



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

**Αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω υψηλής
διείσδυσης φωτοβολταϊκών στην Χαμηλή Τάση μέσω αποθήκευσης
ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Χ. Ριζάδης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

**Αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω υψηλής
διείσδυσης φωτοβολταϊκών στην Χαμηλή Τάση μέσω αποθήκευσης
ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Χ. Ριζάδης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Ιουλίου 2015.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....

Δημήτριος Χ. Ριζάδης

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

Copyright © Δημήτριος Χ. Ριζάδης, 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.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνάται το φαινόμενο ανύψωσης τάσης λόγω υψηλής διείσδυσης φωτοβολταϊκής παραγωγής στα δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης, και ο ρόλος που μπορεί να επιτελέσει η αποθήκευση ενέργειας στην αντιμετώπισή του. Για καλύτερη απεικόνιση και εξέταση των αποτελεσμάτων των μορφών ελέγχου που θα αναπτυχθούν, δημιουργούνται μοντέλα δικτύων με χαρακτηριστικά χαμηλής τάσης και οικιακές εγκαταστάσεις με φωτοβολταϊκή παραγωγή και αποθηκευτικές διατάξεις, και προσομοιώνονται με χρήση του λογισμικού πακέτου Matlab στο γραφικό περιβάλλον Simulink.

Στην αρχή αναφέρονται εισαγωγικά στοιχεία για τον ρόλο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην σύγχρονη εποχή, και γενικά στοιχεία για τα φωτοβολταϊκά. Αναλύονται βασικά χαρακτηριστικά τους, ο τρόπος λειτουργίας τους, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους και εξάγονται ηλεκτρικά ισοδύναμα κυκλώματα και μέθοδοι που βελτιστοποιούν την ισχύ που παράγουν.

Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στην αποθήκευση ενέργειας. Αναλύονται οι βασικοί μηχανισμοί αποθήκευσης, γενικά χαρακτηριστικά για την λειτουργία τους, και περιγράφεται η εξαγωγή μοντέλων που περιγράφουν την συμπεριφορά τους. Αναφέρεται επίσης και η γενική χρησιμότητα της αποθήκευσης ενέργειας σε διάφορους σκοπούς των δικτύων διανομής.

Έπειτα περιγράφεται το πρόβλημα της ανύψωσης τάσης στα δίκτυα διανομής, και αναλύεται η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς και της σημασίας του ελέγχου της ροής αέργου ισχύος. Εξετάζονται διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί το φαινόμενο να αντιμετωπιστεί, με έμφαση στην περικοπή ενεργού ισχύος, την απορρόφηση αέργου ισχύος, την αποθήκευση ενέργειας και τον συνδυασμό όλων των παραπάνω. Παρατίθενται διάφορες μορφές ελέγχου των διεργασιών αυτών, και γίνεται σύγκριση τους. Επίσης αναφέρεται η αυξανόμενη στροφή του χαρακτήρα της αξιοποίησης της φωτοβολταϊκής παραγωγής προς την ιδιοκατανάλωση, και ο ρόλος της ιδιοκατανάλωσης στην αποτροπή φαινομένων ανύψωσης τάσης.

Κατόπιν, με την χρήση του Simulink, μοντελοποιείται ένα δίκτυο Χαμηλής Τάσης συνδεδεμένο σε μία απομακρυσμένη εγκατάσταση, και καταγράφονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των διαφόρων ελέγχων για συνθήκες μεγάλης παραγωγής και χαμηλής κατανάλωσης. Έπειτα μοντελοποιείται δίκτυο με περισσότερους του ενός παραγωγούς και αναλύεται η συμπεριφορά του εκ νέου. Στα αποτελέσματα αποτυπώνεται η επίδραση της ιδιοκατανάλωσης στην διατήρηση ενιαίου επιπέδου τάσης και στην αποφυγή περικοπής ισχύος, και συγκρίνονται διαφορετικές παραλλαγές των ελέγχων (διαφορετικός βαθμός ιδιοκατανάλωσης, ενιαία περικοπή ισχύος μεταξύ παραγωγών κλπ).

Abstract

This diploma thesis focuses on the voltage rise phenomenon caused by high penetration level of photovoltaic generation in low voltage distribution grids, and the application of energy storage in order to confront it. Furthermore, models of low voltage distribution grids domestic connected with domestic systems with photovoltaic generation and battery energy storage systems are created to examine the results of the proposed control methods, and they are simulated with use of the software Matlab.

First, there is an introduction in the role of renewable energy resources in modern days, and some general information about photovoltaics. Also, some of their main characteristics are analysed, including their basic principles, the photovoltaic effect, factors that affect their efficiency and the creation of electrical equivalent models that resemble their performance. Finally, there is an extended reference to the maximum power point tracking method.

After that, there is an introduction to the energy storage. This includes an analysis of the most common energy storage systems, some general facts about the basic principles of storage and the extraction of models that resemble their basic characteristics of performance. There is also a description of the general use of energy storage in various domains of the distribution grids.

Next, there is a detailed analysis of the voltage rise phenomenon in the distribution grids and the role of distributed generation in it, as long as the importance of reactive power control against the phenomenon. Various measures against the problem are reported, with emphasis given to power curtailment, reactive power control, energy storage and the coordination of them. There is an examination of a variety of approaches to each kind of control, and comparison between them. Also, there is an analysis of the growing importance of self-consumption, and its role in the prevention of the voltage rise phenomenon.

Finally, the development of a model of a low voltage distribution grid connected to a single installation and the simulation with the use of Simulink, allows an analysis of the results of each of the imposed control methods, as long as the results of the coordination of them. The case studied is that of low consumption with high generation. After that, the same process is made for a radial grid with five similar systems, which shows the impact of self-consumption in the voltage stability of a large network.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο και τον Μάριο Μανιατόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια και τον χρόνο που δαπάνησαν σε όλο αυτό το διάστημα με τις παροτρύνσεις και την καθοδήγησή τους, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Αθανάσιο Βασιλάκη για την βοήθειά του σε πολλά κομμάτια της εργασίας και την επίλυση αποριών. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, που ως καθηγητής μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το παρόν θέμα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, και τους ανθρώπους που με στήριζαν όλα αυτά τα χρόνια κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά στοιχεία για ΑΠΕ και φωτοβολταϊκά	13
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	13
1.2 Φωτοβολταϊκή παραγωγή	15
Κεφάλαιο 2: Φωτοβολταϊκά συστήματα	18
2.1 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο, το πλαίσιο και η συστοιχία.....	18
2.1.1 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (Cell)	18
2.1.2 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV Module)	18
2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	19
2.3 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκών στοιχείων	21
2.4 Παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών	23
2.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας	24
2.4.2 Επίδραση της ακτινοβολίας	25
2.5 Εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας φωτοβολταϊκών	26
Κεφάλαιο 5 Συσσωρευτές.....	30
3.1 Βασικά στοιχεία λειτουργίας συσσωρευτών.....	30
3.2 Είδη συσσωρευτών	31
3.3 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας των συσσωρευτών.....	33
3.4 Εξαγωγή μοντέλων συσσωρευτών.....	35
3.4.1 Ηλεκτροχημικά μοντέλα.....	36
3.4.2 Μοντέλα ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος.....	36
3.4.3 Αναλυτικά μοντέλα	37
3.4.3.1 Ο Νόμος του Peukert.....	37
3.4.3.2 Rakhmatov και Vrudhula	38
3.4.3.3 Kinetic Battery Model.....	39
3.4.3.4 Μοντέλο BEST.....	44
3.4.4 Το μοντέλο του Doyle.....	45
3.5 Τύποι άλλων μέσων αποθήκευσης ενέργειας.....	45
3.6 Χρησιμότητα αποθήκευσης ενέργειας γενικά στα ΣΗΕ.....	48
Κεφάλαιο 4 Φαινόμενο ανύψωσης τάσης στα δίκτυα ΧΤ λόγω διείσδυσης ΑΠΕ ...	51

4.1 Κριτήρια σύνδεσης φωτοβολταϊκών στο δίκτυο	51
4.2 Ορισμός του ποσοστού διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής.....	52
4.3 Φαινόμενο ανύψωσης τάσης λόγω υψηλής διείσδυσης Φ/Β	53
4.3.1 Ανάλυση ευαισθησίας τάσης	54
4.4 Τρόποι αντιμετώπισης φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω Φ/Β	57
4.5 Περικοπή Ενεργού Ισχύος Φωτοβολταϊκών	59
4.6 Απορρόφηση αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των ΦΒ	62
4.7 Αποθήκευση Ενέργειας	70
4.7.1 Αξία της ιδιοκατανάλωσης	70
4.7.2 Στρατηγικές ελέγχου αποθήκευσης ενέργειας	73
4.8 Συνεργασία μεθόδων	83
Κεφάλαιο 5 Κομμάτι προσομοιώσεων	84
5.1 Μοντέλα και αλγόριθμοι ελέγχου που θα χρησιμοποιηθούν	84
5.2 Μοντελοποίηση Δικτύων Χαμηλής Τάσης.....	91
5.2.1 Δίκτυο με μόνο έναν καταναλωτή – παραγωγό	91
5.2.1.1 Προσομοίωση χωρίς αποθηκευτικά μέσα.....	95
5.2.1.2 Προσομοίωση με χρήση αποθηκευτικών μέσων	97
5.2.1.3 Εκφόρτιση.....	109
5.2.2 Προσομοίωση δικτύου με πολλούς παραγωγούς.....	119
5.2.2.1 Σενάριο χωρίς αποθήκευση	120
5.2.2.2 Σενάριο με αποθήκευση	125
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα – Προοπτικές συνέχισης.....	136
Παράρτημα.....	138
Βιβλιογραφία	142

1. Εισαγωγικά στοιχεία για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και φωτοβολταϊκά.

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ο όρος ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνει ένα σύνολο φυσικών διεργασιών, κατά την διάρκεια των οποίων απελευθερώνεται ενέργεια σε εκμεταλλεύσιμη και αξιοποιήσιμη μορφή προς όφελος των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής αφορά την μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια, την στιγμή που η ανάγκη για αντικατάσταση των μέχρι σήμερα συμβατικών μέσων θερμικής φύσης γίνεται όλο και πιο επιτακτική για λόγους περιβαλλοντολογικούς, οικονομικούς, αλλά και για τον λόγο της σταδιακής εξάντλησης των αποθεμάτων συμβατικών μέσων παραγωγής του πλανήτη. Σαν ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (ή πράσινη ενέργεια), σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου χαρακτηρίζονται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.

Χαρακτηρίζονται επίσης σαν ήπιες μορφές ενέργειας, τόσο για τον τρόπο με τον οποίο είναι προσβάσιμες, όσο και για την φιλικότητά τους προς το περιβάλλον λόγω των αποτελεσμάτων της χρήσης τους. Για την πρόσβαση σε αυτές δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση όπως καύση, εξόρυξη ή άντληση, αλλά μόνο η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στην φύση, ενώ σε αντίθεση με τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα. Αν και το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό τους υπολογίζεται ότι υπερκαλύπτει την παγκόσμια συνολική κατανάλωση ενέργειας, η υψηλή τιμή τους, η σχετικά πρόσφατη ανάπτυξη της τεχνολογίας τους καθώς και πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες αντίθετες με την διατάραξη της κατεστημένης τάξης στον τομέα της ενέργειας λειτούργησαν ανασταλτικά στην μεγαλύτερη αξιοποίησή τους.

Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έγινε έντονο την δεκαετία του 70, όταν οι πετρελαϊκές κρίσεις της εποχής ανέδειξαν την ανάγκη για μεγαλύτερη ενεργειακή ανεξαρτησία των κρατών, ταυτόχρονα με περιβαλλοντολογικούς παράγοντες. Μετά από ένα αρχικό στάδιο περιορισμένης χρήσης λόγω υψηλού κόστους, πλέον έχουν μπει στο επίκεντρο των κρατικών σχεδιασμών σε μεγάλο αριθμό ανεπτυγμένων κρατών για την αύξηση του ποσοστού ενέργειας που βασίζεται σε αυτές (κυρίως στην αιολική και την υδροηλεκτρική ενέργεια). Χαρακτηριστικά, στις ΗΠΑ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν ένα 6%, ενώ για την Ευρωπαϊκή Ένωση ο στόχος είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από ΑΠΕ σε ποσοστό 20% μέχρι το 2020.

Η φιλικότητα προς το περιβάλλον και η ανεξάντλητη παροχή τους δεν είναι τα μόνα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ΑΠΕ. Ο τοπικός χαρακτήρας που μπορούν να έχουν μπορεί να λύσει το πρόβλημα των μεγάλων συγκεντρωμένων μονάδων παραγωγής και κατά συνέπεια της ανάγκης για μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, κάτι που σημαίνει μικρότερες απώλειες αλλά και πιο ευπροσάρμοστος σχεδιασμός αναλόγως με τις ενεργειακές ανάγκες που προορίζονται να καλυφθούν. Επίσης, πλέον η τεχνολογία έχει οδηγήσει στην παροχή εξοπλισμού αρκετά οικονομικού και με μεγάλο χρόνο ζωής, ενώ οι επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι συνήθως σε ένα βαθμό επιδοτούμενες από τα κράτη. Τέλος, σε πολιτικό επίπεδο μπορούν να βοηθήσουν χώρες εξαρτημένες ενεργειακά να γίνουν

πιο αυτόρκεις, ενώ αποτελούν και την λύση για την μείωση κατανάλωσης πετρελαίου που δεν έχει ανεξάντλητα αποθέματα.

Στα μειονεκτήματα των ΑΠΕ, μπορεί να σημειωθεί ο χαμηλός βαθμός απόδοσής τους, που συνεπάγεται μεγάλο κόστος και επιφάνεια γης για μια δεδομένη εφαρμογή, κάτι που τις καθιστά ακατάλληλες για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων. Επίσης η απόδοσή τους εξαρτάται και από εποχιακές, κλιματολογικές και γεωγραφικές συνθήκες (για την αιολική, την υδροηλεκτρική και την ηλιακή ενέργεια). Επιπρόσθετα, για τις ανεμογεννήτριες υπάρχουν ισχυρισμοί ότι η παρουσία τους αλλοιώνει το φυσικό περιβάλλον, και ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Έτσι γίνεται προσπάθεια να επιλέγονται χώροι για την τοποθέτησή τους που να ελαχιστοποιούν το πρόβλημα. Τέλος, για τα υδροηλεκτρικά έργα υπάρχει η θεωρία ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό και έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Κάποιες κατηγορίες ήπιων μορφών ενέργειας:

- Αιολική ενέργεια: Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (πχ την άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- Ηλιακή ενέργεια: Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές(ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.
- Υδραυλική Ενέργεια: Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.
- Βιομάζα: Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.
- Γεωθερμική ενέργειας: Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, πχ στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20% όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια.

- Ενέργεια από τη θάλασσα
 - Ενέργεια από παλίρροιες: Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.
 - Ενέργεια από κύματα: Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
 - Ενέργεια από ωκεανούς: Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.

- Ωσμωτική ενέργεια: Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

1.2 Φωτοβολταϊκή Παραγωγή

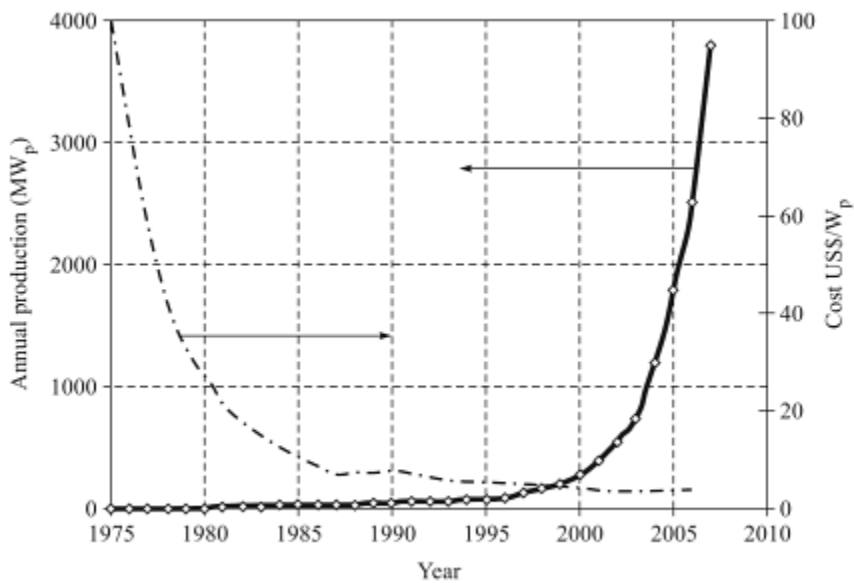
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μία από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με τεράστιο ενδιαφέρον για την Ελλάδα. Εκμεταλλεούμενο το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια.

Ενδεικτικά πλεονεκτήματά τους είναι τα εξής:

- Τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής
- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη
- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται τα κρύσταλλα για 20-30 χρόνια λειτουργίας
- Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι πχ η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ότι μπορεί να διασυνδεθεί με το δίκτυο

ηλεκτροδότησης (διασυνδεδεμένο σύστημα), καταργώντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου.

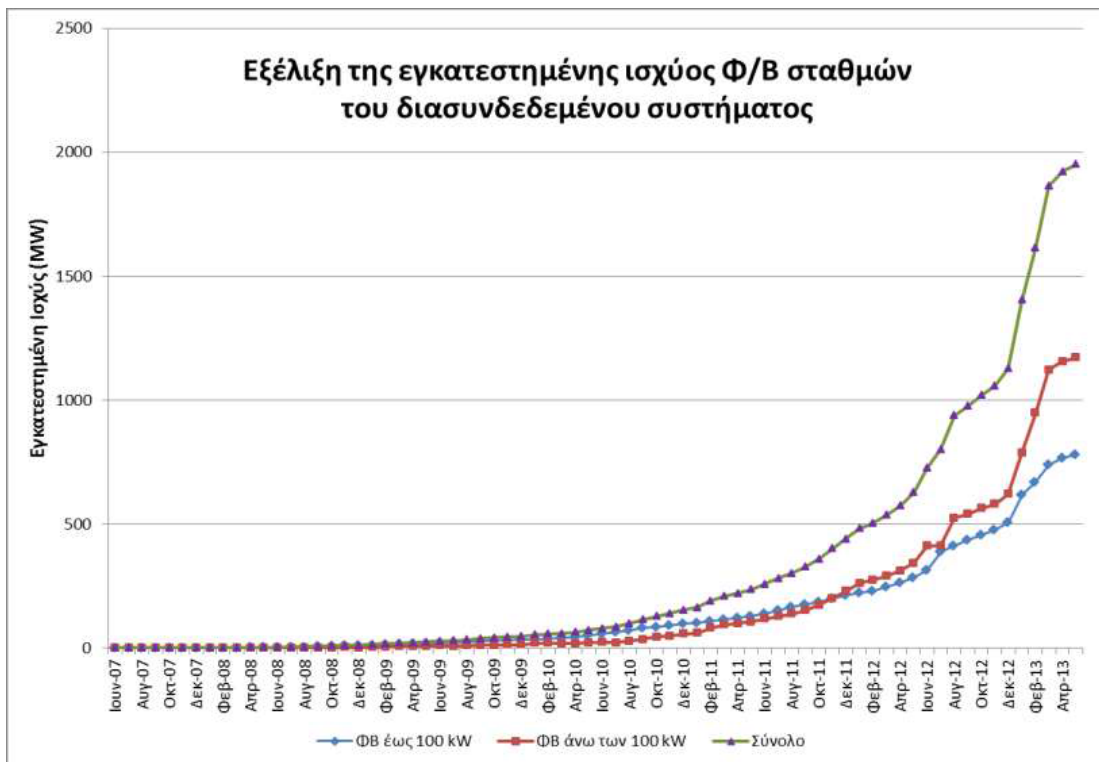
Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να καταλογίσει κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, που ωστόσο με την τεχνολογική εξέλιξη μειώνεται σταδιακά, ενώ μερικά χρόνια μετά την εγκατάστασή τους γίνεται πλήρης απόσβεση της επένδυσης.



Εικόνα 1.1: Η εξέλιξη της ετήσιας φωτοβολταϊκής παραγωγής σε σχέση με το κόστος επένδυσης στο πέρασμα των χρόνων .[3]

Στην Ελλάδα μεγάλο είναι το ενδιαφέρον για τα φωτοβολταϊκά τα τελευταία χρόνια, τόσο λόγω του ηλιακού δυναμικού που παρέχεται λόγω της κλιματικής της κατάστασης και της γεωγραφικής της θέσης, όσο και λόγω των στόχων που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2020 που να προέρχεται κατά 20% από ανανεώσιμες πηγές.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον της Ελλάδας για τα φωτοβολταϊκά αποδεικνύεται από τα στοιχεία του ΔΕΔΔΗΕ για την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια που φαίνονται στην εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2: Η ραγδαία αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκής παραγωγής στον Ελλαδικό χώρο τα τελευταία χρόνια. [4]

2. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

2.1 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο, το πλαίσιο και η συστοιχία.

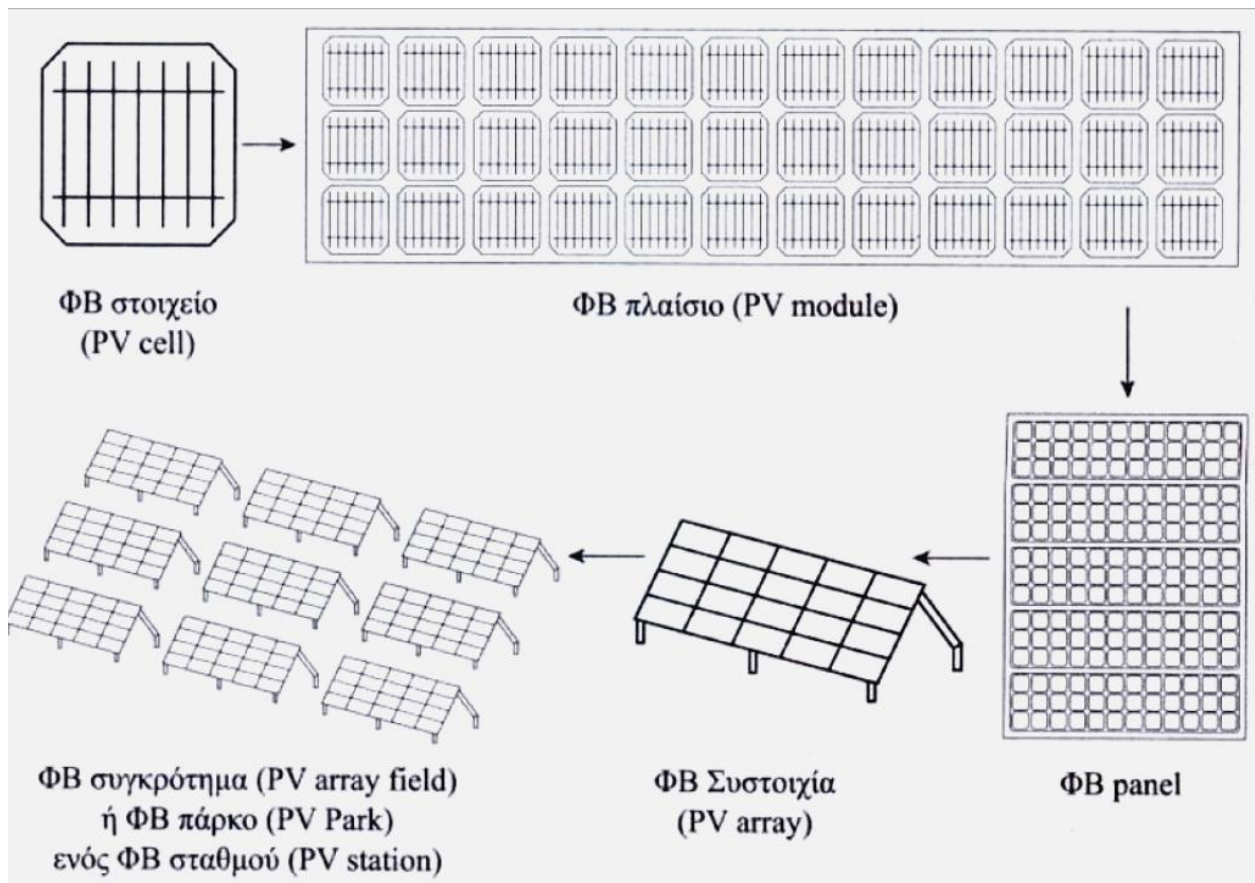
2.1.1 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (cell):

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (λέγεται επίσης και φωτοβολταϊκή κυψέλη) αποτελεί την ελάχιστη δομική μονάδα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτεινή ακτινοβολία. Τα συνήθη εμπορικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από διόδους επαφής p-n και έχουν εμβαδόν φωτιζόμενης επιφάνειας που ποικίλλει από λίγα τετραγωνικά εκατοστά μέχρι περίπου 180 τετραγωνικά εκατοστά. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατατάσσονται ανάλογα με το υλικό της κατασκευής τους σε Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου, λεπτών υμενίων και άμορφου πυριτίου [6].

2.1.2 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module)

Το κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο, όταν δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, παρέχει στην έξοδό του συνεχή τάση περίπου ίση προς 0.5 V. Η μέγιστη ένταση του ρεύματος που παράγεται στην έξοδο ενός ΦΒ στοιχείου είναι ανάλογη της επιφάνειάς του και προσδιορίζεται κυρίως από την τιμή της πυκνότητας ισχύος της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας. Μια τυπική τιμή του ρεύματος μέγιστης ισχύος ενός Φωτοβολταϊκού στοιχείου κυμαίνεται συνήθως από 4 έως 7 A, οπότε η παρεχόμενη μέγιστη ισχύς από το Φωτοβολταϊκό στοιχείο ανέρχεται περίπου στα 3W. Τα Φωτοβολταϊκά στοιχεία παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος επί 30 έως και 50 έτη, αντισταθμίζοντας πλήρως το κόστος που απαιτήθηκε για την κατασκευή τους εντός λίγων μόνο ετών.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους για το σχηματισμό πλαισίων (module) Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελεί τη βασική κατασκευαστική μονάδα που χρησιμοποιείται για την δημιουργία κάθε Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, ανεξαρτήτως μεγέθους εγκατεστημένης Φωτοβολταϊκής ισχύος. Περιλαμβάνει πολλά, όμοια απολύτως φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, με σκοπό την αύξηση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Πολλά πλαίσια συνδεδεμένα μεταξύ τους σχηματίζουν φωτοβολταϊκά πάνελ, ενώ πολλά πάνελ σχηματίζουν τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.



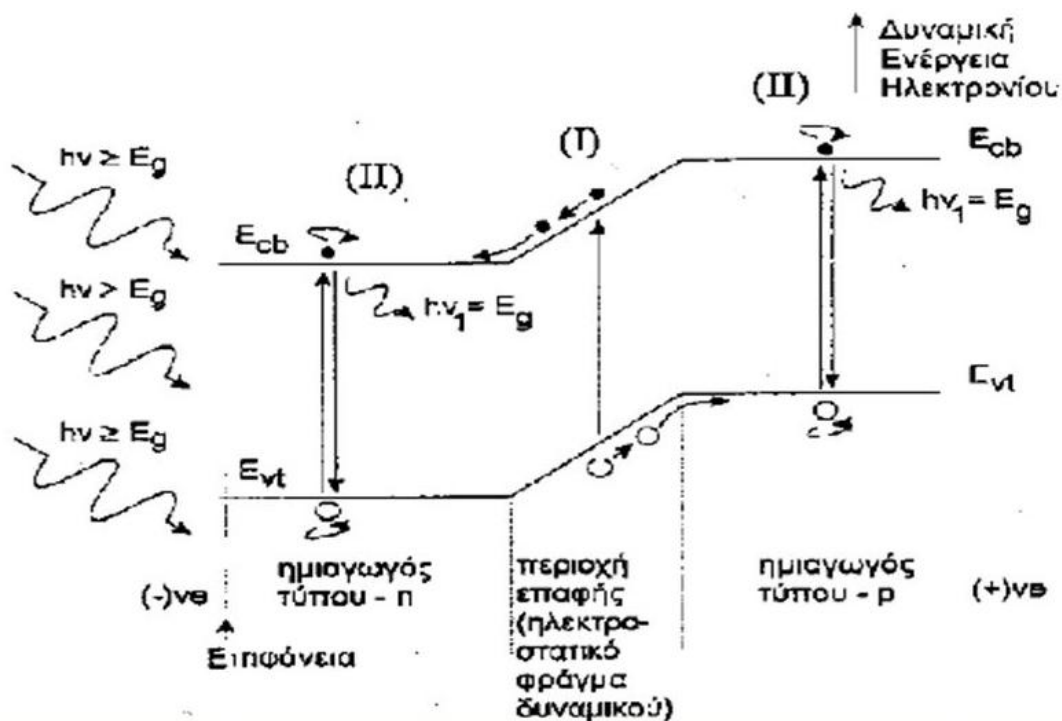
Εικόνα 2.1: Οι βασικές βαθμίδες οργάνωσης των στοιχειωδών δομών των φωτοβολταϊκών συστημάτων [5].

Καθώς τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παράγουν DC τάση και τα φορτία που τροφοδοτούν είναι AC, η λειτουργία τους συνοδεύεται από την παρουσία αντιστροφών οι οποίοι αναλαμβάνουν να μετατρέψουν την έξοδό τους σε κατάλληλη μορφή. Ωστόσο η λειτουργία που επιτελούν είναι πολύ ευρύτερη, καθώς μπορούν να παρέχουν έλεγχο στην έξοδό τους, στην ποιότητα ισχύος τους, στην φόρτιση συσσωρευτών όταν αυτοί υφίστανται, ενώ μπορούν να επιτελέσουν και την λειτουργία του Maximum Power Point Tracking που θα αναφερθεί στην συνέχεια. Επίσης, αναλόγως με το αν η εγκατάσταση είναι συνδεδεμένη σε ευρύτερο δίκτυο ή αυτόνομη, μπορούν να διαφοροποιούν πολύ την λειτουργία τους παρέχοντας μεγάλο εύρος υπηρεσιών.

2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα ηλιακά στοιχεία βασίζουν την λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού το οποίο εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το φράγμα δυναμικού βρίσκεται κατανεμημένο σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά από την οποία προσπίπτει το φως. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να δημιουργηθεί ένα ζεύγος ελεύθερων φορέων: δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας και μία οπή στη ζώνη σθένους. Η αναγκαιότητα ύπαρξης του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού πηγάζει από την απαίτηση για διαχωρισμό των θετικών και αρνητικών

φορέων φορτίου και την συγκέντρωσή τους πάνω στις δύο όψεις του ηλιακού στοιχείου, δηλαδή την φωτιζόμενη και την πίσω όψη τους. Συγκεκριμένα, επειδή μερικά από τα ζεύγη των φορέων αυτών δημιουργούνται μέσα ή και δίπλα από την περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού διαχωρίζονται προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την δυναμική τους ενέργεια. Για την κατανόηση του μηχανισμού μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σαν σφαίρες μάζας m_e που κυλούν πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο, ενώ οι οπές συμπεριφέρονται σαν φυσαλίδες (θέσεις στις οποίες απουσιάζει η μάζα ενός ηλεκτρονίου) που αιωρούνται μέσα σε ένα υγρό. Στο μοντέλο αυτό, το ηλεκτρόνιο (σφαίρα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική του ενέργεια κινούμενο προς τα κάτω, ενώ η οπή (φυσαλίδα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική της ενέργεια κινούμενη προς τα άνω σε ένα διάγραμμα δυναμικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σε μία δίοδο p-n τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται φορτία στις δύο αντικρινές επιφάνειες και να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου, για όσο διάστημα υπάρχει η οπτική διέγερση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο [6].



Εικόνα 2.2: Το ηλιακό στοιχείο που αποτελείται από την επαφή ημιαγωγού τύπου-n και τύπου-p. Το σχήμα παρουσιάζει το διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια. Στο ηλιακό στοιχείο προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια τιμής $E = h\nu \geq E_g$. Όπου $E_g = E_{cb} - E_{vt}$ η τιμή του ενεργειακού διακένου, E_{cb} ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και E_{vt} η κορυφή ζώνης σθένους.

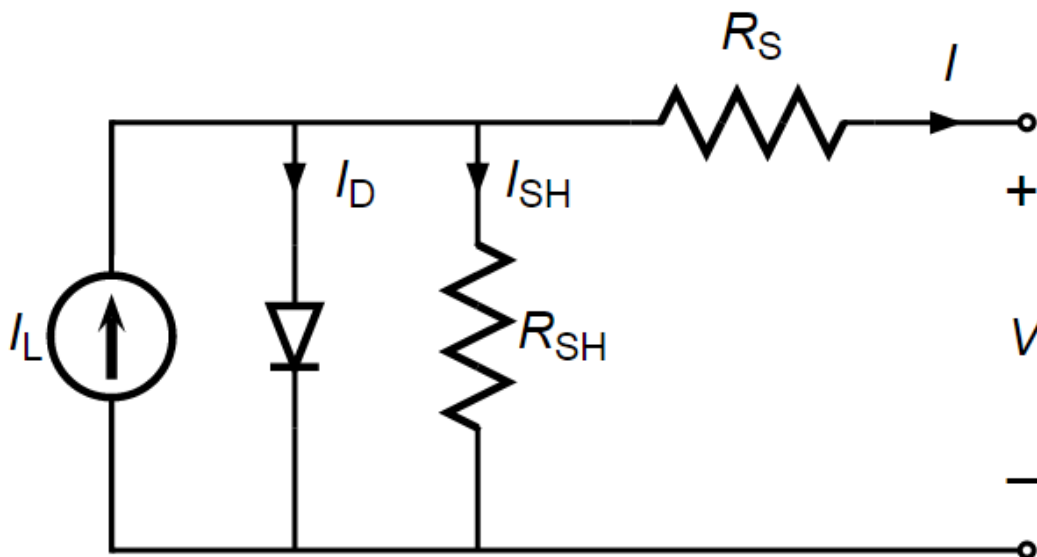
Στην περιοχή (I) το δημιουργούμενο ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής διαχωρίζεται από το ηλεκτροστατικό πεδίο. Στο σχήμα, τα ηλεκτρόνια (σφαίρες) κυλούν πάνω στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας και μεταφέρονται στην περιοχή τύπου-n. Κατ' αναλογία, οι οπές (φυσαλίδες) ολισθαίνουν μόλις κάτω από την κορυφή της ζώνης σθένους και μεταφέρονται προς την περιοχή τύπου-p για να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια. Στις περιοχές

(II), δεν διαχωρίζονται χωρικά οι παραγόμενοι φορείς, οπότε αφού παρέλθει ο χρόνος ζωής τους, επανασυνδέονται και χάνονται εκπέμποντας ένα φωτόνιο ενέργειας $E = h\nu = E_g$.

2.3 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκών στοιχείων:

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών στοιχείων, αλλά και για την μοντελοποίησή τους σε εφαρμογές προσομοίωσης συστημάτων, είναι χρήσιμη η δημιουργία του ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος, με χρήση απλών ηλεκτρικών στοιχείων των οποίων η λειτουργία είναι γνωστή [6].

Η βασική λειτουργία των φωτοβολταϊκών απεικονίζεται με την βοήθεια μίας πηγής ρεύματος, που ελέγχεται από μία διάοδο. Μία αντίσταση R_{sh} προστίθεται παράλληλα, που αντιστοιχεί στην μη ιδανική λειτουργία του στοιχείου. Για τον ίδιο λόγο προστίθεται σε σειρά και μία αντίσταση R_s . Το τελικό κύκλωμα που προκύπτει απεικονίζεται στην εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Από το κύκλωμα και με χρήση νόμου ρευμάτων Kirchhoff, προκύπτει ότι το ρεύμα που αποδίδεται τελικά στο εξωτερικό κύκλωμα είναι μειωμένο σε σχέση με το παραγόμενο κατά το ρεύμα της διάόδου και το ρεύμα της παράλληλης αντίστασης:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (2.1)$$

,όπου I το ρεύμα εξόδου,

I_L το φωτόρρευμα που είναι ανάλογο προς τα φωτόνια που απορροφά το ηλιακό στοιχείο,

I_D το ρεύμα του κλάδου της διάόδου και

I_{sh} το ρεύμα που διέρχεται από την παράλληλη αντίσταση.

Με V να συμβολίζεται η τάση εξόδου, η τάση στα άκρα της διόδου δίνεται από τον τύπο:

$$V_D = V + IR_s \quad (2.2)$$

.Από την εξίσωση διόδου Shockley, το ρεύμα που διέρχεται από την δίοδο θα είναι ίσο με:

$$I_D = I_0 \left(\exp \left[\frac{qV_D}{nkT} \right] - 1 \right) \quad (2.3)$$

,όπου I_0 είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου, n ο συντελεστής ποιότητας της διόδου, q το στοιχειώδες φορτίο, k η σταθερά του Boltzmann και T η απόλυτη θερμοκρασία.

Επομένως, και με χρήση του νόμου του Ohm για το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R_{sh} η (2.1) γίνεται:

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left[\frac{qV_D}{nkT} \right] - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

.Για συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα I μηδενίζεται, και θεωρώντας την αντίσταση R_{sh} αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να αγνοηθεί ο τελευταίος όρος της εξίσωσης, προκύπτει για την τάση του στοιχείου V_{oc} :

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.5)$$

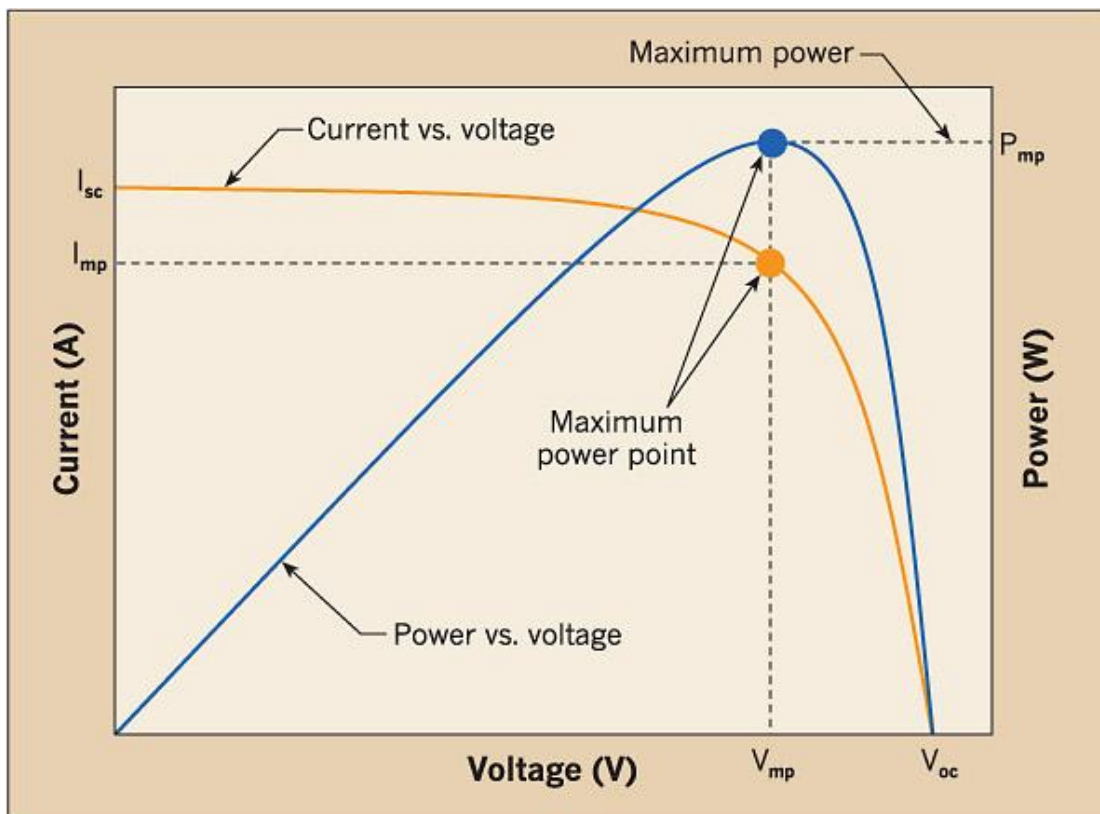
Ομοίως, όταν το στοιχείο είναι βραχυκυκλωμένο, τότε $V=0$, και θεωρείται ότι το ρεύμα εξόδου είναι ίσο με το παραγόμενο φωτορεύμα:

$$I_{sc} = I_L$$

Προφανώς για κάθε άλλη τιμή εξωτερικής αντίστασης R_L το ρεύμα εξόδου θα πάρει ενδιάμεσες τιμές, ενώ για κάποια τιμή της αντίστασης η ισχύς που παράγεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο μεγιστοποιείται:

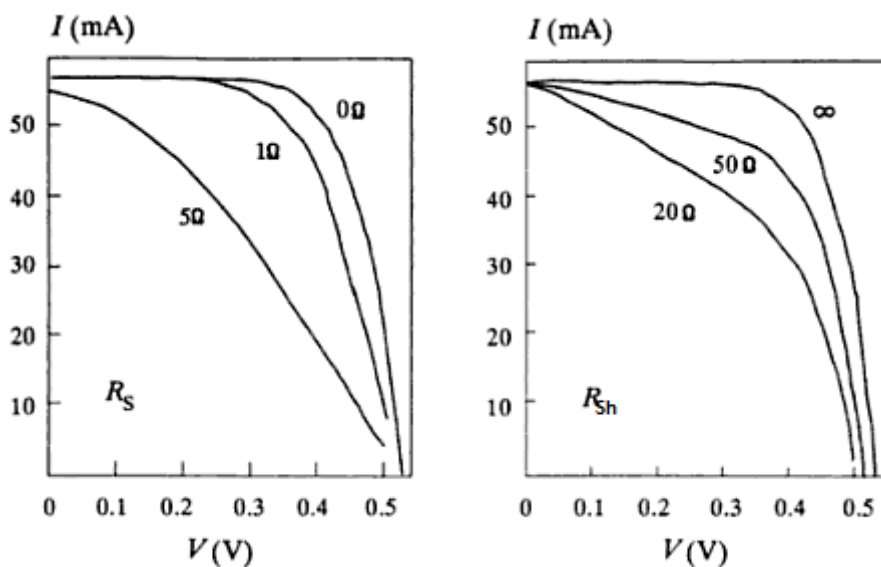
$$P_m = I_m V_m \quad (2.6)$$

. Οι τρεις παράμετροι P_m, I_{sc}, V_{oc} είναι από οι κύριες παράμετροι αξιολόγησης της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Με βάση αυτές τις παραμέτρους, εξάγεται και η χαρακτηριστική I-V καμπύλη του φωτοβολταϊκού στοιχείου που απεικονίζεται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4: Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου [7].

Η επίδραση της παράλληλης και της εν σειρά αντίστασης φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2.5: Εξάρτηση της καμπύλης I-V από τις αντιστάσεις R_{sh} και R_s [7]

2.4 Παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών:

Η ευρεία εφαρμογή των φωτοβολταϊκών σε ποικίλες δραστηριότητες όπως διαστημικές, καθιστούν σαφές ότι μπορούν να λειτουργήσουν κάτω από μεγάλο φάσμα συνθηκών θερμοκρασιών και ακτινοβολίας. Ωστόσο, η μεταβολή των δύο αυτών μεγεθών καθορίζει άμεσα την απόδοσή τους.

2.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας

Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μικρή αύξηση του φωτορρέυματος, αν και η αλλαγή αυτή είναι μικρή και μπορεί να αγνοηθεί. Η πραγματική επίδραση της θερμοκρασίας οφείλεται στην ύπαρξη του εκθετικού όρου καθώς και στην εξάρτηση του ανάστροφου ρεύματος κόρου από αυτήν που έχει την μορφή:

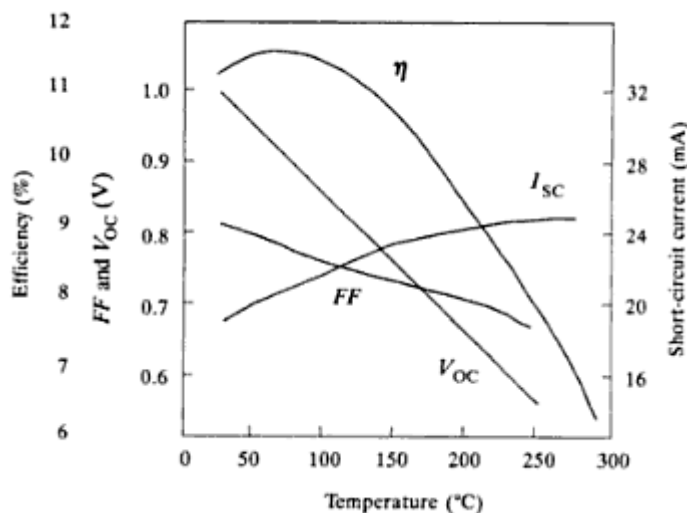
$$I_0(T) = KT^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \quad (2.7)$$

,όπου τα μεγέθη K και E_{G0} είναι σταθερά με την θερμοκρασία.

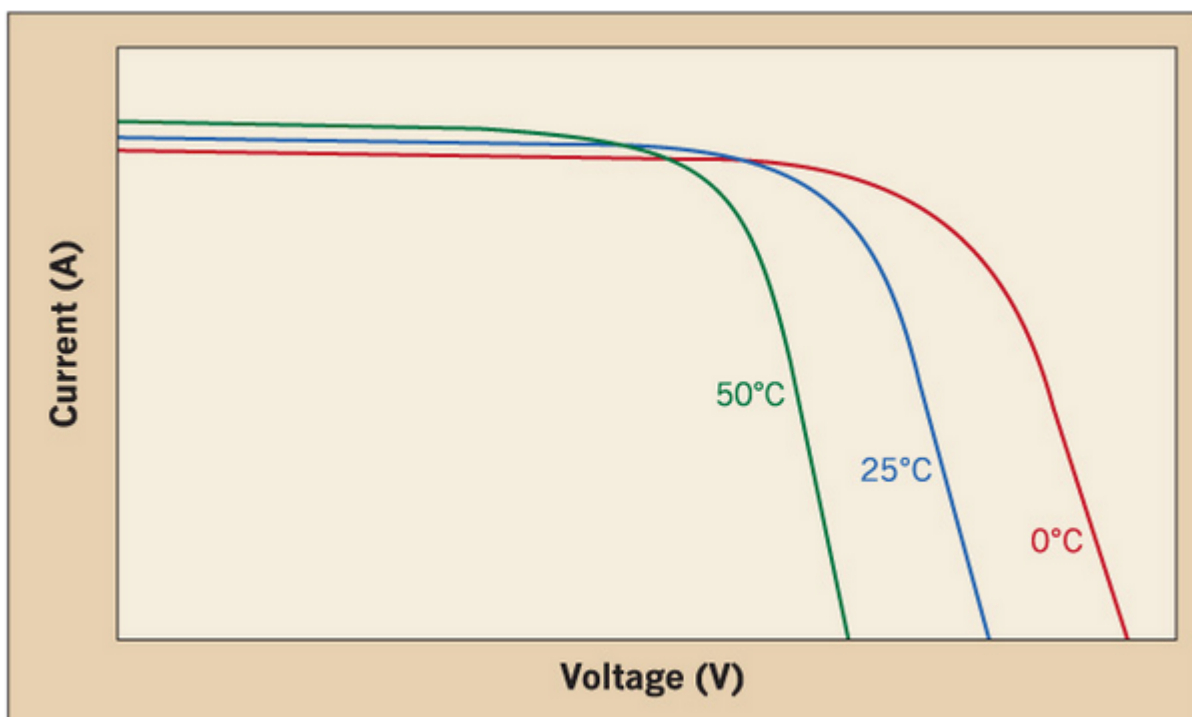
Έτσι η τάση ανοικτοκυκλώσεως προκύπτει:

$$V_{OC}(T) = \frac{E_{G0}}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{KT^3}{I_L} \quad (2.8)$$

,από την οποία φαίνεται πτώση της με την αύξηση της θερμοκρασίας (για τα στοιχεία πυριτίου υπολογίζεται σε περίπου $-2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$). Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται ελαφρά επίσης και ο παράγοντας πλήρωσης (Fill Factor, FF) εξαιτίας κυρίως της αύξησης του ανάστροφου ρεύματος κόρου. Πτώση παρατηρείται και στην απόδοση του ηλιακού στοιχείου με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όλες αυτές οι μεταβολές, απεικονίζονται στις εικόνες 2.6 και 2.7.



Εικόνα 2.6: Εξάρτηση χαρακτηριστικών μεγεθών της απόδοσης του στοιχείου από την θερμοκρασία [7].



Εικόνα 2.7: Εξάρτηση της καμπύλης I-V του στοιχείου από την μεταβολή της θερμοκρασίας [8].

2.4.2 Επίδραση της ακτινοβολίας

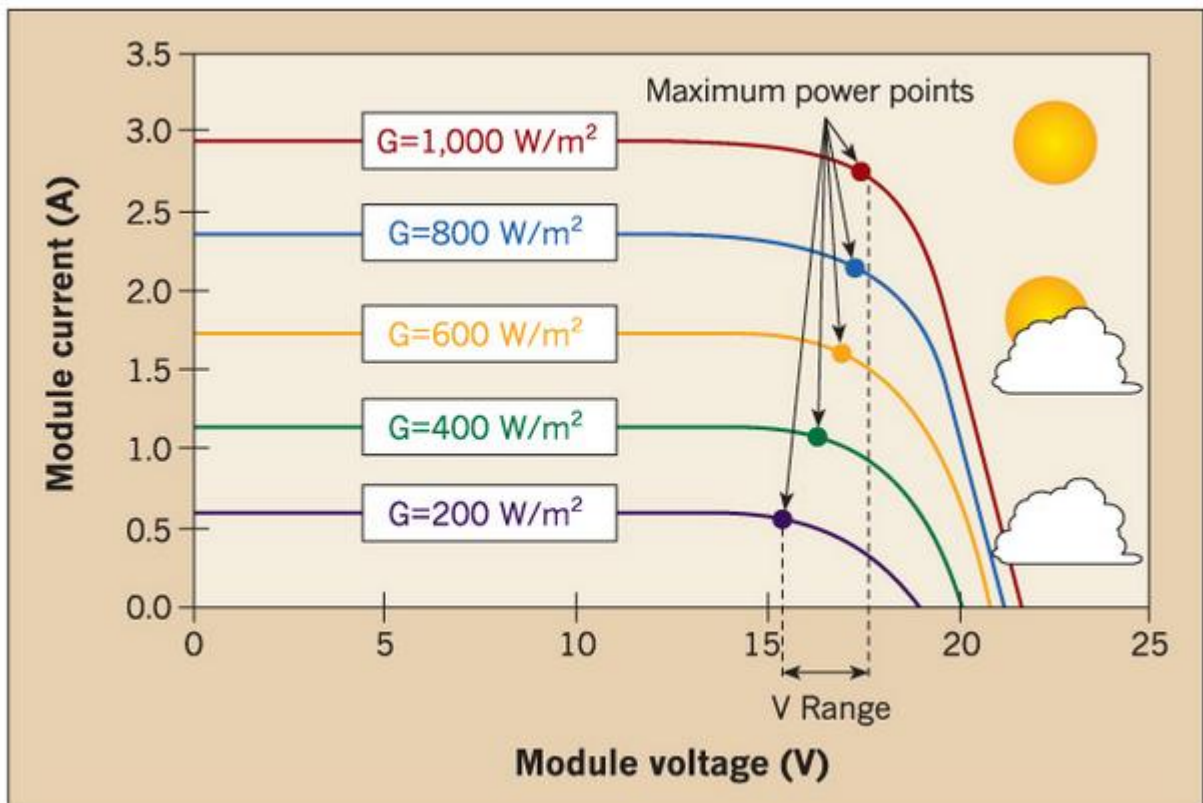
Για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας, το φωτορρέυμα των ηλιακών στοιχείων είναι ευθέως ανάλογο της έντασης της προσκείμενης ακτινοβολίας. Με βάση αυτή την αναλογία, αν το φωτορρέυμα σε κάποια καθορισμένη τιμή έντασης είναι ίσο με I_{L1} , σε ένα επίπεδο έντασης X φορές μεγαλύτερο θα είναι:

$$I_L = XI_{L1} \quad (2.9)$$

,ενώ αν η τάση ανοικτοκυκλώσεως στην ίδια αρχική τιμή έντασης ακτινοβολίας είναι V_{OC1} , στο τελικό επίπεδο έντασης θα προκύπτει:

$$V_{OC}(T) = V_{OC1} + m \frac{kT}{q} \ln X \quad (2.10)$$

Φαίνεται λοιπόν ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται λογαριθμικά με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ το φωτορρέυμα γραμμικά.



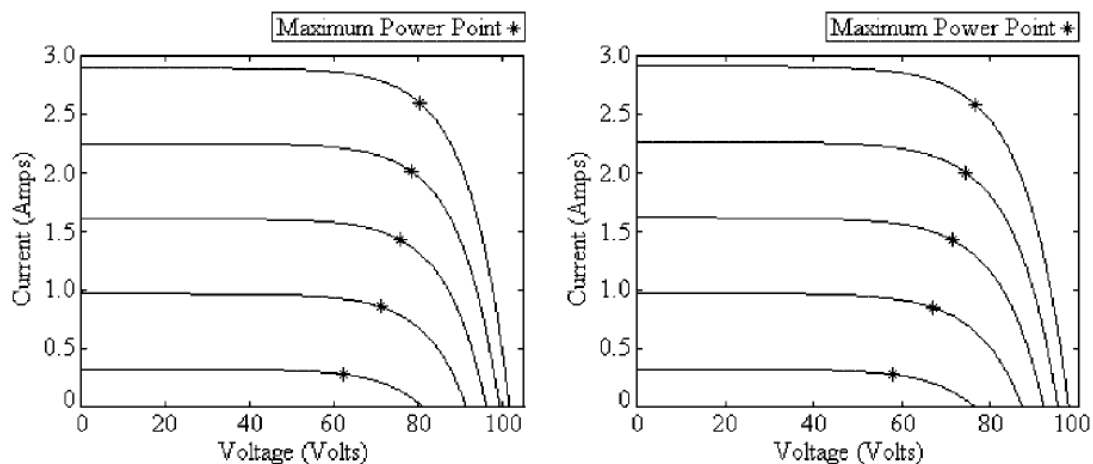
Εικόνα 2.8: Εξάρτηση της καμπύλης I-V και του σημείου μέγιστης ισχύος από το επίπεδο ακτινοβολίας [8].

2.5 Εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος (Maximum Power Point Tracking, MPPT)

Η συστοιχία φωτοβολταϊκών, κάτω από σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας έχει σταθερή χαρακτηριστική I-V, όπως έχει ήδη εξηγηθεί. Υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στην καμπύλη, που ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), στο οποίο η συστοιχία λειτουργεί με μέγιστη απόδοση και παράγει την μέγιστη ισχύ εξόδου. Όταν η συστοιχία είναι άμεσα συνδεδεμένη σε κάποιο φορτίο, το λειτουργικό σημείο του συστήματος θα βρίσκεται πάνω στην τομή της καμπύλης των φωτοβολταϊκών και στην καμπύλη του φορτίου. Στην γενική περίπτωση, το σημείο λειτουργίας θα είναι μετατοπισμένο από το σημείο μέγιστης ισχύος. Έτσι η τροφοδότηση ενός φορτίου θα απαιτούσε μία νέα μεγαλύτερη διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για την κάλυψη των απαιτήσεων του φορτίου.

Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ισχύος που ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker, MPPT), ο οποίος φροντίζει να διατηρείται πάντα το σημείο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται με την διατήρηση της τάσης ή του ρεύματος λειτουργίας των φωτοβολταϊκών ανεξάρτητα από τα αντίστοιχα μεγέθη του φορτίου. Με την χρήση κατάλληλου αλγορίθμου, μπορεί να εντοπιστεί και να συλλέξει την μέγιστη ισχύ από τα φωτοβολταϊκά. Ωστόσο το σημείο αυτό πάνω στην καμπύλη I-V δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων. Πρέπει να βρεθεί με χρήση είτε υπολογισμών πάνω στο μοντέλο ή με αναζήτηση

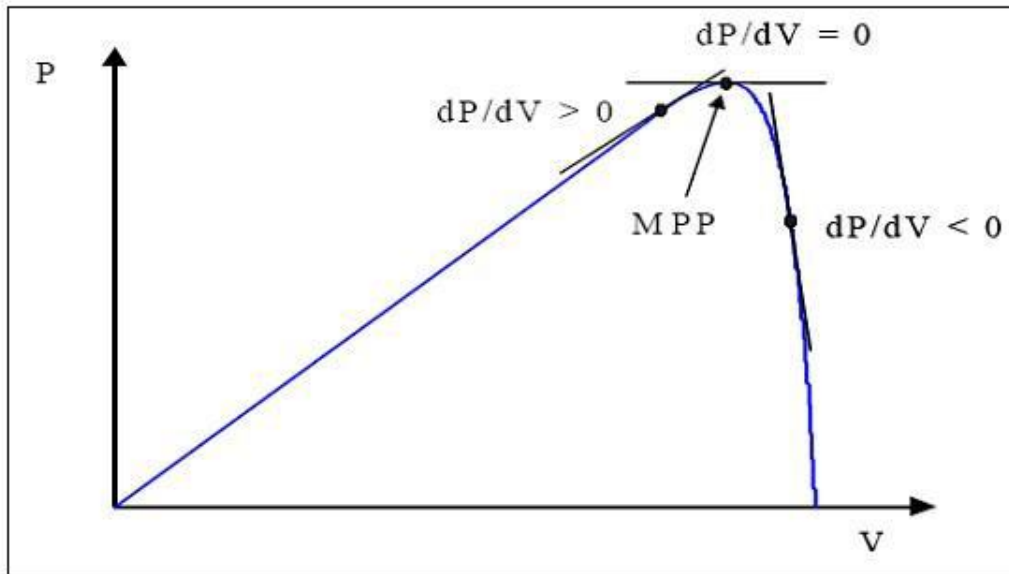
μέσω αλγορίθμου. Το πρόβλημα περιπλέκεται ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι το σημείο εξαρτάται κατά μη γραμμικό τρόπο από την ακτινοβολία και την θερμοκρασία.



Εικόνα 2.9: Εξάρτηση MPP από ακτινοβολία και θερμοκρασία. Το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει καμπύλες I-V σε θερμοκρασία 40°C για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας, ενώ το δεύτερο τις ίδιες καμπύλες για θερμοκρασία 50°C [9].

Διάφοροι αλγόριθμοι έχουν προταθεί για το MPPT [9]. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος σε εμπορικές εφαρμογές είναι ο αλγόριθμος perturb-and-observe (P&O), ωστόσο δεν υπάρχει ακόμα κάποιος αλγόριθμος κοινά αποδεκτός αλγόριθμος σαν βέλτιστος. Τέσσερις ευρέως χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι είναι:

- Perturb and Observe(P&O): Ο αλγόριθμος αυτός είναι ο πιο κοινός στην πράξη λόγω της ευκολίας στην υλοποίησή του. Η πιο βασική μορφή του αλγορίθμου λειτουργεί ως εξής: Έστω ότι τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν σε ένα σημείο πάνω στην I-V καμπύλη που βρίσκεται μακριά από το MPP. Τότε, με τον P&O η τάση λειτουργίας των φωτοβολταϊκών διαταράσσεται με μια μικρή προσαύξηση, και σαν αποτέλεσμα προκαλείται μία μικρή αλλαγή στην ισχύ, ΔP , η οποία μετράται. Αν το ΔP είναι θετικό, τότε η διαταραχή της λειτουργικής τάσης μετακίνησε το σημείο λειτουργίας πιο κοντά στο MPP. Έτσι, προκαλούνται περισσότερες διαταραχές στην τάση προς την ίδια κατεύθυνση (με το ίδιο πρόσημο), με σκοπό να μετατοπίσουν το σημείο λειτουργίας ακόμα πιο κοντά στο MPP. Αν το ΔP είναι αρνητικό, τότε το σημείο λειτουργίας έχει απομακρυνθεί από το MPP και το πρόσημο της διαταραχής θα πρέπει να αλλάξει ώστε να προσεγγιστεί το MPP. Τα πλεονεκτήματά του αλγορίθμου είναι όπως προαναφέρθηκε η απλότητα και η ευκολία στην υλοποίησή του, ωστόσο έχει και περιορισμούς που μειώνουν την αποδοτικότητά του. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι ότι όσο η ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται και η καμπύλη I-V γίνεται όλο και πιο επίπεδη, οι διαταραχές τάσης συνεπάγονται όλο και μικρότερες αλλαγές ισχύος, κάνοντας δύσκολη την εύρεση του MPP. Άλλο ένα μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι καθώς δεν μπορεί να διαπιστώσει αν έχει πραγματικά εντοπίσει το MPP, καταλήγει να ταλαντώνεται γύρω του αλλάζοντας σε κάθε εκτέλεση το πρόσημο της διαταραχής. Προβληματική είναι η συμπεριφορά του αλγορίθμου και σε περίπτωση γρήγορων μεταβολών στα επίπεδα ακτινοβολίας, καθώς αλλαγή της παραγόμενης ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε θετικό πρόσημο ΔP , χωρίς όμως αυτό να συνεπάγεται προσέγγιση του MPP. Διάφορες παραλλαγές στην λειτουργία του έχουν προταθεί.



Εικόνα 2.10: Βασική Ιδέα λειτουργίας αλγορίθμου P&O.

- Incremental Conductance(INC): Ο αλγόριθμος αυτός προκύπτει από την παραγωγή της φωτοβολταϊκής ισχύος ως προς την τάση και την εξίσωσή της με το μηδέν:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \text{ στο σημείο } MPP \quad (2.11)$$

,η οποία με αναδιάταξη των όρων γίνεται:

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (2.12)$$

Στο σημείο MPP λοιπόν, αυτές οι δύο ποσότητες πρέπει να είναι ίσες σε μέγεθος, αλλά με αντίθετο πρόσημο. Σε περίπτωση ανισότητας, το είδος της καθορίζει σε ποια κατεύθυνση πρέπει να είναι η διαταραχή ώστε να μετακινηθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος, όπου και παραμένει μέχρι να συμβεί κάποια αλλαγή στις συνθήκες λειτουργίας (όπως κάποια αλλαγή στο ρεύμα σαν αποτέλεσμα της αλλαγής της ακτινοβολίας). Αυτή η ακρίβεια στον εντοπισμό της σωστής κατεύθυνσης στην οποία πρέπει να κινηθεί και η ικανότητα να αντιληφθεί τότε πραγματικά έφτασε στο σημείο μέγιστης ισχύος χωρίς να ταλαντώνεται γύρω από αυτό, είναι και το πλεονέκτημα της μεθόδου απέναντι στον αλγόριθμο P&O.

- Parasitic Capacitance(PC): Ο αλγόριθμος αυτός είναι όμοιος με αυτόν του incremental conductance, με την εξαίρεση ότι συμπεριλαμβάνει το φαινόμενο της παρασιτικής χωρητικότητας επαφής C_p του ηλιακού στοιχείου, το οποίο μοντελοποιεί το φορτίο που αποθηκεύεται στις p-n ενώσεις των ηλιακών στοιχείων. Προσθέτοντας την

χωρητικότητα, και αναπαριστώντας την χρησιμοποιώντας τη σχέση $i(t) = CdV/dt$, και αμελώντας την παράλληλη αντίσταση του μοντέλου, προκύπτει:

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left[\frac{qV_D}{nkT} \right] - 1 \right) + C_P \frac{dv_P}{dt} = F(v_P) + C_P \frac{dv_P}{dt} \quad (2.13)$$

Έτσι το ρεύμα τελικά του στοιχείου προκύπτει σαν μία συνάρτηση δύο συνιστωσών, μία εξαρτώμενη από την τάση και μία από το ρεύμα της παρασιτικής χωρητικότητας. Έτσι η αυξητική αγωγιμότητα της συστοιχίας (g_P) μπορεί να οριστεί σαν $\frac{dF(v_P)}{dv_P}$ και η στιγμιαία αγωγιμότητα της συστοιχίας, g_L σαν $-\frac{F(v_P)}{v_P}$. Το MPP βρίσκεται εκεί που ισχύει $\frac{dP}{dv_P} = 0$. Πολλαπλασιάζοντας την (2.11) με την τάση v_P της συστοιχίας και παραγωγίζοντας το αποτέλεσμα, η εξίσωση για την ισχύ στο MPP γίνεται:

$$\frac{dF(v_P)}{dv_P} + C_P \left(\frac{\dot{V}}{V} + \frac{\dot{V}}{V} \right) + \frac{F(v_P)}{v_P} = 0 \quad (2.14)$$

, με τα διαφορικά πρώτης και δεύτερης τάξης της τάσης να λαμβάνουν υπ' όψιν φαινόμενα κυματισμών που προκύπτουν από τους μετατροπείς. Στην ουσία η εξίσωση αποτελεί μια γενίκευση αυτής της μεθόδου incremental conductance και παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε περιπτώσεις φωτοβολταϊκών μεγάλης ισχύος με πολλά στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα.

- Constant Voltage(CV): Η βάση για τον αλγόριθμο σταθερής τάσης (CV) είναι η παρατήρηση από τις I-V καμπύλες ότι ο λόγος της τάσης των φωτοβολταϊκών στην μέγιστη ισχύ (V_{MPP}) προς την τάση ανοικτοκυκλώσεως V_{OC} είναι περίπου σταθερός. Με άλλα λόγια,

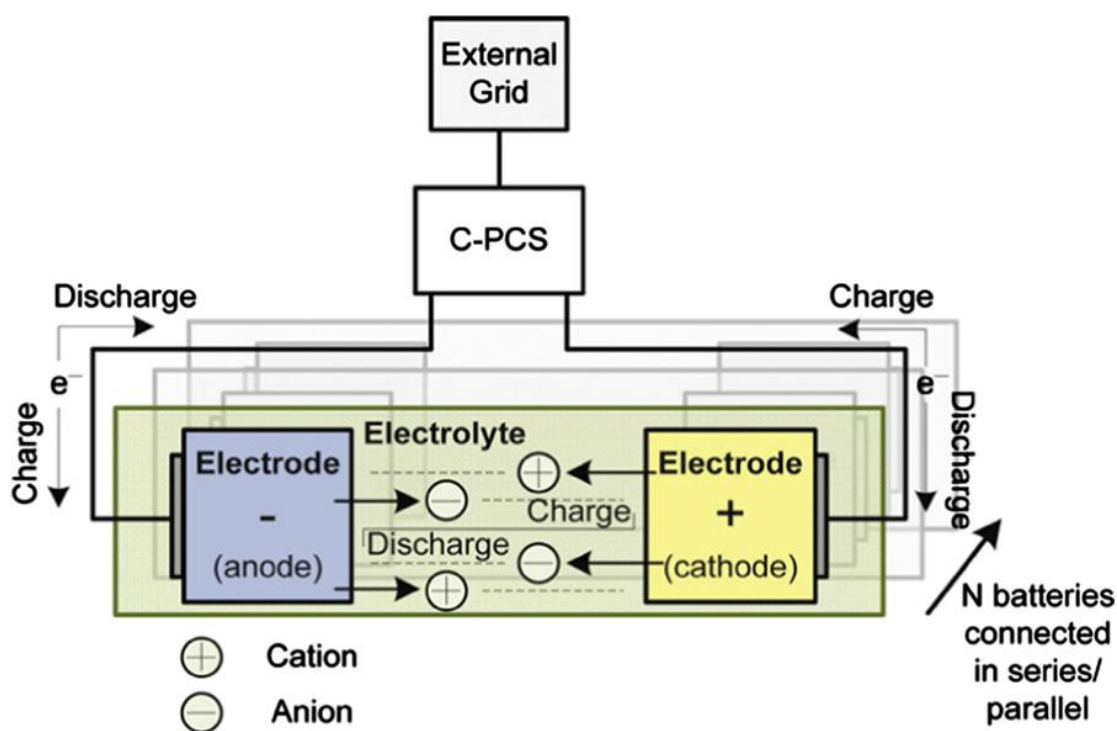
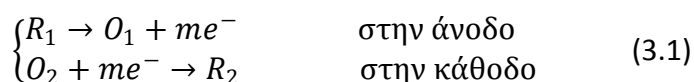
$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \cong K < 1 \quad (2.15)$$

.Με προσωρινή απομόνωση της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών, μετράται η τάση V_{OC} . Ύστερα, με βάση την (2.15) και την προεπιλεγμένη τιμή K, επαναπροσδιορίζει την τάση λειτουργίας μέχρι να φτάσει την V_{MPP} . Αν και η μεθοδολογία είναι απλή, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί μια βέλτιστη τιμή K, η οποία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 73% και 80% και εξαρτάται από την θερμοκρασία και την ακτινοβολία σε σημείο που μπορεί να μεταβληθεί μέχρι και 8% σε όλο το φάσμα των συνθηκών. Παραλλαγή της μεθόδου είναι ο αλγόριθμος σταθερού ρεύματος, που έχει την ίδια αρχή λειτουργίας.

3. Συσσωρευτές

3.1 Βασικά στοιχεία λειτουργίας συσσωρευτών.

Ένας συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία, συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα. Στους χημικούς τους δεσμούς περικλείεται αποθηκευμένη χημική ενέργεια, η οποία μπορεί να απελευθερωθεί μέσα από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Το στοιχείο αποτελείται από μία άνοδο, μία κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια. Κατά την εκφόρτιση, μία αντίδραση οξείδωσης λαμβάνει χώρα στην άνοδο. Σε αυτή την αντίδραση, κάποιο οξειδωτικό στοιχείο απελευθερώνει έναν αριθμό ηλεκτρονίων, τα οποία απελευθερώνονται στο εξωτερικό διασυνδεδεμένο κύκλωμα. Στην κάθοδο, λαμβάνει χώρα μια αντίδραση αναγωγής. Σε αυτήν την αντίδραση ο ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων λαμβάνεται από ένα αναγωγικό μέσο [11].



Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών της βασικής ηλεκτροχημικής λειτουργίας ενός συσσωρευτή [12].

Τα στοιχεία αυτά έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν με διάφορους τρόπους, σε σειρά ή παράλληλα. Καθώς η τάση λειτουργίας τους είναι αρκετά χαμηλή, υπάρχει μεγάλη ευελιξία στον τρόπο με τον οποίο θα συνδεθούν ώστε να επιτύχουν τις συνήθως μεγαλύτερες τιμές

τάσης που απαιτούνται στα συστήματα στα οποία διασυνδέονται. Αναλόγως την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται ή όχι, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

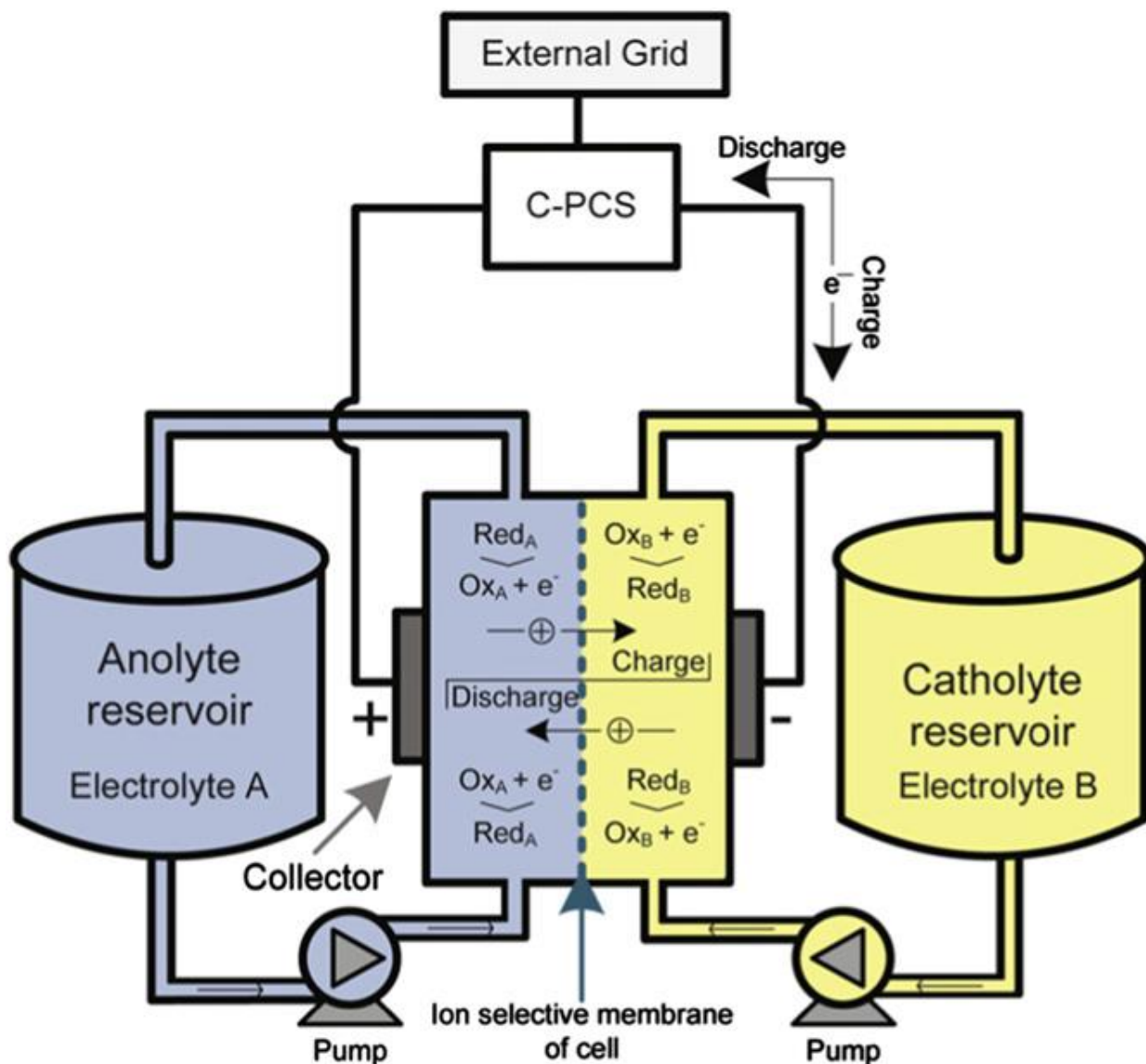
- οι συσσωρευτές που δεν μπορούν να επαναφορτιστούν, λόγω της εσωτερικής τους δομής και των υλικών που περιέχουν, οπότε είναι μίας χρήσης
- οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές, οι οποίοι επιτρέπουν την αποκατάσταση της αρχικής κατάστασης φόρτισής τους με εξωτερική ενέργεια, για όσο διάστημα προβλέπεται από την διάρκεια ζωής τους.

3.2 Είδη συσσωρευτών [12]:

- Συσσωρευτές μολύβδου – οξέος (Lead-Acid Batteries): Οι συσσωρευτές αυτοί είναι η πιο διαδεδομένη μορφή συσσωρευτών. Αποτελούνται από κυψελίδες σε μορφή στοιβάς, βυθισμένες σε αραιό διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4) που λειτουργεί σαν ηλεκτρολύτης. Το θετικό ηλεκτρόδιο κάθε κυψελίδας αποτελείται από διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2), ενώ το αρνητικό είναι πορώδης μόλυβδος. Κατά την διάρκεια του κύκλου εκφόρτισης, και τα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θειικό μόλυβδο ($PbSO_4$), ενώ κατά την διάρκεια του κύκλου φόρτισης, και τα δύο ηλεκτρόδια επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση. Υπάρχουν δύο κύρια είδη συσσωρευτών μολύβδου-οξέος: οι υγρού τύπου, και ρυθμιστικής βαλβίδας. Η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών είναι περίπου 5-15 χρόνια, και η απόδοσή τους κυμαίνεται στο 75-80%.
- Συσσωρευτές Νικελίου- Καδμίου ($Ni - Cd$): Η ανάπτυξη αυτού του τύπου αλκαλικών επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών έχει πραγματοποιηθεί από το 1950, ενώ πλέον είναι συστήματα καθιερωμένα στην αγορά. Τα βασικά εξαρτήματα αυτού του τύπου συσσωρευτών, είναι στοιχεία νικελίου και στοιχεία καδμίου σαν ενεργά υλικά του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου αντίστοιχα, και υδάτινο αλκαλικό διάλυμα σαν ηλεκτρολύτης. Κατά τον κύκλο εκφόρτισης, το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι $Ni(OH)_2$ και του αρνητικού $Cd(OH)_2$. Κατά τον κύκλο φόρτισης, το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι το $NiOOH$ και του αρνητικού το μεταλλικό κάδμιο. Το αλκαλικό διάλυμα KOH λειτουργεί σαν ηλεκτρολύτης. Ο συσσωρευτής αυτός έχει μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 3500 κύκλους), και δεν χρειάζεται ιδιαίτερη συντήρηση. Πάντως η διάρκεια ζωής του έχει μεγάλη εξάρτηση από το βάθος εκφόρτισης στο οποίο λειτουργεί, καθώς μπορεί να λειτουργεί για περισσότερους από 50000 κύκλους σε βάθος εκφόρτισης 10%.
- Συσσωρευτές Νατρίου – Θείου (NaS): Οι συσσωρευτές αυτοί είναι ένα νέο σχετικά σύστημα, και πολλά υποσχόμενο για εφαρμογές αποθήκευσης μεγάλης ισχύος. Η άνοδος είναι φτιαγμένη από νάτριο, ενώ η κάθοδος από θείο. Σαν ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται κεραμικό $\beta - Al_2O_3$, που λειτουργεί και σαν διαχωριστής ταυτόχρονα. Κατά την διάρκεια του κύκλου εκφόρτισης, το μεταλλικό υλικό της ανόδου οξειδώνεται και απελευθερώνει κατιόντα νατρίου, ενώ το υλικό της καθόδου ανάγεται και απελευθερώνει ανιόντα θείου(δισθενή). Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει την μεταφορά ιόντων νατρίου στην κάθοδο, όπου συνδέονται με ανιόντα θείου και παράγουν θειούχες ενώσεις νατρίου (μορφής NaS_x). Κατά την διάρκεια του κύκλου φόρτισης, η αντίθετη αντίδραση συμβαίνει. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του τύπου

συσσωρευτών είναι η μεγάλη θερμοκρασία λειτουργίας, γύρω στους 350°C. Οι συσσωρευτές αυτοί έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, και απόδοση 85%. Επίσης δεν παρουσιάζουν αυτοεκφόρτιση, δεν χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση και είναι ανακυκλώσιμοι κατά 99%.

- Συσσωρευτές ιόντων Λιθίου (Li – ion) : Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρές εφαρμογές, όπως κινητά ή φορητές συσκευές. Επίσης είναι στο επίκεντρο της προσπάθειας για δημιουργία συσκευών μεγάλης ισχύος με εφαρμογές σε ηλεκτρικά οχήματα και στατικές αποθήκες ενέργειας. Η λειτουργία τους βασίζεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μεταξύ κατιόντων λιθίου με άλλα ενεργά υλικά (analytic and catholytic active materials). Οι κυψελίδες των συσσωρευτών αποτελούνται από πλάκες ανόδου και καθόδου που περιέχουν υγρό ηλεκτρολυτικό υλικό. Οι περιοχές των ηλεκτροδίων διαχωρίζονται από έναν πορώδη διαχωριστή πολυαιθυλενίου ή πολυπροπυλενίου, που επιτρέπει την μετάβαση ιόντων λιθίου. Κατά την διάρκεια της φόρτισης, κατιόντα λιθίου ρέουν από το θετικό ηλεκτρόδιο, που είναι φτιαγμένο από $LiCoO_2$, στα φύλλα γραφίτη του αρνητικού ηλεκτροδίου. Στον κύκλο εκφόρτισης λαμβάνει χώρα η αντίστροφη διαδικασία. Καθώς η επίδοση και το εύρος του συσσωρευτή είναι άμεσα συνδεδεμένο με τα ενεργά υλικά των ηλεκτροδίων και τον ηλεκτρολύτη, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην έρευνα που διεξάγεται στον τομέα της τεχνολογίας υλικών. Η απόδοσή τους προσεγγίζει το 78% για 3500 κύκλους.
- Συστήματα Συσσωρευτών Ροής: Οι συσσωρευτές αυτοί είναι σχετικά νέοι. Η λειτουργική αρχή τους βασίζεται σε αντιστρεπτές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν σε ένα σύνολο κυψελίδων συνδεδεμένων σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό και των δύο, με σκοπό να πετύχουν το επιθυμητό επίπεδο τάσης. Αντίθετα με τους συμβατικούς συσσωρευτές, δύο διαφορετικά υγρά ηλεκτρολυτικά διαλύματα περιέχονται σε διαφορετικές δεξαμενές. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, τα διαλύματα αυτά προωθούνται στην ηλεκτροχημική κυψελίδα, όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση. Τρία παραδείγματα εμπορικά διαθέσιμων συσσωρευτών ροής είναι οι συσσωρευτές οξειδοαναγωγής βαναδίου (Vanadium Redox Batteries, VRB), συσσωρευτές βρωμιούχου ψευδαργύρου (Zinc Bromine Battery, ZBB) και οι συσσωρευτές πολυθειούχου βρωμιδίου (Polysulphide Bromide Battery, PSB). Κατά τον κύκλο φόρτισης αυτών των συσσωρευτών, ο ένας ηλεκτρολύτης οξειδώνεται στην άνοδο, ενώ ο άλλος ανάγεται στην κάθοδο, με το αντίστροφο να συμβαίνει κατά την διάρκεια του κύκλου εκφόρτισης. Ένα πλεονέκτημα των συσσωρευτών είναι ότι η χωρητικότητά τους μπορεί να καθοριστεί εύκολα, καθώς εξαρτάται από τον όγκο του ηλεκτρολυτικού διαλύματος, με αποτέλεσμα το κόστος εγκατάστασης να μειώνεται όσο τα συστήματα μεγαλώνουν. Επίσης μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως χωρίς πρόβλημα, και έχουν πολύ μικρή εμφάνιση αυτοεκφόρτισης. Έτσι έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, χαμηλή ανάγκη συντήρησης και αποθηκεύουν ενέργεια για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η διάρκεια ζωής των VRB είναι περίπου 15-20 χρόνια, με περισσότερους από 1000 κύκλους φόρτισης - εκφόρτισης μέχρι βάθος εκφόρτισης 100%, οι ZBB έχουν απόδοση της τάξης του 75%-85%, ενώ οι PSB έχουν απόδοση 75% και χρόνο ζωής πάνω από 15 χρόνια.



Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας ενός συσσωρευτή ροής [12].

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας των συσσωρευτών

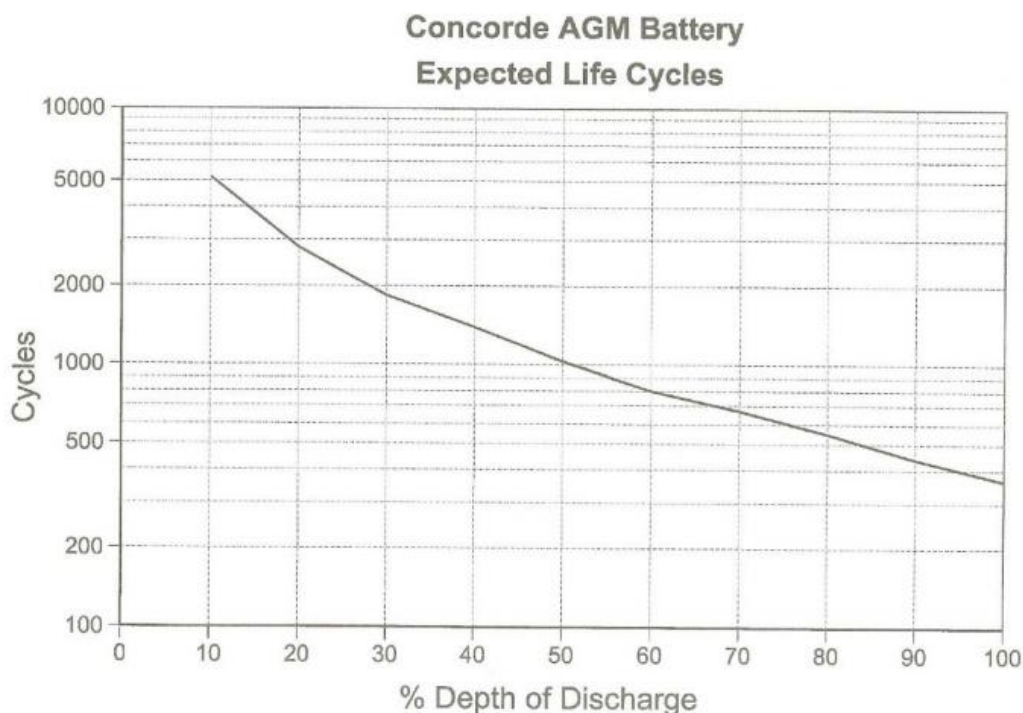
Κάποια μεγέθη που χαρακτηρίζουν την λειτουργία των συσσωρευτών και πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την μελέτη και λειτουργία τους, είναι τα εξής:

- Ονομαστική χωρητικότητα q_{max} : είναι ο μέγιστος αριθμός του φορτίου σε Αμπερώρια (Ah) που μπορεί να ληφθεί από την μπαταρία, υπό προκαθορισμένες συνθήκες εκφόρτισης(με έναν χαμηλό ρυθμό εκφόρτισης, που να προσεγγίζει το $I \approx 0A$).
- Κατάσταση φόρτισης ενός συσσωρευτή (State of Charge, ή αλλιώς SOC) : ο λόγος του φορτίου που έχει αποθηκευτεί στον συσσωρευτή (q) προς την ονομαστική χωρητικότητά του (q_{max}).

$$SOC = \frac{q}{q_{max}} \quad (3.2)$$

Το SOC μετριέται σε απόλυτες μονάδες και κυμαίνεται μεταξύ 0(κατάσταση πλήρους εκφόρτισης) και 1 (κατάσταση πλήρους φόρτισης) ή μεταξύ 0 και 100 όταν τα μεγέθη αναφέρονται σαν ποσοστά επί τοις εκατό.

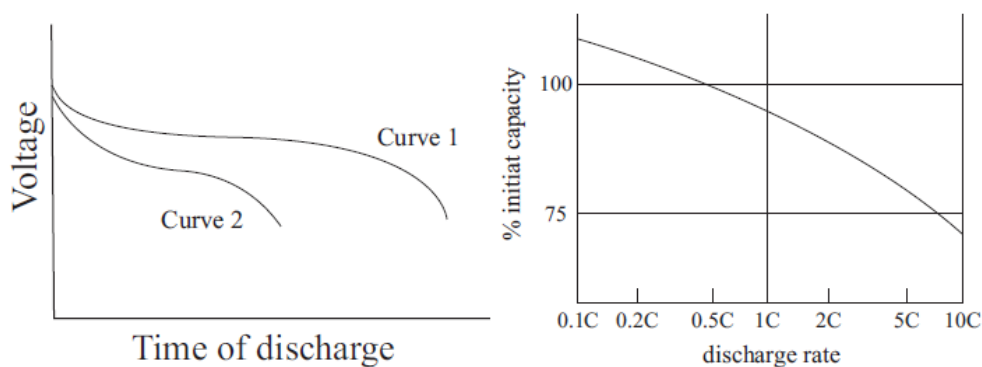
- Μια εναλλακτική μορφή του συγκεκριμένου μεγέθους είναι το Βάθος Εκφόρτισης (Depth of Discharge, ή αλλιώς DOD). Σε αυτό το μέγεθος, η κατάσταση πλήρους φόρτισης αντιστοιχεί στο 0 και η κατάσταση πλήρους εκφόρτισης στο 1. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται περισσότερο στην συζήτηση για την διάρκεια ζωής της μπαταρίας μετά από επαναλαμβανόμενη χρήση, σε αντίθεση με το SOC που χρησιμοποιείται κυρίως για να εκφράσει την παρούσα κατάστασή της.
- Απόδοση: είναι ο λόγος του φορτίου που μπορεί να ληφθεί κατά την εκφόρτιση προς το μέγεθος του φορτίου που απαιτείται για να αποκατασταθεί η αρχική κατάσταση φόρτισης. Εξαρτάται τόσο από την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, όσο και από το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης.
- Διάρκεια ζωής: το πλήθος από πλήρεις κύκλους φόρτισης/ εκφόρτισης που μπορεί να υποβληθεί η μπαταρία πριν χάσει το 20% της ονομαστικής της χωρητικότητας. Είναι σε άμεση συνάρτηση με το βάθος εκφόρτισης στο οποίο φτάνει ο συσσωρευτής.



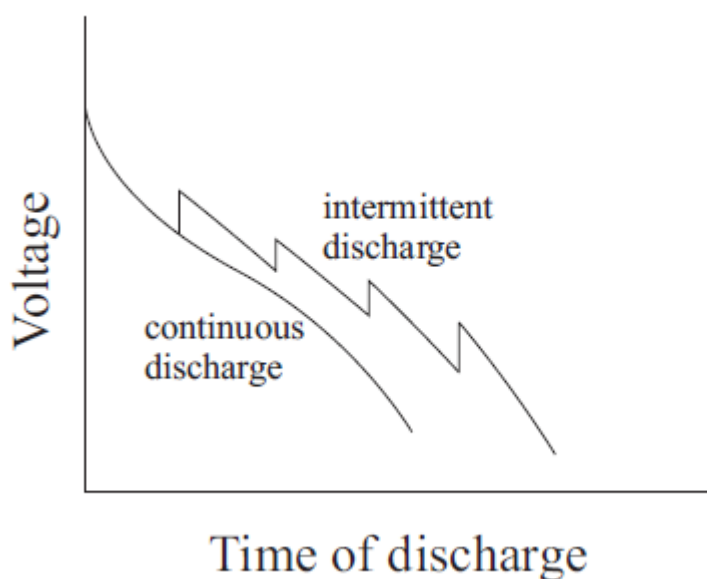
Εικόνα 3.3: Εξάρτηση της διάρκειας ζωής ενός συσσωρευτή από το βάθος εκφόρτισής του.

3.4 Εξαγωγή μοντέλων συσσωρευτών

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των συσσωρευτών είναι περίπλοκη, εξ αιτίας των μη γραμμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της εκφόρτισης. Στην ιδανική περίπτωση, η τάση μένει σταθερή κατά την διάρκεια της εκφόρτισης, με μία απότομη πτώση στο μηδέν όταν η μπαταρία εκφορτιστεί πλήρως. Η ιδανική χωρητικότητα θα έμενε σταθερή για όλες τις τιμές ρεύματος εκφόρτισης, και όλη η αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, στις πραγματικές περιπτώσεις συσσωρευτών η τάση πέφτει σταδιακά κατά την διάρκεια της εκφόρτισης, και η ενεργός χωρητικότητα είναι χαμηλότερη για υψηλότερα ρεύματα εκφόρτισης. Επίσης, υπάρχει και το φαινόμενο ανάκτησης: σε περιόδους με χαμηλή ή μηδενική εκφόρτιση, η μπαταρία μπορεί να ανακτήσει φορτίο που είχε χάσει σε περίοδο υψηλής εκφόρτισης ως ένα βαθμό. Με αυτόν τον τρόπο η ενεργός χωρητικότητα αυξάνεται και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας επεκτείνεται. Αν και τα φαινόμενα αυτά ισχύουν για κάθε τύπο συσσωρευτή, σε διαφορετικούς τύπους εμφανίζονται με διαφορετική έκταση.



Εικόνα 3.4: Εξάρτηση τάσης και χωρητικότητας συσσωρευτή από τον ρυθμό εκφόρτισής του.



Εικόνα 3.5: Φαινόμενο ανάκτησης.

3.4.1 Ηλεκτροχημικά μοντέλα:

Τα ηλεκτροχημικά μοντέλα βασίζονται στις χημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στον συσσωρευτή. Τα μοντέλα περιγράφουν τις διαδικασίες αυτές με μεγάλη λεπτομέρεια, κάτι που τα καθιστά τα ακριβέστερα μοντέλα συσσωρευτών. Ωστόσο, η πολύ λεπτομερής περιγραφή καθιστά τα μοντέλα περίπλοκα και δύσκολο να παραμετροποιηθούν.

Οι Doyle, Fuller και Newman ανέπτυξαν ένα ηλεκτροχημικό μοντέλο για συσσωρευτές λιθίου και ιόντων λιθίου. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από έξι πεπλεγμένες μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις. Η επίλυση των εξισώσεων αυτών δίνει το ρεύμα και την τάση σαν συναρτήσεις του χρόνου, και το δυναμικό στον ηλεκτρολύτη και στις φάσεις των ηλεκτροδίων, την συγκέντρωση άλατος, την ταχύτητα της αντίδρασης και την πυκνότητα ρεύματος στον ηλεκτρολύτη σαν συναρτήσεις του χρόνου και της θέσης στον συσσωρευτή.

Υπάρχουν προγράμματα σε υπολογιστές (όπως το Dualfoil σε Fortran) [14] που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση συσσωρευτών ιόντων λιθίου βάσει αυτού του μοντέλου. Υπολογίζει την μεταβολή όλων των μεγεθών του συσσωρευτή για διαφορετικό προφίλ φορτίου. Ο χρήστης πρέπει να προσδιορίσει πάνω από 50 παραμέτρους σχετιζόμενες με τον συσσωρευτή, όπως το πάχος των ηλεκτροδίων, την αρχική συγκέντρωση άλατος στον ηλεκτρολύτη και την θερμοχωρητικότητα του συστήματος. Κάτι τέτοιο απαιτεί πολύ λεπτομερή γνώση του συσσωρευτή που πρέπει να μοντελοποιηθεί. Βέβαια η τελική ακρίβεια του προγράμματος είναι πολύ υψηλή, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο σύγκρισης για άλλα μοντέλα ώστε να διαπιστωθεί η δική τους ακρίβεια.

3.4.2 Μοντέλα ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος

Το πρώτο μοντέλο ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος προτάθηκε από τον Hageman [15], κατασκευάζοντας απλά κυκλώματα στο πρόγραμμα PSpice για να προσομοιώσει συσσωρευτές νικελίου-καδμίου, μολύβδου-οξέος και αλκαλικούς. Η βασική ιδέα για την μοντελοποίηση όλων των τύπων συσσωρευτών είναι η ίδια:

- Ένας πυκνωτής αναπαριστά την χωρητικότητα του συσσωρευτή,
- Μια κανονικοποίηση με βάση των ρυθμό εκφόρτισης υπολογίζει την απωλεσθείσα χωρητικότητα σε υψηλά ρεύματα εκφόρτισης,
- Ένα κύκλωμα για να εκφορτίζεται ο συσσωρευτής
- Ένας πίνακας αντιστοίχισης τάσης με κατάσταση φόρτισης,
- Μία αντίσταση που να αναπαριστά την αντίσταση του συσσωρευτή.

Από την βασική μορφή μιας γενικής υλοποίησης του μοντέλου, μικρές αλλαγές χρειάζονται να γίνουν ώστε να προσαρμοστεί σε ένα συγκεκριμένο τύπο συσσωρευτή. Αν και αυτός ο τύπος μοντέλων είναι αρκετά απλούστερος από τα ηλεκτροχημικά μοντέλα και επομένως πολύ λιγότερο πολύπλοκος υπολογιστικά, χρειάζεται αρκετή προσπάθεια για να διαμορφωθεί σωστά. Ειδικά ο πίνακας για τα διάφορα χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο χρειάζονται αρκετά πειραματικά δεδομένα για την συμπεριφορά του συσσωρευτή. Επιπρόσθετα, τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν μικρότερη ακρίβεια, με σφάλματα της τάξης του 10%.

3.4.3 Αναλυτικά μοντέλα

Τα αναλυτικά μοντέλα περιγράφουν τον συσσωρευτή σε ένα πιο αφαιρετικό επίπεδο από ότι τα ηλεκτροχημικά και τα ηλεκτρικά ισοδύναμα. Οι βασικές ιδιότητες του συσσωρευτή μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας μόνο λίγες εξισώσεις. Έτσι, αυτός ο τύπος μοντέλων γίνεται ευκολότερος στην χρήση.

3.4.3.1 Ο Νόμος του Peukert:

Το απλούστερο μοντέλο πρόβλεψης της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή που λαμβάνει υπόψιν μέρος των μη γραμμικών ιδιοτήτων του συσσωρευτή, είναι ο νόμος του Peukert. Συμπεριλαμβάνει την μη γραμμική σχέση μεταξύ της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή και του ρυθμού εκφόρτισης, αλλά δεν μοντελοποιεί το φαινόμενο ανάκτησης. Σύμφωνα με τον νόμο του Peukert, η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή (L) μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο:

$$L = \frac{\alpha}{I^b} \quad (3.3)$$

,όπου I είναι το ρεύμα εκφόρτισης, και α και b είναι σταθερές που λαμβάνονται πειραματικά. Ιδανικά, το α θα έπρεπε να είναι ίσο με την χωρητικότητα του συσσωρευτή, και το b είναι ένας αριθμός μεγαλύτερος του 1. Για τους περισσότερους συσσωρευτές, η τιμή του b κυμαίνεται μεταξύ 1.2 και 1.7 [16].

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας τον νόμο του Peukert για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή είναι αρκετά καλά για συνεχή φορτία. Όμως το μοντέλο δεν ανταποκρίνεται καλά σε μεταβαλλόμενα ή ασυνεχή φορτία. Στο [17] οι Rakhmatov και Vrudhula δίνουν μια εκτεταμένη εκδοχή του νόμου του Peukert για μη σταθερά φορτία. Αντικαθιστώντας στην αρχική σχέση το I με το μέσο ρεύμα μέχρι την χρονική στιγμή $t=L$. Για ένα τμηματικά σταθερό προφίλ εκφόρτισης, με t_k τα χρονικά σημεία στα οποία το ρεύμα αλλάζει, προκύπτει

$$L = \frac{\alpha}{\left[\frac{\sum_{k=1}^n I_k (t_k - t_{k-1})}{L} \right]^b} \quad (3.4)$$

.Η εξίσωση δεν είναι τόσο απλή όσο φαίνεται. Είναι αδύνατο να απομονωθεί εύκολα το L στην εξίσωση, καθώς εμφανίζεται επίσης και μέσα στο άθροισμα (για $k=n$, $t_k = L$). Για $n=1$, η σχέση μεταπίπτει στην αρχική. Αν και ο επεκταμένος νόμος του Peukert μπορεί να χειριστεί μη σταθερά προφίλ εκφόρτισης, παραμένει ακόμα αρκετά απλός. Μόνο το μέσο ρεύμα εκφόρτισης λαμβάνεται υπόψιν, και το φαινόμενο ανάκτησης παραμένει μη μοντελοποιημένο.

3.4.3.2 Rakhmatov και Vrudhula

Εκτός του επεκταμένου νόμου του Peukert, οι Rakhmatov και Vrudhula δίνουν ένα νέο αναλυτικό μοντέλο συσσωρευτών [18]. Το μοντέλο περιγράφει την διαδικασία διάχυσης του ενεργού υλικού μέσα στον συσσωρευτή. Η διάχυση θεωρείται μονοδιάστατη στο πεδίο του μήκους w . Η συγκέντρωση του ενεργού υλικού σε χρόνο t και απόσταση $x \in [0, w]$ από το ηλεκτρόδιο συμβολίζεται ως $C(x, t)$. Για να προσδιοριστεί η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή, πρέπει να υπολογιστεί ο χρόνος στον οποίο η συγκέντρωση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ($C(0, t)$) πέφτει κάτω από το επίπεδο αποκοπής C_{cutoff} . Η μονοδιάστατη διαδικασία διάχυσης περιγράφεται από τους νόμους του Fick:

$$\begin{cases} -J(x, t) = D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \end{cases} \quad (3.5)$$

,όπου $J(x, t)$ είναι η ροή ενεργού υλικού σε χρόνο t και θέση x , και D είναι η σταθερά διάχυσης. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, η ροή στο αριστερό άκρο της περιοχής διάχυσης ($x=0$) είναι ανάλογη του ρεύματος $i(t)$. Η ροή στο δεξί άκρο ($x=w$) είναι μηδενική. Αυτό δίνει τις ακόλουθες συνοριακές συνθήκες:

$$\begin{cases} D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{i(t)}{\nu F A} \\ D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=w} = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

,όπου A είναι το εμβαδό της επιφάνειας του ηλεκτροδίου, F είναι η σταθερά του Faraday ($96485.31 \text{ C mol}^{-1}$) και ν είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αναμειγνύονται στην ηλεκτροχημική αντίδραση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.

Με σχηματισμό Laplace, από τις διαφορικές εξισώσεις και τις συνοριακές συνθήκες που δόθηκαν, είναι πιθανή η λήψη μιας αναλυτικής λύσης. Από την λύση λαμβάνεται η ακόλουθη έκφραση που συσχετίζει το φορτίο, την διάρκεια ζωής του συσσωρευτή και τις παραμέτρους του:

$$\alpha = \int_0^L \frac{i(t)}{\sqrt{L-\tau}} d\tau + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{i(t)}{\sqrt{L-\tau}} e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L-\tau}} d\tau \quad (3.7)$$

,όπου $\alpha = \nu F A \sqrt{\pi D} C^* \rho(L)$, $\beta = \frac{w}{\sqrt{D}}$, C^* είναι η συγκέντρωση στο $t=0$ και $\rho(L) = 1 - \frac{C(0, L)}{C^*}$.

Στην ειδική περίπτωση συνεχούς ρεύματος εκφόρτισης (I), η έκφραση για το α απλοποιείται σε:

$$\alpha = 2I\sqrt{L} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\sqrt{L} e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L}} - \beta m \sqrt{\pi} \Phi \left(\frac{\beta m}{\sqrt{L}} \right) \right) \quad (3.8)$$

,όπου $\Phi(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$. Μία καλή προσέγγιση του α μπορεί να γίνει με λήψη των δέκα πρώτων όρων του άπειρου αθροίσματος. Ταυτόχρονα, με μία καλή προσέγγιση για το Φ , η σχέση γίνεται:

$$\alpha = 2I\sqrt{L} \left(1 + 2 \sum_{m=1}^{10} \left(e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L}} - \frac{\pi e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L}}}{\pi - 1 + \sqrt{1 + \pi \frac{L}{\beta^2 m^2}}} \right) \right) \quad (3.9)$$

Με αυτή την εξίσωση και για δεδομένο ρεύμα εκφόρτισης, μπορεί να προβλεφθεί η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή. Για να είναι δυνατόν να γίνουν αυτές οι προβλέψεις, χρειάζεται εκτίμηση του α και του β από τα πειραματικά δεδομένα.

Οι δημιουργοί του μοντέλου συνέκριναν το μοντέλο τους τόσο με το πρόγραμμα Dualfoil της ηλεκτροχημικής προσομοίωσης, όσο και με την επεκταμένη έκδοση του τύπου του Peukert που μπορεί να χειριστεί μεταβλητά φορτία. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Dualfoil χρησιμοποιούνται σαν τιμές αναφοράς, καθώς είναι η πιο ακριβής. Για συνεχή φορτία, το μοντέλο προβλέπει διάρκεια ζωής με ένα μέσο σφάλμα της τάξης του 3% και ένα μέγιστο σφάλμα του 6%, συγκρινόμενο με αυτά που λαμβάνονται με χρήση του προγράμματος Dualfoil. Σε αντίθεση, ο τύπος του Peukert δείχνει ένα μέσο σφάλμα της τάξης του 14% και ένα μέγιστο σφάλμα της τάξης του 43%. Ο τύπος του Peukert λειτουργεί καλά για ελαφριά φορτία, αλλά τα σφάλματα γίνονται πολύ μεγαλύτερα σε περιπτώσεις μεγαλύτερων φορτίων. Για διακοπτόμενα και μεταβλητά φορτία στα πειράματα, το αναλυτικό μοντέλο δουλεύει ακόμα καλύτερα, με ένα μέγιστο σφάλμα της τάξης του 2,7% και ένα μέσο σφάλμα μικρότερο του 1%. Και εδώ τα αποτελέσματα του τύπου του Peukert είναι πολύ χειρότερα. Κάτι τέτοιο βέβαια είναι αναμενόμενο από την στιγμή που το ο τύπος του Peukert δεν λαμβάνει το φαινόμενο ανάκτησης του συσσωρευτή υπ' όψιν.

3.4.3.3 Kinetic Battery Model

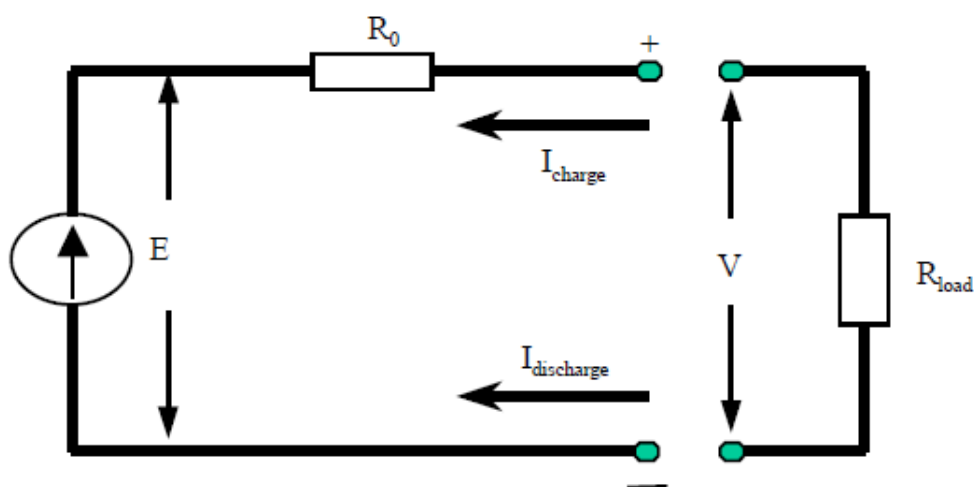
Το Kinetic Battery Model (KiBaM) αναπτύχθηκε με σκοπό να αντικαταστήσει τα υπάρχοντα πολύπλοκα μοντέλα για συσσωρευτές, τα οποία εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα χωρίς να έχουν σημαντικά καλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά τους [19]. Το μοντέλο, σε αντίθεση με προγενέστερά του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις λειτουργίες τόσο της φόρτισης όσο και της εκφόρτισης, υπολογίζοντας την μεταβολή στην κατάσταση φόρτισης σαν άμεση συνάρτηση των ρυθμών φόρτισης και εκφόρτισης. Το φορτίο θεωρείται ότι μπορεί να αποθηκευθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, είτε ως άμεσα διαθέσιμο είτε σαν δεσμευμένο χημικά στο εσωτερικό του συσσωρευτή. Το διαθέσιμο φορτίο τροφοδοτείται απ'ευθείας στο εξωτερικό κύκλωμα, ενώ το δεσμευμένο αναπληρώνει μόνο το διαθέσιμο. Η λειτουργία του μοντέλου, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα γνωστά μοντέλα συσσωρευτών, χρειάζεται τον καθορισμό μόνο τριών παραμέτρων. Το μοντέλο μπορεί να απεικονίσει την επίπτωση στην χωρητικότητα που έχουν μεγάλοι ρυθμοί φόρτισης/εκφόρτισης και την επίδραση του ρεύματος του συσσωρευτή στην τάση της και στην κατάσταση φόρτισης, αδυνατεί όμως να

απεικονίσει με ακρίβεια την απότομη αύξηση της τάσης σε καταστάσεις σχεδόν πλήρους φόρτισης και την απότομη πτώση της σε καταστάσεις σχεδόν πλήρους εκφόρτισης, καθώς και την επίδραση της θερμοκρασίας.

Όπως και σε πολλά άλλα μοντέλα, ο συσσωρευτής παρουσιάζεται σαν μια πηγή τάσης σε σειρά με μία αντίσταση. Η εσωτερική αντίσταση θεωρείται σταθερή, και η εσωτερική τάση, E , μεταβάλλεται με την κατάσταση φόρτισης. Η τάση του συσσωρευτή τότε δίνεται από τον τύπο:

$$V = E - IR_0 \quad (3.10)$$

,με I να συμβολίζεται το ρεύμα εκφόρτισης.



Εικόνα 3.6: Ηλεκτρικό ισοδύναμο απεικόνισης του συσσωρευτή στο Kinetic Battery Model.

Στο μοντέλο η εσωτερική πηγή τάσης E διαφοροποιείται ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης και το ρεύμα, ως ακολούθως:

$$E = E_0 + AX + CX/(D - X) \quad (3.11)$$

,όπου:

- Με E_0 συμβολίζεται η εσωτερική τάση σε κατάσταση πλήρους φόρτισης και μηδενικού ρεύματος,
- Με A συμβολίζεται η αρχική γραμμική μεταβολή της εσωτερικής τάσης του συσσωρευτή σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης
- Με C, D συμβολίζονται παράμετροι που μοντελοποιούν την απότομη αύξηση της πτώσης τάσης κοντά στην κατάσταση της πλήρους εκφόρτισης (στο γόνατο δηλαδή της καμπύλης).
- Τέλος, με X συμβολίζεται η κανονικοποιημένη χωρητικότητα που αφαιρείται από τον συσσωρευτή για ένα δεδομένο ρεύμα εκφόρτισης:

$$X = \frac{q_{out}}{q_{max}(I)} q_{max} \quad (3.12)$$

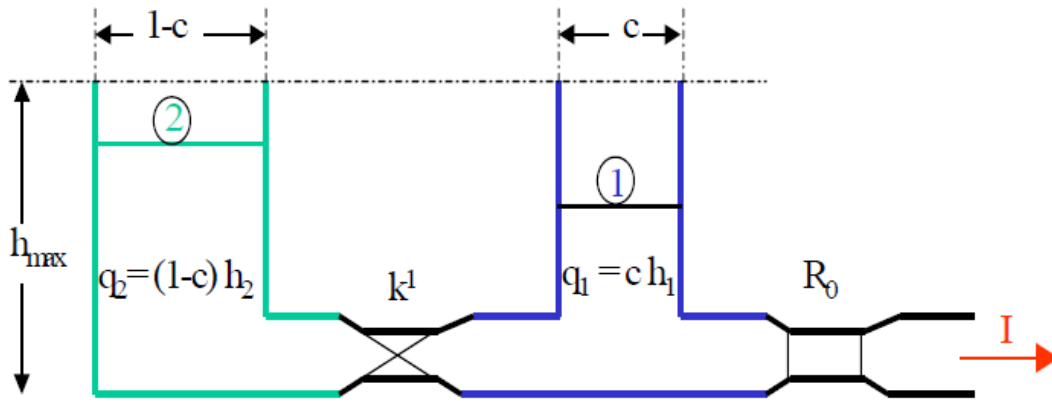
Με $q_{max}(I)$ συμβολίζεται η χωρητικότητα του συσσωρευτή για κάθε τιμή ρεύματος εκφόρτισης I και με q_{out} το φορτίο που έχει αφαιρεθεί μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο της εκφόρτισης (με αρχικά πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή):

$$q_{out} = \int I dt = q_{max} - q_1 - q_2 \quad (3.13)$$

Έτσι το μοντέλο τάσης μπορεί να προσδιοριστεί με την γνώση τεσσάρων παραμέτρων (E_0 , A , C , D), οι οποίες μπορούν να προσδιοριστούν με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στα δεδομένα που δίνονται από τον κατασκευαστή. Στην μελέτη των (Manwell & McGowan, 1994) αναφέρεται ότι οι παράμετροι αυτές θα πρέπει να προσδιοριστούν ξεχωριστά για την φόρτιση και για την εκφόρτιση του συσσωρευτή.

Ο τρόπος που κατανέμεται το φορτίο στον συσσωρευτή αναπαρίσταται σαν δύο δοχεία τα οποία διαχωρίζονται μέσω μίας αγωγιμότητας. Το ένα δοχείο περιέχει το φορτίο που είναι άμεσα διαθέσιμο προς χρήση από το εξωτερικό κύκλωμα, ενώ το άλλο περιέχει το φορτίο που έχει προσδεθεί στους χημικούς δεσμούς του συσσωρευτή. Η αγωγιμότητα αναπαριστά την σταθερά που δείχνει τον ρυθμό με βάση τον οποίο μία χημική αντίδραση ή μία διαδικασία διάχυσης καθιστά το δεσμευμένο φορτίο διαθέσιμο. Ο ρυθμός αυτός, σε μία αναλογία της αρχής των συγκοινωνούντων δοχείων, είναι ευθέως ανάλογος της διαφοράς μεταξύ του ύψους του περιεχομένου των δύο δοχείων (συνεπώς αν τα ύψη είναι μεταξύ τους ίσα, δεν υπάρχει ροή ανάμεσα στα δύο δοχεία).

Κάθε δοχείο θεωρείται ότι έχει μοναδιαίο βάθος, αλλά διαφορετικά πλάτη, επομένως και διαφορετικό όγκο. Το πλάτος του δοχείου 1, που αναπαριστά το διαθέσιμο φορτίο είναι c , και αυτό του δοχείου 2 που αναπαριστά του χημικά προσδεμένο είναι $1-c$. Το συνολικό πλάτος των δύο δοχείων είναι ίσο με 1, επομένως το συνολικό εμβαδό των δοχείων είναι 1. Ο συνολικός όγκος των δοχείων ισούται με q_{max} . Επομένως, όταν το ύψος των δοχείων βρίσκεται στο μέγιστο σημείο του, h_{max} , θα είναι ίσο επίσης με q_{max} . Η βαλβίδα ανάμεσα στα δύο δοχεία έχει μία σταθερή αγωγιμότητα k' . Καθώς το μοντέλο υποθέτει ότι στιγμιαία η ισχύς παραμένει σταθερή, το ρεύμα θεωρείται ότι είναι κι αυτό σταθερό.



Εικόνα 3.7: Αναπαράσταση της κεντρικής ιδέας λειτουργίας του KIBaM, σαν ισοδύναμο του συστήματος των δύο δεξαμενών.

Οι εξισώσεις της κίνησης των φορτίων μέσα στα δοχεία είναι η εξής:

$$\frac{dq_1}{dt} = -I - k'(h_1 - h_2) \quad (3.14)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k'(h_1 - h_2) \quad (3.15)$$

, όπου q_1 είναι το διαθέσιμο φορτίο και q_2 το δεσμευμένο. Το ύψος του κάθε δοχείου δίνεται από τον λόγο του όγκου του προς το εμβαδό του, ως εξής:

$$h_1 = \frac{q_1}{c} \quad (3.16)$$

και

$$h_2 = \frac{q_2}{1-c} \quad (3.17)$$

Για λόγους απλοποίησης της μαθηματικής έκφρασης, ορίζεται μια σταθερά k ίση με:

$$k = \frac{k'}{c(1-c)} \quad (3.18)$$

Έτσι τελικά η (3.14) γίνεται

$$\frac{dq_1}{dt} = -I - k(1 - c)q_1 + kcq_2 \quad (3.19)$$

και η (3.15)

$$\frac{dq_2}{dt} = k(1 - c)q_1 - kcq_2 \quad (3.20)$$

Οι ιδιοτιμές του συστήματος είναι $s=0$ και $s=k$. Συνεπώς η μία εκφράζει έναν ολοκληρωτή, ενώ η άλλη εξαρτάται από την τιμή της αγωγιμότητας k . Το δοχείο 2 μπορεί να θεωρηθεί ολοκληρωτής καθώς δεν ελέγχεται εξωτερικά.

,οι οποίες μετά από μετασχηματισμό Laplace δίνουν:

$$q_1 = q_{1,0}e^{-kt} - \frac{(q_0kc - I)(1 - e^{-kt})}{k} - \frac{Ic(kt - 1 + e^{-kt})}{k} \quad (3.21)$$

$$q_2 = q_{2,0}e^{-kt} + (q_0(1 - c)(1 - e^{-kt}) - \frac{I(1 - c)(kt - 1 + e^{-kt})}{k}) \quad (3.22)$$

,όπου με $q_{1,0}$ και $q_{2,0}$ συμβολίζεται το αρχικό διαθέσιμο και δεσμευμένο φορτίο αντιστοίχως. Ισχύει $q_0 = q_{1,0} + q_{2,0}$.

Απώλειες:

Ενώ το μοντέλο υποθέτει ότι το φορτίο διατηρείται κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση του συσσωρευτή, δεν συμβαίνει το ίδιο και με την ενέργεια. Όταν η τάση εκφράζεται με ακρίβεια, οι απώλειες ενέργειας καθορίζονται από την διαφορά τάσης μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης. Σαν αποτέλεσμα, οι απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος επί την εσωτερική αντίσταση. Όταν η τάση δεν εκφράζεται με ακρίβεια, αρκεί να εκτιμήσουμε μία ονομαστική απόδοση ενέργειας για τον συσσωρευτή.

Φαινόμενα συσχετιζόμενα με την θερμοκρασία:

Όπως αναφέρθηκε, ένα μειονέκτημα του μοντέλου είναι ότι στην παρούσα μορφή του δεν περιλαμβάνει την επίδραση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί απαραίτητα μεγάλο μειονέκτημα για το μοντέλο στην πράξη, καθώς στην πραγματικότητα οι χώροι που φυλάσσονται οι συσσωρευτές μπορεί να υποτεθεί ότι συνήθως δεν αναμένεται να αντιμετωπίσουν δραματική αλλαγή στην θερμοκρασία τους.

Καθορισμός των σταθερών του μοντέλου:

Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους, αναλόγως με το αν η τάση εκφράζεται με ακρίβεια ή όχι. Όταν η διαφοροποίηση της τάσης του συσσωρευτή αναλόγως με την κατάσταση φόρτισης δεν λαμβάνεται υπ' όψιν, το μοντέλο χρειάζεται τον καθορισμό τριών σταθερών: της μέγιστης χωρητικότητας του συσσωρευτή (q_{max}), του μέρους του συσσωρευτή που περιέχει το διαθέσιμο φορτίο(c), και της σταθεράς k. Σε περίπτωση που η τερματική τάση λαμβάνεται υπ' όψιν, είναι επίσης απαραίτητο να θεωρηθεί και η εσωτερική αντίσταση R_0 . Τα στοιχεία αυτά μπορούν να βρεθούν μέσα από τα δεδομένα τεχνικών χαρακτηριστικών που δίνονται από τους κατασκευαστές των συσσωρευτών, όπως επίσης και μετά από δοκιμές με εφαρμογή μη γραμμικών μεθόδων προσαρμογής καμπύλης, όπως η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Για λόγους απλότητας του μοντέλου, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι σταθερές αυτές είναι ίδιες τόσο κατά την φόρτιση όσο και κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή.

Ένα βασικό πρόβλημα του KiBaM είναι ότι δεν απεικονίζει την εσωτερική δυναμική του συσσωρευτή, αλλά μόνο την εξωτερική. Η τάση του συσσωρευτή δεν θα έπρεπε να περιγράφεται μόνο βάσει του ρεύματος που τον διαρρέει, αλλά και της εσωτερικής του δομής. Έτσι η παρούσα μορφή του μοντέλου είναι επαρκής μόνο για μακροπρόθεσμες προσομοιώσεις. Για βραχυπρόθεσμες εφαρμογές όπου η δυναμική συμπεριφορά της τάσης του συσσωρευτή είναι μεγάλης σημασίας, το KiBaM δεν αποδεικνύεται καλό εργαλείο [20].

3.4.3.4 Μοντέλο BEST (Battery Energy Storage Test)

Το μοντέλο αυτό, όπως και το KiBaM προορίζεται για μοντελοποίηση μεγάλων συσσωρευτών μολύβδου-οξέος. Βασίζεται σε καμπύλες τάσης-ρεύματος για διαφορετικά βάθη εκφόρτισης και υποθέτει ότι οι καμπύλες είναι παράλληλες, κάτι που για τους συσσωρευτές μολύβδου οξέος προσεγγίζει την πραγματικότητα όταν έχουν σχετικά επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και η τάση αποκοπής είναι συνάρτηση του ρυθμού εκφόρτισης. Ωστόσο, στην γενική περίπτωση οι καμπύλες δεν είναι παράλληλες και το μοντέλο αποτυγχάνει. Όμως ένα ενδιαφέρον στοιχείο του μοντέλου είναι ότι αναπαριστά το κανονικοποιημένο βάθος εκφόρτισης σαν συνάρτηση τόσο του φορτίου που έχει απομακρυνθεί, όσο και του ρυθμού εκφόρτισης:

$$X(q, I) = \frac{q}{Q_0} + \frac{qI}{Q_0 I_0} \quad (3.23)$$

,όπου X είναι το κανονικοποιημένο βάθος εκφόρτισης, q είναι η ποσότητα φορτίου που έχει απομακρυνθεί, I είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, Q_0 είναι η οριακή χωρητικότητα φόρτισης για πολύ μικρούς ρυθμούς φόρτισης, και το I_0 καθορίζει την απώλεια χωρητικότητας με αυξανόμενο εξωτερικό φορτίο. Έτσι, η κατάσταση φόρτισης δεν εξαρτάται μόνο από το πόσο φορτίο έχει αφαιρεθεί αλλά και από το πόσο γρήγορα αφαιρείται. Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι ότι για μεταβλητή εξωτερική φόρτιση, η δυναμική απόκριση της τάσης αυξάνεται καθώς το βάθος εκφόρτισης πλησιάζει την μονάδα, προσεγγίζοντας την φαινόμενη

αύξηση της εσωτερικής αντίστασης κοντά στο τέλος της εκφόρτισης που εμφανίζεται σε πολλούς τύπους συσσωρευτών [16].

3.4.4 Το μοντέλο του Doyle:

Το μοντέλο του Doyle είναι ένα κατ' εξοχήν ηλεκτροχημικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί θεωρία συγκεντρωμένων διαλυμάτων [21] και λύνει ένα σύνολο έξι εξισώσεων που περιγράφουν το ρεύμα, την μεταφορά μάζας, τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων και τα δυναμικά, χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων διαφορών. Τέτοια μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για συσσωρευτές νικελίου-καδμίου και αλκαλικούς, όμως η πολυπλοκότητα του μοντέλου καθώς και οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν από τον χρήστη το καθιστούν πολύ δύσκολο και έτσι η χρήση του περιορίζεται στο να βοηθήσει σχεδιαστές συσσωρευτών.

