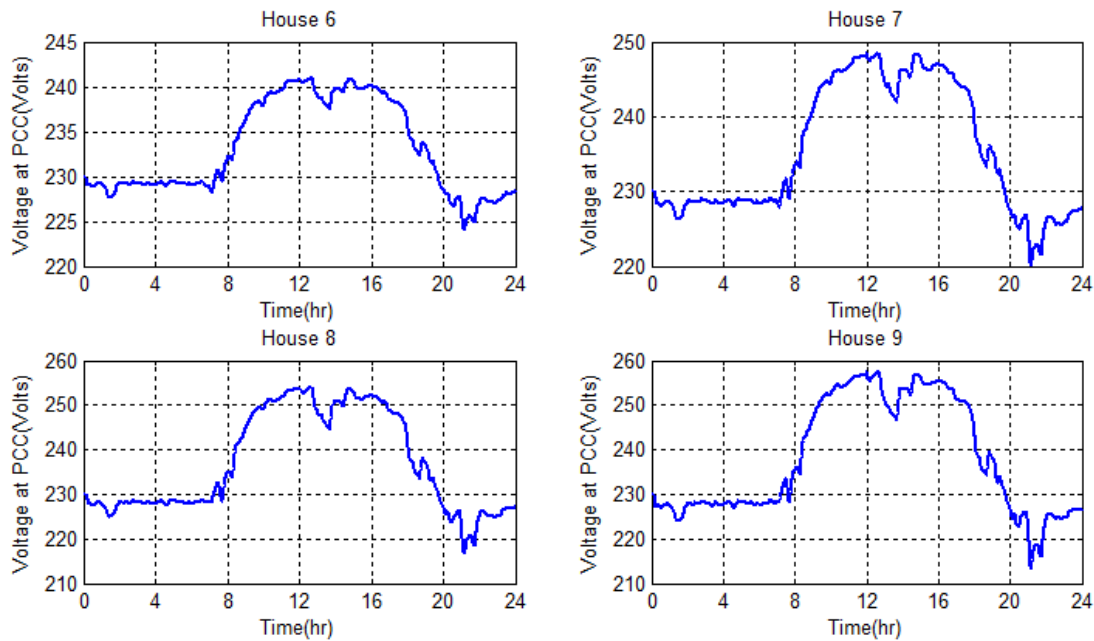
Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.71 το οποίο εικονίζει τις μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 1 έως 5, το όριο των 253 V υπερβαίνεται οριακά στον κόμβο 3. Ενώ, στο κόμβο 4 και 5 υπάρχει αισθητή βελτίωση συγκριτικά με το διάγραμμα του σχήματος 5.61 του σεναρίου 1.1, ωστόσο το πρόβλημα δεν εξαλείφεται.



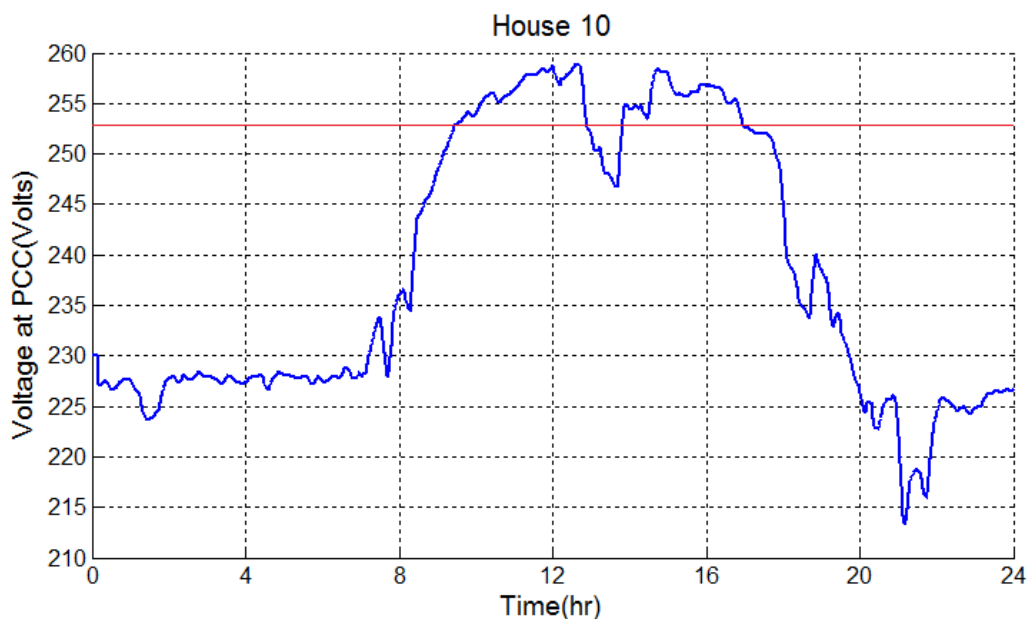
**Σχήμα 5.71** Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 1-5 (Σενάριο 1.3)

Στα σχήματα 5.71, 5.72 και 5.73 παρουσιάζονται τα προφίλ των τάσεων για τους κόμβους του δικτύου 6 έως και 9 στη διάρκεια της ημέρας προσομοιώσεων, καθώς επίσης και οι μέγιστες τιμές που λαμβάνουν στους αντίστοιχους κόμβους.

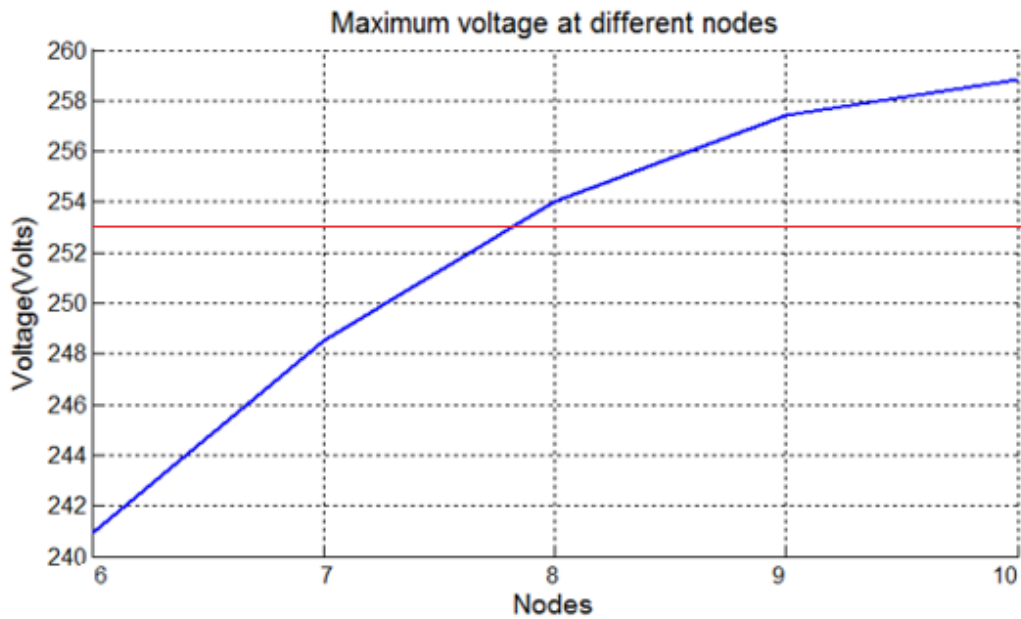
Αντίστοιχα, αποτελέσματα λαμβάνουμε και σε αυτή τη περίπτωση. Ενώ, υπάρχει βελτίωση στο προφίλ των τάσεων σε όλους τους κόμβους το πρόβλημα δεν αντιμετωπίζεται επαρκώς.



**Σχήμα 5.72** Οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 6 έως 9 (Σενάριο 1.3)



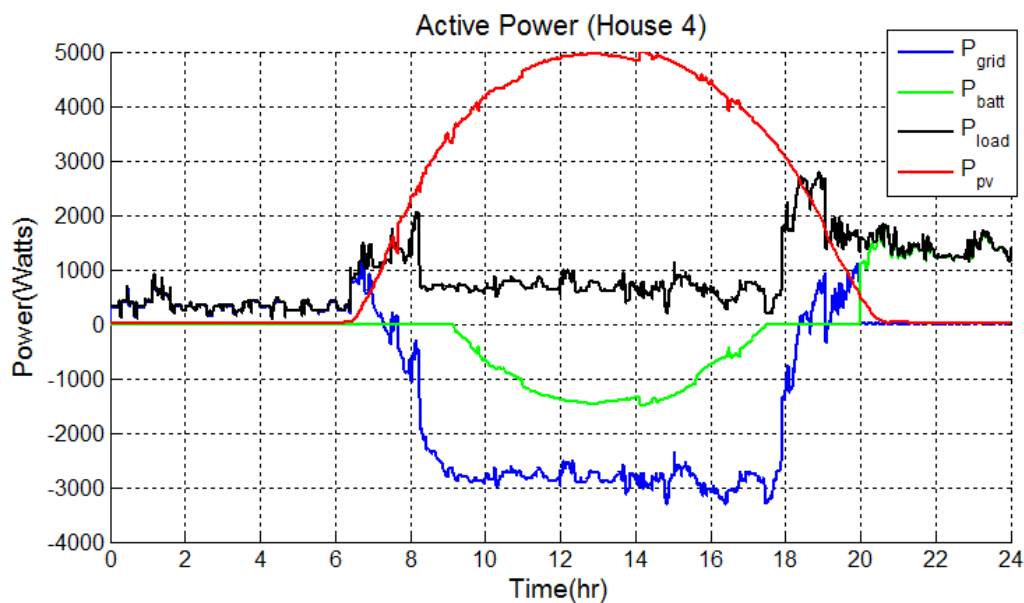
**Σχήμα 5.73** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 10 (Σενάριο 1.3)



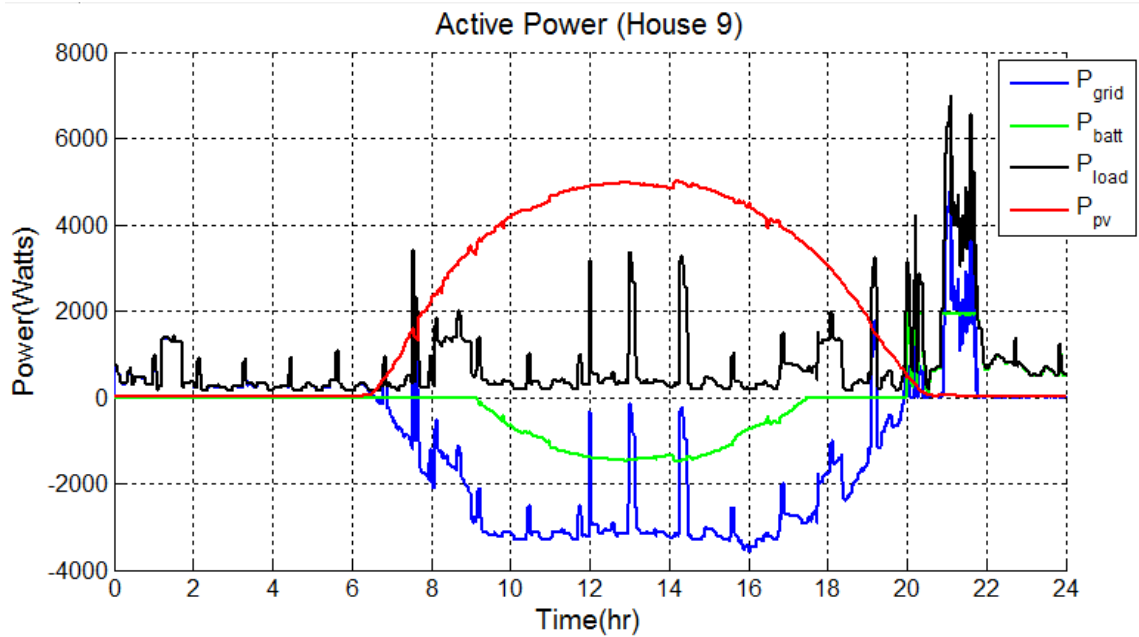
Σχήμα 5.74 Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 6-9 (Σενάριο 1.3)

### Σενάριο 1.4

Στο παρών σενάριο θα τοποθετηθούν αποθηκευτικά συστήματα σε όλους τους κόμβους που παρουσίασαν πρόβλημα ανύψωσης της τάσης πέραν των ορίων εξαρχής. Πιο συγκεκριμένα, θα τοποθετηθούν συστήματα στους κόμβους 3,4,5 αλλά και 8,9,10. Στα σχήματα 5.75 και 5.76 εικονίζεται το ισοζύγιο της ενεργού ισχύος για τα σπίτια 4 και 9 αντίστοιχα.

