



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

**Αντιμετώπιση φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διείδυσης  
φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κορλός Κ. Θεοφάνης**

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

Αθήνα, Νοέμβριος 2012





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

## Αντιμετώπιση φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διείδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κορλός Κ. Θεοφάνης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

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

.....  
Πάυλος Γεωργιάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2012

.....  
Κορλός Κ. Θεοφάνης

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

Copyright © Κορλός Κ. Θεοφάνης, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το φαινόμενο της ανύψωσης τάσης λόγω της σύνδεσης φωτοβολταϊκών μονάδων παραγωγής στη Χαμηλή Τάση, και μελετώνται τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου αυτού. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιείται η μοντελοποίηση και η μελέτη δύο δικτύων αγροτικής περιοχής Χαμηλής Τάσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά γραμμών, και εκτελούνται προσομοιώσεις για διάφορα σενάρια φωτοβολταϊκής παραγωγής και οικιακών φορτίων.

Αρχικά, αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των Φ/Β διατάξεων, και εξηγούνται συνοπτικά οι επιδράσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών στη λειτουργία τους. Στη συνέχεια γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια του μικροδικτύου, και περιγράφονται οι συσκευές του μικροδικτύου στο εργαστήριο ΣΗΕ.

Εξετάζονται οι επιπτώσεις της σύνδεσης φωτοβολταϊκών στη ΧΤ, και αναφέρονται οι προδιαγραφές της ΔΕΗ για την επίτευξη της σύνδεσης. Παρουσιάζονται τρόποι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης, και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο περικοπής ενεργού ισχύος (power curtailment), καθώς και στη μέθοδο ελέγχου της αέργου ισχύος (power factor control). Μελετάται η θεωρία της ροής φορτίου, καθώς και της ανάλυσης ευαισθησίας τάσης ως προς την ενεργό και άεργο ισχύ στους κόμβους του δικτύου. Εν συνεχεία, περιγράφεται ο εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS), που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, αρχικά γίνεται μελέτη των δύο δικτύων με ανάλυση ροής φορτίου στο Matlab. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός τους στο γραφικό περιβάλλον Simulink του Matlab, και λαμβάνονται αποτελέσματα για το επίπεδο της τάσης στους κόμβους για διάφορα σενάρια παραγωγής-κατανάλωσης. Επίσης, εφαρμόζονται οι δύο αναφερθέντες τρόποι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης, είτε μεμονωμένα, είτε σε συνεργασία μεταξύ τους. Μελετάται η απόκριση των ελεγκτών τάσης που σχεδιάστηκαν σε μεταβατικές περιόδους. Πραγματοποιείται η μοντελοποίηση ενός Φ/Β πλαισίου και μιας διάταξης MPPT, και κατασκευάζεται μια συστοιχία συνδέοντας κατάλληλα τα παραπάνω πλαίσια. Χρησιμοποιώντας χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, υπολογίζεται η παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία στη διάρκεια μιας ημέρας. Γίνεται εισαγωγή της χρονοσειράς παραγωγής, καθώς και μιας χρονοσειράς οικιακού φορτίου στο δεύτερο δίκτυο ΧΤ, και καταγράφεται το προφίλ της τάσης και της ενεργού και αέργου ισχύος στους κόμβους, για διάφορα σενάρια χρήσης των ελεγκτών.

Τέλος, πραγματοποιείται η μοντελοποίηση ενός δικτύου ΧΤ, καθώς και των ελεγκτών για τη ρύθμιση της τάσης στο RTDS. Εκτελούνται προσομοιώσεις για την καταγραφή της τάσης και της ενεργού και αέργου ισχύος, και πραγματοποιείται σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στο Simulink.

**Λέξεις κλειδιά:** φωτοβολταϊκά συστήματα, μικροδίκτυο, RTDS, ανύψωση τάσης λόγω φωτοβολταϊκών, μοντελοποίηση Φ/Β, MPPT, ανάλυση ροής φορτίου, ανάλυση ευαισθησίας τάσης, περικοπή ενεργού ισχύος, μέθοδος ελέγχου άεργου ισχύος, χρονοσειρές

## Abstract

This diploma thesis examines the voltage rise phenomenon caused by the penetration of distributed photovoltaic generators to low voltage networks, and studies various methods to confront it. In this framework, we model and study two rural Low Voltage networks, with different line features, and we execute simulations for different scenarios of PV production and consumer load profiles.

Initially, the basic characteristics of photovoltaic systems are mentioned, and the impacts of environmental conditions on their operation are briefly explained. We are introduced to the concept of microgrids, and the devices of the laboratory microgrid are described.

We examine the impacts of PV connection to LV networks, and the specifications for this connection are mentioned. We present methods to mitigate voltage rise, and we emphasize on the active power curtailment method (apc), as well as the power factor control method (pfc). Power flow analysis, and first order voltage sensitivity analysis are discussed. Subsequently, we describe the real-time digital simulator (RTDS), which will be used to conduct experiments.

Regarding the experimental part of this thesis, at first we study the aforementioned networks using the load flow analysis code in Matlab. Additionally, we design them in Simulink, and we present the results of the voltage levels at the connection nodes, by implementing various production-consumption scenarios. We implement apc, or pfc, or both methods in order to reduce voltage rise. The response of the network voltage and the designed controllers is observed at transient states. A PV module and an MPPT algorithm are modeled, while a PV array is constructed by connecting the above modules. We calculate the PV array power production during a day, using insolation and module temperature time series. A consumer load profile time series is selected, and both load and production time series are inserted in the second LV network. Both voltage levels and active and reactive power profiles at nodes are recorded.

Finally, an LV network and both controllers are modeled for simulations in RTDS. Once more, voltage and active and reactive power profiles are recorded, while the results are compared to the ones resulting from Simulink simulations for the same network.

**Key words:** photovoltaic systems, microgrid, RTDS, voltage rise due to photovoltaic connection, PV modeling, MPPT, load flow analysis, voltage sensitivity analysis, active power curtailment, power factor control, time series



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο για τις υποδείξεις και την καθοδήγησή του, καθώς και για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ανέστη Αναστασιάδη, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να λύσει τις απορίες μου κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής, και για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Βασίλειο Κλεφτάκη, διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., για την καταλυτική του βοήθεια στο εργαστηριακό κομμάτι της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της οικογένειάς μου για την πολύπλευρη υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

## Περιεχόμενα

<b>1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Ιστορική αναδρομή της τεχνολογίας των Φ/Β .....	15
1.3 Λειτουργία φωτοβολταϊκών .....	17
1.3.1 Δομικά στοιχεία φωτοβολταϊκής γεννήτριας .....	17
1.3.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	19
1.3.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β στοιχείου.....	20
1.3.4 Επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών στη λειτουργία των Φ/Β .....	22
<b>2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ</b> .....	24
2.1 Διεσπαρμένη παραγωγή και μικροδίκτυα .....	24
2.2 Εργαστηριακό μικροδίκτυο της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.....	25
2.3 Φωτοβολταϊκά εργαστηριακού μικροδικτύου.....	26
2.3.1 Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες.....	26
2.3.2 Αντιστροφέας φωτοβολταϊκής γεννήτριας.....	30
2.3.3 Ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος - Maximum Power Point Tracker (MPPT) .....	32
2.4 Ανεμογεννήτρια εργαστηριακού μικροδικτύου .....	34
2.4.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά .....	34
2.4.2 Αντιστροφέας ανεμογεννήτριας .....	36
2.5 Συσσωρευτές εργαστηριακού μικροδικτύου.....	38
2.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	38
2.5.2 Αντιστροφέας συσσωρευτών.....	39
2.6 Άλλες διατάξεις του μικροδικτύου.....	43
<b>3. ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ</b> ....	44
3.1 Εισαγωγή στα δίκτυα διανομής.....	44
3.2 Δομή των δικτύων διανομής .....	45
3.2.1 Μέσα ζεύξεως και προστασίας.....	45
3.2.2 Εναέρια δίκτυα ΜΤ .....	46
3.2.3 Υπόγεια δίκτυα ΜΤ .....	47
3.2.4 Εναέρια δίκτυα ΧΤ .....	48
3.2.5 Υπόγεια δίκτυα ΧΤ.....	49
3.3 Συμβατικά μέσα ρύθμισης της τάσης.....	51
3.3.1 Ρυθμιστές τάσης υπό φορτίο .....	52
3.3.2 Πυκνωτές.....	53
3.3.3 Λήψεις των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ .....	54
3.3.4 Θέση εγκατάστασης των ρυθμιστών τάσης.....	55

<b>4. ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΗ ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ</b> .....	56
4.1 Εισαγωγή .....	56
4.2 Επιπτώσεις της σύνδεσης φωτοβολταϊκών στο δίκτυο .....	56
4.3 Σύνδεση Φ/Β παραγωγών στη ΧΤ - Προδιαγραφές ΔΕΗ.....	61
4.3.1 Προϋποθέσεις για τη σύνδεση .....	62
4.4 Διερεύνηση ανύψωσης τάσης σε κόμβο του δικτύου .....	64
4.5 Τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου ανύψωσης τάσης .....	67
4.5.1 STATCOM, SVC, DVR .....	67
4.5.2 Αναβάθμιση του δικτύου .....	69
4.5.3 Αποθήκευση περίσσειας ισχύος σε συσσωρευτές.....	69
4.5.4 Περικοπή ενεργού ισχύος - Active Power Curtailment.....	70
4.5.5 Δυνατότητα ρύθμισης αέργου ισχύος - Power Factor Control.....	71
4.5.5.1 Μέθοδοι εφαρμογής της ρύθμισης αέργου ισχύος .....	73
4.5.6 Συνεργασία Περικοπής ενεργού ισχύος και Ρύθμισης αέργου ισχύος.....	75
<b>5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΑΣΗΣ</b> .....	76
5.1 Μελέτη ροών φορτίου .....	76
5.2 Μεταβλητές συστήματος.....	77
5.3 Μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγών.....	78
5.4 Ταξινόμηση ζυγών .....	79
5.5 Εξισώσεις ροών φορτίου .....	80
5.6 Ψηφιακές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου .....	82
5.6.1 Η μέθοδος Newton-Raphson .....	83
5.6.2 Η μέθοδος Gauss-Seidel .....	85
5.6.3 Η ταχεία αποζευγμένη μέθοδος .....	85
5.7 Ανάλυση ευαισθησίας τάσης.....	87
<b>6. ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ (RTDS)</b> .....	90
6.1 Ο εξομοιωτής .....	90
6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του RTDS.....	91
6.3 Λογισμικό RSCAD .....	94
<b>7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b> .....	96
7.1 Εισαγωγή.....	96
7.2 Τοπολογία δικτύου με γραμμές με λόγο R/X=2 .....	96
7.2.1 Σενάρια κατανάλωσης - παραγωγής με ανάλυση ροής φορτίου .....	97
7.2.1.1 Ελάχιστη παραγωγή - Μέγιστο φορτίο .....	101
7.2.1.2 Ελάχιστη παραγωγή - Ελάχιστο φορτίο.....	102
7.2.1.3 Μέγιστη παραγωγή - Μέγιστο φορτίο .....	102
7.2.1.4 Μέγιστη παραγωγή - Ελάχιστο φορτίο.....	103
7.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας τάσης του δικτύου για το σενάριο μέγιστης παραγωγής-ελάχιστου φορτίου .....	105
7.2.3 Αντιμετώπιση της ανύψωσης τάσης .....	108

7.3 Τοπολογία και μελέτη δικτύου με γραμμές με λόγο $R/X=5$ .....	113
7.3.1 Αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης.....	115
7.4 Μελέτη σε μεταβατικές περιόδους.....	122
7.5 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκού συστήματος .....	125
7.6 Χρονοσειρές ζήτησης φορτίου και παραγωγής των Φ/Β .....	131
7.7 Απόκριση δικτύου ΧΤ με $R/X=5$ σε χρονοσειρές παραγωγής και ζήτησης.....	133
7.7.1 Συμπεριφορά ελεγκτή αέργου ισχύος .....	134
7.7.2 Συμπεριφορά ελεγκτή ενεργού ισχύος .....	138
7.8 Μοντελοποίηση δικτύου ΧΤ στο RTDS .....	140
7.8.1 Σχεδίαση ελεγκτών για τη ρύθμιση τάσης στο RSCAD .....	142
7.8.2 Εκτέλεση προσομοιώσεων για διάφορα σενάρια παραγωγής και χρήσης ελεγκτών.....	144
<b>8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ.....</b>	<b>153</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>155</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>158</b>

# Κεφάλαιο 1

## Φωτοβολταϊκά Συστήματα

### 1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο αντιληπτή η ανάγκη της μεγαλύτερης δυνατής αξιοποίησης των "Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας" (ΑΠΕ). Αυτό επιβάλλεται όχι μόνο από το πεπερασμένο των "συμβατικών" μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως είναι ο άνθρακας και το πετρέλαιο, αλλά και από την ανάγκη περιορισμού των δυσμενών επιπτώσεων από τη χρήση τους στο περιβάλλον. Οι ήπιες μορφές ενέργειας ή ΑΠΕ είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορους φυσικούς πόρους, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία και η κυκλοφορία του νερού. Ονομάζονται "ήπιες" λόγω δύο βασικών χαρακτηριστικών τους: καταρχάς, σε αντίθεση με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, δεν απαιτούν κάποια ενεργητική παρέμβαση, για παράδειγμα εξόρυξη, άντληση, καύση, αλλά απλώς εκμεταλλεύονται την ήδη υπάρχουσα ροή ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως συμβαίνει με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. [1]

Με τον όρο "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας" (ΑΠΕ), αναφερόμαστε κυρίως στις ακόλουθες μορφές ενέργειας :

- Την "Αιολική"
- Την "Ηλιακή"
- Τα "Μικρά Υδροηλεκτρικά"
- Τις "Κυψέλες καυσίμου"
- Την ενέργεια των "Θαλασσίων κυμάτων"
- Τη "Γεωθερμική"
- Την ενέργεια της "Βιομάζας". [3]

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων ΑΠΕ είναι πολλά : είναι φιλικά προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα ενώ σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, δε θα εξαντληθούν ποτέ. Μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας, αλλά και για μεταφορά αυτής σε μεγάλες αποστάσεις. Επιπροσθέτως, ο εξοπλισμός τους είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση, και έχει μεγάλο χρόνο ζωής. Βοηθούν στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, και είναι η εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου. Τέλος, επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Ωστόσο, οι ΑΠΕ έχουν και μειονεκτήματα. Ο συντελεστής απόδοσής τους είναι αρκετά μικρός (της τάξης του 30% ή και λιγότερο). Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι μεγάλο και συνήθως απαιτείται μεγάλη επιφάνεια γης. Έτσι, προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων, και αντιμετωπίζονται σαν συμπληρωματικές μορφές ενέργειας. Τέλος, για τα υδροηλεκτρικά έργα εξετάζεται το ενδεχόμενο να προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό, συντελώντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

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

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

εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου. [2]

Φυσικά, τα Φ/Β συστήματα έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία όμως στο σύνολό τους δεν είναι ικανά να αναιρέσουν τα πλεονεκτήματα, και να αποτελέσουν τροχοπέδη για την περαιτέρω ανάπτυξή τους :

- Το σημαντικότερό τους μειονέκτημα είναι το υψηλό τους κόστος, το οποίο όμως κατά την τελευταία πενταετία μειώνεται ταχύτατα. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους (50-60%) αφορά τα Φ/Β πλαίσια, ενώ το υπόλοιπο μοιράζεται στους μετατροπείς και το λοιπό εξοπλισμό, στο κόστος των εργασιών κτλ.
- Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να θεωρηθεί και το γεγονός της μικρής σχετικά ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β συστημάτων, το οποίο μεταξύ άλλων σημαίνει ότι απαιτούνται επιφάνειες μεγάλης έκτασης για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας.
- Κύριο χαρακτηριστικό των Φ/Β συστημάτων είναι ότι η παραγωγή ισχύος εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία εμφανίζεται μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, και μάλιστα μεταβάλλεται συνεχώς. Έτσι, η διακοπτόμενη και μη σταθερή παραγωγή ισχύος είναι άλλο ένα πρόβλημα των Φ/Β συστημάτων, το οποίο αντιμετωπίζεται με τα συστήματα αποθήκευσης, που όμως αυξάνουν το κόστος.
- Τέλος, περισσότερο ως τεχνικό θέμα προς επίλυση παρά ως μειονέκτημα, θα αναφέρουμε τα ζητήματα διασύνδεσης των Φ/Β συστημάτων με το δίκτυο, τα οποία είναι παρόμοια με αυτά που ισχύουν για κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέεται με το δίκτυο μέσω μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος (αρμονικές, ανύψωση τάσης κτλ.).

## 1.2 Ιστορική αναδρομή της τεχνολογίας των Φ/Β

Η πρώτη λειτουργική φωτοβολταϊκή συσκευή δημιουργήθηκε το 1883 από τον Fritts. Η σύγχρονη εποχή των Φ/Β ξεκίνησε το 1954, όταν οι ερευνητές στο εργαστήριο Bell των ΗΠΑ, ανακάλυψαν τυχαία την επαφή p-n που παρήγαγε τάση. Σε διάστημα ενός χρόνου κατασκεύασαν μια Φ/Β κυψέλη με p-n επαφή πυριτίου (Si), και απόδοση 6%. Μέχρι το 1960, πολλές δημοσιεύσεις από Prince, Loferski, Rappaport και Wysoski, Shokley και Queisser ανέπτυξαν τις θεμελιώδεις λειτουργίες των Φ/Β κυψελών επαφής p-n, ανάμεσα στις οποίες είναι και η σχέση μεταξύ του χάσματος και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, θερμοδυναμικής και τέλος της απόδοσης.

Η αρχική εφαρμογή των Φ/Β ήταν στη διαστημική τεχνολογία, και για το λόγο αυτό μελέτες για επιδράσεις της ακτινοβολίας και αντοχής υλικών σε ακτινοβολία, οδήγησαν στη χρήση Li-doped Si. Το 1970 μια ομάδα ερευνητών με επικεφαλής τον Alferon, δημιούργησε μια κυψέλη GaAlAs/GaAs που έλυνε ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετώπιζαν οι GaAs συσκευές, εγκαινιάζοντας έτσι μια νέα εποχή στην κατασκευή νέων συσκευών. Οι κυψέλες GaAs προκαλούσαν το ενδιαφέρον λόγω της υψηλής απόδοσής και της αντίστασής τους σε

ιονίζουσα ακτινοβολία στο διάστημα. Μια σημαντική βελτίωση το 1973 ήταν το "violet cell" που παρουσίαζε μια αύξηση 30% στην απόδοση σε σχέση με τις καθιερωμένες έως τότε κυψέλες πυριτίου. Οι κυψέλες GaAs αναπτύχθηκαν επίσης από την IBM στις ΗΠΑ με απόδοση 13%. Τον Οκτώβρη του 1973, ο πρώτος αποκλεισμός πετρελαίου από τους πετρελαιοπαραγωγούς του Περσικού Κόλπου δημιούργησε ταραχή στο βιομηχανικό κόσμο της εποχής, με αποτέλεσμα οι περισσότερες κυβερνήσεις να ξεκινήσουν προγράμματα για την ενίσχυση των ΑΠΕ και κυρίως για την ηλιακή ενέργεια. Τα παραπάνω γεγονότα καθόρισαν το 1973 ως έτος μεγάλης σημασίας για την εξέλιξη των φωτοβολταϊκών.

Το 1980 δημιουργήθηκαν στις ΗΠΑ, Ιαπωνία και Ευρώπη οι πρώτες κατασκευάστριες εταιρίες Φ/Β στοιχείων από Si με επαφές p-n. Οι εταιρίες αυτές επιχείρησαν να αυξήσουν τις τεχνολογίες Φ/Β λεπτού στρώματος όπως a-Si και CuInSe<sub>2</sub> και πέτυχαν απόδοση μεγαλύτερη του 10% για μια επιφάνεια ενός τετραγωνικού εκατοστού. Με απογοήτευση αποφάσισαν ότι ήταν πολύ πιο πολύπλοκο να αυξήσουν την απόδοση από το να αυξήσουν απλά το μέγεθος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι περισσότερες κατασκευάστριες εταιρίες στις ΗΠΑ, όπως η IBM και η General Electric να εγκαταλείψουν τις ερευνητικές προσπάθειες. Το 1990 η μεγαλύτερη εταιρία κατασκευής ηλιακών στοιχείων ήταν η Arco Solar στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, η οποία παρήγαγε κυψέλες c-Si και λεπτού στρώματος a-Si. Τη δεκαετία αυτή πολλές εταιρίες επιδόθηκαν στη βελτίωση της τεχνολογίας και κατασκευή Φ/Β στοιχείων, όπως η Mobil Solar Energy (ΗΠΑ), BP Solar (Μ.Βρετανία), το Πανεπιστήμιο New South Wales (Αυστραλία), το Πολυτεχνείο της Μαδρίτης, ενώ ενδιαφέρον έδειξε και η βιομηχανία της Ιαπωνίας.

Παράλληλα με την ωρίμανση της τεχνολογίας των Φ/Β κυψελών, διάφορα προϊόντα όπως μετατροπείς για τη μετατροπή της dc ισχύος σε εναλλασσόμενη, ηλιακοί ανιχνευτές κτλ. έπρεπε να βελτιωθούν. Στις περισσότερες εφαρμογές οι μετατροπείς ήταν αυτοί που αποτελούσαν το αδύναμο σημείο όσων αφορά την απόδοση και την ποιότητα της εναλλασσόμενης ισχύος. Το κόστος τους σταδιακά μειώθηκε με τον ίδιο ρυθμό με τα Φ/Β στοιχεία.

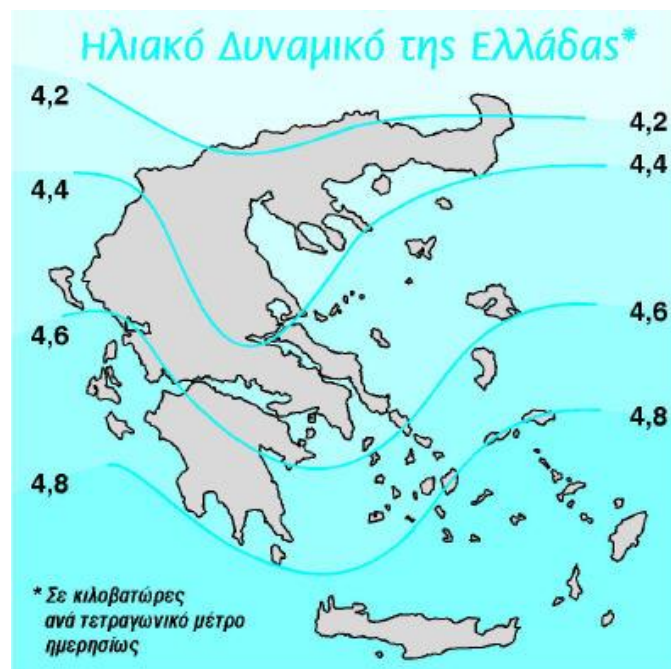
Οι πρώτες εγκαταστάσεις Φ/Β στην αρχή ήταν μικρές της τάξης των 10 με 40 W, ενώ οι περισσότερες εγκαταστάσεις ήταν επιδοτούμενες από κάποιο διεθνή οργανισμό. Συνεπώς, όσον αφορά την οικιακή χρήση, ακόμα και με επιδοτήσεις, το υψηλό κόστος αποτελούσε ένα μεγάλο εμπόδιο, και οφειλόταν κυρίως σε έλλειψη τεχνικής υποδομής, εκπαίδευσης, κουλτούρας, σχεδιασμού και άλλων μη τεχνικών λόγων. Από τη δεκαετία του '80 εφαρμογές μεγάλης κλίμακας της τάξης των MW δημιουργούνταν στην Αμερική και σε άλλες ανεπτυγμένες χώρες, για λόγους διερεύνησης των τεχνικών και οικονομικών οφελών της χρήσης Φ/Β. [4]

Στη σημερινή εποχή, από το 2008, η Ε.Ε. αποτελεί μία από τις ισχυρότερες αγορές καταλαμβάνοντας το 80% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Η δυναμική είσοδος της ισπανικής αγοράς, η σταθερή ανάπτυξη της αντίστοιχης γερμανικής και η αύξηση της ισχύος σε Ιταλία, Πορτογαλία, Βέλγιο και Γαλλία συνέβαλε στο υψηλό αυτό ποσοστό. Τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα ουσιαστικά συνθέτουν το μεγαλύτερο μέρος της



εγκατεστημένης ισχύος στην Ε.Ε. κατέχοντας το 99.8% της συνολικής παραγωγής κατά τη διάρκεια του 2008, και το 98.7% στα τέλη του ίδιου έτους.

Σήμερα, η Ελλάδα καταλαμβάνει την 6<sup>η</sup> θέση μεταξύ 35 χωρών αναφορικά με το βαθμό ελκυστικότητας για επενδύσεις σε Φ/Β σύμφωνα με τον οίκο Ernst&Young, με πιο πρόσφατο το πρόγραμμα επένδυσης Ήλιος. Το πρόγραμμα αυτό προβλέπει την εγκατάσταση Φ/Β ισχύος 3.000 - 10.000 MW με την ανάπτυξη μηχανισμών συνεργασίας με τις άλλες χώρες της Ε.Ε., στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής Οδηγίας για τις ανανεώσιμες πηγές. Με βάση την ελληνική νομοθεσία, η οποία προωθεί το συγκεντρωτισμό των εγκαταστάσεων ΑΠΕ και ιδιαίτερα των Φ/Β σταθμών, προβλέπεται συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό 40% μέχρι το 2020.



Εικόνα 1.1 Ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας

### 1.3 Λειτουργία φωτοβολταϊκών

#### 1.3.1 Δομικά στοιχεία φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Η δομική μονάδα των Φ/Β διατάξεων είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή ηλιακά κύτταρα. Τα κύτταρα είναι κατασκευασμένα από ειδικά υλικά όπως το πυρίτιο, που ονομάζονται ημιαγωγοί. Όταν το φως πέσει στο κύτταρο, ένα μέρος του απορροφάται από τον ημιαγωγό. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια του φωτός μεταφέρεται σε αυτόν. Η ενέργεια αυτή ελευθερώνει ηλεκτρόνια που κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Τα κύτταρα έχουν επίσης ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά πεδία που υποχρεώνουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινούνται προς μία κατεύθυνση. Η κίνηση των ηλεκτρονίων είναι το ηλεκτρικό ρεύμα, το

οποίο μαζί με την τάση του Φ/Β στοιχείου που είναι αποτέλεσμα των ηλεκτρικών πεδίων του κυττάρου, καθορίζει την ισχύ του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει το κύτταρο.



*Εικόνα 1.2 Φωτοβολταϊκό στοιχείο (cell)*

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



*Εικόνα 1.3 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο*

Περισσότερα του ενός πλαισίου μπορούν να στηριχθούν στην ίδια μεταλλική κατασκευή σχηματίζοντας ένα Φ/Β πάνελ (panel). Περισσότερα του ενός πάνελα σχηματίζουν τη Φ/Β συστοιχία (array), όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Φ/Β Πανέλο



Φ/Β Συστοιχία

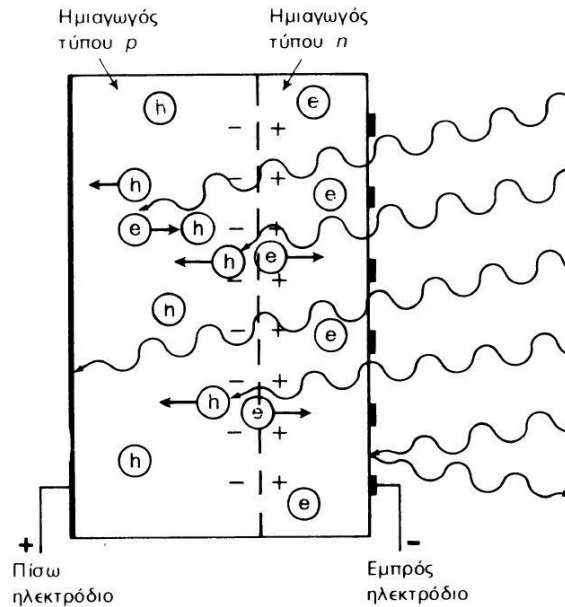
**Εικόνα 1.4** Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες

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

### 1.3.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου (Εικόνα 1.5).



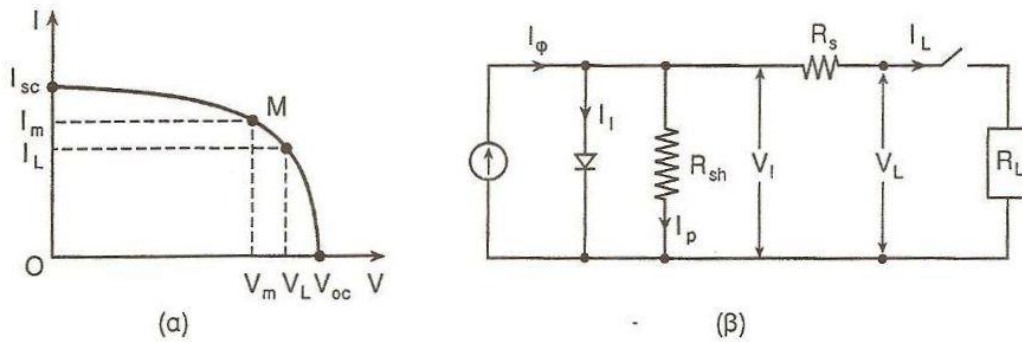
**Εικόνα 1.5** Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η ηλιακή ενέργεια, προσπίπτοντας στη δίοδο p-n, διαχωρίζει οπές και ηλεκτρόνια δημιουργώντας διαφορά δυναμικού.

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n, και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών Φ/Β στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. [5]

Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την κατασκευή ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φ/β διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων υλικών, πχ. από διόδους Σότκυ που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

### 1.3.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Η λειτουργία του Φ/Β στοιχείου μπορεί κατά προσέγγιση να προσομοιωθεί με το ισοδύναμο κύκλωμα της Εικόνας 1.6 (β), κύριο στοιχείο του οποίου αποτελεί η ιδανική πηγή εντάσεως, η οποία ελέγχεται από μια δίοδο. Η πηγή εντάσεως παράγει το "φωτορεύμα" (photocurrent),  $I_{\phi}$ , το οποίο είναι ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.



**Εικόνα 1.6** (α) Χαρακτηριστική Τάσεως - Εντάσεως (β) Ισοδύναμο κύκλωμα

Πειραματικά προκύπτει ότι για μια ορισμένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, η χαρακτηριστική Τάσεως - Εντάσεως (V-I) ενός Φ/Β στοιχείου έχει τη μορφή της *Εικόνας 1.6 (α)*, στην οποία διακρίνουμε:

$V_{oc}$ , την τάση ανοιχτού κυκλώματος,

$I_{sc}$ , την ένταση βραχυκυκλώσεως,

$V_m$  και  $I_m$ , την τάση και ένταση της μέγιστης ισχύος  $P_m = V_m * I_m$ ,

$V_L$  και  $I_L$ , την τάση και ένταση τυχόντος σημείου στο οποίο το Φ/Β στοιχείο λειτουργεί, όταν παράγει ένταση  $I_L$  και ισχύ:  $P_L = V_L * I_L$ .

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

Όταν στα άκρα του Φ/Β στοιχείου συνδεθεί μια αντίσταση (φορτίο  $R_L$ ), διαπιστώνεται ότι το Φ/Β στοιχείο παρουσιάζει πρόσθετες απώλειες, ενώ η τάση του μειώνεται, όσο η τιμή της  $R_L$  μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή εκφράζεται με την αντίσταση σειράς  $R_s$ . Επομένως με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα της παραπάνω εικόνας, αν  $V_L$  και  $I_L$  η τάση και ένταση στα άκρα της αντιστάσεως του φορτίου  $R_L$ , η λειτουργία του Φ/Β στοιχείου θα εκφράζεται από την εξίσωση:

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

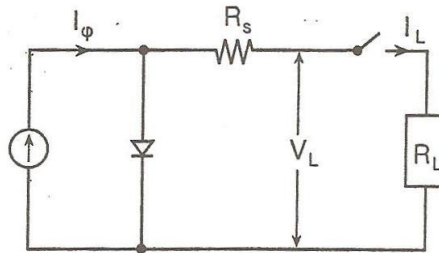
όπου  $I_0$  : το "ανάστροφο ρεύμα κόρου",

$\mu = \gamma * K * T / e =$  μια σταθερά, με:

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

$K$  = η σταθερά του Boltzman,  
 $T$  = η απόλυτη θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου,  
 $e$  = το φορτίο του ηλεκτρονίου.

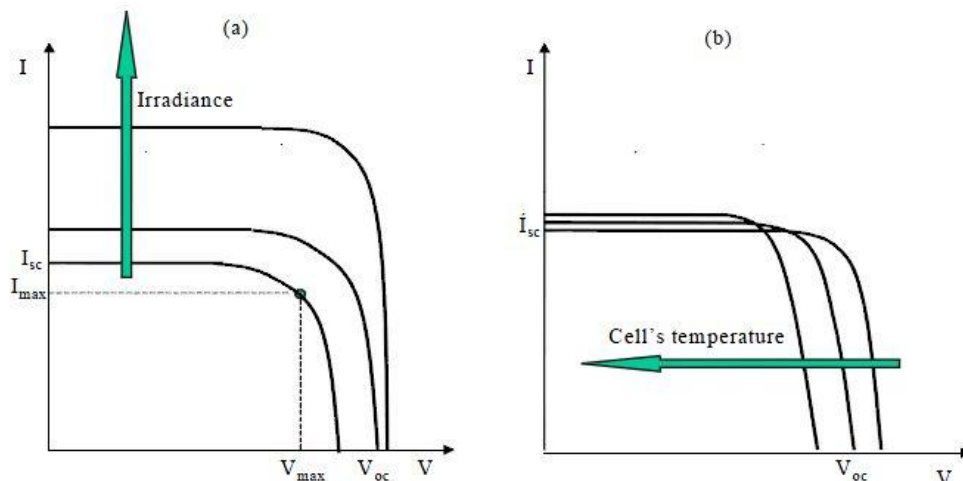
Το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα μπορεί να απλοποιηθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα αν ληφθεί υπόψη ότι οι απώλειες χωρίς φορτίο είναι πολύ μικρές, δηλαδή αγνοηθεί η  $R_{sh}$ . Στην περίπτωση αυτή το ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματίζεται στο εξής [3] :



**Εικόνα 1.7** Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα

### 1.3.4 Επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών στη λειτουργία των Φ/Β

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



**Εικόνα 1.8** Επίδραση (α) της ακτινοβολίας και (β) της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική  $V - I$  του ηλιακού κυττάρου

Στην *Εικόνα 1.8 (α)* φαίνεται ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνει λογαριθμικά με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η ένταση βραχυκύκλωσης γραμμικά. Στην *Εικόνα 1.8 (β)* παρατηρούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως κύριο αποτέλεσμα τη γραμμική μείωση της τάσεως ανοιχτού κυκλώματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται πολύ λίγο. Η φορά των βελών στα παραπάνω σχήματα υποδεικνύει την αύξηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας αντίστοιχα. [6]

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

## Κεφάλαιο 2

### Εισαγωγή στα Μικροδίκτυα

#### 2.1 Διασπαρμένη παραγωγή και μικροδίκτυα

Η διείδυση των ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνεχώς αυξανόμενη, και προκαλεί μεταβολές στην παραδοσιακή αρχή λειτουργίας των δικτύων. Σύμφωνα με αυτή και με τα μέχρι σήμερα δεδομένα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι "συγκεντρωμένη". Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια παράγεται σε μεγάλους θερμικούς σταθμούς και μονάδες συμβατικών καυσίμων, ενώ διοχετεύεται στους καταναλωτές που βρίσκονται σε μακρινή απόσταση από τις μονάδες παραγωγής μέσω γραμμών υψηλής τάσης, και εν συνεχεία μέσω μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης που βρίσκονται κοντά σε αυτούς.

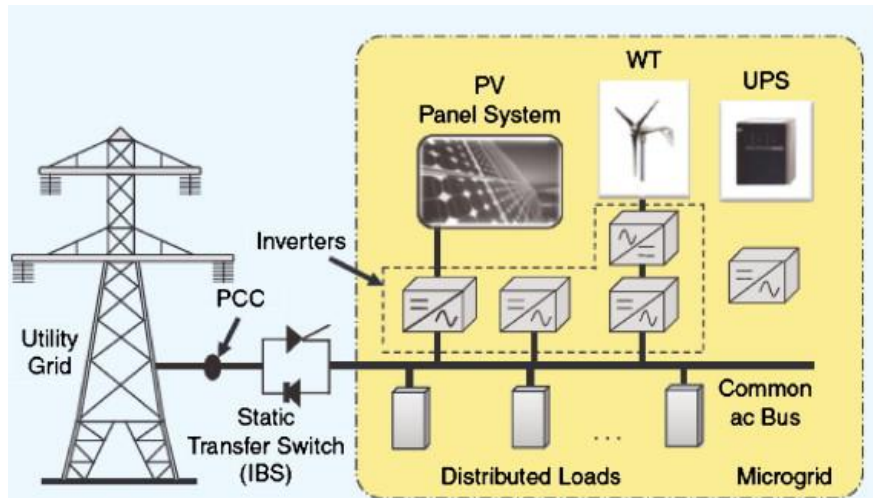
Με την είσοδο των ΑΠΕ έχει προκύψει ένα καινούριο μοντέλο παραγωγής ενέργειας. Η καινούρια προσέγγιση αφορά τη μέθοδο της "διασπαρμένης παραγωγής", δηλαδή τη δημιουργία μικρότερων μονάδων παραγωγής σε τόπους όπου υπάρχει διαθέσιμη η πρωταρχική πηγή ενέργειας, και βρίσκεται κοντά σε τόπους κατανάλωσης, όπως πόλεις και βιομηχανίες. Με τον τρόπο αυτό περιορίζουμε τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτουν από τη μεταφορά της από την παραγωγή στην κατανάλωση. Επίσης, μπορεί ο κάθε καταναλωτής αυτόνομα να καλύψει τις ενεργειακές του ανάγκες, μειώνοντας την επιβάρυνση στο κεντρικό δίκτυο.

Η διασύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής σε συστήματα διανομής χαμηλής τάσης, αποτελούν ένα νέο τύπο συστήματος ισχύος που ονομάζεται μικροδίκτυο. Τα μικροδίκτυα μπορούν να συνδέονται στο κύριο δίκτυο ισχύος, ή μπορούν και να λειτουργήσουν αυτόνομα, όπως συμβαίνει με τα συστήματα ισχύος νησιωτικών μονάδων. Υπάρχουν μικροδίκτυα που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια και συσσωρευτές για την κάλυψη των αναγκών μιας οικίας, μέχρι μικροδίκτυα που αποτελούνται από αιολικά πάρκα, γεννήτριες ντίζελ και μονάδες συμπαραγωγής που τροφοδοτούν μεγάλους καταναλωτές. [7], [8]

Ένας σημαντικός παράγοντας προκειμένου να εκμεταλλευτούμε όλες τις δυνατότητες που προσφέρουν τα μικροδίκτυα, είναι η παρουσία των διασπαρμένων πηγών ενέργειας με τη χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Οι διατάξεις αυτές μας επιτρέπουν να ρυθμίσουμε την τάση και συχνότητα, και να εξασφαλίσουμε ομοιόμορφο διαμοιρασμό της ισχύος στα διάφορα φορτία, όταν βρισκόμαστε σε αυτόνομη λειτουργία. Αντίστοιχα, σε λειτουργία διασύνδεσης με το δίκτυο, οι ελεγκτές των μικροδικτύων μπορούν να ρυθμίσουν την ανταλλαγή ισχύος με αυτό, να ελέγχουν τα χαρακτηριστικά του δικτύου, και να ανταποκρίνονται ταχύτατα στις ενδεχόμενες μεταβολές. Τέτοιοι ελεγκτές αναπτύσσονται,



και ενσωματώνονται στους αντιστροφείς (inverters), οι οποίοι αποτελούν σημαντικό συστατικό του μικροδικτύου, και διασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του. [9]

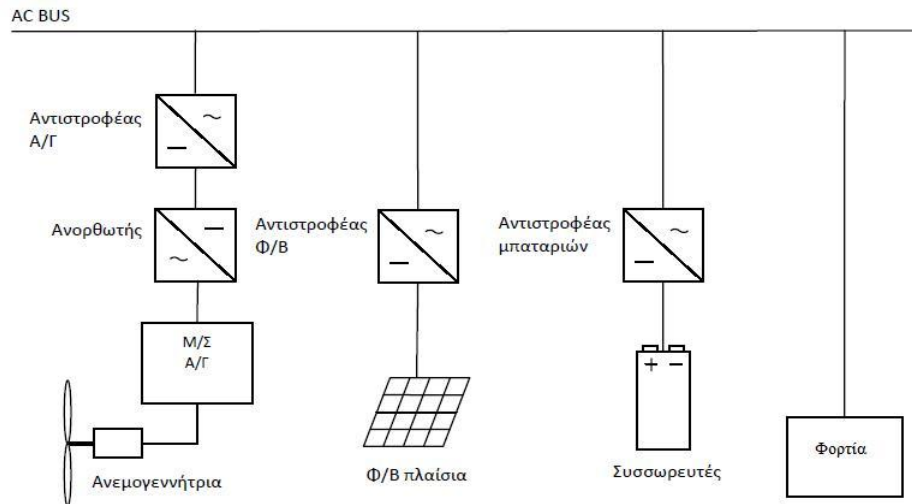


**Εικόνα 2.1** Διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο που αποτελείται από φωτοβολταϊκό, ανεμογεννήτρια, τους αντιστροφείς τους, και από διανεμημένα φορτία

Ένα βασικό στοιχείο των μικροδικτύων σε αυτόνομη λειτουργία είναι οι συσσωρευτές. Η παρουσία τους καθίσταται αναγκαία, καθώς η παραγωγή των διεσπαρμένων πηγών χαρακτηρίζεται από έντονες διακυμάνσεις, εφόσον είναι εξαρτώμενη από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Συνεπώς τις ώρες μέγιστης παραγωγής, η παραγόμενη ισχύς μπορεί να τροφοδοτήσει τα φορτία, και η περίσσεια να αποθηκευτεί στους συσσωρευτές. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τις ώρες χαμηλής ή και μηδενικής παραγωγής.

## 2.2 Εργαστηριακό μικροδίκτυο της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών έχει γίνει η εγκατάσταση ενός μικροδικτύου, το οποίο έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί τόσο ως σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παρέχεται στο κεντρικό δίκτυο, όσο και ως αυτόνομο σύστημα ικανό να καλύψει ζήτηση ισχύος 3,3 KVA και αιχμής 4,3 KVA. Το μικροδίκτυο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος 1100Wp, αντιστροφέα DC/AC για τα φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια ισχύος 850W με το αντιστροφέα της, συσσωρευτές μολύβδου οξέως 2V/250Ah, πρωτότυπο αντιστροφέα για τους συσσωρευτές, διατάξεις ελέγχου και φορτία.



**Εικόνα 2.2** Σχηματικό διάγραμμα του εργαστηριακού μικροδικτύου

Όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο της ΔΕΗ, το φορτίο του εργαστηρίου λαμβάνει ισχύ και από τα δύο δίκτυα. Σε περίπτωση διακοπής ρεύματος στο κεντρικό δίκτυο, το μικροδίκτυο μπορεί να μεταβεί ομαλά σε αυτόνομη λειτουργία (island operation), και εν συνεχεία να ξανασυνδεθεί στο δίκτυο της ΔΕΗ όταν αυτό είναι εφικτό.

Όπως θα αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους, κεντρικό συστατικό του μικροδικτύου είναι ο αντιστροφέας των συσσωρευτών, ο οποίος ρυθμίζει την τάση και συχνότητα όταν το δίκτυο είναι σε αυτόνομη λειτουργία, ελέγχοντας την ενεργό και άεργο ισχύ. Στην περίπτωση διασυνδεδεμένης λειτουργίας, το κεντρικό δίκτυο είναι αυτό που καθορίζει τη συχνότητα και τάση, οπότε ο αντιστροφέας εξασφαλίζει την σωστή ανταπόκριση του εργαστηριακού δικτύου στις επιθυμητές παραμέτρους. [9], [10]

## 2.3 Φωτοβολταϊκά εργαστηριακού μικροδικτύου

### 2.3.1 Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες

Στην οροφή του κτηρίου ηλεκτρολόγων μηχανικών βρίσκονται εγκατεστημένα 10 Φ/Β πλαίσια (modules), καθένα από τα οποία αποτελείται από 36 cells. Η μέγιστη ισχύς κάθε πλαισίου είναι 110 W<sub>p</sub>, η δε τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι 21,6 volt (καθώς κάθε cell παράγει 0,6 volt), οπότε αυτά συνδεδεμένα σε σειρά δίνουν συνεχή τάση 180 volt. Τα συγκεκριμένα στοιχεία, ισπανικής κατασκευής, είναι από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυρίτιου έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση, περίπου 15%.

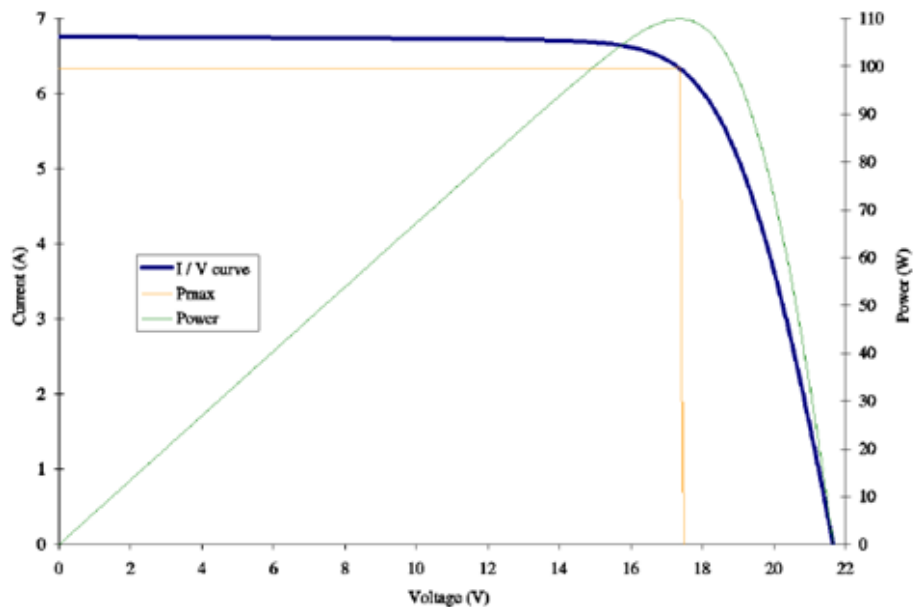


*Εικόνα 2.3 Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες του εργαστηριακού μικροδικτύου*

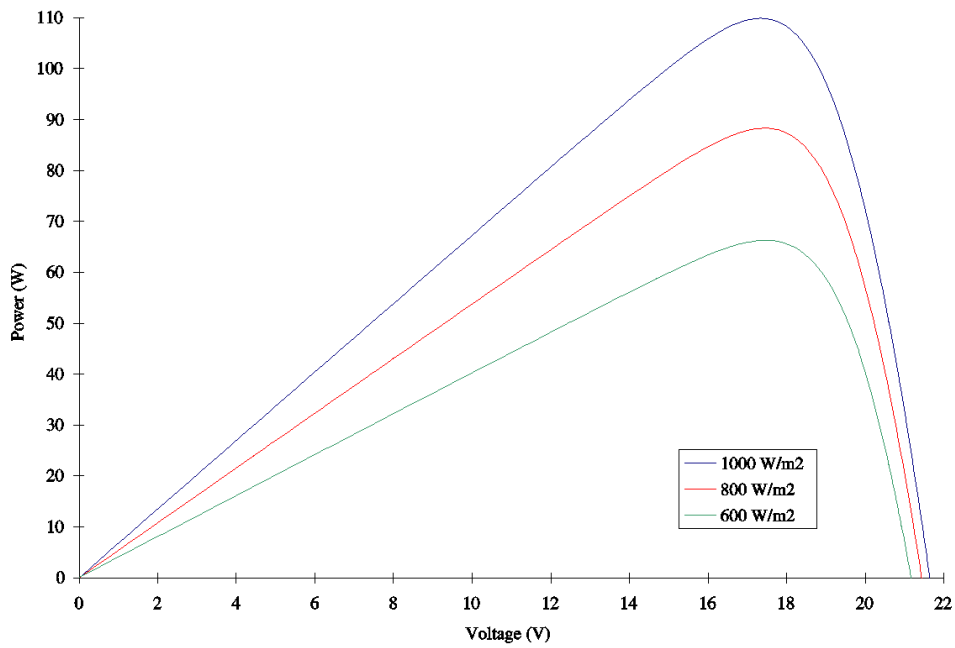
<b>ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>	
Διαστάσεις	1310*654*39,5 mm
Βάρος	11,5 κιλά
Αριθμός εν σειρά κυψελών	36
Αριθμός κυψελών εν παραλλήλω	2
Αναφορά μετρήσεων	NOCT (800 W/m <sup>2</sup> , 25 °C, AM 1,5)
<b>ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>	
(μετρήσεις σε συνθήκες 1000 w/m <sup>2</sup> , 25 °C, AM 1.5)	
Ονομαστική τάση λειτουργίας	12 volt
Μέγιστη ισχύς	110 Wp +- 10%
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I <sub>sc</sub>	6,67 A
Τάση ανοιχτοκύκλωσης V <sub>oc</sub>	21,6 Volt
Ένταση στη μέγιστη ισχύ I <sub>max</sub>	6,32 A
Τάση στη μέγιστη ισχύ V <sub>max</sub>	17,4 volt
<b>ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>	
Στοιχεία	Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με αντανακλαστική επίστρωση
Επαφές	Ενισχυμένες επαφές σε κάθε στοιχείο για αξιοπιστία του κυκλώματος
Κάλυψη	EVA( ethylene vinyl acetate)
Εμπρόσθια όψη	Ενισχυμένο γυαλί με βελτιωμένη μετάδοση φωτός
Πλαίσιο	Ανοδιωμένο αλουμίνιο
Κιβώτια επαφών	IP65 με ενσωματωμένες διόδους παράκαμψης
Ακροδέκτες γείωσης	ναι
Καλώδια επαφών	4-10 mm <sup>2</sup>

*Εικόνα 2.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων του μικροδικτύου*

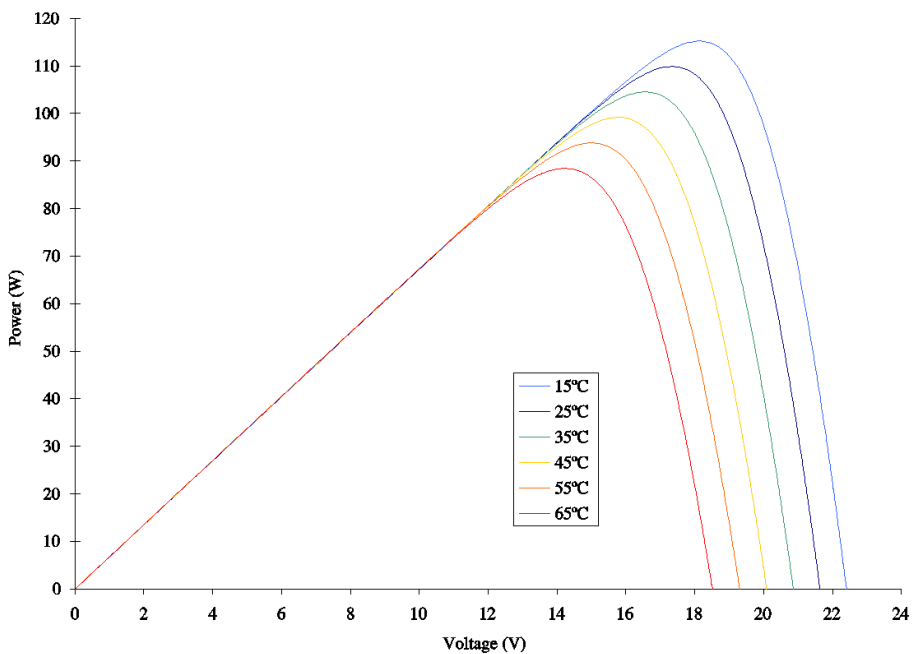
Παρακάτω δίνονται και τα χαρακτηριστικά διαγράμματα I-V, ισχύος - θερμοκρασίας και ισχύος - ακτινοβολίας για τα συγκεκριμένα Φ/Β πλαίσια:



**Εικόνα 2.5** Χαρακτηριστική I-V ενός φ/β πλαισίου ISO FOTON 110Wr μονοκρυσταλικού πυριτίου. Διακρίνεται το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου Pmax (17.4V, 6.32A). Η καμπύλη αυτή ισχύει για συνθήκες 1000 W/m<sup>2</sup> ηλιακής ακτινοβολίας 1.5AM και 25°C θερμοκρασία.



**Εικόνα 2.6** Καμπύλη ισχύος εξόδου (γινόμενο  $V \cdot I$ ) των  $\Phi/B$  του μικροδικτύου συναρτήσει της τάσης εξόδου, για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι φανερή η μεγάλη επίδραση αυτής στην απόδοση του  $\Phi/B$



**Εικόνα 2.7** Καμπύλες ισχύος εξόδου του  $\Phi/B$  συναρτήσει της τάσης εξόδου για διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας. Για τιμές άνω των 12V, υπάρχει μεγάλη εξάρτηση της ισχύος εξόδου από τη θερμοκρασία [10]

### 2.3.2 Αντιστροφέας φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Η χρήση του αντιστροφέα της Φ/Β γεννήτριας είναι επιτακτική, καθώς το ρεύμα που παρέχει το μικροδίκτυο θέλουμε να είναι εναλλασσόμενο. Οι αντιστροφείς είναι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος, οι οποίες μετατρέπουν μια συνεχή τάση σε μονοφασική ή τριφασική εναλλασσόμενη μεταβλητής RMS τιμής και μεταβλητής συχνότητας. Θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στους αντιστροφείς Sunny Boy, μιας και τέτοιους αντιστροφείς έχει το εργαστηριακό μικροδίκτυο. Οι αντιστροφείς Sunny Boy βασίζονται στην τεχνολογία string. Η τεχνολογία αυτή συνίσταται στο ότι ένας μικρός αριθμός φωτοβολταϊκών συλλεκτών συνδέονται σε μια σειρά. Εν συνεχεία κάθε σειρά συνδέεται χωριστά σε έναν ξεχωριστό αντιστροφέα και αυτός με τη σειρά του συνδέεται στο δίκτυο. Στην περίπτωση των μεγάλων Φ/Β γεννητριών έχουμε πολλές σειρές φ/β πλαισίων και η παραγόμενη ενέργεια συγκεντρώνεται κατ' ευθείαν στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος. Παλιότερα τα πλαίσια συνδέονταν σε σειρά κατά ομάδες, στην συνέχεια όλα μαζί παράλληλα, και έπειτα με έναν αντιστροφέα, ο οποίος συνδεόταν με το δίκτυο. Η νέα τεχνολογία παρακάμπτει τα καλώδια της παράλληλης σύνδεσης, και συνδέεται άμεσα με το δίκτυο, απλοποιώντας σε μεγάλο βαθμό το σύστημα. Επίσης, πλέον γίνεται πολύ ευκολότερα η επέκταση της εγκατάστασης, διότι τα επιπλέον φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται άμεσα στην πλευρά του δικτύου, ενώ και ο κίνδυνος βραχυκυκλώματος μειώνεται. [11]

Ο Sunny boy 1100 grid-tie inverter, είναι ένας αντιστροφέας για τη διασύνδεση φωτοβολταϊκών γεννητριών με ένα δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο που έχει εγκατασταθεί στο εργαστήριο ΣΗΕ έχει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τεχνολογία αντιστροφέα	πραγματικού ημιτόνου, πηγής ρεύματος, υψηλής συχνότητας διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)
Ονομαστική AC τάση εξόδου	213-260 volt ac (standard 240)
Ονομαστική συχνότητα εξόδου	49,3 – 50,5 Hz
DC τάση εισόδου	129-400 volt dc
Τάση για μέγιστη ισχύς εξόδου (MPPT)	145 - 400 Volt DC
Μέγιστη ισχύς εισόδου (dc τάσης)	1440 watt
Μέγιστη ισχύς εξόδου (240 volt ac)	1100 watt
Ονομαστική ισχύς εξόδου	1000 watt
Αρμονική παραμόρφωση ρεύματος THD	Μικρότερη από 4%
Συντελεστής ισχύος	1
Μέγιστη απόδοση αντιστροφέα	93%
Ψύξη	Φυσική απαγωγή (χωρίς ανεμιστήρα)
Τάση εισόδου για έναρξη λειτουργίας	180 volt dc
Μέγιστο ρεύμα εξόδου AC	4,6 Ampere
Μέγιστο ρεύμα εισόδου DC	9,5 Ampere
Κυμάτωση DC τάσης	Μικρότερη από 10%
Κατανάλωση ισχύος	0 watt τη νύχτα, μικρότερη από 4 watt σε λειτουργία, μικρότερη από 0,1 watt σε λειτουργία stand by
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	45 °C

**Εικόνα 2.8** Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιστροφέα των Φ/Β του μικροδικτύου

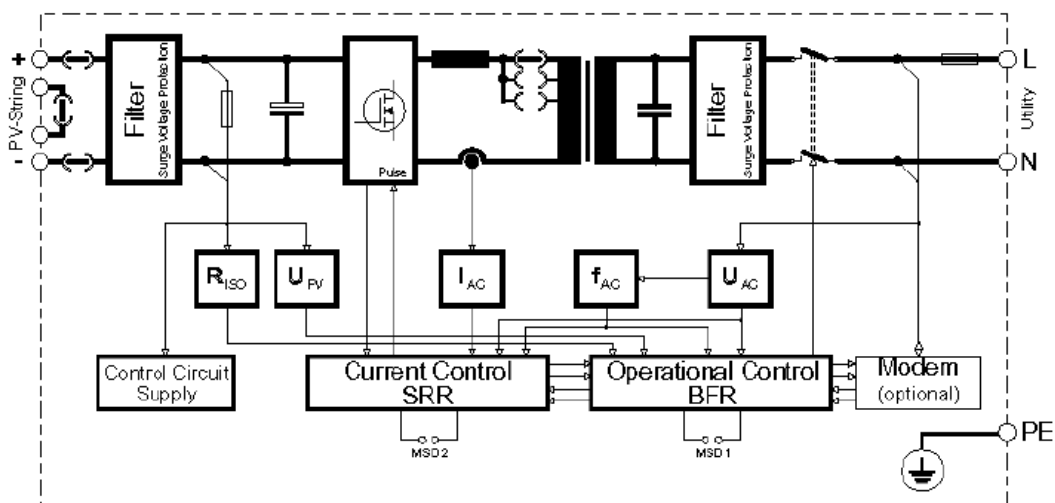




**Εικόνα 2.9 Sunny boy 1100**

Ο Sunny boy είναι ένας αντιστροφέας ισχύος DC/AC πηγής έντασης. Στην είσοδό του συνδέεται η φ/β γεννήτρια, μια συστοιχία φωτοβολταϊκών της οποίας η τάση πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των 145 και 400V. Από την πλευρά της εξόδου ο αντιστροφέας είναι μόνιμα συνδεδεμένος σε ένα εν λειτουργία δίκτυο χαμηλής τάσης, είτε αυτό είναι το μικροδίκτυο του εργαστηρίου, είτε το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Όταν στην μεν τάση εξόδου μετρήσει την ονομαστική τάση που του έχει οριστεί και την συχνότητα στα επιθυμητά όρια, είναι ανά πάση στιγμή έτοιμος να λειτουργήσει μετατρέποντας την τάση εισόδου των φ/β σε εναλλασσόμενη. Ταυτόχρονα θα πρέπει η τάση εισόδου του να είναι μεγαλύτερη των 180 Volt, ώστε να εξασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχουν συνεχείς διακοπές της διαδικασίας.

Σε ότι αφορά το τεχνικό κομμάτι του αντιστροφέα, ο Sunny Boy 1100 χρησιμοποιεί για την μετατροπή της τάσης τρανζίστορ IGBT. Παρακάτω δίνεται ένα σχεδιάγραμμα της ηλεκτρονικής διάταξης του :



**Εικόνα 2.10 Ηλεκτρικό σχεδιάγραμμα αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου**

Η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα περνά από ένα φίλτρο για προστασία από υπερτάσεις καθώς και από ένα βαθυπερατό φίλτρο για εξομάλυνση του ρεύματος εισόδου. Έπειτα ακολουθεί ένας μετατροπέας DC/DC ο οποίος χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της τεχνικής μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος των φωτοβολταϊκών (M.P.P.T).