3.5 Τύποι άλλων μέσων αποθήκευσης ενέργειας

Εκτός από την ηλεκτροχημική μετατροπή ενέργειας, και άλλα συστήματα μετατροπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αποθηκευτικά μέσα [12]:

- Ενέργεια βαρυτικού δυναμικού με δεξαμενές νερού
- Συμπιεσμένος αέρας
- Χημική ενέργεια σε κυψέλες καυσίμου
- Κινητική ενέργεια σε στρεφόμενους σφονδύλους
- Μαγνητικό πεδίο σε πηνία
- Ηλεκτρικό πεδίο σε πυκνωτές

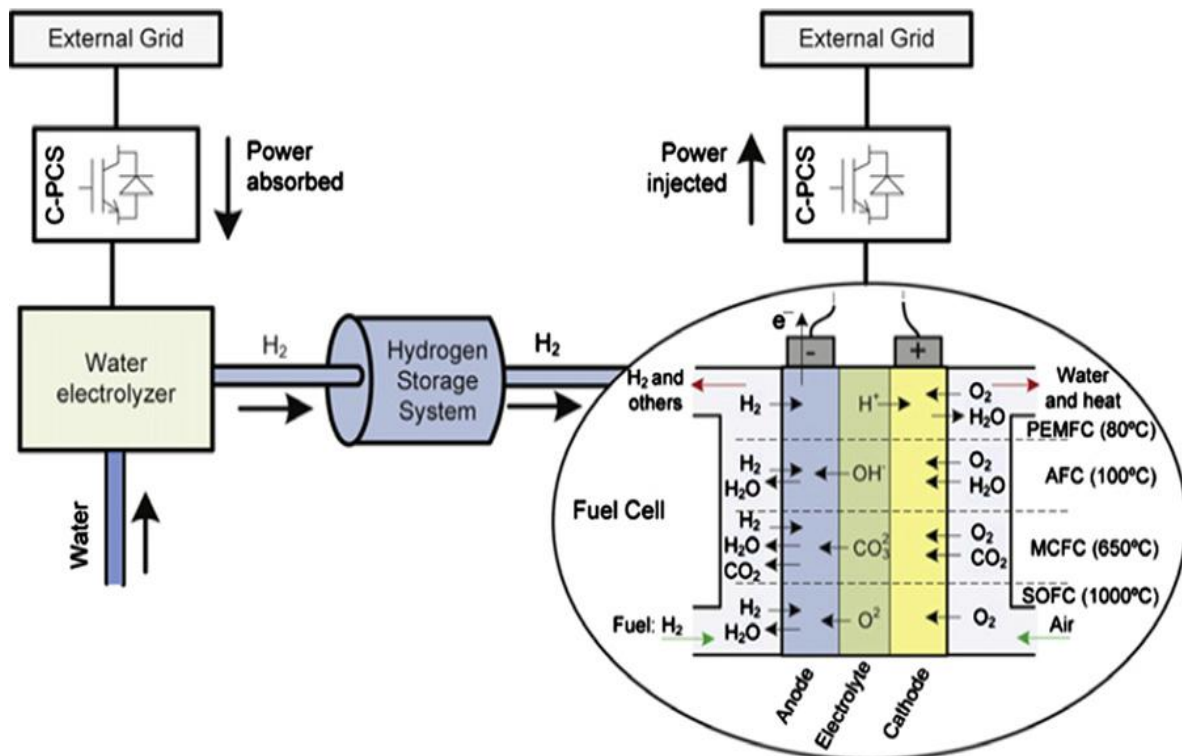
Με βάση αυτές τις γενικές δυνατότητες αποθήκευσης, έχουν αναπτυχθεί τα εξής συστήματα:

1) Αποθήκευση μέσω άντλησης νερού (Pumped hydro storage, PHS): Η αποθήκευση μέσω άντλησης νερού γίνεται σε συστήματα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Η βασική λειτουργική της αρχή βασίζεται στην διαχείριση της δυναμικής ενέργειας λόγω βαρύτητας του νερού, αντλώντας το από μία χαμηλότερη δεξαμενή σε μία υψηλότερη, σε καταστάσεις χαμηλής ζήτησης φορτίου. Όταν η ζήτηση ισχύος είναι μεγάλη, το νερό ρέει από την ανώτερη στην κατώτερη δεξαμενή, παράγοντας ηλεκτρισμό στις αρμόδιες γεννήτριες. Η αποθηκευμένη ενέργεια είναι ανάλογη του όγκου του νερού στην ανώτερη δεξαμενή, και του ύψους από το οποίο ρέει. Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για εφαρμογές 24ώρου βάσεως, όσο και σε εφαρμογές που απαιτούν η ισχύς να αποθηκεύεται για μεγαλύτερο διάστημα, της τάξεως των αρκετών ημερών. Τα συστήματα αυτά λαμβάνουν χώρα σε μεγάλες εφαρμογές ισχύος. Η διάρκεια ζωής τους είναι στα 30-50 χρόνια, και η απόδοσή τους κυμαίνεται μεταξύ 65-75%.

2) Συστήματα πεπιεσμένου αέρα (Compressed air energy storage, CAES): Βασίζονται στην συμβατική τεχνολογία των αεριοστροβίλων. Σε αυτά τα συστήματα, η ενέργεια αποθηκεύεται σε μορφή πεπιεσμένου αέρα σε υπόγειους θαλάμους. Όταν η ενέργεια απαιτείται να εγχυθεί στο δίκτυο, ο πεπιεσμένος αέρας αντλείται από τον θάλαμο αποθήκευσης, θερμαίνεται και εκτονώνεται σε ένα σύνολο στροβίλων που μετατρέπουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς του σε κινητική ενέργεια. Ο αέρας επίσης αναμιγνύεται με φυσικό αέριο και αναφλέγεται. Όσο οι στρόβιλοι είναι συνδεδεμένοι με ηλεκτρικές γεννήτριες ώστε να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, τα καυσαέρια των στροβίλων χρησιμοποιούνται για να θερμάνουν τον αέρα του θαλάμου. Μέχρι στιγμής η εφαρμογή τους ανά τον κόσμο είναι σχετικά περιορισμένη. Έχουν διάρκεια ζωής περίπου 40 χρόνια, και η απόδοσή τους είναι στο 71%.

3) Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βασισμένα στο υδρογόνο (Hydrogen-based energy storage system, HESS): Το υδρογόνο μπορεί είτε να αποθηκευθεί κατευθείαν ώστε να είναι έτοιμο για χρήση σε κυψέλες καυσίμου, είτε να μεταφερθεί μέσα από αγωγούς στους χρήστες ώστε να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Όταν χρησιμοποιείται για αποθήκευση, το σύστημα αποκαλείται κυψέλη καυσίμου αναγεννητικής λειτουργίας (Regenerative Fuel Cell, RFC). Αποτελείται από ένα σύστημα ηλεκτρόλυσης (electrolyzer) νερού, ένα σύστημα κυψελών καυσίμου, ένα σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου και ένα σύστημα μετατροπής ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή είναι υπεύθυνη για να πραγματοποιεί τους ηλεκτροχημικούς μετασχηματισμούς ώστε να αποθηκεύσει ενέργεια στην μορφή του υδρογόνου και να την εγχύσει σαν ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο όποτε χρειαστεί. Ο electrolyzer είναι σημαντικό κομμάτι του συστήματος, καθώς πραγματοποιεί την ηλεκτρόλυση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Υπάρχουν διάφορα είδη electrolyzer, από αλκαλικούς μέχρι ηλεκτρόλυση πολυμερούς μεμβράνης (Polymer Electrolyte Membrane, PEM). Υπάρχουν επίσης πολλά είδη κυψελών καυσίμου για σκοπούς αποθήκευσης ή διανεμημένης παραγωγής, αναλόγως του ηλεκτρολυτικού υλικού, όπως οι κυψέλες καυσίμου ηλεκτρόλυσης πολυμερούς μεμβράνης (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC), οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμων (Alkaline Fuel Cell, AFC), οι κυψέλες καυσίμου τηγμένου άνθρακα (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) και οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC). Οι PEMFC είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, καθώς έχει χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (50-100 °C), χαμηλή συντήρηση και χαμηλή διάβρωση, σημαντικά χαρακτηριστικά για συστήματα του είδους. Στον αντίποδα είναι το κόστος του καταλυτικού υλικού που είναι λευκόχρυσος και η επίδραση που έχει η μη καθαρότητα του υδρογόνου στην διάρκεια ζωής του συστήματος.

Γενικά οι κυψέλες καυσίμου RFC έχουν καλή δυναμική συμπεριφορά, δεν παρουσιάζει ακουστική εκπομπή και σε περιβαλλοντολογικό επίπεδο, το μόνο προϊόν τους είναι νερό. Ωστόσο έχουν χαμηλή απόδοση, περίπου 42%, εξαιτίας της χαμηλής απόδοσης των κυψελών καυσίμου και του electrolyzer (60% και 70% αντιστοίχως).



Εικόνα 3.8: Σχηματική περιγραφή λειτουργίας κυψελών καυσίμου.

4) Συστήματα Σφονδύλων (Flywheel energy storage system, FESS): Τα συστήματα σφονδύλων είναι ηλεκτρομηχανικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε μορφή κινητικής ενέργειας. Μία μάζα στρέφεται πάνω σε μαγνητικά ρουλεμάν για μείωση τριβής σε μεγάλη ταχύτητα, συνδεδεμένη με μία ηλεκτρική μηχανή. Η συνολική κατασκευή τοποθετείται σε κενό ώστε να μειωθεί η επίδραση του ανέμου. Η ενέργεια μεταφέρεται στον σφόνδυλο όταν η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας (ο σφόνδυλος επιταχύνει), αποθηκεύοντας έτσι την ενέργεια (φόρτιση). Κατά την διάρκεια της εκφόρτισης, η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια επιβραδύνοντας τον σφόνδυλο. Η ενέργεια που αποθηκεύεται με αυτόν τον τρόπο είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής και της αδράνειας του σφονδύλου. Οι σφόνδυλοι μπορεί να είναι συσκευές είτε χαμηλής είτε υψηλής ταχύτητας. Οι χαμηλής ταχύτητας περιστρέφονται σε χιλιάδες στροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ) (συνήθως αυτού του τύπου οι σφόνδυλοι χρησιμοποιούν χάλυβα σαν κυρίως υλικό στον δρομέα), ενώ οι υψηλής λειτουργούν σε δεκάδες χιλιάδες ΣΑΛ (με δρομέα φτιαγμένο από προηγμένο συνθετικό υλικό όπως ανθρακονήματα ή γραφίτη). Η απόδοση του συστήματος είναι υψηλή (περίπου 90% υπό ονομαστική ισχύ), έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, λειτουργία για μεγάλο εύρος θερμοκρασίας και δεν επηρεάζεται από φαινόμενα μεγάλου βάθους εκφόρτισης.

5) Υπεραγώγιμη Μαγνητική αποθήκευση (Superconducting magnetic energy storage, SMES): Πρόκειται για σχετικά νέα τεχνολογία. Η λειτουργία της βασίζεται στην αποθήκευση ενέργειας σε μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται από DC ρεύμα που διέρχεται μέσα από ένα μεγάλο υπεραγώγιμο πηνίο σε κρυογενική θερμοκρασία. Η αποθηκευμένη ενέργεια υπολογίζεται ως το γινόμενο της αυτοεπαγωγής του πηνίου και του τετραγώνου του ρεύματος που το διαρρέει. Αναλόγως με την λειτουργική θερμοκρασία του συστήματος, τα υπεραγώγιμα πηνία ταξινομούνται σαν υψηλής θερμοκρασίας, που λειτουργούν στους 70K, και σαν χαμηλής θερμοκρασίας που λειτουργούν στους 5 K. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διέλθει μέσα από τον υπεραγωγό εξαρτάται από την θερμοκρασία, και συγκεκριμένα όσο πιο χαμηλή είναι η

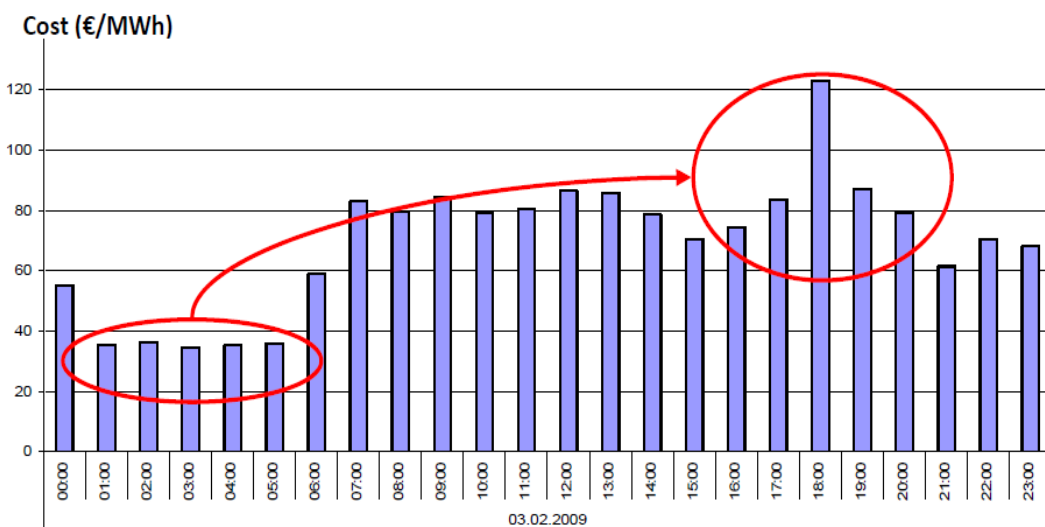
Θερμοκρασία λειτουργίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή ρεύματος που μπορεί να επιτευχθεί. Έτσι, το σύστημα μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από όλα τα προαναφερθέντα συστήματα και η α-πόδοσή του είναι πολύ υψηλή, μεγαλύτερη του 90%. Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των στοιχείων είναι η ικανότητά τους να εγχέουν ή να απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας σε πολύ σύντομο χρόνο. Η χωρητικότητα αυτών των συστημάτων κυμαίνεται μεταξύ 100 kW και 10 MW.

6) Συστήματα αποθήκευσης σε Υπερπυκνωτές: Οι υπερπυκνωτές, όπως και οι μπαταρίες, βασίζονται σε ηλεκτροχημικές κυψελίδες που περιέχουν δύο αγώγιμα ηλεκτρόδια, έναν ηλεκτρολύτη και μία πορώδη μεμβράνη διά μέσω της οποίας επιτρέπεται η μετάβαση ιόντων ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια. Στην πραγματικότητα αυτή η δομή δημιουργεί δύο πυκνωτές (εξαιτίας των δύο διεπαφών, μία μεταξύ ηλεκτρολύτη και αρνητικού ηλεκτροδίου και μία μεταξύ ηλεκτρολύτη και θετικού ηλεκτροδίου), και για αυτόν τον λόγο ονομάζονται και πυκνωτές δύο στρωμάτων. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στους πυκνωτές είναι ανάλογη της χωρητικότητάς τους και του τετραγώνου του εμβαδού της επιφάνειας του ηλεκτρολύτη, και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων. Εξ αιτίας της χαμηλής τάσης των κυψελίδων, η επιθυμητή τάση και χωρητικότητα του συστήματος επιτυγχάνεται με εν σειρά και παράλληλη σύνδεση συνόλου κυψελίδων. Οι υπερπυκνωτές μπορεί να χρησιμοποιούν είτε ίδιο υλικό για την άνοδο και την κάθοδο (και τότε είναι συμμετρικοί), ή διαφορετικό (και είναι μη συμμετρικοί). Επιπλέον κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει με βάση το υλικό των ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια που αποτελούνται από ενεργό άνθρακα παρέχουν χωρητικότητα από 100 μέχρι 1000 φορές περισσότερη ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τους συμβατικούς ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές. Η επιλογή του υλικού του ηλεκτρολύτη πρέπει να γίνεται προσεκτικά, καθώς η τάση διάσπασής του περιορίζει την τάση της κάθε κυψελίδας. Το σύστημα μπορεί να πετύχει ενεργειακή πυκνότητα 10 φορές μεγαλύτερη από ότι οι μπαταρίες. Αυτό το χαρακτηριστικό σε συνδυασμό με την μεγάλη αυτοεκφόρτιση των υπερπυκνωτών (που μπορεί να είναι μέχρι και 20% της ονομαστικής χωρητικότητας σε 12 ώρες, εξαιτίας της μη αμελητέας ισοδύναμης αντίστασης των επαφών ανάμεσα στον ηλεκτρολύτη και τα ηλεκτρόδια) καθιστούν το σύστημα υποψήφιο για βραχυπρόθεσμες εφαρμογές με μικρούς χρόνους απόκρισης. Επίσης τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, περισσότερους από 50000-100000 κύκλους χωρίς ανάγκη για συντήρηση, και απόδοση περίπου 75%-80%.

3.6 Χρησιμότητα αποθήκευσης ενέργειας γενικά στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

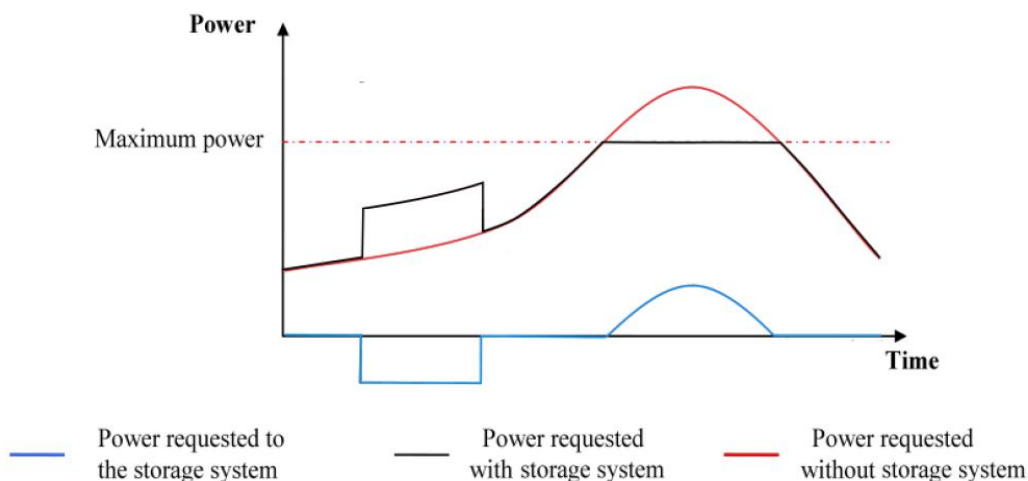
1. Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας λόγω έλλειψης ικανότητας παραγωγής των διαθέσιμων μονάδων. [22]
2. Αποθήκευση ενέργειας για αποφυγή παραβίασης τεχνικών ελαχίστων θερμικών μονάδων.

- Χρήση αποθηκευτικής διάταξης για εξομάλυνση της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ και αποδοτικότερης συμμετοχής τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύοντας στις ώρες χαμηλού κόστους και χρησιμοποιώντας την στις ώρες υψηλού κόστους εκμεταλλεόμενοι τη διαφορά τιμών.



Εικόνα 3.9: Οικονομικό όφελος από την χρήση των μπαταριών, με αξιοποίησή τους την ώρα που η τιμή της ενέργειας είναι υψηλή [23].

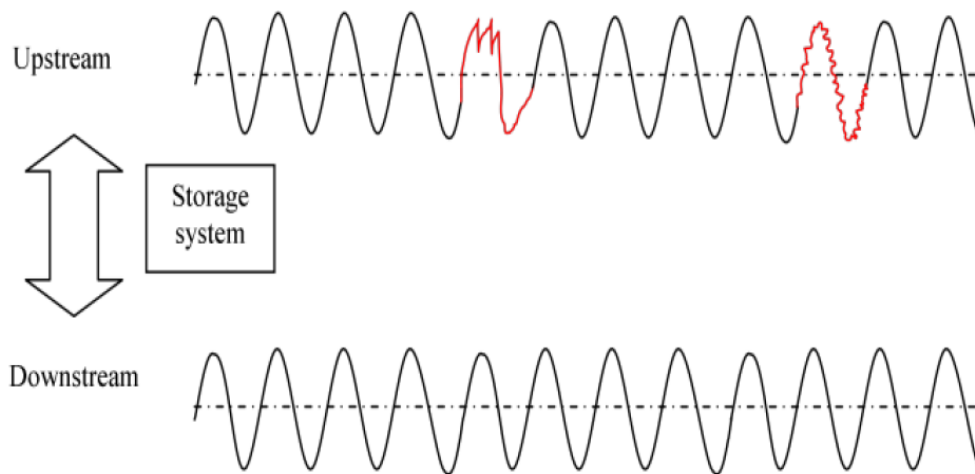
- Περιορισμός αποκοπτόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, αποθήκευση ενέργειας για χρήση σε επόμενο χρονικό διάστημα οπότε και δεν θα υπάρχει διαθέσιμη παραγωγή. Είναι η συνηθισμένη πρακτική σε μικρά αυτόνομα και απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Λειτουργία peak-shaving.



Εικόνα 3.10: Λειτουργία peak-shaving της μπαταρίας[23].

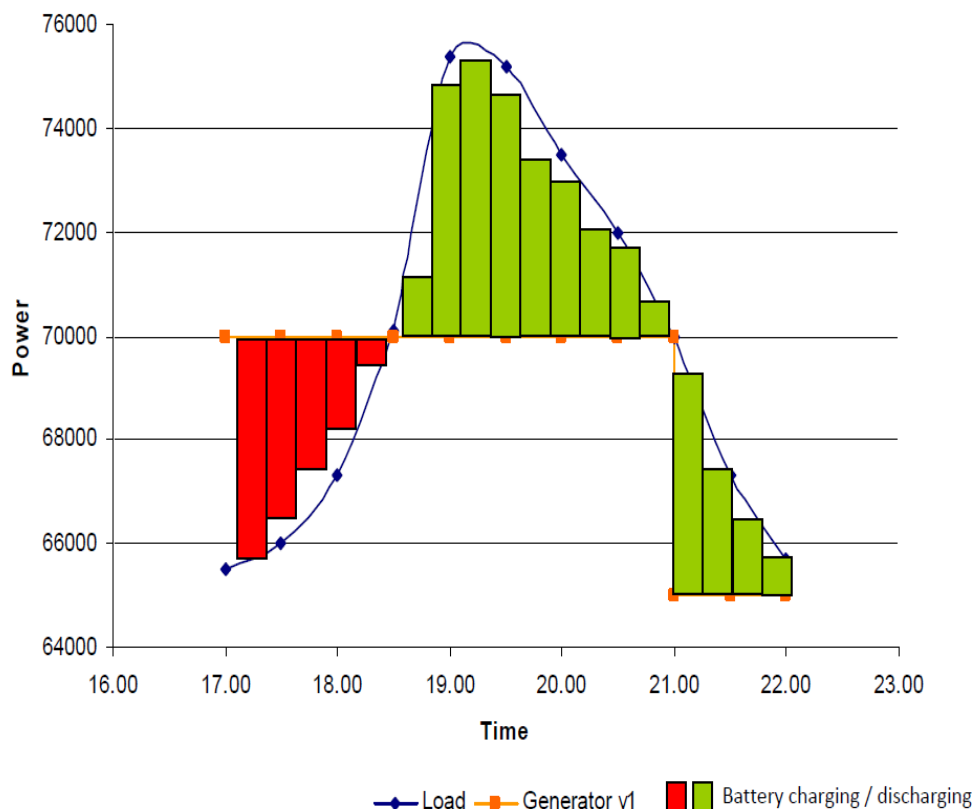
- Για εκμετάλλευση της διαφοράς κόστους παραγωγής από τις συμβατικές μονάδες είτε χωρίς αλλαγή του προγράμματος ένταξης μονάδων (μόνο οικονομική κατανομή), είτε μεταβάλλοντας κάπως το πρόγραμμα ένταξης μονάδων.
- Παροχή στρεφόμενης εφεδρείας, παροχή ισχύος σε έκτακτη χρονική στιγμή.
- Περιορισμός απωλειών δικτύου λόγω της παροχής ισχύος σε πολύ τοπικό επίπεδο.

8. Αποφυγή ή μετάθεση επενδύσεων ενίσχυσης δικτύου διανομής ειδικά αν υπάρχει συνδυασμός της διάταξης αποθήκευσης με κάποιας μορφής παραγωγή από ΑΠΕ αν έχουν επιλεγεί οι κατάλληλες θέσεις για την εγκατάστασή της.
9. Διαχείριση ζητημάτων ποιότητας ισχύος λόγω της γρήγορης απόκρισης των μονάδων αυτών.



Εικόνα 3.11: Βελτίωση της ποιότητας ισχύος μέσω της μπαταρίας[23].

10. Αδιάλειπτη παροχή ισχύος.
11. Εκκίνηση μετά από σφάλμα Black start.
12. Υποστήριξη τάσης και συχνότητας.
13. Παραγωγή άλλου αγαθού και αποθήκευσής του πχ θερμότητας, σε ώρες στις οποίες το κόστος είναι χαμηλό για την αποφυγή κατανάλωσης ενέργειας σε ώρες υψηλού φορτίου.
14. Επίτευξη ιδιοκατανάλωσης:



Εικόνα 3.12: Επίτευξη ιδιοκατανάλωσης.

4. Φαινόμενο ανύψωσης τάσης στα δίκτυα χαμηλής τάσης λόγω διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής.

4.1 Κριτήρια σύνδεσης φωτοβολταϊκών στο δίκτυο

Η συνήθης πρακτική στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την οποία αναπτύσσονταν παραδοσιακά, ήταν η μονόδρομη ροή ισχύος από τις μεγάλες συγκεντρωμένες μονάδες παραγωγής, προς τους τερματικούς καταναλωτές. Η ανάπτυξη της λογικής της διεσπαρμένης παραγωγής μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μεγάλο ποσοστό διείσδυσης τείνει να αμφισβητήσει αυτή την πρακτική, καθώς πλέον τα συστήματα μπορούν να καθορίζουν την ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο μέσω της σχέσης παραγωγής- κατανάλωσης σε κάθε χρονική στιγμή, αλλά και την διαχείριση της ισχύος τους μέσω εξελιγμένων τεχνικών ελέγχου των ηλεκτρονικών τους συστημάτων.

Ωστόσο η σωστή διασύνδεση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο συνεπάγεται και κάποιες αρχές που πρέπει να τηρούνται ώστε να εξασφαλίζεται μία ικανοποιητική ποιότητα παρεχόμενης ισχύος. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να γίνει σωστή μελέτη ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα έντονων αυξομειώσεων της τάσης του σημείου σύνδεσης, νησιδοποίησης, flicker, αρμονικών συνιστωσών, καθώς και της επίδρασης στην στάθμη βραχυκύκλωσης. Επίσης πρέπει να εξεταστεί κατά πόσο το δίκτυο μπορεί να αντέξει την σύνδεση, καθώς και να υπάρξει πρόβλεψη για την προστασία της διασύνδεσης [5].

- Καθώς η παραγόμενη ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να έχει στοχαστική συμπεριφορά με έντονες αυξομειώσεις (στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών ξαφνικές σκιάσεις μπορεί να είναι μία αιτία για τέτοιο φαινόμενο), η σχέση μεταξύ ισχύος παραγωγής και κατανάλωσης μπορεί να κυμαίνεται αρκετά για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, μεταβάλλοντας κατά συνέπεια την τάση στο σημείο σύνδεσης. Έτσι, η εγκατάσταση θα πρέπει να προλαμβάνει φαινόμενα είτε έντονου κυματισμού της τάσης είτε αύξησης της τάσης πάνω από κάποιο όριο που θα προκύπτει με βάση κάποια πρότυπα που θα ορίζονται από το δίκτυο.
- Ένας πολύ σοβαρός παράγοντας κινδύνου για την εγκατάσταση των Φ/Β είναι η περίπτωση απομονωμένης λειτουργίας, η λεγόμενη και νησιδοποίηση. Σε αυτή την κατάσταση ένα τοπικό δίκτυο συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά αν και το ευρύτερο δίκτυο είναι εκτός λειτουργίας. Η νησιδοποίηση είναι μία πολύ επικίνδυνη κατάσταση για το προσωπικό που χειρίζεται τον εξοπλισμό τον οποίο θεωρεί λανθασμένα εκτός λειτουργίας (όπως σε περιπτώσεις συντήρησης), όπως και για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό που μένει συνδεδεμένος στην εγκατάσταση και υπόκειται σε μία κακής ποιότητας παροχή ισχύος που μπορεί να τον βλάψει. Όλα τα σύγχρονα συστήματα έχουν πρόβλεψη για εντοπισμό της νησιδοποίησης και αντιμετώπισής της (anti-islanding), που περιλαμβάνει την ύπαρξη κατάλληλων ηλεκτρονόμων κατάλληλων ώστε να ανιχνεύουν αντικανονική λειτουργία στην τάση και την συχνότητα του δικτύου και να διακόπτουν την λειτουργία.
- Μία άμεση συνέπεια των αυξομειώσεων της τάσης λόγω της ταχείας μεταβολής των συνθηκών λειτουργίας της διεσπαρμένης παραγωγής, είναι οι εκπομπές flicker. Οι αυξομειώσεις στην τάση προκαλούν αντίστοιχες αυξομειώσεις στην ένταση της φωτεινότητας των λαμπτήρων που λειτουργούν κατά την ίδια χρονική διάρκεια, κάτι που προκαλεί ενόχληση τόσο στους καταναλωτές κοντά στην εγκατάσταση, όσο και σε

άλλα σημεία του δικτύου που επηρεάζονται από τις μεταβολές αυτές. Πάντως το φαινόμενο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα μείζον στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών.

- Η ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου είναι ο βασικός δείκτης της αντοχής του σε κατάσταση σφάλματος απέναντι σε πιθανά ρεύματα βραχυκύκλωσης. Με βάση αυτή γίνεται ο σχεδιασμός του δικτύου σχετικά με την μηχανική και θερμική αντοχή του εξοπλισμού και των κατασκευών και την ικανότητα διακοπής των διακοπτικών στοιχείων. Ένα δίκτυο με μεγάλη ισχύ βραχυκύκλωσης χαρακτηρίζεται σαν ευάλωτο σε τέτοιες καταστάσεις, επομένως οποιαδήποτε προσθήκη διεσπαρμένης παραγωγής δεν θα έπρεπε να μεταβάλλει το συγκεκριμένο μέγεθος κατά πολύ (με ένα πάνω όριο της τάξης των 250 MVA). Αν και το ζήτημα αυτό αφορά περισσότερο στρεφόμενες γεννήτριες, η πολύ μεγάλη συνδεδεμένη ισχύς Φ/Β στα δίκτυα διανομής καθιστά την συνεισφορά τους αρκετά σημαντική.
- Τα ηλεκτρονικά ισχύος που περιλαμβάνονται στην εγκατάσταση έχουν ως αποτέλεσμα την έγχυση ρεύματος με περιεχόμενο αρμονικών συνιστωσών πέραν της θεμελιώδους. Εκτός των απωλειών ισχύος που συνεπάγεται η ύπαρξή τους, προκαλούν κυρίως μεγάλη δυσλειτουργία σε πληθώρα ηλεκτρονικών συσκευών που συνδέονται σε κοντινά σημεία του δικτύου. Το όριο του συντελεστή ολικής παραμόρφωσης μέσα στο οποίο είναι αποδεκτή η ύπαρξη της είναι της τάξης του THD=5%. Η συνηθέστερη λύση που προτείνεται για το πρόβλημα είναι η τοποθέτηση φίλτρων. Επίσης, πρόβλημα αποτελεί η έγχυση DC ρεύματος στο δίκτυο, η οποία πρέπει να είναι μικρότερη του 0,5% του ονομαστικού ρεύματος, καθώς σε αντίθετη περίπτωση συμβάλλει σημαντικά στην λειτουργία των μετασχηματιστών και στον κορεσμό τους, προκαλώντας επίσης και αύξηση των απωλειών.

4.2 Ορισμός του ποσοστού διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής

Ως ποσοστό διείσδυσης p ορίστηκε ο λόγος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των ΦΒ μονάδων προς τη συνολική ικανότητα φόρτισης της γραμμής, δηλαδή το άθροισμα των ονομαστικών ισχύων των ΜΣ διανομής [24].

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n P_{PV,i}^{installed}}{\sum_{i=1}^n S_{N,i}} \quad (4.1)$$

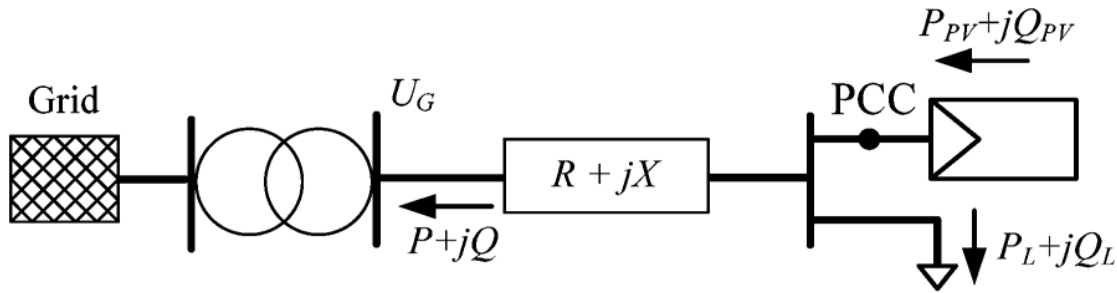
,όπου:

$\sum_{i=1}^n P_{PV,i}^{installed}$ είναι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β μονάδων που συνδέονται στο ζυγό ΧΤ του ΜΣ διανομής i , και

$\sum_{i=1}^n S_{N,i}$ είναι η ονομαστική ισχύς διέλευσης του ΜΣ διανομής i .

Θα πρέπει να ισχύει $P_{PV,i}^{installed} \leq S_{N,i}$.

4.3 Φαινόμενο ανύψωσης τάσης λόγω υψηλής διεύθυνσης φωτοβολταϊκών



Εικόνα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση δικτύου διανομής με σύνδεση εγκατάστασης με ταυτόχρονη παραγωγή και κατανάλωση, καθώς και της ανάστροφης ροής ισχύος [25].

Έστω το απλό δίκτυο διανομής της εικόνας. Η δομή του είναι αρκετά απλή, καθώς αποτελείται από μία ακτινική σύνδεση μεταξύ του μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ και ενός καταναλωτή με φορτίο $P_L + jQ_L$. Στον ζυγό του καταναλωτή συνδέεται σύστημα φωτοβολταϊκής παραγωγής. Η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών θα δημιουργήσει μια αύξηση τάσης που θα δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta U = I(R + jX) = \frac{P - jQ}{U_G} (R + jX) = \frac{PR + QX}{U_G} + j \frac{PX - QR}{U_G} \quad (4.2)$$

,όπου U_G η τάση του ζυγού του δικτύου, $R + jX$ η σύνθετη αντίσταση της γραμμής και P και Q το αλγεβρικό άθροισμα των επί μέρους ποσοτήτων ενεργού και αέργου ισχύος αντιστοίχως:

$$P = P_{PV} - P_L \quad (4.3)$$

$$Q = Q_{PV} - Q_L \quad (4.4)$$

, όπου P_{PV} είναι η ενεργός ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά και Q_{PV} πιθανή ανταλλαγή αέργου ισχύος μεταξύ του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών και του δικτύου.

Έτσι, η τάση στο σημείο σύνδεσης U_{PCC} θα δίνεται από τον τύπο:

$$U_{PCC} = U_G + \frac{PR + QX}{U_G} + j \frac{PX - QR}{U_G} \quad (4.5)$$

.Καθώς το φανταστικό μέρος μπορεί με ασφάλεια να υποθεθεί αρκετά μικρότερο από το πραγματικό, ο τελευταίος όρος παραλείπεται. Έτσι η τάση στο σημείο σύνδεσης μπορεί να θεωρηθεί ίση με:

$$U_{PCC} \approx U_G + \frac{PR + QX}{U_G} \quad (4.6)$$

Μπορούν να διακριθούν τέσσερις πιθανές ακραίες περιπτώσεις για την συνολική ροή ενεργού ισχύος και το αντίκτυπό της στην τάση του σημείου σύνδεσης:

- Μέγιστο φορτίο – Ελάχιστη παραγωγή: Σε αυτή την περίπτωση η ροή ισχύος είναι από το δίκτυο προς το σημείο κοινής σύνδεσης, και τείνει να μειώσει την τάση του.
- Μέγιστη παραγωγή – Ελάχιστο φορτίο: Σε αυτή την περίπτωση (και σε περίπτωση που η ισχύς της παραγωγής υπερβαίνει την ζήτηση) η ροή ισχύος είναι ανάστροφη (από το σημείο κοινής σύνδεσης προς το δίκτυο). Το αποτέλεσμα είναι ανύψωση της τάσης του σημείου.
- Μέγιστη παραγωγή – Μέγιστο φορτίο: Η συνισταμένη ροή ισχύος καθορίζεται από το πρόσημο της διαφοράς, όμως θεωρείται ενδιάμεση κατάσταση με μικρότερες επιπτώσεις στην τάση του σημείου.
- Ελάχιστη παραγωγή – Ελάχιστο φορτίο: Η ροή ισχύος αναμένεται να είναι μηδενική, με αντίστοιχη επίδραση στην τάση του ζυγού.

Συμβολή στην μεταβολή της τάσης έχει και η συνολική ανταλλαγή αέργου ισχύος μεταξύ του δικτύου και του σημείου σύνδεσης. Το ποσοστό με το οποίο κάθε μέγεθος συμβάλλει στην μεταβολή αυτή καθορίζεται από την σχέση μεταξύ R και X της γραμμής. Ενώ στην Μέση και Υψηλή Τάση μπορεί να υποθεθεί με ασφάλεια ότι $X \gg R$, επομένως η συνολική αέργου ισχύος θα είναι αυτή που καθορίζει περισσότερο την συνολική μεταβολή της τάσης, στην Χαμηλή Τάση τα στοιχεία των γραμμών διαφέρουν, καθώς τείνει να ισχύει ότι $R > X$, και επομένως το συνολικό ποσοστό θα προκύπτει από μία διαδικασία ανάλυσης των χαρακτηριστικών της γραμμής που λέγεται ανάλυση ευαισθησίας τάσης.

4.3.1 Ανάλυση ευαισθησίας τάσης

Η ανάλυση ευαισθησίας τάσης [26] καθορίζει την επίδραση που έχει η μεταβολή στα μεγέθη της ενεργού και αέργου ισχύος στο επίπεδο της τάσης για ένα δεδομένο σημείο του δικτύου. Έτσι είναι ένας σημαντικός δείκτης για την απαιτούμενη ποσότητα ενεργού ή αέργου ισχύος που απαιτείται να ανταλλαχθεί με το δίκτυο ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ρύθμιση τάσης. Ο πίνακας της ευαισθησίας τάσης S προκύπτει από την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων της ροής φορτίου:

$$P_i = |U_i| \sum_{j=1}^n |U_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.7)$$

$$Q_i = -|U_i| \sum_{j=1}^n |U_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.8)$$

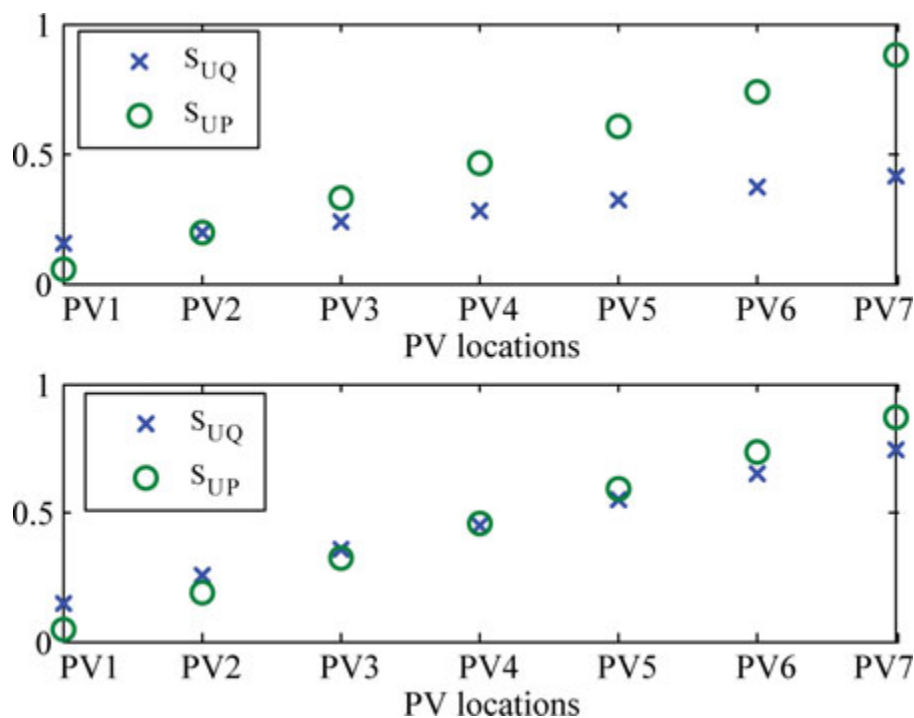
, με χρήση του αλγορίθμου Newton-Raphson. Ο ιακωβιανός πίνακας ανανεώνεται σε κάθε επανάληψη μέχρι η συνθήκη σύγκλισης να ικανοποιηθεί, και τότε ο τελικός πίνακας αντιστρέφεται ώστε να προκύψει ο πίνακας S :

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_{\theta P} & S_{\theta Q} \\ S_{UP} & S_{UQ} \end{bmatrix}}_{J^{-1}=S} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

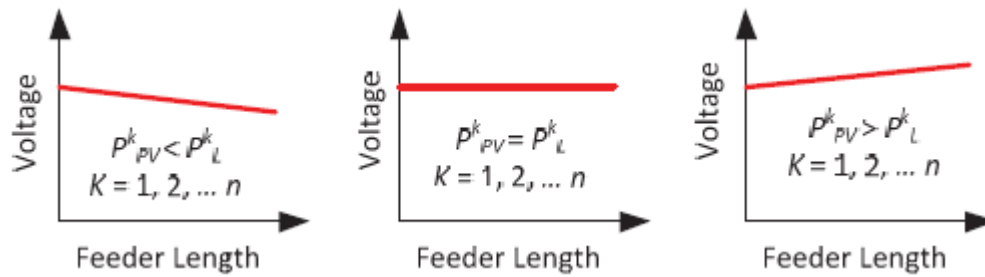
.Τα μεγέθη P, Q, U, δ, Υ και θ δηλώνουν την ροή ενεργού ισχύος, ροή αέργου ισχύος, την τιμή της τάσης του ζυγού, την φάση της τάσης, την αγωγιμότητα των γραμμών και την φάση της σύνθετης αντίστασης αντιστοίχως.

Έτσι, με δεδομένες τις αγωγιμότητες των γραμμών από τις οποίες αποτελείται ένα δεδομένο δίκτυο, μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη S_{UP} και S_{UQ} , που αποτελούν την ευαισθησία τάσης ως προς την ενεργό και την άεργο ισχύ αντίστοιχα. Είναι λογικό ότι όσο μεγαλύτερες οι αντιστάσεις των γραμμών, τόσο μεγαλύτερα θα είναι και τα μεγέθη ευαισθησίας.

Σε προσομοιώσεις δικτύων χαμηλής τάσης, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τα σημεία σύνδεσης που βρίσκονται κοντά στον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ, η ευαισθησία τάσης είναι μεγαλύτερη για την άεργο από ότι για την ενεργό ισχύ. Αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω του γεγονότος ότι το μήκος γραμμής που παρεμβάλλεται είναι μικρό, επομένως ο κυρίαρχος παράγοντας για την μεταβολή της τάσης είναι η αντίδραση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή. Όσο όμως η απόσταση από τον μετασχηματιστή μεγαλώνει, η αντίσταση της γραμμής συνεισφέρει όλο και περισσότερο σε σχέση με την αντίδραση του μετασχηματιστή, κάνοντας τον έλεγχο της τάσης μέσω του ελέγχου της ενεργού ισχύος αποδοτικότερο από τον έλεγχο της αέργου.



Εικόνα 4.2: Τιμές των μεγεθών ευαισθησίας τάσης συναρτήσει της απόστασης από τον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ για δύο διαφορετικού τύπου γραμμές σύνδεσης.



Εικόνα 4.3: Επίδραση της σχέσης παραγωγής – κατανάλωσης στην τάση κατά μήκος μίας γραμμής ενός δικτύου διανομής [27].

Ιδεατά, η αύξηση της τάσης που προκαλείται σε κάθε έναν από τους ζυγούς λόγω της έγχυσης ενεργού ισχύος από τους αντιστροφείς της κάθε εγκατάστασης θα μπορούσε να αντισταθμιστεί πλήρως από έναν αντίστοιχο έλεγχο αέργου ισχύος. Η συνολική αύξηση τάσης θα προέκυπτε από τον τύπο

$$\Delta U = S_{UP}\Delta P + S_{UQ}\Delta Q = 0 \quad (4.10)$$

,με τον απαιτούμενο συντελεστή ισχύος κάθε αντιστροφή να προκύπτει ως

$$PF_i = \frac{1}{\sqrt{1 + m_i^2}} \quad (4.11)$$

,με το m_i να προκύπτει ως ο λόγος:

$$m_i = \frac{S_{UP}(j, i)}{S_{UQ}(j, i)} \quad (4.12)$$

.Το PF_i είναι ο απαιτούμενος συντελεστής ισχύος στον ζυγό i , και το j είναι ο αριθμός του ζυγού στον οποίο υπάρχει το μεγαλύτερο πρόβλημα. Στην πραγματικότητα βέβαια τα όρια του συντελεστή ισχύος είναι καθορισμένα, επομένως η αντιστάθμιση θα μπορεί να γίνει μόνο μέχρι κάποιο βαθμό.

4.4 Τρόποι αντιμετώπισης φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω υψηλής διείσδυσης φωτοβολταϊκών

Διάφοροι τρόποι προτείνονται για την αντιμετώπιση του φαινομένου ή την θωράκιση απέναντί του, τόσο από την πλευρά του δικτύου όσο και από την μεριά των ανεξάρτητων καταναλωτών. Μια πλήρης απεικόνισή τους είναι αυτή: [28]

Κατηγορία	Νο	Τεχνική λύση
Μέτρα Διαχειριστή Δικτύου	1	Ενίσχυση δικτύου
	2	Σύστημα ρύθμισης τάσης υπό φορτίο για μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ
	3	Προηγμένη τεχνολογία ρύθμισης τάσης μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ
	4	Στατική αντιστάθμιση αέργου ισχύος
	5	Αποθήκευση ενέργειας από Διαχειριστή Δικτύου
	6	Μετασχηματιστής αντιστάθμισης (Booster transformer)
	7	Αναδιαμόρφωση Δικτύου
	8	Προηγμένη λειτουργία κλειστού κυκλώματος
Μέτρα αυτοπαραγωγών (prosumers)	9	Αποθήκευση σε επίπεδο αυτοπαραγωγού
	10	Αυτοκατανάλωση με οικονομικά κίνητρα
	11	Περικοπή παρεχόμενης ισχύος προς Δίκτυο
	12	Έλεγχος ενεργού ισχύος μέσω inverter P(U)
	13	Έλεγχος αέργου ισχύος μέσω inverter Q(U) Q(P)
Διαδραστικά μέτρα	14	Ανταπόκριση στη ζήτηση σύμφωνα με τις τοπικές τιμές
	15	Ανταπόκριση στη ζήτηση σύμφωνα με τις αγοραίες τιμές
	16	SCADA + Έλεγχος φορτίου
	17	SCADA + Έλεγχος μέσω inverter (Q&P)
	18	Έλεγχος τάσης μεγάλης έκτασης

Εικόνα 4.4: Μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης και των αποτελεσμάτων του [28].

- Η ενίσχυση και η αναδιαμόρφωση του δικτύου είναι μέτρα τα οποία αναπροσαρμόζουν τα βασικά τεχνικά τους χαρακτηριστικά με τρόπο ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς η λογική πάνω στην οποία χτίστηκαν ήταν η μονόδρομη ροή ισχύος από συγκεντρωμένες μεγάλες μονάδες προς τους τελικούς καταναλωτές. Έτσι υπάρχει η πιθανότητα να είναι αναγκαία η δημιουργία νέων γραμμών, η αντικατάσταση των υπαρχουσών από νέες με διαφορετικά χαρακτηριστικά (όπως μικρότερη σύνθετη αντίσταση, ώστε η επίδραση της ροής δεδομένης ποσότητας ενεργού και αέργου ισχύος να οδηγεί σε μικρότερα ποσοστά μεταβολής της τάσης), η αναβάθμιση των μετασχηματιστών ώστε να μπορούν να αντέξουν καταστάσεις μεγαλύτερης φόρτισης, και η εγκατάσταση ηλεκτρονικών συστημάτων με πιο έξυπνους αλγόριθμους ελέγχου. Η λύση αυτή συνεπάγεται και μεγαλύτερη δαπάνη.
- Τα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο είναι μία πρακτική που ακολουθείται σε μεγάλη έκταση στα δίκτυα ΜΤ και ΥΤ. Ωστόσο μέχρι στιγμής η χρήση τους στην ΧΤ δεν έχει καταστεί εφικτή σε ικανοποιητικό βαθμό, λόγω των μεταβατικών φαινομένων που συνεπάγονται και του γεγονότος ότι για την αλλαγή των λήψεων του μετασχηματιστή πρέπει να γίνει με τον μετασχηματιστή εκτός τάσεως. Ενδεχομένως στο μέλλον να βρουν μεγαλύτερη εφαρμογή.
- Η στατική αντιστάθμιση αέργου ισχύος γίνεται μέσα από διάφορους τρόπους, όπως είναι το STATCOM και το SVC.

- Το STATCOM (Static Synchronous Compensator) χρησιμοποιείται στο επίπεδο της μετάδοσης και της διανομής, καθώς και σαν εξοπλισμός ισχύος τελικών καταναλωτών. Οι κύριες εφαρμογές του περιλαμβάνουν την ρύθμιση τάσης, την διόρθωση του συντελεστή ισχύος, την απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος, καθώς και την εξισορρόπηση του φορτίου.
Το STATCOM είναι ένας μετατροπέας που λειτουργεί σαν πηγή τάσης βασισμένος σε ελεγχόμενους διακόπτες. Λειτουργεί παράλληλα με την υπόλοιπη εγκατάσταση και είναι επιφορτισμένο με την ταχεία αντιστάθμιση ισχύος στο δίκτυο. Αναλόγως με το αν χρειάζεται να έχει επαγωγικό ή χωρητικό χαρακτήρα, προσαρμόζει κατάλληλα το διάνυσμα του ρεύματός του πάντα κάθετα με την τάση. Με κατάλληλη στρατηγική ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξομαλύνει κυματώσεις τάσης στο δίκτυο [29].
 - Το SVC (Static Var Compensation) είναι κι αυτό συσκευή που μπορεί να ελέγξει γρήγορα και αξιόπιστα την τάση της γραμμής. Παρέχει δυναμική, γρήγορη απόκριση αέργου ισχύος, ακολουθώντας τις μεταβάσεις που συμβαίνουν στο σύστημα(βραχυκυκλώματα, αποσυνδέσεις γραμμής ή γεννητριών). Επίσης μπορεί να αυξήσει την ικανότητα μεταφοράς, να μειώσει τις απώλειες, να αποσβέσει ταλαντώσεις ισχύος καθώς και να κρατήσει την τάση μέσα στα όρια σε κατάσταση απότομης απώλειας φορτίου. Παρά την παρόμοια λειτουργία με το STATCOM, το STATCOM έχει μάλλον καλύτερη συμπεριφορά, καθώς προσφέρει πολύ ταχύτερη απόκριση λόγω των γρήγορων διακοπτικών του στοιχείων, ενώ και ο τρόπος που χειρίζεται την άεργο ισχύ είναι καλύτερος λόγω της γραμμικής μεταβολής του ρεύματός του, ενώ το SVC μεταβάλλει την έξοδό του με το τετράγωνο της τάσης, μειώνοντας έτσι την ευστάθειά του. Στα υπέρ του STATCOM και το χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο που παράγει. Ωστόσο οι υψηλές απώλειές του και το γεγονός ότι είναι ακριβότερο από το SVC καθιστά το δεύτερο ανταγωνιστικό και διαδεδομένο.
- Σημαντικό ρόλο στην ικανότητα του συστήματος να μπορεί να εποπτεύει τις επί μέρους επιδόσεις του ώστε να αναλάβει την σωστή δράση έχει παίξει η ανάπτυξη του συστήματος SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition, Εποπτικός Έλεγχος και Συλλογή Δεδομένων) [30]. Στην ουσία είναι ένα πακέτο λογισμικού που δεν παρέχει έλεγχο, αλλά συλλέγει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και τις αποστέλλει για επεξεργασία και απεικόνιση στα κεντρικά σημεία διαχείρισης, απλουστεύοντας, αυτοματοποιώντας και επιταχύνοντας την εποπτεία μεγάλων συστημάτων. Την πληροφορία του SCADA κατόπιν θα αναλάβουν να επεξεργαστούν τα αρμόδια στοιχεία του συστήματος ώστε να αναλάβουν αυτά τον αρμόδιο έλεγχο για την αποκατάσταση των πιθανών δυσλειτουργιών, πχ κάποια μεταβολή στην ανταλλαγή αέργου ισχύος για την αποκατάσταση της ρύθμισης τάσης.
 - Έλεγχος Αέργου Ισχύος: Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σημαντικό ρόλο στην μεταβολή της τάσης ενός σημείου του δικτύου έχει το ποσό της ανταλασσόμενης αέργου ισχύος. Καθώς η άεργος ισχύς είναι εύκολη στον χειρισμό, σημαντικό μέρος των μεθόδων ελέγχου της τάσης του δικτύου αποτελεί ο χειρισμός της με τρόπο ώστε να αναιρεί το φαινόμενο. Στις περιπτώσεις υπέρτασης, η απορρόφηση ισχύος από τα συστήματα του καταναλωτή μπορεί να επαναφέρει την τάση σε αποδεκτά επίπεδα ή έστω να συμβάλλει σε μια συντονισμένη προσπάθεια, με τρόπο που δεν οδηγεί σε αξιοσημείωτη υπερφόρτιση των γραμμών ή των ηλεκτρονικών συσκευών. Οι διάφορες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για αυτόν τον σκοπό θα αναλυθούν στην συνέχεια.

- Περικοπή Ισχύος Φωτοβολταϊκών: Ίσως η πιο προφανής, αλλά και απευκταία λύση για το πρόβλημα είναι η αναίρεση της βασικής αιτίας του φαινομένου, δηλαδή η μείωση της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών σε περιπτώσεις που η τάση υπερβεί κάποιο όριο. Αν και αυτή η πρακτική οδηγεί σίγουρα σε αποδεκτή λειτουργία, θα πρέπει να αποτελεί την τελευταία λύση, αφού συνεπάγεται απώλεια ενέργειας από το σύστημα που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί, άρα και οικονομικών οφελών, ωστόσο χρησιμοποιείται όταν αποτύχουν όλοι οι υπόλοιποι τρόποι αντιμετώπισης.
- Αποθήκευση ενέργειας: Ένας τρόπος να αποφευχθεί η περικοπή ισχύος των φωτοβολταϊκών, είναι η αποθήκευσή τμήματος ή του συνόλου της με βάση κάποια στρατηγική ελέγχου, και η χρησιμοποίησή της σε ώρες που η παραγωγή των φωτοβολταϊκών θα είναι χαμηλή ή μηδενική. Αν και η λύση αυτή σχεδόν μηδενίζει τις απώλειες που συνεπάγεται η περικοπή ισχύος, εν τούτοις η μεγάλη οικονομική επένδυση που συνεπάγεται η εγκατάσταση των συστημάτων αποθήκευσης αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην επέκταση της χρήσης τους. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια μέσω επιδοτήσεων και κατάλληλης τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας να δημιουργηθούν κίνητρα για την ενίσχυση της έννοιας της ιδιοκατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή ισορροπίας μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος, με σκοπό η ανταλλαγή με το δίκτυο να είναι η μικρότερη δυνατή (κάτι που θα σήμαινε και μηδενικές αυξομειώσεις στην τιμή της τάσης). Σε αυτή την προσπάθεια σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ικανότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας, και προς αυτή την κατεύθυνση η πολιτική που ακολουθείται τείνει να μειώσει το οικονομικό βάρος της εγκατάστασης αποθηκευτικών συστημάτων στην πλευρά του καταναλωτή-παραγωγού.

4.5 Περικοπή Ενεργού Ισχύος Φωτοβολταϊκών

Ένα από τα κύρια μελήματα μια μελέτης για την αύξηση της διείσδυσης παραγωγής από φωτοβολταϊκά συστήματα, πρέπει να είναι η επίδραση που θα έχει στην τάση του δικτύου. Είναι λοιπόν χρήσιμο να υπάρχει μια τεχνική ελέγχου η οποία σε στιγμές που εμφανίζεται το πρόβλημα της ανύψωσης τάσης, θα είναι ικανή να μειώσει την παραγόμενη ισχύ, και να την επαναφέρει σε στιγμές που το πρόβλημα σταματάει να υφίσταται. Έναντι της συντηρητικής μεθόδου της μόνιμης μείωσης της ικανότητας παραγωγής, μία τεχνική περικοπής ενεργού ισχύος προτιμάται. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, όσο η τάση του σημείου σύνδεσης είναι εντός κάποιων καθορισμένων ορίων, ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών μπορεί να εγγχεί όλη την παραγόμενη ισχύ τους στο δίκτυο. Όταν όμως η τάση υπερβεί αυτό το όριο, τότε η εγχεόμενη ισχύς μειώνεται με τρόπο γραμμικό με την αύξηση της τάσης. Η τεχνική αυτή είναι αρκετά ελκυστική από την άποψη ότι δεν απαιτεί μεγάλες τροποποιήσεις στην λογική λειτουργίας του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών, ενώ επίσης ενεργοποιείται μόνο όταν υπάρχει πραγματική ανάγκη, ελαχιστοποιώντας έτσι το ποσό της ισχύος που περικόπτεται (απώλειες ισχύος εξόδου).

Η υλοποίηση της μεθόδου βασίζεται σε τεχνικές drop ελέγχου [31] [32]. Η μορφή αυτή ελέγχου χρησιμοποιείται ευρέως στην διαδικασία διαμοιρασμού ισχύος μεταξύ γεννητριών συνδεδεμένων εν παραλλήλω, συνήθως συσχετίζοντας την ενεργό ισχύ με την συχνότητα. Η

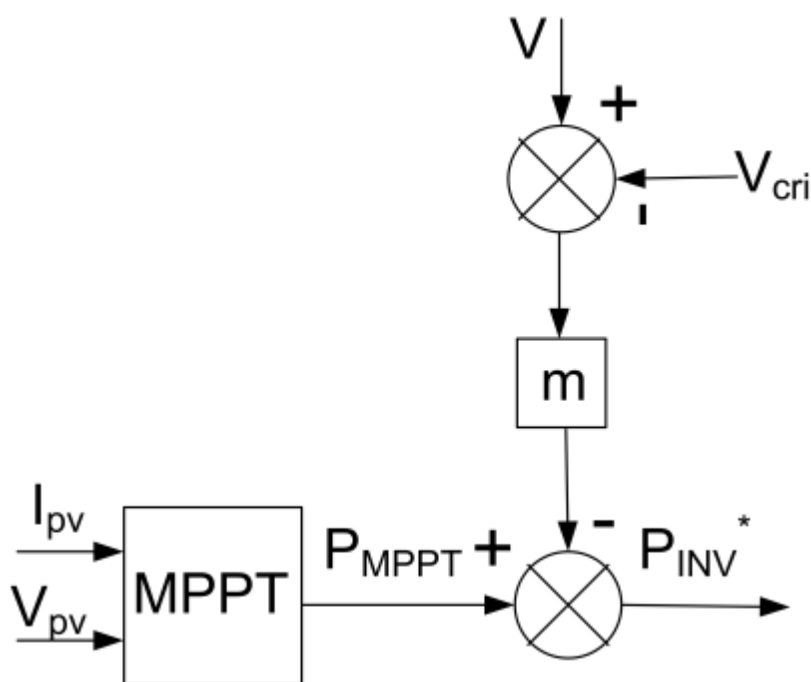
επέκτασή της στην περικοπή ενεργού ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα ΧΤ βασίζεται στο γεγονός πως, όπως ήδη αναφέρθηκε, η επίδραση της ενεργού ισχύος στην τάση είναι ισχυρότερη από την επίδραση της αέργου ισχύος, λόγω της υπεροχής της πραγματικής αντίστασης της γραμμής σε σχέση με την επαγωγική αντίδρασή της.

Η βασική ιδέα πίσω από την ανάπτυξη της μεθόδου αυτής ξεκίνησε σαν μία προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο των συνεχών αυξομειώσεων της τάσης που προέκυπτε με τις συμβατικές μεθόδους. Σύμφωνα με αυτές, όταν η παραγωγή ισχύος από τα φωτοβολταϊκά οδηγούσε την τάση πάνω από το όριο, ο αντιστροφέας σταματούσε την έγχυση ισχύος. Μετά την αλλαγή αυτή, η τάση επανερχόταν σε κανονικά επίπεδα, και έτσι ο αντιστροφέας εισερχόταν ξανά σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, εγχέοντας εκ νέου την ισχύ των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο και προκαλώντας ως εκ τούτου νέο πρόβλημα υπέρτασης, με την διαδικασία να επαναλαμβάνεται αρκετές φορές σε μικρό χρονικό διάστημα μέχρι οι σχέσεις παραγωγής/κατανάλωσης να σταματήσουν να οδηγούν σε μεγάλη ποσότητα ανάστροφης ισχύος. Η διαδικασία αυτή όπως είναι λογικό έχει σαν αποτέλεσμα η παραγόμενη τάση να χαρακτηρίζεται από μεγάλες μεταβάσεις καθιστώντας την ενδεχομένως ακατάλληλη για τους τοπικούς καταναλωτές, βλάπτοντας παράλληλα και τα διακοπτικά στοιχεία των τοπικών ηλεκτρονόμων [33].

Για την αντιμετώπιση λοιπόν του φαινομένου της υπέρτασης χωρίς τα φαινόμενα αυξομειώσεων, η λύση που προτείνεται είναι η εφαρμογή ενός μηχανισμού ελέγχου που θα μειώνει την ισχύ εξόδου του αντιστροφέα με τρόπο αναλογικό προς την άυξηση της τάσης [31,32]:

$$P_{inv} = \begin{cases} P_{MPPT} & V < V_{cri} \\ P_{MPPT} - m(V - V_{cri}) & V_{cri} \leq V \leq V_{lim} \\ 0 & V_{lim} < V \end{cases} \quad (4.13)$$

, όπου P_{MPPT} η μέγιστη ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών όπως προκύπτει από την διαδικασία MPPT, m ένας παράγοντας κλίσης και V_{cri} η τάση πάνω από την οποία η εγχυόμενη ισχύς από τον αντιστροφέα μειώνεται κατά έναν παράγοντα $droop$. Για $V < V_{cri}$ ο αντιστροφέας εγχείει την μέγιστη διαθέσιμη ισχύ P_{MPPT} . Ωστόσο για τιμές πάνω από την V_{cri} , η τιμή ισχύος που θα περικοπεί είναι σε άμεση συνάρτηση με την διαφορά ανάμεσα στην πραγματική τάση και στην V_{cri} , μέχρι μία ανώτατη τιμή V_{lim} πάνω από την οποία η ισχύς των φωτοβολταϊκών μηδενίζεται. Οι συντελεστές $droop$ του αντιστροφέα (m και V_{cri}), επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμβαδίζουν με τα όρια τάσης των ζυγών σύνδεσής τους.



Εικόνα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ελέγχου του Power Curtailment.

Η στρατηγική αυτή έχει ως αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά να περικόπτουν ισχύ μόνο όταν υπάρχει πραγματική ανάγκη, και με σωστή παραμετροποίηση μπορεί να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της απώλειας ισχύος. Επίσης η δυνατότητα που παρέχει στην αυτόματη ρύθμιση τάσης και η βεβαιότητα ότι η τάση δεν θα κινδυνεύσει να τεθεί εκτός ορίων επιτρέπει την επί πλέον διεύθυνση φωτοβολταϊκής παραγωγής.

Ωστόσο, η μέθοδος περιέχει και κάποια μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ότι η λειτουργία αυτή μπορεί να αναιρέσει το σύστημα προστασίας για την νησιδοποίηση, σε περίπτωση που αυτό βασίζεται στις μετρήσεις τάσης και στην παρατήρηση των εκτός ορίων τιμών της [33].

Σε αυτή την περίπτωση, η παραγωγή των φωτοβολταϊκών θα ήταν μεγαλύτερη από την κατανάλωση, και η τάση θα ανέβαινε ενεργοποιώντας τον κατάλληλο έλεγχο, φαινόμενο που τώρα λόγω της περικοπής ισχύος δεν θα συμβεί. Ωστόσο δεν επηρεάζει συστήματα τα οποία βασίζονται σε έλεγχο μέσω της παρατήρησης της συχνότητας, των αλμάτων φάσης, των αρμονικών, και της εμπέδησης του δικτύου [35] δεν επηρεάζονται από την τεχνική αυτή. Ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι αν εφαρμοστεί με ίδιο τρόπο σε ένα σύνολο φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων κατά μήκος μιας γραμμής, οι παραγωγοί που βρίσκονται στα πιο απομακρυσμένα σημεία από τον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ θα κληθούν να περικόψουν πολύ μεγαλύτερο μέρος της ισχύος τους σε σχέση με τους παραγωγούς που βρίσκονται πιο κοντά στον μετασχηματιστή, καθώς η ευαισθησία της τάσης τους είναι πολύ μεγαλύτερη. Έτσι η συμβολή στην αντιμετώπιση του φαινομένου δεν κατανέμεται δίκαια. Μία παραλλαγή της μεθόδου είναι η εφαρμογή ενός συντονισμένου ελέγχου, με αυτόματη περικοπή ισχύος όταν αυτή ή η διαφορά της από την κατανάλωση περάσει κάποιο όριο. Η τεχνική αυτή φροντίζει να κατανέμει με πιο δίκαιο τρόπο την συμμετοχή στην αντιμετώπιση του προβλήματος ανάμεσα στους παραγωγούς, χωρίς να απαιτεί την δημιουργία ενός ξεχωριστού συστήματος επικοινωνίας μεταξύ τους, ωστόσο οι συνολικές απώλειες είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση του μη συντονισμένου ελέγχου.

4.6 Απορρόφηση αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των Φωτοβολταϊκών:

Αν και το κυρίαρχο εργαλείο ελέγχου του επιπέδου τάσης του σημείου σύνδεσης είναι ο έλεγχος της ροής ενεργού ισχύος, εν τούτοις όπως προαναφέρθηκε υπάρχει περιθώριο επιπλέον βελτίωσης μέσω μιας περιορισμένης ανταλλαγής αέργου ισχύος με το δίκτυο, η οποία χωρίς να επιβαρύνει ιδιαίτερα την λειτουργία του αντιστροφέα, των γραμμών και των λοιπών στοιχείων του δικτύου επιτυγχάνει έναν μικρό αλλά σημαντικό επιπλέον έλεγχο της τάσης.

Συγκεκριμένα, έστω ένας αντιστροφέας που παράγει ενεργό ισχύ ίση με 1αμ. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ταυτόχρονος έλεγχος αέργου ισχύος, η φαινόμενη ισχύς που θα έπρεπε να διαχειριστεί ο αντιστροφέας θα ήταν ίση με 1αμ, και ο συντελεστής ισχύος μοναδιαίος. Έστω λοιπόν ότι το όριο του αντιστροφέα τίθεται ίσο με 0.9. Αυτό θα σήμαινε ότι για το ίδιο ποσό ενεργού ισχύος, θα υπήρχε περιθώριο χειρισμού ποσού αέργου ισχύος που θα προέκυπτε ως εξής:

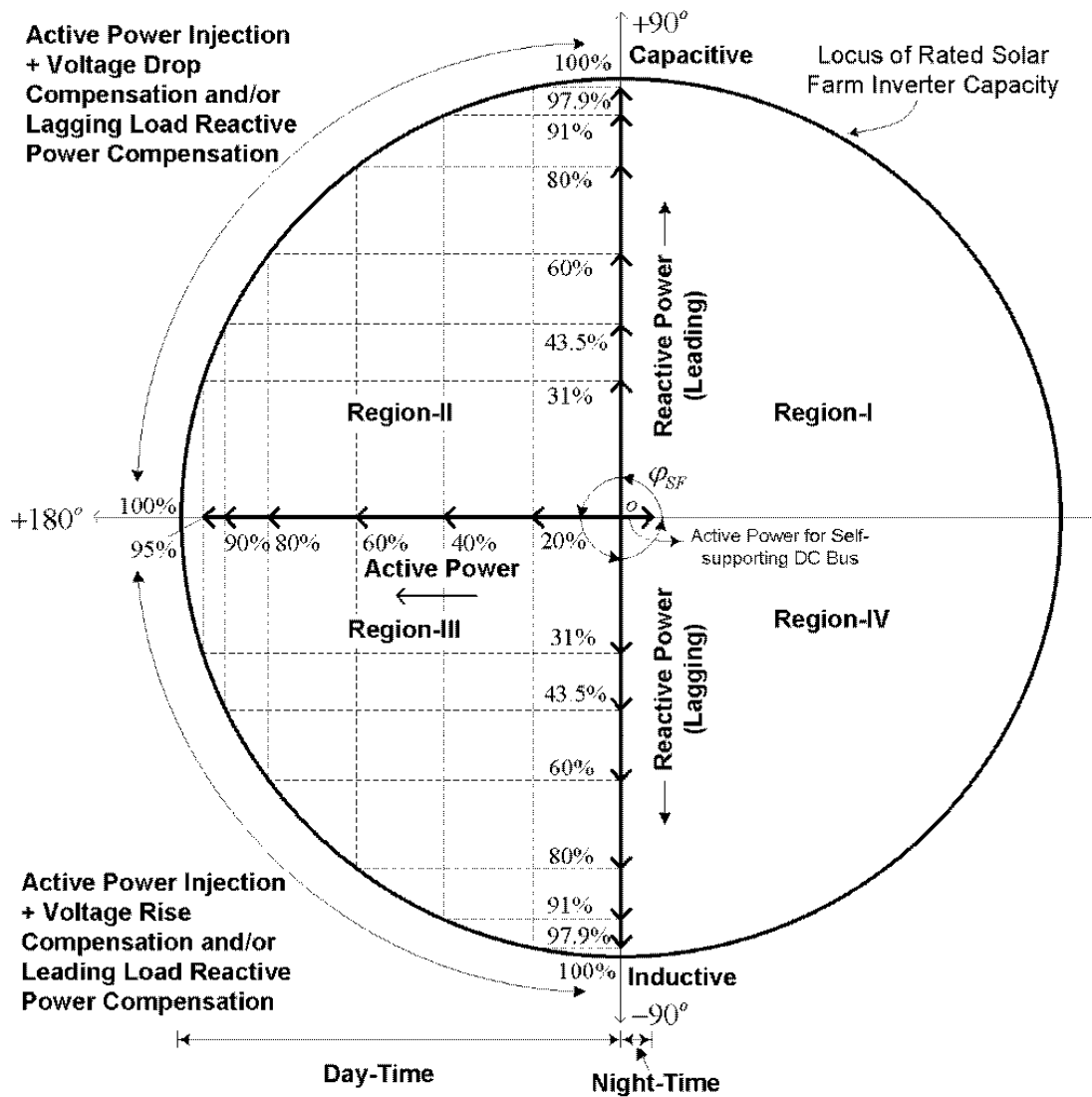
$$Q = P \cdot \tan(\arccos(0.9)) = 0.484 \text{ αμ}$$

, το οποίο θα σήμαινε ότι το νέο αναγκαίο ονομαστικό μέγεθος του inverter θα ήταν ίσο με:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1 + 0.484^2} = 1.11 \text{ αμ}$$

,δηλαδή για αύξηση της αέργου ισχύος κατά σχεδόν 0.5 ανά μονάδα, ο αντιστροφέας θα χρειαζόταν αύξηση μόλις 11% σε σχέση με το αρχικό μέγεθος. Έτσι φαίνεται ότι μικρή αύξηση της επένδυσης σε έναν μεγαλύτερο αντιστροφέα, θα μπορούσε να δώσει σημαντικό περιθώριο ρύθμισης τάσης μέσω αέργου ισχύος.

Στο σχεδιάγραμμα 4.6 που ακολουθεί φαίνεται η σχέση μεταξύ του ποσού αέργου ισχύος που είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί και της αύξησης που συνεπάγεται για τα ονομαστικά μεγέθη ισχύος του αντιστροφέα.



Εικόνα 4.6: Περιθώριο ταυτόχρονης ρύθμισης αέργου ισχύος για δεδομένα μεγέθη αντιστροφεία, και εύρεση καινούριου αναγκαίου μεγέθους του για δεδομένη ποσότητα ρύθμισης [36]

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι χειρισμού της αέργου ισχύος. Τέσσερις από αυτούς αναφέρονται στο [37]. Οι δύο έχουν να κάνουν με απ'ευθείας καθορισμό του ποσού της ανταλλαγής αέργου ισχύος και οι άλλοι δύο με έμμεσο καθορισμό μέσα από τον ορισμό του συντελεστή ισχύος λειτουργίας του αντιστροφεία. Να σημειωθεί ότι για λόγους απλότητας για όλους τους τρόπους θεωρούνται ίδιες καταστάσεις παραγωγής.

Ο ένας τρόπος ρύθμισης της αέργου ισχύος, είναι η προκαθορισμένη απορρόφηση ή έγχυση αέργου ισχύος από ή προς το δίκτυο (λειτουργία fixed Q), το ποσό της οποίας μπορεί να καθοριστεί για κάθε σύστημα διαφορετικά, σε αναλογία με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

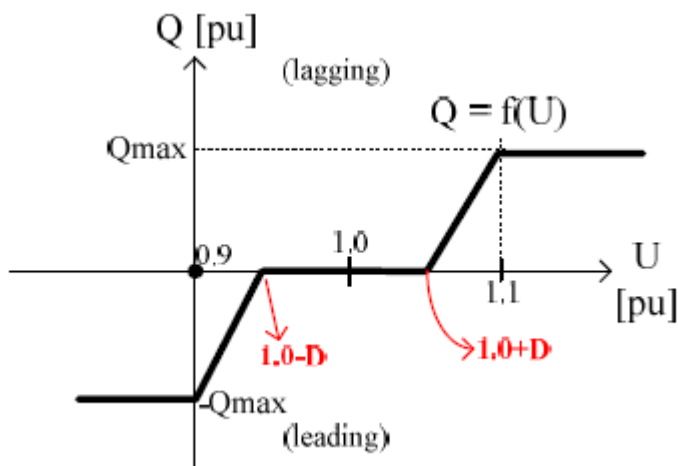
Ο δεύτερος είναι η λειτουργία του inverter με έναν καθορισμένο συντελεστή ισχύος (fixed cosφ). Σε αυτή την λειτουργία η αέργου ισχύς που απορροφάται δεν είναι σταθερή, αλλά αυξάνεται όσο αυξάνεται η παραγόμενη ισχύς, με τέτοιον τρόπο ώστε να παραμένει σταθερός ο συντελεστής ισχύος του αντιστροφεία. Η λογική βασίζεται στην διαπίστωση ότι μεγαλύτερη

παραγωγή συνεπάγεται μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρτασης, άρα και μεγαλύτερη ανάγκη απορρόφησης αέργου ισχύος.

Στον τρίτο τρόπο, ο χειρισμός της αέργου ισχύος γίνεται μέσω μίας καμπύλης droop, σε πλήρη εξάρτηση από το επίπεδο τάσης του ζυγού σε κάθε χρονική στιγμή ($Q(U)$). Η περιγραφή της καμπύλης αυτής είναι η εξής:

$$Q = \begin{cases} Q_{max} & U < U_1 \\ \frac{Q_{max}}{U_1 - U_2} (U - U_2) & U_1 \leq U \leq U_2 \\ 0 & U_2 < U \leq U_3 \\ \frac{Q_{max}}{U_3 - U_4} (U - U_3) & U_3 < U \leq U_4 \\ -Q_{max} & U > U_4 \end{cases} \quad (4.14)$$

,όπου σαν U_1 και U_4 θεωρούνται το άνω και κάτω όριο τάσης αντίστοιχα, ενώ σαν U_2 και U_3 επιλέγονται δύο εσωτερικά επίπεδα τάσης, ανάμεσα στα οποία η λειτουργία του δικτύου θεωρείται πλήρως εξασφαλισμένη από ενδεχόμενα υπέρτασης και υπότασης και έτσι επιλέγεται ένα dead band για την ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο, δηλαδή μέσα σε αυτά τα όρια τάσης η αέργος ισχύς που ανταλλάσσεται με το δίκτυο είναι 0. Καθώς η μέθοδος προβλέπει ρύθμιση τάσης τόσο σε φαινόμενο υπέρτασης, όσο και σε φαινόμενο υπότασης, η παροχή στήριξης της τάσης θεωρείται πλήρης.

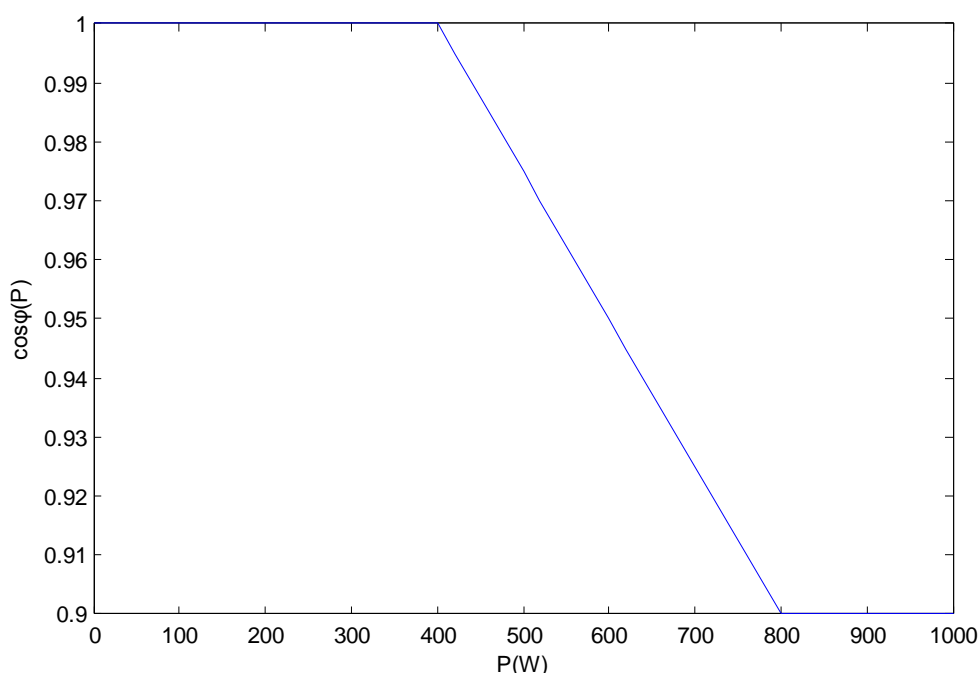


Εικόνα 4.7: Καμπύλη ελέγχου $Q(U)$ [38].

Ο επόμενος τρόπος ελέγχου που εξετάζεται είναι η καμπύλη $\cos\phi(P)$: Είναι παραλλαγή της μεθόδου σταθερού συντελεστή ισχύος. Ο συντελεστής ισχύος δεν είναι πλέον καθορισμένος ρητά, αλλά ελέγχεται από το ποσό ενεργού ισχύος που την δεδομένη στιγμή στέλνει ο αντιστροφέας στο δίκτυο μέσα από μία droop καμπύλη ($\cos\phi(P)$). Σε κατάσταση μέτριας παραγωγής ενεργού ισχύος από τον inverter, οι πιθανότητες για ανύψωση ή πτώση τάσης είναι μικρές, οπότε ο αντιστροφέας μπορεί να λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Όσο η παραγωγή ενεργού ισχύος αυξάνεται, τόσο το πρόβλημα της ανύψωσης τάσης γίνεται όλο και πιθανότερο, οπότε ο inverter θα χρειαστεί να απορροφήσει άεργο ισχύ από το δίκτυο

για να μειώσει το επίπεδο της τάσης. Για να το κάνει αυτό, η droop καμπύλη προβλέπει την γραμμική μείωση του συντελεστή ισχύος λειτουργίας του inverter μετά από ένα επίπεδο ισχύος, ο οποίος θα λειτουργεί με επαγωγικό χαρακτήρα, μέχρι μία ακραία τιμή κάτω από την οποία δεν δύναται ο αντιστροφέας να λειτουργήσει. Αν και η βασική χρήση του είναι για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ανύψωσης τάσης, ο έλεγχος μπορεί να επεκταθεί για αντιμετώπιση φαινομένου πτώσης τάσης, ορίζοντας χωρητική λειτουργία με γραμμική μείωση του συντελεστή ισχύος κάτω από ένα επίπεδο παραγόμενης ισχύος.

$$\cos\varphi(P) = \begin{cases} 1 & P < P_1 \\ \frac{\cos\varphi_2 - 1}{P_2 - P_1}(P - P_1) + 1 & P_1 < P \leq P_2 \\ \cos\varphi_2 & P > P_2 \end{cases} \quad (4.15)$$

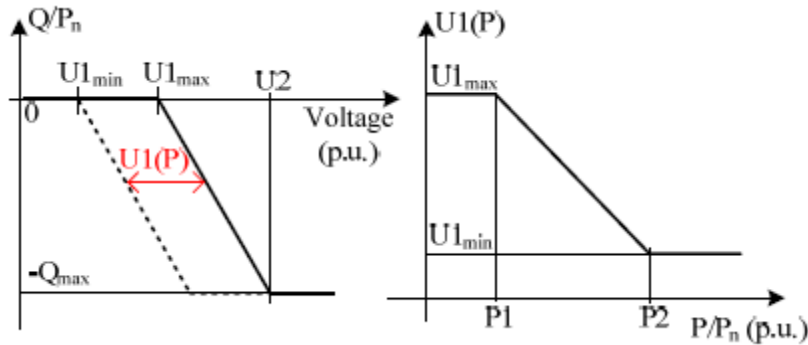


Εικόνα 4.8: Καμπύλη $\cos\varphi(P)$.

Οι δύο αυτές βασικές μέθοδοι χειρισμού της ενεργού ισχύος έχουν κάποια μειονεκτήματα: Με την μέθοδο Q(U), ο κάθε αντιστροφέας ορίζει το ποσό αέργου ισχύος με βάση το επίπεδο τάσης του. Όμως, είναι λογικό ότι οι πιο απομακρυσμένοι από τον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ αντιστροφέες θα είναι αυτοί που θα έχουν το μεγαλύτερο πρόβλημα τάσης, άρα και την μεγαλύτερη συμμετοχή στην απορρόφηση αέργου ισχύος, ενώ οι αντιστροφέες που είναι πιο κοντά στον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ θα έχουν πολύ μικρότερες διακυμάνσεις τάσης, άρα και μηδενική συμμετοχή στην απορρόφηση της αέργου ισχύος. Επίσης, με την μέθοδο $\cos\varphi(P)$ όλοι οι αντιστροφέες απορροφούν τα ίδια ποσά αέργου ισχύος (για ίδιες συνθήκες παραγωγής) χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν το ενδεχόμενο η παραγόμενη ισχύς να καταναλώνεται τοπικά, δηλαδή να μην παράγεται πρόβλημα ανύψωσης, ενώ επίσης δεν λογίζεται η ευαισθησία της τάσης από τις μεταβολές P και Q σε κάθε εγκατάσταση, με αποτέλεσμα οι αντιστροφέες που είναι κοντά στον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ (μικρή ευαισθησία) και οι πιο απομακρυσμένοι

(μεγάλη ευαισθησία) να συμμετέχουν με τα ίδια ποσά αέργου ισχύος, κάτι που συνεπάγεται περιττή φόρτιση για τους πρώτους. Οι συγγραφείς του [37] προτείνουν δύο παραλλαγές για την $Q(U)$ και την $\cos\phi(P)$:

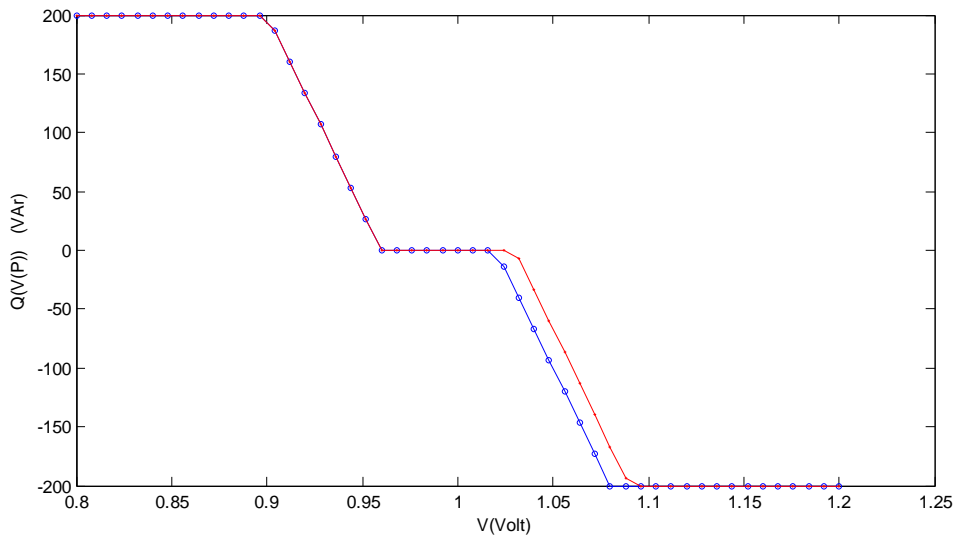
- Για την $Q(U)$ προτείνεται μία καμπύλη η λογική της οποίας είναι η εξής: Ενώ η απλή $Q(U)$ έχει σταθερό dead band, ανεξάρτητο από την παραγόμενη ισχύ, η νέα καμπύλη έχει μεταβλητό dead band, σε μία αναλογία με την παραγόμενη ισχύ του αντιστροφέα. Για μέτρια ποσά παραγόμενης ισχύος, η πιθανότητα υπέρτασης είναι χαμηλή, οπότε η τάση εκκίνησης απορρόφησης αέργου ισχύος δεν χρειάζεται να είναι χαμηλή. Μετά από ένα καθορισμένο ποσό ισχύος που παράγεται, όσο αυτή αυξάνεται, τόσο η τάση στην οποία ξεκινάει η απορρόφηση αέργου ισχύος μειώνεται γραμμικά, μέχρι ένα κατώτατο σημείο τάσης μετά το οποίο ανεξαρτήτως της παραγωγής η τάση έναρξης μένει σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η συμμετοχή των κοντινών στον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ αντιστροφέν στην αντιμετώπιση του προβλήματος, και μάλιστα σε στιγμές που υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα ανύψωσης τάσης(μεγαλύτερη παραγωγή ενεργού ισχύος).



Εικόνα 4.9: Περιγραφή της καμπύλης $Q(U,P)$.

Όπως φαίνεται, η συνάρτηση από την οποία προκύπτει η αέργος ισχύς δεν διαφοροποιείται σε σχέση με την $Q(U)$, ωστόσο πλέον οι τιμές U_3 και U_4 της αρχικής συνάρτησης μεταβάλλονται ως ακολούθως:

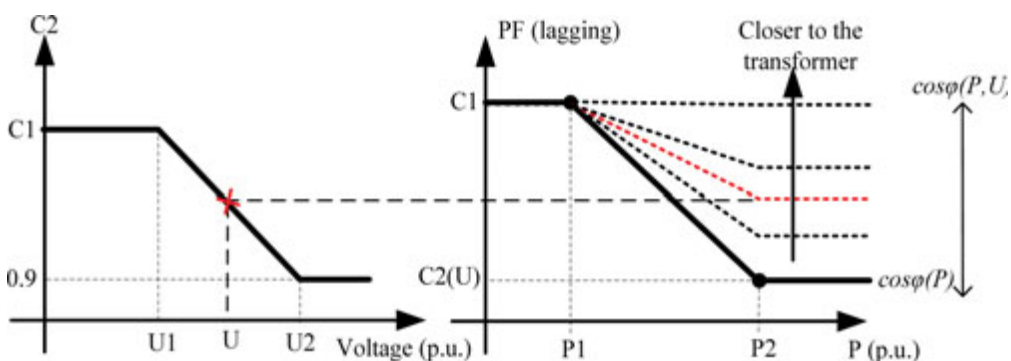
$$U_3 = \begin{cases} U_{3max} & P < P_1 \\ \frac{U_{3min} - U_{3max}}{P_2 - P_1} (P - P_2) + U_{3min} & P_1 \leq P \leq P_2 \\ U_{3min} & P > P_2 \end{cases} \quad (4.16)$$



Εικόνα 4.10: Αποτελέσματα της καμπύλης $Q(U,P)$ για διαφορετικές τιμές P .

Στο παραπάνω διάγραμμα, η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στην παραγόμενη άεργο ισχύ υπό συνθήκες ελάχιστης παραγωγής, ενώ η μπλε στις συνθήκες μέγιστης παραγωγής.

- Για την $\cos\phi(P)$ η καμπύλη που προτείνεται διαφοροποιείται από την κλασική στο ότι η κατώτατη τιμή του $\cos\phi$ πλέον δεν καθορίζεται απόλυτα, αλλά κινείται με τη σειρά της σε μία καμπύλη που είναι γραμμική συνάρτηση της τάσης ($\cos\phi(P,U)$). Συγκεκριμένα, για τιμές τάσης κοντά στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας οι αντιστροφείς λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, καθώς δεν υφίσταται κάποιος λόγος να παρέχουν στήριξη τάσης. Όσο η τάση όμως αυξάνεται, τόσο εμφανίζεται η ανάγκη απορρόφησης αέργου ισχύος από το δίκτυο, οπότε και η κατώτατη τιμή του συντελεστή ισχύος λειτουργίας μειώνεται (με τον συντελεστή ισχύος να έχει επαγωγικό χαρακτήρα), και έτσι αυξάνεται το περιθώριο ρύθμισης.

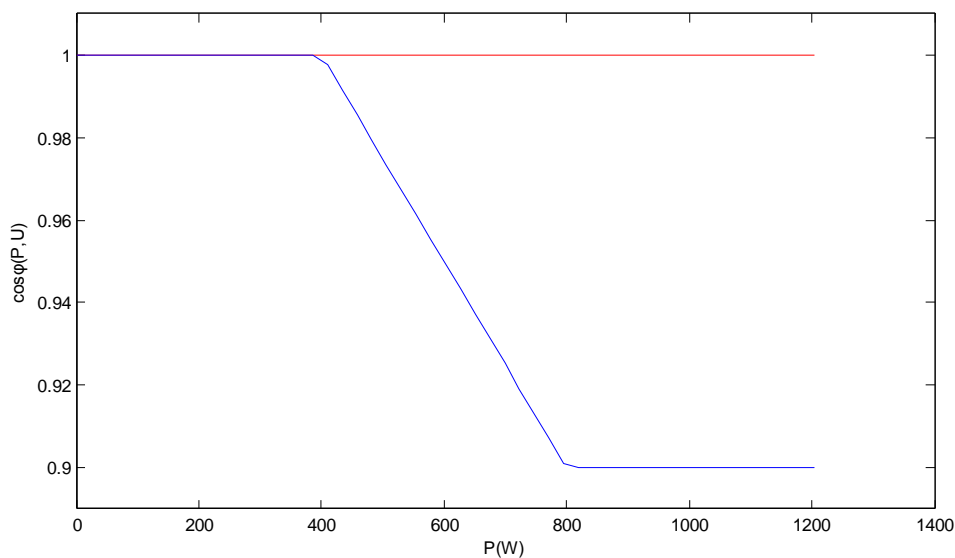


Εικόνα 4.11: Σχηματική περιγραφή της $\cos\phi(P,U)$.

Η συνάρτηση που δίνει τον συντελεστή ισχύος δεν μεταβάλλεται, αυτό που μεταβάλλεται όμως είναι το κατώτατο όριο του συναρτήσε της τάσης λειτουργίας, με τον τρόπο που ακολουθεί:

$$\cos\varphi = \begin{cases} 1 & U < U_1 \\ \frac{\cos\varphi_{min} - 1}{U_2 - U_1} (U - U_1) + 1 & U_1 \leq U \leq U_2 \\ \cos\varphi_{min} & U > U_2 \end{cases} \quad (4.17)$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η διαφοροποίηση του κατώτατου συντελεστή ισχύος ανάλογα με την τιμή της τάσης. Στην κόκκινη καμπύλη απεικονίζεται η τιμή του $\cos\varphi$ για $U < U_1$, και παραμένει μοναδιαίος για όλο το φάσμα ισχύος, ενώ στην μπλε απεικονίζεται η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει, για $U > U_2$.



Εικόνα 4.12: Αποτελέσματα της καμπύλης $\cos\varphi(P, U)$ για διαφορετικές τιμές U .

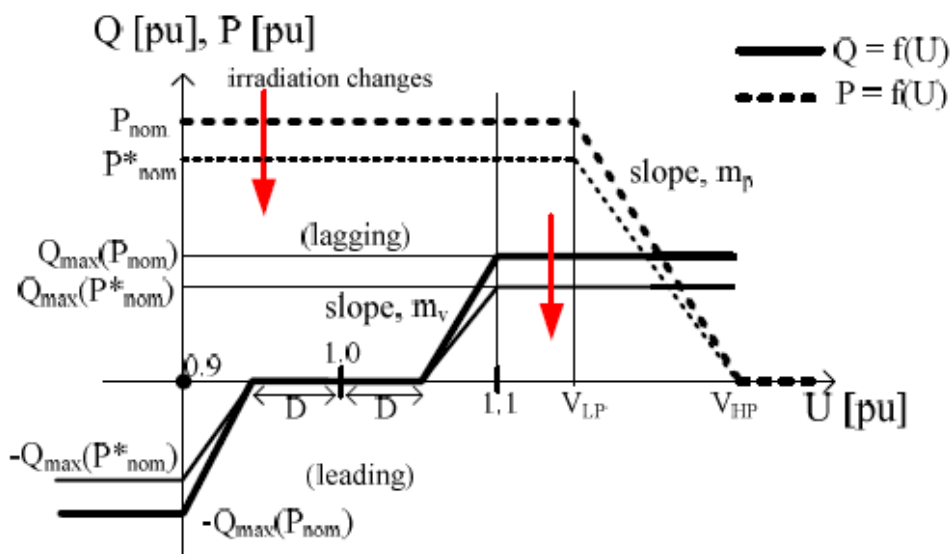
Με αυτόν τον τρόπο η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο δεν είναι ανεξάρτητη πλέον από το μέγεθος του προβλήματος που πρέπει να αντιμετωπισθεί, καθώς σε περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς καταναλώνεται τοπικά, η τάση δεν θα αυξηθεί και έτσι ο συντελεστής ισχύος λειτουργίας του αντιστροφέα θα παραμείνει ψηλά, επιλύοντας έτσι ένα πρόβλημα της κλασικής καμπύλης $\cos\varphi(P)$. Επίσης στην ίδια λογική, μια πιθανή εξωτερική μεταβολή της τάσης θα τύχει πιο κατάλληλης αντιμετώπισης, αφού πλέον το ποσό περίσσειας ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο δεν είναι ο μόνος παράγοντας υπέρτασης, και έτσι οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών αναλαμβάνουν έναν πιο ενεργό ρόλο. Ταυτόχρονα, η αχρείαστα μεγάλη συμμετοχή των αντιστροφέων με την μικρότερη ευαισθησία τάσης στην απορρόφηση αέργου ισχύος για την αντιμετώπιση του φαινομένου μειώνεται με αυτή την μέθοδο, αφού οι περιορισμένες αυξομειώσεις τάσης που αντιλαμβάνονται συνεπάγονται και υψηλότερο συντελεστή ισχύος.

Με άλλα λόγια, οι δύο προτεινόμενες μορφές ελέγχου του [37] είναι δύο απόπειρες συμβιβασμών μεταξύ των διαφορετικών χαρακτηριστικών που περιέχουν οι δύο βασικές μορφές ελέγχου.

Τέλος, σε μία άλλη παραλλαγή του ελέγχου $Q(U)$ [38], η μέγιστη τιμή της άεργου ισχύος δεν είναι πλέον σταθερή, αλλά εξαρτάται από την παραγωγή ενεργού ισχύος. Έτσι, με επιλογή κατάλληλου συντελεστή ισχύος, η μέγιστη άεργος ισχύς που θα απορροφάται θα είναι ίση με:

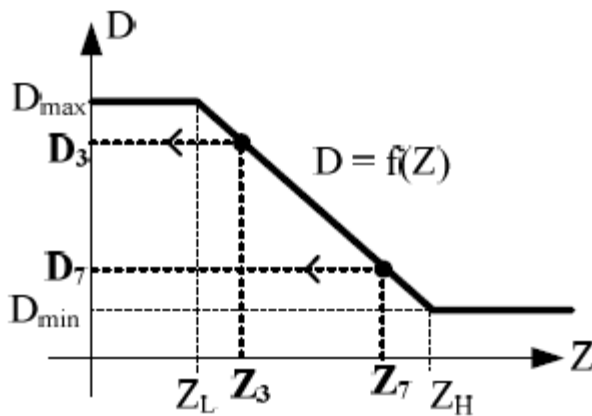
$$Q_{max} = P \cdot \tan(\arccos\phi) \quad (4.18)$$

,με την νέα καμπύλη που προκύπτει να είναι της μορφής:



Εικόνα 4.13: Καμπύλη $Q(U,P)$ με μεταβλητό Q_{max} .

Στην καμπύλη απεικονίζεται παράλληλα και η συνεργασία της ρύθμισης άεργου ισχύος με την τεχνική Power Curtailment. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή της τιμής D του dead band που τοποθετείται στην καμπύλη μπορεί να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε σε ένα δίκτυο πολλών παραγωγών η ρύθμιση να γίνεται με διαφορετικό τρόπο συμμετοχής. Στο paper προτείνεται μία drop καμπύλη για το D συναρτήσει της αντίστασης βραχυκύκλωσης του σημείου κοινής σύνδεσης, με βάση την ανάλυση ευαισθησίας τάσης. Συγκεκριμένα, καθώς τα απομακρυσμένα από τον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ συστήματα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανίσουν πρόβλημα υπέρτασης, καλούνται να απορροφούν περισσότερη άεργο ισχύ από τα πλησιέστερα:



Εικόνα 4.14: Καμπύλη $D(Z)$.

$$D(Z) = \begin{cases} D_{max} & Z < Z_L \\ \frac{D_{min} - D_{max}}{Z_H - Z_L} (Z - Z_H) + D_{min} & Z_L \leq Z \leq Z_H \\ D_{min} & Z > Z_H \end{cases} \quad (4.19)$$

Τέλος, στο [26] προτείνεται και ένας απλός τρόπος εφαρμογής των απλών καμπυλών $\cos\phi(P)$ και $Q(U)$ για την περίπτωση επικοινωνίας ανάμεσα στους αντιστροφείς ή μεταξύ των αντιστοφίων και ενός κεντρικού μέσου επικοινωνίας. Σύμφωνα με τον τρόπο αυτό, όσο η τάση είναι μέσα στα όρια, επιλέγεται η καμπύλη $Q(U)$ για την λειτουργία όλων των αντιστροφίων, με κριτήριο επιλογής την κάπως πιο συντηρητική αντιμετώπιση του προβλήματος, ενώ σε στιγμές υπέρβασης της τάσης σε κάποιο σημείο που θα θεωρηθεί κρίσιμο, ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή για εφαρμογή της μεθόδου $\cos\phi(P)$ μέχρι να επιλυθεί το πρόβλημα ανύψωσης τάσης.

4.7 Αποθήκευση Ενέργειας

4.7.1 Αξία της ιδιοκατανάλωσης

Η κατεύθυνση που έχει πάρει η ανάπτυξη της διανεμημένης παραγωγής στον Ευρωπαϊκό χώρο προσανατολίζεται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια προς την ενίσχυση της έννοιας της ιδιοκατανάλωσης [39]. Προς αυτή την κατεύθυνση δύο είναι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί στους οποίους μπορούν να διαχωριστούν οι ακολουθούμενες πολιτικές διαχείρισης της φωτοβολταϊκής παραγωγής σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης:

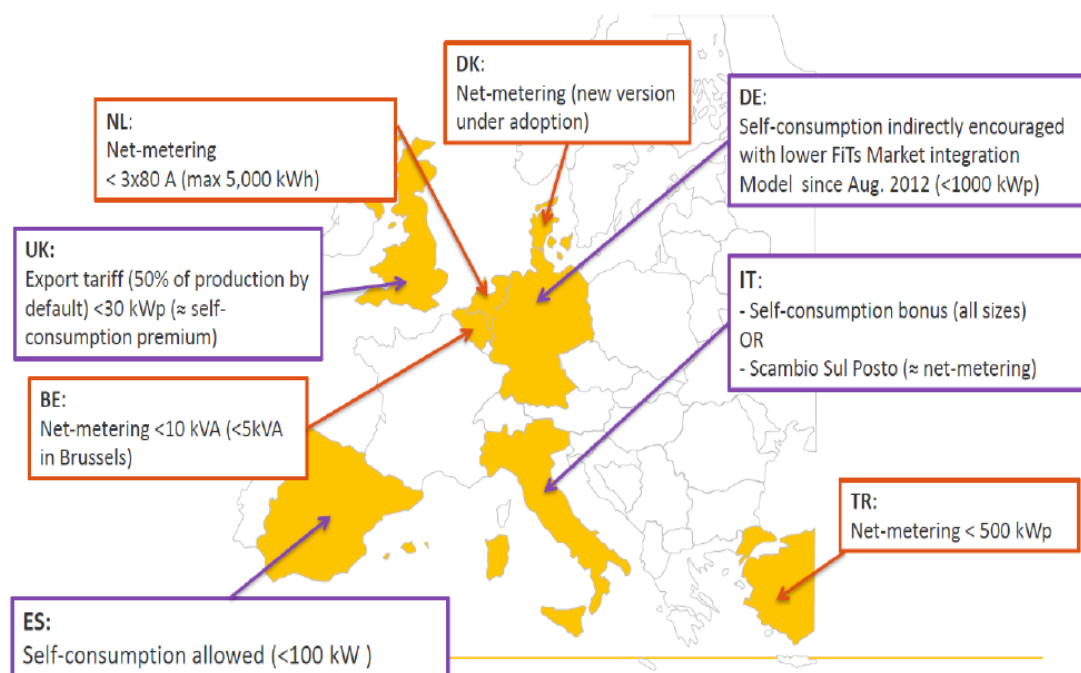
- **Ιδιοκατανάλωση (Self Consumption):** Η δυνατότητα κάθε καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας να συνδέσει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, με μέγεθος που να ανταποκρίνεται στην κατανάλωσή του και στις δυνατότητες του δικτύου στο οποίο συνδέεται, με σκοπό να καλύπτει την επί τόπου κατανάλωσή του, ενώ μπορεί να λαμβάνει κέρδος από την

περίσσεια ενέργειας που παράγει την οποία δεν καταναλώνει και μπορεί να την εγχέει στο δίκτυο.

- Συμψηφισμός ενέργειας (Net-Metering): Μία απλή συμφωνία που διαβεβαιώνει τους καταναλωτές ότι η τιμή της ενέργειας που καταναλώνουν σε σχέση με την τιμή της ενέργειας που εγχέουν στο δίκτυο θα έχουν μία αναλογία τιμής 1 προς 1. Με αυτό τον τρόπο η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης λογίζεται σε ένα ευρύτερο χρονικό περιθώριο, και το δίκτυο λογίζεται σαν μία μακροπρόθεσμη αποθηκευτική μονάδα, με την ενέργεια των φωτοβολταϊκών να εγχέεται κατά περίπτωση στο δίκτυο και να καταναλώνεται αργότερα.

Την παρούσα στιγμή πολλές χώρες έχουν εφαρμόσει ήδη πολιτικές που εντάσσονται σε κάποια από τις δύο κατηγορίες ή συνδυάζουν στοιχεία και των δύο. Σε μεγάλο βαθμό η τάση πάντως είναι προς την δημιουργία κινήτρων για μεγαλύτερο βαθμό ιδιοκατανάλωσης: στην Γερμανία αυτό γίνεται τόσο με κατάλληλες τιμολογήσεις της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και της μείωσης των εγγυημένων τιμών (Feed in Tariffs), όσο και με τον περιορισμό της μέγιστης δυνατής εγχεόμενης ισχύος. Η Ιταλία αποζημιώνει την ενέργεια που εγχέεται στο δίκτυο όταν αυτή καταναλώνεται αμέσως, σαν ένα μίγμα εφαρμογής εγγυημένης τιμής που ωστόσο οδεύει προς την ιδιοκατανάλωση. Σε γενικές γραμμές, η εφαρμογή της εγγυημένης τιμής είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την εκκίνηση της αγοράς των φωτοβολταϊκών, και δεν παρουσιάζει μεγάλα προβλήματα στην εφαρμογή της για χαμηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών. Ωστόσο, με την αύξηση της διείσδυσης, η εξυπηρέτηση των εγγυημένων τιμών γεννά το ερώτημα της οικονομικής βιωσιμότητας των διαχειριστών του δικτύου.

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζονται οι πολιτικές που ακολουθούνται σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και η ένταξή τους σε κάποια από τις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες:



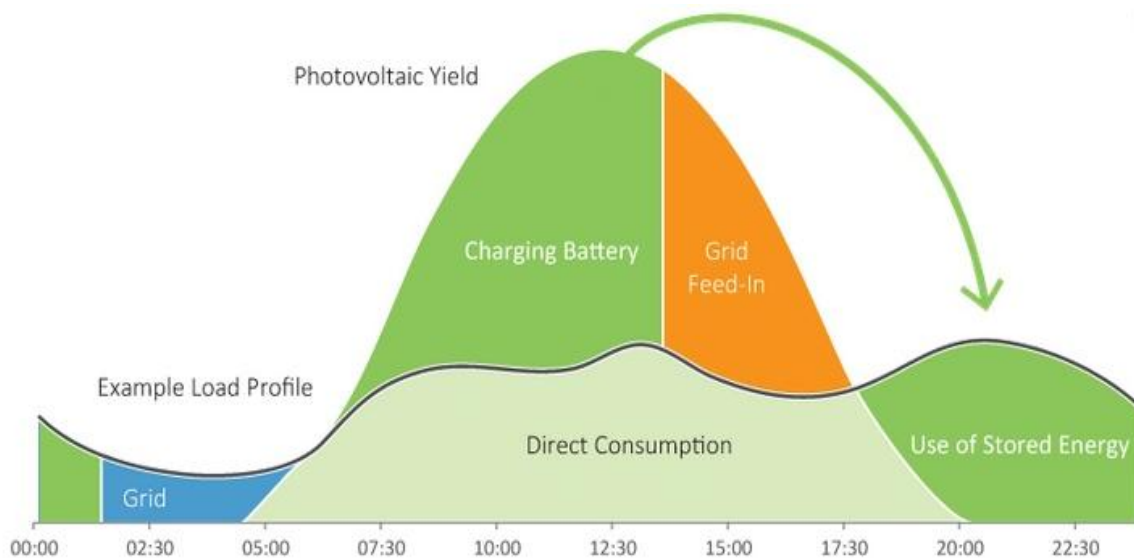
Εικόνα 4.15: Πολιτικές που ακολουθούνται για την ιδιοκατανάλωση ανά χώρα σ την Ευρώπη.

Πλεονεκτήματα της ιδιοκατανάλωσης:

Η περεταίρω εξάπλωση της εφαρμογής της ιδιοκατανάλωσης αναμένεται να διευκολύνει την μετάβαση προς μία κατάσταση όπου οι εγγυημένες τιμές ή τα πράσινα πιστοποιητικά δεν θα αποτελούν πια το βασικό κίνητρο για την επένδυση. Η επιστροφή της επένδυσης θα γίνεται μέσα από την εξοικονόμηση στους ηλεκτρικούς λογαριασμούς συναρτήσει της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία δεδομένη αγορά.

Επίσης, πολιτικές που στηρίζουν την ιδιοκατανάλωση είναι πιο κοντά στην βασική σκέψη της διανεμημένης παραγωγής. Καθώς οι εγγυημένες τιμές ανταμείβουν κάθε ροή ηλεκτρικής ισχύος από τον παραγωγό προς το δίκτυο, η ιδιοκατανάλωση επικεντρώνει στην επίτευξη ισορροπίας του δικτύου όσον αφορά την ανταλλαγή ισχύος με τον παραγωγό/καταναλωτή (prosumer).

Ένα ακόμα πλεονέκτημα που μπορεί να προκύψει από την ιδιοκατανάλωση είναι το γεγονός ότι αν εφαρμοστεί σωστά μπορεί να διευκολύνει τον σχεδιασμό και την λειτουργία των δικτύων διανομής. Η εφαρμογή της μειώνει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που εγχέεται στιγμιαία στο δίκτυο τις ώρες μεγάλης παραγωγής (μεσημβρινές ώρες), επιτελώντας λειτουργία Peak-Shaving. Επίσης, όταν συνδυάζεται με πρακτικές όπως η ύπαρξη αποθηκευτικών μέσων, φορτία θέρμανσης/ψύξης κλπ, η ιδιοκατανάλωση μπορεί να επιτελέσει επίσης και λειτουργία shaving και στην κατανάλωση, σε ώρες αιχμής φορτίου χωρίς μεγάλη παραγωγή (απογευματινές ώρες). Έτσι μπορεί να αποφευχθεί η ανάγκη για λήψη μέτρων υποστήριξης των δικτύων διανομής, όπως η ενίσχυσή τους.



Εικόνα 4.16: Χρήση των μπαταριών με σκοπό την ιδιοκατανάλωση.

Τέλος, ένα άλλο ζήτημα στο οποίο συνεισφέρει η ιδιοκατανάλωση έχει να κάνει με τον βαθμό απόδοσης ενέργειας του δικτύου, μία σημαντική πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει η ευρωπαϊκή πολιτική για την ενέργεια. Συγκεκριμένα, επιβραβεύει άμεσα την προσπάθεια των χρηστών να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωσή ενέργειάς τους, ενώ και η αγορά βρίσκει πεδίο

να αναπτύξει εφαρμογές που θα βοηθούν τον χρήστη να έχει επίγνωση της εγκατάστασής του, όπως εφαρμογές απεικόνισης της ροής ενέργειας μιας συγκεκριμένης εγκατάστασης σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας έτσι σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό στην επίτευξη υψηλότερης απόδοσης ενέργειας.

4.7.2 Στρατηγικές ελέγχου αποθήκευσης ενέργειας

Η αυξανόμενη ροπή προς την ιδιοκατανάλωση όπως αναφέρθηκε ήδη, έχει σε κεντρικό ρόλο την αποθήκευση ενέργειας. Μέχρι πρόσφατα, ενώ τα πιθανά πλεονεκτήματα από τις διάφορες υπηρεσίες που μπορούσαν να προκύψουν με την χρήση συστημάτων αποθήκευσης είχαν αναγνωριστεί ευρέως, η απαγορευτική κοστολόγηση της επένδυσης σε συστήματα συσσωρευτών λειτουργούσε αποτρεπτικά για την χρήση τους, και οι όποιες λειτουργίες επιτελούσαν είχαν σαν βασικό στόχο την όσο το δυνατόν μικρότερη καταπόνησή τους, κάτι που πλέον η ιδιοκατανάλωση τείνει να το αλλάξει. Στο παράδειγμα της Γερμανίας, η μεταστροφή αυτή εκφράζεται μέσω του German Act.

Σύμφωνα με το German Act, ο στόχος πλέον είναι η ενίσχυση της τοπικής κατανάλωσης της παραγόμενης ισχύος των φωτοβολταϊκών και η ελαχιστοποίηση της ανταλλαγής ισχύος με το δίκτυο. Σε αυτό το πλαίσιο, η πολιτική που ακολουθείται τα τελευταία χρόνια στην τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας τείνει να ενισχύσει την ιδιοκατανάλωση, μειώνοντας τις τιμές με τις οποίες το δίκτυο αγοράζει την ενέργεια από τους τοπικούς παραγωγούς και αυξάνοντας τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας με τις οποίες πουλάει ενέργεια στους καταναλωτές. Ταυτόχρονα η αγορά χαμηλής κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων με δυνατότητα αποθήκευσης εμπλουτίζεται με όλο και περισσότερα διαθέσιμα προϊόντα.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το υφιστάμενο νομικό καθεστώς (German Renewable Energies Act of 2012), τα φωτοβολταϊκά συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη των 30 kWp οφείλουν είτε να μειώσουν μόνιμα την ενεργό ισχύ που παρέχουν στο δίκτυο στο 70% της εγκατεστημένης ισχύος τους ή να είναι ικανά να αναπροσαρμόσουν ανά πάσα στιγμή την παραγόμενη ισχύ τους σε περίπτωση ανάγκης.

Η διαφορά που προκύπτει μεταξύ των επιδοτήσεων για την παραγωγή και της τιμολόγησης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί το κίνητρο για την ενίσχυση της ιδιοκατανάλωσης. Ο ρόλος των αποθηκευτικών συστημάτων συνίσταται στο να μπορούν να συλλέγουν την διαφορά σε στιγμές που η παραγωγή υπερβαίνει την κατανάλωση και να την αποδίδουν όταν η παραγωγή δεν επαρκεί για να καλύψει την κατανάλωση. Προς ενίσχυση αυτής της πρακτικής, τον Μάιο του 2013 η γερμανική κυβέρνηση εισήγαγε ένα πρόγραμμα για να υποστηρίξει την επένδυση σε συστήματα φωτοβολταϊκών με συστήματα αποθήκευσης. Συγκεκριμένα για κάθε kWp εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος, το πρόγραμμα προβλέπει επιδότηση 600€ αν υπάρχει ταυτόχρονα εγκατεστημένο και ένα σύστημα μπαταριών. Μία προϋπόθεση που θέτει το πρόγραμμα είναι ο περιορισμός της ροής ενεργού ισχύος προς το δίκτυο σε ένα ποσοστό 60% της εγκατεστημένης ισχύος.

Ωστόσο με αυτή την λειτουργία, πιθανός συνδυασμός μεγάλης παραγωγής με μικρή κατανάλωση θα μπορούσε να οδηγήσει τις μπαταρίες σε ταχεία φόρτιση. Έτσι σε περίπτωση υπέρτασης, και αν οι μηχανισμοί απορρόφησης αέργου ισχύος έχουν φτάσει στις μέγιστες τιμές τους, το σύστημα δεν θα είχε άλλη επιλογή από το να περικόψει την ισχύ των φωτοβολταϊκών, κάτι που συνεπάγεται απώλεια ενέργειας (και κατ' επέκταση οικονομική απώλεια). Ως εκ τούτου προκύπτει ότι η διαχείριση της αποθηκευόμενης ισχύος πρέπει να

γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν την διατήρηση της ικανότητας της μπαταρίας να συνεισφέρει στην αντιμετώπιση των φαινομένων υπέρβασης των ορίων τάσης για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο διάστημα. Επίσης το ποσό που αποθηκεύεται θα μπορούσε να μην είναι ανεξάρτητο της στιγμιαίας τιμής της τάσης, αλλά να προσαρμόζεται έτσι ώστε σε περιπτώσεις που πλησιάζουν τις οριακές τιμές, το ποσό της αποθηκευόμενης ισχύος να αυξάνεται.

Σε αυτό το πλαίσιο, στο [40] οι Von Arpen et al. ανέπτυξαν μια σειρά από διαφορετικές υλοποιήσεις μεθόδων ελέγχου της λειτουργίας των μπαταριών.

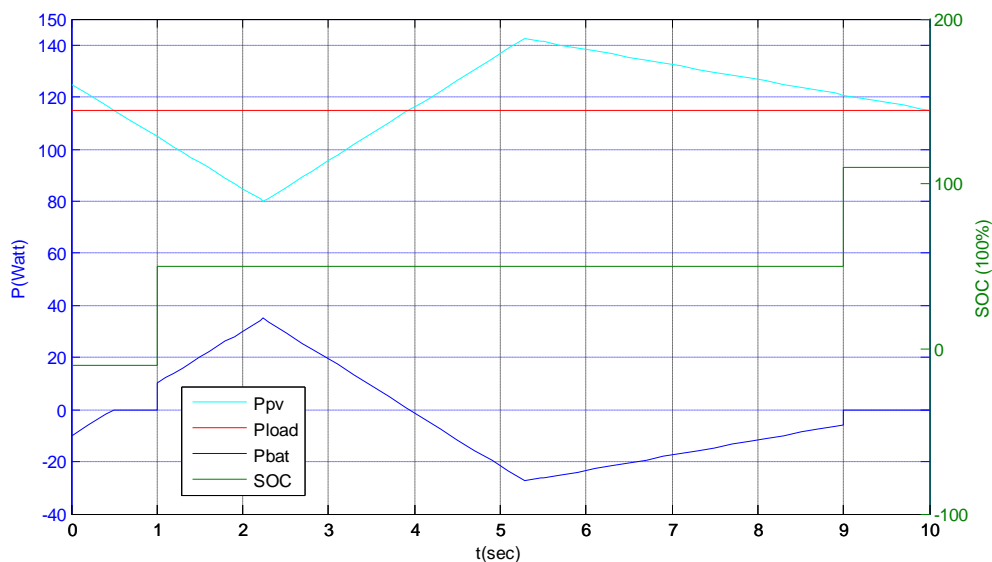
Πρώτη στρατηγική ελέγχου:

Στην πρώτη υλοποίηση από αυτές, ο βασικός στόχος είναι η επίτευξη του μέγιστου δυνατού βαθμού ιδιοκατανάλωσης. Η μπαταρία σε περίπτωση μεγαλύτερης παραγωγής αποθηκεύει την περίσσεια ισχύος, ενώ σε περίπτωση μεγαλύτερης κατανάλωσης εκφορτίζεται κατά το αντίστοιχο ποσό. Η μέθοδος λειτουργεί κυρίως σαν περίπτωση αναφοράς για την μέγιστη δυνατή ιδιοκατανάλωση και δεν προβλέπει ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο, καθώς και περικοπή της ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών. Πάντα ελέγχεται φυσικά ταυτόχρονα και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας.

$$P_{res} = P_{PV} - |P_{Load}| \quad (4.20)$$

$$P_{Bat, ch} = -P_{res} \text{ εαν } SOC < 1 \text{ και } P_{res} > 0 \quad (4.21)$$

$$P_{Bat, disch} = |P_{res}| \text{ εαν } SOC > 1 \text{ και } P_{res} < 0 \quad (4.22)$$



Εικόνα 4.17: Προσομοίωση της λειτουργίας του αλγορίθμου για διάφορες τιμές κατάστασης φόρτισης: Η μπαταρία εκφορτίζεται (θετική τιμή ισχύος) όταν το P_{res} είναι αρνητικό, φορτίζει (αρνητική τιμή ισχύος) όταν είναι θετικό και εξετάζει πάντα την κατάσταση φόρτισής της (εδώ αποτυπώνεται η μη φόρτισή της για κατάσταση πλήρους φόρτισης και θετικό P_{res} και η μη εκφόρτισή της για κατάσταση πλήρους εκφόρτισης και αρνητικό P_{res})

Δεύτερη στρατηγική ελέγχου:

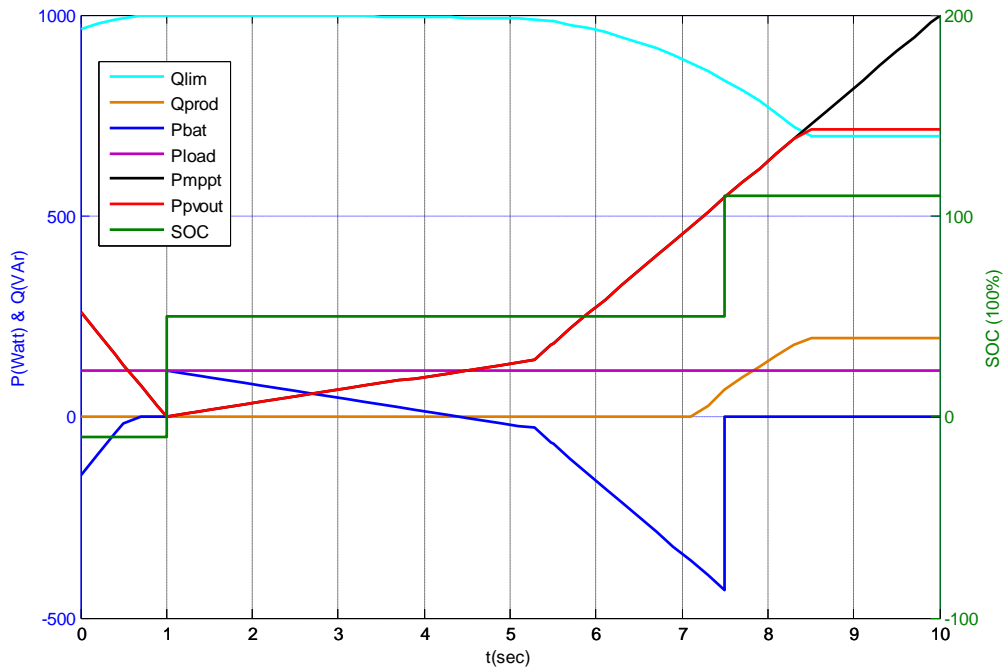
Οι λειτουργίες της αποθήκευσης και της εκφόρτισης ακολουθούν την λογική των εξισώσεων που προαναφέρθηκαν, ωστόσο πλέον το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών επηρεάζει την έξοδο των φωτοβολταϊκών. Μόλις οι μπαταρίες φορτιστούν πλήρως, και εάν η έξοδος των φωτοβολταϊκών παραμένει υψηλή σε σχέση με την κατανάλωση, η ισχύς των φωτοβολταϊκών περιορίζεται στο άθροισμα του 60% της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος συν την στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύ, με σκοπό να πληρούνται οι προαναφερθείσες προϋποθέσεις που θέτει το πρόγραμμα επιδότησης για την αποθήκευση (μέγιστη ανάστροφη ροή ισχύος στο 60% της αποθηκευμένης). Έτσι η τελική έξοδος των φωτοβολταϊκών διαμορφώνεται ως εξής:

$$P_{pv} = \begin{cases} P_{PVmax} & \text{εάν } P_{pv} \leq 0.6 \cdot P_{STC} + |P_{Load}| \\ 0.6 \cdot P_{STC} + |P_{Load}| & \text{εάν } P_{pv} \geq (0.6 \cdot P_{STC} + |P_{Load}|) \text{ και } SOC = 1 \end{cases} \quad (4.23)$$

όπου το P_{PVmax} ισούται με την μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η ισχύς των φωτοβολταϊκών. Ταυτόχρονα, ανάλογα με την μέγιστη φαινόμενη ισχύ που μπορεί να υποστηρίξει ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών, μπορεί να υπάρχει και περιθώριο για παράλληλο χειρισμό αέργου ισχύος, το εύρος της οποίας καθορίζεται από τον περιορισμό

$$\sqrt{P^2 + Q^2} \leq S_{max} \quad (4.24)$$

. Σε περίπτωση που το επίπεδο φόρτισης έχει φτάσει στο όριο και η απορρόφηση αέργου ισχύος δεν καταφέρει να εξαλείψει το πρόβλημα τάσης, η ισχύς των φωτοβολταϊκών περικόπτεται.