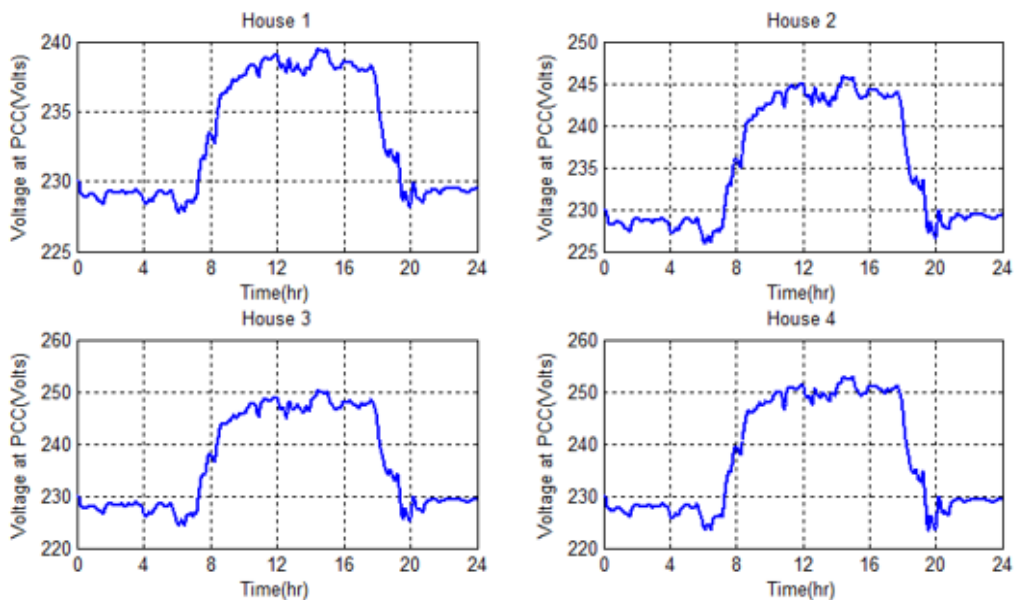


Σχήμα 5.75 Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 10 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 1.4)

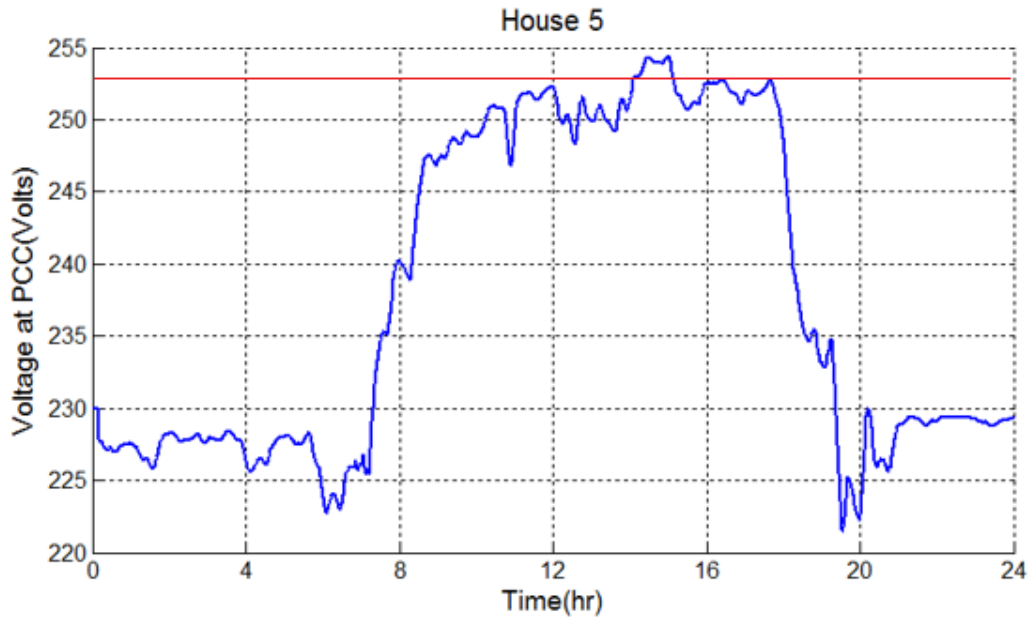


**Σχήμα 5.76** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 9 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 1.4)

Στα διαγράμματα των σχημάτων 5.77 και 5.78 εικονίζονται τα προφίλ των τάσεων έτσι όπως διαμορφώθηκαν για το σενάριο 1.4 και για τις οικίες 1 έως 5.

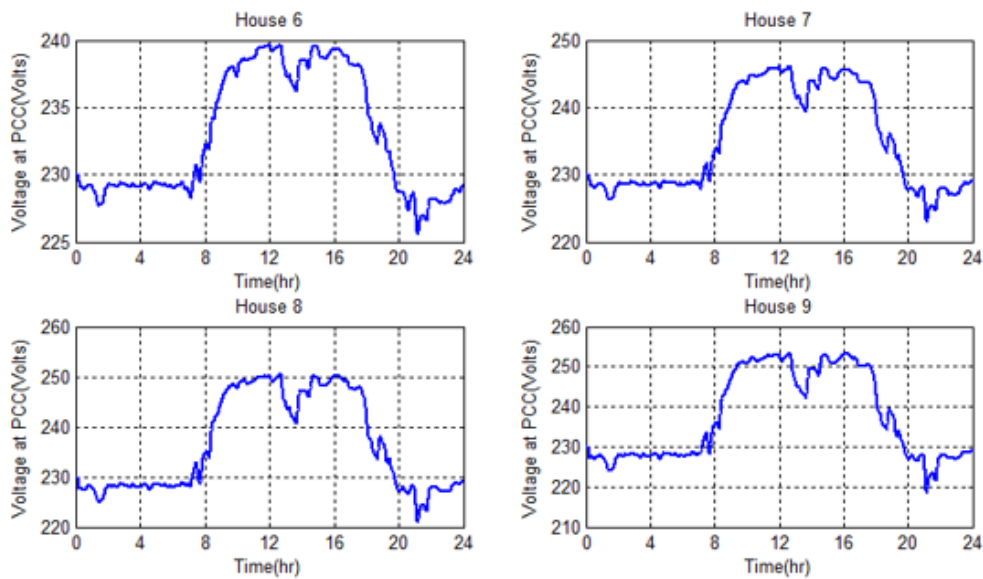


**Σχήμα 5.77** Οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 1 έως 4 (Σενάριο 1.4)

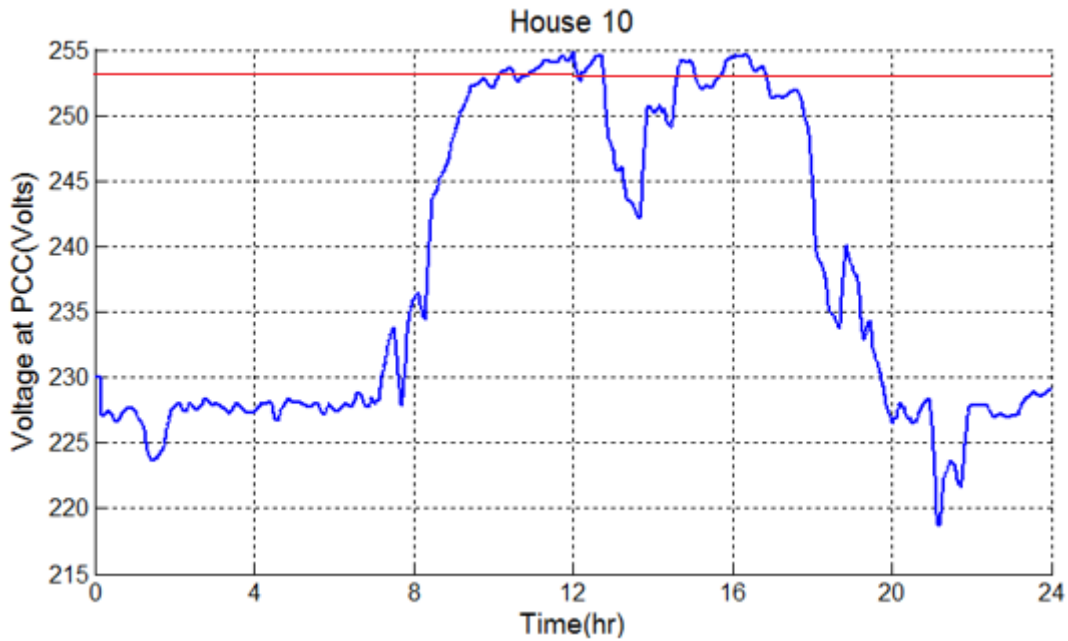


**Σχήμα 5.78** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 5 (Σενάριο 1.4)

Τα αποτελέσματα των τάσεων που καταγράφηκαν στους ζυγούς 6 έως 9 απεικονίζονται στα διαγράμματα των σχημάτων 5.79 και 5.80.

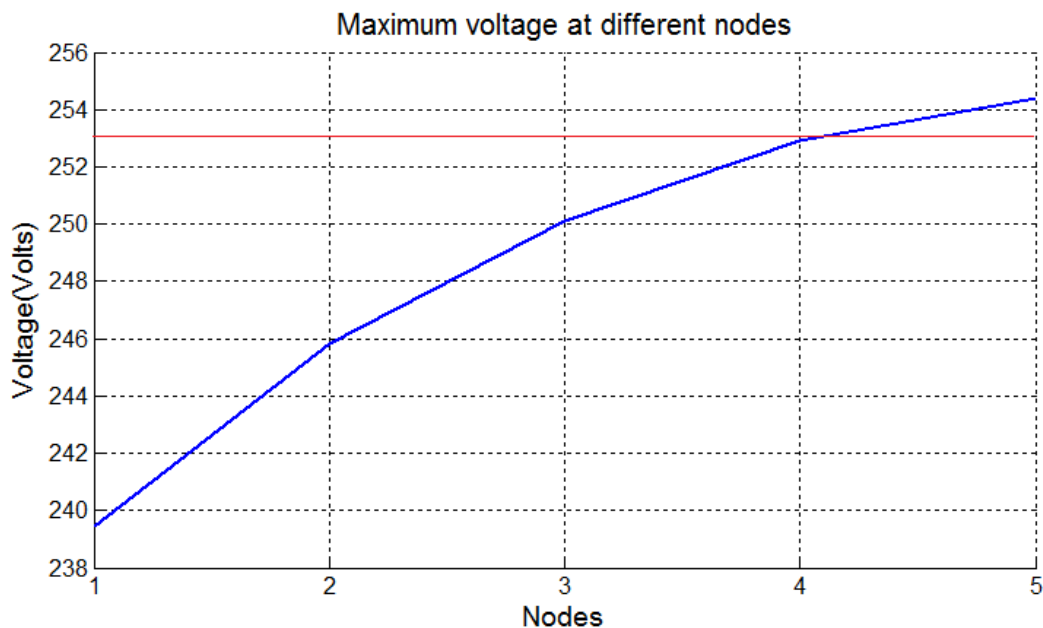


**Σχήμα 5.79** Οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 6 έως 9 (Σενάριο 1.4)

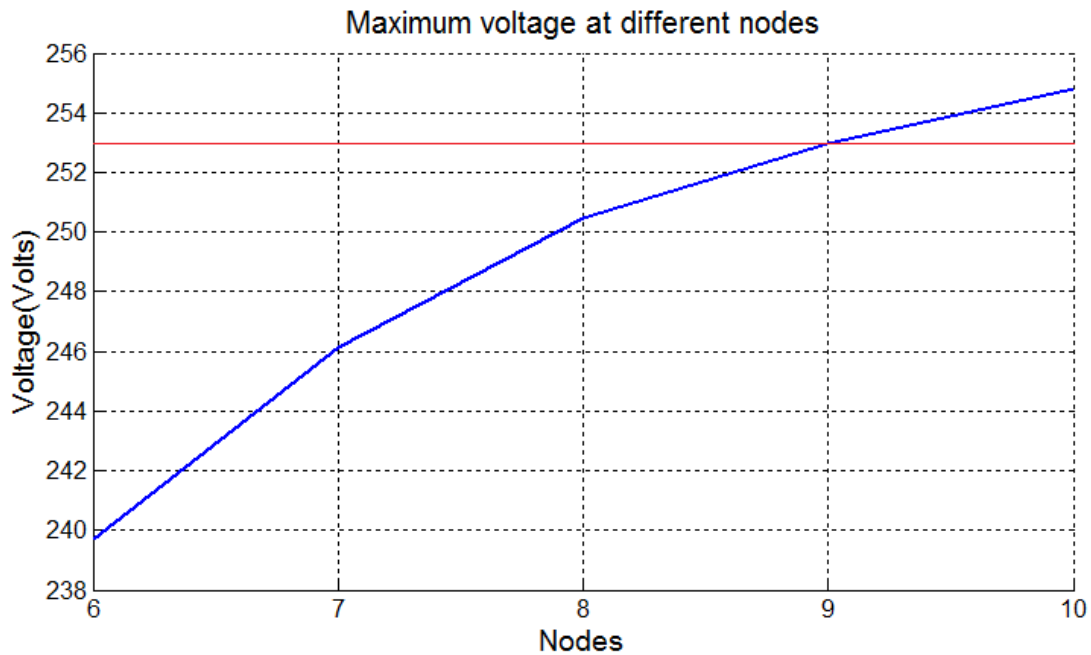


**Σχήμα 5.80** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 10 (Σενάριο 1.4)

Στα παραπάνω αποτελέσματα του σεναρίου 1.4 παρατηρούμε βελτίωση όσον αφορά τις τάσεις που καταγράφονται στα σημεία κοινής σύνδεσης των σπιτιών. Πιο συγκεκριμένα, για τις οικίες 1 έως και 4, όπως και 6 έως 9 τα προφίλ των τάσεων παραμένουν εντός των ορίων. Αντίστοιχα, για τις οικίες 5 και 10 η παραβίαση των ορίων είναι ελάχιστη. Τα παραπάνω επιβεβαιώνουν και τα σχήματα 5.81, 5.82 που εικονίζουν τις μέγιστες τιμές των τάσεων όπως αυτές διαμορφώθηκαν στους κόμβου του δικτύου για το σενάριο 1.4.



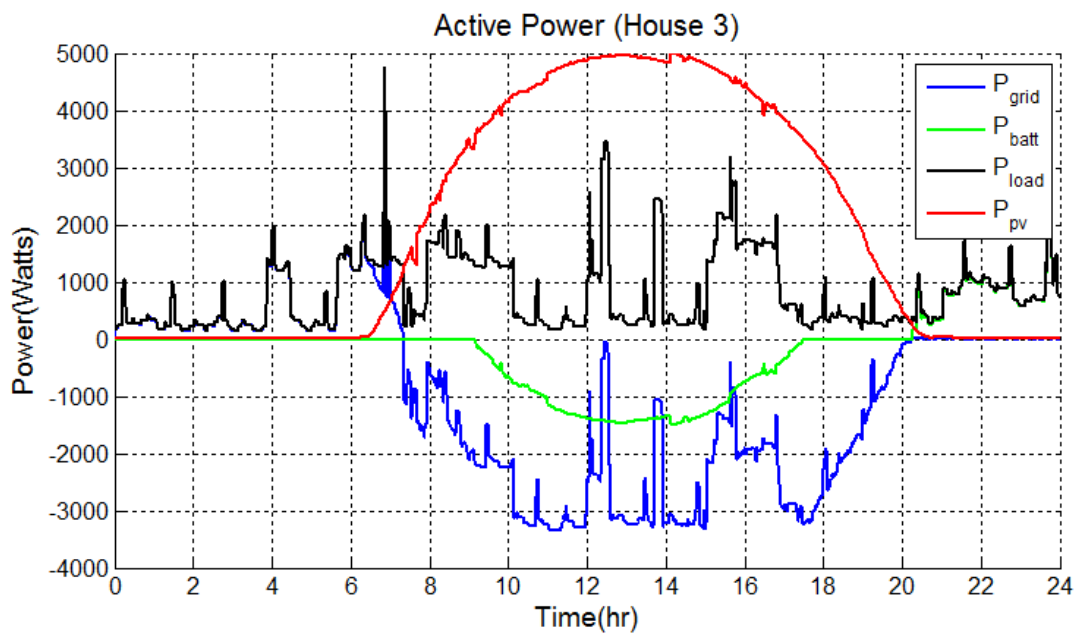
**Σχήμα 5.81** Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 1-5 (Σενάριο 1.4)



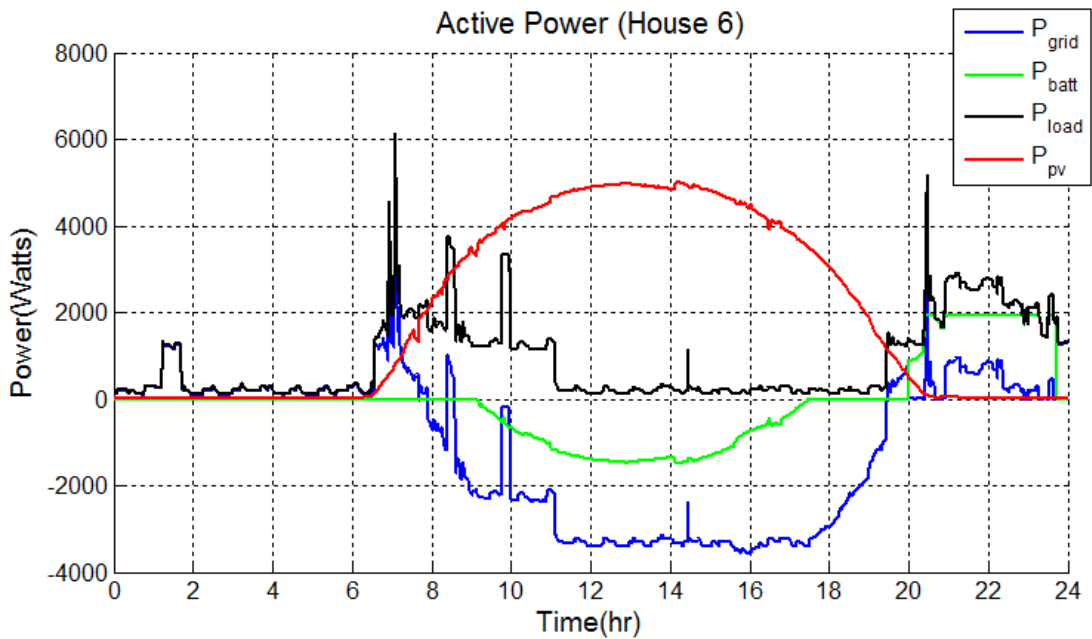
Σχήμα 5.82 Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 6-9 (Σενάριο 1.4)

### Σενάριο 1.5

Στο σενάριο 1.5 θα εγκατασταθούν αποθηκευτικά συστήματα σε όλα τα σπίτια του δικτύου. Στα σχήματα 5.83 και 5.84 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα ισοζύγια ενεργού ισχύος των σπιτιών 3 και 6.

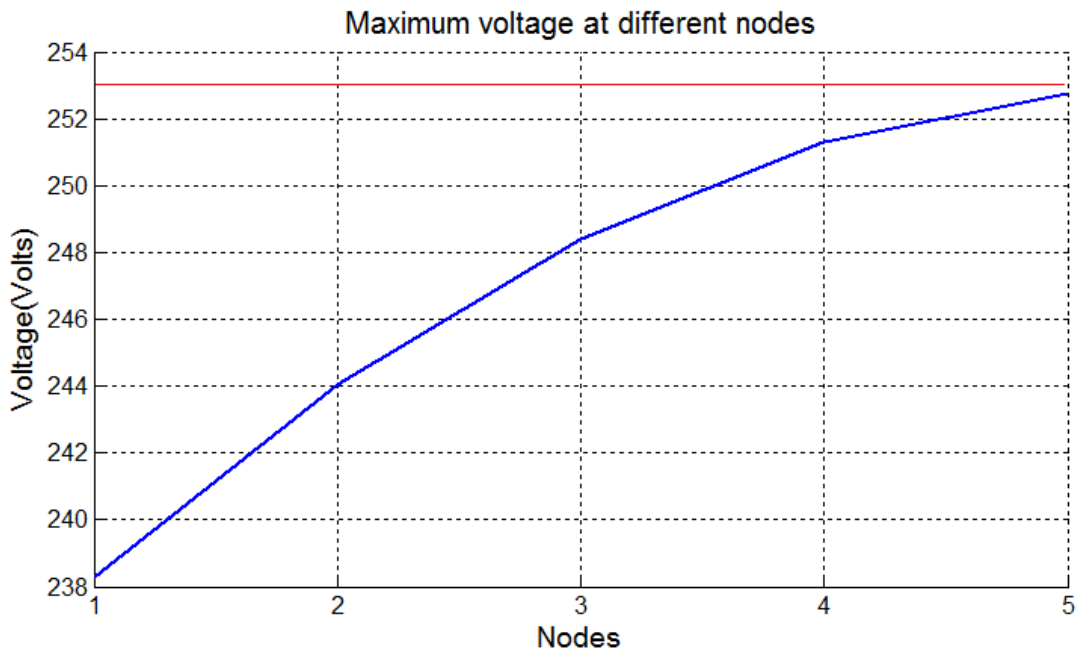


Σχήμα 5.83 Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 3 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 1.5)



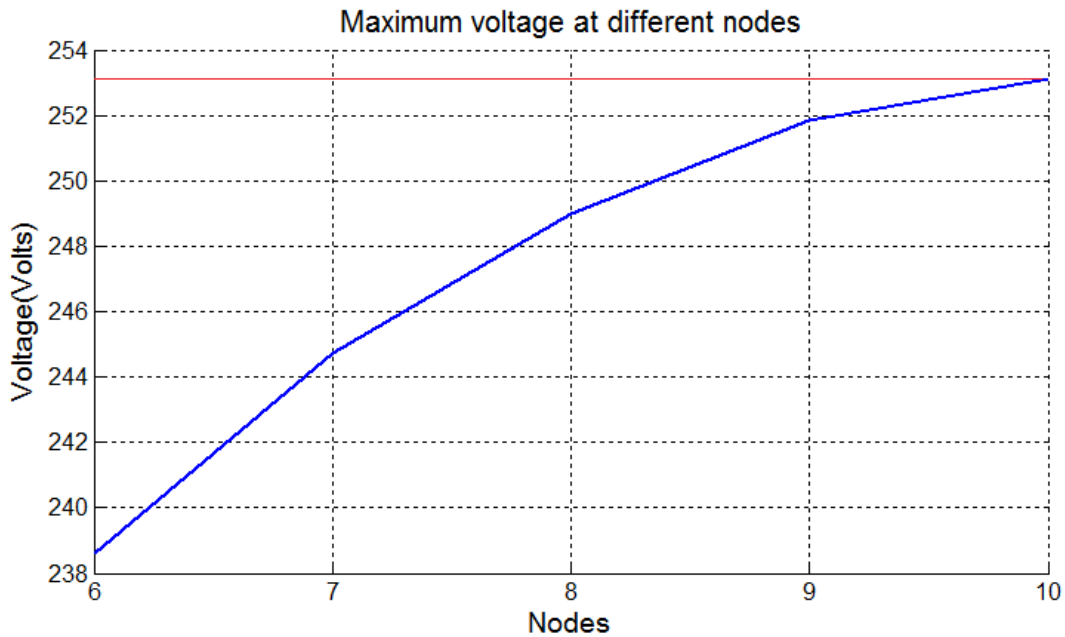
**Σχήμα 5.84** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 6 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 1.5)

Στα διαγράμματα των σχημάτων 5.85 και 5.86, όπου απεικονίζονται οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους διάφορους κόμβους του δικτύου, φαίνεται πως εγκαθιστώντας αποθηκευτικά συστήματα σε όλα τα σπίτια του δικτύου το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης αντιμετωπίζεται πλήρως.



**Σχήμα 5.85** Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 1-5 (Σενάριο 1.5)





**Σχήμα 5.86** Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στους κόμβους 6-9 (Σενάριο 1.5)

Αξίζει να σημειωθεί πως την μεγαλύτερη μεταβολή στα προφίλ των τάσεων επιφέρει η εγκατάσταση αποθηκευτικών συστημάτων σε εκείνους τους κόμβους που παρουσιάζουν πρόβλημα ή γενικότερα στους πιο απομακρυσμένους κόμβους του δικτύου. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η τιμή του κατωφλιού ισχύος  $P_{thr}$  (από το οποίο εξαρτάται και το μέγεθος του αποθηκευτικού συστήματος) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε δικτύου διανομής, από τα επίπεδα της φωτοβολταϊκής διείσδυσης αλλά και από τα προφίλ των καταναλωτών. Ταυτόχρονα, ανάλογα και με τα χαρακτηριστικά του δικτύου διανομής το decentralized storage μπορεί να μην αντιμετωπίζει πλήρως το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης.

Ωστόσο, η αποκεντρωμένη αξιοποίηση των αποθηκευτικών συστημάτων στη διεσπαρμένη παραγωγή θα λέγαμε πως έχει πολλαπλά οφέλη. Ένα από αυτά είναι, όπως φάνηκε και από τις προσομοιώσεις, πως ανακουφίζουν τα δίκτυα διανομής τόσο αποτρέποντας την επιστροφή μεγάλων ποσοτήτων ισχύος στο δίκτυο όσο και αποφορτώνοντας το δίκτυο τις ώρες που μεγιστοποιείται το φορτίο.

Στη συνέχεια, της ενότητας αυτής θα παρουσιαστεί άλλο ένα σει πειραμάτων όπου το απλουστευμένο δίκτυο XT όπου θα εξεταστεί θα έχει πιο ρεαλιστικά χαρακτηριστικά.