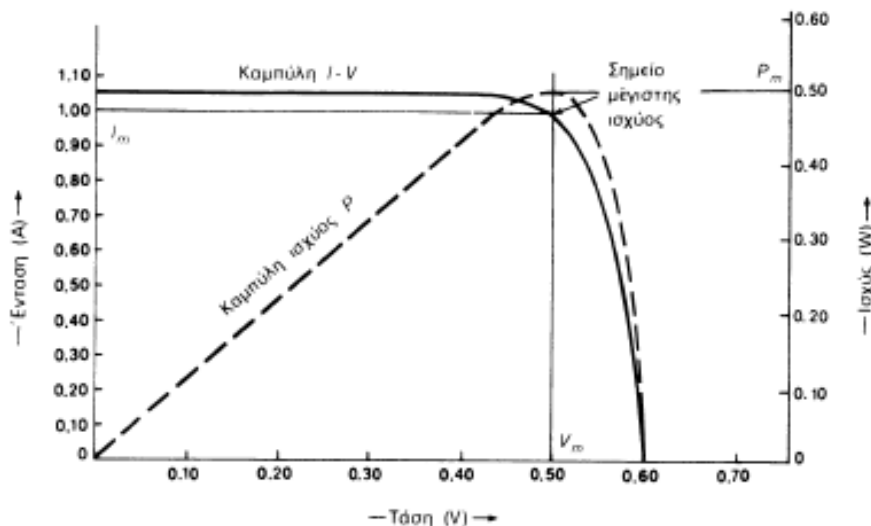
Η τάση αυτή, τροφοδοτεί μια γέφυρα που αποτελείται από τέσσερα διπολικά τρανζίστορ ελεγχόμενα από την πύλη (IGBT) τα οποία λειτουργούν με φέρουσα συχνότητα  $f_s=16$  KHz. Στην γέφυρα αυτή το ρεύμα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ημιτονοειδούς μορφής και συχνότητας 50 Hz με την τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Το εναλλασσόμενο ρεύμα που παράγεται πριν φτάσει στην έξοδο του αντιστροφέα περνά από ένα μετασχηματιστή απομόνωσης για την ηλεκτρική απομόνωση της DC από την AC πλευρά. Τέλος, έχουμε και την παρεμβολή ενός βαθυπερατού φίλτρου στην έξοδο, για την εξουδετέρωση των υψίσυχνων αρμονικών που παράγονται από τον αντιστροφέα, καθώς επίσης και για την προστασία από υπερτάσεις του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πως η λειτουργία της γέφυρας καθώς και ο χρονισμός σύνδεσης – αποσύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο ελέγχεται πλήρως από ψηφιακά κυκλώματα.

Ο αντιστροφέας Sunny boy 1100 είναι ένας αντιστροφέας μονόδρομης ροής ισχύος, καθώς επιτρέπει μονό ροή ισχύος από τα φωτοβολταϊκά προς το δίκτυο, και όχι το αντίστροφο. Παρακάτω θα συναντήσουμε έναν αντιστροφέα ο οποίος επιτρέπει τη ροή ισχύος και προς τις δυο κατευθύνσεις. [10]

### **2.3.3 Ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος - Maximum Power Point Tracker (MPPT)**

Η ισχύς εξόδου ενός Φ/Β πλαισίου μεταβάλλεται με οποιαδήποτε αλλαγή της θέσης του ήλιου, της ηλιακής ακτινοβολίας, ή της θερμοκρασίας. Επίσης υπάρχει ένα μοναδικό σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου (Maximum Power Point - MPP) στη I-V χαρακτηριστική ενός φ/β πλαισίου, για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Είναι επιθυμητό το φ/β πλαίσιο να έχει συνεχώς ισχύ εξόδου που να είναι όσο γίνεται πλησιέστερη στη μέγιστη δυνατή. Η διαδικασία που ακολουθούμε ώστε να πετύχουμε αυτό το αποτέλεσμα ονομάζεται ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος.





**Εικόνα 2.11** Χαρακτηριστική I-V και καμπύλη ισχύος

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα, η μεταβολή της έντασης του ρεύματος είναι αντίστροφη της μεταβολής της τάσης. Συνεπώς, κάθε χρονική στιγμή υπάρχει ένα ζευγάρι τάσης - έντασης για το οποίο έχουμε μέγιστη ισχύ. Εφόσον η ισχύς εξόδου της Φ/Β γεννήτριας δεν είναι σταθερή όπως αναφέραμε, προκύπτει πως ούτε και η τάση εξόδου στους ακροδέκτες των Φ/Β είναι σταθερή. Σκοπός μας είναι το Φ/Β στοιχείο να μην παράγει την τάση και ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει το ζευγάρι τάσης - έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.

Όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο, η διάταξη που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του MPPT στα φωτοβολταϊκά είναι ένας μετατροπέας DC/DC ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης που είναι ενσωματωμένος στον Sunny boy.

Θεωρητικά η τεχνική MPPT εφαρμόζεται ως εξής: η παραγόμενη ισχύς από ένα Φ/Β στοιχείο είναι  $P = V * I$ . Όταν η λειτουργία του στοιχείου μετατοπιστεί σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης V - I λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, τότε η τάση μεταβάλλεται κατά dV και η ένταση κατά dI. Τότε η ισχύς είναι :  $P = V * I = (V + dV) * (I + dI)$ . Αν αγνοήσουμε τους όρους δεύτερης τάξης προκύπτει :

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

Όπως γίνεται φανερό από την καμπύλη ισχύος του Φ/Β, ο όρος dP (η κλίση δηλαδή της καμπύλης ισχύος) είναι μηδέν στο σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σημείο αυτό (maximum power point) λοιπόν η άνωθεν εξίσωση γίνεται :

$$0 = dV * I + dI * V \Rightarrow \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I}$$

Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος [10] :

1. **Incremental Conductance:** Μια διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στη φωτοβολταϊκή πηγή, ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής  $Z_d = dV/dI$  και η στατική αντίσταση  $Z_s = \frac{V}{I}$ . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται, μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή  $Z_d = -Z_s$ .
2. **Perturb & Observe:** Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ελέγχου, αυξάνεται η τάση όσο ισχύει η συνθήκη  $dP/dV > 0$ , δηλαδή η ισχύς αυξάνεται με αύξηση της τάσης. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται. Η τάση σταθεροποιείται όταν μηδενίζεται σχεδόν αυτός ο ρυθμός μεταβολής.
3. **V<sub>mpp</sub> ως ποσοστό του V<sub>oc</sub>:** Η τρίτη αυτή τεχνική κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή  $V_{mpp}/V_{oc} = k = \text{σταθ.}$  (περίπου 0,72 για τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φ/β στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο  $K \cdot V_{oc}$  που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

## 2.4 Ανεμογεννήτρια εργαστηριακού μικροδικτύου

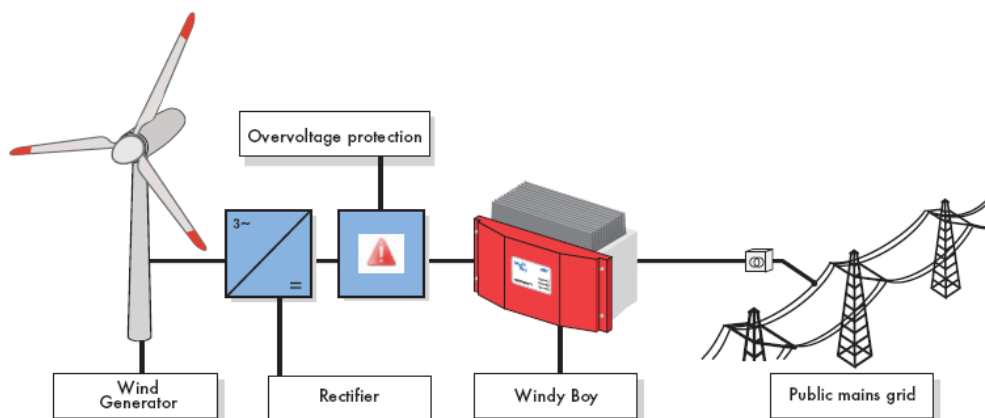
### 2.4.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Μαζί με τα φωτοβολταϊκά, το άλλο κύριο στοιχείο του υβριδικού μικροδικτύου του εργαστηρίου είναι η ανεμογεννήτρια. Αυτή έχει κατασκευαστεί από φοιτητές ηλεκτρολόγους μηχανικούς στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας. Είναι μια τριφασική ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών και ισχύος  $P_{ηλ}=850W$  σε λειτουργία MPPT. Είναι 12 πόλων και η φασική της τάση είναι 53V, ενώ η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής είναι  $n_{nom}=560ΣΑΛ$ . [8]



**Εικόνα 2.12** Η ανεμογεννήτρια του εργαστηριακού μικροδικτύου

Η ανεμογεννήτρια συνδέεται στο κεντρικό δίκτυο περνώντας πρώτα από μια τριφασική μη ελεγχόμενη ανόρθωση πλήρους γέφυρας και στη συνέχεια μέσω ενός αντιστροφέα Windy boy. Στον αντιστροφέα είναι ενσωματωμένος ένας DC/DC μετατροπέας που κάνει εφικτή τη μέγιστη παραγωγή ισχύος.



**Εικόνα 2.13** Σύνδεση ανεμογεννήτριας στο κεντρικό δίκτυο

Η ανεμογεννήτρια παράγει 3Φ τάση, ενώ ο Windy boy απαιτεί συνεχή τάση ως είσοδο. Συνεπώς όπως, απαιτούνται δύο ενδιάμεσα στοιχεία. Αρχικά ένας μετασχηματιστής για να μετατρέψει την τάση εξόδου της ανεμογεννήτριας σε μονοφασική, και εν συνεχεία ένας ανορθωτής που θα μετατρέψει την τάση σε συνεχή. Ο μετασχηματιστής είναι συνδεσμολογίας Y-Y, ονομαστικής ισχύος 1KW και τριών λήψεων στην έξοδο (100/350V, 100/360V, 100/370V). Ο ανορθωτής που χρησιμοποιείται είναι ένα Whisper link, το οποίο λειτουργεί και ως σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας.



*Εικόνα 2.14 Whisper link, ο ανορθωτής της ανεμογεννήτριας του μικροδικτύου*

#### **2.4.2 Αντιστροφέας ανεμογεννήτριας**

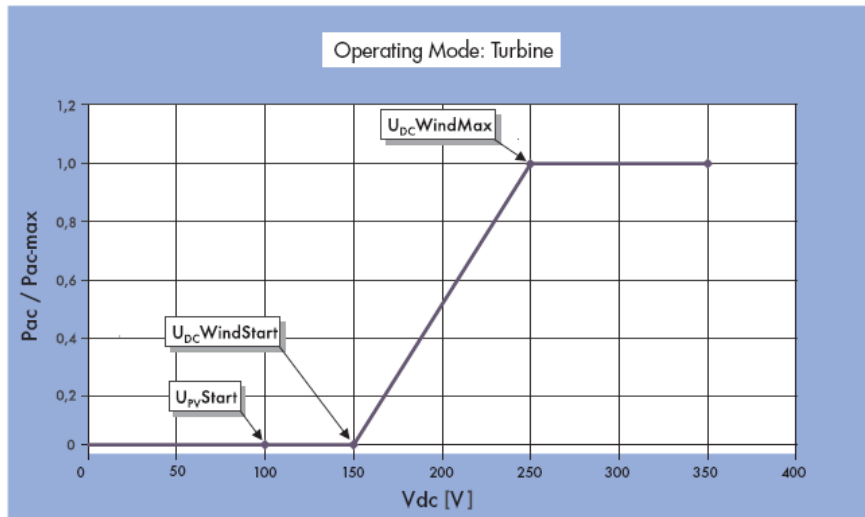
Όπως αναφέραμε και παραπάνω, μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας ισχύος AC-DC-AC για τον έλεγχο της ροής ισχύος. Στην περίπτωση μας το ρόλο της μετατροπής από DC σε AC αναλαμβάνει ο αντιστροφέας Windy boy 1700. Αποτελείται από έναν DC/DC μετατροπέα για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια και από έναν μονοφασικό αντιστροφέα που επιτρέπει μονόδρομη ροή ισχύος. Είναι πανομοιότυπος με τον Sunny Boy, και ακολουθεί τις ίδιες αρχές λειτουργίας. Η διαφορά του Windy Boy με τον Sunny Boy βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο έχουν προγραμματιστεί ώστε να εφαρμόζουν την αρχή του Maximum Power Point Tracking για την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος.



*Εικόνα 2.15 Windy boy 1700*

Ο κάθε μετατροπέας ανάλογα με το σχεδιαστή του μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετική στρατηγική ελέγχου και μετρούμενα μεγέθη, απαιτώντας να μεγιστοποιείται η αεροδυναμική ισχύς για κάθε ταχύτητα ανέμου. Ο DC/DC μετατροπέας του windy boy χρησιμοποιεί τη βέλτιστη καμπύλη ισχύος εισόδου του μετατροπέα  $P_{dc}$  με την τάση εισόδου

του  $V_{dc}$ . Ο windy boy έχει στη μνήμη του μία ευθύγραμμη χαρακτηριστική καμπύλη (Εικόνα 2.16), αλλά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, και ενδείκνυται να εισάγει τη χαρακτηριστική καμπύλη της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας που θα συνδεθεί, μέσω υπολογιστή και της συσκευής sunny boy control.



Εικόνα 2.16 Χαρακτηριστική ελέγχου του μετατροπέα windy boy

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του windy boy 1700 [12]

<b>Windy Boy 1700</b>	
<b>Είσοδος (DC)</b>	
Μεγ. ισχύς DC	1850 W
Συνιστώμενη ισχύς γεννήτριας για 2500 / 5000 ώρες πλήρους φορτίου ετησίως	1400 W / 1300 W
Μεγ. τάση DC	400 V
Ονομαστική τάση DC	180 V
Ελαχ. τάση χωρίς φορτίο για ενεργοποίηση "Turbine Mode"	150 V
Εύρος λειτουργίας "Turbine Mode"	139 V - 400 V
Μεγ. ρεύμα εισόδου / ανά είσοδο	12,6 A / 12,6 A
<b>Έξοδος (AC)</b>	
Ονομαστική ισχύς AC	1550 W
Μεγ. ισχύς AC	1700 W
Μεγ. ρεύμα εξόδου	8,6 A
Ονομαστική τάση AC / εύρος λειτουργίας AC	220 V, 230 V, 240 V / 180 V - 260 V
Ονομαστική συχνότητα AC / εύρος	50 Hz, 60 Hz / ± 4,5 Hz
Συντελεστής ισχύος (cos φ)	1
Φάσεις τροφοδοσίας / Φάσεις σύνδεσης	1 / 1
<b>Βαθμός απόδοσης</b>	
Μεγ. βαθμός απόδοσης / Euro-Eta	93,5 % / 91,8 %

Εικόνα 2.17 Τεχνικά χαρακτηριστικά Windy boy 1700

## 2.5 Συσσωρευτές εργαστηριακού μικροδικτύου

### 2.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Στο εργαστηριακό μικροδίκτυο είναι εγκατεστημένοι εν σειρά 30 συσσωρευτές Ergon OPzS των 2 volt, και ονομαστικής χωρητικότητας C10=250Ah ή C120=370Ah, δίνοντας συνολικά μια τάση εξόδου 60 Volt. Σε ότι αφορά τις δυο τιμές που αναφέρθηκαν για τις μπαταρίες σημειώνεται πως οι τιμές αυτές αναφέρουν τη μέγιστη χωρητικότητα του κάθε στοιχείου των 2 Volt όπως προκύπτει από την εξίσωση Peukert για χρόνο εκφόρτισης 10 και 120 ωρών αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση, εννοείται ότι το στοιχείο μπορεί να δίνει 25A για 10 ώρες, ενώ στη δεύτερη ότι το στοιχείο μπορεί να δίνει ρεύμα 3A για 120 ώρες. Είναι προφανές ότι η χωρητικότητα των στοιχείων μειώνεται συναρτήσει του ρεύματος εξόδου. Έτσι, η συνολική ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν είναι  $60 \cdot 250 = 15000$  Wh=15KWh για ρεύματα εκφόρτισης 25A, ή  $60 \cdot 370 = 22,2$  KWh για ρεύματα εκφόρτισης 3A.

Οι συσσωρευτές είναι τεχνολογίας μολύβδου αντιμονίου, και περιέχουν σαν ηλεκτρολύτη διάλυμα θεικού οξέως. Οι προδιαγραφές τους αναφέρουν διάρκεια ζωής 15 έτη, όταν χρησιμοποιούνται σαν εφεδρικοί, δηλαδή χωρίς να εκφορτίζονται/φορτίζονται συνεχώς. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται έλεγχος για την τάση της διάταξής τους. Αποτελούν την καταλληλότερη επιλογή για χρήση σε υβριδικό δίκτυο, καθώς έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, και την ικανότητα να εκφορτίζονται βαθιά. Με βάση τις προδιαγραφές μπορούν να πραγματοποιήσουν το λιγότερο 1200 κύκλους για ένα βαθμό εκφόρτισης έως και 80% με ρεύμα C/10, δηλαδή  $250/10 = 25$  A. Για βαθμούς εκφόρτισης μέχρι και 50%, οι κύκλοι μπορούν να φτάσουν και τους 3000. Αυτές οι τιμές βάθους εκφόρτισης και ρεύματος είναι οι μέγιστες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον τύπο συσσωρευτών.



*Εικόνα 2.18 Συσσωρευτές μικροδικτύου*



## 2.5.2 Αντιστροφέας συσσωρευτών

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, ο αντιστροφέας των συσσωρευτών αποτελεί την καρδιά του υβριδικού μικροσυστήματος. Είναι ο δίαυλος μεταξύ των συσσωρευτών και του υπόλοιπου συστήματος. Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε ο αντιστροφέας ισχύος Sunny Island 4500. Η παρουσία του προορίζεται βασικά για χρήση σε αυτόνομα μικρά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας που δεν είναι διασυνδεδεμένα με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Όμως, και σε περίπτωση διασυνδεδεμένου δικτύου μπορεί να λειτουργήσει σαν μονάδα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS), εντοπίζοντας μια τυχαία διακοπή της τάσης του κεντρικού δικτύου, και τροφοδοτώντας άμεσα τα φορτία του μικροδικτύου. Σε αντίθεση με τους υπόλοιπους inverters του μικροδικτύου, δηλαδή τα sunny boy και windy boy, παρέχει τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος ανάμεσα σε υβριδικό και κεντρικό δίκτυο, και αυτός είναι ο παράγοντας που τον καθιστά το σημαντικότερο στοιχείο της διάταξης.



*Εικόνα 2.19 Sunny Island 4500*

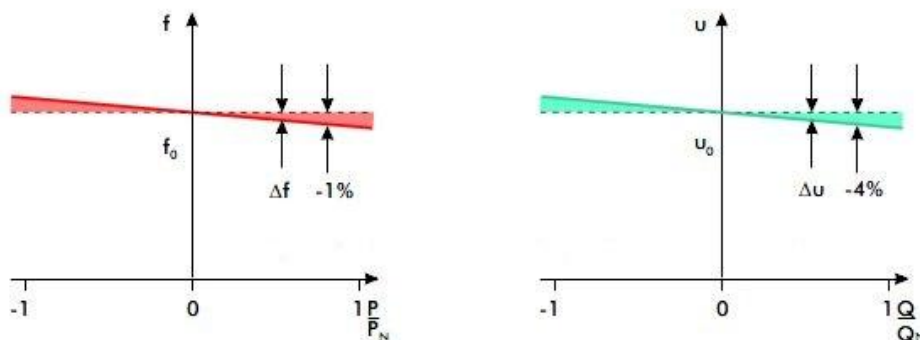
Σε λειτουργία αυτόνομου δικτύου (Island mode), βασικός σκοπός του αντιστροφέα είναι να ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα του δικτύου. Κύρια λειτουργία του είναι να συνδυάζει την παραγόμενη ισχύ των Φ/Β και της ανεμογεννήτριας με την ισχύ που μπορούν να δώσουν οι συσσωρευτές, ώστε να καλύπτει κάθε χρονική στιγμή τις ανάγκες των φορτίων. Με άλλα λόγια, όταν υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ισχύος από τις διεσπαρμένες πηγές ενέργειας, ο Sunny Island φροντίζει να φορτιστούν με αυτή οι μπαταρίες. Αντίστοιχα, όταν υπάρχει έλλειψη ισχύος φροντίζει να καλύψει το κενό με την ενέργεια των συσσωρευτών. Σε περίπτωση που υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ισχύος, και οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι, ο Sunny Island θέτει σε λειτουργία ένα βοηθητικό φορτίο (πχ. αντιστάσεις), το οποίο απορροφά την υπερπαραγωγή, είτε διακόπτει εντελώς τη λειτουργία της παραγωγής. Η ιδιότητα του αυτή είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς η ροή περίσσειας ισχύος προς το κεντρικό δίκτυο μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές για τα φορτία συνέπειες, όπως θα μελετηθεί σε παρακάτω κεφάλαιο.

Εξετάζοντας πάντα την περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας του μικροδικτύου, ο αντιστροφέας Sunny Island είναι δυνατό να λειτουργήσει με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- λειτουργία RUN-U χωρίς έλεγχο droops, με τον αντιστροφέα να καθορίζει την τάση και τη συχνότητα στην ονομαστική τους τιμή,
- λειτουργία RUN-U με έλεγχο droops, με τον αντιστροφέα να ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα με βάση τις καμπύλες στατισμού του, δηλαδή σύμφωνα με την ενεργό και άεργο ισχύ που παρέχει.

Στη λειτουργία RUN-U χωρίς droops, ο inverter προσπαθεί να κρατά την τάση και τη συχνότητα του δικτύου στις ονομαστικές τιμές που έχουν οριστεί.

Στη λειτουργία RUN-U με droops, ο αντιστροφέας καθορίζει την ενεργό και άεργο ισχύ που παράγει, βασιζόμενος στις καμπύλες στατισμού του. Ανάλογα με την ενεργό και άεργο ισχύ που απορροφά ή παρέχει ( $P/P_N$  και  $Q/Q_N$  αντίστοιχα εκφρασμένες ως κλάσματα της ονομαστικής), θα μεταβάλλει τη συχνότητα και την τάση εξόδου κατά  $\Delta f$  και  $\Delta Q$ , όπως προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα :



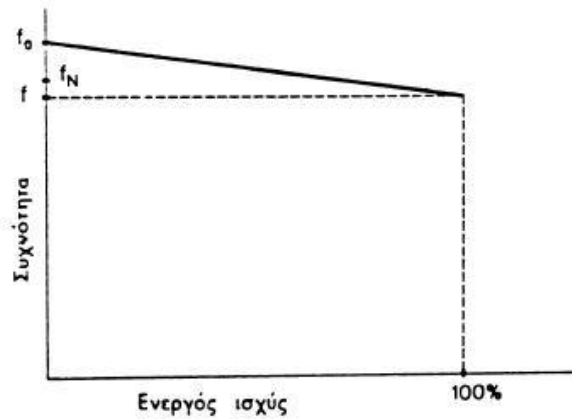
**Εικόνα 2.20** Χαρακτηριστικές κλίσεις στατισμού  $P-f$  και  $Q-V$  του Sunny Island

Για συγκεκριμένη τιμή της κλίσης στατισμού droop $f$  και ονομαστική συχνότητα  $f_0$ , ο αντιστροφέας αποκλίνει από την ονομαστική του συχνότητα κατά  $\Delta f$  που αντιστοιχεί σύμφωνα με την κλίση, στην ενεργό ισχύ  $\Delta P$  που ανταλλάσσει με το απομονωμένο μικροδίκτυο. Αντίστοιχος έλεγχος γίνεται και για την τάση. Για δεδομένη ονομαστική τάση  $V_0$  και τιμή της κλίσης τάσης - άεργου ισχύος droop $V$ , ο αντιστροφέας αποκλίνει από την ονομαστική του τάση κατά  $\Delta V$ , που σύμφωνα με την καμπύλη αντιστοιχεί στην τιμή  $\Delta Q$  που ανταλλάσσει με το απομονωμένο μικροδίκτυο. [9]

Πηγή κάθε μεγάλου ηλεκτρικού δικτύου είναι η σύγχρονη γεννήτρια, οι ιδιότητες της οποίας καθορίζουν βασικά τη συμπεριφορά του δικτύου στις μεταβολές της τάσης και της συχνότητας. Για αυτήν, η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι αντιστρόφως ανάλογη της



ενεργού ισχύος εξόδου αυτής. Ομοίως η τάση εξόδου αυτής είναι αντιστρόφως ανάλογη της αέργου ισχύος εξόδου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή της συχνότητας συναρτήσει της ενεργού ισχύος. Παρόμοια είναι και η χαρακτηριστική της τάσης συναρτήσει της αέργου ισχύος.

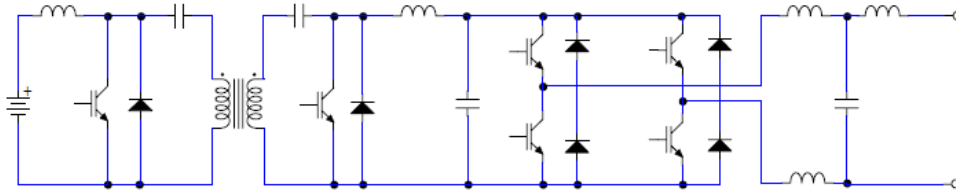


**Εικόνα 2.21** Χαρακτηριστική φορτίου - συχνότητας σύγχρονης γεννήτριας (στατισμός)[13]

Εύκολα συμπεραίνουμε ότι ο sunny island έχει προγραμματιστεί να λειτουργεί με βάση τις καμπύλες στατισμού, σε μια προσπάθεια να μιμηθεί τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνει το σωστό διαμοιρασμό ισχύος, και διευκολύνεται η διαμόρφωση της συχνότητας, χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα ροής μεγάλων αέργων ρευμάτων στη διάταξη.

Σε περίπτωση διασυνδεδεμένης λειτουργίας με το δίκτυο, η παρουσία του sunny island δεν είναι τόσο καθοριστικής σημασίας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να λειτουργήσει ως συσκευή αδιάλειπτης παροχής ισχύος. Σε περίπτωση διακοπής της σύνδεσης με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτήσει αυτόματα το μικροδίκτυο, με χρόνο μεταγωγής της τάξεως των millisecond.

Ο Sunny Island 4500 είναι ένας αντιστροφείας πηγής τάσης τεσσάρων τεταρτημορίων και ονομαστικής ισχύος 3300VA. Πρόκειται για μια διάταξη μετατροπέα DC/DC με μετασχηματιστή απομόνωσης υψηλής συχνότητας, και αντιστροφή διακοπτικού τύπου DC/AC που χρησιμοποιεί πλήρη γέφυρα τρανζίστορς IGBT. Παρακάτω δίνεται ένα απλοποιημένο σχεδιάγραμμα του αντιστροφέα :



**Εικόνα 2.22** Κυκλωματικό σχεδιάγραμμα του αντιστροφέα sunny island. Περιλαμβάνει φίλτρα πυκνωτών και πηνίων, αμφίδρομο μετατροπέα CUK (DC DC) με ενδιάμεσο μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και πλήρη γέφυρα τεσσάρων IGBT και διόδων ισχύος DC-AC αμφίδρομης ροής ισχύος. Τελευταίο το πηνίο σύνδεσης (coupling inductor)

Η τάση στην είσοδο του αντιστροφέα είναι η dc τάση των συσσωρευτών. Η συνεχής αυτή τάση μέσω πηνίου, εισέρχεται στον αμφίδρομο μετατροπέα CUK (DC/DC) που περιλαμβάνει μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας. Αυτός εξασφαλίζει τη γαλβανική απομόνωση της εισόδου από την έξοδο. Η συχνότητα των παλμών της τάσης στον μετασχηματιστή είναι 16,6KHz. Ο μετατροπέας CUK ελέγχεται από ένα κεντρικό ελεγκτή του αντιστροφέα (ελεγκτή που χρησιμοποιεί υπερτιθέμενο PI ελεγκτή), και ελέγχει την τάση του ενδιάμεσου κυκλώματος. Ο ελεγκτής αυτός λειτουργεί με τη μισή συχνότητα από αυτήν των παλμών της τάσης (8,3KHz). Η έξοδος του CUK είναι μια ελεγχόμενη τάση 360 Volt. Η συνεχής αυτή τάση, πάλι μέσω φίλτρων επαγωγέων και πυκνωτών εισέρχεται σε μια πλήρη γέφυρα των IGBT's όπου με τη μέθοδο της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη 230V/50Hz.

Τέλος η ημιτονοειδής τάση της γέφυρας μέσω του φίλτρου οδηγείται στην έξοδο του αντιστροφέα για να συνδεθεί με το δίκτυο χαμηλής τάσης. Το στάδιο εξόδου περιλαμβάνει επαγωγή συνδέσεως (coupling inductor) τιμής 0.8mH και φίλτρο πυκνωτή. Στην είσοδο του αντιστροφέα υπάρχει διπολικός αυτόματος διακόπτης συνεχούς ρεύματος (63A) και στην έξοδό του διπολικός αυτόματος διακόπτης 16A.

SI 4500		
<b>Output data</b>		
Rated AC voltage (adjustable)	$U_{AC}$	230 V (200 - 260 V)
Grid frequency (adjustable)	$f$	50 or 60 Hz (40 - 70 Hz)
Continuous AC output at 25 °C / 45 °C	$P_{nom}$	3700 / 3300 W
Continuous AC output at 25 °C for 30 / 5 / 1 min	$P_{30 / 5 / 1}$	4500 / 5200 / 6000 W
Rated AC current	$I_{AC, nom}$	16 A
Max. current (peak value) for 5 s		70 A
Output voltage harmonic distortion factor	$K_{VAC}$	< 3 %
Power factor	$\cos \phi$	-1 to +1
<b>Input data</b>		
Input voltage	$U_{AC, ext}$	230 V (150 - 260 V)
Input frequency	$f_{ext}$	50 or 60 Hz (40 - 70 Hz)
Max. AC input current	$I_{AC, ext}$	0 - 500 A (depends on external wiring)
Max. input power	$P_{AC, ext}$	depends on external wiring
<b>Battery data</b>		
Battery voltage (range)	$U_{Bat}$	48 - 60 V (41 - 81 V)
Max. battery charging current	$I_{Bat, max}$	125 A
Continuous charging current	$I_{Bat, nom}$	60 A
Battery capacity	$C_{Bat}$	100 - 10000 Ah
Charge control		IU0U with automatic full charge and equalization charge
<b>Efficiency/power consumption</b>		
Max. efficiency (typical)	$\eta$	> 91 %
Own consumption (no load/standby)		60 W (< 9 W)

**Εικόνα 2.23** Τεχνικά χαρακτηριστικά Sunny Island 4500

## 2.6 Άλλες διατάξεις του μικροδικτύου

Για τη συνολική παρακολούθηση και έλεγχο του μικροδικτύου χρησιμοποιείται το Sunny Web Box. Συλλέγει όλα τα δεδομένα των inverters, και ενημερώνει ανά πάσα στιγμή για την κατάσταση της εγκατάστασης, προβάλλοντας τα αποτελέσματα στην οθόνη του υπολογιστή μας.

Για τη σύνδεση - αποσύνδεση του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο χρησιμοποιείται μικροαυτόματος Hager ES240, ο οποίος και ελέγχεται από τον αντιστροφέα. Σε κάθε ζυγό (φορτία, αντιστροφέα φωτοβολταϊκών, αντιστροφέα sunny island, δίκτυο) υπάρχουν βολτόμετρα, αμπερόμετρα και ασφάλειες.

Τέλος, σαν φορτία χρησιμοποιούνται κοινοί λαμπτήρες (ωμικά φορτία), σύγχρονοι ηλεκτρονικοί λαμπτήρες, οι οποίοι παρουσιάζουν και ωμική αλλά και επαγωγική συμπεριφορά, μονοφασικός κινητής εναλλασσόμενου ρεύματος, πηνία, πυκνωτές και αντιστάσεις του εργαστηρίου ελεγχόμενες από πίνακα μέσω διακοπών.

## Κεφάλαιο 3

# Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Ρύθμιση Τάσης

### 3.1 Εισαγωγή στα δίκτυα διανομής

Τα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) μπορούν να διακριθούν γενικά στα ακόλουθα τμήματα:

- ✓ Τους Σταθμούς Παραγωγής,
- ✓ Τα Δίκτυα Μεταφοράς, που διασυνδέουν τους Σταθμούς Παραγωγής μεταξύ τους, και μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες ποσότητες κοντά στα μεγάλα κέντρα καταναλώσεως,
- ✓ Τα Δίκτυα Διανομής (ΔΔ), με τα οποία η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές (βιομηχανίες, κατοικίες κλπ.).

Η τροφοδότηση (σύνδεση) των καταναλωτών από το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας γίνεται ανάλογα με τη μέγιστη απορροφούμενη ισχύ τους. Έτσι, για το Σύστημα της ΔΕΗ διακρίνουμε τρεις κατηγορίες Καταναλωτών:

- Τους Καταναλωτές Υψηλής Τάσεως - ΥΤ (150kV) - για ισχείς άνω των 10MW,
- Τους Καταναλωτές Μέσης Τάσεως - ΜΤ - για ισχείς άνω των 200KW (ή 100KW σε κέντρα πόλεων),
- Τους Καταναλωτές Χαμηλής Τάσεως - ΧΤ. [14]

Τα δίκτυα διανομής καλύπτουν όλη την εξυπηρετούμενη περιοχή και φθάνουν μέχρι και τον τελευταίο καταναλωτή. Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής :

- a) Διανομή ΜΤ ή πρωτεύουσα διανομή,
- b) Διανομή ΧΤ ή δευτερεύουσα διανομή.

Το δίκτυο διανομής ΜΤ τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ, και τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής ΜΤ/ΧΤ και τους καταναλωτές ΜΤ. Η μέση τάση διανομής περιλαμβάνει τιμές από 6.6 έως 20 kV.

Οι περιοχές καταναλώσεως ή φορτίου είναι αστικές, βιομηχανικές, υπεραστικές, αγροτικές ή μικτές, αντίστοιχος δε προς το είδος της περιοχής είναι και ο τύπος του δικτύου ΜΤ. Έτσι, στα κέντρα των πόλεων, ή γενικά σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας φορτίου, τα δίκτυα είναι κατά το πλείστο υπόγεια, δηλαδή οι γραμμές διανομής αποτελούνται από καλώδια (cables). Στις λοιπές περιοχές, τα δίκτυα είναι κατά κανόνα εναέρια.

Τα ΔΔ ΜΤ είναι συνήθως βροχοειδή αλλά λειτουργούν ακτινικά. Η βροχοειδής δομή επιτρέπει οικονομία γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησεως, ενώ η ακτινική λειτουργία επιβάλλεται από την απλότητα της προστασίας και της ροής της ενέργειας στα δίκτυα αυτά.

Η ΧΤ διανομής είναι εκείνη με την οποία τροφοδοτούνται οι οικιακοί καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής ΧΤ αναχωρούν από τους ζυγούς ΧΤ των υποσταθμών διανομής και τροφοδοτούν τις παροχές των καταναλωτών ΧΤ. Τα αστικά δίκτυα διανομής ΧΤ ιδίως των πυκνοκατοικημένων περιοχών είναι κατά κανόνα υπόγεια. [13]

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ΔΔ σε αντιπαραβολή με τα δίκτυα Μεταφοράς είναι ότι αποτελούνται από μεγάλο πλήθος στοιχείων (πχ. υποσταθμούς - Υ/Σ). Από το γεγονός αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία για τα ΔΔ η "τυποποίηση" των επιμέρους κατασκευαστικών τους στοιχείων, καθώς και του υλικού που χρησιμοποιείται σε αυτά, δεδομένου ότι πρόκειται για επαναλαμβανόμενες κατασκευές από πολλά διεσπαρμένα σε όλη τη χώρα συνεργεία.

### 3.2 Δομή των δικτύων διανομής

Στην παράγραφο αυτή θα δοθεί μια γενική εικόνα της δομής των δικτύων ΜΤ και ΧΤ, θα γίνει δηλαδή μια παρουσίαση των διαφόρων επιμέρους στοιχείων τους. Αρχικά δίνονται ορισμένοι ορισμοί που αφορούν τον εξοπλισμό τους.

#### 3.2.1 Μέσα ζεύξεως και προστασίας

Τα "μέσα ζεύξεως" χρησιμεύουν στα δίκτυα για την εκτέλεση των διαφόρων "χειρισμών", δηλαδή την ζεύξη - απόζευξη τμημάτων του δικτύου. Οι κύριες κατηγορίες είναι :

- Οι *Αποζεύκτες* ( $A/Z$ ) - (Isolators ή Disconnectors)
- Οι *Διακόπτες Φορτίου* ( $\Delta/\Phi$ ) - (Switches)
- Οι *Διακόπτες Ισχύος* (*βραχυκυκλώσεως*), ( $\Delta/I$ ) - (Circuit Breakers)

*Αποζεύκτες* ονομάζονται οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για το άνοιγμα ή το κλείσιμο ενός κυκλώματος, είτε όταν το ρεύμα που διακόπτεται είναι αμελητέο, είτε όταν δεν επέρχεται ουσιαστική μεταβολή στην τάση μεταξύ των πόλων όταν ανοίγει.

*Διακόπτες Φορτίου* ονομάζονται οι συσκευές που έχουν τη δυνατότητα να διακόπτουν, ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος, καθώς και αποκαθιστούν αλλά όχι να διακόπτουν εντάσεις ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

*Διακόπτες Ισχύος* ονομάζονται οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος, αλλά κυρίως υπό ορισμένες μη κανονικές συνθήκες, όπως είναι η περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Όλα τα μέσα ζεύξης που αναφέρθηκαν έχουν την ικανότητα να υφίστανται στην κλειστή θέση τη δίοδο υπερεντάσεων που οφείλονται σε βραχυκυκλώματα, επί ορισμένο μικρό χρονικό διάστημα, εκτός βεβαίως της ικανότητάς τους να διαρρέονται συνεχώς από το ονομαστικό τους ρεύμα.

Τα "μέσα προστασίας" χρησιμεύουν για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος ή στην πρόληψη βλάβης στοιχείων του δικτύου. Οι βασικές κατηγορίες είναι :

- Οι Διακόπτες Ισχύος ( $\Delta/I$ ), όταν δέχονται εντολές από τους Ηλεκτρονόμους (H/N) Προστασίας
- Οι Ασφάλειες (ΑΣΦ)

Στην πράξη χρησιμοποιούνται πολύ συχνά συνδυασμοί των παραπάνω μέσων ζεύξεως και προστασίας, οι συνηθέστεροι των οποίων είναι:

- $A/Z$  και  $\Delta/I$ , δεδομένου ότι το άνοιγμα των επαφών του  $\Delta/I$  μέσα στο θάλαμο σβέσεως του τόξου δεν εξασφαλίζει τη βέβαια απομόνωση του κυκλώματος,
- $\Delta/\Phi$  και ΑΣΦ, ώστε με τον  $\Delta/\Phi$  να υπάρχει η δυνατότητα χειρισμών ενώ με τις ΑΣΦ να εξασφαλίζεται η προστασία από βραχυκυκλώματα.

Η όλη κατασκευαστική διαμόρφωση των μέσων ζεύξεως και προστασίας διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το εάν προορίζονται για εγκατάσταση σε Εξωτερικό ή Εσωτερικό χώρο, και φυσικά ανάλογα με την τάση του δικτύου στο οποίο μπορεί να εγκαθίστανται. [14]

### 3.2.2 Εναέρια δίκτυα ΜΤ

Τα εναέρια δίκτυα ΜΤ ενδείκνυται να έχουν "δενδροειδή" μορφή. Αποτελούνται δηλαδή από τον "κορμό" ή "κύρια γραμμή" που κατασκευάζεται από αγωγούς μεγάλης διατομής, και τις "διακλαδώσεις" πάνω στις οποίες συνδέονται οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Οι διακλαδώσεις κατασκευάζονται με αγωγούς μικρότερης διατομής απ' ότι ο κορμός. Η δενδροειδής μορφή επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα στις αγροτικές περιοχές, όχι όμως και στις ημιαστικές, όπου οι υπάρχοντες περιορισμοί στην όδευση των γραμμών δεν το επιτρέπουν.

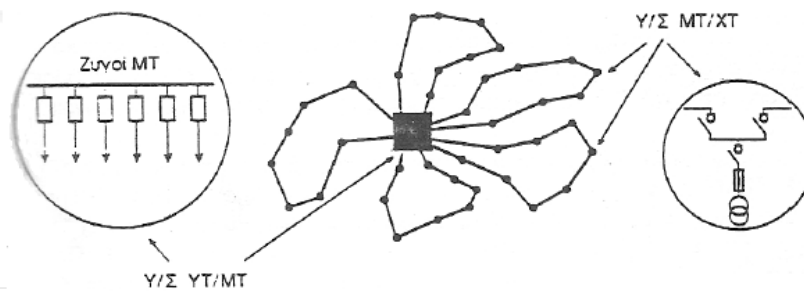
Οπωσδήποτε τα εναέρια δίκτυα ΜΤ λειτουργούν σχεδόν πάντα "ακτινικά" (ή "ανοιχτά"), δηλαδή όλες οι γραμμές, από τις οποίες αποτελείται το δίκτυο, τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους.

Σε πολλές χώρες (πχ. ΗΠΑ, Μεγ. Βρετανία) γίνεται εκτεταμένη χρήση  $A/Z$ , τόσο για την προστασία των Μ/Σ όσο και για την προστασία - απομόνωση των διακλαδώσεων. Την πολιτική αυτή ακολουθεί και η ΔΕΗ. Στις Ευρωπαϊκές χώρες γενικά οι γραμμές των εναερίων ΔΔ ΜΤ περιλαμβάνουν μόνο τους τρεις αγωγούς των φάσεων, δηλαδή δεν ακολουθεί ο ουδέτερος.

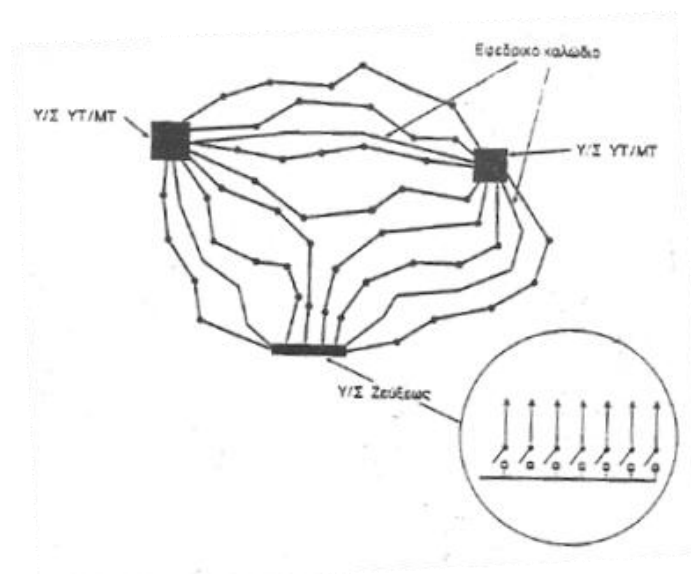
### 3.2.3 Υπόγεια δίκτυα MT

Τα υπόγεια δίκτυα MT τροφοδοτούν περιοχές με μεγάλη σχετικά πυκνότητα φορτίου, αλλά και με αυξημένες απαιτήσεις συνεχούς τροφοδοτήσεως. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι το απλό και οικονομικό σχήμα δικτύου που εφαρμόζεται στα εναέρια δίκτυα δεν επαρκεί. Για το λόγο αυτό στα υπόγεια δίκτυα MT ακολουθείται ο κανόνας του να υπάρχει δυνατότητα μετά από μια βλάβη, να επανατροφοδοτηθούν οι Υ/Σ MT/XT από άλλη οδό, μετά από την εκτέλεση ορισμένων χειρισμών ή και αυτόματα, χωρίς να προηγείται κατ' ανάγκη η επισκευή της βλάβης. Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται με τα παρακάτω τρία βασικά σχήματα και τις αντίστοιχες παραλλαγές τους:

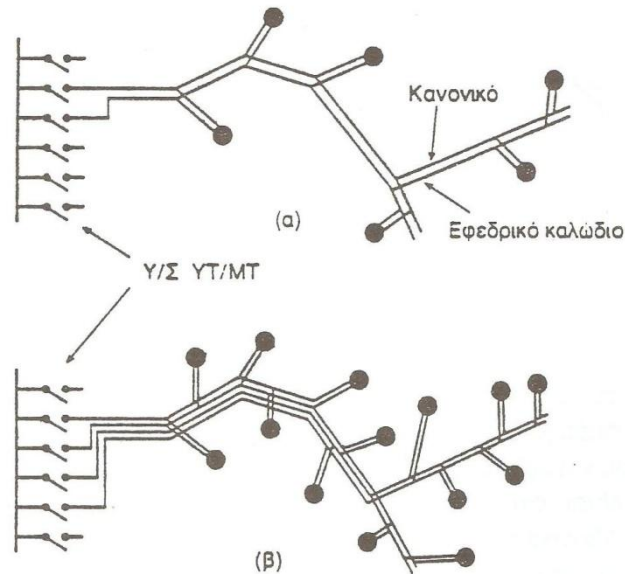
- Το "βροχοειδές", που χαρακτηρίζεται από το ότι οι γραμμές αποτελούν τμήματα βρόχου που αρχίζουν και τελειώνουν στον ίδιο Υ/Σ YT/MT,
- Το "ατρακτοειδές" που χαρακτηρίζεται από το ότι οι γραμμές αρχίζουν από ένα Υ/Σ YT/MT και καταλήγουν σε ένα άλλο ή καταλήγουν σε ένα "Υ/Σ ζεύξεως".
- Το δίκτυο "διπλής τροφοδότησης" το οποίο συνίσταται από παράλληλες ακτινικές γραμμές, και σε κάθε Υ/Σ YT/MT φέρονται τροφοδοτήσεις από δύο γραμμές. Από αυτές η μία χρησιμεύει ως "κανονική" τροφοδότηση, και η άλλη ως "εφεδρική".



Εικόνα 3.1 Βροχοειδές δίκτυο MT



Εικόνα 3.2 Ατρακτοειδές δίκτυο



**Εικόνα 3.3** Σχήμα "διπλής τροφοδοτήσεως" (α) σε αρχική, (β) σε επόμενη φάση αναπτύξεως [14]

Όπως μπορούμε να καταλάβουμε, ο εντοπισμός της θέσης μιας βλάβης και η αποκατάστασή της σε ένα εναέριο δίκτυο είναι γενικά εύκολη υπόθεση και απαιτεί χρόνο μερικών ωρών. Αντίθετα, η ίδια διαδικασία σε ένα υπόγειο καλώδιο είναι πολύ πιο σύνθετη εργασία που μπορεί να διαρκέσει συνολικά και περισσότερο από 24 ώρες. Συνεπώς, η επιλογή των παραπάνω σχημάτων για τα υπόγεια δίκτυα είναι μονόδρομος. Η καταλληλότητα ενός σχήματος επηρεάζεται άμεσα από τις γεωγραφικές συνθήκες της περιοχής όπου θα εγκατασταθεί, καθώς και την κατανομή των φορτίων και την προοπτική ανάπτυξής του στο μέλλον. Ειδικότερα, η δυνατότητα εύκολης ανάπτυξης και προσαρμογής ενός σχήματος υπογείου δικτύου αποτελεί βασικό πλεονέκτημα.

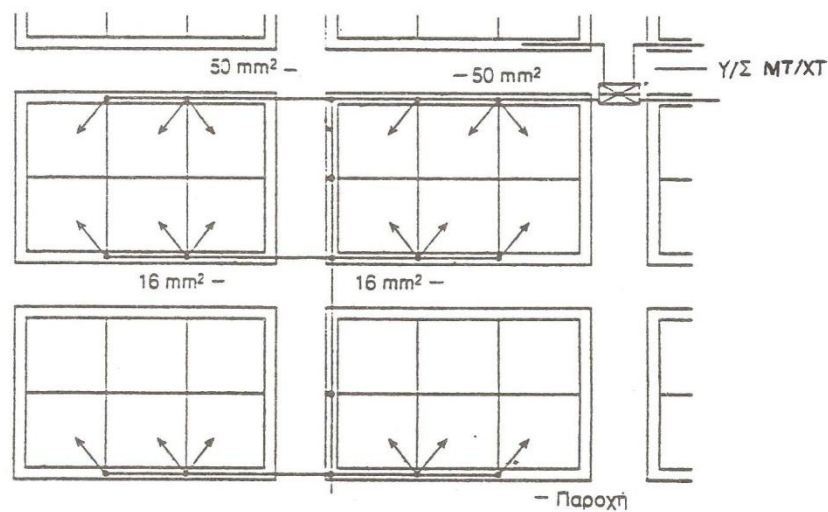
Στη χώρα μας εφαρμόζονται αποκλειστικά τα βροχοειδή σχήματα, αλλά και διεθνώς είναι συνηθέστερα. Για να περιορίζεται ο χρόνος εντοπισμού του σφάλματος στα βροχοειδή δίκτυα εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια διάφορα συστήματα. Το απλούστερο συνίσταται στην εγκατάσταση "ενδεικτικών Η/Ν", οι οποίοι σημειώνουν αν η ένταση που προκάλεσε το βραχυκύκλωμα "πέρασε" από τη θέση εγκατάστασής του. Η ένδειξη αυτή μπορεί να μεταφέρεται σε ένα "κέντρο ελέγχου" του ΔΔ.

### 3.2.4 Εναέρια δίκτυα ΧΤ

Η διαμόρφωση των εναέριων δικτύων ΧΤ, είτε αυτά κατασκευάζονται με γυμνούς ή με μονωμένους αγωγούς, είναι απλούστερη των υπογείων, ενώ κατά γενικό κανόνα δεν προβλέπονται δυνατότητες διπλών τροφοδοτήσεων.



Χρησιμοποιούνται συνήθως περισσότερες της μιας διατομές αγωγών, συχνά δε, ιδίως στις αγροτικές περιοχές, οι γραμμές δεν είναι τριφασικές, αλλά μονοφασικές, δηλαδή αποτελούνται από μια φάση και τον ουδέτερο.

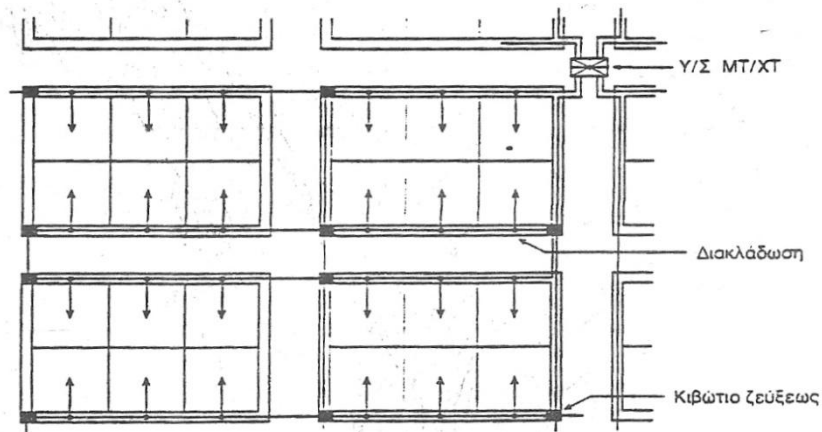


*Εικόνα 3.4 Ενδεικτικό σχήμα εναέριου δικτύου ΧΤ, από Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ 4 αναχωρήσεων*

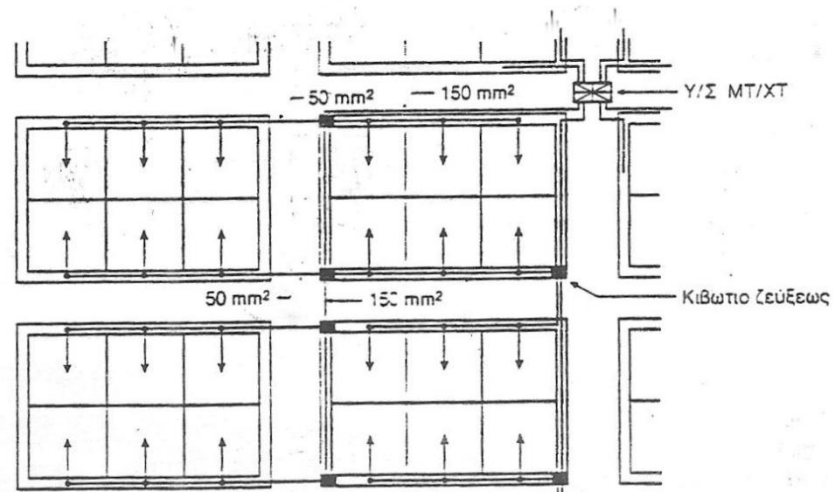
### 3.2.5 Υπόγεια δίκτυα ΧΤ

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να σχεδιαστεί ένα ακτινικό υπόγειο δίκτυο ΧΤ:

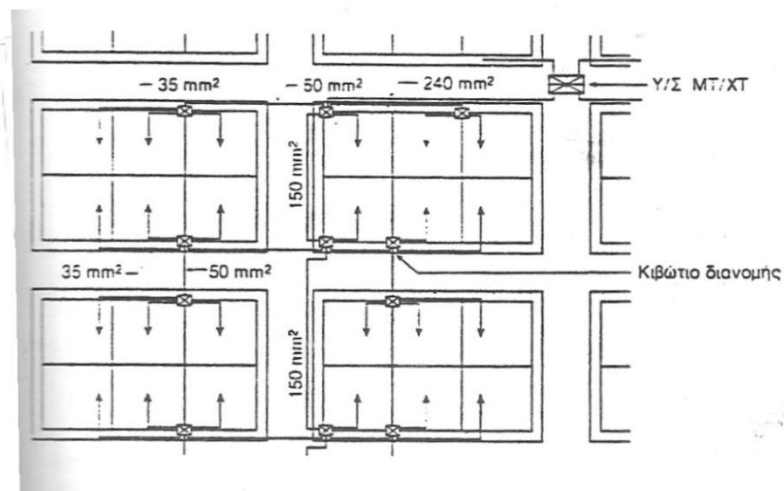
- Χρησιμοποιούνται καλώδια ενιαίας διατομής. Το δίκτυο διαμορφώνεται ώστε να υπάρχει η δυνατότητα διπλής τροφοδότησης μετά από χειρισμούς κάθε πλευράς οικοδομικού τετραγώνου, με το σχηματισμό βρόχων (κατασκευαστικά κλειστών αλλά λειτουργικά ανοιχτών). (Εικόνα 3.5)
- Διαμορφώνονται κύριοι βρόχοι, ανά δύο αναχωρήσεις από τον Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ, αλλά η τροφοδότηση των καταναλωτών γίνεται ακτινικά με καλώδια μικρότερης διατομής, ή και της ίδιας για λόγους ομοιομορφίας). (Εικόνα 3.6)
- Δεν υπάρχουν κατασκευαστικά κλειστοί βρόχοι, χρησιμοποιούνται δε καλώδια πολλών διατομών, ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί φορτίσεως και πτώσεως τάσεως, χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα διπλής τροφοδότησης σε περίπτωση βλάβης. (Εικόνα 3.7)



*Εικόνα 3.5 Ενδεικτικό σχήμα υπογείου δικτύου ΧΤ με διπλή δυνατότητα τροφοδότησης*



*Εικόνα 3.6 Ενδεικτικό σχήμα υπογείου δικτύου ΧΤ με απλή τροφοδότηση των καταναλωτών*



*Εικόνα 3.7 Ενδεικτικό σχήμα υπογείου δικτύου ΧΤ με χρησιμοποίηση "κιβωτίων διανομής"*

Ο τρόπος (α) προσφέρει μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησεως από τον (γ), αλλά οδηγεί σε μεγαλύτερη δαπάνη κατασκευής, ενώ ο (β) βρίσκεται μεταξύ των δύο. Άλλα πλεονεκτήματα του τρόπου (α) είναι ότι προσφέρεται για περιπτώσεις που προβλέπεται ταχεία και μεγάλη αύξηση των φορτίων στο μέλλον, οπότε για την αντιμετώπισή τους αρκεί η πύκνωση των Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Γενικότερα ενδείκνυται για περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου και είναι ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος σε μεγάλες πόλεις.

Είναι φανερό πως υπάρχει η δυνατότητα πολλών παραλλαγών των παραπάνω τύπων υπογείου δικτύου, κάθε μία των οποίων αποτελεί προσαρμογή στις υφιστάμενες συνθήκες δόμησης και την τεχνολογία του υλικού (κιβωτίων διακλαδώσεως, συνδέσεως, διανομής κλπ) που χρησιμοποιείται. [14]

### 3.3 Συμβατικά μέσα ρύθμισης της τάσης

Κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου παρατηρείται συνεχής μεταβολή του φορτίου στο σύστημα, με αποτέλεσμα οι τάσεις του δικτύου να μεταβάλλονται αργά κατά τη διάρκεια της ημέρας, μειούμενες κατά τις ώρες μεγάλου φορτίου και αυξανόμενες κατά τις νυχτερινές ώρες. Ο έλεγχος της διακύμανσης αυτής της τάσης μπορεί να γίνει κατά τρόπο εφικτός με αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού των μετασχηματιστών ισχύος, ή με ειδικούς μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης. Επίσης το μεγαλύτερο ποσοστό των φορτίων που τροφοδοτούνται από ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι επαγωγικού χαρακτήρα, και συνεπώς απαιτείται η χορήγηση αέργου ισχύος από το σύστημα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος της εγχύσεως αέργου ισχύος σε αυτό με πυκνωτές εν παραλλήλω για τη βελτίωση της τάσης του δικτύου. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές αντιστάθμισης είναι σύγχρονοι και στατοί.

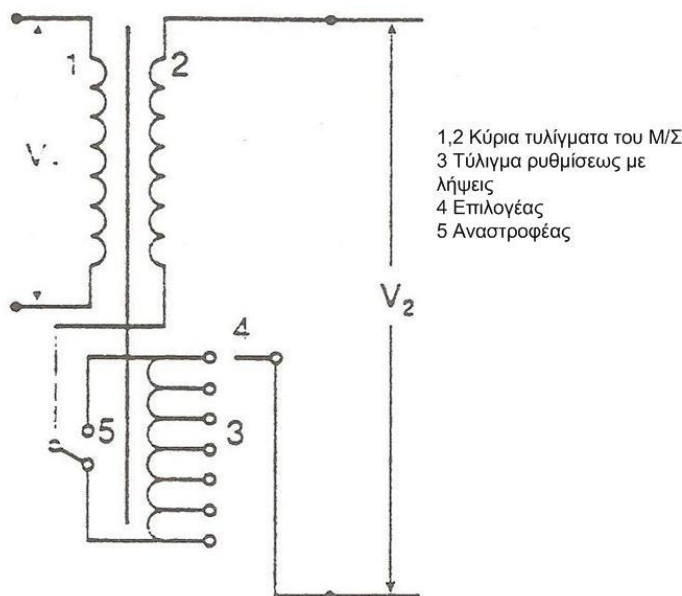
Τα μέσα (εξοπλισμός) που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της τάσης των δικτύων Διανομής, είναι κυρίως τα ακόλουθα:

- a) Οι "Ρυθμιστές Τάσης (PT) υπό φορτίο", οι οποίοι μπορούν να διακριθούν:
  - Στους ενσωματωμένους στους Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ.
  - Στους ανεξάρτητους, οι οποίοι εγκαθίστανται στην αρχή ή κατά μήκος των γραμμών ΜΤ.
- b) Οι "Πυκνωτές", οι οποίοι εγκαθίστανται:
  - Στους ζυγούς ΜΤ των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (όταν πρόκειται να συμβάλουν στη ρύθμιση της ροής φορτίων και τάσεων κυρίως του συστήματος Μεταφοράς).
  - Επί των γραμμών ΜΤ ή (σπανιότερα) και επί των γραμμών ΧΤ.
- c) Οι "Λήψεις" των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ, οι οποίες μπορεί να μεταβάλλονται μόνον όταν ο Μ/Σ είναι αποσυνδεδεμένος από το δίκτυο.