Εικόνα 4.18: Προσομοίωση της λειτουργίας του δεύτερου αλγορίθμου. Η βασική διαφορά έγκειται στην περικοπή των φωτοβολταϊκών σε περίπτωση που οι μπαταρίες βρίσκονται σε κατάσταση πλήρους φόρτισης και η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από ένα ορισμένο μέγεθος, οπότε οι καμπύλες P_{mppt} και P_{pvout} διαχωρίζονται. Στο διάγραμμα συμπεριλαμβάνεται επίσης και η απορρόφηση αέργου ισχύος με βάση μία καμπύλη $\cos\phi(P)$, καθώς και το περιθώριο ρύθμισης Q_{lim} που υφίσταται με βάση το μέγεθος του αντιστροφέα και την παραγωγή των φωτοβολταϊκών.

Τρίτη στρατηγική ελέγχου: $(P_{Bat} - Q_{PV} - P_{PV})$

Στην τρίτη στρατηγική ελέγχου, γίνεται προσπάθεια να αποφευχθεί η συνεχής απορρόφηση αέργου ισχύος και καθορισμένης περικοπής φωτοβολταϊκής ισχύος, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα την λογική της ιδιοκατανάλωσης με στρατηγικές ελέγχου εξαρτώμενες από την τάση. Σε περίπτωση που η μετρούμενη τάση υπερβεί μία κρίσιμη τιμή V_{thres} και η μπαταρία δεν είναι πλήρως φορτισμένη, η μπαταρία αποθηκεύει όλη την φωτοβολταϊκή ισχύ αντί του πλεονάσματος που προκύπτει από την διαφορά παραγωγής και κατανάλωσης. Έτσι η

επίδραση των φωτοβολταϊκών στην τάση μηδενίζεται ολοκληρωτικά, και καθώς οι ανάγκες του φορτίου καλύπτονται πλέον από το δίκτυο παρέχεται ακόμη ένας παράγοντας που βοηθάει στην μείωση της τάσης.

$$P_{Bat, ch} = \begin{cases} -P_{res} & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} < V_{thres} \text{ και } P_{res} > 0 \\ -P_{PV} & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \text{ και } P_{res} > 0 \\ 0 & \text{εάν } SOC = 1 \text{ ή } P_{res} < 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

Σε αυτή την στρατηγική, ανάμεσα στην αντιμετώπιση του φαινομένου μέσα από την αναπροσαρμογή της αποθηκευόμενης ισχύος και την ρύθμιση της απορρόφησης αέργου ισχύος προτεραιότητα δίνεται στην πρώτη. Επομένως, σε περίπτωση που η αποθήκευση δεν επαρκεί για να μειώσει την τάση στο σημείο μέτρησης, ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών απορροφά άεργο ισχύ:

$$Q_{PV} = \begin{cases} 0 & \text{εάν } V_{PCC} < V_{thres} \\ 0 & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \\ -Q_{PV} & \text{εάν } SOC = 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \end{cases} \quad (4.26)$$

Σε περίπτωση που οι προαναφερθέντες μηχανισμοί δεν φανούν ικανοί να αποτρέψουν το φαινόμενο υπέρτασης, η ισχύς των φωτοβολταϊκών περιορίζεται:

$$P_{PV} = \begin{cases} P_{PVmax} & \text{εάν } V_{PCC} < V_{thres} \\ P_{PVmax} & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \text{ και } |Q_{PV}| < Q_{PVmax} \\ P_{PVred} & \text{εάν } SOC = 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \text{ και } |Q_{PV}| < Q_{PVmax} \end{cases} \quad (4.27)$$

,όπου το P_{PVred} είναι η μειωμένη ισχύς των φωτοβολταϊκών μετά την μεγιστοποίηση της απορροφούμενης αέργου ισχύος.

Η εκφόρτιση των μπαταριών γίνεται σε στιγμές που το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την παραγόμενη ισχύ, ενώ ταυτόχρονα η τάση δεν είναι μεγαλύτερη του V_{thres} . Σε αντίθετη περίπτωση δεν επιτρέπεται η εκφόρτιση των μπαταριών(όπως και σε περίπτωση που οι μπαταρίες έχουν εκφορτιστεί πλήρως):

$$P_{Bat,disch} = \begin{cases} |P_{res}| & \text{εάν } SOC > 0 \text{ και } V_{PCC} < V_{thres} \text{ και } P_{res} < 0 \\ 0 & \text{εάν } V_{PCC} > V_{thres} \text{ ή } P_{res} > 0 \end{cases} \quad (4.28)$$

Τέταρτη στρατηγική ελέγχου: $(Q_{PV} - P_{Bat} - P_{PV})$

Η τέταρτη στρατηγική διαφοροποιείται σε σχέση με την τρίτη μόνο στην προτεραιότητα που δίνει στην απορρόφηση αέργου ισχύος αντί για την αποθήκευση του συνόλου της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ισχύος σε περίπτωση που η τάση είναι πάνω από το όριο. Η φιλοσοφία της τρίτης μεθόδου μπορεί να οδηγήσει πιο εύκολα τις μπαταρίες σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, χωρίς να έχει αξιοποιήσει πλήρως το περιθώριο του αντιστροφέα για ρύθμιση αέργου ισχύος. Έτσι, σε αυτή την στρατηγική η αποθήκευση του συνόλου της φωτοβολταϊκής ισχύος ακολουθεί την μεγιστοποίηση της αέργου ισχύος:

$$P_{Bat, ch} = \begin{cases} -P_{res} & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} < V_{thres} \text{ και } P_{res} > 0 \\ -P_{res} & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \text{ και } P_{res} > 0 \text{ και } |Q_{PV}| < Q_{PVmax} \\ -P_{PV} & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \text{ και } P_{res} > 0 \text{ και } |Q_{PV}| > Q_{PVmax} \\ 0 & \text{εάν } SOC = 1 \text{ ή } P_{res} < 0 \end{cases} \quad (4.29)$$

,ενώ ο έλεγχος της αέργου ισχύος πλέον γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$Q_{PV} = \begin{cases} 0 & \text{εάν } V_{PCC} < V_{thres} \\ -Q_{PV} & \text{εάν } V_{PCC} > V_{thres} \text{ και } |Q_{PV}| < Q_{PVmax} \end{cases} \quad (4.30)$$

Τα φωτοβολταϊκά ακολουθούν την μορφή ελέγχου που ακολουθήθηκε στην τρίτη μέθοδο, όπως και η εκφόρτιση της μπαταρίας.

Πέμπτη στρατηγική ελέγχου: $(P_{Bat}(P) - Q_{PV} - P_{Bat} - P_{PV})$

Τέλος, η πέμπτη μέθοδος έχει χαρακτήρα που επικεντρώνει περισσότερο στο peak shaving παρά στην απόλυτη τήρηση της ιδιοκατανάλωσης με σκοπό να διαφυλάξει τις μπαταρίες από μία γρήγορη φόρτιση ώστε να έχει μεγαλύτερη άνεση στην αντιμετώπιση φαινομένων τάσης. Η μέθοδος διαπιστώνει ότι τα προβλήματα υπέρτασης είναι πιθανότερο να συμβούν όταν η παραγωγή είναι αισθητά μεγαλύτερη από την κατανάλωση, επομένως ορίζει μία ισχύ αναφοράς P_{diff} για το P_{res} , έτσι ώστε για τιμές μικρότερες από αυτή και σε τιμές τάσης μέσα στα όρια οι μπαταρίες δεν αποθηκεύουν ισχύ, ενώ για τιμές μεγαλύτερες η μπαταρία αποθηκεύει το $P_{res} - P_{diff}$. Σε περίπτωση που η τάση είναι εκτός ορίων τότε η λειτουργία της μπαταρίας ακολουθεί την λογική που περιγράφηκε στην τέταρτη μέθοδο:

$$P_{Bat, ch} = \begin{cases} -(P_{res} - P_{diff}) & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} < V_{thres} \text{ και } P_{res} > P_{diff} \\ -P_{res} & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \text{ και } P_{res} > 0 \\ & \text{και } |Q_{PV}| < Q_{PVmax} \\ -P_{PV} & \text{εάν } SOC < 1 \text{ και } V_{PCC} > V_{thres} \text{ και } P_{res} > 0 \\ & \text{και } |Q_{PV}| > Q_{PVmax} \\ 0 & \text{εάν } SOC = 1 \text{ ή } P_{res} < 0 \end{cases} \quad (4.31)$$

Με αυτόν τον τρόπο πλέον το ισοζύγιο ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης δεν είναι μηδενικό, αλλά έχει μια μέγιστη τιμή P_{diff} για το διάστημα που η τάση βρίσκεται εντός ορίων. Όταν η τάση υπερβεί το όριο, τότε η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με αυτή που περιγράφηκε στην τέταρτη μέθοδο, με προτεραιότητα δηλαδή στην παροχή αέργου ισχύος και αποθήκευση του συνόλου της περίσσειας παραγωγής στις μπαταρίες ή του συνόλου της φωτοβολταϊκής ισχύος.

Οι παραπάνω τεχνικές δίνουν ένα μεγάλο εύρος χειρισμού των μπαταριών, επιτελώντας διαφορετικές πιθανές επιθυμητές λειτουργίες όσον αφορά το επίπεδο ιδιοκατανάλωσης και ρύθμισης τάσεως που μπορεί να επιτευχθεί, και ανταποκρίνονται καλά και σε εξωτερικές αιτίες μεταβολής της τάσης. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ανάμεσα στις συνθήκες που εξετάζονται σε κάθε κομμάτι ελέγχου, οι μεταβάσεις είναι κάπως απότομες και βηματικές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για μικρές αλλαγές σε τιμές τάσης ή ισχύος, η αλλαγή που επιτελείται στην λειτουργία του ελέγχου να είναι δυσανάλογα μεγάλη, δημιουργώντας έναν κύκλο συνεχών μεταβάσεων σε διαφορετικά σημεία των αλγορίθμων και κατά συνέπεια σε μία μη ευσταθή συμπεριφορά του δικτύου. Οι συνέπειες από μια τέτοια συμπεριφορά ενδεχομένως θα μπορούσαν να είναι μεγάλες για διακοπτικά στοιχεία τα οποία θα έπρεπε να μεταβάλλουν την κατάστασή τους σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και για διατάξεις που οι συνεχείς αυξομειώσεις τάσης θα μπορούσαν να τους προκαλέσουν προβληματική λειτουργία ή βλάβη. Η χρησιμοποίηση κάποιου φίλτρου πρώτης τάξης, ή κάποιων περιοριστών μεταβολής (rate limiters) θα μπορούσε να είναι μια λύση για την μείωση του ρυθμού των μεταβάσεων και την εξομάλυνση της απόκρισης, ωστόσο η εφαρμογή τους θα ήταν εις βάρος της ταχύτητας απόκρισης του ελέγχου.

Επίσης ένα άλλο μειονέκτημα της συγκεκριμένης υλοποίησης είναι ότι η προστασία των συσσωρευτών από γρήγορη φόρτιση γίνεται ανεξαρτήτως της τιμής τάσης. Είναι λογικό και επιθυμητό να υπάρχει η πρόβλεψη ώστε οι συσσωρευτές να διατηρούν όσο δυνατόν μεγαλύτερο περιθώριο φόρτισης για ενδεχόμενη κατάσταση ανάγκης μέσα σε μία δεδομένη μέρα, ωστόσο όταν η τάση φτάνει κοντά σε οριακά επίπεδα η προστασία αυτή θα μπορούσε να μειωθεί χάριν της ρύθμισης της τάσης.

Για το πρόβλημα των συνεχών μεταβάσεων, συγκεκριμένα, έστω ότι μελετάται η περίπτωση του πέμπτου αλγορίθμου και έστω ότι η τάση βρίσκεται σε σημείο κοντά στο επιλεγμένο V_{thres} . Η αποθηκευόμενη ισχύς θα είναι ίση με $P_{res} - P_{diff}$, ανεξαρτήτως της τιμής αυτής της ποσότητας. Μία ενδεχόμενη αύξηση της τάσης πάνω από το V_{thres} θα οδηγήσει σε μεταβολή της αποθηκευόμενης ισχύος σε μια νέα ποσότητα P_{res} (ή στην ποσότητα P_{pv} σε περίπτωση που ο έλεγχος της αέργου ισχύος έχει φτάσει ήδη σε μέγιστη απορρόφηση). Αυτή η μεταβολή της αποθηκευόμενης ισχύος θα σημαίνει αντίστοιχη μείωση της εγχεόμενης ισχύος στο δίκτυο, και ως αποτέλεσμα μείωση της τάσης κάτω από το V_{thres} . Μπορούμε να υποθέσουμε ότι στο μικρό διάστημα που μεσολαβεί η τιμή του $P_{res} - P_{diff}$ δεν θα έχει αλλάξει σημαντικά, όπως και μια πιθανή εξωτερική αιτία ανόδου της τάσης, επομένως ο αλγόριθμος θα επαναλάβει την ίδια ακολουθία μεταβάσεων, πραγματοποιώντας ταλαντώσεις γύρω από το V_{thres} .

Το ίδιο φαινόμενο θα παρατηρηθεί και σε άλλα σημεία της λειτουργίας του ελέγχου, όπως η απορρόφηση αέργου ισχύος.

Έτσι, η βασική ιδέα του ελέγχου, θα επεκταθεί ώστε να γραμμικοποιήσει τις μεταβάσεις του με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε και στο κεφάλαιο με την υλοποίηση του Power Curtailment. Χωρίς να αλλάζει η βασική ιδέα του ελέγχου, στα σημεία με τις απότομες μεταβολές θα μπορούσε να εφαρμοστεί μια γραμμική μετάβαση συναρτήσει της τάσης για μια ευρύτερη περιοχή των οριακών σημείων του αλγορίθμου. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι όποιες ταλαντώσεις εμφανίζονται θα τείνουν τελικά να ισορροπήσουν σε ένα σημείο της καμπύλης λειτουργίας.

Η τροποποίηση που θα προταθεί, θα υλοποιηθεί για τον αλγόριθμο $P_{Bat}(P) - Q_{PV} - P_{Bat} - P_{PV}$. Άλλωστε οι αλγόριθμοι $Q_{PV} - P_{Bat} - P_{PV}$ και $P_{Bat} - Q_{PV} - P_{PV}$ αποτελούν υποπεριπτώσεις του $P_{Bat}(P) - Q_{PV} - P_{Bat} - P_{PV}$ για P_{diff} ίσο με το μηδέν και με μεταβολή της προτεραιότητας ανάμεσα στον έλεγχο της αποθήκευσης και τον έλεγχο της αέργου ισχύος.

Για τον έλεγχο των αποθήκευσης, η βασική ιδέα παραμένει ίδια. Ωστόσο εισάγεται μία περιοχή τάσης πριν το V_{thres} όπου η αποθηκευόμενη ισχύς αυξάνεται βαθμιαία μέχρι την τελική τιμή της. Συγκεκριμένα, το βασικό σώμα του ελέγχου είναι ίδιο με τον αρχικό μέχρι μία τιμή $V_{thres} - D$. Από το σημείο εκείνο η αποθηκευόμενη ισχύς αυξάνεται μέχρι το σημείο τάσης $V_{thres} - \frac{D}{2}$ όπου παίρνει την τιμή P_{res} . Το βασικό νόημα της μεταβολής αυτής είναι ότι πλέον η τιμή της τάσης έχει αυξηθεί επικίνδυνα, και η ανάγκη για προστασία της κατάστασης φόρτισης των μπαταριών για μελλοντικές συνθήκες δεν είναι το ίδιο επιτακτική. Έτσι το σύστημα εντατικοποιεί τον έλεγχό του, αλλά μέσα στα πλαίσια ακόμα της ιδέας της ιδιοκατανάλωσης. Σε περίπτωση που η τάση πλησιάσει ακόμα περισσότερο την κρίσιμη, δηλαδή μέσα στο διάστημα $V_{thres} - \frac{D}{2}$ και V_{thres} το σύστημα μεταβαίνει πλέον πάλι σταδιακά στην αποθήκευση του συνόλου της ισχύος των φωτοβολταϊκών και την εξυπηρέτηση του φορτίου από την ισχύ του δικτύου, όπως προέβλεπε και ο αρχικός αλγόριθμος ελέγχου. Η ίδια λογική μπορεί να επεκταθεί και για το φαινόμενο της υπότασης, με την εισαγωγή ενός σημείου λίγο πριν την κρίσιμη τάση για το φαινόμενο της βύθισης τάσης, κάτω από το οποίο σταδιακά οι συσσωρευτές τροφοδοτούν εξ ολοκλήρου το φορτίο ανεξαρτήτως παραγωγής (σε περίπτωση που η βύθιση οφειλόταν σε εξωτερικά αίτια). Για λόγους καλύτερης εποπτείας, το άνω όριο τάσης θα ονομαστεί V_{uthres} , το κάτω όριο V_{dthres} και D_{up} και D_{down} το dead band που τοποθετείται κοντά στο άνω και στο κάτω όριο αντιστοίχως.

Παράλληλα, η αέργου ισχύς θα αξιοποιείται ανεξάρτητα με τις υπόλοιπες μορφές ελέγχου, μόνο με βάση τα μεγέθη που καθορίζουν την καμπύλη της.

Έτσι προκύπτει η τελική μορφή ελέγχου:

Το ποσό ισχύος που θα αντάλλαζε η μπαταρία σε κάθε στιγμή λειτουργίας της χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η κατάσταση φόρτισής της είναι το εξής:

- Για $P_{res} = P_{pv} - P_{load} \geq P_{diff}$:

$$P_{bat,αρχικ\acute{o}} = \begin{cases} -(P_{res} - P_{diff}), & V_{dthres} + D_{down} \leq V_{pcc} \leq V_{uthres} - D_{up} \\ \frac{2P_{diff}}{D_{up}} \left(V_{uthres} - \frac{D_{up}}{2} - V_{pcc} \right) - P_{res}, & V_{uthres} - D_{up} < V_{pcc} \leq V_{uthres} - \frac{D_{up}}{2} \\ \frac{2(P_{pv} - P_{res})}{D_{up}} \left(V_{uthres} - V_{pcc} \right) - P_{pv}, & V_{uthres} - \frac{D_{up}}{2} < V_{pcc} \leq V_{uthres} \\ -P_{pv}, & V_{pcc} > V_{uthres} \\ \frac{-(P_{res} - P_{diff}) - P_{load}}{D_{down}} \left(V_{pcc} - V_{dthres} \right) + P_{load}, & V_{dthres} \leq V_{pcc} < V_{dthres} + D_{down} \\ P_{load}, & V_{pcc} < V_{dthres} \end{cases} \quad (4.32)$$

- Για $P_{res} = P_{pv} - P_{load} < P_{diff}$, $P_{res} \geq 0$:

$$P_{bat, αρχικό} = \begin{cases} 0, & V_{dthres} + D_{down} \leq V_{pcc} \leq V_{uthres} - D_{up} \\ \frac{2P_{res}}{D_{up}} \left(V_{uthres} - \frac{D_{up}}{2} - V_{pcc} \right) - P_{res}, & V_{uthres} - D_{up} < V_{pcc} \leq V_{uthres} - \frac{D_{up}}{2} \\ \frac{2(P_{pv} - P_{res})}{D_{up}} (V_{uthres} - V_{pcc}) - P_{pv}, & V_{uthres} - \frac{D_{up}}{2} < V_{pcc} \leq V_{uthres} \\ -P_{pv}, & V_{pcc} > V_{uthres} \\ \frac{-P_{load}}{D_{down}} (V_{pcc} - V_{dthres}) + P_{load}, & V_{dthres} \leq V_{pcc} < V_{dthres} + D_{down} \\ P_{load}, & V_{pcc} < V_{dthres} \end{cases} \quad (4.33)$$

- Τέλος, για $P_{res} < 0$:

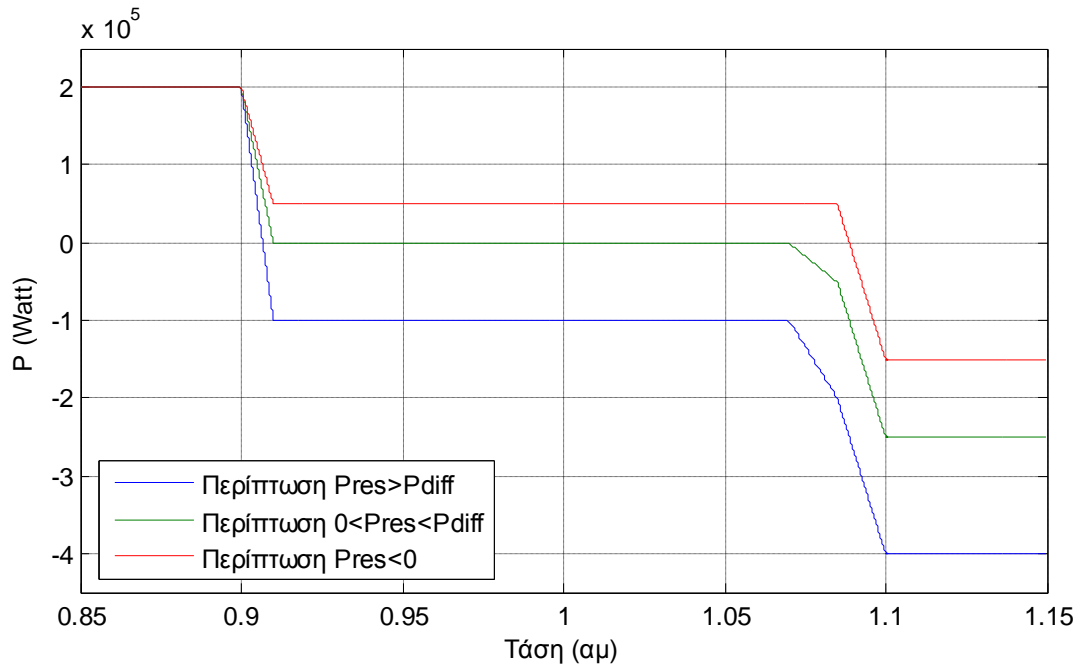
$$P_{bat, αρχικό} = \begin{cases} -P_{res}, & V_{dthres} + D_{down} \leq V_{pcc} \leq V_{uthres} - D_{up} \\ -P_{res}, & V_{uthres} - D_{up} < V_{pcc} \leq V_{uthres} - \frac{D_{up}}{2} \\ \frac{2(P_{pv} - P_{res})}{D_{up}} (V_{uthres} - V_{pcc}) - P_{pv}, & V_{uthres} - \frac{D_{up}}{2} < V_{pcc} \leq V_{uthres} \\ -P_{pv}, & V_{pcc} > V_{uthres} \\ \frac{-P_{res} - P_{load}}{D_{down}} (V_{pcc} - V_{dthres}) + P_{load}, & V_{dthres} \leq V_{pcc} < V_{dthres} + D_{down} \\ P_{load}, & V_{pcc} < V_{dthres} \end{cases} \quad (4.34)$$

Κατόπιν, η μπαταρία ελέγχει αν η κατάσταση φόρτισής της επιτρέπει να επιτελέσει την συγκεκριμένη λειτουργία:

$$P_{bat, τελικό} = \begin{cases} P_{bat, αρχικό}, & SOC_{down} \leq SOC \leq SOC_{up} \\ P_{bat, αρχικό}, & SOC > SOC_{up}, P_{bat, αρχικό} \geq 0 \\ P_{bat, αρχικό}, & SOC < SOC_{down}, P_{bat, αρχικό} \leq 0 \\ 0, & SOC > SOC_{up}, P_{bat, αρχικό} < 0 \\ 0, & SOC < SOC_{down}, P_{bat, αρχικό} > 0 \end{cases} \quad (4.35)$$

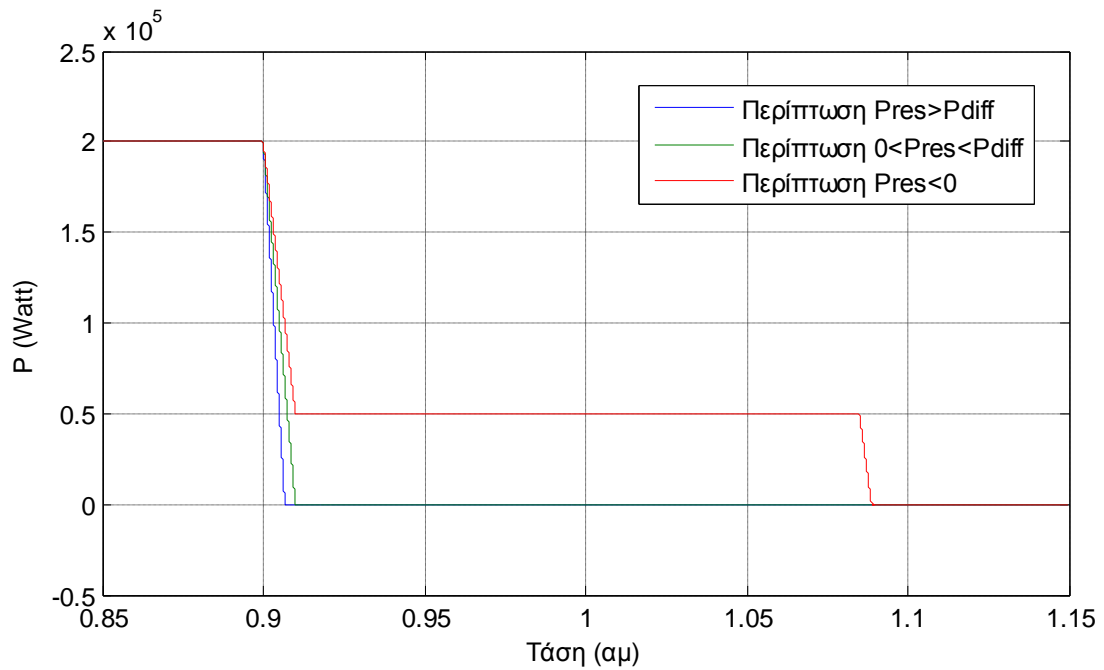
Η τελική μορφή που έχει ο έλεγχος ως προς την τάση αναλόγως το επίπεδο του Pres και την κατάσταση φόρτισης, είναι η εξής:

Για κατάσταση φόρτισης εντός ορίων:



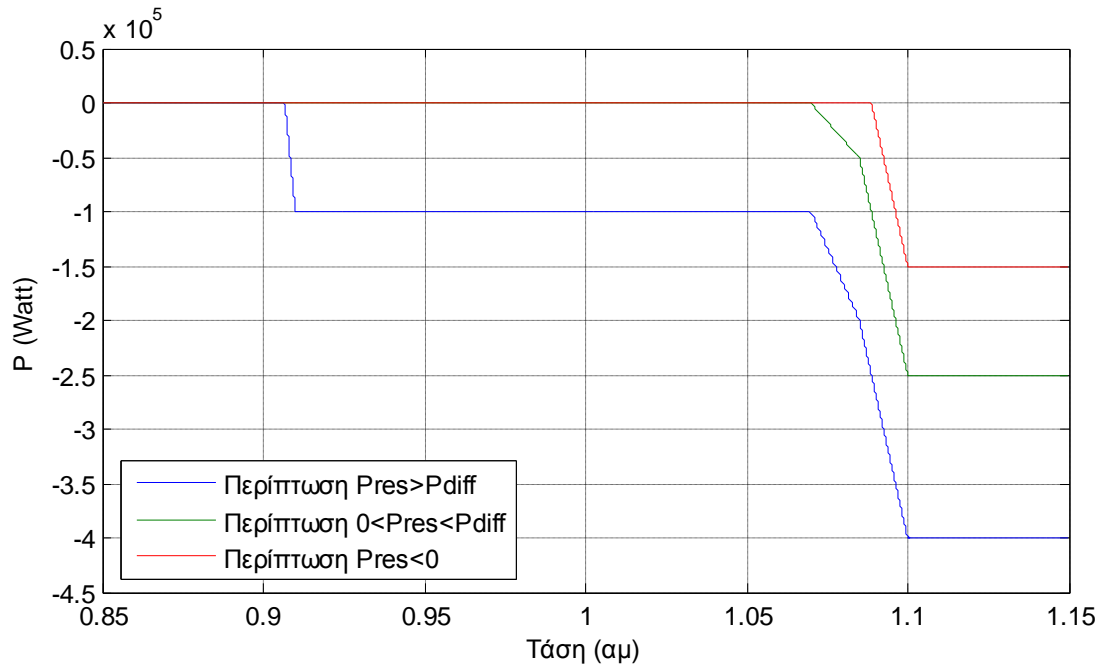
Εικόνα 4.19: Απόκριση ελέγχου για κατάσταση φόρτισης εντός ορίων.

Για κατάσταση φόρτισης υψηλή:



Εικόνα 4.20: Απόκριση ελέγχου για υψηλή φόρτιση.

Για κατάσταση φόρτισης χαμηλή:



Εικόνα 4.21: Απόκριση ελέγχου για χαμηλή φόρτιση.

Φαίνεται από τα διαγράμματα ότι ανεξαρτήτως της σχέσης παραγωγής – κατανάλωσης και της πιθανότητας εξωτερικών μεταβολών τάσης, η απόκριση του ελέγχου έχει εξαλείψει τις απότομες μεταβάσεις, οι οποίες πλέον μπορούν να προκύψουν μόνο από εξωτερικές απότομες μεταβολές (όπως σκιάσεις και μεταβολές φορτίου).

4.8 Συνεργασία μεθόδων

Όπως έχει περιγραφεί ήδη, οι έλεγχοι της αποθήκευσης, της αέργου ισχύος και της περικοπής της ισχύος των φωτοβολταϊκών μπορούν να δράσουν συντονισμένα για την επίτευξη της αντιμετώπισης των φαινομένων τάσης. Αναλόγως της επιθυμητής λειτουργίας και των προτεραιοτήτων του εκάστοτε συστήματος, μπορεί να γίνει ο κατάλληλος συνδυασμός υλοποιήσεων, παρέχοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα επιλογών.

5. Κομμάτι προσομοιώσεων:

Στο σημείο αυτό θα γίνει υλοποίηση δικτύων ΧΤ με ύπαρξη φωτοβολταϊκής παραγωγής και αποθηκευτικών μέσων, με σκοπό να εξεταστεί στην πράξη το φαινόμενο ανύψωσης τάσης, καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής των ελέγχων αντιμετώπισης του που προαναφέρθηκαν. Η προσομοίωση των δικτύων έγινε με χρήση του εργαλείου Simulink του προγράμματος Matlab.

5.1 Μοντέλα και αλγόριθμοι ελέγχου που θα χρησιμοποιηθούν:

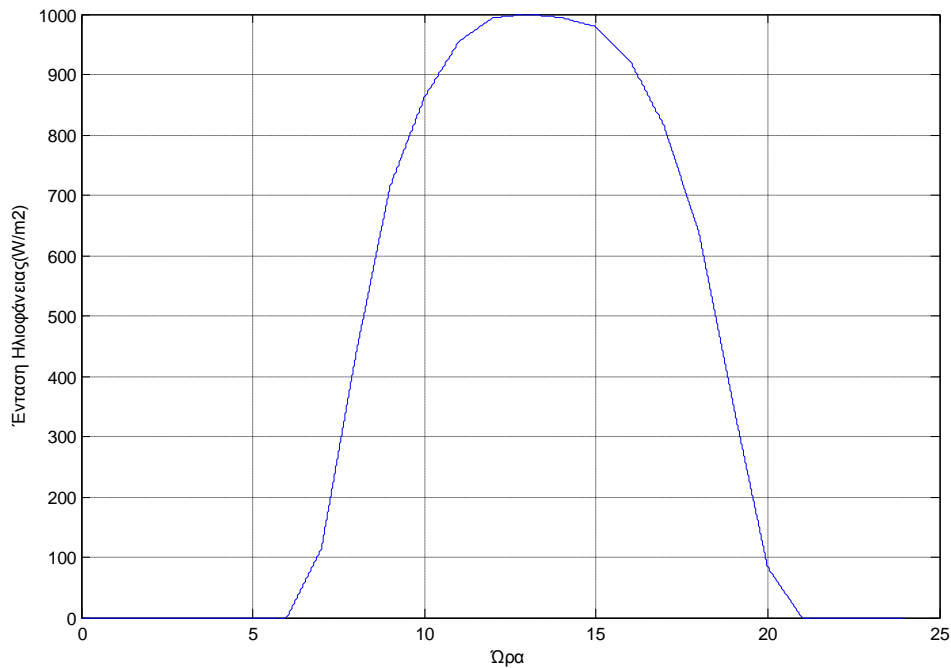
Η ηλιοφάνεια η οποία θα λειτουργήσει σαν είσοδος στο μοντέλο των φωτοβολταϊκών, θα προσομοιωθεί με χρήση τεχνητών χρονοσειρών που αντιπροσωπεύουν την κατάσταση ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας σε μία δεδομένη μέρα και λειτουργούν σαν είσοδος στο μοντέλο των φωτοβολταϊκών, το οποίο υπολογίζει έτσι την μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ σε κάθε χρονική στιγμή, καθώς έχει ενσωματωμένη την διαδικασία του Maximum Power Point Tracking(MPPT), όπως και την τάση και το ρεύμα των φωτοβολταϊκών.

Οι τιμές της ηλιοφάνειας προκύπτουν από πραγματικά δεδομένα για την Καλιφόρνια:

Ώρα	Παραγωγή(MW)	Ώρα	Παραγωγή(MW)	Ώρα	Παραγωγή(MW)	Ώρα	Παραγωγή(MW)
1	0	7	624	13	5488	19	1933
2	0	8	2383	14	5457	20	455
3	0	9	3922	15	5375	21	0
4	0	10	4730	16	5060	22	0
5	0	11	5236	17	4459	23	0
6	0	12	5454	18	3498	24	0

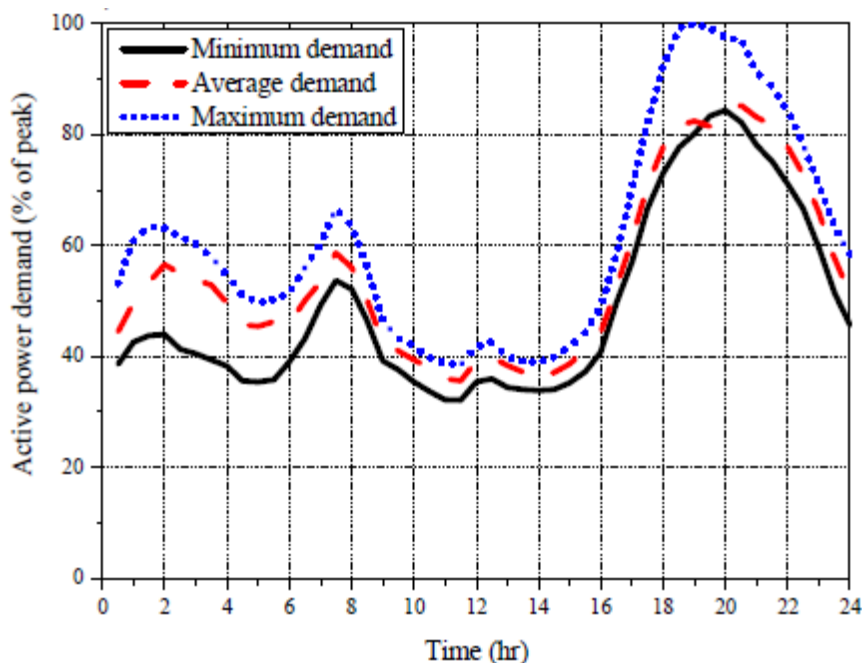
Η θερμοκρασία θα τεθεί σταθερή και ίση με 25°C για όλη την διάρκεια της ημέρας.

Θεωρώντας την παραγωγή πρακτικά ευθέως ανάλογη της ηλιοφάνειας, και κανονικοποιώντας τις τιμές ώστε στην κατάσταση μέγιστης παραγωγής να θεωρηθεί ότι η ένταση της ηλιοφάνειας είναι 1000W/m², γίνεται εφικτή η λήψη του εξής διαγράμματος ηλιοφάνειας:



Εικόνα 5.1: Κανονικοποιημένη καμπύλη ημερήσιας παραγωγής.

Τέλος, η κατανάλωση φορτίου γίνεται και πάλι βάσει χρονοσειρών που προσομοιώνουν την οικιακή κατανάλωση για μία δεδομένη μέρα. Μία τυπική μορφή καμπύλης για μία τυπική μέρα σε μία οικιακή κατανάλωση, φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 5.1: Καμπύλη ημερήσιας κατανάλωσης [41].

Παρόλο που το συνολικό φορτίο μιας οικιακής εγκατάστασης αναμένεται να έχει επαγωγικό χαρακτήρα, στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα θεωρηθεί αμιγώς ωμικό, τόσο για λόγους απλότητας, όσο και γιατί αυτή η περίπτωση φορτίου παρουσιάζει μεγαλύτερο κίνδυνο

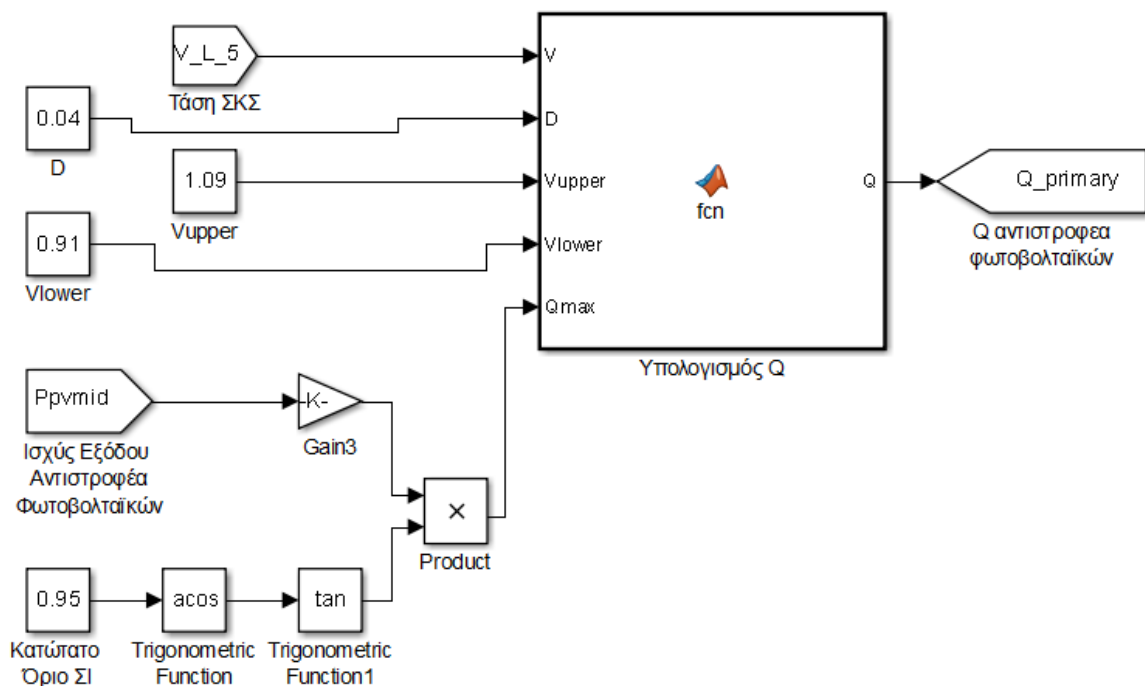
ανύψωσης τάσης καθώς η απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο τείνει να μειώσει την τάση.

Ρύθμιση Αέργου Ισχύος από τον Αντιστροφέα των Φωτοβολταϊκών:

Στον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών δίνεται η δυνατότητα να χειρίζεται ανταλλαγή αέργου ισχύος με το δίκτυο. Η στρατηγική που θα ακολουθηθεί είναι η τελευταία που αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο (μέθοδος Q(U) με Q_{max} που καθορίζεται από τον συντελεστή ισχύος και την ταυτόχρονη παραγωγή των φωτοβολταϊκών). Η μέγιστη δυνατή απορρόφηση αέργου ισχύος καθορίζεται από τον κατώτατο συντελεστή ισχύος λειτουργίας του αντιστροφέα, ο οποίος τίθεται ίσος με 0.9.

Η υλοποίηση γίνεται με τη χρήση του block "MATLAB Function", το οποίο υλοποιεί τον έλεγχο σε μορφή εκτελέσιμου κώδικα. Σαν εισόδους δέχεται το άνω και κάτω όριο τάσης, την τιμή D του dead band, καθώς και την μέγιστη τιμή αέργου ισχύος

$$Q_{pvmax} = P_{pv} \cdot \tan[\cos^{-1}(\Sigma I_{min})] \quad (5.1)$$



Εικόνα 5.2: Μπλοκ ελέγχου αέργου ισχύος φωτοβολταϊκών.

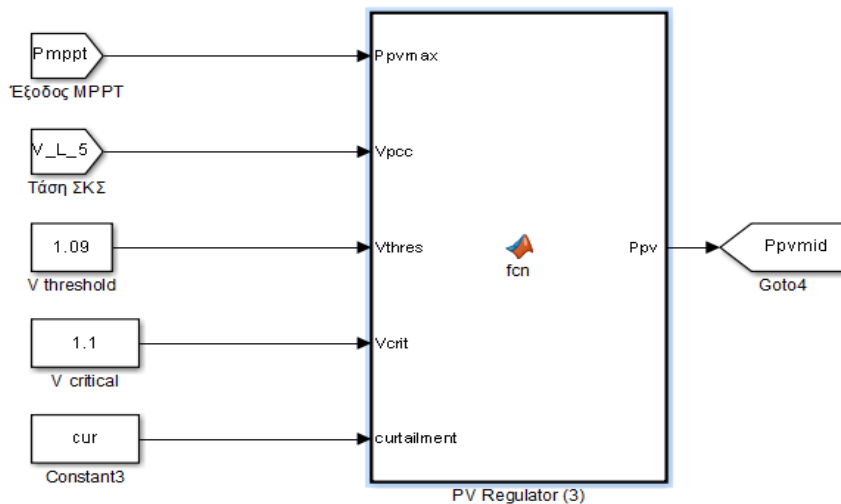
Ο κώδικας του ελέγχου της αέργου ισχύος παρατίθεται στο παράρτημα. Καθώς ο έλεγχος της αέργου ισχύος είναι επιθυμητό να γίνεται με προτεραιότητα σε σχέση με την περικοπή ισχύος

των φωτοβολταϊκών, η τιμή τάσης στην οποία μεγιστοποιείται ο έλεγχος τίθεται χαμηλότερα από την τιμή στην οποία περικόπτεται η ισχύς των φωτοβολταϊκών (1.09 αμ).

Περικοπή Ισχύος Φωτοβολταϊκών:

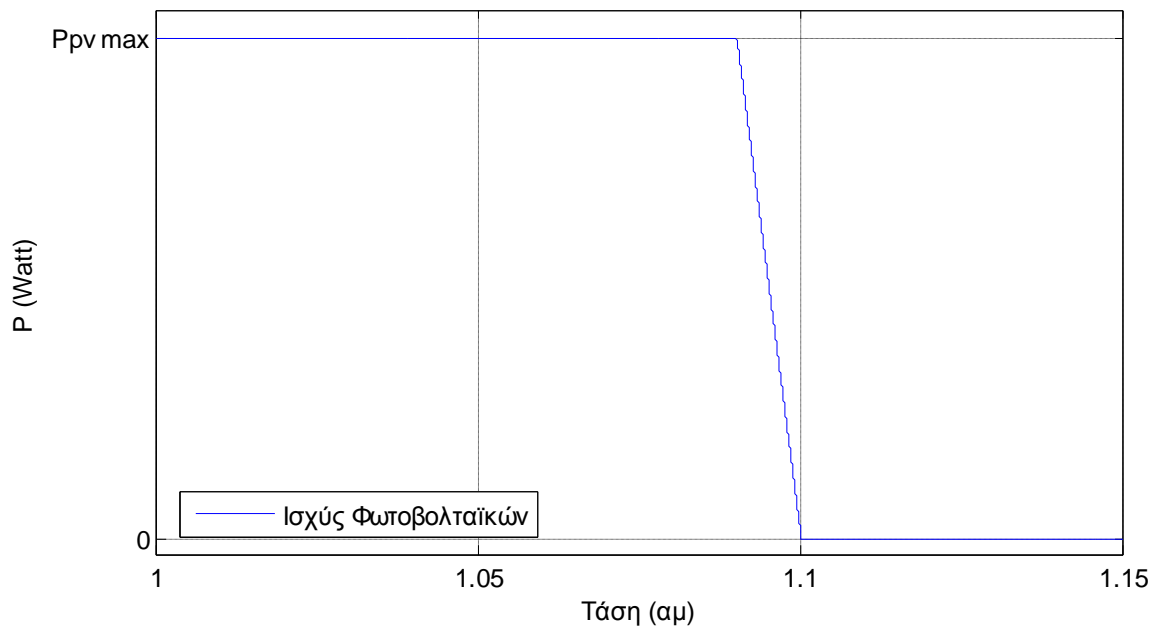
Η περικοπή ισχύος των φωτοβολταϊκών πραγματοποιείται με τον τρόπο που περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Επιλέγονται δύο σημεία τάσης, $V_{threshold}$ και $V_{critical}$. Η ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι ίση με την μέγιστη ισχύ που προκύπτει από τον έλεγχο MPPT όταν η τάση είναι μικρότερη του $V_{threshold}$, και όταν το ξεπερνά αρχίζει να μειώνεται γραμμικά μέχρι το σημείο $V_{critical}$ όπου και μηδενίζεται.

Ο κώδικας για το power curtailment των φωτοβολταϊκών παρατίθεται στο παράρτημα.



Εικόνα 5.3: Μπλοκ Power Curtailment.

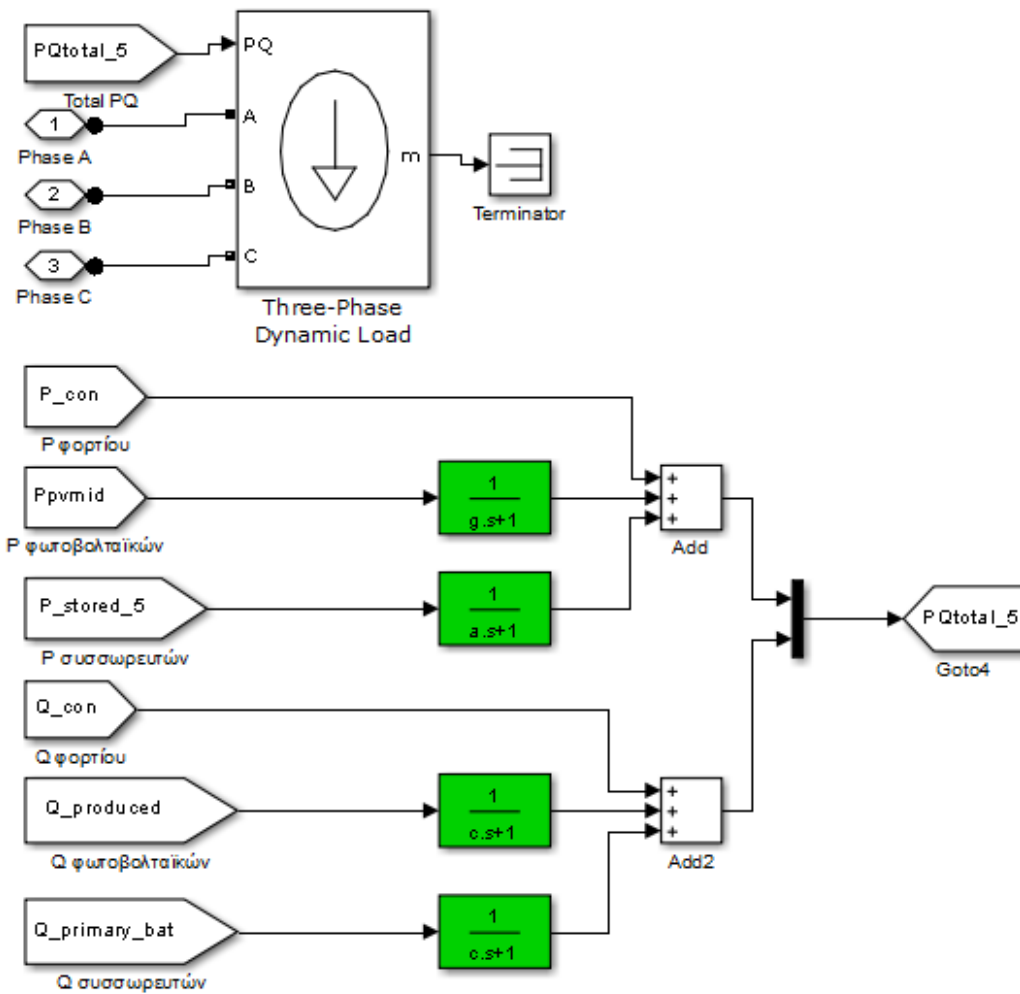
,και η απόκριση του ελέγχου ως προς την τάση:



Εικόνα 5.4: Power Curtailment συναρτήσσει της τάσης.

Μοντελοποίηση του τρόπου εισαγωγής της ισχύος κατανάλωσης, παραγωγής και αποθήκευσης στην προσομοίωση:

Οι μονάδες κατανάλωσης, παραγωγής και αποθήκευσης που είναι συνδεδεμένες στον ζυγό αναπαριστώνται από το Block Dynamic Load του Simulink. Το block αυτό δίνει την επιλογή εξωτερικού χειρισμού της ενεργού και της άεργου ισχύος του και έχει σαν έξοδο την τελική του τάση σε αμ τιμές, καθώς και την συνολική ενεργό και άεργο ισχύ του. Οι επί μέρους τιμές της ενεργού ισχύος που προκύπτει από κάθε ένα κομμάτι αθροίζονται αλγεβρικά και αποτελούν την συνολική είσοδο ενεργού ισχύος για το block, ενώ το ίδιο ισχύει και για την άεργο ισχύ. Θετική ισχύς μεταφράζεται σαν κατανάλωση, και αρνητική σαν παραγωγή. Για τους συσσωρευτές, αρνητική ισχύς σημαίνει εκφόρτιση, και θετική φόρτιση.



Εικόνα 5.5: Ανάθεση Ενεργού και Αέργου Ισχύος στο Dynamic Block.

Τα κομμάτια ενεργού και αέργου ισχύος των φωτοβολταϊκών και των μπαταριών περνούν πρώτα μέσα από ένα φίλτρο πρώτης τάξης, με σκοπό να προστατεύσουν το κύκλωμα από πιθανά μεταβατικά φαινόμενα σε απότομες αλλαγές της λειτουργίας των στοιχείων.

Για τις δεδομένες συνθήκες προσομοίωσης, όπου η ημερήσια λειτουργία θα προσομοιωθεί σε 24 δευτερόλεπτα, η τιμή T της σταθεράς των φίλτρων επιλέχθηκε ίση με 0.08.

Μοντέλο Συσσωρευτών και Έλεγχος Αποθήκευσης Ενέργειας:

Το μοντέλο των μπαταριών που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στην λογική του Kinetic Battery Model και έχει παραμετροποιηθεί κατάλληλα ώστε να αντιπροσωπεύει την πραγματική λειτουργία των μπαταριών πραγματικού μικροδικτύου [20]. Καθώς το κύριο στοιχείο της λειτουργίας των συσσωρευτών που ενδιαφέρει για τον έλεγχό τους είναι η κατάσταση φόρτισης, με αδιάφορη την ακρίβεια στην τάση τους, το μοντέλο του KiBaM θεωρείται επαρκές, με επιπλέον πλεονέκτημά του την απλότητά του στον σχεδιασμό και τους υπολογισμούς.

Για το μοντέλο KiBaM που χρησιμοποιήθηκε, οι χαρακτηριστικές του παράμετροι είναι:

$$k = 0.4219 \text{ 1/h}$$

$$c = 0.3236$$

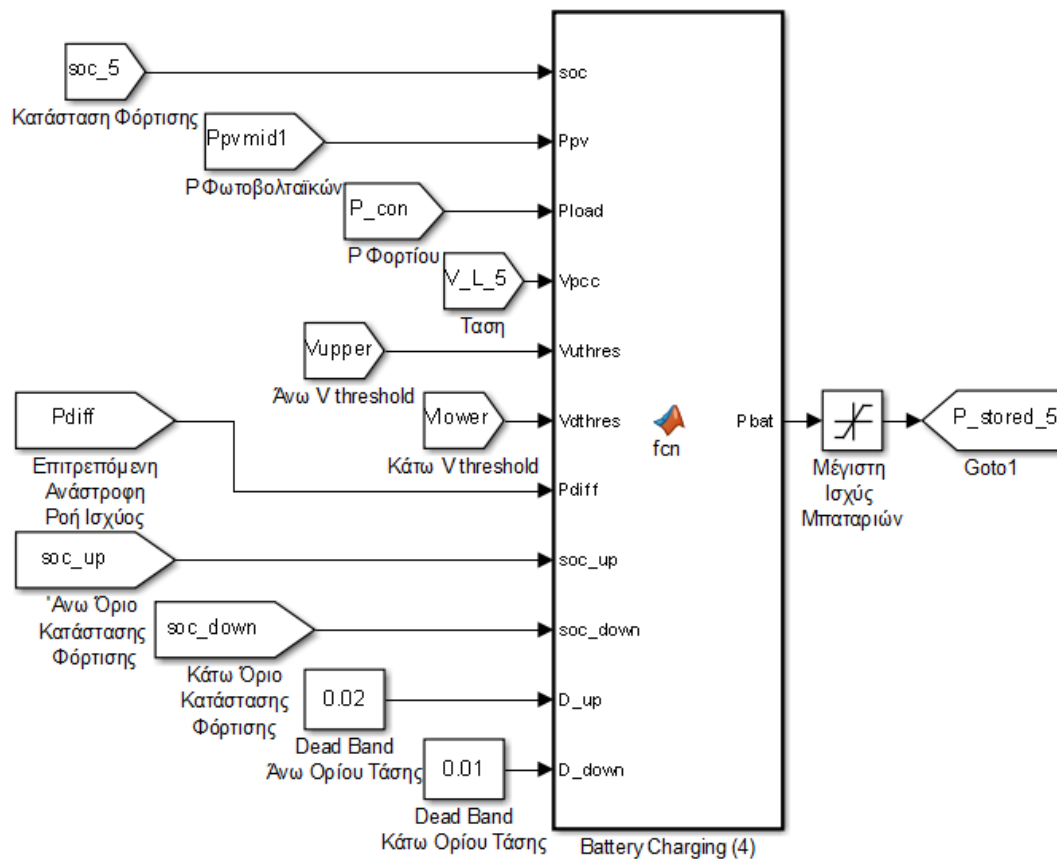
$$q_{max,0} = 388.3 \text{ Ah}$$

,και για λόγους καλύτερης αποτύπωσης της λειτουργίας του ελέγχου των συσσωρευτών θα θεωρηθεί ότι υποστηρίζουν μεγάλες τιμές ισχύος.

Η διαδικασία ελέγχου που θα εφαρμοστεί για την αποθήκευση ενέργειας βασίζεται στην ήδη αναλυθείσα λογική που αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Η τιμή της τάσης του άνω ορίου ελέγχου θα τοποθετηθεί όμοια με αυτή του ελέγχου της αέργου ισχύος και μικρότερη της τάσης στην οποία περικόπτεται η ισχύς των φωτοβολταϊκών (1,09 αμ).

Ο κώδικας για τον έλεγχο των συσσωρευτών παρατίθεται στο παράρτημα.

Το μπλοκ ελέγχου με τις εισόδους του:

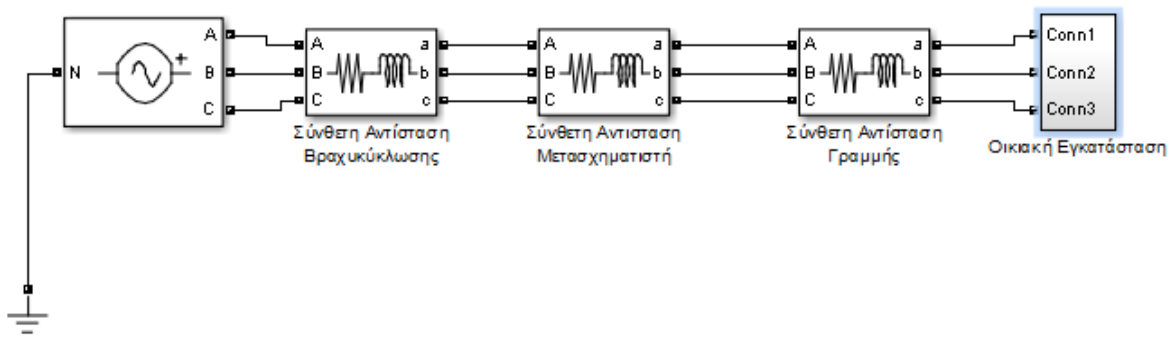


Εικόνα 5.6: Μπλοκ ελέγχου αποθήκευσης.

5.2 Μοντελοποίηση Δικτύων Χαμηλής Τάσης:

5.2.1 Δίκτυο με μόνο έναν καταναλωτή-παραγωγό:

Αρχικά, θα προσομοιωθεί το σενάριο της απλής περίπτωσης της ύπαρξης μίας απομακρυσμένης εγκατάστασης ώστε να φανούν καλύτερα τα αποτελέσματα των ελέγχων. Το δίκτυο διανομής τροφοδοτείται από μία πηγή τάσης, η οποία τροφοδοτεί έναν μετασχηματιστή 20kV/400V και μεγέθους 630 kVA, ο οποίος αναπαρίσταται στο κύκλωμα με την σύνθετη αντίστασή του. Ανάμεσα στην μεταξύ τους σύνδεση παρεμβάλλεται μία σύνθετη αντίσταση που αντικατοπτρίζει την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου MT. Ο μετασχηματιστής με την σειρά του τροφοδοτεί την εγκατάσταση μέσω μίας γραμμής ΧΤ.



Εικόνα 5.7: Μοντέλο δικτύου που προσομοιώθηκε.

Για τον ακριβή υπολογισμό των τιμών των συνθέτων αντιστάσεων γραμμής, μετασχηματιστή και βραχυκύκλωσης, λαμβάνονται πραγματικές τιμές των μεγεθών αυτών από βιβλιογραφία.

Για την γραμμή ΧΤ, επιλέγεται εναέρια γραμμή με γυμνό αγωγό ΑΙ, διατομής 35mm^2 , της οποίας η πραγματική αντίσταση R είναι $0.574(\Omega/\text{km})$ και η επαγωγική αντίδραση $0.294(\Omega/\text{km})$ και η μέγιστη φόρτιση 161 kVA [31, 42], Ας υποθεθεί λοιπόν ότι το σύστημα που αναλύεται είναι μία απομονωμένη αγροτική εγκατάσταση, η οποία απέχει 1000 μέτρα από τον μετασχηματιστή ΧΤ. Η απόσταση επιλέγεται μεγάλη ώστε να προκύπτει μεγάλη τιμή R και X , ικανή να δημιουργεί φαινόμενα μεταβολής τάσης από μία μοναδική εγκατάσταση. Τότε η συνολική αντίσταση της γραμμής που συνδέει την εγκατάσταση στο δίκτυο θα είναι ίση με:

$$R_L = 1 \cdot 0,574 = 0,574 \Omega$$

$$X_L = 1 \cdot 0,294 = 0,294 \Omega$$

Η ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου ΜΤ θα τοποθετηθεί ίση με 100MVA , με σχέση $R/X=0.1$. Τα μεγέθη με τα οποία θα απεικονιστεί επομένως θα είναι:

$$X_{sc} = \frac{400^2}{10^8} = 16 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{sc} = 0,1 \cdot X_{sc} = 1.6 \cdot 10^{-4} \Omega$$

, ενώ για τον Μ/Σ [43], τα στοιχεία του θα είναι:

Στοιχεία Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ			
Τύπος	kVA	$u_R(\%)$	$u_K(\%)$
20/0.4 kV DIN 42500	630	1.3	4.0

Με αναγωγή στην πλευρά χαμηλής τάσης, τα μεγέθη του μετασχηματιστή θα προκύψουν ακολούθως.

Η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ θα είναι

$$Z_{M\Sigma} = u_K \frac{U_R}{S_R} = 0.04 \cdot \frac{400^2}{630000} = 0.01016\Omega$$

, και η ωμική του αντίσταση θα είναι

$$R_{M\Sigma} = u_R \frac{U_R}{S_R} = 0.013 \cdot \frac{400^2}{630000} = 0.0033\Omega$$

, επομένως η επαγωγική του αντίδραση θα είναι:

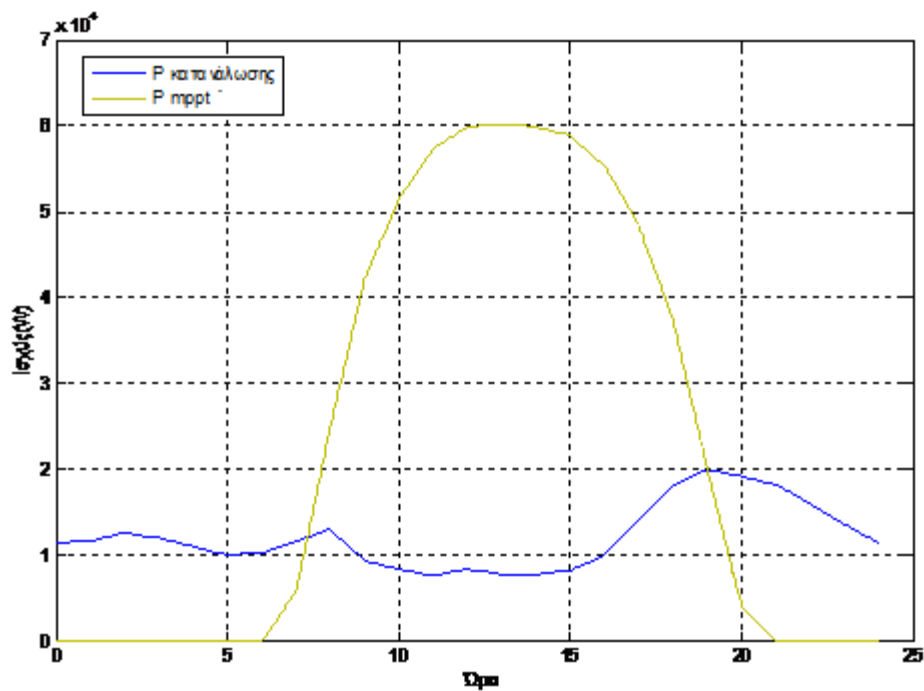
$$X_{M\Sigma} = \sqrt{Z_{M\Sigma}^2 - R_{M\Sigma}^2} = 0,00961\Omega.$$

Μεγέθη παραγωγής – κατανάλωσης:

Το σημείο στο οποίο συνδέεται η εγκατάσταση θα θεωρηθεί ένας ζυγός PQ, στον οποίο συνδέονται τα φορτία του καταναλωτή, τα φωτοβολταϊκά και οι συσσωρευτές.

Η σχέση μεταξύ των μεγεθών παραγωγής και κατανάλωσης, καθώς και το μήκος των γραμμών έχουν επιλεχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες προβλήματος τις οποίες θα κληθούν να αντιμετωπίσουν τα αρμόδια συστήματα ελέγχου. Με αυτή την λογική, θα θεωρηθεί ένα σενάριο μέγιστης παραγωγής 60 kW και ελάχιστης κατανάλωσης 20 kW. Οι τιμές απέχουν αρκετά από τα πραγματικά δεδομένα οικιακής κατανάλωσης, αλλά θα αναδείξουν καλύτερα τις διάφορες περιοχές λειτουργίας των αλγορίθμων.

Έτσι, θα θεωρηθεί ότι για μια συγκεκριμένη μέρα με υψηλή παραγωγή και χαμηλή κατανάλωση, προκύπτει η εξής σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών:

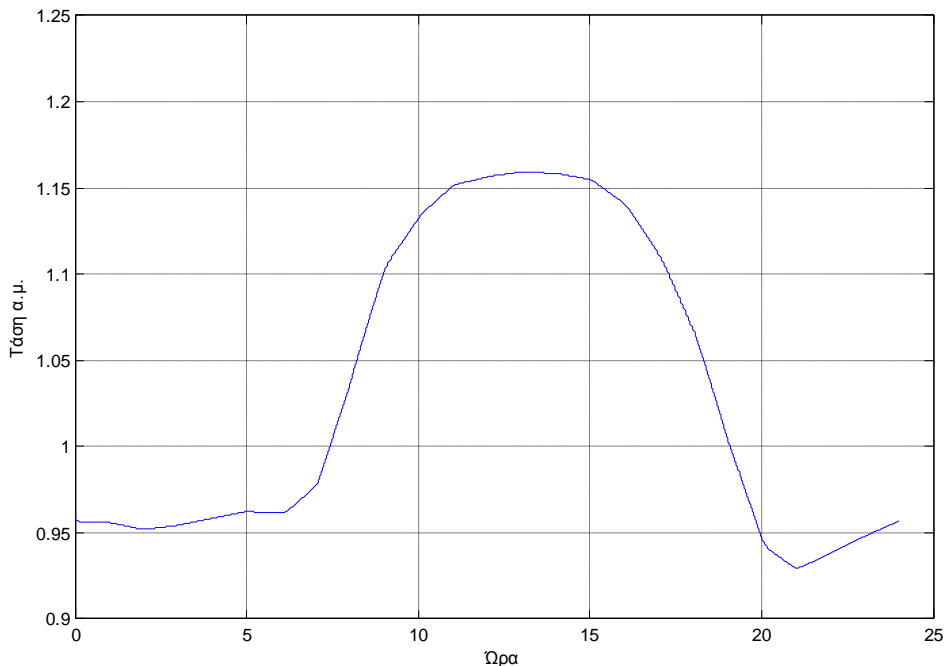


Εικόνα 5.8: Σχέση παραγωγής-κατανάλωσης που επιλέχθηκε.

Το μέγεθος της παραγωγής είναι αρκετά μεγάλο για μία οικιακή κατανάλωση, αλλά θεωρείται έτσι στην συγκεκριμένη περίπτωση με σκοπό την δημιουργία φαινομένου ανύψωσης τάσης.

5.2.1.1 Προσομοίωση χωρίς ύπαρξη αποθηκευτικών διατάξεων:

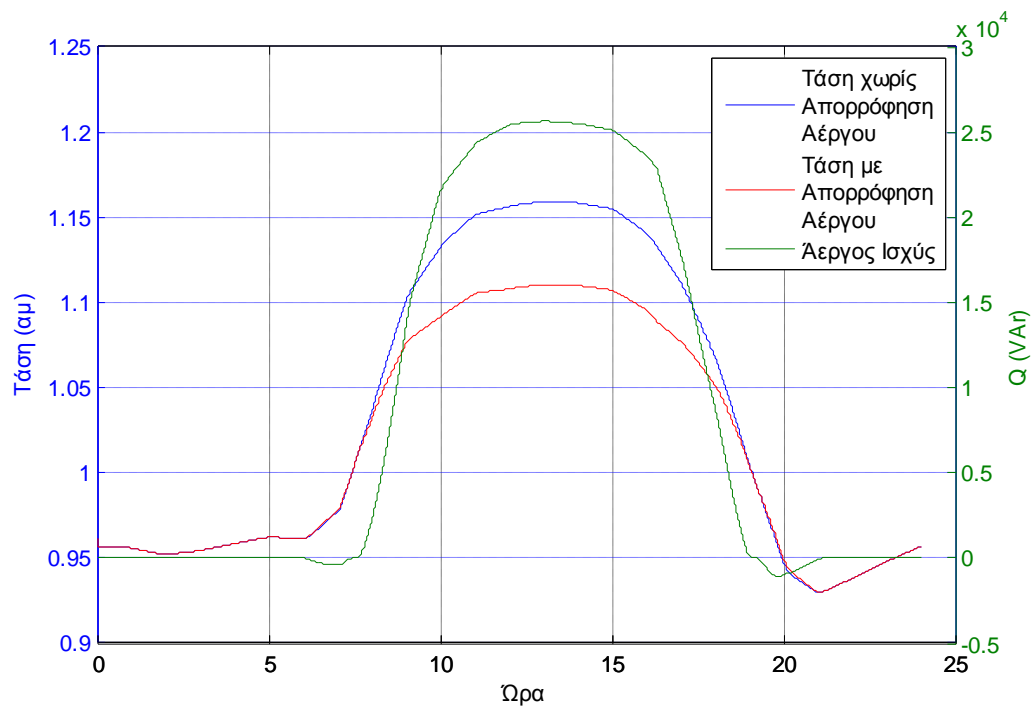
Η προσομοίωση του συγκεκριμένου σεναρίου, χωρίς παράλληλη ρύθμιση απορρόφησης αέργου ισχύος, περικοπή ισχύος φωτοβολταϊκών και ύπαρξη αποθηκευτικών διατάξεων, θα οδηγούσε στην εξής απόκριση τάσης:



Εικόνα 5.9: Απόκριση τάσης χωρίς κάποιον έλεγχο.

Όπως φαίνεται, τις ώρες υψηλής παραγωγής το σύστημα αντιμετωπίζει πολύ έντονο φαινόμενο ανύψωσης τάσης, καθώς υπερβαίνει το 1.15 αμ. Δεδομένου ότι τα όρια τάσης είναι στο +/- 10% της ονομαστικής (1 αμ), αυτή η τιμή δεν θα μπορούσε να είναι αποδεκτή. Αντίθετα, τις ώρες με χαμηλή παραγωγή αλλά με ύπαρξη φορτίου, η τάση μειώνεται αρκετά.

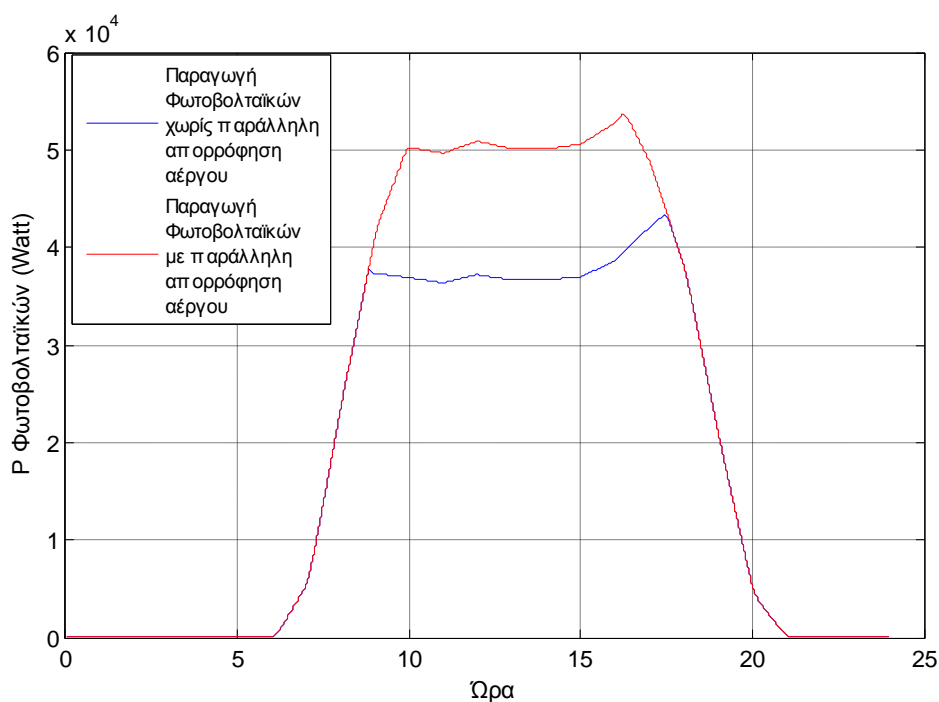
Σαν πρώτο μέτρο αντιμετώπισης του φαινομένου, προκρίνεται η απορρόφηση αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών. Καθώς τα όρια τάσης είναι στο +/- 10% της ονομαστικής, και δεδομένου ότι η διαδικασία πρέπει να λειτουργεί σε προτεραιότητα σε σχέση με την περικοπή της ισχύος των φωτοβολταϊκών, η τιμή της τάσης στην οποία θα γίνεται μέγιστη η ανταλλαγή αέργου τοποθετείται στο +/- 9% της ονομαστικής. Επίσης επιλέγεται ελάχιστος συντελεστής ισχύος ίσος με 0.92 και με D ίσο με 0.01, η βελτίωση στην απόκριση της τάσης καθώς και το ποσό της αέργου ισχύος που θα χρειαζόταν να απορροφηθεί φαίνεται στο διάγραμμα:



Εικόνα 5.10: Απόκριση τάσης με και χωρίς ρύθμιση αέργου ισχύος, και αντίστοιχη απεικόνιση της αέργου ισχύος.

Στο διάγραμμα φαίνεται η σημασία που έχει η απορρόφηση της αέργου ισχύος, μειώνοντας την απόκλιση της τάσης λειτουργίας στις ώρες αιχμής παραγωγής και δρώντας αναλογικά με το μέγεθος του προβλήματος που καλείται να αντιμετωπίσει. Φαίνεται επίσης αν και οριακά στο διάγραμμα, ότι ακόμα και όταν η τάση είναι για οποιονδήποτε λόγο χαμηλή (είτε λόγω εξωτερικής αιτίας, είτε λόγω μεγάλης κατανάλωσης), παρέχεται κάποια στήριξη μέσω παραγωγής αέργου ισχύος (με σεβασμό πάντα στον συντελεστή ισχύος των φωτοβολταϊκών).

Εφόσον η απορρόφηση αέργου ισχύος δεν λύνει το πρόβλημα της υπέρτασης, χωρίς την ύπαρξη αποθήκευσης ενέργειας το επόμενο βήμα του ελέγχου θα ήταν η περικοπή ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Η τελική έξοδος των φωτοβολταϊκών με και χωρίς ταυτόχρονη απορρόφηση αέργου ισχύος, φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 5.11: Περικοπή ενεργού ισχύος με ή χωρίς ταυτόχρονη απορρόφηση αέργου ισχύος.

5.2.1.2 Προσομοίωση με προσθήκη αποθηκευτικών διατάξεων:

Εγκαθίσταται σύστημα συσσωρευτών με τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν πιο πάνω.

Για τα όρια της κατάστασης φόρτισης μέσα στα οποία θα μπορούν να λειτουργούν οι συσσωρευτές, θα πρέπει να θεωρηθούν δύο κριτήρια:

Αρχικά, το βάθος εκφόρτισης στο οποίο θα φτάνουν οι συσσωρευτές, θα έχει σημαντική επίδραση στην διάρκεια ζωής τους. Αν και συσσωρευτές όπως οι μολύβδου- οξέως υποστηρίζουν εκφόρτιση μέχρι και σε βάθος εκφόρτισης 80%, τέτοια λειτουργία θα έφθειρε τους συσσωρευτές αρκετά γρήγορα. Από την άλλη όμως, μικρό βάθος εκφόρτισης θα σήμαινε χαμηλή αξιοποίηση των συσσωρευτών, άρα ανάγκη για μεγαλύτερο μέγεθος της διάταξης, που συνεπάγεται επιπλέον επένδυση, αλλά και μικρότερα ρεύματα φόρτισης για τους συσσωρευτές καθώς η ισχύς θα κατανέμεται καλύτερα. Γίνεται σαφές ότι η απόφαση για την διαχείριση της κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών είναι ένα ζήτημα που δεν επιδέχεται μονοσήμαντης απάντησης, αλλά καθορίζεται ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες και συνθήκες. Έτσι, για τις ανάγκες της παρούσας μοντελοποίησης, θα προκριθεί ένα βάθος εκφόρτισης ίσο με 40% (δηλαδή κατώτατη τιμή SOC ίση με 60%).

Επίσης, οι συσσωρευτές στην γενική περίπτωση είναι καλό να λειτουργούν κοντά στην κατάσταση πλήρους φόρτισής τους. Καθώς όμως πάνω από κάποια τιμή του SOC υπάρχει το ενδεχόμενο η απόδοση των συσσωρευτών να μειώνεται [44], και καθώς η ύπαρξη φίλτρων θα σημαίνει ότι η φόρτιση θα συνεχίζει για ένα μικρό διάστημα μετά την εντολή για διακοπή λειτουργίας της, επιλέγεται να υπάρχει ένα μικρό περιθώριο μέχρι την κατάσταση πλήρους φόρτισης, και έτσι το άνω όριο του SOC επιλέγεται στο 90%. Επίσης οι τιμές των ορίων φόρτισης μπορεί να είναι σταθερές, όπως επιλέγονται εδώ ή και εξαρτώμενες από τις συνθήκες που αναμένεται να αντιμετωπίσει το σύστημα.

Τέλος, ο αριθμός των συσσωρευτών στην παρούσα προσομοίωση θα είναι μικρός (7), δεδομένου ότι η προσομοίωση αναφέρεται σε δευτερόλεπτα. Ωστόσο σε ένα πραγματικό σύστημα για διάρκεια μιας μέρας, η ενέργεια που θα καλούνταν να αποθηκεύσουν οι συσσωρευτές θα ήταν πολύ μεγαλύτερη, και τα ρεύματα φόρτισης των συσσωρευτών μικρότερα. Συνολικά πάντως ο αριθμός των συσσωρευτών που θα χρειαζόνταν θα ήταν μεγαλύτερος. Η διαστασιολόγηση στο συγκεκριμένο παράδειγμα γίνεται με τρόπο που να αναδεικνύει την επίδραση της ρύθμισης της επιτρεπόμενης ανάστροφης ροής ισχύος στην προστασία της κατάστασης φόρτισης και την διάρκεια της λειτουργίας της μπαταρίας για μια δεδομένη μέρα.

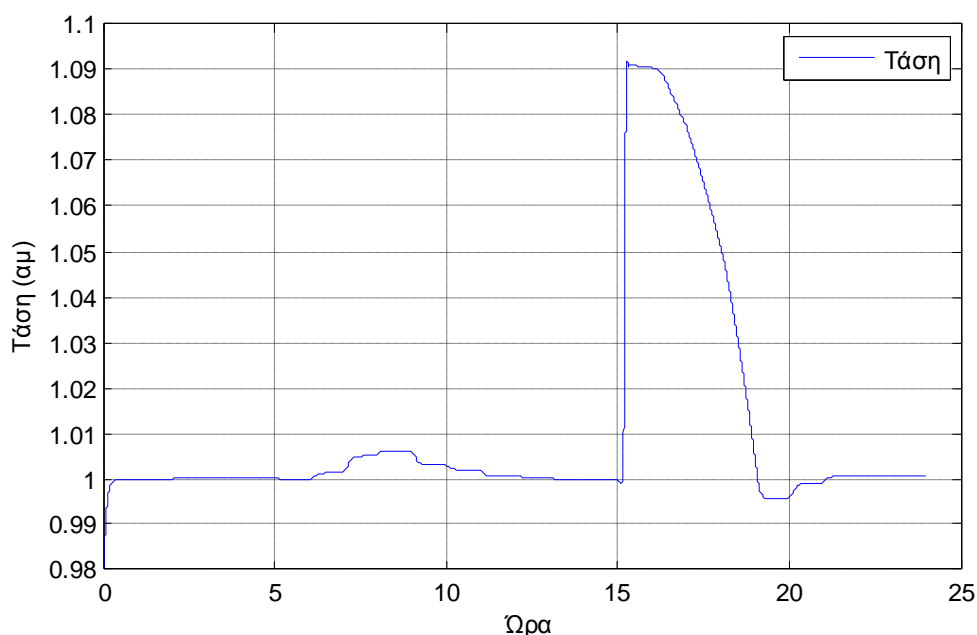
Δεδομένου ότι εξακολουθεί να ισχύει ότι η περικοπή ισχύος φωτοβολταϊκών είναι η έσχατη επιλογή για την επαναφορά της τάσης, επιλέγονται τα ακρότατα σημεία τάσης του droop ελέγχου της αποθήκευσης να είναι ίδια με της άεργου ισχύος (+/-9% της ονομαστικής τάσης, δηλαδή 0.91 και 1.09 αμ). Επίσης τοποθετούνται τιμές D_{up} ίσο με 0.02 και D_{down} ίσο με 0.01.

Θα εξεταστούν διαφορετικά σενάρια επιπέδου αποθηκευόμενης ισχύος, μέσω της μεταβολής του P_{diff} που εκφράζει την επιτρεπόμενη ανάστροφη ροή ισχύος προς το δίκτυο για αποφυγή πρόωρης φόρτισης των συσσωρευτών.

Καθώς αυτή η ανάστροφη ροή ισχύος οδηγεί σε αντίστοιχα φαινόμενα μικρής μεταβολής της τάσης, αλλά και για την καλύτερη συμπεριφορά των συσσωρευτών σε περίπτωση εξωτερικών μεταβολών τάσης, θα διερευνηθεί επίσης η παράλληλη επιπρόσθετη ρύθμιση αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των συσσωρευτών. Η λογική του ελέγχου που θα εφαρμοστεί θα είναι ίδια με την λογική του ελέγχου της αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών, με την μέγιστη ποσότητα της ανταλλαγής αέργου ισχύος να καθορίζεται από την ταυτόχρονη ισχύ λειτουργίας των συσσωρευτών. Ο ελάχιστος δυνατός συντελεστής ισχύος θα τεθεί ίσος με 0.9.

Αρχικά, θα οριστεί λειτουργία απόλυτης ιδιοκατανάλωσης, θέτοντας $P_{diff} = 0$. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα προκύπτουν ως εξής:

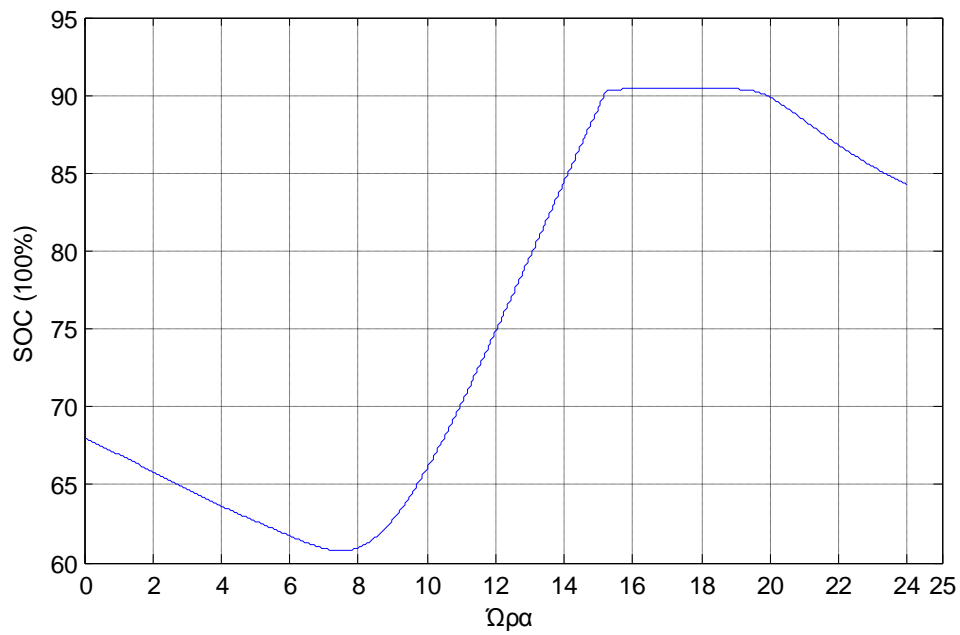
Τάση σημείου σύνδεσης:



Εικόνα 5.12: Απόκριση τάσης για ιδιοκατανάλωση με $Pd_{ff}=0$.

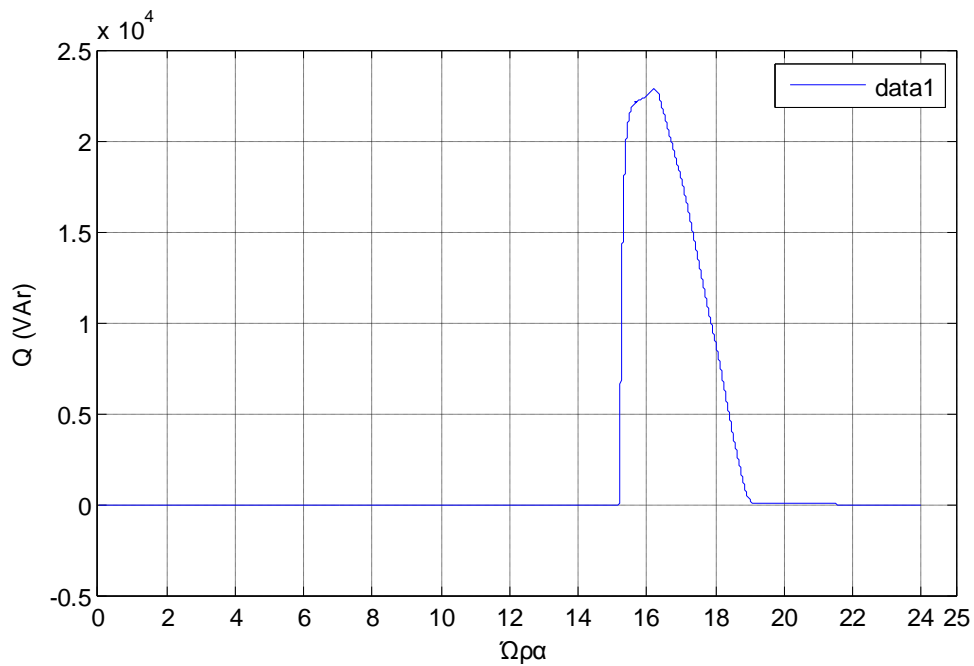
Όσο οι συσσωρευτές είναι εντός ορίου κατάστασης φόρτισης, η απόκριση της τάσης είναι σχεδόν αμετάβλητη και ίση με την ονομαστική, καθώς η ιδιοκατανάλωση επιτυγχάνει μηδενική ροή ισχύος άρα και μηδενικές μεταβολές τάσης. Αρχικά οι συσσωρευτές εκφορτίζονται καλύπτοντας το νυχτερινό φορτίο, ενώ όταν η παραγωγή γίνει μεγαλύτερη από την κατανάλωση αποθηκεύουν την διαφορά. Κάποιες μικρές αυξομειώσεις που παρατηρούνται έχουν να κάνουν με την ύπαρξη των φίλτρων που είναι αναγκαία για την αποφυγή έντονων μεταβατικών φαινομένων, ωστόσο οδηγούν σε ελαφρώς καθυστερημένη χρονική απόκριση. Οι αυξομειώσεις αυτές μάλιστα θα ήταν πολύ μικρότερες σε συνθήκες μικρότερης διαφοράς παραγωγής – κατανάλωσης ή μικρότερη αντίσταση γραμμής, με άλλα λόγια σε ρεαλιστικές συνθήκες. Η λειτουργία απόλυτης ιδιοκατανάλωσης έχει το αποτέλεσμα μετά τις 15:00 οι συσσωρευτές να φτάνουν στο άνω όριο φόρτισής τους και έτσι η αποθήκευση σταματάει. Η ύπαρξη πλέον μόνο των φωτοβολταϊκών οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της τάσης, και καθώς η διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης συνεχίζει να είναι μεγάλη και η ταυτόχρονη αύξηση της απορρόφησης αέργου ισχύος δεν επαρκεί για να συγκρατήσει την τάση, αναγκαστικά το κύκλωμα οδηγείται σε περικοπή της ενεργού ισχύος φωτοβολταϊκών, μέχρι την επαναφορά της τάσης σε αποδεκτά επίπεδα. Οι συσσωρευτές αρχίζουν εκ νέου την λειτουργία τους όταν η κατανάλωση γίνει μεγαλύτερη από την παραγωγή με συνέπεια να εκφορτίζονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτό το σενάριο δεν υπάρχει μεγάλη συμμετοχή της ρύθμισης αέργου ισχύος του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών, καθώς στην μεγαλύτερη διάρκεια της λειτουργίας η τάση είναι κοντά στην ονομαστική, ενώ η άεργος ισχύς από τον αντιστροφέα των συσσωρευτών είναι μηδέν.

Η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης φαίνεται παρακάτω:



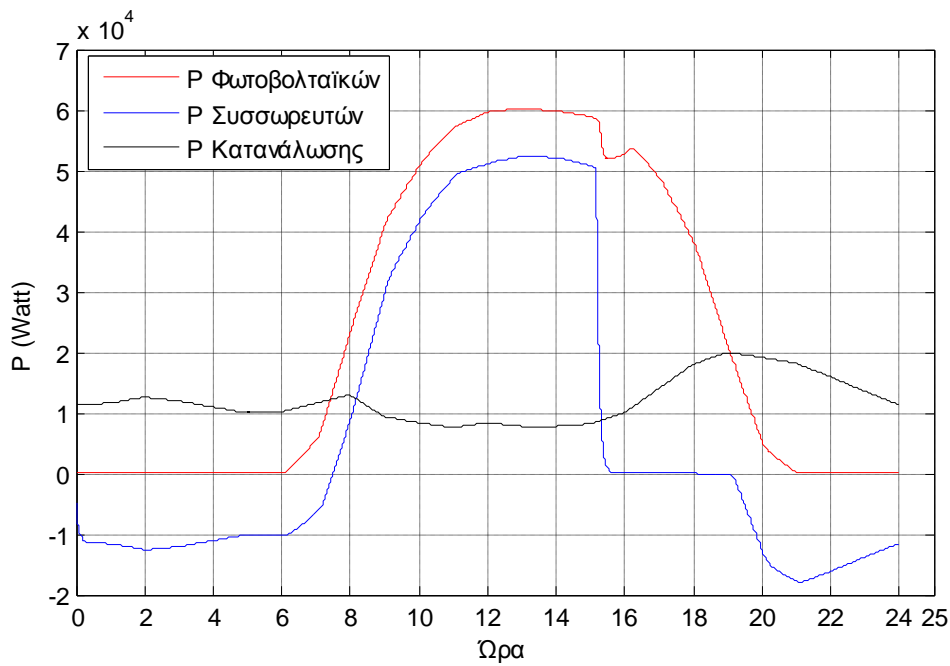
Εικόνα 5.13: Μεταβολή του SOC για $P_{diff}=0$.

Η ανταλλαγή αέργου ισχύος:



Εικόνα 5.14: Απορρόφηση αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών για $P_{diff}=0$.

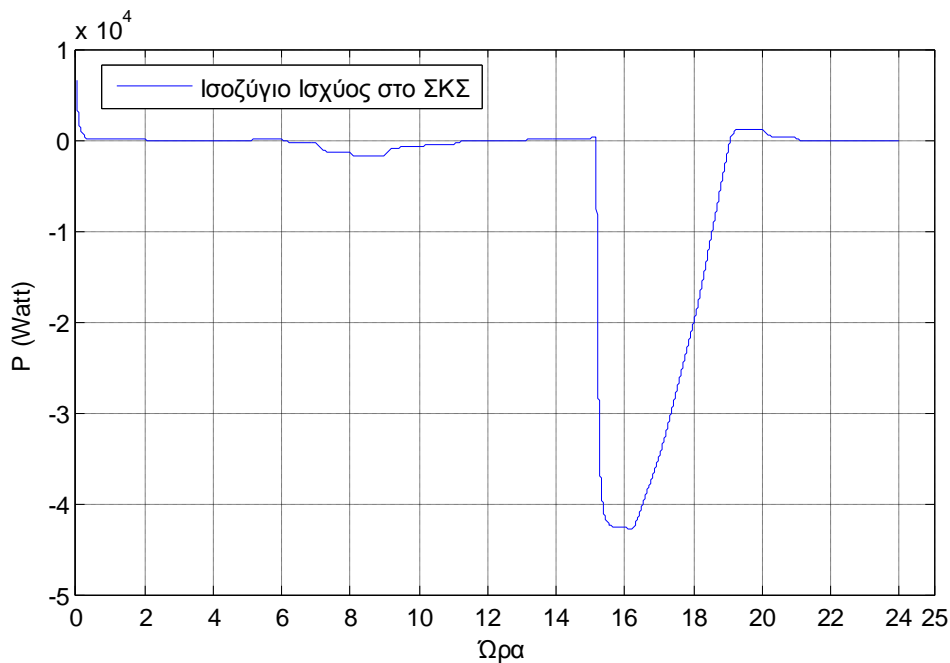
Ενώ η σχέση μεταξύ των ισχύων φωτοβολταϊκών, φορτίου και συσσωρευτών, αποτυπώνεται παρακάτω:



Εικόνα 5.15: Σχέση μεταξύ παραγωγής, κατανάλωσης και αποθήκευσης στο διάστημα μιας μέρας.

Στην καμπύλη που αντιστοιχεί στην παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι φανερή η περικοπή ισχύος που λαμβάνει χώρα (περίπου μετά τις 15:00).

Τέλος, η συνολική ροή ισχύος στο ΣΚΣ φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 5.16: Ισοζύγιο Ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης για $P_{diff}=0$.

,όπου φαίνεται καθαρά ότι τηρείται ο στόχος της μηδενικής ανταλλαγής ισχύος με το δίκτυο όσο οι συσσωρευτές είναι ικανοί να ανταλλάσσουν ισχύ(οι μικρές αποκλίσεις οφείλονται στις

αποκρίσεις των φίλτρων). Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών θεωρείται αρνητική αλγεβρικά, εξ ου και το αρνητικό πρόσημο του διαγράμματος.

Είναι σαφές από τα παραπάνω ότι η τήρηση μεγάλου επιπέδου ιδιοκατανάλωσης μέσα στην διάρκεια μιας μέρας με υψηλή παραγωγή και χαμηλή κατανάλωση, είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε γρήγορη φόρτιση των μπαταριών, με αποτέλεσμα το κύκλωμα να πρέπει να περικόψει ισχύ από τα φωτοβολταϊκά, κάτι που συνεπάγεται απώλεια ενέργειας.

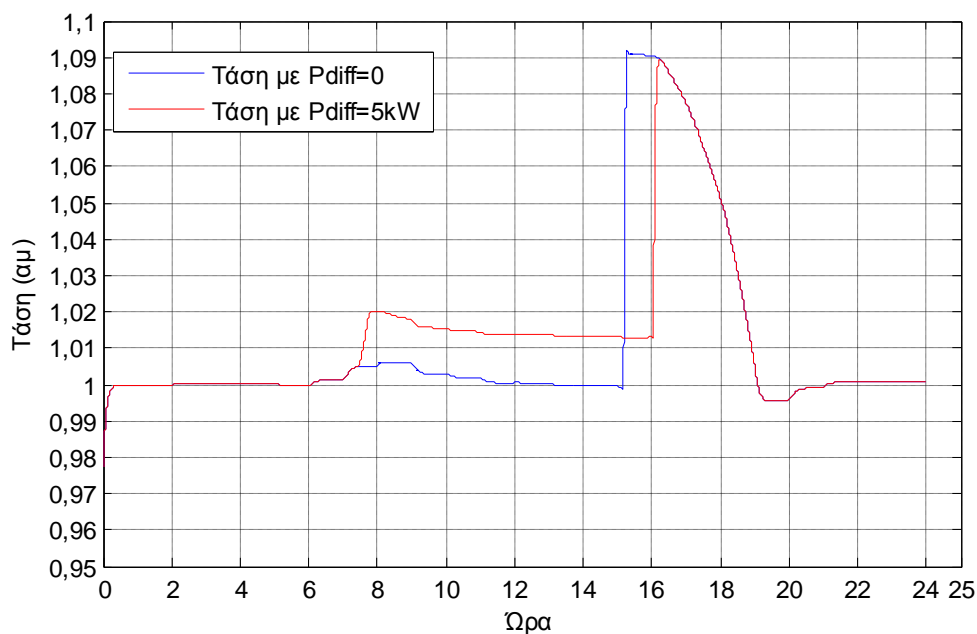
Θα εξεταστεί λοιπόν τι γίνεται σε περίπτωση που το P_{diff} λάβει κάποιες μεγαλύτερες τιμές.

Προσομοίωση με $P_{diff} = 5 \text{ kW}$

Έστω ότι $P_{diff} = 5 \text{ kW}$.

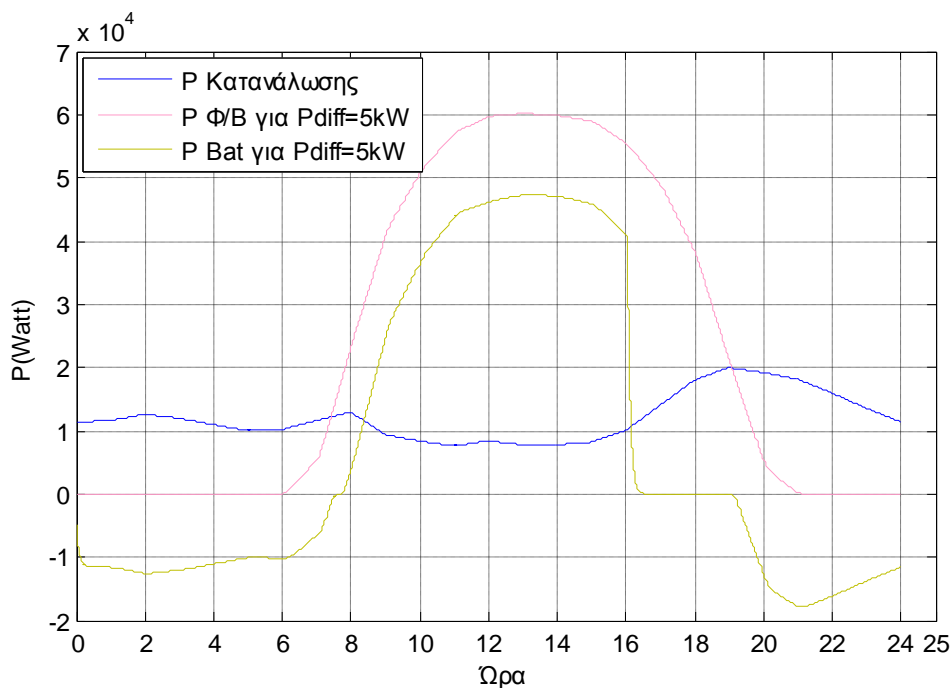
Τότε προκύπτουν τα εξής διαγράμματα, σε σχέση με την λειτουργία με μηδενικό P_{diff} :

Διάγραμμα τάσης:



Εικόνα 5.17: Διαφοροποίηση της τάσης εξ αιτίας της αλλαγής του P_{diff} .

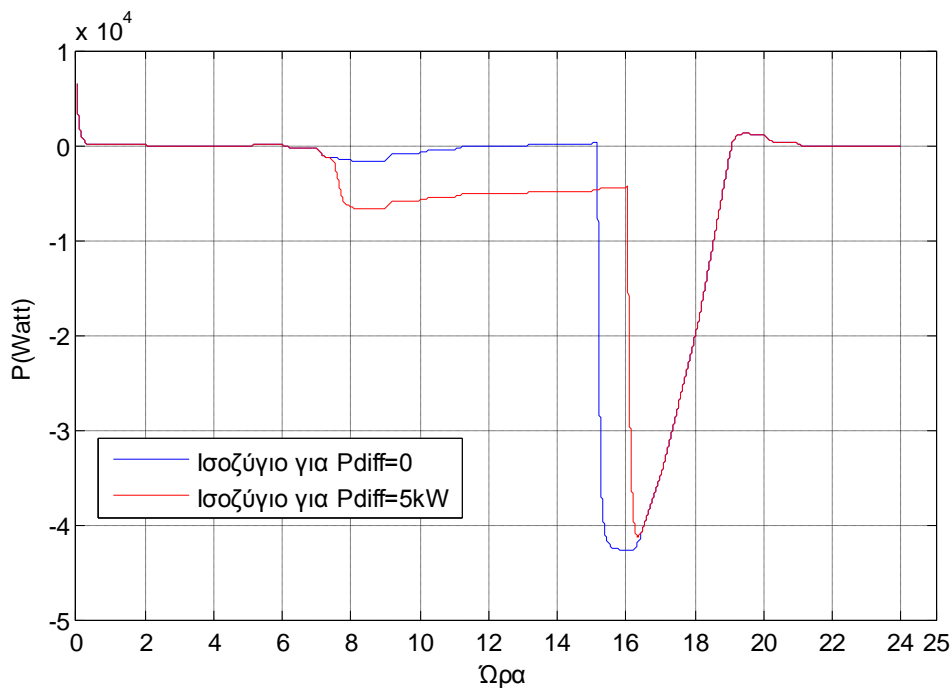
Σε αυτό το διάγραμμα απεικονίζεται η βασική λειτουργία της αύξησης του P_{diff} . Η αύξησή του συνεπάγεται και αύξηση του ποσού ανάστροφης ροής ισχύος που επιτρέπει ο έλεγχος των συσσωρευτών με σκοπό να αποφευχθεί η άμεση φόρτισή τους. Έτσι οι ώρες στις οποίες οι συσσωρευτές παραμένουν ενεργοί επί πλέον σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο είναι περισσότερες, ενώ όταν πλέον η κατάσταση φόρτισής τους φτάσει στο όριο, η διαφορά παραγωγής και κατανάλωσης δεν είναι ικανή να παράγει ανύψωση τάσης, και έτσι η περικοπή της φωτοβολταϊκής ισχύος πλέον μηδενίζεται:



Εικόνα 5.18: Η νέα σχέση μεταξύ παραγωγής, κατανάλωσης και αποθήκευσης.

Στο διάγραμμα φαίνεται πλέον ότι η περικοπή ενεργού ισχύος, άρα και πιθανή οικονομική απώλεια, έχει εξαλειφθεί πλήρως.

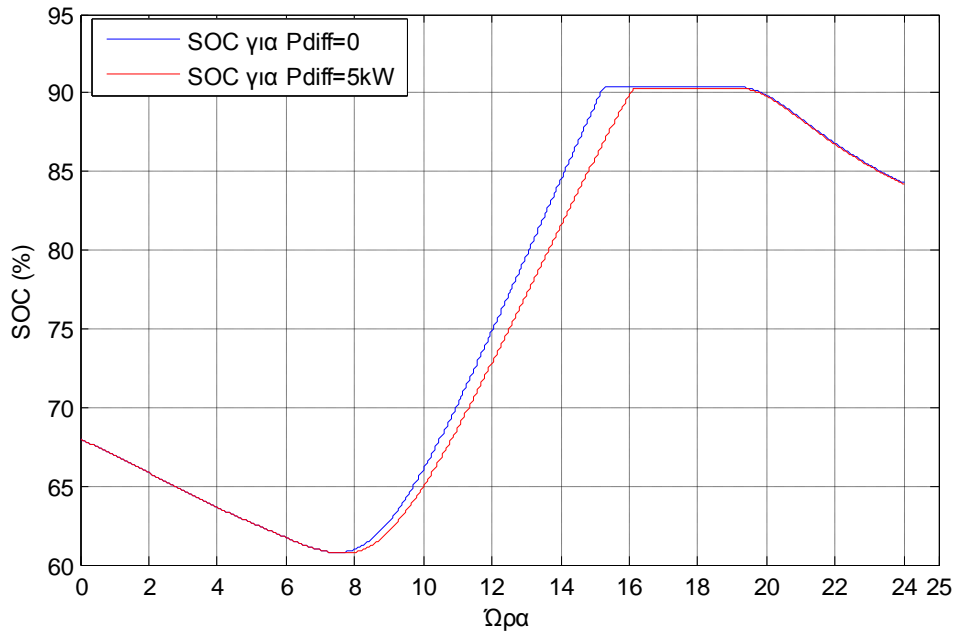
Η νέα συνολική ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο αποτυπώνεται καλύτερα στο αντίστοιχο διάγραμμα:



Εικόνα 5.19: Η νέα ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο.

,όπου φαίνεται ότι το σύστημα έχει περιορίσει αρκετά το διάστημα στο οποίο στέλνει μεγάλα ποσά ισχύος στο δίκτυο, με το τίμημα μιας αυξημένης μόνιμης ροής σε σχέση με την μηδενική.

Τέλος, η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης για το συγκεκριμένο σενάριο σε σχέση με την αντίστοιχη μεταβολή για το σενάριο της ιδιοκατανάλωσης:

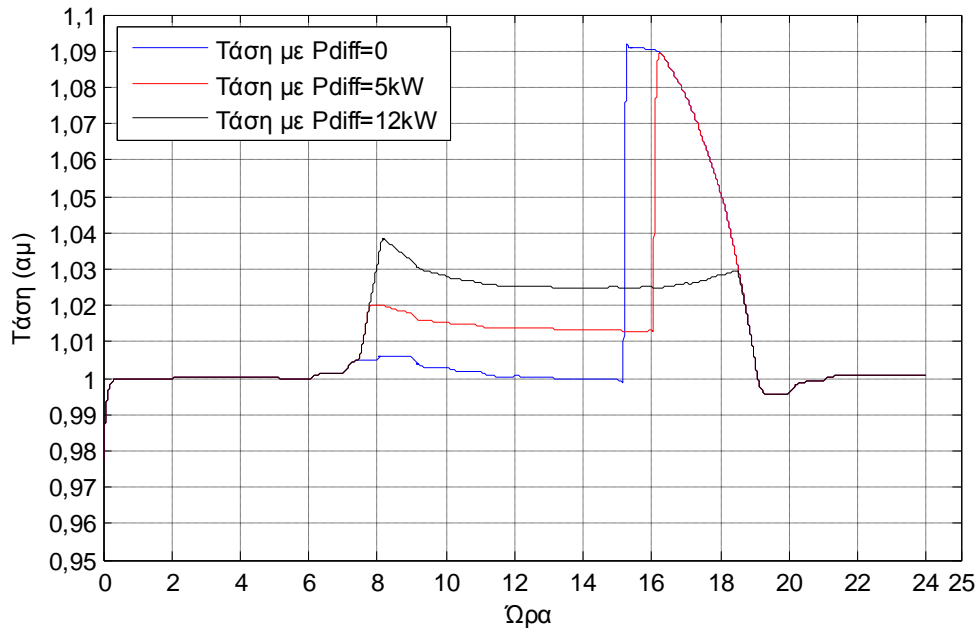


Εικόνα 5.20: Η μεταβολή του SOC με $P_{diff}=5kW$ σε σχέση με την αρχική.

Τέλος, θα προσομοιωθεί το σενάριο για $P_{diff} = 12kW$.

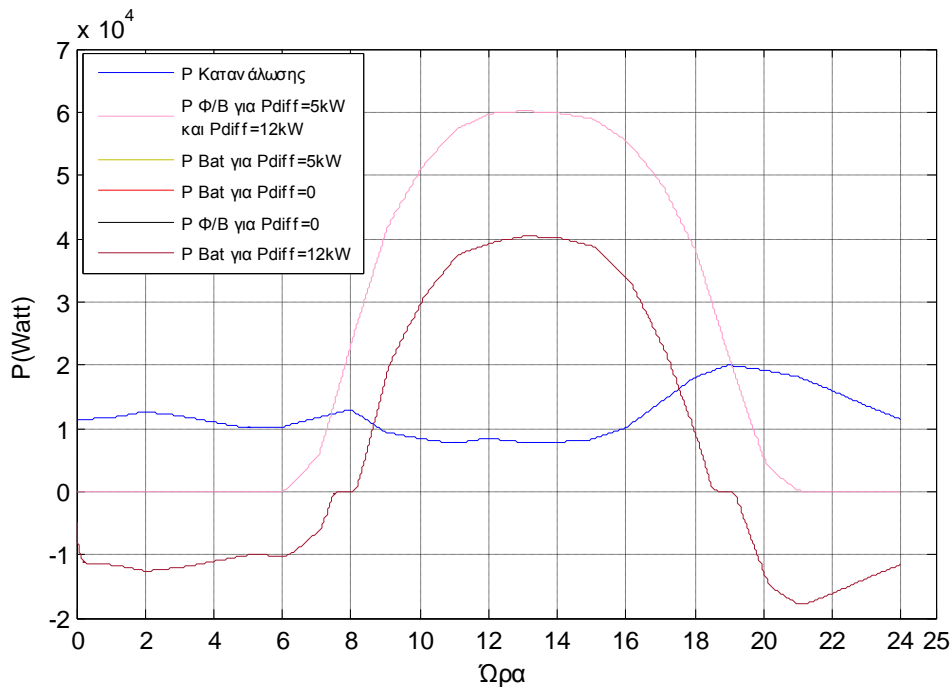
Προσομοίωση για $P_{diff} = 12kW$

Η τάση λειτουργίας που προκύπτει σε σχέση με την τάση λειτουργίας των προηγούμενων σεναρίων:



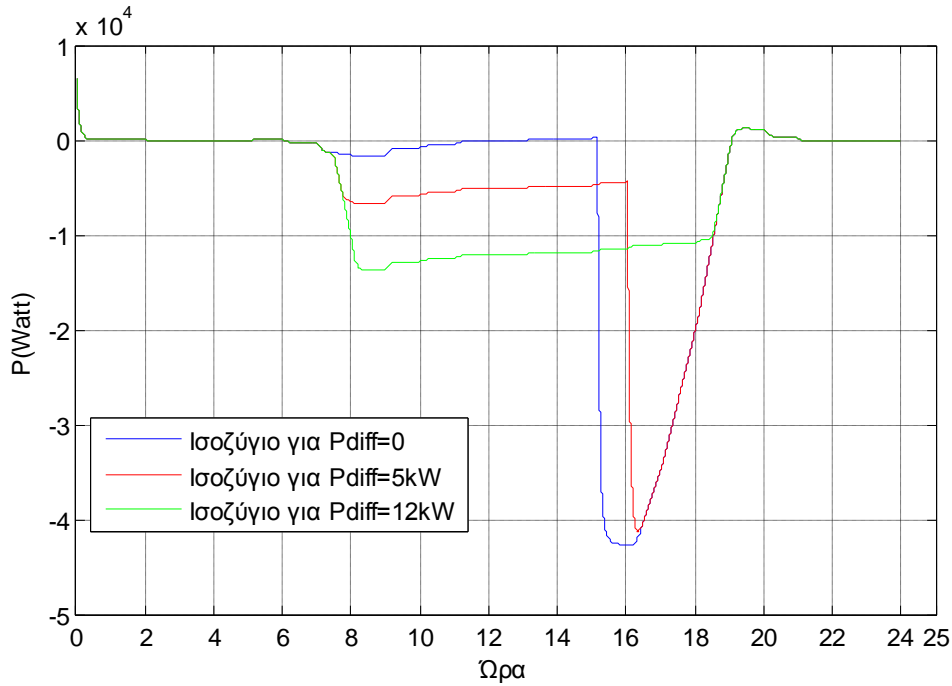
Εικόνα 5.21: Μεταβολή της τάσης σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Στο διάγραμμα φαίνεται το γεγονός ότι αν και η ανάστροφη ροή είναι αρκετά περισσότερη, και έχει ανεβάσει την τάση αρκετά, εν τούτοις το επίπεδο τάσης παραμένει ενιαίο καθώς πλέον οι συσσωρευτές διαρκούν για όλη την μέρα και δεν φορτίζονται πρόωρα. Αυτό αποτυπώνεται και στο αναλυτικό διάγραμμα της ισχύος:



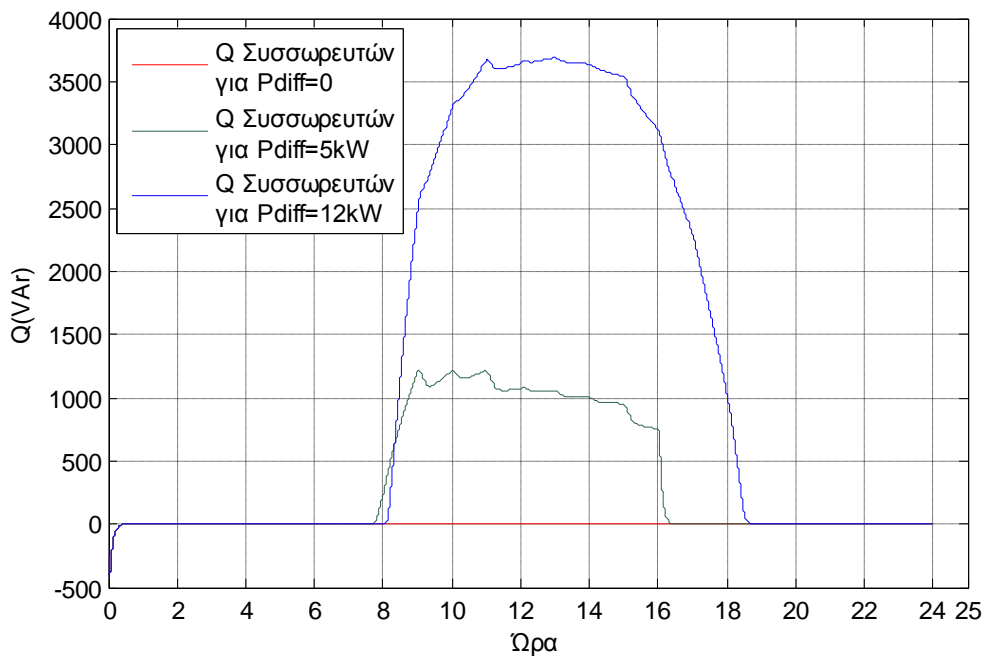
Εικόνα 5.22: Σχέσεις μεταξύ παραγωγής, κατανάλωσης και αποθήκευσης στο τρίτο σενάριο.

,ενώ η συνολική ανταλλαγή με το δίκτυο πλέον διαμορφώνεται ως εξής:



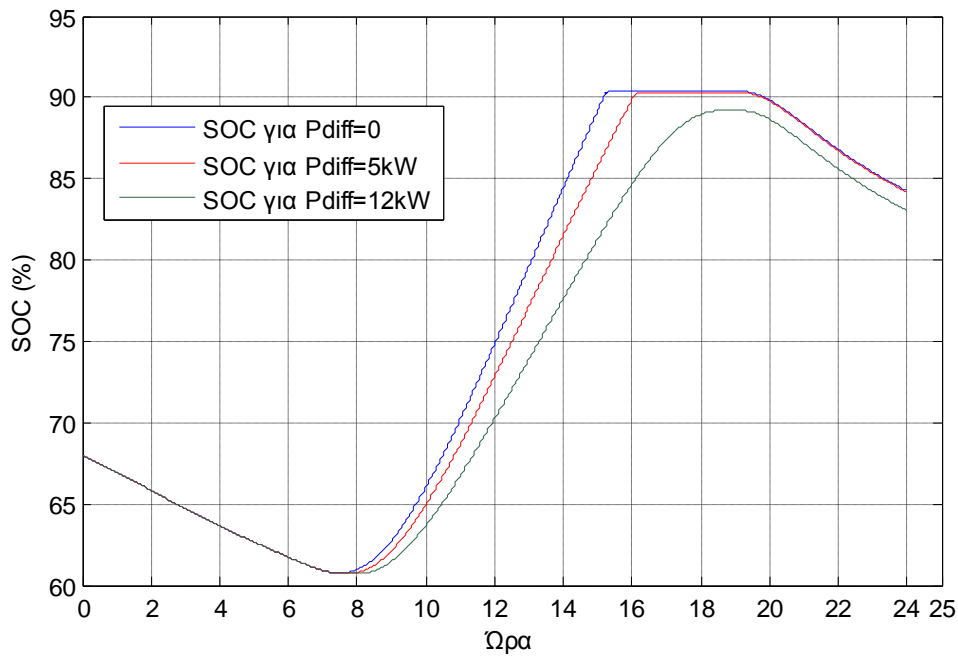
Εικόνα 5.23: Σύγκριση της ανάστροφης ροής ισχύος στο δίκτυο για διαφορετικά σενάρια P_{diff} .

Η μεταβολή στον τρόπο που οι μπαταρίες συμμετέχουν στην απορρόφηση αέργου ισχύος φαίνονται στο διάγραμμα 5.24:



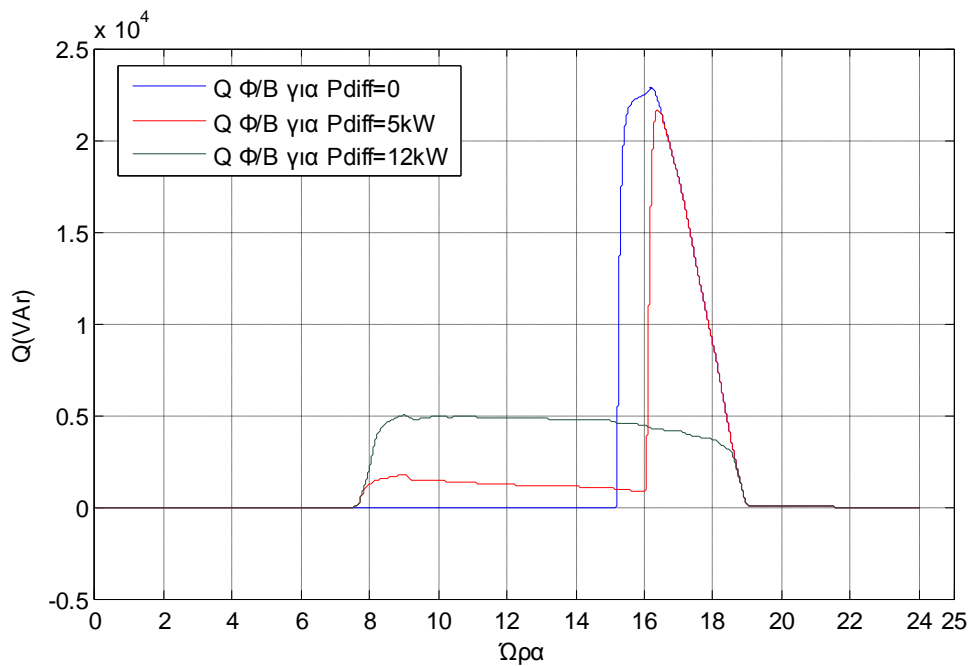
Εικόνα 5.24: Σύγκριση της απορρόφησης αέργου ισχύος από τους συσσωρευτές για διαφορετικά σενάρια P_{diff} .

Η διαφορά στην ταχύτητα φόρτισης των μπαταρών φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 5.25: Σύγκριση της ταχύτητας φόρτισης των μπαταριών για διαφορετικά σενάρια Pdiff.

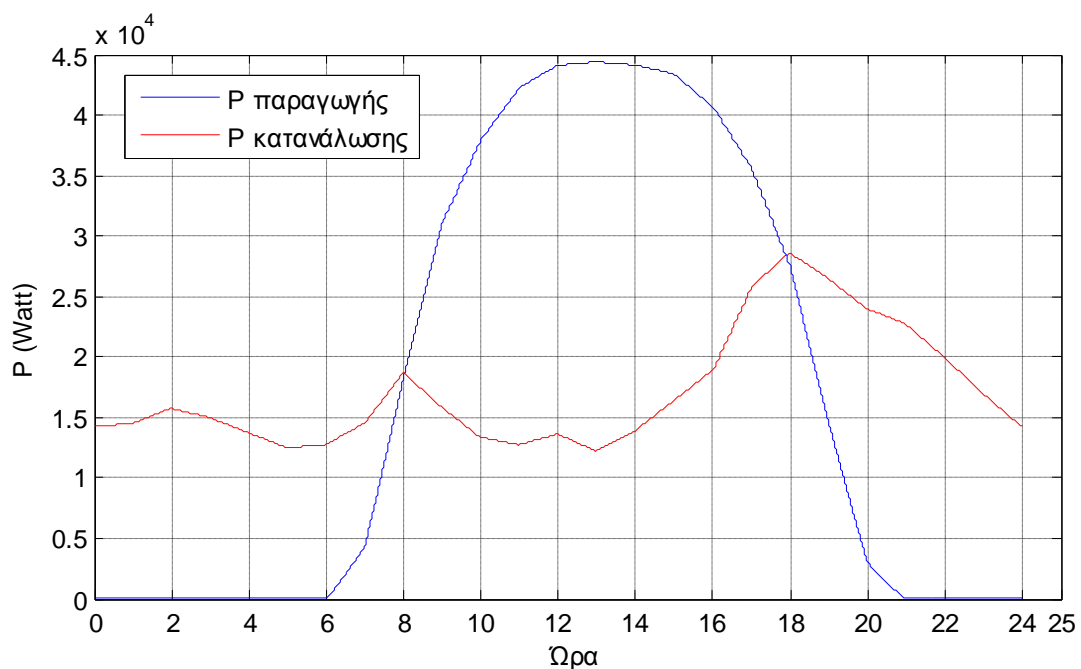
,ενώ η απορρόφηση αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών για κάθε σενάριο προκύπτει:



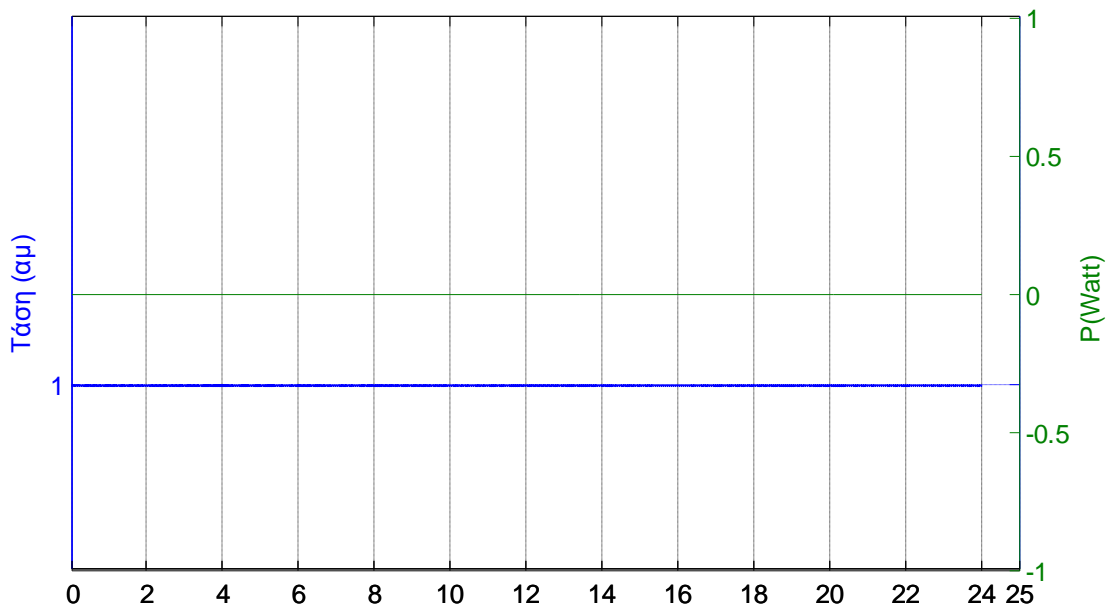
Εικόνα 5.26: Σύγκριση της απορρόφησης αέργου ισχύος από τους αντιστροφέες των φωτοβολταϊκών για διαφορετικά σενάρια Pdiff.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θεώρηση σταθερού P_{diff} δεν είναι απαραίτητη. Ενδεχομένως, σε συστήματα τα οποία θα μπορούσαν να παρέχουν κάποια πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής, το P_{diff} θα μπορούσε να αναδιαμορφώνεται ανά τακτές χρονικές στιγμές, αναλόγως με την διαφορά που θα αναμενόταν ανάμεσα στην παραγωγή και την κατανάλωση. Για παράδειγμα, μια μέρα που η πρόβλεψη θα έκανε λόγο για υψηλή κατανάλωση και χαμηλή παραγωγή, οι συσσωρευτές δεν θα υπήρχε λόγος να προφυλάσσονται και έτσι το P_{diff} θα μπορούσε χωρίς πρόβλημα να θεωρηθεί ίσο με το μηδέν ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός ιδιοκατανάλωσης. Αντίθετα, αν η πρόβλεψη παρείχε πληροφορία για υψηλή παραγωγή και χαμηλή κατανάλωση, οι συσσωρευτές θα έπρεπε να προφυλαχθούν από γρήγορη φόρτιση και έτσι το P_{diff} θα έπρεπε να είναι μεγάλο. Μία ιδέα θα ήταν να δημιουργηθεί μία droop καμπύλη, η οποία με βάση την εκτίμηση για μια μέση διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης για μια δεδομένη μέρα, θα αποφάσιζε την τιμή του P_{diff} για την μέρα εκείνη, εκκινώντας από μηδενική τιμή για χαμηλή αναμενόμενη διαφορά και φτάνοντας σε μία μέγιστη τιμή πάνω από την οποία όση κι αν είναι η διαφορά το P_{diff} θα παραμένει σταθερό.

Τέλος, για να αποτυπωθεί η λειτουργία του ελέγχου σε πιο ήπια σχέση παραγωγής - κατανάλωσης, θα γίνει μια νέα προσομοίωση για αντίστοιχο σενάριο, στην οποία θα αφαιρεθούν και τα φίλτρα ώστε να αναδειχθεί καλύτερα η επίδραση της ιδιοκατανάλωσης στην τάση.



Εικόνα 5.27: Νέο σενάριο διαφοράς παραγωγής κατανάλωσης.

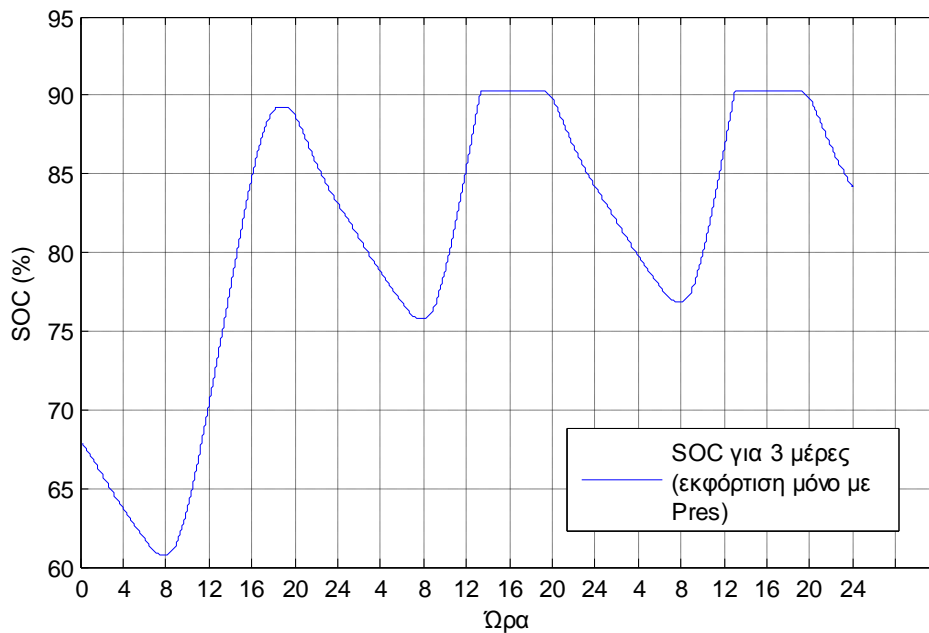


Εικόνα 5.28: Νέα τάση ΣΚΣ και ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο. Η τάση παραμένει ίση με την ονομαστική, ενώ η ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο είναι ίση με μηδέν.

5.2.1.3 Εκφόρτιση.

Ένα ζήτημα το οποίο φαίνεται να προκύπτει από τις παραπάνω προσομοιώσεις, είναι η μεγάλη διαφορά μεταξύ αρχικής και τελικής κατάστασης φόρτισης στην διάρκεια μιας μέρας. Αν και το σενάριο που αναλύθηκε είναι μία αρκετά κακή περίπτωση σχέσης παραγωγής –φορτίου, είναι φανερό ότι σε περίπτωση που το σενάριο της επόμενης μέρας είχε παρόμοια χαρακτηριστικά τότε οι συσσωρευτές που κατά την διάρκεια της νύχτας δεν θα είχαν εκφορτίσει το ποσό ενέργειας που αποθήκευαν μέσα στην μέρα, θα φτάσουν πολύ πιο γρήγορα σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, με αποτέλεσμα να γίνει αναγκαία η περικοπή ισχύος των φωτοβολταϊκών.

Ας θεωρηθεί για παράδειγμα η χρονική περίοδος τριών ημερών με σχέση μεταξύ παραγωγής - κατανάλωσης αυτή του προηγούμενου σεναρίου:

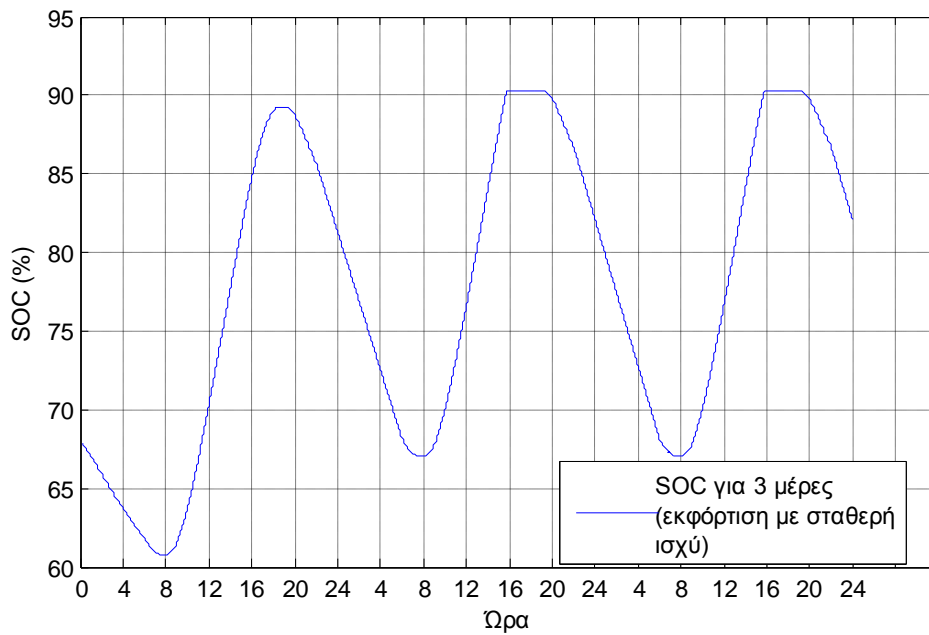


Εικόνα 5.29: Εκφόρτιση μπαταρίας μόνο μέσω του φορτίου.

Μία λύση φυσικά για αυτό θα ήταν η ύπαρξη ενός φορτίου διάχυσης (damp load), το οποίο θα φρόντιζε να παίρνει ένα μέρος της ισχύος των συσσωρευτών ώστε να μειώσει την κατάσταση φόρτισής τους για το διάστημα της μέρας. Όμως αυτό θα ήταν και πάλι μία απώλεια ενέργειας, αν το φορτίο αυτό δεν είχε κάποια άλλη χρηστική αξία.

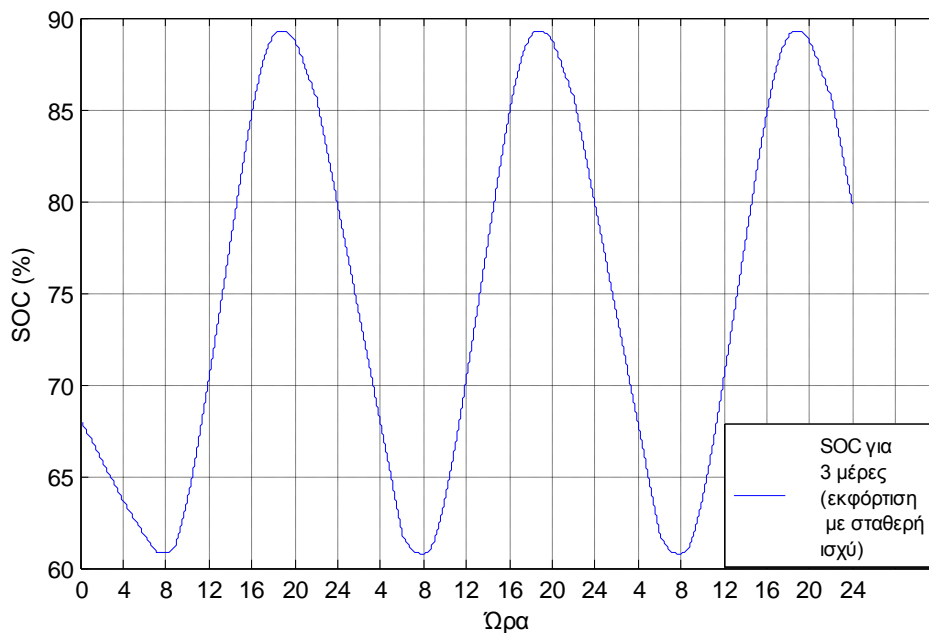
Ίσως μία διαφορετική ιδέα, θα ήταν η εκφόρτιση των συσσωρευτών με σταθερό ρυθμό στην διάρκεια της νύχτας. Ένα block ολοκληρωτή συνδέεται με την έξοδο της ισχύος των συσσωρευτών και ολοκληρώνοντας την συνολική δραστηριότητα για κάποιο διάστημα (πχ μιας μέρας), λαμβάνει το συνολικό ποσό ενέργειας που αποθηκεύθηκε. Κατόπιν, εφόσον έχει καθοριστεί το διάστημα των ωρών στις οποίες η εκφόρτιση είναι επιθυμητή να γίνει, υπολογίζει μία σταθερή ισχύ εκφόρτισης για το διάστημα αυτό, με ένα κομμάτι της ισχύος αυτής να καλύπτει το νυχτερινό φορτίο, και το υπόλοιπο να εγχέεται στο κοντινό δίκτυο, το οποίο θα μπορούσε να την χρησιμοποιήσει για τις δικές του ανάγκες (πχ αν οι κοντινοί καταναλωτές δεν έχουν αποθηκευτικές διατάξεις θα χρησιμοποιήσουν αυτή την ισχύ για το νυχτερινό φορτίο τους), ελέγχοντας πάντα βέβαια πιθανές παραβάσεις στο επίπεδο τάσης, στο επίπεδο μέγιστης επιτρεπόμενης ανάστροφης ροής ισχύος και στην κατάσταση φόρτισης. Το σενάριο της σταθερής ισχύος εκφόρτισης επίσης προστατεύει και την διάρκεια ζωής των συσσωρευτών.

Για την υλοποίηση αυτής της ιδέας για το σενάριο που περιγράφεται, θα θεωρηθεί ότι οι συσσωρευτές θα εκφορτίζουν την αποθηκευμένη ισχύ τους τις ώρες που δεν υπάρχει φωτοβολταϊκή παραγωγή, για παράδειγμα ανάμεσα στις 10 μμ της μιας μέρας και τις 6 πμ της επόμενης. Εδώ, αρχικοποιώντας τον ολοκληρωτή με αρχική τιμή μηδέν στο ξεκίνημα τις πρώτης μέρας, αναμένεται στο τέλος της εκφόρτισης (6 το πρωί της επόμενης) οι συσσωρευτές να βρίσκονται στην αρχική κατάσταση εκφόρτισης.



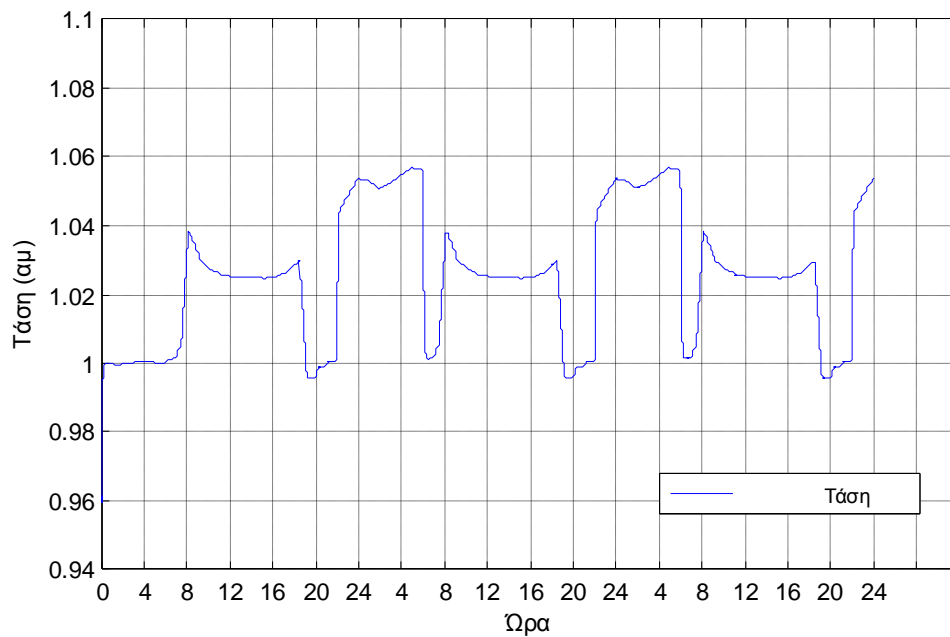
Εικόνα 5.30: Εκφόρτιση μπαταρίας με σταθερό ρυθμό την νύχτα.

Αλλάζοντας το χρονικό σημείο για το οποίο αρχικοποιείται η μέτρηση της αποθηκευόμενης ενέργειας (για παράδειγμα στις 6 το πρωί), μπορεί να μεταβληθεί η τελική επιθυμητή κατάσταση φόρτισης για την δραστηριότητα της επόμενης μέρας:



Εικόνα 5.31: Εκφόρτιση μπαταρίας με σταθερό ρυθμό αλλά σε διαφορετικό βάθος εκφόρτισης.

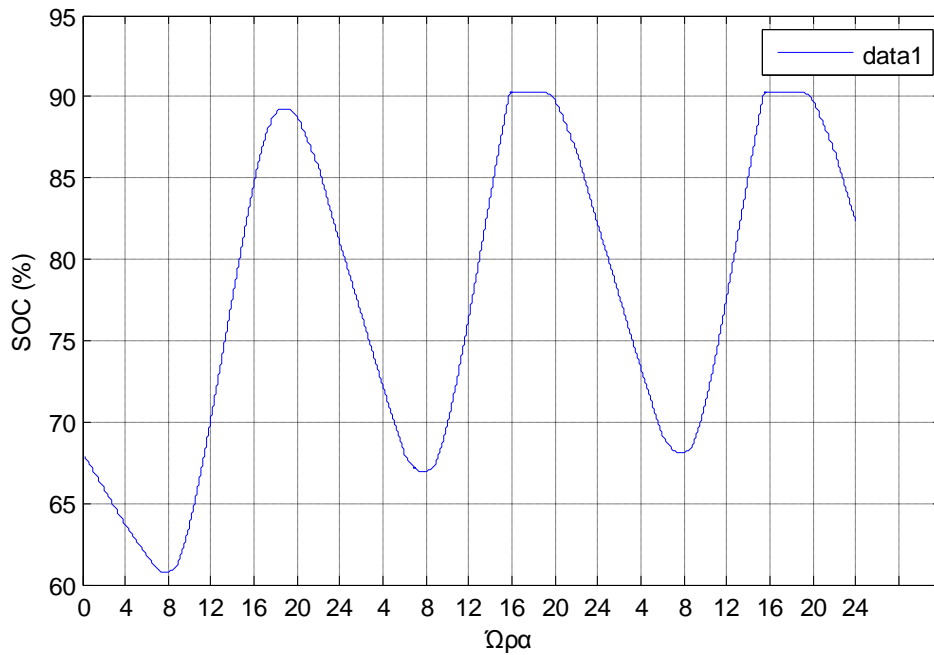
Η τάση λειτουργίας τότε για την ίδια περίοδο θα είναι:



Εικόνα 5.32: Τάση λειτουργίας στο σενάριο της εκφόρτισης με σταθερό ρυθμό.

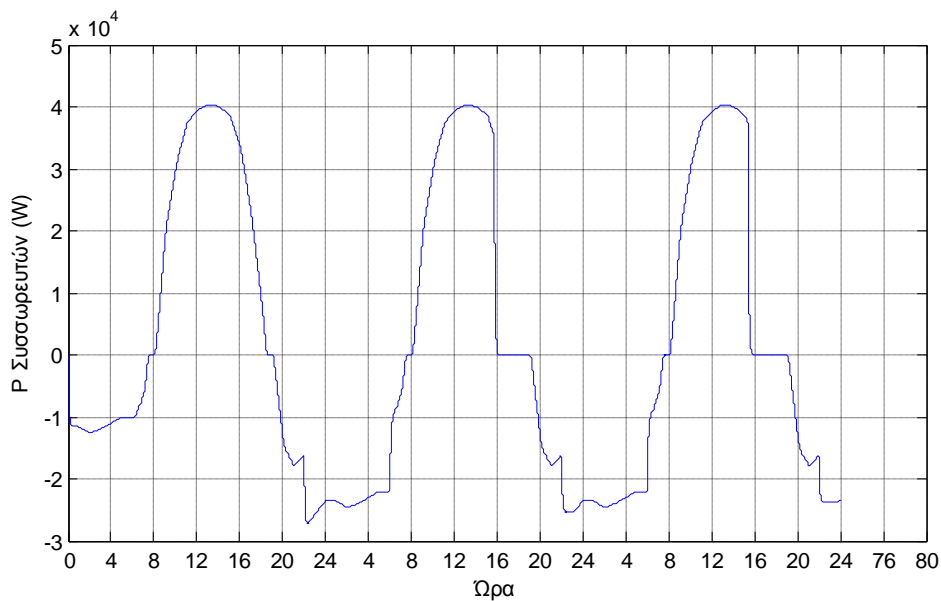
Η μεταβολή της τάσης που παρατηρείται είναι αρκετά μεγάλη για αυτή την ακραία περίπτωση. Έτσι, θα ήταν χρήσιμο να προστεθεί ένας έλεγχος για να μην παραβιάζεται το όριο ανάστροφης ισχύος P_{diff} , ενώ για να διασφαλίζεται η εκφόρτισης ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής αποθηκευμένης ισχύος μέσα στην μέρα αλλά αυξημένου νυχτερινού φορτίου προστίθεται και ο έλεγχος όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την καθορισμένη σταθερή ισχύ εκφόρτισης, να δίνεται από τους συσσωρευτές ισχύς ίση με το φορτίο.

Για το σενάριο που περιγράφεται, προκύπτει η εξής καμπύλη κατάστασης φόρτισης:



Εικόνα 5.33: Εκφόρτιση μπαταρίας με σταθερό ρυθμό, με εφαρμογή ελέγχου για την ανάστροφη ροή και την πλήρη κάλυψη του φορτίου.

Ενώ η τάση λειτουργίας:

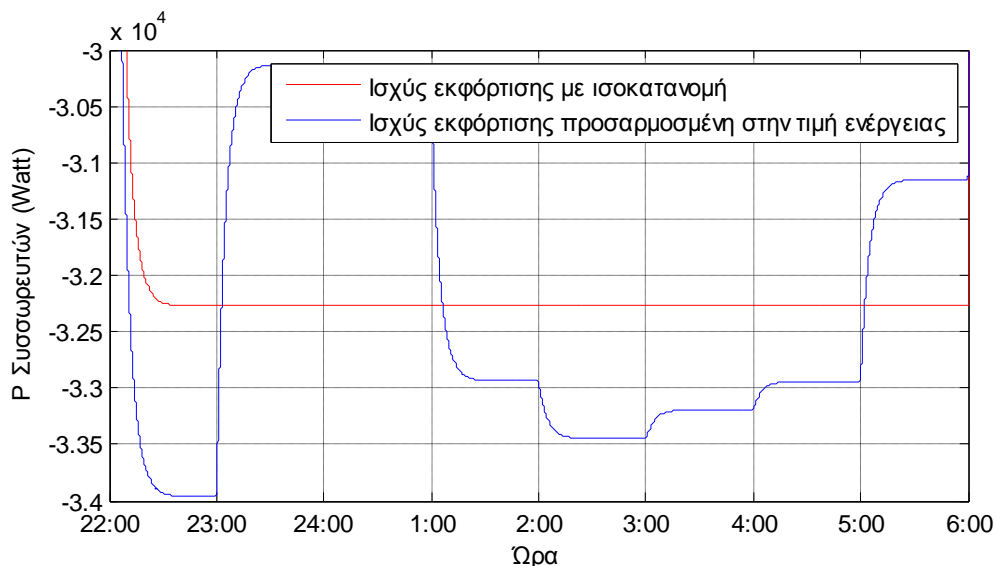


Εικόνα 5.34: Τάση για εκφόρτιση μπαταρίας με σταθερό ρυθμό, με εφαρμογή ελέγχου για την ανάστροφη ροή και την πλήρη κάλυψη του φορτίου

Φαίνεται ότι η προσθήκη των περιορισμών της ανάστροφης ροής ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε συνδυασμό με ένα τέτοιο ακραίο σενάριο παραγωγής- κατανάλωσης τους συσσωρευτές στο να μην εκφορτίσουν αρκετά στην διάρκεια της νύχτας. Αυτό το ποσό ενέργειας που δεν απελευθερώνεται κατά την διάρκεια τα νύχτας, θα μπορούσε τελικά να διοχετεύεται σε ένα

φορτίο διάχυσης(damp load). Συνολικά όμως αυτή η απώλεια ενέργειας είναι αρκετά μικρότερη από το σενάριο με την εκφόρτιση μόνο με το φορτίο.

Μία ακόμα παραλλαγή της μεθόδου αυτής, θα ήταν η ισχύς εκφόρτισης να μην είναι σταθερή μέσα στην νύχτα, αλλά να ακολουθεί πιθανές διακυμάνσεις της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο αν αυτές υπάρχουν, με την προϋπόθεση ότι θα πληρούνται όλοι οι προαναφερθέντες περιορισμοί. Αν και η πώληση ενέργειας μέσα στην διάρκεια της νύχτας δεν αναμένεται να είναι προσοδοφόρα και τα κέρδη αναμένονται χαμηλά, εν τούτοις μια μικρή οικονομική βελτιστοποίηση της εκφόρτισης θα μπορούσε να είναι εφικτή. Αν θεωρηθεί ότι το σύστημα έχει πληροφορία για τις τιμές ενέργειας του χρονικού διαστήματος στο οποίο εκφορτίζει σε μία ωριαία βάση, μπορεί να υπολογίζει έναν συντελεστή στάθμισης για κάθε ώρα εκφόρτισης με βάση τον οποίο θα προκύπτει το τελικό ποσό ισχύος εκφόρτισης για την ώρα εκείνη. Οι συντελεστές στάθμισης αυτοί προκύπτουν από την εκτιμώμενη τιμή ενέργειας για εκείνη την ώρα, η οποία θα προβλέπεται από έναν στατιστικό πίνακα ο οποίος θα μπορεί να ανανεώνεται σε κάθε επανάληψη. Έτσι το σύστημα θα εκφορτίζει με μεγαλύτερη ισχύ τις ώρες που η τιμή είναι μεγάλη, και με μικρότερη τις υπόλοιπες, με προϋπόθεση πάντα η συνολική ενέργεια που θα αποδοθεί να είναι αμετάβλητη.

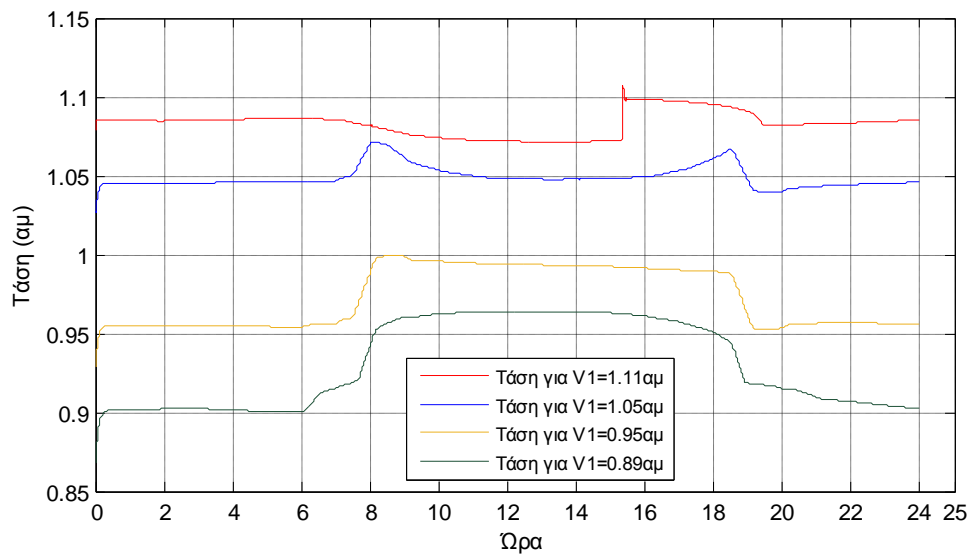


Εικόνα 5.35: Σύγκριση μεταξύ ισοκατανεμημένης εκφόρτισης και σταθμισμένης με βάση την τιμή ενέργειας.

Τέλος, ενδιαφέρον έχει να διαπιστωθεί η συμπεριφορά του κυκλώματος σε περιπτώσεις εξωτερικών μεταβολών τάσης. Θα θεωρηθούν τέσσερα διαφορετικά σενάρια αρχικής τάσης V1 σταθερής για κάθε προσομοίωση (διαδοχικά θα τεθεί ίση με 1.11, 1.05, 0.95 και 0.89).

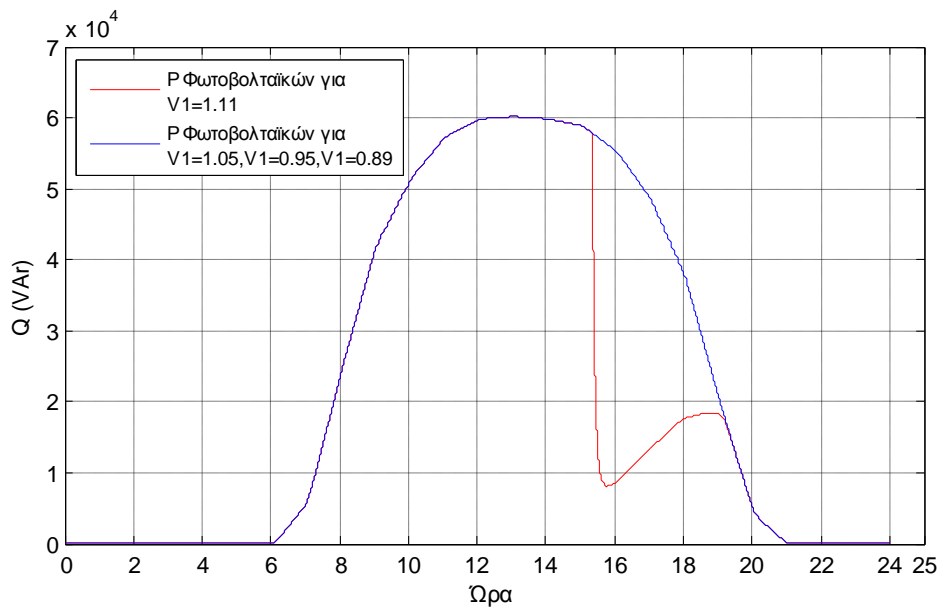
Οι αποκρίσεις του κυκλώματος προκύπτουν ως εξής:

Τάση στο ΣΚΣ:



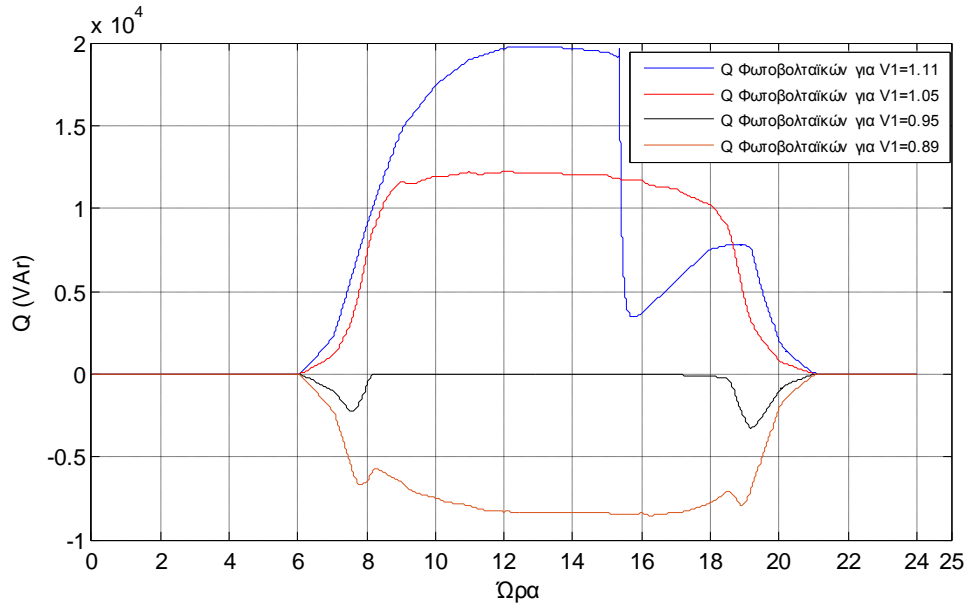
Εικόνα 5.36: Τάση που διαμορφώνεται στο ΣΚΣ όταν υπάρχει εξωτερική μεταβολή τάσης σε κάποιο σημείο.

Ισχύς εξόδου Φωτοβολταϊκών:



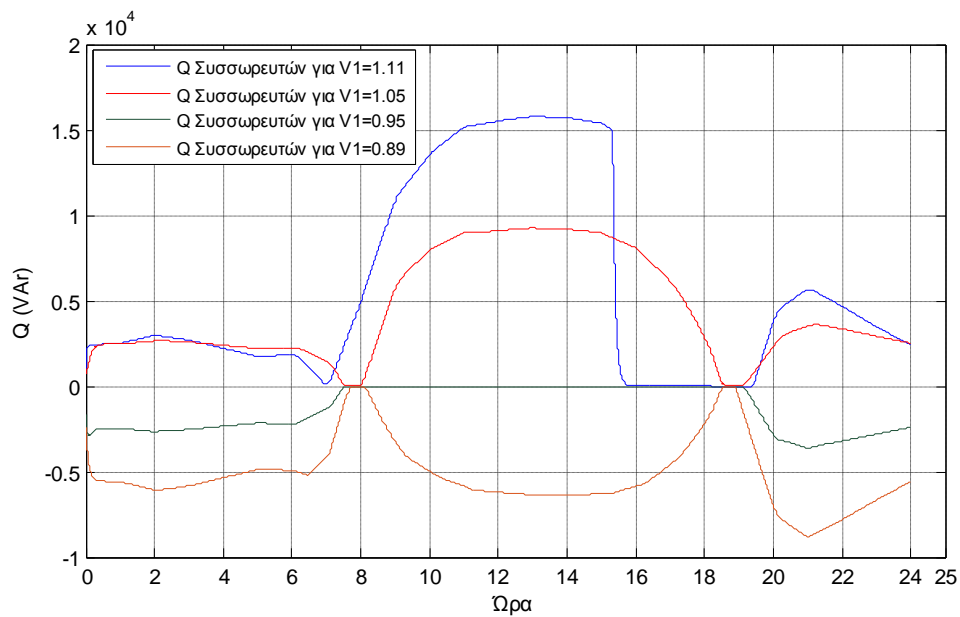
Εικόνα 5.37: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκών όταν υπάρχει εξωτερική μεταβολή τάσης σε κάποιο σημείο.

Άεργος Ισχύς Φωτοβολταϊκών:



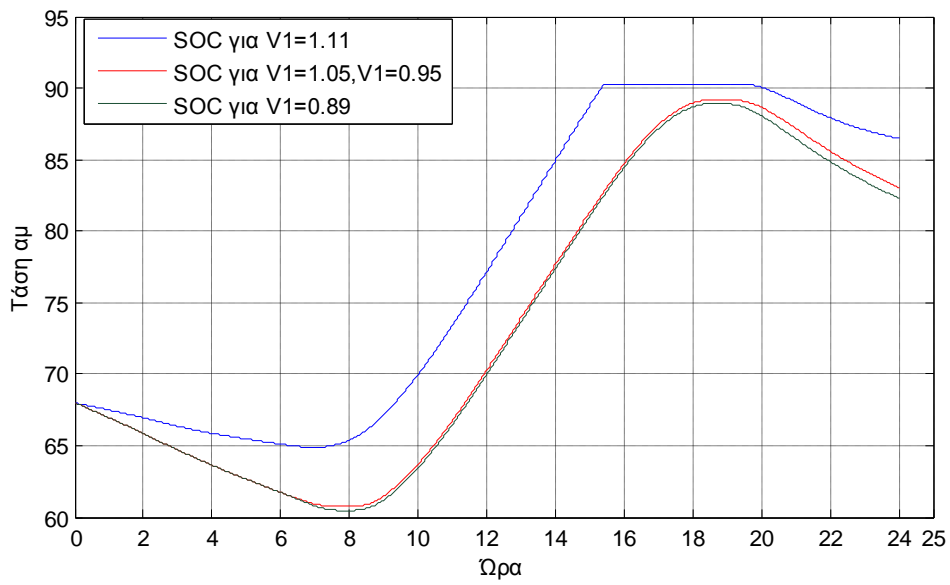
Εικόνα 5.38: Άεργος Ισχύς φωτοβολταϊκών όταν υπάρχει εξωτερική μεταβολή τάσης σε κάποιο σημείο.

Άεργος ισχύς Συσσωρευτών:



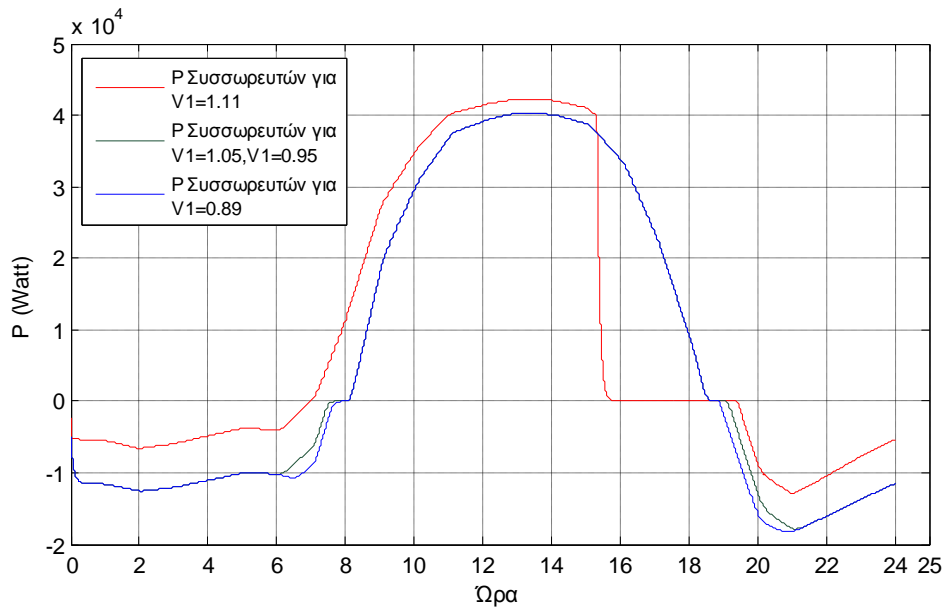
Εικόνα 5.39: Άεργος Ισχύς Συσσωρευτών όταν υπάρχει εξωτερική μεταβολή τάσης σε κάποιο σημείο.

Κατάσταση Φόρτισης:



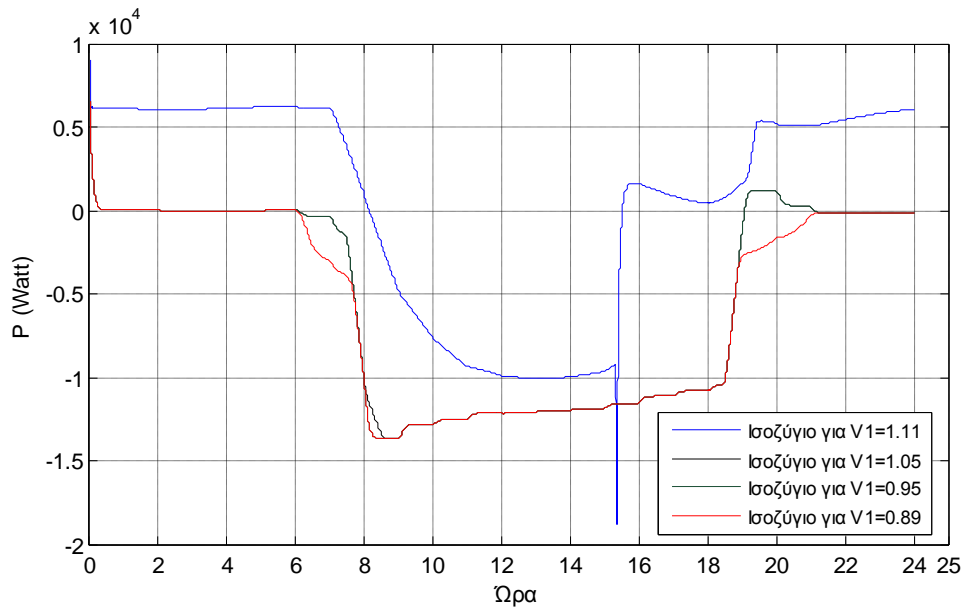
Εικόνα 5.40: Μεταβολή SOC για σενάρια εξωτερικής μεταβολής τάσης σε κάποιο σημείο.

Ισχύς Συσσωρευτών:



Εικόνα 5.41: Ισχύς αποθήκευσης όταν υπάρχει εξωτερική μεταβολή τάσης σε κάποιο σημείο.

Ανάστροφη ροή ισχύος:



Εικόνα 5.42: Ανταλλαγή Ισχύος με το δίκτυο όταν υπάρχει εξωτερική μεταβολή σε κάποιο σημείο.

Είναι ξεκάθαρο από τα διαγράμματα ότι σε κάθε περίπτωση όλες οι μορφές ελέγχου τείνουν να βοηθήσουν στην εξάλειψη του προβλήματος.

5.2.2 Προσομοίωση δικτύου με πολλούς παραγωγούς - καταναλωτές.

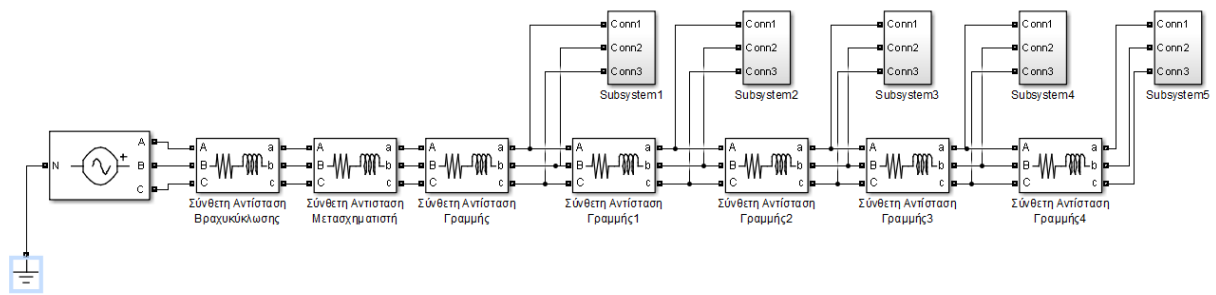
Για να αποτυπωθεί καλύτερα ο ρόλος της ιδιοκατανάλωσης σε ένα ευρύτερο δίκτυο, θα εξεταστεί το παράδειγμα ενός ακτινικού δικτύου με 5 οικιακές εγκαταστάσεις με συνδυασμό παραγωγής φωτοβολταϊκών και αποθήκευσης.

Οι αποστάσεις των γραμμών μεταξύ των διαδοχικών εγκαταστάσεων, καθώς και μεταξύ της πρώτης εγκατάστασης και του μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ θα θεωρηθούν για λόγους απλότητας ίσες μεταξύ τους (200m), και τα υπόλοιπα τεχνικά στοιχεία του δικτύου δεν θα μεταβληθούν.

Τα στοιχεία της νέας σύνθετης αντίστασης γραμμής μεταξύ δύο διαδοχικών εγκαταστάσεων είναι:

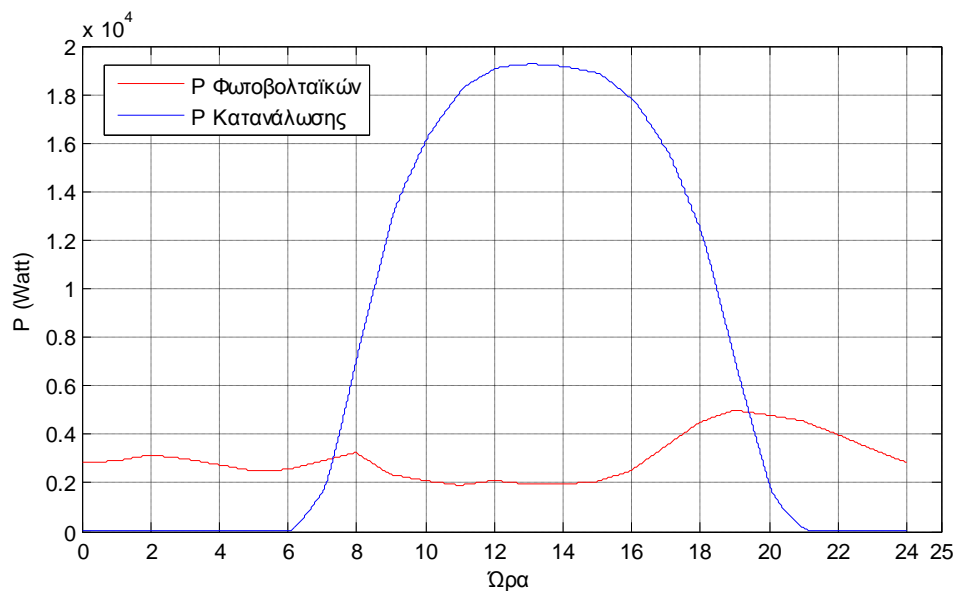
$$R_L = 0.2 \cdot 0.574 = 0,1148 \Omega$$

$$X_L = 0.2 \cdot 0.294 = 0,0588 \Omega$$



Εικόνα 5.43: Το νέο δίκτυο.

Καθώς το σενάριο που θα εξεταστεί θα είναι πάλι αυτό της χαμηλής κατανάλωσης σε συνδυασμό με υψηλή παραγωγή, θα επιλεγούν αντίστοιχα μεγέθη που να εξυπηρετούν το σενάριο:

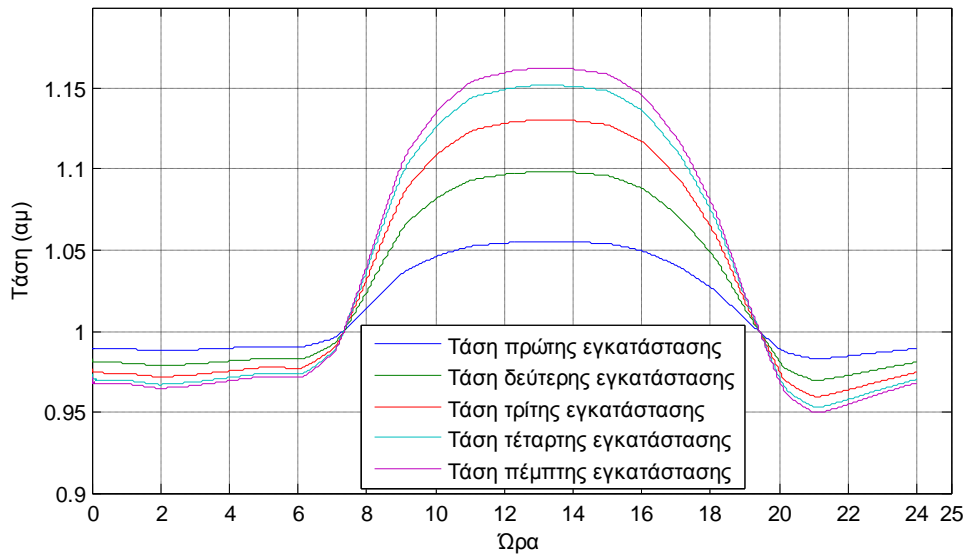


Εικόνα 5.44: Σενάριο παραγωγής – κατανάλωσης για το νέο δίκτυο.

Οι τιμές παραγωγής και κατανάλωσης θα θεωρηθούν κοινές για όλες τις εγκαταστάσεις.

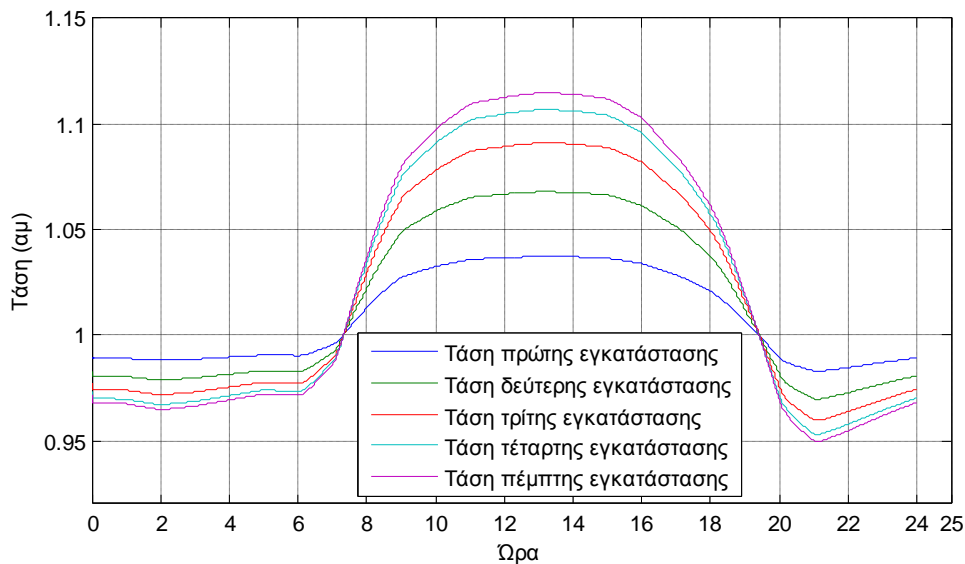
5.2.2.1 Σενάριο χωρίς αποθήκευση ενέργειας

Η απόκριση τάσης του δικτύου σε αυτό το σενάριο, χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, περικοπής ισχύος φωτοβολταϊκών ή ρύθμισης αέργου ισχύος, θα ήταν η εξής:



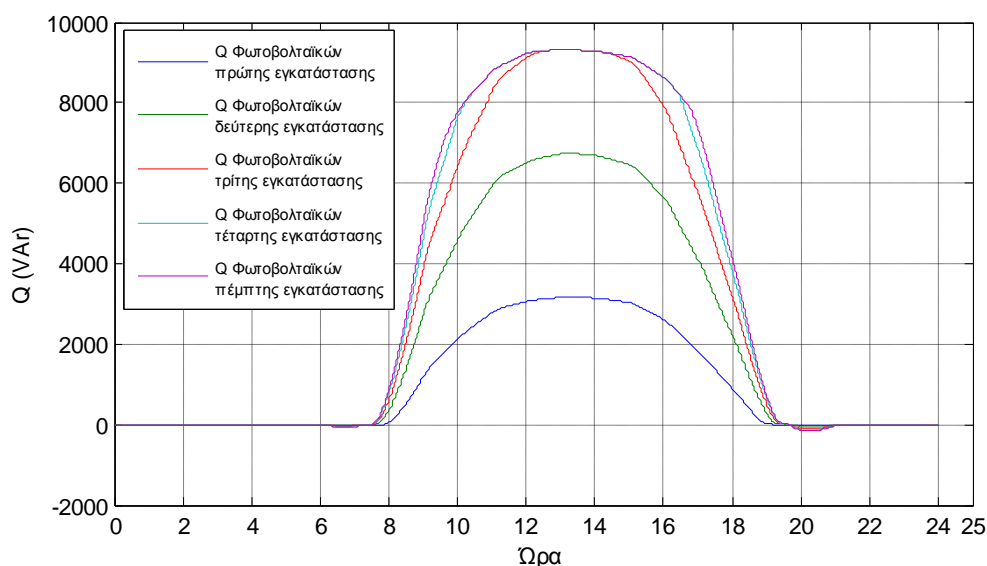
Εικόνα 5.45: Απόκριση τάσης χωρίς εισαγωγή ελέγχων.

Από το διάγραμμα φαίνεται το μέγεθος του προβλήματος που αντιμετωπίζουν οι πιο απομακρυσμένες εγκαταστάσεις στο συγκεκριμένο παράδειγμα, καθώς τρεις από αυτές είναι έξω από το άνω όριο τάσης (1.1 αμ). Η εφαρμογή απορρόφησης αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών με την μέθοδο που ακολουθήθηκε στην περίπτωση της μίας εγκατάστασης και με ίδιες παραμέτρους για όλους τους αντιστροφέις για τον έλεγχο, θα έχει τα εξής αποτελέσματα:



Εικόνα 5.46: Απόκριση τάσης με απορρόφηση αέργου ισχύος.

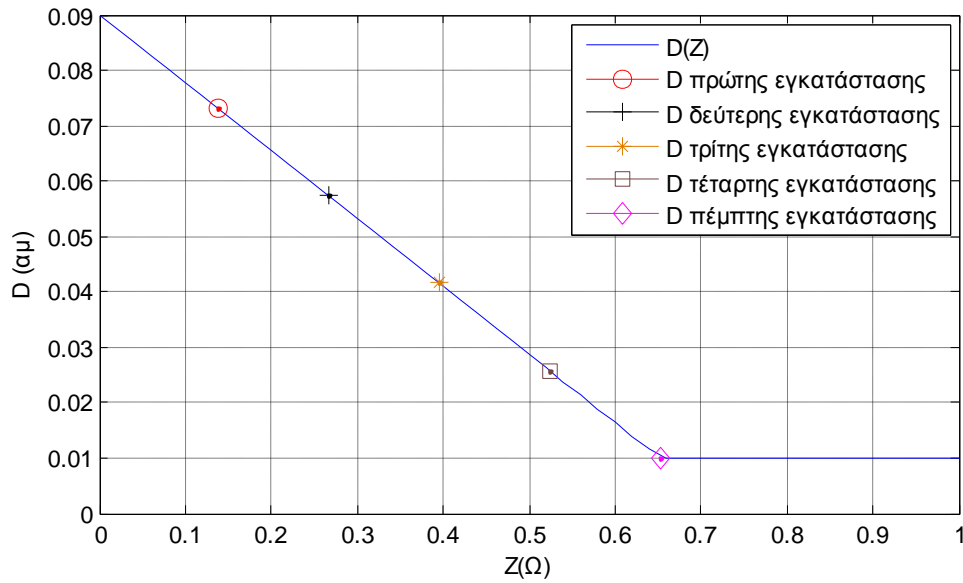
,ενώ η απορρόφηση αέργου ισχύος:



Εικόνα 5.47: Απορρόφηση αέργου ισχύος από φωτοβολταϊκά.

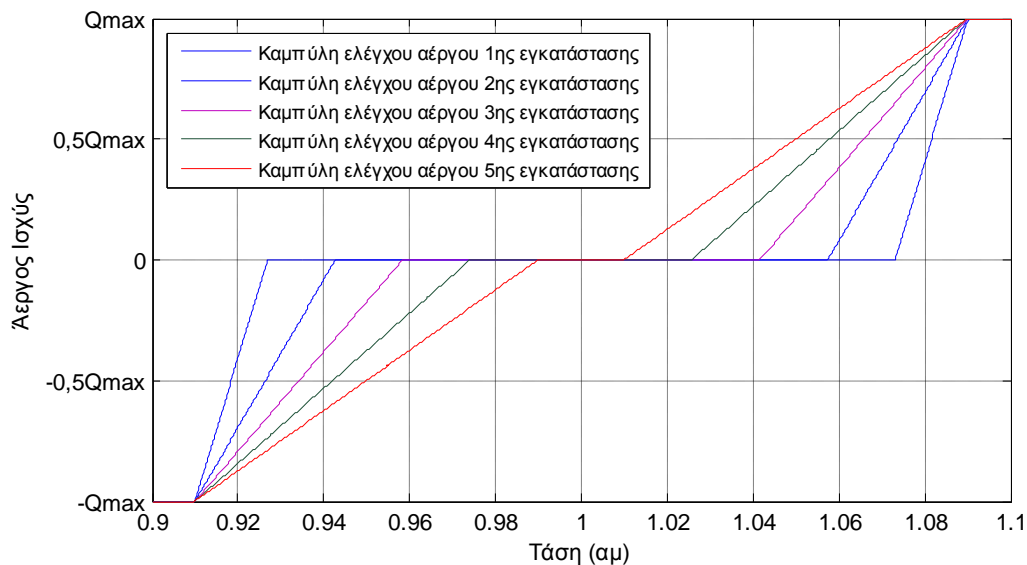
Το διάγραμμα αυτό δείχνει ότι όλες οι εγκαταστάσεις συνεισφέρουν στην αντιμετώπιση του προβλήματος της ανύψωσης τάσης κατά τρόπο που εξαρτάται από την τάση λειτουργίας τους. Ωστόσο, όπως φάνηκε από το κεφάλαιο της ανάλυσης ευαισθησίας τάσης, η απορρόφηση αέργου ισχύος από τις πιο απομακρυσμένες εγκαταστάσεις έχει μεγαλύτερο αποτέλεσμα από ότι από τις πιο κοντινές στον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ, επομένως το αποτέλεσμα της φόρτισης των δεύτερων με μεγάλα ποσά αέργου ισχύος έχει δυσανάλογα μικρά αποτελέσματα, κάνοντας τον έλεγχο ενδεχομένως ασύμφορο για αυτούς. Ταυτόχρονα όμως, η τάση των σημείων αυτών δεν αναμένεται να παρουσιάσει μεγάλες αυξομειώσεις κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους, σε αντίθεση με τους απομακρυσμένους αντιστροφείς. Έτσι, όπως προκύπτει από τις καμπύλες του ελέγχου, οι αντιστροφείς που βρίσκονται πιο μακριά στο δίκτυο θα κληθούν να συμμετάσχουν κατά πολύ μεγαλύτερο ποσοστό στην αντιμετώπιση του προβλήματος και να περικόψουν πολύ μεγαλύτερα ποσά ενεργού ισχύος φωτοβολταϊκών, διαμορφώνοντας μια άδικη κατανομή της λύσης του προβλήματος. Αυτά τα δύο διαφορετικά φαινόμενα διαμορφώνουν μια αντικρουόμενη λογική, και έτσι η απόφαση για την μορφή ελέγχου ενδεχομένως να εναπόκειται στους ιδιοκτήτες των εγκαταστάσεων. Για το παρόν παράδειγμα πάντως, θα προκριθεί η τεχνικά πιο συμφέρουσα λύση, με τους κοντινούς στον μετασχηματιστή αντιστροφείς να ελαφρύνονται σε σχέση με τα ποσά αέργου ισχύος που καλούνται να απορροφήσουν.

Ο τρόπος για αυτό είναι αυτός που περιγράφεται στην αναλυτική περιγραφή της παρούσας μεθόδου ρύθμισης αέργου ισχύος στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο υπολογισμού του dead band στο παρόν δίκτυο, προκύπτει η εξής συνάρτηση για τα dead band σε σχέση με την αντίσταση, καθώς και οι τιμές του dead band που αντιστοιχεί σε κάθε εγκατάσταση:



Εικόνα 5.48: Συνάρτηση D σε σχέση με την αντίσταση βραχυκύκλωσης του σημείου που βρίσκεται.

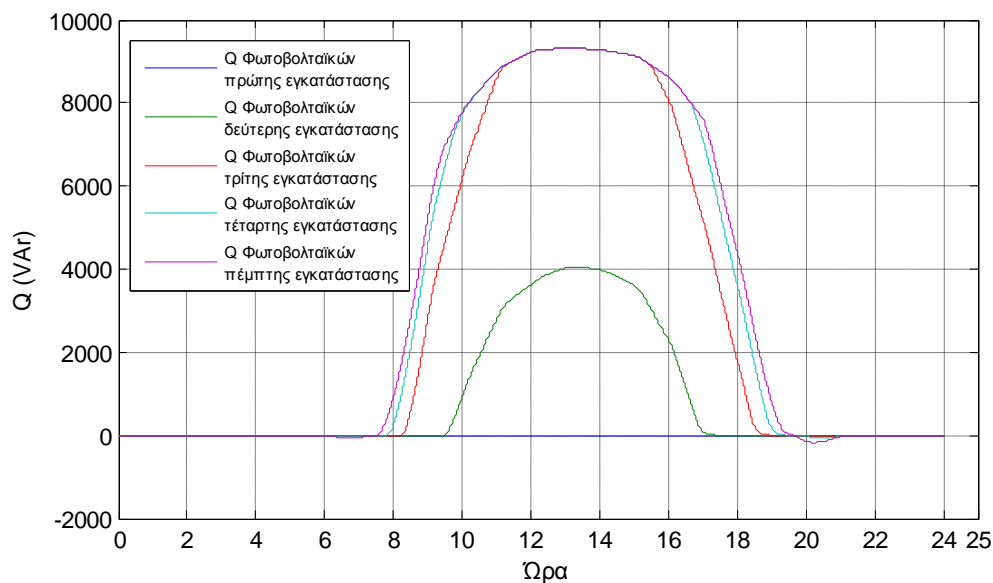
Με την τελική καμπύλη $Q(U)$ για κάθε εγκατάσταση να προκύπτει:



Εικόνα 5.49: Συνάρτηση $Q(U)$ με εφαρμογή των D που προκύπτουν στον έλεγχο της αέργου ισχύος.

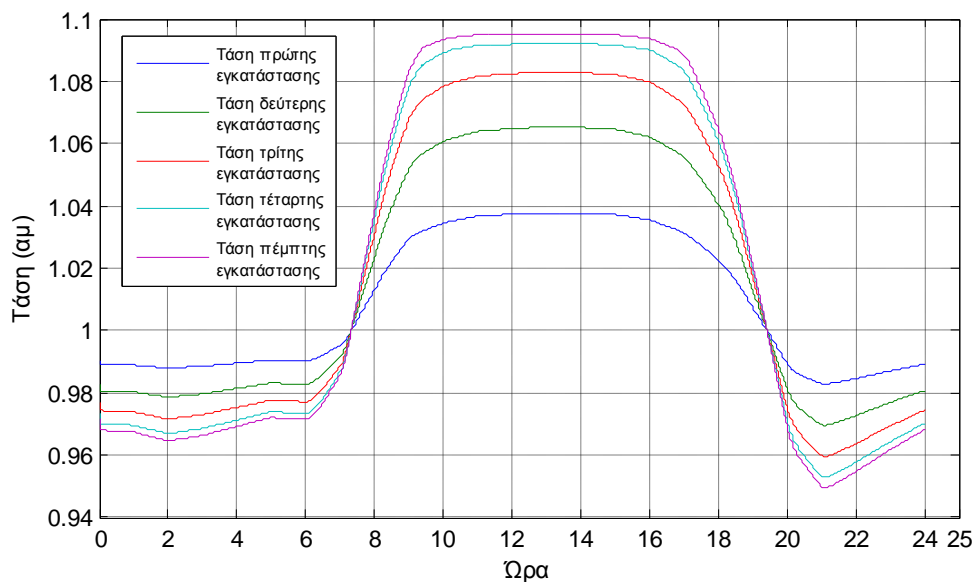
Ο κώδικας για τον υπολογισμό του dead band παρατίθεται στο παράρτημα.

Έτσι, η νέα καμπύλη της απορρόφησης αέργου ισχύος προκύπτει ως εξής:



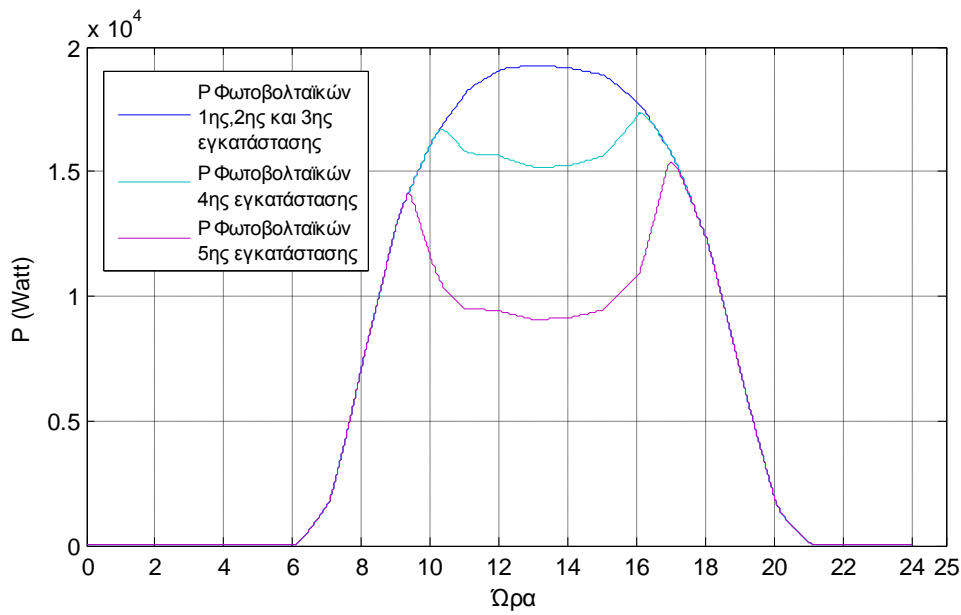
Εικόνα 5.50: Νέα απορρόφηση αέργου ισχύος.

Η εφαρμογή του ελέγχου αέργου ισχύος βελτίωσε την τιμή της τάσης των εγκαταστάσεων, ωστόσο 2 από αυτές συνεχίζουν να λειτουργούν έξω από το όριο τάσης λειτουργίας. Έτσι, το επόμενο αναγκαστικό βήμα θα είναι η περικοπή ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Το αποτέλεσμα για την τιμή της τάσης που προκύπτει θα είναι το εξής:



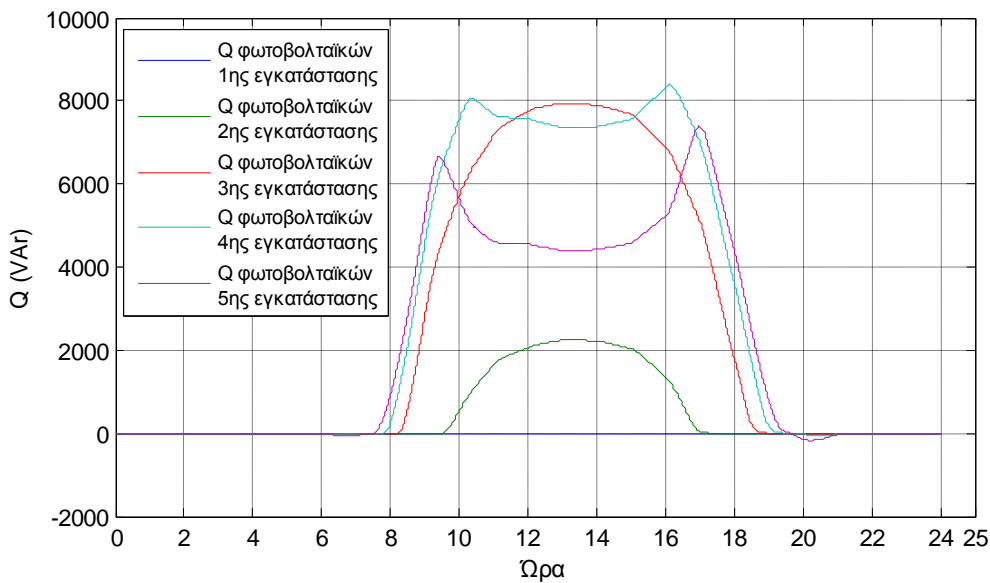
Εικόνα 5.51: Απόκριση τάσης με *Power Curtailment*.

,και η έξοδος των φωτοβολταϊκών προκύπτει ως εξής:



Εικόνα 5.52: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκών κάθε εγκατάστασης.

,όπου φαίνεται το πώς οι απομακρυσμένες εγκαταστάσεις υφίστανται τις μεγαλύτερες απώλειες ισχύος.



Εικόνα 5.53: Απορρόφηση αέργου ισχύος με ύπαρξη Power Curtailment.

5.2.2.2 Προσθήκη αποθηκευτικών διατάξεων:

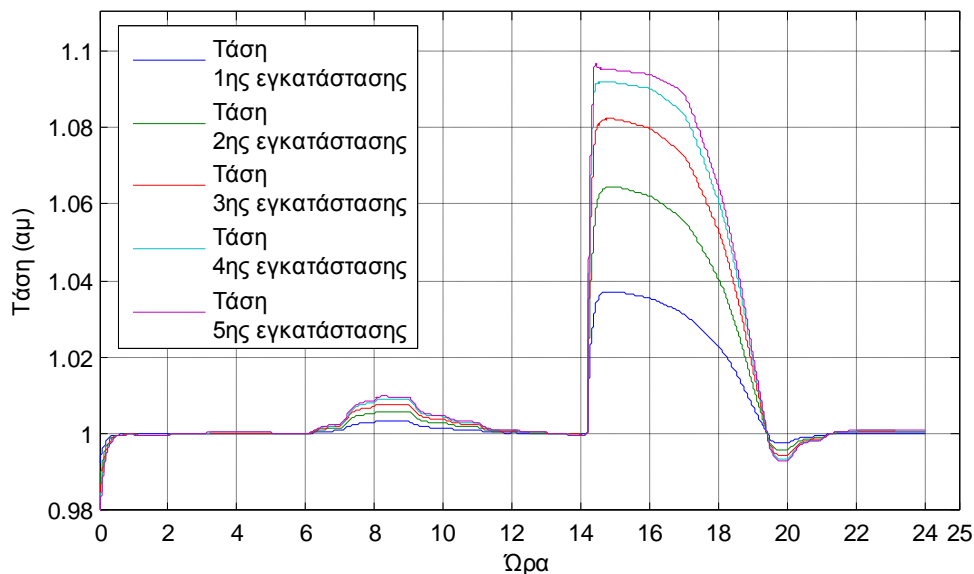
Σε αυτό το σημείο θα φανεί η πραγματική σημασία της ιδιοκατανάλωσης. Σε ένα δίκτυο όπως αυτό που μελετάται εδώ, η ανάστροφη ροή ισχύος από παραγωγούς προς το δίκτυο προκαλεί ανύψωση τάσης στο σημείο σύνδεσής τους. Σε περίπτωση λοιπόν πολλών παραγωγών, το

φαινόμενο ανύψωσης τάσης σε κάποια εγκατάσταση αυξάνει την τάση που βλέπει και η επόμενη εγκατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα αθροιστικό φαινόμενο που οδηγεί τους παραγωγούς που βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία σε έντονη ανύψωση τάσης, και περικοπή φωτοβολταϊκής ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία άδικη κατανομή της αντιμετώπισης του φαινομένου, καθώς οι απομακρυσμένες εγκαταστάσεις υφίστανται μεγάλη απώλεια ισχύος, ενώ οι κοντινές δεν υφίστανται κανέναν περιορισμό.

Η εφαρμογή της ιδιοκατανάλωσης στο δίκτυο θα οδηγήσει τους παραγωγούς – καταναλωτές να ελαχιστοποιήσουν την ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, ακόμα και σε μία γραμμή με πολλές εγκαταστάσεις που εφαρμόζουν ιδιοκατανάλωση, η μεταβολή της τάσης μπορεί να είναι μηδαμινή ή πολύ κοντά στην ονομαστική. Έτσι εξασφαλίζεται ότι οποιαδήποτε αύξηση της διείδυσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής δεν θα διαταράσσει το επίπεδο τάσης, ούτε και θα απαιτεί πιθανές επεκτάσεις δικτύου.

Σαν πρώτο σενάριο, θα προσομοιωθεί το ενδεχόμενο της απόλυτης ιδιοκατανάλωσης, δηλαδή με $P_{diff} = 0$.

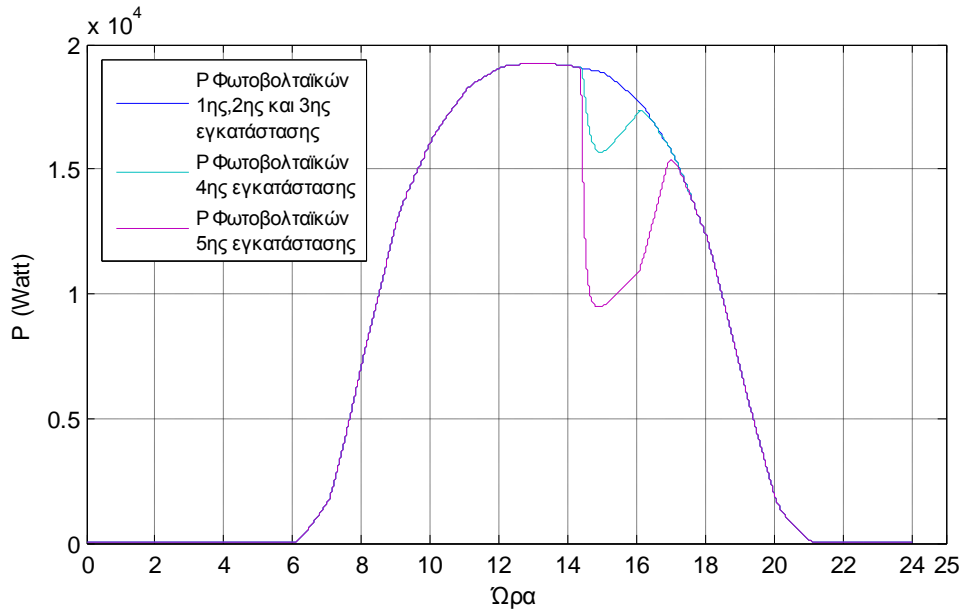
Η τάση θα προκύπτει:



Εικόνα 5.54: Απόκριση τάσης με εφαρμογή αποθήκευσης.

Φαίνεται λοιπόν καθαρά το πώς η ιδιοκατανάλωση διατηρεί σταθερό το επίπεδο της τάσης, με τις μικρές μετατοπίσεις από την ονομαστική τάση να οφείλονται στην καθυστερημένη απόκριση λόγω των φίλτρων. Αυτό αναιρείται την στιγμή που οι συσσωρευτές φτάσουν σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο φόρτισης, οπότε η τάση ανυψώνεται και το κύκλωμα επιστρέφει στις συνθήκες λειτουργίας που αναλύθηκαν πριν.

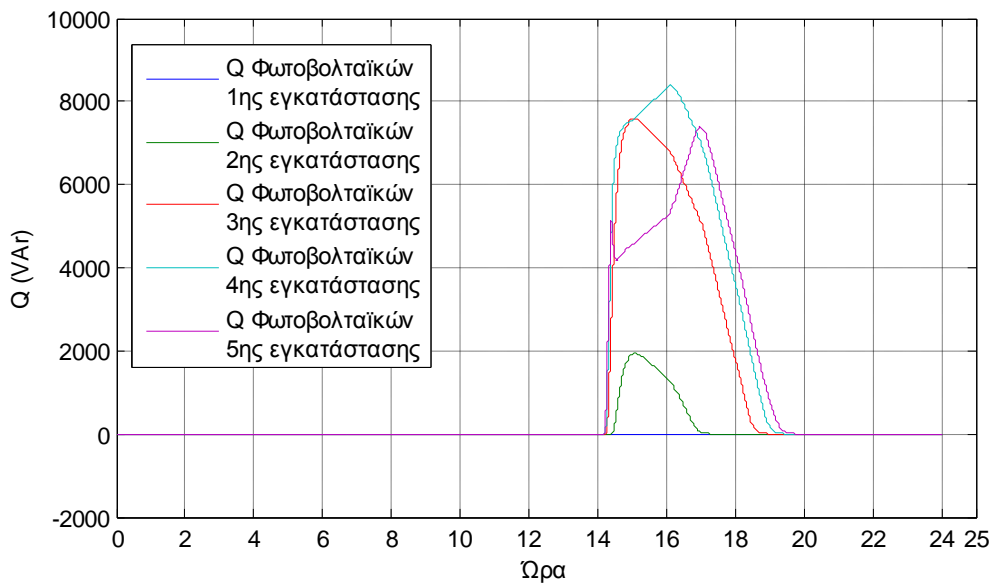
Η νέα έξοδος ισχύος των φωτοβολταϊκών φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 5.55: Περικοπή Ισχύος με εφαρμογή αποθήκευσης.

Φαίνεται καθαρά ότι οι απώλειες των απομακρυσμένων παραγωγών έχουν μειωθεί σημαντικά, και συνίστανται μόνο στην απώλεια ισχύος λόγω της περικοπής ισχύος μετά την φόρτιση των συσσωρευτών.

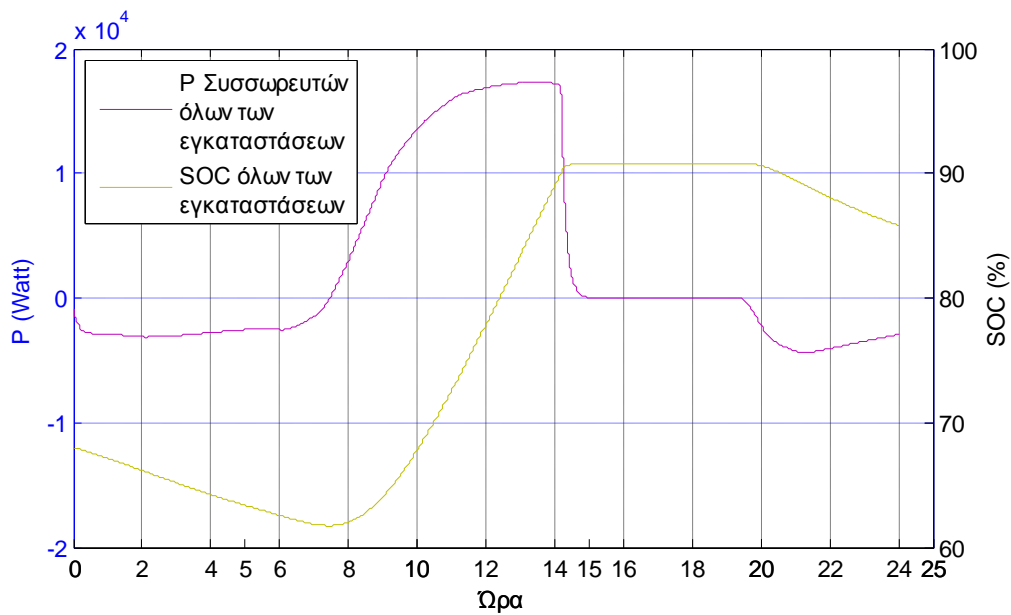
Ακολουθεί η παραγωγή αέργου ισχύος φωτοβολταϊκών:



Εικόνα 5.56: Απορρόφηση αέργου ισχύος από φωτοβολταϊκά με εφαρμογή αποθήκευσης.

,ενώ η άεργος ισχύς των συσσωρευτών θα είναι μηδέν(η τάση παραμένει κοντά στην ονομαστική στην διάρκεια λειτουργίας των μπαταριών).

Η ισχύς των συσσωρευτών θα είναι για κάθε εγκατάσταση:

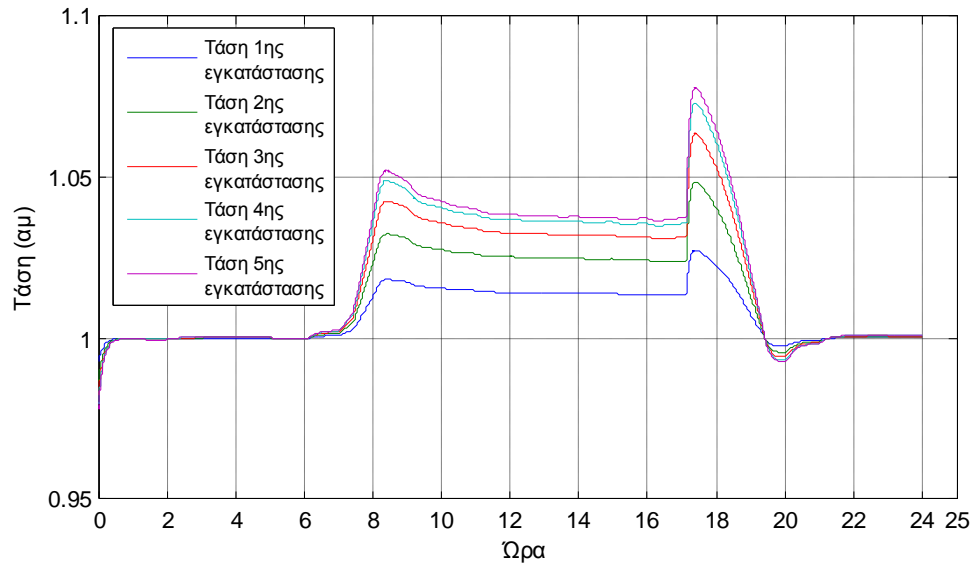


Εικόνα 5.57: Αποθηκευόμενη ισχύς και μεταβολή της κατάστασης φόρτισης.

Αν και η ιδιοκατανάλωση έλυσε εν πολλοίς το πρόβλημα της απώλειας ισχύος, το γεγονός ότι η παραγωγή ήταν πολύ μεγαλύτερη από την κατανάλωση επέφερε γρήγορη φόρτιση των συσσωρευτών, και κατά συνέπεια για λίγη ώρα το φαινόμενο της περικοπής ισχύος επανήλθε. Έτσι, θα ήταν ίσως χρήσιμος ο ορισμός του P_{diff} σε μία μεγαλύτερη τιμή, τέτοια ώστε να μην θεωρείται σημαντική η ανάστροφη ροή ισχύος που θα προέκυπτε, αλλά και να οδηγούσε τους συσσωρευτές σε μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας μέσα στην μέρα. Επιλέγεται η τιμή $P_{diff} = 5kW$.

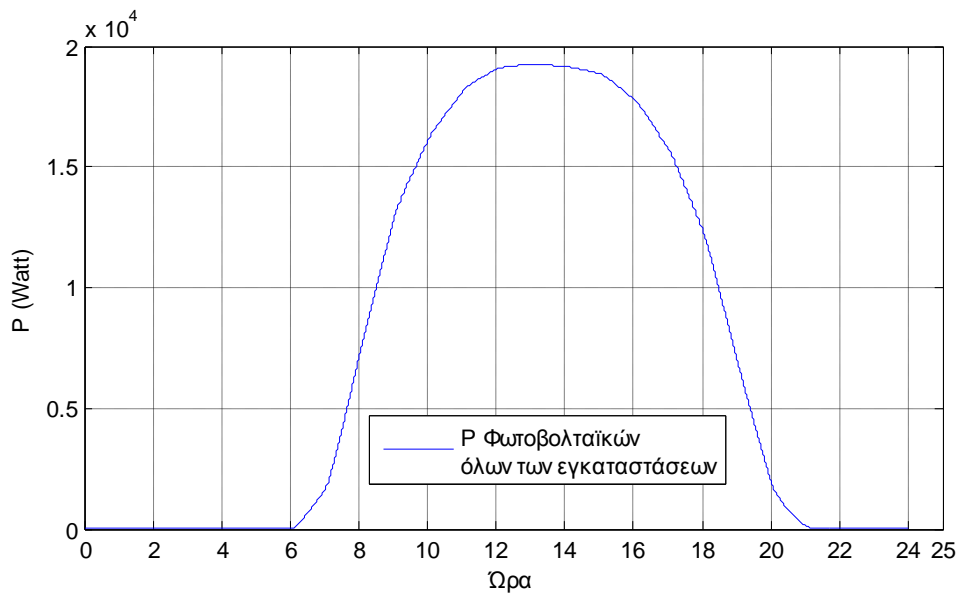
Τα αποτελέσματα προκύπτουν ως εξής:

Τάση:



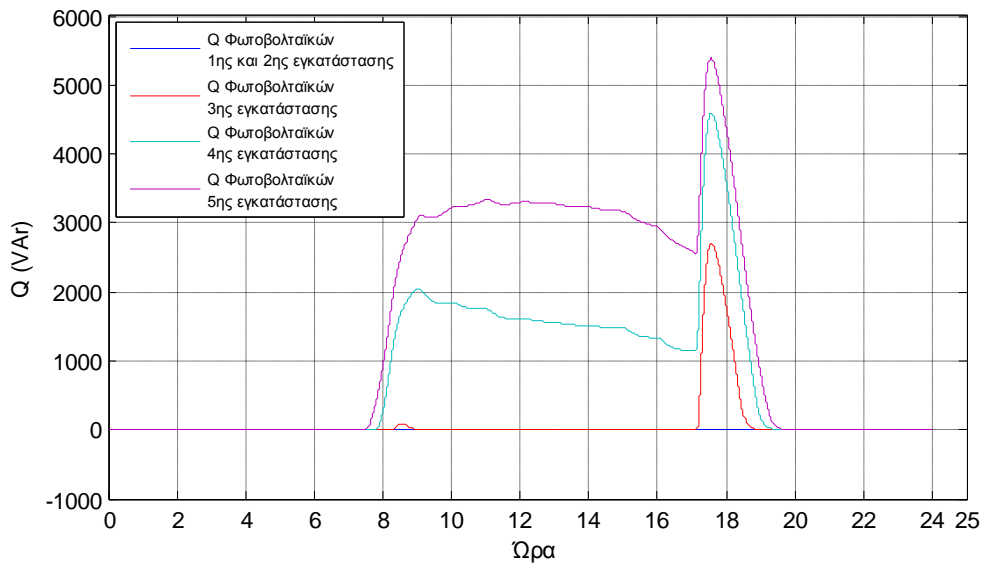
Εικόνα 5.58: Απόκριση τάσης με εφαρμογή $P_{diff}=5kW$.

Η Ισχύς των Φωτοβολταϊκών πλέον δεν χρειάζεται περικοπή:



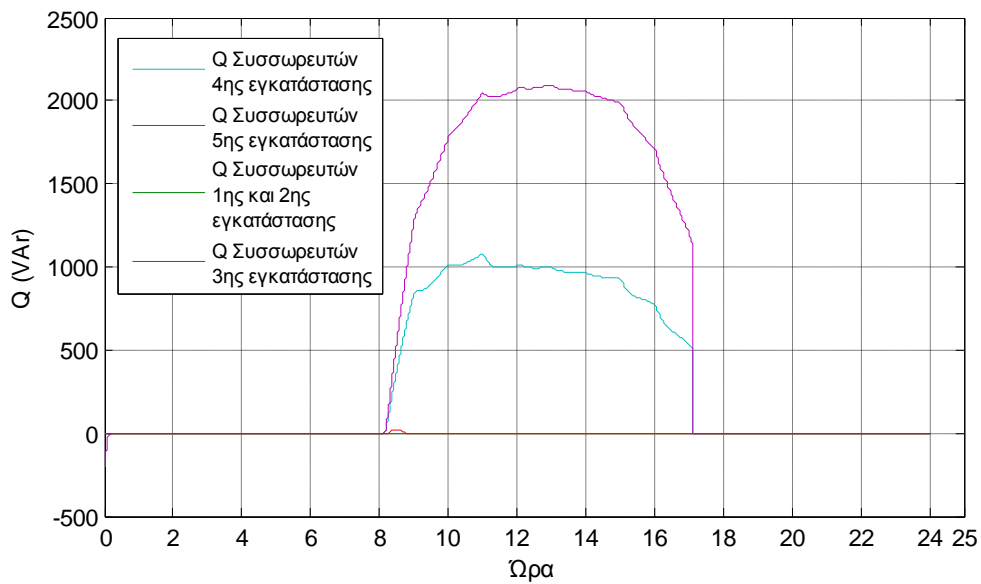
Εικόνα 5.59: Ισχύς φωτοβολταϊκών με εφαρμογή $P_{diff}=5kW$.

Άεργος Ισχύς Φωτοβολταϊκών:



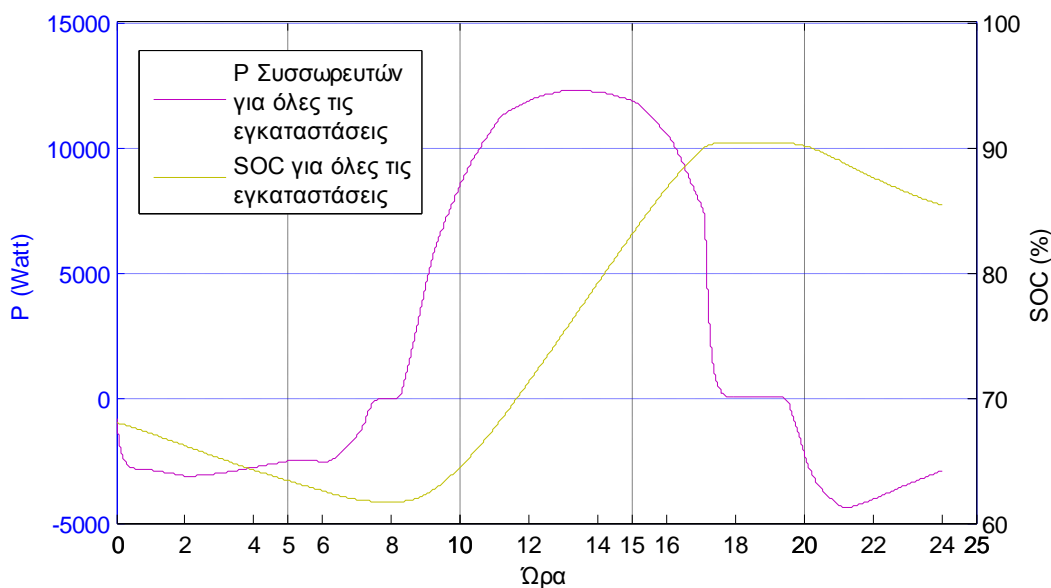
Εικόνα 5.60: Άεργος ισχύς φωτοβολταϊκών με εφαρμογή $P_{diff}=5kW$.

Άεργος Ισχύς Συσσωρευτών:



Εικόνα 5.61: Άεργος ισχύς συσσωρευτών με εφαρμογή $P_{diff}=5kW$.

Κατάσταση Φόρτισης και Ισχύς Συσσωρευτών:



Εικόνα 5.62: Αποθηκευόμενη ισχύς και κατάσταση φόρτισης.

Η βελτίωση είναι σαφής στην λειτουργία του δικτύου, καθώς πλέον δεν υπάρχει η παραμικρή απώλεια ισχύος σε κάποια από τις εγκαταστάσεις. Ωστόσο φυσικά, η απομάκρυνση από την έννοια της αυστηρής ιδιοκατανάλωσης οδήγησε την τάση λειτουργίας του δικτύου να ανέβει σχετικά (αν και ο συντονισμένος ταυτόχρονος έλεγχος αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών και των συσσωρευτών συγκράτησε κάπως το φαινόμενο). Αυτό συνεπάγεται ότι αν στην συνέχεια τοποθετούνταν κι άλλες εγκαταστάσεις σε σημεία του δικτύου, πιθανόν η αύξηση της συνολικής ροής ισχύος να έθετε πάλι την τάση εκτός ορίων. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, αν το P_{diff} δεν είναι αυστηρά καθορισμένο αλλά αποτέλεσμα μίας πρόβλεψης παραγωγής και φορτίου, τότε θα μπορούσε να είναι υψηλό τις μέρες με πρόβλεψη για μεγάλη παραγωγή σε σχέση με το φορτίο και χαμηλό σε άλλη περίπτωση, φεύγοντας έτσι από τον βασικό πυρήνα της ιδιοκατανάλωσης μόνο τις ημέρες που θα αναμενόταν να υπάρξει πρόβλημα.

Στις παραπάνω υλοποιήσεις, βασικός γνώμονας που ακολουθήθηκε ήταν η συμμετοχή όλων των παραγωγών στην λύση του προβλήματος ανύψωσης τάσης, αλλά με τρόπο που βαρύνει κυρίως τους απομακρυσμένους παραγωγούς. Αυτή η επιλογή έχει το πλεονέκτημα της καλύτερη συνολικά τεχνικά προσέγγισης βάσει της ανάλυσης ευαισθησίας τάσης, ωστόσο είναι πολύ πιθανό σε μία πραγματική περίπτωση παραγωγών αυτό να μην είναι θεμιτό, και να αποφασίζεται όλοι να συμμετέχουν στην ρύθμιση εξ ίσου. Αυτό θα σήμαινε ίσες απώλειες για όλους τους παραγωγούς ανεξαρτήτως θέσης στο δίκτυο.

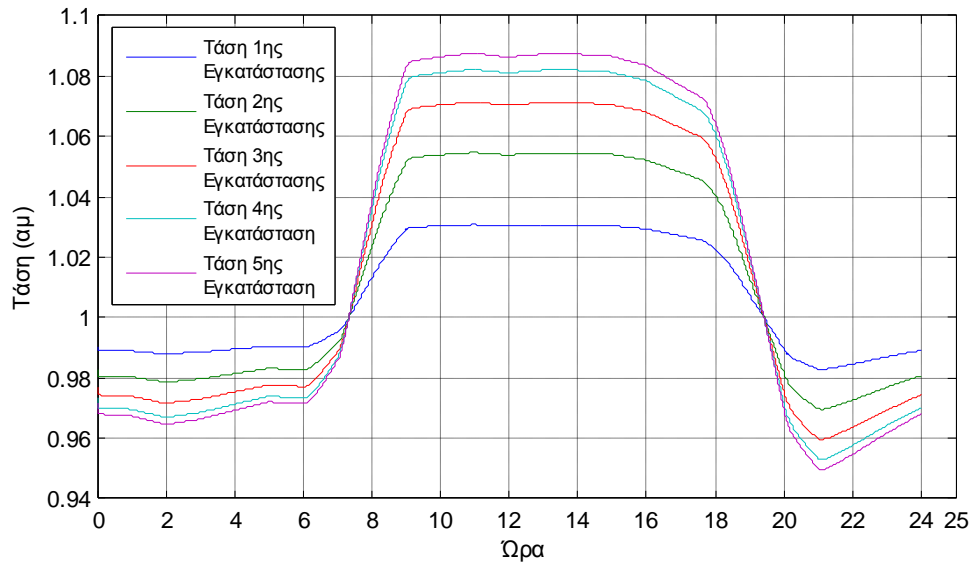
Θα εξεταστούν, με βάση τις λογικές που περιγράφονται στο [40] οι περιπτώσεις ισοκατανομής όπου δεν υπάρχουν αποθηκευτικές διατάξεις και απλά περικόπτεται σε μόνιμη βάση η ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών, και που υπάρχουν αποθηκευτικές διατάξεις.

Στην πρώτη περίπτωση, η λειτουργία που περιγράφεται συνοψίζεται στην μόνιμη περικοπή ισχύος των φωτοβολταϊκών στο 70% της εγκατεστημένης ισχύος τους, μειώνοντας έτσι μόνιμα

την πιθανότητα ανάστροφης ροής ισχύς, με ταυτόχρονο έλεγχο της αέργου ισχύος του αντιστροφέα.

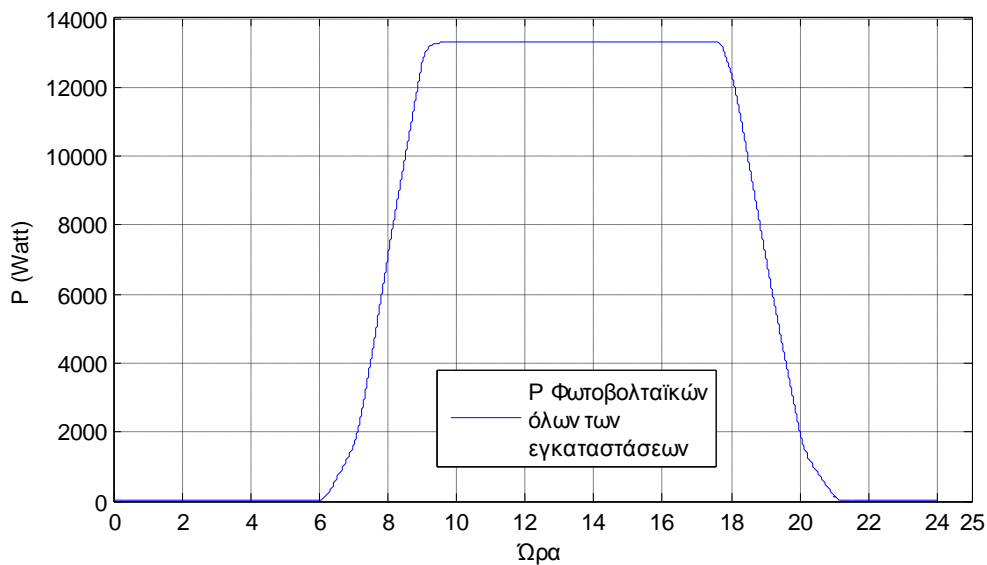
Για το δίκτυο που αναλύεται, προκύπτει ότι η εγκατεστημένη ισχύς είναι 19 kW_p .

Η απόκριση τάσης προκύπτει:



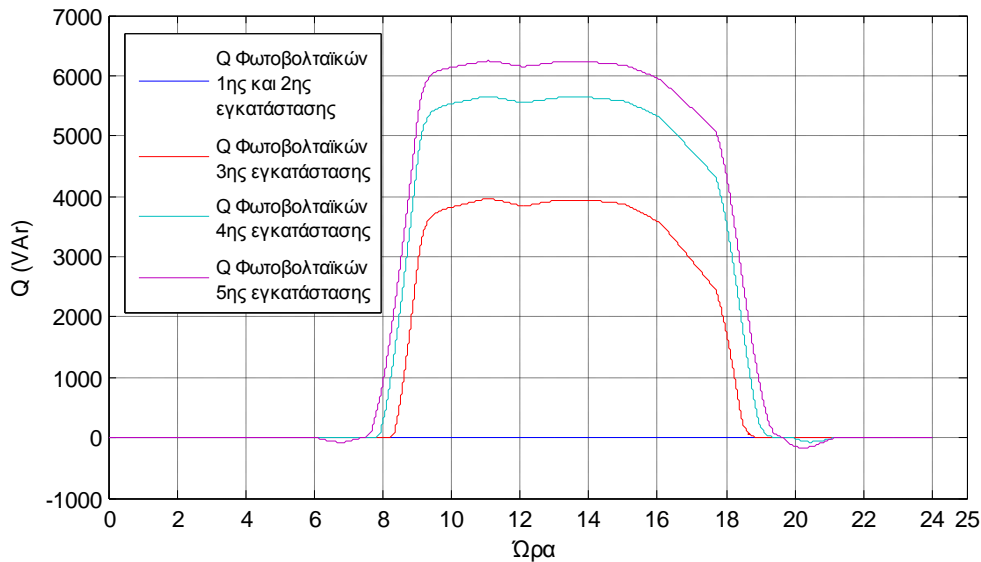
Εικόνα 5.63: Τάση χωρίς αποθήκευση, με μόνιμη περικοπή στο 70% της P_{stc} .

η ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών:



Εικόνα 5.64: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκών με μόνιμη περικοπή στο 70% της P_{stc}

,και η αέργος ισχύς:

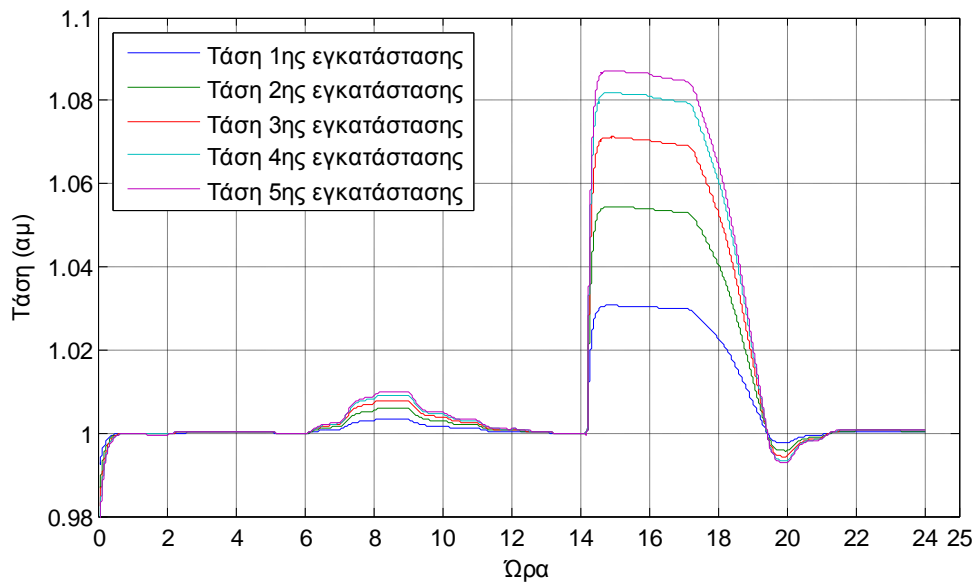


Εικόνα 5.65: Άεργος ισχύς φωτοβολταϊκών με μόνιμη περικοπή στο 70% της P_{stc} .

Φαίνεται λοιπόν ότι το βασικό μέλημα για ισοκατανομή της περικοπής ισχύος των φωτοβολταϊκών καλύπτεται πλήρως. Η συνολική απώλεια ισχύος του δικτύου είναι μεγαλύτερη από την εφαρμογή περικοπής με προτεραιότητα στις εγκαταστάσεις που έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία τάσης, αλλά εφαρμόζεται με δίκαια κατανεμημένο τρόπο εξ ίσου σε όλους τους παραγωγούς του δικτύου. Η άεργος ισχύς δεν έχει την ίδια ισοκατανομή στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αλλά θα μπορούσε και αυτό να επιτευχθεί με μία άλλη στρατηγική ελεγχου της (όπως με μία καμπύλη $\cos\phi(P)$).

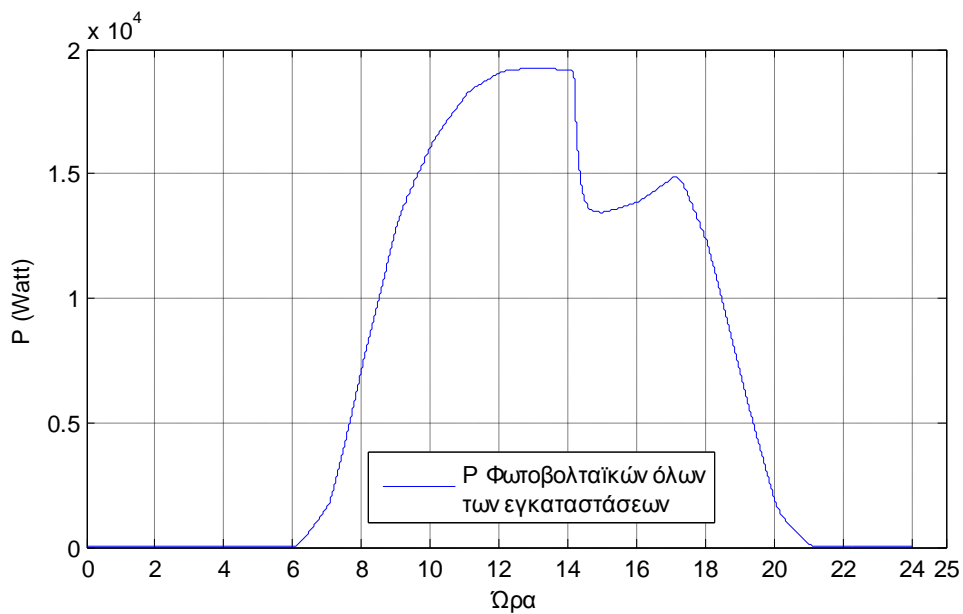
Σε περίπτωση ύπαρξης δυνατότητας αποθήκευσης, στο [40] προτείνεται η λειτουργία των συσσωρευτών σε πλήρη ιδιοκατανάλωση, και όταν φτάσουν στο άνω όριο φόρτισης, τα φωτοβολταϊκά περικόπτουν την ισχύ τους στο 60% της μέγιστης τιμής τους συν την τιμή του φορτίου, όταν η παραγωγή τους υπερβαίνει αυτό το άθροισμα. Προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

Τάση Λειτουργίας:



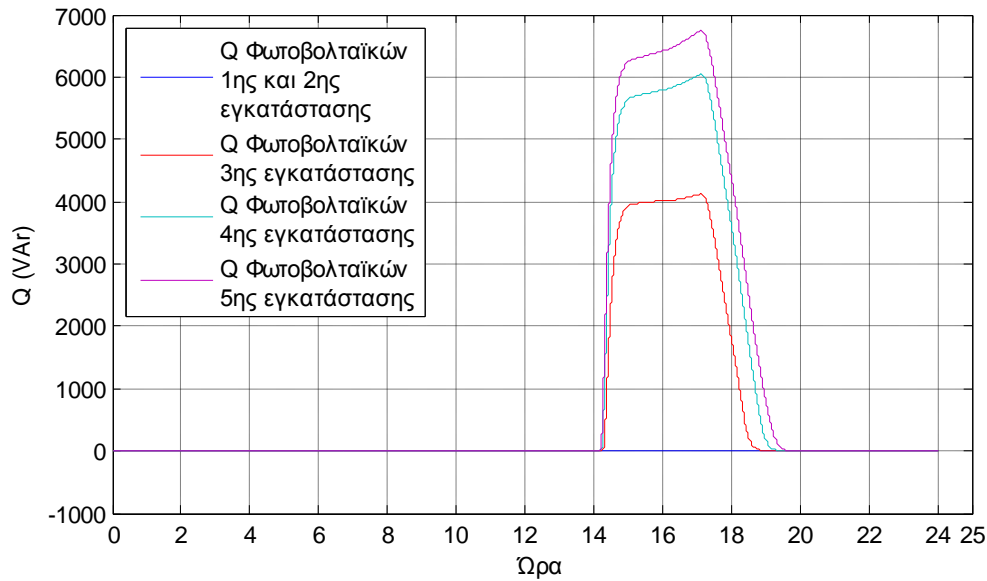
Εικόνα 5.66: Τάση με στρατηγική ιδιοκατανάλωσης και περιορισμό ανάστροφης ροής ισχύος στο 60% της P_{stc} .

Ισχύς Φωτοβολταϊκών:



Εικόνα 5.67: Ισχύς φωτοβολταϊκών με στρατηγική ιδιοκατανάλωσης και περιορισμό ανάστροφης ροής ισχύος στο 60% της P_{stc} .

Άεργος Ισχύς Φωτοβολταϊκών:



Εικόνα 5.68: Άεργος ισχύς φωτοβολταϊκών με στρατηγική ιδιοκατανάλωσης και περιορισμό ανάστροφης ροής ισχύος στο 60% της P_{stc} .

Γίνεται ξεκάθαρη από την σύγκριση των δύο τελευταίων σεναρίων η επίτευξη μείωσης της απώλειας ισχύος μέσα από την ύπαρξη δυνατότητας αποθήκευσης ενέργειας. Μάλιστα η διαφορά αναμένεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη σε μέρες με πιο ισορροπημένη σχέση παραγωγής - κατανάλωσης, όπου οι συσσωρευτές δεν θα φορτίζονται τόσο νωρίς στην διάρκεια της ημέρας, αλλά και αν συνέβαινε αυτό η περικοπή ισχύος δεν θα ήταν δεδομένη αν το φορτίο ήταν σχετικά υψηλό. Σε κάθε περίπτωση, είναι σαφές ότι η απώλεια ισχύος αυτών των σεναρίων είναι συνολικά μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα σενάρια με προτεραιότητα στον έλεγχο των απομακρυσμένων εγκαταστάσεων, όμως υπάρχει το κέρδος της ισοκατανομής των απωλειών.

6. Συμπεράσματα – Προοπτικές συνέχισης:

Το φαινόμενο ανύψωσης τάσης λόγω υψηλής διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής είναι ένα μείζον θέμα το οποίο καλούνται να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα προκειμένου να συνεχίσουν να αυξάνουν την ποσότητά της και να μειώνουν την εξάρτησή τους από τα συμβατικά μέσα παραγωγής. Οι συμβατικές επιλογές αντιμετώπισης του φαινομένου της ανύψωσης τάσης (όπως η περικοπή ενεργού ισχύος και η ρύθμιση της απορρόφησης της αέργου ισχύος) δίνουν σημαντικές λύσεις στο πρόβλημα για χαμηλά ποσοστά διείσδυσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής. Όμως για την επί πλέον επέκτασή της, η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί καταλυτικό παράγοντα.

Η μέχρι σήμερα υψηλή τιμή των αποθηκευτικών διατάξεων καθιστούσε την χρήση τους πολύ περιορισμένη. Η σύγχρονη τάση της στροφής της λογικής της διεσπαρμένης παραγωγής προς την ιδιοκατανάλωση όμως, έχει θέσει την χρήση της αποθήκευσης ενέργειας σε κεντρικό ρόλο, και οι πολιτικές που ακολουθούνται στις τιμολογήσεις της πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η πολιτική των επιδοτήσεων καθώς και η στροφή της αγοράς στην ανάπτυξη οικονομικότερων συστημάτων αποθήκευσης καθιστούν την επένδυση αυτή συνεχώς φιλικότερη και συμφέρουσα.

Η βασική ιδέα της ιδιοκατανάλωσης, που είναι η ελάχιστη δυνατή ανταλλαγή ισχύος με το υπόλοιπο δίκτυο, έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα την αναίρεση των φαινομένων μεταβολής τάσης. Ωστόσο, η πλήρης επίτευξή της υπό οποιεσδήποτε συνθήκες παραγωγής και κατανάλωσης θα απαιτούσε ίσως μία δυσανάλογα μεγάλη επένδυση σε αποθηκευτικά συστήματα, με την διαστασιολόγηση να είναι ενδεχομένως αχρείαστα μεγάλη. Έτσι, για την αποφυγή πρόωρης φόρτισης των συσσωρευτών, η λύση δίνεται με την ρύθμιση του επιπέδου της ιδιοκατανάλωσης σε κατάλληλο βαθμό ώστε να προστατεύεται η διάρκεια λειτουργίας των συσσωρευτών σε μέρες με ακραίες σχέσεις παραγωγής και κατανάλωσης.

Στις προσομοιώσεις που έγιναν σε μοντελοποιημένες περιπτώσεις δικτύων, επιβεβαιώθηκε η συμπεριφορά των ελέγχων για την απλή περίπτωση μίας μοναδικής εγκατάστασης και προέκυψαν τα πλεονεκτήματα που δίνει η ιδιοκατανάλωση σε σχέση με τις στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται στην περικοπή ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών και στην απορρόφηση αέργου ισχύος. Αρχικά επιβεβαιώθηκε η συμπεριφορά των ελέγχων για την απλή περίπτωση μίας μοναδικής εγκατάστασης και στην συνέχεια αποτυπώθηκε η πραγματική αξία της, δηλαδή η συμβολή της σε ένα δίκτυο πολλών παραγωγών. Ενώ χωρίς αποθηκευτικές διατάξεις η επαναφορά του επιπέδου τάσης γινόταν με τρόπο ανισομερή και οικονομικά δυσμενή προς τους απομακρυσμένους παραγωγούς, οι οποίοι ήταν αυτοί που καλούνταν να περικόψουν την παραγωγή τους και έτσι να υφίστανται οικονομική απώλεια πολύ μεγαλύτερη από τους παραγωγούς σε σημεία του δικτύου με μικρή ευαισθησία τάσης, πλέον στην λύση του προβλήματος συμμετέχουν όλες οι εγκαταστάσεις, καθώς αναλαμβάνουν να διατηρούν αμετάβλητη την τάση που βλέπουν όταν είναι εντός ορίων, ενώ περιλαμβάνουν και μηχανισμούς αντιμετώπισης πιθανών ενδεχομένων μεταβολής της σε ακραίο βαθμό, η οποία

μπορεί να συμβαίνει από εξωτερικές μεταβολές. Σε περίπτωση όμως κανονικής λειτουργίας και πλήρους ιδιοκατανάλωσης, η τάση μπορεί να παραμένει σταθερή και κοντά στην ονομαστική για όλη την έκταση του δικτύου, εξασφαλίζοντας έτσι ομαλές συνθήκες λειτουργίας για όλες τις εγκαταστάσεις που συνδέονται σε αυτό.

Σαν επόμενο στάδιο μελέτης γύρω από το θέμα της αποθήκευσης ενέργειας, θα είχε αξία η εξέταση των συγκεκριμένων μορφών ελέγχου σε συνθήκες πιο κοντινές στις πραγματικές, μέσα από την μέθοδο του Power Hardware in Loop. Επίσης, καθώς το κύριο μειονέκτημα μέχρι σήμερα της επένδυσης σε αποθηκευτικές διατάξεις είναι το κόστος τους, θα ήταν χρήσιμη μία αποτίμηση των πιθανών κερδών της επένδυσης στην ιδιοκατανάλωση με βάση πραγματικά δεδομένα, καθώς και μία βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης των αποθηκευτικών διατάξεων ώστε να ανταποκρίνονται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος συνθηκών, με το ελάχιστο κόστος επένδυσης. Σε αυτή την διαδικασία σημαντικό ρόλο θα διαδραματίσει η επέκταση του ελέγχου ώστε να συμπεριλαμβάνει την δυνατότητα πρόβλεψης παραγωγής και φορτίου, ώστε να αναπροσαρμόζει την συμπεριφορά του ανάλογα με τις αναμενόμενες συνθήκες. Σημαντικό είναι ακόμα να επεκταθεί η ισχύς των συγκεκριμένων μορφών ελέγχου και για εφαρμογές διεσπαρμένης παραγωγής πέραν των φωτοβολταϊκών. Τέλος, θα είχε ίσως ενδιαφέρον η εξέταση των συγκεκριμένων αλγορίθμων και σε διαφορετικές τοπολογίες δικτύων, καθώς και η εξέταση της ύπαρξης επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων αντιστροφών με σκοπό την επίτευξη καλύτερης συνεργασίας για την αντιμετώπιση προβλημάτων.

Παράρτημα:

Κώδικας για τον έλεγχο της αποθήκευσης

```
function [Pbat, flag, Pres, flagp] =  
fcn(soc, Ppv, Pload, Vpcc, Vuthres, Vdthres, Pdiff, soc_up, soc_down, D2,  
D5)  
%#codegen  
  
Pres=abs(Ppv)-Pload;  
  
if (Pres>=Pdiff); flagp=1;  
  
elseif ((Pres<Pdiff)&&(Pres>0)); flagp=2;  
  
elseif (Pres<=0); flagp=3;  
  
else flagp=4;  
  
end  
  
if ((Vpcc<=Vuthres-D2)&&(Vpcc>=Vdthres+D5)); flagv=1;  
  
elseif (Vpcc>(Vuthres-D2))&&(Vpcc<Vuthres-(D2/2)); flagv=2;  
  
elseif ((Vpcc>=(Vuthres-(D2/2)))&&(Vpcc<=Vuthres)); flagv=3;  
  
elseif (Vpcc>Vuthres); flagv=4;  
  
elseif ((Vpcc<Vdthres+D5)&&(Vpcc>=Vdthres)); flagv=5;  
  
elseif (Vpcc<Vdthres); flagv=6;  
  
else flagv=7;  
  
end  
  
if ((flagv==1)&&(flagp==1));  
Pbat1=-(Pres-Pdiff); flag=1;  
  
elseif (((flagv==2)&&(flagp==1)));  
Pbat1=(Pdiff/(D2/2))*(Vuthres-(D2/2)-Vpcc)-Pres; flag=2;  
  
elseif ((flagv==5)&&(flagp==1));  
Pbat1=((-(Pres-Pdiff)-Pload)/D5)*(Vpcc-  
Vdthres)+Pload); flag=3;  
  
elseif (((flagv==1)&&(flagp==2)));  
Pbat1=0; flag=4;  
  
elseif ((flagv==5)&&(flagp==2));
```

```

Pbat1=(((-Pload)/D5)*(Vpcc-Vdthres)+Pload);flag=5;

elseif      ((flagv==2)&&(flagp==2));
    Pbat1=(Pres/(D2/2))*(Vuthres-(D2/2)-Vpcc)-Pres;flag=6;

elseif      ((flagv==1)&&(flagp==3));
    Pbat1=-Pres;flag=7;

elseif      ((flagv==5)&&(flagp==3));
    Pbat1=((-Pres-Pload)/D5)*(Vpcc-Vdthres)+Pload);flag=8;

elseif      ((flagv==2)&&(flagp==3));
    Pbat1=-Pres;flag=9;

elseif      ((flagv==3));
    Pbat1=((abs(Ppv)-Pres)/(D2/2))*(Vuthres-Vpcc)-
abs(Ppv);flag=10;

elseif      ((flagv==4));
    Pbat1=-abs(Ppv);flag=11;

elseif      ((flagv==6));
    Pbat1=0;flag=14;

else
    Pbat1=0;flag=15;

end

if          ((soc<soc_up)&&(soc>soc_down));
    Pbat=Pbat1;

elseif
    (((soc>=soc_up)&&(Pbat1>=0))||((soc<=soc_down)&&(Pbat1<=0)));
    Pbat=Pbat1;

elseif
    (((soc>=soc_up)&&(Pbat1<0))||((soc<=soc_down)&&(Pbat1>0)));
    Pbat=0;

else
    Pbat=0;

end

```

Κώδικας για το power curtailment των φωτοβολταϊκών:

```
function Ppv = fcn(Ppvmax,Vpcc,Vthres,Vcrit,curtailment)
%#codegen

a=( (-abs(Ppvmax)) / (Vcrit-Vthres) );

if (curtailment==0);
    Ppv=-abs(Ppvmax);

elseif (Vpcc<Vthres);
    Ppv=-abs(Ppvmax);

elseif ((Vpcc>=Vthres) && (Vpcc<Vcrit));
    Ppv=-(a*(Vpcc-Vthres)+abs(Ppvmax));

else
    Ppv=0;

end
```

Κώδικας ελέγχου αέργου ισχύος από αντιστροφέα φωτοβολταϊκών και συσσωρευτών:

```
function Q = fcn(V,D,Vupper,Vlower,Qmax)
%#codegen

a=(Qmax/(Vupper-(1+D)));

if (V<Vlower);
    Q=-Qmax;

elseif ((V>=Vlower) && (V<=(1-D)));
    Q=a*V-a*(1-D);

elseif ((V>(1-D)) && (V<(1+D)));
    Q=0;

elseif ((V>=(1+D)) && (V<Vupper));
    Q=a*V-a*(1+D);

else
    Q=Qmax;

end
```

Κώδικας για τον υπολογισμό του dead band του ελέγχου της αέργου ισχύος:

```
function DQ = fcn(Z, ZH, ZL, Dmax, Dmin)
%#codegen

if (Z < ZL);
    DQ = Dmax;

elseif ((Z >= ZL) && (Z <= ZH));
    DQ = ((Dmax - Dmin) / (ZL - ZH)) * (Z - ZL) + Dmax;

else
    DQ = Dmin;

end
```

Βιβλιογραφία:

- [1] http://el.wikipedia.org/wiki/Ηπιες_Μορφές_Ενέργειας
- [2] http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό_Σύστημα
- [3] Solanki, C. S. Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications; PHI Learning Private Ltd.: New Delhi, 2009.
- [4] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. , Ημερίδα «Η επανεκκίνηση της αγοράς των φωτοβολταϊκών και οι προϋποθέσεις για την μεγάλη διείσδυσή τους στα ηλεκτρικά δίκτυα», Αθήνα 2013
- [5] Φαρδή Κωνσταντίνα, «Διερεύνηση σύνδεσης φωτοβολταϊκών πάρκων στο επίπεδο μέσης τάσης και δυνατότητα ρύθμισης της άεργης ισχύος», Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ 2011
- [6] Κ. Θ. Δέρβος, «Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις», έκδοση ΕΜΠ, 2010
- [7] Lorenzo, E. (1994). Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems. Artes Graficas Gala, S.L., Spain.
- [8] Ryan Mayfield , «The Highs and Lows of Photovoltaic System Calculations», Electrical Construction and Maintenance, July 2012.
- [9] D.P. Hohm, M.E. Ropp, Comparative study of maximum power point tracking algorithms, Prog. Photovolt: Res. Appl. 11 (2003) 47–62.
- [10] L Siva Chaitanya Kumar, K Padma, Matlab/Simulink Based Modelling and Simulation of Residential Grid Connected Solar Photovoltaic System, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 3 - Issue 3 (March - 2014)
- [11] M. R. Jongerden and B. R. Haverkort, “Battery modeling,” Centre for Telematics and Information Technology, University of Twente, Technical Report TR-CTIT-08-01, 2008.
- [12] Rabiee A, Khorramdel H, Aghaei J. A review of energy storage systems in microgrids with wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013;18(0):316–26
- [13] A. Hansen, P. Lars, H. Hansen and H. Bindner. “Models for a StandAlone PV System”. Risø National Laboratory, Roskilde, December 2000, ISBN 87-550-2776-8.
- [14] J.S. Newman, “FORTRAN Programs for Simulation of Electrochemical Systems,” Dualfoil.f Program for Lithium Battery Simulation
- [15] S. C. Hageman, “Simple pspice models let you simulate common battery types,” EDN, pp. 17–132, Oct. 1993.
- [16] Thomas L. Martin. Balancing Batteries, Power, and Performance: System Issues in CPU SpeedSetting for Mobile Computers. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1999.
- [17] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, “An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems,” in Proceedings of the International Conference on Computer Aided Design (ICCAD’01), 2001, pp. 488–493.
- [18] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D.A. Wallach. A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 11(6):1019 –1030, December 2003.
- [19] James F. Manwell and Jon G. McGowan. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. Solar Energy, 50(5):399–405, May 1993.
- [20] Βασιλάκης Αθανάσιος, «Μελέτη της συμπεριφοράς των Εικονικών Σύγχρονων Μηχανών στη Στήριξη της Συχνότητας», Διπλωματική Εργασία, Οκτώβριος 2012.
- [21] Newman, J. S. Electrochemical Systems; Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1973.
- [22] Αντώνιος Γ. Τσικαλάκης, Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2008.
- [23] Lemaire, E., Martin, N., Nørgård, P., de Jong, E., de Graaf, R., Groenewegen, J., Kolentini, E., Tselepis, S., 2011. European White Book on Grid-Connected Storage. Department INES Recherche, Développement & Innovation, Institution CEA INES, Savoie Technolac.

- [24] Αντώνιος Γ. Μαρινόπουλος, Επίδραση της διείσδυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων διανεμημένης παραγωγής στις απώλειες των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη 2009.
- [25] F. Marra, G. Yang, C. Traeholt, J. Ostergaard, and E. Larsen, "A Decentralized Storage Strategy for Residential Feeders with Photovoltaics," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 974-981, 2014.
- [26] E. Demirok, P. González, K. H. B. Frederiksen, D. Sera, P. Rodriguez, and R. Teodorescu, "Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids," *IEEE Journal of Photovoltaics* vol. 1, pp. 174-182, 2011.
- [27] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi & D. Sutanto, "Distributed energy storage for mitigation of voltage-rise impact caused by rooftop solar PV," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1-8.
- [28] PV GRID, Μειώνοντας τα εμπόδια για τη μεγάλης κλίμακας διείσδυση φωτοβολταϊκών στα δίκτυα διανομής, Ιούλιος 2013.
- [29] AC, Mahendra, "Novel Control of PV Solar and Wind Farm Inverters as STATCOM for Increasing Connectivity of Distributed Generators" (2013). *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. Paper 1241.
- [30] Σαρρής Νικόλαος, Εποπτικός έλεγχος και συλλογή δεδομένων (SCADA), ανάλυση και υλοποίηση σε δίκτυα Ethernet, Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη 2002.
- [31] Κορλός Κ. Θεοφάνης, Αντιμετώπιση φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2012
- [32] Tonkoski R, Lopes LAC. Impact of active power curtailment on overvoltage prevention and energy production of PV inverters connected to low voltage residential feeders. *Renewable Energy* 2011;36:3566–74
- [33] K. De Brabandere, A. Woyte, R. Belmans, and J. Nijs, "Prevention of Inverter Voltage Tripping in High Density PV Grids," presented at the 19th EU-PVSEC, Paris, 2004.
- [35] Παπαμιχάλη Μαρία, Υλοποίηση και Αξιολόγηση Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2014.
- [36] Rajiv Kumar Varma, Vinod Khadkikar, Shah Arifur Rahman, UTILIZATION OF DISTRIBUTED GENERATOR INVERTERS AS STATCOM, UNIVERSITY OF WESTERN ONTARIO ,2010
- [37] E. Demirok, D. Sera, R. Teodorescu, K.H.B. Frederiksen: "An optimized local reactive power control for high penetration of distributed solar inverters in low voltage networks", 26th EU PVSEC, Hamburg, 2011.
- [38] E. Demirok, D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez, and U. Borup, "Evaluation of the voltage support strategies for the low voltage grid connected PV generators," in *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, 2010, pp. 710–717.
- [39] EPIA, Self Consumption of PV Electricity, Position Paper, July 2013.
- [40] J. von Appen, T. Stetz, M. Braun, A. Schmiegel, Local Voltage Control Strategies for PV Storage Systems in Distribution Grids, *IEEE Transactions on Smart Grid*. 5 (2014) 1002–1009
- [41] A. J. Collin, J. L. Acosta, I. Hernando-Gil and S. Z. Djokic, "An 11kV Steady-State Residential Aggregate Load Model. Part 1: Aggregation Methodology", *IEEE PowerTech*, Trondheim, Norway, 2011.
- [42] Χρήστος Ε. Γκιλφέςης, Μελέτη επίδρασης φωτοβολταϊκών σε δίκτυα Χ.Τ., Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2010.
- [43] Παπαιωάννου Τ. Ιουλία, «Επίδραση της ένταξης Φ/Β μονάδων στην ποιότητα ισχύος δικτύων διανομής», Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη 2010.
- [44] J. Stevens and G. Corey. A Study of Lead-Acid Battery Efficiency Near Top-of-Charge and the Impact on PV System Design. In *PVSC*, 1996