## Σενάριο 2.1

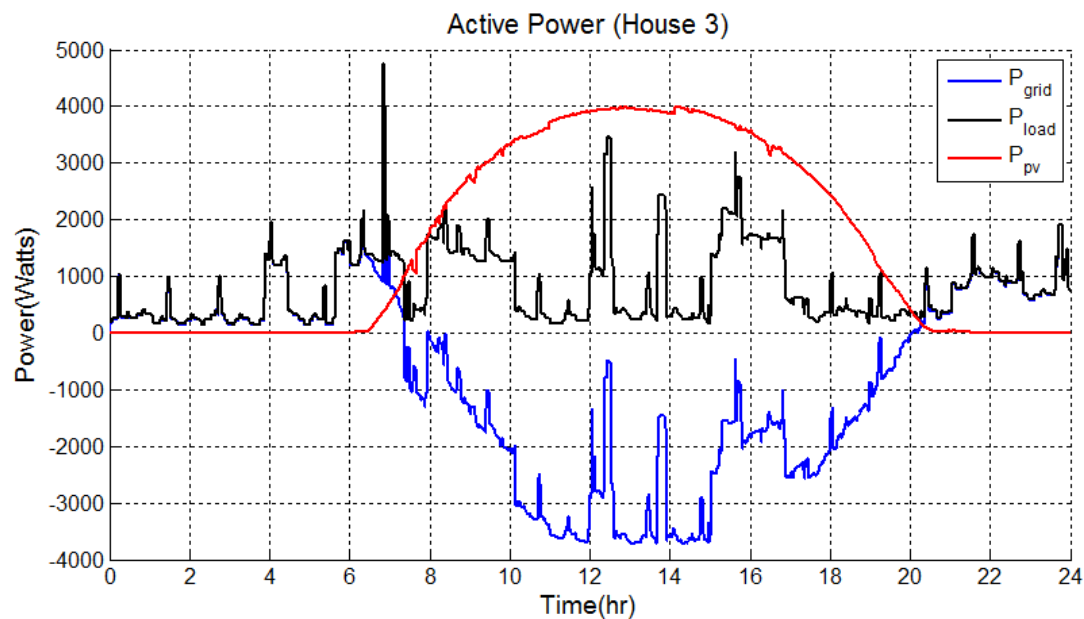
Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης που θα διεξαχθεί για το πρώτο σενάριο του δεύτερου σει προσομοιώσεων, όπως η ονομαστική εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ των μονάδων παραγωγής, το μήκος των γραμμών μεταφοράς και η χωρητικότητα των αποθηκευτικών συστημάτων.

Στα σχήματα 5.87 και 5.88 παρακολουθούμε την ενεργό ισχύ (φωτοβολταϊκή παραγωγή, φορτίο) για δύο τυχαία επιλεγμένες οικίες (House 3, House 10). Σε αυτές

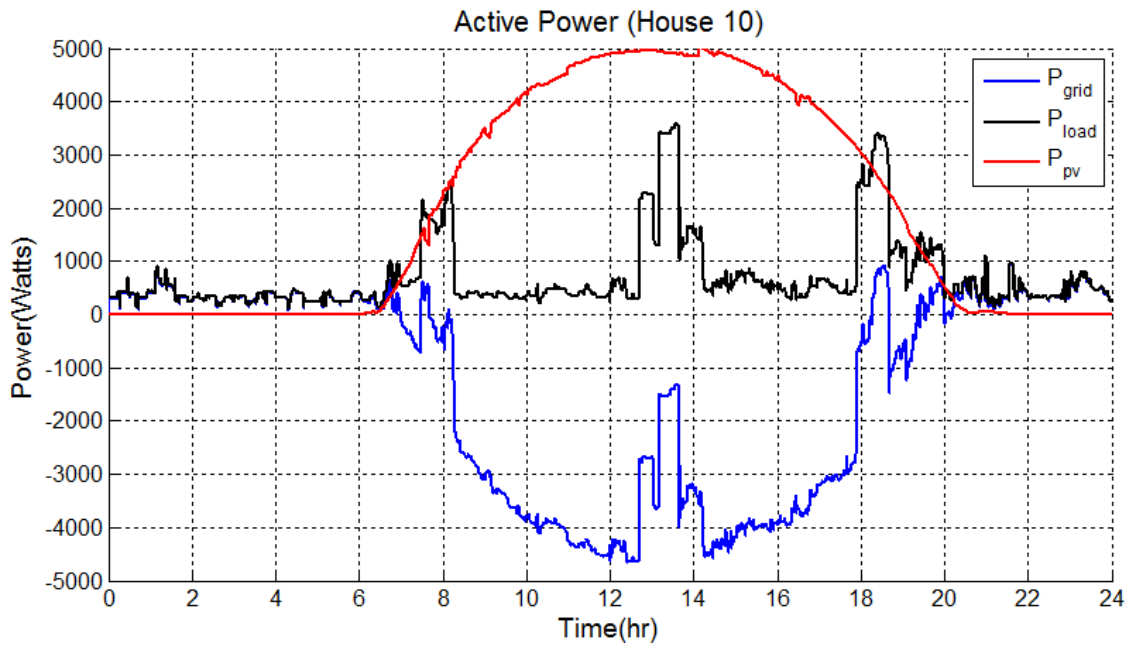
τις προσομοιώσεις δεν έχουν εγκατασταθεί αποθηκευτικά συστήματα. Στο σχήμα 5.59 εικονίζονται οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων όπως διαμορφώθηκαν στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) 1 έως 4 για τη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας των συστημάτων.

**Πίνακας 3** Σενάριο 2.1: Χαρακτηριστικά μεθόδου προσομοίωσης

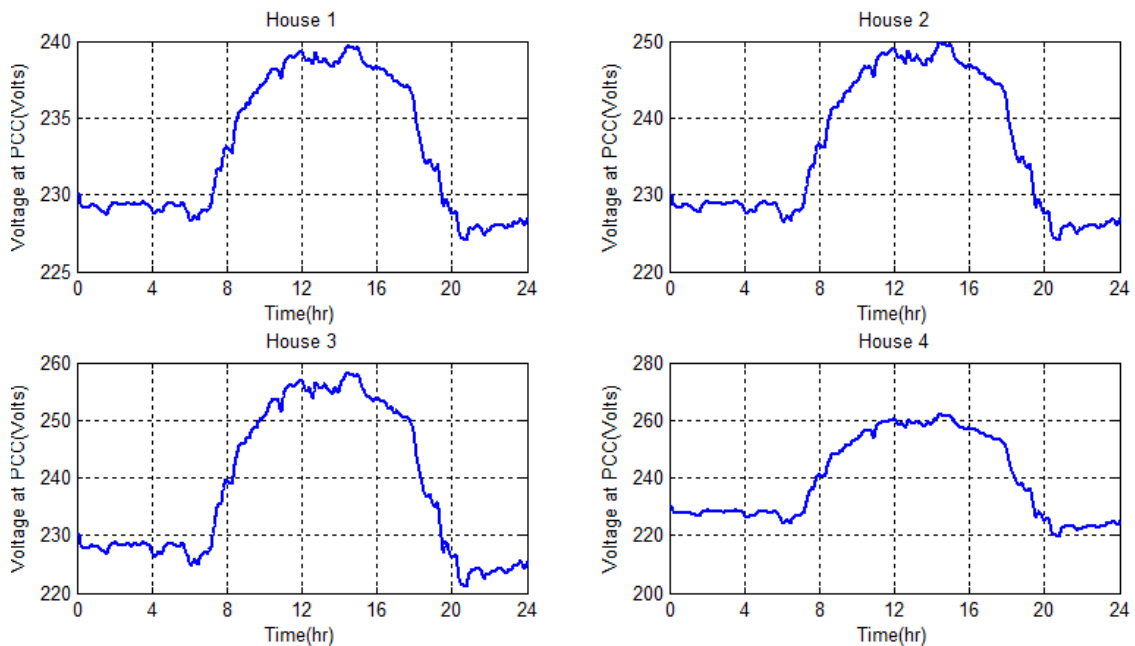
House (#)	Nominal PV <sub>peak</sub> Output (kWp)	Storage System (kWh)	Length of Transmission Line (m)
1	3	-	150
2	6	-	200
3	4	-	220
4	6	-	120
5	5	-	135
6	4	-	200
7	6	-	180
8	6	-	250
9	5	-	280
10	5	-	320



**Σχήμα 5.87** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 3 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 2.1)



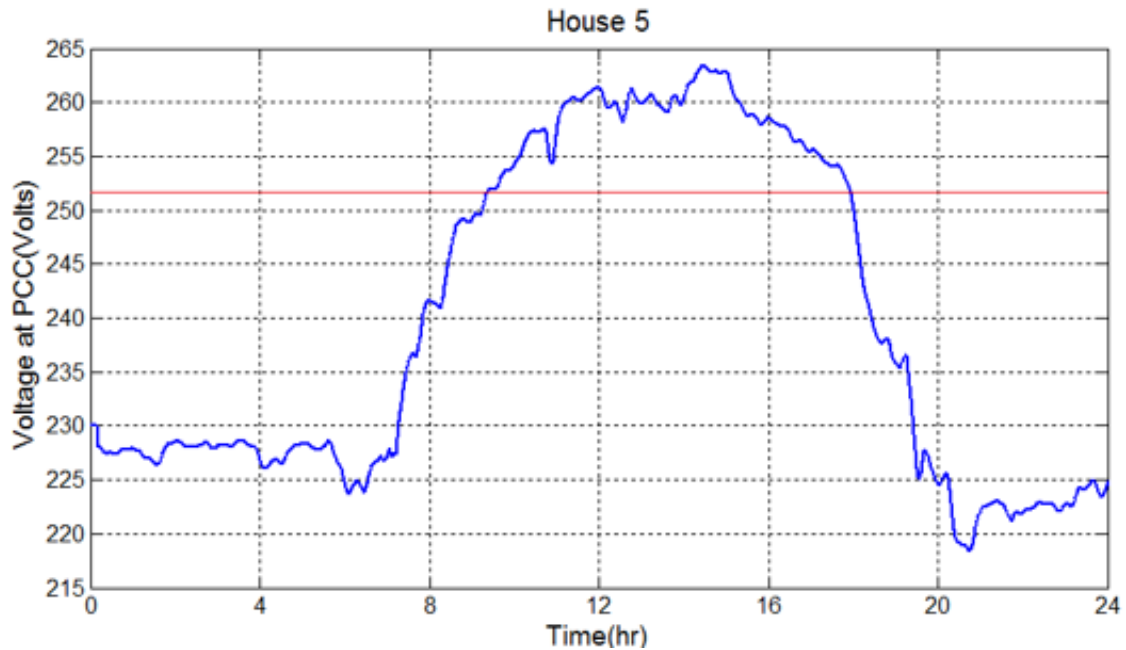
**Σχήμα 5.88** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 10 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 2.1)



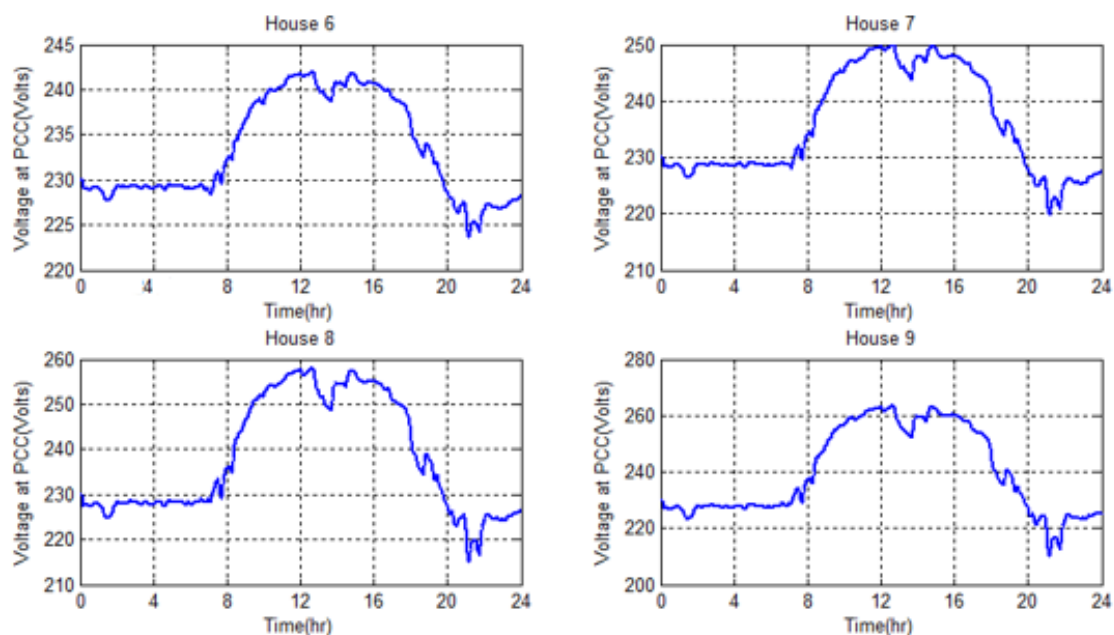
**Σχήμα 5.89** Η δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 1 έως 4 (Σενάριο 1)

Από τα διαγράμματα του σχήματος 5.89 παρατηρείται πως όσο απομακρυνόμαστε από το Μ/Σ τόσο αυξάνεται η τιμή των τάσεων στα PCC. Τα προφίλ των τάσεων των οικιών 1 και 2 δεν ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια 253 V και 207 V ( $\pm 10\%$  της ονομαστικής τιμής), ενώ στις οικίες 3 και 4 υπάρχει παραβίαση του πάνω ορίου. Στο σχήμα 5.90 εικονίζεται το προφίλ της τάσης στο PCC της οικίας 5. Όπως παρατηρείται

από τα σχήματα 5.89 και 5.90, η τάση λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές στον ζυγό 5, δηλαδή στον πιο απομακρυσμένο κόμβο, όπως ήταν αναμενόμενο.



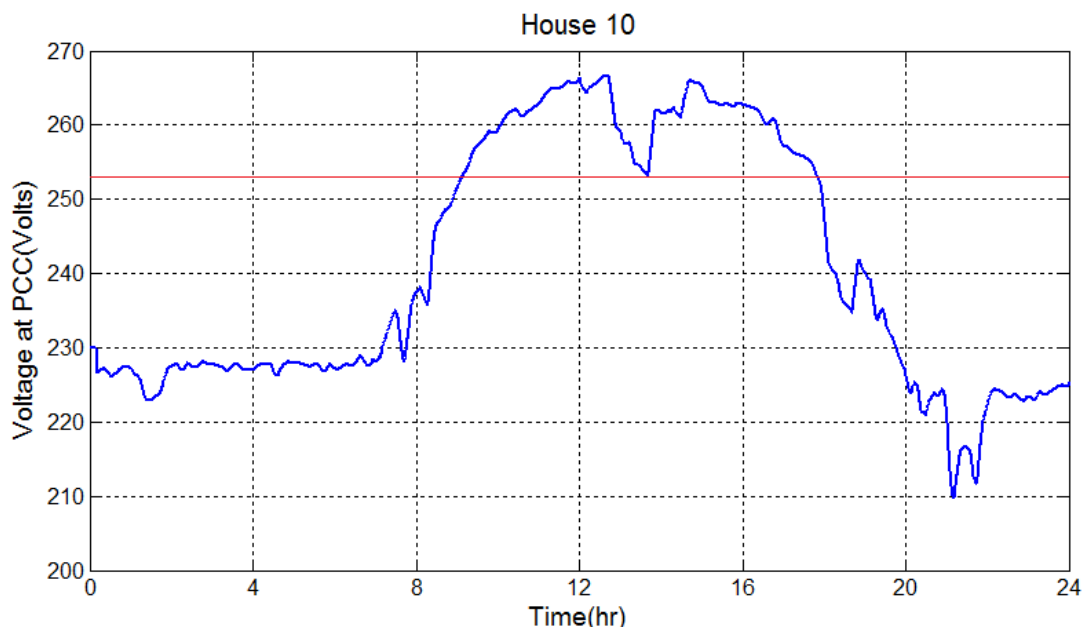
**Σχήμα 5.90** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 5 (Σενάριο 2.1)



**Σχήμα 5.91** Η δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 6 έως 9 (Σενάριο 2.1)

Στο σχήμα 5.91 παρουσιάζονται τα προφίλ των τάσεων όπως διαμορφώθηκαν στους ζυγούς 6 έως και 9. Και σε αυτή τη περίπτωση τα προφίλ των τάσεων παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όπως πριν. Δηλαδή οι τιμές των τάσεων αυξάνονται όσο

απομακρυνόμαστε από το  $M/\Sigma$  (αφού αυξάνονται τα συνολικά μήκη των γραμμών μεταφοράς δηλαδή το  $R$  και το  $X$  της εξίσωσης (5.2)). Το σχήμα 5.92 παρουσιάζει το προφίλ της τάσης για τον κόμβο 10. Στους κόμβους 6 και 7 οι τάσεις παρέμειναν μεταξύ των επιτρεπτών ορίων, ενώ στους κόμβους 8, 9 και 10 παραβιάστηκε το πάνω όριο των 253 V.



**Σχήμα 5.92** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 10 (Σενάριο 2.1)

Παρατηρείται πως οι τάσεις στα PCC λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τις ώρες όπου μεγιστοποιείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή. Αν, επίσης, τις ώρες αυτές το φορτίο λαμβάνει μικρές τιμές (μέγιστη παραγωγή-ελάχιστο φορτίο), όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 5.88 (π.χ. 10:00-12:00), τότε το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης επιδεινώνεται.

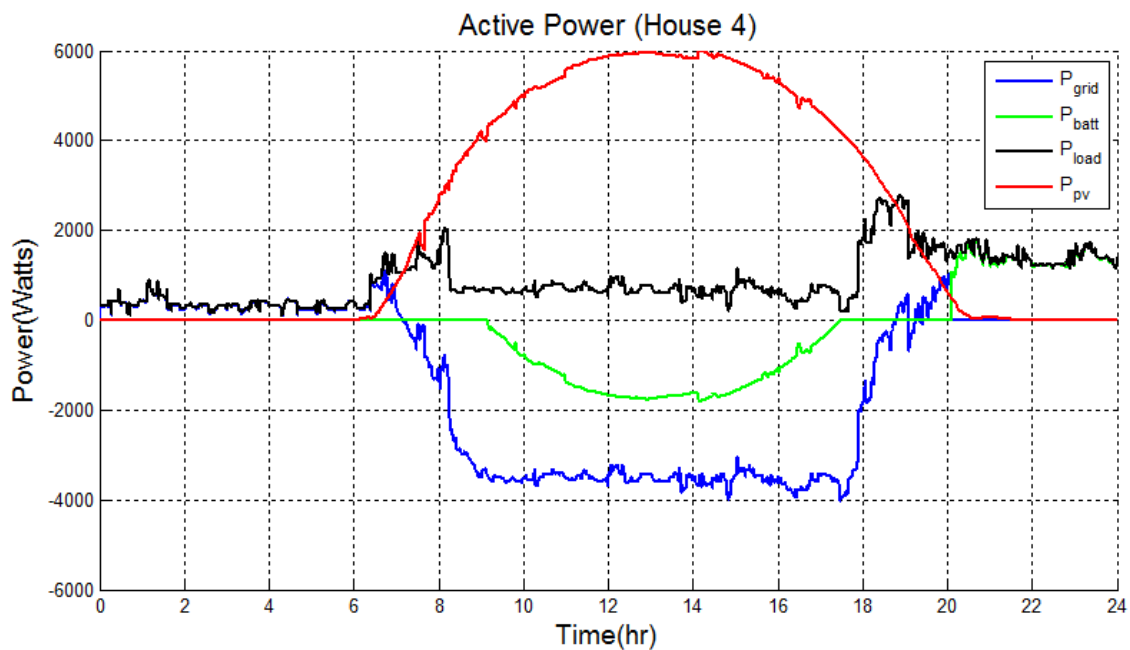
## Σενάριο 2.2

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης, στο σενάριο 2.2 θα τοποθετηθούν αποθηκευτικά συστήματα μόνο στις οικίες που παραβιάστηκαν τα επιτρεπτά όρια των τάσεων. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4, αποθηκευτικά συστήματα θα εγκατασταθούν στους ζυγούς 3,4,5 αλλά και 8,9,10. Η χωρητικότητα των μπαταριών θα εξαρτάται από το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος της εκάστοτε οικίας και θα προκύψει με βάση τη διαστασιολόγηση που πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Προσοχή η χωρητικότητα που αναγράφεται στον πίνακα 4 αντιστοιχεί στην αξιοποιήσιμη χωρητικότητα  $E_{BU}$  και όχι στη συνολική χωρητικότητα των μπαταριών (δες εξίσωση (4.15)).

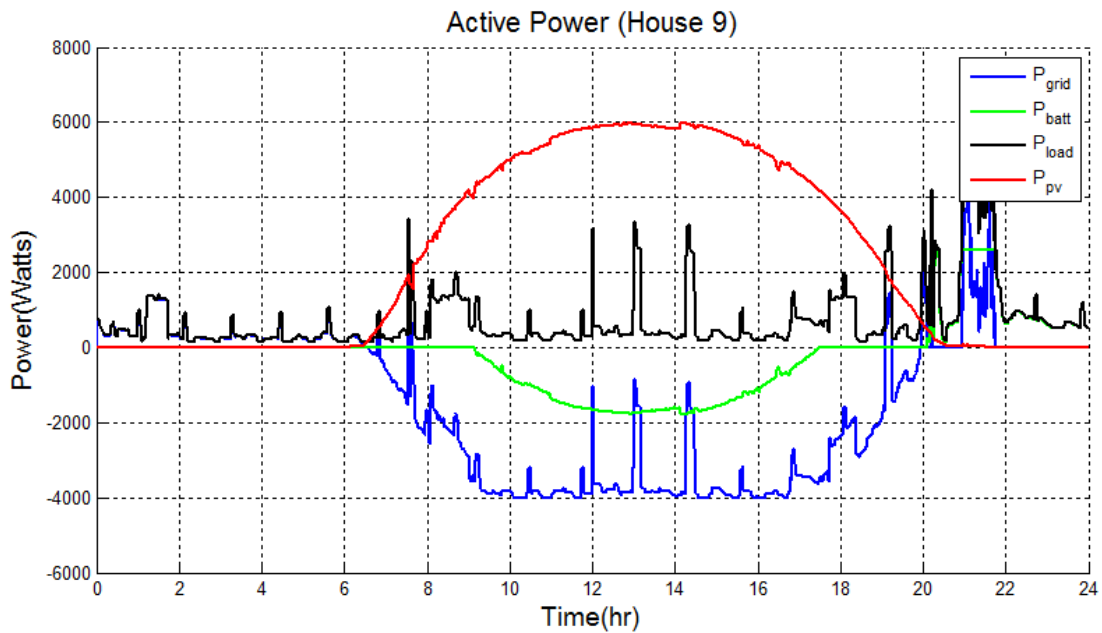
**Πίνακας 4** Σενάριο 2: Χαρακτηριστικά μεθόδου προσομοίωσης

House (#)	Nominal PV <sub>peak</sub> Output (kWp)	Storage System (kWh)	Length of Transmission Line (m)
1	3	-	150
2	6	-	200
3	4	5	220
4	6	9	120
5	5	7	135
6	4	-	200
7	6	-	180
8	6	9	250
9	5	7	280
10	5	7	320

Στα σχήματα 5.93 και 5.94 παρουσιάζεται η ενεργός ισχύς (φωτοβολταϊκή παραγωγή, φορτίο, μπαταρία) για δύο τυχαία επιλεγμένες οικίες (House 4, House 9). Σε αυτές τις προσομοιώσεις τα αποθηκευτικά συστήματα θα εκφορτίζονται πάνω στο φορτίο, όπως φαίνεται και από το σχήμα. Επιπλέον, θα ακολουθείται πάντα η *προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου*. Τέλος, όλες οι μπαταρίες αρχικά είναι άδειες (αρχική κατάσταση φόρτισης 20%). Σε όλες τις προσομοιώσεις τηρείται το όριο της μέγιστης ισχύος φόρτισης/αποφόρτισης με βάση, όπως έχει προαναφερθεί, το ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης των 5 ωρών. Ακόμη, σε όλες τις περιπτώσεις τηρείται το German act και η διαδικασία της φόρτισης των μπαταριών ξεκινά πάντα από το αντίστοιχο  $P_{thr}$  η τιμή του οποίου προκύπτει από το 70% της ονομαστικής τιμής του εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού συστήματος της εκάστοτε οικίας.

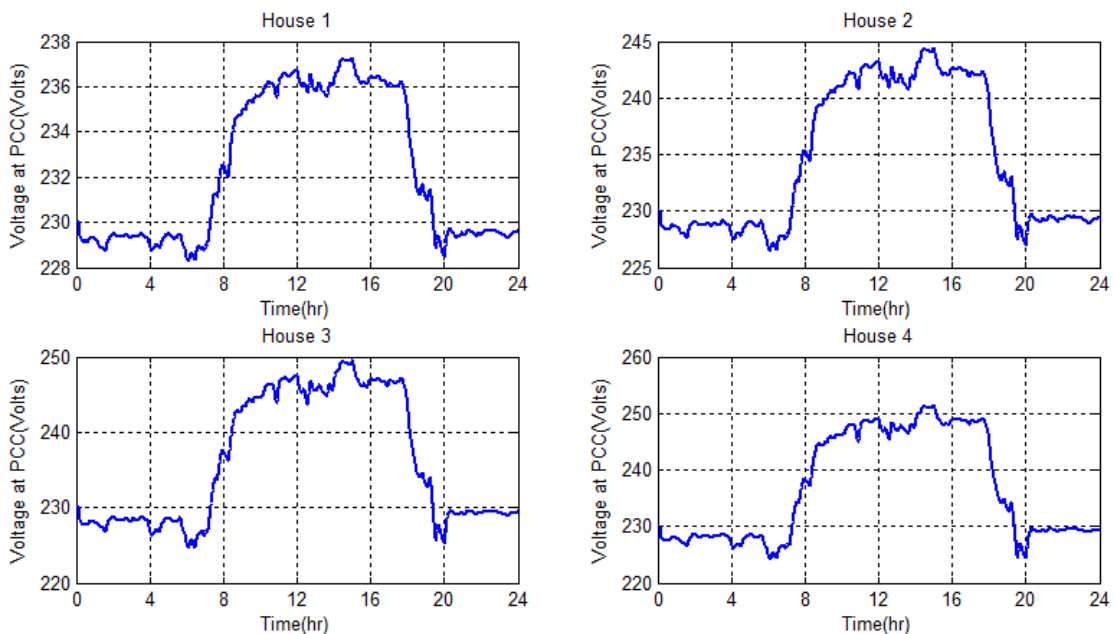


**Σχήμα 5.93** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 9 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 2.2)



**Σχήμα 5.94** Το ισοζύγιο ισχύος (Watts) για την οικία 9 στη διάρκεια της ημέρας (Σενάριο 2.2)

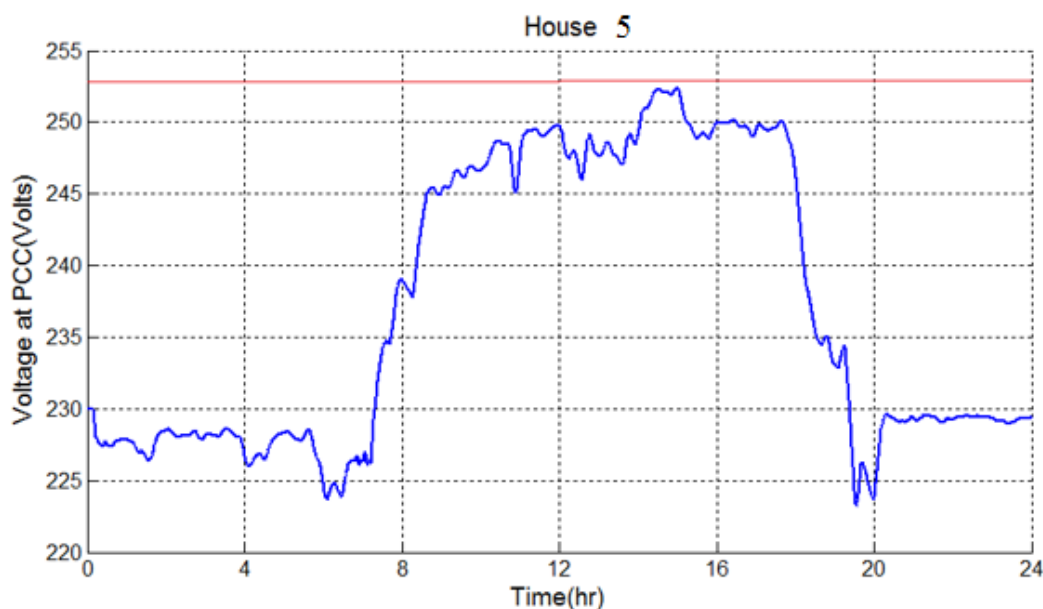
Στο σχήμα 5.95 εικονίζονται οι δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων όπως διαμορφώθηκαν στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) 1 έως 4 για τη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας των συστημάτων του σεναρίου 2.2.



**Σχήμα 5.95** Η δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 1 έως 4 (Σενάριο 2.2)

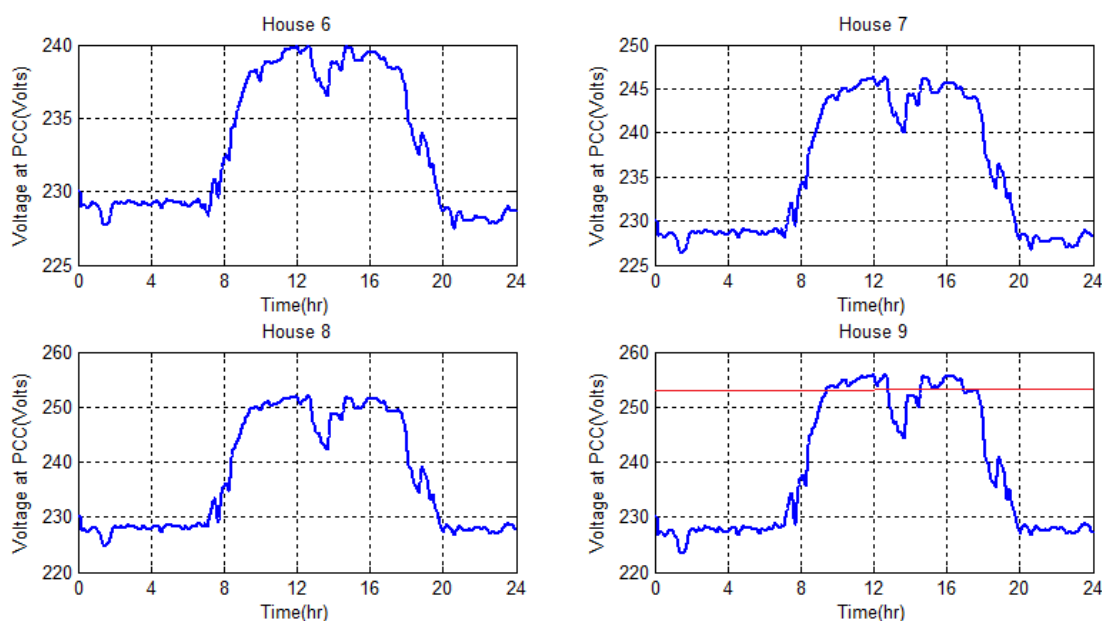
Από το σχήμα 5.95 παρατηρείται πως το πρόβλημα της ανύψωσης της τάσης που εμφανιζόταν στους κόμβους 3 και 4 έχει πλέον εξαλειφθεί. Επίσης, σε όλους του κόμβους ακόμη και σε αυτούς στους οποίους δεν εγκαταστάθηκαν αποθηκευτικά

συστήματα παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές στα προφίλ των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης συγκριτικά με το σενάριο 1. Στο σχήμα 5.96 εικονίζεται το προφίλ της τάσης στο PCC της οικίας 5. Ακόμη, και στο πιο απομακρυσμένο κόμβο τα όρια των τάσεων δεν παραβιάζονται μετά την εγκατάσταση του αποθηκευτικού συστήματος.



**Σχήμα 5.96** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 5 (Σενάριο 2.2)

Στο σχήμα 5.97 παρακολουθούμε τα προφίλ των τάσεων όπως προέκυψαν για το σενάριο 2.2 και για τις οικίες 6 έως και 9.

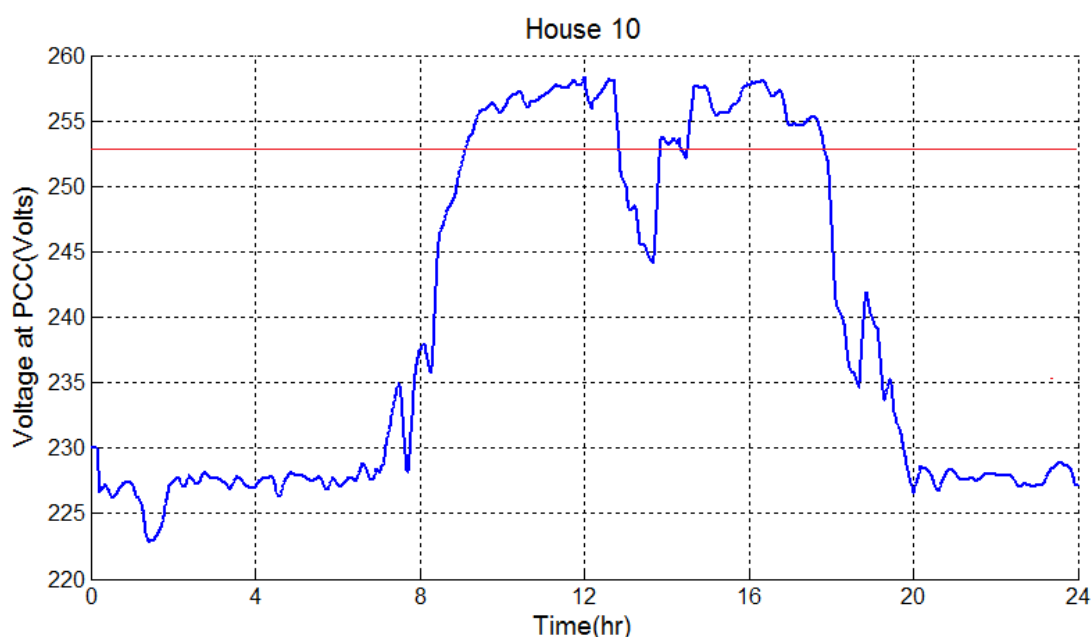


**Σχήμα 5.97** Η δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 6 έως 9 (Σενάριο 2.2)



Σε αυτή τη περίπτωση, και για την οικία 9 τα όρια των τάσεων παραβιάζονται, ενώ τα όρια των τάσεων της οικίας 8 δεν παραβιάζονται παρά μόνο οριακά. Έτσι, όπως αναμένεται αλλά φαίνεται και στο σχήμα 5.98 τα όρια των τάσεων στο PCC της οικίας 10 θα παραβιάζονται εντονότερα. Το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης είναι εμφανέστατα πιο έντονο για τις οικίες που ανήκουν στο σετ των σπιτιών 6 έως 10 καθώς και το μήκος των γραμμών τους είναι μεγαλύτερο. Για παράδειγμα η οικία 10 απέχει από το Μ/Σ 1230 m, ενώ η οικία 5 απέχει 825 m. Όπως εξετάστηκε και στην παράγραφο 5.3 η ανύψωση της τάσης οφείλεται τόσο στην ενεργό/άεργο ισχύ που εγχέεται στο PCC όσο και από το μήκος των γραμμών, σχέση (5.2).

Παρατηρείται λοιπόν πως, ενώ η εγκατάσταση αποθηκευτικών συστημάτων μόνο στους κόμβους που παρουσίαζαν πρόβλημα ανύψωσης της τάσης βοήθησε αισθητά (π.χ. στις οικίες 3,4 και 5 το πρόβλημα εξαλείφθηκε επαρκώς) μειώνοντας γενικότερα τις τιμές των προφίλ των τάσεων, σε κάποιους κόμβους που το πρόβλημα ήταν πιο έντονο, η εγκατάσταση μπαταριών αποκλειστικά και μόνο στους κόμβους αυτούς δεν επαρκεί (π.χ. κόμβοι 9 και 10). Για αυτό το λόγο στο σενάριο 3 θα εγκαταστήσουμε αποθηκευτικά συστήματα σε όλους τους κόμβους του δεύτερου σετ οικιών του προσομοιωμένου δικτύου XT, του σχήματος 5.96.



**Σχήμα 5.98** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 10 (Σενάριο 2.2)

### Σενάριο 2.3

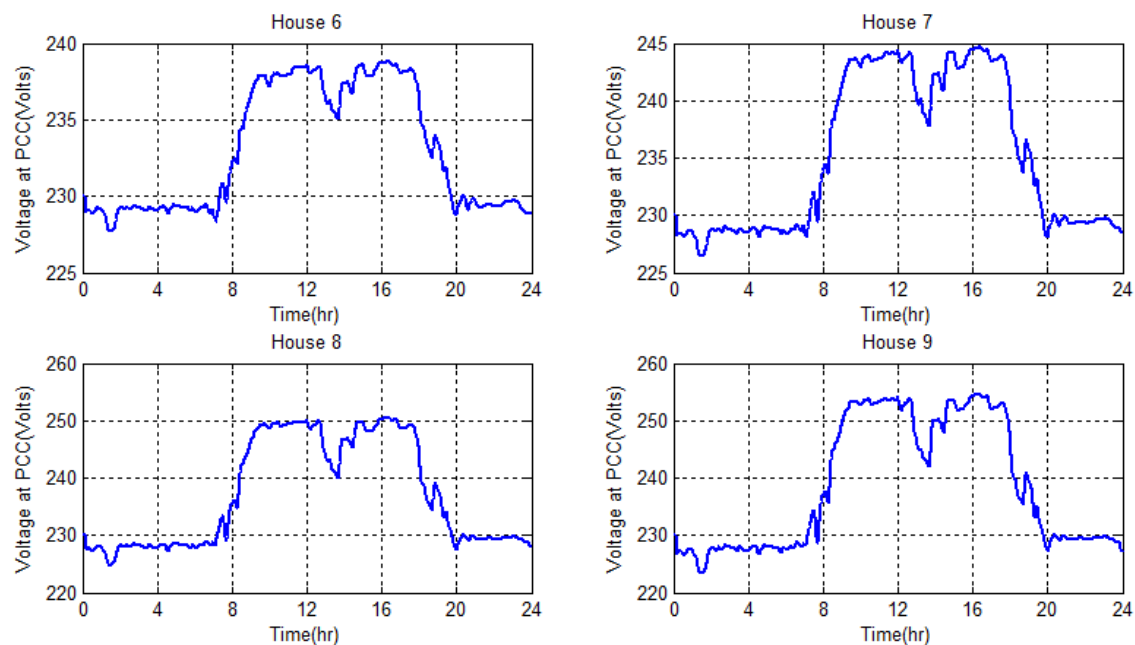
Σε αυτό το σενάριο θα πραγματοποιηθεί εγκατάσταση αποθηκευτικών συστημάτων σε όλους τους κόμβους (του δεύτερου σετ οικιών δηλαδή από 6 έως και 10 που συνεχίζουν να παρουσιάζουν πρόβλημα) του προσομοιωμένου δικτύου XT. Στον

πίνακα 5 παρουσιάζονται, όπως και πριν, οι ονομαστικές τιμές των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στους εκάστοτε ζυγούς, το μήκος των εναέριων γραμμών μεταφοράς μέσω των οποίων οι οικίες συνδέονται στο Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ αλλά και τα αποθηκευτικά συστήματα που τις συνοδεύουν. Ουσιαστικά, προστέθηκαν δύο αποθηκευτικά συστήματα στους κόμβους 6 και 7 με αξιοποιήσιμη χωρητικότητα 5 και 9 kWh αντίστοιχα.

**Πίνακας 5** Σενάριο 3: Χαρακτηριστικά μεθόδου προσομοίωσης

House (#)	Nominal PV <sub>peak</sub> Output (kWp)	Storage System (kWh)	Length of Transmission Line (m)
1	3	-	150
2	6	-	200
3	4	5	220
4	6	9	120
5	5	7	135
6	4	5	200
7	6	9	180
8	6	9	250
9	5	7	280
10	5	7	320

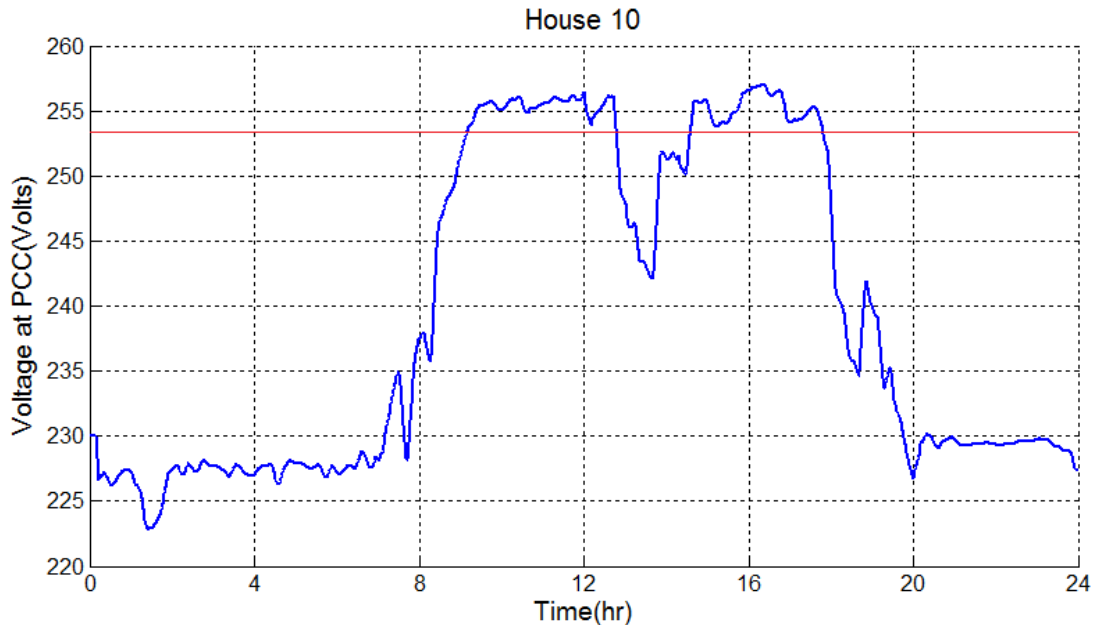
Στο σχήμα 5.99 και 5.100 παρουσιάζονται τα προφίλ των τάσεων σε όλους τους κόμβους του δικτύου ΧΤ για το δεύτερο σετ οικιών.



**Σχήμα 5.99** Η δεκάλεπτες RMS τιμές των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (PCC) των οικιών 6 έως 9 (Σενάριο 2.3)

Σε αυτή τη περίπτωση υπενθυμίζεται ότι προστέθηκαν δύο αποθηκευτικά συστήματα στους κόμβους 6 και 7 αντίστοιχα. Παρατηρείται όμως πως η μείωση στα προφίλ των

τάσεων είναι αμελητέα και το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης πέραν των ορίων δεν αντιμετωπίστηκε επαρκώς. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τα διαγράμματα των σχημάτων 5.98 και 5.100 η μείωση των τιμών στο προφίλ της τάσης δεν ξεπερνά τα 2 Volt.



**Σχήμα 5.100** Το προφίλ της δεκάλεπτης RMS τιμής της τάσης στη διάρκεια της ημέρας λειτουργίας για την οικία 10 (Σενάριο 2.3)

Έτσι, οι τιμές των τάσεων της οικίας 9 βρίσκονται οριακά κάτω από το όριο των 253 V, ενώ για τον πιο απομακρυσμένο κόμβο 10 το φαινόμενο της ανύψωσης της τάσης πέραν των ορίων που θέτει ο διαχειριστής του δικτύου δεν αντιμετωπίζεται πλήρως. Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα του σεναρίου 3 είναι πως η ουσιαστική μείωση των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης με τη βοήθεια αποθηκευτικών συστημάτων προκύπτει από την εγκατάσταση των παραπάνω στους κόμβους αυτούς που παρουσιάζουν το πρόβλημα και συνήθως απέχουν τη μεγαλύτερη απόσταση από τον Μ/Σ.

Επίσης, η αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης της τάσης, εκτός από την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας σε συσσωρευτές, μπορεί να γίνεται αξιοποιώντας ταυτόχρονα και άλλους τρόπους. Όπως είδαμε στο τελευταίο σενάριο, όπου το πρόβλημα παραμένει, θα μπορούσε ο ιδιοκτήτης του συστήματος να στραφεί παράλληλα στις εξής μεθόδους:

- ✓ STATCOM,SVC,DVR
- ✓ Περικοπή ενεργού ισχύος φ/β (APC)
- ✓ Έλεγχος της άεργου ισχύος των αντιστροφών (PFC)

Η πρώτη επιλογή αφορά διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος υπεύθυνες για την ρύθμιση της τάσης, είτε μέσω του ελέγχου του συντελεστή ισχύος, είτε μέσω του ελέγχου τη άεργης ισχύος, προσαρμόζοντας και διαμορφώνοντας κατάλληλα τη συμπεριφορά των

συστημάτων. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και με τον έλεγχο της άεργου ισχύος από τους αντιστροφείς. Ωστόσο, η περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω μεθόδων δεν αποτελεί αντικείμενο αυτής εργασίας (για περισσότερες πληροφορίες απευθυνθείτε εδώ [54]).

## Κεφάλαιο 6

### Συμπεράσματα-Προοπτικές συνέχισης

Στη σημερινή εποχή, λόγω των κλιματικών αλλαγών και του πεπερασμένου των συμβατικών πηγών ενέργειας παρουσιάζεται όλο και εντονότερα η ανάγκη αύξησης της διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ολοένα αυξανόμενη σύνδεση διεσπαρμένης παραγωγής και ειδικότερα των φωτοβολταϊκών στα δίκτυα διανομής. Αποτελεί, λοιπόν, επιτακτική ανάγκη η λήψη αντισταθμιστικών μέτρων ώστε να αποφευχθεί η επιβράδυνση της επέκτασης των φωτοβολταϊκών εξαιτίας της περιορισμένης δυναμικότητας του δικτύου.

Στο παρελθόν τα φωτοβολταϊκά συστήματα εγκαθίστανται κυρίως για να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο, από το οποίο αμείβονταν για την εγγεόμενη ενέργεια διαμέσου του μηχανισμού των εγγυημένων τιμών πώλησης (feed-in tariffs). Ωστόσο, η ραγδαία μείωση του κόστους της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας σε συνδυασμό με την αύξηση του κόστους προμήθειας της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο έχει κάνει πιο ελκυστική πια την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και την επιτόπου κατανάλωση της ιδίως σε οικιακό/εμπορικό επίπεδο. Παρόλα αυτά η χρονική κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου συνήθως δεν ταυτίζεται με την φ/β παραγωγή πόσο μάλλον σε οικιακό επίπεδο. Μετατοπίζοντας χρονικά το φορτίο σε περιόδους με υψηλή φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι ένας τρόπος για να αυξηθεί ο ρυθμός της ιδιοκατανάλωσης. Ωστόσο, η σύνδεση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες αποθήκευσης επιτρέπει μια πιο ουσιαστική αύξηση της ιδιοκαταναλώμενης ενέργειας. Η παραγόμενη, λοιπόν, ενέργεια που δεν καταναλώνεται επιτόπου στο φορτίο αποθηκεύεται στην μπαταρία και χρησιμοποιείται αργότερα το βράδυ όταν η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μηδενική. Με αυτό τον τρόπο, τα σπίτια με εγκατεστημένο ένα φωτοβολταϊκό-αποθηκευτικό σύστημα μπορούν να μειώσουν την ενέργεια που λαμβάνουν από το δίκτυο αυξάνοντας συνεπώς την αυτονομία τους.

Αναδείχθηκε, λοιπόν, η ανάγκη διαστασιολόγησης των εν λόγω συστημάτων και για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης σε γλώσσα Matlab από το οποίο εξάχθηκαν χρήσιμα συμπεράσματα. Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, μεταβάλλοντας το μέγεθος του φ/β και του αποθηκευτικού συστήματος αντίστοιχα, αποκαλύφθηκε ο κατάλληλος συνδυασμός φ/β συστήματος-μπαταρίας. Η ανάλυση ανέδειξε ότι τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων δηλαδή ο βαθμός της ιδιοκατανάλωσης και ο βαθμός αυτονομίας, εξαρτώνται άμεσα τόσο από το μέγεθος της εγκατεστημένης φ/β ισχύος όσο και από το μέγεθος των μπαταριών. Ταυτόχρονα, διαπιστώθηκε ότι το καταλληλότερο μέγεθος μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης αντιστοιχίζεται σε συστήματα μικρής κλίμακας που αποδίδουν μεγαλύτερους βαθμούς ιδιοκατανάλωσης,

καθώς τα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας στις εγγυημένες τιμές πώλησης (FIT's) θα διαδραματίσουν αμελητέο ρόλο στο μέλλον. Τα έσοδα πλέον δεν προκύπτουν από τις εγγυημένες τιμές πώλησης αλλά από τη μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης και την ανεξάρτηση από το δίκτυο (αύξηση της αυτονομίας). Για αυτό το λόγο είτε οι μικρές χωρητικότητες μπαταριών (χαμηλοί βαθμοί ιδιοκατανάλωσης, μικρή διάρκεια ζωής), είτε οι πολύ μεγάλες (αυξημένο κόστος επένδυσης, δεν αδειάζουν ώστε να είναι έτοιμες για χρήση την επόμενη μέρα) παρουσιάζουν ταυτόχρονα μεγαλύτερο κόστος και χειρότερες επιδόσεις. Συνδυάζοντας ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εγκατεστημένου ισχύος 5 kWp με ένα αποθηκευτικό σύστημα αξιοποιήσιμης χωρητικότητας 5 kWh (η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε ένα μέσο ετήσιο συνολικό φορτίο 4 MWh) ο ετήσιος βαθμός της ιδιοκατανάλωσης στη Γερμανία αγγίζει το 60%. Μελλοντικά ο συνδυασμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων με αποθηκευτικά συστήματα θα αποτελεί την βέλτιστη λύση τόσο από πλευρά ενεργειακής απόδοσης όσο και από θέμα κόστους.

Επιπλέον, αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η ομαλή ενσωμάτωση των εν λόγω συστημάτων στο δίκτυο διανομής. Για το λόγο αυτό το σύστημα σχεδιάστηκε ξανά στο Simulink, όπου χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές παραγωγής και φορτίου υψηλής χρονικής ανάλυσης, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων όσον αφορά τη λειτουργική συμπεριφορά των συστημάτων. Διαπιστώθηκε πως αν η φόρτιση του αποθηκευτικού συστήματος ξεκινούσε όσο το δυνατόν νωρίτερα (δηλαδή από τις πρώτες πρωινές ώρες, συμβατική στρατηγική), η μπαταρία θα ήταν πλήρως φορτισμένη τις ώρες όπου μεγιστοποιούνται η φ/β παραγωγή (ιδίως τις μέρες με καθαρό ουρανό) έχοντας ως αποτέλεσμα την επιστροφή μεγάλων ποσοτήτων ισχύος στο δίκτυο και συνεπώς την αύξηση των επιπέδων των τάσεων στα σημεία κοινής σύνδεσης (φαινόμενο ανύψωσης της τάσης). Μέσω της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου που αναπτύχθηκε η διαδικασία της φόρτισης πραγματοποιούνταν στο χρονικό διάστημα της ημέρας που η παραγωγή λάμβανε τις μέγιστες της τιμές ανακουφίζοντας το δίκτυο και αποτρέποντας το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης. Ταυτόχρονα, η στρατηγική αυτή συνέβαλλε στην αποφόρτωση του δικτύου τις ώρες αιχμής του φορτίου (βραδινές ώρες) αποφασίζοντας τον ρυθμό εκφόρτισης κατάλληλα, αλλά και με τέτοιο τρόπο, ώστε η μπαταρία να αποφορτίζεται πλήρως και να είναι έτοιμη για χρήση την επόμενη μέρα.

Τέλος, χρήσιμα συμπεράσματα προέκυψαν και μέσω της προσομοίωσης ενός απλουστευμένου ακτινικού δικτύου XT (που αποτελούνταν από 10 ζυγούς στους οποίους συνδέονταν φ/β παραγωγή και οικιακά φορτία) τοποθετημένο σε αγροτική περιοχή και για το οποίο λήφθηκαν υπόψη διάφορα σενάρια παραγωγής και ζήτησης. Καθώς στις αγροτικές περιοχές υπάρχει άφθονος χώρος για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκής παραγωγής και η απόσταση μεταξύ των οικιών είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις αστικές περιοχές, προκύπτει ότι σε αγροτικά δίκτυα είναι πολύ μεγαλύτερη η πιθανότητα παραβίασης των επιτρεπτών ορίων της τάσης. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν πως το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στον πιο απομακρυσμένο κόμβο του δικτύου, δίνοντας έτσι προτεραιότητα

στην εγκατάσταση αποθηκευτικού συστήματος αρχικά στον κόμβο αυτό, και μετέπειτα στους υπόλοιπους. Γενικότερα, παρατηρήσαμε πως σε όλα τα σενάρια η εγκατάσταση συστημάτων συσσωρευτών βελτιώνει αισθητά τα προφίλ των τάσεων σε όλους τους κόμβους. Όπως και να έχει, η χρήση αποθηκευτικών συστημάτων στη διεσπαρμένη παραγωγή έχει πολλαπλά οφέλη, τόσο σε επίπεδο καταναλωτή όσο και σε επίπεδο δικτύου διανομής, επιτρέποντας την αύξηση της φωτοβολταϊκής διείσδυσης και αποτρέποντας την άμεση παρέμβαση για την αναβάθμιση του δικτύου διανομής με ότι κόστος αυτό συνεπάγεται.

Σαν προοπτικές συνέχισης και όσον αφορά το πρώτο σκέλος της διαστασιολόγησης των φ/β συστημάτων-συσσωρευτών θα είχε πολύ ενδιαφέρον μία μελέτη που θα λάμβανε υπόψη τα ενεργειακά και τα τεchnο-οικονομικά χαρακτηριστικά των μπαταριών τύπου ιόντων λιθίου. Η δυναμική ανάπτυξη των μπαταριών ιόντων λιθίου και η πολύ καλή απόδοση που παρουσιάζουν ίσως αντικαταστήσουν σε ένα μεγάλο βαθμό (όταν και η τιμή τους στην αγορά γίνει πιο ανταγωνιστική) το τύπο μπαταριών μολύβδου οξέος στο μέλλον. Ακόμη, σε μία πλήρως απελευθερωμένη αγορά ενέργειας, όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται δυναμικά, το αποθηκευτικό σύστημα θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ώστε να αποθηκεύει ενέργεια τις ώρες όπου η τιμή της βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα και να εκφορτίζει/πουλάει στο δίκτυο αντίστοιχα τις ώρες όπου η ενέργεια λαμβάνει τις πιο υψηλές της τιμές. Τέλος, και όσον αφορά την ενσωμάτωση των εν λόγω συστημάτων στο δίκτυο, ο περιορισμός της εγγεόμενης ισχύος αλλά και η ταυτόχρονη αύξηση της ιδιοκατανάλωσης μπορεί να επιτευχθεί σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό αξιοποιώντας τις προαναφερθείσες στρατηγικές ελέγχου αλλά λαμβάνοντας υπόψη καθημερινά προβλέψεις, τόσο για τη φ/β παραγωγή όσο και για το φορτίο, και επιλέγοντας κάθε φορά καταλλήλως την αντίστοιχη στρατηγική.





## Βιβλιογραφία

- [1] [el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες\\_πηγές\\_ενέργειας](http://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας)
- [2] Παπαθανασίου Σταύρος, “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές”, ΕΜΠ
- [3] European Photovoltaic Industry Association (EPIA), “Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018”, EPIA website:  
<http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018/>
- [4] M. Latour, “PV Market And Policy Trends In Europe”, Polish PV GRID Forum, Warsaw, 6 June, 2013
- [5] European Photovoltaic Industry Association (EPIA), “Self Consumption Of PV Electricity”, EPIA website:  
[http://www.epia.org/fileadmin/user\\_upload/Position\\_Papers/Self\\_and\\_direct\\_consumption\\_-\\_position\\_paper\\_-\\_final\\_version.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Position_Papers/Self_and_direct_consumption_-_position_paper_-_final_version.pdf)
- [6] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, “Προτάσεις για τη βέλτιστη εφαρμογή του net-metering”, Αθήνα, Νοέμβριος, 2013
- [7] Κ. Καγκαράκης, “Φωτοβολταϊκή τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1992
- [8] A. Daoud, A. Midoun, “Fuzzy Control of a Lead Acid Battery Charger”, Journal of Electrical Systems, 01/2005
- [9] T. Markvart, “Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια”, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2003
- [10] Γ. Τσόλκας, “Ετήσια ενεργειακή απόδοση πλαισίων λεπτού φιλμ και ισοδύναμη μοντελοποίηση”, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Φεβρουάριος 2011
- [11] [www.shielcosolarpv.gr](http://www.shielcosolarpv.gr)
- [12] Κ.Θ.Δέρβος, “Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και στις φωτοβολταϊκές διατάξεις”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2009
- [13] [www.selasenergy.gr](http://www.selasenergy.gr)
- [14] [www.sma-hellas.com](http://www.sma-hellas.com)
- [15] Φ. Κωνσταντίνα, “Διερεύνηση σύνδεσης φωτοβολταϊκών πάρκων στο επίπεδο της μέσης τάσης και δυνατότητα ρύθμισης της άεργης ισχύος”, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ 2011
- [16] Voltage characteristics in public distribution systems – Standard EN 50160, 2004

- [17] Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, “Οδηγίες για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις”, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ)
- [18] D. Linden, T. Reddy, “Handbook of Batteries”, Mc Graw – Hill, 3<sup>rd</sup> edition, 2001
- [19] T. Markvart, L. Castaner, “Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications”, Elsevier Ltd, 2003
- [20] A. Luque, S. Hegedus, “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [21] DOE, “Primer on Lead Acid Storage Batteries Handbook”, Department of Energy, United States of America, 09/1995
- [22] H. Kiehne, “Battery Technology Handbook”, Marcel Dekker Inc, 2<sup>nd</sup> edition, 2003
- [23] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lead/>
- [24] [http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)
- [25] F. Marra, G. Yang, C. Treholt, E. Larsen, C. Rasmussen, and S. You, “Demand Profile Study of Battery Electric Vehicle under Different Charging Options”, Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE
- [26] D. Matthias, C. Andrew, G. Sinclair, McDonald J.R, “Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system,” Journal of Power Sources, Volume 161, n 2, October 27, 2006, pp 1400- 1411
- [27] C. M. Shepherd, “Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge,” Journal of Electrochemical Society, Volume 112, Jul. 1965 Page(s): 657-664
- [28] J. Weniger\*, T. Tjaden, V. Quaschnig, “Sizing and Grid Integration of Residential PV Battery Systems”, 8th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition, IRES 2013
- [29] Yu Ru, J. Kleissl and S. Martinez, “Storage Size Determination for Grid-Connected Photovoltaic Systems”, Sustainable Energy, IEEE Transactions, Volume 4, Jan. 2013
- [30] D. Zhang Ning, D. Kirschen, “Preliminary Analysis of High Resolution Domestic Load”, Dec. 2010
- [31] B. Battke, T. Schmidt, D. Grosspietch, V. Hoffmann, “A Review and Probabilistic Model of Lifecycle Costs of Stationary Batteries in Multiple Applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 25, Sep. 2013

- [32] S.M. Schoenung and William V. Hassenzahl, “Long- vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis Life-Cycle Cost Study”, A Study for the DOE Energy Storage Systems Program, Jul. 2007
- [33] M. Castillo-Cagigal, A. Gutiérrez, F. Monasterio-Huelin, E. Caamaño-Martín, D. Masa, J. Jiménez-Leube, “A Semi-distributed Electric Demand-Side Management System with PV Generation for Self-Consumption Enhancement”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, Jul. 2011
- [34] H. F. Mohsen Gitizadeh, “Battery Capacity Determination with Respect to Optimized Energy Dispatch Schedule in Grid-Connected Photovoltaic (PV) Systems”, *Energy*, vol. 65, p. 665–674, 2014.
- [35] H. Bidner, T. Cronin, “Lifetime modelling of lead acid batteries”, National Riso Laboratory, Apr. 2011
- [36] Victron Energy, “Electricity on Board Lead-Acid batteries”, web: [www.victronenergy.com](http://www.victronenergy.com)
- [37] Y. Riffonneau, S. Bacha, F. Barruel, and S. Ploix, “Optimal Power Flow Management for Grid Connected PV Systems With Batteries”, *Sustainable Energy, IEEE transactions*, Vol.2, Jul.2011
- [38] A. Gunawardana, “Proper Sizing of Energy Storage for Grid Connected Photovoltaic System”, Department of Engineering Science Faculty of Engineering and Science, University of Agder, 2014
- [39] E. Lemaire-Potteau, F. Mattera, A. Delaille, and P. Malbranche, “Assessment of Storage Ageing in Different Types of PV Systems Technical and Economical Aspects,” in *Proc. 24th EU Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Valencia, Spain, 2008.
- [40] Mohsen Gitizadeh\*, Hamid Fakharzadegan, “Battery capacity determination with respect to optimized energy dispatch schedule in grid-connected photovoltaic (PV) systems”, *Energy*, Vol.65, Feb.2014
- [41] Ch. Werner, Ch. Breyer, A. Gerlach, O. Beckel, “Photovoltaic with Energy Storage: An Overview on Economics, System Design and Politics”, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, Sep.2012
- [42] M. H. J. Bollen, “Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions”, Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2000.
- [43] B. Renders, L. Vandeveld, L. Degroote, K. Stockman, and M. H. J. Bollen, “Distributed generation and the voltage profile on distribution feeders during voltage dips,” *J. Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 12, pp. 1452–1458, 2010.
- [44] T. Stetz, F. Marten, and M. Braun, “Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany,” *IEEE Trans. Sustain. Eng.*, vol. PP, no. 99, 2012.

- [45] Renewable Energy Sources Act (EEG) 2012 [Online]. Available: [www.bmu.de](http://www.bmu.de)
- [46] F. Marra, G. Yang, C. Træholt, J. Østergaard and E. Larsen, “A Decentralized Storage Strategy for Residential Feeders With Photovoltaics”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, March 2014
- [47] T. Stetz, M. Braun, and F. Marten, “Improved LV grid-integration of PV systems in Germany,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 534–542, Apr. 2013.
- [48] Νικόλαος Π. Θεοδωρακάτος, “Μέθοδοι βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2012
- [49] Κορλός Κ. Θεοφάνης, “Αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διεύθυνσης φωτοβολταϊκών στη χαμηλή τάση”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2012
- [50] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint “Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications”, *World Electric Vehicle Journal*, vol.3, May, 2009
- [51] D. Georgakis, S. Papathanassiou, N. Hatziaargyriou, A. Engler, Ch. Hardt, "Operation of a prototype Microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces", 35th annual IEEE power electronics specialists conference, Aachen, Germany, 2004
- [52] J. Dunlop, “Batteries and Charge Control in Stand Alone Photovoltaic Systems: Fundamentals and Application”, Prepared for Sandia National Laboratories, Photovoltaic Systems Application Dept., 01/1997
- [53] Παπαϊωάννου Τ. Ιουλία, “Επίδραση της ένταξης Φ/Β μονάδων στην ποιότητα ισχύος δικτύων διανομής”, Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη 2010
- [54] E. Demirok, D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez and U. Borup, “Clustered PV Inverters in LV Networks: an overview on impacts and comparison of voltage control strategies”, 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference