



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΡΥΘΜΙΣΗ ΦΟΡΤΟΥ – ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΜΕΣΩ  
ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΣΑΜΠΑΝΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ  
ΦΟΡΤΟΥ – ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΜΕΣΩ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗΣ  
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΣΑΜΠΑΝΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Δεκεμβρίου 2013

.....  
Χατζηαργυρίου Νικόλαος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεωργιλάκης Παύλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
Παπαθανασίου Σταύρος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

.....

ΣΑΜΠΑΝΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

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

Copyright © Αναστασία Σαμπάνη, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

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

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ν. Χατζηαργυρίου, τόσο για την προσφορά του ως καθηγητή στη διάρκεια των σπουδών μου όσο και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου ένα θέμα τόσο ενδιαφέρον και δημιουργικό.

Θα ήθελα, επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Μουτή για την συνεχή καθοδήγησή του, τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές και υποδείξεις του και για την άψογη συνεργασία και το ενδιαφέρον του κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφού η συμβολή του και η βοήθεια του ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωσή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη και συμπαράστασή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.



*Στους γονείς μου και στις αδελφές μου που στηρίζουν πάντα κάθε μου  
προσπάθεια και επιλογή.*





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της δυνατότητας συμμετοχής φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Για το σκοπό αυτό εξετάζεται φωτοβολταϊκό πάρκο αποτελούμενο από 6 αντιστροφείς, σε κάθε έναν από τους οποίους συνδέονται παράλληλα 4 φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Μία από τις 4 φωτοβολταϊκές συστοιχίες κάθε αντιστροφέα διαθέτει διακόπτη, ο οποίος την συνδέει και την αποσυνδέει από τον αντιστροφέα, δίνοντας την δυνατότητα αποφόρτισης των αντιστροφέων του πάρκου. Με τον τρόπο αυτό, η απορριπτόμενη ισχύς μπορεί να αποδίδεται στο ηλεκτρικό σύστημα σε περιπτώσεις αύξησης του φορτίου, ή αντίστοιχα να περιορίζεται η αποδιδόμενη στο ηλεκτρικό σύστημα ισχύς αποσυνδέοντας φωτοβολταϊκές συστοιχίες από το φωτοβολταϊκό πάρκο.

Αρχικά, γίνεται ανάλυση του υποτιθέμενου συστήματος και των συντελεστών του, το οποίο αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πάρκο και μία σύγχρονη νηξελογεννήτρια. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μοντελοποίηση του συστήματος στο λογισμικό Simulink του περιβάλλοντος Matlab. Τέλος, προσομοιώνεται η λειτουργία του συστήματος με τη συμμετοχή του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και συγκρίνεται με την περίπτωση όπου η ρύθμιση αναλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από τη συμβατική μονάδα παραγωγής. Το σύνολο των αποτελεσμάτων σχολιάζονται και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα, ενώ προτείνονται και αντιστροφείς του εμπορίου οι οποίοι θα μπορούσαν να υποστηρίξουν την εν λόγω εφαρμογή.

## ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, αποφόρτιση αντιστροφέα, φωτοβολταϊκή συστοιχία, εφεδρεία.



## ABSTRACT

The subject of this Diploma Thesis is the study of the possibility of the participation of a photovoltaic park in the primary and secondary load – frequency control of an Electric Power System. For this purpose, a photovoltaic park is considered, which consists of 6 inverters on each one of which there are four photovoltaic strings connected in parallel. One out of the four strings of its inverter is connected to the inverter via a switch, which connects and disconnects the string, enabling the discharge of the inverter. This way, the reserve of the power can be attributed to the electrical system to meet load increases, or respectively the output to the electrical system can be limited by disconnecting PV strings from the photovoltaic park.

Initially, the supposed system, which consists of a photovoltaic park and a synchronous diesel generator, is analyzed along with its other factors. Subsequently, the system is modeled in the Simulink software of the Matlab environment. Finally, the operation of the system with the participation of the photovoltaic park in the load – frequency control is simulated and compared with the case where the load – frequency control is entirely undertaken by the conventional power unit. The overall results are discussed and the corresponding conclusions are extracted, as well as models of inverters of the trade are proposed, which are able to support such implementation.

## KEY – WORDS

primary load – frequency control, secondary load – frequency control, inverter discharge, photovoltaic string, reserve.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	17
Εισαγωγή .....	17
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	17
1.2 Η ηλιακή ενέργεια .....	19
1.3 Προβλήματα χρήσης των ΑΠΕ.....	21
1.4 Αντικείμενο της διπλωματικής.....	22
1.5 Οργάνωση των κεφαλαίων της εργασίας.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	25
Φωτοβολταϊκά στοιχεία και συστήματα .....	25
2.1 Φωτοβολταϊκές διατάξεις.....	25
2.1.1 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο .....	25
2.1.2 Κατασκευή φωτοβολταϊκών κυττάρων .....	27
2.1.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών κυττάρων .....	28
2.1.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	31
2.1.5 Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	31
2.1.6 Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια .....	33
2.1.7 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	39
Αντιστροφείς φωτοβολταϊκών πάρκων.....	39
3.1 Το παρόν φωτοβολταϊκό πάρκο .....	39
3.1.1 Πλήθος κυττάρων και συστοιχιών.....	39
3.1.2 Υπολογισμός ισχύος εξόδου συστοιχιών.....	40
3.1.3 Σύνδεση συστοιχιών και συνολική ισχύς εξόδου .....	41
3.2 Αντιστροφείς .....	42
3.2.1 Αρχές λειτουργίας αντιστροφέων.....	42
3.2.2 Απαιτήσεις από τους αντιστροφείς.....	43
3.2.3 Αντιστροφείς φωτοβολταϊκών πάρκων.....	44
3.2.4 Διασύνδεση αντιστροφέων με τα φωτοβολταϊκά πάρκα.....	45

3.2.5 Αριθμός βαθμίδων αντιστροφέα.....	48
3.2.6 Ανάλυση κυκλώματος αντιστροφέων.....	49
3.2.7 Προσομοίωση κυκλώματος αντιστροφέα.....	52
3.3 Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος ( <i>Maximum Power Point Trackers</i> ) .....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	57
Αποθηκευτικές διατάξεις .....	57
4.1 Υλοποίηση συστήματος φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση αποθηκευτικών διατάξεων..	57
4.1.1 Αποθηκευτικές διατάξεις σε συστήματα ΑΠΕ .....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	69
Μέθοδοι ρύθμισης φορτίου – συχνότητας σε φωτοβολταϊκά συστήματα .....	69
5.1 Ανάγκη ρύθμισης φορτίου – συχνότητας σε ΣΗΕ .....	69
5.2 Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση .....	70
5.3 Ρυθμιστές στροφών.....	73
5.4 Υπάρχουσες μέθοδοι ρύθμισης φορτίου – συχνότητας σε φωτοβολταϊκά συστήματα.....	74
5.5 Συμπεράσματα.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	81
Προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης φορτίου – συχνότητας .....	81
6.1 Ανάλυση της μεθόδου.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....	85
Λοιποί συντελεστές συστήματος προσομοίωσης .....	85
7.1 Λοιποί συντελεστές συστήματος.....	85
7.1.1 Έλεγχος διακοπών συστοιχιών .....	85
7.1.2 Γεννήτρια <i>diesel</i> .....	87
7.1.3 Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας.....	90
7.1.4 Παράγοντας διακύμανσης της ηλιοφάνειας .....	92
7.1.5 Συνολικό μοντέλο προσομοίωσης .....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 .....	95
Σενάρια προσομοιώσεων .....	95
8.1 Βασικά σενάρια προσομοίωσης.....	95

8.2 Χαρακτηριστικά και παράμετροι μεταβλητών του προβλήματος.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 .....	99
Προσομοιώσεις .....	99
9.1 Σενάριο 1ο .....	99
9.1.1 Προσομοιώσεις .....	99
9.1.2 Συμπεράσματα.....	115
9.2 Σενάριο 2 <sup>ο</sup> .....	118
9.2.1 Προσομοιώσεις .....	118
9.2.2 Συμπεράσματα.....	134
9.3 Σενάριο 3 <sup>ο</sup> .....	134
9.3.1 Προσομοιώσεις .....	134
9.3.2 Συμπεράσματα.....	137
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 .....	139
Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 .....	141
Μελέτη αντιστροφών του εμπορίου προς υποστήριξη της προτεινόμενης μεθόδου .....	141
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 .....	143
Βιβλιογραφία.....	143





# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## ***Εισαγωγή***

### ***1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας***

Οι **Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας** (ΑΠΕ ), ή όπως αλλιώς αποκαλούνται ήπιες μορφές ενέργειας ή πράσινη ενέργεια, είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες όπως ο άνεμος, η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία κλπ. Χαρακτηρίζονται ως ήπιες γιατί η εκμετάλλευσή τους δεν απαιτεί κάποια ενεργητική παρέμβαση (π.χ. εξόρυξη ή καύση ), ενώ παράλληλα καλούνται «καθαρές» μορφές ενέργειας διότι δεν αποδεσμεύουν τοξικά απόβλητα στο περιβάλλον.

Το ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 κατά την διάρκεια των πρώτων πετρελαϊκών κρίσεων. Τότε, πέρα από την διαμάχη που δημιουργήθηκε γύρω από τα περιορισμένα αποθέματα πετρελαίου, έγινε για πρώτη φορά τόσο έντονα αντιληπτή η αλλοίωση του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής του ανθρώπου λόγω της χρήσης των συμβατικών πηγών ενέργειας. Η ανάγκη για ανεύρεση νέων ενεργειακών πόρων έγινε επιτακτική και συνεχίζει να είναι έως σήμερα. Στην

κατεύθυνση αυτή ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται εναλλακτικές μορφές ενέργειας για την κάλυψη αναγκών, φτάνοντας σήμερα οι ΑΠΕ να λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των αναπτυγμένων κρατών ενώ το κόστος τους να μειώνεται συνεχώς και να ανταγωνίζεται το κόστος παραδοσιακών πηγών ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Τα τελευταία χρόνια η Ευρωπαϊκή Ένωση καθώς και άλλα μεμονωμένα κράτη, υιοθετούν νέες πολιτικές για τη χρήση των ΑΠΕ, ενώ οι περισσότερες αναπτυγμένες χώρες έχουν υπογράψει τη **Συνθήκη του Κιότο**, σύμφωνα με την οποία στο τέλος του έτους 2020 το 20% της εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ[1].

Η νέα αυτή ενεργειακή πολιτική βασίζεται στα πολλά **πλεονεκτήματα** που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ ορισμένα από τα οποία αναφέρονται παρακάτω :

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά απόβλητα και κατάλοιπα .
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας .
- Ο εξοπλισμός τους είναι εύκολος στην κατασκευή και στη συντήρηση, ενώ παράλληλα έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του εθνικού ενεργειακού εφοδιασμού.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ.

Τα είδη των ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται είναι τα ακόλουθα:

1. Αιολική Ενέργεια: χρησιμοποιείται ευρέως στην ηλεκτροπαραγωγή καθώς και σε μηχανικές εφαρμογές.
2. Ηλιακή Ενέργεια: χρησιμοποιείται τόσο στην ηλεκτροπαραγωγή όσο και σε θερμικές εφαρμογές.
3. Υδραυλική Ενέργεια: χρησιμοποιείται στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα και είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ΑΠΕ.

4. Βιομάζα: Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών και αστικά απόβλητα και απορρίμματα με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας.
5. Γεωθερμική Ενέργεια: Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης και είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια.
6. Ενέργεια από τη Θάλασσα: υπάρχουν τρεις μορφές αυτής της ενέργειας: 1)η ενέργεια από τις παλίρροιες, η οποία εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του ηλίου και της σελήνης για την παραγωγή ηλεκτρισμού, 2)η ενέργεια από κύματα, η οποία εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων και 3)η ενέργεια από τους ωκεανούς, η οποία εκμεταλλεύεται τη διαφορά της θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού.

## **1.2 Η ηλιακή ενέργεια**

Με τον όρο ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζουμε το σύνολο των διάφορων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο, όπως το φως, η φωτεινή ενέργεια, η θερμική ενέργεια και η ενέργεια ακτινοβολίας.

Ο ήλιος στέλνει στην επιφάνεια της γης ενέργεια υπό τη μορφή ακτινοβολίας, χωρίς την ύπαρξη της οποίας η ζωή στον πλανήτη θα ήταν αδύνατη. Στον πυρήνα του ήλιου παράγονται τεράστια ποσά ενέργειας. Εξαιτίας όμως της μεγάλης απόστασης της γης από τον ήλιο, ένα μικρό ποσοστό μόνο της ενέργειας αυτής καταφέρνει να φτάσει στην επιφάνεια της γης. Παρόλα αυτά η ποσότητα αυτή είναι 10.000 φορές μεγαλύτερη από τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες.

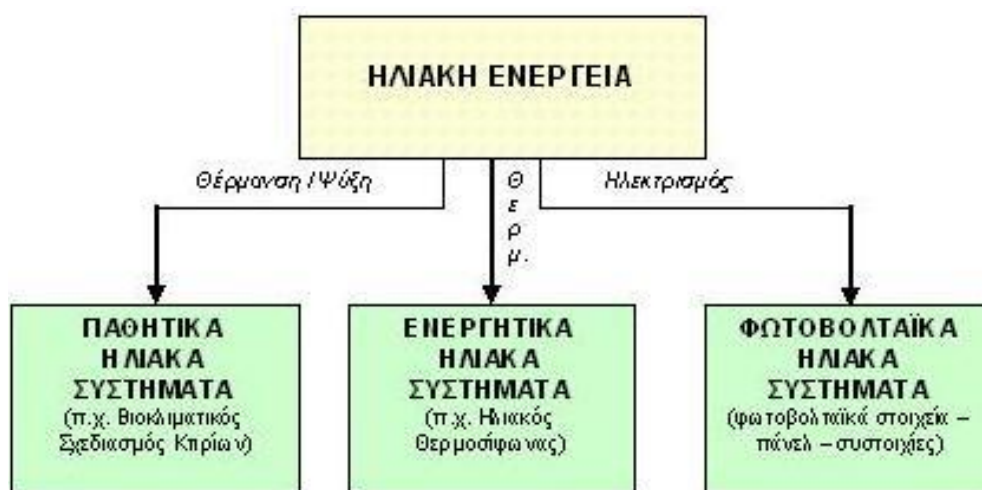
Η ηλιακή ενέργεια είναι πρωτογενής, ήπια και ανανεώσιμη πηγή, η οποία έμμεσα δίνει γένεση σε άλλες τρεις ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την υδραυλική, την αιολική και την ενέργεια της βιομάζας .

Όσο αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, αυτή χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες :

1. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα: αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και δομημένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για εφαρμογές φωτισμού και θέρμανσης .
2. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα: η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών οι οποίοι βρίσκονται σε επαφή με νερό και

του μεταδίδουν μέρος της θερμότητας που παρέλαβαν (π.χ. ηλιακοί θερμοσίφωνες).

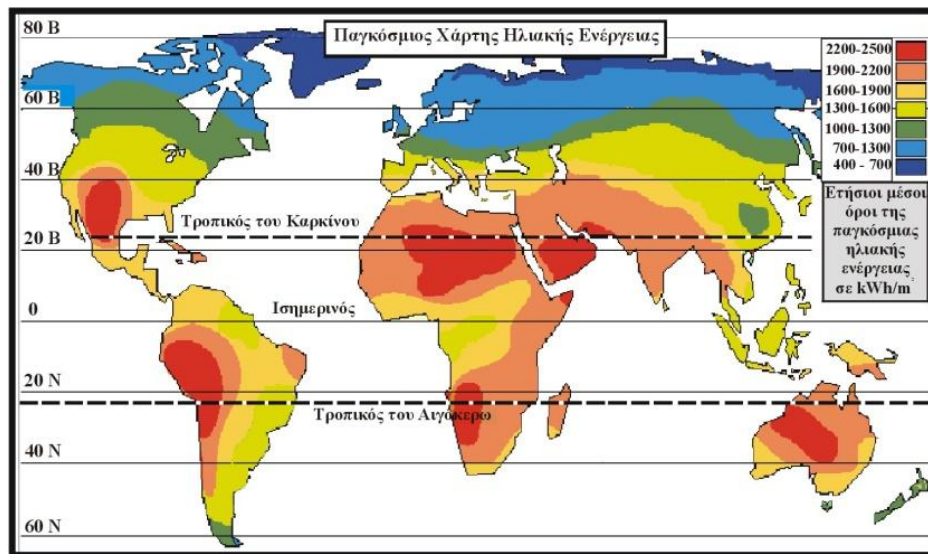
3. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα: σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες που εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που παρέχεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα.



Και οι τρεις κατηγορίες εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως έχουν πολλές πρακτικές εφαρμογές σήμερα, ενώ η χρήση της ενέργειας του ηλίου για την κάλυψη βασικών αναγκών επεκτείνεται συνεχώς. Ο λόγος της μεγάλης ανάπτυξης των εφαρμογών της ηλιακής ενέργειας είναι τα ποικίλα πλεονεκτήματα που αυτή παρουσιάζει, ορισμένα από τα οποία αναφέρονται παρακάτω :

- Ανεξάντλητη πηγή ενέργειας .
- Μηδενική ρύπανση του περιβάλλοντος .
- Αξιοπιστία των συστημάτων και μεγάλη διάρκεια ζωής των εξοπλισμών .
- Αθόρυβη λειτουργία .
- Δυνατότητες επέκτασης .
- Απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας .
- Μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας και ελάχιστη συντήρηση .

Όλοι οι παραπάνω λόγοι καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω διερεύνηση σε θέματα που αφορούν τη χρήση και την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και ιδιαίτερα σε χώρες όπως η Ελλάδα, η οποία βρίσκεται σε αρκετά πλεονεκτική θέση λόγω έντονης ηλιοφάνειας και μεγάλης δυνατότητας αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας .



Εικόνα 1.1: Παγκόσμιος χάρτης ηλιακής ενέργειας

### 1.3 Προβλήματα χρήσης των ΑΠΕ

Παρά την πληθώρα των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ, εμφανίζουν ένα βασικό πρόβλημα όσο αφορά την εκμετάλλευσή τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό έγκειται στην αδυναμία πρόβλεψης της παραγωγής ενέργειας από αυτές τις πηγές. Είναι γεγονός ότι δεν μπορεί να προβλεφθεί σε βάθος χρόνου η ταχύτητα του ανέμου, η δύναμη των κυμάτων και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το πρόβλημα αυτό επιφέρει πολλές δυσκολίες στον έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που στηρίζονται στη χρήση ΑΠΕ, καθώς δημιουργεί ανωμαλίες στο ισοζύγιο ζήτησης – παραγωγής. Συγκεκριμένα όσο αφορά στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, η διαδικασία της ρύθμισης φορτίου – συχνότητας καθίσταται αδύνατη σε πολλές περιπτώσεις λόγω του απρόβλεπτου χαρακτήρα της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να αναζητούνται συνεχώς λύσεις ώστε η ενέργεια που προσφέρεται από τις εγκαταστάσεις αυτές να ισοδυναμεί όσο το δυνατό περισσότερο με την ενέργεια που ζητείται από το αντίστοιχο ηλεκτρικό δίκτυο.

Προτεινόμενη λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι η συμμετοχή των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας με αποφόρτιση των αντιστροφών μέσω των οποίων τα φωτοβολταϊκά συνδέονται στο δίκτυο. Ωστόσο,

μέχρι τώρα η συμμετοχή των φωτοβολταϊκών στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας έχει σχεδόν μηδενική πρακτική εφαρμογή, γι' αυτό κρίνεται σημαντική η επέκταση των ερευνών στο συγκεκριμένο ζήτημα προς νέες κατευθύνσεις.

### **1.4 Αντικείμενο της διπλωματικής**

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα συμμετοχής ενός φωτοβολταϊκού πάρκου στην ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, με απόδοση ισχύος προς το δίκτυο ή μείωση της αποδιδόμενης προς το δίκτυο ισχύος, για την αντιμετώπιση βύθισης συχνότητας ή ανύψωσης συχνότητας αντίστοιχα.

Προς επίτευξη αυτού του στόχου, μοντελοποιείται ηλεκτρικό δίκτυο, στο οποίο είναι συνδεδεμένο φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 100 kWp, αποτελούμενο από έξι αντιστροφείς οι οποίοι υφίστανται αποφόρτιση ή επαναφόρτιση ανάλογα με τα μεταβατικά φαινόμενα, και μία γεννήτρια diesel 200 kW, η οποία λειτουργεί επικουρικά προς το φωτοβολταϊκό πάρκο. Η αποφόρτιση των αντιστροφών επιτυγχάνεται μέσω αποκοπής φωτοβολταϊκών συστοιχιών που είναι συνδεδεμένες σε αυτούς, για περιπτώσεις ανύψωσης της συχνότητας του δικτύου. Σε περίπτωση βύθισης της συχνότητας του δικτύου, η επαναφόρτιση επιτυγχάνεται μέσω σύνδεσης συστοιχιών, οι οποίες τηρούνταν αποσυνδεδεμένες ως εφεδρικές.

Στην συνέχεια της μοντελοποίησης του συστήματος, ελέγχεται η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου, μέσω προσομοίωσης σεναρίων, στα οποία η ρύθμιση φορτίου – συχνότητας πραγματοποιείται μόνο από την συμβατική μονάδα (γεννήτρια diesel) ή και με τη συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου.

### **1.5 Οργάνωση των κεφαλαίων της εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται και περιγράφονται λεπτομερώς τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και συστήματα και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας τους και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών συστημάτων και στα βασικά χαρακτηριστικά τους και στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος προσομοίωσής τους στο simulink.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι αποθηκευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται ως τώρα στα φωτοβολταϊκά συστήματα με σκοπό την διατήρηση του ισοζυγίου προσφοράς – ζήτησης και εξετάζεται η αποδοτικότητάς τους.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται το ζήτημα της ρύθμισης φορτίου – συχνότητας και αναφέρονται οι μέθοδοι που έως σήμερα έχουν εφαρμοστεί στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης φορτίου – συχνότητας για φωτοβολταϊκά συστήματα με συμμετοχή των φωτοβολταϊκών πάρκων στη ρύθμιση.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται αναλυτική περιγραφή των υπόλοιπων συντελεστών του συστήματος που προτείνεται και παρουσιάζεται το τελικό σύστημα που προσομοιώνεται στο περιβάλλον simulink.

Στο Κεφάλαιο 8 αναφέρονται τα σενάρια που θα πραγματοποιηθούν στη συνέχεια για τον έλεγχο της αποδοτικότητας της μεθόδου και δίνονται οι παράμετροι των μεταβλητών του προβλήματος.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα.

Στο Κεφάλαιο 10 περιγράφονται τα συνολικά συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα μελέτη και δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο Κεφάλαιο 11 δίνονται προτάσεις αντιστροφών του εμπορίου που μπορούν να υποστηρίξουν την προτεινόμενη εφαρμογή.

Στο Κεφάλαιο 12 παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας.





# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

## **Φωτοβολταϊκά στοιχεία και συστήματα [2]**

### **2.1 Φωτοβολταϊκές διατάξεις**

Με τον όρο **φωτοβολταϊκό** χαρακτηρίζεται η βιομηχανική διάταξη πολλών φωτοβολταϊκών κυττάρων σε μία σειρά. Πρόκειται για τεχνικούς ημιαγωγούς οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά. Οι εν λόγω ημιαγωγοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν ηλεκτρική τάση.

#### **2.1.1 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο**

Πρωταρχική και βασική μονάδα των φωτοβολταϊκών πλαισίων και κατ' επέκταση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

**Φωτοβολταϊκό στοιχείο** (ή φωτοβολταϊκό κύτταρο ή φωτοβολταϊκή κυψέλη, PV cell) είναι ένα σύστημα δύο υλικών που βρίσκονται σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζεται στα άκρα του συνεχής ηλεκτρική τάση. Συνήθως υπάρχουν δυο ημιαγωγίμα στρώματα σε επαφή από το ίδιο υλικό, από τα οποία



Εικόνα 2.1:  
Φωτοβολταϊκό  
πανάλο

το ένα είναι τύπου n και το άλλο τύπου p, είναι δηλαδή δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου. Όταν το φ/β στοιχείο φωτίζεται προκαλεί στο εσωτερικό του ρεύμα, το λεγόμενο φωτόρευμα, το οποίο είναι ανάλογο της πυκνότητας ισχύος του ηλιακού φωτός που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Συνεπώς, όταν τα ημιαγωγικά στρώματα δέχονται στην επιφάνειά τους ηλιακή ακτινοβολία, εμφανίζουν διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και την πίσω όψη τους .

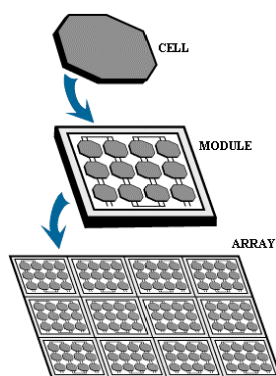
Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0.5 – 1.0 V και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20 – 40 mA ανά cm<sup>2</sup> της επιφάνειάς του για πυκνότητα ισχύος ηλιακού φωτός 1kW/m<sup>2</sup>.

Το **φωτοβολταϊκό πλαίσιο** (PV module ), το οποίο αποτελεί τη βασική μονάδα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ορίζεται ως ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα.

Αντίστοιχα, ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να τοποθετηθεί σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, αποτελούν το **φωτοβολταϊκό πάνελ** (PV panel).

Ακολουθώς, μία ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή πάνελα με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης, συγκροτούν τη **φωτοβολταϊκή συστοιχία** (PV array).

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται σχηματικά η δομή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, όπως περιγράφηκε προηγουμένως :



Εικόνα 2.2: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

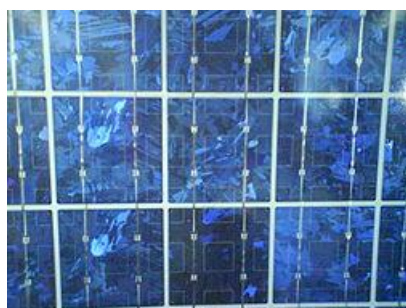
## 2.1.2 Κατασκευή φωτοβολταϊκών κυττάρων

Το φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι συνήθως τετράγωνο, με πλευρά 120-160 mm. Για την κατασκευή του χρησιμοποιούνται ημιαγωγικά υλικά όπως το GaAs, CdTe, αλλά κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται πυρίτιο (Si). Το πυρίτιο επιλέγεται τόσο, γιατί βρίσκεται σε μεγάλη αφθονία στη φύση, όσο και γιατί είναι οικονομικότερο από τα υπόλοιπα υλικά .

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα πυριτίου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

- **Μονοκρυσταλλικά:** το όνομά τους οφείλεται στην μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος των ατόμων πυριτίου, που πλησιάζει την τέλεια κρυσταλλική δομή. Έχουν αυξημένο κόστος παραγωγής, καθώς παρέχουν τον καλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες, φθάνοντας το 15-18%. Ο μεγάλος βαθμός απόδοσής τους αποδίδεται στο γεγονός ότι τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα είναι περισσότερο ευαίσθητα στην υπέρυθη ακτινοβολία, της οποίας το ενεργειακό περιεχόμενο είναι σχετικά χαμηλό .
- **Πολυκρυσταλλικά:** τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα περιλαμβάνουν στο πλέγμα τους κρυστάλλους ποικίλων προσανατολισμών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση στα σημεία σύνδεσής τους και σαν συνέπεια ο βαθμός απόδοσής τους να μην ξεπερνά το 13-15%.
- **Άμορφα:** τα κύτταρα αυτά δεν διαθέτουν κρυσταλλική δομή με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσής τους να περιορίζεται στο 5-8% .

Με βάση τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε δομής γίνεται αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών της εφαρμογής (κατεύθυνση και διάρκεια ηλιοφάνειας, τυχόν σκιάσεις, κλπ. ), ώστε να επιλέγεται η κατάλληλη τεχνολογία.



Φωτοβολταϊκό από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο



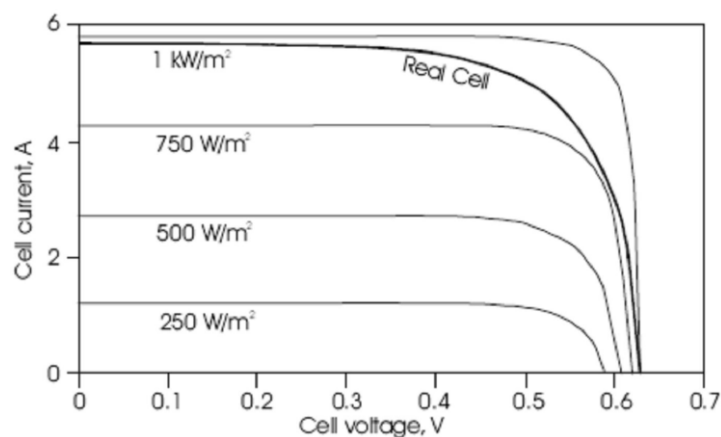
φωτοβολταϊκό από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

### 2.1.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών κυττάρων

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μία ειδικά σχεδιασμένη ένωση p-n. Ένα μη φωτιζόμενο φωτοβολταϊκό κύτταρο μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια από τη χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου .

Όταν ένα κύτταρο ακτινοβολείται, δημιουργούνται ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ρεύματος στο εσωτερικό του, το οποίο ονομάζεται φωτόρευμα. Το ρεύμα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κυττάρου και η τάση που δημιουργείται στα άκρα του, εξαρτώνται από το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η I-V χαρακτηριστική καμπύλη (ρεύματος – τάσης) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες τιμές ακτινοβολίας .



Εικόνα 2.3: Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η εξίσωση που συνδέει την τάση με το ρεύμα και περιγράφει τη συμπεριφορά του κυττάρου είναι η ακόλουθη:

$$I = I_L - I_o \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

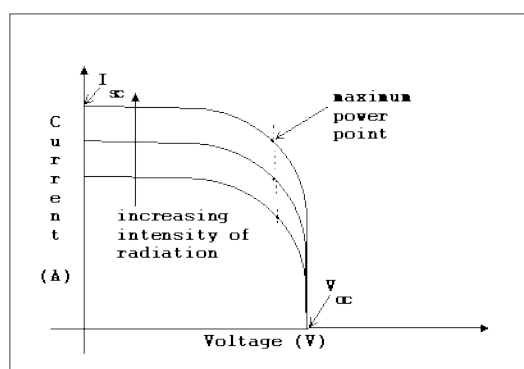
Στην παραπάνω σχέση  $I_L$  είναι η συνιστώσα του ρεύματος στο κύτταρο λόγω των φωτονίων,  $q = 1.6 \times 10^{-9}$  Cb,  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  j/K και T είναι η θερμοκρασία του στοιχείου σε βαθμούς Kelvin .

Η παραπάνω καμπύλη δίνεται μόνο στην περιοχή όπου τα φωτοβολταϊκά κύτταρα παράγουν ρεύμα. Αν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, το οποίο δεν είναι συνδεδεμένο με κάποιο φορτίο, προσπέσει ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργείται μεταξύ των επαφών του μία πτώση τάσης, η οποία ονομάζεται **τάση ανοιχτού κυκλώματος** και

συμβολίζεται  $V_{oc}$ . Αν βραχυκυκλώσουμε τις δύο επαφές με ένα αμπερόμετρο, υπολογίζουμε το **ρεύμα βραχυκύκλωσης**  $I_{sc}$  του κυττάρου. Τα δύο αυτά μεγέθη είναι χαρακτηριστικά για κάθε φωτοβολταϊκό κύτταρο .

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό μέγεθος του φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι το **σημείο μέγιστης ισχύος** (MPP ). Πρόκειται για το σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V στο οποίο το κύτταρο λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ .

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνονται τα 3 χαρακτηριστικά μεγέθη των φωτοβολταϊκών κυττάρων που αναφέρθηκαν :

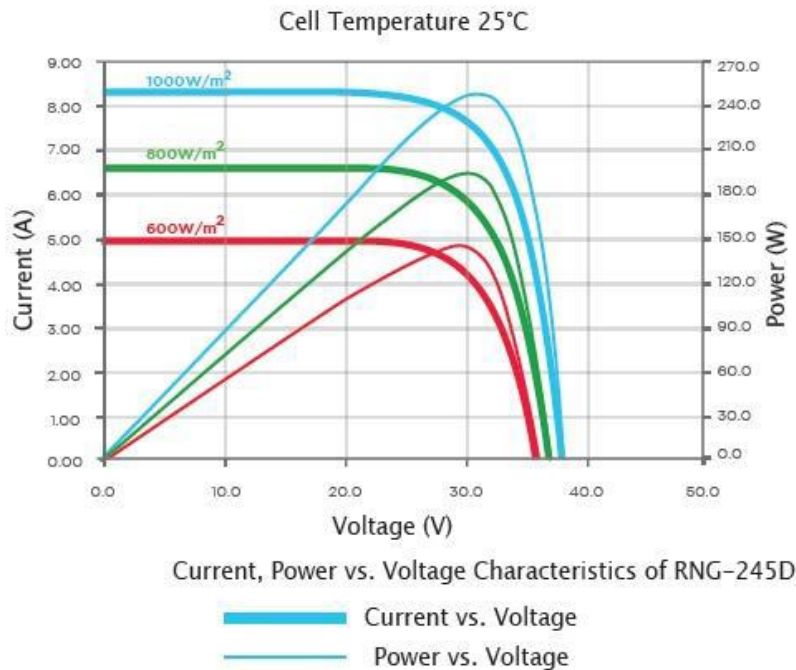


Εικόνα 2.4: Χαρακτηριστικά μεγέθη φωτοβολταϊκού κυττάρου

Ωστόσο και οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών κάθε φωτοβολταϊκού κυττάρου επηρεάζονται από κάποιους παράγοντες οι οποίοι διαμορφώνουν τη γενικότερη λειτουργία και αποδοτικότητά του. Οι τρεις παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι οι ακόλουθες:

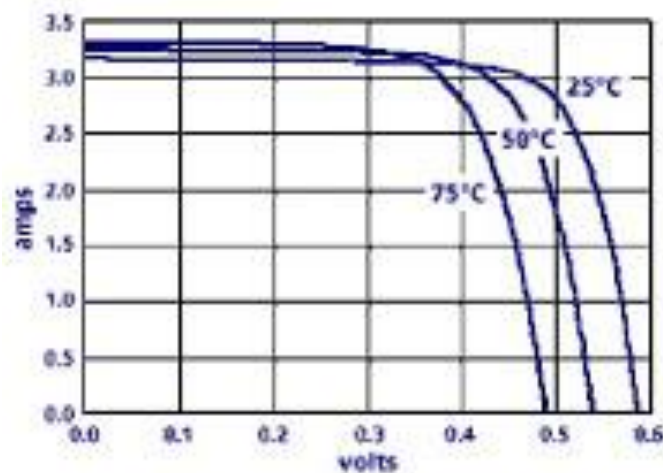
- **Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας:** το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται γραμμικά από την ακτινοβολία, ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης μένει σταθερή έως ότου η ακτινοβολία φτάσει την τιμή  $100 \text{ W/ m}^2$ , οπότε η τάση πέφτει απότομα.
- **Η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων:** όταν αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας του κυττάρου, η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  μειώνεται γραμμικά, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  αυξάνεται ελάχιστα, καθώς προκαλείται αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού.
- **Το ορισμένο φάσμα φωτός:** αναφέρεται στην απόσταση που διανύει το φως στην ατμόσφαιρα και στην πυκνότητα της τελευταίας – όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση τόσο μεγαλύτερη είναι και η μείωση της ακτινοβολίας.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V για διάφορες τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας :



Εικόνα 2.5: Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας

Αντίστοιχα, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η επιρροή της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη:

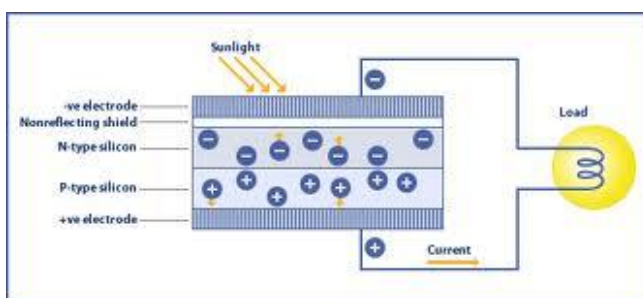


Εικόνα 2.6: Επίδραση θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού κυττάρου

### 2.1.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο ορίζεται η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική τάση .

Είναι γνωστό ότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι



δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου (η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου ), που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία. Το ηλιακό φως αποτελείται από μικρά σωματίδια, τα οποία ονομάζονται φωτόνια και μεταφέρουν ενέργεια. Κάθε φωτόνιο με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό ελευθερώνοντας με τον τρόπο αυτό ένα ηλεκτρόνιο. Η θέση από την οποία φεύγει το ηλεκτρόνιο είναι περιοχή με ηλεκτρονικό έλλειμμα, παρουσιάζει θετικό φορτίο ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου και ονομάζεται οπή. Δημιουργείται λοιπόν, καθ ' όλη τη διάρκεια της ακτινοβολήσης, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές ), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

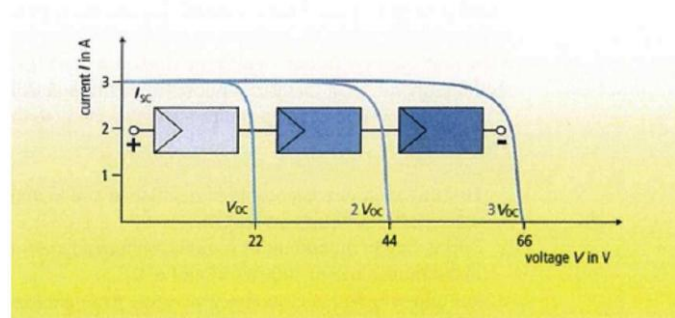
Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n και να δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές προς το τμήμα τύπου p, με συνέπεια τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δύο τμημάτων της διόδου. Με τον τρόπο αυτό, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η ακτινοβολήση στην επιφάνεια του στοιχείου .

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του ακτινοβολούμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**.

### 2.1.5 Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων

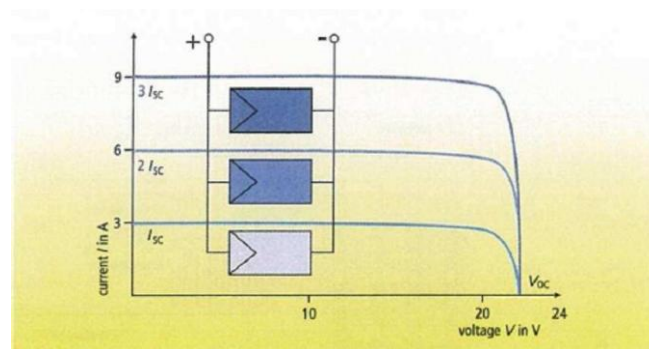
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται εν σειρά ή παράλληλα προς σχηματισμό των φωτοβολταϊκών γεννητριών.

Όταν τα πλαίσια συνδέονται σε σειρά η διάταξη τους ονομάζεται αλυσίδα (string). Κατά τη σύνδεση σε σειρά συνδέονται μόνο ίδια φωτοβολταϊκά πλαίσια με σκοπό τη μείωση των απωλειών. Ο αριθμός των πλαισίων που θα συνδεθούν σε σειρά καθορίζεται από την τάση λειτουργίας του αντιστροφέα. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η εν σειρά συνδεσμολογία πλαισίων:



Εικόνα 2.7: Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά

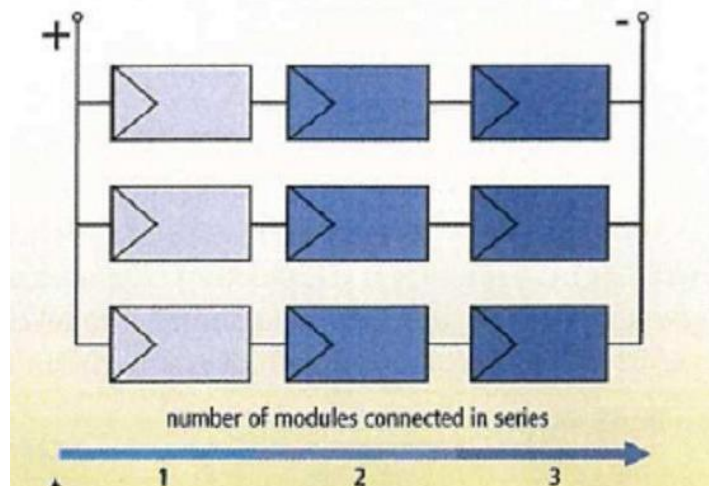
Αντίστοιχα στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων:



Εικόνα 2.8: Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η σύνδεση που συνήθως επιλέγεται ως αποδοτικότερη είναι η παράλληλη σύνδεση αλυσίδων, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Σημειώνεται ότι ο αριθμός των πλαισίων επιλέγεται με βάση την τάση που θέλουμε να πετύχουμε σύμφωνα με τις ανάγκες του δικτύου στο οποίο θα συνδεθεί η συστοιχία.





Εικόνα 2.9: Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών αλυσίδων

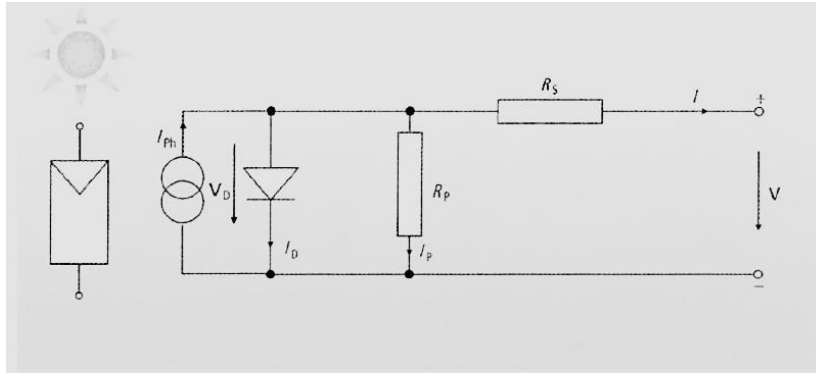
### 2.1.6 Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι το τμήμα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης που περιέχει φωτοβολταϊκά στοιχεία και παράγει συνεχές ρεύμα .

Με κριτήριο την πολυπλοκότητα στην κατασκευή και τη λειτουργία, μπορούμε να κατατάξουμε τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες σε τρεις κατηγορίες :

1. Απλές φωτοβολταϊκές γεννήτριες: βρίσκονται σε σταθερά επίπεδα πλαίσια και δέχονται την ακτινοβολία με τη φυσική της πυκνότητα και διακύμανση .
2. Φωτοβολταϊκές γεννήτριες με κινητά πλαίσια: παρακολουθούν την πορεία του ήλιου και περιστρέφονται αυτόματα ώστε να δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία κάθετα .
3. Φωτοβολταϊκές γεννήτριες με φακούς ή κάτοπτρα: τα κάτοπτρα ή οι φακοί συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη στέλνουν συμπυκνωμένη στα φωτοβολταϊκά κύτταρα (για αποφυγή υπερθερμάνσεως διαθέτουν τεχνητή ψύξη ) .

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αναπαριστώνται με ένα ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλο μιας διόδου. Το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 2.10: Ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλο φωτοβολταϊκού κυττάρου

Το κύκλωμα αποτελείται από μία πηγή σταθερού ρεύματος  $I_{ph}$  (φωτόρευμα), μία ιδανική δίοδο και μία αντίσταση σειράς  $R_s$  (series resistance), που αντιπροσωπεύει την εσωτερική αντίσταση του κύτταρου, που παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση  $R_p = R_{sh}$  (shunt resistance).

Η εξίσωση του παραπάνω κυκλώματος προκύπτει από τη διαφορά του φωτορεύματος από το ρεύμα διόδου:

$$I = I_{ph} - I_D \left( e^{\frac{V+IR_s}{V_T}} - 1 \right)$$

όπου  $I_D \left( e^{\frac{V+IR_s}{V_T}} - 1 \right) = I_D$  το ρεύμα διόδου .

### 2.1.7 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μία από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Εκμεταλλευόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από ηλιακή ενέργεια .

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από ένα ή περισσότερα πάνελ φωτοβολταϊκών στοιχείων, μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή .

#### Αυτόνομα και διασυνδεδεμένα συστήματα :

Ο διαχωρισμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε αυτόνομα ή διασυνδεδεμένα γίνεται με κριτήριο τον τρόπο διάθεσης του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος .

Έτσι τα συστήματα διακρίνονται στα **απομονωμένα** (ή εκτός δικτύου: off-grid) συστήματα και στα **διασυνδεδεμένα** (grid connected) συστήματα .

#### **Απομονωμένα συστήματα:**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα :

- Αυτόνομα συστήματα: Αυτόνομο σύστημα είναι το σύστημα που καλύπτει εξολοκλήρου το σύνολο των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου ή μιας επαγγελματικής χρήσης από το φ/β σύστημα χωρίς να περιλαμβάνεται άλλη ΑΠΕ ή συμβατική πηγή. Δεν υπάρχει διασύνδεση με το εθνικό δίκτυο και η παρεχόμενη ενέργεια είναι είτε συνεχούς τάσης είτε εναλλασσόμενης.
- Υβριδικά συστήματα: Υβριδικό σύστημα είναι το σύστημα στο οποίο συνδυάζονται ΑΠΕ ή άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας, ενώ τις περισσότερες φορές προβλέπεται αυτονομία με τη χρήση συσσωρευτών .

#### **Διασυνδεδεμένα συστήματα :**

Είναι τα συστήματα που διαθέτουν φυσική σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (εθνικό ή τοπικό δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης ). Συνεπώς δεν είναι απαραίτητη η χρήση αποθηκευτικών μέσων ενέργειας αλλά λαμβάνεται ειδική μέριμνα για την εύρυθμη λειτουργία τους παράλληλα με το υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.



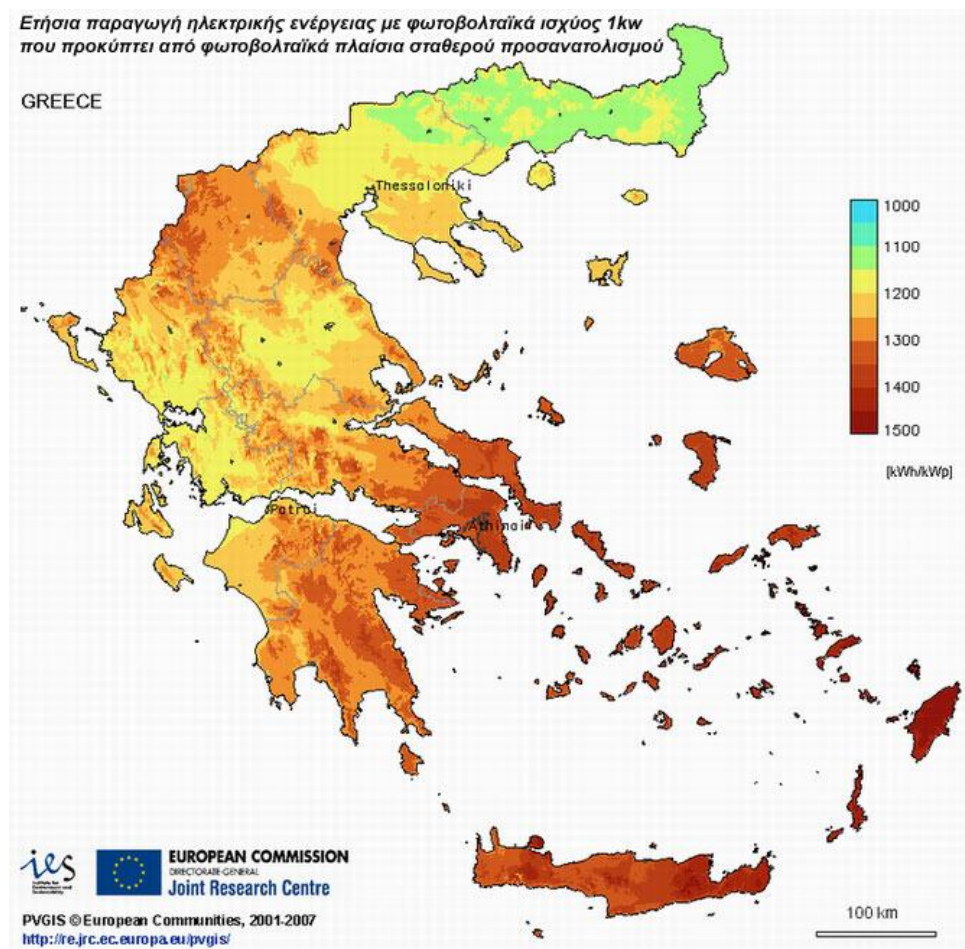
#### **2.1.7.1 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων**

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν μια σειρά σημαντικών πλεονεκτημάτων έναντι της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα ή άλλες μορφές ΑΠΕ:

- Δυνατότητα εγκατάστασης σε υπάρχοντα κτίρια λόγω της αθόρυβης λειτουργίας τους και του μικρού τους όγκου .
- Μηδενική παραγωγή ρύπων και μηδενική επιβάρυνση του περιβάλλοντος .

- Απουσία κινητών μερών και υγρών με αποτέλεσμα μηδενική ανάγκη για συντήρηση .
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (τουλάχιστον 30 χρόνια).
- Μεγάλο πεδίο εφαρμογών ιδιαίτερα στην Ελλάδα λόγω υψηλού ηλιακού δυναμικού.
- Μηδενικές απώλειες μεταφοράς και διανομής του ηλεκτρισμού (εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 10% σε σχέση με τη συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω δικτύου).
- Είναι βαθμωτά συστήματα, δηλαδή μπορούν να επεκταθούν σε μεταγενέστερη φάση για να αντιμετωπίσουν τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών, χωρίς μετατροπή του αρχικού συστήματος.
- Απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και σε πολύ μικρή κλίμακα, π.χ. σε επίπεδο μερικών δεκάδων W ή και mW .
- Δυνατότητα συνδυασμού με άλλες πηγές ενέργειας (υβριδικά συστήματα) .

Στον ακόλουθο χάρτη φαίνεται η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά ισχύος 1Kw που προκύπτει από φωτοβολταϊκά πλαίσια σταθερού προσανατολισμού :



Εικόνα 2.11: Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά ισχύος 1kW

### 2.1.7.2 Φωτοβολταϊκά πάρκα

Το φωτοβολταϊκό πάρκο είναι ένα είδος φωτοβολταϊκού συστήματος, αποτελούμενο από συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένες μεταξύ τους ώστε να παράγουν μεγάλα ποσά ισχύος .

Τα φωτοβολταϊκά πάρκα συνήθως εγκαθίστανται σε κατεξοχήν αγροτικές περιοχές και σε νησιωτικές εκτάσεις και μπορεί να λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε επικουρικά στο τοπικό δίκτυο. Η δομή τους και το πλήθος των φωτοβολταϊκών πανέλων που περιλαμβάνουν ποικίλει ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες που πρόκειται να καλύψει το πάρκο .

Παρακάτω δίνονται παραδείγματα δομής φωτοβολταϊκών πάρκων:



Εικόνα 2.12: Φωτοβολταϊκό πάρκο σε ελληνική επαρχία



Εικόνα 2.13: Νησιωτικό φωτοβολταϊκό πάρκο



Εικόνα 2.14: Φωτοβολταϊκό πάρκο σε ελληνική επαρχία





# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

## ***Αντιστροφείς φωτοβολταϊκών πάρκων***

### ***3.1 Το παρόν φωτοβολταϊκό πάρκο***

Το φωτοβολταϊκό πάρκο που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, αποτελείται από έξι αντιστροφείς μέγιστης ισχύος εξόδου 16,67 kWp ο καθένας. Σε κάθε αντιστροφήα είναι συνδεδεμένες 4 φωτοβολταϊκές συστοιχίες, των οποίων την ισχύ δέχεται σαν είσοδο ο αντιστροφέας και την μετατρέπει σε ισχύ κατάλληλη να τροφοδοτήσει το ηλεκτρικό δίκτυο.

#### ***3.1.1 Πλήθος κυττάρων και συστοιχιών***

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάθε αντιστροφέας δέχεται ως είσοδο την ισχύ εξόδου 4 φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Κάθε μία από αυτές τις συστοιχίες αποτελείται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών κυττάρων (πλαισίων), τα οποία είναι μεταξύ τους συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ οι 4 συστοιχίες του κάθε αντιστροφέα είναι μεταξύ τους συνδεδεμένες παράλληλα.

Ο αριθμός των πλαισίων κάθε συστοιχίας δεν καθορίζεται σαφώς λόγω της ποικιλίας των διαφορετικών τύπων μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, ενώ η ισχύς εξόδου κάθε συστοιχίας υπολογίζεται με απλοποιημένο τρόπο, αφού η επίδραση της ακτινοβολίας σε αυτή (και στα σχετικά μεγέθη τάσεως και ρεύματος) είναι αμελητέα για το αντικείμενο της μελέτης και την προτεινόμενη μέθοδο. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή τόσο του πλήθους των κυττάρων, όσο και του πλήθους των strings, γίνεται με βάση το εύρος τάσης λειτουργίας του αντιστροφέα. Συγκεκριμένα, η ισχύς των φωτοβολταϊκών κυττάρων δεν πρέπει να ξεπερνά αθροιστικά το ανώτατο όριο ισχύος εισόδου του αντιστροφέα, ενώ πρέπει η τάση τους να είναι μεγαλύτερη από το κατώτατο όριο του αντιστροφέα προκειμένου αυτός να ενεργοποιείται. Στη συγκεκριμένη εργασία θεωρείται ότι κάθε συστοιχία έχει ονομαστική ισχύ 4,5kW.

### **3.1.2 Υπολογισμός ισχύος εξόδου συστοιχιών**

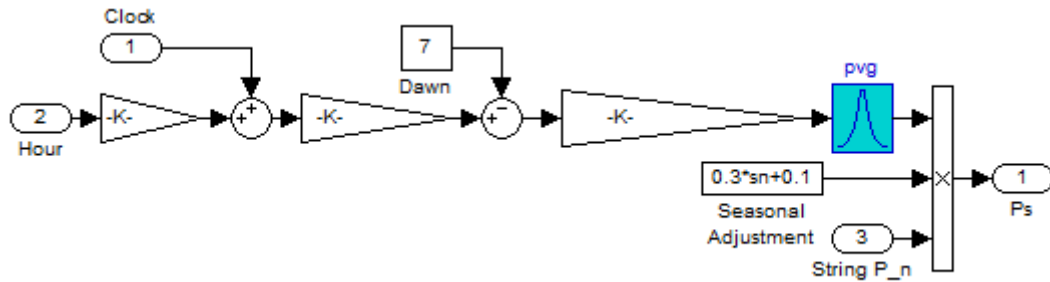
Όπως αναφέρθηκε, στην συγκεκριμένη εργασία δεν ενδιαφέρει το πλήθος των φωτοβολταϊκών κυττάρων που αποτελούν κάθε συστοιχία, καθώς οι συστοιχίες δεν μοντελοποιούνται ως φωτοβολταϊκές γεννήτριες. Για το λόγο αυτό, μας απασχολεί η έξοδος του πάρκου αυτή καθ' αυτή και όχι τόσο ο τρόπος αλληλεπίδρασης των πανέλων με την ηλιακή ακτινοβολία προς σχηματισμό της ισχύος αυτής. Συνεπώς, επιλέγεται μία προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών, λαμβάνοντας υπόψη σαφώς τους σημαντικούς παράγοντες από τους οποίους αυτή επηρεάζεται.

Οι παράγοντες που καθορίζουν την ισχύ εξόδου μιας φωτοβολταϊκής διάταξης είναι αυτοί που σχετίζονται με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη διάρκειά της και την θέση της. Επιπλέον, όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων επηρεάζει επίσης την ισχύ εξόδου τους. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω καταλήγουμε στο ότι οι παράμετροι που καθορίζουν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό την ηλιακή ακτινοβολία (ένταση, θέση, διάρκεια) και τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πανέλων είναι:

- η ώρα της ημέρας
- η εποχή.



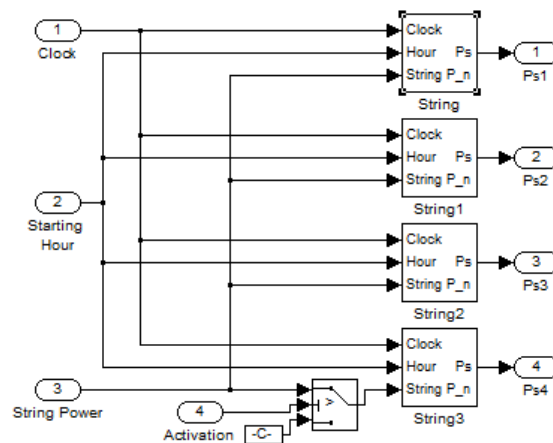
Σύμφωνα με τους παραπάνω συλλογισμούς, καταλήγουμε στην ακόλουθη μοντελοποίηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας:



Εικόνα 3.1: Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής συστοιχίας

### 3.1.3 Σύνδεση συστοιχιών και συνολική ισχύς εξόδου

Στο ακόλουθο σχήμα βλέπουμε την παράλληλη σύνδεση των 4 συστοιχιών που συνδέονται στον ίδιο αντιστροφέα :

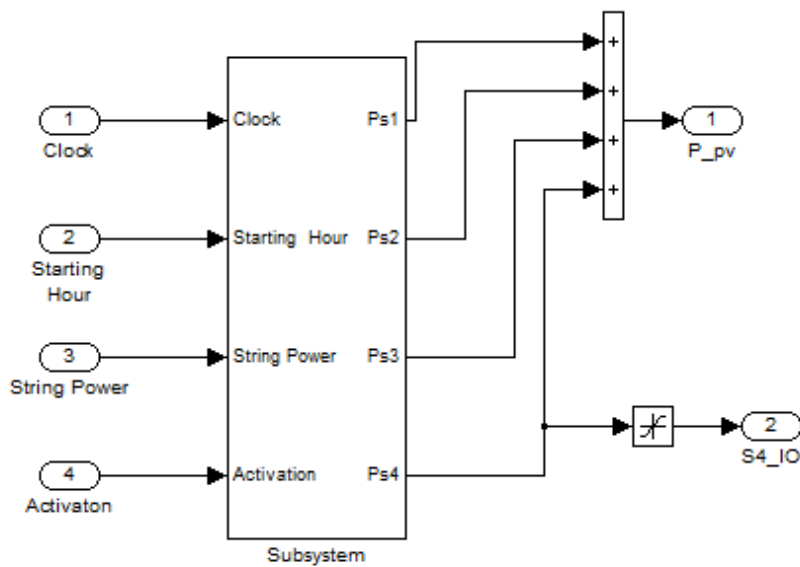


Εικόνα 3.2: Παράλληλη σύνδεση συστοιχιών

Όπως γίνεται φανερό από το μοντέλο, οι 4 συστοιχίες δέχονται τις ίδιες εισόδους (ρολόι, ώρα εκκίνησης και ονομαστική ισχύ συστοιχίας) και συνδέονται παράλληλα, έχοντας σαν έξοδο η καθεμία τη δική της ισχύ .

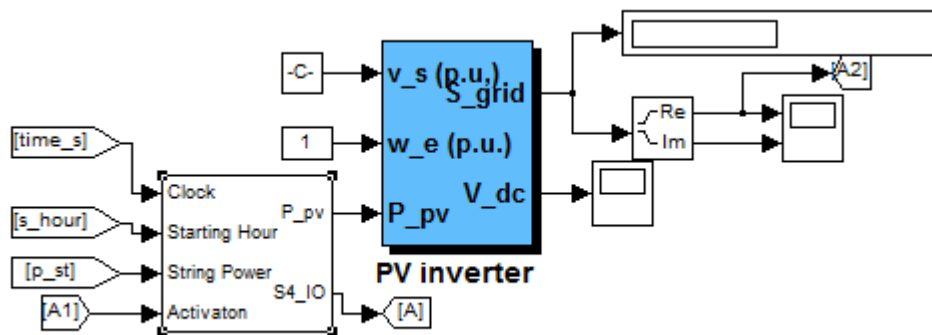
Παρατηρούμε επίσης ότι σε ένα από τα strings υπάρχει διακόπτης, η χρήση και λειτουργία του οποίου θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Στη συνέχεια, οι ισχύες εξόδου των 4 συστοιχιών αθροίζονται προς σχηματισμό της ισχύος εισόδου του αντιστροφέα:



Εικόνα 3.3: Μοντελοποίηση ισχύος εισόδου αντιστροφέα

Έτσι, η τελική μορφή κάθε αντιστροφέα του πάρκου είναι η ακόλουθη :



Εικόνα 3.4: Μοντελοποίηση αντιστροφέα

## 3.2 Αντιστροφείς [3]

### 3.2.1 Αρχές λειτουργίας αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς, γενικά, είναι διατάξεις των οποίων ο σκοπός είναι η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (dc) σε εναλλασσόμενο (ac) κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί σε

διάφορες εφαρμογές. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, ο αντιστροφέας καθορίζει την τάση του συστήματος από την dc πλευρά και η φωτοβολταϊκή γεννήτρια μπορεί τότε να διαμορφωθεί ανάλογα με τα χαρακτηριστικά εισόδου του αντιστροφέα.

Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές αρχές λειτουργίας που ισχύουν σε κάθε αντιστροφέα:

- 1) Η έξοδος του αντιστροφέα λαμβάνεται σαν μία ρυθμιζόμενη πηγή ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι η αλλαγή με το χρόνο της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ρυθμίζεται έτσι ώστε να εναρμονίζεται με τις αλλαγές της προβλεπόμενης τάσης του δικτύου .
- 2) Ανεξάρτητα από την κυματομορφή της τάσης του δικτύου, ο αντιστροφέας παρέχει εσωτερικώς ρυθμιζόμενο, ημιτονοειδώς διαμορφωμένο ρεύμα στο δίκτυο, το οποίο ρέει ταυτόχρονα με την τάση του δικτύου .
- 3) Ο αντιστροφέας επιχειρεί να βελτιώσει την κυματομορφή της τάσης του δικτύου παρέχοντας ηλεκτρισμό με την κατάλληλη κυματομορφή.

### **3.2.2 Απαιτήσεις από τους αντιστροφέις**

Σε κάθε εφαρμογή στην οποία επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί αντιστροφέας, αυτός καλείται να πληροί κάποιες προϋποθέσεις και να ικανοποιεί κάποιες απαιτήσεις, ορισμένες από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω :

- ✓ Ο αντιστροφέας επιθυμούμε να γνωρίζει πότε η ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι αρκετή ώστε να εξασφαλίζει σύνδεση με το δίκτυο και παροχή ηλεκτρικής ενέργειας .
- ✓ Ο αντιστροφέας πρέπει να διαθέτει λειτουργία ορισμένης υπερφόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι όταν η ισχύς ξεπεράσει το όριο της στην dc πλευρά, ο αντιστροφέας πρέπει να διατηρείται ενεργός ως το επόμενο πρωί .
- ✓ Ο αντιστροφέας πρέπει να έχει εσωτερική κατανάλωση μικρότερη από το 1% της ισχύος, ώστε να έχουμε τις μικρότερες δυνατές απώλειες κατά τη μετατροπή dc-ac .
- ✓ Ο αντιστροφέας πρέπει να απενεργοποιείται αυτόματα υπό συνθήκες βραχυκύκλωσης και ανοιχτοκύκλωσης .

- ✓ Ο αντιστροφέας πρέπει να διαθέτει διηλεκτρική δύναμη, δηλαδή τόσο η είσοδος του όσο και η έξοδος του να είναι ανθεκτικές στις υπερτάσεις .
- ✓ Ο συντελεστής ισχύος του αντιστροφέα επιθυμούμε να είναι μεγαλύτερος από 0,9 ώστε να αποφεύγεται η απορρόφηση μεγάλης ποσότητας ισχύος από το δίκτυο .
- ✓ Το αρμονικό περιεχόμενο του αντιστροφέα στην παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος στο δίκτυο πρέπει να είναι χαμηλό .
- ✓ Ο αντιστροφέας επιθυμούμε να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος από την πλευρά της ηλιακής ενέργειας .
- ✓ Ο αντιστροφέας πρέπει να αποσυνδέεται αυτόματα από το δίκτυο σε περίπτωση απόκλισης τάσης ή ισχύος .
- ✓ Ο αντιστροφέας δεν πρέπει να χρησιμοποιεί εσωτερικά φίλτρα ώστε τα σήματα συγχρονισμού που επιβάλλονται από την τάση του δικτύου των 50 Hz να μην προκαλούν καμία σημαντική διακοπή στη λειτουργία του .

### **3.2.3 Αντιστροφείς φωτοβολταϊκών πάρκων**

Οι αντιστροφείς αποτελούν το βασικότερο τμήμα του φωτοβολταϊκού πάρκου καθώς αναλαμβάνουν τη μετατροπή της συνεχούς τάσης των φωτοβολταϊκών πάνελ σε εναλλασσόμενη τάση, κατάλληλη να τροφοδοτήσει το δίκτυο .Ως γνωστόν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, και κατ ' επέκταση μία φωτοβολταϊκή συστοιχία και ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, μπορεί να παράγει μόνο συνεχή τάση. Υπάρχουν εφαρμογές, όπως η φόρτιση μπαταριών, οι οποίες δεν απαιτούν τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη. Σε περιπτώσεις όμως τροφοδοσίας φορτίων εναλλασσόμενου ρεύματος ή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρικό δίκτυο, η μετατροπή αυτή είναι απαραίτητη και την αναλαμβάνουν οι μετατροπείς .

Οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές φωτοβολταϊκών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- **Αντιστροφείς αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων:** Οι αντιστροφείς που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία λειτουργούν ανεξάρτητα από το δίκτυο, γι ' αυτό και πρέπει να εξασφαλίζουν σταθερή τάση και συχνότητα στα φορτία τους.
- **Αντιστροφείς συνδεδεμένοι στο δίκτυο:** οι αντιστροφείς αυτής της κατηγορίας οφείλουν να προσαρμόζουν την εναλλασσόμενη τάση στην έξοδό τους στη συχνότητα και στο επίπεδο τάσης του δικτύου στο οποίο συνδέονται

Αξίζει να σημειωθεί ότι, ανεξάρτητα από την κατηγορία στην οποία ανήκει ένας αντιστροφέας, μεγάλη σημασία έχει ο βαθμός απόδοσής του. Συγκεκριμένα, επιθυμούμε βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο από 0,8, διότι ο βαθμός απόδοσης συνδέεται άμεσα με το κόστος του συνολικού συστήματος. Επιτυγχάνοντας μεγάλη τιμή βαθμού απόδοσης, καταφέρνουμε μείωση του κόστους της κιλοβατώρας που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πάρκο, με αποτέλεσμα το κόστος ενέργειας να γίνεται συγκρίσιμο με εκείνο από άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας.

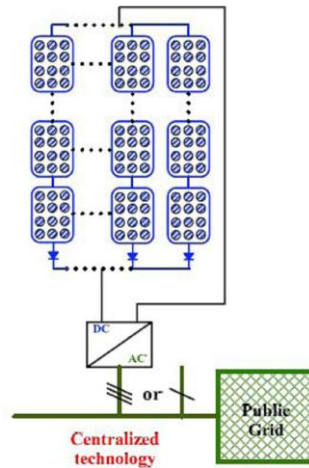
### **3.2.4 Διασύνδεση αντιστροφέων με τα φωτοβολταϊκά πάρκα**

Οι αντιστροφείς διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες με κριτήριο τον τρόπο διασύνδεσής τους με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια :

1. Κεντρικοποιημένοι αντιστροφείς
2. Αντιστροφείς στοιχειοσειράς
3. Αντιστροφείς πολλαπλών στοιχειοσειρών
4. AC-module

1) ΚΕΝΤΡΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ (centralized inverter):

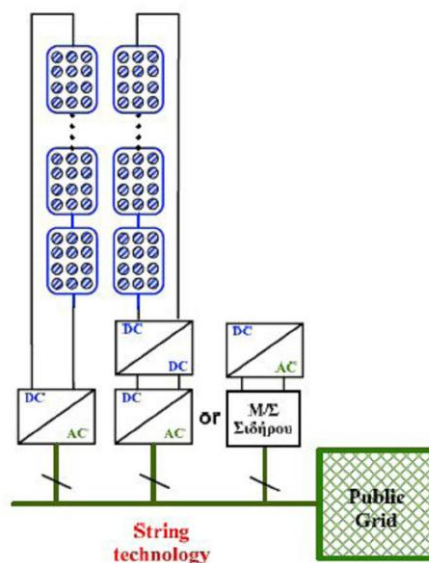
Στην τοπολογία αυτή, τα πλαίσια είναι αρχικά συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά σχηματίζοντας αλυσίδες (strings). Στη συνέχεια, οι αλυσίδες αυτές συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα προς επίτευξη υψηλών επιπέδων ισχύος.



Εικόνα 3.5: Κεντρικοποιημένος αντιστροφes

2) ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΣΕΙΡΑΣ (string inverter):

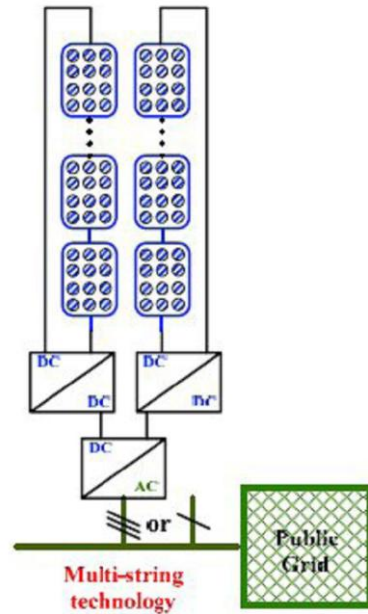
Ο αντιστροφes στοιχειοσειρας περιλαμβάνει μία μόνο αλυσίδα φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένη σε αυτόν. Στη συγκεκριμένη τοπολογία παρατηρούνται λιγότερες απώλειες σε σχέση με τον κεντρικοποιημένο αντιστροφes, μεγαλύτερη απόδοση και μειωμένο κόστος λόγω μαζικής παραγωγής.



Εικόνα 3.6: Αντιστροφes στοιχειοσειρας

### 3) ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΟΣΕΙΡΩΝ (multi-string inverter):

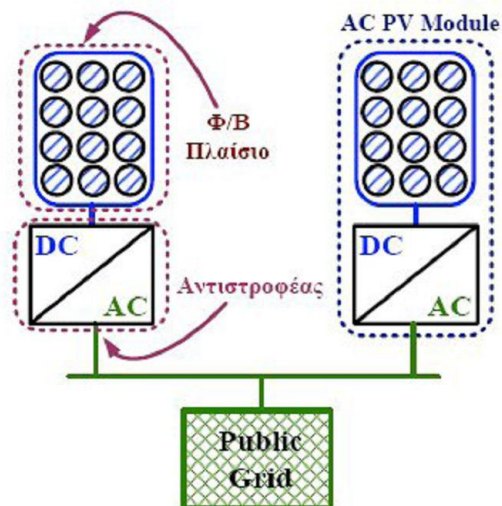
Ο αντιστροφέας πολλαπλών στοιχειοσειρών περιλαμβάνει τη σύνδεση διαφόρων αλυσίδων φωτοβολταϊκών πλαισίων με το δικό τους DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης το καθένα με ένα κοινό αντιστροφέα.



Εικόνα 3.7: Αντιστροφές πολλαπλών στοιχειοσειρών

### 4) AC-MODULE:

Η συγκεκριμένη τοπολογία αποτελεί την «ολοκλήρωση» του αντιστροφέα και των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε μία ηλεκτρική διάταξη.



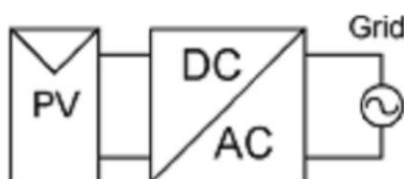
Εικόνα 3.8: Αντιστροφές τύπου AC module

### 3.2.5 Αριθμός βαθμίδων αντιστροφείας

Με βάση τον αριθμό των βαθμίδων οι αντιστροφείς διακρίνονται σε :

➤ **Αντιστροφείς μίας βαθμίδας :**

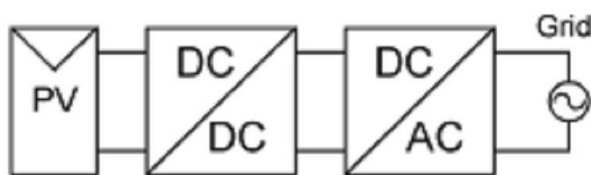
Στις διατάξεις αυτές υπάρχει ένας αντιστροφέας μίας βαθμίδας ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε εναλλασσόμενη. Ο έλεγχος του αντιστροφέα καθίσταται πολύπλοκος, διότι ένας ελεγκτής πρέπει να κάνει τον έλεγχο του αντιστροφέα, τον έλεγχο ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP), τον έλεγχο του ρεύματος στο δίκτυο και την ενίσχυση της τάσης.



Εικόνα 3.9: Αντιστροφείς μίας βαθμίδας

➤ **Αντιστροφείς δύο βαθμίδων :**

Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από δύο τμήματα. Το ένα τμήμα είναι ένας μετατροπέας DC-DC, ο οποίος ανυψώνει την τάση με σταθερή πρακτικά τιμή και ανιχνεύει το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Το δεύτερο τμήμα είναι ο αντιστροφέας, στον οποίο πραγματοποιείται με τη βοήθεια κατωδιαβατού φίλτρου η εναλλασσόμενη μορφή του ρεύματος προκειμένου να υλοποιηθεί η διασύνδεση με το δίκτυο.



Εικόνα 3.10: Αντιστροφείς δύο βαθμίδων

➤ **Αντιστροφείς πολλαπλών βαθμίδων :**

Στη διάταξη αυτή υπάρχει ένα πλήθος εν σειρά συνδεδεμένων DC-DC μετατροπέων και ένας αντιστροφέας για τη σύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος με το δίκτυο.



### 3.2.6 Ανάλυση κυκλώματος αντιστροφών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται είναι αντιστροφείς τύπου RLC κυκλώματος, σε καθέναν εκ των οποίων εισέρχεται η ισχύς τεσσάρων συστοιχιών (strings ), οι οποίες είναι παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους.

Παρακάτω γίνεται ανάλυση των επιμέρους σταδίων λειτουργίας ενός αντιστροφέα:

#### 1. DC LINK :

Το dc link αποτελεί στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της διαφοράς μεταξύ της dc ισχύος που προέρχεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες και της χρονικά μεταβαλλόμενης ισχύος που απορροφάται από το δίκτυο. Σκοπός του dc link είναι να διατηρεί σταθερή την τιμή της τάσης  $V_{dc}$ , η οποία αντιστοιχίζεται στην τάση στα άκρα ενός πυκνωτή, ώστε να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της ισχύος των φωτοβολταϊκών και της ισχύος στην έξοδο του αντιστροφέα. Αυτό μεταφράζεται μαθηματικά με την εξίσωση της **αρχής διατήρησης της ενέργειας**:

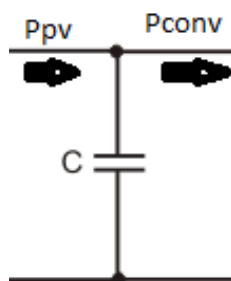
$$P_{conv} = P_{in} + P_{dc}$$

όπου:

$P_{conv}$ : η ισχύς στην έξοδο του αντιστροφέα

$P_{in}$ : η ισχύς που αντιστοιχεί στην πηγή ρεύματος (εν προκειμένω στα φωτοβολταϊκά πλαίσια )

$P_{dc}$ : η ισχύς του πυκνωτή c

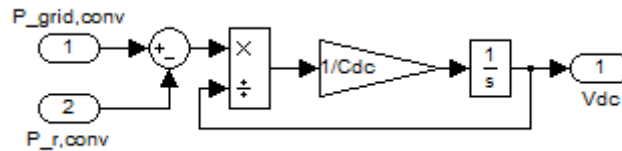


Εικόνα 3.11: Ισοδύναμο κύκλωμα dc link

Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα του dc link όπως προσομοιώθηκε στο simulink με βάση όσα ειπώθηκαν, τα οποία περιγράφονται από την εξίσωση :

$$\frac{1}{sC} * (P_{pv} - P_{conv}) = V_{dc}$$

Η εξίσωση αυτή αντιστοιχεί στην ουσία στην εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, στην οποία αντικαταστάθηκε η τιμή της ισχύος του πυκνωτή ως συνάρτηση της τάσης στα άκρα του .



Εικόνα 3.12 :Μοντελοποίηση dc link

## 2. DC LINK CONTROL :

Η γενική χρήση των DC/DC μετατροπέων είναι η μετατροπή μιας μη σταθεροποιημένης dc τάσης σε μια ελεγχόμενη τάση εξόδου .

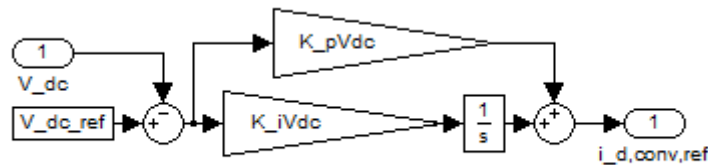
Στα φωτοβολταϊκά συστήματα οι DC/DC μετατροπείς καθίστανται ιδιαίτερα χρήσιμοι παρέχοντας τη δυνατότητα προσαρμογής της dc τάσης ή του ρεύματος σε οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος και τη μετατροπή των συνεχών μεγεθών ρεύματος και τάσης, σε συνεχή με συγκεκριμένη επιθυμητή τιμή. Με άλλα λόγια χρειάζονται ώστε να υποβιβάζουν ή να ανυψώνουν την τάση εξόδου των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην επιθυμητή τιμή .

Είναι επιθυμητό η παραγόμενη ενέργεια να γίνεται σε όσο το δυνατό υψηλότερη τάση ώστε το ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς να μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνονται και οι απώλειες που εξαρτώνται από το τετράγωνό του. Τέλος, η συσκευή πρέπει να διατηρεί μια σταθερή και ελέγξιμη dc τάση εξόδου, η οποία αντιστοιχεί στην τάση του πυκνωτή του αντιστροφέα ανεξάρτητα, από τυχόν αλλαγές στην είσοδο. Συγκεκριμένα, η επιθυμητή τιμή της  $V_{dc}$  είναι η τιμή της  $V_{dcref}$ , η οποία υπολογίζεται από τον αλγόριθμο MPPT του αντιστροφέα. Στην προκειμένη μοντελοποίηση, καθώς για λόγους που θα αναλυθούν στη συνέχεια δεν περιλαμβάνεται μοντελοποίηση MPPT, η τιμή της dc τάσης αναφοράς είναι υπολογισμένη σε μία σταθερή τιμή για την οποία η ισχύς εξόδου των συστοιχιών εξισώνεται με την ισχύ του φορτίου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το dc link control στην ουσία εξυπηρετεί πραγματοποιώντας τη σύγκριση της τιμής  $V_{dc}$  που προέρχεται από τα ηλιακά πλαίσια, με την επιθυμητή τιμή αναφοράς  $V_{dcref}$  και υπολογίζοντας (με βάση αυτή τη

σύγκριση)το επιθυμητό ρεύμα αναφοράς  $I_{dref}$ . Ακολούθως δίνονται η εξίσωση και το μοντέλο του dc link control στο simulink :

$$I_{drefconv} = \int_0^t k_i * (V_{dcref} - V_{dc})dt + k_p * (V_{dcref} - V_{dc})$$



Εικόνα 3.13: Μοντελοποίηση dc link control

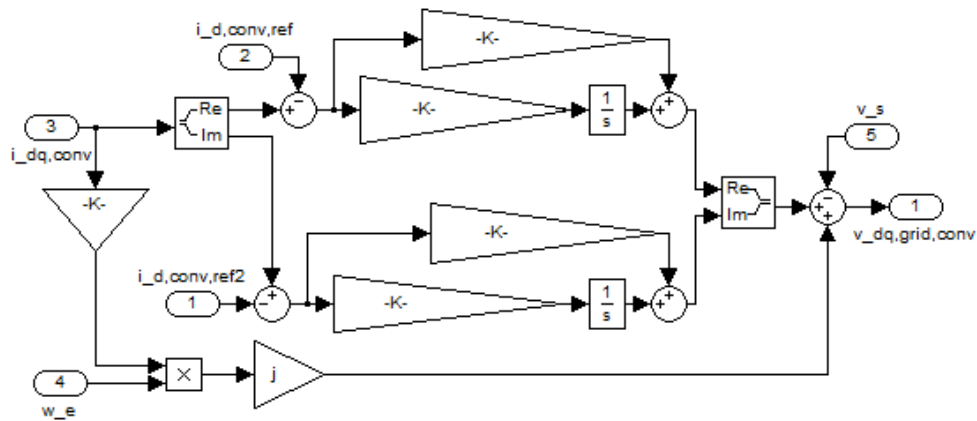
### 3. CONVERTER CURRENT CONTROL :

Ο inverter πέραν της μετατροπής του συνεχούς ρεύματος των συστοιχιών σε εναλλασσόμενο, βοηθά στον έλεγχο της παρεχόμενης στο δίκτυο ισχύος, επιτελεί διανυσματικό έλεγχο (vector control) της τάσης εξόδου και συγχρονίζει την ac πλευρά της εγκατάστασης με το τοπικό δίκτυο. Αυτός είναι που καθορίζει την τάση του συστήματος στην dc πλευρά και η φωτοβολταϊκή γεννήτρια διαμορφώνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά εισόδου του. Στην ουσία, αρμοδιότητά του είναι η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος των ηλιακών κυττάρων σε εναλλασσόμενο συχνότητας 50 Hz

Συγκεκριμένα, η λειτουργία του βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση που υπολογίζει την τάση του δικτύου :

$$V_{dq,grid} = \left\{ L * \frac{d}{dt} i_{dq,conv} - V_s + r * i_{dq,conv} + j * \omega_e * L * i_{dq,conv} \right\}$$

Το ρεύμα αναφοράς και το ρεύμα του αντιστροφέα διέρχονται από ένα PI ελεγκτή ώστε να υπολογιστεί η επιθυμητή τιμή της τάσεως. Στην πραγματικότητα γίνεται έλεγχος και προσαρμογή των τιμών των ρευμάτων στους dq άξονες. Γενικά, επιλέγεται ο PI ελεγκτής διότι προσφέρει μηδενικά σφάλματα στη μόνιμη κατάσταση. Τέλος, υπάρχει και ένα στάδιο στο οποίο γίνεται άρση της επιρροής της αυτεπαγωγής (προστίθεται το γινόμενο  $j * \omega_e * L * i_{dq,conv}$ ) το οποίο γίνεται με σκοπό το σύστημα να γίνει γραμμικό ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ο PI έλεγχος. Το κύκλωμα που προκύπτει για την προσομοίωση είναι το παρακάτω :



Εικόνα 3.14: Μοντελοποίηση converter current control

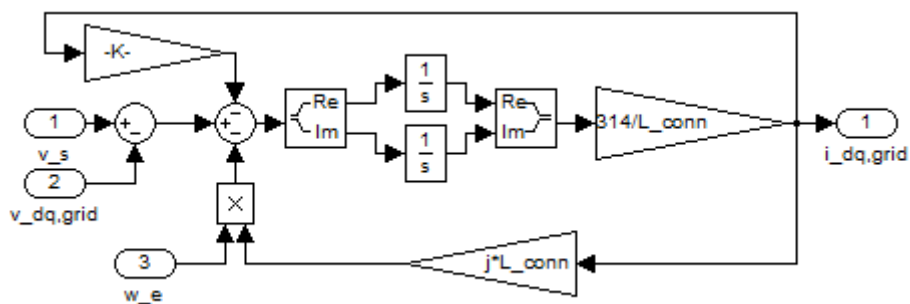
#### 4. CONNECTING RL:

Στο σημείο σύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο και από την πλευρά του δικτύου, υπάρχει RL φίλτρο, το οποίο χρησιμοποιείται για να μειώνει τις αρμονικές που φτάνουν στο δίκτυο από τον αντιστροφέα και να επιτρέπει τον έλεγχο της τάσης εξόδου του .

Στο σημείο αυτό γίνεται χρήση του ακόλουθου τύπου που δίνει το ρεύμα του δικτύου :

$$I_{dq,grid} = \{V_{dq,grid} - V_{dq,conv} - r * i_{dq,grid} - j * L * \omega_e * i_{dq,grid}\}$$

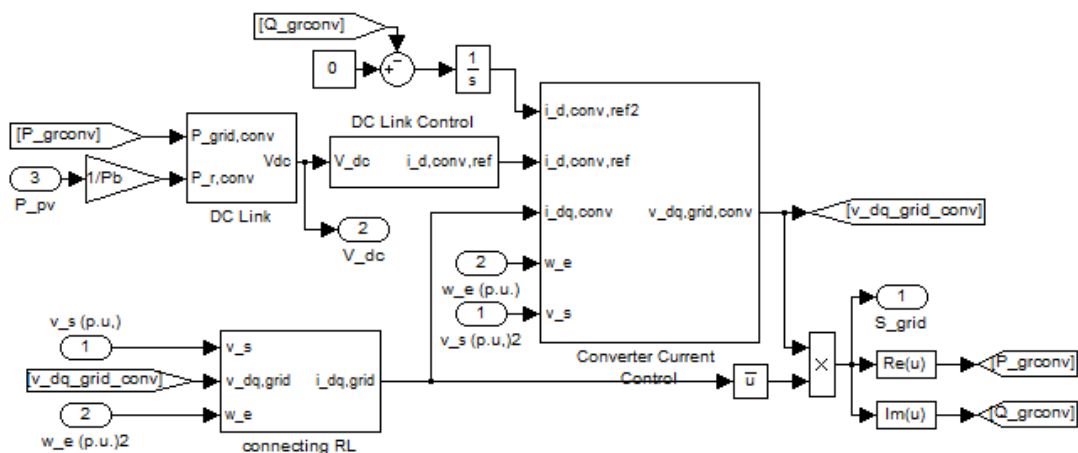
Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση είναι το παρακάτω :



Εικόνα 3.15: Μοντελοποίηση connecting RL

### 3.2.7 Προσομοίωση κυκλώματος αντιστροφέα

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, καθώς και τις μοντελοποιήσεις των επιμέρους τμημάτων του αντιστροφέα, προκύπτει το ακόλουθο συνολικό μοντέλο:



Εικόνα 3.16: Μοντέλο κυκλώματος αντιστροφέα

### 3.3 Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Trackers) [4], [5]

Όπως είναι γνωστό, το ρεύμα και η τάση εξόδου ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι συνεχή μεγέθη. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές συσκευές που διατηρούν σταθερή σχεδόν τάση στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών μεταβάλλεται μη γραμμικά συναρτήσει της εντάσεως που παρέχουν στο εξωτερικό κύκλωμα, στην περίπτωση που η ηλιακή ακτινοβολία ή η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μεταβληθούν. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος των μετατροπέων έτσι ώστε για τις διάφορες μεταβολές της ακτινοβολίας ή της θερμοκρασίας, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία να παρέχουν στην κάθε περίπτωση τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύ. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται από τους ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPPTs).

Οι MPPTs είναι στην ουσία dc – dc μετατροπείς οι οποίοι χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να αυξάνεται η τάση μέχρι το επιθυμητό επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό η έξοδος του μετατροπέα γίνεται το ζεύγος τάσης και ρεύματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ, με σκοπό την αύξηση της οικονομικής απόδοσης της εγκατάστασης.

Ο τρόπος λειτουργίας των MPPTs έγκειται στην εξής διαδικασία:

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου παίρνει την κατάλληλη τιμή ώστε να οδηγεί το σύστημα να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Ωστόσο η ακτινοβολία που πέφτει πάνω στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, επομένως δεν είναι σταθερή και η τάση

εξόδου του. Άρα η τάση και η ένταση που δίνει ως έξοδο το στοιχείο δεν πρέπει να εξαρτώνται από την αντίσταση, αλλά πρέπει κάθε φορά να είναι το ζεύγος τιμών που δίνει τη μέγιστη ισχύ εξόδου. Για το λόγο αυτό, κάθε φορά που η ακτινοβολία ή η θερμοκρασία μεταβάλλονται, η λειτουργία του στοιχείου μετατοπίζεται σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$dP = dV * I + dI * V$$

Στο σημείο μέγιστης ισχύος όμως, ισχύει  $dP = 0$ . Επομένως η εξίσωση γίνεται:

$$\frac{dV}{dI} = - \frac{V}{I}$$

Με βάση την εξίσωση αυτή διακρίνονται 3 μέθοδοι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

1. Αυξητική Αγωγιμότητα (incremental conductance):

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τις αλλαγές του ρεύματος και της τάσης. Ο υπολογισμός είναι σχετικά πολύπλοκος, ωστόσο εντοπίζονται οι μεταβολές των συνθηκών ταχύτερα απ' ό,τι με την μέθοδο διαταραχής και παρατήρησης. Ο όρος  $\frac{dV}{dI}$  αντιπροσωπεύει την δυναμική αντίσταση της πηγής ( $z_d$ ), ενώ ο όρος  $\frac{V}{I}$  αντιπροσωπεύει την στατική αντίσταση ( $z_s$ ). Μια διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στη φωτοβολταϊκή πηγή και η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιείται η αντίσταση μέγιστου ισχύος:  $z_d = -z_s$ . Η τιμή της τάσης που προκύπτει διατηρείται έως ότου προκύψει η επόμενη μεταβολή.

2. Διαταραχή και παρατήρηση (perturb and observe):

Στη συγκεκριμένη μέθοδο παρακολουθούνται συνεχώς οι τιμές της τάσης εξόδου των φωτοβολταϊκών και προκαλείται διαταραχή της τάσης εξόδου ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Όταν με την ανύψωση της τάσης αυξάνεται η τιμή της ισχύος εξόδου, δηλαδή όταν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος στην χαρακτηριστική καμπύλη, η τάση αυξάνεται συνεχώς μέχρι να επέλθει η ισορροπία που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αντίθετα, όταν με την ανύψωση της τάσης η ισχύς μειώνεται, δηλαδή το σημείο λειτουργίας βρίσκεται δεξιά του σημείου μέγιστης ισχύος, η τάση μειώνεται μέχρι να επέλθει ισορροπία. Γενικά ισχύει ότι:

- Σημείο λειτουργίας αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος:  $\frac{dV}{dI} > 0$ .
- Σημείο λειτουργίας δεξιά του σημείου μέγιστης ισχύος:  $\frac{dV}{dI} < 0$ .
- Σημείο μέγιστης ισχύος:  $\frac{dV}{dI} \approx 0$ .

Πρόκειται για την ευκολότερη μέθοδο ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος, όσο αφορά την εφαρμογή της, ωστόσο το μειονέκτημά της είναι ότι ενδέχεται να προκαλέσει ταλαντώσεις στην ισχύ εξόδου.

### 3. Μέθοδος σταθερής τάσης (constant voltage):

Στην συγκεκριμένη μέθοδο το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου τηρείται κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος, ρυθμίζοντας την τάση της συστοιχίας σε μία τιμή αναφοράς κοντά στην τιμή της τάσης του σημείου μέγιστης ισχύος ή κοντά στην τιμή μιας άλλης προ – εκτιμημένης καλύτερης τάσης. Στη μέθοδο αυτή υποτίθεται ότι οι διακυμάνσεις της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας δεν επηρεάζουν την τάση του σημείου μέγιστης ισχύος και ότι η τάση αναφοράς αποτελεί επαρκή προσέγγιση του σημείου μέγιστης λειτουργίας. Ως εκ τούτου, το σημείο μέγιστης ισχύος δεν είναι ποτέ ακριβές και για το λόγο αυτό διαφορετικά δεδομένα πρέπει να υιοθετούνται για διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Συνεπώς, δεν πρόκειται για μέθοδο ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος με την αυστηρή έννοια του όρου, γι' αυτό και συνήθως χρησιμοποιείται συνδυαστικά με άλλες μεθόδους.

### 4. Μέθοδος ανοιχτοκύκλωσης:

Στη μέθοδο αυτή γίνεται συνήθως χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, έστω  $\kappa$ . Έτσι, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσής του. Η τάση των υπόλοιπων (παραγωγικών)φωτοβολταϊκών στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή ίση με  $\kappa * V_{oc}$ , ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη ισχύς. Ένας άλλος τρόπος υλοποίησης είναι με χρήση διακόπτη στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ο οποίος μπορεί να δημιουργεί συνθήκες ανοιχτοκυκλώματος.

##### 5. Μέθοδος βραχυκυκλώσεως (short – current pulse method):

Στη μέθοδο αυτή η ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος επιτυγχάνεται παρέχοντας ένα ρεύμα αναφοράς στον ελεγκτή μετατροπής ισχύος (power converter controller). Στην πραγματικότητα, το βέλτιστο ρεύμα λειτουργίας για μέγιστη ισχύ εξόδου είναι ανάλογο προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$I_{ref} = k_i * I_{sc}$$

όπου  $k_i$  αναλογική σταθερά.

Επομένως, η μέθοδος αυτή απαιτεί τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Για το σκοπό αυτό, τοποθετείται διακόπτης παράλληλα με τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, προκειμένου να δημιουργεί συνθήκες βραχυκυκλώματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν  $V_{pv} = 0$  δεν παρέχεται ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα και επομένως δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας.

Γενικά, παρατηρούμε ότι σε κάθε μέθοδο το κύκλωμα ελέγχου του MPPT στέλνει σήμα στον dc – dc μετατροπέα για ανύψωση ή μείωση της τάσης μέχρι να βρεθεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Δηλαδή, ο MPPT λειτουργεί προσαρμόζοντας την τάση του DC – link έτσι ώστε να απορροφάται από το δίκτυο η μέγιστη δυνατή ισχύς.

Το τελευταίο σημείο σημαίνει ότι αν υποθεθεί ότι από την πλευρά AC του αντιστροφέα δεν απορροφάται η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς από τα Φ/B, τότε υπάρχει κίνδυνος η τάση των Φ/B συστοιχιών να οδηγηθεί σε τιμές που αντιστοιχούν στην τάση ανοιχτοκυκλώματος. Αντίστοιχα και αναλόγως της μεθόδου MPPT, υπό τις ίδιες συνθήκες μειωμένης απορρόφησης ισχύος από μεριάς του φορτίου, οι συστοιχίες μπορεί να οδηγηθούν σε τιμές ρεύματος βραχυκύκλωσης. Στην παρούσα εργασία, ο αλγόριθμος MPPT παραλήφθηκε κατά τη μοντελοποίηση του αντιστροφέα μιας και δεν αναπτύχθηκε διακοπτικό μοντέλο του τελευταίου, ενώ και η απόκριση του αλγορίθμου σε μεταβολές της ηλιοφάνειας ή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της εισόδου των Φ/B είναι αμελητέας χρονικής καθυστέρησης.



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

## ***Αποθηκευτικές διατάξεις***

### ***4.1 Υλοποίηση συστήματος φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση αποθηκευτικών διατάξεων***

#### ***4.1.1 Αποθηκευτικές διατάξεις σε συστήματα ΑΠΕ***

Η συνεχής διείσδυση των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα έχει δημιουργήσει την ανάγκη της αποθήκευσης της ενέργειας. Σε κάθε σύστημα ΑΠΕ το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με το απαιτούμενο φορτίο. Η εποχιακή διακύμανση των ενεργειακών απαιτήσεων και η διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας οδηγούν σε διαφορές και σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης ενέργειας. Όσο αφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα συγκεκριμένα, η αναγκαιότητα για αποθήκευση προκύπτει από το γεγονός ότι η παραγόμενη ισχύς είναι απρόβλεπτη, καθώς εξαρτάται από τις μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Με μία πρώτη προσέγγιση, η λύση στο πρόβλημα εστιάστηκε στην ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς, με την εξωτερική διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων, με αποτέλεσμα την ενίσχυση του δικτύου και την μείωση της επίδρασης των μεταβολών της ηλιακής ακτινοβολίας. Μία επιπλέον λύση βρίσκεται στα λεγόμενα «έξυπνα δίκτυα» (smart grids), τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου της ζήτησης καθώς και τη συλλογή και επεξεργασία στοιχείων σχετικών με την ζητούμενη ισχύ.

Προκειμένου όμως ένα σύστημα ΑΠΕ να λειτουργεί αυτόνομα και ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο, η ευκολότερη και αποτελεσματικότερη μέθοδος καθίσταται η αποθήκευση ενέργειας. Για την αποθήκευση της επιπλέον ενέργειας που παράγεται από ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις, των οποίων ο ρόλος είναι διττός αφού δρουν είτε ως καταναλωτές όταν η περίσσεια ισχύος αποθηκεύεται σ' αυτές, είτε ως παραγωγοί όταν εγχέουν την αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο σε περιπτώσεις που το σύστημα ΑΠΕ αδυνατεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες του δικτύου.

Για κάθε εφαρμογή επιλέγεται το κατάλληλο μέσο αποθήκευσης το οποίο πρέπει να έχει τις απαραίτητες ιδιότητες ώστε να συνάδει με τις ανάγκες του δικτύου. Γενικά το ιδανικό μέσο αποθήκευσης θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύει μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε μικρό χώρο και να έχει τη δυνατότητα να εγχέει αυτή την ενέργεια αργά ή ταχέως ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή και τις ανάγκες της. Θα πρέπει επίσης να λειτουργεί με έναν κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης με μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς να καταστρέφεται. Πρέπει ακόμη να είναι ασφαλές, οικονομικό και να μην απαιτεί μεγάλη συντήρηση. Φυσικά δεν υπάρχει αποθηκευτική διάταξη που να πληροί όλες αυτές τις προδιαγραφές!

#### **4.1.1.1 Μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας**

##### **1. Ηλεκτρικοί συσσωρευτές**

Ένας ηλεκτρικός συσσωρευτής ή, όπως κοινώς ονομάζεται, μία μπαταρία είναι μία χημική πηγή ρεύματος ικανή να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, μετατρέποντας τη σε χημική, και όταν αυτό απαιτείται να την αποδίδει σε εξωτερικό κύκλωμα. Ο σχηματισμός μίας μπαταρίας γίνεται με την σε σειρά ή εν παραλλήλω σύνδεση ενός ή περισσότερων ηλεκτροδίων, ανάλογα με την επιθυμητή παραγόμενη τάση. Η

σύνδεση των ηλεκτροδίων αυτών με εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος και άρα εκφόρτιση της μπαταρίας. Η φόρτιση της μπαταρίας γίνεται όταν περάσει από αυτήν συνεχές ρεύμα από άλλη πηγή, ενώ την ίδια στιγμή άλλες διεργασίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική.



- Μπαταρίες μολύβδου-οξέως: αποτελούν το παλαιότερο είδος επαναφορτιζόμενων μπαταριών που ξεκίνησε να χρησιμοποιείται. Παρότι διαθέτουν μικρή ενεργειακή πυκνότητα και περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης, εξακολουθούν να βρίσκουν εφαρμογή σε μπαταρίες αυτοκινήτων, εφαρμογές αδιάλειπτης παροχής συχνότητας και γενικά σε εφαρμογές χαμηλού κόστους.
- Μπαταρίες ιόντος – λιθίου: διαθέτουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, καθώς και μικρότερο ποσοστό εκφόρτισης σε συνθήκες εκτός λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως κινητά τηλέφωνα, φωτογραφικές μηχανές και λάμπες .
- Μπαταρίες νικελίου – καδμίου: εμφανίζουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, αλλά είναι κατώτερης ποιότητας από τις μπαταρίες λιθίου – ιόντος .
- Μπαταρίες νικελίου υβριδίου μετάλλου: είναι γενικά καλύτερης ποιότητας από τα προηγούμενα είδη μπαταριών, ωστόσο, η λειτουργία τους συνεπάγεται και κάποια αρνητικά αποτελέσματα όπως ο υψηλός ρυθμός εκφόρτισης σε συνθήκες εκτός λειτουργίας .
- Μπαταρίες θειούχου νατρίου: διαθέτουν πλεονεκτήματα, όπως υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση, σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας και μεγάλη ασφάλεια. Έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο αποθηκεύοντας ενέργεια στις περιόδους χαμηλής ζήτησης και επιστρέφοντάς την στο δίκτυο στις αιχμές του φορτίου ή σε περιπτώσεις διαταραχής .
- Συσσωρευτές ροής: κύριο χαρακτηριστικό αυτών των μπαταριών είναι η απόξευξη της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας από την ικανότητα παροχής ισχύος. Συνεπώς, οι συσσωρευτές αυτοί χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρικό δίκτυο ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, δεδομένου ότι η ενέργεια προς αποθήκευση και η ισχύς των συσσωρευτών επιλέγεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του δικτύου .

Ανεξάρτητα με το είδος στο οποίο ανήκει ένας ηλεκτρικός συσσωρευτής, διαθέτει κάποια βασικά μειονεκτήματα που καθιστούν σχετικά ασύμφορη τη χρήση του σε εφαρμογές συστημάτων ΑΠΕ, και κυρίως σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος .

### Μειονεκτήματα :

- Μικρή ενέργεια αποθήκευσης .
- Χαμηλή πυκνότητα ισχύος .
- Περιορισμένη διάρκεια ζωής .
- Κόστος απαγορευτικό για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ισχύος .

### **2. Υπερπυκνωτής :**

Ο υπερπυκνωτής είναι ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής και σχετίζεται τόσο με μια μπαταρία όσο και με έναν πυκνωτή, με αποτέλεσμα η τάση ενός στοιχείου να



περιορίζεται σε μερικά Volts. Η τεχνολογία των υπερπυκνωτών χρησιμοποιείται συχνά για την εξυπηρέτηση γρήγορων και απότομων μεταβολών των φορτίων. Συγκριτικά με τους συμβατικούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές έχουν σημαντικά

μεγαλύτερο εμβαδό επιφάνειας ηλεκτροδίου, γεγονός πολύ σημαντικό αφού η επιφάνεια του ηλεκτροδίου αποτελεί καθοριστική παράμετρο από την οποία εξαρτάται η ποσότητα του ρεύματος που μπορεί να απορροφηθεί. Έχει αναφερθεί χωρητικότητα υπερπυκνωτή 5.000 F και ενεργειακή πυκνότητα 5 wh/kg, ενώ σε ένα συμβατικό πυκνωτή η τυπική τιμή είναι 0.5 wh/kg .

Τα μειονεκτήματα, ωστόσο, που παρουσιάζει η συγκεκριμένη τεχνολογία αποθηκευτικής διάταξης είναι πολλά .

### Μειονεκτήματα :

- Μικρή διάρκεια ζωής (το πολύ 12 έτη).
- Υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης .
- Λόγω χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας, το υψηλό ποσό ισχύος είναι διαθέσιμο για μικρό χρονικό διάστημα .
- Μεγάλο κόστος .

### **3. Υπεραγωγία πηνία :**

Το υπεραγωγίο πηνίο είναι μια ηλεκτρομαγνητική διάταξη, όπου η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από την ροή συνεχούς

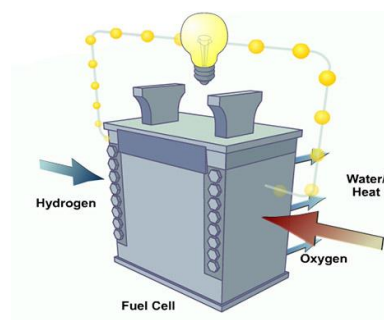
ρεύματος σε ένα υπεραγώγιμο τύλιγμα. Τα υπεραγώγιμα πηνία έχουν πολύ μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρικής ισχύος, μεγάλο συντελεστή απόδοσης (πάνω από 90 %) και αρκετά μικρή χρονική απόκριση. Βρίσκουν εφαρμογή στα ηλεκτρικά δίκτυα με αυξημένη αιολική διείσδυση, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα ισχύος.

#### Μειονεκτήματα :

- Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα .
- Τα μεγάλα συστήματα αυτού του είδους εμφανίζουν αστάθεια λόγω του ισχυρού μαγνητικού πεδίου .
- Απαιτήση συστήματος ψύξης για την εφαρμογή του φαινομένου της μηδενικής αντίστασης, που καθιστά το σύστημα πολύπλοκο και αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας .
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεγάλων συστημάτων αυτού του τύπου, λόγω του μαγνητικού πεδίου .

#### **4. Κυψέλες καυσίμου :**

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μικρές δεξαμενές όπου παράγεται και αποθηκεύεται υδρογόνο. Όταν απαιτηθεί, το υδρογόνο μέσω της διαδικασίας της καύσης παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το κατάλοιπο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου είναι καθαρό νερό.

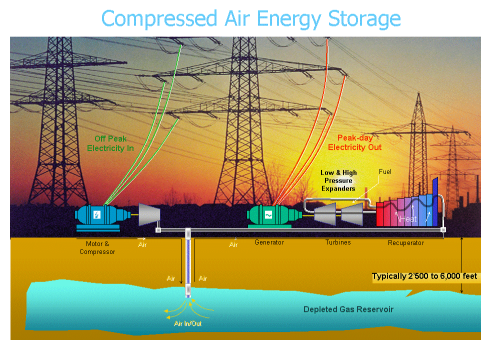


#### Μειονεκτήματα :

- Πολύ μικρή απόδοση, περίπου 25% .
- Μη ασφαλής και αποτελεσματική αποθήκευση .
- Αδυναμία χρήσης σε μαζική κλίμακα, διότι το παγκόσμιο δίκτυο διανομής του δεν υφίσταται .
- Μεγάλο κόστος διατάξεων .

## 5. Πεπιεσμένος Αέρας :

Τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα αφορούν σε μακροπρόθεσμη και μεγάλης κλίμακας ενεργειακή αποθήκευση (από 50 έως 300 MW ), ενώ η απόδοσή τους φτάνει το 80%. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ενέργεια αιχμής για τη συμπίεση και την αποθήκευση ποσοτήτων αέρα σε μεγάλες



πίεσεις και σε υπόγειο αεροστεγή ταμειυτήρα. Όταν θεωρηθεί απαραίτητο, ποσότητες συμπιεσμένου αέρα αποδεσμεύονται από τον ταμειυτήρα και στη συνέχεια θερμαίνονται και εκτονώνονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### Μειονεκτήματα :

- Απώλειες ενέργειας κατά την αποθήκευση στον ταμειυτήρα και κατά την άντληση του συμπιεσμένου αέρα, καθώς και λόγω των βαθμών αποδόσεως των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης .
- Τεράστιο κόστος λόγω της κατασκευής του υπόγειου ταμειυτήρα .

## 6. Αντλησιοταμίευση :

Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πλέον αξιόπιστη τεχνολογία για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε επίπεδο μακράς διάρκειας. Η λειτουργία της βασίζεται στην εκμετάλλευση της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η δυναμική ενέργεια του νερού (εκφραζόμενη από το επίπεδο στάθμης της θάλασσας) μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια μέσω υδροστροβίλου. Κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου είναι η δράση του ήλιου. Το σύνολο των έργων και του εξοπλισμού μέσω των οποίων η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ονομάζεται υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ) .

### Μειονεκτήματα :

- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με το οικοσύστημα ιδιαίτερα στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα από τη δημιουργία τεχνητών λιμνών για αποθήκευση και την κατάκλιση μεγάλων εκτάσεων .
- Μεγάλο επενδυτικό κόστος.

## 7. Σφόνδυλοι κινητικής ενέργειας :

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω σφονδύλων κινητικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την επιτάχυνση ενός δρομέα σε πολύ υψηλή ταχύτητα, μετατρέποντας την ηλεκτρική ισχύ σε περιστροφική. Όταν απορροφάται ενέργεια από τη διάταξη, η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου αυξάνει ως αποτέλεσμα της διατήρησης της ενέργειας. Το αντίθετο συμβαίνει όταν αποδίδεται ενέργεια στο ηλεκτρικό σύστημα από τη διάταξη, οπότε η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου μειώνεται.

### Μειονεκτήματα :

- Υψηλό κόστος επένδυσης .
- Κίνδυνος ατυχήματος σε περίπτωση που σπάσει κάποιος δίσκος .
- Υψηλά ποσοστά αυτοεκφόρτισης -> μη επάρκεια για μακροπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση .

## **ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ :**

Από τις παραπάνω τεχνολογίες που αναφέρθηκαν, οι υπερπυκνωτές, οι διάφοροι τύποι μπαταριών, οι σφόνδυλοι κινητικής ενέργειας και οι κυψέλες υδρογόνου, αφορούν σε εφαρμογές μικρής και μέσης ισχύος. Αντίθετα, η αντλησιοταμίευση, ο συμπιεσμένος αέρας και η υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση αφορούν σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος.

### **4.1.1.2 Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης**

Συγκεντρώνοντας τα χαρακτηριστικά κάθε μίας από της αποθηκευτικές διατάξεις ηλεκτρικής ενέργειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, κατασκευάζουμε τους ακόλουθους πίνακες ώστε να διευκολυνθεί η σύγκριση των παραπάνω διατάξεων.

ΑΠΟΘΗΚΕ ΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	ΠΥΚΝΟΤΗ ΤΑ ΙΣΧΥΟΣ (Wh/kg)	ΠΥΚΝΟΤ ΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (W/kg)	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΛΟΣ ΗΣ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ	ΕΚΤΙΜΩΜ ΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΠΕΛΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓ ΩΝ	ΕΓΚΑΤΕ ΣΤΗΜΕ ΝΗ ΙΣΧΥΣ	ΑΥΤΟΕΚ ΦΟΡΤΙΣ Η
ΜΠΑΤΑΡΙΕ Σ ΜΟΛΥΒΔΟ Υ-ΟΞΕΩΣ	15-45	180	60-95%	300-1500 κύκλοι φόρτισης- εκφόρτισης	200\$/kW	Μακροπρόθ εση αποθήκευση ενέργειας	1kW- 20MW	5-20% / μήνα
ΜΠΑΤΑΡΙΕ Σ ΛΙΘΙΟΥ- ΙΟΝΤΟΣ	80-150	50-340	85-95%	3000-6000 κύκλοι φόρτισης - εκφόρτισης	350- 1000\$/kW	UPS, ηλεκτρικά αυτοκίνητα	1-100kW	5-10% / μήνα
ΜΠΑΤΑΡΙΕ Σ ΝΙΚΕΛΙΟΥ- ΚΑΔΜΙΟΥ	15-120	75-1000	60-65%	12-15 έτη	200\$/kW	Παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας	1kW- 5MW	2-30% / μήνα
ΜΠΑΤΑΡΙΕ Σ ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΥΒΡΙΔΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟ Υ	15-120	75-1000	60-65%	12-15 έτη	200\$/kW	Υπολογιστέ ς, ιατρικός εξοπλισμός	1kW- 5MW	2-30% / μήνα
ΜΠΑΤΑΡΙΕ Σ ΘΕΙΟΥΧΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ	100-240	N/A	80-90%	2500-6500 κύκλοι φόρτισης- εκφόρτισης	350- 1000\$/kW	UPS, δίκτυα μεταφοράς και διανομής, βελτίωση ποιότητας ισχύος	100W- 20MW	N/A
ΣΥΣΣΩΡΕΥ ΤΕΣ ΡΟΗΣ	10-70	N/A	65-85%	2000-5000 κύκλοι φόρτισης- εκφόρτισης	200\$/kW	Εφαρμογές αδιάλειπτης παροχής ισχύος, τεχνολογίες ΑΠΕ	80kW- 30MW	Όχι
ΥΠΕΡΠΥΚΝ ΩΤΕΣ	Χαμηλή	Πολύ υψηλή	90-95%	10.000- 100.000 κύκλοι φόρτισης -	250- 500\$/kW	Άμεση παροχή ισχύος, υποστήριξη	7-10W για εμπορικέ ς	14%/ μήνα



				εκφόρτισης		δικτύου μεταφοράς	εφαρμογές και 10-20kW για ειδικές εφαρμογές	
ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΠΗΝΙΑ	30	Πολύ υψηλή	90-95%	20 έτη	1000\$/kW	Βελτίωση ποιότητας ισχύος, εφαρμογή στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής	1-100MW ανάλογα με την κλίμακα της εφαρμογής	-
ΚΥΨΕΛΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	120-142 (MJ/kg)	N/A	45-65%	N/A	350-1500\$/kW	Μείωση μεταβλητότητας ισχύος, στρεφόμενη εφεδρεία	Σε κλίμακα kW	3% / μέρα
ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ	10-30	N/A	70-80%	40 έτη	350-500\$/kW	Στρεφόμενη εφεδρεία, ρύθμιση συχνότητας	25-350MW	-
ΑΝΤΛΗΣΙΟ ΤΑΜΙΕΥΣΗ	0,3	N/A	70-80%	75 έτη	500-1600\$/kW	Στρεφόμενη εφεδρεία, ρύθμιση συχνότητας	Έως 2,1 GW	-
ΣΦΟΝΔΥΛΟΙ ΚΙΝΗΤΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	100-130	1000	90-95%	Πάνω από 20.000 κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης	500-6000\$/kW	Υποστήριξη δικτύου μεταφοράς, ρύθμιση συχνότητας	Κλίμακα kW	1-10% / ώρα

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα προκύπτουν από τις πηγές [15], [16] καθώς και από διαδικτυακή αναζήτηση για το κόστος και τα επιμέρους χαρακτηριστικά της καθεμίας.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι για την (παρούσα)εφαρμογή κατασκευής συστήματος 200kW, έχουμε τις εξής επιλογές :

- Αρχικά, οι διατάξεις που μπορούν να υποστηρίξουν αυτή την ποσότητα ισχύος είναι η αντλησιοταμίευση, η διάταξη πεπιεσμένου αέρα, όλα τα είδη μπαταριών εκτός από τις μπαταρίες λιθίου-ιόντων και τα υπεραγωγία πηνία .
- Επιπλέον, μια άλλη λύση είναι η χρήση περισσότερων διατάξεων μίας κατηγορίας ώστε να φτάσουμε την τιμή της επιθυμητής ισχύος. Έτσι θα μπορούσαμε να επιλέξουμε για παράδειγμα μία διάταξη 10-15 υπερπυκνωτών.
- Αν επιλέξουμε μία αποθηκευτική διάταξη με βάση το κόστος, η πιο συμφέρουσα κρίνεται η χρήση μπαταριών με επικρατέστερα είδη τις μπαταρίες μολύβδου – οξέως ή νικελίου ή τους συσσωρευτές ροής. Μια τέτοια εφαρμογή θα είχε ένα κόστος περίπου 40.000 \$, δηλαδή περίπου 30.000€. Ωστόσο μια τέτοια επένδυση δεν θα είχε μεγάλη διάρκεια ζωής, όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης των μπαταριών (όχι πάνω από 15 χρόνια ). Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε μεγάλο αριθμό αυτών των διατάξεων δεδομένης της εγκατεστημένης ισχύος της κάθε μίας. Τέλος, ανασταλτικός παράγοντας είναι ο σχετικά μικρός βαθμός απόδοσης καθώς και η αυτοεκφόρτιση των συγκεκριμένων διατάξεων.
- Η επόμενη σε σειρά λύση (με βάση τα οικονομικά κριτήρια) είναι η χρήση διάταξης πεπιεσμένου αέρα ή η χρήση 10 – 15 υπερπυκνωτών. Οι δύο αυτές διατάξεις έχουν το ίδιο μέσο κόστος, το οποίο για μια εφαρμογή 200kW θα είναι περίπου 75.000\$, δηλαδή περίπου 57.000€, για τους υπερπυκνωτές και 85.000\$, δηλαδή περίπου 65.000€ για τη διάταξη πεπιεσμένου αέρα. Όπως βλέπουμε πρόκειται για μία επένδυση με αρκετά υψηλό κόστος. Όσο αφορά τους πυκνωτές, έχουν αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης, αλλά η διάρκεια ζωής τους κρίνεται μικρή για το ύψος της επένδυσης. Η διάταξη πεπιεσμένου αέρα έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, ωστόσο μέτριο βαθμό απόδοσης .
- Η επόμενη λύση είναι η χρήση μπαταριών τύπου λιθίου – ιόντος ή θειούχου νατρίου ή η χρήση κυψελών υδρογόνου. Το κόστος των εν λόγω αποθηκευτικών διατάξεων είναι περίπου 135.000\$, δηλαδή περίπου 100.000€. Βλέπουμε ότι το κόστος επένδυσης ανεβαίνει σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο η διάρκεια ζωής της θα είναι σχετικά μικρή, όπως συμπεραίνουμε από τη διάρκεια ζωής των συγκεκριμένων διατάξεων. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης υδρογόνου είναι πάρα πολύ μικρός, γεγονός που καθιστά τη λύση αυτή μη συμφέρουσα.
- Μία άλλη λύση στην οποία το κόστος αυξάνεται παραπάνω, είναι η χρήση υπεραγωγίων πηνίων ή η χρήση αντλησιοταμίευσης. Στην πρώτη περίπτωση το κόστος είναι 200.000\$, δηλαδή 150.000€ περίπου, ενώ στη δεύτερη 210.000\$, δηλαδή περίπου 160.000€. Η αντλησιοταμίευση είναι μία λύση με πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, ωστόσο ο όχι και τόσο καλός βαθμός απόδοσης (~75%) και το τεράστιο επενδυτικό κόστος καθιστούν δύσκολη την εφαρμογή της .

- Τέλος, μπορούμε να επιλέξουμε τη διάταξη σφονδύλων κινητικής ενέργειας. Το κόστος της εν λόγω επένδυσης είναι 650.000\$, δηλαδή περίπου 490.000€. Ο βαθμός απόδοσης της διάταξης και η διάρκεια ζωής της δρουν προς όφελος της πρότασης. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί μια τέτοια διάταξη δεν προτείνεται για εφαρμογές μεγάλης ισχύος, ενώ παράλληλα το κόστος της είναι απαγορευτικό.



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

## ***Μέθοδοι ρύθμισης φορτίου – συχνότητας σε φωτοβολταϊκά συστήματα***

### ***5.1 Ανάγκη ρύθμισης φορτίου – συχνότητας σε ΣΗΕ***

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας είναι μεγίστης σημασίας. Προκειμένου τα δύο αυτά μεγέθη να διατηρούνται στις ονομαστικές τους τιμές και το σύστημα να είναι ευσταθές, χρησιμοποιούνται διατάξεις που ρυθμίζουν την τάση και τη συχνότητα και διατηρούν τις τιμές τους σταθερές. Γενικά, η ρύθμιση της συχνότητας πραγματοποιείται μέσω της ενεργού ισχύος, ενώ η ρύθμιση της τάσης μέσω της αέργου.

Στη συγκεκριμένη εργασία, μελετάμε τη ρύθμιση της συχνότητας, καθώς επιθυμούμε να βρίσκετε σε συγκεκριμένο επίπεδο τιμών ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία του συστήματος.

Επειδή οι μεταβολές της συχνότητας οφείλονται στην διαφορά που ενίοτε προκύπτει μεταξύ παραγόμενης και ζητούμενης ισχύος, η αποκατάσταση και ο έλεγχός της έγκειται στην προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος προς τη ζητούμενη.

Κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η συχνότητα ταλαντώνεται γύρω από την τιμή των 50 Hz, που αποτελεί την ονομαστική τιμή της. Τόσο η αύξηση όσο και η

μείωση της συχνότητας είναι φαινόμενα ανεπιθύμητα, αφού προκαλούν διαταραχή της λειτουργίας του συστήματος και προκαλούν την απώλεια της ευστάθειάς του.

Η αύξηση της συχνότητας εμφανίζεται όταν είτε υπάρχει περίσσεια παραγωγής είτε υπάρχει απώλεια φορτίου. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια, μειώνεται η αδράνειά του και προκαλείται μείωση της τάσης.

Η μείωση της συχνότητας προκύπτει είτε από την απώλεια μονάδων παραγωγής είτε από την αύξηση του φορτίου. Η εμφάνισή της ενδέχεται να οδηγήσει σε καταπόνηση των μονάδων που συνδέονται στο σύστημα στην προσπάθειά τους να αναλάβουν το επιπλέον φορτίο. Επιπλέον, εμφανίζεται μείωση τάσεων στο σύστημα με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε υπερδιέγερση λόγω της ενεργοποίησης των ρυθμιστών τάσης, οι οποίοι τείνουν να αυξήσουν την διέγερση. Οι συνθήκες αυτές είναι τόσο επίπονες για το σύστημα το οποίο ενδέχεται να οδηγηθεί σε διακοπή λειτουργίας, σε περίπτωση απώλειας κάποιας επιπλέον μονάδας.

Όσο αφορά την αύξηση του φορτίου και την μείωση της συχνότητας, οι γεννήτριες αποφεύγεται να παράγουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ τους. Αντίθετα, τηρούν ένα ποσό ισχύος ως εφεδρεία προκειμένου να έχουν την δυνατότητα να ανταποκριθούν σε περιπτώσεις αύξησης της ζήτησης.

Παρακάτω δίνονται βασικοί ορισμοί που σχετίζονται με τη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο αυτή λειτουργεί.

## **5.2 Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση [10]**

Η διατήρηση του ισοζυγίου ζήτησης – παραγωγής και της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή επιτυγχάνεται μέσω των ρυθμιστών στροφών των γεννητριών, οι οποίοι αναλαμβάνουν τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος. Η ρύθμιση που πραγματοποιείται από τους ρυθμιστές στροφών γίνεται σε δύο επίπεδα, την πρωτεύουσα ρύθμιση, η οποία επιτελεί βραχυπρόθεσμη μεταβολή της ισχύος, και τη δευτερεύουσα η οποία εξαλείφει τα μόνιμα σφάλματα συχνότητας.

Η πρωτεύουσα ρύθμιση πραγματοποιείται από κάθε μονάδα παραγωγής ξεχωριστά και επιτελείται από τον ρυθμιστή στροφών της μονάδας. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνεται το φορτίο οι στρεφόμενες γεννήτριες αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια με αποτέλεσμα τη μείωση των στροφών τους και κατ' επέκταση της συχνότητας. Για

το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο ρυθμιστής στροφών, ώστε να ελέγχεται η μηχανική ισχύς που παράγεται από τις γεννήτριες και να σταθεροποιείται η τιμή της συχνότητας.

Η δευτερεύουσα ρύθμιση έχει ως ρόλο την εξάλειψη των μόνιμων σφαλμάτων που παραμένουν μετά το τέλος της πρωτεύουσας ρύθμισης. Επιτελείται από τον μηχανισμό αλλαγής στροφών του ρυθμιστή στροφών με κατάλληλη μετατόπιση της χαρακτηριστικής φορτίου – συχνότητας της γεννήτριας.

**Ευστάθεια:** Με τον όρο ευστάθεια χαρακτηρίζεται η ικανότητα του συστήματος να επαναφέρει το σύστημα στην κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή να στρέφεται το σύστημα πάλι με τη σύγχρονη ταχύτητα, ύστερα από μία διαταραχή ή μεταβολή της ισχύος εξόδου. Η ευστάθεια περιγράφεται μαθηματικά από το λόγο :

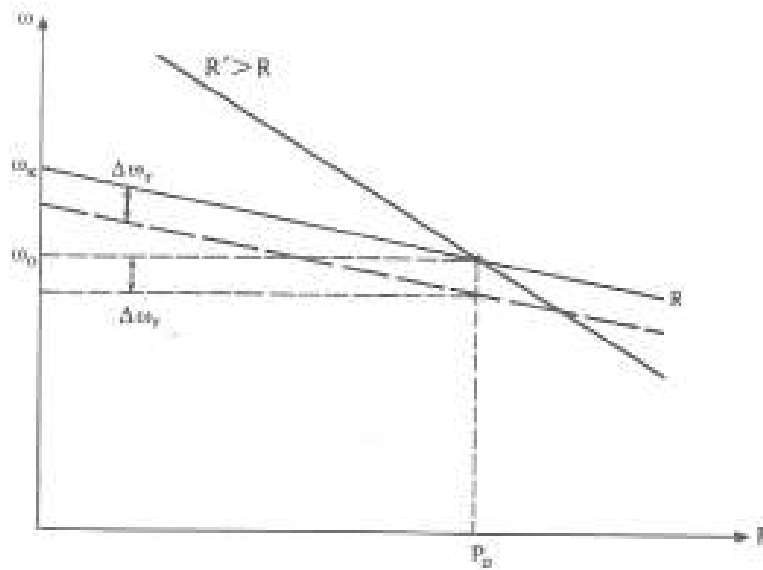
$$\frac{df/f}{dP/P}$$

όπου f: συχνότητα και P: ισχύς εξόδου .

**Πρωτεύουσα ρύθμιση:** Μία μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας γίνεται αντιληπτή από τον ρυθμιστή που είναι συνδεδεμένος στον άξονά της. Η μεταβολή αυτή μετατρέπεται σε σήμα ελέγχου για την ανάλογη προσαρμογή της μηχανικής ισχύος που παράγει η γεννήτρια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται πρωτεύουσα ρύθμιση .

**Δευτερεύουσα ρύθμιση:** Συμπληρωματικά με την πρωτεύουσα ρύθμιση μπορεί να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αλλαγής στροφών του ρυθμιστή. Μετρίεται δηλαδή το σφάλμα συχνότητας μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση και αποστέλλονται σήματα που αντιστοιχούν σε μία νέα ταχύτητα αναφοράς της γεννήτριας, προκειμένου να εξαλειφθεί το σφάλμα συχνότητας.

**Στατισμός:** Μία ορισμένη θέση του μηχανισμού αλλαγής στροφών, δηλαδή μία δεδομένη ταχύτητα αναφοράς, αντιστοιχεί σε μία ευθύγραμμη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα :



**Εικόνα 5.1: Χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου – συχνότητας**

Η κλίση της χαρακτηριστικής ονομάζεται στατισμός της μονάδας (ή του ρυθμιστή στροφών) και η μαθηματική του έκφραση είναι η ακόλουθη :

$$R = - \frac{\Delta\omega}{\Delta P}$$

όπου  $\underline{\Delta\omega}$ : η ανά μονάδα μεταβολή της συχνότητας (ισούται με την ανά μονάδα μεταβολή της ταχύτητας) που παραμένει μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση .

$\underline{\Delta P}$ : η ανά μονάδα μεταβολή του φορτίου, η οποία ήταν αιτία εμφάνισης της μεταβολής  $\Delta\omega$  .

Ο στατισμός μετριέται συνήθως σε ποσοστό επί τοις εκατό (% ), ενώ η τιμή του είναι αρνητική (αφού και η κλίση της χαρακτηριστικής είναι αρνητική ). Η αρνητική τιμή του στατισμού οφείλεται στο ότι παρά τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών, κάθε μεταβολή φορτίου αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας. Οπότε, αν η μεταβολή του φορτίου είναι θετική, δηλαδή αν το φορτίο αυξηθεί, η συχνότητα θα μειωθεί με αποτέλεσμα η διαφορά  $\Delta\omega$  να είναι αρνητική .

Η χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας μίας μονάδας μεταβάλλεται με δύο τρόπους :

- a) Η μεταβολή του στατισμού  $R$  προκαλεί τη χαρακτηριστική να στρέφεται γύρω από το σημείο λειτουργίας  $\omega_0, P_0$  .
- b) Η μεταβολή της ταχύτητας (συχνότητας) οδηγεί τη χαρακτηριστική σε παράλληλη μετατόπιση, διατηρώντας σταθερή κλίση (δηλαδή σταθερό στατισμό).

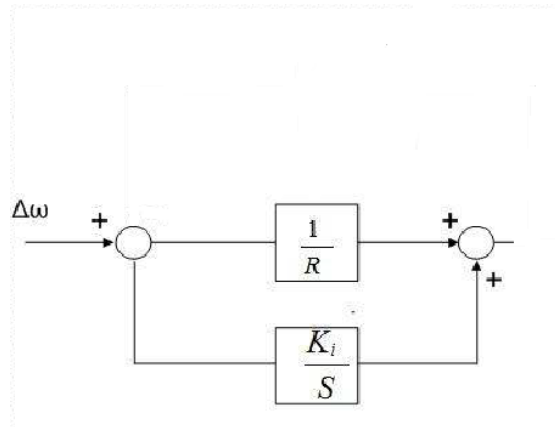


Τέλος, η τιμή του στατισμού εκφράζει την αντίδραση της γεννήτριας στις μεταβολές του φορτίου. Συγκεκριμένα, αν μία γεννήτρια έχει μικρό στατισμό, για σχετικά μικρή μεταβολή της συχνότητας θα μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της (ρυθμίζουσα μονάδα). Αντίθετα, μία γεννήτρια με μεγάλο στατισμό μεταβάλλει ελάχιστα το φορτίο της όταν μεταβάλλεται η συχνότητα (μονάδα βάσεως).

### **5.3 Ρυθμιστές στροφών [6], [8]**

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το ζητούμενο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι η εξισορρόπηση της παραγόμενης ισχύος με το φορτίο και η διατήρηση της συχνότητας στην επιθυμητή τιμή. Την επίτευξη των δύο αυτών στόχων αναλαμβάνουν οι ρυθμιστές στροφών, οι οποίοι ελέγχουν την μηχανική ισχύ που παράγεται από τις κινητήριες μηχανές και μπορούν να θεωρηθούν μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας είτε της ισχύος. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις τροφοδότησης απομονωμένων φορτίων ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει τη συχνότητα, ενώ σε περιπτώσεις μεγάλων συστημάτων ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει τη μηχανική ισχύ.

Ο ρυθμιστής στροφών είναι αυτός που εκτελεί την πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα ρύθμιση, όπως αυτές αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του συνήθως χρησιμοποιούμενου ρυθμιστή στροφών. Ο ρυθμιστής στροφών μετρά τη συχνότητα περιστροφής της γεννήτριας και ρυθμίζει την κατανάλωση καυσίμου ώστε η συχνότητα να διατηρείται κοντά στην ονομαστική της τιμή.



**Εικόνα 5.2: Διάγραμμα βαθμίδων ρυθμιστή στροφών**

Ο όρος  $\frac{1}{R}$  ονομάζεται αναλογικός όρος, περιλαμβάνει το κέρδος του στατισμού και εκφράζει τον συντελεστή συμμετοχής της γεννήτριας στις μεταβολές φορτίου του συστήματος. Ο όρος  $\frac{K_i}{s}$  ονομάζεται ισόχρονος όρος (όπου  $K_i$  κέρδος) και εκφράζει την επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή.

## **5.4 Υπάρχουσες μέθοδοι ρύθμισης φορτίου – συχνότητας σε φωτοβολταϊκά συστήματα**

### Μέθοδος 1:

Η πρώτη μέθοδος [11] προτείνει έναν τρόπο ρύθμισης της συχνότητας, μεταβάλλοντας την παραγόμενη ή εγχεόμενη από την εγκατάσταση ισχύ, ελέγχοντας την τάση εξόδου του δικτύου.

Το μοντέλο που υλοποιείται για την ανάδειξη της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελείται από μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ένα dc bus και έναν αντιστροφέα. Η γενική αρχή είναι ότι η εγχεόμενη ή απορροφούμενη ποσότητα ενεργού και αέργου ισχύος είναι συνάρτηση του μεγέθους της τάσης του δικτύου, δηλαδή η ενεργός ισχύς  $P$  αυξομειώνεται ανάλογα με τις διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου (επίσης πρέπει να ισχύει  $Q = \pm 15\% P$ ). Με άλλα λόγια, το ρεύμα εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του συστήματος ελέγχου και εγχέεται ενέργεια σε μια ελεγχόμενη μορφή, λαμβάνοντας τις καθορισμένες τιμές τάσεις από το εφαρμοζόμενο σύστημα.

Ο έλεγχος που πραγματοποιείται στη συγκεκριμένη μέθοδο ονομάζεται έλεγχος  $d - q$  ή έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος. Σκοπός του ελέγχου  $d - q$  είναι η διατήρηση της τάσης του dc bus στην επιθυμητή τιμή, καθώς και η διατήρηση του συντελεστή ισχύος, όταν το σύστημα βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων, σκοπός του ελέγχου είναι η έγχυση ή απορρόφηση των απαιτούμενων ποσών  $P$  και  $Q$ , ανάλογα με τη μεταβολή που υπέστη το σύστημα.

Προκειμένου να επιτυγχάνονται κάθε φορά οι δύο αυτοί στόχοι, υπολογίζονται για κάθε περίπτωση τα ρεύματα αναφοράς του ορθού και του εγκάρσιου άξονα ( $I_{d, \text{ref}}$  και  $I_{q, \text{ref}}$  αντίστοιχα) ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση του dc bus και να ελέγχονται τα  $P$  και  $Q$  που εγχέονται ή απορροφούνται από το δίκτυο σύμφωνα με τις ανάγκες του. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν διαφορετικές τιμές των ρευμάτων αναφοράς, ανάλογα με το αν το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας, αν έχει υποστεί πτώση τάσης ή αύξηση τάσης. Με βάση την τιμή των ρευμάτων αναφοράς, υπολογίζονται στη συνέχεια οι τιμές αναφοράς των τάσεων εγκάρσιου και ορθού άξονα για την ac πλευρά, οι οποίες δίνονται ως είσοδοι στον αντιστροφέα. Τέλος, όσο αφορά τη ρύθμιση συχνότητας, η ισχύς μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της συχνότητας και η τιμή αυτή της ισχύος, εγχέεται ή απορροφάται (ανάλογα τις συνθήκες) από το δίκτυο.

Παρά την αποτελεσματικότητα της μεθόδου για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, παρουσιάζει ένα βασικό **μειονέκτημα** όσο αφορά την εφαρμογή της. Το μειονέκτημα αυτό σχετίζεται με τον κίνδυνο που ενδέχεται να προκληθεί στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες σε περιπτώσεις όπου η μεταβολή της ισχύος που πρόκειται να απορροφηθεί από τις συστοιχίες τις οδηγήσει σε τιμές λειτουργίας πολύ κοντά στην τάση ανοιχτοκύκλωσης ή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η προσέγγιση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης ενδέχεται να οδηγήσει στην κατάρρευση της προστασίας του dc link του αντιστροφέα, ενώ η προσέγγιση του ρεύματος βραχυκύκλωσης οδηγεί στην καταστροφή των ασφαλειών τήξης των συστοιχιών. Αν δεν υπάρχουν ασφάλειες τήξης η μεγάλη τιμή του ρεύματος ( $\sim I_{sc}$ ) υπάρχει κίνδυνος να οδηγήσει στην κατάρρευση των ανάστροφων διόδων των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

## Μέθοδος 2:

Στη δεύτερη υπάρχουσα μέθοδο ρύθμισης φορτίου – συχνότητας σε φωτοβολταϊκό σύστημα [13], το μοντέλο που προτείνεται περιλαμβάνει μία φωτοβολταϊκή συστοιχία, αποτελούμενη από 9 φωτοβολταϊκά πάνελα συνδεδεμένα σε σειρά, έναν αντιστροφέα και ένα πυκνωτή διπλής στρώσεως (EDLC), ο οποίος τοποθετείται μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του αντιστροφέα. Σκοπός του πυκνωτή είναι να απορροφά τις γρήγορες διακυμάνσεις της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και να της επιτρέπει να αλλάζει την ισχύ εξόδου της για μικρά ποσοστά, ενώ έχει σταθερή τάση ώστε να διατηρεί επαρκή ενεργειακή αποθήκευση. Έτσι, η έξοδος της γεννήτριας έχει τη δυνατότητα να διαμορφώνεται ανάλογα με τις διακυμάνσεις της συχνότητας του δικτύου.

Στην εν λόγω μέθοδο, ο έλεγχος της τάσης είναι ανεξάρτητος από τον έλεγχο της συχνότητας, ενώ χρησιμοποιείται dc chopper μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του πυκνωτή διπλής στρώσεως έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν κάθε χρονική στιγμή στο σημείο μέγιστης ισχύος, ανεξάρτητα από την τάση του πυκνωτή.

Ο πυκνωτής διπλής στρώσεως απορροφά την διαφορά μεταξύ της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών και της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα, δηλαδή η ισχύς του πυκνωτή είναι:

$$P_C = P_S - P$$

όπου  $P_C$  είναι η ισχύς του πυκνωτή διπλής στρώσεως,  $P_S$  είναι η ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και  $P$  είναι η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα.

Η έξοδος του αντιστροφέα, δίνεται από την σχέση:

$$P = P_v + P_f + \overline{P_s}$$

στην οποία ο όρος  $P_v$  αντιπροσωπεύει τον έλεγχο τάσεως ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση του πυκνωτή, ενώ ο όρος  $P_f$  αντιπροσωπεύει τον έλεγχο της συχνότητας του δικτύου. Τέλος, ο όρος  $\overline{P_s}$  χρησιμοποιείται ώστε να αποφεύγονται οι ταχείες μεταβολές της ισχύος εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Η διαφορά μεταξύ  $P_S$  και  $\overline{P_s}$  είναι η ισχύς που εν τέλει απορροφά ο πυκνωτής διπλής στρώσεως.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη μέθοδο, ο έλεγχος συχνότητας μπορεί να γίνει μόνο για μεταβολή συχνότητας η οποία επιφέρει έως 3% μεταβολή της ισχύος,

ενώ ο ρυθμός μεταβολής της εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας δεν περιορίζεται για μικρές αλλαγές που οφείλονται στον έλεγχο συχνότητας.

Τέλος, προκειμένου να μην χάνεται η διαμόρφωση της εξόδου με το χρόνο λόγω του ελέγχου της τάσεως του πυκνωτή διπλής στρώσεως, στην μοντελοποίηση του ελέγχου προστίθεται ένας όρος που σχετίζεται με τον έλεγχο της συχνότητας, έτσι ώστε η μεταβολή της τάσης να μην επηρεάζει τη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου.

Το κύριο **μειονέκτημα** της συγκεκριμένης μεθόδου έχει να κάνει τόσο με την πολυπλοκότητα του ελέγχου, όσο και με την χρήση αποθηκευτικής διάταξης. Όσο αφορά την χρήση αποθηκευτικής διάταξης, τα προβλήματα που αυτή επιφέρει σχετίζονται τόσο με το κόστος όσο και με την συντήρηση και τη διάρκεια ζωής της διάταξης. Ανεξάρτητα όμως από αυτό, η χρήση του πυκνωτή από μόνη της δυσχεραίνει τον έλεγχο και τη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου, καθιστώντας τον περισσότερο πολύπλοκο, ενώ παράλληλα επιτρέπει την πραγματοποίηση της ρύθμισης φορτίου – συχνότητας για συγκεκριμένη γκάμα μεταβολών.

### Μέθοδος 3:

Στη συγκεκριμένη προσέγγιση ρύθμισης φορτίου – συχνότητας [12] προτείνεται μία συντονισμένη μέθοδος ελέγχου για την εξάλειψη της διακύμανσης της ισχύος εξόδου πολλαπλών φωτοβολταϊκών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τη στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία και την απόκλιση της συχνότητας του δικτύου που ηλεκτροδοτείται.

Ο εν λόγω έλεγχος πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα, ένα κεντρικό και ένα τοπικό.

Κεντρικό επίπεδο ελέγχου: Στο επίπεδο αυτό αθροίζονται οι ηλιακές ακτινοβολίες που προσπίπτουν σε όλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα που συνιστούν το συνολικό σύστημα και προκύπτει μία τιμή μέσης ηλιακής ακτινοβολίας. Με βάση την τιμή αυτή, καθώς και με βάση την κατάσταση του ΣΗΕ, δημιουργείται μια κεντρική εντολή σχετικά με την επιθυμητή τιμή εξόδου όλων των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο τρόπος με τον οποίο εξάγεται αυτή η τιμή ισχύος αναφοράς (η οποία είναι ίδια για όλες τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες του συστήματος), χρησιμοποιεί ασαφή αιτιολογία (fuzzy reasoning). Η ασαφής αιτιολογία έχει τρεις εισόδους οι οποίες είναι: η απόλυτη τιμή της μέσης απόκλισης συχνότητας, η μέση ηλιοφάνεια και η διακύμανση της ακτινοβολίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν συμβαίνουν μεγάλες αποκλίσεις συχνότητας συνεχώς, η τιμή ισχύος που προκύπτει από το

κεντρικό επίπεδο εξόδου μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι η διακύμανση της συχνότητας οφείλεται στις μεταβολές του φορτίου και αυξάνεται όταν ένα μεγάλο ποσό ισχύος από τα φωτοβολταϊκά με διακυμάνσεις λόγω ταχείας αλλαγής της ηλιακής ακτινοβολίας εγχέεται στο δίκτυο. Αντίστοιχα, η τιμή ισχύος εξόδου που παράγεται από το κεντρικό επίπεδο ελέγχου αυξάνεται όταν η απόκλιση της συχνότητας είναι μικρή και η αύξηση αυτή δεν ξεπερνά το διαθέσιμο όριο μέγιστης ισχύος. Ωστόσο, αν συμβούν γρήγορες αλλαγές ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρό χρονικό διάστημα, η παραγωγή των φωτοβολταϊκών θα είναι μικρότερη από το μέγιστο όταν το νέο σημείο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών (που ορίζεται από το κεντρικό επίπεδο) δεν είναι βέλτιστο.

Τοπικό επίπεδο ελέγχου: Στο επίπεδο αυτό πραγματοποιείται ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος για κάθε ένα από τα φωτοβολταϊκά συστήματα ξεχωριστά. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) είναι η μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης, η οποία έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα (perturb and observe P&O). Όλα τα σημεία μέγιστης ισχύος που βρίσκονται, αθροίζονται και το άθροισμά τους διαιρείται με την τιμή ισχύος εξόδου που έχει προκύψει από το κεντρικό επίπεδο ελέγχου. Από την διαίρεση αυτή παράγεται ένας κοινός παράγοντας ρύθμισης, ο οποίος στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με κάθε μία από τις τιμές μέγιστης ισχύος που έχουν προκύψει από την ανίχνευση, για κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό παράγονται νέες εντολές για κάθε ένα από τα φωτοβολταϊκά συστήματα ξεχωριστά και ορίζεται η ισχύς εξόδου του καθενός.

Στη συνέχεια, αφού ολοκληρωθούν τα δύο επίπεδα ελέγχου, χρησιμοποιείται ένας PI ελεγκτής (αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής), ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του αντιστροφέα ώστε να εξασφαλίζει ότι η ισχύς εξόδου του αντιστοιχεί στην ισχύ εξόδου κάθε φωτοβολταϊκής γεννήτριας, όπως αυτή ορίστηκε από το τοπικό επίπεδο ελέγχου. Στην συγκεκριμένη μέθοδο το σύστημα των φωτοβολταϊκών συνεργάζεται με μία νητζελογεννήτρια για την τροφοδότηση του φορτίου, ενώ η ρύθμιση φορτίου – συχνότητας διαμοιράζεται μεταξύ της νητζελογεννήτριας και των φωτοβολταϊκών.

Το κύριο **μειονέκτημα** που εντοπίζεται στη συγκεκριμένη μέθοδο ρύθμισης φορτίου – συχνότητας, είναι η πολυπλοκότητα του ελέγχου και το μεγάλο κόστος της εγκατάστασης. Είναι ιδιαίτερα επιζήμιο οικονομικά να γίνεται διαδικασία ανίχνευσης

του μέγιστου σημείου λειτουργίας για κάθε φωτοβολταϊκή γεννήτρια ξεχωριστά, ενώ ο έλεγχος καθίσταται πολύπλοκος καθώς πραγματοποιείται σε δύο ξεχωριστά επίπεδα και με πολλά ενδιάμεσα στάδια. Επιπλέον, ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στερείται ακρίβειας, γεγονός επιζήμιο για την αποδοτικότητα της μεθόδου, αφού στον υπολογισμό αυτό στηρίζεται η εξάλειψη του σφάλματος συχνότητας.

#### Μέθοδος 4:

Στη συγκεκριμένη μέθοδο [14] προτείνεται ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από μία φωτοβολταϊκή συστοιχία, έναν ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος δύο επιπέδων (two – stage MPPT ), έναν αμφίδρομο αντιστροφέα, ένα σύστημα ελέγχου βασισμένο σε ασαφή λογική (fuzzy based output power control system ), μία νηζελογεννήτρια και μία διάταξη αποθήκευσης ενέργειας. Ο έλεγχος της συχνότητας πραγματοποιείται από το σύστημα ελέγχου fuzzy.

Το σύστημα ελέγχου fuzzy based output power control system δέχεται ως είσοδο την μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας και τις διακυμάνσεις τις συχνότητας. Με βάση αυτά τα δύο μεγέθη υπολογίζεται η τιμή της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών που είναι η επιθυμητή έτσι ώστε να εξαλειφεται η συγκεκριμένη μεταβολή συχνότητας. Η τιμή ισχύος αναφοράς που υπολογίζεται από το σύστημα ελέγχου ελέγχεται από τον MPPT έτσι ώστε να εξακριβωθεί ότι βρίσκεται εντός των ορίων μέγιστης ισχύος των φωτοβολταϊκών. Στη συνέχεια, η τιμή ισχύος αναφοράς και η πραγματική ισχύ εξόδου των φωτοβολταϊκών εισέρχονται σαν είσοδοι στον αντιστροφέα, ο οποίος διαμορφώνει την έξοδό του προκειμένου να εξαλειφθεί το σφάλμα της συχνότητας. Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών αποθηκεύεται στην διάταξη αποθήκευσης ενέργειας, όταν είναι θετική, ενώ όταν είναι αρνητική, δηλαδή όταν υπάρχει έλλειμμα ισχύος προσφέρεται στον αντιστροφέα από την αποθηκευτική διάταξη.

Το βασικό **μειονέκτημα** της μεθόδου αυτής είναι η χρήση της αποθηκευτικής διάταξης, η οποία αυξάνει σε μεγάλο βαθμό το κόστος του εγχειρήματος, καθώς και ο αστάθμητος και ασαφής παράγοντας υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας με βάση τον οποίο πραγματοποιείται η ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου.

## **5.5 Συμπεράσματα**

Ύστερα από μελέτη και ανάλυση των μεθόδων που έχουν έως τώρα εφαρμοστεί και προταθεί για τη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας σε συστήματα με φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, καταλήγουμε στην πρόταση μίας μεθόδου η οποία δεν περιλαμβάνει αποθηκευτικές διατάξεις, οι οποίες κρίθηκαν προηγουμένως ασύμφωρες οικονομικά, δεν ενέχει υπολογισμό και μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να αποφευχθεί ο στοχαστικός και ασαφής χαρακτήρας της, και δεν επιβαρύνει το σύστημα με τον κίνδυνο εμφάνισης ανεπιθύμητων καταστάσεων λειτουργίας, οι οποίες μπορεί να προκληθούν λόγω μεγάλης απορρόφησης ισχύος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Η μέθοδος ρύθμισης φορτίου – συχνότητας που προτείνεται στην παρούσα εργασία καθιστά τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ενεργό μέρος της διαδικασίας, χωρίς να την επιβαρύνει και χωρίς να απαιτεί υψηλό κόστος για την πραγμάτωσή της.



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

## ***Προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης φορτίου – συχνότητας***

Στην παρούσα εργασία μελετάται η συμμετοχή φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας. Η κύρια ιδέα στην οποία στηρίζεται η συμμετοχή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας είναι η **αποφόρτιση του αντιστροφέα** (ή των αντιστροφέων εφόσον πρόκειται για φωτοβολταϊκό πάρκο) μέσω των οποίων οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες συνδέονται στο δίκτυο που ηλεκτροδοτείται.

Προκειμένου το φωτοβολταϊκό πάρκο να έχει τη δυνατότητα να συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, κρίνεται απαραίτητο να τηρείται ένα ποσό ισχύος ως εφεδρεία έτσι ώστε το ποσό αυτό να μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο σε περιπτώσεις αύξησης της ζήτησης. Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 2.4.1, ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η τήρηση εφεδρείας είναι η τοποθέτηση διακοπών στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε να έχουμε συστοιχίες απενεργοποιημένες, δηλαδή συστοιχίες οι οποίες δεν προσφέρουν το ποσό ισχύος που παράγουν στο δίκτυο, οι οποίες μπορούν να ενεργοποιηθούν και να συνδεθούν στο δίκτυο ώστε να αυξήσουν την συνολική ισχύ εξόδου της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, σε περιπτώσεις αύξησης του φορτίου.

Επιπλέον, η συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας δίνει τη δυνατότητα μείωσης της ισχύος εξόδου του, ώστε να έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται σε περιπτώσεις που η ζήτηση μειώνεται. Με άλλα λόγια, όταν η ζήτηση του ηλεκτροδοτούμενου δικτύου μειωθεί, υπάρχει δυνατότητα να απενεργοποιηθούν ακόμη περισσότερες συστοιχίες μέσω ανοίγματος των αντίστοιχων διακοπών ώστε να ελαττώνεται η ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

### **6.1 Ανάλυση της μεθόδου**

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.4.1, σε ορισμένες από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, από τις οποίες αποτελείται το πάρκο, υπάρχουν διακόπτες οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα στις αντίστοιχες συστοιχίες να συνδέονται ή να αποσυνδέονται από τον εκάστοτε αντιστροφέα. Ο έλεγχος των διακοπών αυτών πραγματοποιείται μέσω ειδικού αλγορίθμου ο οποίος αποφασίζει για τον αν η κατάσταση του κάθε διακόπτη θα είναι ON ή OFF.

Ο αλγόριθμος ο οποίος ελέγχει την κατάσταση των διακοπών, αποφασίζει με κριτήρια την τηρούμενη εφεδρεία, την μεταβολή της συχνότητας και την ισχύ εξόδου των συστοιχιών για την παρούσα χρονική στιγμή. Η ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών συστοιχιών είναι συνάρτηση της ώρας, της εποχής και της ονομαστικής ισχύος των φωτοβολταϊκών.

Όταν μια μεταβολή στη συχνότητα του δικτύου προκύψει, αν δεν τηρείται κάποιο ποσό ισχύος ως εφεδρείας, το φωτοβολταϊκό πάρκο δεν έχει τη δυνατότητα να συμμετέχει στην αποκατάστασή της αφού ήδη προσφέρει στο δίκτυο όλο το ποσό ισχύος που παράγει. Αν όμως κάποιες φωτοβολταϊκές συστοιχίες είναι αποσυνδεδεμένες από το δίκτυο, δηλαδή οι διακόπτες με τους οποίους αυτές συνδέονται στους αντιστροφείς είναι ανοιχτοί, οι συστοιχίες μπορούν να συνδεθούν και να αυξήσουν την ισχύ εξόδου του πάρκου προς την κατεύθυνση μείωσης της συχνότητας, ή ακόμα περισσότερες συστοιχίες μπορούν να αποσυνδεθούν έτσι ώστε η συχνότητα να αυξηθεί.

Ο τρόπος με τον οποίο, λοιπόν, ο εν λόγω αλγόριθμος λειτουργεί είναι ο εξής:

Αρχικά, αν υποθέσουμε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και ζητηθεί κάποιο ποσό ισχύος ως εφεδρεία, ο αλγόριθμος υπολογίζει με βάση το ποσό που ζητείται πόσες συστοιχίες πρέπει να αποσυνδέσει ανάλογα με την ισχύ εξόδου των συστοιχιών για κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, το φωτοβολταϊκό πάρκο υπολειτουργεί, αφού δεν δίνει όλη την ισχύ που διαθέτει στο δίκτυο. Αν στη συνέχεια εμφανιστεί μεταβολή της ζήτησης, το φαινόμενο αυτό θα μεταφραστεί σαν μεταβολή της συχνότητας του δικτύου. Η μεταβολή αυτή της συχνότητας γίνεται αντιληπτή από τον αλγόριθμο, ο οποίος υπολογίζει την ισχύ που αντιστοιχεί στη μεταβολή αυτή και πλέον επαναπροσδιορίζει την κατάσταση των διακοπών λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την εφεδρεία αλλά και την μεταβολή της ισχύος που απαιτείται ώστε να εξαλειφθεί το σφάλμα της συχνότητας. Αν η μεταβολή είναι αύξηση της ζήτησης, ο αλγόριθμος αποφασίζει για κλείσιμο κάποιων διακοπών από αυτούς που είναι ανοιχτοί, δηλαδή σύνδεση παραπάνω συστοιχιών στο δίκτυο. Αντίστοιχα, αν η μεταβολή είναι μείωση της ζήτησης ο αλγόριθμος αποφασίζει για το άνοιγμα περισσότερων διακοπών, δηλαδή για αποσύνδεση περισσότερων συστοιχιών, ώστε να μειωθεί η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Επιπλέον, το φωτοβολταϊκό πάρκο λειτουργεί παράλληλα με νηξελογεννήτρια. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι μεταβολές της ζήτησης διαμοιράζονται μεταξύ των δύο διατάξεων ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη ρύθμιση φορτίου - συχνότητας. Λόγω της μεγάλης ισχύος εξόδου του πάρκου και προκειμένου αυτό να μην επισκιάσει τη λειτουργία της νηξελογεννήτριας και την θέσει εκτός λειτουργίας, κρίνεται ότι η ιδανική συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου και της νηξελογεννήτριας στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας είναι 1: 2.



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

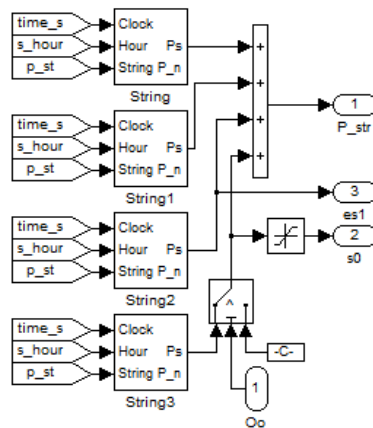
## ***Λοιποί συντελεστές συστήματος προσομοίωσης***

### ***7.1 Λοιποί συντελεστές συστήματος***

#### ***7.1.1 Έλεγχος διακοπών συστοιχιών***

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, σε κάθε αντιστροφέα υπάρχει ένα string το οποίο συνδέεται στον αντιστροφέα μέσω διακόπτη. Αυτό σημαίνει ότι σε όλο το φωτοβολταϊκό πάρκο υπάρχουν έξι συστοιχίες, οι οποίες ελέγχονται από διακόπτη. Η χρήση του διακόπτη εξυπηρετεί στη σύνδεση ή αποσύνδεση της συγκεκριμένης αντιστοιχίας με τον αντιστροφέα, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το μοντέλο ενός αντιστροφέα, στον οποίο η μία από τις τέσσερις συστοιχίες που συνδέονται σ' αυτόν διαθέτει διακόπτη:



Εικόνα 7.1: Εφαρμογή διακόπτη σε μία από τις τέσσερις συστοιχίες του αντιστροφέα

Ο διακόπτης διαθέτει τρεις εισόδους, εκ των οποίων η μία είναι η ισχύς του string, η άλλη είναι μία κατάσταση 0 ή 1 (ο αριθμός 1 συμβολίζει κατάσταση ON του διακόπτη, δηλαδή κλειστό διακόπτη, ενώ ο αριθμός 0 συμβολίζει κατάσταση OFF του διακόπτη, δηλαδή ανοιχτό διακόπτη) και η τελευταία είναι μία σταθερά με περιεχόμενο 0. Όταν η κατάσταση του διακόπτη είναι 1 το string είναι συνδεδεμένο με τον αντιστροφέα και προσφέρει και αυτό την ισχύ του στο δίκτυο. Αντίστοιχα, όταν η κατάσταση του διακόπτη είναι 0 το string έχει αποσυνδεθεί από τον αντιστροφέα και η ισχύς που προσφέρει στο δίκτυο από τη συγκεκριμένη συστοιχία είναι μηδενική.

Οι δεύτερη είσοδος του διακόπτη, δηλαδή η είσοδος που καθορίζει την κατάστασή του, προέρχεται από μία συνάρτηση embedded, δηλαδή έναν αλγόριθμο ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο μοντέλο του συστήματος. Ο αλγόριθμος αυτός είναι γραμμένος σε κώδικα στη γλώσσα MATLAB και ελέγχει τον αριθμό των strings που πρέπει κάθε φορά να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, ελέγχει με άλλα λόγια την ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου. Επομένως, η έξοδος του είναι ένας πίνακας με την κατάσταση όλων των διακοπών του πάρκου. Κάθε μία από αυτές τις καταστάσεις (1 ή 0) μπαίνει σαν είσοδος σε κάθε διακόπτη και καθορίζει αν η συγκεκριμένη συστοιχία θα προσφέρει ισχύ ή θα είναι αποσυνδεδεμένη από το πάρκο.

Ο αλγόριθμος « αποφασίζει » την κατάσταση των διακοπών με βάση τρεις μεταβλητές (τις οποίες δέχεται σαν εισόδους):

1. Την ζητούμενη από τον διαχειριστή **εφεδρεία**,
2. Την **μεταβολή της συχνότητας** που συμβαίνει στο δίκτυο λόγω μεταβολής φορτίου,

3. Την **ισχύ εξόδου κάθε συστοιχίας**, σε μορφή εκτίμησης ανάλογα με την ώρα και την εποχή (και όπως θα δούμε αργότερα την διακύμανση της ηλιοφάνειας ).

Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος υπολογίζει με κριτήριο την ζητούμενη εφεδρεία πόσα strings πρέπει να αποσυνδέσει προκειμένου να τηρεί την τιμή της εφεδρείας που ζητείται. Σε περίπτωση όμως που συμβεί κάποια μεταβολή στο φορτίο, το πάρκο πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την ισχύ του ή να την μειώσει. Για το λόγο αυτό ο αλγόριθμος δέχεται σαν είσοδο και την μεταβολή της συχνότητας, την οποία μεταφράζει σε μεταβολή ισχύος με βάση το στατισμό της γεννήτριας. Έτσι, ανάλογα με το ποσό ισχύος που πρέπει να τηρηθεί σαν εφεδρεία και το ποσό ισχύος που πρέπει να μεταβληθεί για την επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή, ο αλγόριθμος υπολογίζει τον αριθμό των συστοιχιών που πρέπει κάθε φορά να είναι ενεργοποιημένες, αφού γνωρίζει φυσικά την τιμή ισχύος εξόδου τους.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου στην ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, αφού δίνεται η δυνατότητα στο πάρκο να μεταβάλλει την ισχύ εξόδου του ανοίγοντας και κλείνοντας τους διακόπτες, δηλαδή συνδέοντας και αποσυνδέοντας συστοιχίες.

### **7.1.2 Γεννήτρια diesel**

Στην παρούσα εργασία, το δεύτερο κομμάτι του υβριδικού συστήματος που υλοποιείται, συνιστά μία μηχανή εσωτερικής καύσης, ή όπως αλλιώς ονομάζεται γεννήτρια diesel, ισχύος 200kW. Η μηχανή αυτή λειτουργεί παράλληλα με το φωτοβολταϊκό πάρκο και επικουρικά σ' αυτό, ώστε να καλύπτει την τροφοδότηση τη δικτύου, σε περιπτώσεις που το πάρκο αδυνατεί .

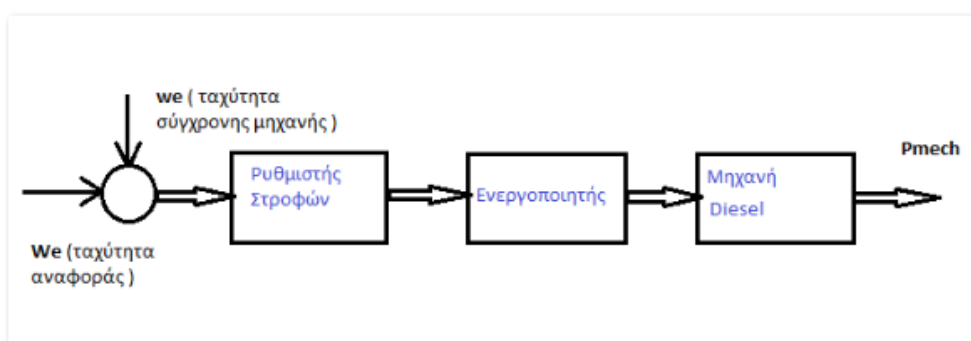
#### **7.1.2.1 Μηχανές εσωτερικής καύσης**

Οι κινητήριες μηχανές ντήζελ είναι ιδανικές για εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η γρήγορη απόκριση για απαιτήσεις αιχμής ή σε εφαρμογές όπου η τοπική ζήτηση για επιπλέον ισχύ απαιτεί αύξηση της πηγής ισχύος, όπως συμβαίνει στην παρούσα περίπτωση. Η απόκριση της κινητήριας μηχανής είναι ταχύτατη, συνεπώς οι τεχνικές

ελέγχου πρέπει να συγκλίνουν γρήγορα και να έχουν μικρό υπολογιστικό κόστος. Ο νεκρός χρόνος της ντήζελ είναι συνάρτηση των συνθηκών λειτουργίας και της ταχύτητας της μηχανής, με αποτέλεσμα οι επιδόσεις της να μειώνονται αρκετά. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται αναλογικοί – ολοκληρωτικοί (PI) ελεγκτές, οι οποίοι βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση της ντήζελ .

Στο μοντέλο ης μηχανής ντήζελ που χρησιμοποιείται συνήθως, ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου της μηχανής δίνεται ως συνάρτησης της ταχύτητας περιστροφής και της μηχανικής ισχύος εξόδου της γεννήτριας. Ο ρυθμιστής στροφών (ή όπως συνήθως αναφέρεται: governor) ρυθμίζει τη ροή καυσίμου και επομένως την είσοδο της γεννήτριας, ώστε να διαμορφώνεται η έξοδος της ανάλογα με τις μεταβολές του φορτίου. Ο έλεγχος, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, γίνεται με αναλογικούς – ολοκληρωτικούς ελεγκτές προς αποφυγή σφαλμάτων της ταχύτητας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται σχηματικά ο τρόπος υλοποίησης και προσομοίωσης του συστήματος της μηχανής :

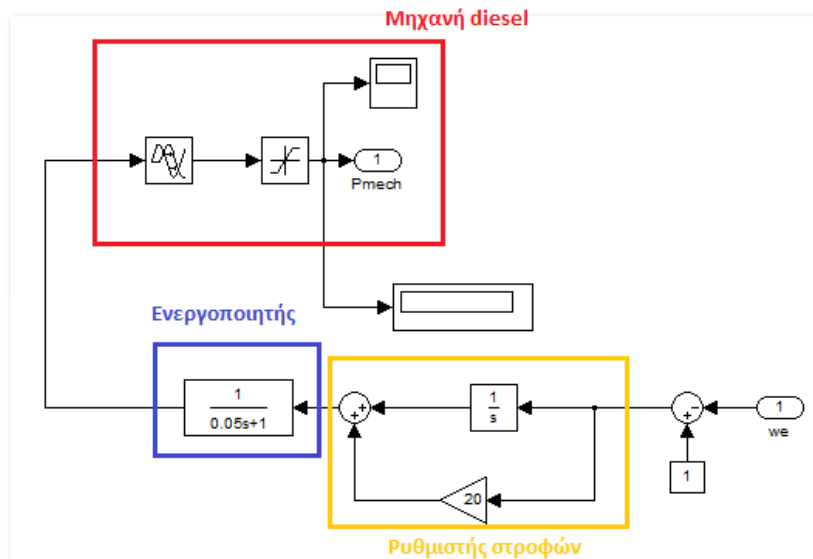


Εικόνα 7.2: Διάγραμμα βαθμίδων μηχανής diesel

### 7.1.2.2 Μοντέλο μηχανής diesel

Παρακάτω δίνεται το μοντέλο της ντήζελ μηχανής που υλοποιήθηκε στο χώρο του simulink. Το μοντέλο σχεδιάστηκε με βάση όσα αναλύθηκαν παραπάνω σχετικά με τη λειτουργία και τις προδιαγραφές των γεννητριών ντήζελ και με τη λειτουργία των ρυθμιστών στροφών :





Εικόνα 7.3 : Μοντελοποίηση μηχανής diesel

Αναλυτικά, ισχύουν τα ακόλουθα :

### 1. Γεννήτρια diesel :

Η γεννήτρια diesel εκφράζει το νεκρό χρόνο μεταξύ της έγχυσης καυσίμου και της παραγωγής μηχανικής ροπής, γι'αυτό και προσομοιώνεται από μία χρονική καθυστέρηση μαζί με έναν περιοριστή (επειδή η μηχανή δεν πρέπει να παράγει ροπή πέρα από μία συγκεκριμένη μέγιστη τιμή) .

### 2. Ενεργοποιητής :

Ο ενεργοποιητής καθορίζει το ρυθμό έγχυσης καυσίμου με βάση την έξοδο του ρυθμιστή και, όπως φαίνεται υλοποιείται από μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης .

### 3. Ρυθμιστής στροφών :

Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης ταχύτητας (της ταχύτητας της μηχανής) και της επιθυμητής τιμής της ταχύτητας (ταχύτητας αναφοράς ), παράγει το σήμα ελέγχου που οδηγεί στη μεταβολή της ροπής της σύγχρονης μηχανής. Το σήμα ελέγχου γίνεται είσοδος του ρυθμιστή στροφών, ο οποίος υλοποιείται με μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης μαζί με τη συμβολή του στατισμού της γεννήτριας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο πάνω κλάδος του ρυθμιστή στροφών συνιστά την πρωτεύουσα ρύθμιση, ενώ ο κάτω κλάδος πρόκειται για τη δευτερεύουσα ρύθμιση .

### 7.1.3 Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας

Υποθέτοντας ότι τα ηλεκτρικά φαινόμενα είναι ταχύτατα σε σχέση με τα μηχανικά (που ουσιαστικά αποτελούν την ενεργό ισχύ), μοντελοποιούμε το δίκτυο με τη μορφή του μηχανικού μοντέλου γεννήτριας. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η εν λόγω μοντελοποίηση.

#### 5.1.3.1 Εξισώσεις ταλάντωσης του ζεύγους στροβίλου – γεννήτριας

Μια μεταβολή του φορτίου επιφέρει μεταβολή στην ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας, η οποία συνεπάγεται την ανατροπή της ισορροπίας μηχανικής – ηλεκτρικής ροπής με άμεσο αποτέλεσμα τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής. Η ακολουθία των παραπάνω μεταβολών εκφράζεται μαθηματικά από την παρακάτω σχέση :

$$2H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e$$

όπου:

$T_m$ : η μηχανική ροπή της γεννήτριας

$T_e$ : η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας

$\frac{d\omega}{dt}$ : η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής

$H$ : η σταθερά αδράνειας στο α.μ. σύστημα, η οποία εκφράζει την κινητική ενέργεια της μηχανής σε ονομαστική ταχύτητα προς τη βάση σε VA :

$$H = \frac{1}{2} \frac{j\omega^2}{VA_{α.μ.}}$$

$J$ : η συνδυασμένη στιγμιαία αδράνεια της γεννήτριας και του στροβίλου σε  $kg \cdot m^2$ .

Δεδομένης της αναλογίας μεταξύ ισχύος και ροπής, στην παραπάνω σχέση μπορούμε να αντικαταστήσουμε την μηχανική ροπή με την μηχανική ισχύ και την ηλεκτρική ροπή με την ηλεκτρική ισχύ αντίστοιχα, οπότε προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση που ονομάζεται εξίσωση επιταχύνσεως:

$$P_m - P_e = 2H \frac{d\omega}{dt}$$

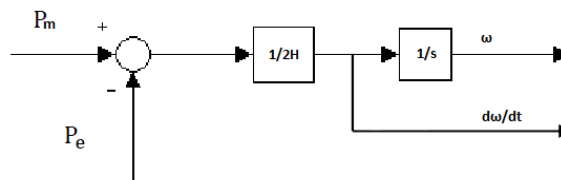
όπου:  $P_m$ : η πραγματική ανά μονάδα παραγόμενη μηχανική ισχύς

$P_e$ : η ανά μονάδα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνουμε τα εξής :

- Για θετική μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής, η μηχανική ισχύς υπερβαίνει την ηλεκτρική, με αποτέλεσμα ο άξονας της γεννήτριας να επιταχύνεται .
- Για αρνητική μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής, η μηχανική ισχύς υπολείπεται της ηλεκτρικής, με αποτέλεσμα ο άξονας της γεννήτριας να επιβραδύνεται .
- Για μηδενική μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής, δηλαδή στην κατάσταση ισορροπίας, η μηχανική ισχύς είναι ίση με την ηλεκτρική ισχύ, με αποτέλεσμα ο άξονας να στρέφεται με σταθερή ονομαστική ταχύτητα .

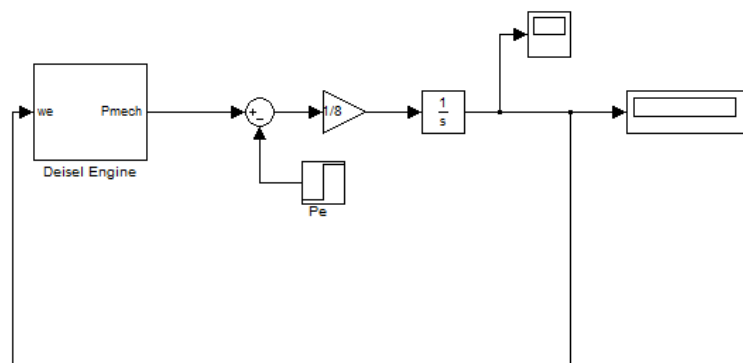
Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει το μηχανικό μοντέλο της γεννήτριας το οποίο είναι το ακόλουθο :



Εικόνα 7.4: Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας

### 7.1.3.2 Προσομοίωση στο Simulink

Με βάση το παραπάνω μοντέλο, υλοποιήθηκε και το μοντέλο του simulink, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα προσομοίωση, για το οποίο θεωρήθηκε σταθερά αδράνειας της γεννήτριας  $H = 4$  :

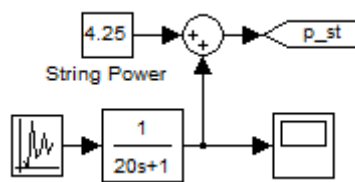


Εικόνα 7.5 : Μοντελοποίηση νηξελομηχανής και μηχανικού μέρους γεννήτριας

### 7.1.4 Παράγοντας διακύμανσης της ηλιοφάνειας

Στο μοντέλο έχει προστεθεί ένας παράγοντας διακύμανσης της ηλιοφάνειας, προκειμένου να εξεταστεί η μεταβολή της ισχύος εξόδου των συστοιχιών σε περιπτώσεις κατά τις οποίες μπορεί να εμφανιστεί συννεφιά ή για κάποιο άλλο λόγο να μειωθεί ή να αυξηθεί η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η διακύμανση της ηλιοφάνειας προσομοιώνεται μέσω μίας συνάρτησης στην οποία εισέρχεται ένα ομοιόμορφα κατανομημένο τυχαίο σήμα. Παρακάτω δίνεται η υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε στο simulink:



Εικόνα 7.6 : Μοντελοποίηση παράγοντα διακύμανσης της ηλιοφάνειας

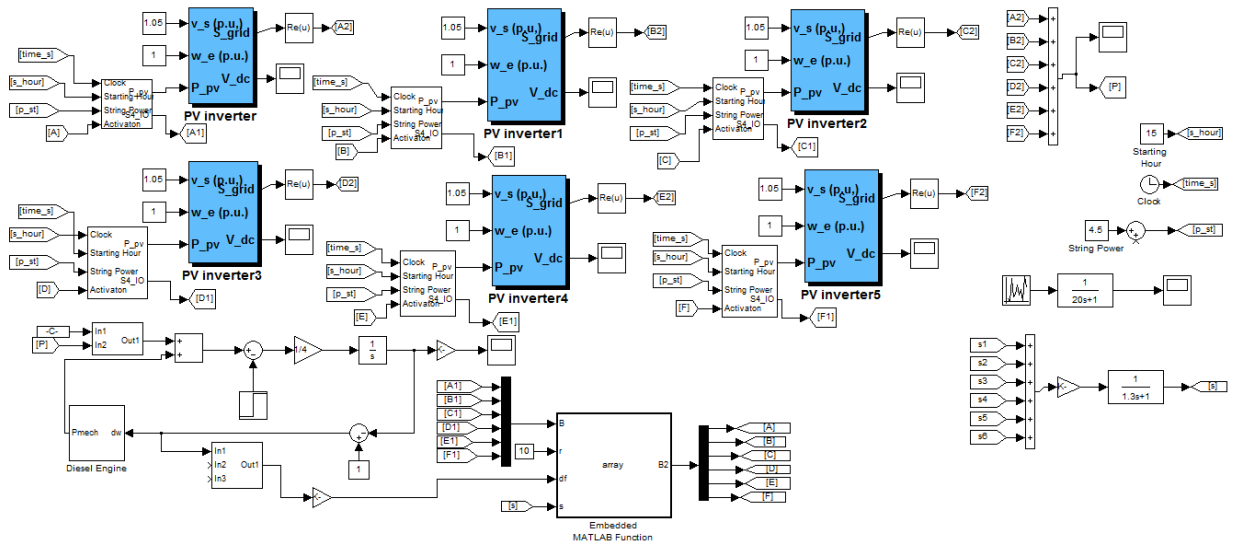
Όπως φαίνεται από την εικόνα, η συνάρτηση αυτή προστίθεται στην ονομαστική ισχύ εξόδου κάθε συστοιχίας, η οποία πλέον μεταβάλλεται και διαμορφώνεται ανάλογα με τα εκάστοτε επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια, όπως είδαμε προηγουμένως, η τιμή που προκύπτει από την παραπάνω μοντελοποίηση εισέρχεται σε κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία και διαμορφώνεται με βάση την ώρα της προσομοίωσης και την εποχή. Με τον τρόπο αυτό η ισχύς των φωτοβολταϊκών γίνεται πλέον συνάρτηση 3 παραγόντων:

1. Ώρα έναρξης της προσομοίωσης,
2. Εποχή κατά την οποία πραγματοποιείται η προσομοίωση και
3. Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας.

### 7.1.5 Συνολικό μοντέλο προσομοίωσης

Με βάση τα όσα αναλύθηκαν προηγουμένως σχετικά με τις επιμέρους μοντελοποιήσεις, στο ακόλουθο σχήμα δίνεται το συνολικό μοντέλο του υβριδικού συστήματος, αποτελούμενο από ένα φωτοβολταϊκό πάρκο έξι αντιστροφών και μία γεννήτρια diesel, όπως αυτό υλοποιήθηκε στο χώρο του simulink:



Εικόνα 7.7 : Συνολικό μοντέλο προσομοίωσης



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**

## ***Σενάρια προσομοιώσεων***

### ***8.1 Βασικά σενάρια προσομοίωσης***

Όπως καθίσταται φανερό από την ανάλυση των επιμέρους μοντέλων του συστήματος που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου να συμμετέχει το φωτοβολταϊκό πάρκο στη ρύθμιση φορτίου συχνότητας απαιτείται να τηρείται μέρος της ισχύος του ως εφεδρεία. Η ποσότητα της ισχύος της εφεδρείας εξαρτάται από τις εκάστοτε απαιτήσεις του διαχειριστή του δικτύου. Επιπλέον, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, η διάταξη ελέγχου των διακοπών η οποία είναι αυτή που στην ουσία πραγματοποιεί την ρύθμιση φορτίου – συχνότητας μέσω του φωτοβολταϊκού πάρκου, δέχεται ως είσοδο και τις μεταβολές της συχνότητας του δικτύου και σε κάθε περίπτωση μεταβάλλει την ισχύ εξόδου του πάρκου.

Επομένως, τα σενάρια προσομοίωσης επιλέγονται έτσι ώστε να μελετηθεί η απόκριση του συστήματος παρουσία και απουσία του φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας.

Με βάση τα παραπάνω, επιλέγονται τα ακόλουθα σενάρια προς προσομοίωση:

1. Στο Σενάριο 1 υποθέτουμε ότι η εποχή είναι καλοκαίρι και ότι το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, ενώ

εμφανίζεται αύξηση του φορτίου κατά 0,3 α.μ.. Εξετάζονται οι ακόλουθες υποπεριπτώσεις:

- a) Η εφεδρεία που ζητά ο διαχειριστής του δικτύου είναι 5 kW.
  - b) Η εφεδρεία που ζητά ο διαχειριστής του δικτύου είναι 21 kW.
  - c) Η εφεδρεία που ζητά ο διαχειριστής του δικτύου είναι 30 kW.
2. Στο Σενάριο 2 υποθέτουμε ότι η εποχή είναι καλοκαίρι και ότι το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, ενώ το φορτίο μειώνεται κατά 0,2 α.μ.. Εξετάζονται οι ακόλουθες υποπεριπτώσεις:
- a) Η εφεδρεία που ζητά ο διαχειριστής του δικτύου είναι 5 kW.
  - b) Η εφεδρεία που ζητά ο διαχειριστής του δικτύου είναι 21 kW.
  - c) Η εφεδρεία που ζητά ο διαχειριστής του δικτύου είναι 1 kW.
3. Στο Σενάριο 3 εξετάζεται η επιρροή του παράγοντα διακύμανσης της ηλιοφάνειας σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος.

## **8.2 Χαρακτηριστικά και παράμετροι μεταβλητών του προβλήματος**

Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται οι τιμές των μεταβλητών των επί μέρους μοντέλων του συνολικού συστήματος, που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις των σεναρίων.

- Φωτοβολταϊκές συστοιχίες:

<b>Χρονική προσαρμογή</b>	<b>17,004709</b>
<b>Εποχιακή προσαρμογή</b>	<b>1</b>
<b>Ονομαστική ισχύς string</b>	<b>4,25</b>
<b>sn (συντελεστής εποχής)</b>	<b>3 για καλοκαίρι, 2 για άνοιξη / φθινόπωρο, 1 για χειμώνα</b>



- Αντιστροφείς:

<b>Βάση ισχύος</b>	<b><math>17 \times 10^3</math></b>
<b><math>I_r</math></b>	1.1
<b>Επαγωγή αντιστροφέα</b>	$105 \times 10^{-3}$
<b>Αντίσταση αντιστροφέα</b>	$3.02 \times 10^{-3}$
<b>Πυκνωτής αποθήκευσης (dc link capacitor)</b>	1.2
<b><math>V_{DC\_ini}</math></b>	0.9
<b>Τάση αναφοράς φωτοβολταϊκών</b>	0.9
<b>Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή</b>	3
<b>Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή</b>	14
<b>Ρεύμα αναφοράς εγκάρσιου άξονα</b>	0

- Γεννήτρια diesel:

<b>Ονομαστική ισχύς</b>	<b>200 kW</b>
<b>Χρονική σταθερά</b>	0.05
<b>Σταθερά αδράνειας</b>	0.15

Τέλος αναφέρεται ότι στο **ρυθμιστή στροφών** το κέρδος της πρωτεύουσας ρύθμισης είναι 5, ενώ για τη γεννήτρια θεωρούμε στατισμό 5 και σταθερά αδράνειας 2 α.μ..



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9**

## **Προσομοιώσεις**

### **9.1 Σενάριο 1ο**

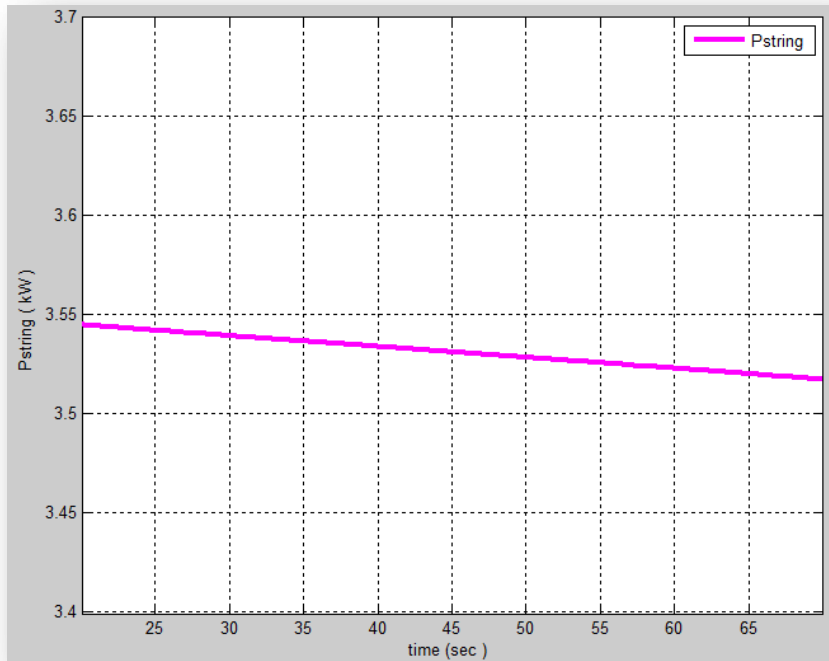
#### **9.1.1 Προσομοιώσεις**

Ισχύουν τα ακόλουθα:

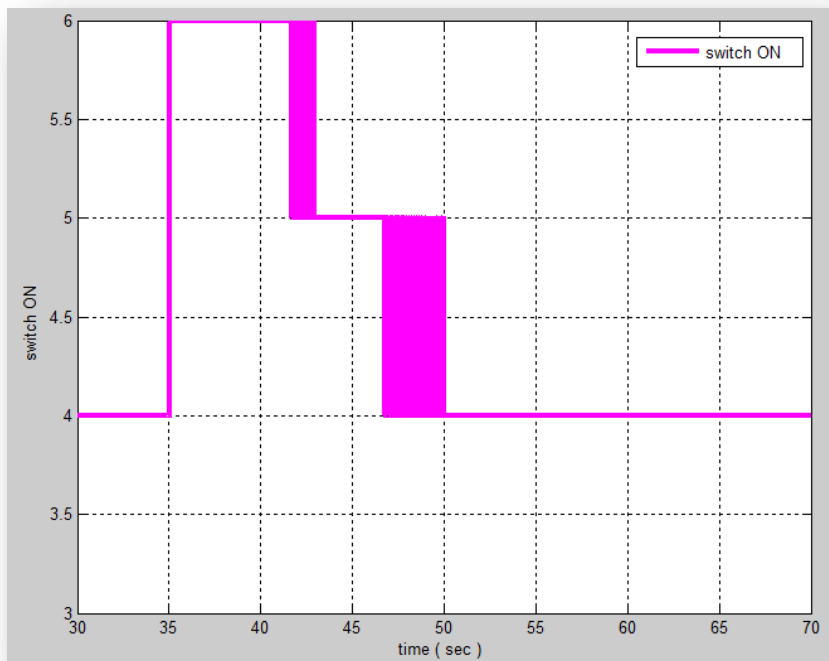
- ❖ Η εποχή που διανύουμε είναι καλοκαίρι.
- ❖ Το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, δηλαδή τηρείται ένα ποσό ισχύος ως εφεδρεία.
- ❖ Στο 35<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο της προσομοίωσης συμβαίνει αύξηση του φορτίου κατά 0,3 α.μ..

Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου:

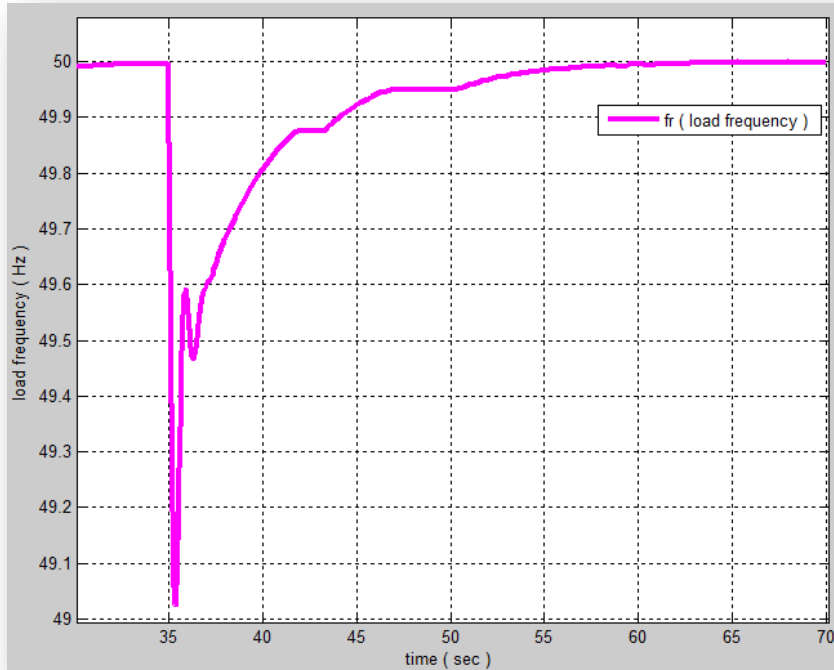
- a) Τηρείται εφεδρεία 5 kW:



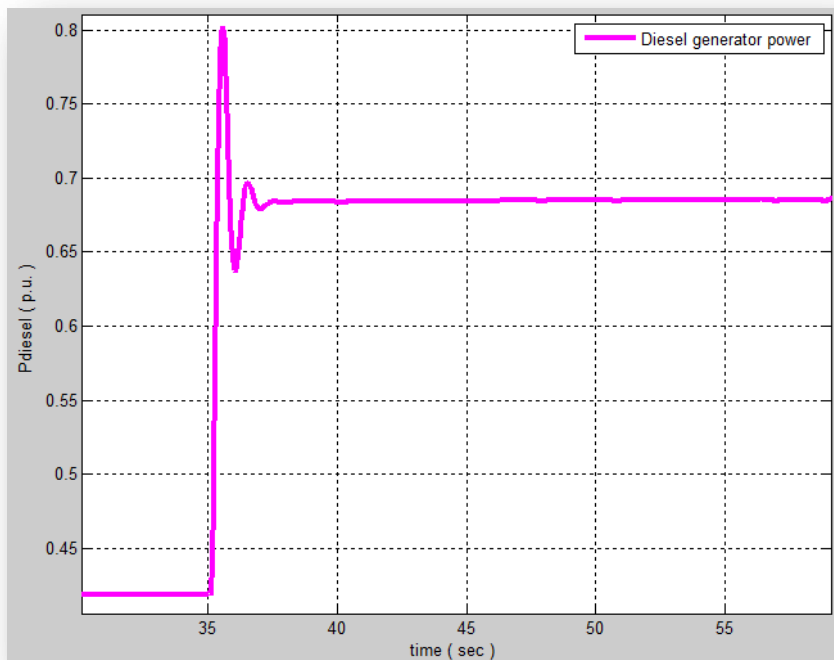
**Εικόνα 9.1: Ισχύς εξόδου string**



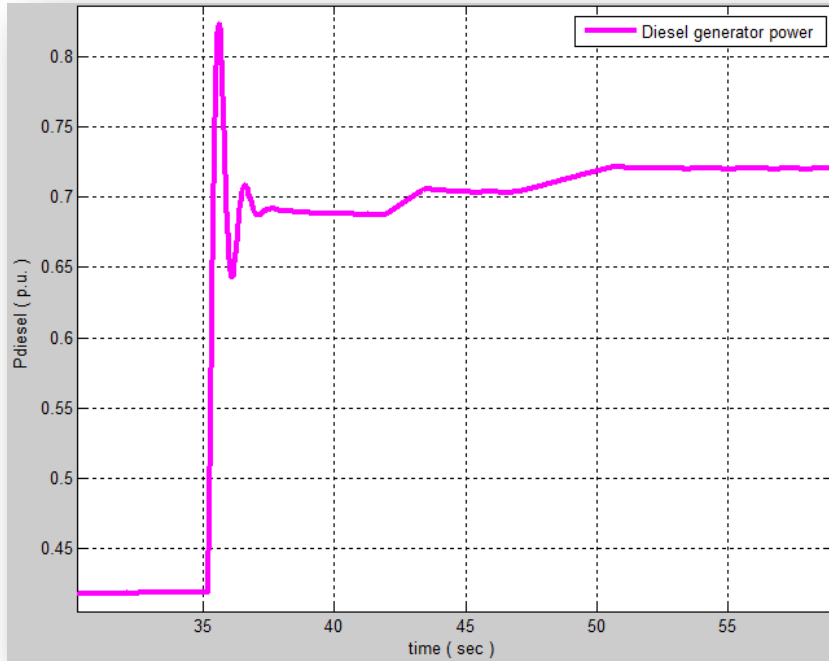
**Εικόνα 9.2: Strings συνδεδεμένα στο δίκτυο**



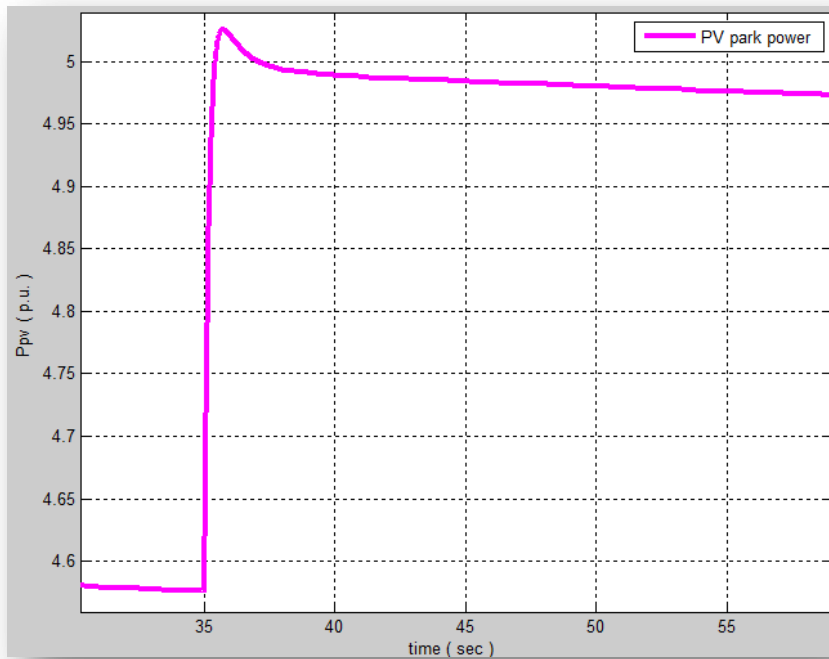
Εικόνα 9.3: Συχνότητα δικτύου



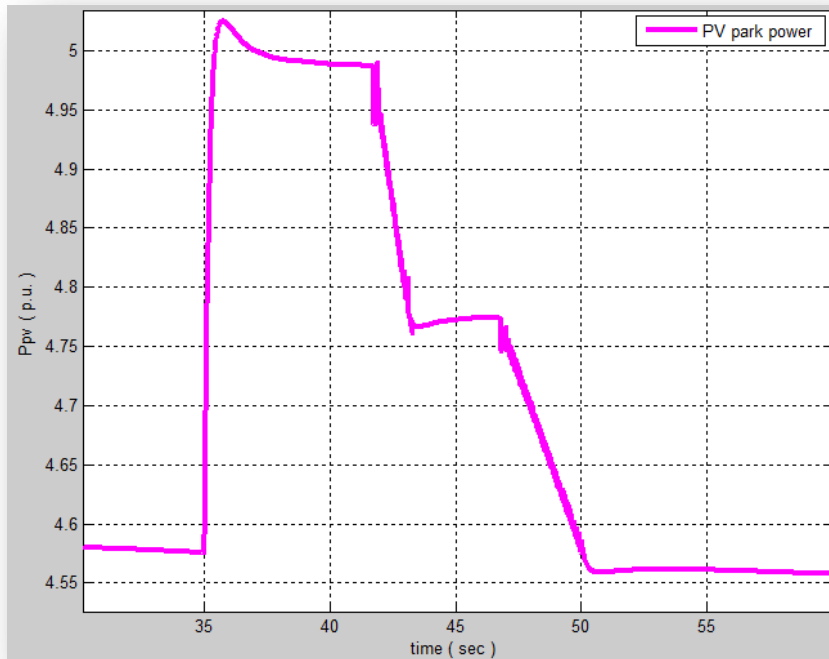
Εικόνα 9.4: Ισχύς εξόδου γεννήτριας diesel πριν την δευτερεύουσα ρύθμιση



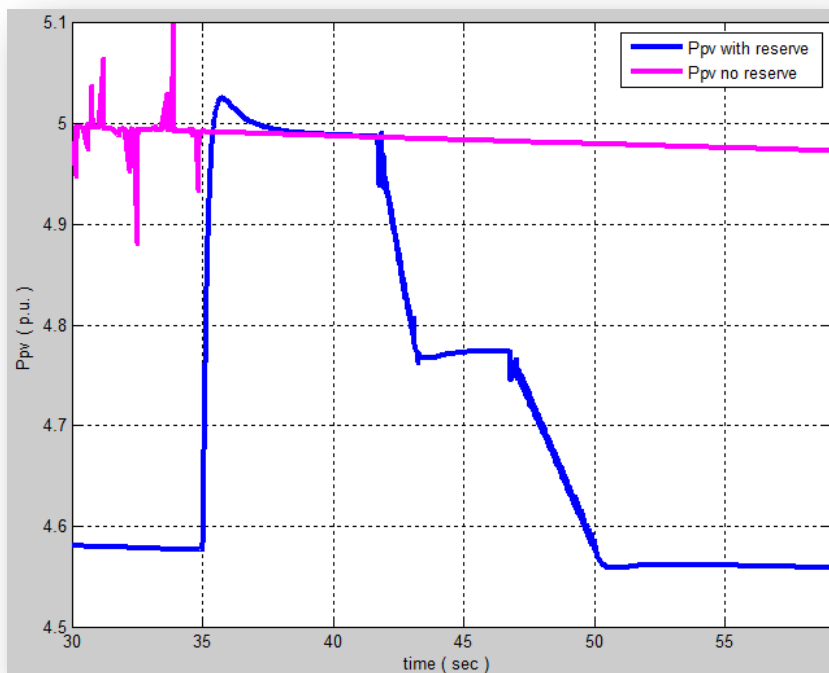
Εικόνα 9.5: Ισχύς εξόδου γεννήτριας diesel μετά τη δευτερεύουσα ρύθμιση



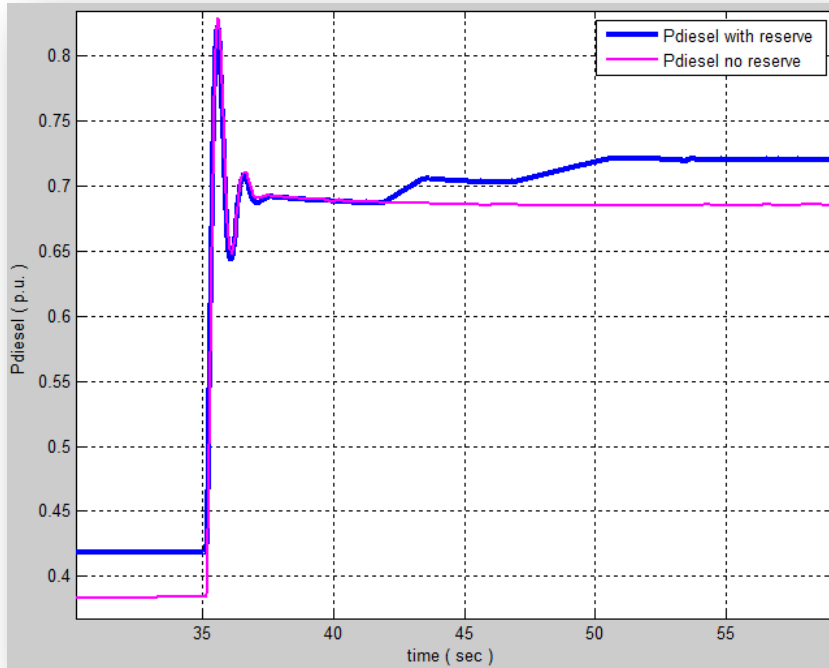
Εικόνα 9.6: Ισχύς εξόδου ΦΒ πάρκου πριν τη δευτερεύουσα ρύθμιση



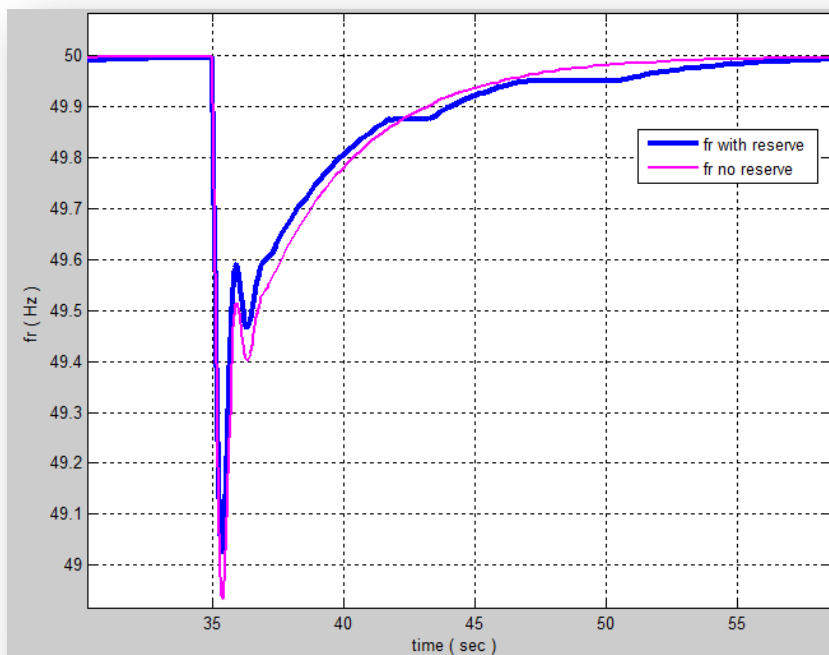
Εικόνα 9.7: Ισχύς εξόδου ΦΒ πάρκου μετά την δευτερεύουσα ρύθμιση



Εικόνα 9.8: Σύγκριση ισχύος εξόδου ΦΒ πάρκου με και χωρίς τη συμμετοχή του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας



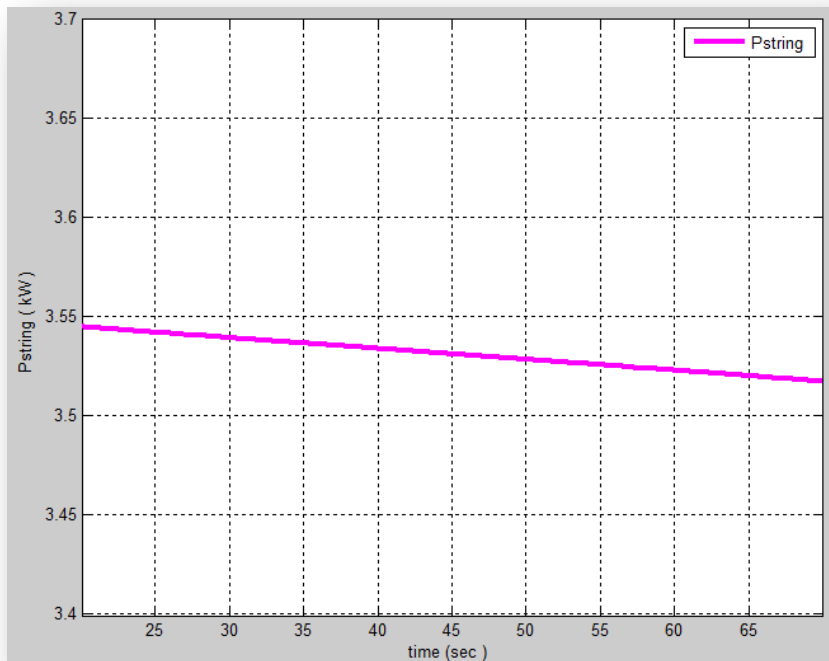
Εικόνα 9.9: Σύγκριση ισχύος εξόδου γεννήτριας diesel με και χωρίς τη συμμετοχή του ΦΒ πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας



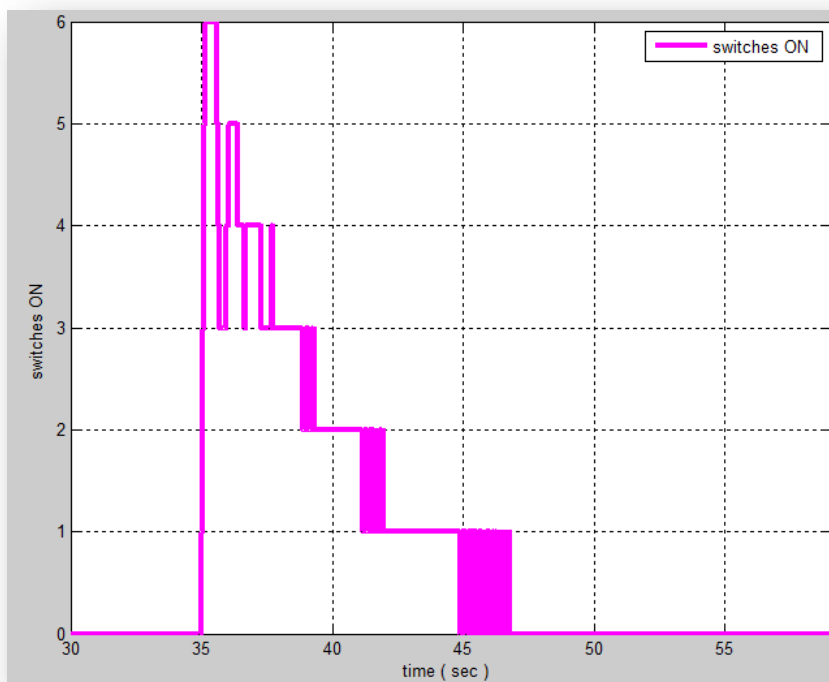
Εικόνα 9.10: Σύγκριση συχνότητας δικτύου με και χωρίς τη συμμετοχή του ΦΒ πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας



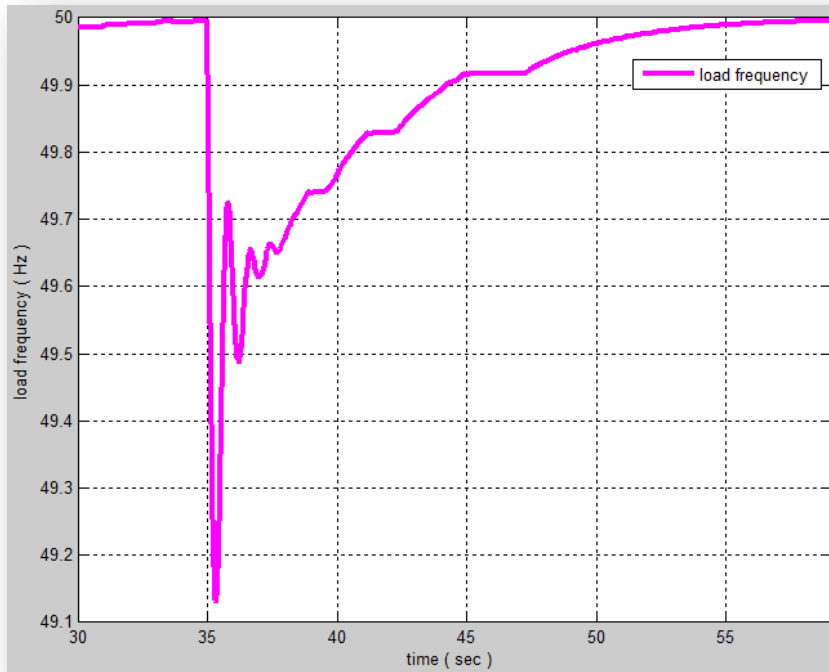
b) Η εφεδρεία αυξάνεται στην τιμή των 21 kW:



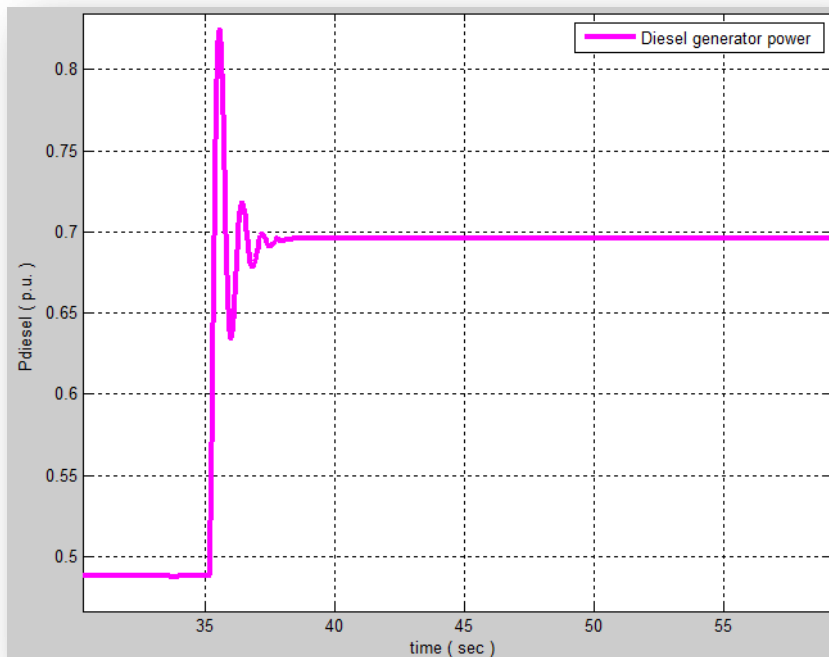
Εικόνα 9.11 :Ισχύς εξόδου string



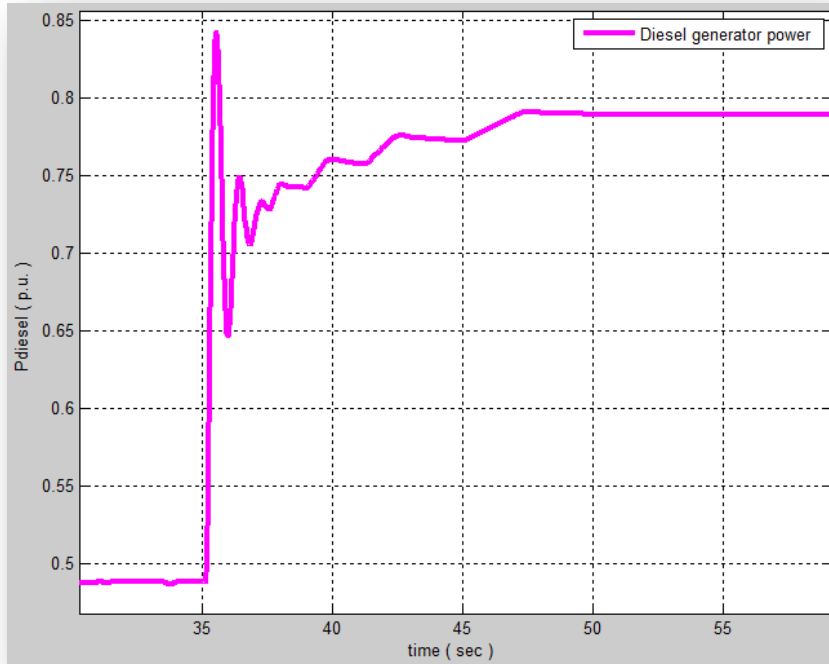
Εικόνα 9.12: Strings συνδεδεμένα στο δίκτυο



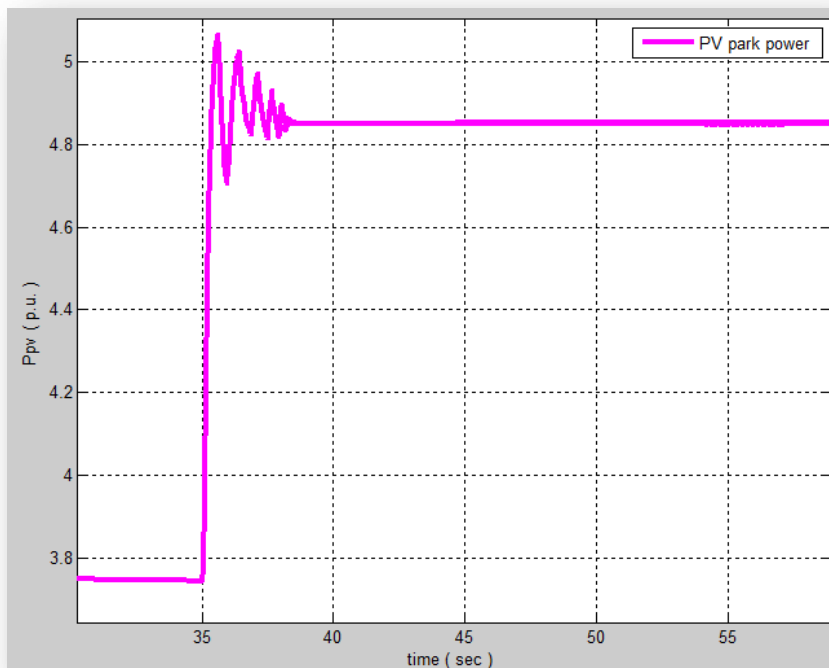
Εικόνα 9.13: Συχνότητα δικτύου



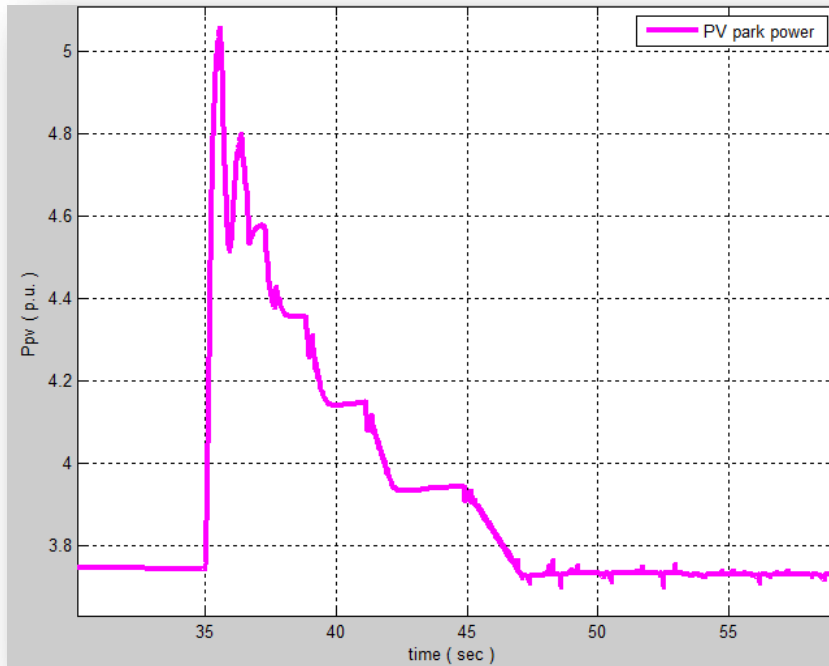
Εικόνα 9.14: Ισχύς εξόδου γεννήτριας diesel πριν τη δευτερεύουσα ρύθμιση



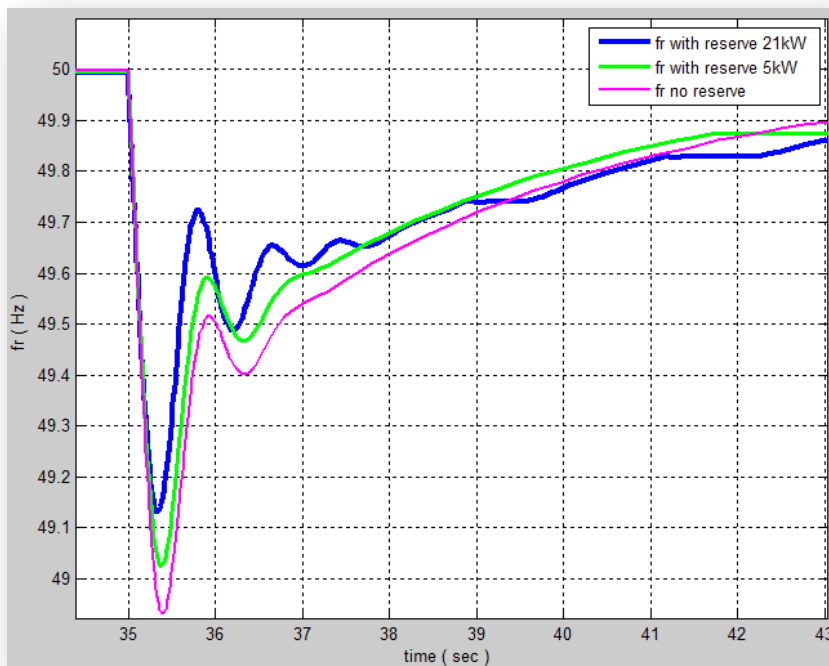
Εικόνα 9.15: Ισχύς εξόδου γεννήτριας diesel μετά τη δευτερεύουσα ρύθμιση



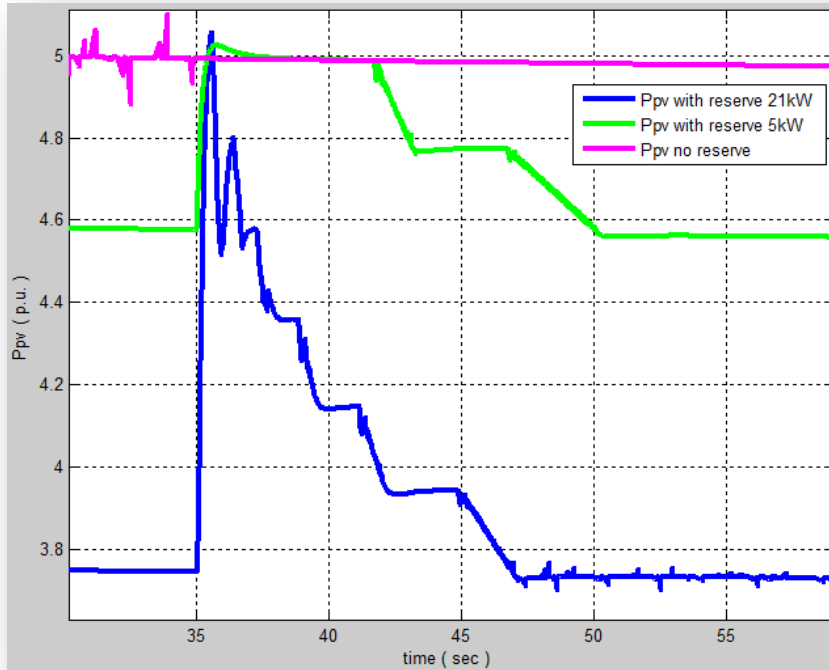
Εικόνα 9.16: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση



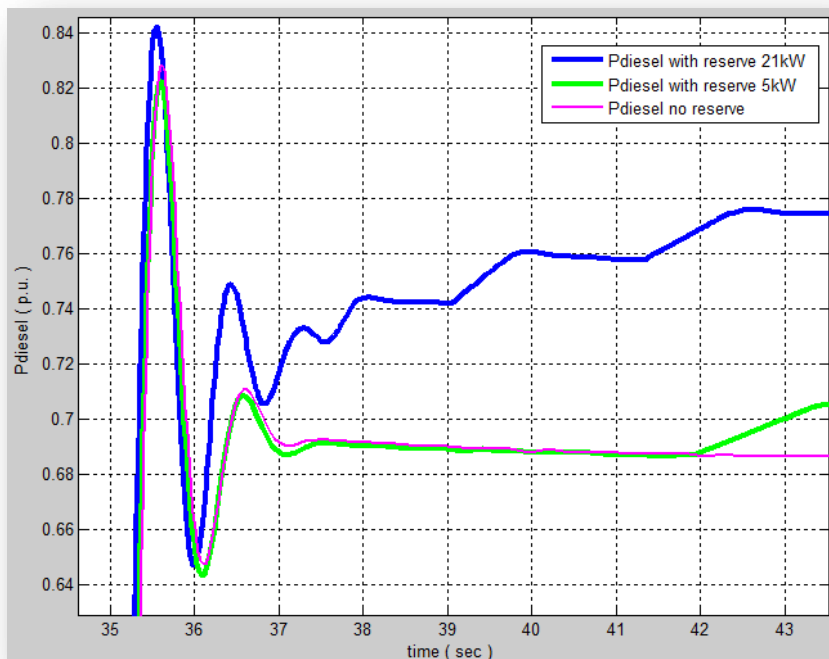
Εικόνα 9.17: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου μετά τη δευτερεύουσα ρύθμιση



Εικόνα 9.18: Σύγκριση μεταβολής συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας

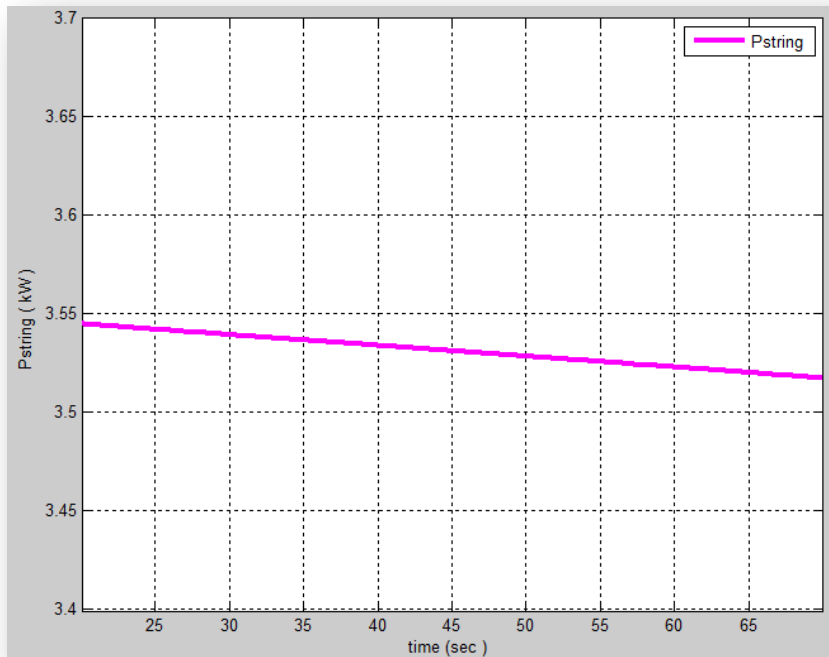


Εικόνα 9.19: Σύγκριση ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου με και χωρίς τη συμμετοχή του στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας

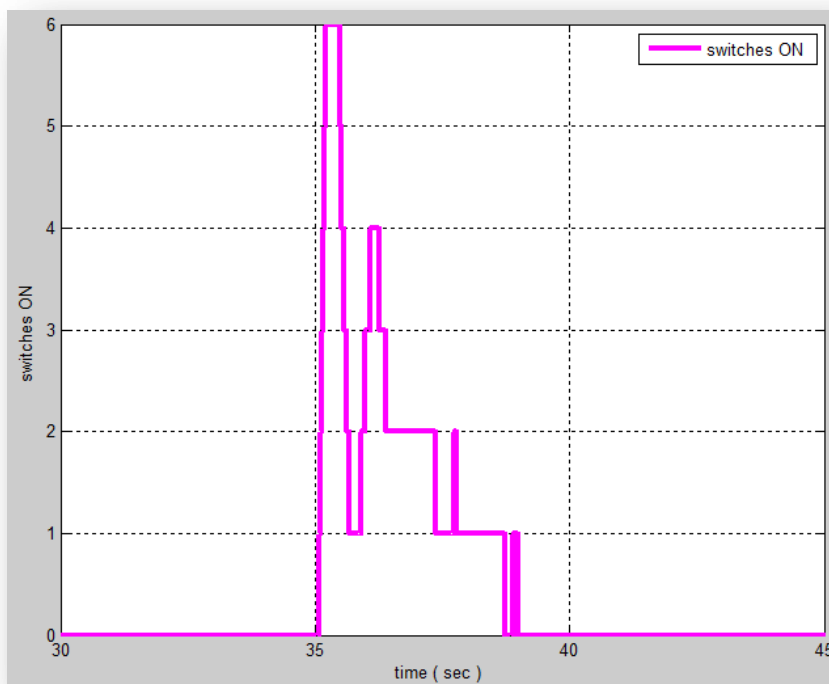


Εικόνα 9.20: Σύγκριση ισχύος εξόδου νηξελογεννήτριας με και χωρίς τη συμμετοχή του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας

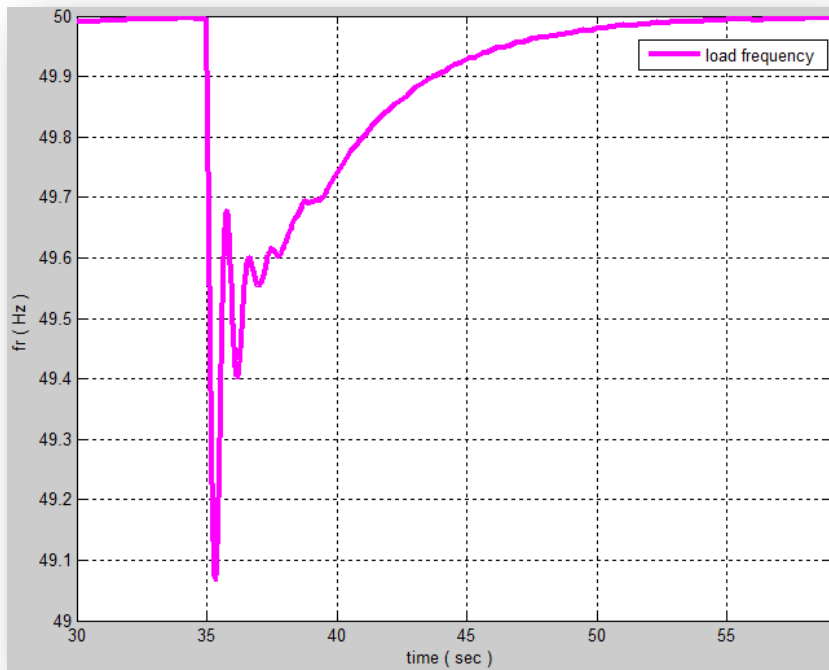
c) Τηρείται εφεδρεία 30 kW:



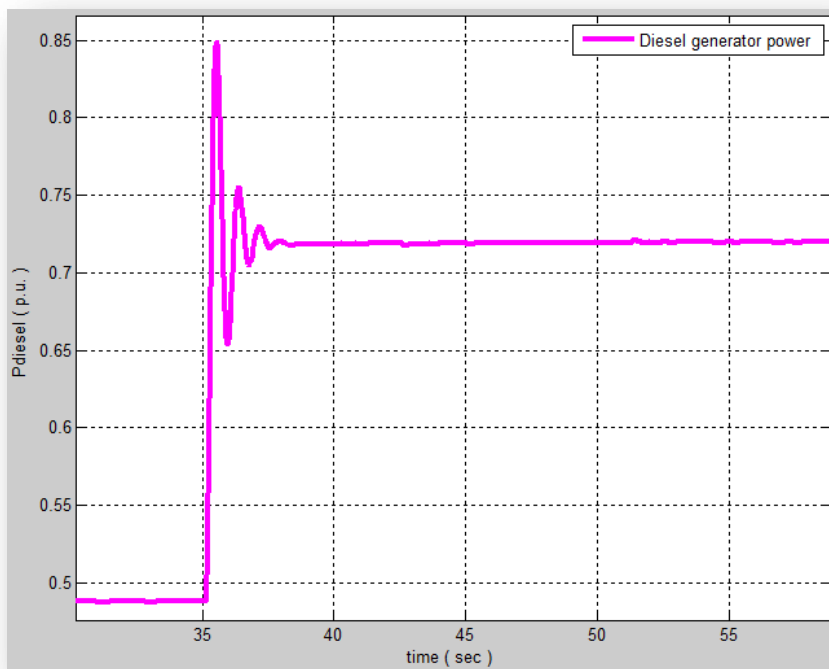
Εικόνα 9.21: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας



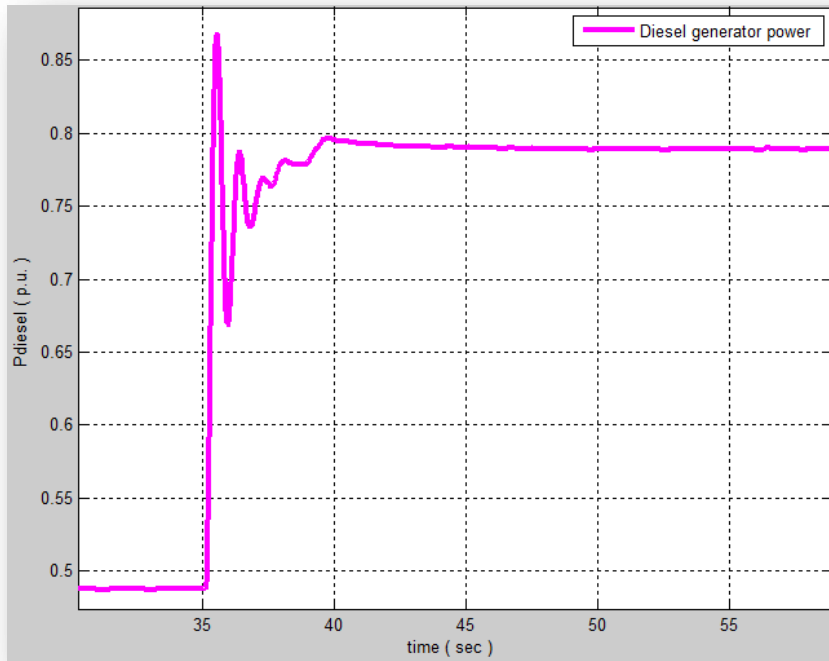
Εικόνα 9.22: Φωτοβολταϊκές συστοιχίες που ενεργοποιούνται



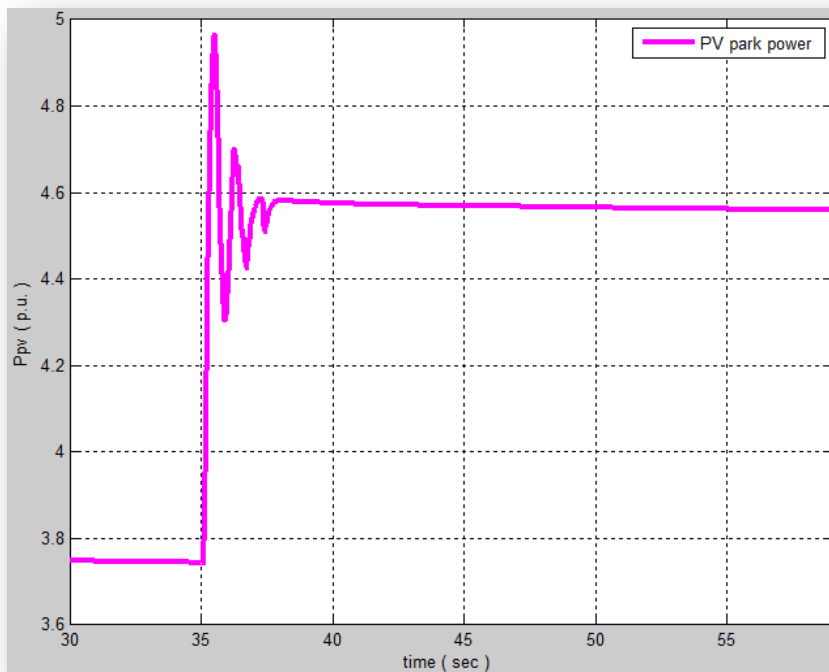
Εικόνα 9.23: Συχνότητα δικτύου



Εικόνα 9.24: Ισχύς εξόδου diesel μετά την προτεινόμενη ρύθμιση

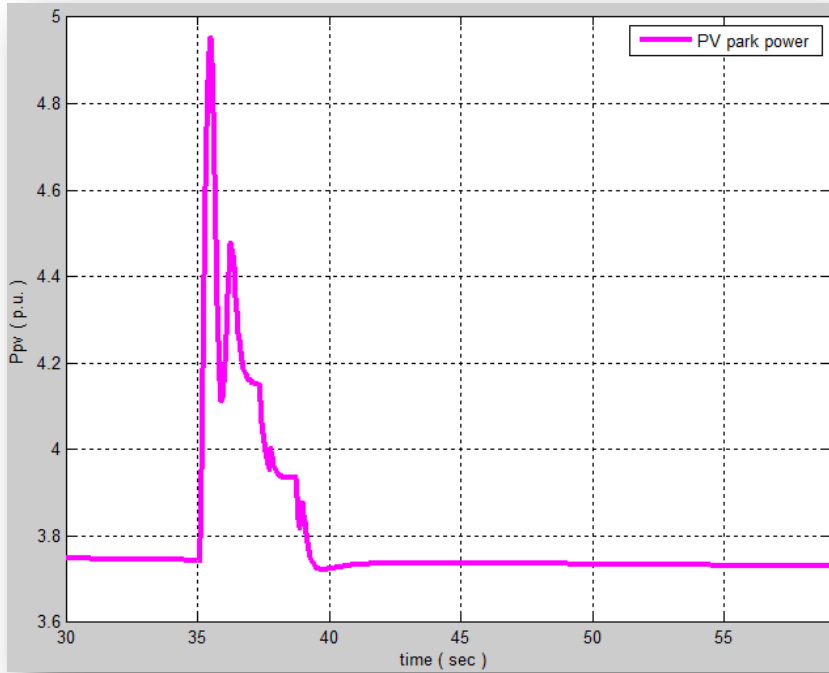


**Εικόνα 9.25: Ισχύς εξόδου diesel μετά την δευτερεύουσα ρύθμιση**

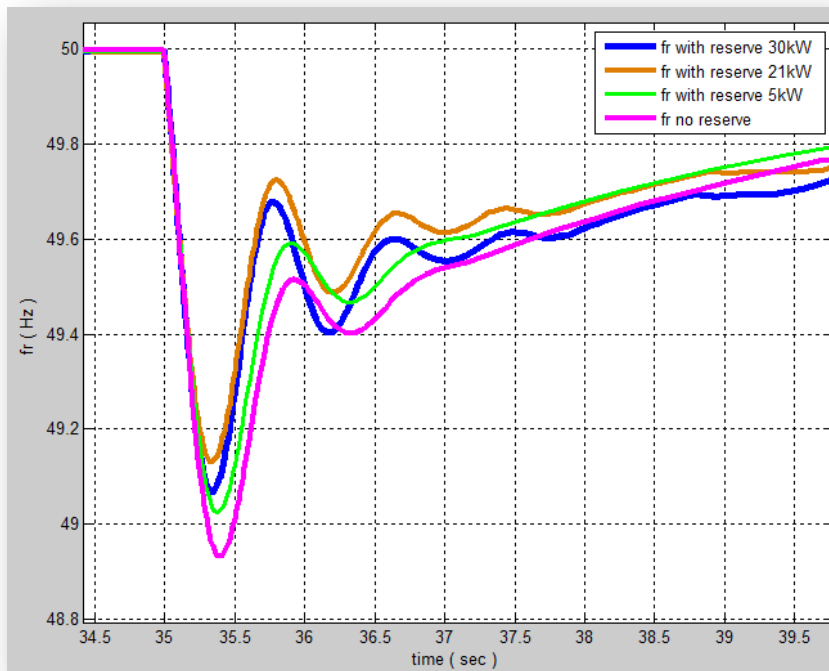


**Εικόνα 9.26: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση**

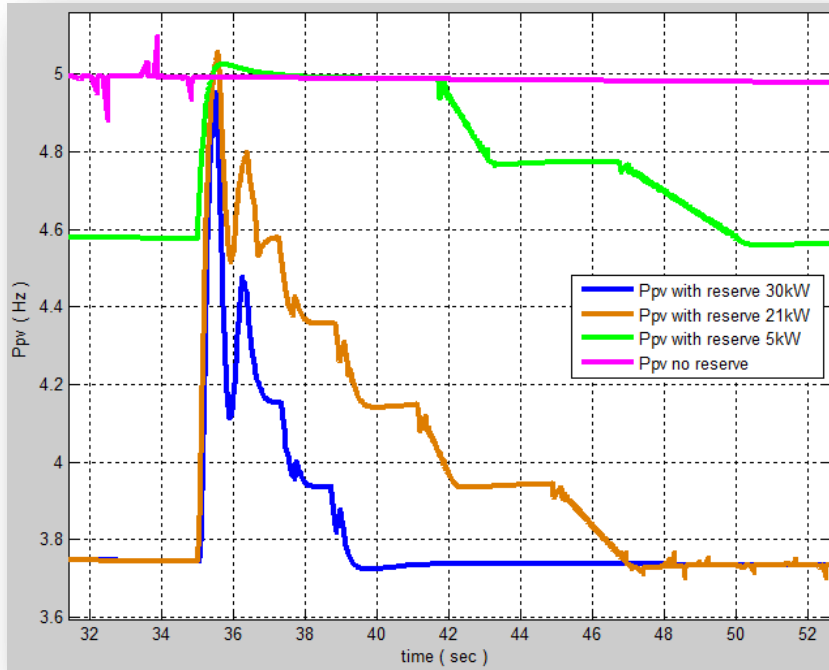




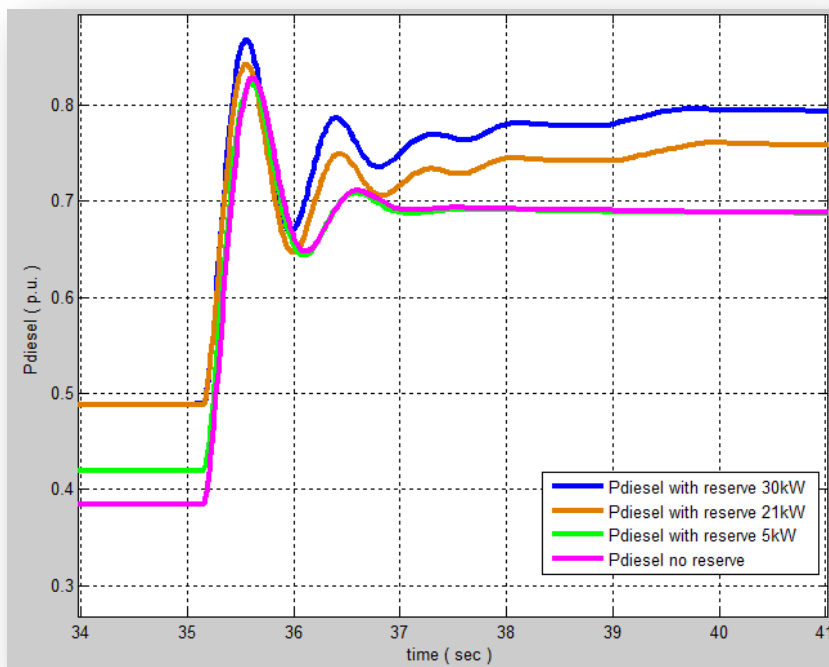
Εικόνα 9.27: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου μετά την δευτερεύουσα ρύθμιση



Εικόνα 9.28: Σύγκριση μεταβολής συχνότητας για τις περιπτώσεις συμμετοχής και μη του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας



Εικόνα 9.29: Σύγκριση της ισχύος εξόδου του πάρκου με και χωρίς τη συμμετοχή του στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας



Εικόνα 9.30: Σύγκριση της ισχύος εξόδου της νηξελογεννήτριας για συμμετοχή και μη του φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας

### 9.1.2 Συμπεράσματα

α) Το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει με εφεδρεία 5 kW:

Στις **Εικόνες 9.1, 9.11, 9.21** δίνεται η ισχύς εξόδου μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Όπως παρατηρούμε και όπως είναι αναμενόμενο, η τιμή της ισχύος εξόδου των strings δεν επηρεάζεται από την εφεδρεία, αφού είναι συνάρτηση της ηλιοφάνειας. Στο φωτοβολταϊκό πάρκο τηρείται εφεδρεία 5 kW, γεγονός που σημαίνει ότι (με βάση την ισχύ κάθε συστοιχίας που είναι περίπου 3,5 kW(για τις συγκεκριμένες συνθήκες προσομοίωσης)δύο συστοιχίες πρέπει να είναι αποσυνδεδεμένες ώστε να καλύπτεται αυτό το ποσό ισχύος. Το γεγονός αυτό φαίνεται στην **Εικόνα 9.2**, όπου πριν το σφάλμα μόνο τέσσερις διακόπτες είναι κλειστοί ενώ οι υπόλοιποι δύο είναι ανοιχτοί.

Μόλις συμβεί το σφάλμα, η συχνότητα του δικτύου μειώνεται (**Εικόνα 9.3**). Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα αποκαθίσταται με τη συνεισφορά τόσο της νηξελογεννήτριας όσο και του φωτοβολταϊκού πάρκου. Όσο αφορά το φωτοβολταϊκό πάρκο, αυτό καλείται να κλείσει και τους άλλους δύο διακόπτες ώστε να συνεισφέρει στην αύξηση της ισχύος που είναι ικανή να εξαλείψει το σφάλμα. Όπως φαίνεται και στην αντίστοιχη εικόνα (**9.2**), μόλις τερματίσει η πρωτεύουσα ρύθμιση και το σφάλμα συχνότητας έχει μειωθεί, ο ένας από τους δύο διακόπτες ξαναανοίγει, ενώ μόλις ολοκληρωθεί και η δευτερεύουσα ρύθμιση οπότε το σφάλμα συχνότητας έχει μηδενιστεί, ανοίγει πάλι και ο δεύτερος διακόπτης.

Αν δούμε τις **Εικόνες 9.5, 9.6, 9.7** μπορούμε να διαπιστώσουμε την μεταβολή ισχύος που υφίστανται το πάρκο και η νηξελογεννήτρια. Συγκεκριμένα το πάρκο αυξάνει την ισχύ του κατά 0,0345 α.μ. και η νηξελογεννήτρια κατά 0,2651 α.μ..

Τέλος, συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του παρόντος σεναρίου με την περίπτωση που το πάρκο δεν συμμετείχε στην ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, στις **Εικόνες 9.8, 9.9, 9.10**. Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης:

Φωτοβολταϊκό πάρκο στη ΡΦΣ	Μεταβολή ισχύος φωτοβολταϊκού πάρκου	Μεταβολή ισχύος γεννήτριας diesel	Μεταβολή συχνότητας
Συμμετοχή	0,0345 α.μ.	0,2651 α.μ.	0,9845
Απουσία	0	0,3 α.μ.	1,0768

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται πόσο ευεργετική είναι η συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και τα καλύτερα αποτελέσματα που παρέχει.

b) Το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει με εφεδρεία 21 kW:

Στην περίπτωση αυτή το φωτοβολταϊκό πάρκο ξεκινάει τη λειτουργία του με τις έξι συστοιχίες απενεργοποιημένες (προς τήρηση εφεδρείας). Μόλις συμβεί η μεταβολή του φορτίου κλείνουν και οι έξι διακόπτες (Εικόνα 9.12), ενώ καθώς το σφάλμα συχνότητας σιγά σιγά αποκαθίσταται ξανανοίγουν όλοι σταδιακά. Από τα διαγράμματα σύγκρισης τις συχνότητας, της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου και της ισχύος εξόδου της νηξελογεννήτριας (Εικόνες 9.18, 9.19, 9.20) προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας αποτελεσμάτων:

Φωτοβολταϊκό πάρκο στη ΡΦΣ	Μεταβολή ισχύος φωτοβολταϊκού πάρκου	Μεταβολή ισχύος γεννήτριας diesel	Μεταβολή συχνότητας
Συμμετοχή με εφεδρεία 21 kW	0,0943 α.μ.	0,2067 α.μ.	0,392 Hz
Συμμετοχή με εφεδρεία 5 kW	0,0345 α.μ.	0,2651 α.μ.	0,9845 Hz
Απουσία	0	0,3 α.μ.	1,0768 Hz

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό ότι η αύξηση της εφεδρείας επιφέρει μεγαλύτερη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Ακόμη παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται η

επιθυμητή αναλογία 1: 2 μεταξύ φωτοβολταϊκού πάρκου και νηξελογεννήτριας, αντίστοιχα, στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας.

c) Το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει με εφεδρεία 30 kW:

Στην περίπτωση αυτή αυξάνουμε ακόμη περισσότερο την εφεδρεία για να ελέγξουμε αν μπορούμε να πετύχουμε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

Στην **Εικόνα 9.22** φαίνεται ότι στην έναρξη λειτουργίας του το φωτοβολταϊκό πάρκο έχει και τους έξι διακόπτες ανοιχτούς, ενώ όταν συμβαίνει η μεταβολή τους κλείνει άμεσα. Επίσης παρατηρούμε ότι έχει ξανανοίξει τους διακόπτες πριν ολοκληρωθεί η πλήρης αποκατάσταση της συχνότητας.

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των διαγραμμάτων των **Εικόνων 9.28, 9.29, 9.30** :

<b>Φωτοβολταϊκό πάρκο στη ΡΦΣ</b>	<b>Μεταβολή ισχύος φωτοβολταϊκού πάρκου</b>	<b>Μεταβολή ισχύος γεννήτριας diesel</b>	<b>Μεταβολή συχνότητας</b>
<b>Συμμετοχή με εφεδρεία 30 kW</b>	0,0689 α.μ.	0,2319 α.μ.	0,9315 Hz
<b>Συμμετοχή με εφεδρεία 21 kW</b>	0,0943 α.μ.	0,2067 α.μ.	0,392 Hz
<b>Συμμετοχή με εφεδρεία 5 kW</b>	0,0345 α.μ.	0,2651 α.μ.	0,9845 Hz
<b>Απουσία</b>	0	0,3 α.μ.	1,0768 Hz

Από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται η εφεδρεία τόσο καλύτερα αποτελέσματα πετυχαίνουμε μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στο άθροισμα ισχύων εξόδου των έξι συστοιχιών που διαθέτουν διακόπτες. Τα 21 kW, στα οποία έχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα και στα οποία επιτυγχάνεται η επιθυμητή αναλογία, αντιστοιχούν στο άθροισμα των ισχύων εξόδου των έξι συστοιχιών, για τις

συγκεκριμένες συνθήκες προσομοίωσης. Οποιαδήποτε αύξηση της εφεδρείας πέρα από αυτή την τιμή δεν μπορεί να επιφέρει κάποια επιπλέον βελτίωση.

Τέλος, αν παρατηρήσουμε τις **Εικόνες 9.2, 9.12, 9.22** θα δούμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή της εφεδρείας τόσο πιο γρήγορα οι διακόπτες επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση. Στην περίπτωση εφεδρείας 5 kW οι διακόπτες επανέρχονται μετά την πλήρη αποκατάσταση του σφάλματος συχνότητας, για εφεδρεία 21 kW επανέρχονται ακριβώς την στιγμή που το σφάλμα αποκαθίστανται, ενώ για εφεδρεία 30 kW οι διακόπτες επανέρχονται στην αρχική κατάσταση πριν τελειώσει η δευτερεύουσα ρύθμιση. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με το εναπομείναν σφάλμα μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση σε συνδυασμό με τη ζητούμενη εφεδρεία, από το οποίο προκύπτει ο αριθμός των διακοπών που κάθε φορά πρέπει να είναι κλειστός.

Καταλήγουμε λοιπόν, στο ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ζητούμενης εφεδρείας (πέρα από την τιμή που αντιστοιχεί στο άθροισμα ισχύος των έξι συστοιχιών) τόσο μεγαλύτερη θα πρέπει να είναι η πτώση της συχνότητας ώστε το φωτοβολταϊκό πάρκο να συμμετέχει αποτελεσματικότερα στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας.

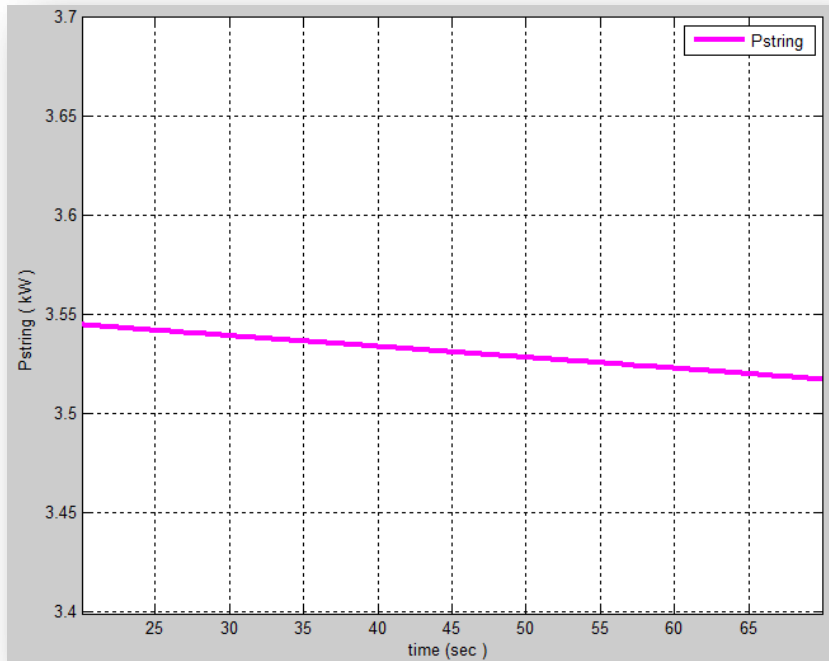
## **9.2 Σενάριο 2<sup>ο</sup>**

### **9.2.1 Προσομοιώσεις**

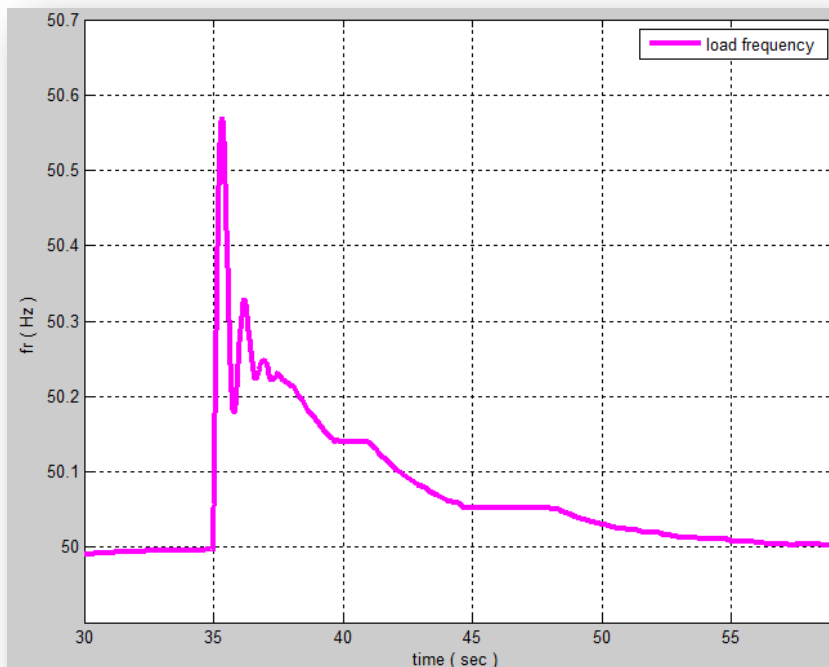
Ισχύουν τα ακόλουθα:

- ❖ Η εποχή που διανύουμε είναι καλοκαίρι.
- ❖ Το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας.
- ❖ Στο 35<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο της προσομοίωσης συμβαίνει μείωση του φορτίου κατά 0,2 α.μ..

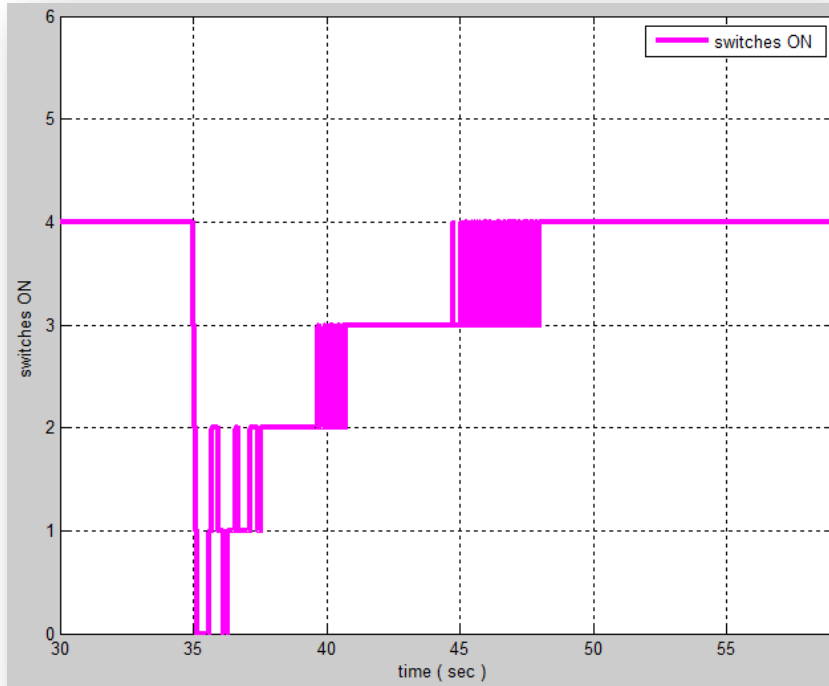
a) Τηρείται εφεδρεία 5 kW:



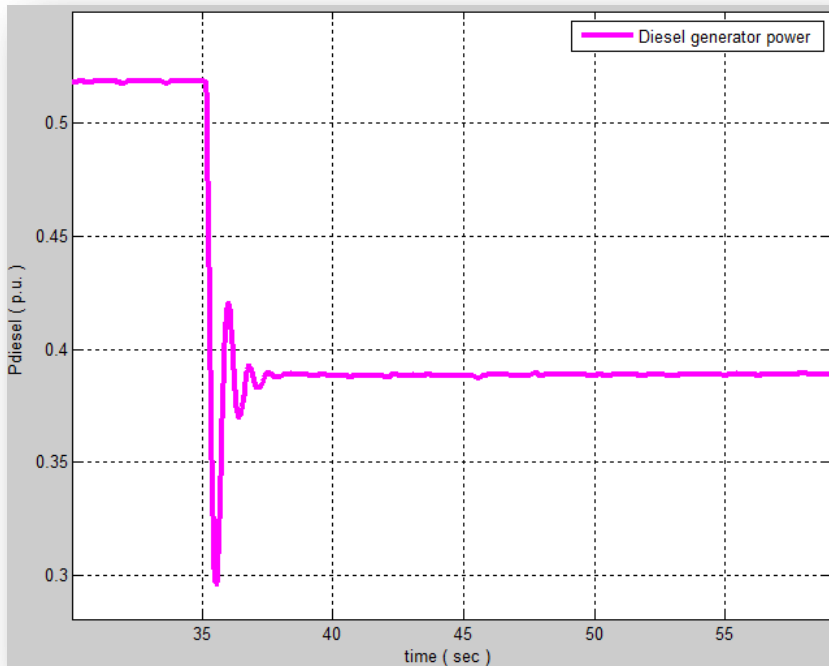
**Εικόνα 9.31: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας**



**Εικόνα 9.32: Συχνότητα δικτύου**

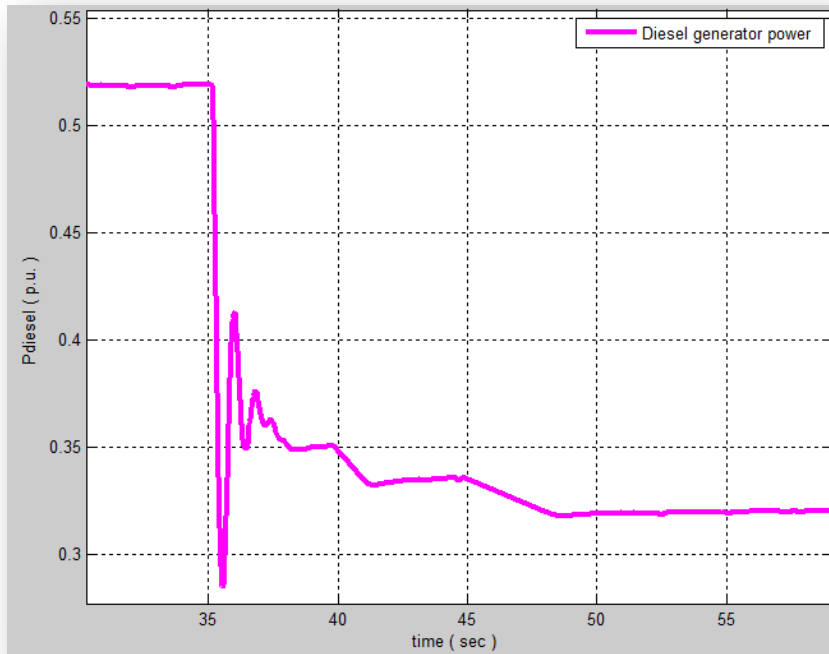


Εικόνα 9.33: Συστοιχίες προς ενεργοποίηση

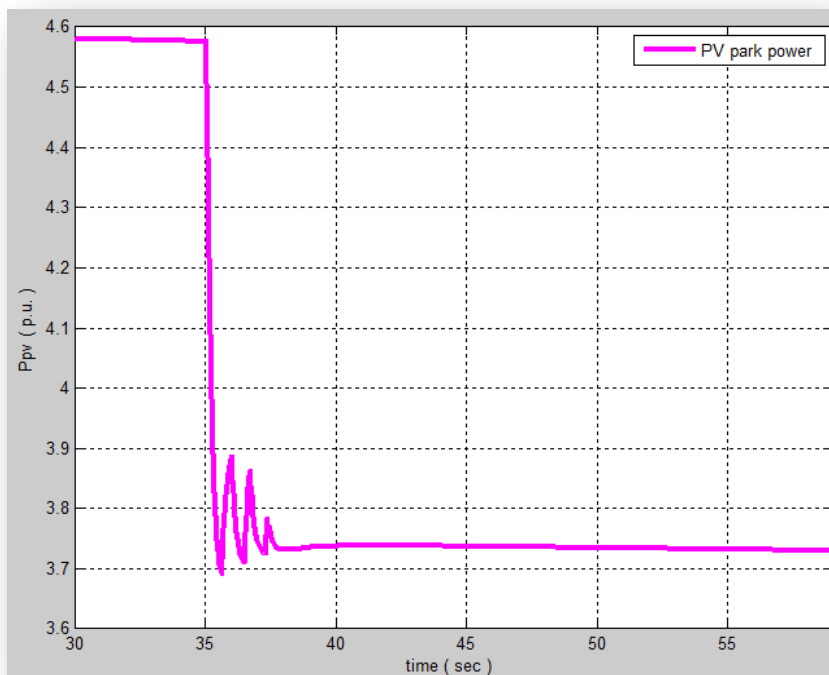


Εικόνα 9.34: Ισχύς εξόδου γεννήτριας diesel μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση

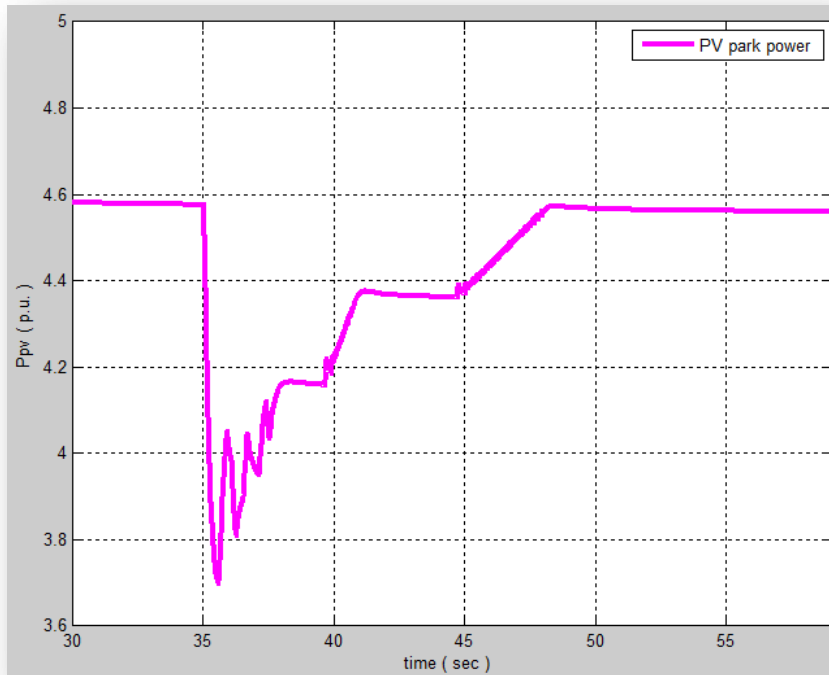




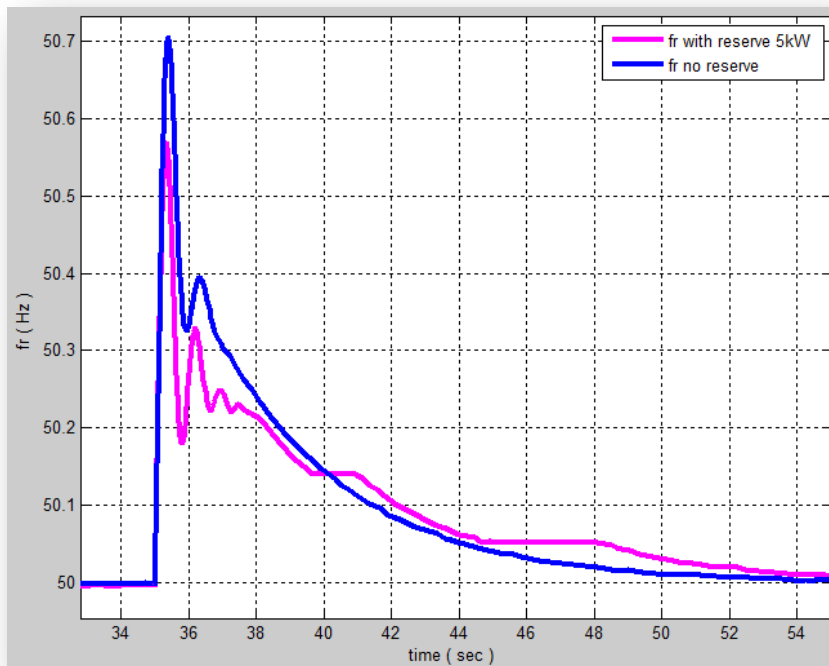
**Εικόνα 9.35:** Ισχύς εξόδου γεννήτριας diesel μετά την δευτερεύουσα ρύθμιση



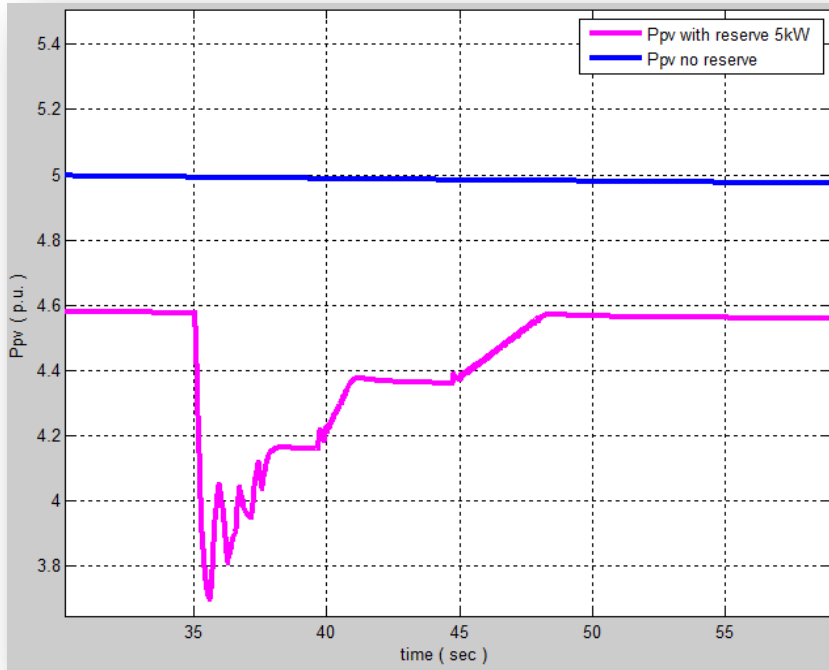
**Εικόνα 9.36:** Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση



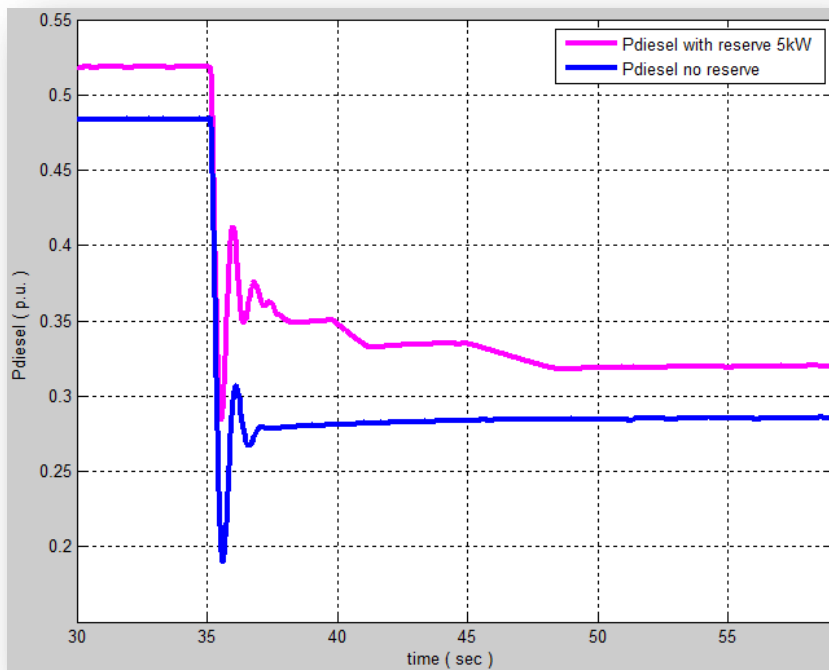
Εικόνα 9.37: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου μετά την δευτερεύουσα ρύθμιση



Εικόνα 9.38: Σύγκριση μεταβολής συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας

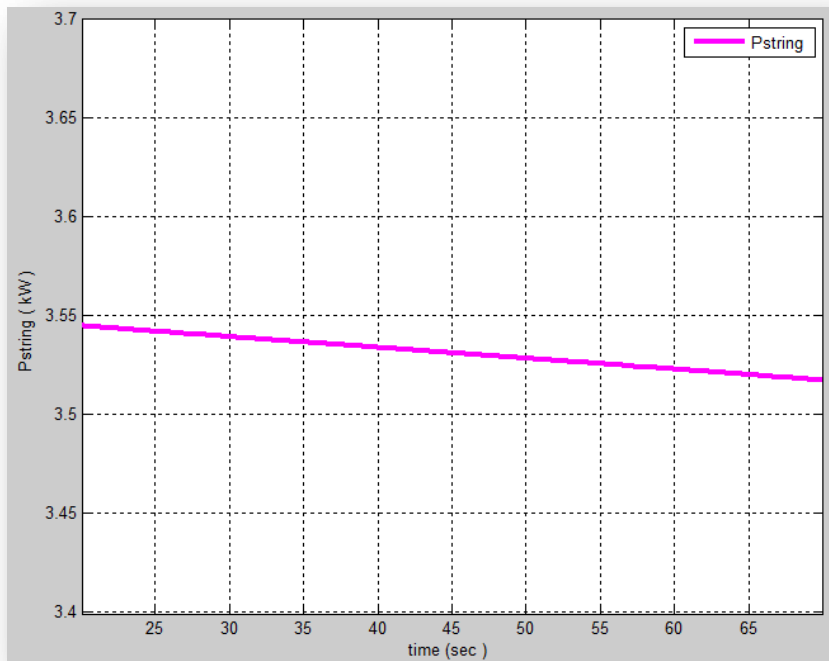


Εικόνα 9.39: Σύγκριση ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου με και χωρίς τη συμμετοχή του στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας

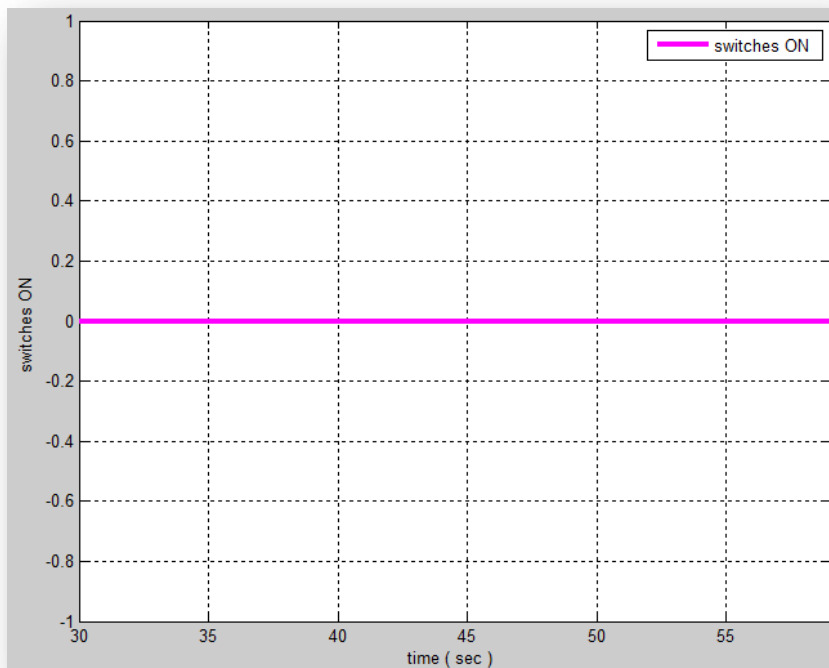


Εικόνα 9.40: Σύγκριση ισχύος εξόδου νηξελογεννήτριας με και χωρίς τη συμμετοχή του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας

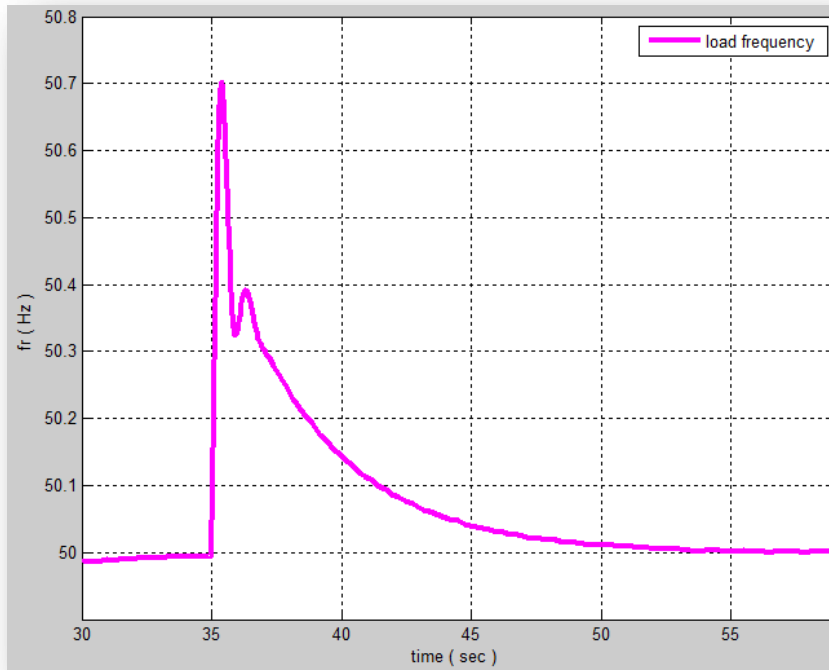
b) Τήρηση εφεδρείας 21 kW:



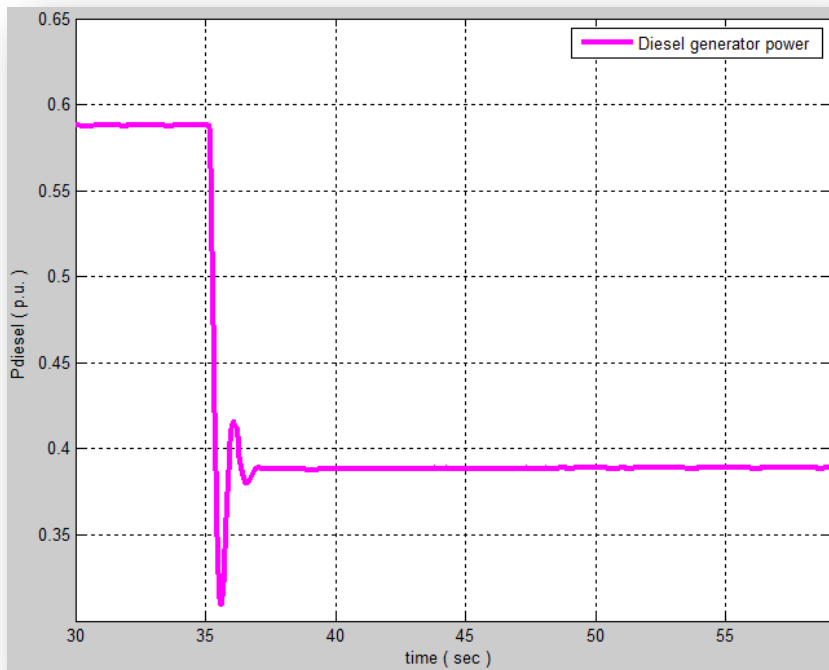
Εικόνα 9.41: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας



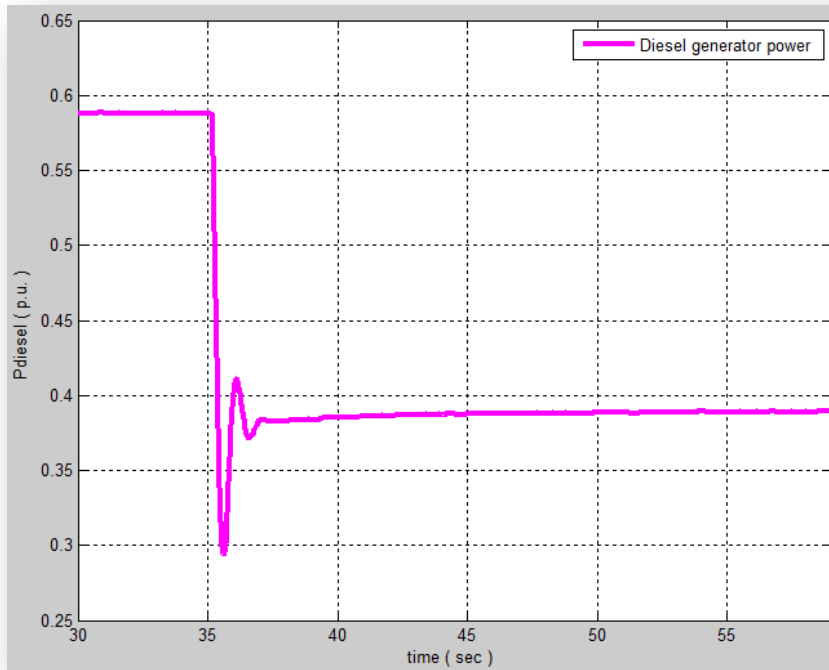
Εικόνα 9.42: Κατάσταση διακοπών



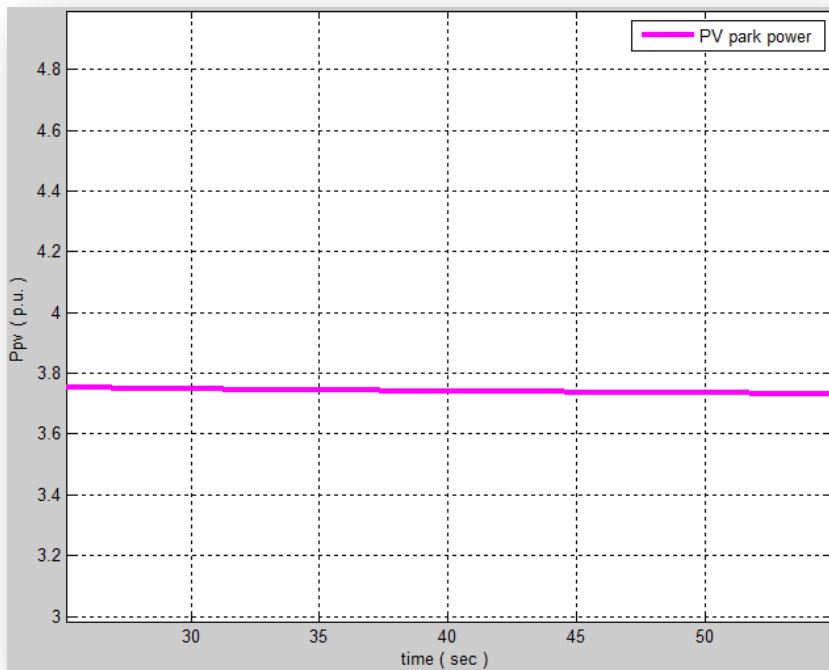
Εικόνα 9.43: Συχνότητα δικτύου



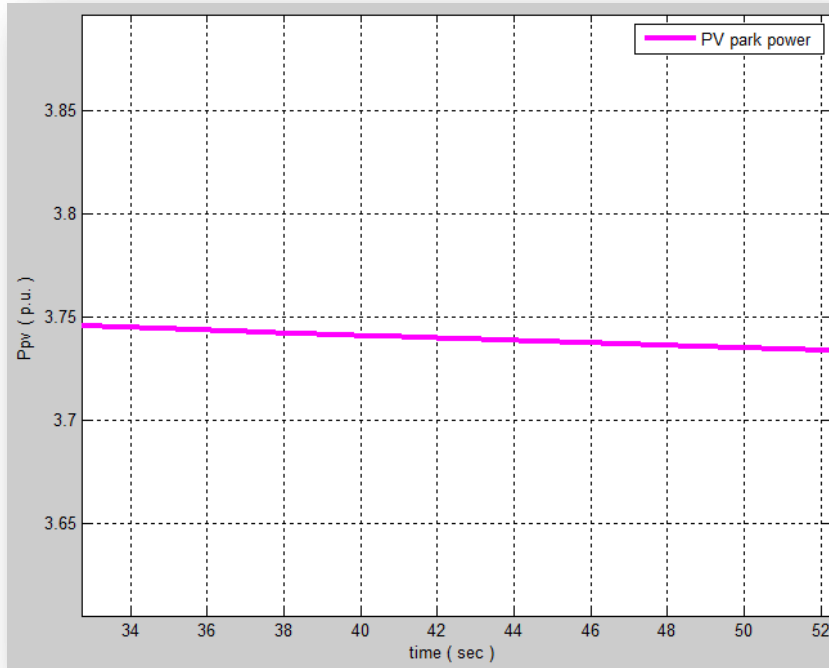
Εικόνα 9.44: Ισχύς εξόδου γεννήτριας diesel μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση



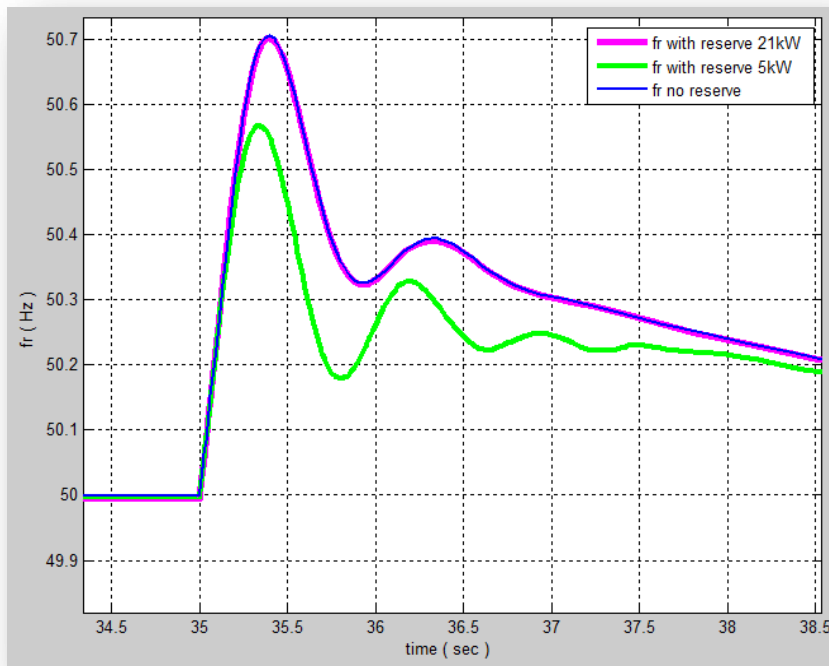
Εικόνα 9.45: Ισχύς γεννήτριας diesel μετά την δευτερεύουσα ρύθμιση



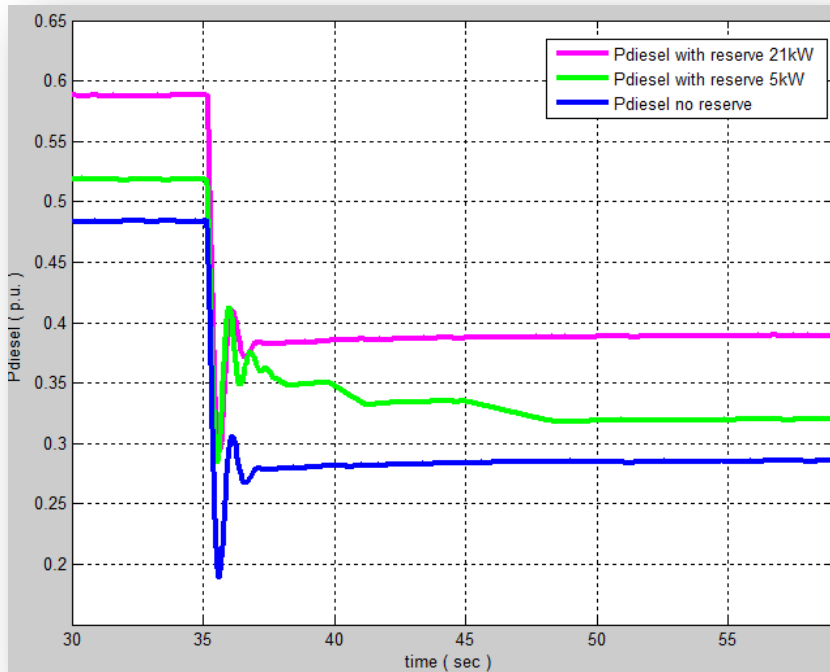
Εικόνα 9.46: Ισχύς φωτοβολταϊκού πάρκου μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση



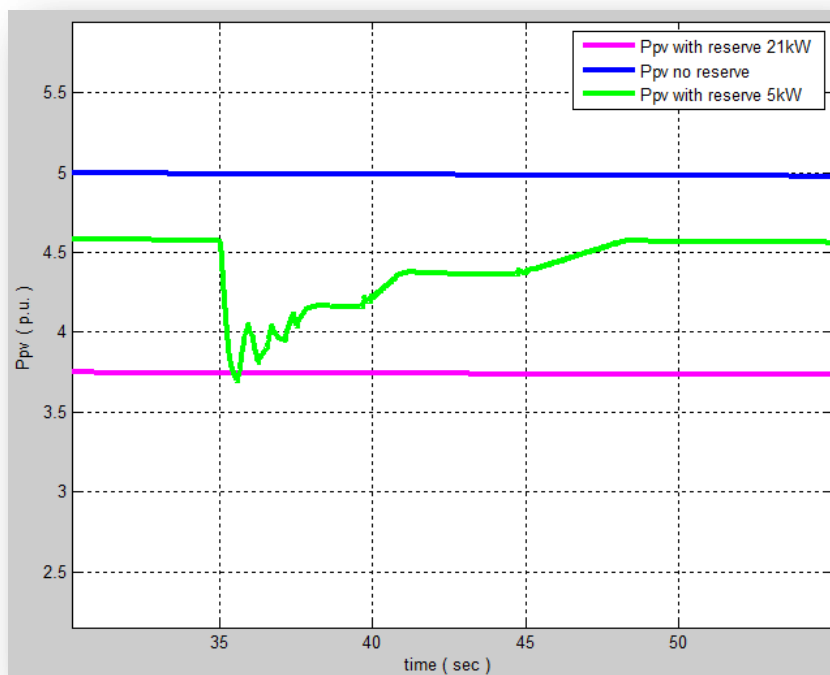
Εικόνα 9.47: Ισχύς φωτοβολταϊκού πάρκου μετά τη δευτερεύουσα ρύθμιση



Εικόνα 9.48: Σύγκριση μεταβολής συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας



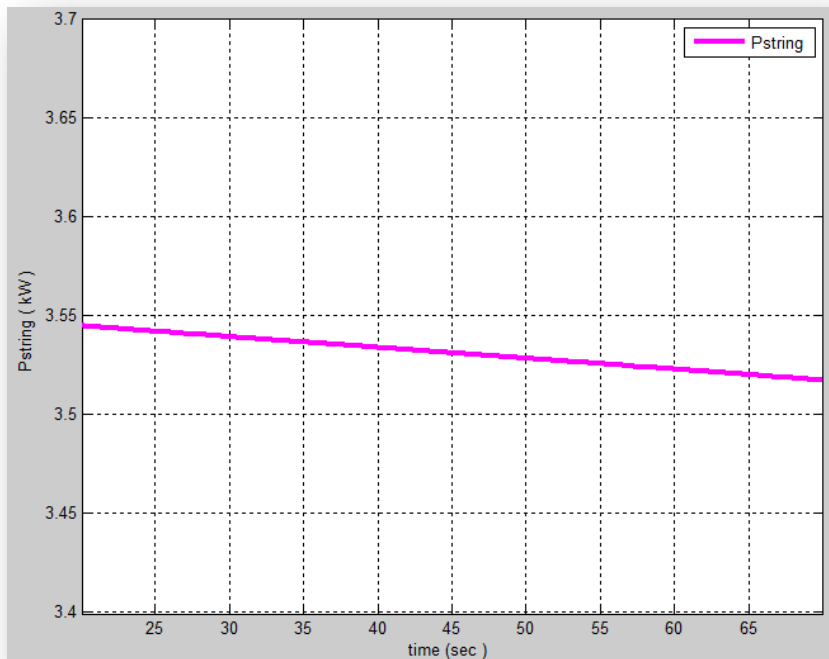
Εικόνα 9.49: Σύγκριση ισχύος εξόδου νηξελογεννήτριας με και χωρίς τη συμμετοχή του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διάφορες τιμές εφεδρείας



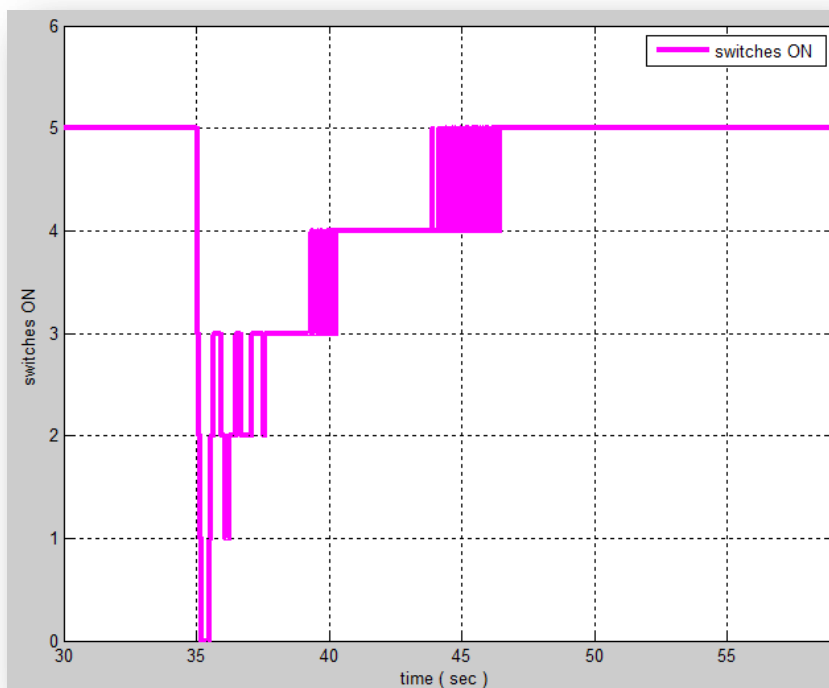
Εικόνα 9.50: Σύγκριση ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου με και χωρίς την συμμετοχή του στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας



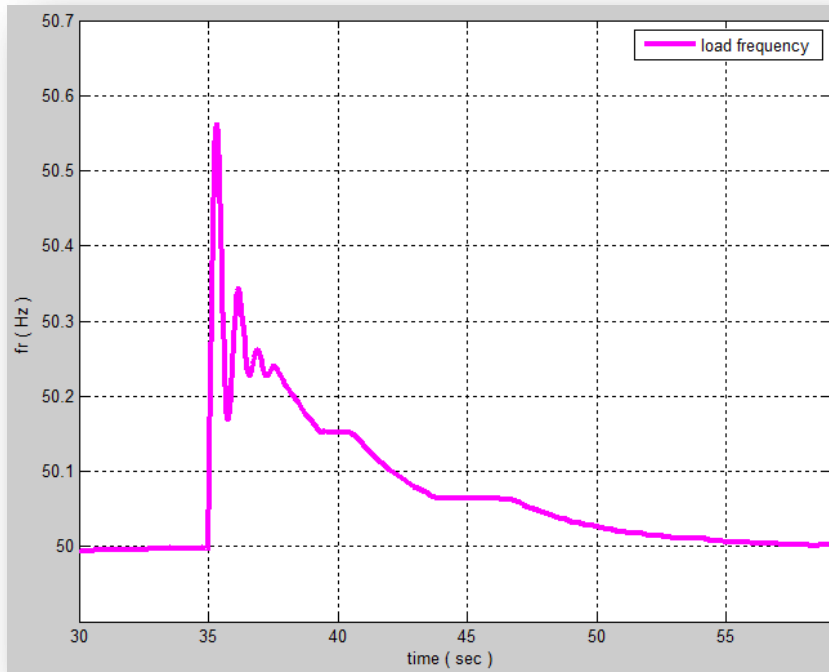
c) Τήρηση εφεδρείας 1 kW:



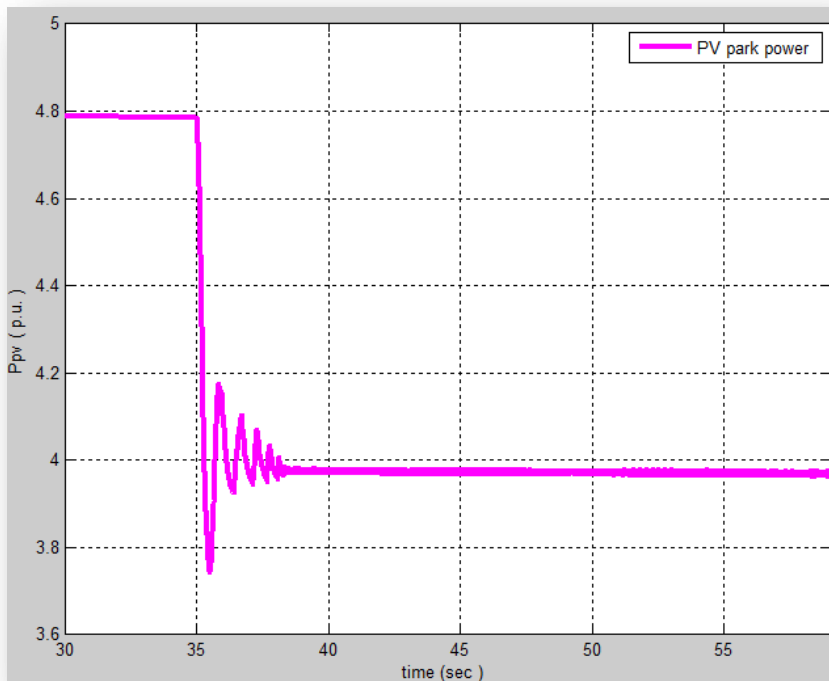
Εικόνα 9.51: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας



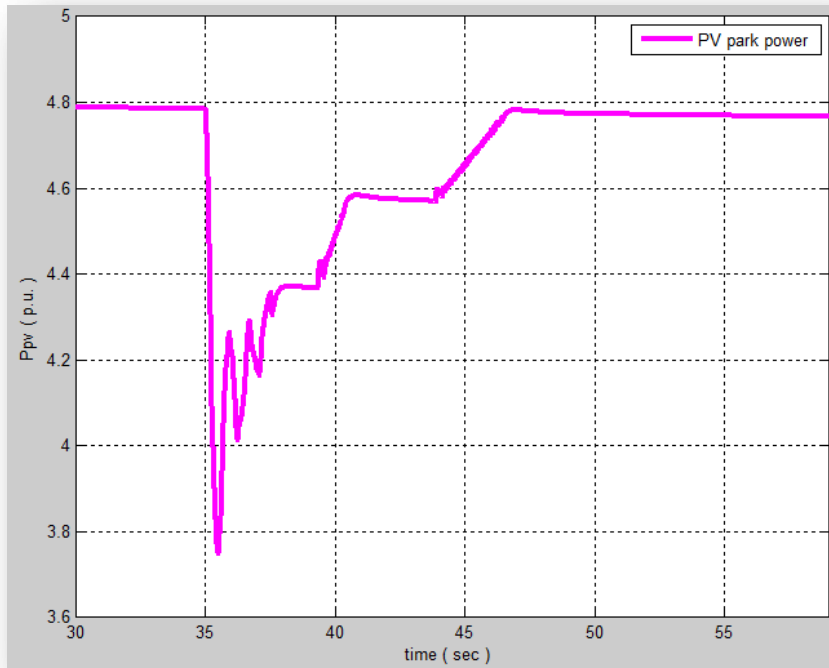
Εικόνα 9.52: Κατάσταση διακοπών



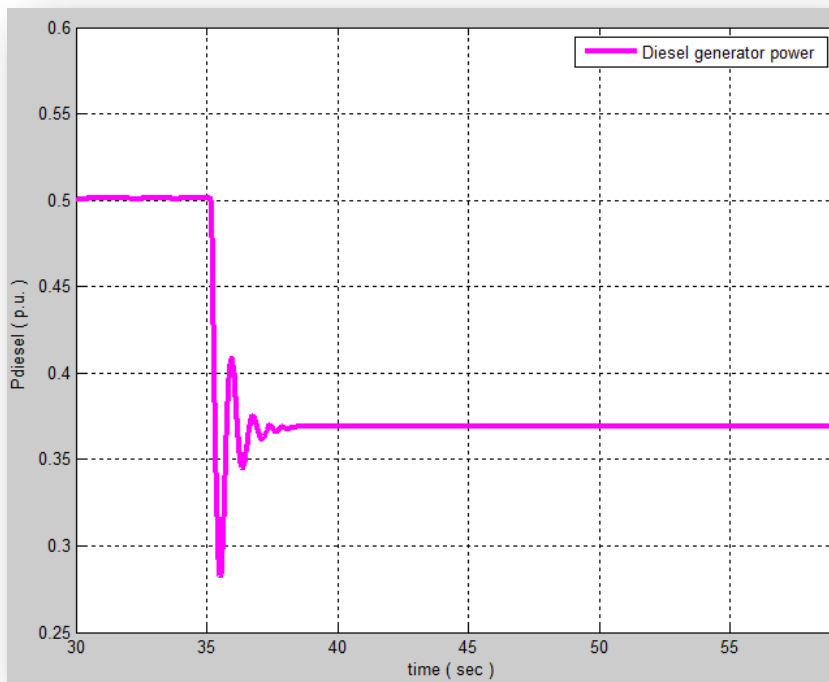
Εικόνα 9.53: Συχνότητα δικτύου



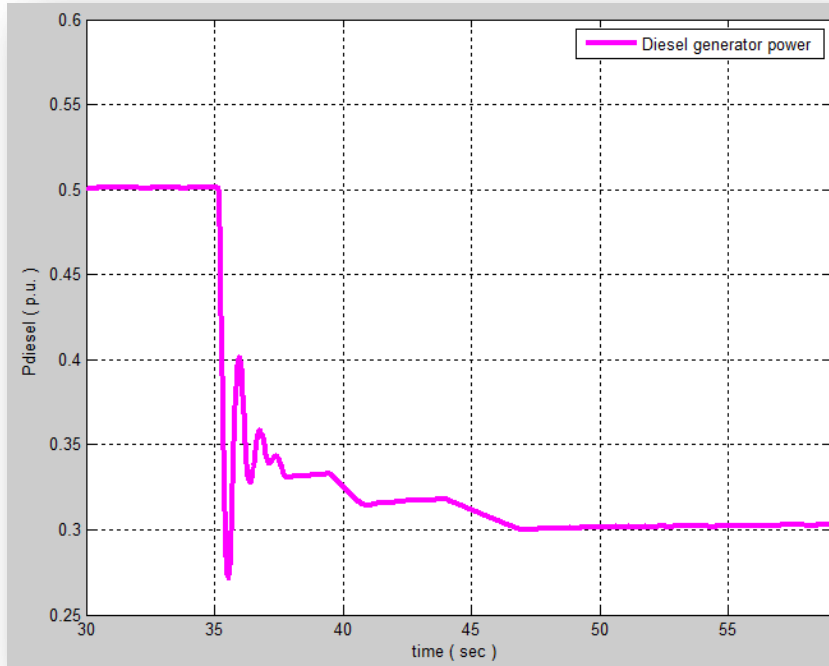
Εικόνα 9.54: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση



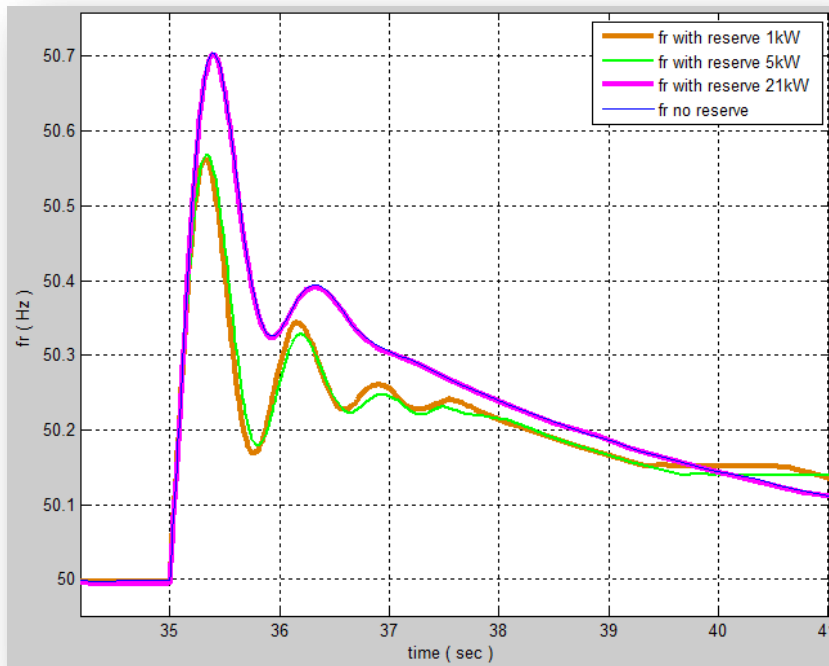
Εικόνα 9.55: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου μετά τη δευτερεύουσα ρύθμιση



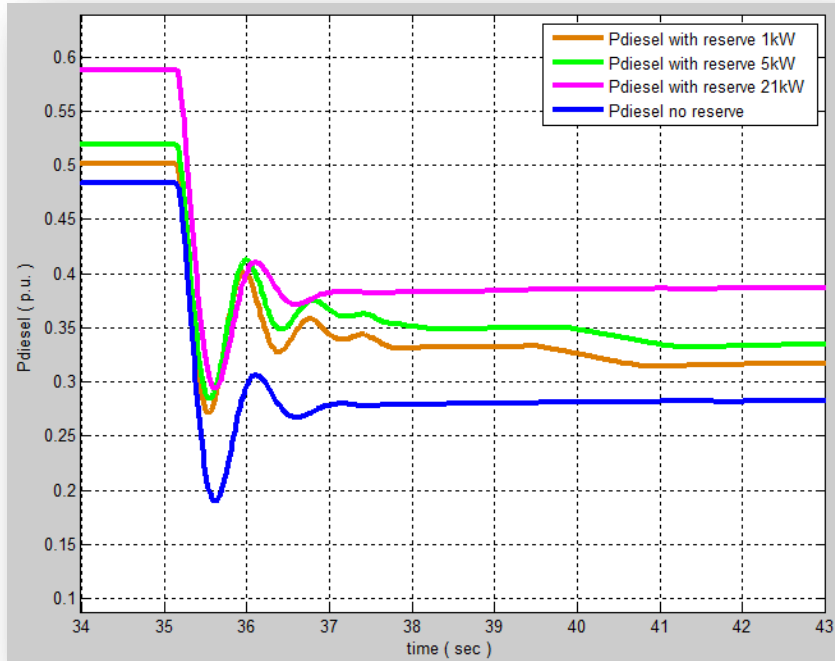
Εικόνα 9.56: Ισχύς εξόδου νηξελογεννήτριας μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση



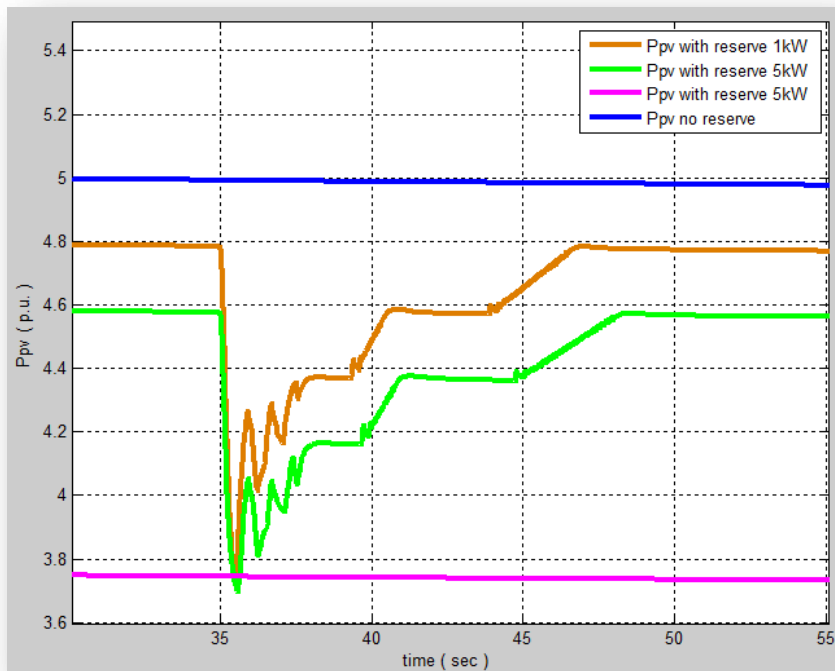
Εικόνα 9.57: Ισχύς εξόδου νηξελογεννήτριας μετά την δευτερεύουσα ρύθμιση



Εικόνα 9.58: Σύγκριση μεταβολής συχνότητας για συμμετοχή και μη του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διάφορες τιμές εφεδρείας



Εικόνα 9.59: Σύγκριση ισχύος εξόδου νηζελογεννήτριας με και χωρίς τη συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διαφορετικές τιμές εφεδρείας



Εικόνα 9.60: Σύγκριση ισχύος εξόδου πάρκου με και χωρίς τη συμμετοχή του στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και για διάφορες τιμές εφεδρείας

## 9.2.2 Συμπεράσματα

Στην περίπτωση αυτή ελέγχουμε την απόκριση του συστήματος για διαφορετικές τιμές εφεδρείας όπως έγινε και στο προηγούμενο σενάριο. Με βάση τα συγκριτικά διαγράμματα των **Εικόνων 9.58, 9.59, 9.60** προκύπτει ο παρακάτω πίνακας αποτελεσμάτων:

Φωτοβολταϊκό πάρκο στη ΡΦΣ	Μεταβολή ισχύος φωτοβολταϊκού πάρκου	Μεταβολή ισχύος γεννήτριας diesel	Μεταβολή συχνότητας
Συμμετοχή με εφεδρεία 1 kW	0,0661 α.μ.	0,1339 α.μ.	0,5632 Hz
Συμμετοχή με εφεδρεία 21 kW	0 α.μ.	0,2 α.μ.	0,702 Hz
Συμμετοχή με εφεδρεία 5 kW	0,0689 α.μ.	0,1306 α.μ.	0,5702 Hz
Απουσία	0	0,2 α.μ.	0,7115 Hz

Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι για την περίπτωση μείωσης του φορτίου και επομένως αύξησης της συχνότητας του δικτύου, η καλύτερη συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας επιτυγχάνεται για τη μικρότερη δυνατή τιμή εφεδρείας (1 kW). Όσο μεγαλώνει η εφεδρεία τόσο λιγότερη δυνατότητα μεταβολής της ισχύος του έχει το φωτοβολταϊκό πάρκο, γεγονός απόλυτα λογικό αφού έχει λιγότερες συστοιχίες διαθέσιμες να ενεργοποιηθεί ώστε να αυξήσει την ισχύ του αρκετά για να αποκατασταθεί το σφάλμα συχνότητας.

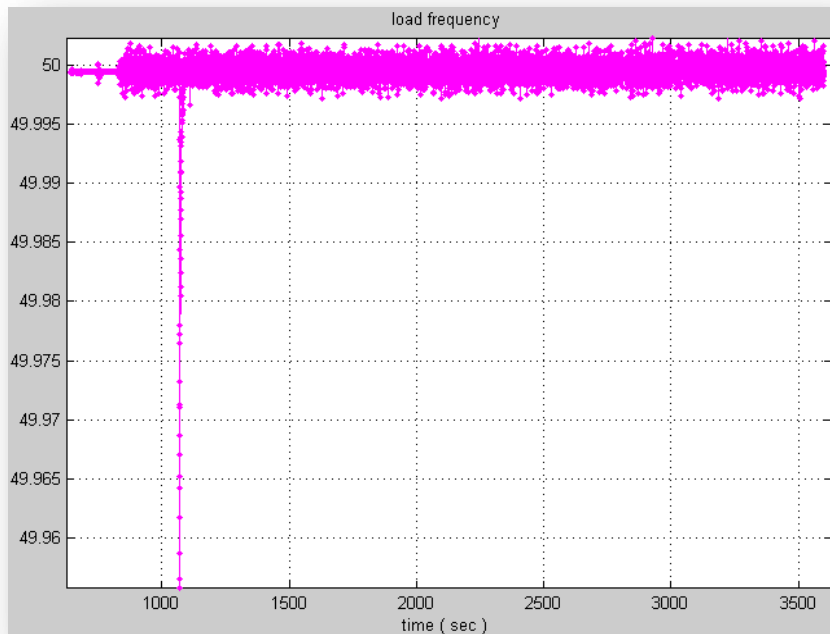
## 9.3 Σενάριο 3<sup>ο</sup>

### 9.3.1 Προσομοιώσεις

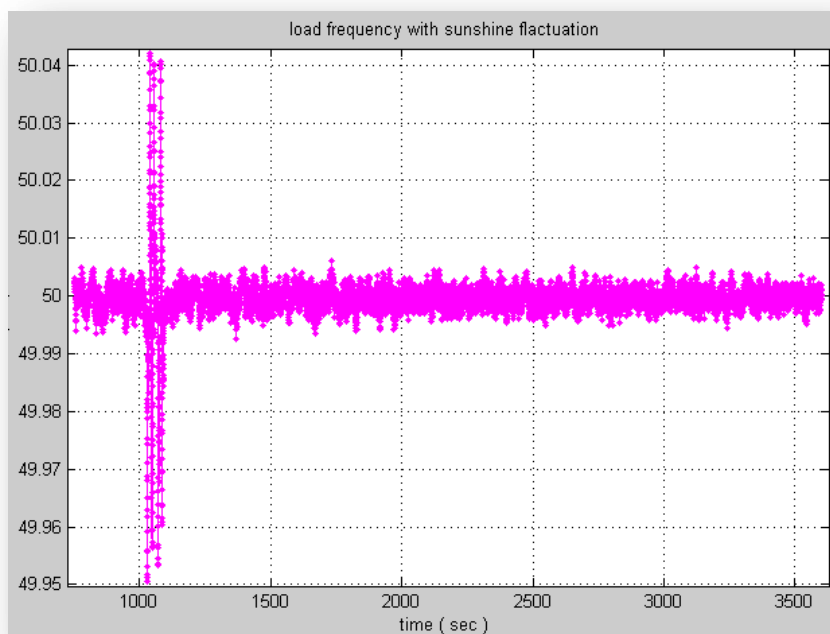
Ισχύουν τα ακόλουθα:

- ❖ Το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας με εφεδρεία 6 kW.

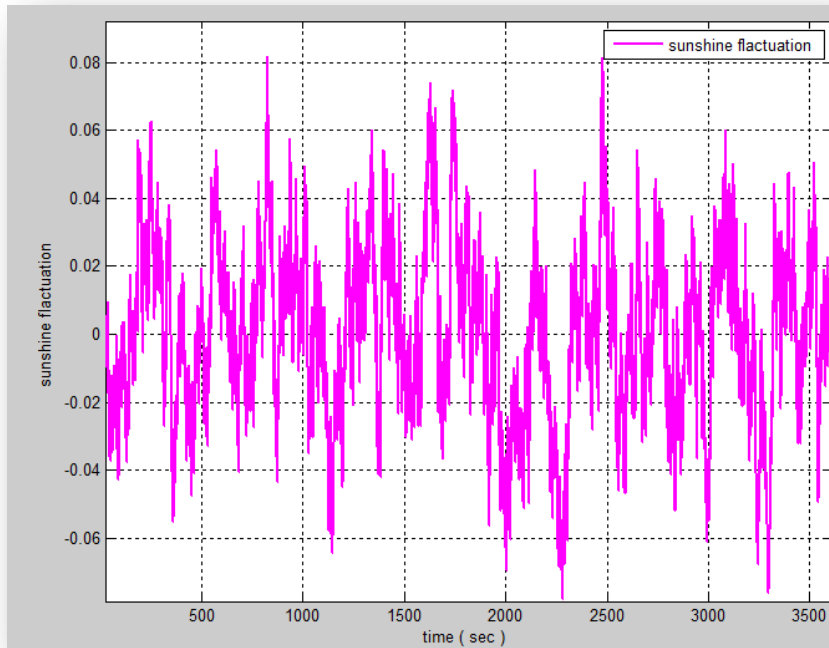
- ❖ Λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας της διακύμανσης της ηλιοφάνειας.



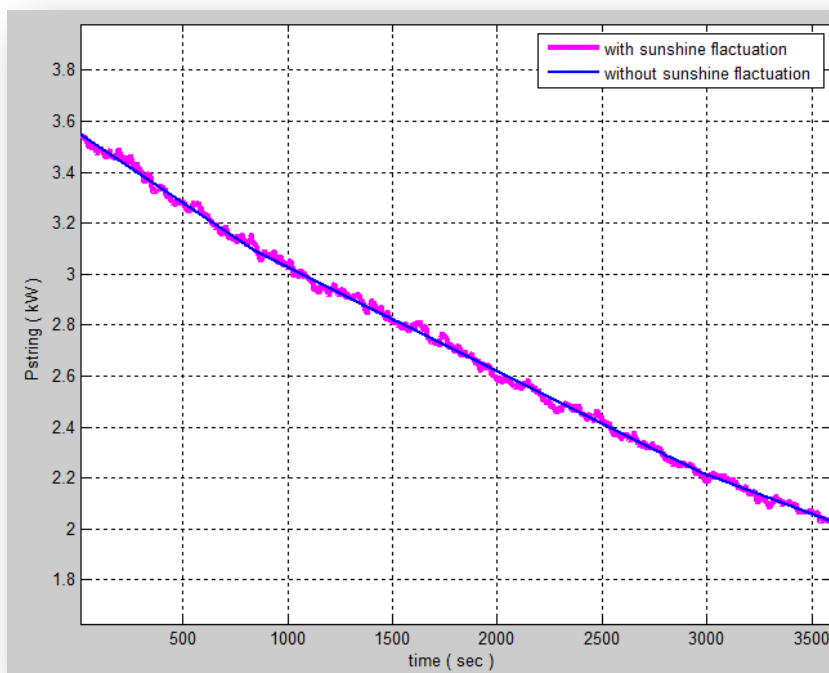
**Εικόνα 9.61:** Συχνότητα δικτύου χωρίς διακύμανση της ηλιοφάνειας



**Εικόνα 9.62:** Συχνότητα δικτύου με διακύμανση ηλιοφάνειας

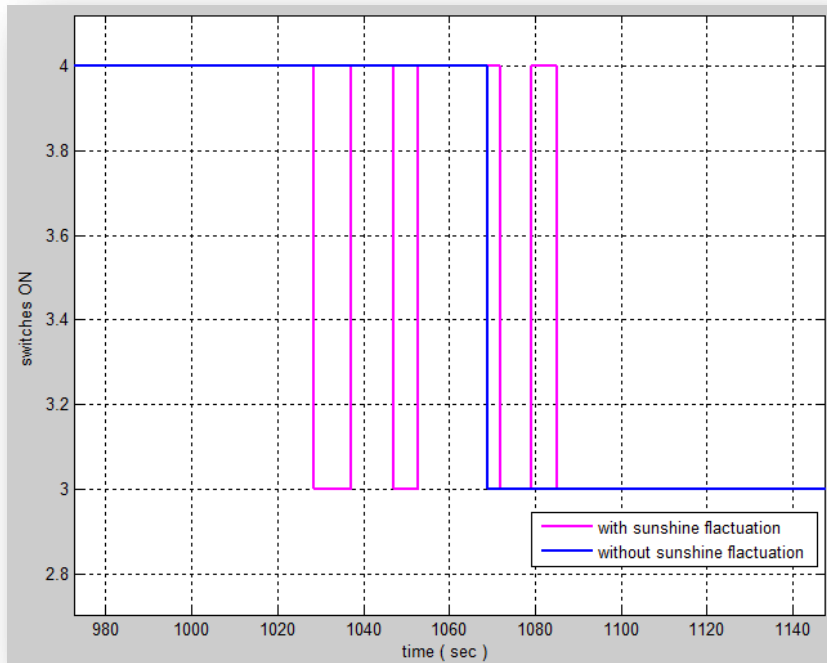


**Εικόνα 9.63: Διακόμανση ηλιοφάνειας**



**Εικόνα 9.64: Ισχύς φωτοβολταϊκών συστοιχιών**





Εικόνα 9.65: Συστοιχίες συνδεδεμένες στο δίκτυο

### 9.3.2 Συμπεράσματα

Στο σενάριο αυτό εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο η διακύμανση της ηλιοφάνειας επηρεάζει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάρκου, όταν αυτό συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας με τήρηση εφεδρείας.

Στις **Εικόνες 9.61, 9.62** παρατηρούμε τη μορφή της συχνότητας του δικτύου με και χωρίς τη διακύμανση της ηλιοφάνειας και συμπεραίνουμε ότι η συχνότητα υφίσταται εντονότερες μεταβολές γύρω από την ονομαστική της τιμή όταν η ακτινοβολία αυξομειώνεται. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η τιμή της συχνότητας επηρεάζεται από την τιμή της ισχύος εξόδου του συστήματος, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται άμεσα από τα επίπεδα ακτινοβολίας εφόσον αυτά καθορίζουν την ισχύ που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά.

Στην **Εικόνα 9.63** δίνεται η γραφική απεικόνιση των μεταβολών που υφίσταται η ηλιοφάνεια και στην **Εικόνα 9.64** παρουσιάζεται η επιρροή της διακύμανσης της ηλιοφάνειας στην ισχύ εξόδου των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Από την εικόνα αυτή συμπεραίνουμε ότι ενώ η τελική τιμή ισχύος εξόδου των συστοιχιών είναι σχεδόν ίδια και στις δύο περιπτώσεις (αφού η πτώση ισχύος οφείλεται κυρίως στο πέρασμα του

χρόνου και στη δύση του ήλιου), στην περίπτωση που η ακτινοβολία μεταβάλλεται η πτώση ισχύος των συστοιχιών δεν είναι σταθερή άλλα αυξομειώνεται συνεχώς. Το αποτέλεσμα αυτών των αυξομειώσεων μεταφράζεται σαν μία ταλάντωση στην κατάσταση των διακοπών μεταξύ 4 και 3 κλειστών, η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 9.65**. Πιο αναλυτικά, στην αρχή της προσομοίωσης όπου η ισχύς των strings είναι περίπου 3,5 kW απαιτείται η αποκοπή δύο συστοιχιών για την τήρηση εφεδρείας 6 kW. Ύστερα από μία ώρα προσομοίωσης η ισχύς των φωτοβολταϊκών συστοιχιών έχει μειωθεί στα 2 kW περίπου με αποτέλεσμα να χρειάζεται η αποκοπή μίας παραπάνω συστοιχίας για την τήρηση της ίδιας τιμής εφεδρείας. Στην περίπτωση σταθερής ηλιοφάνειας η μετάβαση από τα 4 στα 3 συνδεδεμένα strings γίνεται άμεσα και απευθείας. Αντίθετα, όταν υπάρχει διακύμανση της ηλιοφάνειας το σύστημα ταλαντώνεται για αρκετή ώρα μεταξύ των δύο τιμών μέχρι να καταλήξει στην οριστική αποκοπή μίας παραπάνω συστοιχίας. Αυτό είναι λογικό αν σκεφτούμε ότι όταν η ισχύς εξόδου των συστοιχιών είναι 3 kW τα δύο strings αρκούν για να τηρείται η εφεδρεία. Αν όμως συμβεί μια απότομη σκίαση ελάχιστης χρονικής διάρκειας που οδηγήσει την ισχύ στα 2,99 kW πρέπει να ανοίξει άλλος ένας διακόπτης ώστε να τηρούνται 6 kW εφεδρείας. Μόλις η σκίαση «περάσει» και η ισχύς επανέλθει στα 3 kW ο διακόπτης που είχε ανοίξει ξανακλείνει και επιστρέφουμε στα 2 strings αποσυνδεδεμένα. Η απότομη και γρήγορη αυτή μεταβολή της ηλιοφάνειας η οποία προκαλεί μία ελάχιστη μεταβολή στην ισχύ των strings έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της κατάστασης των διακοπών και προκαλεί ταλαντώσεις όπως αυτές της γραφικής παράστασης **9.65**.

Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι η ηλιοφάνεια είναι πολύ βασικός παράγοντας όσο αφορά την λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάρκου και τον τρόπο συμμετοχής του στην ρύθμιση φορτίου – συχνότητας. Καθώς η τιμή της μεταβάλλεται, μεταβάλλονται και οι ανάγκες και δυνατότητες των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Ωστόσο οι διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και οι συνέπειες της δεν επηρεάζουν τον αλγόριθμο που καθορίζει τη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, αφού έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίζει τέτοιες καταστάσεις επαναπροσδιορίζοντας τον αριθμό των συστοιχιών που πρέπει να αποσυνδεθούν από το δίκτυο και μεταβάλλοντας την κατάσταση των διακοπών του φωτοβολταϊκού πάρκου.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10**

## **Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα σύστημα όπου το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου συχνότητας, μέσω αποφόρτισης του αντιστροφέα ο οποίος συνδέει τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες με το δίκτυο. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ένα σύστημα αποτελούμενο από μία σύγχρονη γεννήτρια diesel, φορτίο και ένα φωτοβολταϊκό πάρκο έξι αντιστροφέων, τεσσάρων φωτοβολταϊκών συστοιχιών ο καθένας, στον κάθε ένα από τους οποίους υπάρχει μία συστοιχία που συνδέεται σ' αυτόν μέσω διακόπτη. Οι έξι, συνολικά, διακόπτες των συστοιχιών δίνουν στο φωτοβολταϊκό πάρκο τη δυνατότητα να συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, αποσυνδέοντας ή συνδέοντας τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες με το δίκτυο.

Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικά σενάρια συνθηκών εποχής, ηλιοφάνειας, φορτίου, εφεδρείας και ρύθμισης συχνότητας. Οι προσομοιώσεις επιβεβαίωσαν το στόχο ανάπτυξης της εργασίας, αναδεικνύοντας βελτιωμένη ρύθμιση φορτίου –

συχνότητας από τη συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου, σε σχέση με την ισχύουσα ρύθμιση φορτίου – συχνότητας η οποία πραγματοποιείται από τις συμβατικές μονάδες.

Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι όταν το φωτοβολταϊκό πάρκο συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, τα αποτελέσματα είναι καλύτερα απ' ό,τι όταν η ρύθμιση φορτίου – συχνότητας αναλαμβάνεται αποκλειστικά από την γεννήτρια ντίζελ. Συγκεκριμένα παρατηρούμε μικρότερη βύθιση ή ανύψωση της συχνότητας (ανάλογα με τη μεταβολή του φορτίου) όταν το πάρκο συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, ενώ το μέγεθος της συμμετοχής του πάρκου εξαρτάται από την τιμή της εφεδρείας που τηρείται κάθε φορά. Όταν λοιπόν, ανάλογα με την εκάστοτε μεταβολή του φορτίου, τηρείται η ιδανική ποσότητα ισχύος ως εφεδρεία, τα αποτελέσματα της ρύθμισης συχνότητας βελτιώνονται ακόμα περισσότερο.

Ωστόσο προκειμένου να προκύψουν ακριβέστερα αποτελέσματα υπάρχουν σημεία της μελέτης τα οποία επιδέχονται περαιτέρω έρευνα. Αρχικά, προτείνεται διεξοδικότερη μελέτη στο ζήτημα της ιδανικής τιμής εφεδρείας, η οποία θα εξυπηρετεί την βέλτιστη συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας, ώστε να βρεθεί η τιμή εκείνη η οποία θα αντιμετωπίζει εξίσου αποτελεσματικά τόσο την αύξηση όσο και την μείωση του φορτίου. Επιπλέον, συνίσταται να μελετηθεί η απόκριση της μεθόδου σε σύστημα με περισσότερα και πιο σύνθετα μοντέλα, γραμμές μεταφοράς και φορτία. Τέλος, επιβάλλεται η διεξαγωγή μιας οικονομικής μελέτης η οποία θα δικαιολογεί την πρόταση της εν λόγω μεθόδου και θα επιβεβαιώνει την υπεροχή της σε σύγκριση με τη χρήση αποθηκευτικών διατάξεων στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11**

## ***Μελέτη αντιστροφών του εμπορίου προς υποστήριξη της προτεινόμενης μεθόδου***

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εμπορικής αναζήτησης, η οποία πραγματοποιήθηκε για εύρεση αντιστροφών που μπορούν να υποστηρίξουν την προτεινόμενη εφαρμογή.

Θεωρώντας ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελα πληρούν το πρότυπο IEC 61215, αναζητήθηκε το μικρότερο μοντέλο, από άποψη ισχύος, από κάθε εταιρία και ελέγχθηκε κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εν λόγω εφαρμογή. Ο βασικότερος στόχος είναι οι αντιστροφείς που θα χρησιμοποιηθούν να μπορούν να δεχθούν περισσότερες από μία συστοιχίες (ο καθένας) έτσι ώστε να παρέχουν την δυνατότητα συμμετοχής του πάρκου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας και να μην υπάρχει ο κίνδυνος απενεργοποίησής τους σε περίπτωση που επιταχθεί από τον αλγόριθμο ελέγχου η αποσύνδεση της συστοιχίας τους από το δίκτυο. Στη συνέχεια, για τους αντιστροφείς που τηρούν την παραπάνω προϋπόθεση, υπολογίστηκαν οι τιμές της μέγιστης και της ελάχιστης εφεδρείας που μπορούν να τηρήσουν, χωρίς κίνδυνο απενεργοποίησής τους ή μετάβασής τους σε κατάσταση αναμονής.

Τα αποτελέσματα της αναζήτησης δίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Όπου υπάρχει η ένδειξη «Αδύνατο» υπονοείται ότι ο συγκεκριμένος αντιστροφέας μπορεί να δεχτεί μόνο μία φωτοβολταϊκή συστοιχία.

<b>ΕΤΑΙΡΙΑ</b>	<b>ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΦΕΔΡΕΙΑ (reserve min, W)</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΦΕΔΡΕΙΑ (reserve max, W)</b>
<b>Power – one</b>	Αδύνατο	Αδύνατο
<b>Danfoss</b>	Αδύνατο	Αδύνατο
<b>Siemens</b>	30	60
<b>Fronius</b>	Αδύνατο	Αδύνατο
<b>Conergy</b>	Αδύνατο	Αδύνατο
<b>EATON</b>	3.5	7
<b>SAJ</b>	Αδύνατο	Αδύνατο
<b>ABB</b>	6	12
<b>GOOBWE</b>	Αδύνατο	Αδύνατο

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12**

## **Βιβλιογραφία**

- [1] Ηνωμένα Έθνη, «Πρωτόκολλο του Κιότο στα πλαίσια της Συνδιάσκεψης των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές αλλαγές», Συνδιάσκεψη Ηνωμένων Εθνών, Δεκέμβριος 1997
- [2] Φραγκιαδάκης Ι.Ε., Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- [3] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W., (1992), Powers Electronics Converters Applications and Design, Second Edition John Wiley and Sons Inc.
- [4] “Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems”, A.Dolara, R.Faranda, S.Lava, published online, September 2009, [www.SciRP.org/journal/jemaa](http://www.SciRP.org/journal/jemaa)
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Maximum\\_power\\_point\\_tracking](http://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking)
- [6] “The control of isolated power systems with wind generation”, Cristian Cristea, IEEE Student Member, João Peças Lopes, IEEE Senior Member, Mircea Eremia, IEEE Senior Member, Lucian Toma, IEEE Student Member
- [7] “The control and modeling of Diesel Generator set in electric propulsion ship”, Le Luo, Lan Gao and Hefe Fu, I.J. Information Technology and Computer Science, 2011
- [8] “Validation of nuclear plant auxiliary power supply by test”, L.N.Hannett, F.P.de Mello, G.H. Tylinski, W.H. Becker, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9 September 1982

[9] “Modeling of emergency diesel generators in an 800 Megawatt nuclear power plant”, K.E. Yeager, J.R. Willis, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 3, September 1993

[10] «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας», Κ. Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2011

[11] “Integrated Control Technique for Compliance of Solar Photovoltaic Installation Grid Codes”, Miguel Garcia – Gracia, Nabil El Halabi, Hassan Ajami and Maria Paz Comech, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, No .3, September 2012

[12] “A Coordinated Control Method for leveling PV Output Fluctuations of PV – Diesel Hybrid Systems Connected to Isolated Power Utility”, Manoj Datta, Tomonobu Senjyu, Atsushi Yona, Toshihisa Funabashi and Chul – Hwan Kim, IEEE Transactions on Energy Conversions, Vol. 24, No. 1, March 2009

[13] “Power Modulation of Photovoltaic Generator for Frequency Control of Power System”, Naoto Kakimoto, Satoshi Takayama, Hiroyuki Satoh and Kouichi Nakamura, IEEE Transactions on Energy Conversions, Vol. 24, No. 4, December 2009

[14] “A Frequency – Control Approach by Photovoltaic Generator in a PV – Diesel Hybrid Power System”, Manoj Datta, Tomonobu Senjyu, Atsushi Yona, Toshihisa Funabashi and Chul – Hwan Kim, IEEE Transactions on Energy Conversions, Vol. 26, No. 2, June 2011

[15] «ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – STORIES PROJECT»  
[http://www.storiesproject.eu/docs/energystorage\\_greek.pdf](http://www.storiesproject.eu/docs/energystorage_greek.pdf)

[16] «ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ (ΥΗΣ) ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΣΗΕ ΚΡΗΤΗΣ», Πτυχιακή εργασία, Χριστοφορίδη Ευγενία