### 3.3.1 Ρυθμιστές τάσης υπό φορτίο

#### A) Ρυθμιστές ενσωματωμένοι στους Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ

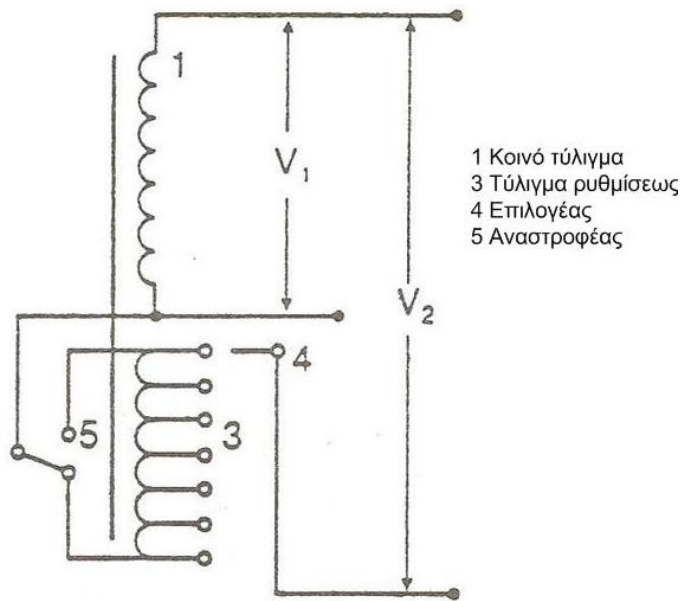
Στην *Εικόνα 3.8* δείχνεται σχηματικά η σύνδεση των τυλιγμάτων μιας φάσεως ενός Μ/Σ με ρυθμιστή τάσης υπό φορτίο. Σε σειρά προς ένα από τα δύο κύρια τυλίγματα του Μ/Σ (συνηθέστερα το πρωτεύον), συνδέεται το "Τύλιγμα ρυθμίσεως". Το τύλιγμα αυτό περιλαμβάνει πολλές λήψεις, η επαγόμενη δε σε αυτό τάση μπορεί να προστίθεται ή αφαιρείται στην τάση του κυρίου τυλιγματος, μέσω του "Αναστροφέα". Συνήθως η τάση ρυθμίσεως κυμαίνεται σε ποσοστό  $\pm 10\%$  της τάσης του κύριου τυλιγματος (και σπανιότερα μέχρι  $\pm 15\%$ ) σε σταθερά βήματα, μεγέθους περί το 1% της ονομαστικής τάσης. Από τα μεγέθη αυτά προκύπτει εύκολα ο αριθμός των λήψεων. Πχ. με  $\pm 10\%$  και 1.25% θα έχει 16 λήψεις.



*Εικόνα 3.8* Σύνδεση ρυθμιστή τάσης υπό φορτίο σε Μ/Σ (μία φάση)

#### B) Ανεξάρτητοι ρυθμιστές

Στην περίπτωση αυτή, δεδομένου ότι ο λόγος μεταφοράς είναι μικρός (πχ. 1 προς 1.1), λόγοι οικονομικότητας οδηγούν στη χρήση Αυτομετασχηματιστή (ΑΜ/Σ) σε συνδυασμό βέβαια με το μηχανισμό αλλαγής τάσης υπό φορτίο. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σύνδεση μιας μόνο φάσεως ενός ΑΜ/Σ με ρύθμιση τάσης υπό φορτίο, κατ' αντιστοιχία της *Εικόνας 3.8*, που αναφέρεται σε Μ/Σ.



**Εικόνα 3.9** Σύνδεση ανεξάρτητου ρυθμιστή τάσης (μια φάση)

Η περιοχή ρυθμίσεως των ανεξάρτητων ρυθμιστών τάσης είναι κατά κανόνα  $\pm 10\%$ , σε βήματα 0.5% έως 1.5%. Ειδικότερα, κατά τις αμερικανικές τυποποιήσεις είναι 5/8% και 1 1/4%, οπότε έχουν 32 ή 16 βήματα αντίστοιχα. Με τα δεδομένα αυτά οι παραπάνω τύποι ΑΜ/Σ-ρυθμιστών χαρακτηρίζονται συχνά, με τη (φαινομένη) ισχύ που ρυθμίζουν και όχι με την πολλαπλάσια που μπορεί κατά μέγιστο να διέλθει από τη γραμμή στην οποία εγκαθίστανται. Πχ. ένας ΑΜ/Σ-ρυθμιστής ονομαστικής ισχύος 500KVA, με περιοχή ρυθμίσεως  $\pm 10\%$ , μπορεί να εγκαθίσταται σε μια γραμμή, και να διέρχεται δι' αυτού ισχύς 5000KVA.

Οι μεγάλης ισχύος ρυθμιστές τάσης είναι συνήθως τριφασικοί. Συχνά όμως, ιδίως για μικρές ισχύεις, χρησιμοποιούνται μονοφασικοί. Χαρακτηριστικό των μονοφασικών ρυθμιστών τάσης είναι ότι αρκούν δύο ρυθμιστές για να επιτευχθεί ρύθμιση της τάσης.

Πλεονεκτήματα των μονοφασικών ρυθμιστών είναι ότι αρχικά μπορούν να εγκαθίστανται δύο ρυθμιστές και αργότερα τρεις - όταν αυξηθούν τα φορτία και συνεπώς οι πτώσεις τάσης. Επιπλέον, σε περίπτωση βλάβης ενός μπορεί να διατηρούνται οι άλλοι δύο. Μειονέκτημα των δύο ρυθμιστών είναι το ότι προκύπτει μία μετάθεση του ουδέτερου κόμβου.

### 3.3.2 Πυκνωτές

Λόγω της σύνδεσης μεγάλου αριθμού φορτίων επαγωγικού χαρακτήρα στο δίκτυο, προκαλείται μεγάλη πτώση τάσης (ορισμένες φορές εκτός επιθυμητών ορίων) στους ζυγούς. Για το λόγο αυτό, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιούμε την έγχυση αέργου ισχύος με τη σύνδεση πυκνωτών. Η πρόσθετη αυτή άεργος ισχύς καταναλώνεται σαν απώλειες ( $I^2X$ ) αέργου ισχύος του δικτύου μεταφοράς και διανομής. Μερικές από τις επιπτώσεις της κυκλοφορίας της αέργου ισχύος στο σύστημα είναι :

- Πρόσθετες απώλειες ενεργού ισχύος ( $I^2R$ ) στις γραμμές και τον εξοπλισμό.
- Αυξημένη εγκατεστημένη ισχύς γραμμών και εξοπλισμού και επομένως αυξημένες επενδύσεις κεφαλαίων.
- Πτώση τάσης από την παραγωγή προς τις θέσεις των φορτίων.

Στην περίπτωσή μας μας ενδιαφέρει η τρίτη συνέπεια. Πυκνωτές με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης χρησιμοποιούνται κυρίως στα εναέρια δίκτυα ΜΤ. Σε μεγάλη έκταση χρησιμοποιούνται οι "παράλληλοι" πυκνωτές, ενώ οι πυκνωτές "σειράς" που συνδέονται ώστε να διέρχεται δια μέσου αυτών η ένταση της γραμμής, έχουν χρησιμοποιηθεί διεθνώς σε πολύ περιορισμένη έκταση.

Οι πυκνωτές συχνά εγκαθίστανται στους ζυγούς ΜΤ των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Η χρησιμοποίηση όμως των πυκνωτών αυτών γίνεται συνηθέστερα με κριτήρια τις ανάγκες του δικτύου Μεταφοράς. Αντίθετα όταν εγκαθίστανται επί των γραμμών ΜΤ, η εγκατάστασή τους αφορά σχεδόν αποκλειστικά τα ΔΔ.

Οι παράλληλοι πυκνωτές συνδέονται είτε μόνιμα ("Μόνιμοι πυκνωτές"), είτε μέσω διακοπών και διατάξεων αυτοματισμού ("Αποζεύξιμοι πυκνωτές"). Η διάταξη αυτοματισμού συνίσταται βασικά από ένα Η/Ν τάσεως, ο οποίος προκαλεί τη ζεύξη των πυκνωτών, όταν η τάση μειωθεί κάτω από μια ορισμένη τιμή (οπότε προκαλείται ανύψωση της τάσης), ή την απόζευξη, όταν η τάση υπερβεί μια άλλη ορισμένη τιμή.

### 3.3.3 Λήψεις των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ

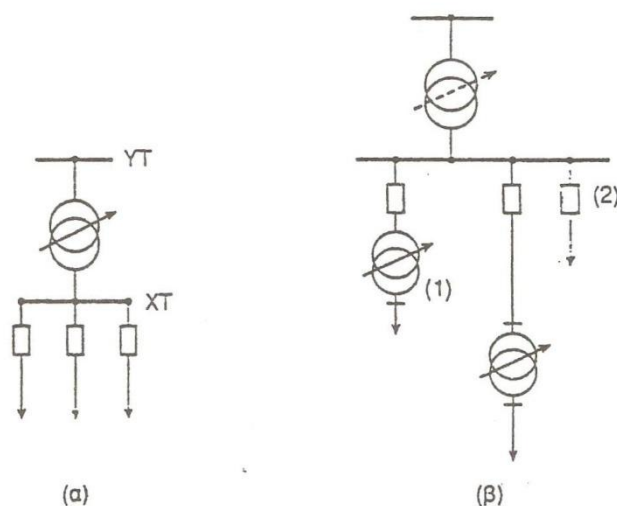
Ο κύριος προορισμός ενός Μ/Σ ισχύος είναι ο μετασχηματισμός της ενέργειας μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης. Εντούτοις, κάθε μετασχηματιστής ή αυτομετασχηματιστής είναι εφοδιασμένος με λήψεις για την αλλαγή της σχέσεως μετασχηματισμού, εκτελώντας με αυτό τον τρόπο το δευτερεύον καθήκον του ελέγχου της δευτερογενούς τάσης. Στους μεγάλους Μ/Σ και ΑΜ/Σ ΥΥΤ/ΥΤ ή ΥΤ/ΜΤ του δικτύου ο έλεγχος αυτός της τάσης γίνεται κατά κανόνα με αλλαγή της τάσης υπό φορτίο. Ωστόσο, στους μικρούς Μ/Σ διανομής ΜΤ/ΧΤ η αλλαγή των λήψεων μπορεί να γίνει μόνο με το μετασχηματιστή εκτός τάσεως. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σπουδαιότερους ή και όλους τους ζυγούς των υποσταθμών διασύνδεσης ή υποβιβασμού του δικτύου. Η περιοχή μεταβολής της τάσης στους μικρούς Μ/Σ διανομής είναι συνήθως  $\pm 5\%$ , ενώ τα βήματα αλλαγής της τάσης είναι  $2.5\%$  ή  $1.25\%$ .

Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ 20kV/0.4kV, με λήψεις  $\pm 2.5\%$  και  $\pm 5\%$ .

- Εάν ληφθεί η λήψη  $-5\%$ , τότε η τάση γίνεται 0,95 φορές την ονομαστική, δηλαδή 0,95pu/1,0pu ή αλλιώς 19kV/0.4kV.
- Ομοίως, αν λάβουμε τη λήψη  $+2.5\%$ , η τάση θα γίνει 1,025 της ονομαστικής, δηλαδή 1,025pu/1,0pu ή αλλιώς 20.5kV/0.4kV.

### 3.3.4 Θέση εγκατάστασης των ρυθμιστών τάσης

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι ρυθμιστές είναι ενσωματωμένοι στους Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Στις περιπτώσεις αυτές η προκαλούμενη ρύθμιση γίνεται ταυτόχρονα για όλες τις γραμμές ΜΤ που αναχωρούν από τον ίδιο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 3.10(α)*. Η ταυτόχρονη ρύθμιση δε δημιουργεί προβλήματα όταν τα φορτία των γραμμών μεταβάλλονται περίπου ταυτόχρονα, κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου, όπως συμβαίνει όταν είναι της ίδιας κατηγορίας (πχ. οικιακά). Αν όμως αυτό δε συμβαίνει, μπορεί να εγκαθίστανται είτε ανεξάρτητοι ρυθμιστές τάσης ανά γραμμή, όπως βλέπουμε στην *Εικόνα 3.10(β)*, είτε ανά ομάδες γραμμών, ενώ ο ρυθμιστής τάσης του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ καθορίζει τις ρυθμίσεις των λοιπών γραμμών, εφόσον βέβαια υπάρχει. Επιπλέον, γίνεται συχνά εγκατάσταση ανεξαρτήτων ρυθμιστών τάσης κατά μήκος των γραμμών, στον κορμό ή και στις διακλαδώσεις. [14]



**Εικόνα 3.10** Θέσεις εγκατάστασης ρυθμιστών τάσης

Το σύστημα αλλαγής της τάσης υπό φορτίο λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός του γίνεται εξ αποστάσεως και πολλές φορές αυτόματα. Στην τελευταία περίπτωση το σύστημα παίρνει εντολές από έναν κατάλληλο ηλεκτρονόμο τάσεως, οπότε ο έλεγχος της δευτερογενούς τάσης γίνεται με κλειστό βρόχο. Ο Η/Ν τάσης συγκρίνει την τάση εξόδου του Μ/Σ με μια προκαθορισμένη τάση αναφοράς, και αν διαπιστώσει διαφορά, δίνει εντολή ανυψώσεως ή μειώσεως της τάσης στο σύστημα αλλαγής.

## Κεφάλαιο 4

# Σύνδεση Φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση και Διερεύνηση Φαινομένου Ανύψωσης Τάσης

### 4.1 Εισαγωγή

Τα σύγχρονα συστήματα διανομής ενέργειας, που μελετήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχουν σχεδιαστεί για να αποδέχονται τη συνολική ισχύ που χρειάζονται στους Μ/Σ, και να τη διανέμουν στους καταναλωτές. Έτσι η ροή τόσο της ενεργού όσο και της αέργου ισχύος ήταν πάντοτε από τα υψηλότερα στα χαμηλότερα επίπεδα τάσης ("συγκεντρωμένη" παραγωγή).

Σήμερα με τη σημαντική διεύρυνση της διεσπαρμένης παραγωγής η ροή ισχύος μπορεί να αναστραφεί, και το δίκτυο διανομής να μην είναι πλέον ένα παθητικό δίκτυο που τροφοδοτεί φορτία, αλλά ένα ενεργό σύστημα όπου η ροή ισχύος και οι τάσεις καθορίζονται από τη διεύρυνση και τα φορτία.

Η αλλαγή στη ροή της ενεργού και της αέργου ισχύος που προκαλείται από τη διεσπαρμένη παραγωγή, έχει σημαντικές τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα εξετάζονται κυρίως τα τεχνικά ζητήματα της σύνδεσης και της λειτουργίας της διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής, ενώ οι περισσότερες χώρες έχουν αναπτύξει κριτήρια και πρακτικές για να αντιμετωπίζουν τέτοιες περιπτώσεις.

Γενικά η προσέγγιση που υιοθετείται είναι να βεβαιώνεται ότι η διεσπαρμένη παραγωγή δεν επηρεάζει την ποιότητα της ισχύος που παρέχεται στους καταναλωτές, και να θεωρούνται οι γεννήτριες σαν "αρνητικά φορτία". Οι οικονομικές συνέπειες τώρα αρχίζουν να μελετώνται, και γίνονται περισσότερο εμφανείς σε εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε απελευθερωμένες αγορές, όπου υπάρχει σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στην παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως συμβαίνει και στη χώρα μας.

### 4.2 Επιπτώσεις της σύνδεσης φωτοβολταϊκών στο δίκτυο

#### Αργές μεταβολές της τάσης

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένας τρόπος για τη ρύθμιση της τάσης στα δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης είναι η μεταβολή των λήψεων των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ όταν ο Μ/Σ είναι αποσυνδεδεμένος από το δίκτυο. Συνήθως οι λήψεις ρυθμίζονται έτσι ώστε κατά την αιχμή του φορτίου, ο πιο απομακρυσμένος ζυγός να έχει αποδεκτή τάση. Αν μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια συνδεθεί στο άκρο της γραμμής, τότε αλλάζει η ροή ισχύος στο



κύκλωμα, οπότε αλλάζουν και οι τάσεις στους κόμβους. Καθώς στα Φ/Β η παραγωγή ενέργειας σχετίζεται άμεσα με τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες και μεταβάλλεται ανάλογα με αυτές, μπορεί να προκληθεί έντονη διακύμανση της τάσης στα σημεία σύνδεσης.

Η χειρότερη δυνατή περίπτωση εμφανίζεται όταν το φορτίο βρίσκεται στην ελάχιστη τιμή του, και η παραγωγή της γεννήτριας είναι κοντά στη μέγιστη δυνατή. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει το ενδεχόμενο να ανυψωθεί η τάση πάνω από τα επιθυμητά επίπεδα. Το φαινόμενο αυτό θα μελετηθεί αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Με τον τρόπο αυτό προκαλούνται οι αργές μεταβολές της τάσης, οι οποίες είναι μεταβολές της τάσης μόνιμης κατάστασης που εκφράζονται από μέσες τιμές δεκαλέπτου της τάσης, και οφείλονται σε αντίστοιχες διακυμάνσεις του φορτίου ή της παραγωγής.

### Αύξηση της ισχύος ή στάθμης βραχυκύκλωσης

Η ισχύς ή στάθμη βραχυκύκλωσης είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους των δικτύων διανομής, που σχετίζεται άμεσα με την επιλογή του εξοπλισμού και των κατασκευών του δικτύου. Εκφράζει την αντοχή σε ρεύματα βραχυκύκλωσης, και δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερβαίνει το τυποποιημένο όριό της (για το δίκτυο ΜΤ των 20kV είναι  $S_k=250\text{MVA}$ ). Ουσιαστικά αποτελεί ένα μέγεθος που φανερώνει τη σθεναρότητα και την ακαμψία του δικτύου. Όσο μικρότερη είναι η στάθμη βραχυκύκλωσης, τόσο πιο ευαίσθητο είναι το δίκτυο σε μεταβολές της τάσης, καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ισοδύναμη αντίσταση του δικτύου στον αντίστοιχο ζυγό.

Οι εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) συνεισφέρουν στα βραχυκυκλώματα, και συνεπώς στην αύξηση της ισχύος βραχυκύκλωσης. Ωστόσο στην περίπτωση της σύνδεσης φωτοβολταϊκών γεννητριών, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, η συνεισφορά στα σφάλματα είναι περιορισμένη, καθώς δε δύνανται να παρέχουν ρεύμα κατά πολύ μεγαλύτερο από το ονομαστικό τους. Στις αστικές περιοχές όπου η στάθμη βραχυκύκλωσης πλησιάζει τα όρια των διακοπών, η αύξηση της μπορεί να είναι ένα σημαντικό εμπόδιο στην ανάπτυξη της ΔΠ.

### Ποιότητα ισχύος

Δύο είναι οι παράμετροι που θεωρούνται σημαντικές για την ποιότητα ισχύος: οι μεταβολές της τάσης, καθώς και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης. Ανάλογα με την περίπτωση, η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί είτε να βελτιώσει, είτε να επιδεινώσει την ποιότητα της τάσης που παρέχεται στους υπόλοιπους χρήστες του δικτύου.

Ταχείες μεταβολές της τάσης είναι οποιεσδήποτε μεταβολές της ενδεικνύμενης (RMS) τιμής της τάσης, που συμβαίνουν σε χρονική διάρκεια από ένα κύκλο έως και αρκετά δευτερόλεπτα. Συμβαίνουν λόγω χειρισμών στις εγκαταστάσεις παραγωγής, ή και λόγω της μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων.

Η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να προκαλέσει μεταβατικές μεταβολές στην τάση αν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές ρεύματος κατά τη ζεύξη και την απόζευξη της γεννήτριας. Η αποσύνδεση της γεννήτριας ενώ αυτή λειτουργεί σε πλήρες φορτίο, μπορεί να προκαλέσει σημαντικές πτώσεις τάσης. Ωστόσο, στις Φ/Β γεννήτριες αυτό δεν παρατηρείται συχνά, καθώς κατά τη ζεύξη και την απόζευξη από το δίκτυο λειτουργούν με μικρή ισχύ εξόδου. Συνήθως οι γεννήτριες συνδέονται στο δίκτυο λίγο πριν την ανατολή του ήλιου, και αποσυνδέονται λίγο μετά τη δύση.

Μια άλλη διαταραχή της ποιότητας ισχύος που μπορεί να προκληθεί είναι το *flicker*. Οι εκπομπές *flicker* σχετίζονται με την οπτική ενόχληση λόγω διακυμάνσεων στη φωτεινότητα των λαμπτήρων πυράκτωσης. Αυτές οφείλονται στη μεταβλητότητα της τάσης τροφοδοσίας τους, που μπορεί να προκληθεί λόγω σύνδεσης στο δίκτυο εγκαταστάσεων ΔΠ. Η λειτουργία των εγκαταστάσεων της διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να προκαλέσει μεταβολές της τάσης στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ), καθώς και σε άλλα σημεία του δικτύου, οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν παρενόχληση λόγω flicker σε άλλους καταναλωτές.

Επίσης, καθώς η σύνδεση των μονάδων ΔΠ με το δίκτυο γίνεται μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, μπορεί να εγχυθούν στο δίκτυο αρμονικές συνιστώσες, που έχουν ως αποτέλεσμα την ύπαρξη *αρμονικών συνιστωσών* στις κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης. Η βασική αρμονική συνιστώσα συχνότητας 50Hz ονομάζεται θεμελιώδης συνιστώσα, ενώ οι συνιστώσες των οποίων η συχνότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους ονομάζονται αρμονικές. Αυτές προκαλούν δυσλειτουργίες τόσο στο ίδιο το δίκτυο και σε εγκαταστάσεις που είναι συνδεδεμένες σε αυτό, όσο και σε παρακείμενες ηλεκτρονικές συσκευές. Πρέπει επομένως να περιορίζεται η εκπομπή τους στα επιτρεπτά όρια, ώστε να μην παρενοχλείται η λειτουργία στοιχείων του δικτύου. Μέτρο της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης αποτελεί ο *συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD)*. Η τοποθέτηση φίλτρων είναι ο συνηθέστερη μέθοδος εξάλειψης αρμονικών.

Ο *συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD)* δίνεται από τη σχέση :  $THD(\%) = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2}$ , όπου  $U_1$  είναι η RMS τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης (συχνότητα  $f_1=50\text{Hz}$ ), και  $U_h$  η RMS τιμή της αρμονικής τάξης  $h$  (με συχνότητα  $hf_1$ ). Η ανώτερη τάξη αρμονικών που λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό του THD είναι 40<sup>η</sup> κατά IEC, και η 50<sup>η</sup> κατά IEEE. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση της δυνατότητας σύνδεσης συσκευών ΧΤ, και εξασφαλίζει ότι το αρμονικό περιεχόμενο υψηλών συχνοτήτων είναι επαρκώς χαμηλό, ώστε να μη χρειάζεται εξέταση των επιμέρους αρμονικών.

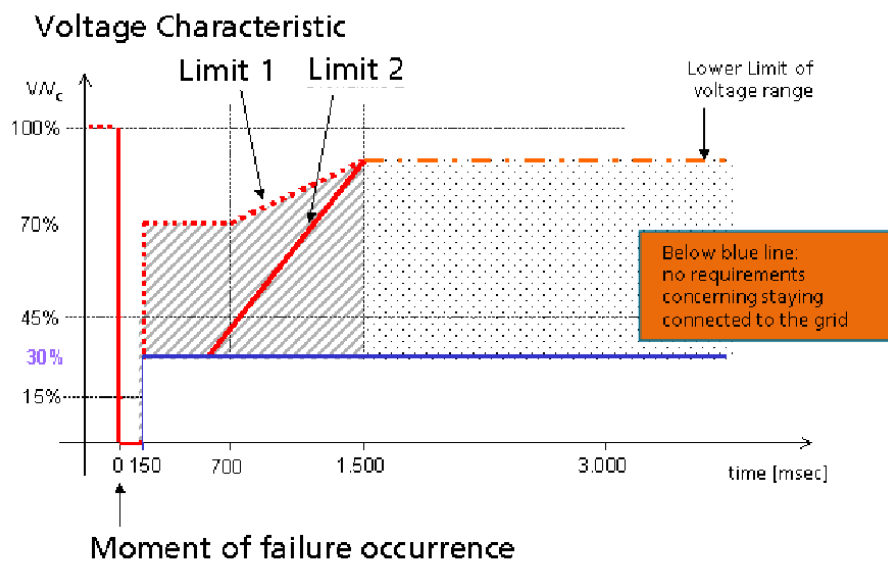
### Ευστάθεια του συστήματος

Συνήθως ο στόχος της ΔΠ είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνεπώς δεν ενδιαφέρει η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Ωστόσο, στην περίπτωση σφάλματος όπου θα μειωθεί η τάση του δικτύου, και η φωτοβολταϊκή γεννήτρια

θα βγει εκτός λειτουργίας, το μόνο που θα χαθεί είναι μια βραχεία περίοδος παραγωγής. Έτσι, όταν οι συνθήκες του δικτύου επανέλθουν στην κανονική λειτουργία, η γεννήτρια θα επανασυνδεθεί αυτόματα.

Αντίθετα, εάν η Φ/Β γεννήτρια θεωρηθεί ως πάροχος υποστήριξης για το σύστημα, η μεταβατική ευστάθεια γίνεται αξιοσημείωτη. Για παράδειγμα, εάν μια μεγάλη μονάδα παραγωγής τεθεί εκτός λειτουργίας, θα υπάρξει πρόβλημα υποσυχνότητας στο σύστημα. Εάν λόγω της εμφάνισης υποσυχνότητας τεθεί εκτός λειτουργίας και η φωτοβολταϊκή παραγωγή, το πρόβλημα θα γίνει ακόμη εντονότερο, καθώς θα υπάρχει μεγάλο έλλειμμα ισχύος. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια σε κάποιες χώρες έχει αρχίσει να υπάρχει η απαίτηση από τη ΔΠ να μην αποσυνδέεται αμέσως σε περίπτωση σφάλματος, αλλά να μπορεί να συνεισφέρει στην αποκατάσταση του λειτουργίας του δικτύου.

Αυτή η ικανότητα της Φ/Β γεννήτριας να παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο κατά τη βύθιση της τάσης ονομάζεται *Fault-Ride-Through (FRT)*. Η απαιτούμενη συμπεριφορά από τη μονάδα ΔΠ εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες: το μέγεθος της βύθισης τάσης, καθώς και η διάρκεια αυτής. Για παράδειγμα ακολουθεί το διάγραμμα των απαιτήσεων που έχει ο διαχειριστής του γερμανικού δικτύου από ένα τύπο γεννητριών:



**Εικόνα 4.1** Προδιαγραφές *Fault-Ride-Through* της γερμανικής EON [18]

Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η χρονική διάρκεια της βύθισης τάσης, ενώ στον κατακόρυφο άξονα η μεταβολή της τάσης. Όταν η διαταραχή βρίσκεται πάνω από την κόκκινη γραμμή, η γεννήτρια οφείλει να παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο.

#### Μέσα προστασίας του συστήματος

Η αμφίδρομη ροή ισχύος που οφείλεται στη διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στη λειτουργία των μέσων προστασίας του συστήματος, προκαλώντας

ενδεχομένως ένα εσφαλμένο άνοιγμα ενός διακόπτη. Οι προστασίες των Φ/Β γεννητριών θα πρέπει να συνεργάζονται με τις προστασίες του δικτύου, ώστε τα σφάλματα να γίνονται άμεσα αντιληπτά και να εκκαθαρίζονται το ταχύτερο δυνατό.

Ένα ζήτημα μεγάλης σημασίας είναι το φαινόμενο της απομονωμένης λειτουργίας (νησιδοποίησης). Πρόκειται για μια ανεπιθύμητη κατάσταση κατά την οποία ένα τμήμα του δικτύου λειτουργεί απομονωμένα από το υπόλοιπο δίκτυο, δηλαδή παραμένει ηλεκτροδοτημένο παρότι το υπόλοιπο δίκτυο είναι ανενεργό. Στην περίπτωση αυτή προκαλούνται διακυμάνσεις στην τάση και τη συχνότητα με την οποία τροφοδοτούνται οι τοπικοί καταναλωτές. Υπάρχει επίσης σοβαρός κίνδυνος ασφάλειας για το προσωπικό που εργάζεται σε κάποιο τμήμα του δικτύου όπου υπάρχει νησιδοποίηση, καθώς θεωρείται ότι το τμήμα αυτό είναι ανενεργό μαζί με το υπόλοιπο δίκτυο, ενώ στην πραγματικότητα τροφοδοτείται με τάση. Επομένως, είναι σημαντικό η εγκατάσταση ΔΠ να ανιχνεύει τη νησιδοποίηση και να αποσυνδέεται. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων που ανιχνεύουν την τάση και τη συχνότητα του δικτύου για ενδεχόμενες αντικανονικές συνθήκες.

Όσον αφορά την προστασία των Φ/Β γεννητριών από εσωτερικά σφάλματα, το ρεύμα σφάλματος που ρέει από το δίκτυο διανομής χρησιμοποιείται για την εύρεση του σφάλματος, και οι συνηθισμένες τεχνικές προστασίας είναι επαρκείς, οπότε πρόκειται για αρκετά απλή υπόθεση. Η προστασία του δικτύου διανομής ενώ βρίσκεται σε σφάλμα από το ρεύμα σφάλματος των γεννητριών είναι πιο δύσκολη υπόθεση. Όπως έχει αναφερθεί, οι Φ/Β γεννήτριες συνεισφέρουν στο σφάλμα σχεδόν με το ονομαστικό τους ρεύμα, οπότε οι προστασίες τους δεν είναι δυνατό να αντιληφθούν το σφάλμα, και να απομονώσουν τη γεννήτρια. Έτσι, είναι απαραίτητη η λειτουργία των προστασιών του δικτύου για την εκκαθάριση των σφαλμάτων και την απομόνωση της διεσπαρμένης παραγωγής. Στη συνέχεια, οι προστασίες υποσυχνότητας/υπερσυχνότητας, υπότασης/υπέρτασης, ή και η προστασία έναντι νησιδοποίησης θα θέσουν τη Φ/Β γεννήτρια εκτός λειτουργίας.

### Επάρκεια του δικτύου

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

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα πως η εισαγωγή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο θα πρέπει να συμβαδίζει με ορισμένους κανόνες, που αποσκοπούν στην παροχή ενέργειας αποδεκτής ποιότητας προς τους καταναλωτές. Οι κανόνες αυτοί στηρίζονται σε διεθνή αλλά και τοπικά πρότυπα, που καθορίζουν τις προϋποθέσεις διασύνδεσης. Η σύνδεση μονάδων παραγωγής στο δίκτυο πρέπει να ακολουθεί

αυτά τα πρότυπα, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους υπόλοιπους καταναλωτές, και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ δικτύου και εγκαταστάσεων. [19]

Από όλες τις ανεπιθύμητες ταραχές που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες σελίδες, μεγάλης σημασίας είναι το φαινόμενο της ανύψωσης της τάσης. Στην παρούσα εργασία θα αναζητήσουμε τρόπους για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό.

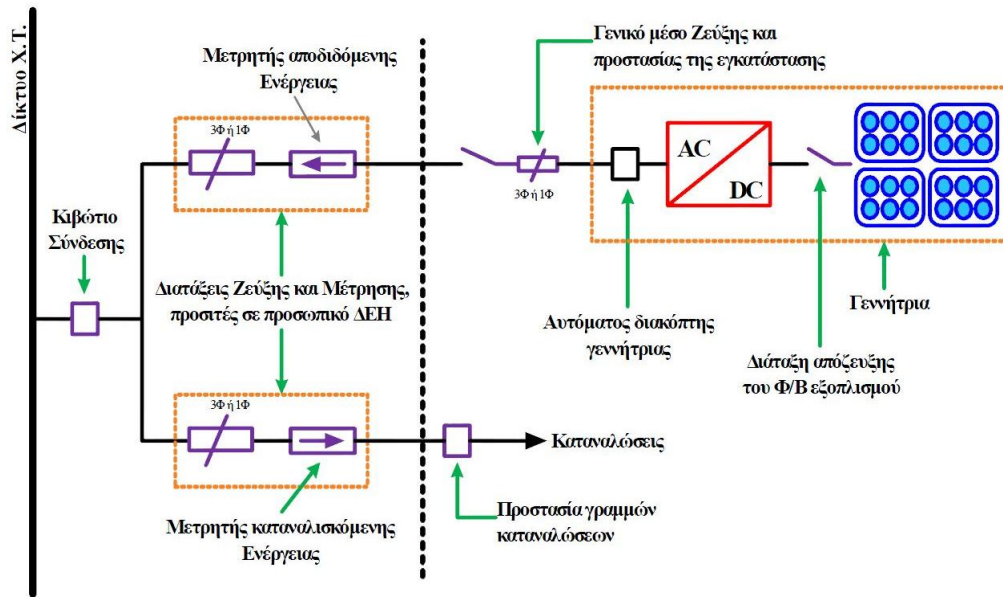
#### 4.3 Σύνδεση Φ/Β παραγωγών στη ΧΤ - Προδιαγραφές ΔΕΗ

Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής στο δίκτυο της ΔΕΗ αποτελεί αντικείμενο τεχνικοοικονομικής εξέτασης, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κεφαλαίου των έργων ενίσχυσης και επέκτασης του δικτύου, τις απώλειες ενέργειας κάθε τρόπου διασύνδεσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, αλλά και άλλους παράγοντες (χρόνος και δυνατότητα κατασκευής των έργων, χρηματοδότηση κλπ.) Στον ακόλουθο πίνακα δίνεται ενδεικτικά ο πιθανός τρόπος διασύνδεσης ανάλογα με την ισχύ του σταθμού:

Ενδεικτική συμφωνημένη ισχύς (MW)	Πιθανός τρόπος σύνδεσης στο δίκτυο
έως 0.1	Δίκτυο ΧΤ
έως 4	Δίκτυο ΜΤ, σε υφιστάμενη γραμμή (με πιθανή ενίσχυσή της)
έως 6	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής απλού κυκλώματος
έως 20	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής διπλού κυκλώματος
άνω των 20	Δίκτυο ΥΤ, με κατασκευή ιδιαίτερου Υ/Σ ανύψωσης ΥΤ/ΜΤ

*Εικόνα 4.2 Σύνδεση στο δίκτυο με κριτήριο την ισχύ του σταθμού[20]*

Όπως προκύπτει από την παραπάνω εικόνα, η σύνδεση γεννητριών παραγωγών στο δίκτυο ΧΤ επιτρέπεται για εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος μέχρι 100kW. Εγκαταστάσεις παραγωγής μπορούν να συνδέονται σε μια φάση μέχρι την ισχύ των 4.5kVA (5kWp για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις). Για ισχύ άνω των 5kW και μέχρι τα 100kW η σύνδεση στο δίκτυο ΧΤ πρέπει να γίνεται με τριφασική παροχή. Στην περίπτωση εγκατάστασης παραγωγής με περισσότερες μοναδιαίες εγκαταστάσεις/γεννήτριες, ο παραπάνω περιορισμός αφορά την κάθε μονάδα, υπό την προϋπόθεση όμως ότι οι μονάδες κατανέμονται ομοιόμορφα στις τρεις φάσεις.



**Εικόνα 4.3** Τυπική απλοποιημένη μορφή σύνδεσης Φ/Β συστημάτων με το ηλεκτρικό δίκτυο ΧΤ [21]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται μια τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο ΧΤ. Για λόγους ασφαλείας είναι βασική απαίτηση η ύπαρξη μέσων διακοπής με ικανότητα διακοπής ρεύματος φορτίου και ορατής απόζευξης, προσιτών ανά πάσα στιγμή στο προσωπικό της ΔΕΗ, ώστε να εξασφαλίζεται η απομόνωση του παραγωγού από το δίκτυο, όταν αυτό απαιτείται από τη ΔΕΗ. Η απαίτηση ορατής απόζευξης ικανοποιείται τόσο από το κιβώτιο σύνδεσης, όσο και από τις ασφάλειες της παροχής. Για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος τα μέσα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έκτακτες περιπτώσεις και για τη διακοπή της εγκατάστασης. Σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος είναι αναγκαία η ύπαρξη διακόπτη φορτίου ή ισχύος.

#### 4.3.1 Προϋποθέσεις για τη σύνδεση

Οι προϋποθέσεις που εξετάζονται για τη σύνδεση ενός φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής στο δίκτυο ΧΤ σχετίζονται με [22]:

- την επάρκεια του δικτύου,
- τις επιπτώσεις στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ),
- τη συμμετρική φόρτιση του δικτύου ΧΤ
- τη συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης.

#### Επάρκεια του δικτύου

Η σύνδεση φωτοβολταϊκών σταθμών παραγωγής στο δίκτυο ΧΤ αποφορτίζει τις γραμμές και τους Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Αυτό συμβαίνει γιατί μέρος της ζητούμενης ισχύος από τα φορτία

καλύπτεται από τους Φ/Β σταθμούς, και συνεπώς ρέει μικρότερη ισχύς στους αγωγούς και τους Μ/Σ. Για το λόγο αυτό, η εξέταση της επάρκειας των στοιχείων του δικτύου αφορά μόνο τη συνολική συνδεδεμένη παραγωγή, που δε θα πρέπει να υπερβαίνει την ονομαστική ικανότητα της γραμμής και του Μ/Σ. Το όριο φόρτισης των Μ/Σ είναι η ονομαστική ισχύς τους.

### Επιπτώσεις στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης

Οι προδιαγραφές που ελέγχονται στο ΣΚΣ είναι η ανύψωση τάσης, η αρμονική παραμόρφωση και η έγχυση συνεχούς ρεύματος. Όπως έχει αναφερθεί, η σύνδεση μιας Φ/Β γεννήτριας σε μια γραμμή ΧΤ μπορεί να προκαλέσει ανύψωση τάσης λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος. Η ανύψωση αυτή εξαρτάται από την ισχύ του σταθμού, τη θέση του επί της γραμμής, καθώς και το φορτίο της. Σύμφωνα με τις διατάξεις της ΔΕΗ [21], τα ανώτερα και κατώτερα όρια τάσης έχουν τυπικές τιμές +15% και -20% της ονομαστικής τάσης αντίστοιχα. Επίσης, με βάση το πρότυπο EN 50160 [22], προσδιορίζεται ότι η ενεργός (RMS) τιμή της τάσης θα πρέπει να είναι στο  $\pm 10\%$  της ονομαστικής τιμής της για το 95% του χρόνου μέσα σε μια εβδομάδα.

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

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

### Συμμετρική φόρτιση του δικτύου ΧΤ

Κατά τη σύνδεση των Φ/Β γεννητριών στο δίκτυο θα πρέπει να ελέγχεται η συμμετρική φόρτιση των φάσεων του δικτύου ΧΤ. Αυτό αφορά τόσο στην ισοκατανομή της ισχύος μια τριφασικής διάταξης στις τρεις φάσεις, όσο και στη σύνδεση περισσότερων της μιας Φ/Β διατάξεων σε μια γραμμή ΧΤ, όπου θα πρέπει κατά το δυνατόν να ισοκατανεμηθούν στις τρεις φάσεις. Σύμφωνα με τις οδηγίες της ΔΕΗ το ποσοστό ασυμμετρίας μεταξύ των τριών φασικών ρευμάτων δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% [21].

### Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στο δίκτυο ΧΤ, ένας Φ/Β σταθμός συνδεδεμένος με το δίκτυο συμβάλει στο βραχυκύκλωμα με την ονομαστική του ισχύ. Δεδομένου της μικρής συνολικής ισχύος που μπορεί να συνδεθεί σε μια γραμμή ΧΤ, δεν αναμένεται η σύνδεση των Φ/Β γεννητριών να οδηγήσει σε υπερβάσεις των ορίων.

Οι απαιτήσεις που θα πρέπει να καλύπτονται για τη διασύνδεση ενός Φ/Β συστήματος με το δίκτυο, σύμφωνα με τις οδηγίες του Διαχειριστή Δικτύου, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος	Απαιτηση
Τάση	Η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης στα άκρα του ηλεκτρονικού αντιστροφέα δεν πρέπει να υπερβαίνει το -20% (184V) ή το +15% (264.5V) της ονομαστικής τιμής της τάσης του δικτύου. Σε περίπτωση υπέρβασης των παραπάνω ορίων, η απόζευξη θα πρέπει να πραγματοποιείται εντός 0.5 s
Συχνότητα	Η συχνότητα των ηλεκτρικών μεγεθών εξόδου του αντιστροφέα δεν πρέπει να υπερβαίνει περισσότερο από $\pm 0.5\text{Hz}$ την ονομαστική τιμή της συχνότητας του δικτύου. Σε περίπτωση υπέρβασης των παραπάνω ορίων, η απόζευξη θα πρέπει να πραγματοποιείται εντός 0.5 s.
Αυτόματη επανάζευξη	Η επανάζευξη θα πρέπει να πραγματοποιείται μετά από τουλάχιστον 3 λεπτά.
Αρμονικές	Η ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 5%.
Έγχυση συνεχούς ρεύματος	Η μέγιστη τιμή εγχέομένου συνεχούς ρεύματος θα πρέπει να είναι το πολύ ίση με το 0.5% του ονομαστικού ρεύματος της εγκατάστασης

**Εικόνα 4.4** Απαιτήσεις διασύνδεσης σύμφωνα με τις οδηγίες του Διαχειριστή Δικτύου [21]

#### **4.4 Διερεύνηση ανύψωσης τάσης σε κόμβο του δικτύου**

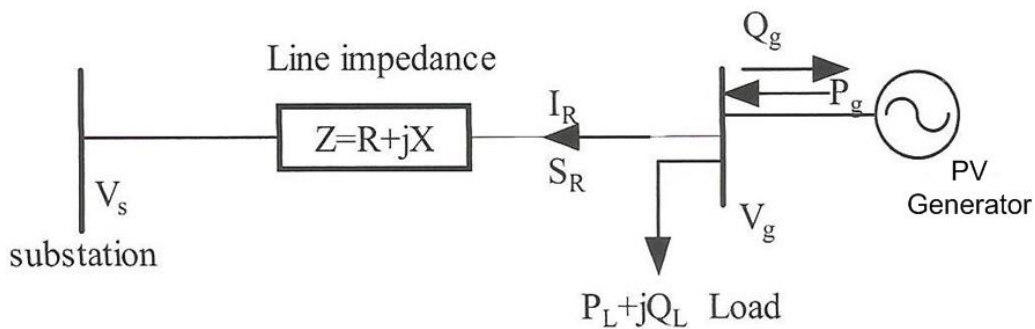
Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια και γενικότερα η διεσπαρμένη παραγωγή συνδεθεί σε μια γραμμή του ακτινικού δικτύου ΧΤ, η ενεργός ισχύς που παράγει μειώνει τη ροή ισχύος από τον Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η πτώση τάσης, που οφείλεται στην κυκλοφορία ενεργού ισχύος που καταναλώνουν τα φορτία, κατά μήκος της γραμμής. Σε περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο, έχουμε αντίστροφη ροή ισχύος, δηλαδή από τη γεννήτρια προς τον υποσταθμό, και αυτό προκαλεί ανύψωση τάσης κατά μήκος της γραμμής.

Οι τέσσερις ακραίες περιπτώσεις λειτουργίας που προκύπτουν είναι :

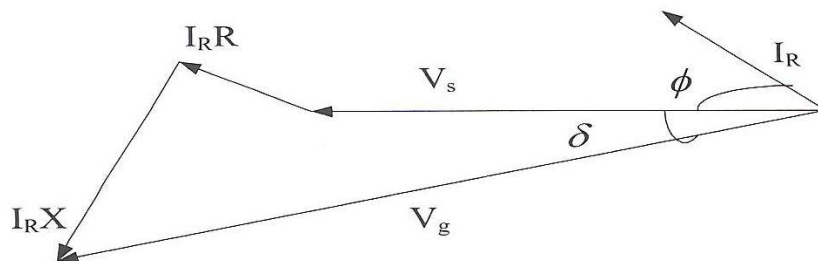


- 1) Ελάχιστη παραγωγή και Μέγιστο φορτίο
- 2) Ελάχιστη παραγωγή και Ελάχιστο φορτίο
- 3) Μέγιστη παραγωγή και Μέγιστο φορτίο
- 4) Μέγιστη παραγωγή και Ελάχιστο φορτίο

Στην πράξη, όσον αφορά το πρόβλημα ανύψωσης τάσης, ο τελευταίος συνδυασμός μέγιστης παραγωγής και ελάχιστου φορτίου είναι καθοριστικής σημασίας για το μέγεθος της Φ/Β παραγωγής που μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο. [23]



**Εικόνα 4.5** Δίκτυο με σύνδεση φωτοβολταϊκής γεννήτριας[23]



**Εικόνα 4.6** Διανυσματικό διάγραμμα

Στην *Εικόνα 4.5* παρατηρούμε τη σύνδεση μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο δίκτυο διανομής. Το δίκτυο αποτελείται από τον ζυγό του υποσταθμού με τάση  $V_s$ , μια γραμμή διανομής με σύνθετη αντίσταση  $Z=R+jX$ , και το ζυγό με τάση  $V_g$  στον οποίο έχει συνδεθεί η μονάδα Φ/Β παραγωγής. Η ενεργός και άεργος ισχύς του Φ/Β είναι  $P_g$  και  $Q_g$  αντίστοιχα. Ομοίως τα  $P_L$  και  $Q_L$  αντιπροσωπεύουν την ενεργό και άεργο ισχύ της ζήτησης των φορτίων του δικτύου διανομής. Το  $I_R$  είναι το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση της γραμμής, ενώ  $S_R$  είναι η φαινόμενη ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο.

Για τη φαινόμενη ισχύ  $S_R$  έχουμε :

$$S_R = P_R + jQ_R = P_g - jQ_g - P_L - jQ_L \quad (4.1)$$

Και καθώς :

$$S_R = V_g I_R^*, I_R = (P_R - jQ_R) / V_g^* \quad (4.2)$$

προκύπτει:

$$\begin{aligned} V_g &= V_s + I_R Z \\ &= V_s + (R + jX) (P_R - jQ_R) / V_g^* \\ &= V_s + (P_R R + X Q_R) / V_g^* + j (P_R X - R Q_R) / V_g^* \end{aligned} \quad (4.3)$$

Από το διανυσματικό διάγραμμα της *Εικόνας 4.6* έχουμε:

$$V_g \sin \delta = (P_R X - R Q_R) / V_s \quad (4.4)$$

Καθώς η γωνία  $\delta$  είναι πολύ μικρή, ο όρος  $(P_R X - R Q_R) / V_s$  είναι επίσης πολύ μικρός, και μπορεί να αγνοηθεί. Συνεπώς το μέτρο της ανύψωσης τάσης δίνεται κατά προσέγγιση από τον τύπο:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{P_R R + X Q_R}{V_g} \\ &= \frac{(P_g - P_L) R - X(Q_g + Q_L)}{V_g} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Από τον τύπο αυτό προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Η ενεργός ισχύς που παράγει η Φ/Β γεννήτρια, καθώς επίσης και η δυνατότητά της να χειριστεί την άεργο ισχύ (να την απορροφήσει ή να την παράγει), είναι καθοριστικής σημασίας για την τάση που αναπτύσσεται στο ζυγό.

Επίσης μεγάλο ρόλο παίζει η αντίσταση  $R$  και η επαγωγική αντίδραση  $X$  της γραμμής. Όσο μεγαλύτερα είναι τα μεγέθη αυτά, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ανύψωση τάσης που παρατηρείται στο ζυγό. Η τιμή τους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της γραμμής (πχ διατομή, μήκος κλπ.). Στα δίκτυα διανομής ΜΤ, ο επαγωγικός χαρακτήρας της γραμμής είναι περισσότερο έντονος από τον ωμικό, δηλαδή ισχύει  $X \gg R$ , οπότε με βάση τον τύπο (4.6), η μεταβολή της αέργου ισχύος έχει μεγαλύτερη επίδραση στην τάση σε σύγκριση με την ενεργό ισχύ. Αντίθετα, στα ΔΔ ΧΤ ισχύει  $R \gg X$ , οπότε μεταβολές στην ενεργό ισχύ έχουν μεγαλύτερη επίδραση.

Οι μέθοδοι που θα προτείνουμε για την αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης σε επόμενη παράγραφο βασίζονται στις παραπάνω παρατηρήσεις.

#### 4.5 Τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου ανύψωσης τάσης

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για την αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης, (αλλά και του φαινομένου βύθισης τάσης λόγω σφάλματος) στους κόμβους σύνδεσης των Φ/Β γεννητριών. Οι τρόποι αυτοί συνοψίζονται ως εξής [24] :

- STATCOM, SVC, DVR
- Αναβάθμιση του δικτύου
- Αποθήκευση περίσσειας ισχύος σε συσσωρευτές
- Περικοπή ενεργού ισχύος Φ/Β (APC)
- Έλεγχος της αέργου ισχύος των αντιστροφών Φ/Β (PFC)

Ο έλεγχος της τάσης από τη διανεμημένη παραγωγή με τους παραπάνω τρόπους θα πρέπει να συνεργάζεται ομαλά με τα συμβατικά μέσα ρύθμισης τάσης που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στα δίκτυα που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία ο έλεγχος της τάσης θα γίνεται μέσω της περικοπής ενεργού ισχύος και του ελέγχου της αέργου ισχύος των αντιστροφών.

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των αναφερθέντων τρόπων ρύθμισης της τάσης.

##### 4.5.1 STATCOM, SVC, DVR

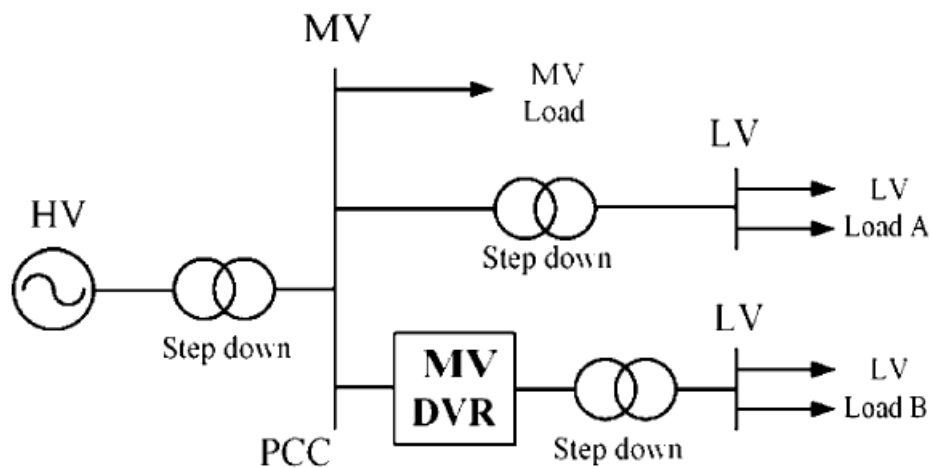
Το *STATCOM* (*Static Compensator*) είναι μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του συντελεστή ισχύος, τη ρύθμιση της τάσης, τη σταθεροποίηση της ροής ισχύος, και να βελτιώσει τη δυναμική συμπεριφορά των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πράξη, το βασικό πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει το STATCOM είναι η αστάθεια της τάσης του συστήματος, που είναι ολοένα αυξανόμενο πρόβλημα με την αύξηση της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Μπορεί να παρέχει ακαριαία τα Var που χρειάζονται σε περίπτωση σφάλματος για υποστήριξη της τάσης. [25]

Μια άλλη διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το *SVC* (*Static Var Compensator*). Μπορεί να ελέγξει την άεργο ισχύ με τη βοήθεια θυρίστρον, συνεπώς μπορεί να ελέγχει δυναμικά την τάση στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης με το δίκτυο. Χαρακτηρίζεται από πολύ γρήγορη απόκριση, με αποτέλεσμα να μπορεί να ανταποκριθεί και στη μόνιμη κατάσταση, αλλά και σε ταχέως μεταβαλλόμενες μεταβατικές περιόδους. [26]

Το STATCOM έχει καλύτερα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το SVC. Στην περίπτωση που η τάση του συστήματος βυθίζεται σε βαθμό που το ρεύμα εξόδου του STATCOM

μεγιστοποιείται, το άεργο ρεύμα εξόδου του δεν επηρεάζεται από το μέτρο της τάσης. Συνεπώς χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη σταθερότητα όταν η τάση είναι μονίμως κάτω του ορίου. Αντίθετα, το άεργο ρεύμα εξόδου του SVC είναι ανάλογο του τετραγώνου της τάσης. Αυτό σημαίνει ότι η παρεχόμενη άεργος ισχύς μειώνεται ταχύτατα με τη μείωση της τάσης, οπότε δεν μπορεί να παρέχει αξιόπιστη στήριξη στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, το STATCOM έχει ταχύτερες αποκρίσεις, και μικρότερες εγχύσεις αρμονικών συνιστωσών. Ωστόσο, το STATCOM προκαλεί μεγαλύτερες απώλειες, και είναι ακριβότερη διάταξη σε σχέση με το SVC, συνεπώς το τελευταίο, που αποτελεί και παλαιότερη τεχνολογία, εξακολουθεί να είναι αρκετά διαδεδομένο.

Τέλος, το *DVR (Dynamic Voltage Restorer)* είναι επίσης μια συσκευή με ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιείται για τη στήριξη της τάσης του δικτύου, και την προστασία ευαίσθητων φορτίων από τις διαταραχές τάσης στο ΣΚΣ. Συνήθως η σύνδεσή του γίνεται στο δίκτυο MT, αλλά τα τελευταία χρόνια έχει εξελιχθεί σε μια λύση με καλή σχέση τιμής-απόδοσης για τα δίκτυα XT. Η χρήση του στη Μέση Τάση το υποβάλλει σε συχνή εμφάνιση σφαλμάτων, με αποτέλεσμα να ρέουν στο εσωτερικό του μεγάλα ρεύματα πριν προλάβουν να ενεργοποιηθούν τα μέσα προστασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη πτώση τάσης στο ΣΚΣ, κάτι που επηρεάζει τα φορτία που είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Εάν δε γίνει σωστός έλεγχος της διάταξης, το DVR μπορεί να συνεισφέρει στη βύθιση τάσης, στην προσπάθειά του να αντισταθμίσει την πτώση τάσης που παρατηρείται, χειροτερεύοντας έτσι το πρόβλημα, και πετυχαίνοντας τον αντίθετο στόχο από τον επιθυμητό. [27]



**Εικόνα 4.6** Διάταξη DVR συνδεδεμένη στο δίκτυο MT [27]

Τα μειονεκτήματα των παραπάνω διατάξεων είναι αφενός το υψηλό κόστος εγκατάστασής τους, και αφετέρου ο προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης τοποθέτησής τους, όταν μάλιστα το φορτίο και η διανεμημένη παραγωγή της γραμμής μεταβάλλονται συνεχώς.

#### 4.5.2 Αναβάθμιση του δικτύου

Ένας από τους τρόπους αντιμετώπισης του προβλήματος ανύψωσης τάσης είναι η αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου. Τα συμβατικά δίκτυα είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να τροφοδοτούν με ισχύ φορτία σε συγκεκριμένη απόσταση, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τη διεσπαρμένη παραγωγή. Με τη διεύρυνση όμως των ΑΠΕ και την αντίστροφη ροή ισχύος στο δίκτυο, οι ισορροπίες έχουν αλλάξει. Για να μπορέσει το δίκτυο να ανταπεξέλθει στις αλλαγές, είναι δυνατό να γίνει αναβάθμιση των συστατικών του. Για παράδειγμα μπορεί να γίνει αντικατάσταση των γραμμών με χρήση αγωγών με καλύτερη ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (μικρότερη σύνθετη αντίσταση), είτε και δημιουργία νέων γραμμών. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν Μ/Σ μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα υπερφόρτισής τους, λόγω των μεγάλων άεργων ρευμάτων, και τη ροή μεγάλων ποσοτήτων ισχύος στο δίκτυο.

Με βάση τον τύπο (4.6) προκύπτει ότι μείωση του  $R$  και  $X$  της γραμμής, δηλαδή της σύνθετης αντίστασης του δικτύου θα επιφέρει μείωση των διακυμάνσεων της τάσης. Συνεπώς, πρόκειται για μία λύση που θα μετριάσει το πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό, ωστόσο η εφαρμογή της συνεπάγεται πολύ μεγάλο κόστος, ιδίως αν πρόκειται για την αντικατάσταση γραμμών του υπόγειου δικτύου. Ο παράγοντας αυτός καθιστά τη συγκεκριμένη πρόταση λιγότερο συμφέρουσα, σε σύγκριση με τους υπόλοιπους προτεινόμενους τρόπους.

#### 4.5.3 Αποθήκευση περίσσειας ισχύος σε συσσωρευτές

Όπως έχουμε αναφέρει, σε περίπτωση που η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση των φορτίων, τότε αυτή καλύπτει τις ανάγκες των φορτίων, και η περίσσεια ισχύος εγχύεται στο δίκτυο, συμβάλλοντας στην αύξηση της τάσης των ζυγών. Μια λύση του προβλήματος είναι η αποθήκευση της περίσσειας ισχύος σε συσσωρευτές, όπως δίνεται η δυνατότητα στο εργαστηριακό μικροδίκτυο της σχολής ΗΜΜΥ.

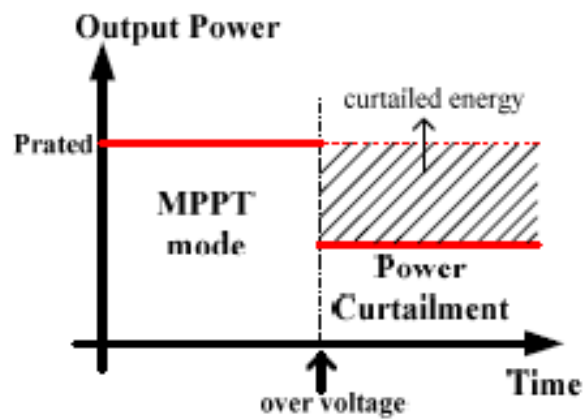
Με τη χρήση ενός έξυπνου inverter (όπως ο Sunny Island), μπορεί να αποφασιστεί το ποσό της παραγόμενης ισχύος που θα χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των φορτίων, καθώς και το ποσό ισχύος που θα αποθηκεύεται στους συσσωρευτές σε διαστήματα με μεγάλη πιθανότητα ανύψωσης της τάσης. Η αποθηκευμένη ισχύς μπορεί να αποδοθεί στο δίκτυο σε περιόδους μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας (πχ βράδυ, συννεφιά κλπ).

Πρόκειται για μια πολύ αξιόλογη προοπτική, ωστόσο οι αποθηκευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι πολύ ακριβές, και η σχέση κόστους-απόδοσης είναι πολύ μικρή, ιδίως σε περιπτώσεις μεγαλύτερης φωτοβολταϊκής παραγωγής, όπου θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεγάλες διατάξεις συσσωρευτών.

#### 4.5.4 Περικοπή ενεργού ισχύος - Active Power Curtailment

Ο έλεγχος των inverter με καμπύλες στατισμού (droop control), είναι συνηθισμένη τεχνική που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία και το διαμοιρασμό ισχύος σε γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες παράλληλα, και αφορά συνήθως τη σχέση μεταξύ ενεργού ισχύος και συχνότητας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης τάσης, μπορούμε να επιβάλουμε στον inverter έλεγχο droop που θα συνδέει την ενεργό ισχύ με την τάση.

Με τον τρόπο αυτό, μόλις η τάση στον αντιστροφέα ξεπεράσει το επιθυμητό όριο, η ενεργός ισχύς περιορίζεται, μεταφέροντας το σημείο λειτουργίας από το σημείο MPPT σε ένα σημείο πιο κοντά στην τάση ανοιχτοκύκλωσης του Φ/Β πλαισίου. Εάν η τάση στο ΣΚΣ εξακολουθεί να παραμένει πάνω από το επιτρεπτό όριο, τότε ο αντιστροφέας παύει τη λειτουργία του. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *Περικοπή ενεργού ισχύος - Active Power Curtailment (APC)*.



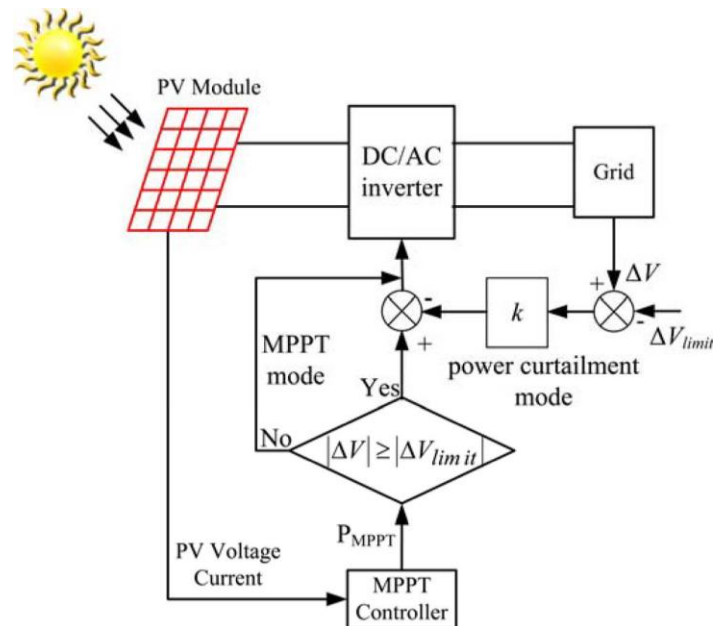
**Εικόνα 4.7** Περικοπή ενεργού ισχύος λόγω ανύψωσης τάσης [24]

Ένας τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε να εφαρμοστεί η μέθοδος είναι η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο από τον αντιστροφέα να είναι συνάρτηση της τάσης ως εξής:

$$P_{inv} = \begin{cases} P_{MPPT}, & V \leq V_{limit} \\ P_{MPPT} - k(V - V_{limit}), & V_{limit} < V \leq V_{cri} \\ 0, & V > V_{cri} \end{cases} \quad (4.7)$$

όπου:  $P_{MPPT}$  είναι η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να παράγει η συστοιχία των Φ/Β για μια δεδομένη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (kW),  $k$  ένας παράγοντας κλίσης [συντελεστής στατισμού - droop coefficient] (kW/V), ενώ  $V_{limit}$  είναι η τάση πάνω από την οποία η ισχύς που προσφέρει ο inverter μειώνεται με το συντελεστή κλίσης  $k$ . Όσο ισχύει  $V \leq V_{limit}$ , ο inverter παρέχει την ισχύ MPPT, ενώ για  $V > V_{limit}$  μειώνει την ισχύ εξόδου του. Σε περίπτωση που η τιμή της τάσης ξεπεράσει το  $V_{cri}$ , ο αντιστροφέας θα πρέπει να αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Γίνεται συνεχώς καταμέτρηση της τάσης στους ακροδέκτες για να καθορίσει πόση ισχύς θα πρέπει να περικοπεί σε κάθε αντιστροφέα. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το συντονισμό των inverter, ώστε να

περικόπτουν από κοινού την ενεργό ισχύ με αποτέλεσμα τη διατήρηση της τάσης εντός ορίων σε όλο το μήκος της γραμμής, χωρίς κανάλι επικοινωνίας.



**Εικόνα 4.8** Αλγόριθμος ελέγχου τάσης για περικοπή ενεργού ισχύος [28]

Πρέπει να σημειωθεί ότι η στρατηγική αυτή περιορισμού της ενεργού ισχύος δεν είναι η καλύτερη δυνατή, εφόσον είμαστε αναγκασμένοι να περιορίσουμε την εκμεταλλεύσιμη ισχύ που παράγουν τα Φ/Β. Επίσης μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλου προβλήματος ανύψωσης τάσης να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος, γεγονός που αδικεί ορισμένους παραγωγούς έναντι άλλων με σημαντικές οικονομικές απώλειες. Μια λύση θα μπορούσε να είναι η αποθήκευση της ισχύος που έχει περικοπεί σε συσσωρευτές.

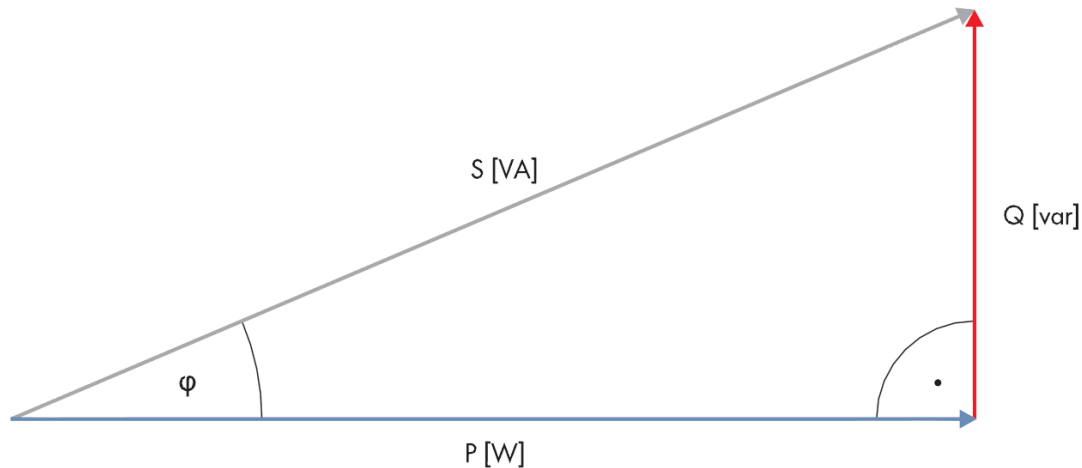
#### 4.5.5 Δυνατότητα ρύθμισης αέργου ισχύος - Power Factor Control

Με βάση τη σχέση (4.6) παρατηρούμε ότι ενδεχόμενη μεταβολή της αέργου ισχύος θα επηρεάσει την ανύψωση τάσης στο ζυγό. Στα δίκτυα YT και MT όπου ισχύει  $X \gg R$ , μπορεί να εφαρμοσθεί η μέθοδος της απορρόφησης αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των Φ/Β για τη μείωση της τάσης στους ζυγούς. Ουσιαστικά οι inverter αναγκάζονται να δουλέψουν με επαγωγικό συντελεστή ισχύος ( $\Sigma I$ ), ενώ αντίστοιχα σε περίπτωση βύθισης τάσης παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο δουλεύοντας με χωρητικό  $\Sigma I$ . Η δυνατότητα αυτή ονομάζεται *Power Factor Control (PFC)*.

Όπως αναφέραμε, στα δίκτυα XT ο ωμικός χαρακτήρας της γραμμής είναι περισσότερο έντονος από τον επαγωγικό, οπότε ο έλεγχος της τάσης με μεταβολή της αέργου ισχύος δεν είναι εξίσου αποδοτικός σε σχέση με τη μέση και υψηλή τάση. Θα χρειαστεί πολύ μεγαλύτερη ποσότητα απορροφούμενης αέργου ισχύος για να επιτύχουμε την επιθυμητή μείωση τάσης. Αυτό σημαίνει ότι θα προκληθεί μεγαλύτερη ροή αέργου ισχύος στο δίκτυο,

οπότε θα παρατηρηθεί αύξηση των απωλειών στις γραμμές, και ενδεχόμενη υπερφόρτιση των γραμμών και του Μ/Σ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κάθε inverter έχει ένα όριο στη φαινόμενη ισχύ εξόδου του, που προκύπτει από το μέγιστο ρεύμα εξόδου του. Το όριο στο ρεύμα είναι αποτέλεσμα του ρεύματος αντοχής των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα. Έτσι, μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι αδύνατο να καταναλώσει την απαιτούμενη άεργο, ώστε να φτάσει η τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί αντιστροφέας με μεγαλύτερη ονομαστική φαινόμενη ισχύ από την ονομαστική ισχύ εξόδου των Φ/Β.



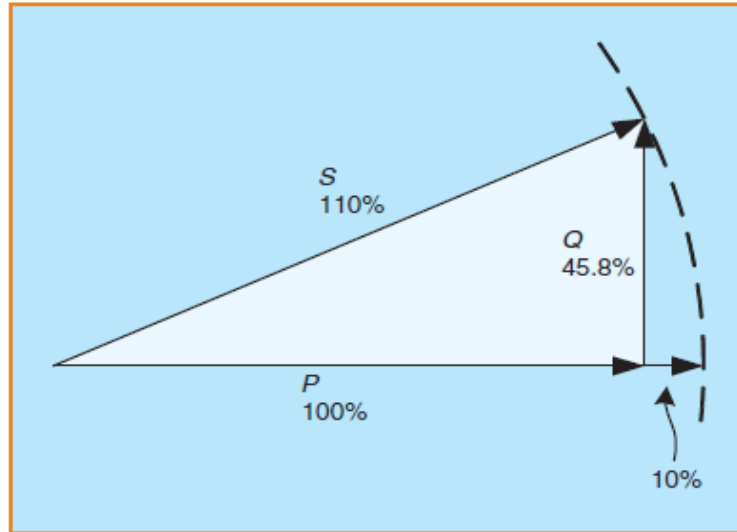
**Εικόνα 4.9** Φαινόμενη ισχύς αντιστροφέα με συντελεστή ισχύος διάφορο της μονάδας

Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που μπορεί να παράγει  $P=100\text{kW}$  ενεργού ισχύος. Σε περίπτωση που ο inverter λειτουργεί με συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi=1$ , δηλαδή δεν παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης αέργου ισχύος, η φαινόμενη ισχύς του είναι  $S=P=100\text{kVA}$ .

Σε περίπτωση ωστόσο που θέλουμε να δουλεύει με συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi=0.95$ , τότε ο inverter θα πρέπει να μπορεί να χειριστεί  $Q = P \tan\varphi = 33\text{kVar}$  αέργου ισχύος. Συνεπώς η φαινόμενη ισχύς του θα πρέπει να είναι  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 105\text{kVA}$ . Οπότε πρέπει να γίνει επιλογή αντιστροφέα με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ από αυτή των Φ/Β.

Εύκολα προκύπτει ότι η αύξηση της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα κατά μόλις 10%, αυξάνει την ικανότητα αέργου ισχύος από μηδέν έως περίπου 46% κατά τη διάρκεια της μέγιστης παραγωγής από τα Φ/Β. Αυτό οδηγεί σε ένα συντελεστή ισχύος από 0.91 επαγωγικό (απορρόφηση αέργου) έως 0.91 χωρητικό (παραγωγή αέργου) [29].





**Εικόνα 4.10** Σχέση φαινόμενης ισχύος του αντιστροφέα και ικανότητας διαχείρισης αέργου ισχύος [29]

#### 4.5.5.1 Μέθοδοι εφαρμογής της ρύθμισης αέργου ισχύος

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι εφαρμογής της ρύθμισης αέργου ισχύος για τη μείωση της τάσης σε ένα δίκτυο με μεγάλη διείσδυση φωτοβολταϊκών. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι οι εξής [30]:

- Καθορισμένη αέργος ισχύος [Fixed Q]
- Καθορισμένος συντελεστής ισχύος [Fixed cosφ]
- Συντελεστής ισχύος εξαρτώμενος από την ενεργό ισχύ [cosφ(P)]
- Άεργος ισχύς εξαρτώμενη από την τάση [Q(U)]

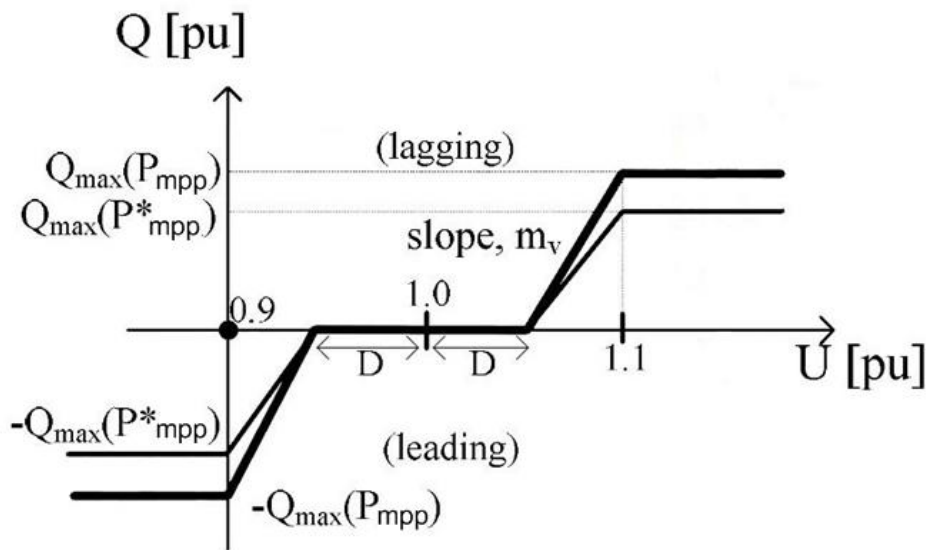
Σύμφωνα με τη μέθοδο της *καθορισμένης αέργου ισχύος [Fixed Q]*, επιβάλλεται σε όλους τους inverter του δικτύου να απορροφούν την ίδια ποσότητα αέργου, ανεξάρτητα με το αν υπάρχει ανεπιθύμητη ανύψωση τάσης ή όχι. Η μέθοδος αυτή έχει το μειονέκτημα ότι το δίκτυο υποβάλλεται σε μη χρειαζόμενη και μη επιθυμητή κυκλοφορία αέργου ισχύος, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες. Επίσης, καθώς η ισχύς Q είναι προκαθορισμένη, θα πρέπει να ξέρουμε εκ των προτέρων τι ποσότητα θα χρειαστούμε για την αντιμετώπιση της δυσμενέστερης περίπτωσης, οπότε θα πρέπει να έχουν προηγηθεί διάφορες μελέτες στο δίκτυο για το σκοπό αυτό.

Το πρόβλημα αυτό λύνει η μέθοδος του *καθορισμένου συντελεστή ισχύος [Fixed cosφ]*. Στην περίπτωση αυτή, η αέργος ισχύς που απορροφούν οι αντιστροφείς είναι εξαρτώμενη της παραγόμενης ενεργού ισχύος του Φ/B ( $Q=P \tan \phi$ ). Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργός ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η απορρόφηση αέργου, οδηγώντας σε καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης της τάσης. Ωστόσο, σε περίπτωση μικρής Φ/B παραγωγής, η πιθανότητα αύξησης της τάσης μικραίνει, οπότε η κατανάλωση αέργου είναι αχρείαστη, προκαλώντας και πάλι απώλειες στο δίκτυο.

Στη μέθοδο όπου ο συντελεστής ισχύος του inverter δεν είναι προκαθορισμένος, αλλά εξαρτώμενος από την ενεργό ισχύ που παράγουν τα  $\Phi/B [\cos\varphi(P)]$ , προκύπτουν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα, καθώς περιορίζεται κατά πολύ η κυκλοφορία αέργου ισχύος στο δίκτυο.

Οι παραπάνω μέθοδοι υποστηρίζουν την τάση του δικτύου έμμεσα, μετρώντας μόνο την παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών, και κάνοντας την υπόθεση ότι αύξηση της παραγωγής θα οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη αύξηση της τάσης, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τα φορτία στους ζυγούς. Σε πολλές περιπτώσεις, τα διαστήματα μεγιστοποίησης της  $\Phi/B$  παραγωγής μπορεί να συμπίπτουν με μεγάλη ζήτηση από τα φορτία, οπότε να μην εμφανιστεί καν το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης. Η μέθοδος όπου η *άεργος ισχύς είναι εξαρτώμενη της τάσης* [ $Q(U)$ ] μετράει κατευθείαν την τάση του ζυγού, και ο καθορισμός της αέργου που θα απορροφηθεί γίνεται με τη χρήση καμπυλών στατισμού (droop control).

Με τη μέθοδο αυτή, σε περίπτωση που η τάση είναι εντός επιθυμητών ορίων, ο inverter δεν απορροφά άεργο, μειώνοντας έτσι κατά πολύ τις άεργες απώλειες που εμφανίζονται στις υπόλοιπες μεθόδους. Επίσης, ανάλογα με το επίπεδο της τάσης σε κάθε ζυγό, γίνεται απορρόφηση διαφορετικής ποσότητας αέργου από τον κάθε inverter. Η καμπύλη droop που μπορεί να επιβληθεί στον inverter φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 4.11** Διαχείριση αέργου ισχύος για στήριξη της τάσης του δικτύου [31]

Η άεργος ισχύς που θα πρέπει να απορροφηθεί από τον inverter δίνεται από τον τύπο:

$$Q = \begin{cases} -Q_{max} , & V < 0.9pu \\ Q_{max} \left( \frac{V - 1 + D}{0.1 - D} \right) , & 0.9pu \leq V < 1 - D \\ 0 , & 1 - D \leq V \leq 1 + D \\ Q_{max} \left( \frac{V - 1 - D}{0.1 - D} \right) , & 1 + D < V \leq 1.1pu \\ Q_{max} , & V > 1.1pu \end{cases} \quad (4.8)$$

Έχουμε ότι  $Q_{max} = P_{MPP} * \tan(\arccos^{-1}(PF_{lim}))$ , άρα η άεργος ισχύς εξαρτάται από την ενεργό ισχύ που παράγει η Φ/Β διάταξη, καθώς και από το ελάχιστο όριο συντελεστή ισχύος  $PF_{lim}$  με τον οποίο είναι επιθυμητό να δουλεύει η μέθοδος. Το όριο αυτό μπορεί να καθοριστεί με βάση τη μέγιστη ποσότητα αέργου ισχύος που μπορούν να απορροφούν ο inverter, ώστε να μην υπερφορτιστούν οι γραμμές και ο Μ/Σ.

Το D (pu) είναι το πλάτος του εύρους ζώνης της τάσης στο οποίο δεν είναι επιθυμητό να απορροφάται άεργος ισχύς, δεδομένου ότι δεν εμφανίζεται έντονο πρόβλημα ανύψωσης τάσης. Το D μπορεί να έχει την ίδια τιμή για όλους τους inverters, ή μπορεί να είναι μεταβαλλόμενο για καλύτερο χειρισμό της αέργου ισχύος.

Είναι άξιο προσοχής, ότι ο προτεινόμενος ελεγκτής αέργου ισχύος έχει τη δυνατότητα να προσφέρει άεργο ισχύ στο δίκτυο σε περίπτωση βύθισης τάσης, δουλεύοντας έτσι με χωρητικό χαρακτήρα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να παρέχει πλήρη στήριξη στη ρύθμιση τάσης του δικτύου.

#### 4.5.6 Συνεργασία Περικοπής ενεργού ισχύος και Ρύθμισης αέργου ισχύος

Από όλες τις μεθόδους για τη ρύθμιση τάσης που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν η Περικοπή Ενεργού Ισχύος (APC) και η Ρύθμιση Αέργου Ισχύος (PFC). Η εφαρμογή τους είναι πολύ εύκολη, καθώς εκμεταλλεύονται ιδιότητες του inverter, και συνεπώς δεν προσθέτουν σημαντικό κόστος στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, κάτι που αποτελεί ένα από τα βασικότερα κριτήρια για την πραγματοποίησή της.

Ωστόσο, και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν μειονεκτήματα, καθώς η PFC ενδεχομένως να μην μπορεί να αντιμετωπίσει εξ' ολοκλήρου την ανύψωση τάσης στο δίκτυο ΧΤ, ενώ η APC μπορεί να ζημιώσει οικονομικά τις εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε ζυγούς με έντονο πρόβλημα ανύψωσης τάσης, οδηγώντας έτσι σε μια άδικη μεταχείριση των παραγωγών.

Για το λόγο αυτό, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα συνδυασμό των δύο μεθόδων, επιβάλλοντας στον inverter να βασίσει τη λειτουργία του σε καμπύλες στατισμού (droop control), τόσο της ενεργού ισχύος συναρτήσει της τάσης, όσο και της αέργου ισχύος συναρτήσει της τάσης του ΣΚΣ (Q(U)).

Η λογική είναι ότι αρχικά εφαρμόζουμε τη μέθοδο Q(U), ώστε να πετύχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση τάσης με ελεγχόμενες απώλειες αέργου ισχύος στις γραμμές, και στη συνέχεια εφόσον είναι αναγκαίο ενεργοποιείται και η περικοπή ενεργού ισχύος, μειώνοντας έτσι στο ελάχιστο δυνατό τον περιορισμό της παραγόμενης ισχύος των Φ/Β, και κατά συνέπεια την οικονομική ζημία των παραγωγών [31].

Καθώς το κάθε δίκτυο ΧΤ είναι διαφορετικό από άποψη τεχνικών χαρακτηριστικών, είναι μεγάλης σημασίας το γεγονός ότι οι προτεινόμενοι ελεγκτές ενεργού και αέργου ισχύος είναι πλήρως παραμετροποιήσιμοι, οπότε μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στις ιδιαιτερότητες του κάθε δικτύου στο οποίο θα ενσωματωθούν.

## Κεφάλαιο 5

### Ανάλυση Ροής Φορτίου και Ανάλυση Ευαισθησίας Τάσης

#### 5.1 Μελέτη ροών φορτίου

Η ανάλυση ροών φορτίου συνίσταται στον υπολογισμό των τάσεων κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, καθώς και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο καθορίζεται από τις τάσεις των γεννητριών, τις καταναλώσεις των φορτίων και την παραγωγή ενεργού ισχύος. Οι μελέτες ροών φορτίου είναι πολύ χρήσιμες για διάφορους λόγους, μερικοί από τους οποίους αναφέρονται ενδεικτικά παρακάτω :

- Είναι απαραίτητες για την επιλογή της πλέον οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος. Επειδή στη διάρκεια κάθε μέρας τα φορτία μεταβάλλονται διαρκώς, απαιτείται συχνά ο υπολογισμός εκ νέου της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας, ώστε τα φορτία να τροφοδοτούνται με τον πιο οικονομικό τρόπο.
- Είναι αναγκαίες για τον έλεγχο των τάσεως και ροών, ώστε να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας.
- Βοηθούν στη μελέτη των επιπτώσεων ενδεχομένων διαταραχών, όπως απώλεια γραμμής, γεννήτριας κλπ.
- Είναι απαραίτητες σε μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ανάλυση των ροών φορτίου είναι το σημείο εκκίνησης για όλες τις επιμέρους μελέτες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. [15]

Η χρησιμοποίηση όλο και ισχυρότερων ψηφιακών υπολογιστών επιτρέπει σήμερα επίλυση προβλημάτων μεγάλων διαστάσεων. Συγκεκριμένα, δίκτυα με πολλές εκατοντάδες κόμβους επιλύονται χωρίς μεγάλες δυσκολίες. Η ανάλυση όμως τέτοιων δικτύων προϋποθέτει την ύπαρξη μιας "τράπεζας δεδομένων", με όλες τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την ανακατασκευή της τοπολογίας του μελετώμενου δικτύου. Η τράπεζα δεδομένων, η οποία πρέπει να είναι πάντοτε ενημερωμένη, τροφοδοτεί το ψηφιακό πρόγραμμα το οποίο βασίζεται στη μητρική ανάλυση του συστήματος, ύστερα από τη διαμόρφωση του κατάλληλου μοντέλου.

Το πρόβλημα των ροών φορτίου συνίσταται στον προσδιορισμό των μεταβλητών που αναφέρθηκαν πιο πάνω σε μια δεδομένη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ορισμένη εικόνα φορτίων, μια αντίστοιχη εικόνα παραγόμενης ισχύος και αντίστοιχη εικόνα τάσεων και ροών στο δίκτυο. Κάθε άλλη εικόνα

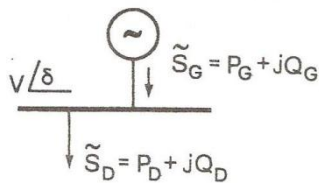
φορτίων ή ροών συνιστά μια άλλη κατάσταση λειτουργίας, και περιγράφεται από άλλες τιμές μεταβλητών.

Η μέθοδος που προσφέρεται για την ανάλυση του δικτύου στην περίπτωση των ροών φορτίου, βασίζεται στη μέθοδο "κόμβων" της ανάλυσης κυκλωμάτων, η οποία παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα :

- ✓ μικρότερο γενικά πλήθος μεταβλητών
- ✓ εύκολη εισαγωγή γραμμών, ή Μ/Σ εν παραλλήλω
- ✓ άμεσος υπολογισμός των μεγεθών που ενδιαφέρουν.

## 5.2 Μεταβλητές συστήματος

Αν θεωρήσουμε τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο που εκφράζονται ως ισχείς διακρίνουμε τα εξής μεγέθη :



- $P_G$  : παραγόμενη ενεργός ισχύς
- $Q_G$  : παραγόμενη άεργος ισχύς
- $P_D$  : ενεργός ισχύς φορτίου
- $Q_D$  : άεργος ισχύς φορτίου
- $V$  : τάση ζυγού (μέτρο)
- $\delta$  : γωνία τάσεως ζυγού

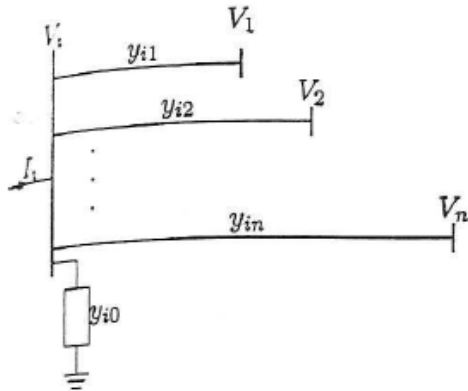
**Εικόνα 5.1** Χαρακτηριστικά μεγέθη ζυγού

Όπως παρατηρούμε τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη, που αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος, είναι έξι σε κάθε ζυγό. Συνεπώς, σε ένα σύστημα με  $n$  ζυγούς υπάρχουν συνολικά  $6n$  μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες. Τα φορτία ή μεταβλητές ζήτησεως ( $P_D$ ,  $Q_D$ ) μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διάνυσματος διαστάσεως  $2n$ . Θεωρούνται ως οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος.

Οι ισχείς παραγωγής ( $P_G$ ,  $Q_G$ ) μπορούν επίσης να θεωρηθούν σα στοιχεία ενός άλλου διάνυσματος, επίσης διαστάσεως  $2n$ . Τέλος, οι τάσεις και γωνίες των ζυγών είναι εξαρτημένες μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ονομαστούν μεταβλητές κατάστασης, και το αντίστοιχο διάνυσμα διαστάσεως  $2n$  διάνυσμα κατάστασης συστήματος.

### 5.3 Μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγών

Στο διπλανό σχήμα φαίνεται ένας τυπικός ζυγός ενός συστήματος  $n$  ζυγών. Στο σύστημα αυτό οι τάσεις και τα ρεύματα των ζυγών συνδέονται με τις εξής εξισώσεις:



$$\begin{aligned}\tilde{I}_1 &= Y_{11}\tilde{V}_1 + Y_{12}\tilde{V}_2 + \dots + Y_{1n}\tilde{V}_n \\ \tilde{I}_2 &= Y_{21}\tilde{V}_1 + Y_{22}\tilde{V}_2 + \dots + Y_{2n}\tilde{V}_n \\ &\vdots \\ \tilde{I}_n &= Y_{n1}\tilde{V}_1 + Y_{n2}\tilde{V}_2 + \dots + Y_{nn}\tilde{V}_n\end{aligned}$$

**Εικόνα 5.2** Τυπικός ζυγός συστήματος  $n$  ζυγών

Ο πίνακας των συντελεστών αυτών ονομάζεται μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγών  $\mathbf{Y}$ , και αντανακλά την τοπολογία και τις παραμέτρους του ηλεκτρικού δικτύου. Η μήτρα αυτή παρουσιάζει ορισμένες αξιοσημείωτες ιδιότητες :

- Είναι συμμετρική εάν δεν υπάρχει μετασχηματιστής αλλαγής φάσης στο δίκτυο, άρα  $Y_{ij} = Y_{ji}$ .
- Είναι αραιή μήτρα, δηλαδή ο λόγος του αριθμού των μη μηδενικών στοιχείων της ως προς το συνολικό αριθμό των στοιχείων της είναι αρκετά μικρός.

Οι παραπάνω εξισώσεις σε μητρική μορφή γίνονται :

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \vdots \\ \tilde{I}_i \\ \vdots \\ \tilde{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \vdots \\ \tilde{V}_i \\ \vdots \\ \tilde{V}_n \end{bmatrix}$$

ή αλλιώς

$$\mathbf{I}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}\mathbf{V}_{bus} \quad (5.1)$$

όπου  $\mathbf{I}_{bus}$  είναι το διάνυσμα των ρευμάτων που εγχύονται στους ζυγούς (πχ. εξωτερικές πηγές ρεύματος). Το ρεύμα θεωρείται θετικό όταν ρέει προς το ζυγό, και αρνητικό όταν απομακρύνεται από αυτόν.  $\mathbf{V}_{bus}$  είναι το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών μετρούμενων ως προς τον κόμβο αναφοράς.

Το κάθε στοιχείο που βρίσκεται στη διαγώνιο ισούται με το άθροισμα των αγωγιμοτήτων των προσπιπτόντων κλάδων στον αντίστοιχο ζυγό :

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} , j \neq i$$

Τα μη διαγώνια στοιχεία ισούνται με την αντίθετη αγωγιμότητα του αντίστοιχου κλάδου :

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$$

Όπως καταλαβαίνουμε, η μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγών μπορεί να γραφεί εύκολα μόνο με επισκόπηση του κυκλώματος. Η τάξη της μήτρας ισούται με τον αριθμό των ζυγών του δικτύου. Ο αριθμός των μη μηδενικών στοιχείων που βρίσκονται εκτός της διαγωνίου ισούται με τον αριθμό των αγείων ζυγών που συνδέονται στον αντίστοιχο ζυγό.

Σε περίπτωση που τα ρεύματα των ζυγών είναι γνωστά, η εξίσωση (5.1) μπορεί να λυθεί ως προς τις τάσεις των  $n$  ζυγών.

$$\mathbf{V}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}^{-1} \mathbf{I}_{bus}$$

Ο αντίστροφος πίνακας της μήτρας αγωγιμοτήτων ζυγών ονομάζεται μήτρα σύνθετων αντιστάσεων ζυγών, και είναι  $\mathbf{Z}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}^{-1}$ . Η μήτρα  $\mathbf{Z}$  που αντιστοιχεί στη μήτρα αγωγιμοτήτων  $\mathbf{Y}$ , είναι της ίδιας τάξης με αυτή. [16]

#### 5.4 Ταξινόμηση ζυγών

Στη μελέτη των ροών φορτίου οι γραμμές παριστάνονται με κυκλώματα-Π, με ανηγμένες παραμέτρους και τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά. Εάν τα φορτία μπορούσαν να παρασταθούν με σταθερές σύνθετες αγωγιμότητες, και οι γεννήτριες σαν πηγές πίσω από αντιστάσεις, θα ήταν δυνατή μια άμεση λύση του προβλήματος.

Ωστόσο, τα φορτία ορίζονται ως ισχείς πραγματικές και άεργες, και οι γεννήτριες επίσης από τις παραγόμενες ισχείς και τις τάσεις ζυγού. Βάσει αυτών των χαρακτηριστικών ορίζονται για τις μελέτες ροών φορτίου οι ακόλουθοι τρεις χαρακτηριστικοί τύποι ζυγών :

- ✓ *Ζυγοί φορτίου (PQ)*, στους οποίους είναι γνωστές οι ισχείς ζήτησης ή φορτίου, και άγνωστη είναι η τάση κατά μέγεθος και γωνία. Συνήθως τέτοιοι ζυγοί είναι τα φορτία όταν οι ισχείς τους δίνονται σαν σταθερές. Επιπλέον, όταν η ενεργός και άεργος ισχύς θεωρείται σταθερή σε κάποιες εγκαταστάσεις παραγωγής, και αυτοί οι ζυγοί θεωρούνται PQ.

- ✓ Ζυγοί παραγωγής (PV), όπου είναι γνωστά η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης, και προσδιορίζονται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης. Συνήθως οι ζυγοί PV διαθέτουν κάποια ελεγχόμενη πηγή αέργου ισχύος, και συνεπώς μπορούν να διατηρούν το μέτρο της τάσης τους σε κάποιο επιθυμητό επίπεδο. Γενικά οι ζυγοί των σταθμών παραγωγής θεωρούνται ζυγοί PV, επειδή η τάσης στους ζυγούς αυτούς μπορεί να ελεγχθεί από την ικανότητα αέργου ισχύος των γεννητριών τους. Σε κάποιες περιπτώσεις και κάποιοι υποσταθμοί μπορούν να θεωρηθούν ζυγοί PV, όταν διαθέτουν αρκετές συσκευές αντιστάθμισης αέργου ισχύος για να ελέγχουν την τάση.
- ✓ Ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς (Slack Bus), ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής, χρησιμοποιούμενος για να αντισταθμίζει τις απώλειες του δικτύου, που δεν είναι γνωστές εξ' αρχής και γενικά για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Στο ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία, και προσδιορίζονται οι ισχείς παραγωγής. Η θέση του ζυγού ταλάντωσης μπορεί να επηρεάσει την πολυπλοκότητα των υπολογισμών.

Επίσης, είναι δυνατόν να προκύψουν και άλλοι συνδυασμοί ζυγών κατά περίπτωση.

## 5.5 Εξισώσεις ροών φορτίου

Οι υπολογισμοί της ροής φορτίου μπορούν περίπου να θεωρηθούν ως το πρόβλημα της επίλυσης της μιγαδικής τάσης σε κάθε κόμβο, ενώ η εγχεόμενη μιγαδική ισχύς είναι προσδιορισμένη. Αν η μιγαδική ισχύς μπορεί να παρασταθεί από εξισώσεις μιγαδικών τάσεων, τότε μια μέθοδος επίλυσης μη γραμμικών εξισώσεων, όπως η Newton-Raphson, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των παραστατικών μιγαδικών της τάσης. Η μαθηματική ανάλυση καταλήγει στη διαμόρφωση ενός συστήματος  $2n$  μη γραμμικών εξισώσεων, όπου  $n$  είναι ο αριθμός των κόμβων (ζυγών) του δικτύου. Κατά τη διαδικασία, η γη ως προς την οποία αναφέρονται οι τάσεις των κόμβων και οι εγκάρσιοι κλάδοι, αποτελεί πρόσθετο κόμβο αναφοράς  $[(n+1) - \text{οστό}]$ .

Σε προηγούμενη παράγραφο είδαμε ότι η σχέση μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων στους κόμβους του δικτύου περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{I}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}\mathbf{V}_{bus}$$

ή διαφορετικά

$$\tilde{I}_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \tilde{V}_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.2)$$

όπου  $\tilde{I}_i$  και  $\tilde{V}_j$  το εγχεόμενο ρεύμα στο ζυγό  $i$ , και η τάση στο ζυγό  $j$  αντίστοιχα, και  $y_{ij}$  ένα στοιχείο της μήτρας αγωγιμότητας.



Για την επίλυση του προβλήματος, η σχέση μεταξύ της ισχύος με το ρεύμα του ζυγού θα πρέπει να είναι :

$$\tilde{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\tilde{V}_i^*} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.3)$$

όπου  $P_i$  και  $Q_i$  η εγχεόμενη ενεργός και άεργος ισχύς στο ζυγό  $i$  αντίστοιχα. Αν ο ζυγός  $i$  είναι ζυγός φορτίου, οι  $P_i$  και  $Q_i$  παίρνουν αρνητικές τιμές. Η τάση  $\tilde{V}_i^*$  είναι η συζυγής της τάσης στο ζυγό  $i$ . Αντικαθιστώντας την (5.3) στην (5.2) προκύπτει:

$$\frac{P_i - jQ_i}{\tilde{V}_i^*} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \tilde{V}_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.4)$$

ή διαφορετικά:

$$\frac{P_i + jQ_i}{\tilde{V}_i^*} = \sum_{j=1}^n y_{ij}^* \tilde{V}_j^* \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.5)$$

Στην (5.5) υπάρχουν  $n$  μη γραμμικές εξισώσεις. Είναι οι κύριες εξισώσεις του υπολογισμού της ροής φορτίου. Από τη σχέση αυτή προκύπτει :

$$P_i + jQ_i = \tilde{V}_i \sum_{j \in i} y_{ij}^* \tilde{V}_j^* \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.6)$$

όπου  $j \in i$  σημαίνει ότι ο κόμβος  $j$  θα πρέπει να συνδέεται απευθείας στον  $i$ , συμπεριλαμβανομένου του  $j=i$ . Η τάση μπορεί να πάρει την πολική μορφή  $\tilde{V}_i = V_i e^{j\theta_i}$ , ενώ τα στοιχεία της μήτρας αγωγιμότητας μπορούν να εκφραστούν ως  $y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ , οπότε η (5.6) παίρνει τη μορφή :

$$P_i + jQ_i = V_i e^{j\theta_i} \sum_{j \in i} (g_{ij} - jb_{ij}) V_j e^{j\theta_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.7)$$

Με χρήση του τύπου του Euler  $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$  προκύπτει ότι :

$$P_i + jQ_i = V_i \sum_{j \in i} (g_{ij} - jb_{ij}) V_j (\cos\theta_{ij} + j\sin\theta_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.8)$$

όπου  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  η διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων των ζυγών  $i$  και  $j$ . Χωρίζοντας τα πραγματικά από τα φανταστικά μέρη προκύπτει :

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.9)$$

Αυτή είναι η πολική μορφή των εξισώσεων ισχύος των κόμβων. Η (5.9) μπορεί να εκφραστεί και στην ακόλουθη μορφή :

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.10)$$

όπου  $P_{is}$  και  $Q_{is}$  είναι η προσδιορισμένη ενεργός και άεργος ισχύς στο ζυγό  $i$ . Έτσι το πρόβλημα της ροής φορτίου μετασχηματίζεται ως εξής: για δεδομένα  $P_{is}$  και  $Q_{is}$  να βρεθούν τα διανύσματα της τάσης  $V_i$ ,  $\theta_i$  έτσι ώστε τα σφάλματα της ισχύος  $\Delta P_i$ ,  $\Delta Q_i$  για  $i = 1, 2, \dots, n$  να είναι μικρότερα από μια επιτρεπτή ανοχή.

## 5.6 Ψηφιακές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου

Παλαιότερα για τη μελέτη των ροών φορτίου χρησιμοποιούνταν ομοιώματα δικτύου EP, δηλαδή ειδικοί αναλογικοί υπολογιστές, στους οποίους τα διάφορα τμήματα του συστήματος εξομοιώνονταν αναλογικά, με αντίστοιχα ηλεκτρικά στοιχεία σε μικρογραφία. Πλέον όμως με την επικράτηση των ψηφιακών υπολογιστών, οι μελέτες των δικτύων αυτού του είδους γίνονται αποκλειστικά με υπολογιστές.

Οι ψηφιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των ροών φορτίου μπορούν να λύσουν τις μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις των ροών φορτίου για μεγάλα συστήματα με εκατοντάδες ζυγούς, με απώλειες, με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι βασικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στις μελέτες αυτές είναι η μέθοδος Gauss-Seidel, η μέθοδος Newton-Raphson, και η ταχεία αποζευγμένη μέθοδος.

Οι μέθοδοι αυτές ξεκινούν με μια αρχική λύση, και με διαδοχικές ανακυκλώσεις προσεγγίζουν την τελική ως εξής: Η αρχική λύση χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του προβλήματος για να βρεθεί μια καινούρια καλύτερη λύση κοκ. Μια τέτοια συγκλίνουσα διαδικασία λέγεται μέθοδος ή διαδικασία ανακυκλώσεως, και η ποιότητά της κρίνεται από την ταχύτητα συγκλίσεώς της.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson. Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει μια παρουσίαση μεθόδων που αναφέρθηκαν.

### 5.6.1 Η μέθοδος Newton-Raphson

Η μέθοδος Newton-Raphson είναι ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων. Μετατρέπει τη διαδικασία της επίλυσης των μη γραμμικών εξισώσεων στην επαναλαμβανόμενη επίλυση γραμμικών εξισώσεων. Αυτή η διαδοχική γραμμικοποίηση είναι η καρδιά της μεθόδου. Χάρη στην τετραγωνική της σύγκλιση είναι μαθηματική ανώτερη μέθοδος από τη Gauss-Seidel. Για μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα, η Newton-Raphson είναι πιο αποτελεσματική και πρακτική. Ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτείται για την εύρεση της λύσης είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του συστήματος.

Έστω ότι ο συνολικός αριθμός των ζυγών του συστήματος είναι  $n$ , ενώ ο αριθμός των ζυγών PV είναι  $r$ . Συνεπώς έχουμε  $n-1$  εξισώσεις ενεργού ισχύος :

$$\begin{cases} \Delta P_1 = P_{1s} - V_1 \sum_{j \in 1} V_j (g_{1j} \cos \theta_{1j} + b_{1j} \sin \theta_{1j}) = 0 \\ \Delta P_2 = P_{2s} - V_2 \sum_{j \in 2} V_j (g_{2j} \cos \theta_{2j} + b_{2j} \sin \theta_{2j}) = 0 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} = P_{n-1,s} - V_{n-1} \sum_{j \in (n-1)} V_j (g_{n-1,j} \cos \theta_{n-1,j} + b_{n-1,j} \sin \theta_{n-1,j}) = 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

και  $n-r-1$  εξισώσεις αέργου ισχύος:

$$\begin{cases} \Delta Q_1 = Q_{1s} - V_1 \sum_{j \in 1} V_j (g_{1j} \sin \theta_{1j} - b_{1j} \cos \theta_{1j}) = 0 \\ \Delta Q_2 = Q_{2s} - V_2 \sum_{j \in 2} V_j (g_{2j} \sin \theta_{2j} - b_{2j} \cos \theta_{2j}) = 0 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-r-1} = Q_{n-r-1,s} - V_{n-r-1} \sum_{j \in (n-r-1)} V_j (g_{n-r-1,j} \sin \theta_{n-r-1,j} - b_{n-r-1,j} \cos \theta_{n-r-1,j}) = 0 \end{cases} \quad (5.12)$$

Ο αριθμός των αγνώστων στις παραπάνω εξισώσεις είναι  $(n-1)$   $\theta_i$  και  $(n-r-1)$   $V_i$ , συνολικά  $2n-r-1$  άγνωστοι. Οι εξισώσεις είναι κι αυτές  $2n-r-1$ , συνεπώς το σύστημα μπορεί να λυθεί.

Παραγωγίζοντας τις (5.11) και (5.12) προκύπτουν τα στοιχεία του *Ιακωβιανού πίνακα* (*Jacobian Matrix*) :

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} = -V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \neq j \quad (5.13)$$

$$H_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{j \in i, j \neq i} V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5.14)$$

Σε μητρική μορφή έχουμε :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

όπου :

$$H_{ii} = V_i^2 b_{ii} + Q_i$$

$$N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} V_j = -V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \neq j$$

$$N_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} V_i = -V_i \sum_{j \in i, j \neq i} V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) - 2V_i^2 g_{ii} = -V_i^2 g_{ii} - P_i$$

$$J_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \neq j$$

$$J_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = -V_i \sum_{j \in i, j \neq i} V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) = V_i^2 g_{ii} - P_i$$

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_j} V_j = -V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \neq j$$

$$L_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} V_i = -V_i \sum_{j \in i, j \neq i} V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) + 2V_i^2 b_{ii} = V_i^2 b_{ii} - Q_i$$

Παρατηρούμε ότι τα μη διαγώνια στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας εξαρτώνται μόνο από ένα στοιχείο της μήτρας αγωγιμότητας. Συνεπώς, εάν  $y_{ij} = 0$ , τότε και τα αντίστοιχα στοιχεία της Ιακωβιανής θα είναι μηδενικά.

Τα χαρακτηριστικά σύγκλισης της Newton-Raphson είναι εξαιρετικά. Γενικά μπορεί να συγκλίνει και σε 6-7 επαναλήψεις. Συνεπώς με την εφαρμογή της μεθόδου αυτής μπορούμε να επιλύσουμε το πρόβλημα της ροής φορτίου, και να υπολογίσουμε τις τάσεις στο δίκτυο με δεδομένα τα φορτία και την παραγωγή των φωτοβολταϊκών, πράγμα που θα υλοποιήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο. [17]

### 5.6.2 Η μέθοδος Gauss-Seidel

Υποθέτουμε γνωστή μια αρχική σειρά τιμών όλων των τάσεων των ζυγών (μόνο η τάση του ζυγού ταλάντωσης είναι επιβεβλημένη), και έστω  $\tilde{V}_i$  η αρχική αυτή τιμή για το ζυγό  $i$ . Από τη σχέση (5.4) λύνοντας ως προς  $\tilde{V}_i$  προκύπτει:

$$\tilde{V}_i = \frac{1}{y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{\tilde{V}_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij} \tilde{V}_j \right) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5.16)$$

Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται επαναληπτικά σύμφωνα με τη διαδικασία Gauss-Seidel. Για τον προσδιορισμό της  $\tilde{V}_i$  στο βήμα  $(t+1)$  έχουμε:

$$\tilde{V}_i^{(t+1)} = \frac{1}{y_{ii}} \left( \frac{P_i^{(t)} - jQ_i^{(t)}}{\tilde{V}_i^{(t)*}} - \sum_{k=1}^{i-1} y_{ik} \tilde{V}_k^{(t+1)} - \sum_{k=i+1}^n y_{ik} \tilde{V}_k^{(t)} \right) \quad (5.17)$$

Στους ζυγούς φορτίου ο παραπάνω τύπος εφαρμόζεται κατευθείαν, δεδομένου ότι τα  $P_i$ ,  $Q_i$  είναι γνωστά. Ωστόσο στους ζυγούς παραγωγής δεν είναι γνωστό το  $Q_i$ , και πρέπει να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$Q_i^{(t)} = -Im \left\{ \tilde{V}_i^{(t)} * \left( \sum_{j=1}^{i-1} y_{ij} \tilde{V}_j^{(t+1)} + \sum_{j=1}^n y_{ij} \tilde{V}_j^{(t)} \right) \right\} \quad (5.18)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του  $Q_i$  στη σχέση (5.17) υπολογίζεται το  $\tilde{V}_i^{(t+1)}$ . Ωστόσο, από την τιμή που θα προκύψει γίνεται δεκτή μόνο η γωνία  $\theta_i$ , καθώς το μέτρο της τάσης  $V_i$  είναι καθορισμένο για τους ζυγούς παραγωγής.

### 5.6.3 Η ταχεία αποζευγμένη μέθοδος

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στη μέθοδο Newton-Raphson. Ο αλγόριθμος αυτός αγνοεί τις ασθενείς συνδέσεις που υπάρχουν μεταξύ της πραγματικής ισχύος και του μέτρου της τάσης αφενός, και μεταξύ της αέργου ισχύος και της γωνίας αφετέρου. Με τον τρόπο αυτό λύνει ξεχωριστά τις εξισώσεις ενεργού και αέργου ισχύος (5.11,5.12), και χρησιμοποιεί τη διαφορά της ενεργού ισχύος για να υπολογίσει τη γωνία της τάσης, και τη διαφορά της αέργου ισχύος για να υπολογίσει το μέτρο αυτής.

Όπως αναφέραμε, ο μέθοδος Newton-Raphson βασίζεται στον Ιακωβιανό πίνακα. Γράφοντας αναλυτικά τη σχέση (5.15) προκύπτει:

$$\begin{cases} \Delta P = H\Delta\theta + N\frac{\Delta V}{V} \\ \Delta Q = J\Delta\theta + L\frac{\Delta V}{V} \end{cases} \quad (5.19)$$

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ενεργός ισχύς σχετίζεται κυρίως με τη γωνία του παραστατικού μιγά της τάσης των ζυγών, ενώ η άεργος ισχύς με το μέτρο του, συνεπώς συμπεραίνουμε ότι τα στοιχεία των μητρών N και J είναι σχετικά μικρά. Αγνοώντας λοιπόν τις ασθενείς αυτές συνδέσεις, δηλαδή αμελήσουμε τις μήτρες N και J αποκτούμε σε κάθε ανακύκλωση δύο μητρικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned} [\Delta P] &= [H][\Delta\theta] \\ [\Delta Q] &= [L][\Delta V/V] \end{aligned} \quad (5.20)$$

Με τον τρόπο αυτό το αρχικό σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων διάστασης  $2n$  έχει απλοποιηθεί σε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων διάστασης  $n$ .

Επίσης, επειδή οι διαφορές στις γωνίες των τάσεων των ζυγών είναι μικρές, μπορούν να γίνουν οι εξής υποθέσεις:  $\begin{cases} \cos\theta_{ij} \approx 1 \\ g_{ij} \sin\theta_{ij} \ll b_{ij} \end{cases}$ . Παράλληλα η αγωγιμότητα  $b_{Li}$  που αντιστοιχεί στην άεργο ισχύ του ζυγού είναι πολύ μικρότερη από το  $b_{ii}$ , συνεπώς  $b_{Li} = \frac{Q_i}{V_i^2} \ll b_{ii} \rightarrow Q_i \ll V_i^2 b_{ii}$ . Συνεπώς καταλήγουμε στα εξής:

$$\begin{cases} H_{ii} = V_i^2 b_{ii} \\ H_{ij} = V_i V_j b_{ij} \\ L_{ii} = V_i^2 b_{ii} \\ L_{ij} = V_i V_j b_{ij} \end{cases} \quad (5.21)$$

Προκύπτει ότι  $H=L$ . Μετά από κατάλληλες πράξεις προκύπτουν οι εξισώσεις διόρθωσης για την ταχεία αποζευγμένη μέθοδο:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1/V_1 \\ \Delta P_2/V_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n/V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \Delta\theta_1 \\ V_2 \Delta\theta_2 \\ \vdots \\ V_n \Delta\theta_n \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1/V_1 \\ \Delta Q_2/V_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n/V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι οι πίνακες των συντελεστών είναι σταθεροί, συνεπώς δε χρειάζεται να υπολογίζονται, να αντιστρέφονται και να

αποθηκεύονται σε κάθε επανάληψη, μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις σε μνήμη και υπολογιστική ικανότητα.

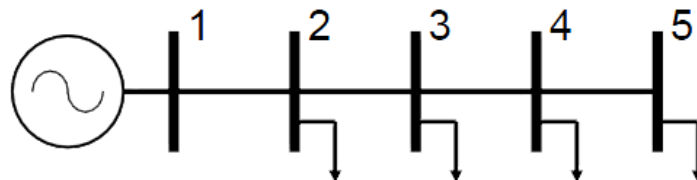
### 5.7 Ανάλυση ευαισθησίας τάσης

Όπως έχουμε δει, το κάθε δίκτυο έχει ξεχωριστές παραμέτρους (είδος και μήκος γραμμών, μετασχηματιστής κλπ), συνεπώς απαιτείται μια ανάλυση ροής φορτίου, ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος χειρισμού του. Μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου μπορούμε να πραγματοποιήσουμε την *ανάλυση ευαισθησίας τάσης*, η οποία μας επιτρέπει να αποκτήσουμε μια ποσοτική εικόνα της επίδρασης των μεταβολών της ενεργού και αέργου ισχύος στην τάση των ζυγών του ακτινικού δικτύου. Με βάση τα στοιχεία των μητρών ευαισθησίας βρίσκουμε τα πιο αποτελεσματικά σημεία για τη στήριξη τάσης του δικτύου, μεταβάλλοντας την ενεργό και άεργο ισχύ που παράγουν ή απορροφούν οι ζυγοί.

Η μέθοδος Newton - Raphson υπολογίζει τη ροή φορτίου χρησιμοποιώντας τις δύο μη γραμμικές εξισώσεις της σχέσης (5.9). Σε κάθε επανάληψη γίνεται εκ νέου υπολογισμός των στοιχείων της Ιακωβιανής μήτρας (Jacobian Matrix). Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του Jacobian όταν επιτευχθεί σύγκλιση, και με βάση τη σχέση (5.15) προκύπτει η μήτρα ανάλυσης ευαισθησίας τάσης [32]:

$$S_V = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & |V| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & |V| \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & |V| \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & |V| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Ο παραπάνω πίνακας ευαισθησίας αποτελείται από τέσσερις υποπίνακες ( $S_{V_{mn}}, m = 1, 2, n = 1, 2$ ) με μερικές παραγώγους που απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσης κατά μέτρο και γωνία σε σχέση με τις μεταβολές της ενεργού και αέργου ισχύος στον κάθε ζυγό. Οι υποπίνακες  $S_{V_{21}}$  και  $S_{V_{22}}$  αφορούν τη μεταβολή του μέτρου της τάσης. Για την καλύτερη κατανόηση της φυσικής σημασίας των στοιχείων των πινάκων αυτών παρατίθεται ένα παράδειγμα το οποίο βασίζεται στο εξής υποθετικό δίκτυο:



**Εικόνα 5.3** Δίκτυο XT πέντε ζυγών

Θεωρούμε ότι το δίκτυο αποτελείται από φορτία χωρίς παραγωγή στους ζυγούς, και ότι το συνολικό φορτίο της γραμμής είναι 1 αμ.

Έστω ότι προκύπτει ο εξής πίνακας ευαισθησίας τάσης :

$$S_V = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0.0025 & 0.0025 & 0.0025 & -0.0193 & -0.0193 & -0.0193 & -0.0193 \\ 0.0025 & 0.0051 & 0.0051 & 0.0051 & -0.0193 & -0.0393 & -0.0393 & -0.0393 \\ 0.0026 & 0.0052 & 0.0078 & 0.0078 & -0.0193 & -0.0393 & -0.0599 & -0.0599 \\ 0.0026 & 0.0053 & 0.0079 & 0.0105 & -0.0193 & -0.0393 & -0.0599 & -0.0807 \\ \hline 0.0194 & 0.0200 & 0.0204 & 0.0206 & 0.0024 & 0.0024 & 0.0024 & 0.0024 \\ 0.0194 & 0.0393 & 0.0401 & 0.0405 & 0.0024 & 0.0047 & 0.0047 & 0.0047 \\ 0.0194 & 0.0393 & 0.0593 & 0.0599 & 0.0024 & 0.0047 & 0.0071 & 0.0071 \\ 0.0194 & 0.0393 & 0.0593 & 0.0789 & 0.0024 & 0.0047 & 0.0071 & 0.0095 \end{bmatrix}$$

Συνεπώς :

$$S_{V21} = S_{UP} = \begin{bmatrix} 0.0194 & 0.0200 & 0.0204 & 0.0206 \\ 0.0194 & 0.0393 & 0.0401 & 0.0405 \\ 0.0194 & 0.0393 & 0.0593 & 0.0599 \\ 0.0194 & 0.0393 & 0.0593 & 0.0789 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$S_{V22} = S_{UQ} = \begin{bmatrix} 0.0024 & 0.0024 & 0.0024 & 0.0024 \\ 0.0024 & 0.0047 & 0.0047 & 0.0047 \\ 0.0024 & 0.0047 & 0.0071 & 0.0071 \\ 0.0024 & 0.0047 & 0.0071 & 0.0095 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Η σημασία του κάθε στοιχείου των πινάκων (5.25), (5.26) μπορεί να ερμηνευθεί ως η μεταβολή που υφίσταται το μέτρο της τάσης σε ένα ζυγό σε περίπτωση εγχύσεως ενεργού ισχύος ποσότητας 1αμ για τον πίνακα  $S_{UP}$ , ή ποσότητας 1 αμ αέργου ισχύος για τον πίνακα  $S_{UQ}$  [32].

Το θετικό πρόσημο των στοιχείων των πινάκων μας δείχνει ότι μειώνοντας την ενεργό ή άεργο ισχύ στο ζυγό, θα προκληθεί μείωση της τάσης. Σε περίπτωση αρνητικού προσήμου, θα πρέπει να αυξήσουμε την ισχύ, ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή μείωση τάσης.

Χρησιμοποιώντας για παράδειγμα το στοιχείο που βρίσκεται στη δεύτερη γραμμή και τρίτη στήλη της μήτρας  $S_{UP}$ , μπορούμε να βρούμε τη μεταβολή  $\Delta P$  που πρέπει να προκαλέσουμε στην ενεργό ισχύ του ζυγού 4, ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή μεταβολή τάσης  $\Delta V$  στο ζυγό 3.

Θεωρούμε ότι από την ανάλυση ροής φορτίου που έχει προηγηθεί για το παραπάνω υποθετικό δίκτυο, προκύπτει ότι η τάση του ζυγού 5 είναι 0.95 αμ. Για να μεταβάλουμε την τάση του ίδιου ζυγού στο 1 αμ, άρα να προκαλέσουμε μεταβολή τάσης  $\Delta V=1-0.95=0.05$  αμ, χρησιμοποιούμε το στοιχείο που βρίσκεται στην τέταρτη γραμμή και τέταρτη στήλη της μήτρας  $S_{UP}$ , που ισούται με 0.0789. Έχουμε λοιπόν :



$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = 0.0789 \Rightarrow \Delta P = \frac{0.05}{0.0789} = 0.63 \text{ αμ}$$

Συνεπώς, εάν στο ζυγό 5 προκαλέσουμε μια αύξηση της ενεργού ισχύος κατά  $\Delta P=0.63$  αμ, η τάση του θα πάρει την τιμή 1 αμ. Αντίστοιχα, μπορεί να βρεθεί η μεταβολή της αέργου ισχύος σε οποιονδήποτε ζυγό, ώστε να πετύχουμε οποιαδήποτε αλλαγή τάσης επιθυμούμε.

Τέλος, τα στοιχεία των δύο μητρών  $S_{UP}$  και  $S_{UQ}$  μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους, ώστε να προσδιορίσουμε ποια παράμετρος εισόδου (ενεργός P ή άεργος ισχύς Q) έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην τάση του δικτύου.

## Κεφάλαιο 6

### Ψηφιακός Εξομοιωτής Πραγματικού Χρόνου (RTDS)

#### 6.1 Ο εξομοιωτής

Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (Real Time Digital Simulator – RTDS), που κατασκευάζεται από το RTDS Technology INC, είναι ένας ψηφιακός εξομοιωτής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο εξομοιωτής χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή δοκιμών κλειστού βρόχου (HIL), σε πραγματικό χρόνο, διάφορων συσκευών, όπως πχ ενός μοντέλου ντιζελογεννήτριας, ή ακόμα και ολόκληρου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, είναι χρήσιμος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, όπως η δοκιμή και ο έλεγχος ηλεκτρικών συσκευών, αλλά και σε τομείς όπως είναι η εκπαίδευση χειριστών, μηχανικών και φοιτητών. Ο εξομοιωτής επιτρέπει στο χειριστή του να διερευνήσει τις επιπτώσεις των διαταραχών των μεταβατικών καταστάσεων στον εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων ή και καταστροφών.

Ο προσομοιωτής είναι ένας συνδυασμός εξελεγμένου υπολογιστικού υλικού και εξειδικευμένου λογισμικού. Τα επιθυμητά δίκτυα ηλεκτρικής ισχύος σχεδιάζονται στον υπολογιστή μέσω του προγράμματος που επιτρέπει την επικοινωνία του χρήστη με το RTDS (RSCAD), με βάση τις έτοιμες βιβλιοθήκες ηλεκτρικών στοιχείων που περιέχει. Είναι μεγάλης σημασίας το ότι ο προσομοιωτής είναι πλήρως επεκτάσιμος, συνεπώς επιτρέπει στο χρήστη να δουλέψει ακόμα και με τα πιο πολύπλοκα και ακριβή μοντέλα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του εξομοιωτή RTDS, και αυτό που τον καθιστά ξεχωριστό σε σχέση με άλλους ψηφιακούς εξομοιωτές είναι η δυνατότητά του να δουλεύει σε συνεχή σταθερό πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι εφικτό, καθώς μπορεί να επιλύσει τις εξισώσεις του συστήματος πολύ γρήγορα, ώστε η έξοδός του να αντιπροσωπεύει ρεαλιστικά τις συνθήκες που ισχύουν και στο πραγματικό δίκτυο. Αυτό το επιτυγχάνει χάρη στο εξελεγμένο hardware, το οποίο θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο.

Στις μέρες μας το RTDS χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, τυπικά στην ανάπτυξη, τη δοκιμή και τη μελέτη μεθόδων προστασίας με ηλεκτρονόμους, ενσωματωμένης προστασίας και συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Ακόμη, χρησιμοποιείται για συστήματα ελέγχου για HVDC, SVC, σύγχρονες μηχανές και συσκευές FACTS, για γενικές λειτουργίες συστημάτων AC και DC, και για την αλληλεπίδραση διάφορων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

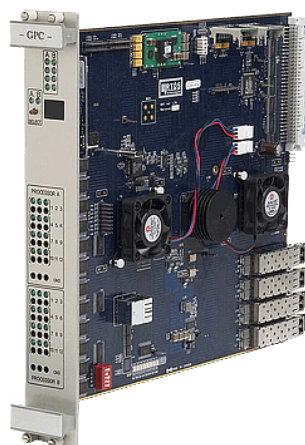


*Εικόνα 6.1 RTDS Simulator*

## 6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του RTDS

Ο εξομοιωτής εκμεταλλεύεται την αρχιτεκτονική της παράλληλης επεξεργασίας χρησιμοποιώντας πολλαπλούς επεξεργαστές, οι οποίοι βρίσκονται σε ανεξάρτητες μονάδες, που αποκαλούνται racks. Κάθε rack αποτελείται από διάφορες κάρτες. Η σύνθεση ενός εξομοιωτή εξαρτάται από τις ανάγκες επεξεργασίας των εισόδων - εξόδων της κάθε εφαρμογής. Ένα backbone συνδέει όλες τις κάρτες ενός rack, και διεκπεραιώνει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους.

Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές διαφορετικές κάρτες, στις οποίες περιλαμβάνονται οι: 3PC (Triple Processor Card), TPC (Tandem Processor Card), GPC (Giga Processor Card), IRC (Workstation Inter Rack Communications Card), WIF (Workstation Interface Card).



*Εικόνα 6.2 GPC κάρτα*

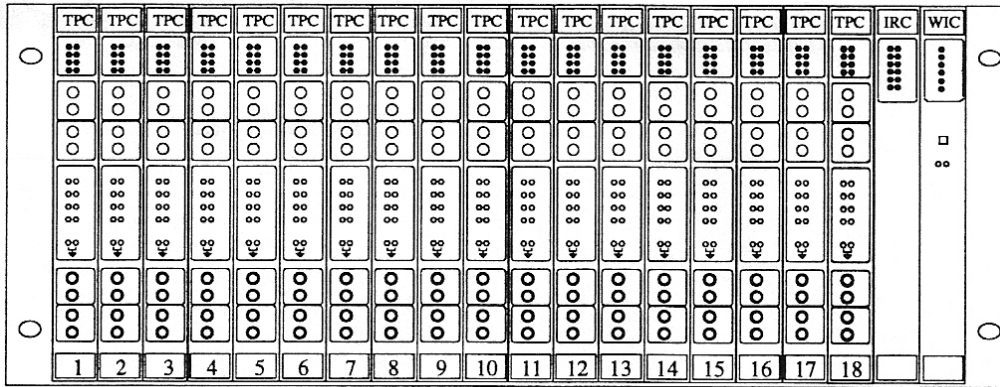


**Εικόνα 6.3** WIF κάρτα

Οι τρεις βασικοί τύποι καρτών είναι οι εξής:

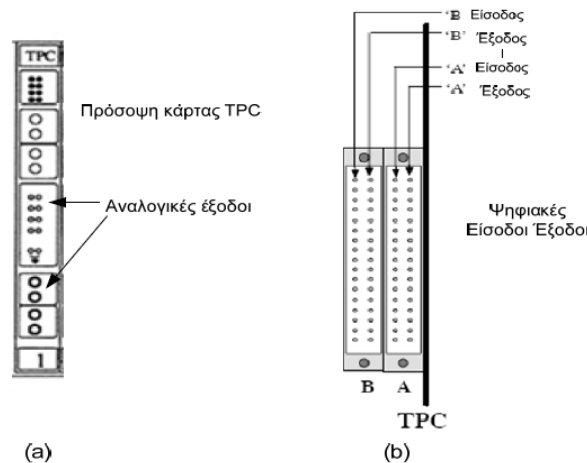
- ✓ Tandem Processor Cards (TPC): είναι οι κύριες κάρτες επεξεργασίας. Κάθε TPC κάρτα φέρει δύο ανεξάρτητους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος NEC77240. Ο συνολικός αριθμός καρτών επεξεργασίας που βρίσκονται σε κάθε βάση είναι δεκαοκτώ (18).
- ✓ Workstation Interface Card (WIF): πρόκειται για την κάρτα επικοινωνίας μεταξύ της γραφικής διεπιφάνειας του λογισμικού, που είναι εγκατεστημένο σε ένα σταθμό εργασίας (PC), και τη βάση (rack) του RTDS. Η κάρτα αυτή διαθέτει έναν ελεγκτή ethernet, που είναι σε θέση να διαβιβάζει πακέτα δεδομένων μεταξύ του τερματικού εργασίας και του RTDS. Συνεπώς, η κάρτα WIF παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να φορτώνει, να ξεκινά, να σταματά και να ελέγχει τις προσομοιώσεις στο RTDS.
- ✓ Inter-Rack Communication Card (IRC): είναι η κάρτα που ανταλλάσσει δεδομένα μεταξύ επεξεργαστών που βρίσκονται σε διαφορετικές βάσεις (racks). Κάθε κάρτα IRC περιλαμβάνει έναν αριθμό από κανάλια εκπομπού - δέκτη, επιτρέποντας έτσι την απευθείας επικοινωνία μεταξύ πολλών βάσεων (racks).

Η μονάδα εξομοιωτή που διαθέτει το εργαστήριο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα rack με 18 κάρτες επεξεργασίας TPC, και μια κάρτα WIF.



**Εικόνα 6.4** Τυπικό rack του εξομοιωτή

Κάθε κάρτα TPC διαθέτει δύο επεξεργαστές, καθώς και αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους. Οι αναλογικές εξόδους βρίσκονται στην πρόσοψη του εξομοιωτή, και μπορούν να συνδεθούν με εξωτερικό υλικό, είτε μέσω ακροδεκτών τύπου "μπανάνα", είτε μέσω ομοαξονικών καλωδίων. Κάθε επεξεργαστής διαθέτει 4 τέτοιες εξόδους, οι οποίες φαίνονται στην *Εικόνα 6.4*. Οι ψηφιακές εισόδους - εξόδους βρίσκονται στην πίσω όψη του εξομοιωτή. Κάθε κάρτα TPC διαθέτει δύο ψηφιακές υποδοχές σύνδεσης, μία για κάθε επεξεργαστή, όπως παρουσιάζεται στην *Εικόνα 6.5*.



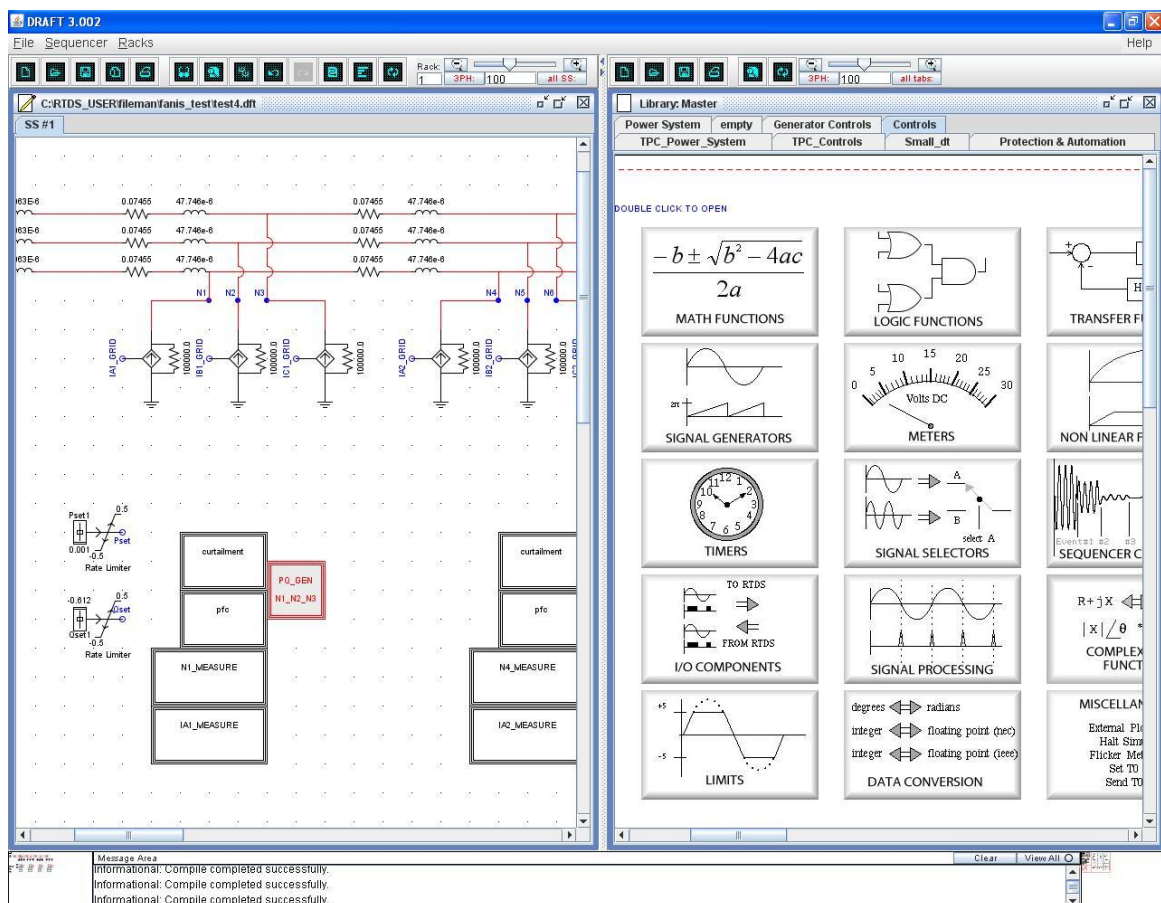
**Εικόνα 6.5** Αναλογικές και ψηφιακές εισόδους - εξόδους των καρτών TPC

Οι υποδοχές είναι θυρίδες των 34 ακροδεκτών, οι οποίες μπορούν να συνδεθούν με εξωτερικές συσκευές με τη χρήση καλωδίου κορδέλας. Κάθε υποδοχή αποτελείται από δύο στήλες 17 ακροδεκτών, μια για τις εισόδους και μια για τις εξόδους κάθε επεξεργαστή. Η κάθε στήλη μπορεί να φέρει μέχρι 16 ψηφιακά σήματα με το 17ο ακροδέκτη, που βρίσκεται στη βάση της υποδοχής, να είναι ο ακροδέκτης αναφοράς (γη).

### 6.3 Λογισμικό RSCAD

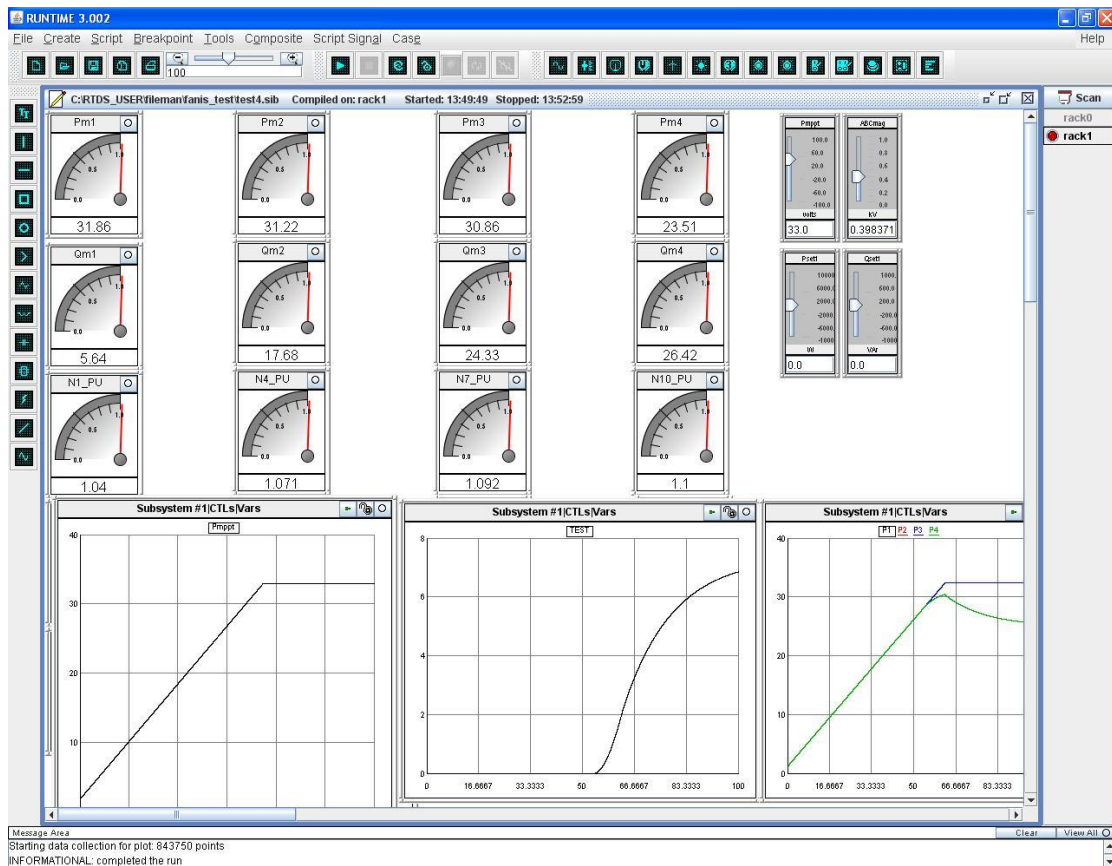
Το λογισμικό για την επικοινωνία του τερματικού με το RTDS αποτελείται από δύο επίπεδα: τη γραφική διεπιφάνεια χρήστη (GUI), και το μεταγλωττιστή (Compiler).

Η γραφική διεπιφάνεια κάνει εφικτή την επικοινωνία του RTDS με το χρήστη. Αυτή επιτυγχάνεται με το RSCAD, το οποίο αποτελεί ένα γραφικό περιβάλλον υψηλού επιπέδου. Το πρόγραμμα RSCAD αποτελείται από πολλά τμήματα, εκ των οποίων θα μας απασχολήσουν τα δύο. Το πρώτο στάδιο είναι το Draft, στο οποίο γίνεται ο σχεδιασμός του δικτύου που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Με βάση τις βιβλιοθήκες του προγράμματος μπορούμε να προσομοιώσουμε μια πληθώρα εφαρμογών και καταστάσεων λειτουργίας.



Εικόνα 6.6 Στάδιο Draft του RSCAD

Το δεύτερο στάδιο είναι το Runtime, στο οποίο εκτελείται η προσομοίωση του δικτύου που έχει δημιουργηθεί στο Draft, και λαμβάνονται τα αποτελέσματά της. Στο στάδιο αυτό ο χρήστης μπορεί να επέμβει δυναμικά στην εξομοίωση, κάνοντας χειρισμούς ελέγχου των διακοπών, αυξομειώνοντας παραμέτρους της προσομοίωσης κλπ. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τα μετρούμενα μεγέθη που τον ενδιαφέρουν, χρησιμοποιώντας γραφικά εικονίδια μετρητών, γραφήματα με κυματομορφές από μεγέθη της εξομοίωσης κλπ. [8]



Εικόνα 6.7 Στάδιο Runtime του RSCAD

## Κεφάλαιο 7

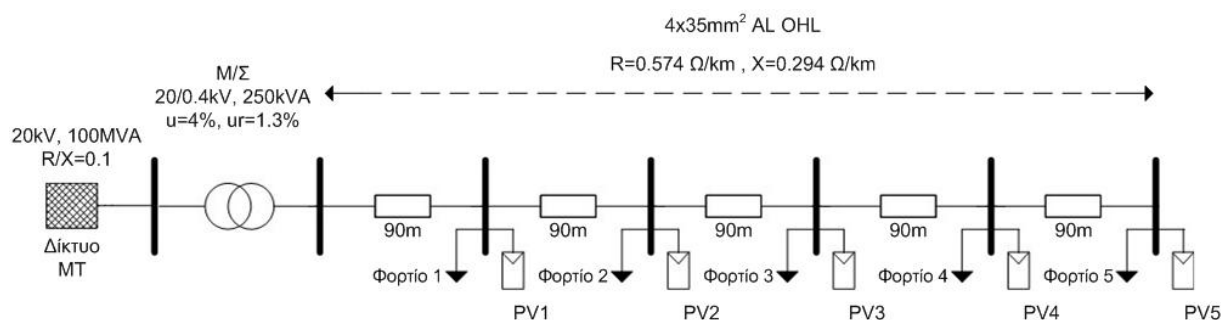
### Προσομοιώσεις - Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

#### 7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσομοιωθούν και θα μελετηθούν δύο απλουστευμένα ακτινικά δίκτυα χαμηλής τάσης, στα οποία έχουν συνδεθεί φωτοβολταϊκές μονάδες. Στόχος των προσομοιώσεων είναι η διερεύνηση ανύψωσης τάσης λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος στο δίκτυο. Αρχικά θα γίνει μελέτη των δικτύων και των χαρακτηριστικών τους, στη συνέχεια θα γίνει καταμέτρηση της τάσης των ζυγών, και τέλος θα γίνει εφαρμογή των μεθόδων αντιμετώπισης του φαινομένου ανύψωσης τάσης, που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, με σεβασμό πάντα στα όρια μεταφοράς των γραμμών και του Μ/Σ.

#### 7.2 Τοπολογία δικτύου με γραμμές με λόγο $R/X=2$

Το πρώτο δίκτυο με το οποίο ασχοληθήκαμε, είναι ένα απλουστευμένο δίκτυο ΧΤ αγροτικής περιοχής με πέντε καταναλωτές, οι οποίοι διαθέτουν φωτοβολταϊκή παραγωγή, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



**Εικόνα 7.1** Δίκτυο αγροτικής περιοχής με πέντε φωτοβολταϊκές γεννήτριες και πέντε φορτία

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από ένα Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ, από εναέριες γραμμές ΧΤ μήκους 90 μέτρων, καθώς και από τις καταναλώσεις και τις παραγωγές των ζυγών.

Καθώς στις αγροτικές περιοχές υπάρχει άφθονος χώρος για εγκαταστάσεις Φ/Β, και η απόσταση μεταξύ των οικιών είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις αστικές περιοχές, προκύπτει ότι σε αγροτικά δίκτυα είναι πολύ μεγαλύτερη η πιθανότητα παραβίασης των επιτρεπτών ορίων τάσης. Για το λόγο αυτό, έχει γίνει η επιλογή και η μοντελοποίηση ενός τέτοιου δικτύου. [33]



### 7.2.1 Σενάρια κατανάλωσης - παραγωγής με ανάλυση ροής φορτίου

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με διάφορα σενάρια κατανάλωσης - παραγωγής για το δίκτυο της *Εικόνας 7.1*. Για να το πετύχουμε αυτό, αρχικά πρέπει να γίνει ο υπολογισμός των στοιχείων της τοπολογίας, ώστε να γίνει εφικτή η προσομοίωσή της.

Το δίκτυο τροφοδοσίας ΜΤ της τοπολογίας της *Εικόνας 7.1* αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης, και μια σύνθετη αντίσταση λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης του δικτύου ΜΤ.

#### Ισχύς βραχυκύκλωσης [30], [31]

Η ισχύς βραχυκύκλωσης είναι 100MVA. Συνεπώς έχουμε:

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

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

$$L_s = \frac{X_s}{100 * \pi} = 5.093 * 10^{-6} H.$$

#### Μετασηματιστής ΜΤ/ΧΤ [34]

Ο Μ/Σ έχει τάση βραχυκύκλωσης  $u=4\%$ . Συνεπώς:

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

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

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

$$X_{M/\Sigma} = \sqrt{0.0256^2 - 0.00832^2} = 0.02421 \Omega \quad [38]$$

Τέλος προκύπτει :

$$L_{M/\Sigma} = \frac{X_{M/\Sigma}}{100 * \pi} = 77.063 * 10^{-6} H.$$

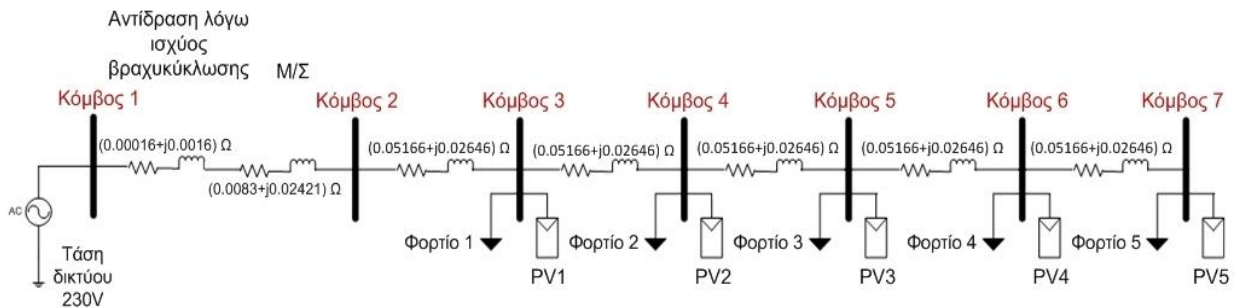
#### Εναέρια γραμμές ΧΤ [17]

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

Για απόσταση 90m μεταξύ των κόμβων προκύπτει :

$R=0.05166\Omega$  και  $X=0.02646\Omega$ . Επίσης  $L = 84.225 * 10^{-6}H = 84.225\mu H$ .

Με βάση τα παραπάνω, το δίκτυο της *Εικόνας 7.1* μετασχηματίζεται στο εξής:



*Εικόνα 7.2* Στοιχεία δικτύου αγροτικής περιοχής

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος του Hadi Saadat για τη ροή φορτίου με τη μέθοδο Newton - Raphson, με τροποποιήσεις και βελτιώσεις από το Εργαστήριο ΣΗΕ της σχολής ΗΜΜΥ ΕΜΠ. Για την εκτέλεση του αλγορίθμου χρησιμοποιείται το πρόγραμμα MatLab (έκδοση R2010a).

Ο αλγόριθμος δέχεται σαν δεδομένα την τοπολογία του δικτύου, τις τιμές της σύνθετης αντίστασης των κλάδων, την παραγωγή, τα φορτία και τη χωρητική αντιστάθμιση σε κάθε κόμβο, και υπολογίζει το μέτρο και τη γωνία της τάσης σε κάθε κόμβο. Σαν κόμβος (ή ζυγός) του δικτύου ορίζεται κάθε σημείο στο οποίο μπορούν να συνδεθούν φορτία ή φωτοβολταϊκοί σταθμοί παραγωγής.

Ένα παράδειγμα των δεδομένων του προγράμματος φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



ενεργού και αέργου ισχύος για τον κάθε ζυγό, ενώ οι στήλες 7 και 8 αφορούν την παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος στον κάθε ζυγό.

Στην περίπτωση μας, ως ζυγός ταλάντωσης θεωρείται ο ζυγός 1 που φαίνεται στην *Εικόνα 7.2*, καθώς η τάση του μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και αμετάβλητη σε σχέση με τη διακύμανση του φορτίου και της παραγωγής. Όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι θεωρούνται ζυγοί PQ, καθώς γνωρίζουμε κάθε φορά την παραγωγή ή τη ζήτηση της ισχύος, ενώ η τάση τους είναι ο προς επίλυση άγνωστος. Στη συνέχεια αρχικοποιείται η τάση κατά μέτρο και γωνία στο  $1\angle 0^\circ$  για κάθε κόμβο.

Ο δεύτερος πίνακας φέρει την ονομασία *linedata*, αποτελείται από έξι στήλες, και συμπληρώνεται με τα δεδομένα του δικτύου. Οι δύο πρώτες στήλες δηλώνουν τις συνδέσεις που υπάρχουν μεταξύ των ζυγών, σημειώνεται δηλαδή ο κόμβος αναχώρησης και άφιξης του κάθε κλάδου. Οι στήλες 3, 4 και 5 χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή των δεδομένων των γραμμών (αντίσταση, αντίδραση και το ήμισυ της συνολικής εγκάρσιας αγωγιμότητας της γραμμής). Σημειώνεται πως στην περίπτωση μας, η εγκάρσια αγωγιμότητα των γραμμών αμελείται, καθώς οι γραμμές XT είναι μικρού μήκους.

Στη συνέχεια, το κυρίως πρόγραμμα καλεί ένα υποπρόγραμμα, το οποίο από τα δεδομένα εισόδου του πίνακα *linedata*, κατασκευάζει τη μήτρα αγωγιμοτήτων κόμβων, και μέσω των εξισώσεων της μεθόδου Newton - Raphson υπολογίζει το μέτρο και τη γωνία της τάσης σε κάθε κόμβο του δικτύου. Οι τάσεις στα αποτελέσματα εμφανίζονται σε αμ (pu).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις των γραμμών που θα δώσουμε ως είσοδο στον πίνακα *linedata*, πρέπει να είναι σε αμ τιμές. Αρχικά, υπολογίζουμε τη βασική αντίσταση:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{(400V)^2}{1 * 10^6VA} = 0.16\Omega$$

όπου  $S_b = 1MVA$  η βασική ισχύς, και  $V_b = 400V$  η βασική τάση. Για την αναγωγή των αντιστάσεων στο ανά μονάδα σύστημα χρησιμοποιείται η σχέση :

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b}$$

Εφαρμόζοντας τους παραπάνω τύπους στα δεδομένα του δικτύου αγροτικής περιοχής της *Εικόνας 7.2*, προκύπτουν οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις των στοιχείων του δικτύου που θα δοθούν ως είσοδος στο πρόγραμμα ροής φορτίου:

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (ρμ)	X (ρμ)
1	2	0.053	0.1613
2	3	0.3229	0.1654
3	4	0.3229	0.1654
4	5	0.3229	0.1654
5	6	0.3229	0.1654
6	7	0.3229	0.1654

**Πίνακας 7.1** Αντιστάσεις και αντιδράσεις των κλάδων του δικτύου

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4, οι ακραίες περιπτώσεις λειτουργίας ενός δικτύου με φορτία και παραγωγή σε σχέση με την τιμή της τάσης είναι τέσσερις :

- Ελάχιστη παραγωγή - Μέγιστο φορτίο
- Ελάχιστη παραγωγή - Ελάχιστο φορτίο
- Μέγιστη παραγωγή - Μέγιστο φορτίο
- Μέγιστη παραγωγή - Ελάχιστο φορτίο

Έχοντας υπολογίσει τις τιμές σε αμ των στοιχείων του δικτύου, μπορούμε να καταγράψουμε με το πρόγραμμα ροής φορτίου την τάση που αναπτύσσεται στους ζυγούς, για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια.

### 7.2.1.1 Ελάχιστη παραγωγή - Μέγιστο φορτίο

Στο σενάριο αυτό θεωρούμε τριφασική φωτοβολταϊκή παραγωγή 3kW με συντελεστή ισχύος μονάδα, που μπορεί πχ να παράγει ένας τριφασικός αντιστροφέας σε συνθήκες πολύ χαμηλής ηλιοφάνειας, και φορτία 3kW/φάση, με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi=0.9$  επαγωγικό σε κάθε κόμβο [35].

Στην πράξη, οι υπαίθριες γραμμές XT τροφοδοτούν συνήθως μονοφασικά οικιακά φορτία, που συνδέονται εναλλάξ σε διαφορετικές φάσεις. Ωστόσο, για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ο διαχειριστής του δικτύου απαιτεί από αυτά να είναι τριφασικά, για ισχύ μεγαλύτερη των 5kW [21].

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές κατανάλωσης και παραγωγής στο δίκτυο της *Εικόνας 7.2* προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα, τρέχοντας τον αλγόριθμο ανάλυσης ροής φορτίου:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230	0,00
2	0,995	229	-0,22
3	0,981	226	-0,09
4	0,970	223	0,01

5	0,961	221	0,09
6	0,956	220	0,14
7	0,953	219	0,17

**Πίνακας 7.2** Τάσεις ανά κόμβο για παραγωγή 3kW και κατανάλωση 3kW/φάση ( $\cos\phi=0.9$  επαγωγικό)

Όπως παρατηρούμε σε αυτή την περίπτωση, λόγω του ότι η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μικρή σε σχέση με το φορτίο, έχουμε πτώση τάσης στους ζυγούς.

### 7.2.1.2 Ελάχιστη παραγωγή - Ελάχιστο φορτίο

Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ξανά τριφασική φωτοβολταϊκή παραγωγή 3kW με συντελεστή ισχύος μονάδα, ενώ τα φορτία απορροφούν ισχύ 200W/φάση με  $\cos\phi=0.7$  επαγωγικό σε κάθε κόμβο [34], [35]. Από την ανάλυση ροής φορτίου προκύπτει:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230	0,00
2	1,000	230	0,12
3	1,003	231	0,29
4	1,006	231	0,42
5	1,008	232	0,52
6	1,009	232	0,59
7	1,010	232	0,63

**Πίνακας 7.3** Τάσεις ανά κόμβο για παραγωγή 3kW και κατανάλωση 200W/φάση ( $\cos\phi=0.7$  επαγωγικό)

### 7.2.1.3 Μέγιστη παραγωγή - Μέγιστο φορτίο

Η ΔΕΗ επιτρέπει στους οικιακούς καταναλωτές να έχουν φωτοβολταϊκές γεννήτριες μέχρι 10kWp [21]. Ωστόσο, όπως αναφέραμε παραπάνω, στις αγροτικές περιοχές υπάρχει άφθονος χώρος για αξιοποίηση, και δεν περιοριζόμαστε μόνο στις στέγες των οικιών για την εγκατάσταση. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να υπάρχουν μικρά αγροκτήματα, τα οποία επιτρέπουν αύξηση της Φ/Β διείσδυσης σε μεγάλο βαθμό. Επίσης, με βάση τις Ευρωπαϊκές οδηγίες πρέπει στα επόμενα χρόνια να αυξηθεί η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στη χώρα μας.

Για το λόγο αυτό θα θεωρήσουμε ότι κάθε οικία είναι δυνατό να διαθέτει 27kW φωτοβολταϊκής παραγωγής με συντελεστή ισχύος μονάδα, ενώ το φορτίο είναι 3kW/φάση,

με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi=0.9$  επαγωγικό σε κάθε κόμβο. Στην περίπτωση αυτή προκύπτει:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230	0,00
2	1,000	230	0,86
3	1,024	236	2,09
4	1,043	240	3,03
5	1,057	243	3,72
6	1,066	245	4,16
7	1,071	246	4,38

*Πίνακας 7.4 Τάσεις ανά κόμβο για παραγωγή 27kW και κατανάλωση 3kW/φάση ( $\cos\phi=0.9$  επαγωγικό)*

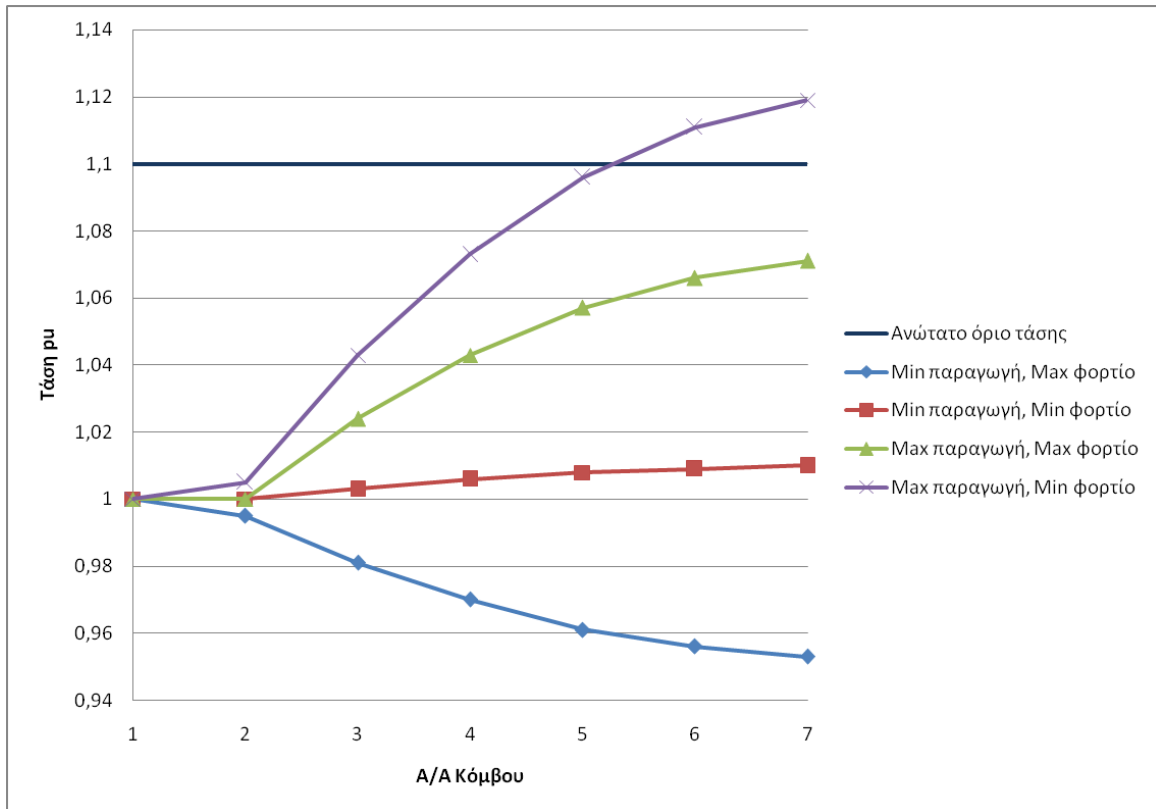
#### 7.2.1.4 Μέγιστη παραγωγή - Ελάχιστο φορτίο

Στο σενάριο αυτό θεωρούμε εκ νέου τριφασική παραγωγή 27kW με συντελεστή ισχύος μονάδα, και φορτίο 200W/φάση με  $\cos\phi=0.7$  επαγωγικό, όπως και προηγουμένως. Από την ανάλυση ροής φορτίου προκύπτει:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230	0,00
2	1,005	231	1,14
3	1,043	240	2,39
4	1,073	247	3,33
5	1,096	252	3,99
6	1,111	256	4,42
7	1,119	257	4,63

*Πίνακας 7.5 Τάσεις ανά κόμβο για παραγωγή 27kW και κατανάλωση 200W/φάση ( $\cos\phi=0.7$  επαγωγικό)*

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα των μέτρων της τάσης για λόγους σύγκρισης, προκύπτει το παρακάτω σχήμα:



**Εικόνα 7.4** Τάσεις στους κόμβους για τα διάφορα σενάρια παραγωγής - κατανάλωσης

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, η μεγαλύτερη ανύψωση τάσης εμφανίζεται στην περίπτωση μέγιστης παραγωγής - ελαχίστου φορτίου, και μάλιστα η τάση στους δύο τελευταίους κόμβους είναι πάνω από το επιθυμητό όριο ( $230V+10\%$  ή 1.1 pu). Επίσης, η ελάχιστη τάση παρουσιάζεται για ελάχιστη παραγωγή και μέγιστο φορτίο.

Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β καλύπτει τις ανάγκες των φορτίων, και η περίσσεια ισχύος εγχέεται στο δίκτυο. Συνεπώς όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά παραγωγής - φορτίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο, οπότε τόσο μεγαλύτερη είναι και η ανύψωση τάσης, με βάση τον τύπο (4.6).

Συνεπώς, εάν καταφέρουμε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα ανύψωσης τάσης για την περίπτωση μέγιστης παραγωγής - ελαχίστου φορτίου, μπορούμε να συμπεράνουμε εκ του ασφαλούς, ότι μπορούμε να αντιμετωπίσουμε προβλήματα ανύψωσης τάσης για οποιαδήποτε άλλη κατάσταση φόρτισης και Φ/Β παραγωγής.



### 7.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας τάσης του δικτύου για το σενάριο μέγιστης παραγωγής-ελάχιστου φορτίου

Όπως παρατηρήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, η μεγαλύτερη ανύψωση τάσης εμφανίζεται για μέγιστη παραγωγή και ελάχιστο φορτίο, δηλαδή 27kW παραγωγή και κατανάλωση 200W/φάση με  $\cos\varphi=0.7$  επαγ. στην περίπτωσή μας.

Με βάση την ανάλυση ροής φορτίου για το δίκτυο της *Εικόνας 7.2*, και τις τιμές αυτές παραγωγής και φόρτισης, βρήκαμε τις τάσεις που αναμένεται να αναπτυχθούν στους κόμβους του δικτύου, όπως φαίνεται στον *Πίνακα 7.5*.

Ο Ιακωβιανός πίνακας που προκύπτει μετά την σύγκλιση της μεθόδου Newton-Raphson είναι ο εξής :

6,919	-1,261	0	0	0	0	4,313	-2,492	0	0	0	0
-1,373	2,734	-1,362	0	0	0	-2,529	5,142	-2,580	0	0	0
0	-1,451	2,896	-1,444	0	0	0	-2,611	5,291	-2,649	0	0
0	0	-1,512	3,019	-1,508	0	0	0	-2,672	5,401	-2,699	0
0	0	0	-1,553	3,103	-1,550	0	0	0	-2,715	5,475	-2,731
0	0	0	0	-1,573	1,573	0	0	0	0	-2,739	2,768
-4,334	2,599	0	0	0	0	6,886	-1,209	0	0	0	0
2,542	-5,310	2,769	0	0	0	-1,366	2,621	-1,269	0	0	0
0	2,723	-5,625	2,903	0	0	0	-1,392	2,697	-1,318	0	0
0	0	2,868	-5,867	2,999	0	0	0	-1,409	2,754	-1,357	0
0	0	0	2,976	-6,030	3,055	0	0	0	-1,417	2,792	-1,386
0	0	0	0	3,043	-3,043	0	0	0	0	-1,416	1,405

Αντιστρέφοντας τον Ιακωβιανό προκύπτει:

0,160	0,151	0,144	0,139	0,136	0,135	-0,056	-0,055	-0,054	-0,054	-0,054	-0,054
0,158	0,300	0,294	0,290	0,288	0,286	-0,062	-0,373	-0,373	-0,372	-0,372	-0,372
0,156	0,290	0,428	0,425	0,423	0,422	-0,067	-0,383	-0,673	-0,673	-0,673	-0,673
0,155	0,283	0,416	0,551	0,549	0,548	-0,070	-0,389	-0,683	-0,959	-0,959	-0,959
0,155	0,279	0,408	0,539	0,672	0,672	-0,072	-0,393	-0,689	-0,967	-1,234	-1,234
0,154	0,277	0,404	0,534	0,665	0,797	-0,073	-0,395	-0,692	-0,971	-1,239	-1,499
0,049	0,040	0,033	0,029	0,026	0,024	0,161	0,162	0,162	0,163	0,163	0,163
0,048	0,335	0,308	0,289	0,277	0,271	0,156	0,317	0,319	0,320	0,320	0,320
0,047	0,327	0,591	0,557	0,535	0,525	0,152	0,309	0,466	0,467	0,468	0,468
0,046	0,320	0,579	0,833	0,802	0,787	0,149	0,303	0,457	0,609	0,611	0,611
0,045	0,316	0,572	0,822	1,077	1,057	0,147	0,299	0,451	0,601	0,752	0,752
0,045	0,314	0,568	0,817	1,070	1,336	0,146	0,297	0,447	0,597	0,747	0,895

Από τον αντίστροφο του Ιακωβιανού και με βάση τον τύπο (5.24) προκύπτει η μήτρα ευαισθησίας τάσης ως προς την ενεργό ισχύ:

$$S_{UP} = \begin{bmatrix} 0.0497 & 0.0404 & 0.0336 & 0.0288 & 0.0257 & 0.0243 \\ 0.0499 & 0.3499 & 0.3213 & 0.3012 & 0.2884 & 0.2822 \\ 0.0500 & 0.3507 & 0.6340 & 0.5976 & 0.5744 & 0.5631 \\ 0.0501 & 0.3512 & 0.6349 & 0.9131 & 0.8791 & 0.8625 \\ 0.0501 & 0.3513 & 0.6350 & 0.9134 & 1.1967 & 1.1746 \\ 0.0502 & 0.3515 & 0.6353 & 0.9138 & 1.1973 & 1.4955 \end{bmatrix}$$

καθώς και η μήτρα ευαισθησίας της τάσης ως προς την άεργο ισχύ:

$$S_{UQ} = \begin{bmatrix} 0.1620 & 0.1628 & 0.1633 & 0.1635 & 0.1636 & 0.1637 \\ 0.1629 & 0.3307 & 0.3326 & 0.3336 & 0.3340 & 0.3342 \\ 0.1633 & 0.3315 & 0.4996 & 0.5014 & 0.5022 & 0.5025 \\ 0.1635 & 0.3320 & 0.5004 & 0.6680 & 0.6692 & 0.6697 \\ 0.1635 & 0.3321 & 0.5005 & 0.6682 & 0.8350 & 0.8356 \\ 0.1636 & 0.3322 & 0.5007 & 0.6685 & 0.8354 & 1.0016 \end{bmatrix}$$

Παρατηρούμε ότι οι δύο παραπάνω πίνακες είναι διαστάσεων 6x6. Το δίκτυο της *Εικόνας 7.2* αποτελείται από επτά κόμβους, αλλά ο κόμβος 1 έχει θεωρηθεί ως ζυγός ταλάντωσης, συνεπώς τα στοιχεία των δύο μητρών αφορούν τους υπόλοιπους έξι κόμβους.

Αρχικά εκτελούμε ένα μικρό πείραμα, για να επαληθεύσουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων [32]. Έστω ότι θέλουμε να μεταβάλουμε την ενεργό ισχύ στον κόμβο 6 της *Εικόνας 7.2*, ώστε να οδηγήσουμε το μέτρο της τάσης στον ίδιο κόμβο στην τιμή 1 αμ. Με βάση την ανάλυση ροής φορτίου που πραγματοποιήθηκε, η τάση του κόμβου 6 είναι 1.111 αμ. Συνεπώς, θέλουμε  $\Delta V = 1.111 - 1 = 0.111$  αμ. Επίσης, στη μήτρα  $S_{UP}$  μας ενδιαφέρει το στοιχείο που βρίσκεται στην πέμπτη γραμμή και πέμπτη στήλη, αφού αυτό αφορά τον κόμβο 6. Έχουμε:

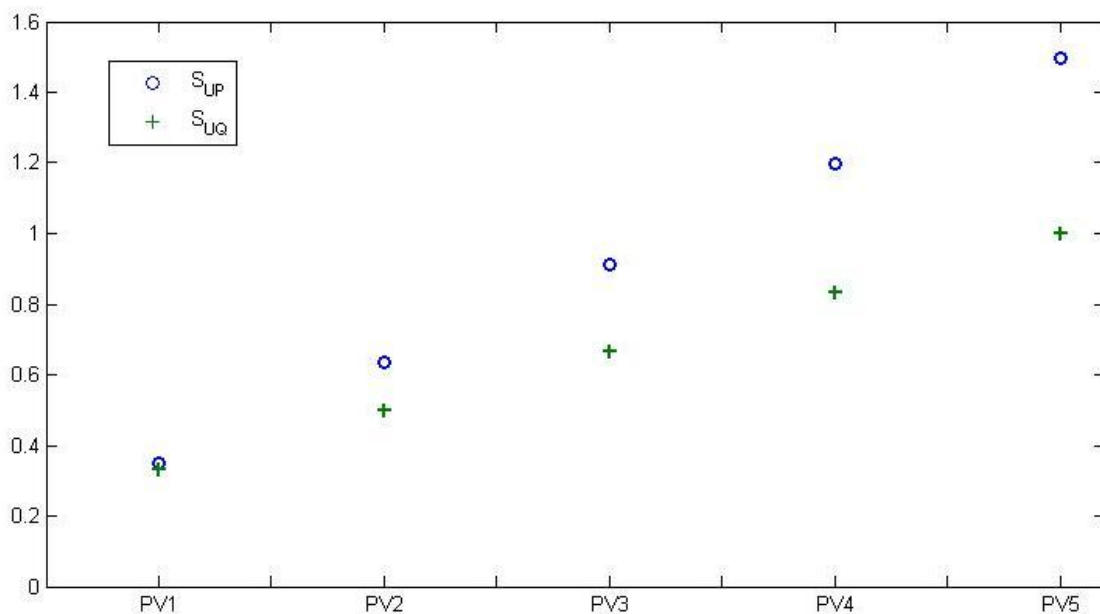
$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = 1.1967 \Rightarrow \Delta P = \frac{0.111}{1.1967} = 0.0928 \text{ αμ}$$

Εφόσον έχουμε επιλέξει  $S_B = 1 \text{ MVA}$ , προκύπτει  $\Delta P = 0.0928 \text{ MW}$  ή  $\Delta P = 92.8 \text{ kW}$ . Αν λοιπόν μειώσουμε την παραγόμενη ισχύ στον κόμβο 6 κατά 92.8kW, θα πρέπει η τάση του κόμβου αυτού να γίνει 1 αμ. Τρέχοντας την ανάλυση ροής φορτίου με αυτά τα δεδομένα προκύπτει:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)
1	1
2	1,001
3	1,013
4	1,016
5	1,011
6	0,999
7	1,007

Παρατηρούμε ότι η τάση του κόμβου 6 πράγματι πήρε την τιμή  $0.999 \approx 1$  αμ, ενώ και οι τάσεις στους υπόλοιπους κόμβους μειώθηκαν, όπως ήταν αναμενόμενο.

Έχοντας εξασφαλίσει την ορθότητα των αποτελεσμάτων, θα επικεντρωθούμε στα στοιχεία των μητρών, που αφορούν τους κόμβους στους οποίους υπάρχει φορτίο και  $\Phi/B$  παραγωγή, δηλαδή τους κόμβους 3, 4, 5, 6 και 7, αφού σε αυτούς μας ενδιαφέρει η μεταβολή της ενεργού και αέργου ισχύος. Τα διαγώνια στοιχεία των μητρών αντιστοιχούν στην επίδραση των P και Q ενός ζυγού στην τάση του ίδιου ζυγού. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται τα στοιχεία ευαισθησίας τάσης ως προς την ενεργό αλλά και την άεργο ισχύ που μας ενδιαφέρουν:



**Εικόνα 7.5** Ανάλυση ευαισθησίας τάσης ως προς την ενεργό και άεργο ισχύ στους κόμβους με  $\Phi/B$  παραγωγή

Με βάση την παραπάνω εικόνα βγάζουμε τα εξής χρήσιμα συμπεράσματα για το δίκτυό μας:

- Οι τιμές ευαισθησίας ως προς ενεργό και άεργο ισχύ αυξάνονται, όσο απομακρυνόμαστε από το Μ/Σ. Οι μεγαλύτερες τιμές ευαισθησίας παρουσιάζονται στο τέλος της γραμμής.
- Οι τιμές  $S_{UP}$  είναι μεγαλύτερες των τιμών  $S_{UQ}$ , που σημαίνει ότι οι μεταβολές στην ενεργό ισχύ είναι πιο αποτελεσματικές σε σχέση με την άεργο, όσον αφορά τον έλεγχο της τάσης στους κόμβους του δικτύου.
- Στους δύο πρώτους κόμβους οι τιμές ευαισθησίας  $S_{UP}$  και  $S_{UQ}$  έχουν παραπλήσιες τιμές. Αυτό συμβαίνει καθώς, όταν η απόσταση από το Μ/Σ είναι μικρή, η επαγωγική αντίδραση αυτού ( $X_{tr} = 24.21m\Omega > R_{tr} = 8.32m\Omega$ ) έχει μεγάλη επίδραση. Αντίθετα, όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν, ο ωμικός χαρακτήρας των γραμμών ΧΤ επικρατεί, με αποτέλεσμα η μεταβολή της αέργου ισχύος Q να είναι λιγότερο

αποτελεσματική σε σχέση με τη μεταβολή της ενεργού ισχύος P, όπως προκύπτει από τον τύπο (4.6).

### 7.2.3 Αντιμετώπιση της ανύψωσης τάσης

Στο κεφάλαιο 4 αναφέρθηκαν αρκετές μέθοδοι για τη ρύθμιση της τάσης στα δίκτυα διανομής XT. Από τις μεθόδους αυτές, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν η Περικοπή Ενεργού Ισχύος (APC), η Ρύθμιση Αέργου Ισχύος (PFC), καθώς και η συνεργασία των δύο μεθόδων.

Προκειμένου να εφαρμοστούν οι δύο αυτοί τρόποι μείωσης της τάσης, έγινε μοντελοποίηση του δικτύου της *Εικόνας 7.2* στο Simulink. Το Simulink είναι γραφικό περιβάλλον του MatLab, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την εξομοίωση και την ανάλυση μοντέλων δυναμικών συστημάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εφόσον υπάρχει η απαίτηση συμμετρίας της φωτοβολταϊκής παραγωγής, και καθώς θεωρούμε ότι τα φορτία είναι συμμετρικά ανά φάση, έγινε η μοντελοποίηση του ανά φάση ισοδύναμου δικτύου για λόγους απλούστευσης των προσομοιώσεων. Ωστόσο, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αφορά το τριφασικό δίκτυο.

Σε προηγούμενη παράγραφο διαπιστώσαμε ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα ανύψωσης τάσης εμφανίζεται στην περίπτωση μέγιστης παραγωγής και ελάχιστου φορτίου. Για το λόγο αυτό θεωρήσαμε φωτοβολταϊκή παραγωγή 27kW, και φορτία 200W/φάση με  $\cos\phi=0.7$  επαγωγικό.

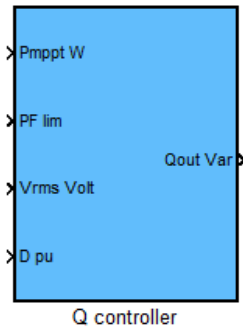
Με βάση τα παραπάνω βρίσκουμε τις τάσεις που αναπτύσσονται στους κόμβους, από την προσομοίωση στο Simulink. Παρατηρήθηκε πώς οι τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται στους κόμβους ταιριάζουν απόλυτα με αυτές που υπολογίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο με τον αλγόριθμο της ανάλυσης ροής φορτίου, και φαίνονται στον *Πίνακα 7.5*. Επίσης, οι τάσεις των δύο τελευταίων κόμβων είναι πάνω από το επιτρεπτό όριο του +10% (ή 1.1 αμ) που ισχύει για τη χώρα μας.

Αρχικά, θα προσπαθήσουμε να μειώσουμε την τάση των κόμβων στα επιθυμητά όρια χρησιμοποιώντας τη Ρύθμιση Αέργου Ισχύος. Για να το πετύχουμε αυτό, κατασκευάστηκε στο Simulink ένα block, το οποίο υπολογίζει την άεργο ισχύ που πρέπει να απορροφήσουν οι inverters βασισμένο στις παρακάτω σχέσεις, ακολουθώντας τα όσα αναπτύχθηκαν στο κομμάτι της θεωρίας :

$$Q = \begin{cases} -Q_{max} , & V < 0.9pu \\ Q_{max} \left( \frac{V - 1 + D}{0.1 - D} \right) , & 0.9pu \leq V < 1 - D \\ 0 , & 1 - D \leq V \leq 1 + D \\ Q_{max} \left( \frac{V - 1 - D}{0.1 - D} \right) , & 1 + D < V \leq 1.1pu \\ Q_{max} , & V > 1.1pu \end{cases} \quad (7.1)$$

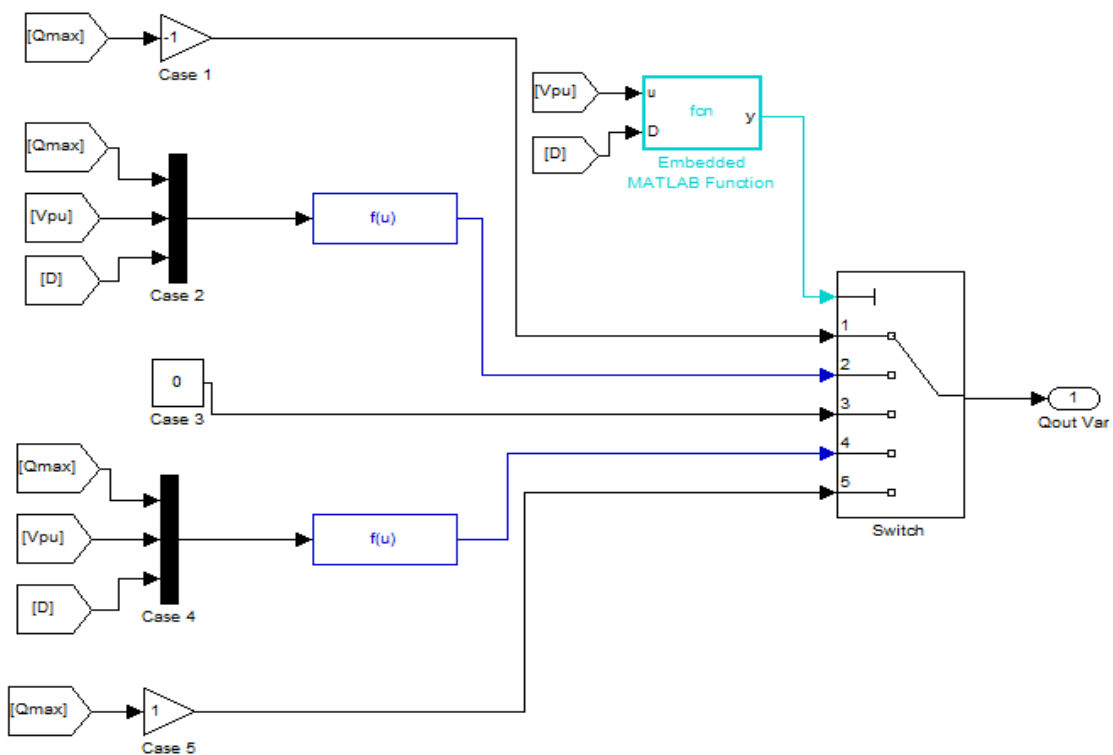
$$Q_{max} = P_{MPP} * \tan(\cos^{-1}(PF_{lim})) \quad (7.2)$$

όπου  $P_{MPP}$  είναι η MPPT ισχύς που παράγει η Φ/Β γεννήτρια ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες.



**Εικόνα 7.6** Block του ελεγκτή αέργου ισχύος που κατασκευάστηκε στο Simulink

Όπως παρατηρούμε, ο ελεγκτής δέχεται ως είσοδο την ενεργό ισχύ που παράγει η Φ/Β διάταξη, το όριο του συντελεστή ισχύος με βάση τον οποίο ο inverter θα υπολογίζει τη μέγιστη άεργο που μπορεί να απορροφήσει, τη μετρούμενη φασική rms τάση του ζυγού, καθώς και το πλάτος του εύρους ζώνης  $D$ . Ως έξοδο δίνει την άεργο ισχύ σε Var που πρέπει να απορροφήσει ο inverter ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα ανύψωσης τάσης. Με βάση τις δύο πρώτες εισόδους και τον τύπο (7.2) υπολογίζει τη μέγιστη άεργο ισχύ  $Q_{max}$  που μπορεί να χειριστεί ο αντιστροφέας. Επίσης υπολογίζει την τάση του ζυγού σε αμ, χρησιμοποιώντας ως βασική τάση τη φασική  $V_{\phi}=230V$ . Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο ο ελεγκτής υπολογίζει την άεργο ισχύ:



**Εικόνα 7.7** Υλοποίηση του ελεγκτή αέργου ισχύος στο Simulink

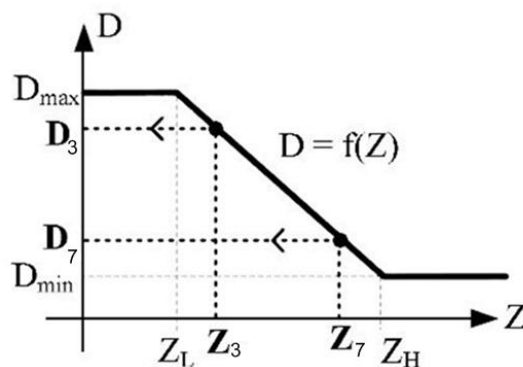
Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 7.7*, ο ελεγκτής υπολογίζει κάθε χρονική τις τιμές καθενός από τους κλάδους της συνάρτησης (7.1), τις οποίες δίνει ως είσοδο σε ένα διακόπτη (Switch).

Το block "Embedded MATLAB Function" αποφασίζει με βάση το διάστημα στο οποίο ανήκει η μετρούμενη τάση στον κόμβο, ποιος κλάδος της συνάρτησης (7.1) αντιστοιχεί στην επιθυμητή έξοδο Q, και στέλνει στο διακόπτη το κατάλληλο σήμα, ώστε να γίνει η σωστή επιλογή. Ακολουθεί ο κώδικας στο MATLAB για την υλοποίηση του block αυτού:

```
%case1
if u < 0.9
    y=1;
%case2
elseif (u >= 0.9) && (u < 1-D)
    y=2;
%case3
elseif (u >= 1-D) && (u <= 1+D)
    y=3;
%case4
elseif (u > 1+D) && (u <= 1.1)
    y=4;
%case5
else
    y=5;
end
```

Είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο με βάση την ανάλυση ευαισθησίας τάσης, ότι η απορρόφηση αέργου ισχύος είναι πιο αποτελεσματική, όσο απομακρυνόμαστε από το M/Σ. Συνεπώς, όσο πιο μακριά από το M/Σ είναι ο inverter, τόσο περισσότερη ισχύ θα πρέπει να απορροφά. Για να το επιτύχουμε αυτό, μπορούμε να ρυθμίσουμε τον κάθε ελεγκτή να λειτουργεί με διαφορετικό D. Έτσι, όσο απομακρυνόμαστε από το M/Σ, τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή του D, ώστε ο inverter να αρχίσει να απορροφά άεργο νωρίτερα σε σχέση με τους υπόλοιπους. Μικρότερη τιμή του D σημαίνει και μικρότερη κλίση στην καμπύλη droop.

Ένας τρόπος να πετύχουμε αυτή τη ρύθμιση είναι να μετράει ο inverter την αντίσταση βραχυκύκλωσης Z στο ΣΚΣ. Η αντίσταση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας τρόπος μέτρησης της απόστασης από το M/Σ [31]. Οπότε το D μπορεί να προκύψει ως συνάρτηση του Z ως εξής:



**Εικόνα 7.8** Το πλάτος του εύρους ζώνης συναρτήσει της αντίστασης βραχυκύκλωσης [31]

Η καμπύλη αυτή καθορίζεται από τις παραμέτρους  $D_{max}$ ,  $D_{min}$ ,  $Z_H$ , και  $Z_L$ . Οι τιμές των παραμέτρων αυτών μπορούν να επιλεγθούν και να ταξινομηθούν για τα αστικά, προάστεια και αγροτικά δίκτυα [31].

Στην περίπτωση μας, το δίκτυο που μοντελοποιούμε θεωρούμε ότι έχει σταθερή παραγωγή και φορτίο, ενώ όλοι οι κλάδοι έχουν το ίδιο μήκος. Συνεπώς, για λόγους απλούστευσης, θα θεωρήσουμε ότι  $D_7=0.01$  αμ (για τον inverter που βρίσκεται στον κόμβο 7 και για  $V_b=230V$  φασική), και  $D_3=0.03$ , ενώ οι υπόλοιποι inverter παίρνουν τις ενδιάμεσες τιμές. Έχουμε επιλέξει χαμηλές τιμές για το  $D$ , ώστε να παρατηρήσουμε καλύτερα τη λειτουργία των ελεγκτών.

A/A Κόμβου	D (αμ)
3	0.03
4	0.025
5	0.02
6	0.015
7	0.01

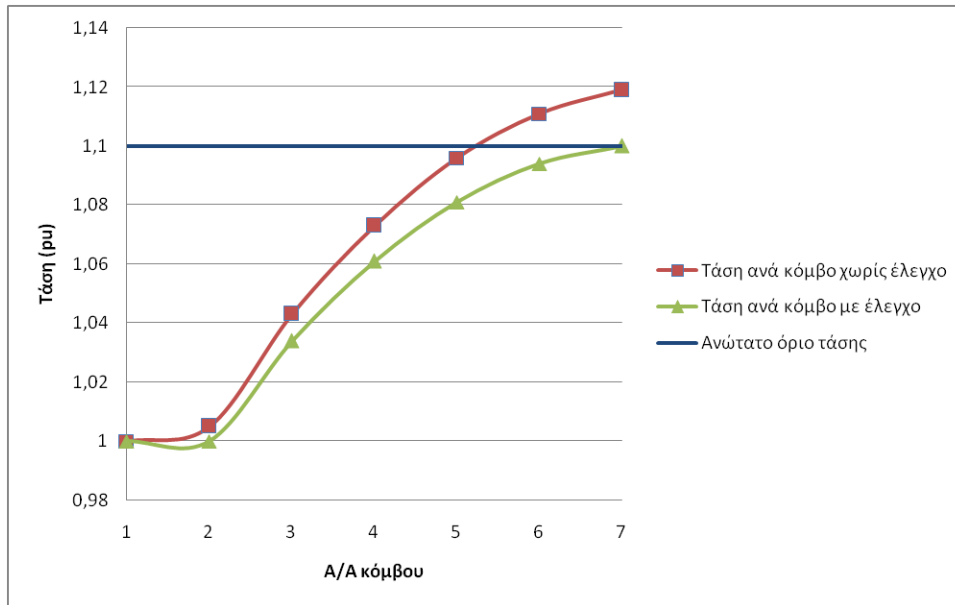
**Πίνακας 7.6** Τιμές του  $D$  για τους κόμβους με  $\Phi/B$  παραγωγή

Στο δίκτυο έχουμε 5 κόμβους με  $\Phi/B$  παραγωγή 27kW ο καθένας. Συνεπώς, συνολικά έχουμε 135kW φωτοβολταϊκής παραγωγής. Επιλέγουμε  $PF_{limit}=0.96$  για τους inverter, (οπότε  $S_{pv}=140$  KVA) ώστε να μη γίνει υπέρβαση του θερμικού ορίου των αγωγών που είναι 161kVA [17]. Όπως παρατηρούμε τηρείται μια απόσταση ασφαλείας από το θερμικό όριο. Θα πρέπει να γίνει η επιλογή αντιστροφεία με ονομαστική φαινόμενη ισχύ ίση με 29kVA, ώστε να μπορεί να καταναλώσει 7.875 kVar αέργου για παραγωγή 27 kW. Χρησιμοποιώντας τους ελεγκτές αέργου ισχύος με τις παραπάνω εισόδους, παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230,0	0,00
2	1,000	230,1	1,23
3	1,034	237,9	2,96
4	1,061	244,0	4,35
5	1,081	248,6	5,38
6	1,094	251,6	6,07
7	1,100	253,0	6,41

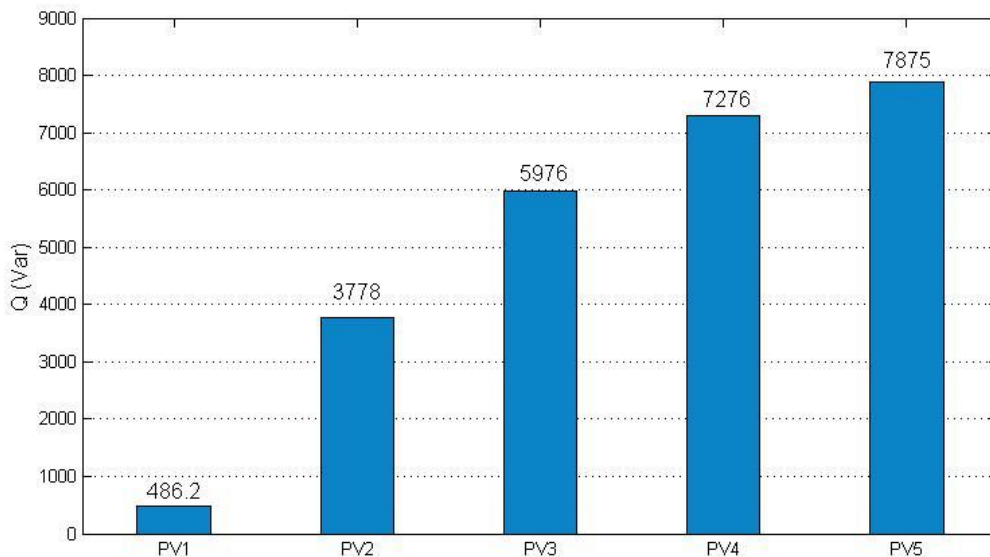
**Πίνακας 7.7** Τάσεις στους κόμβους με την εφαρμογή ελέγχου αέργου ισχύος

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η σύγκριση του μέτρου των τάσεων, πριν και μετά την εφαρμογή του ελέγχου αέργου ισχύος:



**Εικόνα 7.9** Προφίλ των τάσεων ανά κόμβο πριν και μετά την εφαρμογή ελέγχου

Όπως παρατηρούμε, η επιβολή ελέγχου της αέργου κατάφερε να αντιμετωπίσει το πρόβλημα ανύψωσης τάσης, οπότε δε χρειάζεται να ενεργοποιηθεί και η περικοπή ενεργού ισχύος. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ποσότητα αέργου που απορρόφησε ο κάθε αντιστροφέας:



**Εικόνα 7.10** Ποσότητα αέργου ισχύος που απορρόφησε ο κάθε inverter για την αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης

Σημειώνεται ότι ο τελευταίος κόμβος απορρόφησε τη μέγιστη δυνατή ποσότητα αέργου ισχύος. Επίσης, χάρη στην κατάλληλη επιλογή του D σε κάθε αντιστροφέα, ο κάθε inverter



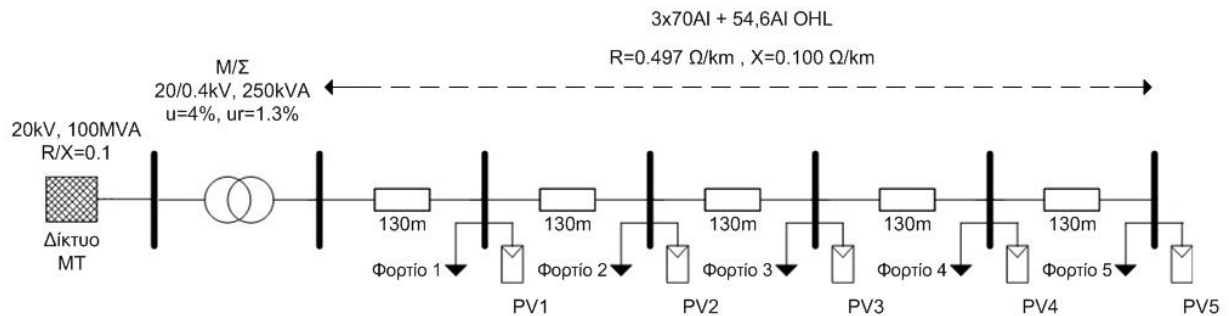
απορροφά όλο και μεγαλύτερη ποσότητα αέργου όσο απομακρυνόμαστε από το Μ/Σ. Ο συντελεστής ισχύος στον οποίο δούλεψε ο κάθε αντιστροφέας φαίνεται παρακάτω:

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
<b>cosφ</b>	0,999	0,99	0,976	0,966	0,96

**Πίνακας 7.8** Συντελεστής ισχύος της λειτουργίας του κάθε αντιστροφέα για την καταπολέμηση της ανύψωσης τάσης

### 7.3 Τοπολογία και μελέτη δικτύου με γραμμές με λόγο R/X=5

Το δεύτερο δίκτυο με το οποίο ασχοληθήκαμε είναι επίσης ένα απλουστευμένο ακτινικό δίκτυο αγροτικής περιοχής, το οποίο είναι παρόμοιο με το πρώτο, με τη διαφορά ότι έχει γίνει επιλογή διαφορετικών γραμμών. Τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν ίδια. Το καινούριο δίκτυο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



**Εικόνα 7.11** Τοπολογία δεύτερου δικτύου αγροτικής περιοχής

Οι καινούριες γραμμές είναι αγωγοί συνεστραμμένων καλωδίων, και έχουν  $R=0.497\Omega/\text{km}$ , και  $X=0.100\Omega/\text{km}$ . Συνεπώς, η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι σχεδόν πενταπλάσια της επαγωγικής αντίδρασης. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων έχει αυξηθεί στα 130 μέτρα, ώστε να παρατηρηθεί πιο έντονα το φαινόμενο ανύψωσης τάσης. Έχουμε για τις γραμμές:

$$R=0.06461\Omega \text{ και } X=0.013\Omega. \text{ Επίσης } L = 41.38 * 10^{-6}H = 41.38\mu H.$$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αντιστάσεις και αντιδράσεις των κλάδων του δικτύου σε αμ τιμές, που θα δοθούν ως είσοδοι στον αλγόριθμο της ανάλυσης ροής φορτίου:

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (μ)	X (μ)
1	2	0.053	0.1613
2	3	0.4038	0.0813
3	4	0.4038	0.0813
4	5	0.4038	0.0813
5	6	0.4038	0.0813
6	7	0.4038	0.0813

**Πίνακας 7.9** Αντιστάσεις και αντιδράσεις των κλάδων του δικτύου

Και σε αυτή την περίπτωση θα θεωρήσουμε Φ/Β παραγωγή 27kW με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, και ζήτηση 200W/φάση με  $\cos\phi=0.7$  επαγωγικό. Από την προσομοίωση της ροής φορτίου βρίσκουμε τις τάσεις στους κόμβους κατά μέτρο και γωνία:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230,0	0,00
2	1,005	231,1	1,12
3	1,053	242,2	1,76
4	1,091	250,9	2,24
5	1,119	257,4	2,58
6	1,138	261,7	2,80
7	1,147	263,8	2,90

*Πίνακας 7.10 Τάσεις στους κόμβους του δικτύου, χωρίς τη χρήση ελέγχου*

Παρατηρούμε ότι οι τρεις τελευταίοι κόμβοι του δικτύου είναι εκτός επιτρεπτών ορίων τάσης (1.1 αμ). Στη συνέχεια, με παρόμοιο τρόπο όπως και για το προηγούμενο δίκτυο, εκτελούμε την ανάλυση ευαισθησίας τάσης, και προκύπτουν:

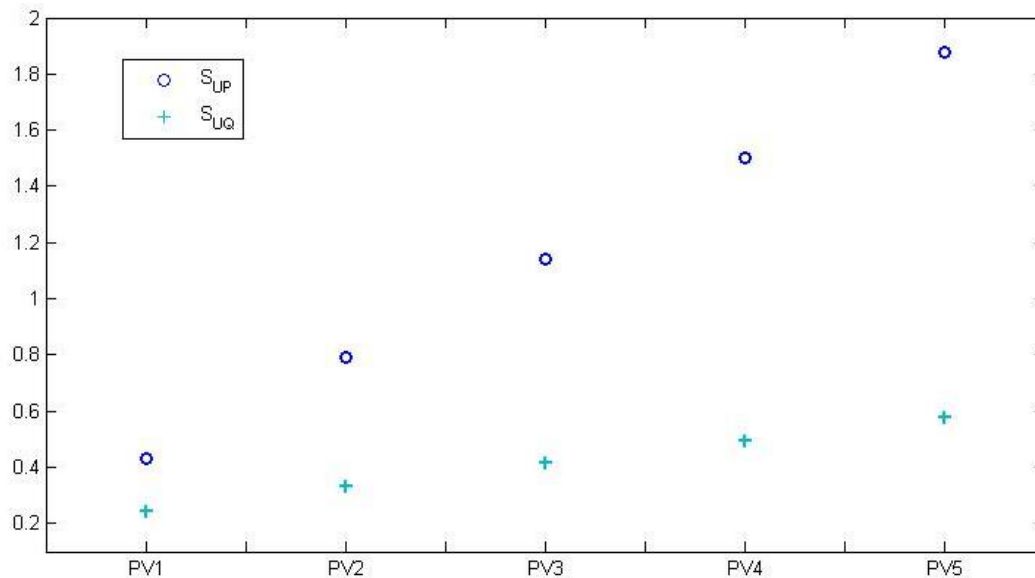
η μήτρα ευαισθησίας τάσης ως προς την ενεργό ισχύ:

$$S_{UP} = \begin{bmatrix} 0.0497 & 0.0428 & 0.0378 & 0.0344 & 0.0322 & 0.0312 \\ 0.0500 & 0.4301 & 0.3986 & 0.3768 & 0.3631 & 0.3564 \\ 0.0502 & 0.4316 & 0.7905 & 0.7488 & 0.7225 & 0.7098 \\ 0.0502 & 0.4321 & 0.7915 & 1.1435 & 1.1039 & 1.0848 \\ 0.0502 & 0.4321 & 0.7914 & 1.1434 & 1.5007 & 1.4749 \\ 0.0502 & 0.4320 & 0.7912 & 1.1432 & 1.5005 & 1.8748 \end{bmatrix}$$

και η μήτρα ευαισθησίας τάσης ως προς την άεργο ισχύ:

$$S_{UQ} = \begin{bmatrix} 0.1617 & 0.1621 & 0.1624 & 0.1625 & 0.1626 & 0.1626 \\ 0.1628 & 0.2457 & 0.2471 & 0.2479 & 0.2483 & 0.2485 \\ 0.1634 & 0.2466 & 0.3300 & 0.3315 & 0.3323 & 0.3326 \\ 0.1636 & 0.2469 & 0.3304 & 0.4136 & 0.4148 & 0.4153 \\ 0.1636 & 0.2468 & 0.3304 & 0.4136 & 0.4962 & 0.4969 \\ 0.1635 & 0.2468 & 0.3303 & 0.4135 & 0.4962 & 0.5782 \end{bmatrix}$$

Συγκεντρώνοντας τα διαγώνια στοιχεία των παραπάνω πινάκων που αφορούν τους κόμβους στους οποίους υπάρχει παραγωγή και ζήτηση προκύπτει το εξής διάγραμμα:



**Εικόνα 7.12** Ανάλυση ευαισθησίας τάσης ως προς την ενεργό και άεργο ισχύ στους κόμβους με  $\Phi/B$  παραγωγή

Όπως παρατηρούμε, σε αυτή την περίπτωση προκύπτουν παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που είχαμε για το προηγούμενο δίκτυο. Ωστόσο, για το καινούριο δίκτυο οι τιμές της ευαισθησίας  $S_{UP}$  είναι πολύ μεγαλύτερες των τιμών  $S_{UQ}$ , για όλους τους κόμβους. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι πενταπλάσια της επαγωγικής αντίδρασης, οπότε η μεταβολή της ενεργού ισχύος έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην τάση, σε σχέση με τη μεταβολή της άεργου.

### 7.3.1 Αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης

Όπως και στο προηγούμενο δίκτυο, έτσι και εδώ θα προσπαθήσουμε αρχικά να μειώσουμε την τάση των κόμβων, ώστε να έρθει εντός των επιτρεπτών ορίων, χρησιμοποιώντας τη Ρύθμιση Αέργου Ισχύος (PFC).

Στο δίκτυό μας έχουμε 5 κόμβους, με  $\Phi/B$  παραγωγή 27kW στον καθένα, συνεπώς συνολικά έχουμε 135kW φωτοβολταϊκής παραγωγής. Θα επιλέξουμε  $PF_{limit}=0.8$  για τους inverter ( $S_{pv}=168kVA$ ), ώστε να μη γίνει υπέρβαση του θερμικού ορίου των αγωγών που είναι 194kVA [17]. Θα πρέπει να γίνει η επιλογή αντιστροφέα με ονομαστική φαινόμενη ισχύ ίση με 34kVA, ώστε να μπορεί να καταναλώσει 20.25 kVar αέργου για παραγωγή 27 kW.

Εκτελώντας στο Simulink την προσομοίωση με χρήση των ελεγκτών αέργου ισχύος, όπως τους ορίσαμε σε προηγούμενη παράγραφο, προκύπτει:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230,0	0,00
2	0,993	228,4	1,30
3	1,034	237,8	3,58
4	1,066	245,2	5,54
5	1,090	250,7	7,07
6	1,106	254,4	8,08
7	1,114	256,2	8,58

**Πίνακας 7.11** Τάση στους κόμβους με την εφαρμογή ελέγχου αέργου ισχύος

Παρατηρούμε ότι στους δύο τελευταίους κόμβους, η τάση παραμένει εκτός επιθυμητών ορίων, παρόλο που έχουμε επιλέξει όριο συντελεστή ισχύος 0.8, τιμή πολύ μεγαλύτερη του 0.96 που είχαμε επιλέξει στο προηγούμενο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει, καθώς σύμφωνα και με την ανάλυση ευαισθησίας τάσης που προηγήθηκε για το δίκτυο, ο ωμικός χαρακτήρας της γραμμής είναι κατά πολύ μεγαλύτερος του επαγωγικού χαρακτήρα, οπότε η μεταβολή της αέργου ισχύος έχει μικρά αποτελέσματα στον έλεγχο της τάσης.

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
<b>Q (Var)</b>	1113,83	11065,34	17701,46	20250	20250

**Πίνακας 7.12** Ποσότητα αέργου ισχύος που απορρόφησε ο κάθε inverter για την αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
<b>cosφ</b>	0,99	0,925	0,836	0,8	0,8

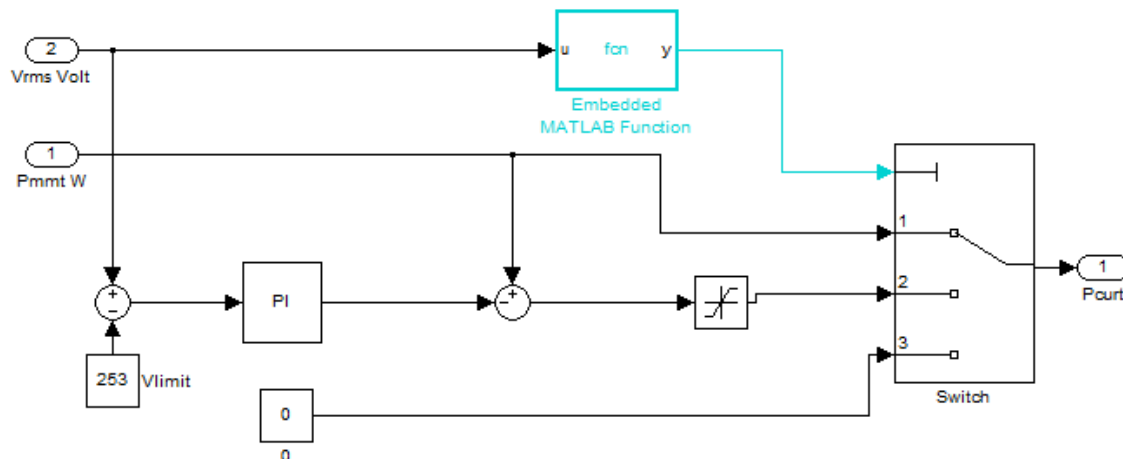
**Πίνακας 7.13** Συντελεστής ισχύος της λειτουργίας του κάθε αντιστροφέα για την καταπολέμηση της ανύψωσης τάσης

Στους δύο παραπάνω Πίνακες φαίνεται η αέργος ισχύς που απορρόφησε ο κάθε αντιστροφέας, καθώς και ο συντελεστής ισχύος στον οποίο λειτούργησε ο καθένας. Σημειώνεται ότι οι δύο τελευταίοι αντιστροφείς απορρόφησαν τη μέγιστη δυνατή ποσότητα αέργου.

Στην περίπτωση αυτή, καθώς ο έλεγχος της αέργου ισχύος δεν κατάφερε να επιλύσει το πρόβλημα ρύθμισης τάσης, θα πρέπει να ενεργοποιηθεί και η Περικοπή Ενεργού Ισχύος. Για το λόγο αυτό, με βάση την παρακάτω σχέση που αναπτύχθηκε στο κομμάτι της θεωρίας:

$$P_{inv} = \begin{cases} P_{MPPT}, & V \leq V_{limit} \\ P_{MPPT} - k(V - V_{limit}), & V_{limit} < V \leq V_{cri} \\ 0, & V > V_{cri} \end{cases} \quad (7.3)$$

κατασκευάστηκε στο Simulink ένα τμήμα ελέγχου το οποίο και εφαρμόστηκε στην προσομοίωση:



**Εικόνα 7.13** Τμήμα ελέγχου ενεργού ισχύος για την εφαρμογή του Active Power Curtailment

Ο ελεγκτής δέχεται ως είσοδο την παραγόμενη ισχύ της Φ/Β διάταξης, καθώς και τη μετρούμενη φασική rms τάση στο ζυγό. Υπολογίζει για κάθε χρονική στιγμή καθέναν από τους κλάδους της σχέσης (7.3), και δίνει τις τιμές τους ως εισόδους σε έναν διακόπτη Switch. Το block "Embedded MATLAB Function" αποφασίζει με βάση το διάστημα στο οποίο ανήκει η μετρούμενη τάση στον κόμβο, ποιος κλάδος της συνάρτησης (7.3) αντιστοιχεί στην επιθυμητή έξοδο Pcurt, και στέλνει στο διακόπτη το κατάλληλο σήμα, ώστε να γίνει η σωστή επιλογή. Ακολουθεί ο κώδικας στο MATLAB για την υλοποίηση του block αυτού:

```

if u <= 253
    y=1;
elseif (u>253) && (u<=264.5)
    y=2;
else
    y=3;
end

```

Συνεπώς, εάν η τάση ξεπεράσει το όριο των 253V (+10% της ονομαστικής), ενεργοποιείται η περικοπή της ενεργού ισχύος, μέχρι η διαφορά της τάσης αναφοράς και της μετρούμενης τάσης να μηδενιστεί. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει ο PI ελεγκτής, η έξοδος του οποίου είναι ουσιαστικά ο παράγοντας k του τύπου (7.3). Στην περίπτωση αυτή έχουμε μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς μπορεί να περικοπεί όση ενεργός ισχύς χρειαστεί για να επανέλθει η τάση

σε φυσιολογικά επίπεδα, σε αντίθεση με τον έλεγχο της αέργου ισχύος, όπου η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να απορροφηθεί είναι καθορισμένη, και μπορεί να μην είναι αρκετή ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα όπως είδαμε.

Σε περίπτωση που τάση φτάσει την τιμή 264.6V (+15% της ονομαστικής), τότε η Φ/Β γεννήτρια θα πρέπει να αποσυνδεθεί από το δίκτυο, όπως ορίζουν οι διατάξεις της Δ.Ε.Η. [22], οπότε και η ισχύς παίρνει την τιμή μηδέν.

Συνεπώς, εάν σε συνεργασία με τον έλεγχο αέργου ισχύος ενεργοποιήσουμε και την περικοπή της ενεργού ισχύος, έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230,0	0,00
2	0,993	228,4	1,23
3	1,032	237,4	3,35
4	1,061	244,1	5,20
5	1,083	249,0	6,65
6	1,095	251,9	7,62
7	1,100	253	8,09

**Πίνακας 7.14** Προφίλ τάσεων στους κόμβους του δικτύου σε περίπτωση συνεργασίας των μεθόδων APC και PFC

Προφανώς σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα ανύψωσης τάσης αντιμετωπίστηκε, καθώς ο τελευταίος κόμβος έχει τάση 1.1 αμ που είναι το επιτρεπτό όριο, και οι υπόλοιποι έχουν τάσεις κάτω του μέγιστου ορίου. Σημειώνεται ότι η περικοπή ενεργού ισχύος ενεργοποιήθηκε μόνο για τον τελευταίο αντιστροφέα, του οποίου η ενεργός ισχύς εξόδου πήρε την τιμή  $P_{PV5}=17744.3W$ , δηλαδή μειώθηκε στο 65.7% της ονομαστικής του ισχύος.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται και η άεργος ισχύς που απορρόφησε ο κάθε αντιστροφέας:

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
Q (Var)	573,02	9848,57	15831,04	19160,27	20250

**Πίνακας 7.15** Ποσότητα αέργου ισχύος που απορρόφησε ο κάθε inverter για συνεργασία των μεθόδων APC και PFC

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
cosφ	0,99	0,939	0,863	0,816	0,66

**Πίνακας 7.16** Συντελεστής ισχύος της λειτουργίας του κάθε αντιστροφέα για τη συνεργασία των δύο μεθόδων

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι ο τελευταίος αντιστροφέας καλείται να δουλέψει σε ΣΙ 0.66 επαγωγικό. Αυτό συμβαίνει καθώς η απορρόφηση αέργου ισχύος έχει οριστεί να γίνεται με βάση την τιμή  $m_{pp}$  της παραγόμενης ισχύος, ενώ η ενεργός ισχύς που παράγει ο αντιστροφέας είναι μικρότερη της  $m_{pp}$  λόγω του curtailment.

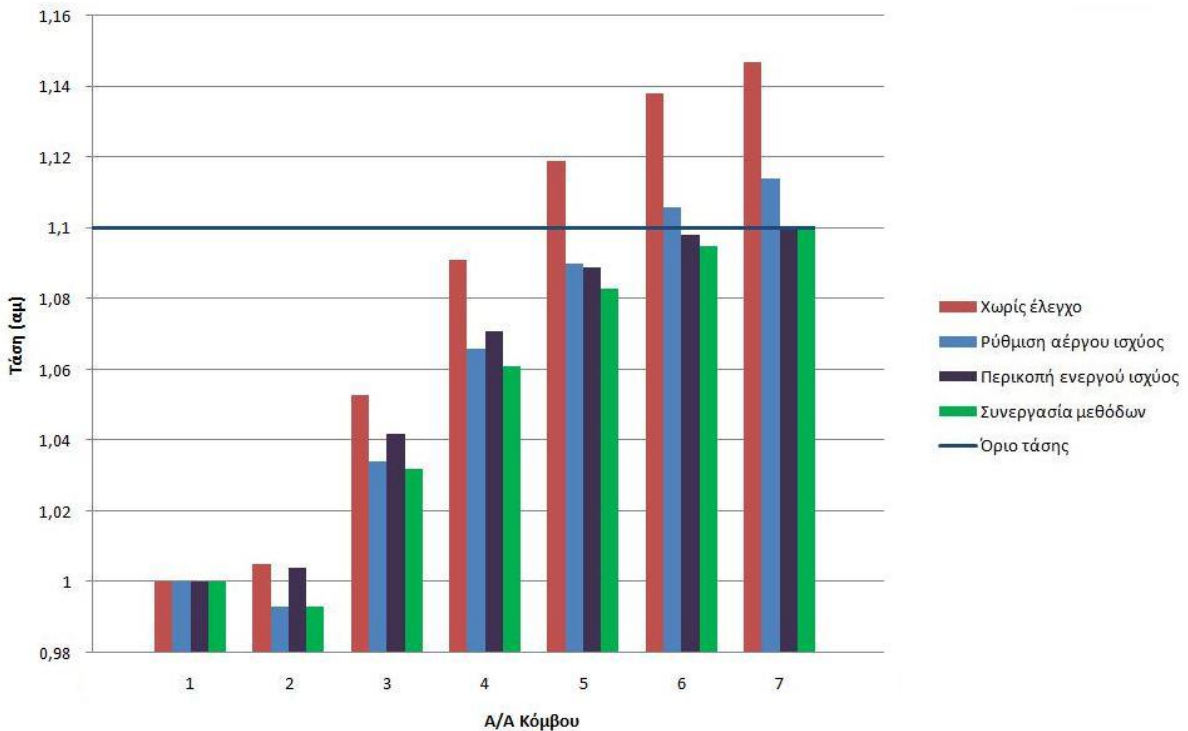
Τέλος, θα μελετήσουμε την περίπτωση κατά την οποία είναι ενεργοποιημένη μόνο η μέθοδος της περικοπής ενεργού ισχύος, ώστε να παρατηρήσουμε τις διαφορές με το σενάριο της συνεργασίας των δύο μεθόδων. Στην περίπτωση αυτή, προκύπτουν οι εξής τάσεις στους κόμβους:

A/A Κόμβου	Τάση (αμ)	Φασική Τάση (V)	Γωνία τάσης (°)
1	1,000	230,0	0,00
2	1,004	230,9	0,90
3	1,042	239,8	1,43
4	1,071	246,3	1,81
5	1,089	250,5	2,04
6	1,098	252,5	1,16
7	1,100	253,0	2,20

**Πίνακας 7.17** Τάσεις στους κόμβους του δικτύου για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου ενεργού ισχύος

Παρατηρούμε ότι και σε αυτή την περίπτωση, η ανύψωση της τάσης αντιμετωπίστηκε. Η περικοπή ενεργού ισχύος ενεργοποιήθηκε για τους δύο τελευταίους αντιστροφέες, οι οποίοι είχαν τιμές εξόδου  $P_{PV4}=17384W$ , και  $P_{PV5}=7357W$ , δηλαδή 64.4% και 27.2% της ονομαστικής τους ισχύος αντίστοιχα.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται συγκεντρωτικά τα μέτρα της τάσης των κόμβων του δικτύου, για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, ώστε να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα:



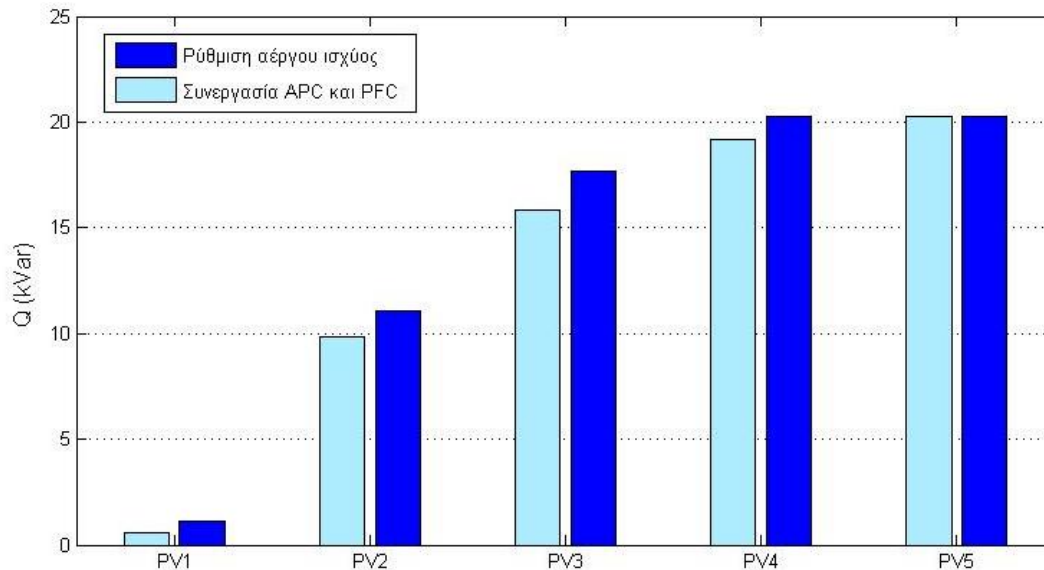
**Εικόνα 7.14** Προφίλ τάσης των κόμβων για όλες τις περιπτώσεις ελέγχου

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο παραπάνω σχήμα, η ρύθμιση αέργου ισχύος καταφέρνει να μειώσει την τάση των κόμβων, αλλά δεν μπορεί να φέρει εντός επιθυμητών ορίων τους δύο τελευταίους κόμβους. Αυτό όπως αναφέραμε είναι αναμενόμενο, καθώς με βάση την ανάλυση ευαισθησίας τάσης, η μεταβολή της αέργου ισχύος δεν έχει μεγάλη επίδραση στην τάση. Παρόλα αυτά, κατάφερε να μειώσει την τάση στον τελευταίο ζυγό από 1.147αμ σε 1.114αμ, δηλαδή πέτυχε μείωση 7,6 V.

Στις περιπτώσεις λειτουργίας με περικοπή ενεργού ισχύος, και με συνεργασία των δύο μεθόδων, οι τάσεις όλων των ζυγών είναι εντός επιθυμητών ορίων, καθώς γίνεται περικοπή ισχύος στο βαθμό που είναι απαραίτητο, ώστε να φτάσουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα. Επίσης, στην περίπτωση συνεργασίας των δύο μεθόδων, οι τιμές της τάσης σε κάθε κόμβο είναι χαμηλότερες σε σχέση με κάθε άλλη περίπτωση, παράγοντας που επισημαίνει το όφελος από τη χρήση αυτού του είδους ελέγχου.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η ποσότητα αέργου που απορρόφησε ο κάθε ζυγός, στην περίπτωση της λειτουργίας με PFC, αλλά και με συνεργασία των μεθόδων, για την αντιμετώπιση της ανύψωσης της τάσης:

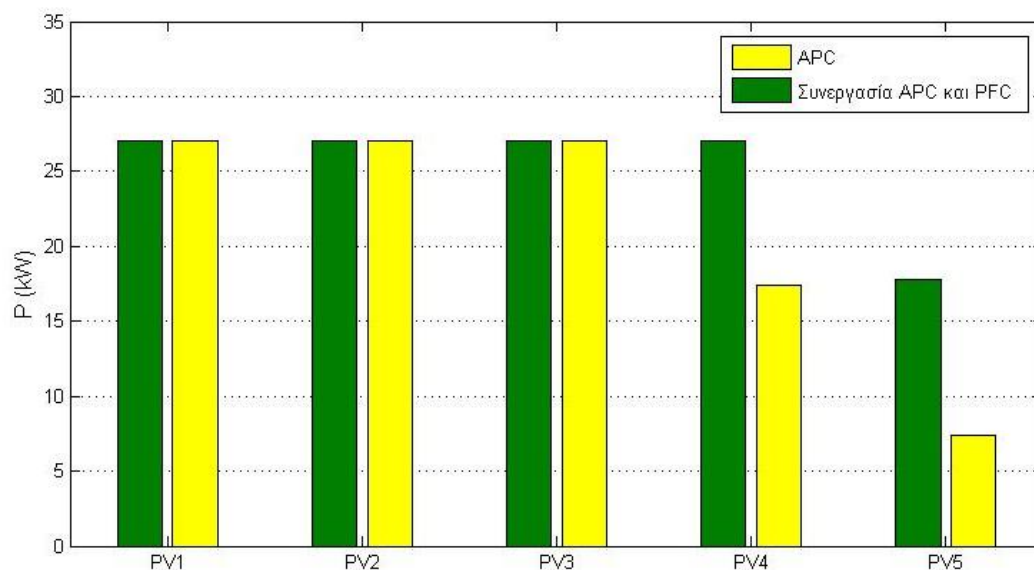




**Εικόνα 7.15** Άεργος ισχύος που απορροφήθηκε για την καταπολέμηση της ανύψωσης τάσης για λειτουργία PFC, και συνεργασία PFC με APC

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση συνεργασίας των δύο μεθόδων, οι αντιστροφείς απορροφούν μικρότερη ποσότητα αέργου, σε σύγκριση με το σενάριο λειτουργίας με PFC. Αυτό συμβαίνει καθώς στην πρώτη περίπτωση, εφόσον μπαίνει σε λειτουργία η περικοπή ενεργού, η ενεργός ισχύς στον τελευταίο κόμβο μικραίνει, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια μικρή πτώση στην τάση όλων των προηγούμενων κόμβων. Αυτή η μείωση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα και τη μικρή μείωση της αέργου που απορροφάται.

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ενεργός ισχύς που παράγουν οι αντιστροφείς, στην περίπτωση της λειτουργίας με APC, καθώς και στην περίπτωση της συνεργασίας των μεθόδων:



**Εικόνα 7.16** Ενεργός ισχύς των αντιστροφέων για τα δύο σενάρια λειτουργίας

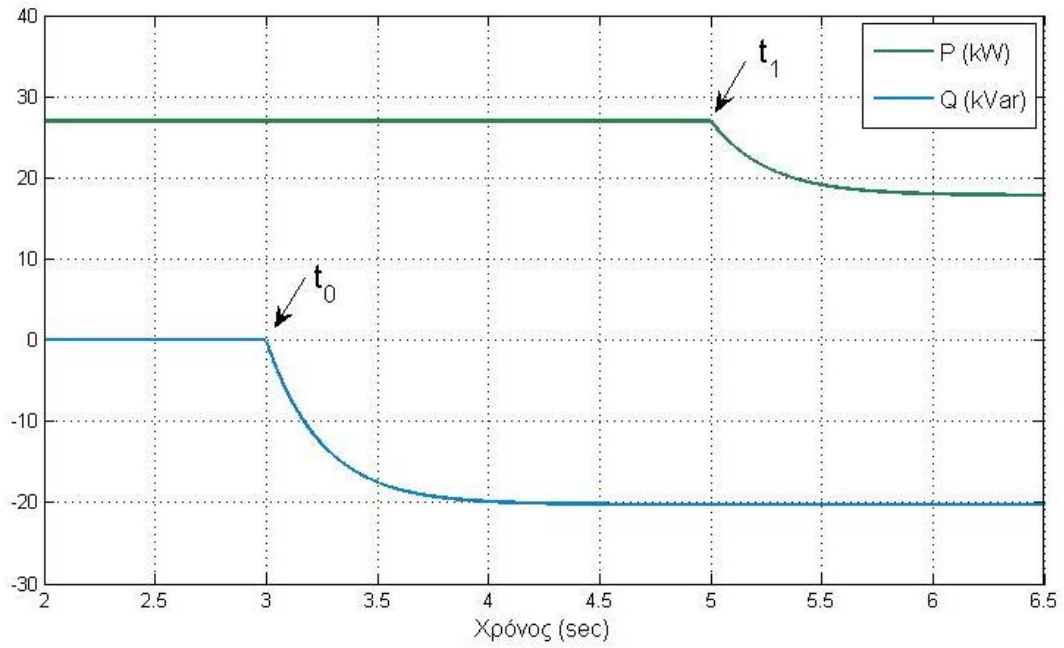
Στην περίπτωση της συνεργασίας των δύο μεθόδων, γίνεται περικοπή ισχύος μόνο στον τελευταίο αντιστροφέα, ενώ στην περίπτωση που το APC λειτουργεί μόνο του, γίνεται περικοπή στους δύο τελευταίους. Έτσι με τη συνεργασία APC και PFC, εξοικονομούμε 9616W στον προτελευταίο ζυγό, και 10387.3W στον τελευταίο ζυγό, δηλαδή πετυχαίνουμε αύξηση της ενεργού ισχύος κατά 55.31% και 141.2% αντίστοιχα σε σχέση με την περίπτωση της μεμονωμένης λειτουργίας του curtailment.

Συμπεραίνουμε ότι στην περίπτωση συνεργασίας της περικοπής ενεργού ισχύος και της ρύθμισης αέργου ισχύος, οι τιμές των τάσεων στους κόμβους παίρνουν τις καλύτερες δυνατές τιμές, ενώ μειώνεται κατά πολύ η περικοπή της ενεργού που θα είχαμε εάν δε χρησιμοποιούσαμε το PFC, παράγοντας που αυξάνει κατά πολύ το οικονομικό όφελος των παραγωγών. Ακόμη, στην περίπτωση αυτή κυκλοφορεί λιγότερη άεργος στις γραμμές σε σχέση με τη λειτουργία PFC, οπότε έχουμε λιγότερες άεργες απώλειες στο δίκτυο. Προφανώς, η συνεργασία των δύο μεθόδων είναι η πιο συμφέρουσα επιλογή, και από οικονομικής άποψης, αλλά και από άποψης βέλτιστης ρύθμισης της τάσης.

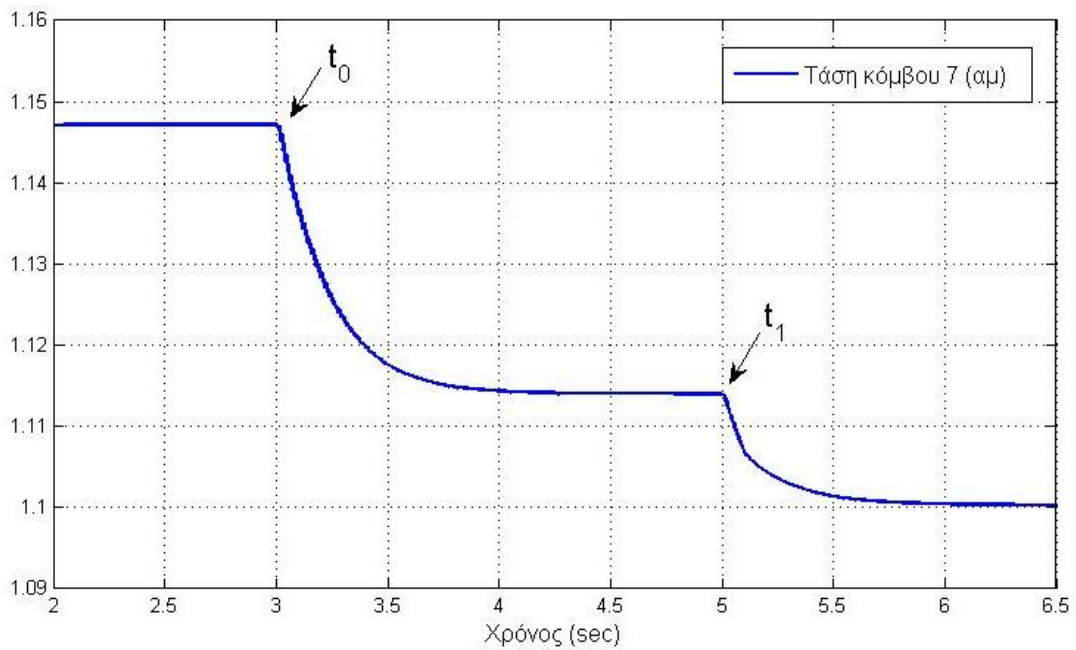
#### **7.4 Μελέτη σε μεταβατικές περιόδους**

Μέχρι στιγμής, τα αποτελέσματα που έχουμε καταγράψει για τα δύο δίκτυα XT, αφορούν τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Εφόσον η μοντελοποίηση των δικτύων γίνεται στο Simulink, το οποίο επιτρέπει τη μελέτη δυναμικών συστημάτων, μας δίνεται η δυνατότητα να παρακολουθήσουμε τη συμπεριφορά των ελεγκτών που κατασκευάσαμε σε μεταβατικές περιόδους.

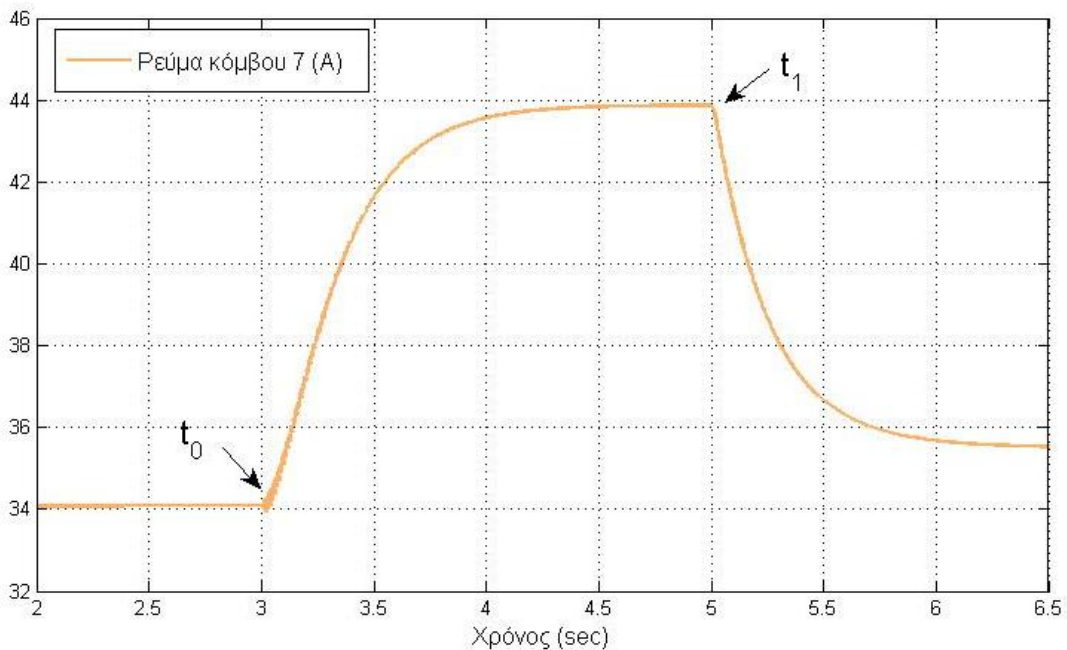
Επιλέγουμε το δεύτερο ακτινικό δίκτυο που προσομοιώθηκε, ώστε να μελετήσουμε την περίπτωση συνεργασίας της ρύθμισης ενεργού και αέργου ισχύος. Αρχικά, αφήνουμε την προσομοίωση να τρέξει χωρίς τη χρήση ελέγχου. Έπειτα, τη χρονική στιγμή  $t_0=3s$  ενεργοποιούμε τη ρύθμιση αέργου ισχύος σε όλους τους κόμβους, και στη συνέχεια τη χρονική στιγμή  $t_1=5s$ , θέτουμε σε λειτουργία και την περικοπή ενεργού ισχύος σε όλους τους αντιστροφείς. Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, στον τελευταίο κόμβο (κόμβος 7) θα ενεργοποιηθεί το power curtailment, οπότε μελετάμε την ισχύ του Φ/B, την τάση και το ρεύμα για τον κόμβο αυτό. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:



*Εικόνα 7.17 Μεταβολή της ενεργού και αέργου ισχύος του αντιστροφέα*



*Εικόνα 7.18 Ανταπόκριση τάσης στις μεταβολές της ισχύος του  $\Phi/B$*



**Εικόνα 7.19** Ανταπόκριση ρεύματος στις μεταβολές της ισχύος του Φ/Β

Όπως παρατηρούμε από την παραπάνω εικόνα, πριν τη χρονική στιγμή  $t_0$ , δεν υπάρχει κανένας έλεγχος στο σύστημα, οπότε η φωτοβολταϊκή γεννήτρια παράγει 27kW, η τάση στον κόμβο 7 έχει την τιμή 1.147αμ, ενώ το ρεύμα είναι 34.09 A.

Τη χρονική στιγμή  $t_0=3s$ , ενεργοποιείται η Ρύθμιση Αέργου Ισχύος σε όλους τους αντιστροφείς. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι ο inverter αρχίζει να απορροφά άεργο ισχύ, μέχρι να φτάσει την τελική τιμή που είναι τα 20250Var. Η άεργος ισχύς παρουσιάζεται αρνητική στο σχήμα, καθώς έχει χρησιμοποιηθεί η σύμβαση γεννήτριας, οπότε απορρόφηση ενός μεγέθους σημαίνει αρνητική τιμή. Με την ενεργοποίηση της αέργου, αρχίζει να πέφτει η τάση στο ζυγό, μέχρι να πάρει την τιμή 1.114αμ. Την ίδια στιγμή το ρεύμα αυξάνεται στα 44A, κάτι που είναι λογικό, καθώς εφόσον απορροφούμε άεργο ισχύ, κυκλοφορεί άεργο ρεύμα στο κύκλωμα.

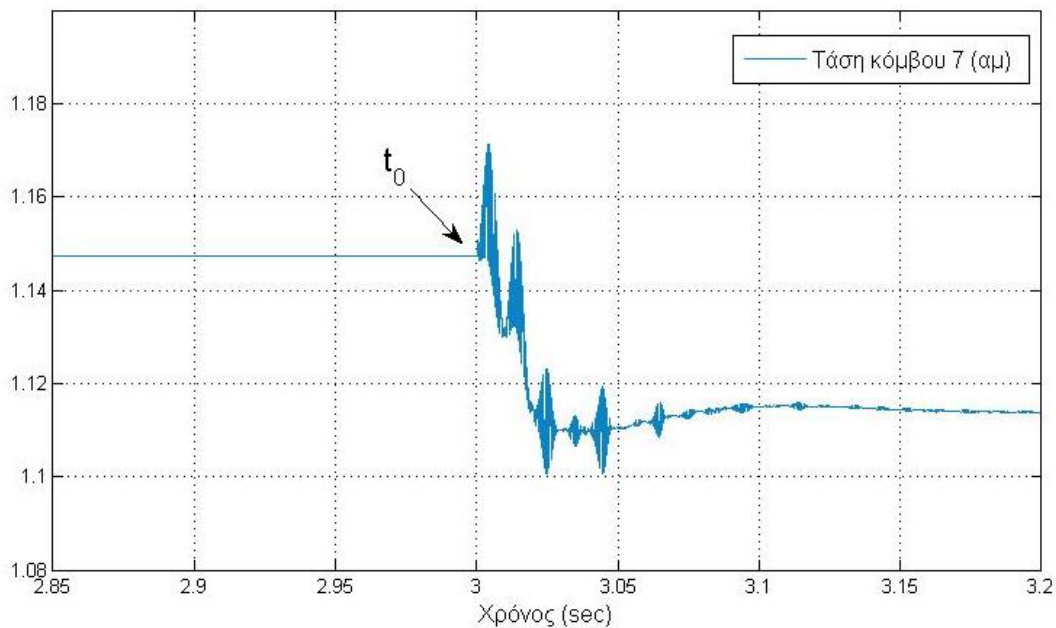
Τέλος, τη χρονική στιγμή  $t_1=5s$ , γίνεται ενεργοποίηση του Power Curtailment σε όλους τους αντιστροφείς, οπότε παρατηρούμε ότι η ενεργός ισχύς του Φ/Β μειώνεται μέχρι την τιμή 17744.3W, οπότε και η τιμή της τάσης φτάνει στο 1.1αμ, που είναι και το επιθυμητό. Ταυτόχρονα, καθώς μειώνεται η ενεργός ισχύς που παράγει το Φ/Β, παρατηρείται μείωση του ρεύματος, το οποίο φτάνει στην τιμή 35.5A.

Στα παραπάνω σχήματα είναι εμφανές, ότι η αύξηση και η μείωση των μεγεθών δε γίνεται ακαριαία, αλλά σταδιακά. Αυτό συμβαίνει καθώς στη Φ/Β γεννήτρια στο Simulink, έχει τοποθετηθεί σε κάθε αναφορά ενεργού και αέργου ισχύος ένα στοιχείο, το οποίο στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως first order lag element [31].

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης, το οποίο προκαλεί τη σταδιακή αύξηση ή μείωση της ενεργού και αέργου ισχύος των φωτοβολταϊκών. Χωρίς τη χρήση του φίλτρου αυτού, παρατηρούνται έντονες ταλαντώσεις στα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν για μικρές μεταβατικές περιόδους, λόγω της απότομης στιγμιαίας αύξησης ή μείωσης της ισχύος. Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

$$H(s) = \frac{1}{0.25s + 1} \quad (7.4)$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα στιγμιότυπο της τάσης του κόμβου 7 τη χρονική στιγμή  $t_0$ , στην περίπτωση που δεν έχει γίνει χρήση του φίλτρου:



**Εικόνα 7.20** Τάση του κόμβου 7 τη χρονική στιγμή  $t_0$  χωρίς τη χρήση φίλτρου

### 7.5 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκού συστήματος

Στην παράγραφο αυτή, πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, καθώς και μιας διάταξης MPPT, για την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας της Φ/Β γεννήτριας.

#### Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Το πλαίσιο που επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί είναι ένα QJP 300W. Τα συγκεκριμένα πλαίσια προσφέρουν ένα υψηλό επίπεδο ενεργειακής παραγωγής, και χρησιμοποιούνται ευρέως στην αγορά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, όπως αυτά δίνονται από τον κατασκευαστή:

## PV module QJP-250W-255W-260W-265W-270W 275W-280W-285W-290W-295W-300W

### Mechanical data

Cell tape:	Polycrystalline cell
Cell arrangement:	72 (6x12)
Dimensions:	1.956 x 992 x 50mm
Weight:	23,5 kg
Front glass:	3.2mm tempered low iron glass
EVA:	EVA
Back side:	TPT
Frame material:	Aluminium
Diodes & type:	IP65 By-pass diodes
Cable type:	900mm / 900mm (Ø 4mm <sup>2</sup> )
Connector:	MC Plug Typ IV (or equal)

### Electrical data QJP 54

Pmax (± 3%)	250W	255W	260W	265W	270W	275W	280W	285W	290W	295W	300W
Vmp	35.0V	35.1V	35.2V	35.3V	35.4V	35.5V	35.7V	35.9V	36.0V	36.1V	36.2V
Imp	7.14A	7.26A	7.39A	7.51A	7.65A	7.75A	7.84A	7.94A	8.05A	8.17A	8.28A
Voc	42.0V	42.1V	42.2V	42.3V	42.4V	42.6V	42.8V	43.1V	43.2V	43.3V	43.4V
Isc	8.00A	8.13A	8.27A	8.41A	8.57A	8.68A	8.78A	8.89A	9.01A	9.15A	9.27A

Maximum system voltage:	DC 1000V (TÜV) / DC 600V (UL)
STC:	irradiance 1000W/m <sup>2</sup> AM: 1.5 temperature 25°C

### Temperature coefficient

NOCT (NOCT):	47°C ± 2°C
Isc:	0.05% / °C
Voc:	- 0,35% / °C
Pmax:	- 0,45% / °C

### Permissible operating conditions

Operating temperature:	- 40°C - +85°C
Maximum loading capacity:	200 Kg/m <sup>2</sup> (5400 Pa)

### Warranty

Manufacturing:	5 years
Power production:	90% : 10 years 80% : 25 years

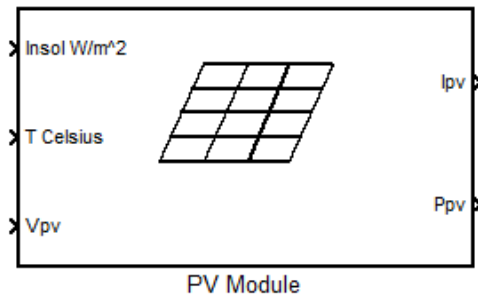
### Note:

This publication summarizes product warranty and specifications, which are subject to change without notice. Additional information may be found on our web site: [www.cnpv-power.com](http://www.cnpv-power.com)



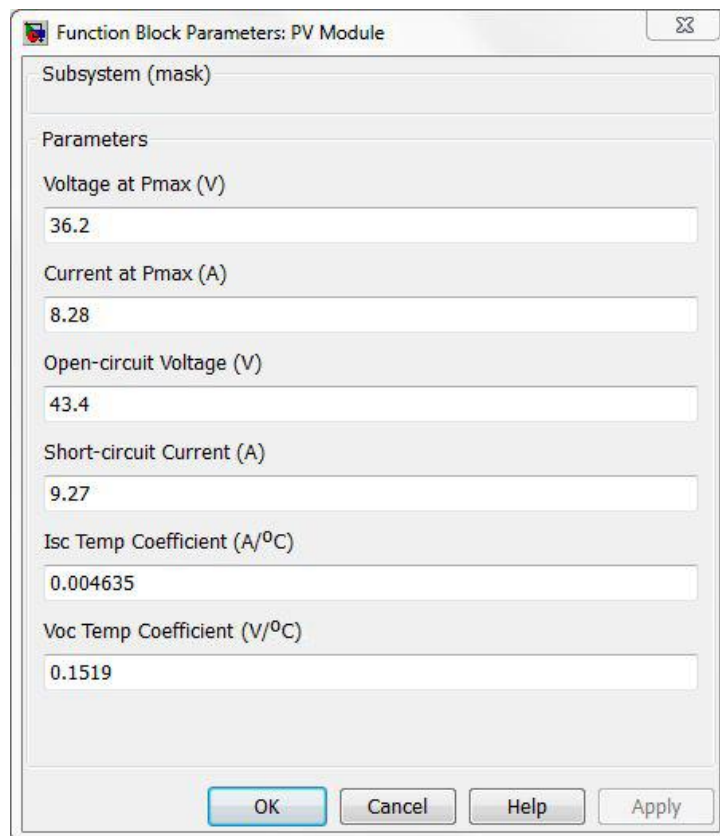
### Εικόνα 7.21 Τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου QJP 300W

Για τη μοντελοποίηση του παραπάνω πλαισίου στο Simulink, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της παρεμβολής [36]. Το πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν οι θεωρητικές παράμετροι δεν είναι διαθέσιμες, και να προσεγγίζει με ακρίβεια την πραγματική καμπύλη της λειτουργίας του Φ/Β. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Εικόνα 7.22** Block του φωτοβολταϊκού πλαισίου στο Simulink

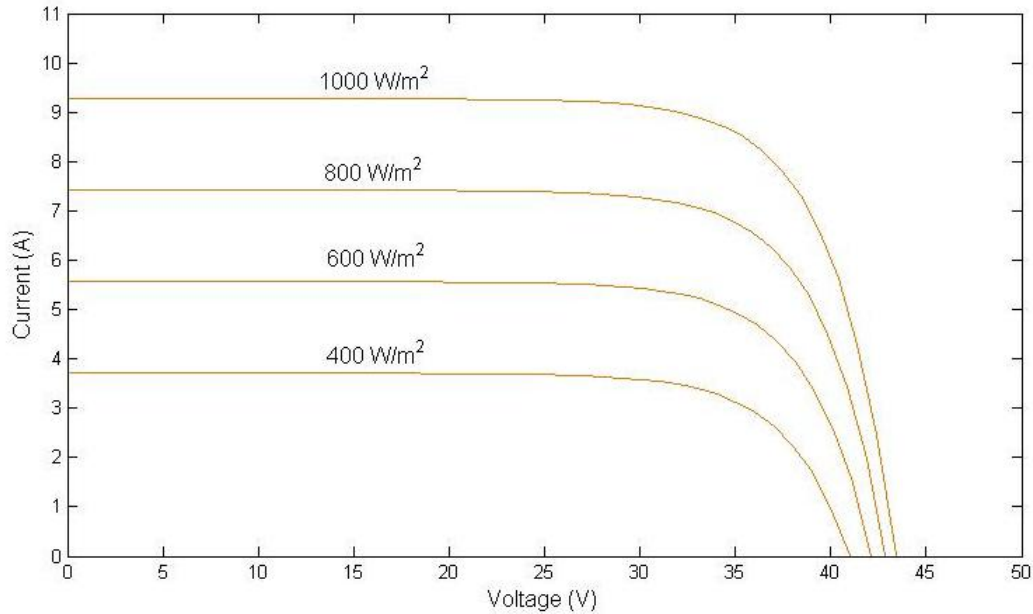
Όπως παρατηρούμε, το μοντέλο δέχεται ως είσοδο την τιμή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στο Φ/Β πλαίσιο, καθώς και την τάση λειτουργίας, και δίνει ως έξοδο το ρεύμα λειτουργίας και την ισχύ που αποδίδει το πλαίσιο για τις παραπάνω εισόδους.



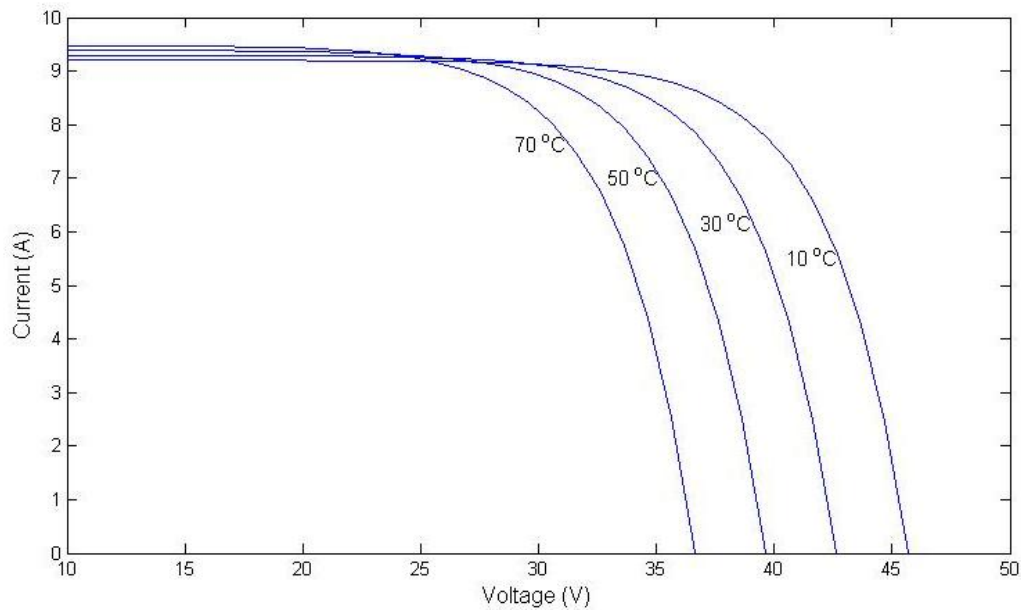
**Εικόνα 7.23** Επιλογή παραμέτρων για το Φ/Β πλαίσιο

Επίσης, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 7.23* μας δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου που θέλουμε να προσομοιάσουμε, συνεπώς χρησιμοποιούμε τα χαρακτηριστικά του QJP 300W. Ο τρόπος κατασκευής του παραπάνω block παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χαρακτηριστικές I-V της λειτουργίας του πλαισίου για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση:





**Εικόνα 7.24** Χαρακτηριστική I-V του πλαισίου QJP για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασία 25°C



**Εικόνα 7.25** Χαρακτηριστική I-V του πλαισίου QJP για διάφορες τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολία 1000W/m²

### Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Το επόμενο βήμα είναι να κατασκευάσουμε μια συστοιχία, που θα αποτελείται από τα πλαίσια που προσομοιώσαμε παραπάνω. Ο σκοπός μας είναι η κατασκευή μιας Φ/Β γεννήτριας 27kW, όπως αυτή που θεωρήσαμε σε προηγούμενες παραγράφους. Για να το επιτύχουμε αυτό, θα πρέπει αρχικά να επιλέξουμε τον κατάλληλο inverter. Εφόσον έχουμε την απαίτηση από τον inverter να απορροφά άεργο ισχύ με  $\cos\phi=0.8$ , θα πρέπει να είναι



ονομαστικής ισχύος 34kVA. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε δύο inverter Sma Sunny Tripower 17000TL, οι οποίοι θα λειτουργούν σε παράλληλη διάταξη, ώστε να μας δίνουν την επιθυμητή ισχύ.

Ο Sunny Tripower 17000TL έχει ονομαστική ισχύ 17kVA, και μπορεί να λειτουργήσει με συντελεστή ισχύος 0.8 επαγωγικό έως 0.8 χωρητικό.

## Technical Data

	Sunny Tripower 8000TL	Sunny Tripower 10000TL	Sunny Tripower 12000TL	Sunny Tripower 15000TL	Sunny Tripower 17000TL
<b>Input (DC)</b>					
Max. DC power (@ cos φ = 1)	8200 W	10200 W	12250 W	15340 W	17410 W
Max. input voltage	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	320 V - 800 V / 600 V	320 V - 800 V / 600 V	380 V - 800 V / 600 V	360 V - 800 V / 600 V	400 V - 800 V / 600 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V	150 V / 188 V	150 V / 188 V	150 V / 188 V	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	22 A / 11 A	22 A / 11 A	22 A / 11 A	33 A / 11 A	33 A / 11 A
Max. input current per string input A** / input B**	33 A / 12.5 A	33 A / 12.5 A	33 A / 12.5 A	33 A / 12.5 A	33 A / 12.5 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A: 4, B: 1	2 / A: 4, B: 1	2 / A: 4, B: 1	2 / A: 5, B: 1	2 / A: 5, B: 1
<b>Output (AC)</b>					
Rated output power (@ 230 V, 50 Hz)	8000 W	10000 W	12000 W	15000 W	17000 W
Max. apparent AC power	8000 VA	10000 VA	12000 VA	15000 VA	17000 VA
Nominal AC voltage	3 / N / PE, 220 / 380 V 3 / N / PE, 230 / 400 V 3 / N / PE, 240 / 415 V	3 / N / PE, 220 / 380 V 3 / N / PE, 230 / 400 V 3 / N / PE, 240 / 415 V	3 / N / PE, 220 / 380 V 3 / N / PE, 230 / 400 V 3 / N / PE, 240 / 415 V	3 / N / PE, 220 / 380 V 3 / N / PE, 230 / 400 V 3 / N / PE, 240 / 415 V	3 / N / PE, 220 / 380 V 3 / N / PE, 230 / 400 V 3 / N / PE, 240 / 415 V
Nominal AC voltage range	160 V - 280 V	160 V - 280 V	160 V - 280 V	160 V - 280 V	160 V - 280 V
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / ± 5 Hz ... +5 Hz				
Rated power frequency / rated power voltage	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V
Max. output current	16 A	16 A	19.2 A	24 A	24.6 A
Power factor at rated output power	1	1	1	1	1
Displacement power factor, configurable	0.8 leading ... 0.8 lagging				
Phase conductors / connection phases	3 / 3	3 / 3	3 / 3	3 / 3	3 / 3
<b>Efficiency</b>					
Max. efficiency / European efficiency	98.1 % / 97.5 %	98.1 % / 97.7 %	98.1 % / 97.7 %	98.2 % / 97.8 %	98.2 % / 97.8 %
<b>Protection devices</b>					
Inputs disconnection device	●	●	●	●	●
Ground fault monitoring / grid monitoring	●/●	●/●	●/●	●/●	●/●
DC surge arrester Type II, can be integrated	○	○	○	○	○
DC reverse pole protection / AC short-circuit current protection / galvanically isolated	●/●/-	●/●/-	●/●/-	●/●/-	●/●/-
All-pole-sensitive residual current monitoring unit	●	●	●	●	●
Protection class (as per IEC 62103) / over- voltage category (as per IEC 60664-1)	I / III	I / III	I / III	I / III	I / III
<b>General data</b>					
Dimensions (W / H / D)	665 / 690 / 265 mm [26.2 / 27.2 / 10.4 in]				
Weight	64 kg / 141.1 lb				
Operation temperature range	-25 °C ... +60 °C / 13 °F ... 140 °F				
Noise emission, typical	51 dB(A)	51 dB(A)	51 dB(A)	51 dB(A)	51 dB(A)
Self-consumption (at night)	1 W	1 W	1 W	1 W	1 W
Topology / cooling concept	transformerless / OptiCool				
Degree of protection / connection area degree of protection (as per IEC 60529)	IP65 / IP64	IP65 / IP54	IP65 / IP54	IP65 / IP54	IP65 / IP54
Climatic category (as per IEC 60721-3-4)	4K4H	4K4H	4K4H	4K4H	4K4H
Maximum permissible value for relative humidity, non-condensing	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
<b>Features</b>					
DC connection	SUNCLIX	SUNCLIX	SUNCLIX	SUNCLIX	SUNCLIX
AC connection	spring terminal	spring terminal	spring terminal	spring terminal	spring terminal
Display	graphic	graphic	graphic	graphic	graphic
Interfaces: RS485 / Bluetooth®	○/●	○/●	○/●	○/●	○/●
Warranty: 5 / 10 / 15 / 20 / 25 years	●/○/○/○/○	●/○/○/○/○	●/○/○/○/○	●/○/○/○/○	●/○/○/○/○
Multi-function relay	●	●	●	●	●
Certificates and permits (more available on request)	CE, VDE 0126-1-1, G83/1-1, RD 1663/2000, PPC, AS4777, EN 50438*, C10/11, PPDS, RD 661/2007, G59/2, IEC 61727, ENELGuida, UTE C15-712-1				
Type designation	STP 8000TL-10	STP 10000TL-10	STP 12000TL-10	STP 15000TL-10	STP 17000TL-10
* Does not apply to all national deviations of EN 50438 ** To be observed in case of a short circuit in the electronic string fuse ● Standard features ○ Optional features — Not available Data at nominal conditions, last updated: May 2011					

Εικόνα 7.26 Τεχνικά χαρακτηριστικά του Sunny Tripower 17000TL

Αρχικά, τα Φ/Β πλαίσια συνδέονται σε σειρά, προκειμένου να επιτύχουμε την επιθυμητή τάση που θέλουμε να δίνουν, σχηματίζοντας τη στοιχειοσειρά (string). Η τάση αυτή πρέπει να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων της DC τάσης εισόδου στον inverter. Επίσης, πρέπει να γίνει υπολογισμός της τάσης εισόδου για τις συνθήκες της Ελλάδας, δηλαδή για εύρος θερμοκρασιών από  $-10^{\circ}\text{C}$  έως  $80^{\circ}\text{C}$ , ώστε να εξασφαλίσουμε ότι σε καμία από τις περιπτώσεις αυτές δε θα βγει η τάση εκτός ορίων.

Στη συνέχεια, οι στοιχειοσειρές των πλαισίων συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους, ώστε να παράγουν το επιθυμητό ρεύμα, το οποίο επίσης πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι είναι στα όρια του inverter. Σύμφωνα με το datasheet της *Εικόνας 7.26*, μπορούν να συνδεθούν μέχρι 5 string στον αντιστροφέα.

Με βάση τα παραπάνω, για να επιτύχουμε την επιθυμητή ισχύ σε κάθε αντιστροφέα, δηλαδή τα  $13.5\text{kWp}$ , θα συνδέσουμε 3 string με 15 πλαίσια σε σειρά το καθένα (συνολικά 45 πλαίσια), στον κάθε inverter. Σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή, ο Sunny Tripower έχει μέγιστο Ευρωπαϊκό συντελεστή απόδοσης 97.8%. Εμείς θα θεωρήσουμε μια μέση τιμή 96%, που να ανταποκρίνεται σε διάφορα σημεία της καμπύλης απόδοσής του.

### Διάταξη MPPT

Τέλος, μοντελοποιήθηκε μια διάταξη MPPT, ώστε σε κάθε χρονική στιγμή ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του πλαισίου, να βρίσκουμε τη μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί να παράγει η Φ/Β γεννήτρια.

Έγινε η επιλογή του προσδιορισμού του MPP ως ποσοστό του  $V_{oc}$ . Όπως αναφέραμε και στο δεύτερο κεφάλαιο, η τάση  $V_{mpp}$  της λειτουργίας του πλαισίου, συνδέεται με την τάση ανοιχτοκύκλωσης μέσω της σχέσης:  $V_{mpp}/V_{oc} = k = \text{σταθ.}$ , όπου  $k$  είναι ο συντελεστής

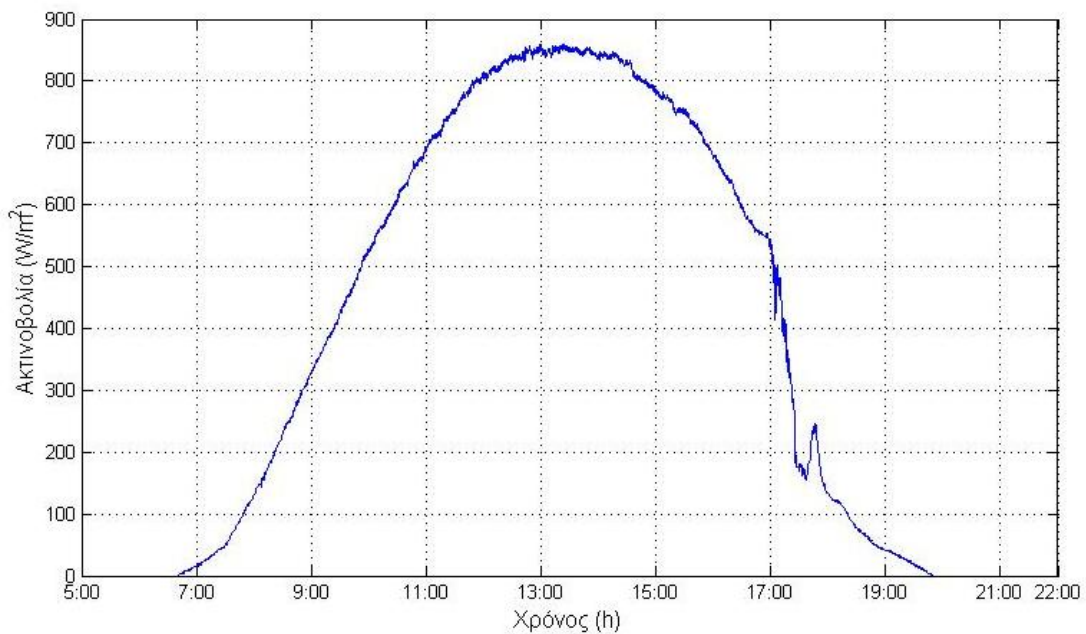
ποσόστωσης. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένα κύτταρο πιλότος, στο οποίο γίνεται συνεχώς καταμέτρηση του  $V_{oc}$ . Καθώς στην προσομοίωση δεν είναι δυνατό να γίνεται μέτρηση του  $V_{oc}$ , γίνεται υπολογισμός αυτού με τρόπο που φαίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα [36].

Εφόσον είναι γνωστό το  $V_{oc}$ , γίνεται υπολογισμός του  $V_{mpp}$ , το οποίο δίνεται ως είσοδος στο μοντέλο της *Εικόνας 7.22*, που με τη σειρά δίνει ως έξοδο το  $I_{mpp}$ , και την ισχύ  $P_{mpp}$  που είναι και το ζητούμενο.

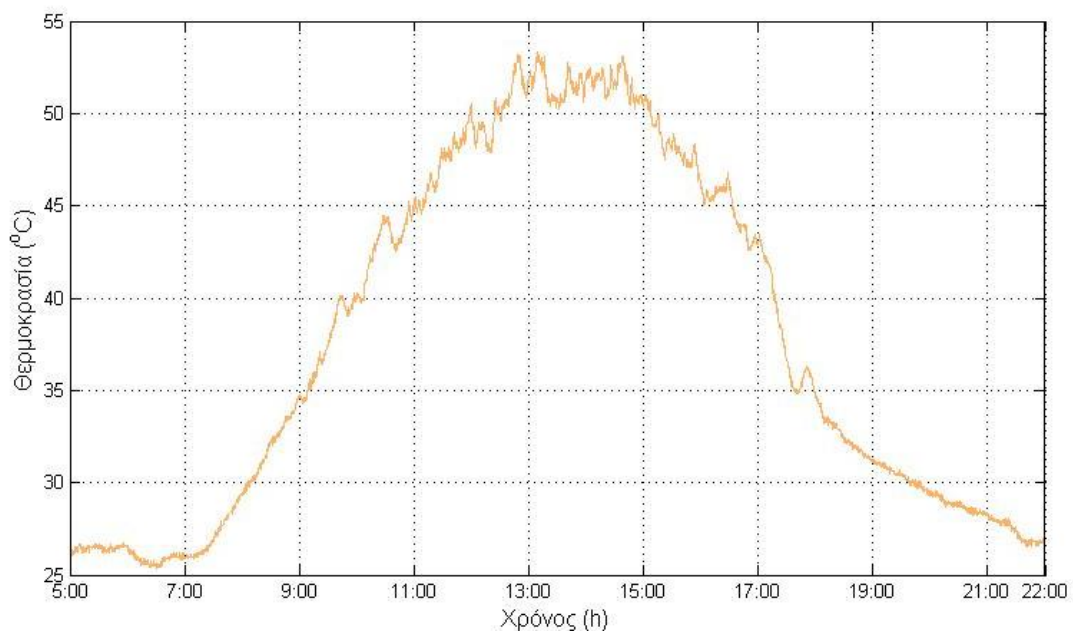
Σημειώνεται ότι η τεχνική αυτή δεν εγγυάται την ανίχνευση του MPP με απόλυτη ακρίβεια. Στην πράξη χρησιμοποιείται κυρίως η τεχνική Perturb&Observe. Ωστόσο, πρόκειται για μια απλή λογική, η οποία υλοποιείται εύκολα, και είναι πολύ γρήγορη σε σχέση με τις υπόλοιπες, κάτι που είναι καθοριστικής σημασίας για το χρόνο εκτέλεσης των προσομοιώσεων.

## 7.6 Χρονοσειρές ζήτησης φορτίου και παραγωγής των Φ/Β

Στην παράγραφο αυτή, θα γίνει η επιλογή χρονοσειρών ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στη διάρκεια μια ημέρας, ώστε να εξαχθεί η χρονοσειρά παραγωγής της γεννήτριας που μοντελοποιήθηκε για τη μέρα αυτή. Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από καταγραφή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ΣΗΕ της σχολής ΗΜΜΥ Ε.Μ.Π. στις 10 Αυγούστου 2012, και παρατίθενται στις παρακάτω εικόνες. Σημειώνεται πως οι μετρήσεις έχουν υψηλή ακρίβεια, και έγιναν με βάση το πρότυπο του οργανισμού DERlab για δοκιμές Φ/Β πλαισίων σε εξωτερικές συνθήκες:

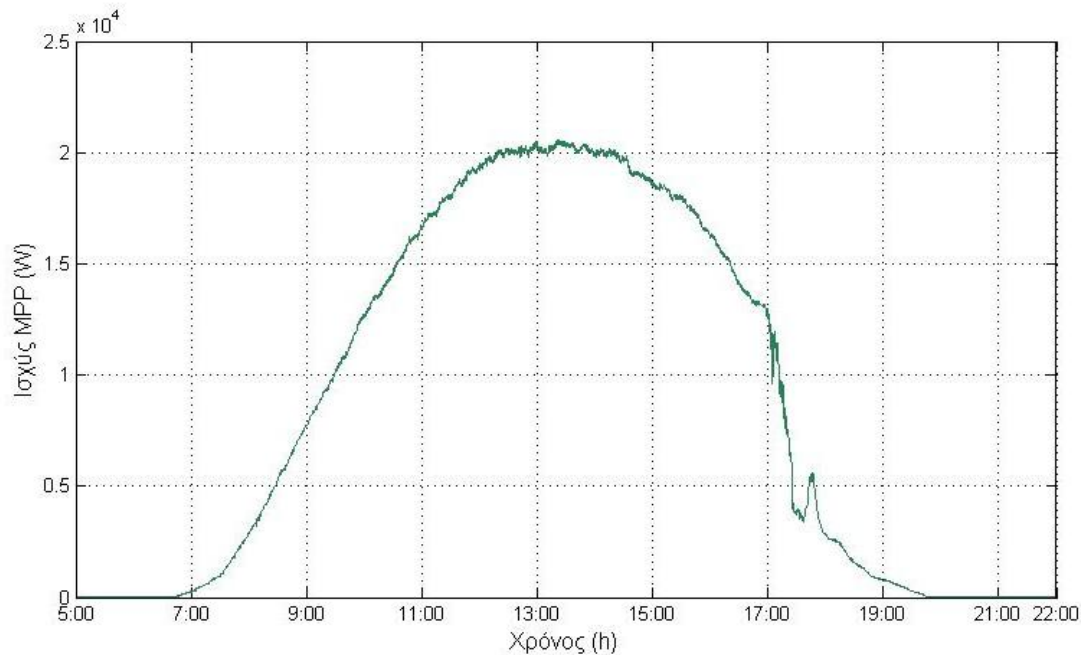


*Εικόνα 7.27 Ηλιακή ακτινοβολία στις 10 Αυγούστου 2012*



*Εικόνα 7.28 Θερμοκρασία πλαισίου στις 10 Αυγούστου 2012*

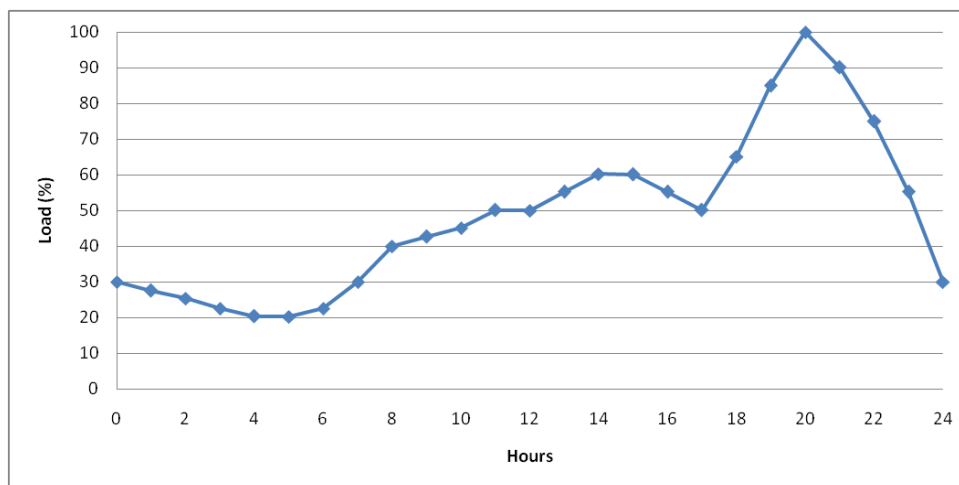
Με βάση τις παραπάνω εισόδους, η ισχύς που παράγει η Φ/Β συστοιχία παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 7.29** Παραγόμενη ισχύς από τη Φ/Β συστοιχία

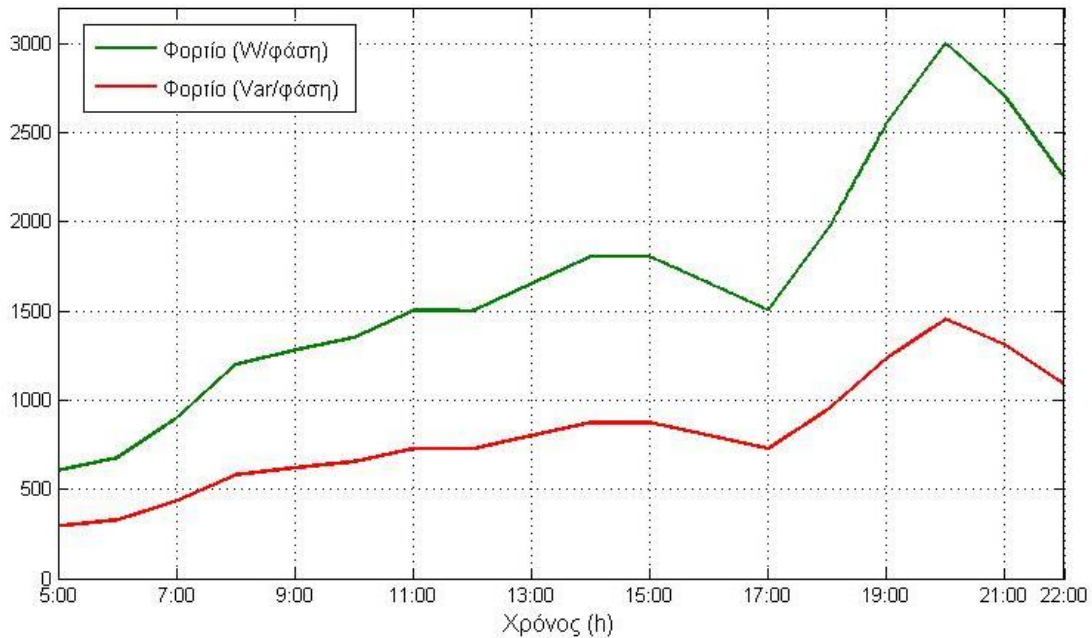
Παρατηρούμε ότι περίπου από τις 12 έως τις 3 το μεσημέρι, η ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται, παίρνοντας τιμές γύρω στα  $850 \text{ W/m}^2$ . Στο ίδιο διάστημα παρατηρείται και η μέγιστη θερμοκρασία στην επιφάνεια του πλαισίου που αγγίζει τους  $53^\circ\text{C}$ . Εφόσον η ακτινοβολία παίρνει τιμές μικρότερες του  $1000 \text{ W/m}^2$ , και η θερμοκρασία ξεπερνά κατά πολύ τους  $25^\circ\text{C}$ , είναι αναμενόμενο ότι η παραγόμενη ισχύς θα είναι μικρότερη των  $27\text{kW}$ , που είναι τα ονομαστικά. Πράγματι, στο διάστημα 12 με 2 το μεσημέρι παρατηρείται η μέγιστη παραγωγή της συστοιχίας, που φτάνει τα  $20.5\text{kW}$ .

Επίσης θα γίνει η επιλογή μιας χρονοσειράς οικιακού φορτίου, η οποία βασίζεται στην εξής καμπύλη φορτίου, που παρουσιάζει μέγιστο τις απογευματινές ώρες [37]:



**Εικόνα 7.30** Ημερήσια καμπύλη φορτίου για οικιακό φορτίο[37]

Με βάση την παραπάνω καμπύλη, θεωρώντας μέγιστο φορτίο 3kW/φάση με  $\cos\phi=0.9$  επαγωγικό (το  $\cos\phi$  θεωρείται σταθερό για όλη την ημέρα) όπως στις προηγούμενες παραγράφους, προκύπτει η χρονοσειρά ενεργού και αέργου ζήτησης του φορτίου:



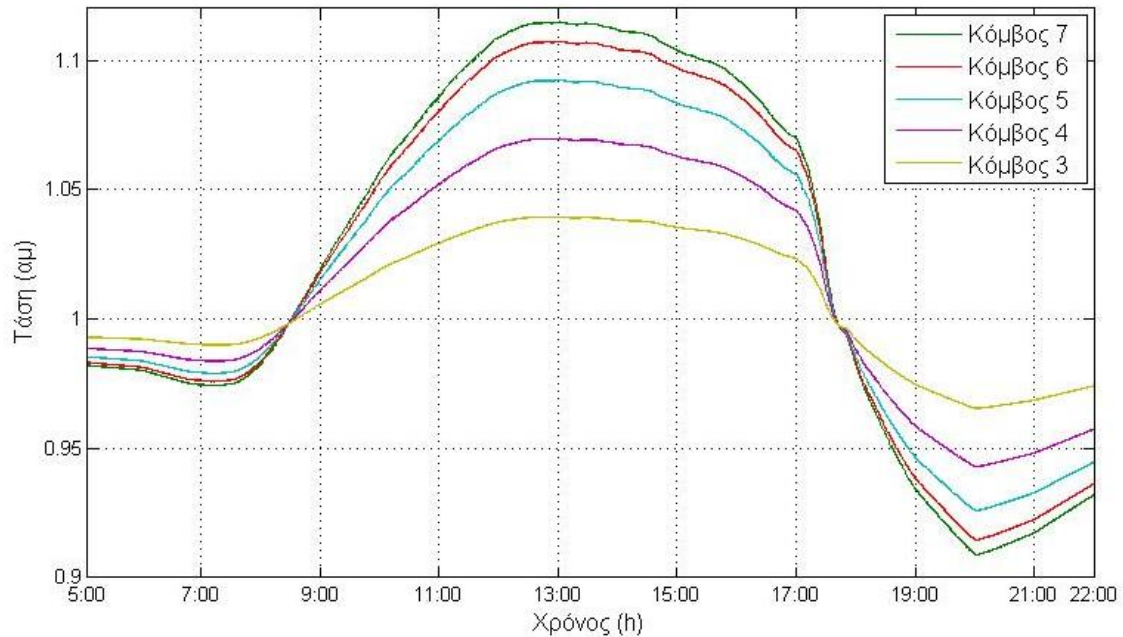
**Εικόνα 7.31** Χρονοσειρά ενεργού και αέργου ισχύος οικιακού φορτίου

### 7.7 Απόκριση δικτύου XT με $R/X = 5$ σε χρονοσειρές παραγωγής και ζήτησης

Στην παράγραφο αυτή, θα θεωρήσουμε ότι η παραγωγή των Φ/Β καθώς και η ζήτηση των φορτίων του δικτύου της *Εικόνας 7.11* δίνονται από τις χρονοσειρές που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ώστε να μελετήσουμε την απόκριση του δικτύου για μεταβαλλόμενη Φ/Β παραγωγή και φορτίο. Καθώς στην περίπτωση αυτή έχουμε μικρότερη παραγωγή από αυτή που θεωρήσαμε στην παράγραφο 7.3, θα αυξήσουμε το μήκος των γραμμών XT στα 150m, ώστε να εμφανιστεί ικανοποιητική ανύψωση τάσης στους κόμβους.

Αρχικά, τρέχουμε την προσομοίωση στο Simulink, χωρίς τη χρήση των ελεγκτών ενεργού και αέργου ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης, και καταγράφουμε το μέτρο της τάσης που αναπτύσσεται στους κόμβους του δικτύου με Φ/Β παραγωγή και φορτίο:





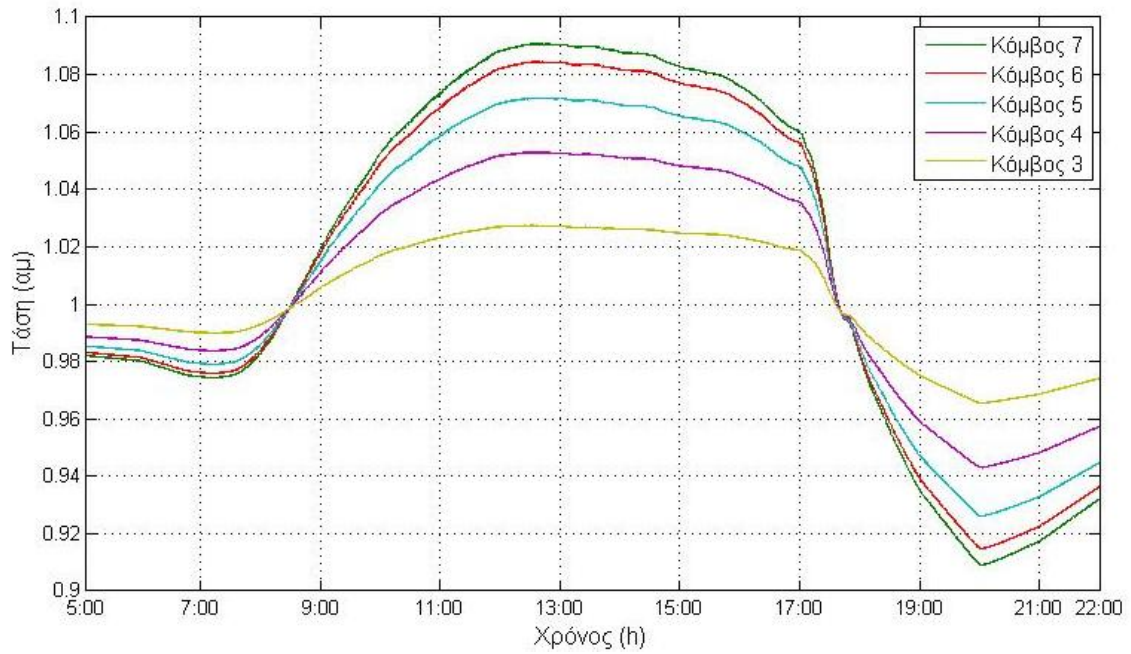
**Εικόνα 7.32** Προφίλ τάσης στους κόμβους του δικτύου XT χωρίς τη χρήση ελεγκτών

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, περίπου στο διάστημα 12 με 3 το μεσημέρι παρουσιάζεται η μεγαλύτερη ανύψωση τάσης στους ζυγούς, και μάλιστα στους κόμβους 6 και 7 του δικτύου η τάση είναι πάνω από τα επιθυμητά όρια. Το χρονικό αυτό διάστημα συμπίπτει με τη μέγιστη παραγωγή ισχύος από τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες.

Επίσης, από τις 5 έως τις 9 το πρωί, καθώς και από τις 5 το απόγευμα έως τις 10 το βράδυ, η τάση στους κόμβους παίρνει τιμές κάτω από το 1 αμ, παρατηρείται δηλαδή πτώση τάσης. Στο πρώτο διάστημα, λόγω χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας η Φ/Β παραγωγή δεν μπορεί να καλύψει τη ζήτηση. Στο δεύτερο διάστημα, δηλαδή μετά τις 5 το απόγευμα, αφενός η Φ/Β παραγωγή είναι πολύ μικρή, αφετέρου το φορτίο παίρνει μεγάλες τιμές, με αποτέλεσμα η πτώση τάσης να είναι πιο έντονη. Συγκεκριμένα στις 8 το απόγευμα, η παραγωγή γίνεται μηδενική, ενώ το φορτίο φτάνει στα 3kW/φάση, δηλαδή τη μέγιστη τιμή του, οπότε και παρατηρείται η μέγιστη πτώση τάσης στους ζυγούς, η οποία είναι εντός ορίων.

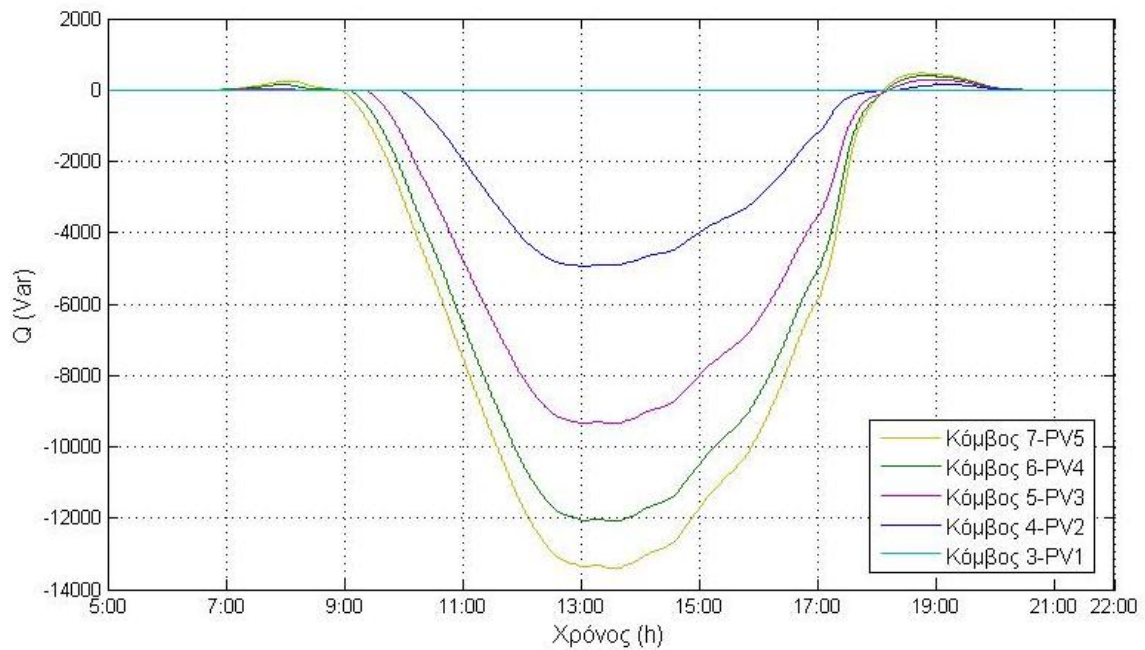
### 7.7.1 Συμπεριφορά ελεγκτή αέργου ισχύος

Στο σενάριο αυτό, θα ενεργοποιήσουμε τους ελεγκτές για τη Ρύθμιση Αέργου Ισχύος στους αντιστροφείς των Φ/Β γεννητριών, ώστε να καταγράψουμε τις τάσεις στους κόμβους, καθώς και τη συμπεριφορά των ελεγκτών για μεταβαλλόμενη παραγωγή και φορτίο. Θεωρούμε και σε αυτή την περίπτωση ότι το όριο συντελεστή ισχύος σε κάθε inverter είναι 0.8, που είναι και το όριο στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει ο inverter Sunny Tripower που έχει επιλεγθεί. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:

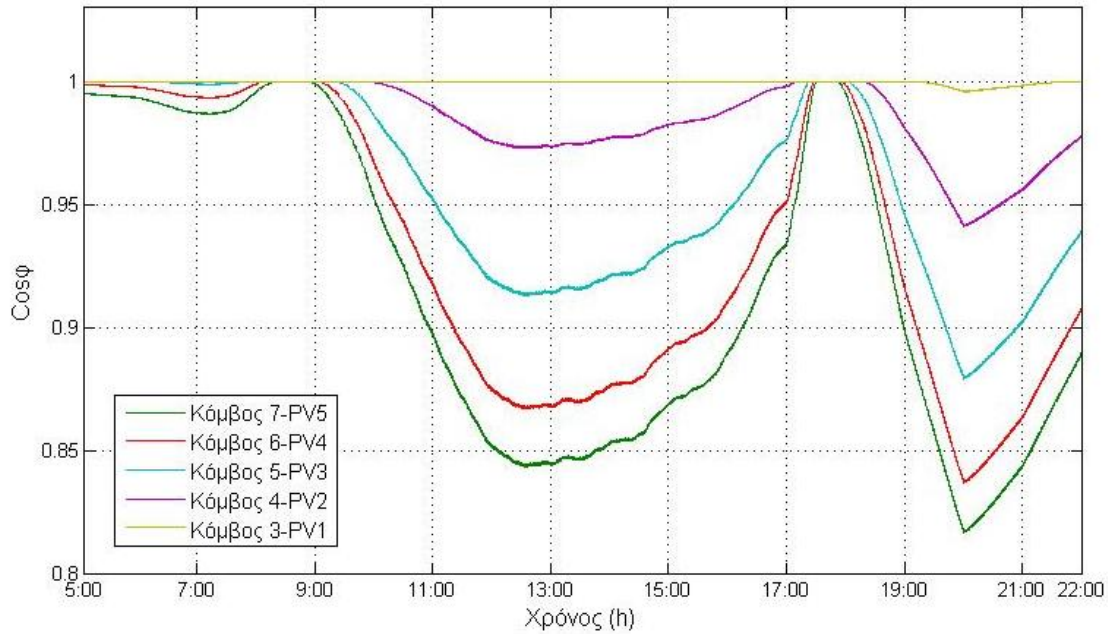


**Εικόνα 7.33** Προφίλ τάσης στους κόμβους του δικτύου XT με τη χρήση ελεγκτή αέργου ισχύος

Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι η τάση σε όλους τους κόμβους είναι κάτω του ορίου του 1.1 αμ, οπότε η χρήση των ελεγκτών επέλυσε το πρόβλημα.



**Εικόνα 7.34** Ποσότητα αέργου ισχύος που απορροφά ο κάθε αντιστροφείας



**Εικόνα 7.35** Συντελεστής ισχύος της λειτουργίας του κάθε αντιστροφέα

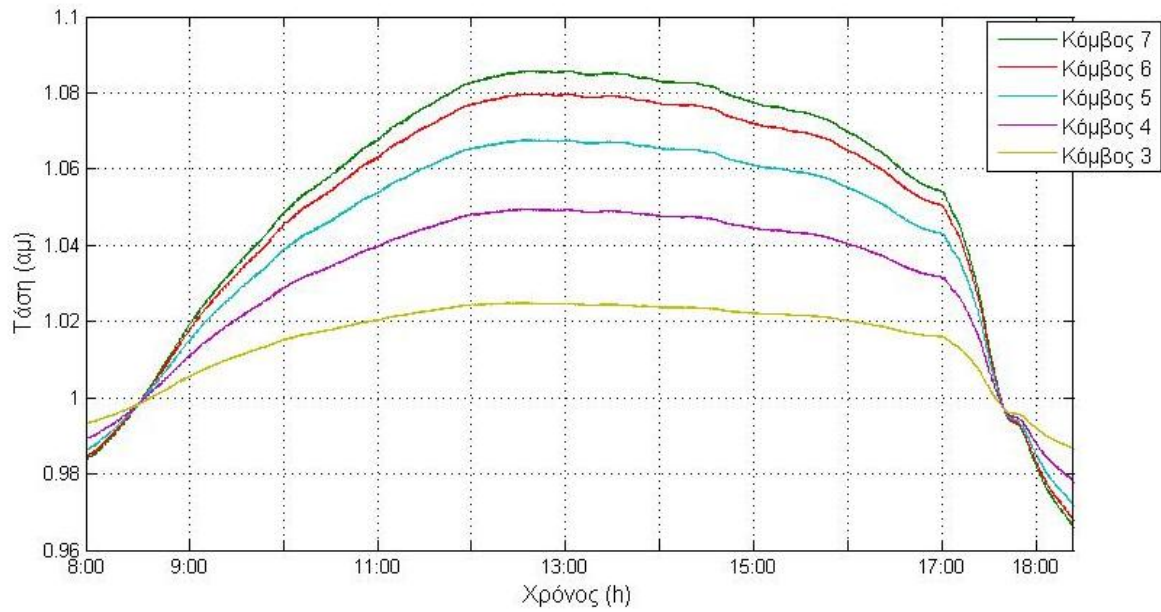
Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο συντελεστής ισχύος και η άεργος ισχύς που απορρόφησε ο κάθε inverter για την αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης τάσης. Ο αντιστροφέας στο ζυγό 3 δεν απορρόφησε άεργο ισχύ. Όπως είδαμε στη θεωρία, η τιμή της αέργου εξαρτάται από την ισχύ  $mpp$  που παράγει το Φ/Β, καθώς και από τη μετρούμενη τάση του ζυγού. Συνεπώς, όπως παρατηρούμε, όσο απομακρυνόμαστε από το Μ/Σ οι αντιστροφείς απορροφούν όλο και μεγαλύτερη ποσότητα αέργου ισχύος, καθώς η τιμή του μέτρου της τάσης είναι όλο και μεγαλύτερη. Επίσης, η απορρόφηση αέργου ισχύος μεγιστοποιείται στο διάστημα 12 με 2 το μεσημέρι, οπότε και έχουμε τη μεγαλύτερη  $P_{mpp}$  από τις Φ/Β συστοιχίες. Επίσης, στο διάστημα από τις 9 έως τις 6 το απόγευμα, οι αντιστροφείς δουλεύουν με επαγωγικό συντελεστή ισχύος.

Όπως είχαμε αναφέρει και στη θεωρία, ο ελεγκτής αέργου ισχύος που κατασκευάστηκε έχει τη δυνατότητα να δουλέψει και με χωρητικό  $\cos\phi$ , παρέχοντας άεργο ισχύ στο δίκτυο σε περίπτωση βύθισης τάσης. Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι στο διάστημα 7 με 9 το πρωί, καθώς και 6 με 8 το βράδυ, οι αντιστροφείς παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο, καθώς η τάση στους κόμβους παίρνει τιμές κάτω του 1 αμ λόγω της ζήτησης των φορτίων. Ωστόσο, καθώς η  $P_{mpp}$  των Φ/Β έχει πολύ χαμηλή τιμή λόγω της πολύ χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, η άεργος που παρέχουν οι inverters παίρνει πολύ μικρές τιμές, χωρίς να μπορεί να συνεισφέρει στην αντιμετώπιση της πτώσης τάσης στους ζυγούς, παρόλο που ο (χωρητικός) συντελεστής ισχύος της λειτουργίας των αντιστροφέων είναι πολύ χαμηλός στα αντίστοιχα διαστήματα.

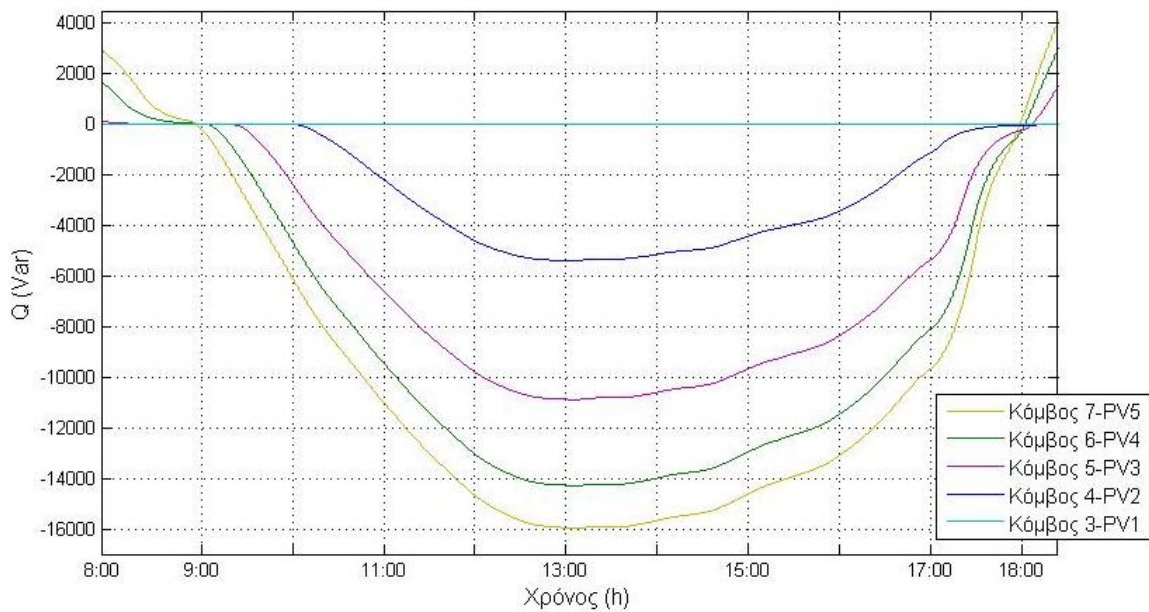
Ένα σενάριο που θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθεί, θα ήταν η τιμή της αέργου που μπορούν να χειριστούν οι αντιστροφείς να μην εξαρτάται από τη στιγμιαία  $P_{mpp}$  των Φ/Β. Για να υλοποιήσουμε αυτό το σενάριο και με βάση τον τύπο (7.2), θα θεωρήσουμε ότι δε χρησιμοποιούμε την  $P_{mpp}$  που παράγουν τα φωτοβολταϊκά, αλλά την  $P_{nom} = 27kW$ , δηλαδή



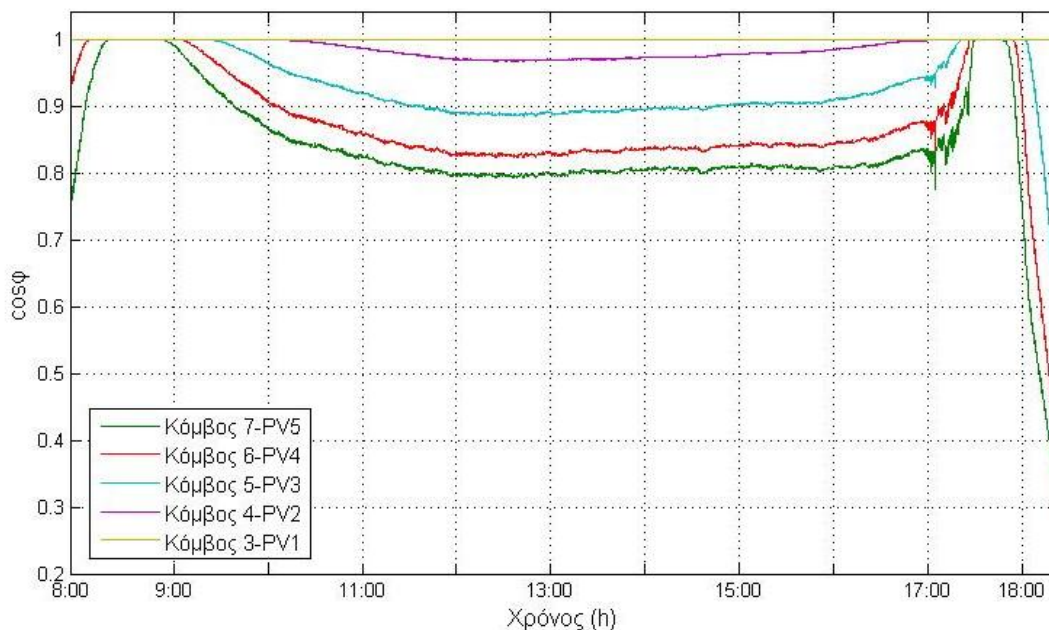
την ονομαστική ισχύ της συστοιχίας, ώστε οι αντιστροφείς να μπορούν να παράγουν ή να απορροφήσουν άεργο ισχύ, ανεξάρτητα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.



**Εικόνα 7.36** Προφίλ τάσης στους κόμβους στην περίπτωση σταθερού  $Q_{max}$



**Εικόνα 7.37** Ποσότητα αέργου που απορροφά ο κάθε αντιστροφέας στην περίπτωση σταθερού  $Q_{max}$



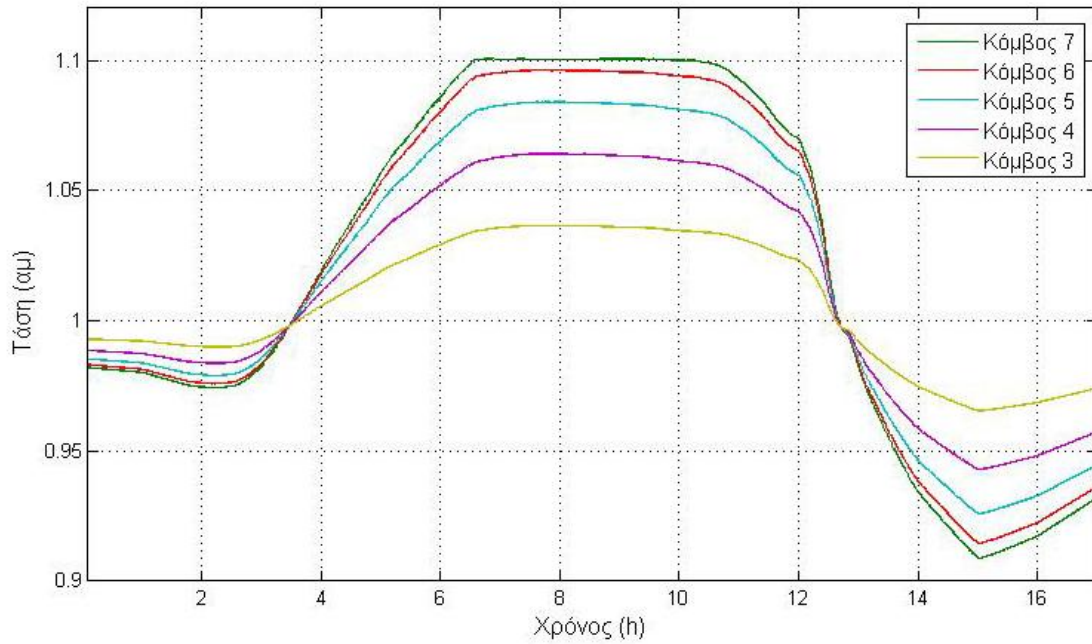
**Εικόνα 7.38** Συντελεστής ισχύος της λειτουργίας του κάθε αντιστροφέα

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι στα διαστήματα όπου εμφανίζεται ανύψωση τάσης, οι αντιστροφείς μπορούν να απορροφήσουν μεγαλύτερη ποσότητα αέργου, συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου. Κι εδώ από τις 9 μέχρι τις 6 το απόγευμα περίπου οι αντιστροφείς δουλεύουν με επαγωγικό συντελεστή ισχύος.

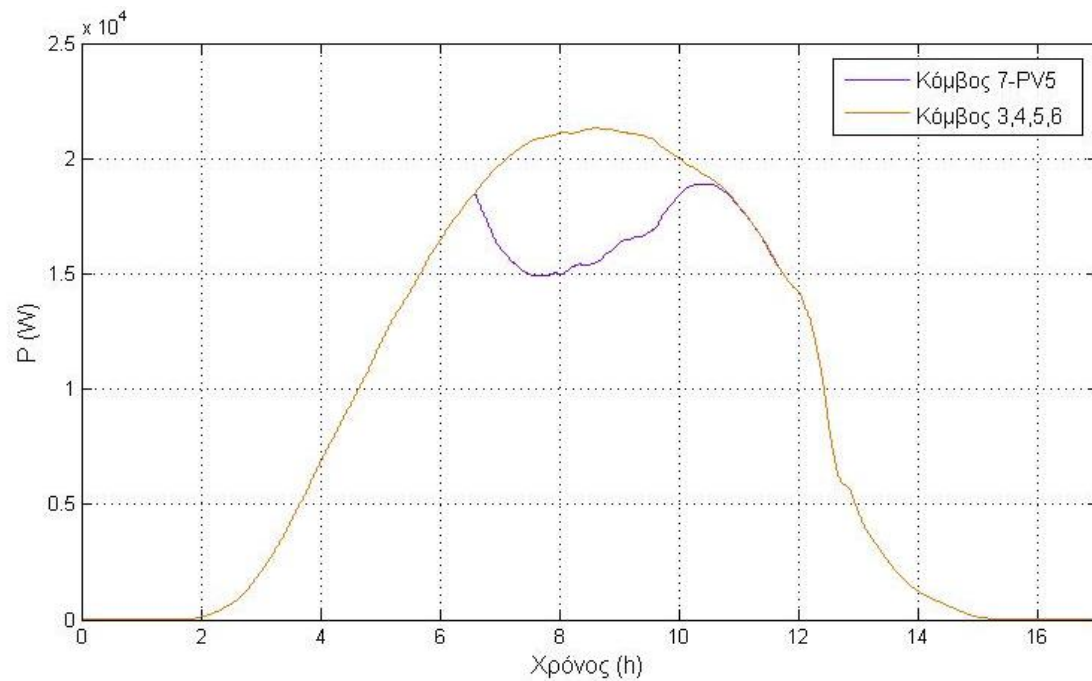
Αυτό που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, είναι η συμπεριφορά των ελεγκτών στην περίπτωση πτώσης τάσης στους κόμβους. Παρατηρούμε ότι από τις 8 έως τις 9 το πρωί, καθώς και από τις 6 το απόγευμα και μετά, οι αντιστροφείς δουλεύουν με χωρητικό  $\cos\phi$ , και παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο για την καταπολέμηση της μείωσης τάσης. Κρίνεται απαραίτητο να αναφέρουμε πως δεν είναι δυνατό ο αντιστροφέας να παράγει μεγάλες ποσότητες αέργου ισχύος, όταν η ηλιοφάνεια είναι πολύ χαμηλή. Για το λόγο αυτό, έχει γίνει καταγραφή των αποτελεσμάτων από τις 8 το πρωί μέχρι λίγο μετά τις 6 το απόγευμα. Παρατηρούμε ότι μετά τις 6 το απόγευμα, που η τιμή της ηλιοφάνειας μικραίνει, ενώ το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται, οι αντιστροφείς καλούνται να δουλέψουν σε πολύ χαμηλό  $\cos\phi$ , καθώς παράγουν μεγάλες ποσότητες αέργου ισχύος για την αντιμετώπιση της πτώσης τάσης, ενώ έχουν μικρή παραγωγή ενεργού ισχύος.

### 7.7.2 Συμπεριφορά ελεγκτή ενεργού ισχύος

Στην παράγραφο αυτή θα θεωρήσουμε ότι είναι ενεργοποιημένη η περικοπή της ενεργού ισχύος στους αντιστροφείς, ώστε να παρατηρήσουμε το προφίλ της τάσης στους ζυγούς του δικτύου. Όπως είδαμε στην *Εικόνα 7.32*, η τάση στους δύο τελευταίους κόμβους είναι εκτός ορίων στην περίπτωση που δεν έχουμε κάποιον είδους έλεγχο στο δίκτυο. Ενεργοποιώντας τον έλεγχο ενεργού ισχύος προκύπτει:



**Εικόνα 7.39** Προφίλ τάσης των κόμβων του δικτύου με χρήση του ελέγχου ενεργού ισχύος



**Εικόνα 7.40** Ενεργός ισχύς που παράγουν οι αντιστροφείς στην περίπτωση ελέγχου ενεργού ισχύος

Παρατηρούμε ότι το Power Curtailment ενεργοποιήθηκε μόνο στον τελευταίο κόμβο, του οποίου η τάση είναι οριακά στο 1.1 αμ, σε όλο το διάστημα στο οποίο εμφανίζεται η ανύψωση τάσης σε περίπτωση μη χρήσης ελέγχου στο δίκτυο. Καθώς μειώνεται η ισχύς στον τελευταίο κόμβο, παρατηρείται και μικρή μείωση της τάσης των υπόλοιπων κόμβων. Σημειώνεται πως εδώ δεν έχει νόημα ο συνδυασμένος έλεγχος, εφόσον η απορρόφηση αέργου ισχύος αρκεί για να επιλύσει το πρόβλημα.

## 7.8 Μοντελοποίηση δικτύου XT στο RTDS

Το τελευταίο κομμάτι της παρούσας εργασίας πραγματεύεται τη μοντελοποίηση του δεύτερου δικτύου XT ( $R/X=5$ ), καθώς και την εκτέλεση προσομοιώσεων στο RTDS. Αρχικά, το δίκτυο χαμηλής τάσης και οι ελεγκτές ισχύος σχεδιάστηκαν στο RSCAD.

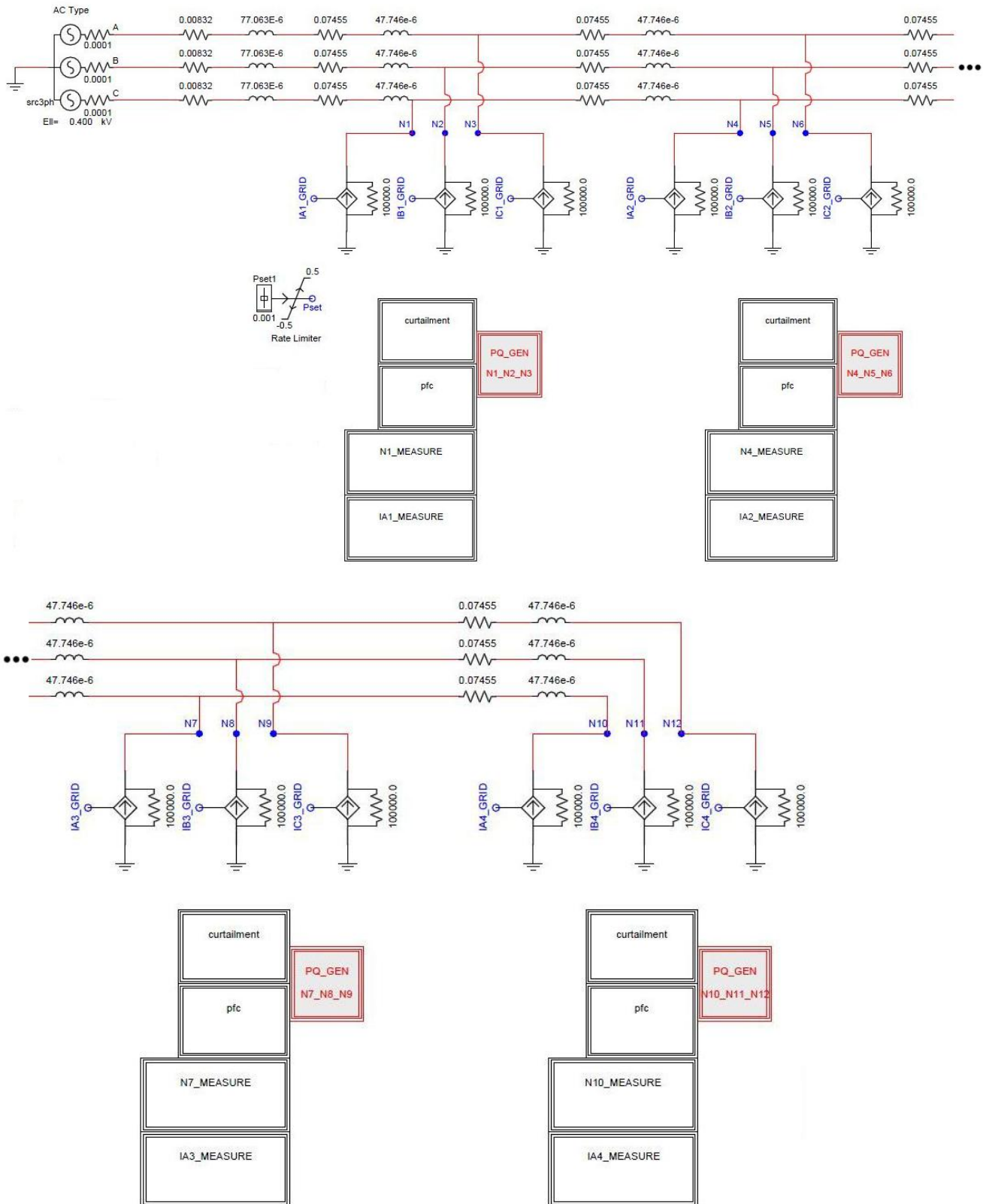
Όπως θα φανεί και παρακάτω, ο σχεδιασμός του δικτύου είναι πολύπλοκος, και για την εκτέλεση των προσομοιώσεων πρέπει να γίνει η καταμέτρηση πολλών μεγεθών που σχετίζονται με τους ελεγκτές για τη ρύθμιση της τάσης, αλλά και με τη μοντελοποίηση των PQ πηγών, με αποτέλεσμα να προκύπτουν σφάλματα στη διάρκεια των προσομοιώσεων. Σημειώνεται ότι δεν κατέστη δυνατό να μοντελοποιηθεί το δίκτυο με 5 κόμβους παραγωγής και φορτίου, όπως αυτό φαίνεται στην *Εικόνα 7.11*.

Για το λόγο αυτό μοντελοποιήθηκε ένα δίκτυο με ίδια χαρακτηριστικά, αλλά με 4 κόμβους στους οποίους υπάρχει Φ/Β παραγωγή και φορτίο, ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα του δικτύου. Επίσης, και σε αυτή την περίπτωση το μήκος των γραμμών αυξήθηκε στα 150m, ώστε να εμφανιστεί έντονα το φαινόμενο ανύψωσης τάσης.

Σε κάθε κόμβο του δικτύου γίνεται η καταμέτρηση του ρεύματος και της τάσης. Επίσης έχει κατασκευαστεί ένα block για τη Ρύθμιση Αέργου Ισχύος, καθώς και για την Περικοπή Ενεργού Ισχύος. Για τη μοντελοποίηση της Φ/Β γεννήτριας χρησιμοποιήθηκε ένα block, το οποίο ουσιαστικά είναι μια πηγή ρεύματος, η οποία δέχεται ως είσοδο την επιθυμητή P και Q που θέλουμε να παράγει το Φ/Β, μετράει την τάση που αναπτύσσεται στο ζυγό, και υπολογίζει το ρεύμα που πρέπει να δοθεί ώστε να παραχθεί η επιθυμητή ενεργός και άεργος ισχύς.

Η παραγωγή των Φ/Β δίνεται ως είσοδος με ένα slider (Pset1), ενώ γίνεται χρήση ενός στοιχείου Rate Limiter, ώστε η ισχύς να μην πάρει στιγμιαία την επιθυμητή τιμή, αλλά να αυξηθεί σταδιακά, ώστε να αποφύγουμε σφάλματα λόγω ανεπιθύμητων μεταβατικών φαινομένων. Ουσιαστικά, η λειτουργία του Rate Limiter είναι παρόμοια με αυτή του βαθυπερατού φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις στο Simulink, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 7.4.

Ο σχεδιασμός του δικτύου στο RSCAD φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

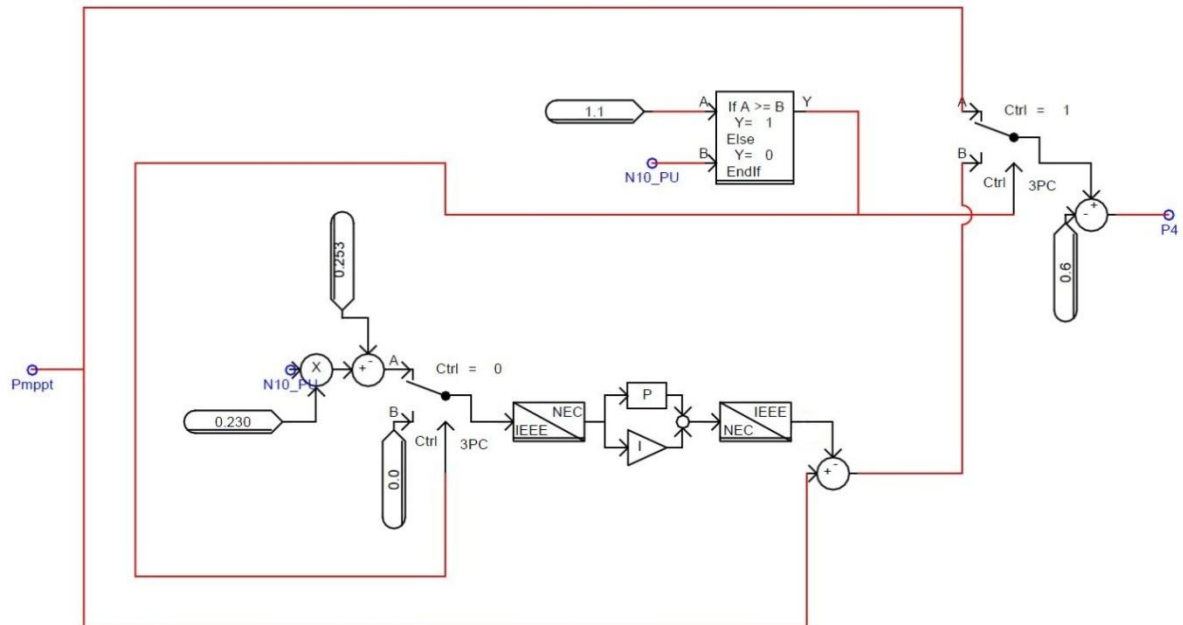


Εικόνα 7.41 Υλοποίηση δικτύου XT στο RSCAD



### 7.8.1 Σχεδίαση ελεγκτών για τη ρύθμιση τάσης στο RSCAD

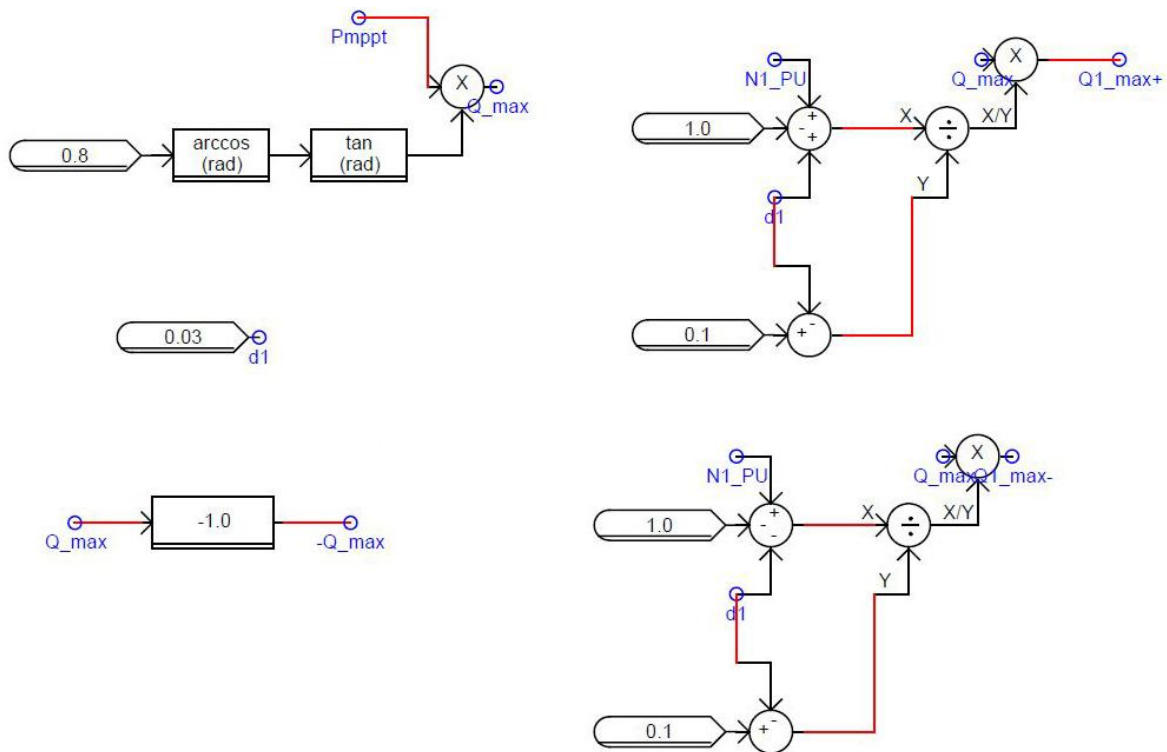
Οι ελεγκτές για το power factor control και για το power curtailment που παρουσιάστηκαν στις προσομοιώσεις του Simulink, μοντελοποιήθηκαν και για τις προσομοιώσεις στο RTDS.



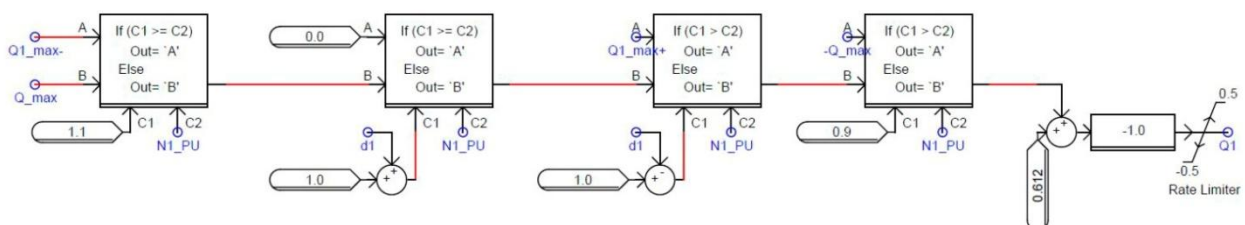
**Εικόνα 7.42** Σχεδίαση ελεγκτή ενεργού ισχύος στο RSCAD

Όπως παρατηρούμε στην παραπάνω εικόνα, η λογική σχεδίασης του ελεγκτή είναι παρόμοια με αυτή του simulink. Μια διάταξη ελέγχου δέχεται ως είσοδο τη μετρούμενη τάση στον κόμβο, και ανάλογα με το αν η τάση έχει ξεπεράσει τα όρια ή όχι, αποφασίζεται εάν θα γίνει περικοπή στην παραγόμενη ισχύ του Φ/Β. Έχει γίνει και εδώ η χρήση ενός PI ελεγκτή, ο οποίος είναι απενεργοποιημένος (δέχεται είσοδο 0) όσο η τάση είναι εντός ορίων, ενώ μόλις η τάση πάρει τιμή μεγαλύτερη του 1.1αμ ενεργοποιείται, ώστε να υπολογίσει την ποσότητα της ισχύος που θα περικοπεί. Προκειμένου να μην κατασκευαστεί ξεχωριστό block για το φορτίο, η τιμή του φορτίου (200W/φάση = 0.6kW τριφασικά) αφαιρείται από την παραγόμενη ισχύ των Φ/Β. Το τελικό αποτέλεσμα στέλνεται στο block της πηγής PQ, ώστε να διοχετευτεί η επιθυμητή ισχύς στο δίκτυο.

Στα επόμενα σχήματα φαίνεται και η υλοποίηση του ελεγκτή αέργου ισχύος:



**Εικόνα 7.43** Υπολογισμός κλάδων της συνάρτησης αέργου ισχύος



**Εικόνα 7.44** Επιλογή τιμής αέργου ισχύος που θα απορροφηθεί

Όπως παρατηρούμε, και ο ελεγκτής αέργου ισχύος έχει σχεδιαστεί με παρόμοια λογική με το simulink. Αρχικά, γίνεται υπολογισμός της μέγιστης ισχύος που μπορεί να χειριστεί ο αντιστροφέας, με βάση το  $PF_{\text{limit}}=0.8$ , και την  $P_{\text{mpp}}$ . Επίσης επιλέγεται το πλάτος του εύρους ζώνης D (στο σχήμα  $d1=0.03$ ). Στη συνέχεια, γίνεται υπολογισμός των τιμών κάθε κλάδου της συνάρτησης (7.1), λαμβάνοντας υπόψη τη μετρούμενη τάση του ζυγού.

Έπειτα, γίνεται επιλογή του κλάδου με την επιθυμητή τιμή της  $Q$ , μέσα από ένα σύστημα ελέγχου το οποίο επιλέγει το σωστό κλάδο με βάση το διάστημα στο οποίο ανήκει η μετρούμενη τάση. Σημειώνεται ότι στις βιβλιοθήκες του RSCAD δε διατίθεται κάποιο block το οποίο να μπορεί να δεχτεί πολλές εισόδους ταυτόχρονα, όπως είναι το Switch στο Simulink, που περιγράφηκε στην παράγραφο 7.2.3. Για το λόγο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί μια σειρά από ελέγχους για την εύρεση της κατάλληλης τιμής του  $Q$ . Και σε αυτή την

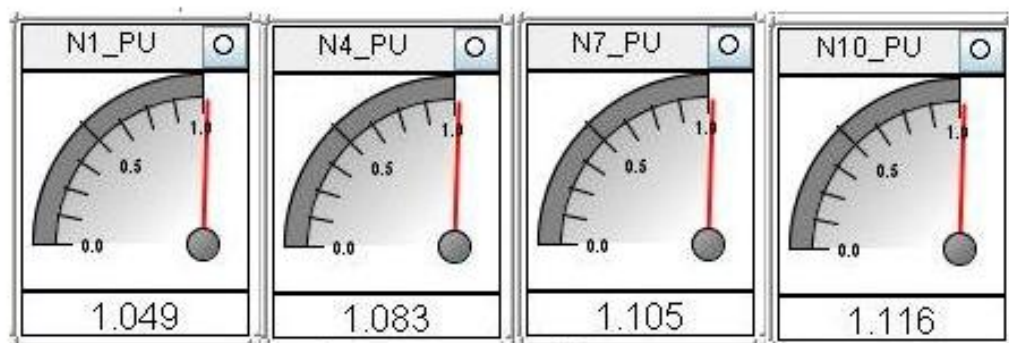
περίπτωση η τιμή του φορτίου αφαιρείται από την Q του Φ/B, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί ένα Rate Limiter όπως στην ενεργό ισχύ, για την αποφυγή ανεπιθύμητων μεταβατικών φαινομένων.

Στη συνέχεια ακολουθούν προσομοιώσεις στο παραπάνω δίκτυο στο RTDS για διάφορα σενάρια Φ/B παραγωγής και χρήσης των ελεγκτών. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε επόμενο βήμα πρόκειται να γίνει χρήση του εν λόγω δικτύου για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων Power Hardware In Loop (PHIL). Σε αυτό το είδος πειράματος, ο αντιστροφείας φωτοβολταϊκών του εργαστηριακού μικροδικτύου (Sunny boy inverter) συνδέεται σε ρόλο δοκιμίου στο ηλεκτρικό δίκτυο που σχεδιάσαμε, και πραγματοποιούνται προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο. Ένα τέτοιο πείραμα έχει μεγάλη πρακτική αξία, καθώς μπορούμε να παρατηρήσουμε πώς ανταποκρίνεται ένας πραγματικός inverter στους προτεινόμενους ελεγκτές για τη ρύθμιση της τάσης.

### 7.8.2 Εκτέλεση προσομοιώσεων για διάφορα σενάρια παραγωγής και χρήσης ελεγκτών

Στην παράγραφο αυτή, πραγματοποιήθηκε η εκτέλεση προσομοιώσεων και καταγραφή των χρήσιμων μεγεθών στο RTDS για διάφορα σενάρια παραγωγής και χρήσης των ελεγκτών. Παράλληλα οι ίδιες προσομοιώσεις εκτελέστηκαν στο Simulink, ώστε να προκύψει μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο τρόπων.

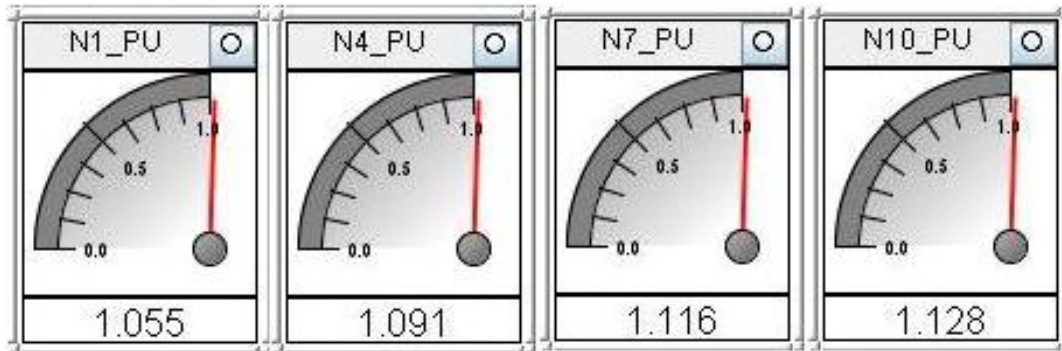
Όπως έγινε και σε προηγούμενες παραγράφους, θεωρήσαμε για όλες τις περιπτώσεις σταθερό ελάχιστο φορτίο 200W/φάση με  $\cos\phi=0.7$  επαγωγικό. Αρχικά, θεωρούμε ότι η φωτοβολταϊκή παραγωγή σε κάθε κόμβο είναι 27kW, χωρίς να γίνεται η χρήση ελέγχου για τη ρύθμιση της τάσης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται στους ζυγούς που έχουν παραγωγή και φορτίο:



**Εικόνα 7.45** Στιγμιότυπο στο RUNTIME του RTDS με τις τάσεις σε αμ των κόμβων για παραγωγή 27kW

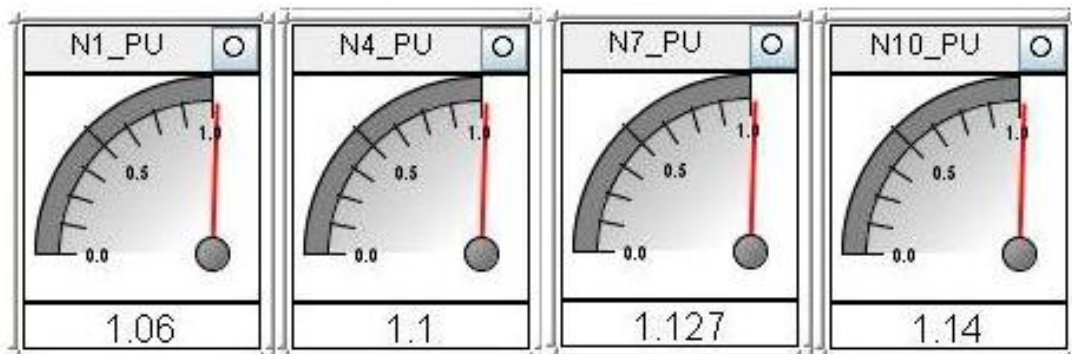
Στη συνέχεια καταγράφουμε τις τάσεις που αναπτύσσονται στους ζυγούς για παραγωγή 30kW. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το στιγμιότυπο από το RUNTIME:





*Εικόνα 7.46 Τάσεις σε αμ στους κόμβους του δικτύου για παραγωγή 30kW*

Τέλος, μελετάται η περίπτωση όπου οι Φ/Β γεννήτριες παράγουν 33kW:

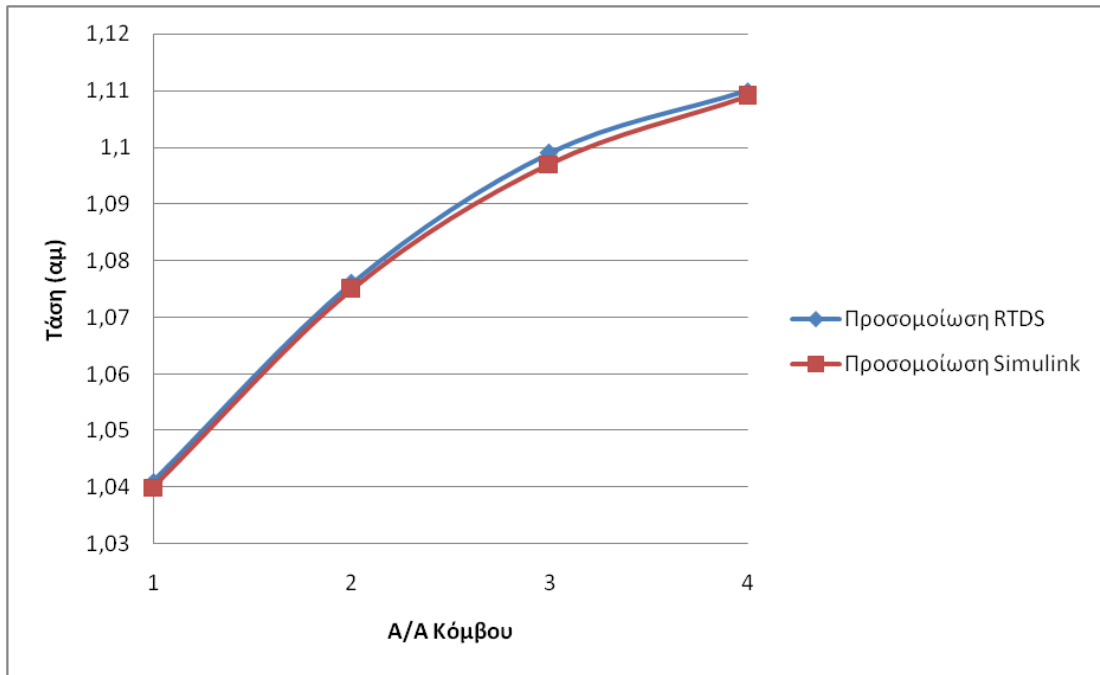


*Εικόνα 7.47 Τάσεις σε αμ στους κόμβους για παραγωγή 33kW*

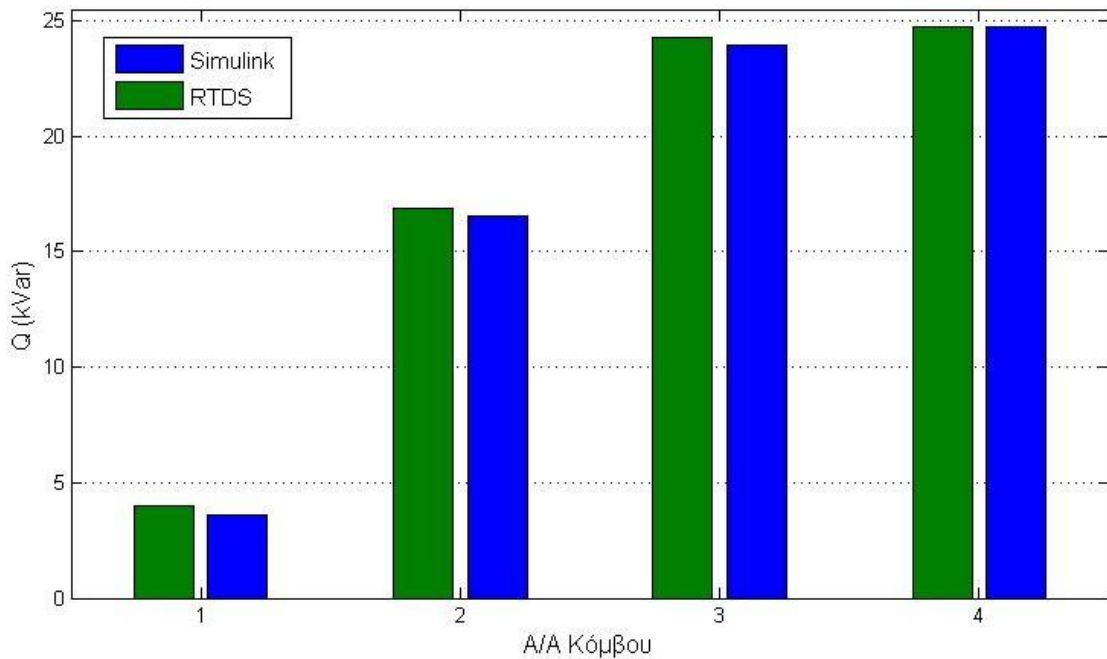
Παρατηρούμε ότι σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, οι τάσεις στους δύο τελευταίους κόμβους είναι πάνω από το επιθυμητό όριο του 1.1αμ. Επίσης, σημειώνεται ότι οι προσομοιώσεις για τα ίδια σενάρια στο Simulink έδωσαν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα για το προφίλ της τάσης στους ζυγούς, κάτι που επιβεβαιώνει τη σωστή μοντελοποίηση του δικτύου στο RTDS.

#### Ρύθμιση της τάσης με χρήση των ελεγκτών αέργου ισχύος

Στην περίπτωση αυτή θα ενεργοποιήσουμε τους ελεγκτές αέργου ισχύος που κατασκευάστηκαν στο RTDS, ώστε να καταγράψουμε την επίδρασή τους στις τάσεις των κόμβων. Τα αποτελέσματα θα επαληθευτούν και με την προσομοίωση του ίδιου σεναρίου στο simulink. Θα μελετήσουμε την περίπτωση στην οποία η παραγωγή των Φ/Β είναι στα 33kW. Για το πλάτος του εύρους ζώνης D θα θεωρήσουμε κι εδώ ότι ο πρώτος κόμβος παίρνει τιμή  $D1=0.03pu$  και ο τελευταίος  $D4=0.01pu$ , ενώ οι άλλοι δύο κόμβοι παίρνουν τις ενδιάμεσες τιμές. Προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:



**Εικόνα 7.48** Τάσεις στους κόμβους για προσομοίωση στο RTDS και το Simulink



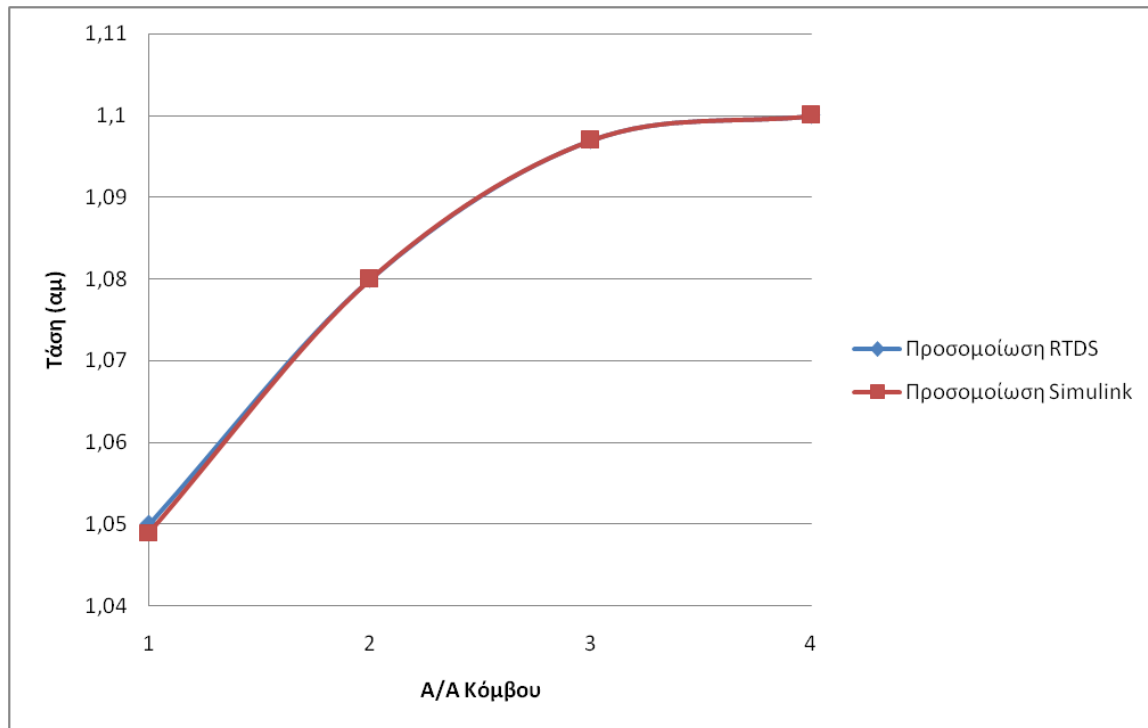
**Εικόνα 7.49** Ποσότητα αέργου ισχύος που απορροφά ο κάθε inverter για προσομοίωση στο RTDS και το Simulink

Παρατηρούμε ότι σε αυτή την περίπτωση έχει μειωθεί η τάση στους ζυγούς χάρη στην εφαρμογή του ελέγχου. Επίσης, παρουσιάζονται πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του RTDS και του Simulink, καθώς στο RTDS και οι τάσεις αλλά και η ισχύς που απορροφήθηκε έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές από αυτές που καταγράφηκαν στο Simulink. Συγκεκριμένα, η απόκλιση των τάσεων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων είναι

της τάξης του 0.09% (αμελητέα), ενώ το μέγιστο σφάλμα μεταξύ των ποσοτήτων της αέργου ισχύος που παρατηρείται είναι 11%.

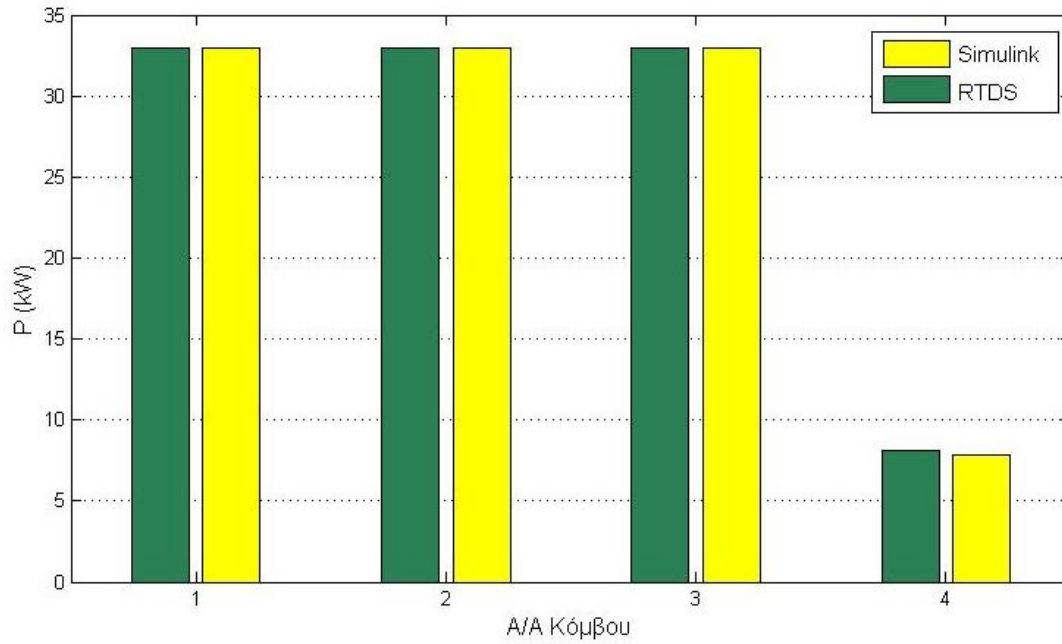
### Ρύθμιση της τάσης με χρήση των ελεγκτών ενεργού ισχύος

Στο σενάριο αυτό θα παρατηρήσουμε το προφίλ της τάσεως και της ισχύος σε κάθε κόμβο, στην περίπτωση που ενεργοποιούμε τους ελεγκτές που εφαρμόζουν την περικοπή ενεργού ισχύος. Και σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε 33kW φωτοβολταϊκή παραγωγή. Προκύπτει:



**Εικόνα 7.50** Τάσεις στους κόμβους για προσομοίωση στο RTDS και το Simulink

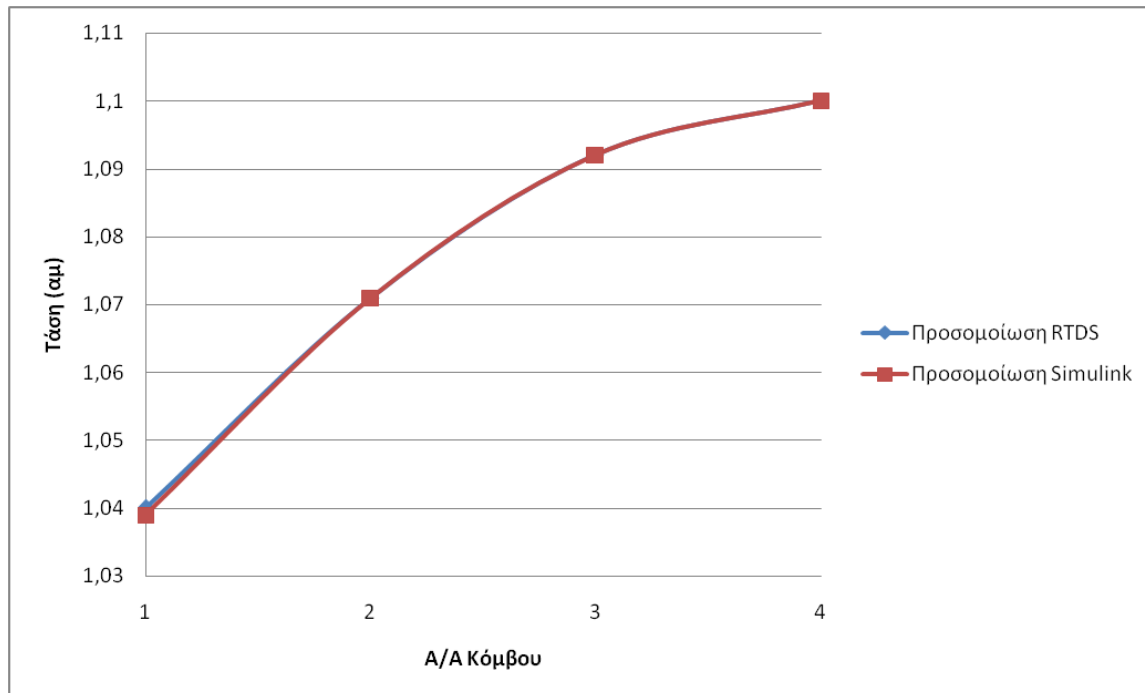
Παρατηρούμε πως και σε αυτή την περίπτωση η καταγραφή των τάσεων στο RTDS ακολουθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα αντίστοιχα αποτελέσματα στο Simulink. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται και η περικοπή ενεργού ισχύος που έγινε στον τελευταίο ζυγό, ώστε να μειωθεί η τάση στα επιθυμητά όρια. Και εδώ, παρουσιάζονται πολύ μικρές αποκλίσεις όσον αφορά στην παραγόμενη ισχύ του τελευταίου αντιστροφέα, της τάξης του 3.41%.



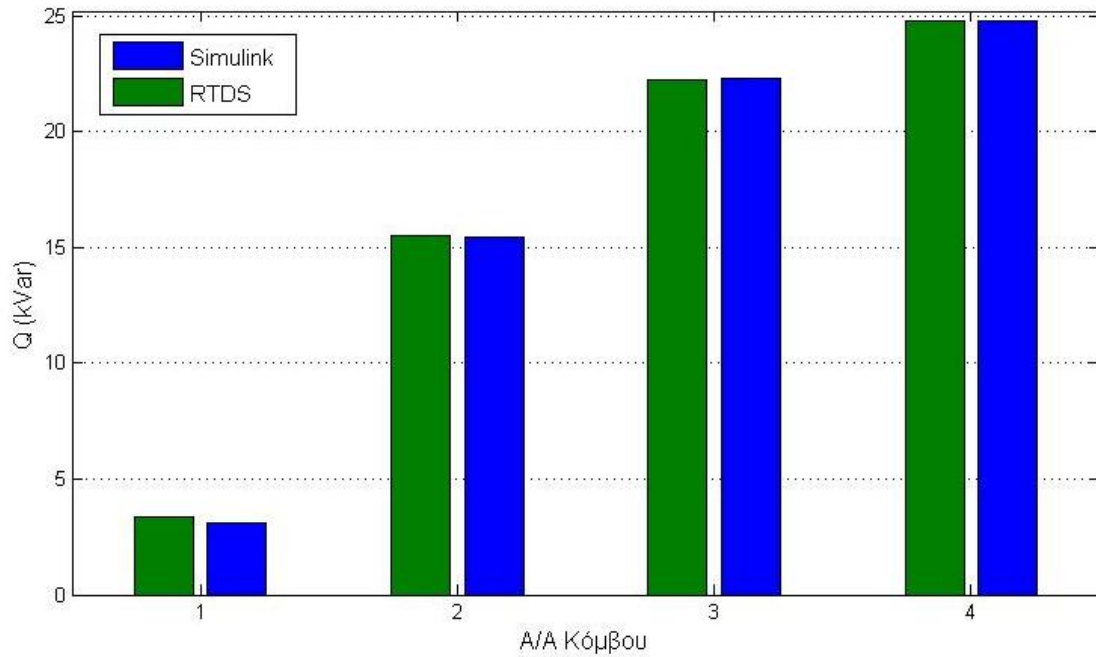
*Εικόνα 7.51 Ποσότητα ενεργού ισχύος που παράγει ο κάθε αντιστροφέας για προσομοίωση στο RTDS και το Simulink*

Ρύθμιση της τάσης με συνεργασία των δύο μεθόδων

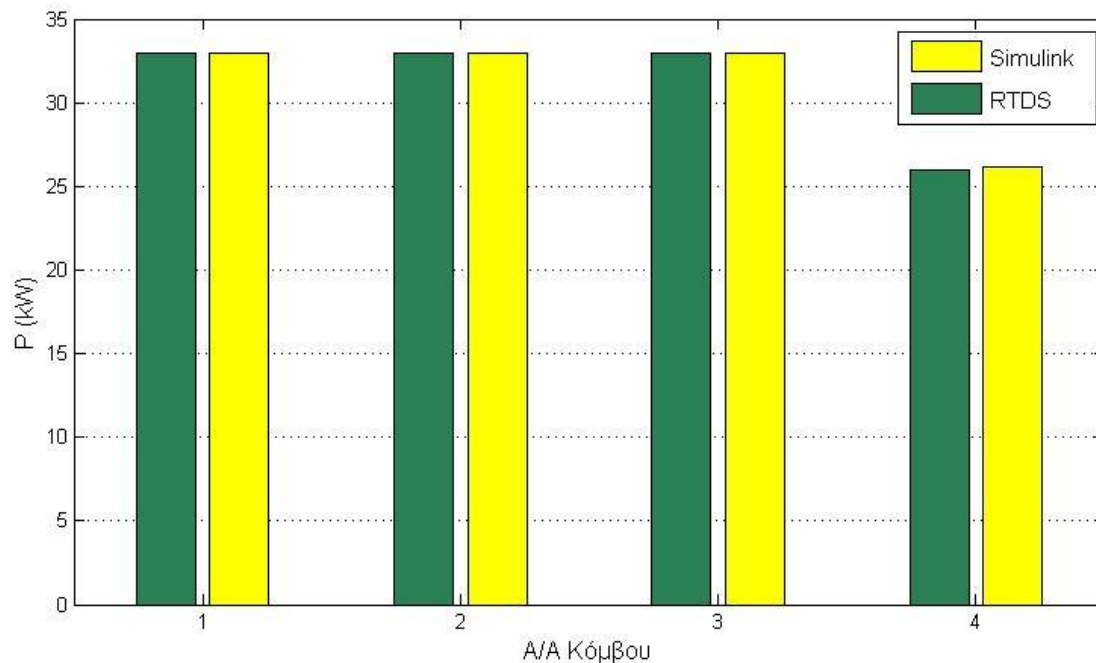
Σε αυτό το σενάριο θα ενεργοποιήσουμε και τα δύο είδη ελεγκτών για τη ρύθμιση τάσης, ώστε να παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα:



*Εικόνα 7.52 Τάσεις στους κόμβους για προσομοίωση στο RTDS και το Simulink*



**Εικόνα 7.53** Ποσότητα αέργου ισχύος που απορροφά ο κάθε inverter για προσομοίωση στο RTDS και το Simulink

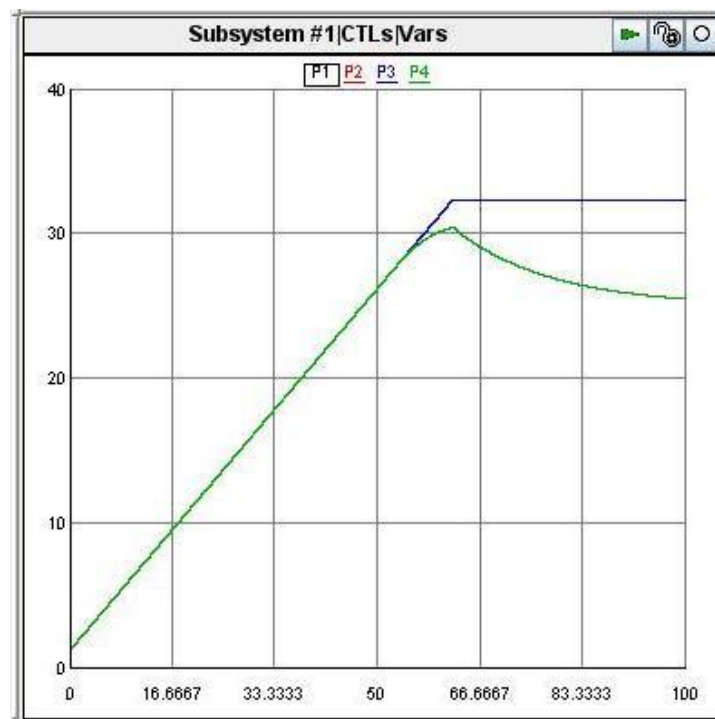


**Εικόνα 7.54** Ποσότητα ενεργού ισχύος που παράγει ο κάθε αντιστροφείας για προσομοίωση στο RTDS και το Simulink

Και στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ των δύο προσομοιώσεων. Η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται στην αεργο ισχύ αγγίζει το 9%,

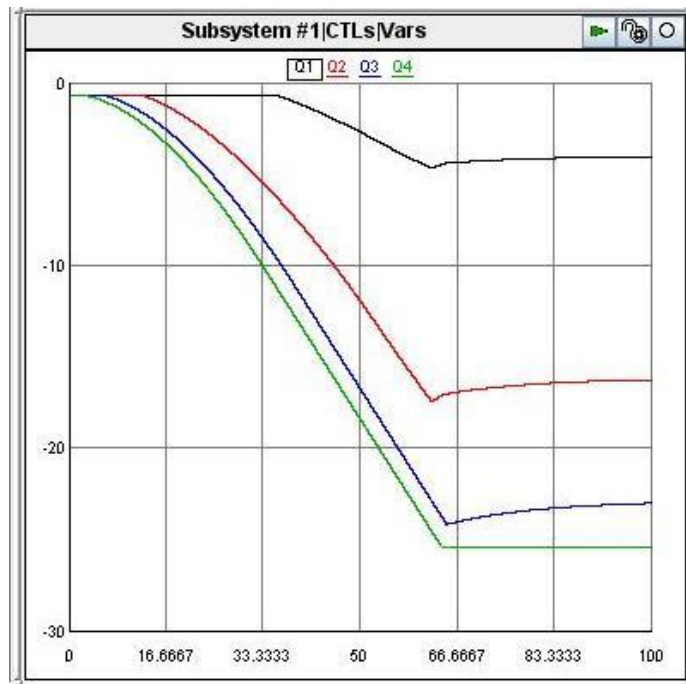
ενώ στην ενεργό παρατηρείται ένα σφάλμα 2.9%. Οι τάσεις στους κόμβους παίρνουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια, ενώ χάρη στη συνεργασία των δύο μεθόδων γίνεται απορρόφηση μικρότερης ποσότητας αέργου ισχύος, και εξοικονομούνται περίπου 17kW ενεργού ισχύος στον τελευταίο κόμβο (αύξηση περίπου 200%), σε σχέση με την περίπτωση που εφαρμόζεται μόνο ο έλεγχος με power curtailment.

Τέλος, στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η καταγραφή των τάσεων στους ζυγούς, της αέργου και ενεργού ισχύος των αντιστροφέν για ένα διάστημα 100 δευτερολέπτων, όπως εμφανίστηκαν στο περιβάλλον RUNTIME του RTDS κατά την προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο:



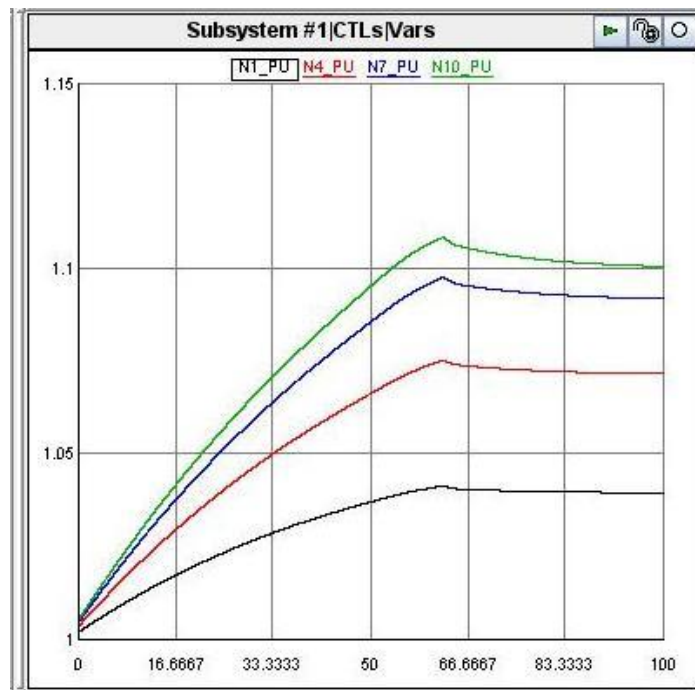
**Εικόνα 7.55** Ενεργός ισχύς των αντιστροφέν στο χρονικό διάστημα 0-100sec

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα, περίπου τη χρονική στιγμή 60sec ενεργοποιείται η περικοπή ενεργού ισχύος στον τελευταίο κόμβο, και η ισχύς μειώνεται σταδιακά μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση. Η σταδιακή μείωση της ισχύος οφείλεται στο στοιχείο Rate Limiter που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο.



*Εικόνα 7.56 Μεταβολή αέργου ισχύος των αντιστροφών στο χρονικό διάστημα 0-100sec*

Κι εδώ είναι εμφανές ότι ή άεργος ισχύς που απορροφούν οι inverter αυξάνεται σταδιακά, μέχρι να πάρει τη μέγιστη τιμή της ανάλογα με τον κόμβο περίπου τη χρονική στιγμή 60sec.



*Εικόνα 7.57 Προφίλ τάσεων των κόμβων στο χρονικό διάστημα 0-100sec*

Οι τάσεις των ζυγών παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους περίπου τη χρονική στιγμή 60sec, οπότε και η άεργος ισχύς των αντιστροφών μεγιστοποιείται, ενώ ενεργοποιείται και η περικοπή της ενεργού ισχύος, για την αντιμετώπιση της ανεπιθύμητης ανύψωσης τάσης, όπως είδαμε παραπάνω. Σημειώνεται ότι ο PI ελεγκτής δεν ανταποκρίνεται στιγμιαία στην αύξηση της τάσης πάνω από το 1.1αμ, αλλά χρειάζεται ένα διάστημα 10sec περίπου μέχρι να υπολογίσει την τιμή της ισχύος που πρέπει να περικοπεί.



## Κεφάλαιο 8

### Συμπεράσματα - Προοπτικές συνέχισης

Στη σημερινή εποχή, λόγω των κλιματικών αλλαγών και του πεπερασμένου των "συμβατικών" πηγών ενέργειας παρουσιάζεται όλο και εντονότερα η ανάγκη αύξησης της διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας. Αυτό έχει σαν συνέπεια την ολοένα αυξανόμενη σύνδεση διεσπαρμένης παραγωγής και ειδικότερα των φωτοβολταϊκών στα δίκτυα διανομής.

Όσον αφορά τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών μονάδων παραγωγής σε δίκτυα ΧΤ, το μεγαλύτερο πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι η ανεπιθύμητη ανύψωση τάσης λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος στις γραμμές. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος, αλλά ο ευκολότερος και οικονομικότερος είναι η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του αντιστροφέα, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η σύνδεση της Φ/Β γεννήτριας με το δίκτυο.

Σύμφωνα με τον προτεινόμενο τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος, η λειτουργία του inverter βασίζεται στη λογική των καμπυλών στατισμού (droop). Με την τρόπο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί περικοπή στην ενεργό ισχύ που παράγει η Φ/Β γεννήτρια όταν η τάση είναι εκτός επιθυμητών ορίων (+10% της ονομαστικής τάσης). Επίσης, ο αντιστροφέας μπορεί να απορροφήσει άεργο ισχύ λειτουργώντας με επαγωγικό συντελεστή ισχύος, ώστε να μειωθεί η τάση στους ζυγούς.

Ωστόσο παρατηρείται ότι σε πολλές περιπτώσεις ο έλεγχος της αέργου ισχύος δεν είναι αρκετός ώστε να αντιμετωπίσει το πρόβλημα ανύψωσης τάσης. Επίσης για διάφορα σενάρια υψηλής Φ/Β παραγωγής, πρέπει να περικοπεί μεγάλη ποσότητα ενεργού ισχύος στους τελευταίους κόμβους, παράγοντας που προκαλεί οικονομική ζημία στους παραγωγούς. Συνεπώς, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η συνεργασία των δύο μεθόδων, η οποία επιφέρει πολύ καλά αποτελέσματα στο προφίλ της τάσης των κόμβων του δικτύου, και περιορίζει κατά πολύ την ποσότητα ενεργού ισχύος που πρέπει να περικοπεί, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις.

Το κάθε δίκτυο ΧΤ είναι διαφορετικό, και χαρακτηρίζεται από την τοπολογία του, τα στοιχεία του (Μ/Σ, είδος αγωγών), τα φορτία και την παραγωγή του. Συνεπώς, εκτελώντας μια ανάλυση ροής φορτίου καθώς και μια ανάλυση ευαισθησίας τάσης, μπορούμε εύκολα να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά του δικτύου για διάφορα σενάρια παραγωγής και ζήτησης, και να καθορίσουμε σε κάθε περίπτωση ποιος είναι ο αποδοτικότερος τρόπος για την αντιμετώπιση της ανύψωσης τάσης. Καθώς οι προτεινόμενοι ελεγκτές είναι εύκολα παραμετροποιήσιμοι, μπορούν να προσαρμοστούν στις ιδιαιτερότητες του κάθε δικτύου στο οποίο θα ενσωματωθούν.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παρατηρήσαμε ότι σε ορισμένα σενάρια χρήσης των ελεγκτών για την αντιμετώπιση της ανύψωσης τάσης, ο αντιστροφέας

καλείται να λειτουργήσει με αρκετά χαμηλό συντελεστή ισχύος, καθώς πρέπει να διαχειρίζεται μεγάλες ποσότητες αέργου ισχύος όταν η παραγωγή της ενεργού ισχύος είναι χαμηλή, είτε λόγω χαμηλής ηλιοφάνειας, είτε λόγω περικοπής που έχει υποστεί. Θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθεί σε μελλοντική εργασία κατά πόσο είναι εφικτή η λειτουργία του αντιστροφέα σε τόσο χαμηλό ΣΙ, λαμβάνοντας υπόψη και τις τεχνολογικές εξελίξεις, καθώς ήδη κατασκευάζονται inverter που προσφέρουν τη δυνατότητα ρύθμισης σε όλο και χαμηλότερο  $\cos\phi$ .

Επίσης, κατά τη χρήση του ελεγκτή αέργου ισχύος, προτάθηκε το πλάτος του εύρους ζώνης  $D$  να υπολογίζεται ως συνάρτηση της αντίστασης βραχυκύκλωσης  $Z$ , που μετράται σε κάθε κόμβο. Ωστόσο, η μέτρηση της αντίστασης  $Z$  από τον inverter επηρεάζεται από τον αριθμό των inverter που λειτουργούν παράλληλα στους κόμβους, καθώς και από τις συνεχείς μεταβολές του φορτίου. Για το λόγο αυτό, θα ήταν ενδιαφέρον να γίνει η μοντελοποίηση μιας μεθόδου για την αξιόπιστη μέτρηση της αντίστασης βραχυκύκλωσης, η οποία να επηρεάζεται το λιγότερο δυνατόν από τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου. Σημειώνεται ότι η μέτρηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί από τους ίδιους τους αντιστροφείς, χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση επιπλέον εξοπλισμού [31].

Τέλος, ένα ζήτημα με μεγάλη πρακτική αξία, είναι η μελλοντική χρήση του δικτύου που μοντελοποιήθηκε στο RTDS για την εκτέλεση προσομοιώσεων Power Hardware in Loop (PHIL). Σε αυτό το είδος πειράματος, ο αντιστροφέας φωτοβολταϊκών του εργαστηριακού μικροδικτύου Sunny boy θα συνδεθεί σε ρόλο δοκιμίου στο εν λόγω δίκτυο, και θα παρατηρηθεί η ανταπόκριση του πραγματικού inverter στους προτεινόμενους ελεγκτές για τη ρύθμιση της τάσης, οι οποίοι έχουν εφαρμοστεί στην προσομοίωση.

## Βιβλιογραφία

- [1] [http://el.wikipedia.org/wiki/Ηπιες\\_μορφές\\_ενέργειας](http://el.wikipedia.org/wiki/Ηπιες_μορφές_ενέργειας)
- [2] [http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό\\_σύστημα](http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό_σύστημα)
- [3] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές", έκδοση ΕΜΠ, 1997
- [4] Antonio Luque, Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [5] Δέρβος Κ.Θ., "Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις", έκδοση ΕΜΠ, 2009
- [6] Anca D. Hansen, Poul Sorensen, Lars H. Hansen and Henrik Bindner, "Models for a Stand - Alone PV System", Riso National Laboratory, Roskilde, December 2000
- [7] Κοτσαμπόπουλος Π., "Μελέτη, κατασκευή, και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής", διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010
- [8] Κλεφτάκης Α. Βασίλειος, "Μελέτη προσομοίωσης «Power Hardware In the Loop» και διερεύνηση ανύψωσης της τάσης εξαιτίας της διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2011
- [9] D. Georgakis, S. Papathanassiou, N. Hatziaargyriou, A. Engler, Ch. Hardt, "Operation of a prototype Microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces", 35th annual IEEE power electronics specialists conference, Aachen, Germany, 2004
- [10] Αναστόπουλος Χ., "Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2004
- [11] Μιχαλας Κ. Μιχαήλ, "Ανάπτυξη συστήματος καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων εργαστηριακού μικροδικτύου", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2008
- [12] Ιστοσελίδα sma: [www.sma.de/en/products/wind-energy-inverters/windy-boy-1200-1700.html](http://www.sma.de/en/products/wind-energy-inverters/windy-boy-1200-1700.html)
- [13] Βασιλείου Κ. Παπαδιά, "Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τόμος I : μόνιμη κατάσταση λειτουργίας", έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 1985
- [14] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, "Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τόμος I", έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 1994
- [15] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2001
- [16] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [17] Γκιλφέςης Χ., "Μελέτη επίδρασης φωτοβολταϊκών σε δίκτυα Χ.Τ.", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2010
- [18] D. Geibel, Dr. G. Arnold, Dr. T. Degner, "Power System Services of PV-systems: Requirements, testing and application in Germany", Fraunhofer Institute Wind Energy and Energy Systems Technology (IWES), DERlab Workshop on Power System Services, 31.03.2011, Riso
- [19] Φαρδή Κωνσταντίνα, "Διερεύνηση σύνδεσης φωτοβολταϊκών πάρκων στο επίπεδο της μέσης τάσης και δυνατότητα ρύθμισης της άεργης ισχύος", Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ 2011

- [20] Σταύρος Παπαθανασίου, "Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Σημειώσεις παραδόσεων", Αθήνα 2008
- [21] Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, "Οδηγίες για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις", Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ)
- [22] Voltage characteristics in public distribution systems - Standard EN 50160, 2004
- [23] R. Shivarudraswamy, D.N. Gaonkar, "Voltage control in the distribution system using reactive power participation factor of distributed generators", International Journal of Distributed Energy Resources, Volume 7 Number 3 (2011)
- [24] Erhan Demirok, Dezso Sera, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez and U. Borup, "Clustered PV inverters in LV networks : an overview of impacts and comparison of voltage control strategies", 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference
- [25] Kuang Li, Jinjun Liu, Zhaoan Wang and Biao Wei, "Strategies and operating point optimization of STATCOM control for voltage unbalance mitigation in three-phase three wire systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Jan.2007
- [26] Rolf Grunbaum, Mikael Halonen, Goran Stromberg, "SVC for 69 kV direct grid connection", Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 2008
- [27] Yun Wei Li, D. Mahinda Vitathgamuwva, Poh Chiang Loh and Frede Blaabjerg, "A dual-functional medium voltage level DVR to limit downstream fault currents"
- [28] Chia-Hung Lin, Wei-Lin Hsieh, Chao-Shun Chen, Cheng-Ting Hsu, "Optimization of Photovoltaic penetration in distribution systems considering annual duration curve of solar irradiation", IEEE Transactions on Power Delivery, May 2012
- [29] J. Bebic, R. Walling, K. O'Brien, and B. Kroposki, "The Sun Also Rises – Planning for Large-Scale Solar Power", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 7(3), May/June 2009.
- [30] Erhan Demirok, Pablo Casado Gonzalez, Kenn H. B. Frederiksen, Dezso Sera, Pedro Rodriguez and Remus Teodorescu, "Local reactive power control methods for overvoltage protection of distributed solar inverters in Low-Voltage grids"
- [31] Erhan Demirok, Dezso Sera, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez and Uffe Borup, "Evaluation of the voltage support strategies for the Low Voltage grid connected PV generators", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE
- [32] Reinaldo Tonkonski, Luiz A.C. Lopes, "Voltage regulation in radial distribution feeders with high penetration of photovoltaic", IEEE Energy2030, Atlanta, GA USA, 17-18 November, 2008
- [33] M. Braun, T. Stetz, T. Reimann, B. Valog, G. Arnold, "Optimal reactive power supply in distribution networks - technological and economic assesment for pv-systems", 24thEUPVSEC, Session 5AO.7.5
- [34] Παπαϊωάννου Τ. Ιουλία, "Επίδραση της ένταξης Φ/Β μονάδων στην ποιότητα ισχύος δικτύων διανομής", Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη 2010
- [35] Μαλαμάκη Κυριακή-Νεφέλη, "Μέθοδος ρύθμισης της τάσης σε γραμμές χαμηλής τάσης με φωτοβολταϊκά συστήματα και οικιακούς καταναλωτές", Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ 2012
- [36] Stathis Tselepis, Vangelis Rikos, "Advanced architectures and control concepts for More Microgrids", Work Package F, December 2009
- [37] Ευαγγελία Β. Παρασκευαδάκη, "Ρύθμιση του συντελεστή ισχύος της διανεμημένης παραγωγής σε δίκτυα Χαμηλής Τάσης", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2007

[38] Thekla N. Boutsika, Stavros A. Papathanassiou, "Short-circuit calculations in networks with distributed generation", *Electric Power Systems Research*, Volume 78, Issue 7, July 2008

## Παράρτημα

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που υλοποιήθηκε, βασίστηκε στη μέθοδο της παρεμβολής. Για την προσέγγιση της πραγματικής καμπύλης λειτουργίας του πλαισίου απαιτούνται τρία σημεία της καμπύλης: το σημείο μέγιστης ισχύος  $I_{mp}$ ,  $V_{mp}$ , το σημείο ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , και το σημείο βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$ . Οι ακριβείς τιμές των σημείων παρέχονται από τον κατασκευαστή του πλαισίου. Από τα τρία αυτά σημεία προσδιορίζονται δύο συντελεστές:

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) \exp\left(\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}}\right)$$

$$C_2 = \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1\right) / \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)$$

Δύο επιπλέον παράμετροι εισάγουν την επιρροή της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στα χαρακτηριστικά εξόδου του εξομοιωτή:

$$D_I = \alpha \Phi (T - T_{ref}) + I_{sc} (\Phi - 1)$$

$$V_R = V + \beta (T - T_{ref}) + R_s D_I$$

όπου:

$V$  : Τάση λειτουργίας του πλαισίου

$\Phi$ : Ηλιακή ακτινοβολία

$T$ : Θερμοκρασία πλαισίου

$T_{ref}$  : Θερμοκρασία αναφοράς (25°C)

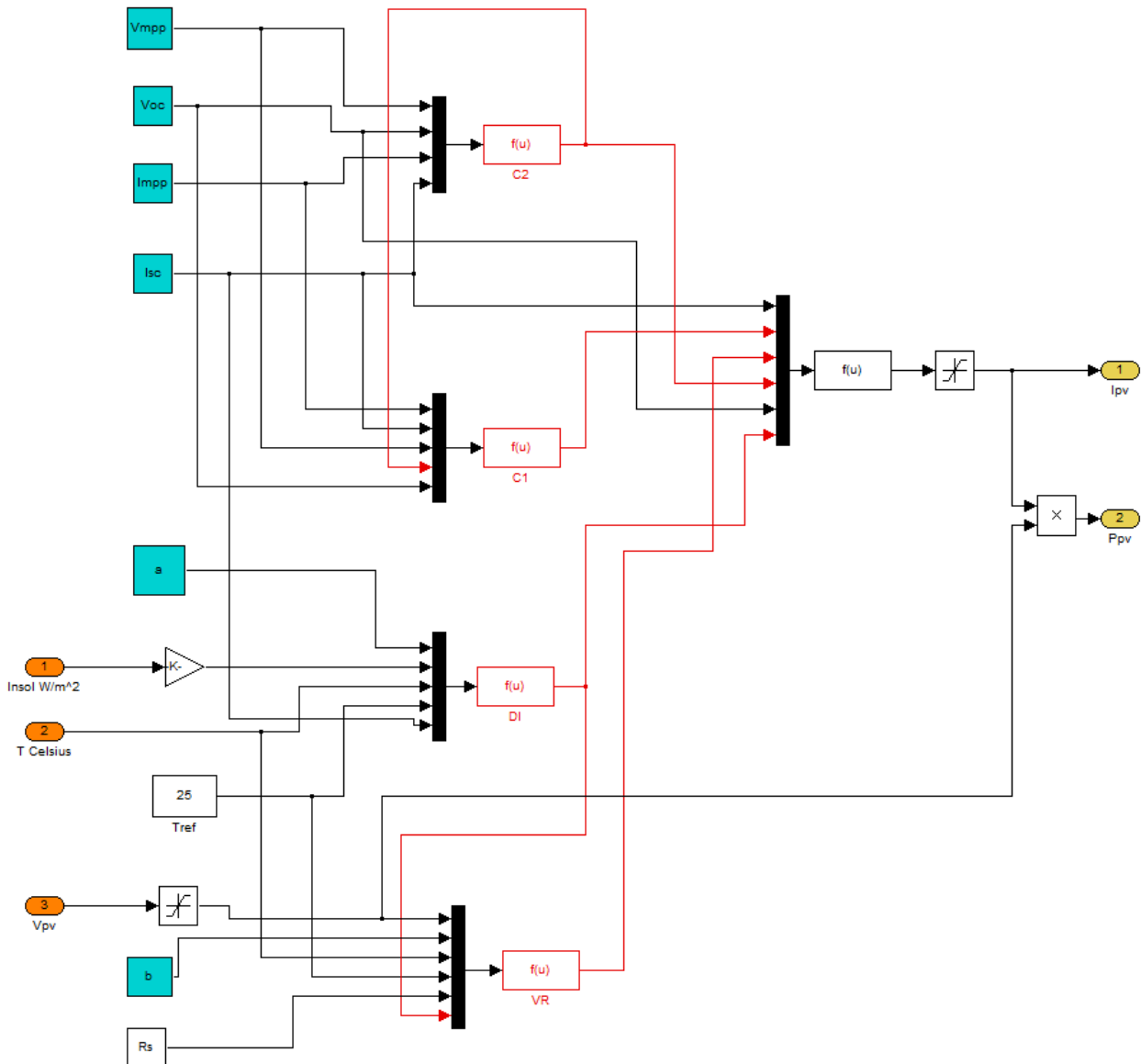
$\alpha, \beta$ : Συντελεστές θερμοκρασίας του  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  αντίστοιχα

$R_s$  : Αντίσταση σειράς ισόδυναμου κυκλώματος  $\Phi/B$  στοιχείου

Το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου με βάση τις παραπάνω εισόδους δίνεται από τον τύπο:

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(\exp\left(\frac{V_R}{C_2 V_{oc}}\right) - 1\right)\right] + D_I$$

Η μοντελοποίηση του  $\Phi/B$  πλαισίου στο Simulink υλοποιώντας τους παραπάνω τύπους είναι η εξής:



Για την υλοποίηση της διάταξης MPPT χρησιμοποιείται ο τύπος:

$V_{mp}^*/V_{oc}^* = k = \text{σταθ.}$  Ο υπολογισμός της τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε κάθε χρονική

στιγμή δίνεται από τη σχέση :

$$V_{oc}^* = C_2 V_{oc} \ln \left( \frac{1 + D_I / I_{sc}}{C_1} + 1 \right) - \beta (T - T_{ref}) - R_s D_I$$

Η διάταξη MPPT που μοντελοποιήθηκε στο Simulink είναι η εξής:

