



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

**Ανάλυση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και επίδραση φωτοβολταϊκής  
Διεσπαρμένης Παραγωγής στην ευστάθεια τάσης δικτύου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Γεώργιος Λαμψίδης Τόμπρος**

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς  
Ομότ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2022





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

**Ανάλυση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και επίδραση  
φωτοβολταϊκής Διεσπαρμένης Παραγωγής στην ευστάθεια  
τάσης δικτύου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Γεώργιος Λαμψίδης Τόμπρος**

**Επιβλέπων Καθηγητής :** Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Ομότ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13<sup>η</sup> Απριλίου 2022.

.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Ομότ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Απρίλιος 2022

.....  
**Γεώργιος Λαμψίδης Τόμπρος**

Copyright © Γεώργιος Λαμψίδης Τόμπρος, 2022  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

# Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο Καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, τόσο για την ανάθεση ενός επίκαιρου θέματος κοντά στα ενδιαφέροντά μου όσο και για τη συνεχή καθοδήγηση και βοήθεια που προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Παράλληλα, μεγάλες ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Πριονιστή για την εξαιρετική συνεργασία, τη συνεχή βοήθεια και τον χρόνο που αφιέρωσε σε όλο το διάστημα της συγγραφής της διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη που μου παρέχει σε όλους τους τομείς.



# Περίληψη

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο σκέλη. Το πρώτο σκέλος αφιερώνεται στην επεξήγηση απαραίτητων εννοιών και στη θεωρητική κατανόηση της λειτουργίας μιας φωτοβολταϊκής διάταξης. Στο σημείο αυτό δίνεται και έμφαση στο πρόβλημα της μέγιστης απολαβής ισχύος. Το δεύτερο σκέλος επικεντρώνεται στην επίδραση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ευστάθεια τάσης συστήματος μέσω προσομοιώσεων ΦΒ διατάξεων και αλγορίθμου μέγιστης απολαβής ισχύος σε περιβάλλον MATLAB και ακτινικού συστήματος διανομής υπό διαταραχή σε περιβάλλον WPSTAB. Τέλος εξετάζεται η επίδραση της υποστήριξης από τις διεσπαρμένες ΦΒ πηγές που βρίσκονται στο σύστημα διανομής στο περιθώριο ευστάθειας, όσον αφορά τον κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης.

Για την παραπάνω εξέταση πραγματοποιείται προσομοίωση ακτινικού συστήματος διανομής συνδεδεμένου μέσω μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ (150/20 kV) σε δίκτυο μεταφοράς. Το σύστημα υπόκειται σε διαταραχή σταδιακής αύξησης αγωγιμότητας στην ΥΤ και μελετάται η επίδρασή της ΦΒ παραγωγής στο περιθώριο ευστάθειας τάσης.

Η διεσπαρμένη ΦΒ παραγωγή ελέγχεται από ηλεκτρονικά ισχύος που μέσω διαφορετικών ρυθμίσεων επιτυγχάνουν διαφορετική συμπεριφορά. Μέσω του WPSTAB παρουσιάζονται οι διαφορές στο περιθώριο ευστάθειας για τις διαφορετικές αυτές ρυθμίσεις και στη συνέχεια συγκρίνονται μεταξύ τους και με το σύστημα στη περίπτωση δίχως ΦΒ παραγωγή. Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά του συστήματος.

## Λέξεις Κλειδιά:

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), Δίοδος, Φωτοδίοδος, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Φωτοβολταϊκό στοιχείο/πλαίσιο/ομάδα πλαισίων/πάρκο, Συστήματα Διανομής, Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς (ΜΜΙ), Άεργη Υποστήριξη, Ευστάθεια/Αστάθεια Τάσης, Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, Βελτιστοποίηση ΣΗΕ





# Abstract

This thesis is divided into two parts. The first part is devoted to the explanation of necessary concepts and the theoretical understanding of the operation of a photovoltaic device. Also, emphasis is placed on the problem of maximum power gain. The second part focuses on the effect of photovoltaic systems on system voltage stability through simulations of PV devices, a maximum power gain algorithm programmed in MATLAB and a radial distribution system under disturbance in WPSTAB. Finally, the effect of support from dispersed PV sources located in the distribution system on the margin of stability is examined, in terms of the risk of long-term voltage instability.

For the above examination, a simulation of a radial distribution system connected by a transformer HV/MV (150/20 kV) to a transmission network is performed. The system is subject to a disturbance of a gradual increase in conductivity in HRT and the effect of PV production on the stability margin is being studied.

The dispersed PV production is controlled by power electronics that through different settings achieve different behavior. Through WPSTAB, the differences in the margin of stability for these different settings are presented and then compared with each other and with the system in the case of PV-free production. Finally, conclusions are drawn about the behaviour of the system.

## **Key Words:**

Electricity System, Diode, Photodiode, Dispersed Production, Photovoltaic Systems, Photovoltaic cell/panel/array/park, Distribution Systems, Maximum Transferred Power, Reactive Power Support, Voltage Stability/Instability, Transformers with On Load Tap-changers, Electricity System Optimization



# Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή .....	21
1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) .....	21
1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	22
1.1.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	22
1.1.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	23
1.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή .....	23
1.2.1 Φωτοβολταϊκή παραγωγή.....	24
1.2.2 Σύνδεση ΦΒ παραγωγής.....	25
1.3 Ηλεκτρονικά Ισχύος.....	26
1.3.1 Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC).....	27
1.3.2 Αντιστροφείς (DC-AC) .....	28
1.3.3 Ηλεκτρονικά ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα .....	29
1.4 Ανάλυση Ροών Φορτίου ΣΗΕ.....	30
1.4.1 Ανά μονάδα σύστημα (Per Unit System) .....	31
1.4.2 Ζυγοί.....	32
1.4.3 Γεννήτριες.....	32
1.4.4 Γραμμές Μεταφοράς .....	33
1.4.5 Εγκάρσιοι πυκνωτές/πηνία .....	34
1.4.6 Μετασχηματιστές .....	34
1.4.7 Φορτία .....	35
1.4.8 Εξισώσεις ροών φορτίου .....	35
1.5 Ευστάθεια ΣΗΕ .....	37
1.5.1 Είδη ευστάθειας.....	37
1.5.2 Ευστάθεια τάσης.....	38
1.5.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς.....	39
1.6 Δυναμικό Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης .....	44
1.6.1 Δυναμικό Μοντέλο ΣΗΕ .....	44
1.6.2 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης.....	45

1.7 Οιονεί Στατική Προσέγγιση .....	47
1.8 Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος .....	48
1.8.1 Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ (Load Tap Changers).....	48
1.8.2 Έλεγχος αέργου ισχύος μέσω μετατροπέων.....	51
1.9 Πρόγραμμα Προσομοίωσης WPSTAB.....	56
1.9.1 Προσδιορισμός σημείων ισοροπίας.....	56
1.9.2 Προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.....	57
1.10 Σκοπός και Δομή της Εργασίας .....	58
2. Δίοδοι, φωτοβολταϊκά στοιχεία και ηλιακή ακτινοβολία.....	61
2.1 Βασική Ανάλυση στα υλικά.....	61
2.1.1 Ενεργειακή ανάλυση .....	61
2.1.2 Είδη Υλικών .....	63
2.1.3 Στατιστική Ανάλυση αριθμού φορέων σε μια ζώνη.....	64
2.1.4 Μεταφορά ηλεκτρικών φορέων.....	65
2.1.5 Μηχανισμοί σκέδασης.....	66
2.1.6 Αγωγιμότητα ημιαγωγού .....	68
2.2 Δίοδοι .....	69
2.2.1 Δίοδος Schottky .....	69
2.2.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ιδανική Schottky .....	71
2.2.3 Πόλωση Διόδου Schottky.....	71
2.2.4 Χαρακτηριστική καμπύλη Ρεύματος-Τάσης (I-V).....	72
2.2.5 Μη ιδανική Schottky .....	73
2.2.6 Δίοδος Schottky ως φωτοβολταϊκό στοιχείο .....	74
2.2.7 Δίοδος p-n.....	75
2.2.8 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ιδανική δίοδο p-n .....	76
2.2.9 Πόλωση διόδου p-n .....	77
2.2.10 Χαρακτηριστική καμπύλη Ρεύματος-Τάσης (I-V).....	78
2.2.11 Δίοδος p-n ως φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	79
2.3 Ηλιακή ενέργεια .....	79
2.3.1 Κατηγοριοποίηση Ηλιακής Ενέργειας .....	79
2.3.2 Θέση του ηλίου.....	80
2.3.3 Θέση συλλέκτη.....	85

2.3.4 Ημερήσια διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας .....	87
2.3.5 Επίδραση νεφών .....	88
2.3.6 Υπολογισμός ηλιακής ενέργειας με βάση γωνίες συλλεκτών και ηλίου.....	89
3 Ηλεκτρική ανάλυση φωτοβολταϊκών .....	91
3.1 Βασικοί ορισμοί .....	91
3.2 Ηλεκτρικό ισοδύναμο ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	93
3.2.1 Σχέσεις ρεύματος-τάσης.....	94
3.2.2 Ανάστροφη λειτουργία διόδου .....	95
3.2.3 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	95
3.2.4 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	96
3.2.5 Μέγιστη απολαβή ισχύος .....	97
3.3 Ηλεκτρικό ισοδύναμο μονής διόδου .....	99
3.3.1 Σχέσεις Ρεύματος-Τάσης.....	100
3.3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης I-V.....	101
3.3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης P-V .....	103
3.3.4 Μέγιστη απολαβή ισχύος .....	104
3.4 Ηλεκτρικό ισοδύναμο διπλής διόδου .....	106
3.4.1 Σχέσεις ρεύματος-τάσης.....	107
3.5 Επίδραση εξωτερικών παραγόντων .....	108
3.5.1 Επίδραση θερμοκρασίας.....	108
3.5.2 Επίδραση πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας .....	110
3.5.3 Ταυτόχρονη επίδραση μεταβολής θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας.....	111
3.6 Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	113
3.6.1 Σειριακή σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	113
3.6.2 Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	114
3.6.3 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο .....	114
3.6.4 Ομάδα ΦΒ πλαισίων (photovoltaic array).....	115
3.7 Παρακολούθηση Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT)	
.....	117
3.7.1 Έμμεσος έλεγχος φωτοβολταϊκής διάταξης .....	117
3.7.2 Άμεσος έλεγχος φωτοβολταϊκής διάταξης-αλγόριθμοι MPPT .....	119
4. Προσομοίωση πραγματικής ΦΒ διάταξης και αλγορίθμου MPPT .....	125
4.1 Προσομοίωση Φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	125

4.1.1 Γενικά .....	125
4.1.2 Φωτόρευμα .....	126
4.1.3 Δίοδος .....	127
4.1.4 Αντίσταση $R_s$ .....	127
4.1.5 Αντίσταση $R_h$ .....	127
4.1.6 Ρεύμα εξόδου $I_{pv}$ .....	128
4.2 Παραγωγή χαρακτηριστικών καμπυλών.....	129
4.3 Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (P&O).....	130
4.2.1 Παρακολούθηση εφαρμογής αλγορίθμου .....	131
4.4 Προσομοίωση παραγόμενης ισχύος ΦΒ διάταξης.....	134
4.5 Σύγκριση της ΦΒ διάταξης με και χωρίς MPPT.....	141
5. Επίδραση διεσπαρμένης φωτοβολταϊκής παραγωγής στην ευστάθεια τάσεως.....	145
5.1 Προσομοίωση ΣΗΕ στο WPSTAB .....	145
5.1.1 Περιγραφή Συστήματος.....	145
5.1.2 Περιγραφή διαταραχής και σενάρια ΦΒ παραγωγής .....	149
5.1.3 Παράσταση μεταβλητής χρονοσειράς ΦΒ παραγωγής .....	150
5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων χρονικής προσομοίωσης.....	152
5.2.1 Προσομοίωση 1 - ΣΗΕ Χωρίς ΦΒ παραγωγή.....	153
5.2.2 Προσομοίωση 2 - ΦΒ παραγωγή με ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος.....	158
5.2.3 Προσομοίωση 3 - ΦΒ παραγωγή με ρύθμιση σταθερής τάσης.....	170
5.3 Ένταξη διάταξης πυκνωτών στο Σύστημα Δοκιμών.....	183
5.3.1 Τροποποίηση Συστήματος Δοκιμών .....	183
5.3.2 Προσομοίωση 1- ΣΗΕ χωρίς ΦΒ παραγωγή με συστοιχία πυκνωτών.....	184
5.3.3 Προσομοίωση 2.3 – Μεταβλητή Χρονοσειρά ΦΒ Ισχύος .....	186
5.3.4 Προσομοίωση 3.3 – Μεταβλητή Χρονοσειρά ΦΒ Ισχύος .....	189
5.4 Μείωση τάσης αναφοράς ΣΑΤΥΦ για αύξηση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος.....	192
5.5 Συνολική παρουσίαση και σύγκριση προσομοιώσεων .....	197
6 Συμπεράσματα και Προοπτικές .....	201
6.1 Σύνοψη και βασικά συμπεράσματα .....	201
6.2 Προοπτικές περαιτέρω έρευνας .....	203

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3. 1 Στοιχεία PV A-300, Sunpower.....	93
Πίνακας 4. 1 Στοιχεία από κατασκευαστή PV cell A-300 (Sunpower).....	125
Πίνακας 4. 2 Ενδιάμεσες τιμές αλγορίθμου .....	134
Πίνακας 4. 3 Ονομαστικά στοιχεία ΦΒ πάρκου .....	134
Πίνακας 5. 1 Στοιχεία μετασχηματιστή .....	146
Πίνακας 5. 2 Στοιχεία ΣΑΤΥΦ (ανά μονάδα) .....	147
Πίνακας 5. 3 Σύνθετες αντιστάσεις γραμμών διανομής 20kV σε Ω .....	147
Πίνακας 5. 4 Στοιχεία Ζυγών (ζήτηση ισχύος).....	148
Πίνακας 5. 5 Ονομαστική ισχύς διεσπαρμένης παραγωγής .....	149
Πίνακας 5. 6 Ζυγοί διεσπαρμένης παραγωγής ως φορτίου .....	153
Πίνακας 5. 7 Κρίσιμες τιμές MMI <b>προσομοίωσης 1</b> (χωρίς ΦΒ παραγωγή).....	157
Πίνακας 5. 8 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 2.1</b> (ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή) .....	161
Πίνακας 5. 9 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 2.2</b> (ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή).....	165
Πίνακας 5. 10 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 2.3</b> (ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) .....	169
Πίνακας 5. 11 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 3.1</b> (ρύθμιση Σταθερής Τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή) .....	174
Πίνακας 5. 12 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 3.2</b> (ρύθμιση Σταθερής Τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή) .....	178
Πίνακας 5. 13 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 3.3</b> (ρύθμιση Σταθερής Τάσης για χρονοσειρά ισχύος Κεφαλαίου 4).....	182
Πίνακας 5. 14 Στοιχεία Συστοιχίας Πυκνωτών .....	183
Πίνακας 5. 15 Κρίσιμα στοιχεία MMI χωρίς ΦΒ παραγωγή και με συστοιχία πυκνωτών .....	186
Πίνακας 5. 16 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 2.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	188
Πίνακας 5. 17 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	192
Πίνακας 5. 18 Κρίσιμα στοιχεία MMI <b>προσομοίωσης 3.4 (προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ)</b> .....	196
Πίνακας 5. 19 Κρίσιμα στοιχεία των <b>προσομοιώσεων 1, 2 και 3</b> .....	197
Πίνακας 5. 20 Κρίσιμα στοιχεία <b>προσομοιώσεων 1, 2.3 και 3.3 με ένταξη διάταξης πυκνωτών</b> .....	198

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχ. 1. 1 Απλοποιημένο διάγραμμα διασύνδεσης συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής.....	21
Σχ. 1. 2 Σύνολο ΦΒ διατάξεων .....	25
Σχ. 1. 3 Μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης .....	27
Σχ. 1. 4 Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας.....	28
Σχ. 1. 5 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση μεγάλης ισχύος που βασίζει τη λειτουργία της σε κεντρικό αντιστροφέα όπου 1) υποπεδίο, 2) MPPT και DC-DC μετατροπείς τάσης, 3) κεντρικός αντιστροφέας, 4) συστήματα ελέγχου και ασφάλειας, 5) Μ/Σ ανύψωσης τάσης και διασύνδεση στη ΜΤ, 6) τοπική κατανάλωση και διασύνδεση στο δίκτυο.....	30
Σχ. 1. 6 Συμβολική αναπαράσταση Γεννήτριας συνδεδεμένη σε ζυγό k .....	32
Σχ. 1. 7 Ισοδύναμο μοντέλο Π γραμμής μεταφοράς.....	33
Σχ. 1. 8 Ισοδύναμο μοντέλο Τ γραμμής μεταφοράς.....	33
Σχ. 1. 9 Εγκάρσιο στοιχείο ζυγού i .....	34
Σχ. 1. 10 Συμβολική αναπαράσταση μετασχηματιστή ανάμεσα σε ζυγούς i,j .....	34
Σχ. 1. 11 Φορτίο σταθερής ισχύος .....	35
Σχ. 1. 12 Ακτινικό ισοδύναμο.....	39
Σχ. 1. 13 Εξισώσεις ρεύματος, τάσης και ισχύος ως προς τον λόγο αντιστάσεων.....	40
Σχ. 1. 14 Οικογένεια P-V καμπυλών για διαφορετικές αντιστάθμίσεις γωνίας φορτίου .....	41
Σχ. 1. 15 Χαρακτηριστική P-V καμπύλη για σταθερό συντελεστή ισχύος .....	41
Σχ. 1. 16 Οικογένεια V-Q καμπυλών για διαφορετικές τιμές ενεργού ισχύος .....	42
Σχ. 1. 17 Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου Ζυγού ΜΤ Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ και κοντινών ζυγών φορτίων μετά από διαταραχή .....	50
Σχ. 1. 18 Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου Ζυγού ΜΤ Μ/Σ χωρίς ΣΑΤΥΦ και κοντινών ζυγών φορτίων μετά από διαταραχή.....	51
Σχ. 1. 19 Διαγράμματα ικανότητας P-Q .....	52
Σχ. 1. 20 Χαρακτηριστική $\cos\phi(P)$ για οριακή τιμή $P_{\text{threshold}} = 0.5$ .....	55
Σχ. 1. 21 Τυπική χαρακτηριστική $Q(V)$ .....	56
Σχ. 2. 1 Ενεργειακές ζώνες υλικών.....	62
Σχ. 2. 2 Ενεργειακά διαγράμματα για μονωτή, ημιαγωγό και αγωγό .....	63
Σχ. 2. 3 Γραφική αναπαράσταση της $F(E)$ για $T_3 > T_2 > T_1 > T_0 = 0$ °K .....	65
Σχ. 2. 4 Οι καμπύλες στα άκρα των ενεργειακών ζωνών παριστάνουν φράγματα δυναμικής ενέργειας για τους φορείς, επιφέροντας σκέδαση .....	67
Σχ. 2. 5 Κινητικότητα φορέων για διάφορες τιμές συγκεντρώσεων προσμίξεων θεωρώντας σταθερή θερμοκρασία T .....	67
Σχ. 2. 6 Κινητικότητα φορέων για διάφορες τιμές θερμοκρασίας θεωρώντας σταθερή τιμή συγκέντρωσης ιοντισμένων προσμίξεων N .....	68
Σχ. 2. 7 Πριν την επαφή.....	69



Σχ. 2. 8 Μετά την επαφή, θερμοδυναμική ισορροπία.....	70
Σχ. 2. 9 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V διόδου Schottky.....	73
Σχ. 2. 10 Δίοδος Schottky ως φωτοβολταϊκό στοιχείο .....	74
Σχ. 2. 11 Ενεργειακό διάγραμμα διόδου p-n μετά την αποκατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.....	75
Σχ. 2. 12 Χαρακτηριστική I-V διόδου p-n.....	78
Σχ. 2. 13 Δίοδος p-n ως φωτοβολταϊκό στοιχείο .....	79
Σχ. 2. 14 Γωνία ύψους $\beta^\circ$ και αζιμούθια γωνία $Z^\circ$ του ηλίου .....	81
Σχ. 2. 15 Ηλιακή απόκλιση $\delta^\circ$ .....	82
Σχ. 2. 16 Μέγιστη και ελάχιστη ηλιακή απόκλιση $\delta^\circ$ .....	82
Σχ. 2. 17 Ωριαία γωνία $\omega^\circ$ και η συμμετρική της γωνία $s^\circ$ .....	83
Σχ. 2. 18 Ύψος ηλίου $\beta^\circ$ , αζιμούθια γωνία $Z^\circ$ και η συμπληρωματική του ύψους $\varphi_z^\circ$ .....	84
Σχ. 2. 19 Συνάρτηση ύψους ηλίου $\beta^\circ$ - αζιμούθιας γωνίας ηλίου $Z^\circ$ .....	85
Σχ. 2. 20 Γωνίες θέσης συλλέκτη σε φωτοβολταϊκό στοιχείο .....	86
Σχ. 2. 21 Συνοπτική παρουσίαση γωνιών ηλίου και συλλεκτών σε φωτοβολταϊκή διάταξη .....	86
Σχ. 2. 22 Τυπική μορφή διακύμανσης ηλιακής ακτινοβολίας σε τέσσερις χαρακτηριστικές μέρες σε οριζόντιο επίπεδο συλλέκτη.....	87
Σχ. 2. 23 Τυπική μορφή διακύμανσης ηλιακής ακτινοβολίας σε τέσσερις χαρακτηριστικές μέρες σε συλλέκτη με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος.....	88
Σχ. 2. 24 Επίδραση νεφών στην ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.....	89
Σχ. 3. 1 Ικανότητα διαβάθμισης του ισοδύναμου μοντέλου μονής διόδου .....	92
Σχ. 3. 2 Ηλεκτρικό ισοδύναμο ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου ελεγχόμενο από δίοδο p-n..	93
Σχ. 3. 3 Ρεύμα βραχυκύκλωσης ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	95
Σχ. 3. 4 Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	96
Σχ. 3. 5 Χαρακτηριστική P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	97
Σχ. 3. 6 Ισοδύναμο μοντέλο μονής διόδου .....	99
Σχ. 3. 7 Επίδραση αύξησης της $R_s$ .....	102
Σχ. 3. 8 Επίδραση μείωσης της $R_h$ .....	102
Σχ. 3. 9 Επίδραση αύξησης της $R_s$ στην ισχύ .....	103
Σχ. 3.10 Επίδραση μείωσης της $R_h$ στην ισχύ .....	104
Σχ. 3. 11 Ηλεκτρικό ισοδύναμο διπλής διόδου.....	106
Σχ. 3. 12 Επίδραση θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική I-V πραγματικού φωτοβολταϊκού.....	109
Σχ. 3. 13 Επίδραση θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική P-V πραγματικού φωτοβολταϊκού.....	109
Σχ. 3. 14 Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική I-V πραγματικού φωτοβολταϊκού .....	110
Σχ. 3. 15 Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική P-V πραγματικού φωτοβολταϊκού .....	111
Σχ. 3. 16 Επίδραση θερμοκρασίας και πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας στην χαρακτηριστική I- V πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	112
Σχ. 3. 17 Επίδραση θερμοκρασίας και πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας στην χαρακτηριστική P-V πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	112
Σχ. 3. 18 Σειριακή σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	113

Σχ. 3. 19 Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	114
Σχ. 3. 20 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο .....	115
Σχ. 3. 21 Φωτοβολταϊκό πεδίο αποτελούμενο από 2 σειριακές συστοιχίες των 2 ΦΒ πλαισίων	116
Σχ. 3. 22 Χωρισμός περιοχών σε I-V και P-V χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	119
Σχ. 3. 23 Διάγραμμα για perturb and observe αλγόριθμο με ρύθμιση τάσης .....	121
Σχ. 3. 24 Καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκού με έκφραση των εξισώσεων (3.53)-(3.55).....	123
Σχ. 4. 1 Ισοδύναμο κύκλωμα μονής διόδου.....	126
Σχ. 4. 2 Διάγραμμα αλγορίθμου P&O με ρύθμιση τάσης.....	130
Σχ. 4. 3 Ενδιάμεσες τιμές ισχύος για κάθε επανάληψη P&O .....	132
Σχ. 4. 4 Ενδιάμεσες τιμές συνεχούς τάσης αντιστροφεία για κάθε επανάληψη P&O.....	133
Σχ. 4. 5 Ενδιάμεσες τιμές ρεύματος για κάθε επανάληψη P&O .....	133
Σχ. 4. 6 Γραφική ισχύος-χρόνου για διάστημα 12 ωρών. Data: 26/2/2015 Καναδάς.....	136
Σχ. 4. 7 Βηματική γραφική ακτινοβολίας για το διάστημα 12:40-14:00, 26/2/2015 Καναδάς..	137
Σχ. 4. 8 Βηματική γραφική παραγόμενης ενεργού ισχύος για το διάστημα 12:40-14:00, 26/2/2015 Καναδάς.....	137
Σχ. 4. 9 Βηματική γραφική ρεύματος για το διάστημα 12:40-14:00, 26/2/2015 Καναδάς .....	138
Σχ. 4. 10 Βηματική γραφική τάσης για το διάστημα 12:40-14:00, 26/2/2015 Καναδάς.....	138
Σχ. 4. 11 Έλεγχος αλγοριθμικών βημάτων του MPPTPO για τα πρώτα 5 βήματα με αρχικοποίηση ίση με την προηγούμενη $V_{mpp}$ .....	140
Σχ. 4. 12 Έλεγχος αλγοριθμικών βημάτων του MPPTPO για τα πρώτα 5 βήματα με τροφοδότηση αυθαίρετης τιμής τάσης 0.2V/cell.....	140
Σχ. 4. 13 Βηματική γραφική παραγόμενης ενεργού ισχύος χωρίς MPPT με $V_{pv} = 0.2V/cell$ ....	141
Σχ. 4. 14 Βηματική γραφική παραγόμενης ενεργού ισχύος χωρίς MPPT με $V_{pv} = 0.4V/cell$ ....	142
Σχ. 4. 15 Βηματική γραφική παραγόμενης ενεργού ισχύος χωρίς MPPT με $V_{pv} = 0.66 V/cell$ . 142	
Σχ. 4. 16 Βηματική γραφική ρεύματος εξόδου ΦΒ διάταξης χωρίς MPPT με $V_{pv} = 0.66 V/cell$ .....	143
Σχ. 5. 1 Ακτινικό Σύστημα Μεταφοράς υπό μελέτη .....	146
Σχ. 5. 2 Χρονοσειρά ισχύος πριν (μαύρη) και μετά (κόκκινη) την απλοποίηση της.....	151
Σχ. 5. 3 Χρονοσειρές ισχύος για κάθε ΦΒ παραγωγή. ....	151
Σχ. 5. 4 Μεταβλητές M/Σ διανομής χωρίς ΦΒ παραγωγή.....	154
Σχ. 5. 5 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή για μηδενική ΦΒ παραγωγή.....	154
Σχ. 5. 6 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής (μηδενικού φορτίου για τη συγκεκριμένη προσομοίωση) χωρίς ΦΒ παραγωγή .....	155
Σχ. 5. 7 Τάση ζυγού 302 χωρίς ΦΒ παραγωγή. ....	155
Σχ. 5. 8 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 χωρίς ΦΒ παραγωγή.....	156
Σχ. 5. 9 Μεταβλητές M/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 2.1</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή).....	158
Σχ. 5. 10 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 2.1</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή) .....	159

Σχ. 5. 11 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή <b>προσομοίωσης 2.1</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή).....	159
Σχ. 5. 12 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 2.1</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή) .....	160
Σχ. 5. 13 Ρεύματα Δ.Π. από ΦΒ <b>προσομοίωσης 2.1</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή).....	160
Σχ. 5. 14 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 2.2</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή).....	162
Σχ. 5. 15 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 2.2</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή) .....	163
Σχ. 5. 16 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή <b>προσομοίωσης 2.2</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή).....	163
Σχ. 5. 17 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 2.2</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή) .....	164
Σχ. 5. 18 Ρεύματα ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 2.2</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή).....	164
Σχ. 5. 19 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 2.3</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) .....	166
Σχ. 5. 20 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 2.3</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος).....	167
Σχ. 5. 21 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή <b>προσομοίωσης 2.3</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος).....	167
Σχ. 5. 22 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 2.3</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος).....	168
Σχ. 5. 23 Ρεύματα ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 2.3</b> (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος).....	168
Σχ. 5. 24 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 3.1</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή).....	171
Σχ. 5. 25 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.1</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή) .....	171
Σχ. 5. 26 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 3.1</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή) .....	172
Σχ. 5. 27 Ρεύματα ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.1</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή).....	172
Σχ. 5. 28 Άεργος ΦΒ παραγωγή <b>προσομοίωσης 3.1</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή).....	173
Σχ. 5. 29 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 3.2</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή).....	175
Σχ. 5. 30 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.2</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή) .....	175
Σχ. 5. 31 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 3.2</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή) .....	176

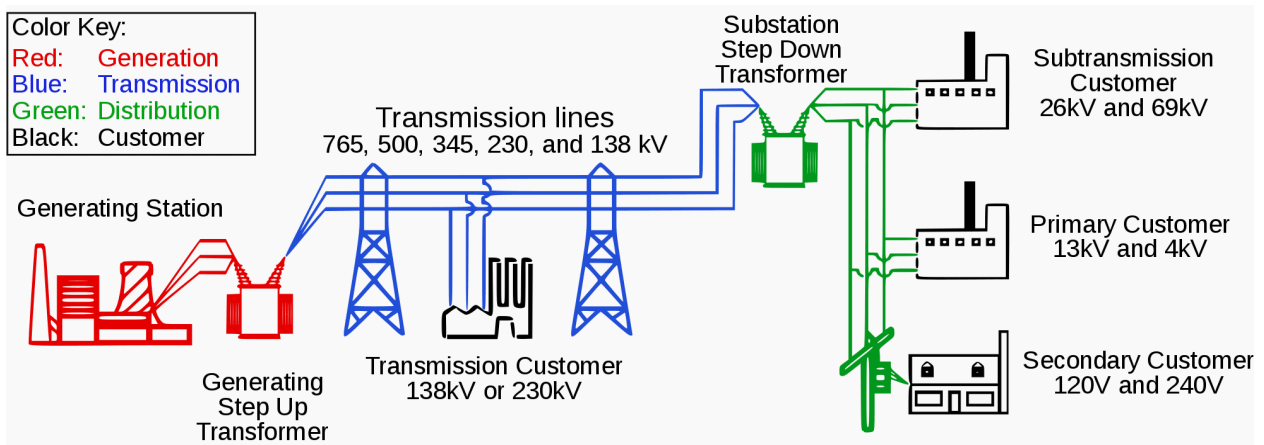
Σχ. 5. 32 Ρεύματα ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.2</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή).....	176
Σχ. 5. 33 Άεργος παραγωγή από ΦΒ <b>προσομοίωσης 3.2</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή).....	177
Σχ. 5. 34 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 3.3</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) .....	179
Σχ. 5. 35 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.3</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) .....	179
Σχ. 5. 36 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή <b>προσομοίωσης 3.3</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος).....	180
Σχ. 5. 37 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 3.3</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) .....	180
Σχ. 5. 38 Ρεύματα ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.3</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) .....	181
Σχ. 5. 39 Άεργος παραγωγή ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.3</b> (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος).....	181
Σχ. 5. 40 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 1</b> με συστοιχία πυκνωτών.....	184
Σχ. 5. 41 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής (μηδενικού φορτίου για τη συγκεκριμένη προσομοίωση) <b>προσομοίωσης 1 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	185
Σχ. 5. 42 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 1 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	185
Σχ. 5. 43 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 2.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	187
Σχ. 5. 44 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 2.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	187
Σχ. 5. 45 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 2.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	188
Σχ. 5. 46 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	189
Σχ. 5. 47 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	190
Σχ. 5. 48 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή <b>προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	190
Σχ. 5. 49 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 <b>προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών</b> .....	191
Σχ. 5. 50 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής <b>προσομοίωσης 3.4</b> (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ) .....	193
Σχ. 5. 51 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής <b>προσομοίωσης 3.4</b> (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ).....	194
Σχ. 5. 52 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή <b>προσομοίωσης 3.4</b> (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ).....	194
Σχ. 5. 53 Χαρακτηριστική P-V καμπύλη <b>προσομοίωσης 3.4</b> (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ).....	195

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές κατανάλωσης. Βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ΣΗΕ αποτελεί η αξιόπιστη τροφοδότηση ισχύος στη κατανάλωση, δηλαδή υπό συνθήκες σταθερής ή κυμαινόμενης εντός ασφαλών ορίων τάσης και σταθερής συχνότητας, συνυπολογίζοντας ταυτόχρονα τα οικονομικά και περιβαλλοντολογικά κόστη του έργου αυτού. Για την εξασφάλιση των προϋποθέσεων αυτών, η ανάλυση ενός ΣΗΕ πραγματοποιείται σε τρία στάδια: τη παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή [1]. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι συνήθως τεχνικά και οικονομικά εξαρτημένες, μεταξύ τους και για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός τείνει να πραγματοποιείται ενιαία. Το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρεται συχνά ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα (bulk power system). Αντίθετα, η ενεργειακή διανομή εξαρτάται άμεσα από τις ανάγκες των καταναλωτών και τις ιδιαιτερότητες της τροφοδοτούμενης περιοχής, με αποτέλεσμα να σχεδιάζεται και να συντηρείται αυτόνομα. Η ηλεκτρική ενέργεια, από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι και το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και ιδανικά πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που καταναλώνεται. Παρόλα αυτά, με την ένταξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αυξάνεται ολοένα και περισσότερο η ανάγκη για οικονομική και αποδοτική αποθήκευση της, καθώς η παραγωγή από ΑΠΕ εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες και δε μπορεί να παρέχει αξιόπιστα ηλεκτρική ενέργεια με βάση τη ζήτηση.

Στην Ελλάδα, υπεύθυνη για τους δημόσιους σταθμούς παραγωγής είναι η ΔΕΗ (Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού), για τη μεταφορά και τον έλεγχο ποιότητας της ισχύος ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) και για τη διανομή στους καταναλωτές ο ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής Εθνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας).



Σχ. 1. 1 Απλοποιημένο διάγραμμα διασύνδεσης συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής

### 1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι σταθμοί παραγωγής είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή διαφόρων μορφών πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Η πλειοψηφία των σταθμών πραγματοποιεί αυτή τη διαδικασία με την αρχική μετατροπή της πρωτογενούς ενέργειας σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Παραδείγματος χάριν, στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς η θερμότητα από την καύση ορυκτών καυσίμων ή από πυρηνική σχάση μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική μέσω πεπιεσμένου ατμού και της περιστροφής στροβίλων και μετά σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Αντίστοιχα, στα αιολικά πάρκα, η ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική περιστροφή πτέρυγας η οποία ελέγχεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρική [2]. Ο κανόνας αυτός βέβαια δεν ισχύει καθολικά. Στη παραγωγή μέσω φωτοβολταϊκών μονάδων, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε κίνηση ηλεκτρονίων από κυκλώματα φωτοδίοδων και με έλεγχο τάσης στην έξοδο μέσω μετασχηματιστών παρέχεται ηλεκτρική ισχύς στο δίκτυο. Συνήθη τακτική αποτελούν τα συστήματα παραγωγής συνδυασμένου κύκλου, όπου παραπροϊόντα ενός σταθμού παραγωγής αξιοποιούνται από άλλον, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα τους όπου αυτό είναι εφικτό. Σε επίπεδο μελέτης, έντονο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην πλευρά των ηλεκτρογεννητριών και όχι της μεθόδου παραγωγής, καθώς η συγχρονισμένη λειτουργία τους είναι κομβική για την ευσταθή λειτουργία του συστήματος.

### 1.1.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης, γίνεται με τις γραμμές υψηλής (ΥΤ) και υπερυψηλής (ΥΥΤ) τάσης, καθώς σε αυτά τα επίπεδα ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτές μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς διανομής, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ). Επίσης, τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, οι οποίοι συνήθως διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση (ΥΤ/ΜΤ) και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης (ΧΤ), και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Το σύστημα μεταφοράς συμπεριλαμβάνει και τους υποσταθμούς ζεύξης των διαφορετικών δικτύων των γραμμών υψηλής τάσης. Σημαντικό να σημειωθεί είναι το γεγονός ότι σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής που συνήθως συνδέονται με μετασχηματιστές ανύψωσης υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ) ή υψηλής τάσης (ΥΤ) για τη μετέπειτα μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας, η σύνδεση ΑΠΕ γίνεται ως επί το πλείστον στη μέση τάση (ΜΤ) και στη χαμηλή τάση (ΧΤ) που αποτελεί πρόκληση για το ήδη υπάρχον δίκτυο. Κυρίως στη φωτοβολταϊκή παραγωγή, τα πάρκα συνδέονται συνήθως στην ΜΤ, αν και όχι αποκλειστικά, ενώ πλέον καταναλωτές ΜΤ και ΧΤ επιλέγουν την τοποθέτηση ιδιόκτητων φωτοβολταϊκών μονάδων. Η διασύνδεση στο κατάλληλο επίπεδο τάσης εξαρτάται από τη συνολική παραγόμενη ισχύ και από την απόσταση μεταφοράς της από τους καταναλωτές. Τα δίκτυα μεταφοράς διατάσσονται βρογχοειδώς.

Τα σημερινά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν αξιόπιστα και αποδοτικά. Παρόλα αυτά, σύγχρονες προκλήσεις όπως η απεξάρτηση από ρυπογόνους σταθμούς παραγωγής και η αντιστάθμιση της παραγωγής με την ένταξη ΑΠΕ αλλά και η γενική τάση αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες της δύσης, σε συνδυασμό με νέες τεχνολογίες,

οδήγησαν στην ανάπτυξη ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ολοκληρωμένα συστήματα αισθητήρων, επικοινωνιών, εξοπλισμού ελέγχου και έξυπνων συστημάτων διαχείρισης, καθώς και τοπολογίες που τα εκμεταλλεύονται με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο των τάσεων και της ροής ισχύος για την αποδοτικότερη μεταφορά ενέργειας στο δίκτυο [3]. Το εγχείρημα αυτό έχει μεγάλο οικονομικό κόστος καθώς απαιτεί αντικατάσταση και εκσυγχρονισμό τμημάτων δικτύου που λειτουργούν ορθά, που εμποδίζει την ευρεία εφαρμογή τους. Ο συνδυασμός των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς με έξυπνα συστήματα μέτρησης ευρείας κλίμακας δύναται να παρέχει μεγαλύτερα πλεονεκτήματα κάνοντας το υψηλό κόστος τους αποδοτικότερη επένδυση.

### 1.1.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το δίκτυο διανομής είναι υπεύθυνο για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των καταναλωτών. Η τροφοδότηση του δικτύου διανομής γίνεται από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ. Στη συνέχεια, μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, τροφοδοτούνται οι πελάτες μέσης τάσης και οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ. Από τους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ, η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει τελικά στο σύνολο των καταναλωτών. Σε αντίθεση με τα δίκτυα μεταφοράς, τα δίκτυα διανομής διατάσσονται ακτινικά [4].

Συγκριτικά με τα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς, το δίκτυο διανομής συναντάει τις μεγαλύτερες προκλήσεις και άρα ανάγκη εκσυγχρονισμού. Η σταδιακά αυξανόμενη διείσδυση ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων (EVs) και διεσπαρμένης παραγωγής ΑΠΕ σε επίπεδο καταναλωτών, η ολοένα μεγαλύτερη ενεργειακή ζήτηση, καθώς και η ανάπτυξη τεχνολογιών που επιτρέπουν τη χρήση υψηλότερων επιπέδων τάσης, σε συνδυασμό με την ύπαρξη παλαιωμένου δικτύου παρουσιάζουν πρόβλημα για τις υποδομές αρκετών χωρών [3]. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, ο ΔΕΔΔΗΕ ήδη πραγματοποιεί επενδύσεις για την ανακαίνιση πυλώνων και καλωδίων ΜΤ, την επαύξηση υποσταθμών (Υ/Σ) επιπέδου τάσης 6,6kV σε 20kV και ισχύος 400MVA σε 630MVA ή 1000MVA, την υπογειοποίηση του εναέριου δικτύου και τη τοποθέτηση φορτιστών ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

## 1.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή

Υπάρχουν αρκετοί ορισμοί για τον όρο διασπαρμένη παραγωγή, χωρίς απαραίτητα αυτοί να συμφωνούν μεταξύ τους. Αρκετοί επικεντρώνονται στα όρια παραγόμενης ισχύος των μονάδων, άλλοι στα επίπεδα τάσης ενώ αρκετοί λαμβάνουν υπόψιν και τον τρόπο σύνδεσης των μονάδων με τα φορτία. Ο λόγος ύπαρξης διαφορετικών ορισμών είναι ότι η κατηγοριοποίηση της παραγωγής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αναφορικά ορισμένοι σημαντικοί παράγοντες είναι ο σκοπός, η τοποθεσία, η εμβέλεια τροφοδοσίας ενέργειας, η αγορά ενέργειας, η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο, αλλά δε περιορίζονται απαραίτητα σε αυτούς. Ανάλογα λοιπόν με τις συνθήκες λειτουργίας του εκάστοτε συστήματος

προτιμώνται διαφορετική ορισμοί [5]. Για την παρούσα διπλωματική εργασία, θα χρησιμοποιηθεί ο εξής ορισμός:

*Ως διεσπαρμένη παραγωγή ορίζονται οι μονάδες παραγωγής που κατά κανόνα συνδέονται στο δίκτυο διανομής και δεν σχεδιάζονται ή ελέγχονται από το κέντρο ελέγχου ενέργειας του Διαχειριστή Μεταφοράς.*

Λόγω της αυξανόμενης ένταξης ΑΠΕ, η πλειοψηφία των οποίων ανήκουν στη διεσπαρμένη παραγωγή κατά τους περισσότερους ορισμούς, καθώς και της κατάργησης μεγάλων σταθμών παραγωγής που επιβαρύνουν το περιβάλλον, όπως σταθμοί καύσης λιγνίτη, εμφανίζεται διεθνώς έντονο ενδιαφέρον για τις χρήσεις αλλά και τις επιπτώσεις της διεσπαρμένης παραγωγής στα ΣΗΕ. Η αυξανόμενη διείσδυση έχει επιπτώσεις στην ευστάθεια του δικτύου και εμπεριέχει τον κίνδυνο υπερτάσεων και αντίστροφης ροής ισχύος στα δίκτυα διανομής σε περίπτωση που η παραγωγή ξεπερνά αρκετά τη ζήτηση. Προφανώς προκύπτει ανάγκη ελέγχου της λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, η οποία πραγματοποιείται δυναμικά μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Ο έλεγχος αυτός λύνει τα προαναφερόμενα προβλήματα, και ταυτόχρονα δίνει δυνατότητα έγχυσης άεργου ισχύος στα φορτία και μείωση της ροής ισχύος αν αυτό χρειάζεται. Επακόλουθα, έμφαση δίνεται στον ανασχεδιασμό ΣΗΕ δυναμικής πλέον συμπεριφοράς με υποστήριξη από τη διεσπαρμένη παραγωγή.

### 1.2.1 Φωτοβολταϊκή παραγωγή

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη παραγωγή από φωτοβολταϊκές μονάδες. Περιληπτικά, η λειτουργία των φωτοβολταϊκών βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, που είναι απαραίτητο για τον διαχωρισμό θετικών και αρνητικών φορτίων σε μία διάταξη φωτιζόμενης διόδου. Το φράγμα αυτό εκτείνεται σε όλο το πλάτος της φωτιζόμενης διάταξης και σε μικρό βάθος από τη φωτιζόμενη επιφάνεια. Όταν φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του υλικού της διόδου προσκρούσει σε αυτή, απορροφάται από χημικό δεσμό στο υλικό και δημιουργεί ζεύγος ηλεκτρικών φορέων, δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο και μία οπή. Τα ζεύγη που δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο, κατανέμονται στη ζώνη αγωγιμότητας και στη ζώνη σθένους αντίστοιχα, λόγω του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού. Η συσσώρευση ηλεκτρονίων στο ένα άκρο, και οπών στο άλλο προκαλεί εμφάνιση διαφοράς δυναμικού που μπορεί να οδηγήσει ρεύμα μέσω εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας ισχύ. Οι φωτοβολταϊκές διατάξεις είναι στοιχεία συνεχούς (DC) ρεύματος/τάσης, τα μεγέθη των οποίων εξαρτώνται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία ( $G$ ) και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ( $T$ ). Ανάλογα με τα μεγέθη αυτά, καθώς και το σύστημα στο οποίο συνδέονται, καθορίζεται το σημείο λειτουργίας της διάταξης  $O (I_{pv}, V_{pv})$  και επακόλουθα η παραγόμενη ισχύς της.

Στο κεφάλαιο 2 δίνεται έμφαση στη λειτουργία των φωτοδίοδων και επακόλουθα στη παραγωγή ενέργειας μέσω εκμετάλλευσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου, ενώ στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται ηλεκτρική ανάλυση και προσομοίωση φωτοβολταϊκού στοιχείου. Επιπρόσθετα, στο κεφάλαιο 5 θα μελετηθεί η επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής από φωτοβολταϊκά πάρκα

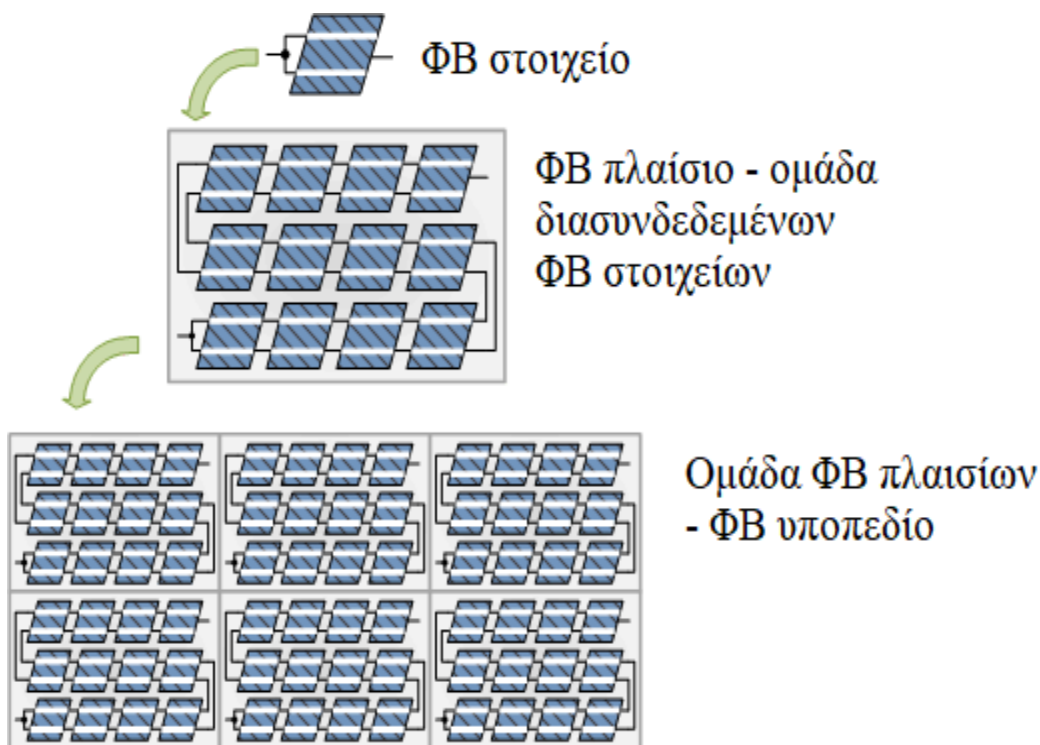


στην ευστάθεια ΣΗΕ και θα πραγματοποιηθεί σύγκριση διαφορετικών μεθόδων ρύθμισης της μέσω ηλεκτρονικών ισχύος.

### 1.2.2 Σύνδεση ΦΒ παραγωγής

Το ΣΗΕ στο οποίο συνδέεται μια φωτοβολταϊκή διάταξη επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο λειτουργίας της. Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι ανεξάρτητο φορτίο (όπως φωτοβολταϊκά στέγης σε οικία), συστοιχία συσσωρευτών για αποθήκευση ενέργειας, κινητήρες συνεχούς ρεύματος για τροφοδότηση απομονωμένων εγκαταστάσεων ή δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ισχύος. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε συστήματος, η σύνδεση μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας ή μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος για παροχή εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος/τάσης σταθερού πλάτους και συχνότητας. Στο σημείο αυτό ορίζονται οι διαφορετικές ΦΒ διατάξεις, οι οποίες αναλύονται περαιτέρω στην ενότητα 3.6:

- ΦΒ στοιχεία (PV Cells)
- ΦΒ πλαίσια (PV Panels)
- Ομάδα (συστοιχία) ΦΒ πλαισίων-ΦΒ υποπεδίο (PV Array)
- ΦΒ πάρκο



Σχ. 1. 2 Σύνολο ΦΒ διατάξεων

Στη συγκεκριμένη εργασία κύριο μέλημα αποτελεί η μελέτη της επίδρασης της ΦΒ παραγωγής στο δίκτυο, οπότε και επικεντρώνεται στη δεύτερη περίπτωση, στην οποία ως κύρια ΦΒ διάταξη θεωρείται πλέον το ΦΒ πάρκο.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται είναι οι μετατροπείς (converters) για ενιοποίηση του επιπέδου τάσης της διάταξης (DC-DC) στη πλευρά συνεχούς ρεύματος/τάσης, και οι αντιστροφείς (inverters) για την αλλαγή από συνεχές σε εναλλασσόμενο ρεύμα/τάση (DC-AC). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων διαφέρουν από τους αντιστροφείς των άλλων ηλεκτρονικών εφαρμογών καθώς μπορούν να ελέγχουν την έξοδο των φωτοβολταϊκών υποπεδίων, προκειμένου να δημιουργούν συνθήκες μέγιστης απόδοσης [6].

### 1.3 Ηλεκτρονικά Ισχύος

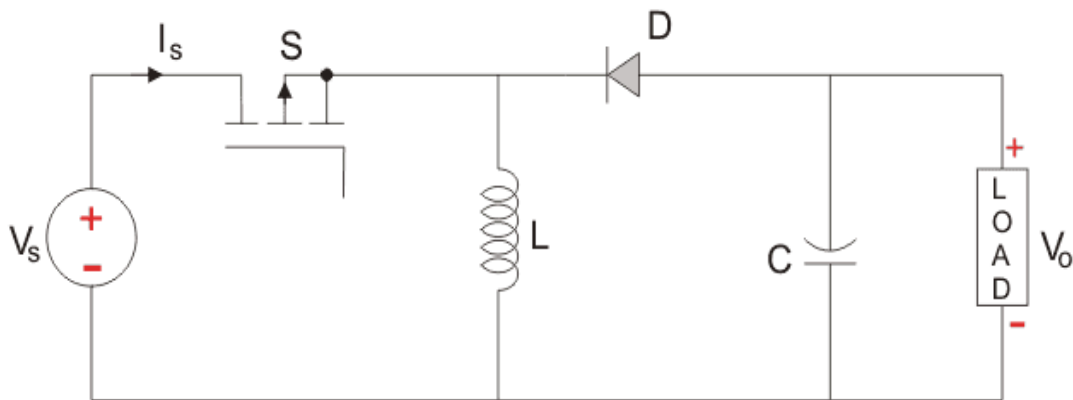
Η τεχνολογία των Ηλεκτρονικών ισχύος (Power Electronics) ασχολείται με τεχνικές μετατροπής ή όπως πολλές φορές αναφέρεται τεχνικές επεξεργασίας ηλεκτρικής ισχύος από μια μορφή σε άλλη χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς ισχύος. Ανάλογα με το είδος μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος και τη ροή ενέργειας, διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες μετατροπέων [6]:

- Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC Converters): Μετατρέπουν τη συνεχή τάση μια ορισμένης τιμής και πολικότητας σε συνεχή τάση άλλης τιμής και κατά περιπτώσεις άλλης πολικότητας
- Αντιστροφείς (DC-AC Inverters): Μετατρέπουν τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη, όπου η ενέργεια μεταφέρεται από ένα σύστημα συνεχούς τάσης σε ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης.
- Ανορθώσεις (AC-DC Rectifiers): Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, όπου η ενέργεια μεταφέρεται από ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης σε ένα σύστημα συνεχούς τάσης.
- Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης (Cycloconverters): Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση μιας ορισμένης τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε εναλλασσόμενη άλλης τιμής, συχνότητας και κατά περιπτώσεις διαφορετικού αριθμού τάσεων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής, τα οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων εμπεριέχουν μετατροπείς DC – AC (αντιστροφείς) καθώς και DC – DC μετατροπείς για προσαρμογή του επιπέδου της τάσης.

### 1.3.1 Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC)

Υπάρχουν αρκετές διατάξεις που επιτελούν την ίδια λειτουργία ανύψωσης ή υποβιβασμού DC τάσης. Επειδή το ενδιαφέρον της εργασίας επικεντρώνεται στη στα φωτοβολταϊκά και στην επίδραση τους σε διασύνδεση ΣΗΕ, παρουσιάζεται για λόγους πληρότητας η διάταξη του μικτού μετατροπέα ή αλλιώς μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης συνεχούς τάσης (buck-boost converter).



Σχ. 1. 3 Μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης

Ο μετατροπέας αυτός φαίνεται στο Σχ. 1.3 και δρά σε δύο φάσεις, μία κατά τη φόρτιση και μία κατά την εκφόρτιση του πηνίου. Αρχικά ο διακόπτης  $S$  άγει με αποτέλεσμα το ρεύμα του πηνίου να αυξάνεται. Η διάδος  $D$  πολώνεται αρνητικά και το φορτίο τροφοδοτείται από τον αρχικά φορτισμένο πυκνωτή. Η φόρτιση του πηνίου σταματάει όταν ο διακόπτης  $S$  σταματήσει να άγει. Κατά τη δεύτερη φάση, ο διακόπτης  $S$  ανοίγει και δημιουργείται τάση στα άκρα του πηνίου με αναστροφή πολικότητα οπότε η διάδος  $D$  πολώνεται ορθά. Έτσι το πηνίο εκφορτίζεται και ο πυκνωτής φορτίζεται για την επανάληψη των δύο φάσεων λειτουργίας. Είναι φανερό ότι η διακοπτική συχνότητα του  $S$  καθορίζει την ταχύτητα και την πληρότητα της διαδικασίας φόρτισης-εκφόρτισης. Αρχικά ορίζεται ο λόγος  $D$  του χρόνου αγωγής του διακόπτη  $S$  ( $t_{on}$ ) προς τη συνολική χρονική διάρκεια των δύο φάσεων ( $T_S = t_{on} + t_{off}$ ) [6].

Αποδεικνύεται ότι για τον λόγο τάσεων εξόδου/εισόδου ισχύει

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (1.1)$$

Σύμφωνα με την (1.1)

- Για  $D > 0.5$  ο λόγος των τάσεων είναι μεγαλύτερος της μονάδας και επιτυγχάνεται ανύψωση.

- Για  $D < 0.5$  ο λόγος των τάσεων είναι μικρότερος της μονάδας και επιτυγχάνεται υποβιβασμός.
- Για  $\Delta = 0.5$  ο λόγος τάσεων είναι ίσος με τη μονάδα.

Μεταβάλλοντας κατάλληλα τη διάρκεια όπου άγει ο διακόπτης  $S$  σε σχέση με τον συνολικό χρόνο λειτουργίας κάθε κύκλου καθορίζεται η λειτουργία του μετατροπέα και ο λόγος υποβιβασμού/ανύψωσης.

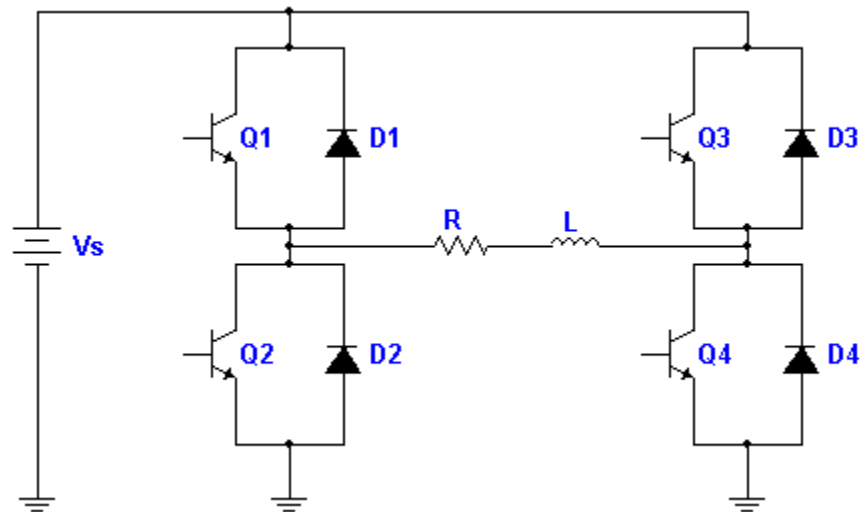
Όσον αφορά τη μεταφερόμενη ισχύ, οι μετατροπείς μεταβάλλουν κατάλληλα το ρεύμα έτσι ώστε η ισχύς εισόδου να ισούται με το άθροισμα της ισχύος εξόδου και των απωλειών του μετατροπέα.

### 1.3.2 Αντιστροφείς (DC-AC)

Αντίστοιχα με τους μετατροπείς, υπάρχουν ποικίλες διατάξεις που εκτελούν την ίδια λειτουργία, και η επιλογή γίνεται ανάλογα με την εφαρμογή. Τα κύρια μεγέθη των αντιστροφέων είναι :

- η ονομαστική ισχύς ( $P_{NOM}$ )
- η ονομαστική τάση εισόδου ( $V_{DC}$ )
- η ονομαστική τάση εξόδου ( $V_{RMS}$ )
- η συχνότητα εξόδου (Hz)
- ο αριθμός των φάσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται σύντομα ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας, όπου μετατρέπει την DC τάση εισόδου  $V_{in}$  σε AC τάση εξόδου πλάτους ίσου της εισόδου.



Σχ. 1. 4 Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας

Ο αντιστροφέας λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές φάσεις. Στη πρώτη φάση άγουν τα ημιαγώγιμα στοιχεία  $Q_1$  και  $Q_4$  με αποτέλεσμα το φορτίο να πολώνεται όμοια με την DC τάση εισόδου. Κατά τη δεύτερη φάση άγουν τα στοιχεία  $Q_2$  και  $Q_3$  με αποτέλεσμα την ανάστροφη πόλωση ης εξόδου. Η τρίτη φάση αποτελεί τη λειτουργία ελεύθερης διέλευσης με τη ταυτόχρονη αγωγή είτε του

στοιχείου  $Q_4$  και της διόδου  $D_2$  είτε του στοιχείου  $Q_1$  και της διόδου  $D_3$  κατά την οποία δεν υπάρχει ροή ισχύος από την είσοδο στην έξοδο και επιτυγχάνεται η εκτόνωση χωρικών ή επαγωγικών φορτίων. Στην έξοδο του αντιστροφέα πρακτικά εμφανίζονται εναλλασσόμενοι παλμοί πλάτους  $V_{in}$  και  $-V_{in}$  με συχνότητα που εξαρτάται από τη διακοπτική συχνότητα των ημιαγωγικών στοιχείων, και με κατάλληλη τεχνική διαμόρφωσης όπως φέροντος σήματος (carrier based), εύρους παλμών (pulse width), και διανύσματος χώρου (space vector), η ανάλυση των οποίων ξεφεύγει του ενδιαφέροντος της εργασίας, επιτυγχάνεται εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση και ρεύμα εξόδου σταθερού πλάτους και συχνότητας [6].

### 1.3.3 Ηλεκτρονικά ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Μία σημαντική διάταξη που συνδυάζεται με τους DC-DC μετατροπείς είναι χαρακτηριστική των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ο έλεγχος μέσω Παρακολούθησης Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (Maximum Power Point Tracking-MPPT), ο οποίος μέσω κατάλληλου αλγορίθμου ελέγχει τη τάση εξόδου και επιβάλλει στο ΦΒ λειτουργία μέγιστης ισχύος. Στα ΦΒ πάρκα συνήθως ο έλεγχος MPPT επιτελείται σε επίπεδο ΦΒ υποπεδίου (PV array) ή ΦΒ συστοιχίας (PV string). Περαιτέρω ανάλυση του MPPT πραγματοποιείται στην ενότητα 3.7. Στη συνέχεια παρεμβάλλεται ο DC-DC μετατροπέας προκειμένου να εξισωθούν οι τιμές των τάσεων που παρέχονται από τα υποπεδία και να οδηγηθούν μεγαλύτερες τιμές τάσεων στην είσοδο του DC-AC αντιστροφέα.

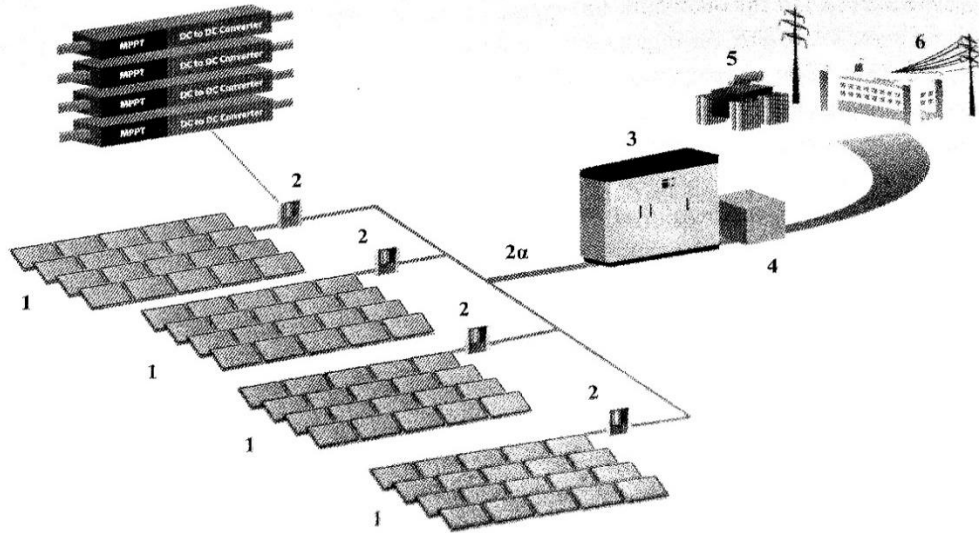
Οι αντιστροφείς μπορεί να παρεμβληθούν σε διαφορετικές θέσεις στη ΦΒ εγκατάσταση, ώστε ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους να μπορούν να ελέγχουν την παραγόμενη ισχύ από :

- ολόκληρο το ΦΒ πεδίο (central inverters)
- ένα υποπεδίο, δηλαδή παράλληλες συστοιχίες ΦΒ πλαισίων (string inverters)
- το κάθε ένα πλαίσιο ανεξάρτητα (micro-inverters)

Ανάλογα με το μέγεθος του πάρκου και την απαιτούμενη παρεχόμενη ισχύ επιλέγεται η αντίστοιχη συνδεσμολογία. Συνήθως όσο αυξάνεται το επίπεδο μεταφερόμενης ισχύος προτιμάται λύση με κεντρικό αντιστροφέα. Στις προσομοιώσεις της συγκεκριμένης εργασίας, ολόκληρη η ισχύς της εγκατάστασης του κάθε ΦΒ πεδίου αποδίδεται προς έναν κύριο αντιστροφέα, οπότε έχουμε τη διάταξη του κεντρικού αντιστροφέα (central inverter).

Στην είσοδο και στην έξοδο των αντιστροφέων επίσης τοποθετούνται συστήματα προστασίας έναντι υπερτάσεων και σφάλματος γης και παρακολούθησης λειτουργίας για σωστή διασύνδεση στο δίκτυο.

Στο Σχ. 1.5 παρουσιάζονται τα κυριότερα τμήματα μιας μεγάλης ΦΒ εγκατάστασης που βασίζει τη λειτουργία της σε διάταξη κεντρικού αντιστροφέα.



Σχ. 1. 5 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση μεγάλης ισχύος που βασίζει τη λειτουργία της σε κεντρικό αντιστροφέα όπου 1) υποπεδίο, 2) MPPT και DC-DC μετατροπείς τάσης, 3) κεντρικός αντιστροφέας, 4) συστήματα ελέγχου και ασφάλειας, 5) Μ/Σ ανύψωσης τάσης και διασύνδεση στη ΜΤ, 6) τοπική κατανάλωση και διασύνδεση στο δίκτυο

## 1.4 Ανάλυση Ροών Φορτίου ΣΗΕ

Η μοντελοποίηση ενός ΣΗΕ και κατά συνέπεια η ανάλυση ροών ισχύος από τη παραγωγή στα φορτία είναι απαραίτητο εργαλείο για την εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας του. Ένα ΣΗΕ μπορεί να προσομοιωθεί ως σύστημα διασυνδεδεμένων ζυγών, πάνω στους οποίους εντάσσονται μονάδες παραγωγής, ισχύος και φορτία. Η διασύνδεση των ζυγών γίνεται με μοντέλα γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών, ενώ τα φορτία συνδέονται απευθείας σε ζυγούς που βρίσκονται σε κατάλληλα επίπεδα τάσης. Οι εξισώσεις ροών ισχύος που προκύπτουν από τα ηλεκτρικά ισοδύναμα δίνουν δυνατότητες:

- Βέλτιστου σχεδιασμού ΣΗΕ σε επίπεδα διανομής και μεταφοράς με ορθή επιλογή στοιχείων που αντιστοιχούν στα ζητούμενα επίπεδα ισχύος/τάσεως και παθητικών μηχανισμών αντιστάθμισης όπως η τοποθέτηση εγκάρσιων πυκνωτών και πηνίων σε υποσταθμούς του συστήματος μεταφοράς.
- Επιλογής οικονομικότερης λειτουργίας των γεννητριών, καθώς η ζήτηση μεταβάλλεται εντός της ημέρας και απαιτείται εκ νέου υπολογισμός παραγόμενης ισχύος τους. Το ζήτημα αυτό γίνεται πολύπλοκο με την εισαγωγή διεσπαρμένης παραγωγής από ΑΠΕ καθώς η παραγωγή τους δεν ελέγχεται όπως αυτή των γεννητριών, αλλά εξακολουθούν να συμβάλουν στη συνολική παραγόμενη ισχύ.
- Καθορισμού ορίων ορθής λειτουργίας και παρακολούθησης των τάσεων και των ροών του ΣΗΕ ώστε να βρίσκεται εντός αυτών.
- Μελέτης επιπτώσεων διαταραχών στην ευστάθεια του συστήματος (αύξηση φορτίων, απώλεια γραμμής κ.α)

- Μελέτης αναβάθμισης και επέκτασης των συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής.

Παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα δομικά στοιχεία που συνθέτουν ένα ΣΗΕ και το ανά μονάδα σύστημα πάνω στο οποίο συνήθως εκφράζονται. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς, εγκάρσιοι πυκνωτές ή πηνία, μετασχηματιστές και φορτία.

#### 1.4.1 Ανά μονάδα σύστημα (Per Unit System)

Η λειτουργία ενός ΣΗΕ επιτελείται σε διάφορα επίπεδα τάσης και ένα πολύπλοκο σύστημα περιλαμβάνει αρκετούς μετασχηματιστές. Το ανά μονάδα σύστημα (αμ ή pu) εκφράζει τα στοιχεία του συστήματος ως κλάσμα κάποιας βασικής τιμής, και είναι πολύ χρήσιμο καθώς οι τιμές εκφρασμένες με τέτοιο τρόπο δεν αλλάζουν και παρουσιάζονται ενιαία σε κάθε πλευρά των μετασχηματιστών, ανάγοντας την κάθε πλευρά τους σε αμ με τις κατάλληλες βασικές τιμές. Για τη μετατροπή ενός ΣΗΕ σε ανά μονάδα απαιτούνται δύο τιμές που καθορίζονται από τον μελετητή, η βασική ισχύς  $S_b$  και η βασική τάση  $V_b$ . Με τις δύο τιμές γνωστές, και τη χρήση του νόμου του Ohm ανάγονται σε αμ όλες οι μεταβλητές του ΣΗΕ (αντιστάσεις, αγωγιμότητες, ρεύματα και τάσεις). Στη περίπτωση ύπαρξης μετασχηματιστή, συνήθης πρακτική είναι η θεώρηση των βασικών μεγεθών να συμπίπτει με τις ονομαστικές τιμές της πλευράς του μετασχηματιστή στην οποία ανήκει το εκάστοτε τμήμα του ΣΗΕ. Παραδείγματος χάριν σε ΣΗΕ με δύο τμήματα, ένα συνδεδεμένο με το πρωτεύον ΥΤ 220kV και ένα συνδεδεμένο με το δευτερεύον ΜΤ 20kV με ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή τα 100MVA, θεωρείται βασική ισχύς  $S_b=100MVA$  και βασικές τάσεις  $V_{b1}=220kV$  για το πρώτο υποσύστημα στην ΥΤ και  $V_{b2}=20kV$  για το υποσύστημα στη ΜΤ Έτσι, θεωρώντας βασικά μεγέθη με τέτοιο τρόπο δημιουργείται συνολικό ΣΗΕ εκφρασμένο σε αμ. Για τη μετατροπή των μεγεθών αρκεί η διαίρεση του οποιοδήποτε μεγέθους του ΣΗΕ με το αντίστοιχο βασικό. Αναφορικά, κάποια από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του ανά μονάδα συστήματος είναι τα εξής:

- Ενιαία εκφρασμένο ΣΗΕ ανεξάρτητα από την ύπαρξη μετασχηματιστών
- Απλοποίηση υπολογισμών που απαιτούνται στο πρόβλημα ροών φορτίου
- Βελτίωση μαθηματικής ακρίβειας κατά τους υπολογισμούς
- Ευκολότερο εντοπισμό μεγέθους εκτός ορίων, καθώς το ανά μονάδα σύστημα είναι συγκριτικό και όχι απόλυτο
- Ελάττωση χρήσης συντελεστή  $\sqrt{3}$  για τα τριφασικά συστήματα

## 1.4.2 Ζυγοί

Για τον προσδιορισμό ζυγού  $k$  του συστήματος, αντιστοιχούν τέσσερις μεταβλητές.

- Έγχυση πραγματικής ισχύος  $P_k$
- Έγχυση αέργου ισχύος  $Q_k$
- Μέτρο τάσης ζυγού  $V_k$
- Φασική γωνία τάσης  $\delta_k$

Η έγχυση πραγματικής και αέργου ισχύος ισούται με την αφαίρεση της καταναλισκόμενης ισχύος  $P_{Dk}$ ,  $Q_{Dk}$  από τη εισερχόμενη/παραγόμενη  $P_{Gk}$ ,  $Q_{Gk}$

Ανάλογα με ποιο ζεύγος μεταβλητών είναι γνωστό για κάθε ζυγό, οι ζυγοί κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες, στους ζυγούς παραγωγής (Generator Buses), ζυγούς φορτίου (Load Buses) και τον ζυγό ταλάντωσης ή αναφοράς (Slack Bus). Παρακάτω εξάγονται ορισμοί σύμφωνα με [1]:

Ζυγός ταλάντωσης ή αναφοράς: Ζυγός στον οποίο είναι γνωστά το μέτρο  $|V|$  και η φασική γωνία τάσης  $\delta$ . Συνήθως ορίζουμε τη γωνία του ζυγού ταλάντωσης  $\delta=0^\circ$ .

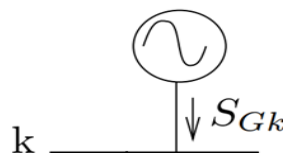
Ζυγός φορτίου ή PQ: Ζυγός στον οποίο είναι γνωστές οι εγχύσεις ενεργού ( $P$ ) και αέργου ( $Q$ ) ισχύος.

Ζυγός παραγωγής ή PV: Ζυγός στον οποίο είναι γνωστή η έγχυση πραγματικής ισχύος ( $P$ ) και το μέτρο της τάσης  $|V|$ .

## 1.4.3 Γεννήτριες

Οι γεννήτριες παριστάνονται ως πηγές ενεργού και αέργου, ή αλλιώς μιγαδικής ισχύος και συμβατικά φέρουν τον δείκτη  $G$  ( $P_G$ ,  $Q_G$ ,  $S_G$ ) [1]. Ισχύει:

$$S_G = P_G + jQ_G \quad (1.2)$$

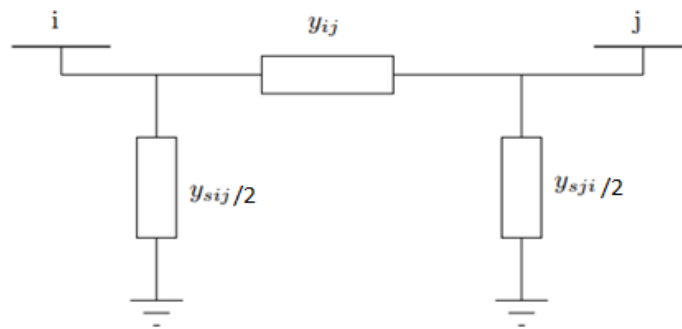


Σχ. 1. 6 Συμβολική αναπαράσταση Γεννήτριας συνδεδεμένη σε ζυγό  $k$

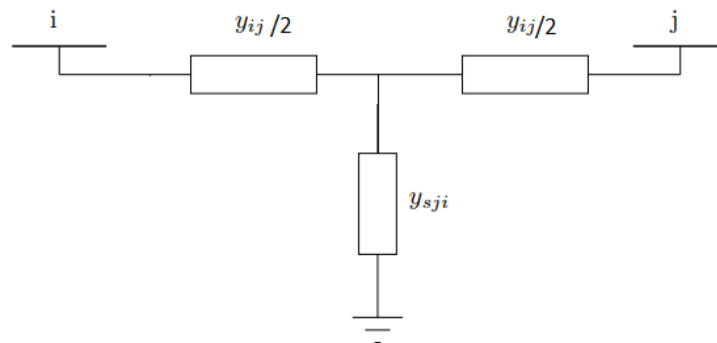


#### 1.4.4 Γραμμές Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς μελετώνται ως δίθυρα κυκλώματα. Για τη μοντελοποίηση τους υπάρχουν δύο βασικά μοντέλα, το μοντέλο Π και το μοντέλο Τ. Τα μοντέλα είναι ισοδύναμα και η επιλογή χρήσης τους εξαρτάται από τη διάταξη του ΣΗΕ, καθώς ανάλογα με τη διάταξη η επίλυση μπορεί να είναι ευκολότερη είτε με το Π είτε με το Τ. Τα μοντέλα Π και Τ με παραμέτρους αγωγιμότητας  $Y$  παρουσιάζονται στα Σχ. 1.7 και Σχ. 1.8 αντίστοιχα [3].



Σχ. 1. 7 Ισοδύναμο μοντέλο Π γραμμής μεταφοράς



Σχ. 1. 8 Ισοδύναμο μοντέλο Τ γραμμής μεταφοράς

Τα μεγέθη  $y_{ij}$  και  $y_{sij}$  είναι σύνθετες μιγαδικές αγωγιμότητες και ισχύει το εξής:

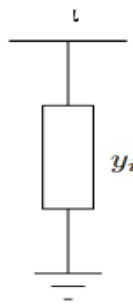
$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (1.3)$$

### 1.4.5 Εγκάρσιοι πυκνωτές/πηνία

Οι πυκνωτές και τα πηνία συνδέονται σε υποσταθμούς του συστήματος μεταφοράς προκειμένου να συμβάλουν στην αντιστάθμιση της αέργου ισχύος και τη ρύθμιση της τάσης. Οι συνιστώσες αυτές εισάγουν μία άεργη αγωγιμότητα μεταξύ του ζυγού που συνδέονται και της γης και ονομάζονται εγκάρσιες συσκευές άεργης αντιστάθμισης. Στα μονογραμμικά διαγράμματα και στις μελέτες ισχύος παριστάνονται με μία αγωγιμότητα  $y_i$  ως προς τη γη [1]. Η αγωγιμότητα είναι της μορφής:

$$y_i = jb_i \quad (1.4)$$

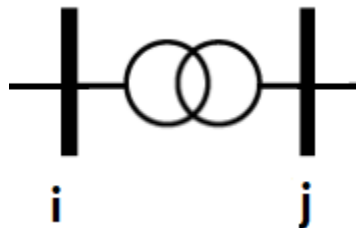
με  $b_i > 0$  για πυκνωτή και  $b_i < 0$  για πηνίο



Σχ. 1. 9 Εγκάρσιο στοιχείο ζυγού i

### 1.4.6 Μετασχηματιστές

Η κατάλληλη επιλογή μετασχηματιστών σε συνδυασμό με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος αποτελούν κομβική σημασίας έργο για τον σχεδιασμό του δικτύου και ο ρόλος τους θα αναλυθεί περαιτέρω στην ενότητα 1.3.1. Αναφορικά με τις μελέτες ροής φορτίου, οι μετασχηματιστές συνήθως εκφράζονται ως ισοδύναμο κύκλωμα μεταξύ των δύο ζυγών με διαφορετικά επίπεδα τάσης, και συμβολίζονται όπως στο Σχήμα 1.10 [1].



Σχ. 1. 10 Συμβολική αναπαράσταση μετασχηματιστή ανάμεσα σε ζυγούς i,j

### 1.4.7 Φορτία

Τα φορτία ενός ΣΗΕ αναπαριστούν την πλευρά της κατανάλωσης στους αντίστοιχους ζυγούς που αυτή υπάρχει και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [1]:

Φορτία σταθερής ενεργού και αέργου ισχύος: Τα φορτία αυτά απορροφούν σταθερή ενεργό και άεργο ισχύ, άρα και φαινόμενη, και συμβατικά φέρουν τον δείκτη D ( $P_D, Q_D, S_D$ ). Τα φορτία αυτά στη μελέτη ροών φορτίου παριστάνονται ως εγχύσεις ισχύος.



Σχ. 1. 11 Φορτίο σταθερής ισχύος

Φορτία σύνθετης αγωγιμότητας: Τα φορτία αυτά εκφράζονται ως σύνθετες αγωγιμότητες συμπεριφέρονται σύμφωνα με την εξίσωση (1.4) και παριστάνονται όπως στο Σχήμα 1.9 της ενότητας 1.4.5.

### 1.4.8 Εξισώσεις ροών φορτίου

Έστω ΣΗΕ η ζυγών που συντίθεται σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται στα 1.2.2-1.2.7. Από ανάλυση των κόμβων του συστήματος προκύπτει η εξίσωση πινάκων

$$[Y][V] = [I] \quad (1.5)$$

Και ως γνωστόν για τη μιγαδική ισχύ ζυγού  $i$  ισχύει

$$S_i = V_i I_i^*$$

Ο πίνακας  $[Y]$  αποτελεί τη μήτρα αγωγιμότητας του ΣΗΕ, η οποία για να ισχύει η εξίσωση (1.5) για κάθε ζυγό του συστήματος προκύπτει ως εξής:

$$Y_{ii} = y_i + \sum_{j=1}^n (y_{sij} + y_{ij}) \quad (1.6)$$

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (1.7)$$

Όπου  $y_{ij}$  είναι η εγκάρσια αγωγιμότητα μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$ .

Από την (1.5) προκύπτουν οι εξισώσεις ρευμάτων

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (1.8)$$

Και από την (1.6) και (1.8) οι εξισώσεις φαινόμενων ισχύων

$$S_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j V_i^* \quad (1.9)$$

Οπότε σύμφωνα με την εξίσωση ισχύος  $S = P + jQ$  (1.2) και την (1.9) προκύπτει για τις ροές ισχύος:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (1.10)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (1.11)$$

Όπου  $\theta_{ij}$  οι γωνίες από τη μήτρα αγωγιμότητας και  $\delta_i, \delta_j$  οι γωνίες τάσεων των αντίστοιχων ζυγών.

Οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν όλα τα ζητούμενα στοιχεία συναρτήσεων των διανυσμάτων τάσης και αγωγιμοτήτων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης (Newton-Raphson, Gauss-Seidel) δίνει τη δυνατότητα γενικευμένης αλγοριθμικής επίλυσης του προβλήματος ροών φορτίου για κάθε ΣΗΕ  $n$  ζυγών. Η επίλυση πραγματοποιείται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα [1], [7]:

1. Κατασκευή μήτρας αγωγιμοτήτων  $[Y]$  μέσω των γνωστών στοιχείων σύνθετης αγωγιμότητας του ΣΗΕ. Συνήθως τα προγράμματα επίλυσης λαμβάνουν πίνακα με τις

αγωγιμότητες του δικτύου και συνθέτουν τη μήτρα αγωγιμότητας σύμφωνα με τους κανόνες (1.6) και (1.7).

2. Αρχικοποίηση μέτρου και γωνίας τάσεως για κάθε ζυγό του ΣΗΕ από τον μελετητή. Οι τιμές αυτές πρέπει να εξασφαλίζουν ικανοποιητική σύγκλιση της χρησιμοποιούμενης επαναληπτικής μεθόδου για τα βήματα 3,4.
3. Επίλυση εξισώσεων ροών φορτίου (1.8)-(1.11) και υπολογισμός απόκλισης από τη λύση.
4. Ενημέρωση των διανυσμάτων τάσης με χρήση κάποιας επαναληπτικής μεθόδου.
5. Επανάληψη βημάτων 3,4 μέχρι να υπάρξει ικανοποιητική σύγκλιση.

## 1.5 Ευστάθεια ΣΗΕ

### 1.5.1 Είδη ευστάθειας

Ευστάθεια χαρακτηρίζεται η ιδιότητα ενός ΣΗΕ να παραμένει σε κατάσταση ομαλής/ευσταθούς λειτουργίας υπό φυσιολογικές συνθήκες και να επανέρχεται στη κατάσταση αυτή αφού υποστεί κάποια διαταραχή [8]. Ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής, αρχικά ορίζονται δύο τύποι ευστάθειας :

- Ευστάθεια μονίμου καταστάσεων (ή μικρών διαταραχών): Αφορά την ικανότητα του ΣΗΕ να επανέλθει στο σημείο ευσταθούς λειτουργίας μετά από μικρή μεταβολή γύρω από αυτό λόγω διαταραχής, όπως παραδείγματος χάριν σταδιακή αύξηση φορτίου. Συστηματικός τρόπος για την ανάλυση ευστάθειας μονίμου καταστάσεων στηρίζεται στη γραμμικοποίηση του συστήματος των εξισώσεων που το περιγράφουν γύρω από το σημείο λειτουργίας, όπου αυτό είναι δυνατό [8], [10].
- Μεταβατική ευστάθεια (ή μεγάλων διαταραχών): Αφορά την ικανότητα του ΣΗΕ να επανέλθει στο σημείο ευσταθούς λειτουργίας μετά από μεγάλη μεταβολή λόγω διαταραχής, όπως παραδείγματος χάριν απώλεια γεννήτριας ή γραμμής μεταφοράς. Επειδή οι διαταραχές μεταβατικής ευστάθειας ξεφεύγουν κατά πολύ από τη περιοχή γραμμικότητας των ΣΗΕ, η ανάλυσή τους πραγματοποιείται με χρήση διαφορικών μη γραμμικών μοντέλων [8], [10].

Λόγω της πολυπλοκότητας των σύγχρονων ΣΗΕ, είναι πρακτικά αδύνατο η μελέτη της ευστάθειας να πραγματοποιηθεί με ενιαίο τρόπο. Παρά το γεγονός ότι μια διαταραχή μπορεί να προκαλέσει αλυσιδωτές αντιδράσεις που τελικά επηρεάζουν όλο το ΣΗΕ, τα φαινόμενα αστάθειας είναι συνήθως τοπικά και μπορούν να αντιμετωπισθούν από μικρό ποσοστό του συνολικού εξοπλισμού προστασίας και ελέγχου. Έτσι, για την απλοποίηση και την πρακτική αντιμετώπιση του προβλήματος κατηγοριοποιούνται τρία είδη ευστάθειας που εστιάζουν σε συγκεκριμένους παράγοντες: την ευστάθεια γωνίας, την ευστάθεια συχνότητας και την ευστάθεια τάσης. Η παρούσα διπλωματική εστιάζεται στην ευστάθεια τάσης.

### 1.5.2 Ευστάθεια τάσης

Ευστάθεια τάσης είναι η ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές τάσεις εντός ορίων ασφαλείας σε όλους τους ζυγούς του κατά τη κανονική λειτουργία του και αφού υποστεί κάποια διαταραχή. Το σύστημα εισέρχεται σε κατάσταση αστάθειας όταν μια διαταραχή, αύξηση ζήτησης φορτίου ή κάποια αλλαγή στη κατάσταση λειτουργίας του προκαλεί διαδοχικές και ανεξέλεγκτες πτώσεις τάσης. Η αστάθεια τάσης ξεκινά ως ένα τοπικό φαινόμενο. Ωστόσο, οι συνέπειές της μπορεί να έχουν ένα πιο διαδεδομένο αντίκτυπο. Από την άλλη, η κατάρρευση τάσης συνήθως είναι το αποτέλεσμα μιας αλληλουχίας γεγονότων που συνοδεύουν την αστάθεια τάσης και οδηγούν ένα σημαντικό κομμάτι του ΣΗΕ να λειτουργεί με χαμηλές τάσεις [9]. Υπάρχουν αρκετές αιτίες για την παρουσίαση αστάθειας τάσης σε ένα ΣΗΕ, με τους πιο σημαντικούς να είναι [8], [10]:

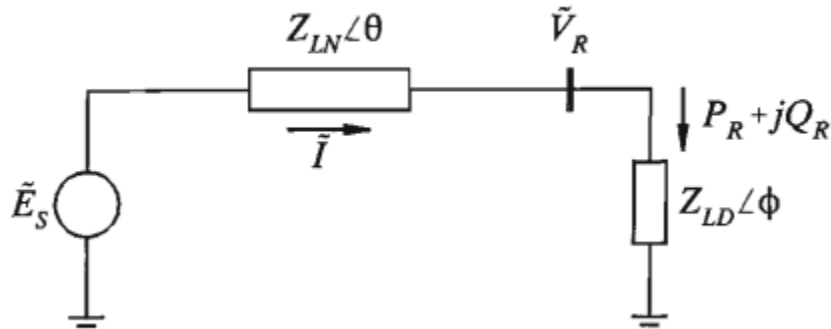
- Κεντρική παραγωγή ενέργειας, που απαιτεί μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς της. Όσο αυξάνεται η απόσταση, τόσο αυξάνεται και η σύνθετη αντίσταση των γραμμών μεταφοράς, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες και πτώσεις τάσης.
- Φυσική σταδιακή αύξηση του συνολικού φορτίου του συστήματος, με κρίσιμο σημείο εκείνο όπου τα φορτία απαιτούν περισσότερη ενεργό ισχύ από τη μέγιστη δυνατή μεταφερόμενη.
- Λειτουργία Συστημάτων Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των μετασχηματιστών διανομής.
- Απώλεια γραμμής μεταφοράς ή γεννήτριας.
- Δυναμική συμπεριφορά φορτίων και μεταβλητότητα ενεργού παραγωγής από μονάδες Δ.Π.

Η κύρια αιτία πρόκλησης φαινομένων αστάθειας είναι η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων. Μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής στο σύστημα, τα φορτία τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ είτε άμεσα, μεταβάλλοντας την αγωγιμότητά τους, είτε έμμεσα, μέσω διατάξεων του συστήματος, όπως είναι τα ΣΑΤΥΦ, οι κινητήρες επαγωγής και τα θερμοστατικά φορτία. Όμως, αν το όριο μεταφερόμενης ισχύος παραβιαστεί, οι μηχανισμοί αποκατάστασης τείνουν να μειώσουν αντί να αυξήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ.

Στη μελέτη της ευστάθειας τάσης είναι σημαντική η έννοια της αέργου ισχύος. Μάλιστα, η σχέση έγχυσης αέργου ισχύος και τάσης σε ζυγό αποτελεί κριτήριο ευστάθειας τάσης. Συγκεκριμένα, αν με έγχυση αέργου ισχύος σε ζυγό επέλθει αύξηση της τάσης του, τότε αυτός θεωρείται ευσταθής με θετική V-Q ευαισθησία (V-Q sensitivity). Ένα ΣΗΕ παρουσιάζει αστάθεια τάσης αν έστω και ένας ζυγός του παρουσιάσει αρνητική V-Q ευαισθησία, δηλαδή μείωση της τάσης του με έγχυση αέργου ισχύος.

### 1.5.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς

Όπως αναφέρθηκε, πιθανή αιτία αστάθειας τάσης αποτελεί η αδυναμία μεταφοράς της απαιτούμενης ισχύος για την κάλυψη των φορτίων [9]. Επακόλουθα, απαραίτητη γίνεται η μελέτη των δυνατοτήτων παροχής στους ζυγούς του εκάστοτε δικτύου. Η βασική ανάλυση προκύπτει από το ακτινικό ισοδύναμο του Σχ. 1.12 που προσομοιάζει τη μεταφορά ισχύος από μια ιδανική πηγή τάσης  $\tilde{E}_S$  σε φορτίο  $Z_{LD}$  μέσω γραμμής σύνθετης αντίστασης  $Z_{LN}$  [8].



Σχ. 1. 12 Ακτινικό ισοδύναμο

Αρχικά ορίζεται η μεταβλητή  $F$  για ευκολία παρουσίασης των εξισώσεων. Η μεταβλητή  $F$  προκύπτει από το άθροισμα των μέτρων των σύνθετων αντιστάσεων  $Z_{LN}$  και  $Z_{LD}$ . Γνωρίζοντας ότι  $|Z_{LN} + Z_{LD}| = \sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \varphi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \varphi)^2}$  και με κατάλληλες απλοποιήσεις και χρήση τριγωνομετρικών εξισώσεων προκύπτει ότι

$$|Z_{LN} + Z_{LD}| = \sqrt{F} = \sqrt{\left(1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)(Z_{LN})^2} \quad (1.12)$$

Πέραν της οπτικής απλοποίησης των εξισώσεων (1.13)-(1.16), η μορφή της μεταβλητής  $F$  είναι χρήσιμη καθώς εμφανίζει τον λόγο της αντίστασης φορτίου  $Z_{LD}$  προς την αντίσταση μεταφοράς  $Z_{LN}$ , που είναι σημαντικός για τον υπολογισμό της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.13.

Δεδομένου του νόμου του Ohm το πλάτος του ρεύματος ισούται με το πλάτος της τάσης  $E_S$  προς το μέτρο της συνολικής αντίστασης  $|Z_{LN} + Z_{LD}|$  που με χρήση της (1.12) προκύπτει η (1.13).

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \left( \frac{E_S}{Z_{LN}} \right) \quad (1.13)$$

Επίσης από τον νόμο του Ohm ισχύει ότι η τάση  $V_R$  ισούται με το γινόμενο του ρεύματος της εξίσωσης (1.13) προς την αντίσταση  $Z_{LD}$ . Για το μέτρο της τάσης λοιπόν ισχύει ότι:

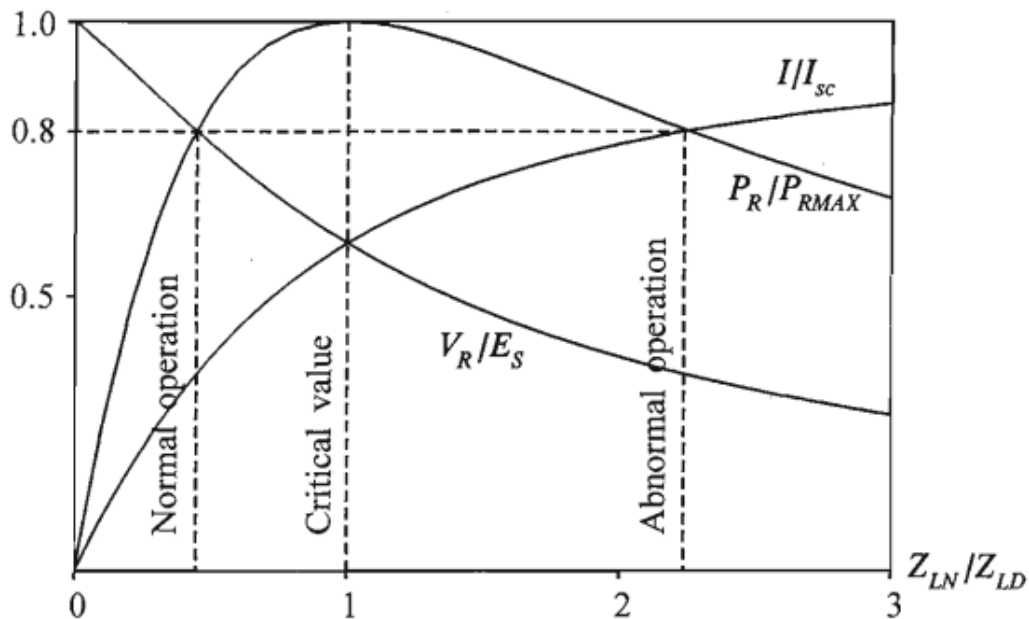
$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \left( \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) E_S \quad (1.14)$$

Με χρήση των (1.13) και (1.14) και των (1.10) και (1.11) προκύπτουν οι εξισώσεις ρών ισχύος (1.15) και (1.16)

$$P_R = \frac{V_R E_S}{\sqrt{F} Z_{LN}} \cos(\varphi) \quad (1.15)$$

$$Q_R = \frac{V_R E_S}{\sqrt{F} Z_{LN}} \sin(\varphi) \quad (1.16)$$

Στις εξισώσεις εμφανίζεται συχνά ο λόγος της αντίστασης της γραμμής  $Z_{LN}$  προς την αντίσταση του φορτίου  $Z_{LD}$ , ο οποίος είναι σημαντικός. Στο Σχ. 1.13 παρουσιάζονται οι γραφικές της ανά μονάδα ισχύος, ρεύματος και τάσης ως προς τον λόγο αυτόν, θεωρώντας  $\cos\varphi=0.95$  και  $\tan\theta=10$ .



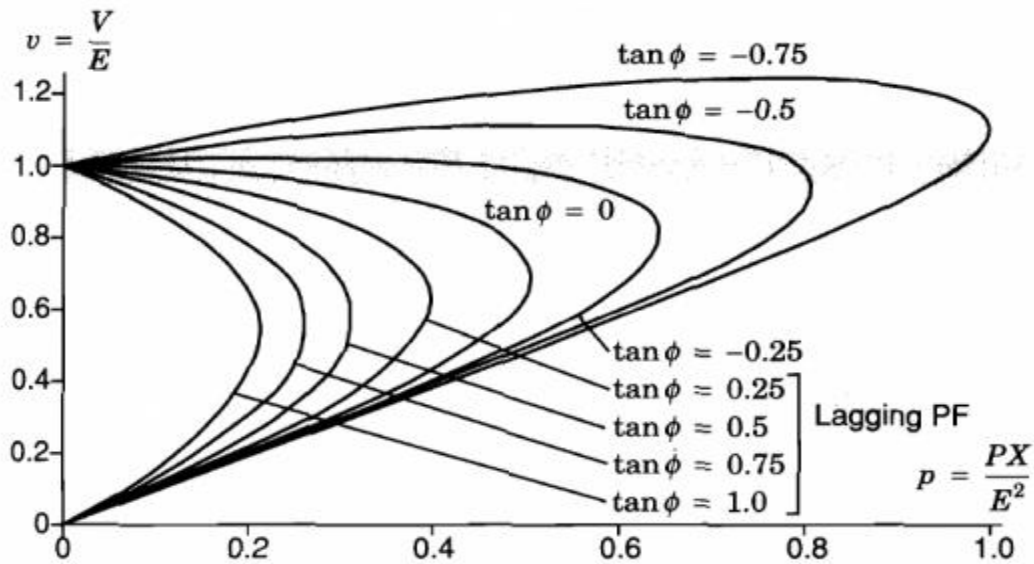
Σχ. 1. 13 Εξισώσεις ρεύματος, τάσης και ισχύος ως προς τον λόγο αντιστάσεων

Φαίνεται ότι για λόγο αντιστάσεων ίσο με τη μονάδα παρουσιάζεται μέγιστη μεταφορά ισχύος, κάτι που αποδεικνύεται εύκολα παραγωγίζοντας την (1.15) προς την αντίσταση φορτίου και θέτοντάς την ίση με το μηδέν για την εύρεση του ακρότατου (συνθήκη μεγίστου (1.17)) και στη συνέχεια με την εύρεση της συνεχώς αρνητικής δεύτερης παραγώγου δείχνοντας ότι είναι μέγιστο.

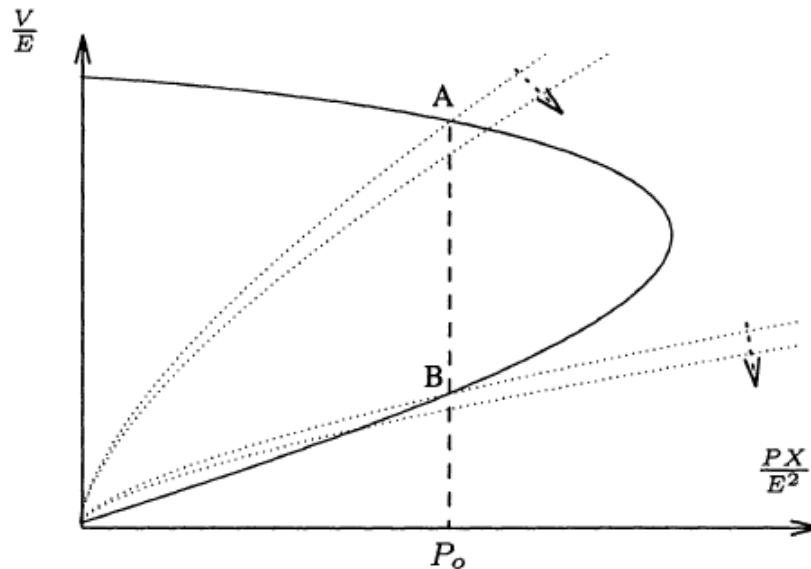
$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0 \quad (1.17)$$



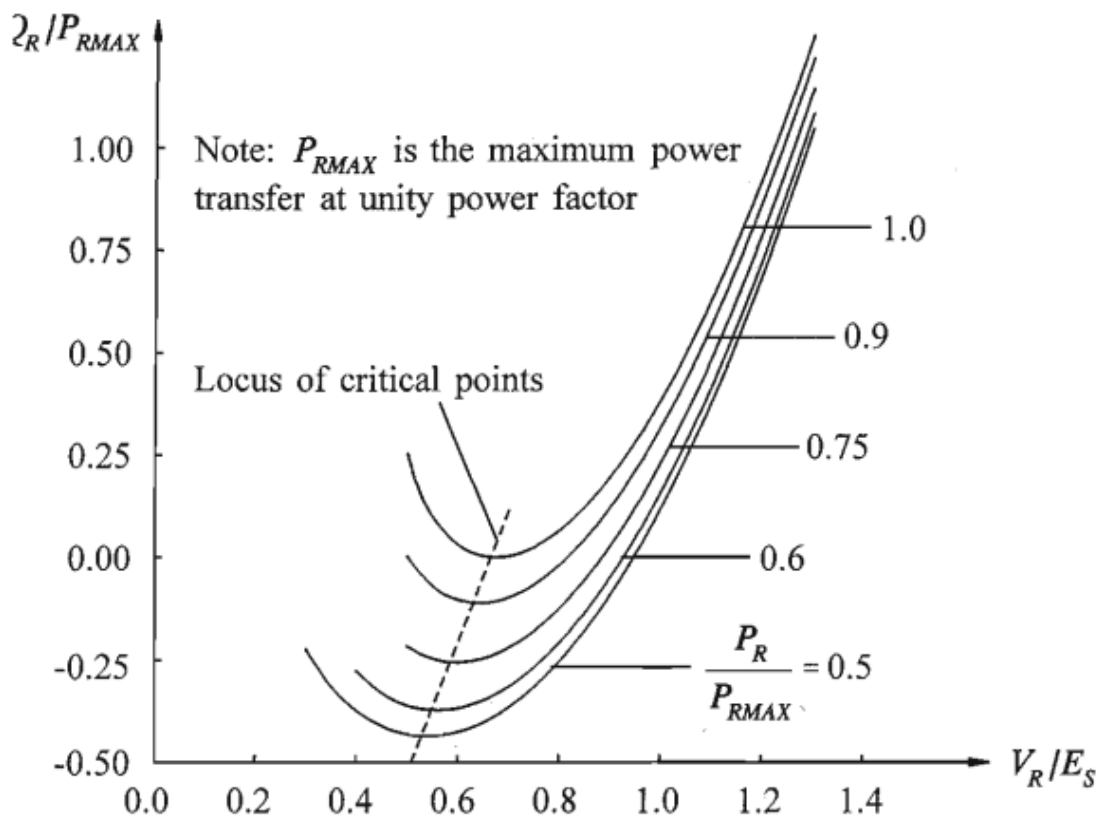
Επίσης πολλά στοιχεία για τα όρια ευστάθειας τάσης λαμβάνονται από τις χαρακτηριστικές  $P_R$ - $V_R$  και  $V_R$ - $Q_R$  που προκύπτουν από τις εξισώσεις (1.15) και (1.16) και παρουσιάζονται στα Σχ. 1.14 και 1.15 και 1.16.



Σχ. 1. 14 Οικογένεια P-V καμπυλών για διαφορετικές αντισταθμίσεις γωνίας φορτίου



Σχ. 1. 15 Χαρακτηριστική P-V καμπύλη για σταθερό συντελεστή ισχύος



Σχ. 1. 16 Οικογένεια V-Q καμπυλών για διαφορετικές τιμές ενεργού ισχύος

Από τις καμπύλες των Σχημάτων 1.14 και 1.15 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Για δεδομένη ενεργό ισχύ του φορτίου υπάρχουν δύο λύσεις: μια με υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα και μία με χαμηλή τάση και υψηλό ρεύμα. Η πρώτη αντιστοιχεί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με τη τάση  $V$  σε πιο κοντινές τιμές με την τάση της γεννήτριας  $E$ . Η δεύτερη δεν είναι αποδεκτή για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, διότι αντιστοιχεί σε ασταθές σημείο λειτουργίας. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό από το Σχ 1.15. Στο σχήμα αυτό, οι διακεκομμένες καμπύλες είναι καμπύλες ζήτησης ενεργού ισχύος του φορτίου συναρτήσει της τάσης. Τα σημεία A και B αποτελούν δύο σημεία λειτουργίας τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια ισχύ  $P_o$ , αλλά από διαφορετική ζήτηση. Θεωρείται μια μικρή αύξηση της ζήτησης του φορτίου. Στην περίπτωση που το σύστημα βρίσκεται στο σημείο A, η αυξημένη ζήτηση προκαλεί μια πτώση τάσης και οδηγεί σε υψηλότερη καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου. Εμφανίζει δηλαδή, την αναμενόμενη απόκριση της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σημείο B, παρόλα αυτά, η μεγαλύτερη ζήτηση συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση της τάσης και της καταναλισκόμενης ισχύος του φορτίου. Αν λοιπόν υποθεθεί ότι υπάρχει ένας μηχανισμός που τείνει να αυξήσει την ισχύ του φορτίου προκειμένου να επιτύχει μια συγκεκριμένη κατανάλωση, το σημείο B καθίσταται ασταθές.
- Με βάση την P-V καμπύλη μπορούν να προσδιοριστούν τρία κριτήρια για το σημείο λειτουργίας, το περιθώριο ενεργού ισχύος ( $P_{margin}$ ), το περιθώριο τάσης ( $V_{margin}$ ) και τη

κρίσιμη τάση ( $V_{critical}$ ). Το περιθώριο ισχύος είναι η διαφορά ανάμεσα στην ισχύ λειτουργίας και τη μέγιστη ισχύ και το περιθώριο τάσης είναι η διαφορά ανάμεσα στη τάση λειτουργίας και στη τάση μέγιστης ισχύος, και δείχνουν πόσο κοντά βρίσκεται το σύστημα σε αστάθεια, ενώ η κρίσιμη τάση συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό και είναι ο λόγος της τάσης μέγιστης ισχύος προς την τάση της πηγής  $E_s$ .

- Όσο αυξάνεται η αντιστάθμιση του φορτίου (που αντιστοιχεί σε μικρότερα  $\tan\phi$  στο Σχ. 1.14), αυξάνεται και η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς. Ταυτόχρονα, όμως, αυξάνεται και η τιμή της τάσης, στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο. Αυτό είναι επικίνδυνο από την άποψη ότι, η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς επιτυγχάνεται σε υψηλές τιμές τάσης και κοντά στην ονομαστική, δυσκολεύοντας έτσι την ανίχνευση της αστάθειας τάσης.
- Για υπέρ-αντισταθμισμένα φορτία ( $\tan\phi < 0$  στο Σχ. 1.14), ένα τμήμα της καμπύλης  $PV$  δείχνει ότι η τάση αυξάνει με την αύξηση της ισχύος φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι υπό αρνητικό  $\tan\phi$ , όσο αυξάνεται η κατανάλωση της ενεργού ισχύος, τόσο αυξάνεται η παραγωγή αέργου ισχύος. Επομένως σε συνθήκες χαμηλής ισχύος φορτίου, η μείωση της τάσης που προκαλείται από την κατανάλωση της ενεργού ισχύος αντισταθμίζεται από την αντίστοιχη παραγωγή της αέργου. Όσο πιο αρνητικό το  $\tan\phi$ , τόσο μεγαλύτερο και το τμήμα της  $PV$  καμπύλης που συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο.

Από την καμπύλη του Σχ. 1.16 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα

- Αντίστοιχα με τη καμπύλη ενεργού ισχύος-τάσης για δεδομένη άεργο ισχύ του φορτίου υπάρχουν δύο λύσεις: μια με υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα και μία με χαμηλή τάση και υψηλό ρεύμα. Το τμήμα ευσταθούς λειτουργίας φαίνεται εύκολα σύμφωνα και με την έννοια της  $V-Q$  ευαισθησίας που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.5.2, δηλαδή το τμήμα στο οποίο η αύξηση της αέργου ισχύος προκαλεί την αύξηση της τάσης. Το τμήμα στο οποίο ισχύει το αντίθετο είναι το αντίστοιχο τμήμα της  $P-V$  καμπύλης που αντιστοιχεί σε λύση χαμηλής τάσης και υψηλού ρεύματος με το ελάχιστο της συνάρτησης να αντιστοιχεί στη τάση του σημείου μέγιστης ενεργού ισχύος.
- Η  $V-Q$  καμπύλη εκφράζει τρία κριτήρια ευστάθειας του σημείου λειτουργίας, δύο εκ των οποίων είναι κοινά, δηλαδή το περιθώριο τάσης ( $V_{margin}$ ) και η κρίσιμη τάση ( $V_{critical}$ ), και το τρίτο είναι το περιθώριο άεργου ισχύος ( $Q_{margin}$ ) που είναι ανάλογο του περιθωρίου ενεργού ισχύος ( $P_{margin}$ ).
- Η μείωση της ενεργού ισχύος  $P_R$  προκαλεί μείωση της τάσης όπου αυτή παρουσιάζεται και ταυτόχρονα δίνει δυνατότητα λειτουργίας με αντίστροφη ροή αέργου ισχύος στο σύστημα για αρκετά χαμηλές τιμές της.

Σε ιδανικές συνθήκες, δηλαδή:

- Για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος φορτίου (άρα  $\cos\phi = 1$ ,  $\sin\phi=0$ )
- Μηδενικές ωμικές απώλειες ( $R_{LN} = 0$ ,  $\theta=90^\circ$ )

Προκύπτει η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς της σχέσης (1.18) με την αντικατάσταση της συνθήκης μεγίστου (1.17) στη σχέση (1.15):

$$P_{Rmax} = \frac{E_S}{4X_{LN}} \quad (1.18)$$

## 1.6 Δυναμικό Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

### 1.6.1 Δυναμικό Μοντέλο ΣΗΕ

Ένα συνεχές σύστημα το οποίο εμφανίζει δυναμική συμπεριφορά, μπορεί να αναλυθεί με ένα σύνολο  $N$  διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες συνήθως γράφονται στη μορφή:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1.19)$$

όπου  $\mathbf{x}$  είναι το  $N \times 1$  διάνυσμα κατάστασης του συστήματος και κάθε  $f_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) είναι μια ομαλή μη γραμμική συνάρτηση όλων των  $x_i$ . Η χρονική απόκριση ενός φυσικού συστήματος συνδέεται με μία λύση της συνήθους διαφορικής εξίσωσης (1.19) για μια αρχική συνθήκη, η οποία δίνει το διάνυσμα κατάστασης τη χρονική στιγμή  $t=0$ :

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (1.20)$$

Η αρχική συνθήκη (1.20) και η διαφορική εξίσωση (1.19) συνιστούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών. Είναι αναμενόμενο ότι για κάθε αρχική συνθήκη υπάρχει μία λύση του μη γραμμικού συστήματος (1.19). Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτός ο ισχυρισμός είναι σωστός, περιγράφονται στο θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης [11].

Ένα γενικό δυναμικό μοντέλο της μορφής που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται παρακάτω. Το μοντέλο περιγράφεται σε συμπυκνωμένη, διανυσματική μορφή, με πορεία από πιο τα γρήγορα προς τα πιο αργά δυναμικά φαινόμενα.

1. *Ακαριαία απόκριση (Δίκτυο)*. Τα μεταβατικά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, είναι πολύ γρήγορα συγκριτικά με το χρονικό διάστημα που παρουσιάζει ενδιαφέρον στις μελέτες ευστάθειας τάσης. Επομένως, θεωρούνται πρακτικά ακαριαία μετά την εμφάνιση μιας διαταραχής ή αλλαγής στις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος. Έτσι, για την παράσταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας υποτίθεται ακαριαία απόκριση και το δίκτυο περιγράφεται από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων:

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.21)$$

όπου  $\mathbf{g}$  είναι  $m$  ομαλές συναρτήσεις και  $\mathbf{y}$  το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών. Τα διανύσματα  $\mathbf{g}$  και  $\mathbf{y}$  έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Τα διανύσματα  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{z}_c$  και  $\mathbf{z}_d$  ορίζονται στη συνέχεια.

Σημειώνεται ότι στις εξισώσεις (1.21) συμπεριλαμβάνονται οι εξισώσεις των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος.

2. *Βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα.* Η βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι η κλίμακα των σύγχρονων γεννητριών και των ρυθμιστών τους, των επαγωγικών κινητήρων και των συνδέσμων συνεχούς ρεύματος. Τα δυναμικά φαινόμενα μετά από μια διαταραχή σ' αυτή την κλίμακα διαρκούν συνήθως από ένα έως μερικά δευτερόλεπτα και συχνά αναφέρονται ως βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα. Τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα περιγράφονται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.22)$$

όπου  $\mathbf{f}$  είναι  $n$  ομαλές συναρτήσεις και  $\mathbf{x}$  το  $N \times 1$  διάνυσμα κατάστασης των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

3. *Μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα.* Η μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι η κλίμακα των φαινομένων, των ρυθμιστών και των διατάξεων προστασίας που δρουν συνήθως από μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής. Οι σχετικοί μηχανισμοί σχεδιάζεται να δρουν μετά από την απόσβεση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων, για την αποφυγή περιττών δράσεων ή ασταθών αλληλεπιδράσεων με τα δυναμικά φαινόμενα βραχυπρόθεσμης κλίμακας. Μερικά παραδείγματα μηχανισμών που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι τα ΣΑΤΥΦ, η δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, η ζεύξη συστοιχιών πυκνωτών. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις παραπάνω διατάξεις αποτελούνται από συνεχείς διαφορικές εξισώσεις μεγάλης χρονικής σταθεράς και από διακριτές εξισώσεις διαφορών, και έχουν την μορφή:

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.23)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k)) \quad (1.24)$$

όπου  $\mathbf{z}_c$  και  $\mathbf{z}_d$  είναι τα διανύσματα κατάστασης για τα συνεχή και τα διακριτά μακροπρόθεσμα φαινόμενα αντίστοιχα. Το  $k$  εκφράζει τη χρονική στιγμή  $t_k = k\Delta T$ , όπου  $\Delta T$  η περίοδος λειτουργίας του διακριτού συστήματος.

Το σύνολο των εξισώσεων (1.22)-(1.24) συνθέτει το πλήρες δυναμικό μοντέλο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.6.2 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

Σημασία για την ευστάθεια τάσεως εμφανίζει η χρονική διάρκεια της διαταραχής. Έτσι, η μελέτη τέτοιου φαινομένου διαχωρίζεται σε βραχυπρόθεσμη μελέτη (short term/transient), όπου αφορά διαταραχές χρονικής κλίμακας 0-10 δευτερολέπτων, μεσοπρόθεσμη μελέτη (mid term) για διαταραχές διάρκειας από δέκα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά και η μακροπρόθεσμη μελέτη που αφορά διαταραχές από μερικά λεπτά έως δεκάδες λεπτά. Συνήθως η μεσοπρόθεσμη με τη

μακροπρόθεσμη μελέτη ταυτίζονται, και αφορούν προβλήματα κακού συντονισμού ή απόκρισης των συστημάτων προστασίας και ελέγχου ή έλλειψη αποθηκευμένης ενεργού/άεργου ισχύος ενώ η βραχυπρόθεσμη μελέτη επικεντρώνεται κυρίως σε μεταβατικά φαινόμενα και προβλήματα συγχρονισμού γεννητριών [8].

#### 1.6.2.1 Βραχυπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα των φορτίων να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλώνουν έπειτα από μια διαταραχή. Στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, η συμπεριφορά αυτή εξελίσσεται εντός λίγων δευτερολέπτων, μια διάρκεια η οποία ταυτίζεται με το χρονικό διάστημα που εμφανίζεται το φαινόμενο της αστάθειας γωνίας στις σύγχρονες γεννήτριες. Στο διάστημα αυτό εξελίσσονται και φαινόμενα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που αφορούν κυρίως τις γρήγορες προσπάθειες αποκατάστασης φορτίου από κινητήρες επαγωγής και λιγότερο συχνά συνδέσμους υψηλής τάσης-συνεχούς ρεύματος (HVDC links). Η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι επίσης γνωστή ως *μεταβατική κατάρρευση τάσης* [10].

Οι μηχανές επαγωγής παίζουν σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα για τους εξής κυρίως λόγους:

- Είναι φορτία με μικρή αδράνεια και γρήγορη επαναφορά (της τάξεως του δευτερολέπτου).
- Είτε λειτουργούν ως κινητήρες είτε ως γεννήτριες, καταναλώνουν άεργο ισχύ για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους. Γι' αυτό λοιπόν, η εγκατάσταση ασύγχρονων μηχανών στο δίκτυο συνοδεύεται συνήθως από κατάλληλες διατάξεις αέργου αντιστάθμισης.
- Κινδυνεύουν να παρουσιάσουν αστάθεια με τη μορφή επιβράδυνσης (λειτουργία κινητήρα) ή υπερεπιτάχυνσης (λειτουργία γεννήτριας), όταν η τερματική τους τάση είναι χαμηλή ή η μηχανική τους ροπή αρκετά μεγάλη.

Για παράδειγμα στα καινούργια Αιολικά Πάρκα εγκαθίστανται συνήθως ανεμογεννήτριες επαγωγής μεταβλητών στροφών, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της τερματικής τάσης και επομένως της καταναλισκόμενης αέργου ισχύος, μέσω κατάλληλων μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος. Πολλά Αιολικά Πάρκα, χρησιμοποιούσαν παλαιότερα γεννήτριες σταθερών στροφών. Οι τελευταίες, από πλευράς ευστάθειας τάσης, εμφανίζουν την ίδια σχεδόν συμπεριφορά με τους κινητήρες επαγωγής. Η διαφορά έγκειται στην επιτάχυνσή τους (αντί για επιβράδυνση), σε περίπτωση απώλειας σημείου ισορροπίας. Επιπλέον, εάν μία ασύγχρονη μηχανή οδηγηθεί σε αστάθεια ενώ παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο, μπορεί να συμπαρασύρει σε αστάθεια και γειτονικές μηχανές, με αποτέλεσμα τη μερική ή ολική κατάρρευση του συστήματος. Το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι ένα σύγχρονο ζήτημα, το οποίο αναμένεται να πάρει ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις λόγω:

- Της αυξημένης χρήσης κινητήρων επαγωγής, οι οποίοι εξοπλίζουν ευρέως τα συστήματα ψύξης και κλιματισμού.
- Της διεύθυνσης φορτίων, των οποίων η κατανάλωση είναι ανεξάρτητη της τάσης και ελέγχεται με ηλεκτρονικά ισχύος.

- Της εκτεταμένης χρήσης συστημάτων πυκνωτών για αντιστάθμιση αέργου ισχύος.
  - Της αυξημένης χρήσης γραμμών συνεχούς ρεύματος (DC) στο επίπεδο Υψηλής Τάσης (HVDC).
  - Της εντατικότερης χρήσης των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς.
- [12]

### 1.6.2.2 Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης

Έπειτα από μια διαταραχή, θεωρείται ότι το σύστημα βρίσκεται σε βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, όταν τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν αποσβεσθεί, όταν δηλαδή στην εξίσωση (1.17) ισχύει:

$$f(x, y, z_c, z_d) = 0 \quad (1.25)$$

Μετά τη βραχυπρόθεσμη ισορροπία, οι μακροπρόθεσμες αργές δυναμικές, οι οποίες περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.23) και (1.24), καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος. Οι γρήγορες δυναμικές συνιστώσες του συστήματος θεωρούνται ότι ανταποκρίνονται ευσταθώς στις αλλαγές των μακροπρόθεσμων και επομένως, οι εξισώσεις (1.17) μπορούν να αντικατασταθούν από αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας (1.25). Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η λογική πίσω από την οιονεί στατική προσέγγιση στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, η οποία θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

Οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης που εμφανίζονται από την εξέλιξη των παραπάνω αργών δυναμικών φαινομένων μπορεί να οδηγήσουν στην μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης [11]. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση αυτού του είδους αστάθειας τάσης παίζουν τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, τα οποία με τις ρυθμιστικές τους λειτουργίες επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος.

## 1.7 Οιονεί Στατική Προσέγγιση

Η μελέτη των ΣΗΕ, από πλευράς αστάθειας τάσης, γίνεται ολοένα και πιο σημαντική, κυρίως λόγω των σημαντικών προβλημάτων που μπορεί να προκαλέσει. Οι αλγεβρικές-διαφορικές εξισώσεις (1.21)-(1.24) αποτελούν ένα εργαλείο αναπαράστασης της συμπεριφοράς ενός ΣΗΕ και η επίλυση τους δίνει τη δυνατότητα μιας λεπτομερούς ανάλυσης των μηχανισμών αστάθειας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Παρά τη συνεχή αύξηση της υπολογιστικής δύναμης που μπορεί να προσφέρει σήμερα η τεχνολογία, για ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται κάποια απλοποίηση, προκειμένου να αναλυθεί το σύστημα στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Αυτή η ανάγκη για μια πιο απλοποιημένη και γρήγορη μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων (1.21)-(1.24), οδήγησε στο διαχωρισμό τους σε δύο συστήματα ελαττωμένης τάξης και πολυπλοκότητας, ανάλογα με τη χρονική κλίμακα στην οποία ανήκουν τα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται. Τα δύο αυτά υποσυστήματα προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής των οιονεί στατικών μεταβολών [9] και είναι το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα και το οιονεί στατικό σύστημα στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Κατά την ανάλυση στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, χρησιμοποιείται το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι τα αργά δυναμικά

φαινόμενα, λόγω του αργού ρυθμού εξέλιξής τους, μπορούν να θεωρηθούν σταθερά, όσο τα γρήγορα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα βρίσκονται στη διαδικασία μετάβασης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές  $z_c$  και  $z_d$  των εξισώσεων (1.21) και (1.22) θεωρούνται σταθερές και επομένως λαμβάνεται το απλοποιημένο βραχυπρόθεσμο μοντέλο:

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.26)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.27)$$

Από την άλλη, το οιονεί στατικό σύστημα χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Εφόσον το ενδιαφέρον στρέφεται στα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται με αργό ρυθμό, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν ήδη φτάσει σε ισορροπία. Αντικαθιστώντας, επομένως, τις διαφορικές εξισώσεις (1.19) με αντίστοιχες αλγεβρικές συνθήκες ισορροπίας, προκύπτει το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) = 0 \quad (1.28)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) = 0 \quad (1.29)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.30)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k)) \quad (1.31)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι πιο συχνή από την βραχυπρόθεσμη, ορισμένα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης επιλέγουν αποκλειστικά το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης για την επίλυση των εξισώσεων. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ο μειωμένος υπολογιστικός χρόνος επίλυσης που προσφέρει, καθιστώντας έτσι δυνατή και την εκτίμηση ασφάλειας συστήματος πραγματικού χρόνου, που είναι πολύ σημαντική. Στην παρούσα εργασία μάλιστα, το οιονεί στατικό σύστημα αποτελεί την οιονεί στατική προσομοίωση που έχει υλοποιηθεί.

## 1.8 Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος

### 1.8.1 Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ (Load Tap Changers)

Οι μετασχηματιστές εφοδιασμένοι με ΣΑΤΥΦ παρέχουν τη δυνατότητα διακριτής αλλαγής του επιπέδου τάσης τους, την οποία ελέγχουν χωρίς την αποκοπή φορτίων με σκοπό τη διατήρηση σταθερής τάσης σε κομβικούς ζυγούς του ΣΗΕ που συνδέονται. Αυτό πραγματοποιείται με αλλαγή λήψεως στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, συνήθως από τη πλευρά της υψηλής τάσης



καθώς υπάρχουν περισσότερα τυλίγματα και διαρρέεται από μικρότερα ρεύματα. Ο έλεγχος του επιπέδου τάσης γίνεται συνήθως στη πλευρά της διανομής και πραγματοποιείται αυτόματα μέσω ηλεκτρονόμου που συγκρίνει τη τάση του δευτερεύοντος του Μ/Σ (αναφερόμενη ως  $V_2$ ) με μια προκαθορισμένη τάση αναφοράς. Αυξάνοντας τον λόγο μετασχηματισμού μειώνεται η τάση του δευτερεύοντος και το αντίστροφο.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν τη παρούσα μελέτη είναι τα εξής:

- Χρονικές καθυστερήσεις  $t_{del1}$  και  $t_{del2}$ , όπου η αρχική λήψη περατώνεται σε χρονικό διάστημα που υπολογίζεται από το άθροισμα των καθυστερήσεων  $t_{del1} + t_{del2}$  και οι μετέπειτα λήψεις σε διάστημα  $t_{del2}$
- Χρονικό βήμα  $\Delta T_k$ , που εκφράζει τον διακριτό χρόνο που χρειάζεται το ΣΑΤΥΦ για την αλλαγή βήματος τάσης. Έστω ότι το σύστημα λειτουργεί σε διακριτές τιμές χρόνου  $t_k$ , τότε ισχύει

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (1.32)$$

- Τάση αναφοράς  $V_r$ , η τάση με την οποία πραγματοποιείται η σύγκριση της πραγματικής τάσης του δευτερεύοντος
- Μεταβλητός λόγος μετασχηματισμού  $r$
- Βήμα μεταβολής λόγου μετασχηματισμού  $\Delta r$ , που εκφράζει τη διακριτή μεταβολή του λόγου τάσης για κάθε χρονική στιγμή
- Εύρος λόγου μετασχηματισμού  $r_{min}$  και  $r_{max}$  όπου ισχύει

$$r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (1.33)$$

Τα όρια είναι απαραίτητα καθώς μεγάλος λόγος μετασχηματισμού προκαλεί έντονες κυματώσεις στην τάση και απώλεια ακρίβειας ενώ μικρός λόγος μετασχηματισμού σημαίνει αργή απόκριση του συστήματος καθώς απαιτούνται πολλά βήματα μεταβολής τάσης.

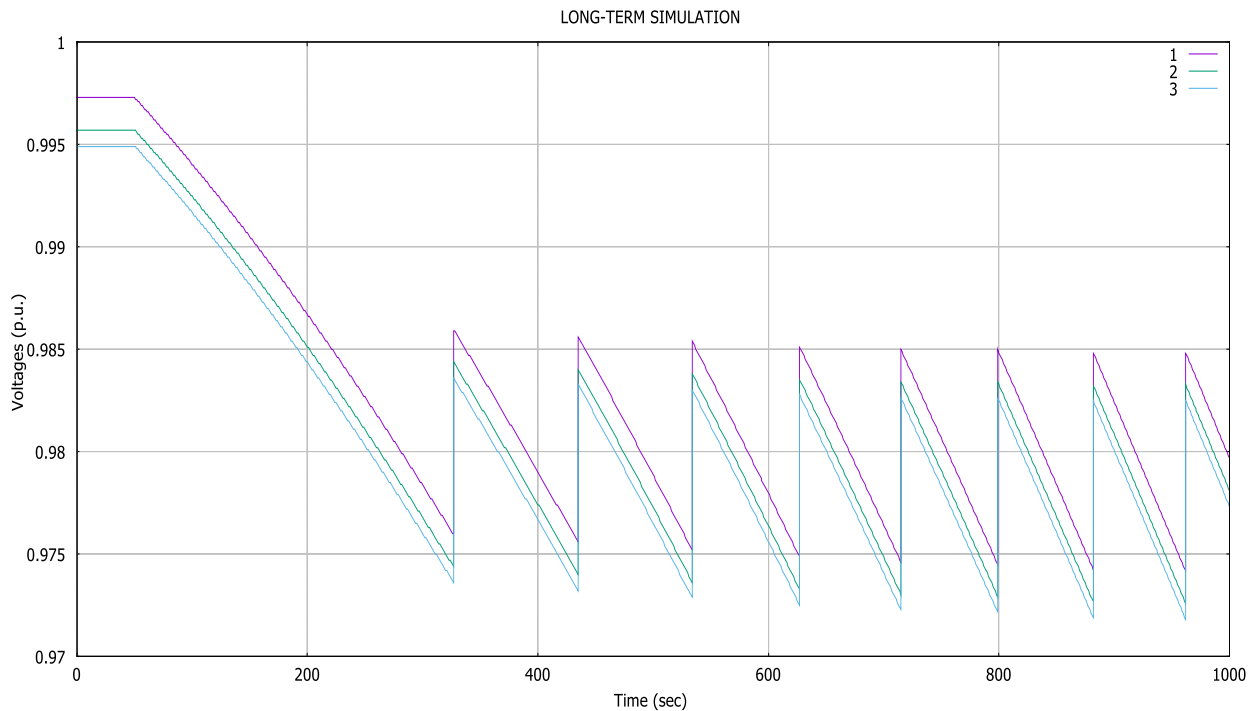
- Νεκρή ζώνη  $d$ , που εκφράζει το επιτρεπτό εύρος της τάσης που ελέγχεται (τάση δευτερεύοντος)

Στην (1.34) παρουσιάζεται η λειτουργία μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά

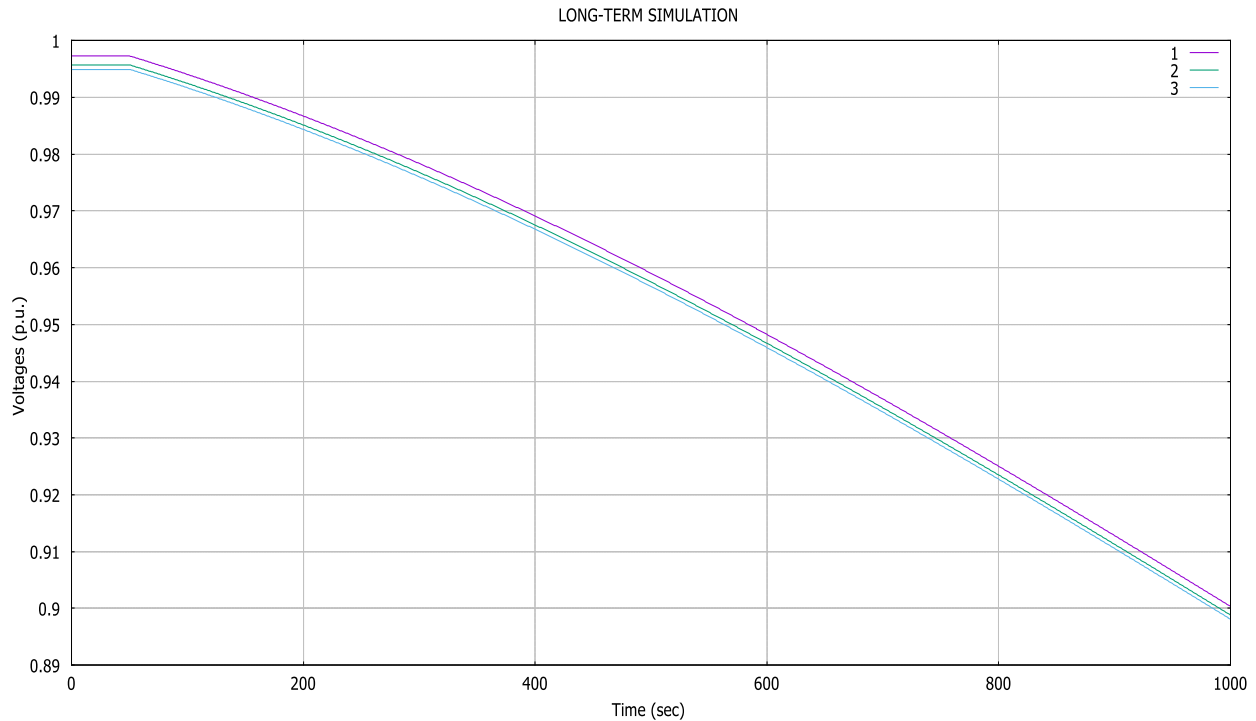
$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, \text{ αν } V_2 > V_r + \frac{d}{2} \text{ και } r_k < r_{max} \\ r_k - \Delta r, \text{ αν } V_2 < V_r - \frac{d}{2} \text{ και } r_k > r_{min} \\ r_k, \text{ , σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (1.34)$$

Περίληπτικά η (1.34) εκφράζει τα εξής. Σε περίπτωση που η ελεγχόμενη τάση  $V_2$  αυξηθεί πάνω από ένα όριο δίνεται εντολή αύξησης του λόγου  $M/\Sigma$  για μείωση της  $V_2$ , δεδομένου ότι ο λόγος μετασχηματισμού δεν έχει ξεπεράσει τον μέγιστο επιτρεπτό, σε περίπτωση που η ελεγχόμενη τάση  $V_2$  μειωθεί κάτω από ένα όριο δίνεται εντολή μείωσης του λόγου μετασχηματισμού για αύξηση της  $V_2$ , δεδομένου ότι ο λόγος μετασχηματισμού δεν είναι μικρότερος από το ελάχιστο επιτρεπτό και διατήρηση του λόγου μετασχηματισμού σε κάθε άλλη περίπτωση.

Στα σχήματα 1.17 και 1.18 παρουσιάζεται η διαφορά στις τάσεις τριών ζυγών MT μετά από την ίδια διαταραχή σε σύστημα μεταφοράς με (Σχ. 1.17) και χωρίς (Σχ. 1.18) χρήση ΣΑΤΥΦ στον μετασχηματιστή. Στο Σχ. 1.17 φαίνεται η δυνατότητα του ΣΑΤΥΦ να διατηρήσει τη τάση του δευτερεύοντος εντός ορίων, με αποτέλεσμα να διατηρεί τις τάσεις των ζυγών διανομής εντός ορίων παρά τη διαταραχή. Αντίθετα, στο Σχ. 1.18 η τάση του δευτερεύοντος δε μπορεί να διατηρηθεί. Ο σκοπός της παρουσίασης των παρακάτω σχημάτων αφορά την οπτική κατανόηση της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ και δεν αναλώνεται στην περιγραφή του συστήματος μεταφοράς και της διαταραχής που υπόκειται. Τα παρακάτω σχήματα εξάχθηκαν με το πρόγραμμα WPSTAB που περιγράφεται στην ενότητα 1.9.



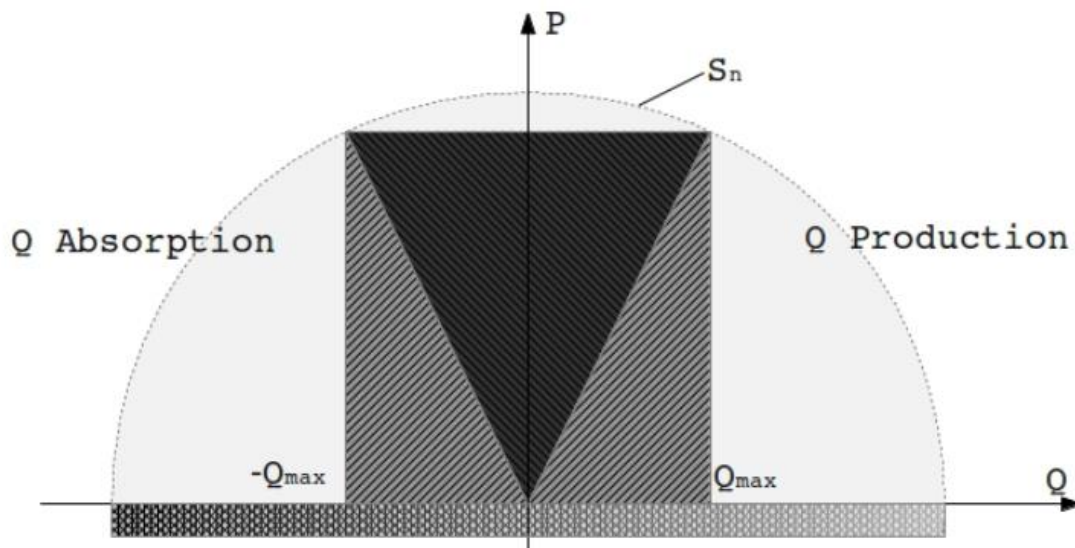
Σχ. 1. 17 Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου Ζυγού MT M/Σ με ΣΑΤΥΦ και κοντινών ζυγών φορτίων μετά από διαταραχή



Σχ. 1. 18 Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου Ζυγού ΜΤ Μ/Σ χωρίς ΣΑΤΥΦ και κοντινών ζυγών φορτίων μετά από διαταραχή

### 1.8.2 Έλεγχος αέργου ισχύος μέσω μετατροπέων

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της ενεργού και άεργου παραγωγής και απορρόφησης με αποτέλεσμα να αποτελούν εξαιρετικούς μηχανισμούς αντιμετώπισης φαινομένων αστάθειας τάσης. Συγκριτικά με άλλες μεθόδους όπως η χρήση ΣΑΤΥΦ, ο έλεγχος και η ρύθμιση των μετατροπέων θεωρείται ακαριαίος. Σε πολλές χώρες εμφανίζονται πρότυπα που επιβάλλουν τεχνικές ρύθμισης στη διεσπαρμένη παραγωγή ανάλογα με το επίπεδο τάσης στο οποίο συνδέονται. Στο Σχ. 1.19 παρουσιάζονται διαγράμματα ικανότητας ενεργού-άεργου ισχύος (P-Q διαγράμματα ικανότητας) σύμφωνα με διαφορετικά πρότυπα [13].



Σχ. 1. 19 Διαγράμματα ικανότητας P-Q

Τριγωνικό διάγραμμα ικανότητας: Η λειτουργία αυτή προβλέπει γραμμική συσχέτιση μεταξύ ικανότητας παραγωγής ενεργού ισχύος και παραγωγής ή κατανάλωσης αέργου.

Ορθογώνιο διάγραμμα ικανότητας: Η λειτουργία αυτή προβλέπει μέγιστη ικανότητα παραγωγής και κατανάλωσης αέργου ισχύος σε όλα τα επίπεδα παραγωγής ενεργού ισχύος.

Ημικυκλικό διάγραμμα ικανότητας: Η λειτουργία αυτή λαμβάνει υπόψιν τη συνολική φαινόμενη ισχύ της μονάδας παραγωγής σε όλα τα επίπεδα ενεργού ισχύος.

Διάγραμμα νυκτερινής λειτουργίας ΦΒ μονάδας: Το διάγραμμα αυτό καθορίζει τη λειτουργία ΦΒ κατά τη νυκτερινή λειτουργία όπου η μονάδα δεν παράγει, δηλαδή υπάρχει μικρή απορρόφηση ενεργού ισχύος οπότε εξαναγκάζει λειτουργία στο τρίτο και στο τέταρτο τεταρτημόριο.

Ο τρόπος ρύθμισης της αέργου παραγωγής και κατανάλωσης πραγματοποιείται με τέσσερις βασικές τεχνικές [12], [13].

- Λειτουργία Σταθερού Συντελεστή Ισχύος ( $\cos\phi$ )
- Λειτουργία Σταθερής Τάσης
- Λειτουργία συσχέτισης συντελεστή ισχύος με ενεργό παραγωγή (χαρακτηριστική  $\cos\phi(P)$ )
- Λειτουργία συσχέτισης αέργου ισχύος με τάση (χαρακτηριστική  $Q(V)$ )

Η παρούσα εργασία θα επικεντρωθεί στις δύο πρώτες τεχνικές ρύθμισης στις προσομοιώσεις ευστάθειας δικτύου του κεφαλαίου 5, αλλά θα επεξηγηθούν όλες για λόγους πληρότητας στις ακόλουθες υποενότητες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος δεν έχουν τη δυνατότητα υπερφόρτισης, στιγμιαίας ή παρατεταμένης. Επακόλουθα, επιβάλλεται περιοριστής ρεύματος, η λειτουργία του οποίου είναι να περιορίζει το πλάτος των ρευμάτων το πολύ σε μία οριακή τιμή. Όταν ζητηθούν

μεγαλύτερα ρεύματα, ο περιοριστής επιβάλλει λειτουργία στη τιμή αυτή. Η τιμή εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ και τάση λειτουργίας, και ορίζεται ως:

$$I_{lim} = \frac{S_n}{V_n} \quad (1.35)$$

Η τιμή του περιοριστή ρεύματος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν καθώς επιβάλλει όριο στην άεργο υποστήριξη που μπορεί να διαθέσει η ΦΒ παραγωγή ανεξάρτητα από τον τρόπο λειτουργίας του.

#### 1.8.2.1 Λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος

Στα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος, ο συντελεστής ισχύος είναι ο λόγος της ενεργού ισχύος προς τη φαινόμενη ισχύ που παρέχεται στο κύκλωμα, και έχει εύρος τιμών από μηδέν έως ένα. Ο λόγος αυτός ισούται με το συνημίτονο της γωνίας που εκφράζει τη διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος, δηλαδή

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (1.36)$$

Μέσω τεχνικών διαμόρφωσης και με έλεγχο του μέτρου και της γωνίας της τάσης, πραγματοποιείται ρύθμιση της διαφοράς φάσης  $\varphi$  με τέτοιο τρόπο ώστε ο συντελεστής ισχύος  $\cos\varphi$  να παραμένει σταθερός.

$$\cos \varphi = \text{σταθερο} \quad (1.37)$$

Με τον τρόπο αυτόν ελέγχεται η παραγωγή ενεργού και η παραγωγή/κατανάλωση ενεργού. Οι ΦΒ μονάδες λειτουργούν εκτός απροόπτου θεωρητικά με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος ( $\cos\varphi = 1$ ) δίνοντας έτσι τη μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος. Στη πράξη, ο ιδανικά μοναδιαίος συντελεστής ισχύος βρίσκεται συνήθως μεταξύ των τιμών

$$0.9 \leq \cos \varphi \leq 0.95 \quad (1.38)$$

#### 1.8.2.2 Λειτουργία σταθερής τάσης

Κατά τη λειτουργία αυτή ορίζεται μια τάση αναφοράς ( $V_{ref}$ ) η οποία επιβάλλεται στον ζυγό ΜΤ όπου συνδέεται η ΦΒ παραγωγή ( $V_{PV}$ ) μέσω μετατροπέα πηγής τάσης. Όταν η τάση του ζυγού ΥΤ ( $V_{YT}$ ) του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ πέσει κάτω από κάποιο προκαθορισμένο όριο ( $V_{YT \text{ limit}}$ ), ο ελεγκτής αέργου υποστήριξης της ΦΒ παραγωγής αυξάνει τη παραγωγή αέργου μέχρι το σημείο όπου η τάση του ζυγού της ΦΒ παραγωγής μεγιστοποιηθεί σε τιμή που καθορίζεται με βάση τις

δυνατότητες της ΦΒ παραγωγής, των ηλεκτρονικών ισχύος και τα όρια ασφαλείας του ΣΗΕ ( $V_{max}$ ). Εν γένει, η λειτουργία σταθερής τάσης περιγράφεται στην (1.39):

$$V_{PV} = \begin{cases} V_{ref} , & \text{αν } V_{YT} \geq V_{YT \text{ limit}} \\ V_{max} , & \text{αν } V_{YT} < V_{YT \text{ limit}} \end{cases} \quad (1.39)$$

Στη λειτουργία σταθερής τάσης τίθεται χρονοκαθυστέρηση μεταξύ του εντοπισμού πτώσης τάσης κάτω του ορίου και την αποστολή εντολής παραγωγής αέργου ώστε ο μηχανισμός να μην ενεργοποιείται για ακαριαίες μεταβολές της υψηλής τάσης που επανέρχονται ταχύτατα εντός ορίων, καθώς σε αυτή τη περίπτωση θα εμφανιζόντουσαν φαινόμενα υπερτάσεων.

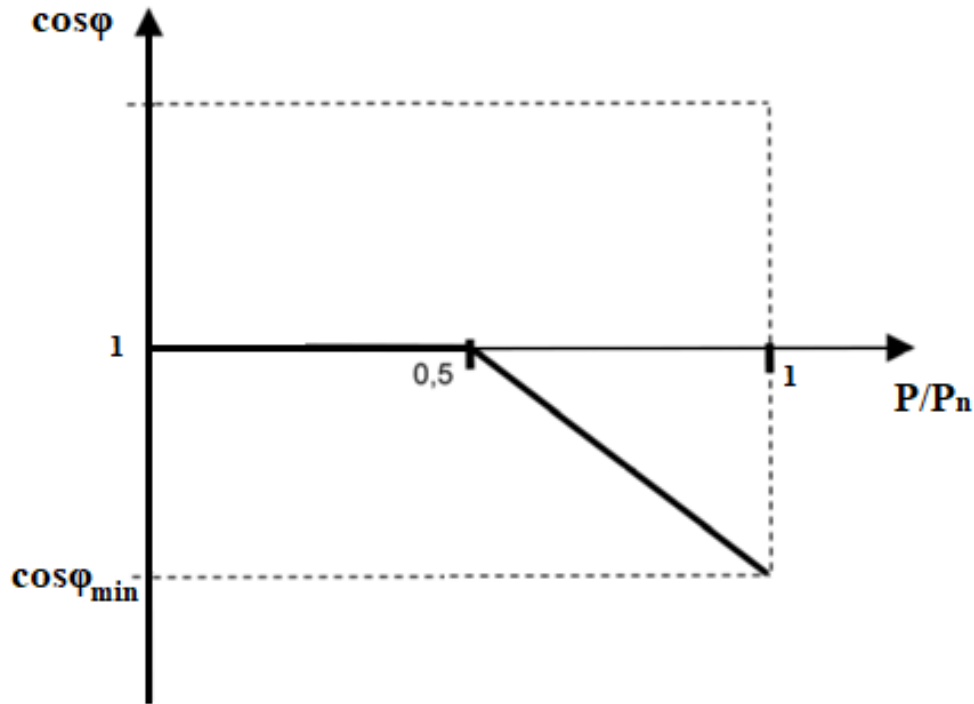
### 1.8.2.3 Λειτουργία χαρακτηριστικής $\cos\phi(P)$

Η λειτουργία αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται η παραγωγή τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα υπερτάσεων. Σε περιπτώσεις υψηλής διεσπαρμένης παραγωγής και ταυτόχρονης χαμηλής ζήτησης έγκειται ο κίνδυνος τέτοιας αύξησης τάσεων στους ζυγούς όπου το δίκτυο θα επέλθει σε ανάστροφη λειτουργία (reverse operation), με αντίστροφη ροή ισχύος από τη ΜΤ στην ΥΤ. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, η διεσπαρμένη παραγωγή απορροφά άεργο ισχύ όσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή ενεργού. Οι μετατροπείς ρυθμίζουν τον συντελεστή ισχύος συναρτήσει της ενεργού παραγωγής. Συγκεκριμένα, ορίζεται μια οριακή ποσοστιαία τιμή ισχύος σύμφωνα με την (1.40)

$$P_{threshold} = \frac{P}{P_n} \quad (1.40)$$

Όπου  $P_n$  η ονομαστική ισχύς και  $P$  η ενεργός παραγωγή.

Εφόσον η  $P_{threshold}$  ξεπεραστεί, ο συντελεστής ισχύος μειώνεται γραμμικά μέχρι μια ελάχιστη προκαθορισμένη τιμή  $\cos\phi_{min}$  που αυξάνει αντίστοιχα την απορρόφηση αέργου ισχύος. Η κλίση της γραμμικής σχέσης μείωσης του συντελεστή ισχύος εξαρτάται από τις τιμές  $P_{threshold}$ ,  $P_n$  και  $\cos\phi_{min}$ . Στο Σχ.1.20 παρουσιάζεται χαρακτηριστική  $\cos\phi(P)$  για οριακή τιμή  $P_{threshold} = 0.5$ .



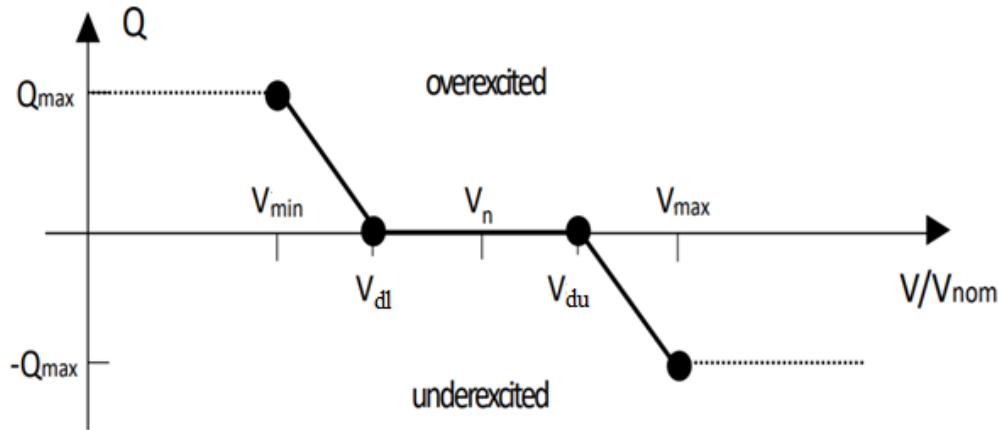
Σχ. 1. 20 Χαρακτηριστική  $\cos\phi(P)$  για οριακή τιμή  $P_{\text{threshold}} = 0.5$

#### 1.8.2.4 Λειτουργία χαρακτηριστικής $Q(V)$

Η λειτουργία μέσω χαρακτηριστικής  $Q(V)$  λαμβάνει υπόψιν της φαινόμενα υπερτάσεων και υποτάσεων. Η άεργος ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής εξαρτάται από τη τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ). Αρχικά ορίζεται μια νεκρή ζώνη τάσης  $[V_{dl}, V_{dh}]$  κέντρο της οποίας αποτελεί η ονομαστική τάση λειτουργίας.

- Αν η τάση του ΣΚΣ πέσει κάτω από την τιμή  $V_{dl}$  τότε ο ελεγκτής αέργου δίνει εντολή παραγωγής αέργου ισχύος για να αυξηθεί/διατηρηθεί η τάση. Η σχέση μείωσης τάσης-αύξησης παραγωγής αέργου είναι γραμμική.
- Αν η τάση του ΣΚΣ υπερβεί την τιμή  $V_{dh}$  τότε ο ελεγκτής αέργου δίνει εντολή απορρόφησης αέργου ισχύος για να αυξηθεί/διατηρηθεί η τάση. Η σχέση αύξησης τάσης-αύξησης απορρόφησης αέργου είναι γραμμική.
- Αν η τάση του ΣΚΣ βρίσκεται εντός της νεκρής ζώνης, τότε η διεσπαρμένη παραγωγή λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Η μορφή της χαρακτηριστικής  $Q(V)$  παρουσιάζεται στο Σχ. 1.21



Σχ. 1. 21 Τυπική χαρακτηριστική Q(V)

## 1.9 Πρόγραμμα Προσομοίωσης WPSTAB

Το πρόγραμμα WPSTAB χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μακροπρόθεσμη κλίμακα (από μερικά λεπτά της ώρας έως μερικές ώρες), εστιάζοντας στην ακριβή παράσταση των μηχανισμών και διατάξεων του συστήματος που προκαλούν το πρόβλημα της αστάθειας τάσης. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο οιονεί στατικών μεταβολών για να παραστήσει τα γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα με τις αντίστοιχες εξισώσεις ισορροπίας. Τα αργά μεταβατικά φαινόμενα από την άλλη, παριστάνονται συνήθως με εξισώσεις διαφορών.

### 1.9.1 Προσδιορισμός σημείων ισορροπίας

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (1.28) και (1.29), οι εξισώσεις ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων αντικαθιστούν τις εξισώσεις ροής φορτίου με ένα διευρυμένο σύστημα εξισώσεων. Η επίλυση των εξισώσεων (1.28)-(1.29) στο WPSTAB γίνεται με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson [11].

Ένα σημείο ισορροπίας προκύπτει επιλύοντας επαναληπτικά μια ακολουθία γραμμικών συστημάτων της μορφής:

$$J_R \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{(j+1)} - \mathbf{x}^{(j)} \\ \mathbf{y}^{(j+1)} - \mathbf{y}^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^{(j)} \\ \mathbf{g}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

Από τις εξισώσεις (1.28),(1.29) για δεδομένα  $z_c$  και  $z_d$ , το διάνυσμα  $\mathbf{x}$  των μεταβλητών κατάστασης στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, αποτελείται από τις γωνίες δρομέα των σύγχρονων γεννητριών, ενώ



το διάνυσμα  $y$  των αλγεβρικών μεταβλητών αποτελείται από τα μέτρα  $V$ , τις φασικές γωνίες  $\theta$  των τάσεων των ζυγών του συστήματος καθώς και τη συχνότητα του συστήματος,  $J_R$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας και  $g$  και  $f$  οι εξισώσεις ισορροπίας που αντιστοιχούν στην ενεργό ισχύ, την άεργο ισχύ, την ενεργό ισχύ των γεννητριών και των κινητήρων και το γενικό ισοζύγιο ισχύος του συστήματος. Με τον δείκτη  $j$  συμβολίζονται οι τιμές των μεταβλητών και των συναρτήσεων στην  $j$ -ανακύκλωση. Το γραμμικό σύστημα (1.41) επιλύεται με τη μέθοδο της ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την τριγωνική παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα  $J_R$ , η οποία πραγματοποιείται με τη μέθοδο απαλοιφής Gauss.

Η επίλυση στο WPSTAB γίνεται χρησιμοποιώντας την τεχνική των αραιών πινάκων, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του  $J_R$  είναι ο πίνακας της ροής φορτίου (1.28), ο οποίος είναι εξαιρετικά αραιός.

Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών προέρχονται είτε από επίλυση του προβλήματος αρχικών συνθηκών, είτε από τις προηγούμενες τιμές των αργών μεταβλητών κατάστασης  $z_c$ ,  $z_d$  κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

## 1.9.2 Προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα

Η διαδικασία προσομοίωση έχει ως εξής: Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ολοκληρώνονται οι διαφορικές εξισώσεις στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ενώ παράλληλα ανανεώνονται τα δεδομένα του συστήματος κάθε φορά που συμβαίνει μια αλλαγή σε διακριτές μεταβλητές ή σε παραμέτρους του συστήματος. Εάν δεν υπάρχουν μακροπρόθεσμες διαφορικές εξισώσεις (1.33), η επίλυση απλοποιείται.

Η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (συνθήκες ισορροπίας (1.31) και αλγεβρικές εξισώσεις (1.32)) πραγματοποιείται όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Οι διατάξεις του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα που παριστάνονται είναι τα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο των μετασχηματιστών και οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης των στατών πυκνωτών.:

Το χρονικό βήμα  $\Delta t$  μετάβασης από τη μια χρονική στιγμή στην άλλη επιλέγεται έτσι ώστε:

- όλες οι διακριτές μεταβάσεις, οι οποίες εκφράζονται με τις εξισώσεις διαφορών (1.34) να λαμβάνουν χώρα σε χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια του  $\Delta t$ , ώστε να εξασφαλίζεται η χρονική ακρίβεια των μεταβάσεων.

- να είναι υποπολλαπλάσιο της μικρότερης σταθεράς χρόνου των διαφορικών εξισώσεων (1.33) για να εξασφαλίζει την ευστάθεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης, στην περίπτωση που παριστάνονται μακροπρόθεσμες δυναμικές με διαφορικές εξισώσεις [11].

Η ανανέωση του Ιακωβιανού πίνακα  $J_R$  κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη κλίμακα πραγματοποιείται μόνο όταν:

- Αλλάζει η τοπολογία του δικτύου (άνοιγμα, κλείσιμο διακοπών).
- Η σύγκλιση δεν έχει επιτευχθεί στις προηγούμενες 5 ανακυκλώσεις.

- Συμβαίνει μεταβολή στο σύστημα.
- Συμβαίνει μεγάλη διαταραχή στις παραγωγές ή τα φορτία του συστήματος.

Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται υπολογιστικός χρόνος, δεδομένου ότι η δυσκολότερη υπολογιστικά διαδικασία είναι η τριγωνική παραγοντοποίηση του  $J_R$ .

## 1.10 Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετήσει τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάρκων προκειμένου αυτά να ενταχθούν στην ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσεως. Ειδικότερα η έμφαση δίνεται στο πώς μπορούν να παραχθούν χρονοσειρές φωτοβολταϊκής παραγωγής από μετεωρολογικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και πώς αυτές οι χρονοσειρές μεταβλητής ηλεκτροπαραγωγής συνδυαζόμενες και με τον έλεγχο των μετατροπέων ηλεκτρικής ισχύος συμβάλουν στην μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης.

Η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται αρχικά στην ανάλυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων και στη συνέχεια στην επίδραση και τη συνεισφορά που μπορούν να έχουν στη βελτίωση της ευστάθειας τάσης. Το πρώτο θεωρητικό σκέλος της εργασίας, πέραν της εισαγωγής απαραίτητων εννοιών, αφορά κυρίως την κατανόηση των φωτοδιόδων στις οποίες στηρίζεται η κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων και την μαθηματική ανάλυση των ισοδύναμων που προκύπτουν. Επιπρόσθετα αναλύεται το πρόβλημα της μέγιστης απολαβής ισχύος μέσω παθητικών μέσων και αλγορίθμων.

Το δεύτερο σκέλος της εργασίας αφορά τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με βάση τις έννοιες του πρώτου σκέλους. Αρχικά με τη χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB προσομοιώνεται φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο κλιμακώνεται στη συνέχεια σε φωτοβολταϊκό πάρκο και αλγόριθμος απολαβής μέγιστης ισχύος με δυνατότητες παρακολούθησής των βημάτων εκτέλεσής του.

Στη συνέχεια, στο πρόγραμμα μακροπρόθεσμης προσομοίωσης WPSTAB προσομοιώνεται ακτινικό δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης, στο οποίο εντάσσεται διεσπαρμένη φωτοβολταϊκή παραγωγή και είναι συνδεδεμένο μέσω μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ με ακτινικό δίκτυο μεταφοράς Υψηλής Τάσης.

Στο ανωτέρω σύστημα πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με συγκεκριμένη διαταραχή για διαφορετικές ρυθμίσεις των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος που συνδέονται στα φωτοβολταϊκά, λαμβάνοντας υπόψιν διαφορετικές στάθμες παραγωγής (σταθερές και μεταβαλλόμενες σύμφωνα με τις προσομοιώσεις μέγιστης απολαβής ισχύος στο MATLAB) και μελετάται η επίδραση των αλλαγών αυτών στην ευστάθεια τάσης και στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ.

Τέλος, δοκιμάζεται η βελτίωση της ευστάθειας τάσης με την ένταξη συστοιχίας πυκνωτών και με τη μείωση της τάση του δικτύου διανομής με στόχο να αυξηθεί η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς (MMI) στο απομακρυσμένο φορτίο.

Η διάρθρωση της εργασίας είναι η εξής:

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο έγινε εισαγωγή σε θέματα που αφορούν στην οργάνωση και τη δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα έγινε αναφορά στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και συγκεκριμένα στα φωτοβολταϊκά συστήματα και στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούν. Συνοψίστηκαν οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης, και ορίστηκε το πρόβλημα της αστάθειας τάσης. Για καλύτερη κατανόηση, αναλύθηκαν τα όρια Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος σε συνδυασμό με τις καμπύλες PV του δικτύου και των φορτίων. Τέλος παρουσιάστηκε το δυναμικό μοντέλο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, WPSTAB.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται με λεπτομέρεια η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των διόδων που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή φωτοβολταϊκών συστημάτων, και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο αξιοποιούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο για τη λειτουργία φωτοδίοδου. Επιπρόσθετα δίνονται ορισμοί και πραγματοποιείται βασική μαθηματική ανάλυση για τη βέλτιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και των γωνιών που σχηματίζονται μεταξύ των ακτινών του ηλίου και των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο πραγματοποιείται ηλεκτρική ανάλυση των ισοδύναμων κυκλωμάτων για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Παρουσιάζονται διαφορετικά ισοδύναμα μοντέλα μαζί με τις μαθηματικές εξισώσεις που τα χαρακτηρίζουν, όπως και οι χαρακτηριστικές καμπύλες που προκύπτουν από τις εξισώσεις αυτές. Σημειώνεται ότι οι χαρακτηριστικές καμπύλες εξάγονται από το MATLAB με διαδικασίες που περιγράφονται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Επιπρόσθετα, γίνεται παρουσίαση των διαφορετικών συνδεσμολογιών φωτοβολταϊκών στοιχείων με σκοπό τη σύνθεση φωτοβολταϊκών πλαισίων/ομάδας πλαισίων και πάρκου. Τέλος, γίνεται αναφορά στο πρόβλημα μέγιστης απολαβής ισχύος και αναφέρονται έμμεσοι και άμεσοι τρόποι επίλυσής του.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αξιοποιούνται οι μαθηματικές εξισώσεις του προηγούμενου κεφαλαίου για τη συγγραφή κώδικα σε MATLAB με στόχους την εξαγωγή των χαρακτηριστικών καμπυλών, χρονοσειράς ισχύος φωτοβολταϊκού πάρκου βασισμένη σε πραγματικά στοιχεία ηλιακής ακτινοβολίας και αλγορίθμου παρακολούθησης μέγιστης απολαβής ισχύος «Διαταραχής και Παρακολούθησης» (Perturb and Observe), καθώς και στοιχεία-γραφήματα που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο του.

Τέλος, στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, με τη χρήση του WPSTAB προσομοιώνεται ακτινικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας με ενταγμένη διεσπαρμένη φωτοβολταϊκή παραγωγή και μελετάται η επίδρασή της για διαφορετικές ρυθμίσεις των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος και ΦΒ παραγωγής στην ευστάθεια τάσης, όπως προκύπτει από τον προσδιορισμό της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος σε απομακρυσμένο ζυγό φορτίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά κρίσιμες μεταβλητές και τελικά συγκρίνονται όλες οι λειτουργίες μεταξύ τους ως προς την επιτυγχανόμενη κάθε φορά μέγιστη μεταφορά ισχύος στο απομακρυσμένο φορτίο. Τέλος, δοκιμάστηκε ως μέτρο αποτροπής αστάθειας η ένταξη συστοιχίας πυκνωτών και στη συνέχεια η μείωση της τάσεως διανομής και πραγματοποιείται σύγκριση ως προς το όριο ευστάθειας με τις αντίστοιχες αρχικές προσομοιώσεις.



## 2. Δίοδοι, φωτοβολταϊκά στοιχεία και ηλιακή ακτινοβολία

### 2.1 Βασική Ανάλυση στα υλικά

Στις φωτοβολταϊκές διατάξεις, χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον ημιαγωγοί κρυσταλλικού πυριτίου. Για την μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, γίνεται εκμετάλλευση κάποιων βασικών ιδιοτήτων, οι οποίες θα εξηγηθούν σε αυτή την ενότητα. Αρχικά δίνονται κάποιοι ορισμοί που είναι απαραίτητοι για την κατανόηση της παραπάνω μετατροπής σύμφωνα με [15], [16], [17].

#### 2.1.1 Ενεργειακή ανάλυση

**Ενεργειακές στάθμες:** Ένα οποιοδήποτε άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από αυτόν. Τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν καθορισμένα ενεργειακά στάδια στα οποία μπορούν να βρίσκονται. Τα στάδια αυτά ονομάζονται ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων.

**Ενεργειακές ζώνες:** Οι ενεργειακές ζώνες είναι για τα σύνθετα υλικά (συστοιχίες ατόμων) ότι οι ενεργειακές στάθμες για τα άτομα. Όλα τα κρυσταλλικά στερεά έχουν τα ηλεκτρόνια τους σε σαφώς καθορισμένες ενεργειακές ζώνες, δηλαδή τροχιές με συγκεκριμένη ενέργεια. Ένα κρυσταλλικό στερεό για φωτοβολταϊκή διάταξη αποτελείται από περιοδική συστοιχία ατόμων πυριτίου (Si) σε συγκεκριμένες αποστάσεις  $r$  μεταξύ τους. Η ανάλυση των στερεών αυτών πραγματοποιείται εξετάζοντας την αλληλεπίδραση των εξωτερικών ηλεκτρονίων τους, δηλαδή αυτών που ανήκουν στην υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, για διάφορες αποστάσεις  $r$ .

Για μεγάλες αποστάσεις, το κάθε άτομο πυριτίου έχει διακριτές ενεργειακές στάθμες τροχίων, καθώς δεν αλληλοεπιδρά με τους απομακρυσμένους γείτονές του. Καθώς η απόσταση ελαττώνεται, οι υπάρχουσες στάθμες διευρύνονται σε ζώνες. Για κάποια κρίσιμη απόσταση  $r_0$ , οι ζώνες που προκύπτουν διαταράσσονται ενεργειακά και οι διακριτές ατομικές στάθμες χάνουν την ταυτότητά τους. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υβριδισμός, και δημιουργεί τις παρακάτω ενεργειακές ζώνες στο υλικό.

- **Ζώνη σθένους (Valance band):** Η ζώνη σθένους είναι η ενεργειακά κατώτερη ζώνη που δημιουργείται, και η μέγιστη ενέργεια που απαιτείται για να ανήκει κάποιο ηλεκτρόνιο σε αυτή συμβολίζεται  $E_v$ . Εμπεριέχει στάθμες που βρίσκονται στις εξωτερικές στοιβάδες των ατόμων του πυριτίου. Τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αυτή συμβάλλουν στη δημιουργία χημικών δεσμών του κρυστάλλου [14], [15].
- **Ζώνη αγωγιμότητας (Conduction band):** Η ζώνη αγωγιμότητας είναι η ενεργειακά ανώτερη ζώνη που δημιουργείται, και η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να ανήκει

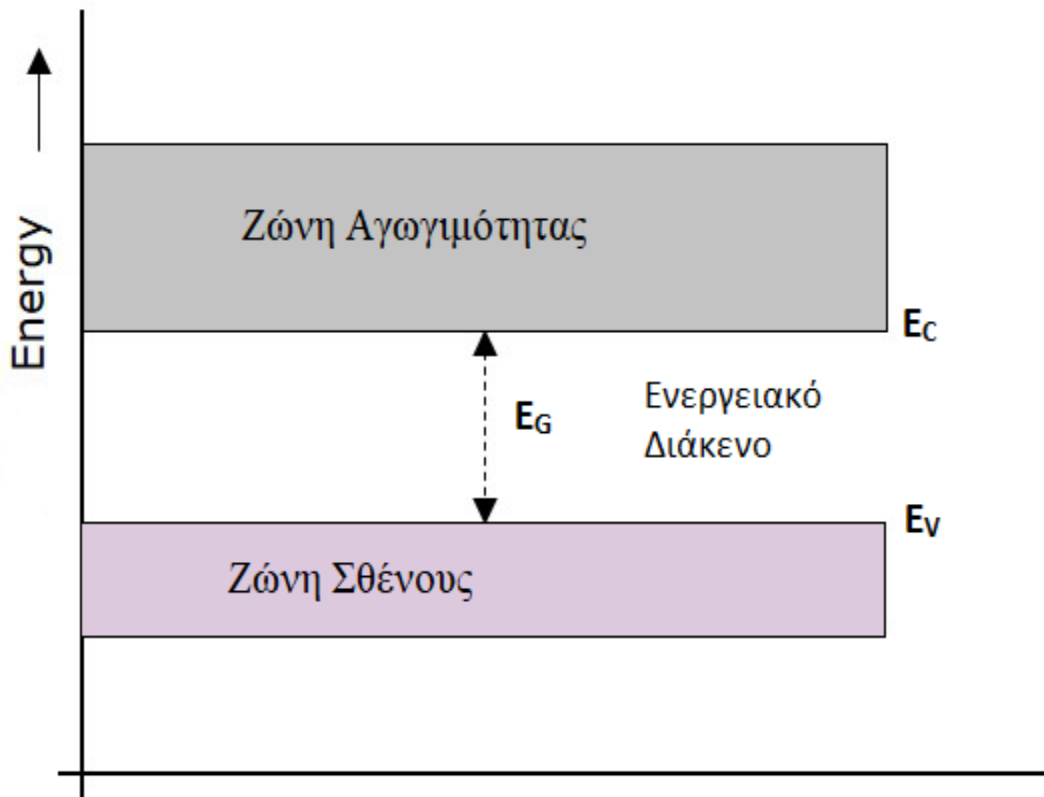
κάποιο ηλεκτρόνια συμβολίζεται  $E_C$ . Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρόνια που ανήκουν στη ζώνη αυτή είναι ελεύθερα να κινούνται [14], [15].

- **Ενεργειακό Διάκενο (Energy gap):** Το ενεργειακό διάκενο είναι η ζώνη που βρίσκεται ανάμεσα στις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας, και αποτελεί πρακτικά την ενέργεια που χρειάζεται κάποιο ηλεκτρόνια για να μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας [14], [15]. Η ενέργεια διακένου  $E_G$  υπολογίζεται ως η διαφορά της ελάχιστης ενέργειας ζώνης αγωγιμότητας με τη μέγιστη ενέργεια της ζώνης σθένους, δηλαδή

$$E_G = E_C - E_V \quad (1.1)$$

**Πλήρης ζώνη:** Μια ζώνη είναι πλήρης όταν δεν υπάρχουν υψηλότερες ενεργειακές στάθμες στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν ηλεκτρόνια. Μια πλήρης ζώνη σθένους προφανώς δεν μπορεί να συντελέσει στην αγωγιμότητα ενός υλικού.

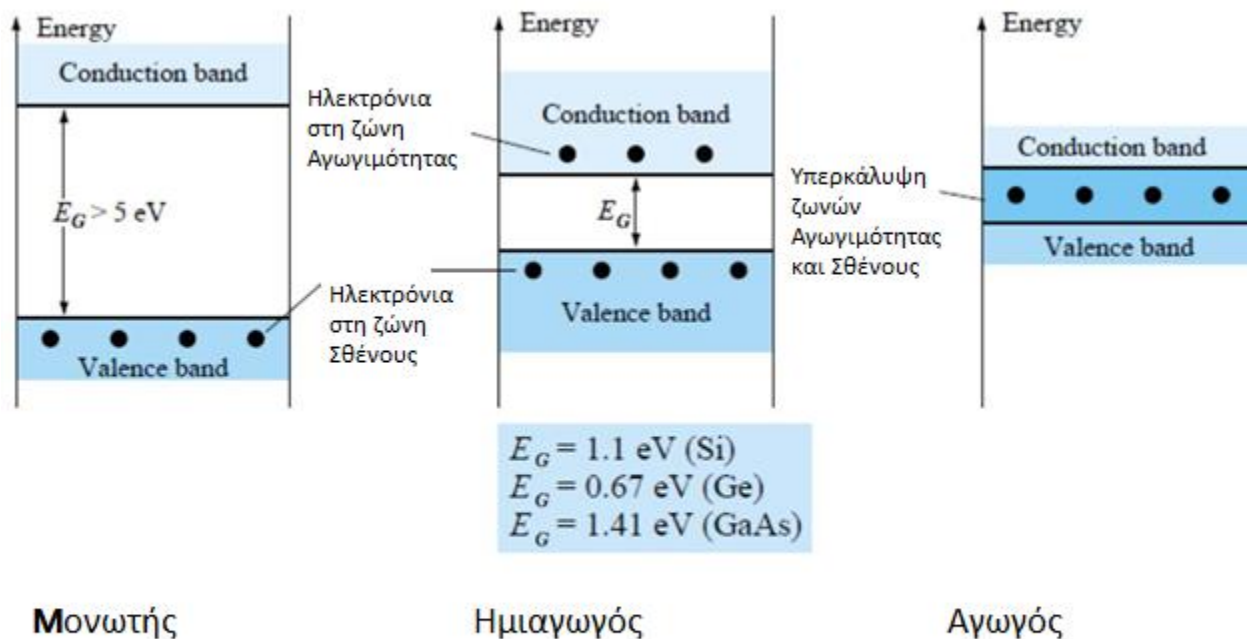
Για την ύπαρξη αγωγιμότητας θα πρέπει είτε να τοποθετηθούν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας (τα οποία είναι αναγκαστικά ελεύθερα) ή να αφαιρεθούν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους, αφήνοντας κάποιες στάθμες κενές. Η απουσία ηλεκτρονίων δρα ως φορέας θετικού φορτίου, και ονομάζεται οπή [14], [15].



Σχ. 2. 1 Ενεργειακές ζώνες υλικών

## 2.1.2 Είδη Υλικών

Τα κρυσταλλικά στερεά χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τις ηλεκτρικές ιδιότητες που έχουν. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι μονωτές (insulators), οι ημιαγωγοί (semi-conductors) και οι αγωγοί (conductors, συνήθως μέταλλα). Οι διαφορές μεταξύ τους οφείλονται στις διαφορετικές ενεργειακές στάθμες  $E_C$ ,  $E_V$  και  $E_G$  που τις διακρίνει, οι οποίες φαίνονται και στο Σχήμα 2.2.



Σχ. 2. 2 Ενεργειακά διαγράμματα για μονωτή, ημιαγωγό και αγωγό

**Μονωτές:** Οι μονωτές, όπως και οι ημιαγωγοί έχουν ξεκάθαρες ζώνες σθένους και αγωγιμότητας, με τη διαφορά ότι η τιμή του διακένου που θα πρέπει να ξεπεράσει ένα ηλεκτρόνιο ώστε να μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας είναι τόσο μεγάλη που είναι πρακτικά αδύνατο. Η απαγορευτική τιμή του διακένου εξασφαλίζει τη μη αγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, που ως γνωστόν είναι η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρονίων [15], [16].

**Ημιαγωγοί:** Στη κατηγορία αυτή έχουμε υλικά τα οποία είναι εν δυνάμει αγωγοί εφόσον φορείς από τη πλήρη ζώνη σθένους λάβουν αρκετή ενέργεια ώστε να μεταβούν στην κενή ζώνη αγωγιμότητας. Το διάκενο είναι υπαρκτό, αλλά όχι απαγορευτικό (η τιμή του οποίου εξαρτάται

από το υλικό). Για να ενταχθεί κάποιο υλικό στη κατηγορία αυτή είναι απαραίτητο η τιμή του διακένου να βρίσκεται ανάμεσα στην ελάχιστη τιμή  $0.2\text{eV}$  και στη μέγιστη τιμή  $2.5\text{eV}$ . Οι ημιαγωγοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, στους ημιαγωγούς τύπου n και στους ημιαγωγούς τύπου p [15], [16].

**Ημιαγωγός τύπου n:** Ημιαγωγός όπου για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας, ο αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των ελεύθερων οπών ονομάζεται ημιαγωγός τύπου n. Για τον λόγο αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ονομάζονται φορείς πλειονότητας ενώ οι οπές φορείς μειονότητας, και η δημιουργία ρεύματος βασίζεται στην κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων [15], [17].

**Ημιαγωγός τύπου p:** Αντίθετα με τον ημιαγωγό τύπου n, στον ημιαγωγό τύπου p οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές και οι φορείς μειονότητας τα ηλεκτρόνια. Η δημιουργία ρεύματος βασίζεται στη μετακίνηση των οπών που δημιουργεί αναγκαστική κίνηση ηλεκτρονίων με αντίθετη φορά από ότι στον ημιαγωγό τύπου n για ίδια πολικότητα εξωτερικής τάσης [15], [17].

**Αγωγοί:** Όπως φαίνεται από το σχήμα, για τη κατηγορία των αγωγών έχουμε εύκολη αγωγή καθώς υπάρχει επικάλυψη ζωνών. Αυτό συμβαίνει καθώς κάποιο ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας χωρίς την απαίτηση επιπλέον ενέργειας [15], [16].

### 2.1.3 Στατιστική Ανάλυση αριθμού φορέων σε μια ζώνη

Προϋπόθεση παρουσιαστεί η στατιστική ανάλυση, αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των φορέων εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία και ο αριθμός και το είδος των προσμείξεων. Οι παράγοντες αυτοί εμπεριέχονται είτε άμεσα στους τύπους (όπως η θερμοκρασία  $T$ ) είτε έμμεσα μέσω των τιμών των ενεργειακών σταθμών  $E_C$ ,  $E_V$  και  $E_G$  που εξαρτώνται από το ίδιο το υλικό. Τέλος, η ανάλυση γίνεται για κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας [18], [19].

**Θερμοδυναμική ισορροπία:** Θερμοδυναμική ισορροπία είναι κατάσταση σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα ή και συνδεδεμένη συστοιχία θερμοδυναμικών συστημάτων, κατά την οποία δεν υπάρχουν ροές μάζας ή ενέργειας σε μακροσκοπικό επίπεδο, καθώς και δεν υπάρχουν μεταβολές στις ιδιότητες του συστήματος αυτού. Στη πράξη, σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. θεωρούμε θερμοδυναμική ισορροπία όταν δεν υπάρχει ηλιακή διέγερση σε κάποιο μήκος χρόνου. Η ανάλυση αυτή γίνεται κατά τη κατασκευή του για καθορισμό παραμέτρων λειτουργίας.

**Ενεργός μάζα  $m^*$ :** Σε ένα τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα, δεν προκαλούνται σκεδάσεις φορέων. Η επίδραση του πλέγματος στις σκεδάσεις έγκειται στην αλλαγή της φαινόμενης μάζας των φορέων, οπότε και η μάζα ηρεμίας  $m$  αντικαθίσταται με την ενεργό μάζα  $m^*$ , η οποία περιγράφει τη μεταβολή της μάζας των φορέων λόγω σκεδάσεων.

**Στάθμη Fermi  $E_F$ :** Η στάθμη Fermi είναι μαθηματική έννοια και ορίζεται ως η ενεργειακή στάθμη στην οποία η πιθανότητα να καταλαμβάνεται από ηλεκτρόνιο είναι ίση με 50%, υπό τη προϋπόθεση ότι τέτοια κβαντική στάθμη μπορεί να καταληφθεί από ηλεκτρόνιο. Στους παρακάτω

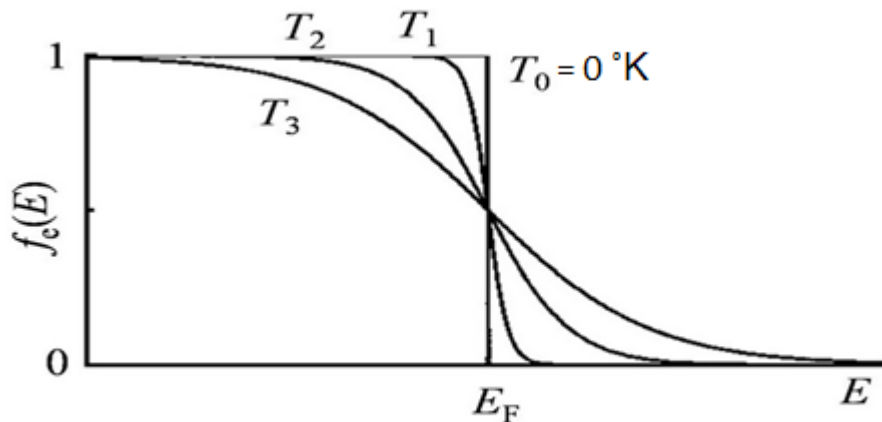


τύπους χρησιμοποιείται η τιμή της στάθμης Fermi με βάση τον ορισμό της, ακόμα και αν τέτοια στάθμη δε παρουσιάζεται στο υλικό προς μελέτη. Σε σύστημα υπό θερμοδυναμική ισορροπία, η στάθμη Fermi όλων των υποστοιχείων του γίνεται ενιαία.

**Συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac  $F(E)$ :** Εκφράζει τη πιθανότητα η στάθμη ενέργειας  $E$  να είναι κατειλημμένη από ένα ηλεκτρόνιο, και δίνεται από τον τύπο:

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{(E - E_F)}{kT}\right)} \quad (2.1)$$

Όπου  $k$  η σταθερά Boltzmann και  $T$  η θερμοκρασία σε Kelvin.



Σχ. 2. 3 Γραφική αναπαράσταση της  $F(E)$  για  $T_3 > T_2 > T_1 > T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{K}$

Πρακτικά η συνάρτηση χρησιμοποιείται για περιγραφή κατανομής ηλεκτρονίων στις διάφορες ενεργειακές στάθμες που μας ενδιαφέρουν. Η μελέτη γίνεται για δεδομένη στάθμη Fermi, η οποία εξαρτάται από το υλικό. Έτσι, από τη συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac προκύπτει ομάδα εξισώσεων στην οποία αναφερόμαστε για τη μελέτη των σταθμών ενός υλικού [18].

#### 2.1.4 Μεταφορά ηλεκτρικών φορέων

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει ανάλυση των βασικών μηχανισμών που επιφέρουν μεταφορά ηλεκτρικών φορέων. Λόγω της μεταφοράς αυτής, το υλικό προς μελέτη δε βρίσκεται πια σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

**Θερμική κίνηση:** Η θερμική κίνηση προκαλείται από ολίσθηση ηλεκτρονίων λόγω σκεδάσεων εντός του υλικού, και πραγματοποιείται χωρίς την ανάγκη εφαρμογής κάποιου εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Τα ηλεκτρόνια έχουν υψηλή ταχύτητα η οποία προσδιορίζεται από τον νόμο ισοκατανομής (equipartition law) μεταξύ θερμικής ενέργειας εντός του κρυσταλλικού πλέγματος και της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων. Η μέση θερμική ταχύτητα εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία και την ενεργό μάζα των φορέων και έχει τυχαίο προσανατολισμό. Για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι υψηλές θερμοκρασίες επιφέρουν έντονες ταλαντώσεις που προκαλούν μείωση της κινητικότητας των φορέων [18].

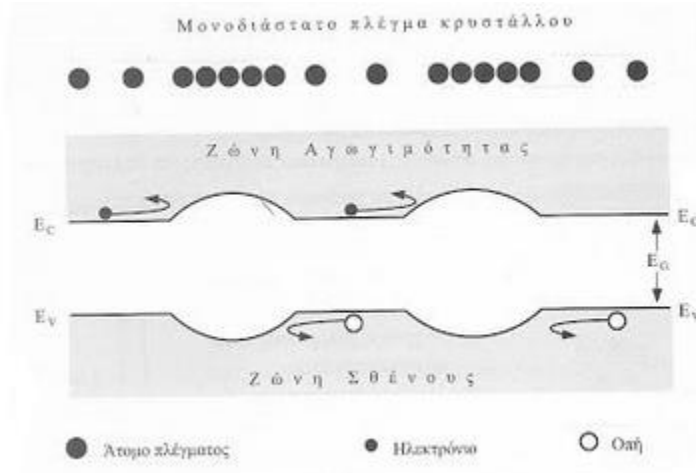
**Εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου  $\vec{E}$  :** Το πεδίο επιβάλλει μια συγκριτικά μικρότερη αλλά προσανατολισμένη ταχύτητα ολίσθησης  $V_d$ , η διεύθυνση της οποίας εξαρτάται από το ηλεκτρικό πεδίο, που προστίθεται διανυσματικά στη τυχαία θερμική κίνηση. Πέρα από τον προσανατολισμό, η ένταση του πεδίου επηρεάζει και το μέτρο της ταχύτητας ολίσθησης  $V_d$ . Αύξηση της έντασης προκαλεί αύξηση του μέτρου της ταχύτητας ολίσθησης, αλλά και αύξηση των συγκρούσεων μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των κέντρων σκέδασης, κάτι που περιορίζει τη μέγιστη ταχύτητα ολίσθησης  $V_{dmax}$ . Είναι σημαντικό το γεγονός ότι οι πλειοψηφία των κρούσεων αυτών είναι ελαστικές, δηλαδή υπάρχει μικρή μεταβολή κινητικής ενέργειας και μεγάλη μεταβολή της κατεύθυνσης. Καθώς τα τυχαία θερμικά φαινόμενα τείνουν να αλληλοεξουδετερώνονται στη κλίμακα όλου του υλικού, η ταχύτητα ολίσθησης  $V_d$  είναι καθοριστικός παράγοντας περιγραφής διαδικασιών σκέδασης, το οποίο σημαίνει ότι αποτελεί καθοριστικό συντελεστή καθορισμού του ρεύματος που εμφανίζεται λόγω της κίνησης των ηλεκτρονίων [15], [18].

**Κινητικότητα φορέων  $\mu$ :** Η κινητικότητα των ηλεκτρικών φορέων εξαρτάται άμεσα από την ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, γεγονός στο οποίο βασίζεται η κατασκευή ημιαγωγικών διατάξεων. Η κινητικότητα δίνεται από τον γενικό τύπο [18]:

$$\mu = -\frac{V_d}{E} \quad (2.2)$$

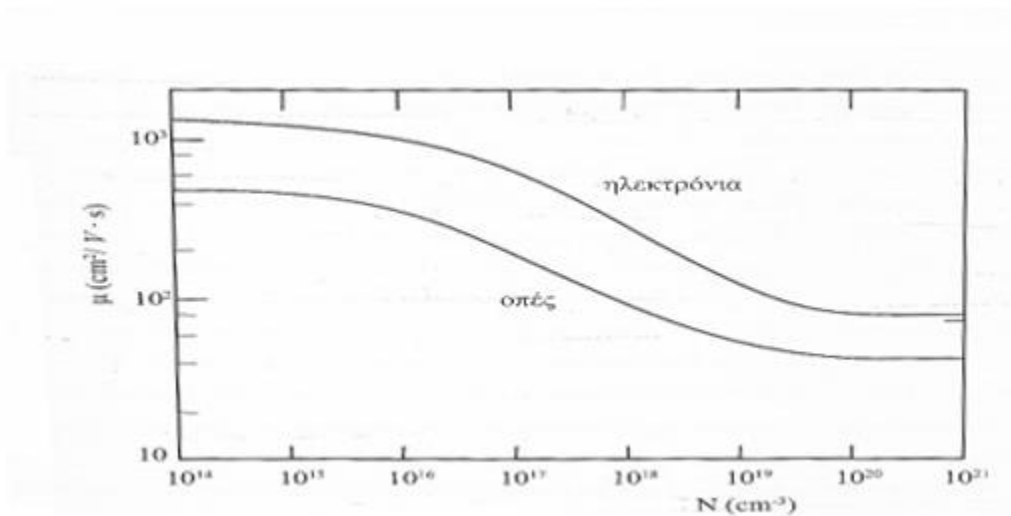
### 2.1.5 Μηχανισμοί σκέδασης

**Σκέδαση πλέγματος:** Οι ηλεκτρικοί φορείς σκεδάζονται λόγω των ταλαντώσεων του πλέγματος που φέρει ως αποτέλεσμα την εναλλακτική αύξηση-μείωση των ατομικών αποστάσεων, που με τη σειρά του προκαλεί τοπική αλλοίωση στο ενεργειακό διάκενο. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση των ατομικών αποστάσεων προξενεί αύξηση του ενεργειακού διάκενου, και αντίστοιχα η αύξηση των αποστάσεων προκαλεί μείωση του διακένου. Τέλος, παρατηρείται ότι οι οπές συμπεριφέρονται ως “φυσαλίδες” οι οποίες εμφανίζουν ανώτατο ενεργειακό όριο στη κορυφή της ζώνης σθένους. Πολύ σημαντικό στοιχείο για τη μελέτη της πλεγματικής σκέδασης αποτελεί το γεγονός ότι το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο σε υψηλές θερμοκρασίες [18].

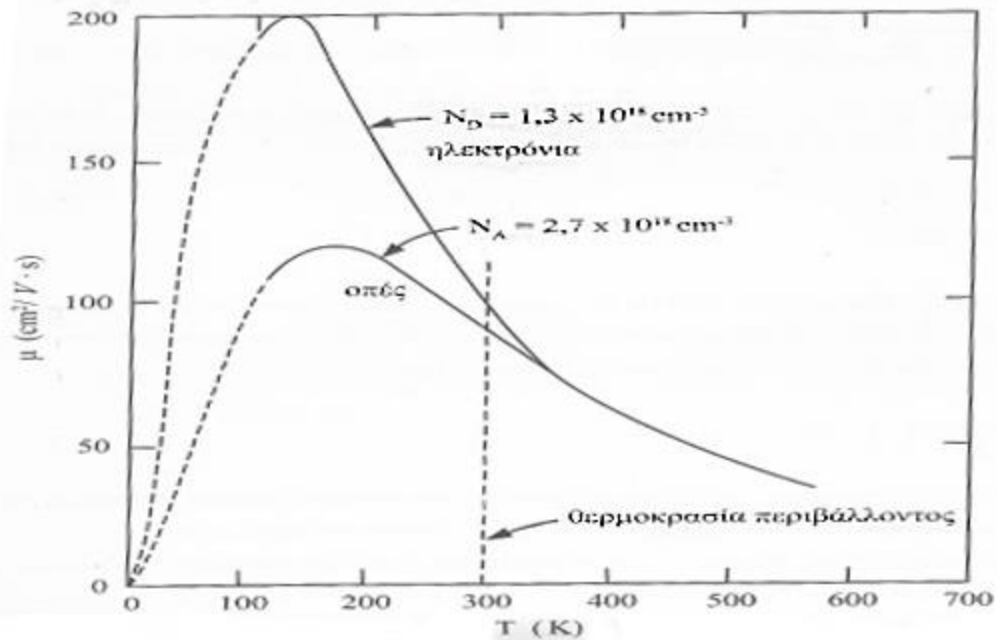


Σχ. 2. 4 Οι καμπύλες στα άκρα των ενεργειακών ζωνών παριστάνουν φράγματα δυναμικής ενέργειας για τους φορείς, επιφέροντας σκέδαση

**Σκέδαση ιοντισμένων προσμίξεων (Rutherford):** Στα μη ιδανικά υλικά, παρουσιάζονται ιοντισμένες προσμίξεις λόγω έντονης νόθευσης των ημιαγωγικών υλικών. Ως αποτέλεσμα, οι ηλεκτρικοί φορείς υπόκεινται σε σημαντικές μεταβολές της διεύθυνσης της κίνησής τους και λόγω του γεγονότος αυτού εισάγονται βαθιές ενεργειακές στάθμες στο διάκενο. Στα σχήματα 2.5-2.6 παρουσιάζονται γραφικά οι επιδράσεις του μηχανισμού αυτού θεωρώντας σταθερή θερμοκρασία  $T$  και σταθερή συγκέντρωση ιοντισμένων προσμίξεων αντίστοιχα σε μονοκρυσταλικό πυρίτιο [18].



Σχ. 2. 5 Κινητικότητα φορέων για διάφορες τιμές συγκεντρώσεων προσμίξεων θεωρώντας σταθερή θερμοκρασία  $T$



Σχ. 2. 6 Κινητικότητα φορέων για διάφορες τιμές θερμοκρασίας θεωρώντας σταθερή τιμή συγκέντρωσης ιοντισμένων προσμίξεων N

### 2.1.6 Αγωγιμότητα ημιαγωγού

Η αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού λόγω ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας εξαρτάται από την ειδική αγωγιμότητα του υλικού και από το επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Στη περίπτωση όπου στην αγωγιμότητα συμβάλουν και οπές, η σχέση περιπλέκεται καθώς συμβάλει στην ειδική αγωγιμότητα του υλικού η συγκέντρωση και η κινητικότητα των οπών. Η μεταβλητή που εκφράζει την αγωγιμότητα του υλικού δεδομένης συμβολής ηλεκτρονίων και οπών χαρακτηρίζεται ως  $\sigma_{ολ}$ .

Στη βιομηχανία ημιαγωγών είναι πολύ σημαντική και η τιμή της ειδικής αντίστασης  $\rho$ , η τιμή της οποίας δίνεται από την σχέση (2.3). Η αντίσταση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως ως σημείο αναφοράς (benchmark) για τις διάφορες δοκιμές.

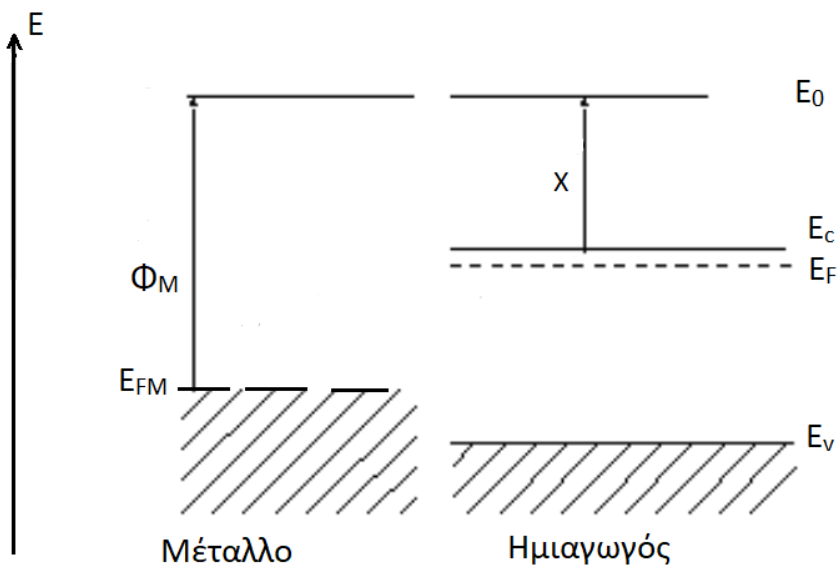
$$\rho = 1/\sigma_{ολ} \quad (2.3)$$

## 2.2 Δίοδοι

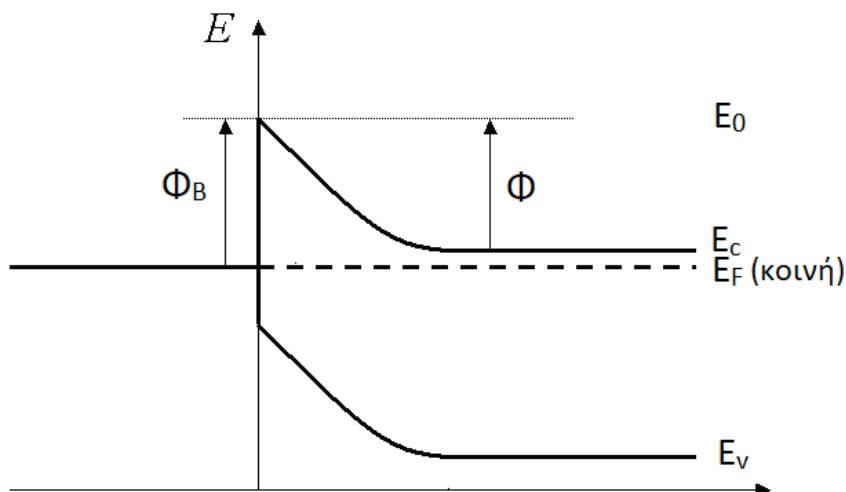
Οι ηλεκτρονικές διατάξεις εξαρτώνται από την ύπαρξη εσωτερικών φραγμάτων δυναμικού και από τη δυνατότητά τους να τα μεταβάλλουν κατά την επιβολή εξωτερικής τάσης. Η προέλευσή των φραγμάτων δυναμικού βασίζεται στον θεμελιώδη θερμοδυναμικό περιορισμό που οδηγεί τη διάταξη σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σύστημα σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας χαρακτηρίζεται από κοινή στάθμη Fermi.

### 2.2.1 Δίοδος Schottky

Η δίοδος Schottky είναι πρακτικά ένα σύστημα επαφής μετάλλου με ημιαγωγό. Για τη κατανόηση της παραπάνω έννοιας, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση για τη κατάσταση της διόδου προ επαφής του μετάλλου με τον ημιαγωγό και μετά από την επαφή τους, αφού επέλθει θερμοδυναμική ισορροπία. Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τα ενεργειακά διαγράμματα μετάλλου και ημιαγωγού του σχήματος 2.2.



Σχ. 2. 7 Πριν την επαφή



Σχ. 2. 8 Μετά την επαφή, θερμοδυναμική ισορροπία

Πρίν την επαφή παρατηρούμε ότι το μέταλλο και ο ημιαγωγός έχουν τις δικές τους ενεργειακές στάθμες. Στο Σχήμα 2.7, το  $\Phi_M$  αποτελεί το ελάχιστο έργο εξόδου ηλεκτρικού φορέα για τη μετάβασή του από το μέταλλο στον ημιαγωγό, και υπολογίζεται ως

$$\Phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (2.4)$$

Το μέγεθος  $X$  ονομάζεται ηλεκτροσυγγένεια του ημιαγωγού, και μαζί με το έργο εξόδου καθορίζουν τη τιμή του φράγματος δυναμικού μετά την επαφή. Η τιμή της εξαρτάται από τις ενεργειακές στάθμες του ημιαγωγού και υπολογίζεται ως:

$$X = E_0 - E_C \quad (2.5)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η στάθμη Fermi στα μέταλλα είναι κατά κανόνα χαμηλότερη από αυτές των ημιαγωγών τύπου n, και υψηλότερη από αυτές των ημιαγωγών τύπου p.

Μετά την επαφή, και αφού έχει επέλθει θερμοδυναμική ισορροπία, βλέπουμε στο Σχήμα 2.8 ότι το σύστημα επαφής έχει εμφανίσει κοινή στάθμη Fermi, ένα φράγμα δυναμικού  $\Phi_B$ , το οποίο πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να μεταφερθούν ηλεκτρικοί φορείς από το μέταλλο στον ημιαγωγό, και ένα φράγμα δυναμικού  $\Phi$  το οποίο θα πρέπει να ξεπεράσουν φορείς του ημιαγωγού ώστε να μεταβούν στο μέταλλο. Η φορά μεταφοράς των ηλεκτρικών φορέων καθορίζει την πόλωση της διεπαφής, κάτι που θα αναλυθεί παρακάτω με περισσότερη λεπτομέρεια. Το φράγμα δυναμικού του μετάλλου εξαρτάται καθαρά από το ίδιο το μέταλλο και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Phi_B = \Phi_M - X \quad (2.6)$$

Αντίθετα, το φράγμα δυναμικού του ημιαγωγού εξαρτάται και από την εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση και δίνεται από τον τύπο:

$$\Phi = \Phi_B - qV_{app} \quad (2.7)$$

όπου  $V_{app}$  η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του συστήματος και  $q$  το στοιχειώδες φορτίο των φορέων πλειονότητας [18], [19].

### 2.2.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ιδανική Schottky

Στη κατάσταση μετά την επαφή, πριν την ύπαρξη θερμοδυναμικής ισορροπίας, παρατηρείται μεταφορά ηλεκτρονίων από το υλικό με την υψηλότερη στάθμη Fermi (ημιαγωγός τύπου n) σε αυτό με τη χαμηλότερη (μέταλλο). Τα ηλεκτρόνια αυτά προσκολλούνται στην επιφάνεια του μετάλλου, προσδίδοντάς του αρνητικό φορτίο  $Q_m$  και αφήνουν στον ημιαγωγό περιοχή στην οποία υπάρχουν μόνο ιοντισμένοι δότες. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή απώθησης φορέων και είναι θετικά φορτισμένη με φορτίο  $Q_s = -Q_m$ . Σε περίπτωση ύπαρξης ημιαγωγού τύπου p, οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές. Στη περίπτωση αυτή θα υπάρξει αγωγιμότητα όταν οι οπές υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικού  $\Phi$  και μετά επανασυνδεθούν μόλις βρεθούν στην επιφάνεια του μετάλλου, με θετικό φορτίο  $Q_s$ . Η διευκόλυνση της μεταφοράς φορέων γίνεται μέσω επιβολής κατάλληλα επιλεγμένης εξωτερικής τάσης  $V_{app}$ , που προκαλεί ελάττωση του φράγματος δυναμικού  $\Phi$ . Αφού τα ηλεκτρόνια υπερβούν το φράγμα, βρίσκονται σε περιβάλλον με στάθμη Fermi πολύ χαμηλότερη της ενέργειάς τους. Την επιπλέον αυτή ενέργεια την αποδίδουν με διαδοχική εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέχρι η ενέργειά τους να γίνει ίση με την ενέργεια της στάθμης Fermi του μετάλλου. Η εκπομπή αυτή είναι που προξενεί ρεύμα στη δίοδο [18], [19].

### 2.2.3 Πόλωση Διόδου Schottky

#### Ορθή πόλωση (Forward Bias)

Κατά την ορθή πόλωση, στο σύστημα διεπαφής επιβάλλεται εξωτερική τάση στα άκρα του με το θετικό ηλεκτρόδιο στη πλευρά του μετάλλου και το αρνητικό ηλεκτρόδιο στη πλευρά του ημιαγωγού. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η τάση αυτή μεταβάλλει κατάλληλα το φράγμα δυναμικού ώστε να επιτραπεί η διέλευση ηλεκτρονίων. Στη περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται δύο αντίρροπες συνιστώσες πυκνότητας ρεύματος. Η πρώτη συνιστώσα, η οποία δίνεται από τον τύπο (2.8) και συμβολίζεται ως  $J$ , είναι η βασική και εκφράζει τη κύρια ροή ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό στο μέταλλο, ενώ η δεύτερη συνιστώσα, γνωστή και ως ρεύμα κόρου, έχει αντίθετη φορά και πολύ μικρότερο μέτρο. Το ρεύμα κόρου εμφανίζεται λόγω της θερμικής διέγερσης του ημιαγωγού. Συμβολίζεται ως  $J_s$  και δίνεται από τη σχέση (2.9). Τελικά, στη διάταξη εμφανίζεται συνολικό ρεύμα ίσο με το διανυσματικό άθροισμα των δύο πυκνοτήτων, που παρουσιάζεται στη σχέση (2.10) [18], [19].

$$J = A^*T^2 e^{-\left(\frac{\Phi_b - qV_{app}}{nkT}\right)} \quad (2.8)$$

$$J_S = A^*T^2 e^{-\left(\Phi_b/nkT\right)} \quad (2.9)$$

$$J_{ολ} = J_S \left[ e^{qV_{app}/nkT} - 1 \right] \quad (2.10)$$

Ο όρος  $A^*$  είναι σταθερά που ονομάζεται ενεργός σταθερά Richardson και εξαρτάται από παράγοντες όπως το συνολικό φορτίο των φορέων πλειονότητας και την ενεργό τους μάζα. Επιπλέον, ο όρος  $n$  που εμφανίζεται στις εξισώσεις είναι ο συντελεστής ποιότητας της διόδου, ο οποίος ορίζεται κατά τη κατασκευή της και έχει να κάνει με το μέταλλο και με τον ημιαγωγό. Στην ιδανική δίοδο,  $n=1$  [18], [19].

Τέλος, σημαντική λεπτομέρεια αποτελεί το γεγονός ότι η βασική συνιστώσα ρεύματος εξαρτάται και από την εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση  $V_{app}$ , ενώ το ρεύμα κόρου εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του μετάλλου (που συνιστούν συγκεκριμένη τιμή φράγματος δυναμικού  $\Phi_b$ ) και από τη θερμοκρασία [19].

### Ανάστροφη πόλωση (Reverse Bias)

Κατά την ανάστροφη πόλωση, η πολικότητα της εξωτερικής τάσης  $V_{app}$  είναι αντίστροφη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συνιστώσα  $J_1$  να λάβει τιμή αρκετές τάξεις μικρότερη σε σχέση με το ρεύμα κόρου. Το ρεύμα κόρου, καθώς δεν εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση αλλά μόνο από το υλικό του μετάλλου, παραμένει ίδιο με πριν. Τελικά, στη κατάσταση ανάστροφης πόλωσης η δίοδος διέρχεται πρακτικά μόνο από το ρεύμα κόρου με φορά αντίρροπη από τη βασική συνιστώσα ρεύματος στη περίπτωση της ορθής πόλωσης [18], [19].

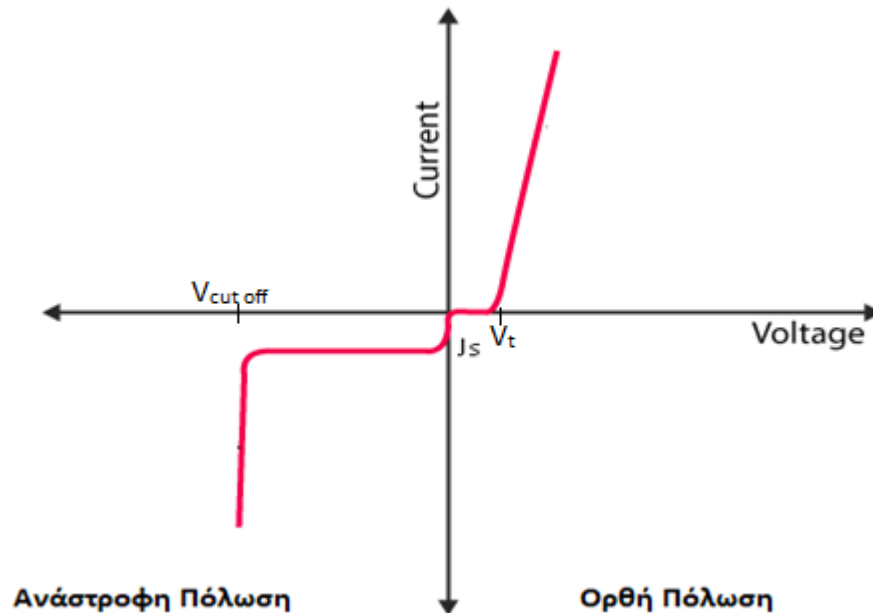
$$J_{ολ} = J_S = A^*T^2 e^{-\left(\Phi_b/nkT\right)} \quad (2.11)$$

### 2.2.4 Χαρακτηριστική καμπύλη Ρεύματος-Τάσης (I-V)

Με βάση τις εξισώσεις (2.10) για την ορθή πόλωση και (2.11) για την ανάστροφη, προκύπτει η χαρακτηριστική καμπύλη του Σχήματος 2.9 για ιδανική δίοδο Schottky. Στη περιοχή όπου η τάση είναι αρνητική, η δίοδος διαρρέεται από το αρνητικό ρεύμα κόρου, ενώ για θετικές τάσεις από το ρεύμα ορθής πόλωσης το οποίο αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της τάσης. Επιπρόσθετα, στη χαρακτηριστική υπάρχει ένα τμήμα μηδενικού ρεύματος. Ο αιτία είναι ότι μέχρι κάποια συγκεκριμένη τιμή τάσης, τα ηλεκτρόνια δεν έχουν αρκετή ενέργεια να ξεπεράσουν το φράγμα



δυναμικού, με αποτέλεσμα η διόδος να μη διαρρέεται από ρεύμα. Η τιμή της ελάχιστης απαιτούμενης τάσης για τη δημιουργία ρεύματος ορθής πόλωσης ονομάζεται τάση κατωφλίου (threshold voltage) και συμβολίζεται ως  $V_t$ . Τέλος, στη περιοχή αρνητικής πόλωσης παρατηρείται ότι πέραν μιας τιμής τάσης, η οποία ονομάζεται τάση αποκοπής (cut off ή breakdown voltage) και συμβολίζεται με  $V_{cut\ off}$  ή  $V_{BR}$ , η διόδος αρχίζει να διαρρέεται από πολύ μεγάλο ρεύμα ομόρροπο του ρεύματος κόρου. Στο σημείο αυτό υπάρχει κατάρρευση της διόδου, και αρχίζει να συμπεριφέρεται σαν βραχυκύκλωμα. Το ρεύμα που εμφανίζεται είναι αρνητικό καθώς η επιβαλλόμενη τάση είναι αρνητική [18], [19].

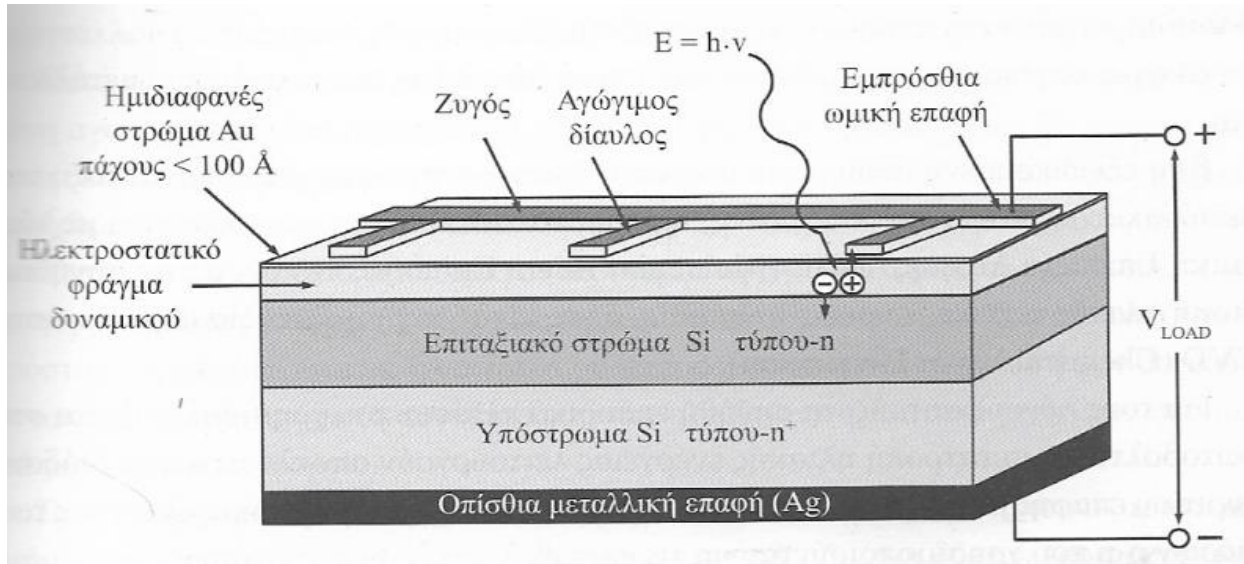


Σχ. 2. 9 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V διόδου Schottky

### 2.2.5 Μη ιδανική Schottky

Η μη ιδανική διόδος Schottky χαρακτηρίζεται από μια αντίσταση σειράς  $R_s$  η οποία εκφράζει το άθροισμα των επιμέρους αντιστάσεων που εμφανίζονται λόγω των χαρακτηριστικών της διεπαφής. Πιο συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στον όγκο του ημιαγωγού, την αντίσταση ωμικής επαφής, η οποία εντοπίζεται στο πίσω τμήμα του ημιαγωγού και του τετραγώνου σύνδεσης των εξωτερικών ακροδεκτών, την αντίσταση που παρεμβάλλεται στη συγκόλληση μεταξύ των εξωτερικών ακροδεκτών και του τετραγώνου σύνδεσης, και τέλος την αντίσταση των ίδιων των εξωτερικών ακροδεκτών. Πρακτικά, εμφανίζεται διαφορά για μεγάλες τιμές ρεύματος αφού η πτώση τάσης που δίνεται από τον τύπο  $\Delta V = I \cdot R_s$  είναι αμελητέα για μικρές τιμές. Στη λειτουργία ανάστροφης πόλωσης δε παρατηρείται αλλαγή καθώς όπως προαναφέρθηκε, το ρεύμα κόρου εξαρτάται καθαρά από τα χαρακτηριστικά του μετάλλου.

## 2.2.6 Δίοδος Schottky ως φωτοβολταϊκό στοιχείο



Σχ. 2. 10 Δίοδος Schottky ως φωτοβολταϊκό στοιχείο

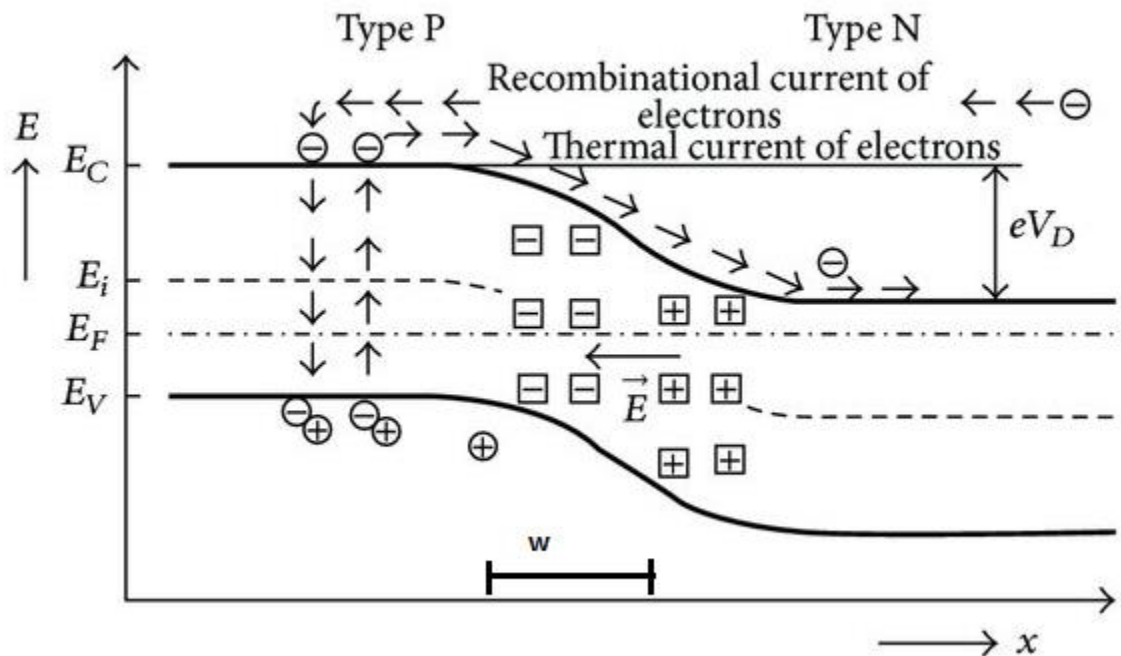
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η δίοδος Schottky μπορεί να λειτουργήσει σαν φωτοβολταϊκό στοιχείο με κύρια διαφορά ότι τα ηλεκτρόνια λαμβάνουν ηλιακή ενέργεια  $E$  για να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικού και να παρουσιαστεί ρεύμα και διαφορά δυναμικού, την οποία εκμεταλλευόμαστε. Τα φωτόνια προσπίπτουν στη πλευρά όπου βρίσκεται το μέταλλο. Κάτω από την επιφανειακή στρώση μετάλλου σχηματίζεται ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού το οποίο εκτείνεται προς την πλευρά του ημιαγωγού. Προκειμένου να μπορούν τα φωτόνια να διέρχονται διαμέσου του στρώματος μετάλλου, και να μην απορροφούνται, τοποθετείται λεπτή ημιδιαφανής μεταλλική στρώση, η οποία αρκεί για τη δημιουργία του απαιτούμενου φράγματος δυναμικού, και ταυτόχρονα διασφαλίζει την ωμική αντίσταση που απαιτείται για τη συλλογή ηλεκτρικών φορέων από τη φωτιζόμενη όψη. Η απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων δημιουργεί ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων τα οποία διαχωρίζονται ανάλογα με το φορτίο τους. Τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται από το μέταλλο προς τον ημιαγωγό τύπου n, ενώ οι οπές προς το μέταλλο. Μόλις οι οπές φτάσουν στο ημιδιαφανές μεταλλικό ηλεκτρόδιο που σχηματίζει τη δίοδο, επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια του μετάλλου, με αποτέλεσμα το φωτιζόμενο ηλεκτρόδιο μεταξύ της δόδου και των αγώγιμων μεταλλικών διαύλων να διαρρέεται μόνο από ηλεκτρόνια, τα οποία συλλέγονται από το ηλεκτρόδιο της εμπρόσθιας ωμικής επαφής. Η ολίσθηση των ηλεκτρονίων στο μέταλλο δημιουργεί ρεύμα με ίδια συμβατική φορά με αυτή του ρεύματος των οπών του ημιαγωγού. Τέλος, στους ακροδέκτες του εξωτερικού κυκλώματος εμφανίζεται τάση  $V_{LOAD}$  για τη τροφοδότηση φορτίου.

Στη περίπτωση όπου το υπόστρωμα είναι τύπου p, η διάταξη θα ήταν κατασκευασμένη από διαφορετικά ηλεκτρόδια τέτοια ώστε το υλικό της φωτιζόμενης όψης να χαρακτηρίζεται από

χαμηλό έργο εξόδου. Η κατεύθυνση των οπών και άρα των ηλεκτρονίων θα ήταν ανάστροφη, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου  $V_{LOAD}$  να έχει ανάστροφη πολικότητα [18].

### 2.2.7 Δίοδος p-n

Όμοια με τη δίοδο Schottky, το φράγμα δυναμικού της δίοδου p-n οφείλεται στη μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ των ημιαγώγιμων υλικών τύπου p και n σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η περιγραφή προ και μετά την επαφή είναι παρόμοια με τη δίοδο Schottky, με εμφάνιση φραγμάτων δυναμικού  $\Phi_n$  και  $\Phi_p$  και ύπαρξη διαφορετικής στάθμης Fermi στα δύο υλικά προ επαφής και τη μεταφορά φορέων από το υλικό n προς το υλικό p αφού ξεπεραστεί το φράγμα δυναμικού πριν την ομογενοποίηση λόγω θερμοδυναμικής ισορροπίας, οπότε θα πραγματοποιηθεί ανάλυση απευθείας για τη μετά επαφής λειτουργία, σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.



Σχ. 2. 11 Ενεργειακό διάγραμμα δίοδου p-n μετά την αποκατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας

Για την κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας της δίοδου, ορίζονται κάποια βασικά μεγέθη ως εξής, σύμφωνα με τις [18], [19]:

**Τάση  $V_D$**  : Η τάση αυτή ονομάζεται δυναμικό διάσχισης δίοδου, και είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της επαφής p-n των ημιαγωγών. Πρακτικά υποδηλώνει τη μεταβολή του φραγματος

δυναμικού κατά μήκος της μη πολωμένης επαφής. Το μέγεθος αυτό είναι ανεξάρτητο εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης  $V_{app}$ , και δίνεται από τον τύπο:

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_{n0}}{n_{p0}}\right) \quad (2.12)$$

Όπου  $n_{n0}$  είναι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων αγωγιμότητας στο υλικό τύπου n κατά τη κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας,  $n_{p0}$  το αντίστοιχο μέγεθος για τη συγκέντρωση οπών στο υλικό τύπου p.

Από την εξίσωση παρατηρούμε ότι η αύξηση προσμίξεων προς οποιαδήποτε πλευρά, που επιφέρει αύξηση των φορέων πλειονότητας, προκαλεί αύξηση του δυναμικού διάσχισης διόδου  $V_D$ .

**Περιοχή w (depletion region):** Το τμήμα αυτό ονομάζεται περιοχή απώθησης ελευθέρων φορέων και επεκτείνεται και στις δύο πλευρές της επαφής. Είναι πρακτικά το κομμάτι της επαφής στο οποίο γίνεται η ανταλλαγή φορέων μεταξύ των ημιαγωγών p και n. Αύξησή του επιφέρει μεγαλύτερη δυσκολία ανταλλαγής φορέων, άρα και μεγαλύτερη δυσκολία παρουσίας ηλεκτρικού ρεύματος.

**Χωρητικότητα  $C_p$ :** Κάθε δίοδος p-n εμφανίζει χωρητικότητα εξαιτίας της κατανομής σταθερών φορτίων που υπάρχουν στη περιοχή επαφής των ημιαγωγών. Στη πράξη προσεγγίζουμε τη περιοχή επαφής ως ενσωματωμένο πυκνωτή παραλλήλων πλακών.

**Φράγματα δυναμικού  $\Phi_n$   $\Phi_p$ :** Κατ' αντιστοιχία με τη δίοδο Schottky, οι ημιαγωγοί p και n παρουσιάζουν φράγματα δυναμικού που εμποδίζουν τη μεταφορά των φορέων πλειονότητάς τους (οπές για τύπου p και ηλεκτρόνια για τύπου n) προς τον άλλο ημιαγωγό. Τα φράγματα αυτά, που είναι εμφανή πριν τη κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας συμβολίζονται ως  $\Phi_n$  για τον ημιαγωγό τύπου n και  $\Phi_p$  για τον ημιαγωγό τύπου p.

**Εφαρμογή εξωτερικής τάσης  $V_{app}$ :** Κατά την επιβολή εξωτερικής πόλωσης, το δυναμικό διάσχισης  $V_d$  αντικαθίσταται από το συνολικό δυναμικό διόδου

$$V_{total} = V_{D+} + V_{app} \quad (2.13)$$

## 2.2.8 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ιδανική δίοδο p-n

Στη δίοδο p-n δημιουργείται ροή ρεύματος όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου n ξεπερνάνε το φράγμα δυναμικού που προσομοιάζεται με το δυναμικό διάσχισης διόδου και μεταφέρονται προς τον ημιαγωγό τύπου p, ενώ οι οπές του ημιαγωγού τύπου p, που είναι και οι φορείς πλειονότητάς του, μετακινούνται προς τον άλλο ημιαγωγό, έτσι ώστε να αποκατασταθεί η ομοιομορφία του υλικού. Στη πραγματικότητα, η μετακίνηση των φορέων αφήνει πίσω ιοντισμένες προσμίξεις των οποίων η φόρτιση δεν αντισταθμίζεται πια, αποτρέποντας την διεπαφή από το να γίνει ηλεκτρικά ουδέτερη [18], [19].

## 2.2.9 Πόλωση διόδου p-n

### Ορθή πόλωση

Κατά την ορθή πόλωση η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση  $V_{app}$  είναι συμβατικά αρνητική, και το συνολικό δυναμικό διόδου  $V_{total}$  υπολογίζεται ως  $V_{total}=V_D-|V_{app}|$ . Η πολικότητα αυτή έχει αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους  $w$ . Τα φράγματα δυναμικού  $\Phi_n$  και  $\Phi_p$  διαχωρίζονται ενεργειακά μεταξύ τους ανάλογα με τη τιμή της εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης  $V_{app}$ , με αποτέλεσμα να υπάρχει μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος με κατάλληλη επιλογή της τάσης αυτής. Παρόμοια με τη δίοδο Schottky, παρουσιάζεται ανάστροφο ρεύμα τάξεις μικρότερο, το οποίο ονομάζεται και στη δίοδο p-n ρεύμα κόρου. Οι συμβολισμοί κύριας συνιστώσας, ρεύματος κόρου και συνολικού ρεύματος παραμένουν ίδιοι με αυτούς της διόδου Schottky.

$$J = q n_i^2 \left[ \frac{D_n}{N_A^+ L_n} + \frac{D_p}{N_D^+ L_p} \right] \left[ e^{qV_{app}/nkT} - 1 \right] \quad (2.14)$$

$$J_S = q n_i^2 \left[ \frac{D_n}{N_A^+ L_n} + \frac{D_p}{N_D^+ L_p} \right] \quad (2.15)$$

$$J_{ολ} = J_S \left[ e^{qV_{app}/nkT} - 1 \right] \quad (2.16)$$

Το τμήμα της εξίσωσης  $\frac{D_n}{N_A^+ L_n} + \frac{D_p}{N_D^+ L_p}$  αποτελείται από στοιχεία που περιγράφουν τους ημιαγωγούς n και p, ενώ ο όρος  $n_i^2$  περιγράφει τη συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας. Τέλος, ο συντελεστής n ονομάζεται συντελεστής ποιότητας διόδου (ideality factor) που εξαρτάται από τη κατασκευή της [18], [19], [20].

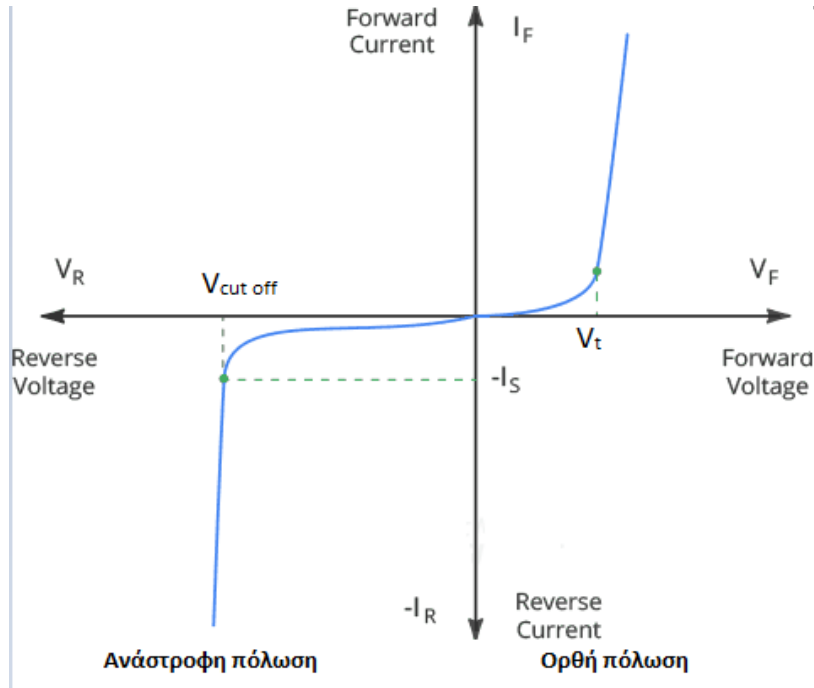
### Ανάστροφη πόλωση

Κατά την ανάστροφη πόλωση η εξωτερική τάση είναι συμβατικά θετική, με το συνολικό δυναμικό διόδου να υπολογίζεται ως  $V_{total}=V_D+|V_{app}|$ , έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους  $w$ . Στη περίπτωση αυτή, οι φορείς μειονότητας του κάθε ημιαγωγού απωθούνται αμφίπλευρα της περιοχής επαφής  $w$  λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται. Κατά συνέπεια, εμφανίζονται ρεύματα διάχυσης των φορέων μειονότητας, η συνιστώσα των οποίων είναι το ρεύμα κόρου  $J_S$ . Όπως προαναφέρθηκε, το ρεύμα αυτό είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερο και αντίρροπο από το ρεύμα  $J_1$  της ορθά πολωμένης διόδου [18], [19], [20]. Οπότε ισχύει

$$J_{ολ} = J_S = q n_i^2 \left[ \frac{D_n}{N_A^+ L_n} + \frac{D_p}{N_D^+ L_p} \right] \quad (2.17)$$

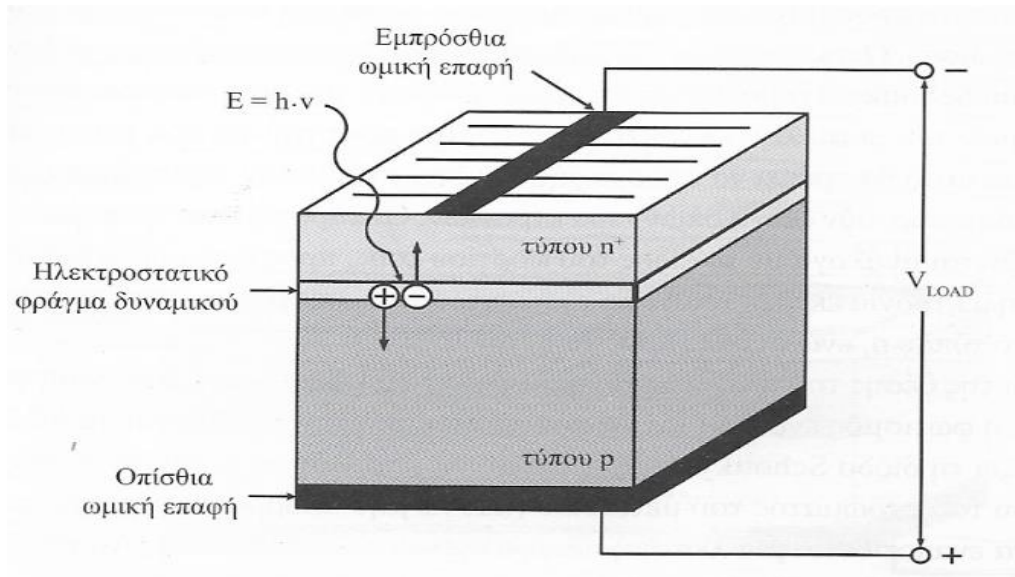
### 2.2.10 Χαρακτηριστική καμπύλη Ρεύματος-Τάσης (I-V)

Από τις παραπάνω εξισώσεις (2.16) και (2.17), χαράσσεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσεως για ιδανική δίοδο p-n. Όμοια με τη δίοδο Schottky, η περιοχή όπου η τάση είναι αρνητική είναι η περιοχή ανάστροφης πόλωσης, ενώ για θετικές τάσεις βρισκόμαστε στη περιοχή ορθής πόλωσης. Επιπλέον, όμοια ορίζονται η τάση κατωφλίου και η τάση αποκοπής [18], [19], [20].



Σχ. 2. 12 Χαρακτηριστική I-V δίοδου p-n

### 2.2.11 Δίοδος p-n ως φωτοβολταϊκό στοιχείο



Σχ. 2. 13 Δίοδος p-n ως φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα φωτόνια απορροφώνται μέσα ή γύρω από τη περιοχή επαφής των ημιαγωγών p και n και δημιουργούν ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων που διαχωρίζονται ανάλογα με το φορτίο τους εξαιτίας του ηλεκτροστατικού πεδίου που εμφανίζεται. Τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται προς τον ημιαγωγό τύπου n, ενώ οι οπές προς τον p. Οι δημιουργούμενοι ηλεκτρικοί φορείς οδηγούνται στα εξωτερικά ηλεκτρόδια μέσω των εμπρόσθιων και οπίσθιων ωμικών επαφών με αποτέλεσμα την εμφάνιση τάσης  $V_{LOAD}$ . Κατασκευαστικά, η εμπρόσθια ωμική επαφή χαρακτηρίζεται από μεγάλα ανοίγματα για να επιτρέψει την απορρόφηση φωτός από τον αγωγό.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου που περιλαμβάνουν στο εσωτερικό τους δίοδο p-n δέχονται φωτισμό πάντα από τη πλευρά του ημιαγωγού n, καθώς διασφαλίζει καλύτερη απόδοση. Το συνολικό εύρος της διάταξης περιλαμβάνει το εύρος  $w$  επαυξημένο εκατέρωθεν από τα μήκη διάσχισης των φορέων μειονότητας  $L_n$  και  $L_p$  [18].

## 2.3 Ηλιακή ενέργεια

### 2.3.1 Κατηγοριοποίηση Ηλιακής Ενέργειας

Πέρα από την ανάπτυξη αποτελεσματικών κυκλωμάτων τα οποία εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, για την απολαβή μέγιστης απόδοσης είναι απαραίτητη και η μελέτη της πηγής της. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει σύντομη παρουσίαση της ηλιακής ακτινοβολίας και κυρίως, στη θέση

αυτής ως προς φωτοβολταϊκά στοιχεία. Οι βασικοί ορισμοί σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία είναι οι ακόλουθοι σύμφωνα με τις πηγές [18], [21], [22]:

**Άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $I_b$ :** Η άμεση ακτινοβολία αποτελεί δέσμη ακτινών η οποία καταφτάνει χωρίς σκεδάσεις και ανακλάσεις, και αποτελεί περίπου το 60% της συνολικής ακτινοβολίας του ηλίου. Αυτό σημαίνει πως οι ακτίνες είναι συγκεντρωμένες και ομόρροπες και έχουν δυνατότητα εύκολης εστίασης με κάτοπτρα, ιδιότητα που εκμεταλλεύονται κατά κόρον τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

**Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία  $I_{DF}$ :** Διάχυτη ορίζεται ως η ακτινοβολία που προέρχεται από τη σκέδαση και ανάκλαση των φωτονίων με διάφορα σωματίδια του αέρα. Φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούν την ενέργεια κάθε φωτονίου που προσπίπτει στην επιφάνειά τους, αλλά η διάχυτη ακτινοβολία, σε αντίθεση με την άμεση είναι πολύ πιο πολύπλοκο να μοντελοποιηθεί καθώς τα διάχυτα φωτόνια μπορούν να βρίσκονται σε διαφορετικές ενέργειες και φορές.

**Απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία:** Είναι το μέρος της ακτινοβολίας το οποίο απορροφάται από την ατμόσφαιρα.

**Χρήσιμη ηλιακή ακτινοβολία:** Η συνολική ακτινοβολία που μπορεί να αξιοποιηθεί από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η ακτινοβολία αυτή υπολογίζεται τοπικά ως το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας.

**Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας:** Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας ορίζεται ως το φάσμα συχνοτήτων αξιοποιήσιμης ακτινοβολίας, το οποίο περιλαμβάνει μήκη κύματος από 0.3 $\mu\text{m}$  έως 1,7 $\mu\text{m}$ , με μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο στη περιοχή γύρω από τα 0.5 $\mu\text{m}$ . Στη παρούσα διπλωματική, οι όροι πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας και ηλιακή ακτινοβολία θα χρησιμοποιούνται με την ίδια σημασία.

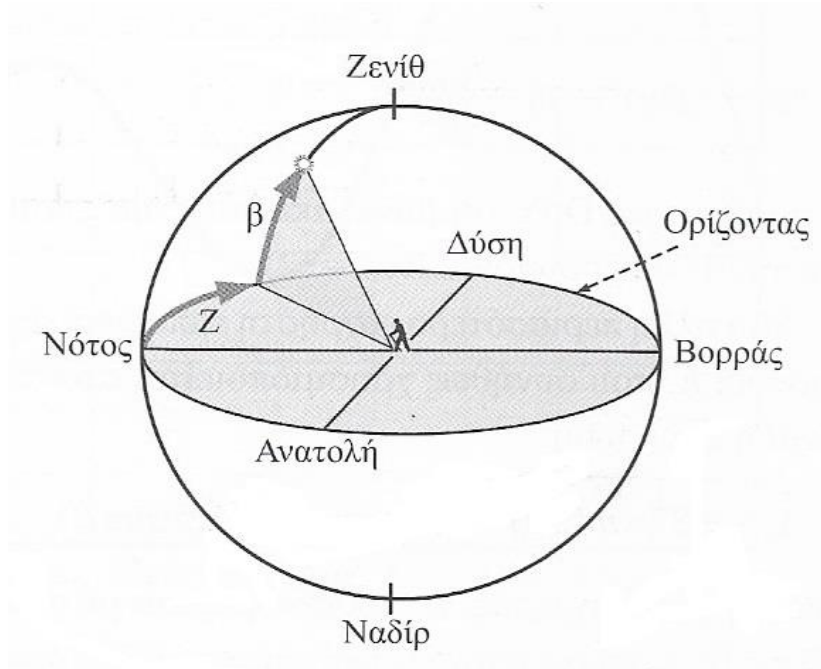
**Πυκνότητα ισχύος:** Η συνολική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή η ισχύς η οποία προέρχεται από μια πηγή ακτινοβολίας ονομάζεται πυκνότητα ισχύος (irradiance) ή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Η ένταση αυτή μετράται σε watt ανά τετραγωνικό μέτρο ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) και συμβολίζεται με το γράμμα G. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται έντονα από συνθήκες όπως ο καιρός, η θέση του ηλίου, η θερμοκρασία και η κίνηση της γης. Κατά σύμβαση, η πυκνότητα  $G=1000 \text{ W}/\text{m}^2$  αντιστοιχεί στη μέγιστη ακτινοβολία που δέχεται μία κάθετη προς αυτή επιφάνεια υπό τις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες και συμβολίζεται με  $G_0$ . Η ακτινοβολία με τέτοια τιμή πυκνότητας ισχύος καλείται ακτινοβολία ενός ήλιου, και χρησιμοποιείται για την έκφραση της ισχύος αιχμής φωτοβολταϊκών διατάξεων.

### 2.3.2 Θέση του ηλίου

Η θέση του ηλίου είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την ισχύ της ακτινοβολίας, και μοντελοποιείται υπολογίζοντας δύο καθοριστικές παραμέτρους που την εκφράζουν: τη γωνία ύψους  $\beta^\circ$  και την ηλιακή αζιμούθια γωνία  $Z^\circ$ , οι οποίες παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα



2.14. Η αζιμούθια γωνία υπολογίζεται πάντα από τον Νότο προς τη κάθετη συνιστώσα του ήλιου με θετική φορά προς τον Βορρά.



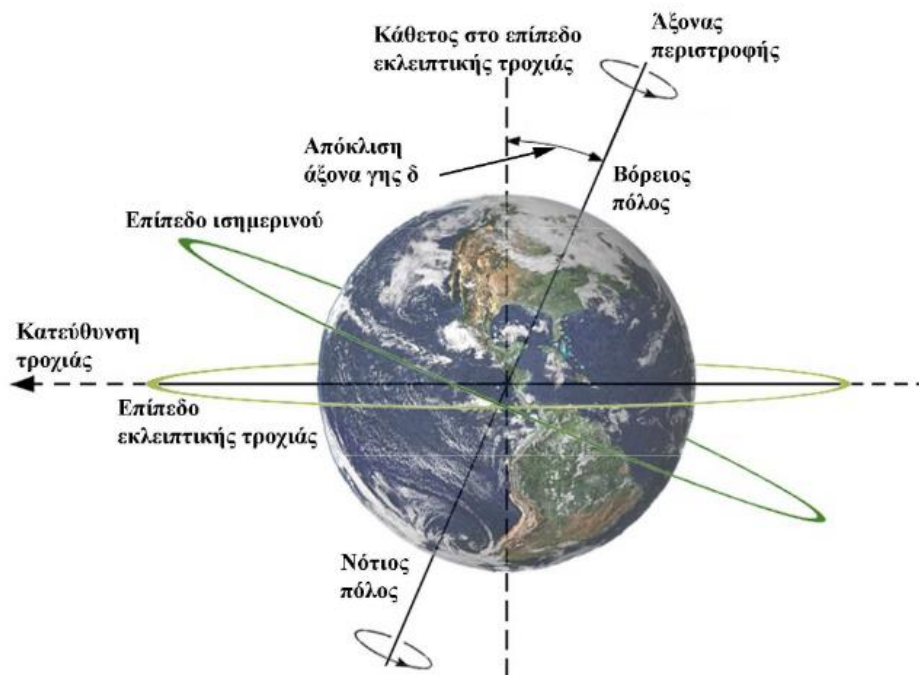
Σχ. 2. 14 Γωνία ύψους  $\beta^\circ$  και αζιμούθια γωνία  $Z^\circ$  του ηλίου

Ο υπολογισμός τους γίνεται μαθηματικά, και είναι πρώτα απαραίτητη η γνώση επιπλέον μεγεθών όπως η ηλιακή απόκλιση  $\delta$ , η ωριαία γωνία  $\omega$  και το γεωγραφικό πλάτος της φωτοβολταϊκής διάταξης  $\varphi$ , σύμφωνα με τις πηγές [18], [21], [22]. Καθ' όλη τη μελέτη, όλες οι γωνίες υπολογίζονται σε μοίρες.

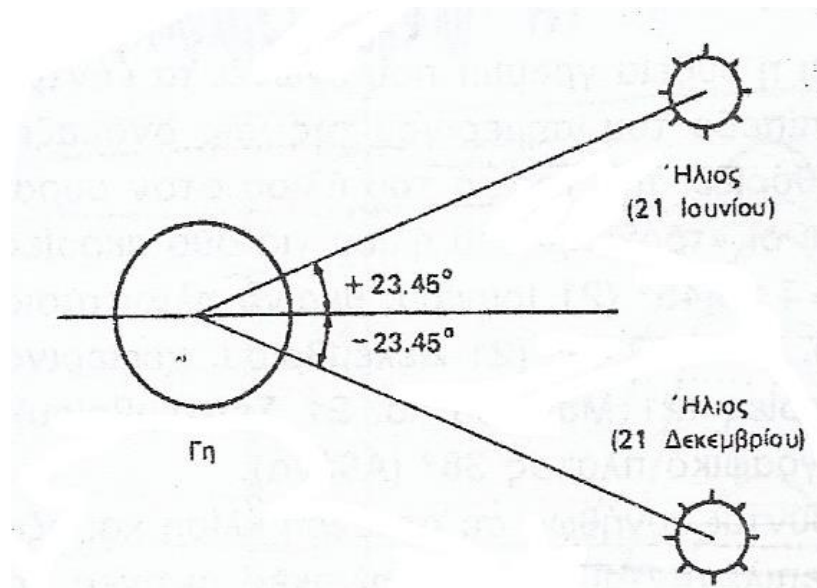
**Ηλιακή απόκλιση  $\delta^\circ$ :** Ηλιακή απόκλιση είναι η γωνία ανάμεσα στο επίπεδο του ουράνιου ισημερινού και στη νοητή ευθεία που ενώνει τα κέντρα γης-ήλιου, και υπολογίζεται με βάση τον εξής τύπο:

$$\delta^\circ = 23.45^\circ \sin\left(\frac{360^\circ}{365^\circ} (DoY + 284)\right) \quad (2.18)$$

Η μεταβλητή  $DoY$  υποδηλώνει τη μέρα του χρόνου (Day of the year,  $DoY \in [1,365]$ ). Η γωνία  $\delta^\circ$  είναι μηδενική στις δύο ισημερίες του χρόνου, μέγιστη κατά το θερινό ηλιοστάσιο με τιμή  $\delta_{\max}=23.45^\circ$  και ελάχιστη στο χειμερινό με τιμή  $\delta_{\min} = -23.45^\circ$ . Τέλος, η γωνία στο ημίτονο της σχέσης (2.16)  $B^\circ = \frac{360^\circ}{365^\circ} (DoY + 284)$  είναι γνωστή και ως γωνία ημέρας.



Σχ. 2. 15 Ηλιακή απόκλιση  $\delta^\circ$

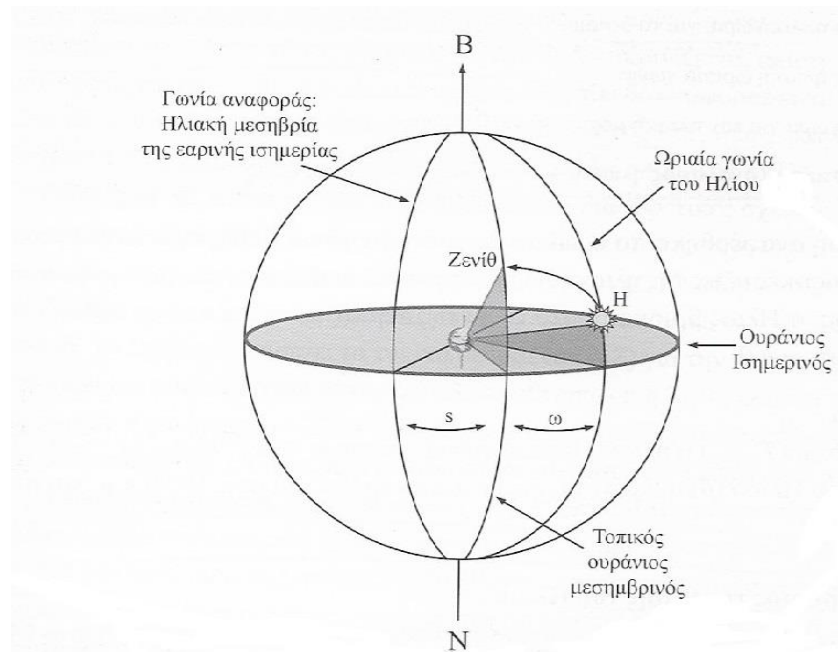


Σχ. 2. 16 Μέγιστη και ελάχιστη ηλιακή απόκλιση  $\delta^\circ$

**Ηλιακή ώρα  $T_{SOLAR}$ :** Η ηλιακή ώρα εκφράζει την τοποθεσία του ήλιου ως προς την τοποθεσία προς μελέτη, παραδείγματος χάριν ορίζεται 12:00 η ώρα όπου ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ του. Ο υπολογισμός της είναι αναγκαίος για τον καθορισμό της ωριαίας γωνίας  $\omega^\circ$ . Για την εύρεσή της

είναι απαραίτητη η γνώση του γεωγραφικού πλάτους  $\phi$ , του τοπικού μήκους  $L_{LOCAL}$ , της ζώνης τοπικής ώρας  $\Delta T_{GMT}$  και της τοπικής ώρας  $T_{LOCAL}$ .

**Ωριαία γωνία  $\omega^\circ$ :** Ωριαία γωνία ενός σημείου H (στη περίπτωση μας το σημείο αυτό είναι η θέση του ηλίου) είναι εκείνη που σχηματίζεται μεταξύ δύο ημιεπιπέδων, με το πρώτο να ορίζεται από τον πολικό άξονα της γης με το ζενίθ της τοποθεσίας του ήλιου και το δεύτερο από τον πολικό άξονα της γης και του σημείου H πάνω στην ουράνια σφαίρα. Σε πολλές εφαρμογές η γωνία αυτή αντιστοιχίζεται σε μονάδες χρόνου, με γωνία  $\omega=15^\circ$  να αντιστοιχεί σε περίπου μία ώρα, καθώς το εικοσιτετράωρο αντιστοιχεί σε  $360^\circ$ , το οποίο αποδεικνύεται εύκολα αφού  $15^\circ \cdot 24h=360^\circ$ .



Σχ. 2. 17 Ωριαία γωνία  $\omega^\circ$  και η συμμετρική της γωνία  $s^\circ$

Τελικά, η ωριαία γωνία υπολογίζεται από τον τύπο (2.19):

$$\omega^\circ = 15^\circ / h (T_{SOLAR} - 12) \quad (2.19)$$

Ο όρος 12 δεν είναι καθαρός αριθμός, και αντιστοιχίζεται σε ώρες.

Έχοντας υπολογίσει την ωριαία γωνία  $\omega^\circ$  και την ηλιακή απόκλιση  $\delta^\circ$ , και ξέροντας το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  υπολογίζεται ότι το ύψος του ηλίου  $\beta^\circ$  ισούται με:

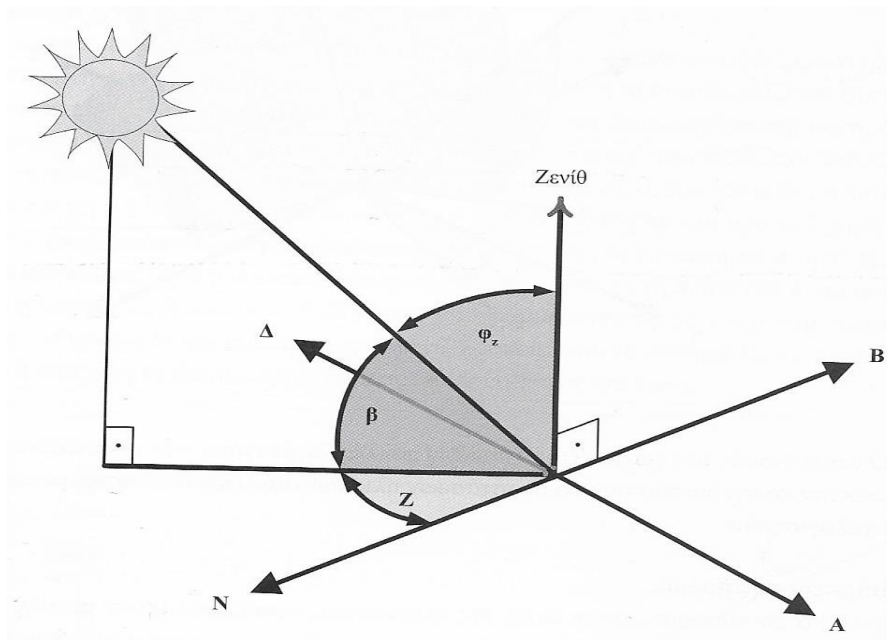
$$\sin(\beta^\circ) = \sin(\delta^\circ) \sin(\varphi^\circ) + \cos(\delta^\circ) \cos(\varphi^\circ) \cos(\omega^\circ) \quad (2.20)$$

Και η αζιμούθια γωνία ηλίου  $Z^\circ$  που υπολογίζεται ως:

$$\cos(Z^\circ) = \frac{\sin(\beta^\circ)\sin(\varphi^\circ) - \sin(\delta^\circ)}{\cos(\beta^\circ)\cos(\varphi^\circ)} \quad (2.21)$$

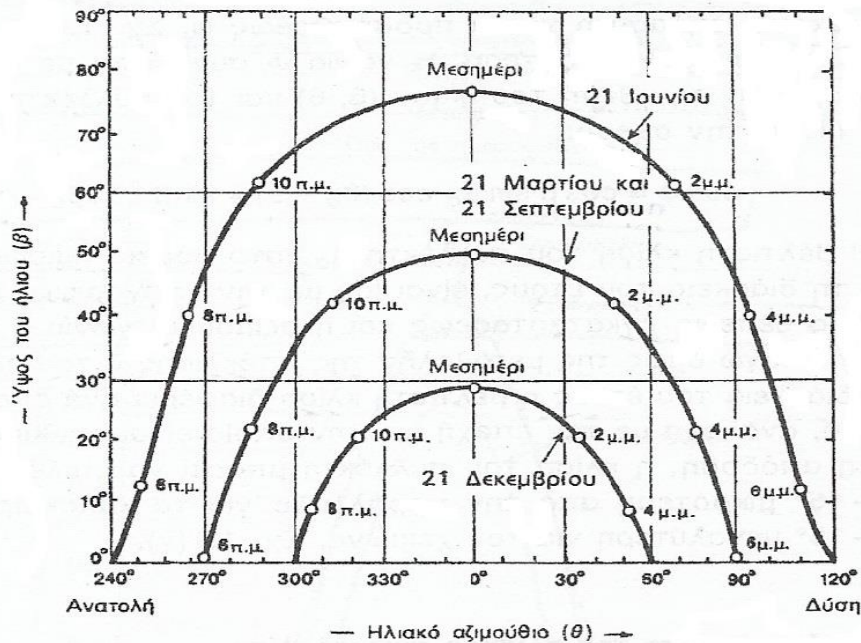
Επίσης ορίζουμε  $\varphi_z^\circ$  τη συμπληρωματική γωνία της  $\omega^\circ$ , άρα

$$\cos(\varphi_z^\circ) = \sin(\beta^\circ) \quad (2.22)$$



Σχ. 2. 18 Ύψος ηλίου  $\beta^\circ$ , αζιμούθια γωνία  $Z^\circ$  και η συμπληρωματική του ύψους  $\varphi_z^\circ$

Ο τύπος της αζιμούθιας ηλιακής γωνίας (2.21) περιλαμβάνει μέσα του και το ύψος ηλίου  $\beta$ . Λύνοντας ως προς αυτό, προκύπτει η χαρακτηριστική εξίσωση  $\beta^\circ$ - $Z^\circ$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.19. Παρατηρούμε ότι η μορφή παραμένει σταθερή, με τα άκρα των γωνιών να παρουσιάζουν εποχικότητα.



Σχ. 2. 19 Συνάρτηση ύψους ηλίου  $\beta^\circ$  - αζιμούθιας γωνίας ηλίου  $Z^\circ$

### 2.3.3 Θέση συλλέκτη

Η παραπάνω ανάλυση ισχύει για πρόσπτωση δέσμης φωτονίων σε κάθετη επιφάνεια συλλογής τους. Όμως, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλές φορές εισάγονται υπό δικιά τους γωνία σε σχέση με το έδαφος, άρα και με τη προσπίπτουσα δέσμη. Οι αντίστοιχες απαραίτητες γωνίες που χαρακτηρίζουν τη θέση του συλλέκτη στο έδαφος σε σχέση με τον ήλιο είναι η γωνία κλίσης συλλέκτη  $\alpha^\circ$ , η γωνία προσανατολισμού συλλέκτη  $\theta^\circ$  και η γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας  $\gamma^\circ$  [18], [21], [22].

**Γωνία κλίσης συλλέκτη  $\alpha^\circ$ :** Πρόκειται για τη γωνία μεταξύ του οριζώντιου δαπέδου αναφοράς (έδαφος-κλίση  $0^\circ$ ) και του ηλιακού συλλέκτη.

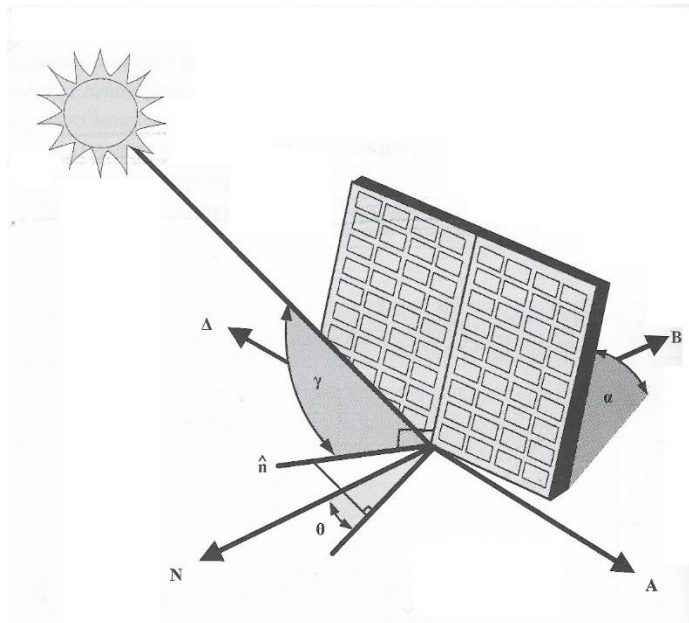
**Γωνία προσανατολισμού συλλέκτη  $\theta^\circ$ :** Η γωνία προσανατολισμού είναι η γωνία μεταξύ της προβολής του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας του συλλέκτη  $\hat{n}$  πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και του νότου.

**Γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας  $\gamma^\circ$ :** Γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας ορίζεται ως η σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ της δέσμης άμεσης ακτινοβολίας και της νοητής καθέτου πάνω στην επιφάνεια του συλλέκτη, η οποία είναι ομόρροπη του κάθετου διανύσματος  $\hat{n}$ .

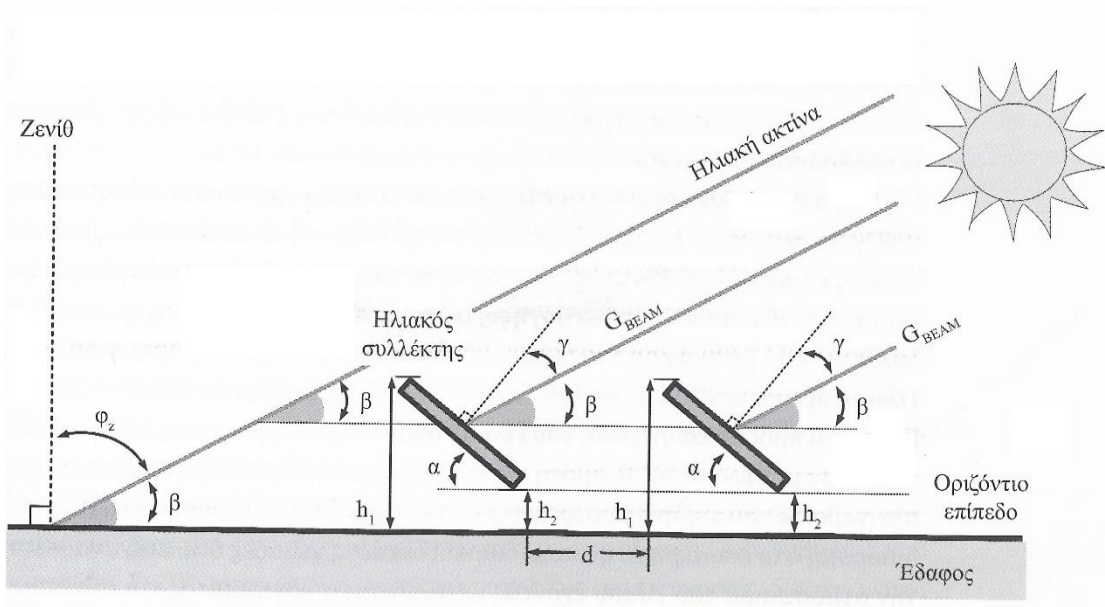
**Μαθηματική σύνδεση γωνιών:** Οι γωνίες ηλίου και συλλέκτη εμπλέκονται με τον τύπο

$$\cos(\gamma^\circ) = \cos(Z^\circ - \theta^\circ) \cdot \cos(\delta^\circ) \cos(\omega^\circ) + \sin(Z^\circ - \theta^\circ) \sin(\delta^\circ) \quad (2.23)$$

Στα Σχήματα 2.20-2.21 παρουσιάζονται σε φωτοβολταϊκό στοιχείο και σε φωτοβολταϊκή διάταξη όλες οι γωνίες που αφορούν τη θέση του συλλέκτη σε σχέση με τον ήλιο.



Σχ. 2. 20 Γωνίες θέσης συλλέκτη σε φωτοβολταϊκό στοιχείο



Σχ. 2. 21 Συνοπτική παρουσίαση γωνιών ηλίου και συλλεκτών σε φωτοβολταϊκή διάταξη

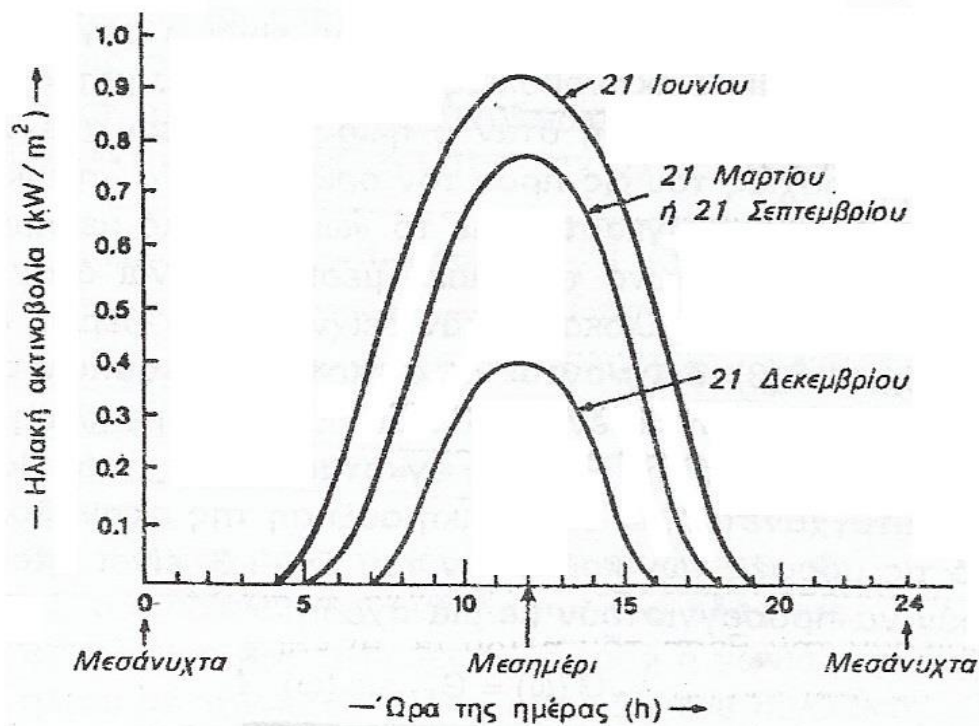


### 2.3.4 Ημερήσια διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας

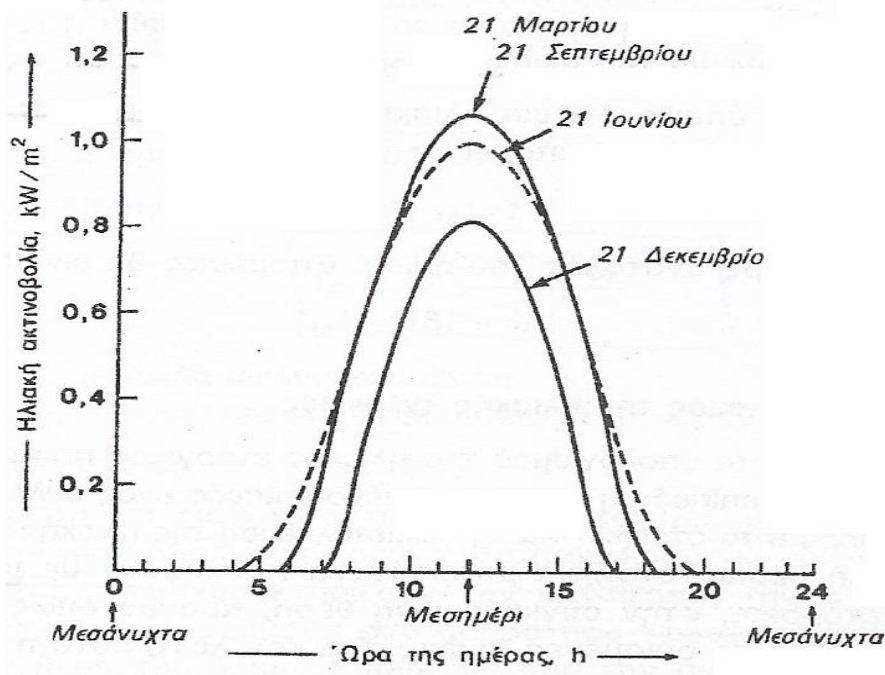
Όπως είναι γνωστό, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Επιπρόσθετα, παρότι η κυματομορφή της μεταβολής αυτής δεν αλλάζει σημαντικά ανάλογα με την ημερομηνία, αλλάζουν οι τιμές που μπορεί να λάβει, αποκτώντας μεγαλύτερη ένταση την ίδια ώρα κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του καλοκαιριού σε σχέση με μία μέρα του χειμώνα. Κατά τη μελέτη της ημερήσιας διακύμανσης, χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η μέγιστη τιμή της ακτινοβολίας, η οποία συμβολίζεται με  $G_{max}$ , και μετράται κατά το ηλιακό μεσημέρι ( $T_{SOLAR}=12:00$ ), δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της τροχιάς του [18], [21], [22]. Στα Σχήματα 2.22-2.23 παρουσιάζονται καμπύλες ηλιακής διακύμανσης ακτινοβολίας οι οποίες προσεγγίζονται με τη σχέση

$$G(\omega) = G_{max} \omega^\circ \quad (2.24)$$

όπου  $\omega^\circ$  η ωριαία γωνία του ήλιου από το προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχ. 2. 22 Τυπική μορφή διακύμανσης ηλιακής ακτινοβολίας σε τέσσερις χαρακτηριστικές μέρες σε οριζόντιο επίπεδο συλλέκτη

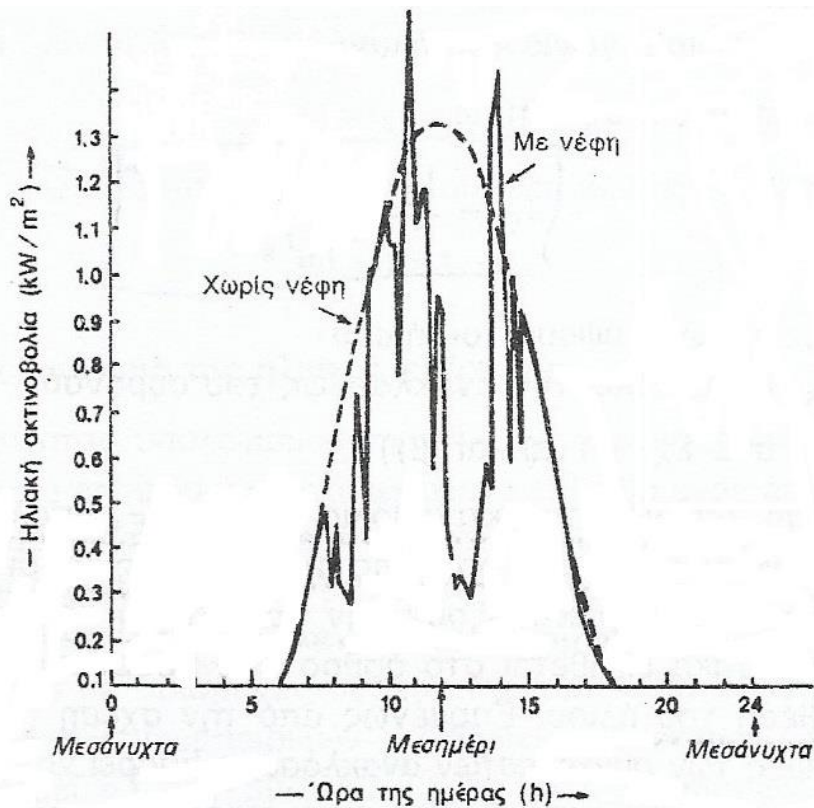


Σχ. 2. 23 Τυπική μορφή διακύμανσης ηλιακής ακτινοβολίας σε τέσσερις χαρακτηριστικές μέρες σε συλλέκτη με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος

### 2.3.5 Επίδραση νεφών

Η παρουσία νεφών έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της άμεσης ακτινοβολίας και την αύξηση της διάχυτης και της απορροφημένης ακτινοβολίας. Η διαφορά επίδρασης στην ακτινοβολία μεταξύ καθαρής και νεφώδους ημέρας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η νεφώδης μέρα μπορεί να παρουσιάσει μεγαλύτερη κορυφή μέγιστης ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει στη περίπτωση όπου τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λαμβάνουν όλη τη δυνατή άμεση ακτινοβολία όταν δεν υπάρχουν σύννεφα που να επισκιάζουν άμεσα τη διάταξη και επιπλέον λαμβάνουν και διάχυτη ακτινοβολία λόγω σκεδάσεων φωτονίων με νέφη σε κοντινές αποστάσεις [18], [22].





Σχ. 2. 24 Επίδραση νεφών στην ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

### 2.3.6 Υπολογισμός ηλιακής ενέργειας με βάση γωνίες συλλεκτών και ηλίου

Για τη καταλληλότητα μίας περιοχής για τη τοποθέτηση φωτοβολταϊκών, έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικές μέθοδοι για τον προσεγγιστικό υπολογισμό της έντασης της ακτινοβολίας σε οριζόντια ( $I_G$ ) και κεκλιμένη ( $I_\phi$ ) επιφάνεια συλλέκτη με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, τα οποία υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (2.23) και (2.24) αντίστοιχα.

$$I_G = \frac{I_B \cos \beta + I_{DF}}{1 - r_g r_s} \quad (2.25)$$

$$I_\phi = I_B \cos(\gamma) + I_{DF} \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + I_G r_a \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.26)$$

όπου  $I_B$  η άμεση ηλιακή ακτινοβολία,  $I_{DF}$  η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία,  $\alpha^\circ$  γωνία που εκφράζει τη κλίση του συλλέκτη,  $\gamma^\circ$  η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας,  $r_a$  ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους και  $r_s$  ο συντελεστής ανάκλασης του ουρανού.

Οι τελευταίοι συντελεστές υπολογίζονται με βάση τα τοπικά χαρακτηριστικά της περιοχής, ενώ οι τιμές της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας υπολογίζονται με βάση την ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας, τους συντελεστές που επηρεάζουν τη κατάστασή της όπως η θερμοκρασία και η υγρασία και τη θέση του ηλίου. Βεβαίως, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από τη διάταξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων και των ηλεκτρονικών ισχύος που απαιτούνται πριν την σύνδεση στο δίκτυο [18], [21], [22].

# 3 Ηλεκτρική ανάλυση φωτοβολταϊκών

## 3.1 Βασικοί ορισμοί

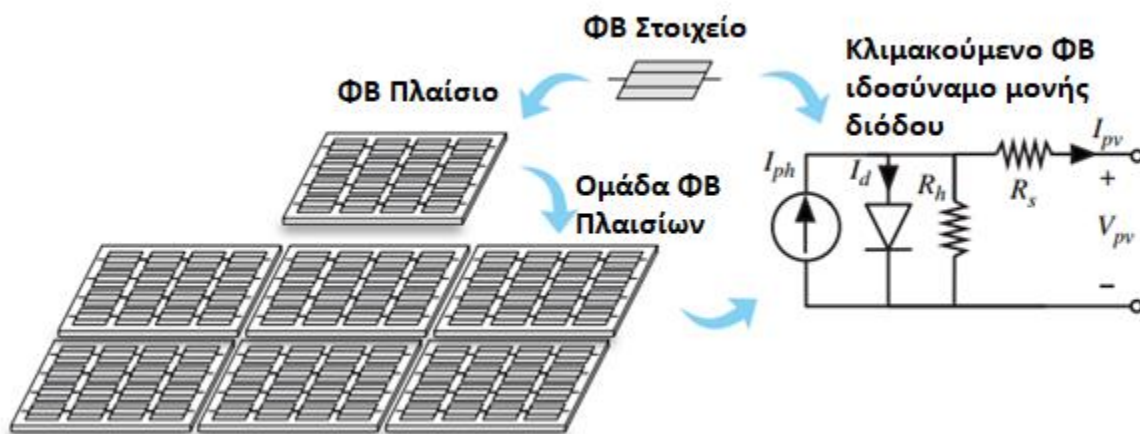
Οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων υποχρεούνται να πραγματοποιήσουν δύο ειδών μετρήσεις. Το πρώτο είδος αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, όπως τη σύνθεση, το βάρος και τις διαστάσεις. Το δεύτερο και πιο σημαντικό από τη σκοπιά της παρούσας εργασίας, είναι οι μετρήσεις των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους, τα οποία είναι τα εξής [18]:

- **Συμβατική ισχύς αιχμής  $P_{max}$**  . Πρόκειται για τη μέγιστη δυνατή ισχύ που δύναται να παρέχει το φωτοβολταϊκό στοιχείο.
- **Η τιμή της τάσης μέγιστης ισχύος  $V_{MPP}$  και του ρεύματος μέγιστης ισχύος  $I_{MPP}$**  . Όπως υποδηλώνει το όνομά τους, πρόκειται για τις τιμές του ρεύματος και της τάσης τα οποία παρέχουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Οι τιμές τους προσεγγίζονται από τη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του φωτοβολταϊκού, με το σημείο μέγιστης ισχύος να συμβολίζεται με  $M(I_{MPP}, V_{MPP})$ .
- **Τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$  και ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$**  . Ως τάση ανοιχτοκύκλωσης ορίζεται η τιμή του δυναμικού που εμφανίζεται στα άκρα της φωτοβολταϊκής διάταξης όταν οι ακροδέκτες της ανοιχτοκυλωθούν. Η τάση αυτή είναι και η μέγιστη τάση του κυκλώματος, αλλά κατά τη κατάσταση ανοιχτοκυκλώματος προφανώς το ρεύμα εξόδου είναι μηδενικό. Στη πράξη μετράται με απευθείας σύνδεση βολτόμετρου σε αντίσταση φορτίου μεγαλύτερη κατά πολλές τάξεις μεγέθους σε σχέση με αυτές του ισοδύναμου κυκλώματος. Αντίστοιχα, το ρεύμα βραχυκύκλωσης αποτελεί το μέγιστο ρεύμα και πρόκειται για το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα του. Η βραχυκύκλωση σημαίνει ότι η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού είναι μηδενική. Η μέτρησή του πραγματοποιείται με παρεμβολή αμπερομέτρου μηδενικής εσωτερικής αντίστασης (συγκριτικά με τις αντιστάσεις της διάταξης) στους βραχυκυκλωμένους ακροδέκτες. Εμφανώς δεν ισχύει ότι η μέγιστη ισχύς που παρέχει η φωτοβολταϊκή διάταξη είναι ίση με το γινόμενό τους ( $P_{max} \neq V_{oc} \cdot I_{sc}$ ) καθώς το κύκλωμα δε μπορεί να βρίσκεται ταυτόχρονα σε κατάσταση βραχυκύκλωσης και ανοιχτοκύκλωσης. Οι μετρήσεις αυτές είναι σημαντικές για τον καθορισμό των ορίων που θα μπορεί να κυμαίνεται η διάταξη προς μέτρηση.
- **Σημείο μέγιστης ισχύος  $M$  (Maximum Power Point ή MPP)**. Ως γνωστόν, η παρεχόμενη ενεργός ισχύς ενός κυκλώματος είναι το γινόμενο του ρεύματος και της τάσης εξόδου. Όπως αναφέρθηκε, σε περίπτωση ανοιχτοκύκλωσης ή βραχυκύκλωσης η ισχύς εξόδου είναι μηδενική διότι είτε το ρεύμα είτε η τάση αντιστοίχως είναι μηδέν. Μεταξύ των δύο αυτών τιμών υπάρχει ένα σημείο όπου η παρεχόμενη ισχύς  $P_{pv}$  μεγιστοποιείται ( $P_{pv} = P_{max}$ ). Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος ή σημείο μέγιστης απολαβής και συμβολίζεται ως  $M$  ή  $MPP$ .
- **Βαθμός απόδοσης  $\eta$** . Βαθμός απόδοσης ορίζεται ο λόγος της ισχύος που παρέχει η διάταξη και της ισχύος που παρέχεται στη διάταξη μέσω ηλιακής ακτινοβολίας,

$$n = \frac{P_{\phi/\beta}}{P_{\eta\lambda}} \quad (3.1)$$

Συμβατικά, οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται για ακτινοβολία έντασης ενός ήλιου ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) και θερμοκρασία  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Η ανάλυση και προσομοίωσή τους γίνεται σε προγράμματα ανάλυσης κυκλωμάτων όπως το PSPICE και το PSIM και προγράμματα γενικότερης χρήσης όπως το MATLAB και το SCILAB με τη χρήση κατάλληλου ισοδύναμου κυκλώματος φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η εύρεση κυκλώματος που προσομοιάζει τη συμπεριφορά φωτοβολταϊκής διάταξης είναι απαραίτητη για τη παραπάνω μελέτη, ώστε να υπάρχει μέγιστη δυνατή απολαβή, αλλά και έλεγχος. Η επιλογή του πιο κατάλληλου ισοδύναμου έχει να κάνει με τον σκοπό και την απαιτούμενη ακρίβεια της εκάστοτε μελέτης. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ιδανικού μοντέλου, μοντέλου μονής διόδου και μοντέλου διπλής διόδου, καθώς και οι διαφορές μεταξύ τους. Το πιο σημαντικό κομμάτι της μελέτης είναι η αξιόπιστη αποκόμιση χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης μέσω των εξισώσεων που προκύπτουν. Ένα αξιοσημείωτο και βασικό χαρακτηριστικό των ισοδύναμων μοντέλων είναι ότι είναι μεταβαλλόμενης κλίμακας, δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσομοιάσουν από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μέχρι ολόκληρο φωτοβολταϊκό πάρκο, με κατάλληλη μεταβολή των χαρακτηριστικών παραμέτρων τους [24].



Σχ. 3. 1 Ικανότητα διαβάθμισης του ισοδύναμου μοντέλου μονής διόδου

Το ισοδύναμο μοντέλο φωτοβολταϊκού του Σχήματος 3.1 είναι το μοντέλο μονής διόδου, που περιγράφεται από μία διεγερμένη φωτοδίοδο (πηγή ρεύματος και δίοδος) και δύο αντιστάσεις  $R_h$  και  $R_s$  που προσομοιάζουν τις απώλειες της διάταξης. Περαιτέρω ανάλυση πραγματοποιείται στην

ενότητα 3.2.2, καθώς στο σχήμα λειτουργεί ως παράδειγμα και θα μπορούσε να αντικατασταθεί με οποιοδήποτε άλλο ισοδύναμο.

Σημειώνεται ότι οι χαρακτηριστικές καμπύλες που προκύπτουν με βάση τις εξισώσεις των παρακάτω ενοτήτων γίνεται με τη χρήση MATLAB και βασίζεται στο μοντέλο PV A-300 της Sunpower, με τα στοιχεία να φαίνονται στον πίνακα 3.1 [23]. Το μοντέλο έχει τροποποιηθεί κατάλληλα για την εκάστοτε χαρακτηριστική ανάλογα με το ηλεκτρικό μοντέλο στο οποίο βασίζεται. Τα προγράμματα προσομοίωσης επεξηγούνται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Πίνακας 3. 1 Στοιχεία PV A-300, Sunpower

#### Typical Electrical Performance

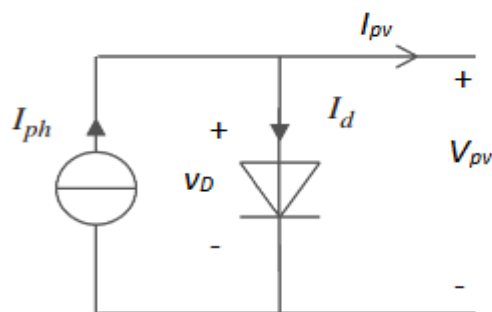
Open Circuit Voltage:	0.665 V
Short Circuit Current:	5.75 A
Maximum Power Voltage:	0.560 V
Maximum Power Current:	5.35 A
Rated Power:	3.0 W
Efficiency:	20.0% minimum

#### Temperature Coefficients

Voltage:	-1.9 mV / °C
Power:	-0.38 % / °C

## 3.2 Ηλεκτρικό ισοδύναμο ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από μία πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από δίοδο. Η πηγή ρεύματος παρέχει ρεύμα με τιμή ίση με το φωτόρευμα που προκαλείται με τη διέγερση της φωτοδιόδου [18], [25]. Το ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί μοντέλο που δε λαμβάνει υπόψιν απώλειες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία πραγματικού φωτοβολταϊκού. Η μελέτη του παρόλα αυτά είναι σημαντική για τη κατανόηση της λειτουργίας του, καθώς και της μορφής των χαρακτηριστικών καμπυλών.



Σχ. 3. 2 Ηλεκτρικό ισοδύναμο ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου ελεγχόμενο από δίοδο p-n

### 3.2.1 Σχέσεις ρεύματος-τάσης

Η μελέτη γίνεται σύμφωνα με τη διαδικασία των [18] και [25].

Στη προκειμένη περίπτωση, από νόμο του Kirchhoff για τα ρεύματα προκύπτει ότι το ζητούμενο ρεύμα  $I_{pv}$  βρίσκεται από την εξίσωση

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (3.2)$$

Η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, οπότε με βάση τον τύπο (2.14) ισχύει ότι

$$I_d = I_s \left[ e^{qV_D/nkT} - 1 \right] \quad (3.3)$$

Η εφαρμοζόμενη τάση διόδου  $V_{app}$  όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2 συμβολίζεται ως  $V_D$  καθώς στη περίπτωση της φωτοδίοδου δεν επιβάλλεται εξωτερική τάση από κύκλωμα, οπότε συμβολικά αντικαθίστανται με την τάση στα άκρα της λόγω των μηχανισμών που έχουν αναφερθεί για τη περίπτωση φωτεινής διέγερσης. Το ρεύμα  $I_s$  είναι το ρεύμα κόρου της διόδου p-n.

Τέλος, με αντικατάσταση της (3.3) στην (3.2) προκύπτει ότι το ρεύμα του ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι

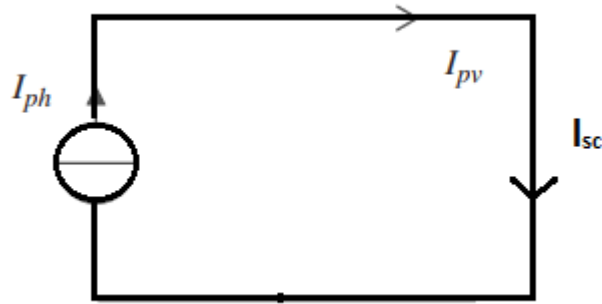
$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ e^{qV_D/nkT} - 1 \right] \quad (3.4)$$

**Τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$ :** Η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι ίση με τη τάση της διόδου  $V_D$  και το ρεύμα της διόδου ισούται με το ρεύμα φωτεινής διέγερσης  $I_{ph} = I_D$  αφού λόγω ανοιχτοκυκλώματος το ρεύμα εξόδου  $I_{pv}$  ισούται με 0. Έτσι, επιλύοντας την εξίσωση (4.3) ως προς τη ζητούμενη τάση, προκύπτει ότι η τάση ανοιχτοκύκλωσης ισούται με

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (3.5)$$

**Ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$**  : Το ρεύμα ανοιχτοκύκλωσης, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχ. 3.3, είναι ίσο με το φωτόρεύμα  $I_{ph}$  καθώς το ρεύμα προτιμάει τη διαδρομή μηδενικής αντίστασης, οπότε η τάση διόδου θεωρείται άπειρη και το ρεύμα μηδενικό. Άρα

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (3.6)$$



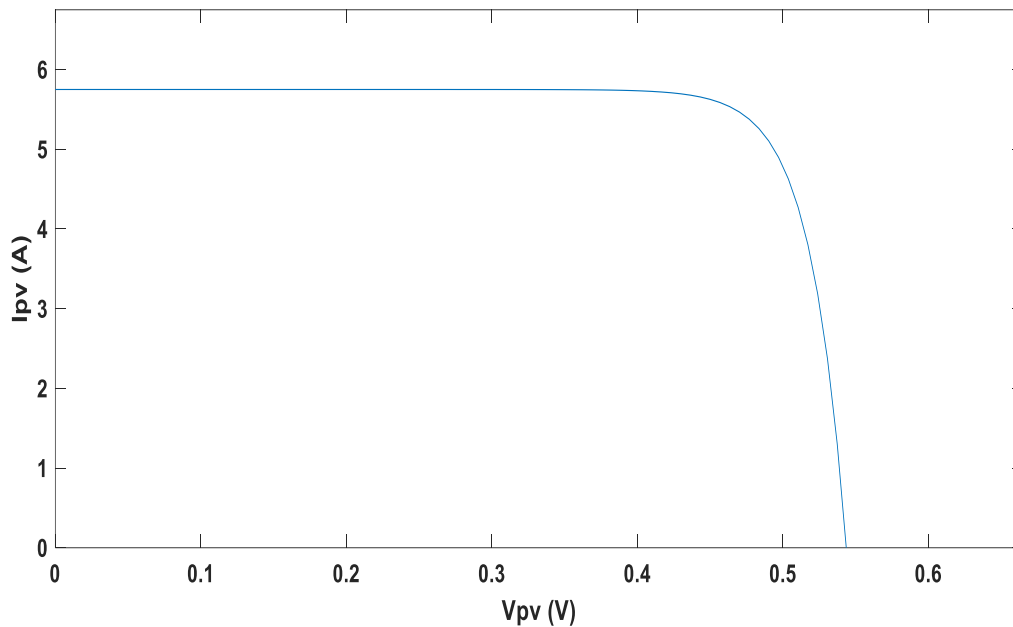
Σχ. 3. 3 Ρεύμα βραχυκύκλωσης ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου

### 3.2.2 Ανάστροφη λειτουργία διόδου

Στη περίπτωση μηδενικής παραγωγής παραδείγματος χάριν λόγω ολικής σκίασης ή νυχτερινής λειτουργίας, η διόδος επέρχεται σε κατάσταση ανάστροφης πόλωσης (ενότητες 2.2.3 για δίοδο Schottky και 2.2.9 για δίοδο p-n) και διαρρέεται ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_s$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η όποια ΦΒ διάταξη να δρα ως φορτίο καταναλώνοντας ενεργό ισχύ. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, το ρεύμα κόρου είναι αρκετά μικρό συγκριτικά με το ρεύμα λειτουργίας, οπότε η κατανάλωση ισχύος από τη ΦΒ διάταξη στην άνω περίπτωση να είναι μικρή.

### 3.2.3 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

Με επεξεργασία της μη γραμμικής εξίσωσης (3.4) προκύπτει χαρακτηριστική καμπύλη με την μορφή του σχήματος 3.4, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η τάση εξόδου  $V_{pv}$  ισούται με τη τάση της διόδου  $V_D$  για όλο το δυνατό εύρος της τάσης  $V_{pv}$ , δηλαδή  $[0, V_{oc}]$ .



Σχ. 3. 4 Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

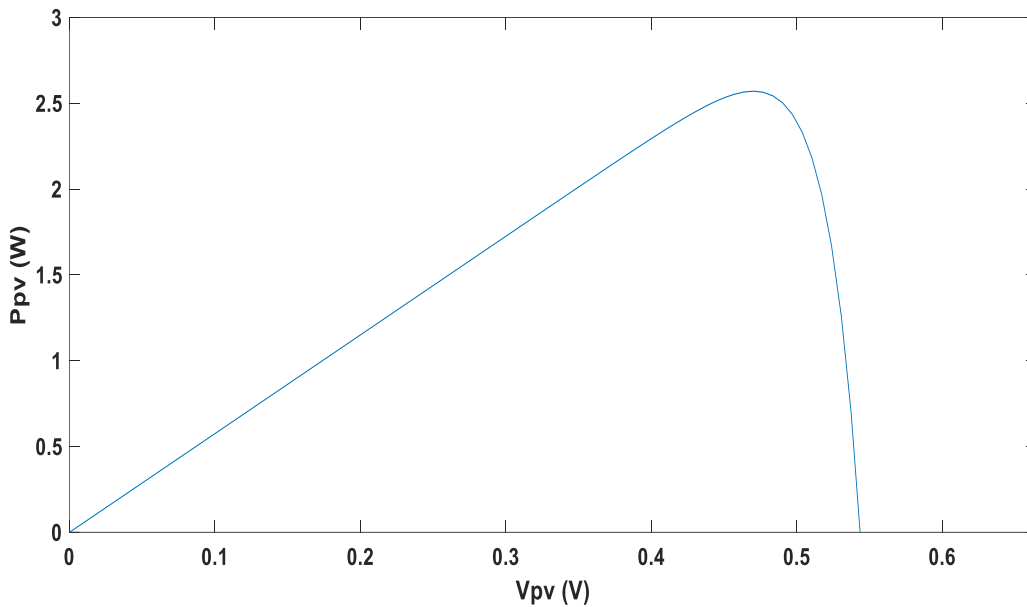
### 3.2.4 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η ενεργός ισχύς στην έξοδο ενός κυκλώματος δίνεται από το γινόμενο του ρεύματος επί της τάσης στους ακροδέκτες εξόδου. Επίσης, το ρεύμα εξόδου είναι ήδη υπολογισμένο από τον τύπο (3.4). Με αντικατάσταση λοιπόν προκύπτει ότι :

$$P = \left[ I_{ph} - I_s \left( e^{qV_{pv}/nKt} - 1 \right) \right] V_{pv} \quad (3.7)$$

Η τάση εξόδου  $V_{pv}$  είναι ίση με τη τάση της διόδου  $V_D$ . Με βάση την εξίσωση (3.7) παράγεται η χαρακτηριστική P-V του σχήματος 3.5.





Σχ. 3. 5 Χαρακτηριστική P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

### 3.2.5 Μέγιστη απολαβή ισχύος

Ο μαθηματικός υπολογισμός των στοιχείων  $I_{MPP}$  και  $V_{MPP}$  για τον υπολογισμό της μέγιστης ισχύος δεν είναι εν γένη απαραίτητος, καθώς οι μικροδιαφορές που μπορούν να παρουσιάσουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, είτε κατασκευαστικά είτε λόγω διαφορετικού φωτισμού, κάνουν το μαθηματικό μοντέλο μη κλιμακούμενο σε διάταξη και ταυτόχρονα χρονοβόρο. Η εξασφάλιση λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος γίνεται μέσω ελέγχου της τάσης εξόδου  $V_{pv}$ . Ο κατάλληλος έλεγχος της πραγματοποιείται αλγοριθμικά και ο τρόπος θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 4. Η μαθηματική επεξήγηση πραγματοποιείται για λόγους πληρότητας όσον αφορά τη παρουσίαση των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η μελέτη πραγματοποιείται με γνώμονα τις [18] και [25].

**Υπολογισμός  $V_{MPP}$  :** Καθώς η τάση λαμβάνει τη τιμή αυτή για τη μέγιστη παρεχόμενη ισχύ, και η μέγιστη αυτή ισχύς μπορεί να βρεθεί μηδενίζοντας τη πρώτη παράγωγο της εξίσωσης ισχύος ως προς την τάση εξόδου

$$\frac{\partial P}{\partial V_{PV}} = 0 \quad (3.8)$$

θα αναζητηθεί τύπος για την  $V_{MPP}$  με τον τρόπο αυτό.

Εφαρμόζοντας την (3.8) στην (3.7) και επιλύοντας την εξίσωση προκύπτει ότι

$$\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 = e^{\left(\frac{qV_{MPP}}{nkT}\right)} \left(\frac{qV_{MPP}}{nkT} + 1\right) \quad (3.9)$$

Επίσης, από τη σχέση (3.5) ισχύει  $V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right)$ . Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.5) και (3.9) προκύπτει

$$e^{\left(\frac{qV_{MPP}}{nkT}\right)} \left(\frac{qV_{MPP}}{nkT} + 1\right) = e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}} \quad (3.10)$$

Η εξίσωση αυτή, όντας μη γραμμική, λύνεται με χρήση επαναληπτικών μεθόδων από ηλεκτρονικό υπολογιστή.

**Υπολογισμός  $I_{MPP}$**  : Αν στην εξίσωση ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού (3.4) θέσουμε  $V_D = V_{MPP}$  τότε αναγκαστικά θα ισχύει και  $I_{pv} = I_{MPP}$  αφού το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος  $M$ . Σημειώνεται ότι αντίστοιχη εξίσωση με την (3.10) μπορεί να βρεθεί με την εξής εξίσωση,  $\frac{\partial P}{\partial I_{pv}} = 0$  αντίστοιχα με την τάση μέγιστης ισχύος. Η παρακάτω μεθοδολογία βασίζεται στο γεγονός ότι η τάση  $V_{MPP}$  υπολογίστηκε ήδη και βγάζει συνάρτηση  $I_{maxP} = f(V_{maxP})$ . Με αντικατάσταση των  $V_D = V_{MPP}$  και  $I_{pv} = I_{MPP}$  στην (3.4) έπεται

$$I_{MPP} = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{qV_{MPP}}{nkT}} - 1 \right] \quad (3.11)$$

Επιπρόσθετα, από την (3.9) έχουμε

$$e^{\left(\frac{qV_{MPP}}{nkT}\right)} = \frac{\frac{I_{ph}}{I_s} + 1}{\left(\frac{qV_{MPP}}{nkT} + 1\right)} \quad (3.12)$$

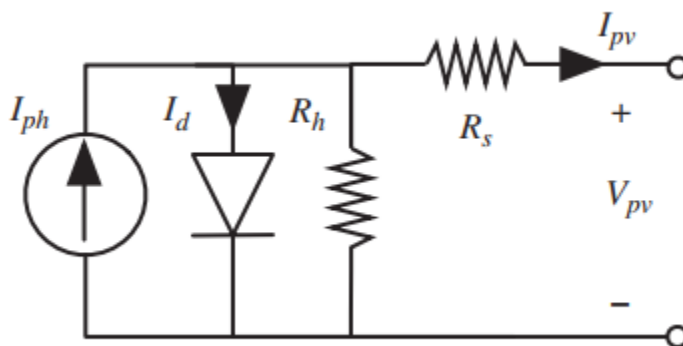
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.11) και (3.12) προκύπτει τελικά ότι

$$I_{MPP} = \frac{I_{ph} \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \frac{qV_{MPP}}{nkT}}{\left(\frac{qV_{MPP}}{nkT} + 1\right)} \quad (3.13)$$

**Υπολογισμός  $P_{max}$**  : Από τις εξισώσεις (3.10) και (3.13) καταλήγουμε

$$P_{\max} = I_{MPP} V_{MPP} = \frac{I_{ph} \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \frac{q}{nkt} V_{MPP}^2}{\left( \frac{qV_{MPP}}{nkt} + 1 \right)} \quad (3.14)$$

### 3.3 Ηλεκτρικό ισοδύναμο μονής διόδου



Σχ. 3. 6 Ισοδύναμο μοντέλο μονής διόδου

Το μοντέλο αυτό ονομάζεται και ισοδύναμο μοντέλο πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου καθώς περιλαμβάνει απώλειες ρεύματος και τάσης μέσω της ύπαρξης των αντιστάσεων  $R_h$  και  $R_s$  και ταυτόχρονα είναι το ηλεκτρικό ισοδύναμο που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις.

**Αντίσταση  $R_h$  :** Η αντίσταση αυτή, και κατ' επέκταση το ρεύμα  $I_h$  που τη διαρρέει, υποδηλώνει τη προσάξηση του ρεύματος που διαπερνάει τη μη ιδανική δίοδο του στοιχείου. Με τον τρόπο αυτό, η δίοδος αυτή καθ' αυτή στο ισοδύναμο είναι ιδανική. Ο κλάδος αυτός αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα κατά την ανάστροφη πόλωση του φωτοβολταϊκού. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι επιπρόσθετοι μηχανισμοί μεταφοράς που εκδηλώνονται στο ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού (πχ επανασυνδέσεις μέσω βαθέων ενεργειακών καταστάσεων) συμβάλουν στο ρεύμα  $I_h$  και περιλαμβάνονται στον υπολογισμό της  $R_h$  [18], [22].

**Αντίσταση  $R_s$  :** Η αντίσταση αυτή λαμβάνει υπόψιν της τις αντιστάσεις που εισάγουν οι ωμικές επαφές, ο όγκος του υποστρώματος και οι αγωγάτοι διάυλοι μεταφοράς. Συνήθως είναι πολύ μεγάλη συγκριτικά με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος και έχει σχετικά μικρή επίδραση [18], [22].

Ανάλογα με τις συνθήκες, οι αντιστάσεις αυτές μπορούν να παρουσιάσουν σταθερή ή μεταβαλλόμενη συμπεριφορά. Οι τιμές τους καθορίζονται ανάλογα με το περιβάλλον τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και όχι ανάλογα με τα στοιχεία αυτά καθ' αυτά.

### 3.3.1 Σχέσεις Ρεύματος-Τάσης

Η μελέτη γίνεται σύμφωνα με τη διαδικασία των [24], [25] και [26]. Με εφαρμογή νόμου ρευμάτων Kirchhoff στο σημείο τομής των ωμικών αντιστάσεων έπεται

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_h \quad (3.15)$$

Με εφαρμογή νόμου τάσεων Kirchhoff στο υποκύκλωμα με τις αντιστάσεις προκύπτει ότι

$$V_D = V_{pv} + I_{pv}R_h \quad (3.16)$$

Τέλος, υπενθυμίζεται ότι για το ρεύμα διόδου από την (3.3) ισχύει ότι  $I_d = I_S \left( e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1 \right)$

Αντικαθιστώντας τις (3.16) και (3.3) στην (3.15) καταλήγουμε στην εξής σχέση ρεύματος-τάσης

$$I_{pv} = I_{ph} - I_S \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_h)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_h}{R_h} \quad (3.17)$$

**Τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$ :** Ανοιχτοκυκλώνοντας τα άκρα εξόδου, η αντίσταση  $R_s$  δεν διαρρέεται από ρεύμα και έχει μηδενική πτώση τάσης. Μαθηματικά αυτό σημαίνει ότι  $I_{pv}=0$  και ότι  $V_{oc}=V_D$ . Τέλος από τον νόμο του Ohm για την αντίσταση  $R_h$  ισχύει ότι

$$I_h = \frac{V_{oc}}{R_h} \quad (3.18)$$

Με βάσει τα παραπάνω, τη σχέση (3.17) και (3.18), συνεπάγεται για την τάση ανοιχτοκύκλωσης ότι

$$V_{oc} + I_S \cdot e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}} = I_{ph} R_h + I_S \quad (3.19)$$

**Ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$**  : Βραχυκυκλώνοντας τα άκρα εξόδου το ζητούμενο ρεύμα ισούται με το ρεύμα εξόδου, δηλαδή  $I_{sc} = I_{pv}$  και η τάση εξόδου μηδενίζεται, δηλαδή  $V_{pv}=0$  . Κατά τα άλλα, το κύκλωμα λειτουργεί ως έχει με τις αντιστάσεις  $R_h$  και  $R_s$  να είναι παράλληλες. Με αυτά τα δεδομένα, από την (3.17) προκύπτει η εξής σχέση

$$I_{sc} \left( 1 + \frac{R_s}{R_h} \right) + I_s \left( e^{\frac{q(I_{sc} R_s)}{nkT}} \right) = I_{ph} + I_s \quad (3.20)$$

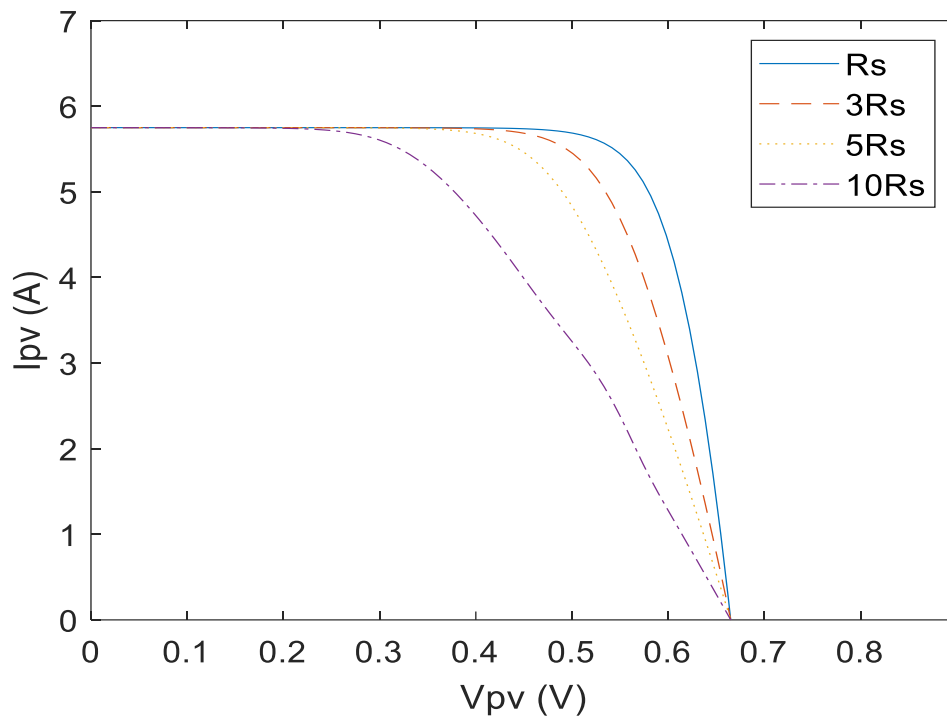
Οι σχέσεις (3.19) και (3.20) είναι εμφανώς μη γραμμικές και αν χρειαστεί επιλύονται με χρήση επαναληπτικών μεθόδων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι τιμές αυτές δεν βρίσκονται μαθηματικά αλλά με πρακτικές μετρήσεις. Η μαθηματική ανάλυση είναι χρήσιμη για τον κατάλληλο καθορισμό των παραμέτρων αυτών κατά τη κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

### 3.3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης I-V

#### 3.3.2.1 Επίδραση $R_s$

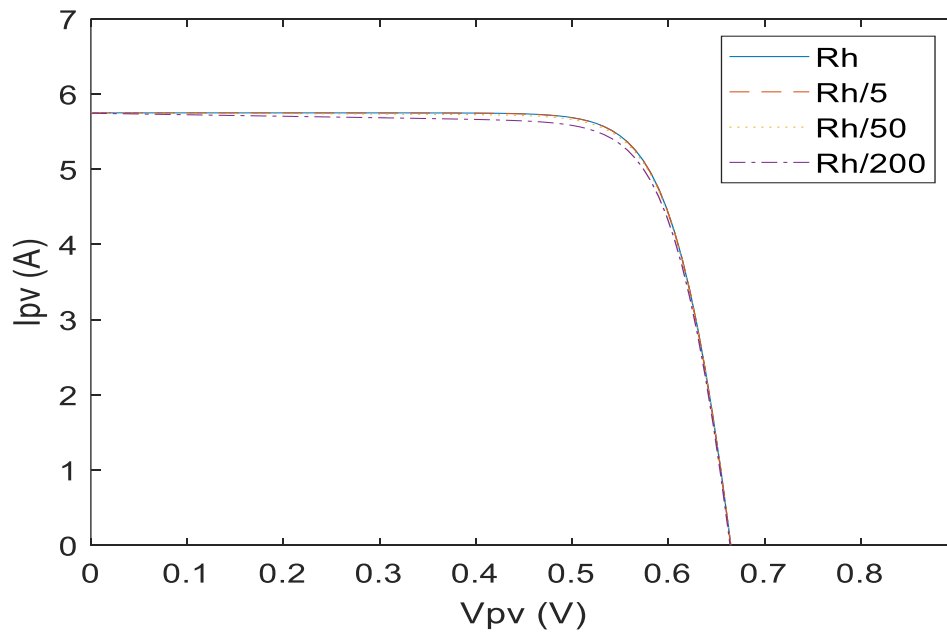
Συγκριτικά με το ιδανικό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου, η ύπαρξη των επιπλέον αντιστάσεων δεν αλλάζει τη μορφή της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης, αλλά προφανώς έχουν επιπτώσεις, κυρίως όσον αφορά το σημείο μέγιστης ισχύος  $M$  και τις τιμές ρεύματος και τάσης που το καθορίζουν. Στα σχήματα 3.7 και 3.8 φαίνεται η επίδραση που έχει η μεταβολή των αντιστάσεων αυτών στη καμπύλη I-V και στο σημείο  $M$ , σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.17), (3.19) και (3.20) για την καμπύλη και (3.25), (3.26) για το σημείο μέγιστης ισχύος. Στο Σχ. 3.7 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I-V του ίδιου ΦΒ στοιχείου για  $R_s$ ,  $3R_s$ ,  $5R_s$  και  $10R_s$  σύμφωνα με την εξίσωση (3.17).

Παρατηρούμε ότι αύξηση της  $R_s$  δε προκαλεί ιδιαίτερες διακυμάνσεις στις μέγιστες τιμές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ , αλλά επηρεάζει έντονα τις τιμές των  $I_{MPP}$  και  $V_{MPP}$  μετακινώντας το σημείο  $M$  και μειώνοντας τη μέγιστη δυνατή ισχύ που παρέχει το φωτοβολταϊκό.



Σχ. 3. 7 Επίδραση αύξησης της  $R_s$

### 3.3.2.2 Επίδραση $R_h$



Σχ. 3. 8 Επίδραση μείωσης της  $R_h$

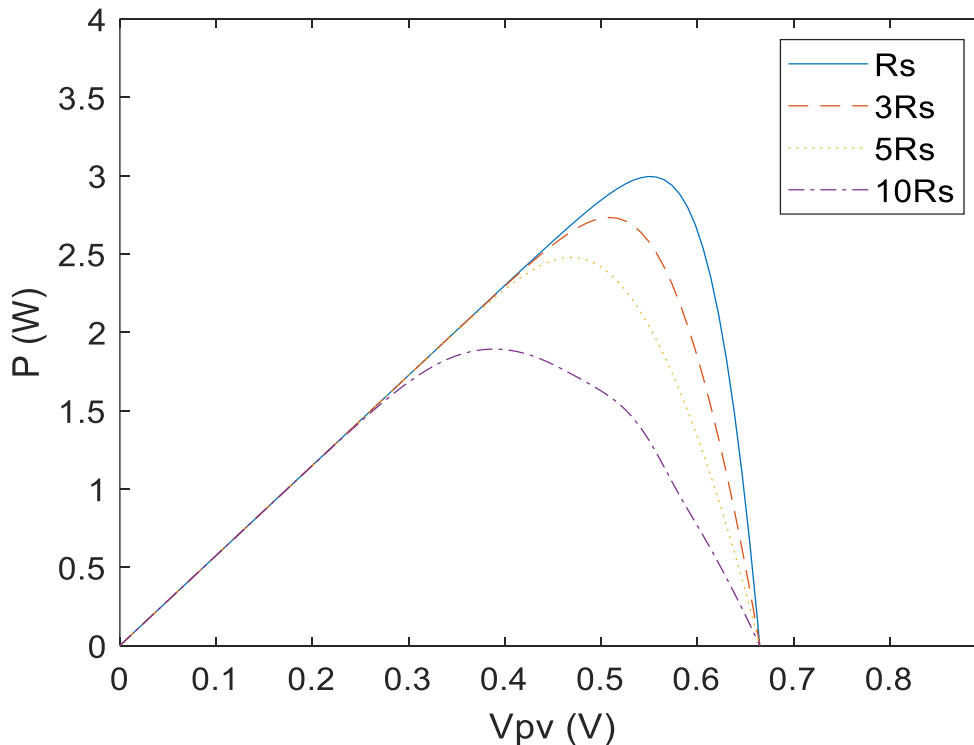
Σε αντίθεση με την αντίσταση  $R_s$ , η μεταβολή της  $R_h$  δεν επηρεάζει το ίδιο έντονα τη χαρακτηριστική και το σημείο μέγιστης ισχύος εκτός αν υπάρξει δραστική μείωσή της. Αυτό είναι λογικό καθώς εμφανίζεται μόνο στο γραμμικό τμήμα της εξίσωσης (3.17), σε αντίθεση με την  $R_s$  που βρίσκεται και στο εκθετικό της τμήμα. Στο Σχ. 3.8 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I-V του ίδιου ΦΒ στοιχείου για  $R_h$ ,  $R_h/5$ ,  $R_h/50$  και  $R_h/200$ . Παρατηρείται ότι ακόμα και στη περίπτωση που διαιρείται με έναν τόσο μεγάλο αριθμό όσο το πενήντα, η επίδραση είναι αμελητέα.

### 3.3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης P-V

Με βάση την εξίσωση ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού μονής διόδου (3.17) εύκολα προκύπτει η εξίσωση ισχύος του μοντέλου μονής διόδου:

$$P = [I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_h}] V_{pv} \quad (3.21)$$

#### 3.3.4.1 Επίδραση $R_s$

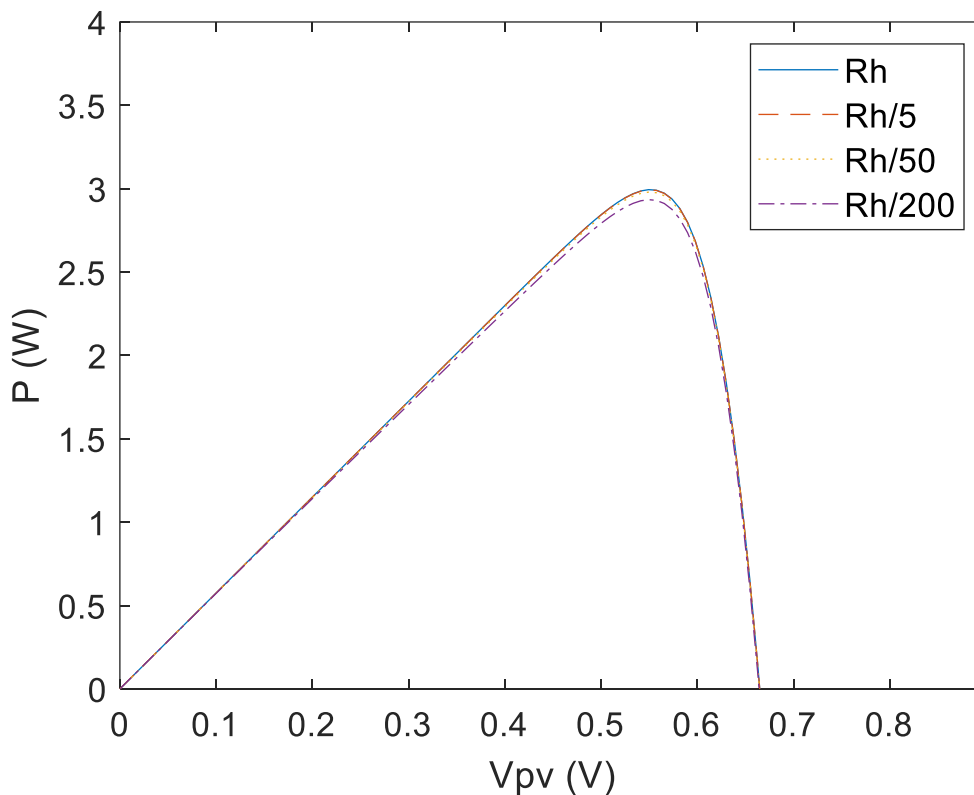


Σχ. 3. 9 Επίδραση αύξησης της  $R_s$  στην ισχύ

Κατά αντιστοιχία με τις I-V χαρακτηριστικές, η επίδραση της  $R_s$  είναι αξιοπρόσεχτη λόγω της επίδρασής της στο ρεύμα και προκαλεί έντονη μείωση της μέγιστης ισχύος που δύναται να παρέχει το ΦΒ. Το Σχ. 3.9 ακολουθεί τα ίδια βήματα αύξησης  $R_s$  με το Σχ. 3.7 της ενότητας 3.3.2.2.

### 3.3.4.2 Επίδραση $R_h$

Καθώς η μεταβολή της  $R_h$  προκαλεί αναλογικά μικρές μεταπτώσεις στο ρεύμα, όπως και στην ενότητα 3.3.2.2 φαίνεται ότι απαιτούνται αρκετά μεγάλες μειώσεις στην αντίσταση  $R_h$  για παρατήρηση σοβαρής μείωσης μέγιστης παρεχόμενης ισχύος. Στο Σχ. 3.10 ακολουθεί τα ίδια βήματα μείωσης  $R_h$  με το Σχ. 3.8 της ενότητας 3.3.2.1.



Σχ. 3.10 Επίδραση μείωσης της  $R_h$  στην ισχύ

### 3.3.4 Μέγιστη απολαβή ισχύος

Σε πρακτικό επίπεδο η διαδικασία εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος πραγματοποιείται με επαναληπτικά προγράμματα που βασίζονται σε δοκιμές τιμών. Καθώς αυτή η διαδικασία θα



αναλυθεί περαιτέρω στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται για λόγους πληρότητας μαθηματικός τρόπος υπολογισμού της μέγιστης ισχύος χωρίς χρήση επαναληπτικής μεθόδου. Η επίλυση γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης Lambert  $W(x)$ , η οποία ορίζεται ως εξής: αν η μεταβλητή  $x = y e^y$  τότε  $W(x) = y$ .

Για την αξιοποίηση της συνάρτησης Lambert, η εξίσωση (3.17) πρέπει να έρθει σε μορφή  $I_{pv} = F(V_{pv})$  ή  $V_{pv} = H(I_{pv})$ . Με κατάλληλες μετατροπές καταλήγουμε στις εξής μορφές [24]:

$$I_{pv} = F(V_{pv}) = \frac{R_h(I_{ph} + I_s) - V_{pv}}{R_s + R_h} - \frac{nkT}{R_s} W(\theta_1) \quad (3.22)$$

Όπου

$$\theta_1 = \frac{(R_h // R_s) I_s e^{\frac{R_s R_h (I_{ph} + I_s) + R_h V_{pv}}{nkT (R_s + R_h)}}}{nkT} \quad (3.23)$$

και

$$V_{pv} = H(I_{pv}) = R_h(I_{ph} + I_s) - I_{pv} (R_s + R_h) - nkT W(\theta_2) \quad (3.24)$$

Όπου

$$\theta_2 = \frac{R_h I_s e^{\frac{R_h (I_{ph} + I_s - I_{pv})}{nkT}}}{nkT} \quad (3.25)$$

Οι εξισώσεις αυτές επιτρέπουν τη υλοποίηση του ισοδύναμου μοντέλου σε οποιοδήποτε περιβάλλον προσομοίωσης καθώς δεν χρειάζονται επαναληπτικές διαδικασίες για την εύρεση του σημείου λειτουργίας και επιπρόσθετα υπολογιστική δυσκολία παρουσιάζει μόνο η εύρεση του  $W(\theta)$ , για την οποία όμως υπάρχουν έτοιμα προγράμματα. Με βάση τα προγράμματα αυτά, μια αρκετά καλή προσέγγιση των τιμών μέγιστης ισχύος.

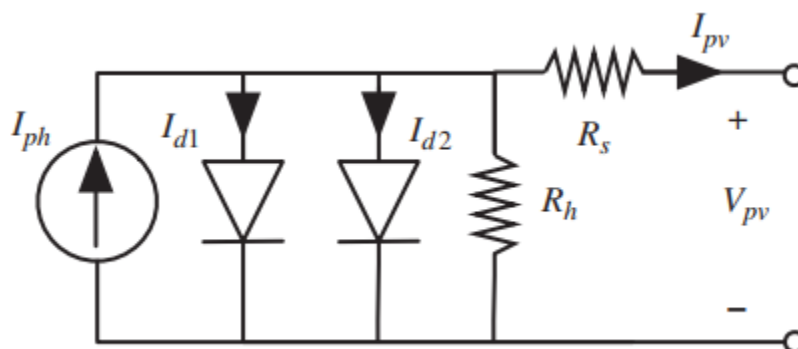
$$I_{\max P} = I_{ph} \left(1 - \frac{1}{w}\right) - \frac{nkT(w - 1)}{R_h} \quad (3.26)$$

$$V_{\max P} = \left( \frac{R_S + R_h}{R_h} \right) nkT (w - 1) - R_S I_{ph} \left( 1 - \frac{1}{w} \right) \quad (3.27)$$

Όπου

$$w = W \left( \frac{I_{ph}}{I_S} \right) \quad (3.28)$$

### 3.4 Ηλεκτρικό ισοδύναμο διπλής διόδου



Σχ. 3. 11 Ηλεκτρικό ισοδύναμο διπλής διόδου

Το μοντέλο αυτό είναι παρόμοιο με το μοντέλο μονής διόδου, με τις αντιστάσεις  $R_h$  και  $R_s$  να προσομοιάζουν τις απώλειες ρεύματος και τάσης αντίστοιχα, και τον συνδυασμό πηγής ρεύματος και διόδων να αποτελούν τον μηχανισμό της φωτοδίοδου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2. Η ύπαρξη της δεύτερης διόδου εξασφαλίζει την προσομοίωση των απωλειών επανασύνδεσης (recombination losses) που επηρεάζουν εμμέσως τις τιμές της μέγιστης παρεχόμενης τάσης (τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{OC}$ ) και ρεύματος (ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$ ). Όπως αναφέρθηκε ήδη στην αρχή του κεφαλαίου, όταν ένα φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο  $E_G$  του υλικού της διόδου προσκρούσει σε αυτή, απορροφάται από χημικό δεσμό στο υλικό και δημιουργεί ζεύγος ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρονίων και οπών) που κατανέμονται στη ζώνη σθένους και αγωγιμότητας αντίστοιχα, δημιουργώντας διαφορά δυναμικού και κίνηση ηλεκτρονίων. Παρόλα αυτά, κατά τη θερμική κίνηση των φορέων αυτών υπάρχει η πιθανότητα επανασύνδεσης τους λόγω των αντίθετων φορτίων που φέρουν, μειώνοντας το συνολικό παρεχόμενο ρεύμα και τη διαφορά δυναμικού. Οι απώλειες που προκαλούνται λόγω του μηχανισμού αυτού ονομάζονται απώλειες επανασύνδεσης και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πού εμφανίζονται στην διόδο [27]. Το μοντέλο διπλής διόδου είναι εξαιρετικό στη προσομοίωση των απωλειών αυτών στη περιοχή όπου οι ημιαγωγοί τύπου n και p ενώνονται. Η περιοχή αυτή

είναι γνωστή ως περιοχή απόθησης ελευθέρων φορέων (depletion region), η οποία συμβολίζεται με το γράμμα  $w$  και παρουσιάστηκε στο 2.2.7 στη δίοδο p-n [24].

Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι οι δύο δίοδοι είναι διαφορετικές αλλά όχι ανεξάρτητες. Η μαθηματική σύνδεση των δύο γίνεται αρχικά μέσω των ρευμάτων ανάστροφης πόλωσης, και ισχύει η σχέση

$$I_{S2} = \frac{T^2}{3.77} I_{S1} \quad (3.29)$$

Η τιμή του ρεύματος ανάστροφης πόλωσης της δεύτερης δίοδου είναι περίπου τρεις με πέντε φορές μεγαλύτερη από της πρώτης, ανάλογα με την απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Προφανώς οι τιμές των ρευμάτων αυτών επηρεάζουν και τις τιμές των αντίστοιχων ρευμάτων ορθής πόλωσης σύμφωνα με τη σχέση (3.3). Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι δίοδοι είναι κατασκευασμένες και με διαφορετικό συντελεστή ποιότητας  $n$ . Συμβατικά, με σκοπό την απλοποίηση της μοντελοποίησης τους, θέτουμε  $n_1=1$  και  $n_2=2$  αν και στη πράξη ισχύει ότι  $n_1 \in [1, 1.5]$  και  $n_2 \in [2, 5]$ . Η διαφορά του μοντέλου διπλής δίοδου σε σχέση με το μοντέλο μονής δίοδου είναι έντονη κυρίως κατά τη λειτουργία σε συνθήκες αρκετά χαμηλής ή υψηλής έντασης ακτινοβολίας [24].

### 3.4.1 Σχέσεις ρεύματος-τάσης

Όλες οι μαθηματικές σχέσεις που θα παρουσιαστούν υπολογίζονται κατ' αντιστοιχία με το μοντέλο μονής δίοδου, οπότε και παρουσιάζονται λιγότερο αναλυτικά. Για το ρεύμα εξόδου ισχύει ότι

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{S1} \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{n_1 kT}} - 1 \right) - I_{S2} \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{n_2 kT}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_h} \quad (3.30)$$

**Τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$**  : Προφανώς όπως και στο μοντέλο μονής δίοδου η σχέση για τη τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι μη γραμμική, και είναι η εξής

$$V_{oc} + I_{S1} e^{\frac{qV_{oc}}{n_1 kT}} + I_{S2} e^{\frac{qV_{oc}}{n_2 kT}} = I_{ph} R_h + I_{S1} + I_{S2} \quad (3.31)$$

**Ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$**  : Αντίστοιχα, η σχέση για το ρεύμα βραχυκύκλωσης:

$$I_{sc} \left( 1 + \frac{R_s}{R_h} \right) + I_{S1} \left( e^{\frac{q(I_{sc} R_s)}{n_1 k T}} \right) + I_{S2} \left( e^{\frac{q(I_{sc} R_s)}{n_2 k T}} \right) = I_{ph} + I_{S1} + I_{S2} \quad (3.32)$$

### 3.5 Επίδραση εξωτερικών παραγόντων

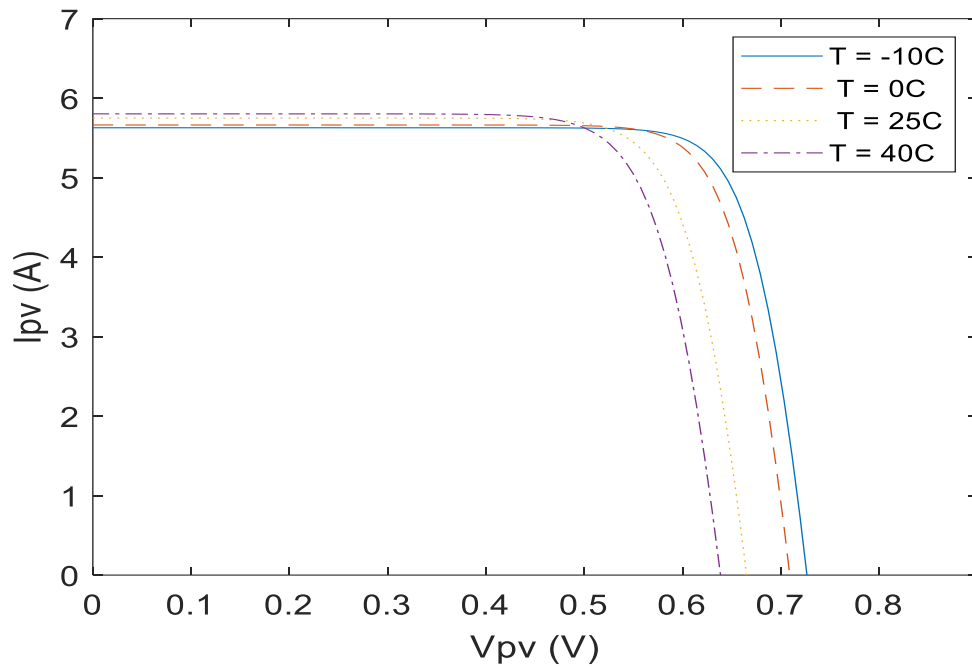
Οι δύο πιο σημαντικοί εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία. Στο κεφάλαιο 2, έγινε μελέτη υπό σταθερή θερμοκρασία  $T_0=298 \text{ }^\circ\text{K}$  και ακτινοβολία  $G_0=1000 \text{ W/m}^2$  ώστε να γίνει κατανοητή η σημασία που έχει η μελέτη για τη βέλτιστη τοποθέτηση ΦΒ στοιχείων. Είναι εμφανώς απαραίτητο να γίνει και η αντίστοιχη μελέτη της συμπεριφοράς ενός στοιχείου σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού θεωρώντας σταθερές γωνίες, καθώς η κάθε περιοχή παρουσιάζει διαφορετικές μέσες τιμές και διακυμάνσεις των στοιχείων αυτών. Για τη μελέτη αυτή, είναι αναγκαία η ύπαρξη έκφρασης του φωτορεύματος  $I_{ph}$  ως συνάρτηση των δύο αυτών παραγόντων. Η έκφραση αυτή δίνεται από τον τύπο

$$I_{ph} = [I_{sc}(T_0, G_0) + k_i (T - T_0)] \frac{G}{G_0} \quad (3.33)$$

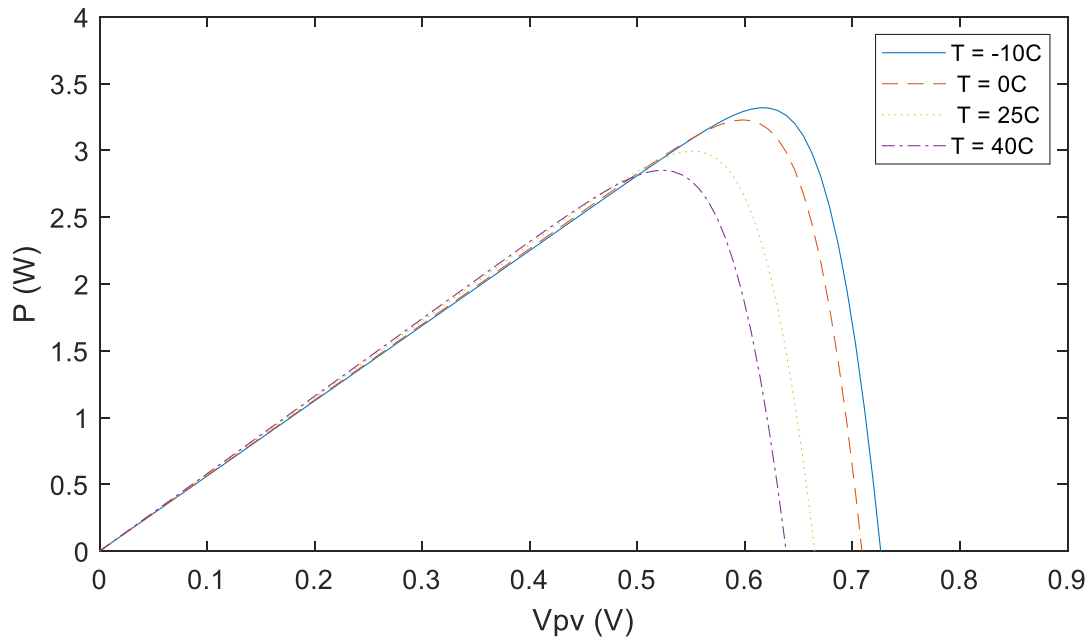
Όπου  $T_0=298 \text{ }^\circ\text{K}$  ( $=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $G_0=1000 \text{ W/m}^2$  και  $I_{sc}(T_0, G_0)$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης στις συνθήκες αυτές.

#### 3.5.1 Επίδραση θερμοκρασίας

Αρχικά θεωρούμε φωτισμό σε διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες αλλά υπό σταθερή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ . Σύμφωνα με την εξίσωση (3.17) για το ρεύμα εξόδου του μοντέλου μονής διόδου και (3.33) για το φωτόρευμα προκύπτει η εξής χαρακτηριστική I-V για θερμοκρασίες  $T = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , οι οποίες φαίνονται στο Σχ. 3.12. Επίσης σύμφωνα με την εξίσωση (3.21) για την ισχύ εξόδου και την (3.33) για το φωτόρευμα προκύπτει η χαρακτηριστική P-V του Σχ. 3.13. Οι χαρακτηριστικές εξάγονται σε περιβάλλον MATLAB και πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση στο Κεφ. 4.



Σχ. 3. 12 Επίδραση θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική I-V πραγματικού φωτοβολταϊκού

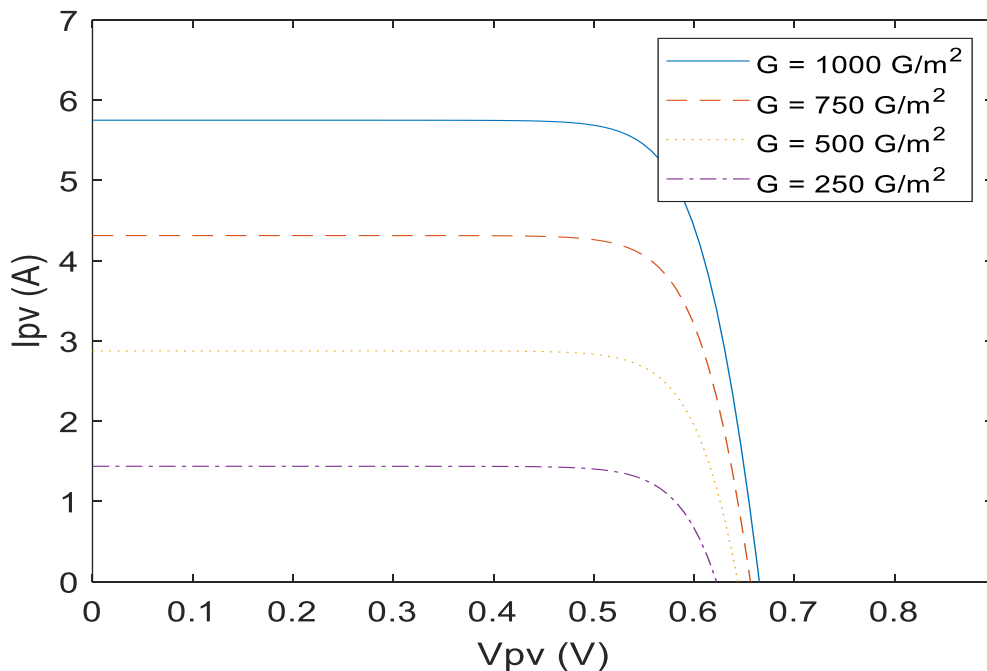


Σχ. 3. 13 Επίδραση θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική P-V πραγματικού φωτοβολταϊκού

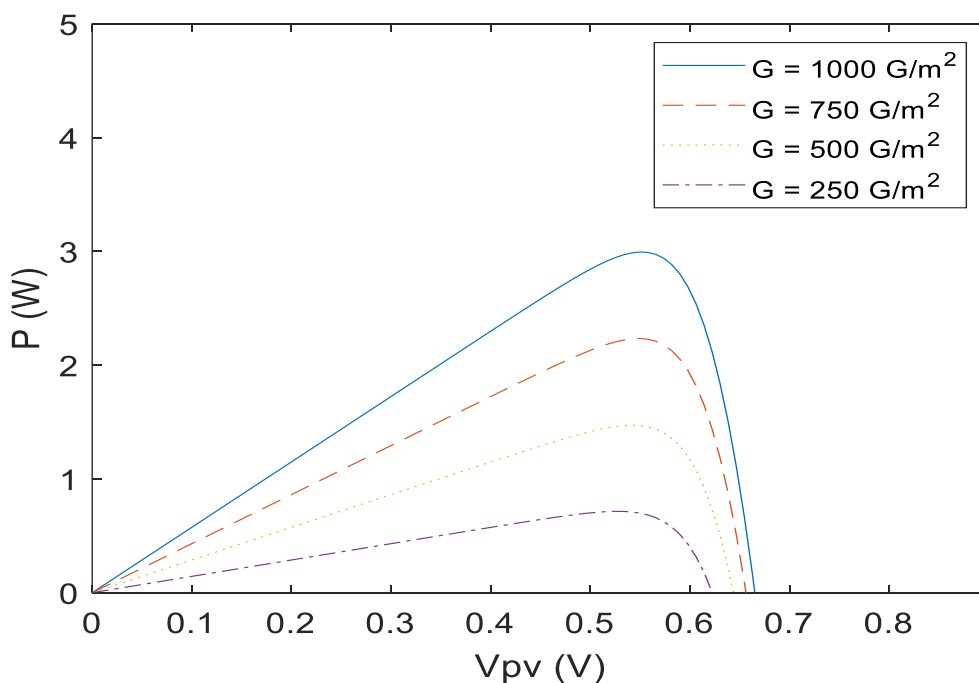
Αρχικά θεωρούμε φωτισμό σε διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες αλλά υπό σταθερή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ . Σύμφωνα με την εξίσωση (3.17) για το ρεύμα εξόδου του μοντέλου μονής διόδου και (3.33) για το φωτόρευμα προκύπτει η εξής χαρακτηριστική I-V για θερμοκρασίες  $T = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$  και  $T = 40\text{ }^\circ\text{C}$ , οι οποίες φαίνονται στο Σχ. 3.12. Επίσης σύμφωνα με την εξίσωση (3.21) για την ισχύ εξόδου και την (3.33) για το φωτόρευμα προκύπτει η χαρακτηριστική P-V του Σχ. 3.13.

Στα σχήμα 3.12 παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει σημαντική μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, άρα και του εύρους τιμών της τάσης, χωρίς να έχει παρατηρήσιμο αντίκτυπο στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Λόγω της αλλαγής αυτής, το σημείο μέγιστης ισχύος MPP, καθώς και το συνολικό εύρος τιμών της ισχύος, μετατοπίζονται οριζοντίως και η μέγιστη παρεχόμενη ισχύς μειώνεται με ρυθμό περίπου 0.3-0.5% ανά βαθμό κελσίου. Αυτό συμβαίνει καθώς η τιμή της τάσης μέγιστης ισχύος  $V_{MPP}$  ελαττώνεται ενώ η τιμή του ρεύματος μέγιστης ισχύος  $I_{MPP}$  παραμένει περίπου ίδια. Η διαφορά στην παρεχόμενη ισχύ παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα στο Σχ. 3.13, όπου φαίνεται η μετατόπιση του MPP και η μείωση του εύρους παρεχόμενης ισχύος.

### 3.5.2 Επίδραση πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας



Σχ. 3. 14 Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική I-V πραγματικού φωτοβολταϊκού



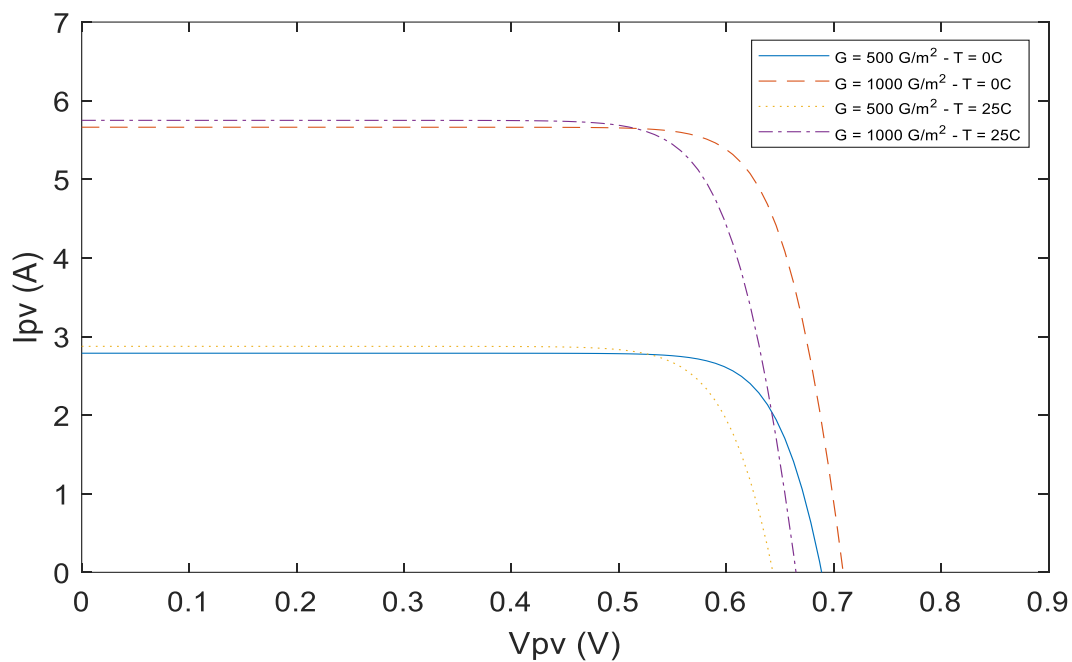
Σχ. 3. 15 Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική P-V πραγματικού φωτοβολταϊκού

Κατ' αντιστοιχία με την επίδραση θερμοκρασίας στο 3.5.1, θεωρούμε σταθερή θερμοκρασία και μεταβλητή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας για τα σχήματα 3.14 και 3.15 για τιμές  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $G = 750 \text{ W/m}^2$ ,  $G = 500 \text{ W/m}^2$  και  $G = 250 \text{ W/m}^2$ .

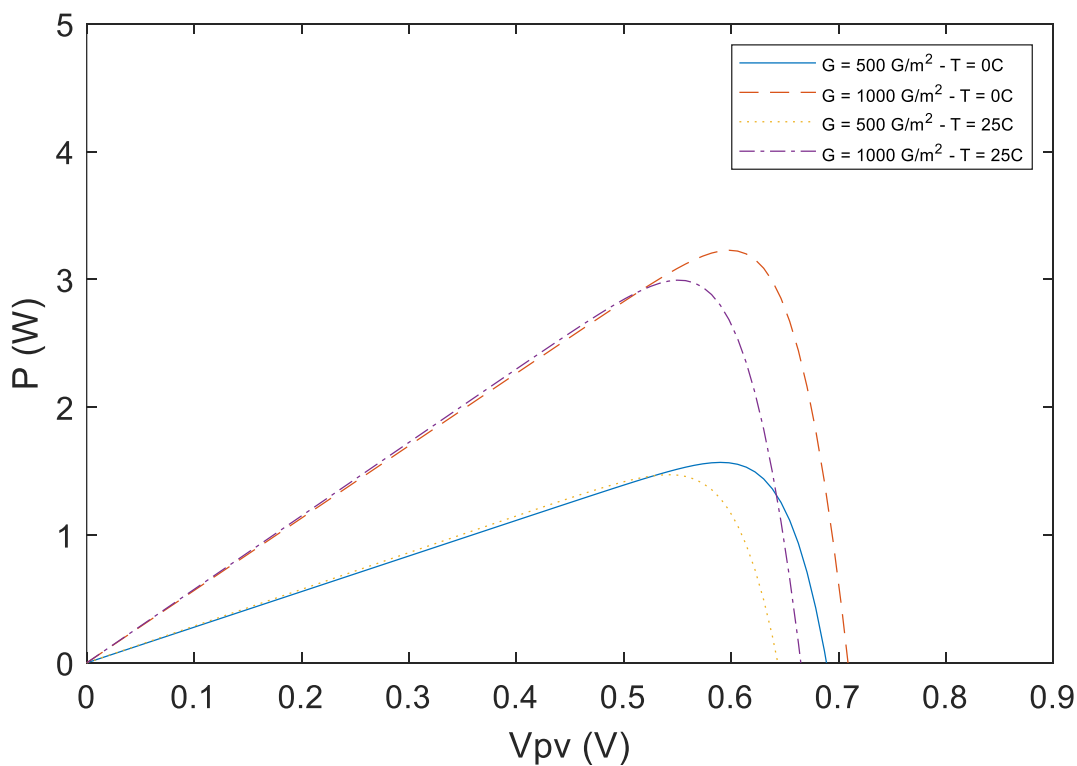
Σε αντίθεση με την θερμοκρασιακή επίδραση, η μείωση της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας επιφέρει μεγάλη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και ταυτόχρονα μικρότερη αλλά αισθητή μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.14. Αποτέλεσμα της μείωσης του εύρους των τιμών ρεύματος και τάσης είναι η κάθετη μετακίνηση του σημείου μέγιστης ισχύος, προσφέροντας μικρότερη ισχύ εξόδου όχι μόνο στη λειτουργία μέγιστης ισχύος αλλά γενικά για κάθε τιμή ζεύγους ρεύματος και τάσης. Η μεταβολή της παρεχόμενης ισχύος παρουσιάζεται στο Σχ. 3.15

### 3.5.3 Ταυτόχρονη επίδραση μεταβολής θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας

Στο υποκεφάλαιο αυτό, παρόμοια με τα 3.5.1 και 3.5.2, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για μεταβλητές συνθήκες θερμοκρασίας και πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας. Στα Σχ. 3.16 και 3.16 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές για συνδυαστικά ζεύγη ακτινοβολίας-θερμοκρασίας  $G = 500 \text{ W/m}^2$ -  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ -  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $G = 500 \text{ W/m}^2$ -  $T = 25^\circ\text{C}$  και  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ -  $T = 25^\circ\text{C}$ .



Σχ. 3. 16 Επίδραση θερμοκρασίας και πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας στην χαρακτηριστική I-V πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου



Σχ. 3. 17 Επίδραση θερμοκρασίας και πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας στην χαρακτηριστική P-V πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου

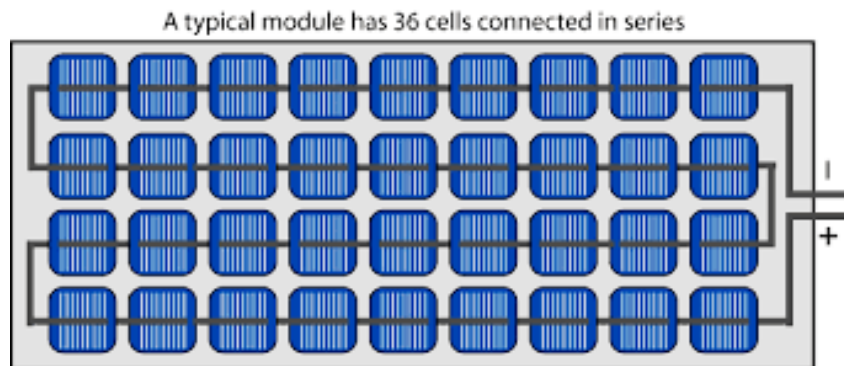


## 3.6 Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων

Μέχρι τώρα γίνεται αναφορά σε φωτοβολταϊκό στοιχείο (p/v cell). Η δημιουργία φωτοβολταϊκών διατάξεων βασίζεται στη σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων, η οποία γίνεται ανάλογα με τις ανάγκες της διάταξης. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει περιληπτικά η ανάλυση των τρόπων διασύνδεσης και το αντίκτυπο που έχουν στη παροχή ισχύος.

### 3.6.1 Σειριακή σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η φωτοβολταϊκή διάταξη του Σχ. 3.18 αποτελείται από  $N_s$  όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Θεωρούμε ότι το κάθε ΦΒ στοιχείο έχει τάση εξόδου  $V_{pv}$  και ρεύμα εξόδου  $I_{pv}$ .



Σχ. 3. 18 Σειριακή σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων

Εφόσον η διάταξη είναι σύνδεση σε σειρά, για την τάση και το ρεύμα εξόδου ισχύει ότι

$$V_{pv\text{-module}} = N_s V_{pv} \quad (3.34)$$

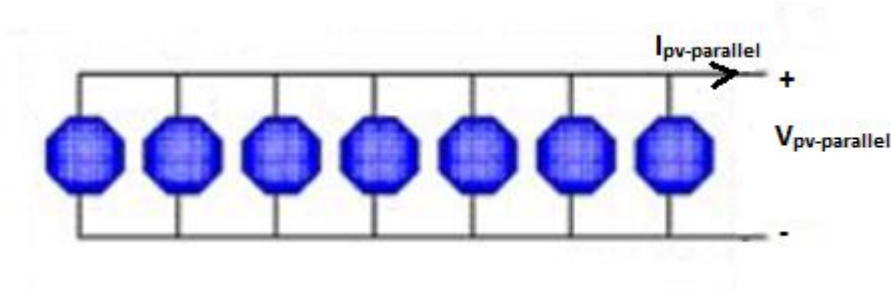
$$I_{pv\text{-module}} = I_{pv} \quad (3.35)$$

Οπότε, για την συνολική ισχύ προκύπτει ότι

$$P_{pv\text{-module}} = N_s P_{pv} \quad (3.36)$$

### 3.6.2 Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων

Έστω μια διάταξη που αποτελείται από  $N_p$  φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα.



Σχ. 3. 19 Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων

Στη περίπτωση αυτή, οι σχέσεις της διάταξης μετατρέπονται ως εξής:

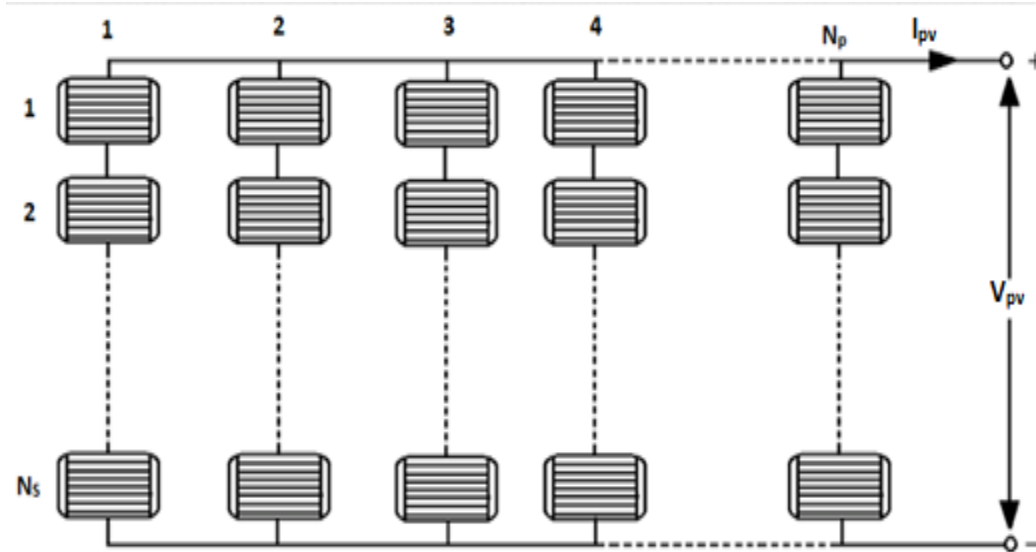
$$V_{pv-parallel} = V_{pv} \quad (3.37)$$

$$I_{pv-parallel} = N_p I_{pv} \quad (3.38)$$

$$P_{pv-parallel} = N_p P_{pv} \quad (3.39)$$

### 3.6.3 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από  $N_s$  όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και  $N_p$  φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το ρεύμα και η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου συμβολίζονται στο σχήμα ως  $I_{pv}$  και  $V_{pv}$ .



Σχ. 3. 20 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Από τις ενότητες 3.6.1 και 3.6.2 για τις σχέσεις ρεύματος, τάσης και ισχύος του πλαισίου (module) προκύπτει ότι

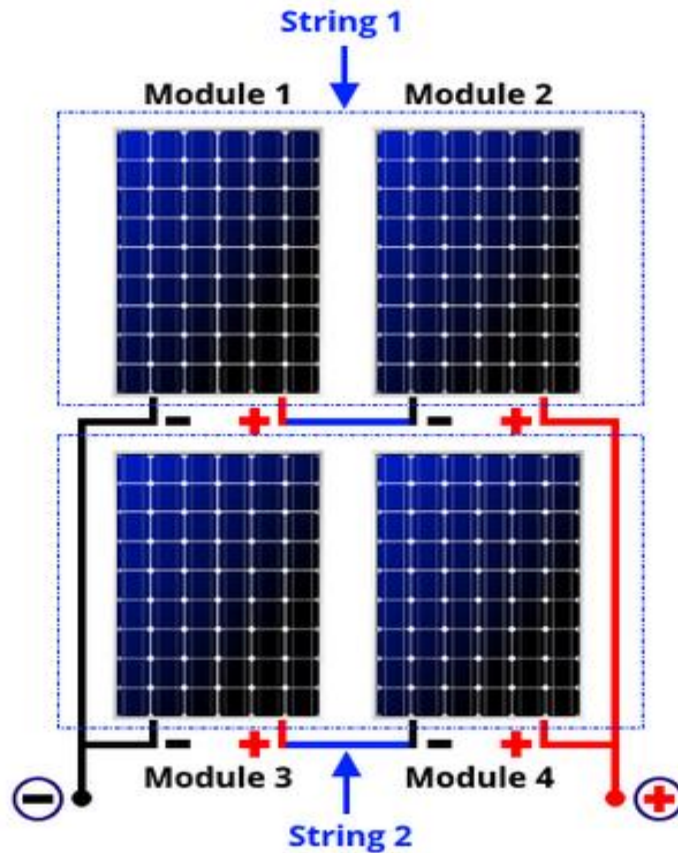
$$V_{pv\text{-module}} = N_s V_{pv} \quad (3.40)$$

$$I_{pv\text{-module}} = N_p I_{pv} \quad (3.41)$$

$$P_{pv\text{-module}} = N_s N_p P_{pv} \quad (3.42)$$

### 3.6.4 Ομάδα ΦΒ πλαισίων (photovoltaic array)

Το φωτοβολταϊκό πεδίο αποτελείται από ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα. Οι ομάδες των πλαισίων ονομάζονται σειριακές συστοιχίες (string arrays) φωτοβολταϊκών πλαισίων [18].



Σχ. 3. 21 Φωτοβολταϊκό πεδίο αποτελούμενο από 2 σειριακές συστοιχίες των 2 ΦΒ πλαισίων

Υποθέτοντας ότι η σειριακή συστοιχία αποτελείται από  $N_{ss}$  φωτοβολταϊκά πλαίσια και  $N_{pp}$  παράλληλες σειριακές συστοιχίες, οι εξισώσεις που μοντελοποιούν το παραπάνω σύστημα είναι οι εξής:

$$V_{pv-array} = N_{ss} V_{pv-module} \quad (3.43)$$

$$I_{pv-array} = N_{pp} I_{pv-module} \quad (3.44)$$

$$P_{pv-array} = N_{ss} N_{pp} P_{pv-module} \quad (3.45)$$

## 3.7 Παρακολούθηση Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT)

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης μιας φωτοβολταϊκής διάταξης δίνουν κάθε δυνατό σημείο λειτουργίας της. Προφανώς είναι επιθυμητό το σημείο λειτουργίας να ταυτίζεται με το σημείο μέγιστης ισχύος MPP. Καθώς τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι προκαθορισμένα από τον κατασκευαστή, ο βασικός τρόπος ελέγχου του σημείου λειτουργίας είναι μέσω του ελέγχου της τάσης εξόδου  $V_{pv}$ , ο οποίος συνήθως πραγματοποιείται με χρήση μεταβλητής αντίστασης στο φορτίο ή με χρήση μετατροπέα τάσης [18]. Η αντίσταση χρησιμοποιείται για μικρές εφαρμογές και είναι μεταβλητή ώστε να μπορεί να αλλάζει δυναμικά ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της διάταξης, καθώς όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2 και 3.5.2, η χαρακτηριστική καμπύλη I-V αλλάζει μορφή ανάλογα με την επίδραση εξωτερικών συνθηκών. Η βέλτιστη τιμή της αντίστασης εξόδου υπολογίζεται με βάση τον νόμο του Ohm για την έξοδο του φωτοβολταϊκού στις συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας, δηλαδή:

$$R_{MPP} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (3.46)$$

Η χρήση μετατροπέων είναι πιο συνηθισμένη για φωτοβολταϊκά πάρκα που συνδέονται με το δίκτυο, με σκοπό την παροχή ενιαίου επιπέδου τάσης από το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο του πάρκου σε αυτό. Ανεξάρτητα με τον τρόπο ελέγχου, είναι προφανώς απαραίτητη η γνώση του σημείου λειτουργίας  $O$  και του σημείου μέγιστης ισχύος  $M$ , καθώς και η εύρεση μεθοδολογίας η οποία θα επαναφέρει τη διάταξη στο  $M$ . Για το τελευταίο πρόβλημα υπάρχουν αρκετές λύσεις για έμμεσο ή άμεσο έλεγχο της διάταξης.

### 3.7.1 Έμμεσος έλεγχος φωτοβολταϊκής διάταξης

Έμμεσος έλεγχος σε μία ΦΒ διάταξη πραγματοποιείται με βάση κάποιες μετρήσεις και όχι επιτόπου δυναμικό έλεγχο. Οι μεθοδολογίες για έλεγχο τέτοιου είδους είναι φθηνότερες αλλά εν γένη ανακριβείς και ευάλωτες σε διακυμάνσεις ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

#### 3.7.1.1 Μέθοδος σταθερής τάσης (Fixed voltage method)

Η μέθοδος αυτή δε βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση της διάταξης, αλλά σε κάποιες υποθέσεις που ελέγχονται με μετρήσεις, όπως  $\overline{V_{\chiειμώνα}} > \overline{V_{\phiθινοπόρου}} > \overline{V_{\acute{\alpha}νοιξης}} > \overline{V_{καλοκαιριού}}$ , καθώς όπως έχουμε δει στο 3.5.1 η τάση μειώνεται με τη θερμοκρασία. Ανάλογα με τις αναμενόμενες εποχιακές μέγιστες ισχύεις, επιβάλλονται και αντίστοιχες εποχιακές τάσεις ώστε το

σύστημα να λειτουργεί προσεγγιστικά κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η μέθοδος αυτή είναι φθηνή αλλά χρονοβόρα, καθώς απαιτείται λειτουργία τουλάχιστον ενός έτους για τον υπολογισμό των εποχιακών μεγεθών μέγιστης ισχύος. Επιπρόσθετα, η μέθοδος σταθερής τάσης προϋποθέτει μικρές εποχιακές διακυμάνσεις σε θερμοκρασία και πυκνότητα ακτινοβολίας ώστε να έχει επαρκή ακρίβεια [28], [29].

### 3.7.1.2 Μέθοδος κλασματικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης (Fractional open circuit voltage method)

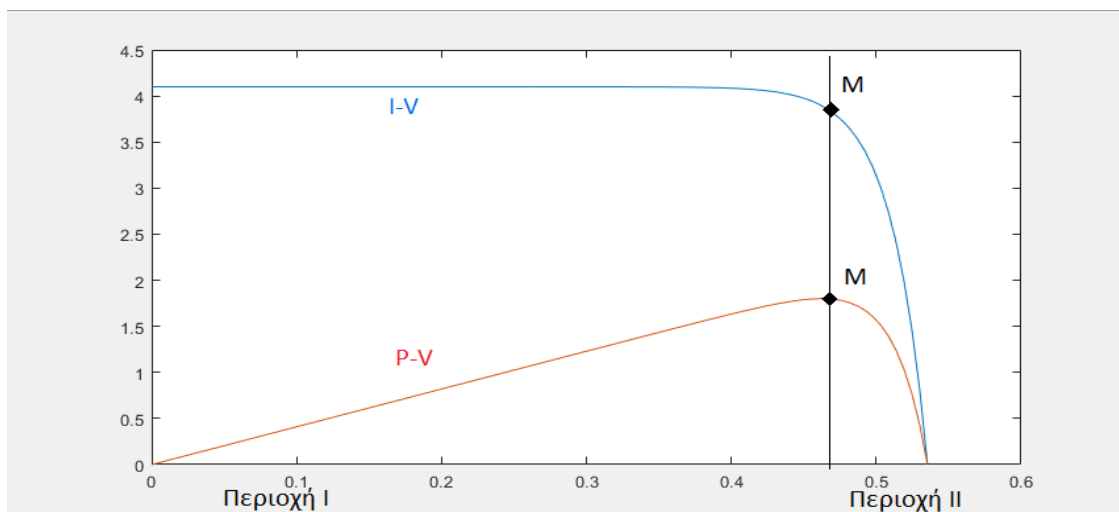
Η βέλτιστη τάση λειτουργίας υπολογίζεται όχι εποχιακά, αλλά με βάση τη προσέγγιση ότι  $V_{MPP} = k_1 V_{oc}$ , όπου  $k$  αποτελεί σταθερά. Παρά το γεγονός ότι οι διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη ρεύματος και τάσης μιας φωτοβολταϊκής διάταξης, έχει παρατηρηθεί από μετρήσεις ότι ο λόγος  $k_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{oc}}$  είναι κατά προσέγγιση σταθερός και εξαρτάται κυρίως από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της διάταξης. Παραδείγματος χάριν, για φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου, η σταθερά κυμαίνεται περίπου από 0.7 έως 0.8. Παρότι πρόκειται για φθηνή διαδικασία, υπάρχουν δύο βασικά προβλήματα. Το πρώτο είναι το γεγονός ότι ο έλεγχος βασίζεται εξ' ολοκλήρου στη σωστή προσέγγιση της σταθεράς  $k$ , και το δεύτερο είναι ότι για την μέτρηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης απαιτείται αποσύνδεση του μετρούμενου φωτοβολταϊκού, με αποτέλεσμα να χάνεται η παραγωγή της κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σοβαρό σε περιοχές με έντονη διακύμανση θερμοκρασίας ή/και ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς απαιτείται συχνή μέτρηση της  $V_{oc}$ . Το πρώτο πρόβλημα λύνεται με επιλεγμένη εφαρμογή της μεθόδου αυτής, καθώς αν οι διακυμάνσεις των εξωτερικών παραγόντων βρίσκονται εντός κάποιων ορίων, το  $k$  αλλάζει ανεπαίσθητα, και το δεύτερο πρόβλημα λύνεται με την ύπαρξη φωτοβολταϊκού στοιχείου όμοιου με αυτά της μετρούμενης διάταξης, πάνω στο οποίο γίνονται όλες οι απαραίτητες μετρήσεις. Με βάση τις μετρήσεις αυτές, γίνεται αναγωγή για όλη τη διάταξη [28], [29].

### 3.7.1.3 Μέθοδος κλασματικού ρεύματος βραχυκύκλωσης (Fractional short circuit current method)

Κατ' αντιστοιχία με τη μέθοδο κλασματικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης, ο λόγος  $k_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{sc}}$  είναι αντίστοιχα σταθερός για μεσαίες διακυμάνσεις εξωτερικών συνθηκών. Για φωτοβολταϊκό πυριτίου, το  $k_2$  κυμαίνεται από 0.9 έως 0.98. Η μέθοδος είναι τελείως όμοια με την κλασματική τάση ανοιχτοκύκλωσης, με τη διαφορά ότι απαιτεί μετρήσεις ρεύματος και όχι τάσης, οπότε πάσχει από τα ίδια προβλήματα και έχει ίδιες λύσεις [28], [29].

### 3.7.2 Άμεσος έλεγχος φωτοβολταϊκής διάταξης-αλγόριθμοι MPPT

Η άμεση υλοποίηση βασίζεται στον υπολογισμό της απόκλισης του σημείου λειτουργίας  $O$  από το σημείο μέγιστης ισχύος  $M$ , καθώς και τη βηματική επαναφορά της διάταξης στο  $M$  με τη χρήση αλγορίθμων. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν νοητά να χωριστούν σε δύο μέρη για την κατανόηση της λειτουργίας τους. Το πρώτο μέρος είναι υπεύθυνο για τη τοποθέτηση του σημείου  $O$  ως προς το  $M$ , δηλαδή αν βρίσκεται αριστερά του ή δεξιά του. Συμβατικά ονομάζουμε περιοχή  $I$  την περιοχή αριστερά του  $M$ , και περιοχή  $II$  δεξιά του. Ο διαχωρισμός αυτός είναι σημαντικός καθώς στη περιοχή  $I$  η αύξηση του ρεύματος ή μείωση της τάσης επιφέρει μείωση της παρεχόμενης ισχύος, ενώ στη περιοχή  $II$  ισχύει το αντίθετο. Το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου πραγματοποιεί τη βηματική μετατόπιση του σημείου  $O$  προς το σημείο  $M$ . Υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι που επιτελούν τη διαδικασία αυτή, με διαφορετικό τρόπο προσέγγισης των δυο αυτών μερών, αλλά η διεργασία τους βασίζεται στο παραπάνω σκεπτικό. Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι είναι ο perturb and observe (P&O algorithm) και ο incremental conductance (InCo algorithm).



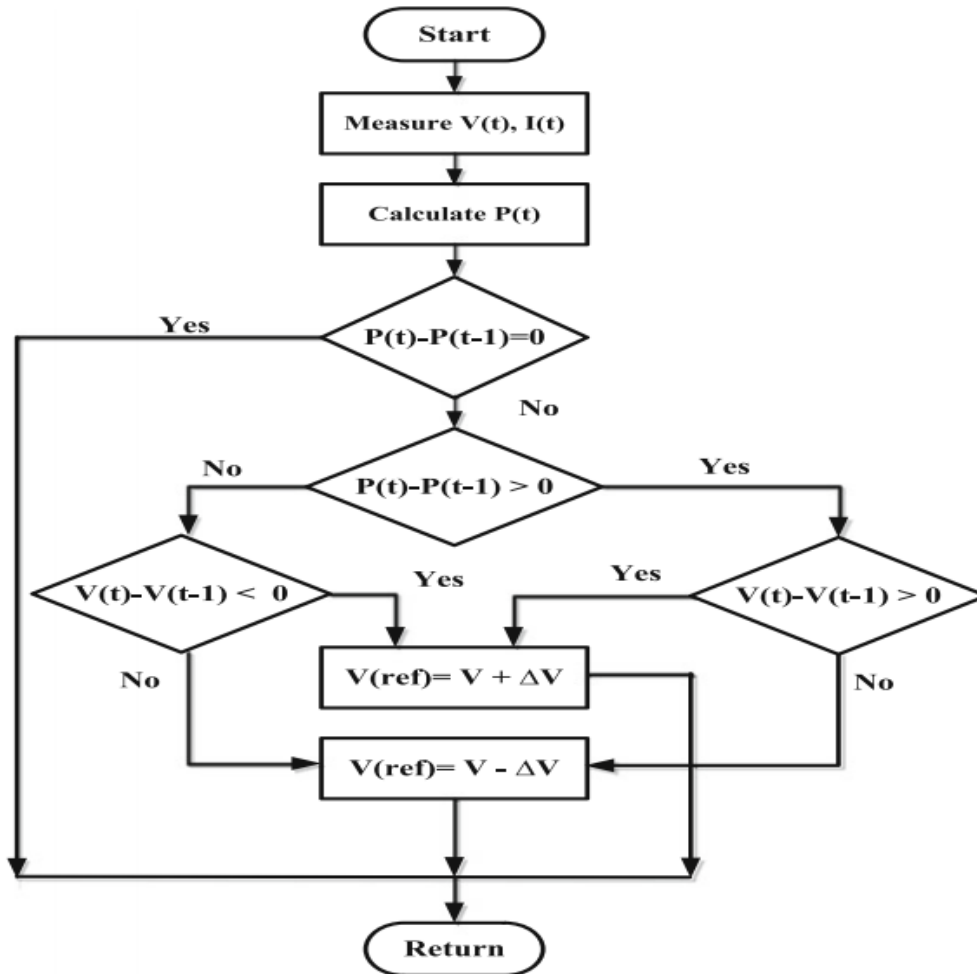
Σχ. 3. 22 Χωρισμός περιοχών σε I-V και P-V χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκού στοιχείου

#### 3.7.2.1 Αλγόριθμος διαταραχής και παρακολούθησης (Perturb and observe)

Προτού αναλυθεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, αξίζει να σημειωθεί ότι η επίτευξή του μπορεί να γίνει μέσω ελέγχου της τάσης ή του ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού, με επιβολή κατάλληλης τάσης από τους μετατροπείς ισχύος ή με τη χρήση μεταβαλλόμενης αντίστασης ελέγχου στην έξοδο  $R_{load}$  κατ'αντιστοιχία [18]. Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου αποτελεί ο υπολογισμός της ισχύος για το δεδομένο σημείο λειτουργίας  $O$ . Ακολούθως, μεταβάλλεται είτε η τιμή του ρεύματος με αύξηση κατά  $\Delta I$  είτε η τιμή της τάσης με μείωση κατά  $\Delta V$  και υπολογίζεται η νέα τιμή της

ισχύος που προκύπτει από τη μεταβολή. Από τις παρατηρήσεις για τις δύο περιοχές λειτουργίας στο 3.7.2, αν η παρεχόμενη ισχύς μειωθεί τότε το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στη περιοχή I, ειδάλως βρίσκεται στη περιοχή II. Έτσι γίνεται η εκκίνηση της αλγοριθμικής διαδικασίας. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί και χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, παραδείγματος χάριν στη περίπτωση που επέλθει αλλαγή στο σημείο λειτουργίας λόγω αλλαγής των εξωτερικών παραγόντων που επηρεάζουν τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος προσεγγίζει βηματικά το σημείο M. Η επιλογή του βήματος  $\Delta I$  ή  $\Delta V$  επιλέγεται ανάλογα με τη περίπτωση. Μεγάλο βήμα σημαίνει μεγαλύτερη ταχύτητα αλλά ταυτόχρονα μπορεί να προκαλέσει την ταλάντωση της διάταξης γύρω από το σημείο μέγιστης λειτουργίας χωρίς αυτό να προσεγγιστεί ποτέ. Μικρό βήμα σημαίνει μεγαλύτερη ακρίβεια προσέγγισης αλλά με μικρότερη ταχύτητα. Αν η διάταξη βρίσκεται στη περιοχή I εφαρμόζεται κύκλος διακριτών μειώσεων του ρεύματος ή διακριτών αυξήσεων της τάσης και ακολούθως υπολογίζεται η νέα τιμή της ισχύος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η νέα τιμή ισχύος να είναι μικρότερη από τη προηγούμενη, που σημαίνει ότι το σημείο O μετατοπίστηκε στη περιοχή II. Στη περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι το σημείο λειτουργίας του προηγούμενου βήματος είναι το MPP. Στη περίπτωση που το O εντοπίζεται αρχικά στη περιοχή II ακολουθείται αντίστοιχη διαδικασία, μόνο που εφαρμόζεται κύκλος αυξήσεων του ρεύματος ή μειώσεων της τάσης μέχρι το σημείο O να μεταβεί στη περιοχή I. Ο αλγόριθμος αυτός είναι εύκολο να εφαρμοστεί και παρουσιάζει καλή συμπεριφορά σε μη έντονες διακυμάνσεις ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά, σε πιο έντονες διακυμάνσεις συνήθως ο αλγόριθμος καταλήγει σε άπειρες ταλαντώσεις ή σε εύρεση λάθους σημείου [28], [29], [30], [31]. Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζεται παράδειγμα block διαγράμματος για P&O algorithm με έλεγχο τάσης .





Σχ. 3. 23 Διάγραμμα για perturb and observe αλγόριθμο με ρύθμιση τάσης

### 3.7.2.2 Αλγόριθμος επαύξησης αγωγιμότητας (Incremental conductance algorithm)

Ο προσανατολισμός του σημείου λειτουργίας στον αλγόριθμο αυτό βασίζεται κυρίως στη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης, αλλά εκμεταλλεύεται και τη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του φωτοβολταϊκού. Όπως φαίνεται από το 3.22, η καμπύλη  $P(V_{pv})$  είναι αύξουσα στη περιοχή I και φθίνουσα στη περιοχή II, οπότε ισχύει ότι [28], [29], [30]:

$$\frac{dP}{dV_{pv}}(I) > 0 \quad (3.47)$$

και

$$\frac{dP}{dV_{pv}}(II) < 0 \quad (3.48)$$

Ο παρών αλγόριθμος βασίζεται στον υπολογισμό της παραγώγου της ισχύος ως προς την τάση εξόδου και ανάλογα με το πρόσημο της τοποθετεί το Ο στην κατάλληλη περιοχή. Προφανώς για το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) ισχύει ότι

$$\frac{dP}{dV_{pv}}(\text{MPP}) = 0 \quad (3.49)$$

Η παράγωγος της ισχύος υπολογίζεται από τον τύπο

$$\frac{dP}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.50)$$

Λόγω της βηματικής αύξησης ή μείωσης ρεύματος, ο διαφορικός λόγος στην (3.50) είναι γνωστός και ισούται με την διαφορά του παρόντος σημείου λειτουργίας με του προηγούμενου, δηλαδή

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_n - I_{n-1}}{V_n - V_{n-1}} \quad (3.51)$$

Τελικά, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.48)-(3.51) προκύπτουν οι συνθήκες με βάση τις οποίες ο αλγόριθμος αποφαινεται για το σημείο λειτουργίας. Για την περιοχή I ισχύει

$$\frac{I_n - I_{n-1}}{V_n - V_{n-1}} > \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.53)$$

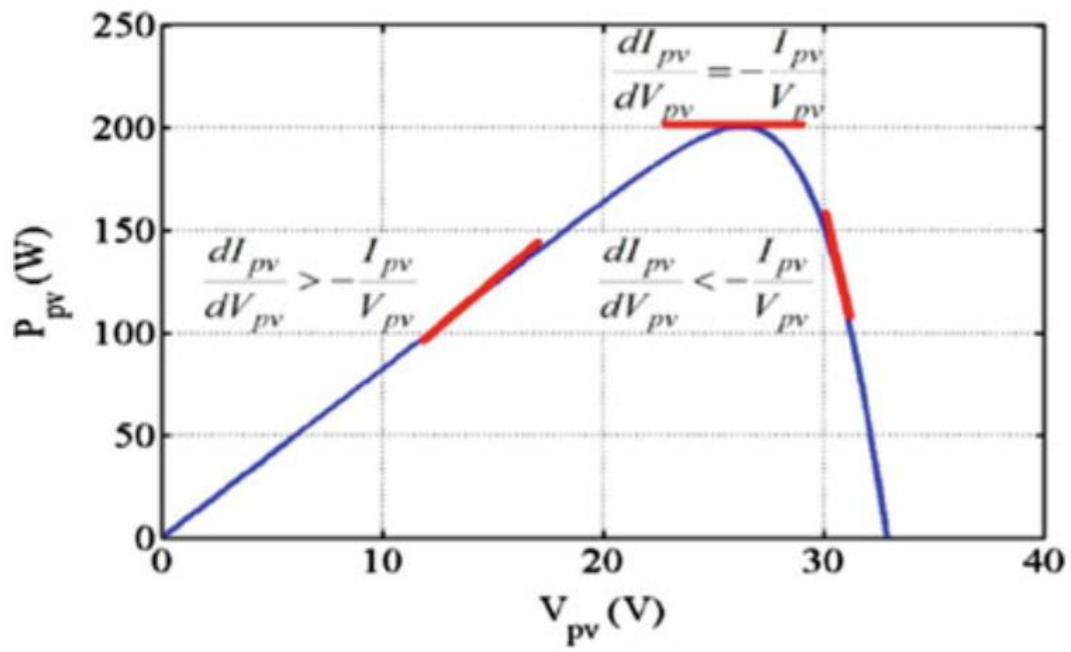
Για την περιοχή II ισχύει

$$\frac{I_n - I_{n-1}}{V_n - V_{n-1}} < \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.54)$$

Και για το MPP

$$\frac{I_n - I_{n-1}}{V_n - V_{n-1}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.55)$$

Οι εξισώσεις (3.53)-(3.55) είναι απαραίτητες καθώς δίνουν τη σχετική θέση του σημείου λειτουργίας με βάση μεγέθη γνωστά στον αλγόριθμο χωρίς να χρειάζεται να υπολογίζει κάθε φορά την κλίση γραφικής παράστασης με βάση τη παραγωγή της εξίσωσης ισχύος, γεγονός που συμβάλει στην ταχύτητα και ακρίβειά του. Ο έλεγχος του βήματος γίνεται με επιβολή εξωτερικής τάσης στην έξοδο ( $V_{ref}$ ), την οποία και μεταβάλλει κατάλληλα ο αλγόριθμος ανάλογα με τη περιοχή στην οποία βρίσκεται το σημείο λειτουργίας έως ότου να ικανοποιηθεί η συνθήκη που εκφράζεται από την εξίσωση (3.55). Όπως αναφέρθηκε στο 3.7.2, αν το Ο βρίσκεται στη περιοχή I η τάση αυξάνεται κατά  $\Delta V$ , ενώ αν βρίσκεται στη περιοχή II ελαττώνεται με το ίδιο βήμα.



Σχ. 3. 24 Καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκού με έκφραση των εξισώσεων (3.53)-(3.55)



# 4. Προσομοίωση πραγματικής ΦΒ διάταξης και αλγορίθμου MPPT

## 4.1 Προσομοίωση Φωτοβολταϊκού στοιχείου

### 4.1.1 Γενικά

Σύμφωνα με τις εξισώσεις του Κεφαλαίου 3 από τα ισοδύναμα κυκλώματα ΦΒ διατάξεων και με τις προδιαγραφές που παρέχουν οι κατασκευαστές, δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης τους. Στον όρο ΦΒ διάταξη περιλαμβάνεται ΦΒ στοιχείο/πλαίσιο/ομάδα πλαισίων/πάρκο (cell/panel/array/system) καθώς το μοντέλο είναι κλιμακούμενο.

Με βάση τη προσομοίωση αυτή, και σε συνδυασμό με αλγόριθμο παρακολούθησης μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT), από πραγματικές μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας είναι δυνατή η αναπαράσταση μιας πραγματικής ΦΒ διάταξης με βάση έναν αλγόριθμο επεξεργασίας των τιμών ρεύματος-τάσης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του ΦΒ στοιχείου PV cell A-300 της Sunpower [23] και συγκεκριμένα το πρόγραμμα που παράγει τις χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσεως I-V και ισχύος-τάσεως P-V που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 3, ο αλγόριθμος MPPT διαταραχής και παρατήρησης (Perturb and Observe, P&O) και ένα τελικό πρόγραμμα που για να υπολογίζει την παραγόμενη ισχύ της ΦΒ διάταξης για το δεδομένο χρονικό διάστημα που αναπαρίσταται. Οι προσομοιώσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Πίνακας 4. 1 Στοιχεία από κατασκευαστή PV cell A-300 (Sunpower)

#### **Typical Electrical Performance**

Open Circuit Voltage:	0.665 V
Short Circuit Current:	5.75 A
Maximum Power Voltage:	0.560 V
Maximum Power Current:	5.35 A
Rated Power:	3.0 W
Efficiency:	20.0% minimum

#### **Temperature Coefficients**

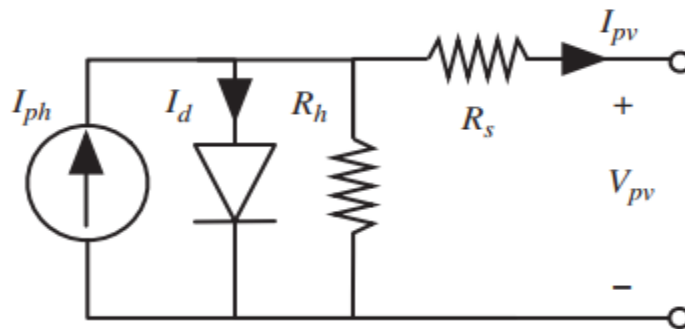
Voltage:	-1.9 mV / °C
Power:	-0.38 % / °C

Η μοντελοποίηση του A-300 βασίζεται στα στοιχεία του Πιν. 4.1 και τις εξισώσεις που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Η προσομοίωση γίνεται με ελεγχόμενη τάση εξόδου λόγω του μετατροπέα που τοποθετείται. Για την κατανόηση των εξισώσεων, σημειώνεται ότι

- $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$
- $T_0 = 298 \text{ Kelvin}$
- $I_{sc}$  ρεύμα βραχυκύκλωσης ΦΒ (Πιν. 4.1)
- $V_{oc}$  τάση ανοιχτοκύκλωσης ΦΒ (Πιν. 4.1)
- $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  ρεύμα και τάση εξόδου ΦΒ
- $n$  είναι ο συντελεστής διόδου που στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις ισούται με 1.2 (δίοδος πυριτίου)
- Συντελεστής βραχυκύκλωσης του ΦΒ  $k_i$

Η παρένθεση στον δείκτη μιας μεταβλητής δηλώνει τις συνθήκες θερμοκρασίας  $T$  και πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ .

Η προσομοίωση της ΦΒ διάταξης βασίζεται στο μοντέλο μονής διόδου το οποίο αναλύθηκε στην ενότητα 3.3.



Σχ. 4. 1 Ισοδύναμο κύκλωμα μονής διόδου

#### 4.1.2 Φωτόρευμα

Το ρεύμα που δημιουργείται λόγω του φωτοβολταϊκού φαινομένου και ισοδυναμεί με ιδανική πηγή ρεύματος στο ΦΒ ισοδύναμο, υπολογίζεται βάση των εξωτερικών συνθηκών θερμοκρασίας και ακτινοβολίας και από στοιχεία του ΦΒ, δηλαδή το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε ιδανικές συνθήκες και τον συντελεστή βραχυκύκλωσης του ( $k_i$ ).

$$I_{ph} = [I_{sc(T_0, G_0)} + k_i (T - T_0)] \frac{G}{G_0} \quad (4.1)$$

όπου  $G$  είναι η ηλιακή ακτινοβολία και  $T$  η θερμοκρασία

### 4.1.3 Δίοδος

Το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο στη κατάσταση ορθής πόλωσης εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για τον υπολογισμό του, απαιτείται αρχικά η εύρεση του ρεύματος που τη διαρρέει σε ιδανικές συνθήκες  $I_{S(T_0)}$  και στη συνέχεια μπορεί να ευρεθεί το ρεύμα που τη διαρρέει υπό συγκεκριμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$$I_S = I_{S(T_0)} e^{\frac{-qV_g}{nk\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}} \quad (4.2)$$

$$I_{S(T_0)} = \frac{I_{sc(T_0)}}{e^{\frac{qV_{oc}(T_0)}{nkT_0}} - 1} \quad (4.3)$$

### 4.1.4 Αντίσταση $R_s$

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2, η αντίσταση αυτή λαμβάνει υπόψιν της τις αντιστάσεις που εισάγουν οι ωμικές επαφές, ο όγκος του υποστρώματος και οι αγώγιμοι δίαυλοι μεταφοράς. Αναλυτικά η συμπεριφορά της εκφράζεται με τις παρακάτω εξισώσεις. Ο όρος  $X_v$  ορίζεται για ευκολία χρήσης της εξίσωσης σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Η αντίσταση  $R_s$  εξαρτάται άμεσα από τα στοιχεία του ΦΒ και παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά για τις προσομοιώσεις της διπλωματικής.

$$R_s = -\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} (V = V_{oc}) - \frac{1}{X_v} \quad (4.4)$$

$$X_v = \frac{q I_{S(T_0)}}{nkT_0} e^{\frac{qV_{oc}(T_0)}{nkT_0}} \quad (4.5)$$

### 4.1.5 Αντίσταση $R_h$

Η αντίσταση  $R_h$  θεωρείται σταθερή και στη παρούσα προσομοίωση έχει τιμή ίση με 1000Ω (1kΩ). Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3, η αντίσταση αυτή λαμβάνει υπόψιν της τις αντιστάσεις που εισάγουν οι ωμικές επαφές, ο όγκος του υποστρώματος και οι αγώγιμοι δίαυλοι

μεταφοράς. Συνήθως είναι πολύ μεγάλη συγκριτικά με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος και έχει σχετικά μικρή επίδραση.

#### 4.1.6 Ρεύμα εξόδου $I_{pv}$

Το ρεύμα εξόδου υπολογίζεται με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση [26]. Η μέθοδος χρησιμοποιείται επειδή είναι ακριβής, σύντομη και εύκολα υλοποιήσιμη σε προγραμματιστικό περιβάλλον.

$$I_{pv(k+1)} = I_{pv(k)} - \frac{f(I_{pv(k)})}{f'(I_{pv(k)})} \quad (4.6)$$

Όπου η  $f(I_{pv(k)})$  προκύπτει από την εξίσωση (3.17) και ισούται με

$$f(I_{pv(k)}) = I_{pv(k)} - I_{ph} + I_S \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv(k)}R_s)}{nkT}} - 1 \right) + \frac{V_{pv} + I_{pv(k)}R_s}{R_h} \quad (4.7)$$

Τέλος, παραγωγίζοντας την (4.7) ως προς το ρεύμα εξόδου  $I_{pv}$ , η  $f'(I_{pv(k)})$  είναι ίση με

$$f'(I_{pv(k)}) = 1 + I_S \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv(k)}R_s)}{nkT}} - 1 \right) \left( \frac{qR_s}{nkT} \right) + \frac{R_s}{R_h} \quad (4.8)$$

Με βάση τις εξισώσεις (4.1)-(4.8) [26], η προσομοίωση του A-300 γίνεται με την function PVR η οποία δέχεται ως εισόδους την τάση εξόδου  $V_{pv}$  σε Volt, την τιμή ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  σε  $W/m^2$  και θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $T_c$  σε βαθμούς Κελσίου, και παράγει ως έξοδο την αντίστοιχη τιμή ρεύματος εξόδου  $I_{pv}$ . Σημειώνεται ότι είναι απαραίτητη η μετατροπή των βαθμών Κελσίου σε Κέλβιν για τη χρήση των εξισώσεων, και ο λόγος που η είσοδος είναι σε Κελσίου είναι χάριν ευκολίας, καθώς τα περισσότερα πραγματικά δεδομένα δίνονται σε αυτή τη μονάδα μέτρησης. Το μοντέλο αυτό είναι κλιμακούμενο, οπότε σύμφωνα με τις εξισώσεις της ενότητας 3.6.3 ανάγεται σε μοντέλο ΦΒ πλαισίου και όμοια σε μοντέλο ΦΒ πάρκου για τις μετέπειτα προσομοιώσεις.

$$V_{pv-g} = N_s V_{pv} \quad (4.9)$$

$$I_{pv-g} = N_p I_{pv} \quad (4.10)$$



$$P_{pv-g} = N_s N_p P_{pv} \quad (4.11)$$

Όπου  $N_s$  ο αριθμός των σειριακών και  $N_p$  ο αριθμός των παράλληλων ΦΒ στοιχείων.

## 4.2 Παραγωγή χαρακτηριστικών καμπυλών

Το πρόγραμμα προσομοίωσης ΦΒ στοιχείου, που θα ονομάζεται στο εξής ‘PVR’, δέχεται ως εισόδους τις τιμές θερμοκρασίας  $T$  και ακτινοβολίας περιβάλλοντος  $G$ , καθώς και την τιμή τάσης λειτουργίας που του επιβάλλεται στην έξοδο  $V_{pv}$  και παρέχει ως έξοδο το ρεύμα εξόδου  $I_{pv}$  για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.1)-(4.8). Σημειώνεται πως ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψιν τον αριθμό σειριακών και παράλληλων ΦΒ στοιχείων σύμφωνα με τις (4.9)-(4.11), δίνοντάς του τη δυνατότητα προσομοίωσης κάθε ΦΒ διάταξης με την παραδοχή ότι όλα τα ΦΒ στοιχεία δέχονται την ίδια ακτινοβολία.

Το πρόγραμμα παραγωγής χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσεως και ισχύος-τάσεως,  $I-V$  και  $P-V$ , που θα ονομάζεται στο εξής ‘photovoltaicIV\_Final’, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο PVR με σκοπό να δώσει όλες τις τιμές ρευμάτων που αντιστοιχούν στο εύρος τάσης εξόδου του ΦΒ  $V_{pv}$  σε όλο το διάστημα  $[0, V_{oc}]$ .

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με εισαγωγή των δεδομένων τάσης σε μορφή πίνακα με διακριτό βήμα και την ένταξη του προγράμματος PVR σε βρόγχο (for loop) για την κάθε τιμή της τάσης με σταθερές τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση το εύρος της τάσης περιέχεται σε πίνακα εκατό θέσεων. Το βήμα τάσης εξαρτάται από το  $V_{oc}$  και τον αριθμό θέσεων του πίνακα. Αντιστοιχώντας τη κάθε τιμή του πίνακα  $V_{pv}$  στο πρόγραμμα PVR λαμβάνεται πίνακας ρευμάτων  $I_{pv}$  με θέσεις που αντιστοιχούν στα ζεύγη τάσης του πίνακα τάσης  $V_{pv}$ . Με τη χρήση της εντολής plot είναι δυνατή η γραφική αναπαράσταση όλων των δυνατών ζευγών ρεύματος-τάσης του ΦΒ στοιχείου, καθώς και των αντίστοιχων ζευγών ισχύος-τάσεως καθώς ως γνωστόν η ισχύς είναι το γινόμενο της αντίστοιχης συνεχούς τάσης και ρεύματος εξόδου.

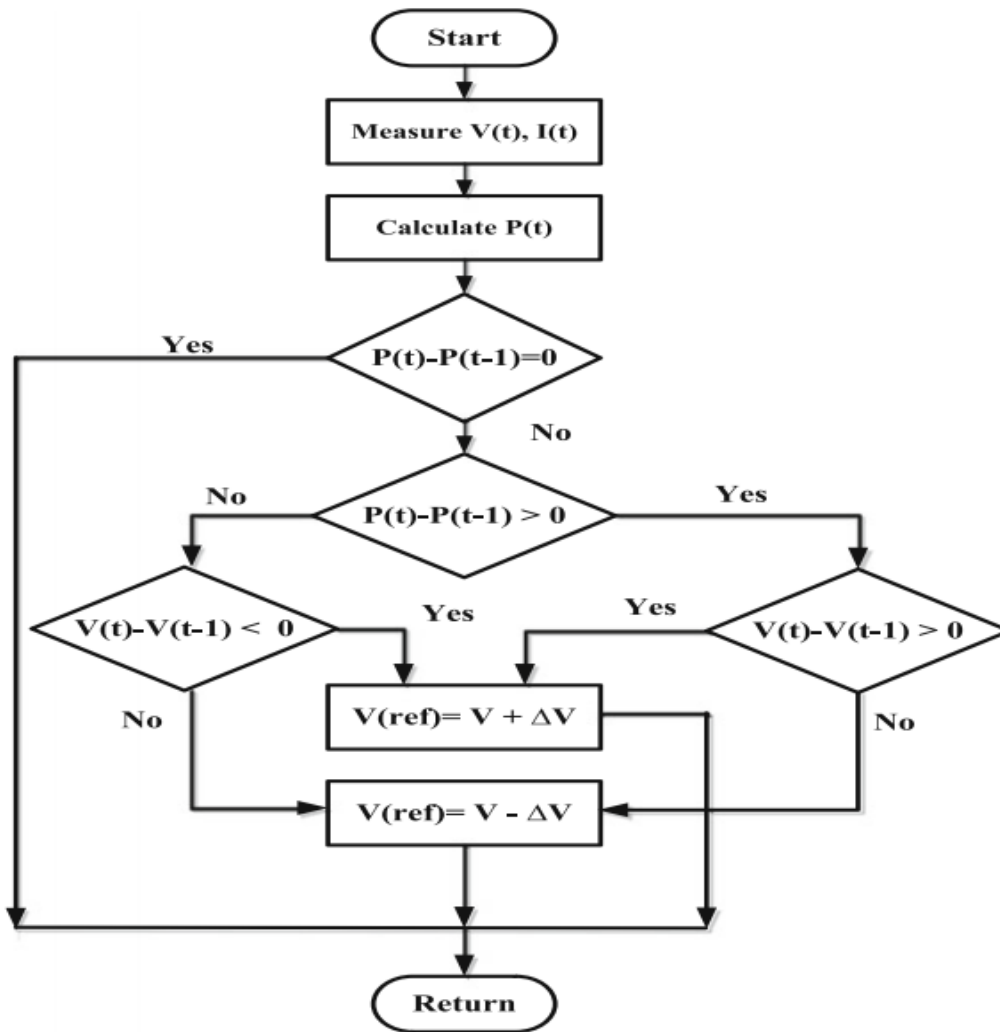
Τέλος, με τη χρήση του αλγορίθμου παρακολούθησης μέγιστης απολαβής ισχύος MPPT που περιγράφεται στην επόμενη ενότητα 4.3 είναι δυνατή η εύρεση του σημείου μέγιστης απολαβής ισχύος και η παρουσίασή του πάνω στη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης. Με βάση τη διαδικασία αυτή ο αλγόριθμος ‘photovoltaicIV\_Final’ δίνει τις χαρακτηριστικές που χρησιμοποιήθηκαν στα σχήματα του Κεφ. 3 και συγκεκριμένα στα Σχ. 3.5, 3.7, 3.8 και 3.12-3.17.

Σημειώνεται ότι η προσομοίωση περεταίρω ΦΒ διατάξεων βασίζεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος PVR είναι κλιμακούμενος σύμφωνα με τα πόσα ΦΒ στοιχεία βρίσκονται εν σειρά και παράλληλα. Για τον λόγο αυτό, οι εισόδους τάσης  $V_{pv}$  εκφράζεται σε Volt ανά στοιχείο (V/cell), καθώς είναι εύκολα κατανοητό σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές  $I-V$  που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 και τα στοιχεία του κατασκευαστή (Πιν. 4.1) το πόσο κοντά λειτουργεί η διάταξη στο σημείο μέγιστης απολαβής ισχύος (MPP) και σε ποια περιοχή λειτουργίας βρίσκεται, ανεξάρτητα

με τη κλίμακα της προσομοίωσης. Η περιοχή λειτουργίας είναι σημαντική καθώς η συμπεριφορά της όποιας ΦΒ διάταξης αλλάζει δραστικά.

### 4.3 Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (P&O)

Η αλγοριθμική διαδικασία του P&O περιεγράφηκε εκτενώς στην παράγραφο 3.7.2, και παρουσιάζεται περιληπτικά στο διάγραμμα ροής του Σχ. 4.2.



Σχ. 4. 2 Διάγραμμα αλγορίθμου P&O με ρύθμιση τάσης

Κατ' αντιστοιχία με το Σχ. 4.2 γράφτηκε ο αλγόριθμος, που από εδώ και πέρα θα αναφέρεται ως MPPTPO (Maximum Power Point Tracking Perturb and Observe), ο οποίος δέχεται ως είσοδο το ζεύγος τάσης-ρεύματος λειτουργίας του ΦΒ, καθώς και τα στοιχεία περιβάλλοντος (θερμοκρασία

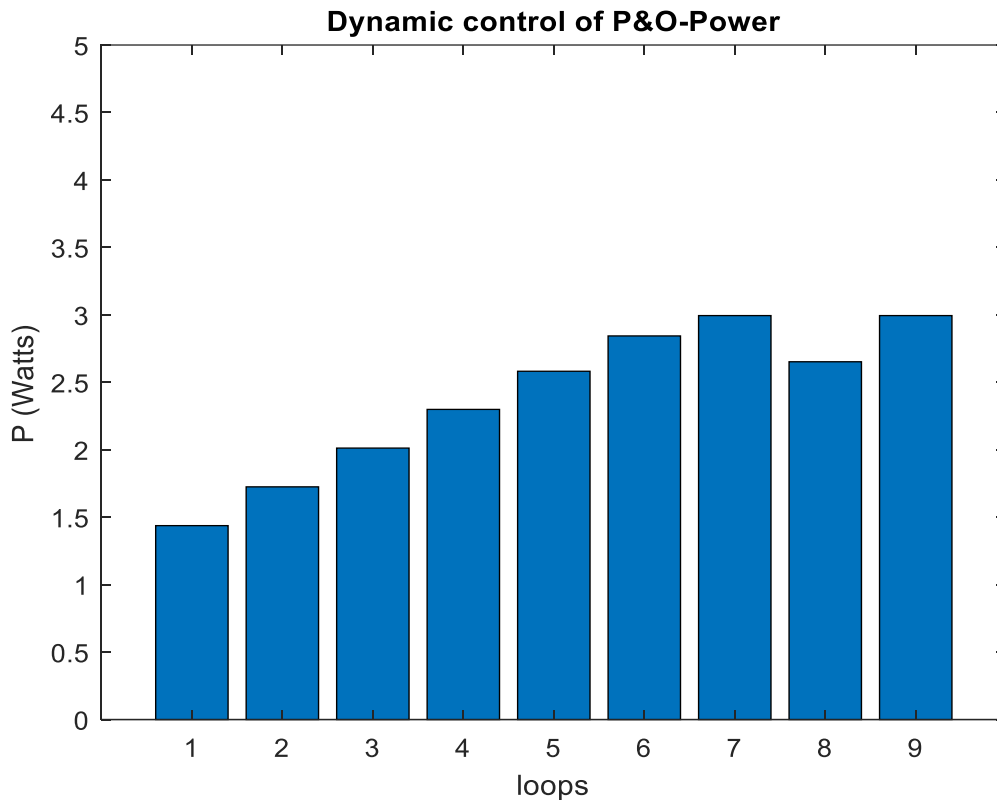
και ηλιακή ακτινοβολία) και δίνει ως έξοδο τις τιμές ρεύματος και τάσης μέγιστης ισχύος ( $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ) και την μέγιστη ισχύ ( $P_{max}$ ). Επίσης ο αλγόριθμος παρέχει και τον αριθμό επαναλήψεων (steps στο πρόγραμμα) που χρειάστηκε για τη παρακολούθησή της μέγιστης ισχύος. Ο σκοπός της παρακολούθησης αυτής αναλύεται περαιτέρω στην επόμενη ενότητα 4.4. Η προσέγγιση του σημείου μέγιστης απολαβής ισχύος MPP πραγματοποιείται με τη σύγκριση δύο σημείων λειτουργίας, το τωρινό  $P(t)$  με το προηγούμενο  $P(t-1)$ . Στον αλγόριθμο MPPTPO εμφανίζονται ως  $P_{cur}$  και  $P_{prev}$ . Το ρεύμα και η ισχύς των νέων σημείων λειτουργίας βρίσκονται με τη χρήση του προγράμματος PVR που εξηγήθηκε στην ενότητα 4.2.

Η λειτουργία του αλγορίθμου MPPTPO περιγράφεται ως εξής. Στην πρώτη επανάληψη, ο αλγόριθμος δέχεται σημείο λειτουργίας ρεύματος-τάσεως ( $I, V$ ), υπολογίζει την ισχύ και δημιουργεί το επόμενο σημείο λειτουργίας προσθέτοντας (ή αφαιρώντας αν βρίσκεται κοντά στην  $V_{oc}$  ώστε να μη βγει εκτός επιτρεπτής τάσης λειτουργίας) το προκαθορισμένο βήμα τάσης  $\Delta V$  και μέσω του PVR υπολογίζει το ρεύμα και την ισχύ που του αντιστοιχούν. Στη παρούσα προσομοίωση το βήμα είναι  $DV = 0.05 \text{ V/cell}$ . Αποθηκεύει ως  $P_{prev}$  την ισχύ που του δόθηκε και ως  $P_{cur}$  την ισχύ του σημείου λειτουργίας που μόλις υπολόγισε. Εφόσον το  $P_{prev} \neq P_{cur}$ , κάνει τις απαραίτητες συγκρίσεις σύμφωνα με το Σχ. 4.2 ώστε να αντιληφθεί αν θα πρέπει να προσθέσει ή αφαιρέσει βήμα  $DV$ . Αποθηκεύει ως  $P_{prev}$  το τωρινό  $P_{cur}$  και ως  $P_{cur}$  αυτό που υπολογίζει αφού εκτελέσει το κατάλληλο βήμα πρόσθεσης ή αφαίρεσης. Εφόσον η ισχύς συνεχίζεται να αυξάνει (Περιοχή I) ή να μειώνεται (Περιοχή II), ο αλγόριθμος καταλαβαίνει ότι δεν βρίσκεται στο MPP. Στη περίπτωση όμως που ξεπεραστεί το MPP, το βήμα τάσης θα αλλάξει πρόσημο με αποτέλεσμα να επανέλθει στο προηγούμενο σημείο λειτουργίας του. Εκείνη τη στιγμή η ισότητα  $P_{prev} = P_{cur}$  ισχύει, οπότε αποτρέπει τον αλγόριθμο να κάνει περαιτέρω αλλαγές και θεωρεί ότι το τωρινό (current) σημείο λειτουργίας του είναι το σημείο μέγιστης απολαβής ισχύος MPP.

Ο αλγόριθμος λειτουργεί για τάση εκκίνησης που ανήκει είτε στη Περιοχή I είτε στη Περιοχή II, καθώς η αλλαγή προκαλείται όταν ξεπεραστεί το MPP και έχει ενσωματωμένη ασφάλεια έτσι ώστε αν η αρχική τάση του σημείου λειτουργίας που του δίνεται είναι κοντά στη τάση βραχυκύκλωσης, τότε το επόμενο σημείο που δημιουργεί να πραγματοποιείται πάντα με αφαίρεση βήματος τάσης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση να προσθέτει βήμα τάσης καθώς το μεγαλύτερο εύρος των σημείων λειτουργίας ανήκουν στη Περιοχή I. Με τον τρόπο αυτό μειώνει ή εξαλείφει τον αριθμό αχρείαστων επαναλήψεων και τον κίνδυνο απόφραξης λανθασμένου σημείου μέγιστης ισχύος.

#### 4.2.1 Παρακολούθηση εφαρμογής αλγορίθμου

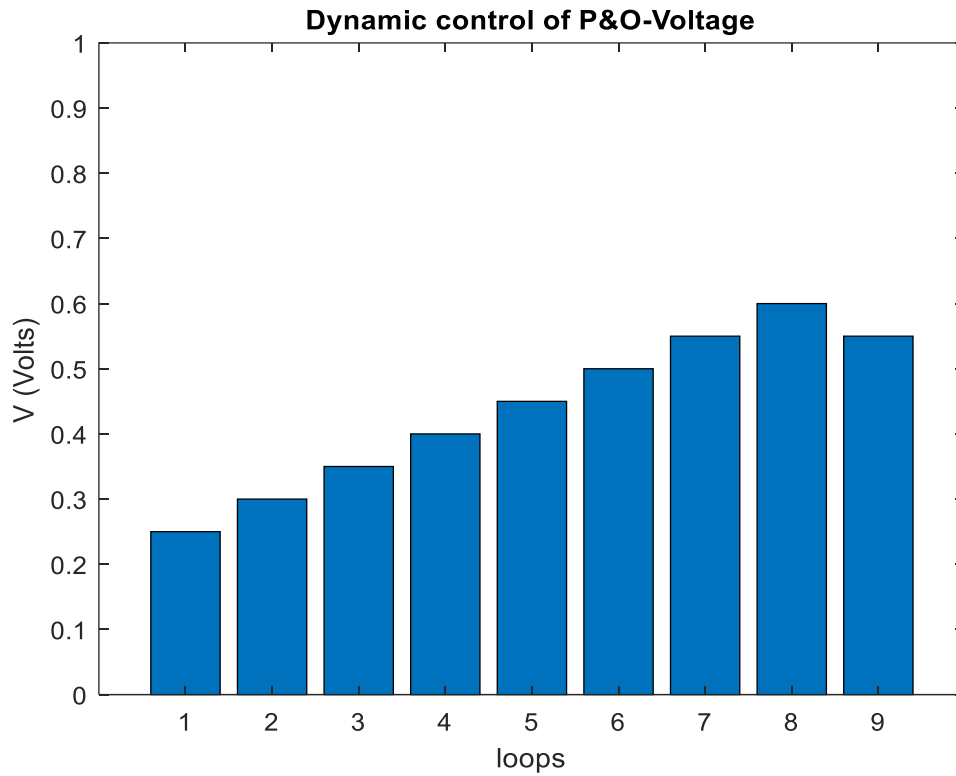
Πέρα από τις τιμές μέγιστης ισχύος για κάθε τιμή εισόδου (ακτινοβολίας), ο αλγόριθμος έχει δυνατότητα να εμφανίζει εάν αυτό ζητηθεί σε μορφή πίνακα και ραυδογράμματος (bar graph) τις ενδιάμεσες τιμές ρεύματος, τάσης και ισχύος για κάθε επανάληψη (loop) μέχρι να φτάσει στη μέγιστη ισχύ  $P_{max}$ . Με την παρουσίαση αυτή πραγματοποιείται έλεγχος της λειτουργίας του, όπως φαίνεται στα Σχ. 4.3, 4.4 και 4.5. Οι συγκεκριμένες δοκιμές έγιναν με αρχική τάση  $V_{pv}=0.2 \text{ V}$ , θερμοκρασία  $T_{c0}=25^\circ\text{C}$  και ηλιακή ακτινοβολία  $G_0=1000 \text{ W/m}^2$ .



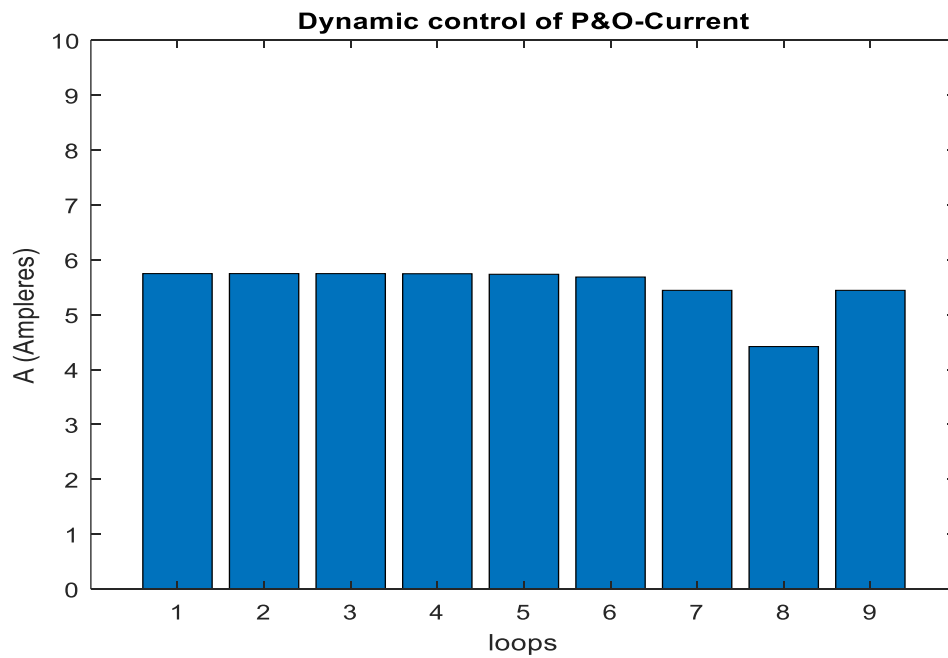
Σχ. 4. 3 Ενδιάμεσες τιμές ισχύος για κάθε επανάληψη P&O

Στο Σχ. 4.3 φαίνεται πως με κάθε επανάληψη του αλγορίθμου P&O αλλάζει η τιμή της ισχύος για κάθε αλγοριθμική επανάληψη. Στην επανάληψη 9 ο αλγόριθμος επανέρχεται στο ίδιο σημείο με την επανάληψη 7 οπότε ο αλγόριθμος βρίσκεται στο σημείο μέγιστης ισχύος. Παρότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει τη μέγιστη δυνατή ισχύ στην 7<sup>η</sup> επανάληψη, είναι αναγκαίες οι επιπλέον δύο επαναλήψεις καθώς με την μείωση της ισχύος στην 8<sup>η</sup> επανάληψη και την επίτευξη της ισότητας ισχύων 7<sup>ης</sup> και 9<sup>ης</sup> επανάληψης ο αλγόριθμος τερματίζει στο σημείο μέγιστης απολαβής ισχύος MPP.

Στο παρακάτω διάγραμμα του Σχ. 4.4 φαίνεται πως με κάθε επανάληψη του P&O αλλάζει η τιμή της τάσης σύμφωνα με το προκαθορισμένο βήμα  $\Delta V$  (εδώ 0.05 V ανά στοιχείο) για κάθε επανάληψη. Στην 9<sup>η</sup> επανάληψη η επιβαλλόμενη τάση επαναφέρεται σε ίδιο επίπεδο με την 7<sup>η</sup> καθώς επανέρχεται στο σημείο μέγιστης απολαβής ισχύος MPP.



Σχ. 4. 4 Ενδιάμεσες τιμές συνεχούς τάσης αντιστροφέα για κάθε επανάληψη P&O



Σχ. 4. 5 Ενδιάμεσες τιμές ρεύματος για κάθε επανάληψη P&O

Κατ' αντιστοιχία με τα σχήματα 4.3 και 4.4, το Σχ. 4.5 δείχνει τις αλλαγές της τιμής του ρεύματος για κάθε επανάληψη. Στις πρώτες επαναλήψεις, η τιμή του ρεύματος είναι σχεδόν σταθερή, πράγμα λογικό καθώς στη Περιοχή I που βρίσκεται το αρχικό σημείο λειτουργίας της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης ΦΒ, η τιμή του ρεύματος είναι όντως σχεδόν σταθερή. Όταν ξεπεραστεί το σημείο μέγιστης ισχύος (επανάληψη 8) το νέο σημείο λειτουργίας εισέρχεται στη Περιοχή II όπου η μείωση του ρεύματος γίνεται αισθητή.

Πίνακας 4. 2 Ενδιάμεσες τιμές αλγορίθμου

Ρεύμα (A/στοιχείο)	Τάση (V/στοιχείο)	Ισχύς (W/στοιχείο)	Αριθμός Επαναλήψεων
5.7497	0.25	1.4374	1
5.7496	0.30	1.7249	2
5.7491	0.35	2.0122	3
5.7471	0.40	2.2988	4
5.7371	0.45	2.5817	5
5.6870	0.50	2.8435	6
5.4444	0.55	2.9944	7
4.4201	0.60	2.6521	8
5.4444	0.55	2.9944	9

Ο πίνακας 4.2 παρουσιάζει ομαδοποιημένα τις τιμές ρεύματος/τάσης και ισχύος αντίστοιχα για κάθε επανάληψη.

#### 4.4 Προσομοίωση παραγόμενης ισχύος ΦΒ διάταξης

Με την χρήση των αλγορίθμων PVR και MPPTPO είναι δυνατή η δημιουργία προγράμματος προσομοίωσης ΦΒ διάταξης (πχ πάρκου), η οποία ελέγχεται από αλγόριθμο MPPT, και δίνει στην έξοδό της τη μέγιστη δυνατή ισχύ για τα κάθε φορά πραγματικά δεδομένα του περιβάλλοντος. Το πρόγραμμα από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως `pv_Pt_graph_staircase`.

Στη παρούσα εργασία, έγινε εισαγωγή δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας από πραγματικές μετρήσεις σε Φωτοβολταϊκά Πάρκα στον Καναδά [34], θεωρώντας σταθερή θερμοκρασία καθώς η μεταβολή της είναι ανεπαίσθητη για το χρονικό διάστημα των 80 λεπτών που εξετάζεται στα Σχ. 4.8-4.10. Το ΦΒ πάρκο προσομοιάζεται σύμφωνα με τις τιμές του παρακάτω πίνακα

Πίνακας 4. 3 Ονομαστικά στοιχεία ΦΒ πάρκου

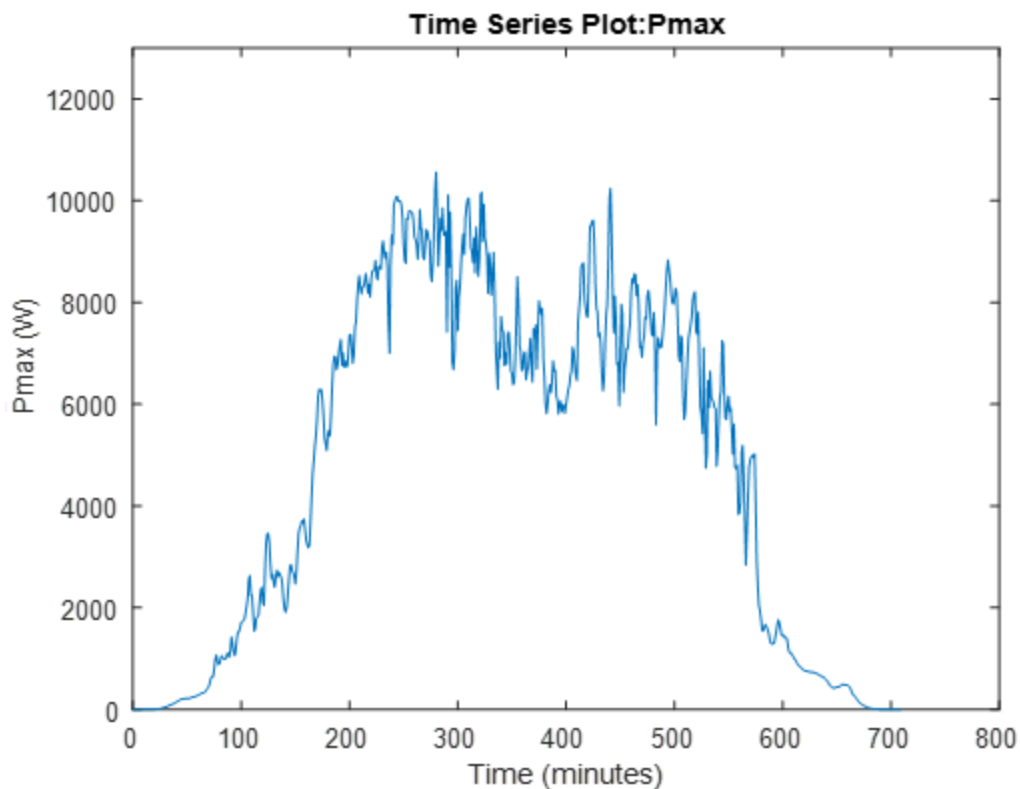
Ονομαστική Ισχύς $P_n$ (kW)	Συνθήκες Ακτινοβολίας ( $W/m^2$ )	Συνθήκες Θερμοκρασίας ( $^{\circ}C$ )
10	1000	25

Το πρόγραμμα προσομοίωσης της ΦΒ διάταξης, δέχεται το πρώτο δεδομένο ηλιακής ακτινοβολίας και υπολογίζει την αντίστοιχη τιμή ρεύματος για μια αυθαίρετη αρχική τιμή τάσης (εντός των επιτρεπτών ορίων) μέσω της ρουτίνας (αλγόριθμου) PVR. Έπειτα, με χρήση του αλγορίθμου MPPTPO υπολογίζεται το αντίστοιχο ζεύγος μέγιστης ισχύος, στο οποίο και θα λειτουργήσει η διάταξη. Στη συνέχεια, για την επόμενη τιμή ακτινοβολίας, πραγματοποιούνται ακριβώς τα ίδια βήματα αλλά αντί για αυθαίρετη αρχική τιμή τάσης επιβάλλεται η τάση μέγιστης ισχύος  $V_{mpp}$  της προηγούμενης τιμής ακτινοβολίας. Αυτό γίνεται για να χρειάζεται ο αλγόριθμος λιγότερες επαναλήψεις για να φτάσει στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης απολαβής ισχύος MPP του τρέχοντος ζεύγους ρεύματος-τάσης καθώς το αρχικό σημείο λειτουργίας που εισάγεται στον MPPTPO θα βρίσκεται πιο κοντά στο επιθυμητό. Στη συνέχεια θα δειχθεί γραφικά η διαφορά αυτής της επιλογής από το να επιλέγεται τυχαία τάση προς εκκίνηση του MPPTPO για κάθε επανάληψη.

Τέλος, ο αλγόριθμος παράγει γραφικές της μέγιστης ισχύος, του αντίστοιχου ρεύματος και τάσης της ΦΒ διάταξης, καθώς και πόσες επαναλήψεις χρειάστηκε ο αλγόριθμος MPPTPO για να επιβάλει λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος για κάθε νέα τιμή ακτινοβολίας.

Είναι σημαντική η αναφορά στα χρονικά διαστήματα που εισάγεται νέα τιμή ακτινοβολίας, και η επίδρασή τους στον MPPTPO. Η κάθε επανάληψη, απαιτεί χρόνο καθώς η βηματική μεταβολή της τάσης γίνεται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτό εμπεριέχει τον κίνδυνο η διάταξη να μη λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος γιατί υπάρχει πιθανότητα να εισάγεται νέο δεδομένο ακτινοβολίας πριν ο MPPT ολοκληρώσει όλες τις απαραίτητες επαναλήψεις για να φτάσει στο MPP του προηγούμενου πλέον σημείου λειτουργίας.

Πέραν της ημερήσιας καμπύλης ισχύος, η οποία θα δοθεί ενδεικτικά στο Σχ. 4.6 και αποτελείται από στοιχεία ακτινοβολίας ανά λεπτό, οι γραφικές που περιεγράφηκαν παραπάνω δέχονται δεδομένα ανά διάστημα δέκα δευτερολέπτων, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω γραμμικής παρεμβολής των αρχικών δεδομένων ανά λεπτό. Θεωρώντας ότι η κάθε αλγοριθμική επανάληψη χρειάζεται περίπου ένα δευτερόλεπτο για να πραγματοποιηθεί, γίνεται έλεγχος αν ο αριθμός επαναλήψεων του MPPTPO ξεπερνάει το χρονικό διάστημα όπου η διάταξη δέχεται νέα τιμή ακτινοβολίας.

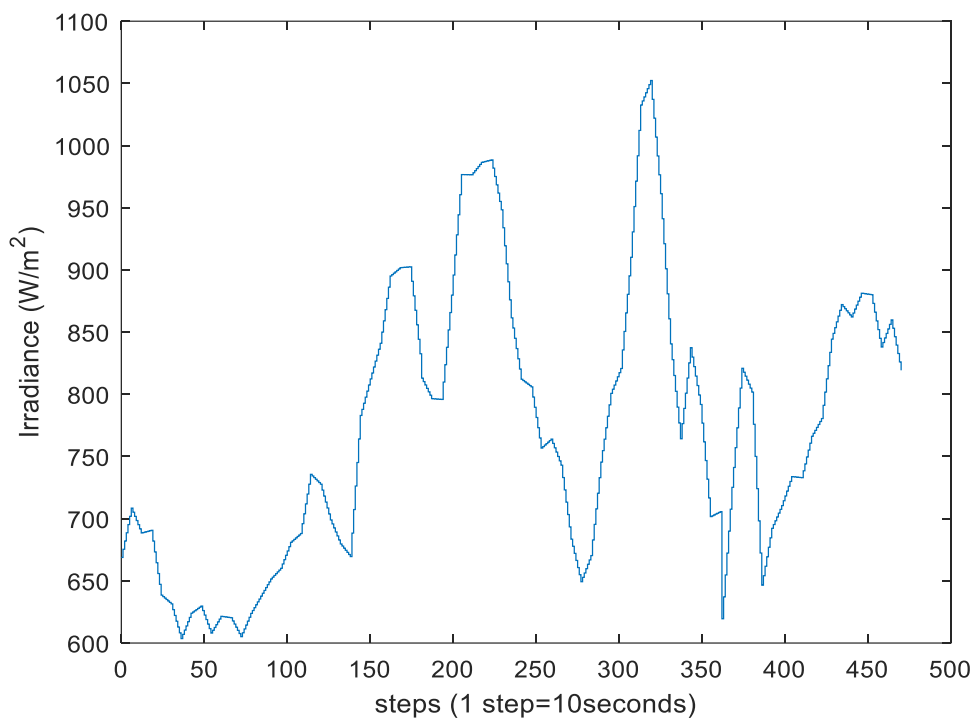


Σχ. 4. 6 Γραφική ισχύος-χρόνου για διάστημα 12 ωρών. Data: 26/2/2015 Καναδάς

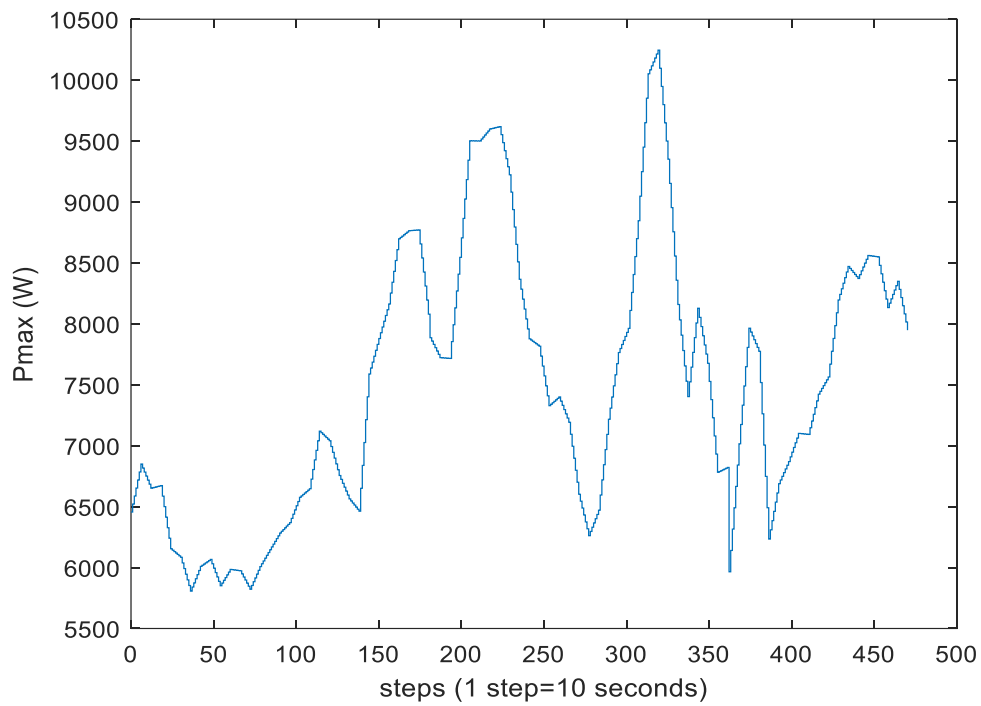
Στο Σχ. 4.6 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της παραγόμενης ισχύος της διάταξης με τη χρήση MPPT για τις αντίστοιχες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, σε διάστημα 12 ωρών. Οι τιμές ακτινοβολίας εισέρχονται με ρυθμό μία ανά λεπτό, που αντικατοπτρίζεται και στις τιμές ισχύος. Όπως αναφέρθηκε, η συγκεκριμένη καμπύλη δίνεται ενδεικτικά και διαφοροποιείται από τα παρακάτω σχήματα τόσο στη χρονική κλίμακα όσο και στη δειγματοληψία.

Στα σχήματα 4.7-4.10 παρουσιάζονται οι γραφικές ακτινοβολίας, ισχύος, ρεύματος και τάσης μετά από έλεγχο του MPPTPO για διάστημα μίας ώρας και είκοσι λεπτών (12:40-14:00). Τα δεδομένα ακτινοβολίας εισέρχονται με ρυθμό ένα ανά δέκα δευτερόλεπτα, το οποίο θεωρείται ένα βήμα (step). Οι συναρτήσεις είναι σκαλωτές (staircase) και μεταβάλλονται ανά ένα βήμα.

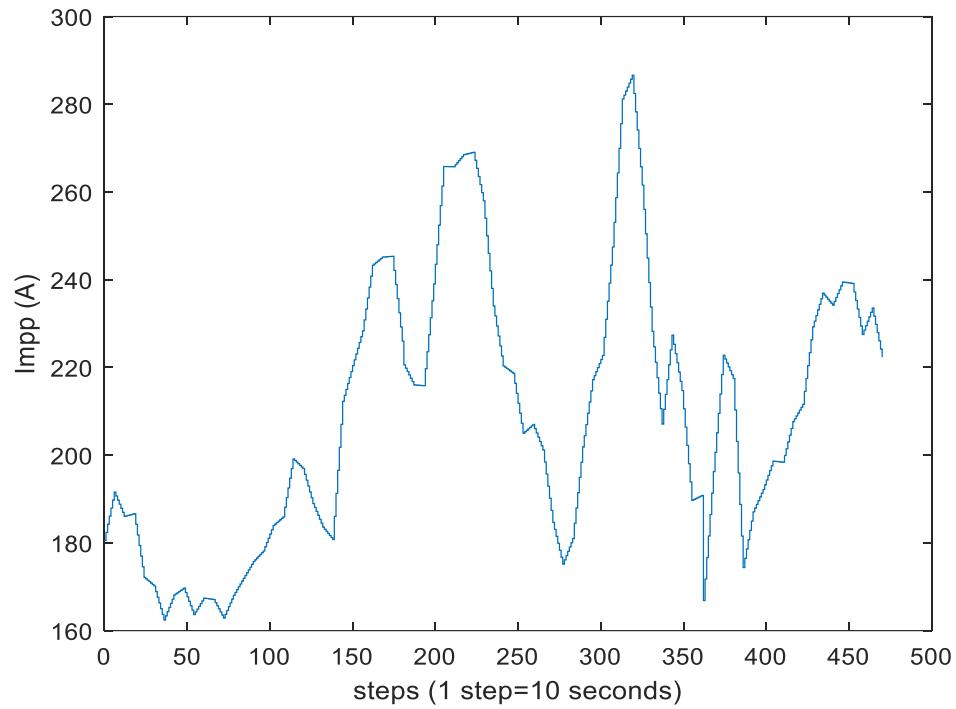




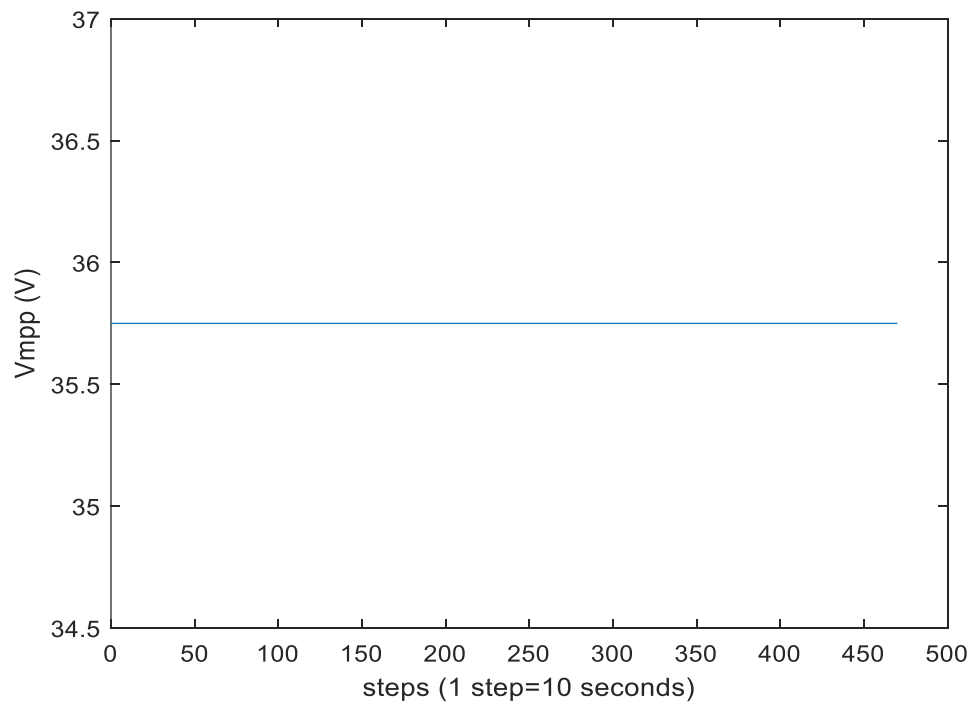
Σχ. 4. 7 Βηματική γραφική ακτινοβολίας για το διάστημα 12:40-14:00, 26/2/2015 Καναδάς



Σχ. 4. 8 Βηματική γραφική παραγόμενης ενεργού ισχύος για το διάστημα 12:40-14:00, 26/2/2015 Καναδάς



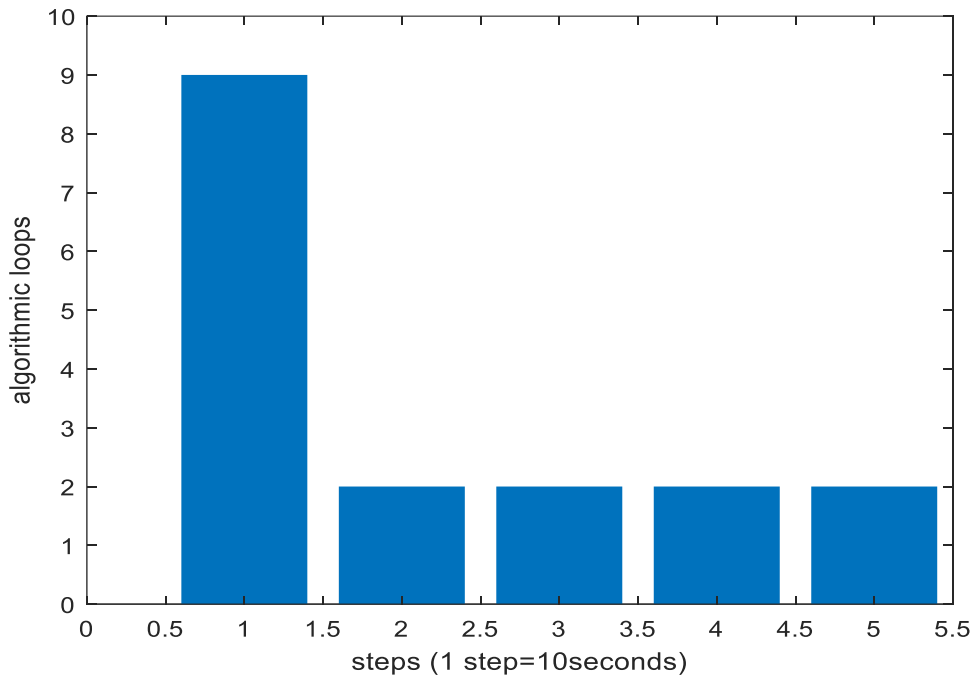
Σχ. 4. 9 Βηματική γραφική ρεύματος για το διάστημα 12:40-14:00, 26/2/2015 Καναδάς



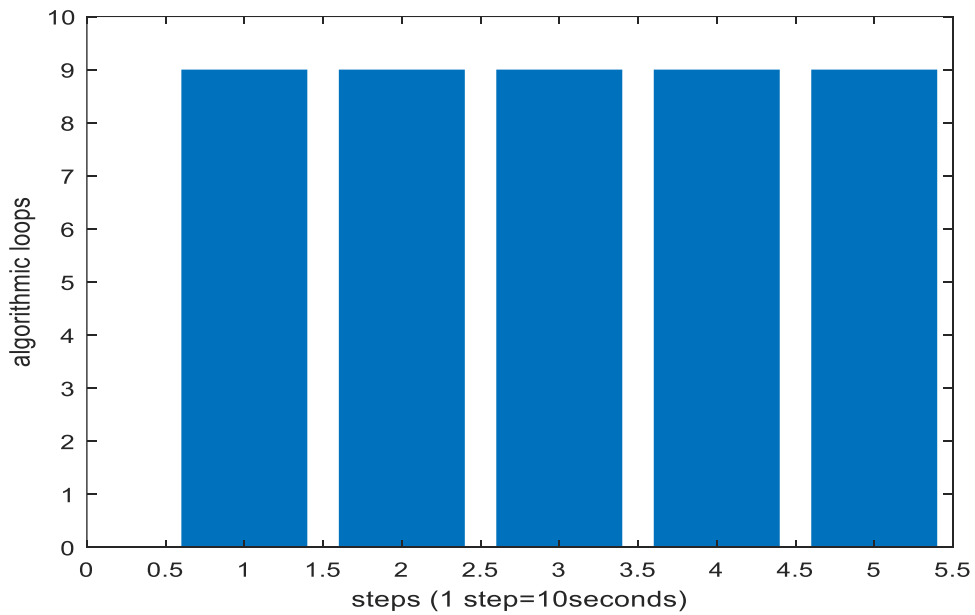
Σχ. 4. 10 Βηματική γραφική τάσης για το διάστημα 12:40-14:00, 26/2/2015 Καναδάς

Μία πολύ σημαντική παρατήρηση που προκύπτει είναι ότι η ακτινοβολία, το ρεύμα και η ισχύς έχουν αντίστοιχη μορφή, ενώ η τάση παραμένει σταθερή. Αυτό συμβαίνει επειδή όπως αναλύθηκε στις ενότητες 3.5.1 και 3.5.2, η ακτινοβολία επηρεάζει κυρίως το ρεύμα και ανεπαίσθητα τη τάση. Στο εύρος και τη διασπορά ακτινοβολίας από τα συγκεκριμένα στοιχεία ( $600-1050 \text{ W/m}^2$ ), η επιρροή στη τάση είναι πρακτικά μηδενική. Έτσι, η  $V_{\text{mpp}}$  της διάταξης είναι σταθερή, και μεταβάλλεται μόνο το  $I_{\text{mpp}}$ , και κατά συνέπεια η  $P_{\text{max}}$ . Αυτό σημαίνει σύγκλιση του αλγορίθμου από το πρώτο βήμα.

Στα Σχ. 4.11 και 4.12 φαίνονται τα ενδεικτικά ραυδογράμματα (bar graphs) που δείχνουν τον αριθμό των αλγοριθμικών επαναλήψεων του MPPTPO για τα πρώτα πέντε βήματα εισαγωγής νέας ακτινοβολίας. Τα υπόλοιπα παραλείπονται καθώς δεν αλλάζουν για τα επόμενα 480 βήματα. Στο Σχ. 4.11 παρουσιάζεται η μέθοδος χρήσης της τάσης  $V_{\text{mpp}}$  της προηγούμενης επανάληψης για αρχική, ενώ στο Σχ. 4.12 είναι η ίδια διαδικασία αλλά με επιλογή αυθαίρετης τάσης για την αρχικοποίηση του MPPTPO κάθε φορά. Με την αυθαίρετη τιμή τάσης  $0.2\text{V/στοιχείο}$ , ο MPPTPO χρειάζεται 9 επαναλήψεις για να φέρει τη διάταξη στο σημείο βέλτιστης ισχύος. Με τη διαδικασία αρχικοποίησης με την προηγούμενη MPP τάση, καθώς η  $V_{\text{mpp}}$  μένει σταθερή (Σχ. 4.10), ο αλγόριθμος χρειάζεται δύο επαναλήψεις για να αντιληφθεί ότι η επιβαλλόμενη τάση ήταν η τάση MPP, μία για να προσθέσει βήμα  $\Delta V$  και αφού παρατηρεί μείωση ισχύος ακόμα μία για να επανέλθει στο αρχικό σημείο. Αντίθετα, αν ο αλγόριθμος θέτει αρχικό σημείο λειτουργίας με την αυθαίρετη τάση κάθε φορά, απαιτούνται 9 επαναλήψεις για κάθε βήμα ώστε να επαναφέρει τη διάταξη στη μέγιστη ισχύ της.



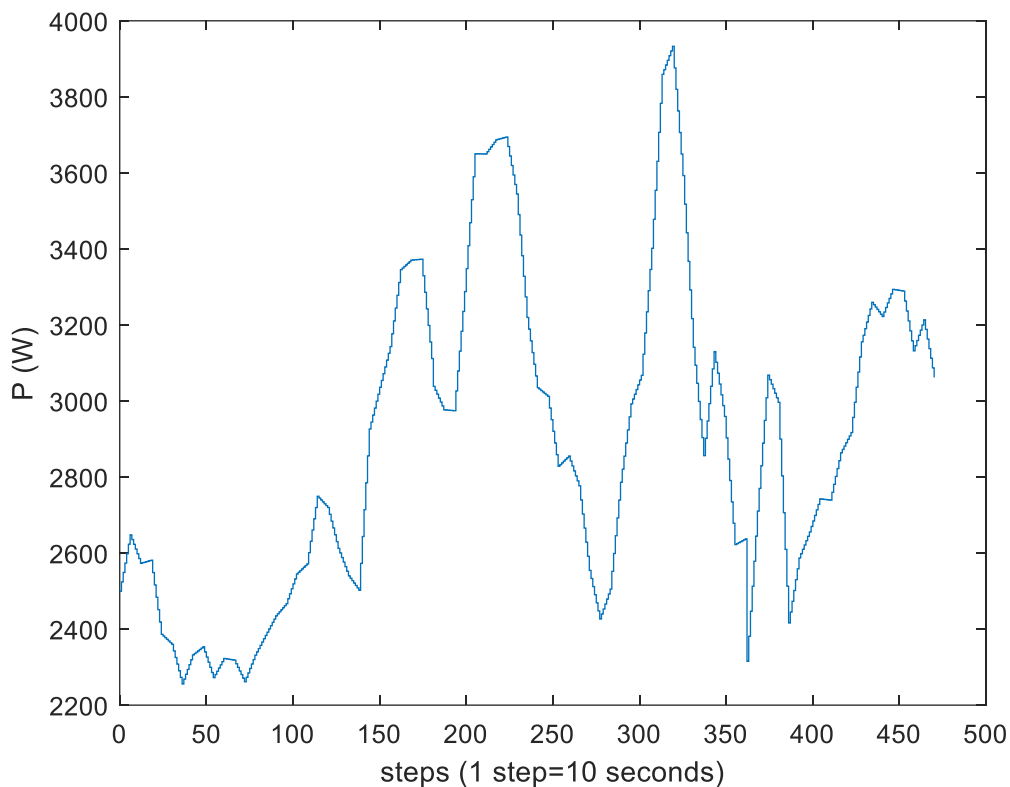
Σχ. 4. 11 Έλεγχος αλγοριθμικών βημάτων του MPPTPO για τα πρώτα 5 βήματα με αρχικοποίηση ίση με την προηγούμενη  $V_{mpp}$



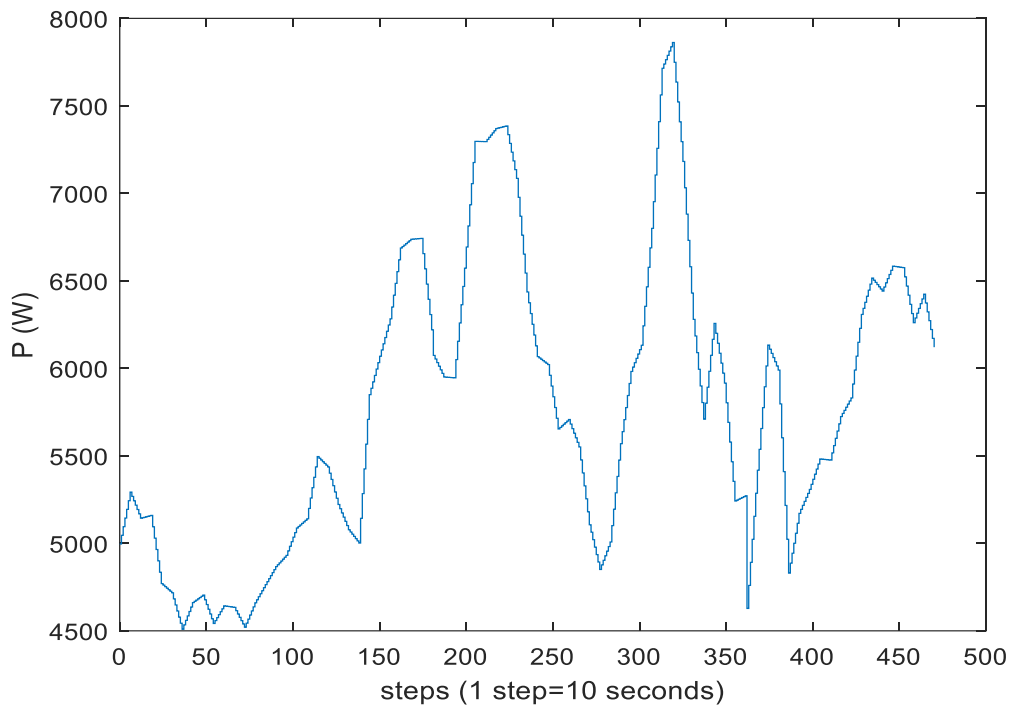
Σχ. 4. 12 Έλεγχος αλγοριθμικών βημάτων του MPPTPO για τα πρώτα 5 βήματα με τροφοδότηση αυθαίρετης τιμής τάσης 0.2V/cell

## 4.5 Σύγκριση της ΦΒ διάταξης με και χωρίς MPPT

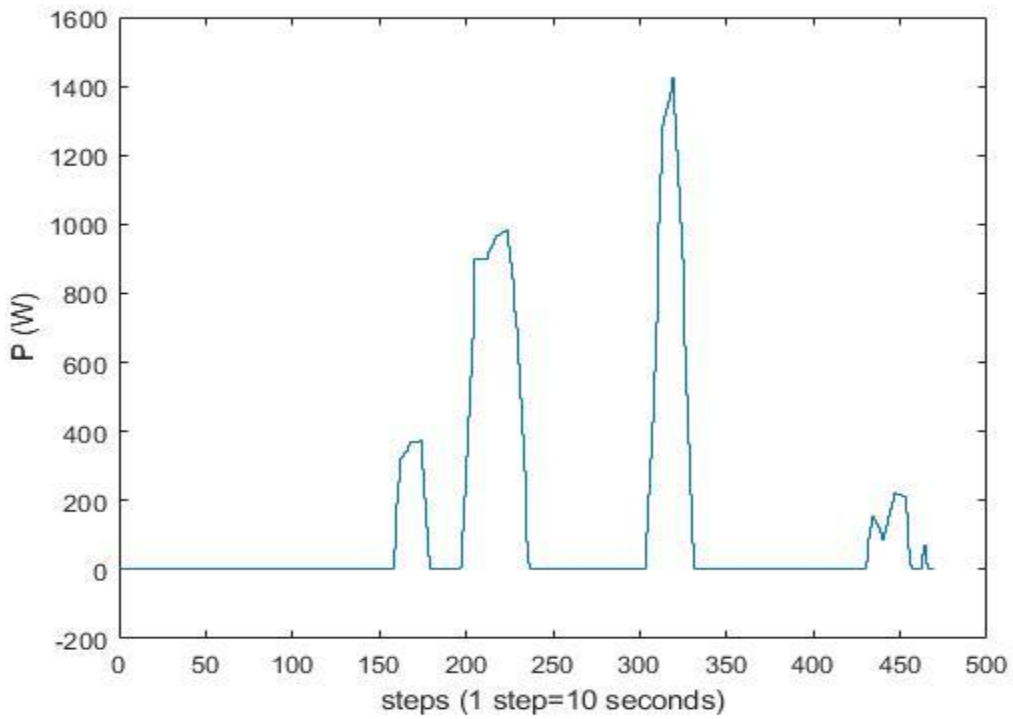
Με την χρήση της προγραμματιστικής διαδικασίας που αναλύθηκε στην ενότητα 4.4 και με κάποιες τροποποιήσεις στο πρόγραμμα 'pv\_Pt\_graph\_staircase' ώστε να μην αξιοποιεί τον αλγόριθμο 'MPPTPO', αλλά να επιβάλει σταθερή τιμή τάσης εξόδου  $V_{pv}$ , παράγονται βηματικές καμπύλες ισχύος για το ίδιο χρονικό διάστημα με ίδιο χρονικό βήμα συγκριτικά με το Σχ. 4.9 της ενότητας 4.4 για επιβαλλόμενες τάσεις  $V_{pv} = 0.2V/cell$  (Σχ. 4.13),  $V_{pv} = 0.4V/cell$  (Σχ. 4.14), που είναι χαμηλότερες της  $V_{mpp}$  σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή (Περιοχή Ι) από το Σχ. 4.1 και  $V_{pv} = 0.66V/cell$  (Σχ. 4.15) που προσεγγίζει την μέγιστη τάση λειτουργίας  $V_{oc}$  (Περιοχή ΙΙ). Υπενθυμίζεται ότι οι περιοχές Ι και ΙΙ παρουσιάζονται στο Σχ. 3.22.



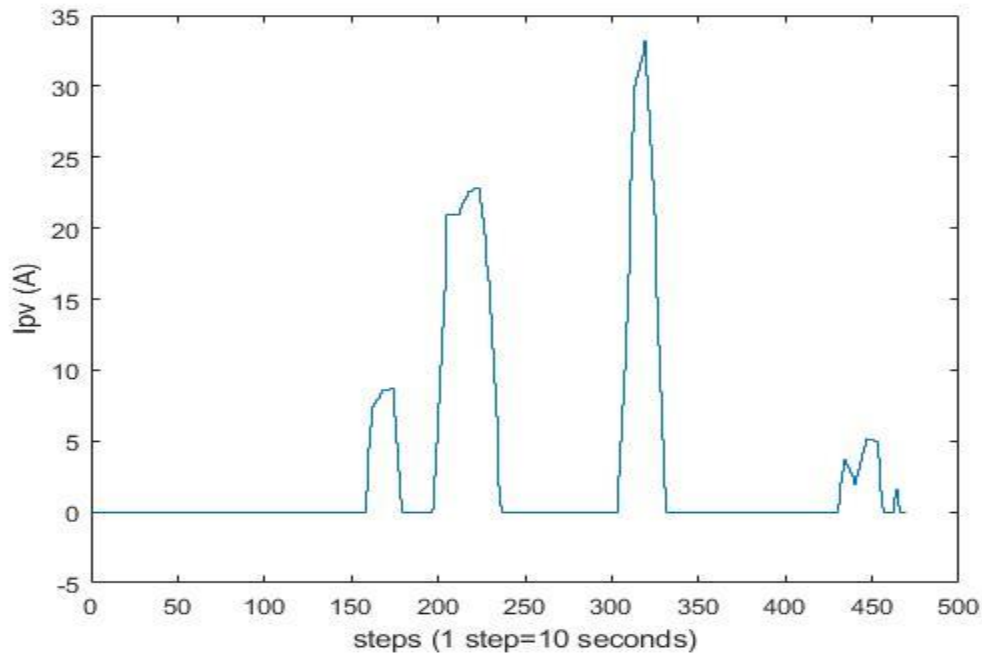
Σχ. 4. 13 Βηματική γραφική παραγόμενης ενεργού ισχύος χωρίς MPPT με  $V_{pv} = 0.2V/cell$



Σχ. 4. 14 Βηματική γραφική παραγόμενη ενεργού ισχύος χωρίς MPPT με  $V_{pv} = 0.4V/cell$



Σχ. 4. 15 Βηματική γραφική παραγόμενη ενεργού ισχύος χωρίς MPPT με  $V_{pv} = 0.66 V/cell$



Σχ. 4. 16 Βηματική γραφική ρεύματος εξόδου ΦΒ διάταξης χωρίς MPPT με  $V_{pv} = 0.66$  V/cell

Συγκρίνοντας τα Σχ. 4.13-4.14 (καμπύλες ισχύος χωρίς MPPT) με το Σχ. 4.8 (Καμπύλη ισχύος με MPPT) για λειτουργία εντός της Περιοχής I παρατηρείται σημαντική μείωση παραγόμενης ισχύος με την απομάκρυνση της τάσης λειτουργίας από την τάση μέγιστης ισχύος  $V_{mpp}$ .

Για λειτουργία εντός της περιοχής II οι τιμές των ρευμάτων είναι τόσο μικρές για ορισμένες τιμές ακτινοβολίας όπου το πρόγραμμα τις θεωρεί μηδενικές όπως φαίνεται στο Σχ. 4.16 με αποτέλεσμα μηδενικής παραγωγής ενεργού ισχύος για τις αντίστοιχες περιοχές, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 4.15.





# 5. Επίδραση διεσπαρμένης φωτοβολταϊκής παραγωγής στην ευστάθεια τάσεως

## 5.1 Προσομοίωση ΣΗΕ στο WPSTAB

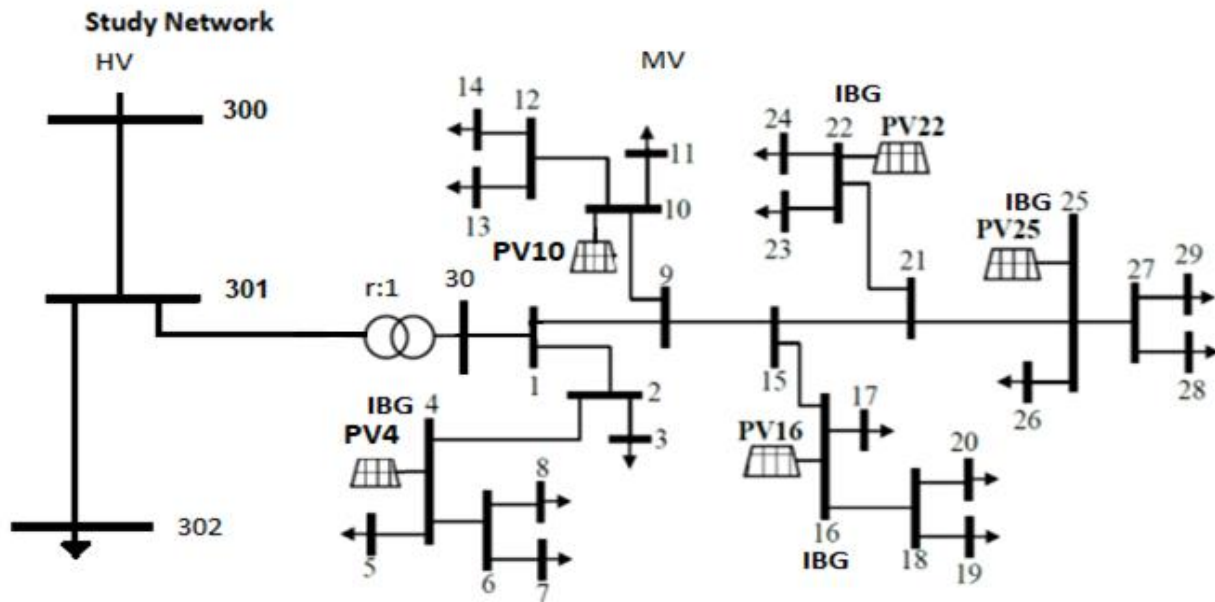
### 5.1.1 Περιγραφή Συστήματος

Με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB που περιγράφηκε στην ενότητα 1.9.2 προσομοιώνεται ένα ακτινικό σύστημα μεταφοράς, το οποίο αποτελείται από τρεις ζυγούς μεταφοράς YT, στον ενδιάμεσο ζυγό του οποίου συνδέεται γραμμή διανομής με τριάντα ζυγούς MT μέσω μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ. Στη γραμμή διανομής υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή από πέντε φωτοβολταϊκά πάρκα όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1. Η γραμμική διανομής προέρχεται από την εργασία [32].

Η επίλυση του προβλήματος ροών φορτίου για την αρχικοποίηση του ΣΗΕ σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας απαιτεί σωστή αρχικοποίηση τιμών από τον χρήστη. Για τη λειτουργία του μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ, ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή αρχικοποίηση του μεταβλητού λόγου μετασχηματισμού ( $r$ ). Στη συνέχεια εισάγεται διαταραχή αύξησης φορτίου σε μορφή ράμπας, η οποία τείνει να φέρει το ακτινικό σύστημα μεταφοράς σε αστάθεια τάσεως. Η μελέτη της επίδρασης της διαταραχής πραγματοποιείται από το πρόγραμμα WPSTAB και η γραφική αναπαράσταση πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος GNUPLOT.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος (MMI) του ακτινικού συστήματος μεταφοράς με και δίχως ΦΒ παραγωγή και η σύγκριση των λειτουργιών ελέγχου αέργου ισχύος από τους μετατροπείς των ΦΒ με χρήση ρύθμισης σταθερής τάσης και ρύθμισης σταθερού συντελεστή ισχύος, όπως αναλύθηκαν στις ενότητες 1.8.2.1 και 1.8.2.2.

Στη συνέχεια εξετάζονται οι περιπτώσεις αύξησης της αρχικής τάσης του ζυγού YT του μετασχηματιστή με ταυτόχρονη ένταξη διάταξης πυκνωτών με στόχο την αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και την εμφάνιση της αντίστοιχης κρίσιμης τάσης σε λογικά επίπεδα και τέλος η επίδραση της μεταβολής της τάσεως του δικτύου διανομής μέσω ρύθμισης της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ.



Σχ. 5. 1 Ακτινικό σύστημα μεταφοράς και γραμμή διανομής υπό μελέτη

Στους πίνακες 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 και 5.5 παρουσιάζονται κατ' αντιστοιχία τα στοιχεία του μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ, τα στοιχεία του ΣΑΤΥΦ, οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς και διανομής, τα στοιχεία των ζυγών και τέλος οι ονομαστικές τιμές ισχύος και τα όρια των περιοριστών ρεύματος των μετατροπέων της διεσπαρμένης παραγωγής. Τα όρια των περιοριστών προκύπτουν όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.8.2 και παρουσιάζονται στο ανά μονάδα σύστημα για να ταυτίζονται με τις γραφικές παραστάσεις που θα παρουσιαστούν στις παρακάτω ενότητες. Υπενθυμίζεται ότι η βασική ισχύς είναι  $S_b = 100 \text{ MVA}$  και η βασική τάση στο δίκτυο διανομής ΜΤ είναι  $V_b = 20 \text{ KV}$ , οπότε σύμφωνα με την ενότητα 1.4.1 το βασικό ρεύμα ισούται με  $I_b = 5 \text{ KA}$ .

Τα στοιχεία του μετασχηματιστή περιλαμβάνουν την ονομαστική ισχύ ( $S_n$ ), τη σύνθετη αντίσταση του και τα στοιχεία του ΣΑΤΥΦ, δηλαδή το εύρος του λόγου μετασχηματισμού ( $\Gamma_{\min}, \Gamma_{\max}$ ), το εύρος της νεκρής ζώνης της τάσης διανομής ( $V_{\min}, V_{\max}$ ), το βήμα αλλαγής λόγου μετασχηματισμού (step) και τις χρονικές καθυστερήσεις (αρχική  $t_{del1}$ , και επόμενη  $t_{del2}$ ), τα οποία έχουν επεξηγηθεί στην ενότητα 1.8.2.

Τα στοιχεία των ζυγών περιλαμβάνουν την ενεργό/άεργο ζήτηση ισχύος των φορτίων. Τα φορτία θεωρούνται εξαρτώμενα από την τάση και συγκεκριμένα το ενεργό φορτίο θεωρείται σταθερού ρεύματος (εκθέτης 1), ενώ το άεργο σταθερής αγωγιμότητας (εκθέτης 2).

Πίνακας 5. 1 Στοιχεία μετασχηματιστή

Transformer Data
220/20 KV
$S_n = 20 \text{ MVA}$

$R = 0 \text{ αμ}$
$X = 0.50 \text{ αμ.}(S_b = 100 \text{ MVA})$

Πίνακας 5. 2 Στοιχεία ΣΑΤΥΦ (ανά μονάδα)

$r_{\max}$	$r_{\min}$	$V_{\max}$	$V_{\min}$	step	$t_{del1}$	$t_{del2}$
1.1	0.8	1.01	0.99	0.01	30	10

Πίνακας 5. 3 Σύνθετες αντιστάσεις γραμμών διανομής 20kV σε Ω

Από ζυγό	Προς ζυγό	Αντίσταση R [Ω]	Αντίδραση X [Ω]
30	1	0.1464	0.4116
1	2	0.1220	0.3430
2	3	0.1342	0.3773
2	4	0.1708	0.4802
4	5	0.1220	0.3430
4	6	0.1220	0.3430
6	7	0.1342	0.3773
7	8	0.1464	0.4116
1	9	0.1464	0.4116
9	10	0.1464	0.4116
10	11	0.1220	0.3430
10	12	0.1220	0.3430
12	13	0.1220	0.3430
13	14	0.1220	0.3430
9	15	0.1342	0.3773
15	16	0.1342	0.3773
16	17	0.1220	0.3430
16	18	0.1586	0.4459
18	19	0.1342	0.3773
19	20	0.1220	0.3430
15	21	0.1464	0.4116
21	22	0.1464	0.4116
22	23	0.1342	0.3773
22	24	0.1220	0.3430
21	25	0.1586	0.4459
25	26	0.1464	0.4116
25	27	0.1464	0.4116
27	28	0.1586	0.4459
27	29	0.1342	0.3773
300	301	0.00	96.8
301	302	0.00	96.8

Πίνακας 5. 4 Στοιχεία Ζυγών (ζήτηση ισχύος)

Ζυγός	P [MW]	Q [MVAr]
1	0.00	0.00
2	0.00	0.00
3	0.85	0.52
PV4	0.00	0.00
5	0.70	0.21
6	0.00	0.00
7	0.22	0.09
8	0.33	0.11
9	0.00	0.00
PV10	0.00	0.00
11	0.90	0.45
12	0.00	0.00
13	0.35	0.15
14	1.26	0.64
15	0.00	0.00
PV16	0.00	0.00
17	0.76	0.43
18	0.00	0.00
19	1.22	0.46
20	0.95	0.43
21	0.00	0.00
PV22	0.00	0.00
23	0.40	0.17
24	0.44	0.205
PV25	0.00	0.00
26	0.90	0.45
27	0.00	0.00
28	1.05	0.625
29	0.68	0.31
30	0.00	0.00
300	0.00	0.00
301	0.00	0.00
302	Προ διαταραχής 50.00	0.00

Πίνακας 5. 5 Ονομαστική ισχύς διεσπαρμένης παραγωγής

ΦΒ Παραγωγή	Ζυγός	Ονομαστική ισχύς [MVA]	Όρια περιοριστών ρεύματος (αμ)
PV4	4	8.00	0.08
PV10	10	6.00	0.06
PV16	16	4.5	0.045
PV22	22	2.25	0.0225
PV25	25	4.5	0.045

### 5.1.2 Περιγραφή διαταραχής και σενάρια ΦΒ παραγωγής

Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι μια βαθμιαία αύξηση αγωγιμότητας στον ζυγό φορτίου YT 302 με ρυθμό 0.1% ανά δευτερόλεπτο, διάρκειας 2500 δευτερολέπτων. Τα πρώτα 50 δευτερόλεπτα η αγωγιμότητα παραμένει σταθερή ώστε να εξασφαλιστεί κατάσταση μόνιμης λειτουργίας. Στην συνέχεια εισάγεται η διαταραχή για τα επόμενα 2450 δευτερόλεπτα και μετά η προσομοίωση τερματίζει. Το φορτίο στο ζυγό 302 παρουσιάζεται ως αγωγιμότητα για να φανεί καθαρά το σημείο όπου η καταναλισκόμενη ισχύς του μεγιστοποιείται, χωρίς να υπάρξει πρόβλημα στην επίλυση των εξισώσεων, όπως θα συνέβαινε αν το φορτίο είχε παρασταθεί ως σταθερή ισχύς (που δεν θα μπορούσε φυσικά να ξεπεράσει τη μέγιστη).

Η μελέτη της επίδρασης της διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης του δικτύου θα πραγματοποιηθεί με τρεις προσομοιώσεις:

1. Προσομοίωση διαταραχής χωρίς φωτοβολταϊκή παραγωγή. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιείται θεωρώντας τους ζυγούς φωτοβολταϊκής παραγωγής 4, 10, 16, 22, 25 ως ζυγούς φορτίου (P-Q) μηδενικής ισχύος. Στην συνέχεια της εργασίας αυτή η προσομοίωση θα αναφέρεται ως **προσομοίωση 1**.
2. Προσομοίωση διαταραχής με φωτοβολταϊκή παραγωγή ίση με το 50% και το 90% της ονομαστικής ικανότητας παραγωγής αντίστοιχα, σύμφωνα με τον πίνακα 5.5 και με ρύθμιση σταθερού μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Επιπρόσθετα θα προσομοιωθεί η εξεταζόμενη διαταραχή με ΦΒ παραγωγή καθορισμένη από χρονοσειρά ισχύος σύμφωνα με τις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 4. Η χρονοσειρά αυτή έχει παραχθεί για πάρκα ονομαστικής ισχύος 1MW και παρέχεται στο κάθε φωτοβολταϊκό πάρκο ως είσοδος πολλαπλασιασμένη επί την εκάστοτε ονομαστική ισχύ σύμφωνα με τον πίνακα 5.5. Στην συνέχεια της εργασίας αυτές οι προσομοιώσεις θα αναφέρονται ως **προσομοίωση 2.1** για την περίπτωση 50% παραγωγής, **προσομοίωση 2.2** για τη περίπτωση 90% παραγωγής και **προσομοίωση 2.3** για τη μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος του Κεφαλαίου 4. Οι τρεις αυτές προσομοιώσεις θα αναφέρονται μαζί ως **προσομοίωση 2**.
3. Προσομοίωση διαταραχής με φωτοβολταϊκή παραγωγή ίση με το 50% και το 90% της ονομαστικής ικανότητας παραγωγής αντίστοιχα και ρύθμιση σταθερής τάσης. Επιπρόσθετα θα προσομοιωθεί διαταραχή με ΦΒ παραγωγή καθορισμένη από χρονοσειρά

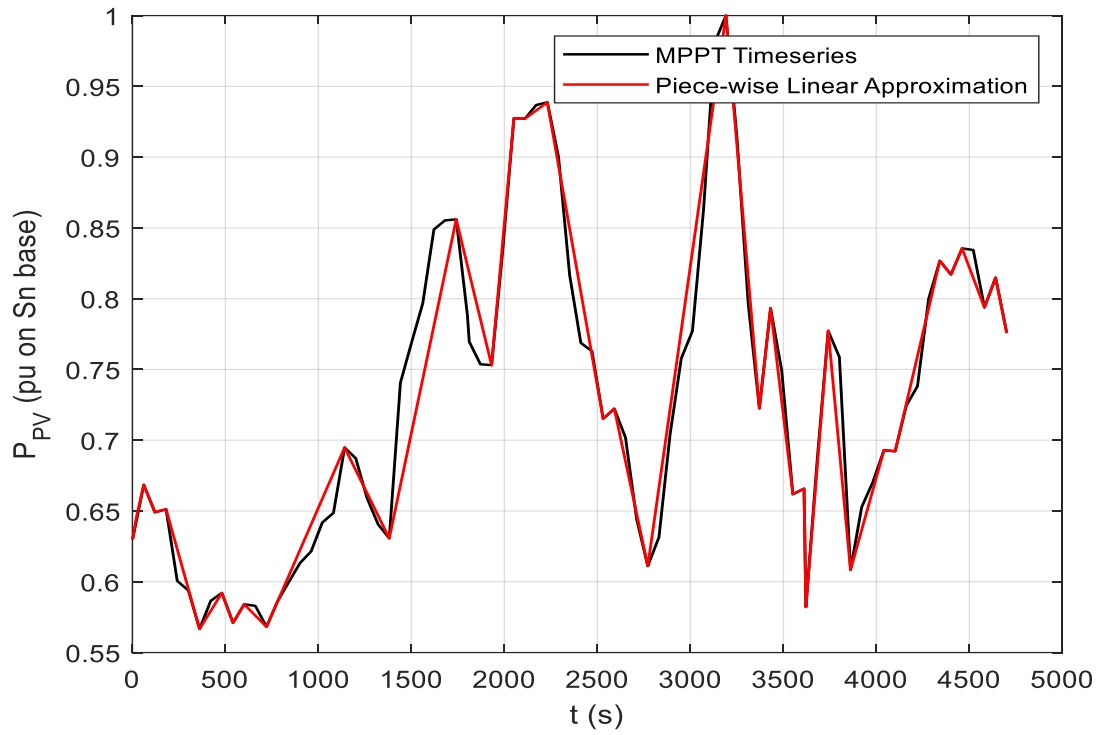
ισχύος σύμφωνα με τις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 4, όπως παραπάνω. Στην συνέχεια της εργασίας αυτές οι προσομοιώσεις θα αναφέρονται ως **προσομοίωση 3.1** για την περίπτωση 50% παραγωγής, **προσομοίωση 3.2** για τη περίπτωση 90% παραγωγής και **προσομοίωση 3.3** για τη μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος. Οι τρεις αυτές προσομοιώσεις θα αναφέρονται μαζί ως **προσομοίωση 3**.

### 5.1.3 Παράσταση μεταβλητής χρονοσειράς ΦΒ παραγωγής

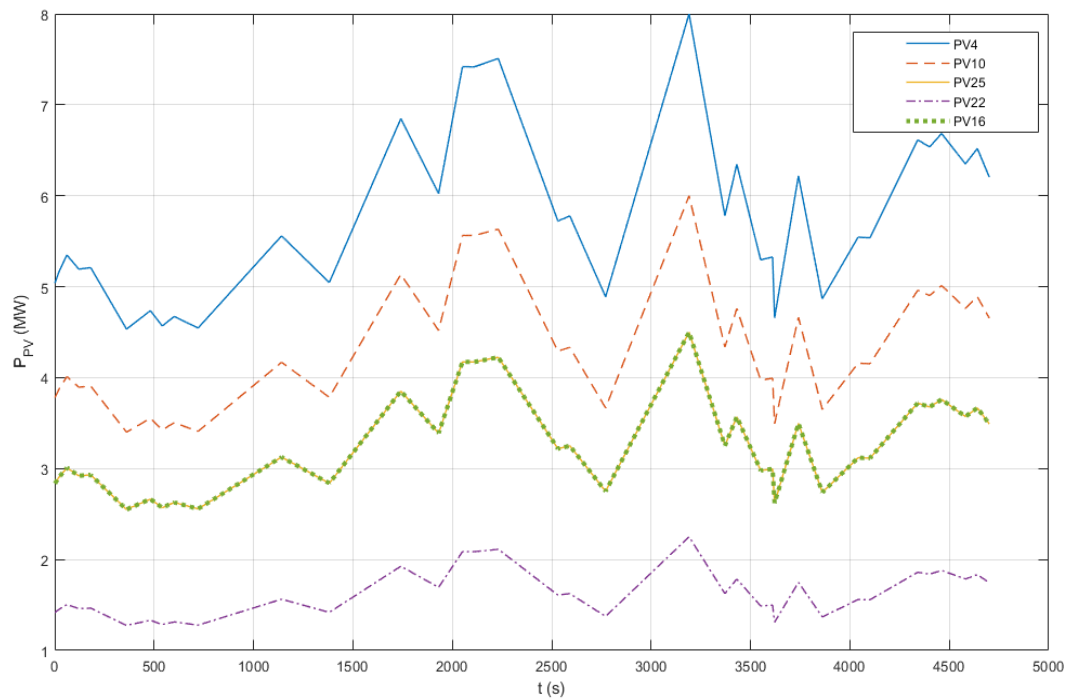
Η παραγωγή χρονοσειρών ισχύος για τη ΦΒ παραγωγή στις **προσομοιώσεις 2.3** και **3.3** απαιτεί ιδιαίτερη διαδικασία. Αρχικά, απαιτείται μια χρονοσειρά ισχύος η οποία προκύπτει σύμφωνα με τη διαδικασία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4 από μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας και προσομοίωσης της εφαρμογής αλγορίθμου μέγιστης απολαβής ισχύος. Η παραγόμενη με αυτή τη μέθοδο χρονοσειρά ισχύος αποτελείται από 463 σημεία ανά δέκα δευτερόλεπτα. Για τη λειτουργία των συγκεκριμένων προσομοιώσεων, έγινε απλοποίηση της χρονοσειράς ώστε η εισαγωγή δεδομένων να γίνεται έτσι ευκολότερη.

Αρχικά η παραγόμενη ισχύς μετατρέπεται στο ανά μονάδα σύστημα. Στη συνέχεια, τα διακριτά σημεία της παραγόμενης ισχύος προσεγγίζονται με τμηματικά γραμμικές συναρτήσεις. Οι μέθοδοι πραγματοποίησης της προσέγγισης αυτής περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5 της διπλωματικής εργασίας [33]. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς πραγματοποιείται με τέτοιον τρόπο ώστε να μην εισάγει σημαντικό σφάλμα στα αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.2.

Στη συνέχεια, με βάση την απλοποιημένη τμηματικά γραμμική χρονοσειρά ισχύος και τις ονομαστικές παραγωγές του Πιν. 5.5, γίνεται εξαγωγή των πέντε αντίστοιχων χρονοσειρών ισχύος της ΦΒ παραγωγής. Στο Σχ. 5.2 παρουσιάζεται η αρχική χρονοσειρά ισχύος πριν (μαύρο) και μετά (κόκκινο) την απλοποίηση της, ενώ στο Σχ. 5.3 παρουσιάζονται οι πέντε χρονοσειρές ισχύος για τη ΦΒ παραγωγή. Εν τέλει, οι **προσομοιώσεις 2.3** και **3.3** υπόκεινται στην ίδια διαταραχή που εξηγήθηκε παραπάνω και η διάρκεια των **προσομοιώσεων 2.3** και **3.3** εκτείνεται μόνο μέχρι τα 2100 δευτερόλεπτα περίπου, δηλαδή λίγο μετά τη μεγιστοποίηση της μεταφοράς ισχύος προς το φορτίο.



Σχ. 5. 2 Χρονοσειρά ισχύος πριν (μαύρη) και μετά (κόκκινη) την απλοποίηση της



Σχ. 5. 3 Χρονοσειρές ισχύος για κάθε ΦΒ παραγωγή.

Σημειώνεται ότι καθώς τα ΦΒ Πάρκα PV16 και PV25 έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ σύμφωνα με τον Πίν. 5.5, οι χρονοσειρές ισχύος τους στο Σχ. 5.3 ταυτίζονται.

Σε όλες τις προσομοιώσεις ο μετασχηματιστής YT/MT λειτουργεί με ρύθμιση της MT από το ΣΑΤΥΦ (εκτός εάν έχουν εξαντληθεί οι διαθέσιμες λήψεις) και οι μετατροπείς των ΦΒ λειτουργούν με περιοριστή ρεύματος όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.8.2 και 5.1.1.

Σχετικά με την ευστάθεια τάσης θα παρουσιαστούν γραφικά

- Οι μεταβλητές του μετασχηματιστή διανομής, δηλαδή η τάση του πρωτεύοντος (ζυγός 301), του δευτερεύοντος (ζυγός 30), η νεκρή ζώνη της ρυθμιζόμενης τάσης διανομής (deadband) και ο λόγος υποβιβασμού (ratio).
- Η ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή, με τις θετικές τιμές να συμβολίζουν ροή ισχύος από τον ζυγό YT 300 στον ζυγό MT 30 και αρνητικές αντίστροφη ροή από τη MT στην YT.
- Οι τάσεις στους ζυγούς των ΦΒ 4, 10, 16, 22, 25.
- Η PV χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-τάσεως του ζυγού φορτίου YT (ζυγός 302) όπου εξάγεται η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς.
- Τα ρεύματα της φωτοβολταϊκής παραγωγής για την **προσομοίωση 2** και **προσομοίωση 3**.
- Η άεργος φωτοβολταϊκή παραγωγή στην **προσομοίωση 3**. Στην **προσομοίωση 1** δεν υπάρχει φωτοβολταϊκή παραγωγή και στην **προσομοίωση 2** η άεργος παραγωγή λόγω του μοναδιαίου συντελεστή ισχύος είναι μηδενική.

## 5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων χρονικής προσομοίωσης

Κατά τη διάρκεια των **προσομοιώσεων 1, 2 και 3**, ιδιαίτερη σημασία έχει η εμφάνιση του σημείου Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος πριν την εξάντληση του ΣΑΤΥΦ, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της κατανάλωσης στη γραμμή διανομής μέσω της αλλαγής της τάσης του δικτύου. Με μέριμνα το παραπάνω, οι κρίσιμες τιμές που αντιστοιχούν στη MMI για κάθε μία από τις προσομοιώσεις περιλαμβάνουν την κρίσιμη τάση του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου (ζυγός 302)  $V_c$ , τον μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού  $r_c$ , την αντίστοιχη χρονική στιγμή  $t_c$ , καθώς και την τιμή της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος  $P_{max}$ .

Η σύγκριση του σημείου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε σχέση με τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ πραγματοποιείται μέσω της μεταβλητής  $r_c$ . Δεδομένου ότι από τον Πιν. 5.2 είναι γνωστή η ελάχιστη τιμή του λόγου μετασχηματισμού ( $r_{min}$ ) και του βήματος μεταβολής του (step), είναι εύκολη η σύγκριση του πόσο απέχει το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος από το σημείο τερματισμού του ΣΑΤΥΦ. Επιπρόσθετα, μέσω των μεταβλητών  $V_c$  και  $t_c$  εξάγονται πορίσματα για τη συμπεριφορά του ΣΗΕ, καθώς είναι σημαντική πληροφορία το αν η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς μπορεί να εμφανιστεί σε επίπεδα τάσης κοντινά με αυτά της συνήθους λειτουργίας του συστήματος.



Επίσης, στις μεταβλητές περιλαμβάνεται και ο αρχικός λόγος μετασχηματισμού  $r_0$  ο οποίος επιλέγεται από τον χρήστη για να είναι η αρχική τάση του ρυθμιζόμενου ζυγού εντός της νεκρής ζώνης.

Τέλος, στα κρίσιμα στοιχεία εντάσσεται η ποσοστιαία διαφορά της τρέχουσας προσομοίωσης με τη ΜΜΙ της **προσομοίωσης 1** (δίχως ΦΒ παραγωγή), η οποία πραγματοποιείται για τη σύγκριση της επίδρασης της ΦΒ παραγωγής και των διαφορετικών ρυθμίσεων των μετατροπέων στην ΜΜΙ. Η ποσοστιαία διαφορά υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta P\% = \frac{P_{max} - P_{max.1}}{P_{total}} 100\% \quad (5.1)$$

Όπου  $P_{max}$  η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς της εκάστοτε προσομοίωσης,  $P_{max.1}$  η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς της **προσομοίωσης 1** με την οποία γίνεται η σύγκριση και  $P_{total} = 25.25\text{MW}$  η ονομαστική συνολική ισχύς από τα ΦΒ πάρκα.

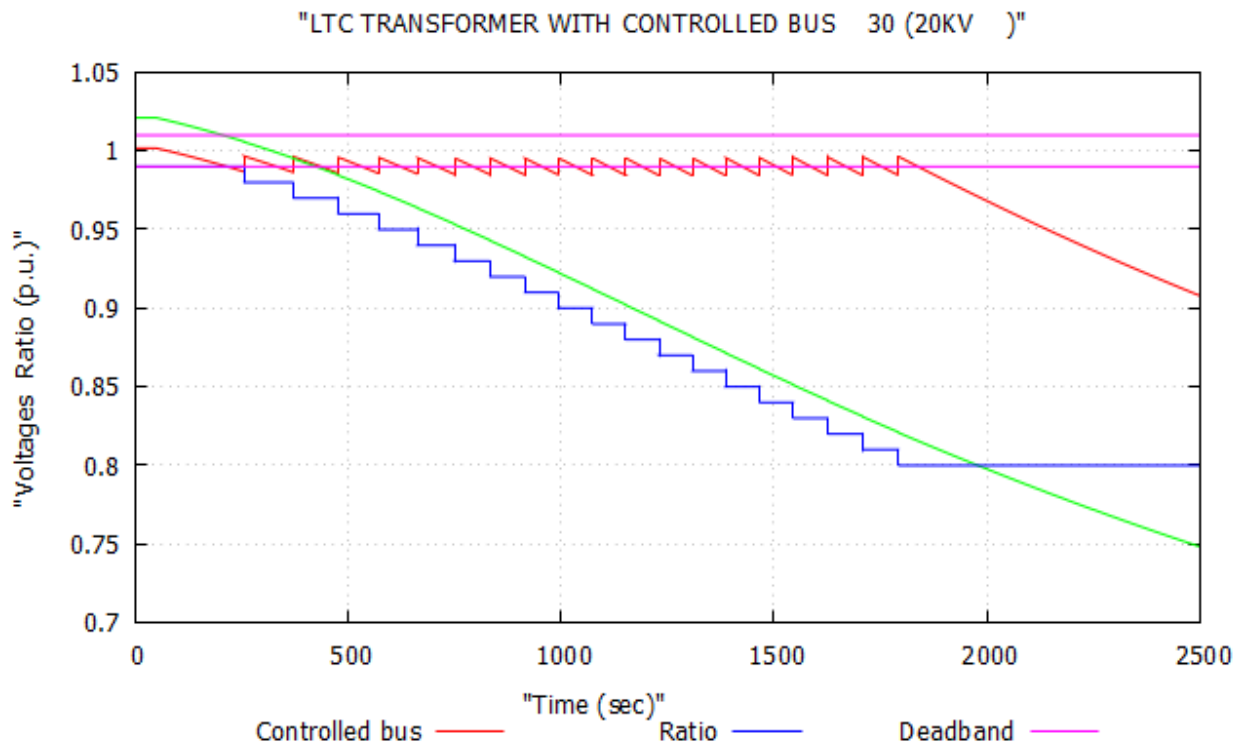
### 5.2.1 Προσομοίωση 1 - ΣΗΕ Χωρίς ΦΒ παραγωγή

Στην **προσομοίωση 1** οι ζυγοί 4, 10, 16, 22 και 25 θεωρούνται ζυγοί φορτίου (P-Q) μηδενικού φορτίου. Ο πίνακας 5.6 εμφανίζει τις αλλαγές στους ζυγούς αυτούς σε σχέση με τον πίνακα 5.4 που εκφράζει τα στοιχεία των ζυγών για τις **προσομοιώσεις 2 και 3**. Η **προσομοίωση 1** είναι απαραίτητη ως μέτρο σύγκρισης της επίδρασης της διεσπαρμένης παραγωγής και των ρυθμίσεων που επιβάλλονται στα ηλεκτρονικά ισχύος.

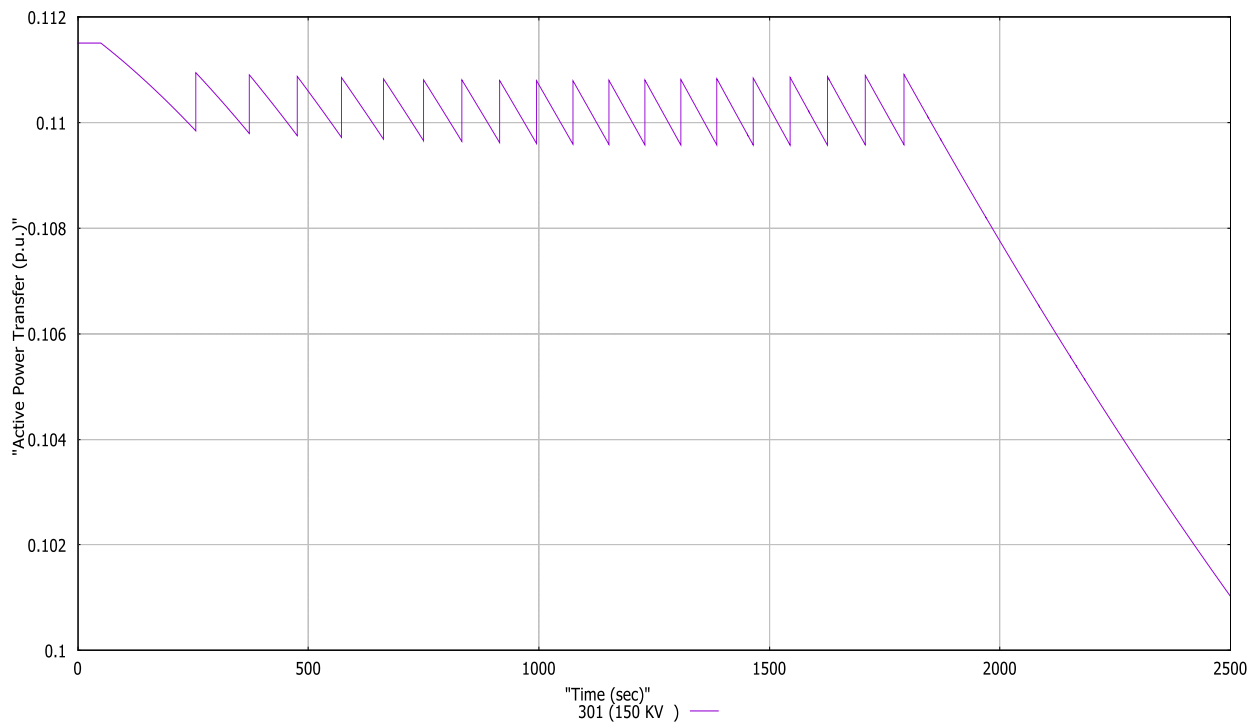
Πίνακας 5. 6 Ζυγοί διεσπαρμένης παραγωγής ως φορτίου

Ζυγός	P [MW]	Q [MVar]
4	0	0
10	0	0
16	0	0
22	0	0
25	0	0

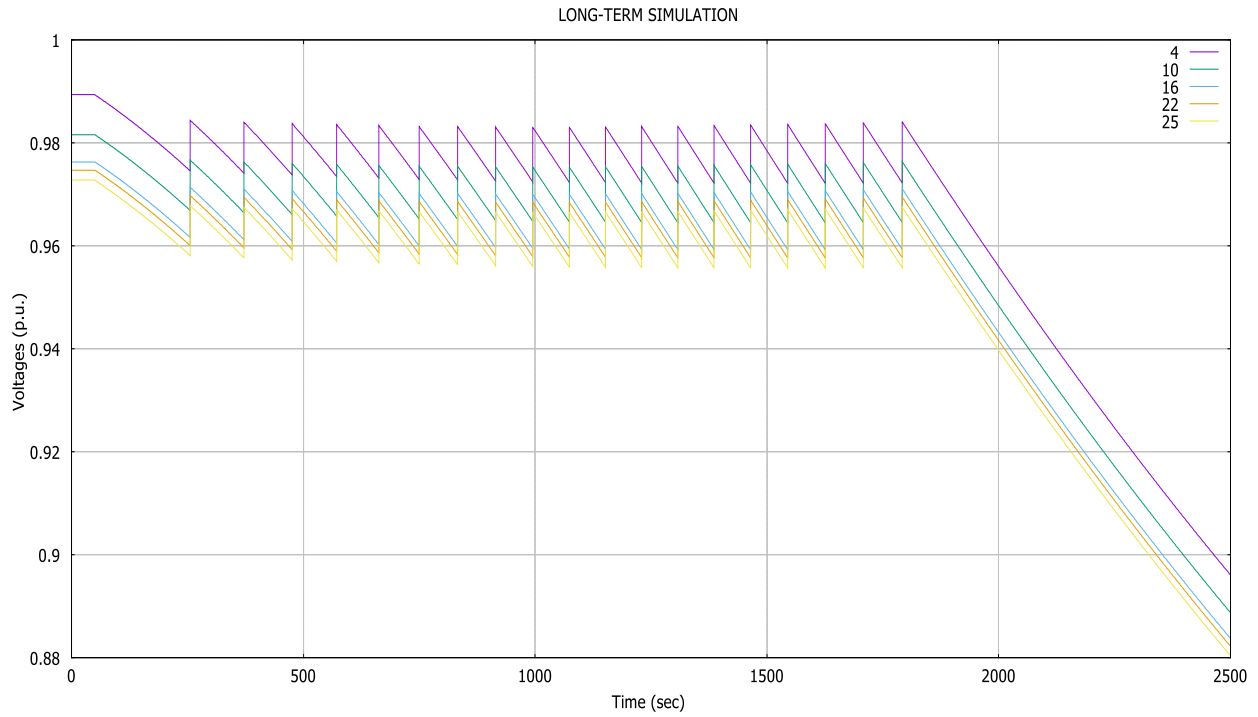
Στα Σχ. 5.4 – 5.8 παρουσιάζονται και στη συνέχεια σχολιάζονται με τη σειρά οι μεταβλητές και η ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή διανομής, οι τάσεις των ζυγών ΦΒ παραγωγής (4, 10, 16, 22, 25) που στην προκειμένη προσομοίωση είναι ζυγοί μηδενικού φορτίου και τέλος η τάση και η χαρακτηριστική καμπύλη Ισχύος – Τάσης P-V του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου (ζυγός 302).



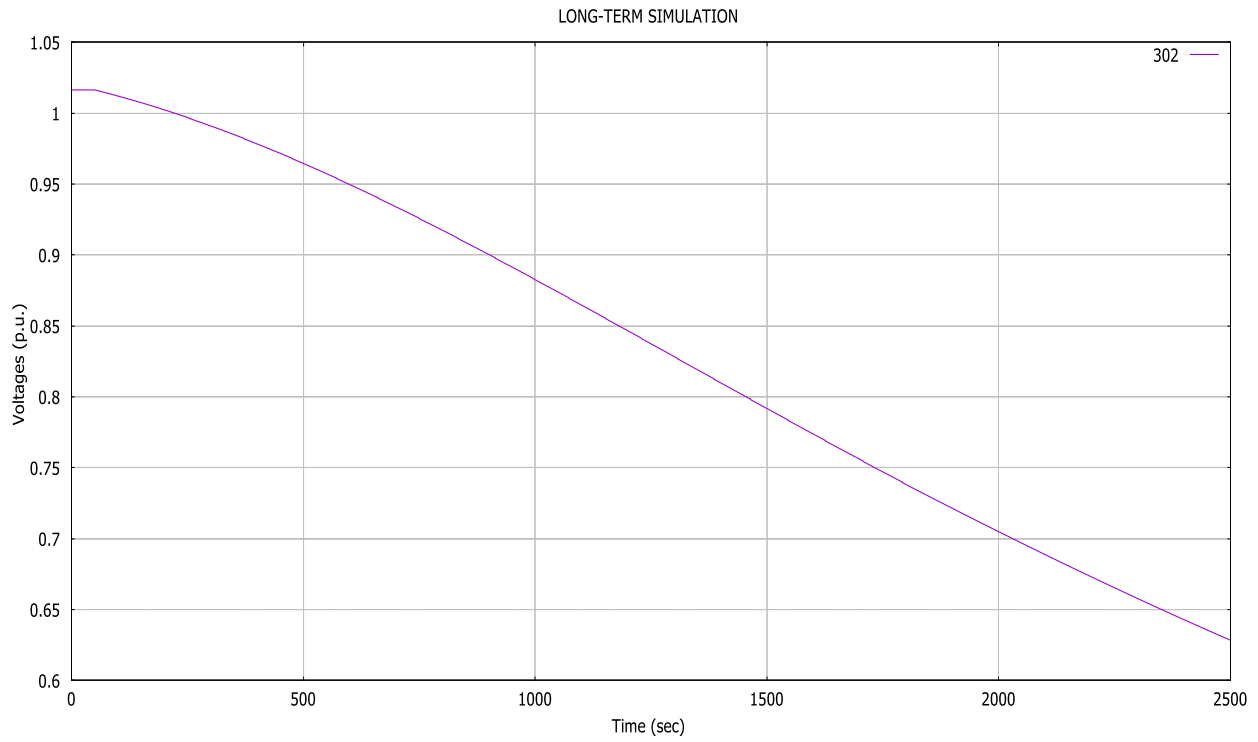
Σχ. 5. 4 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής χωρίς ΦΒ παραγωγή



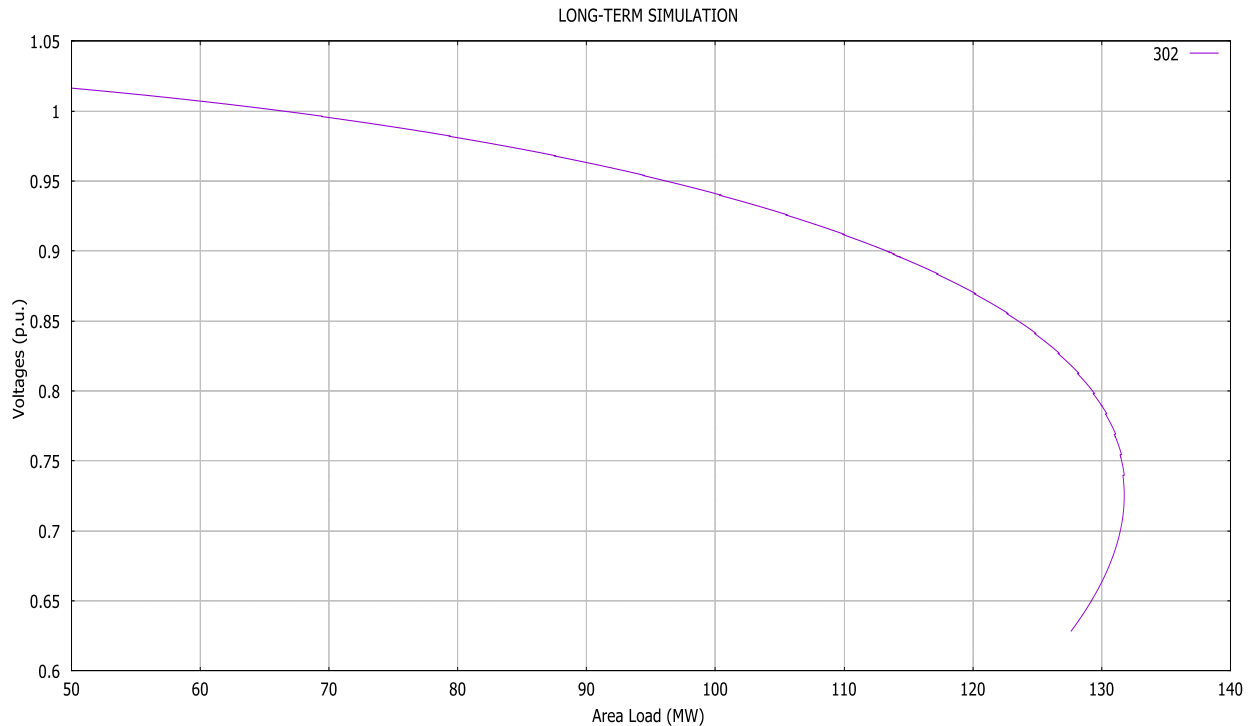
Σχ. 5. 5 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή για μηδενική ΦΒ παραγωγή



Σχ. 5. 6 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής (μηδενικού φορτίου για τη συγκεκριμένη προσομοίωση) χωρίς ΦΒ παραγωγή



Σχ. 5. 7 Τάση ζυγού 302 χωρίς ΦΒ παραγωγή.



Σχ. 5. 8 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 χωρίς ΦΒ παραγωγή

Στο Σχ. 5.4 παρουσιάζονται οι μεταβλητές του Μ/Σ διανομής, όπως αναφέρθηκαν στο 5.1.2. Δεδομένου ότι η μεταβολή της λήψης γίνεται στο πρωτεύον ( $r:1$ ), σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην ενότητα 1.8.1, ο λόγος μετασχηματισμού  $r$  μειώνεται καθώς κατά τη διαταραχή η αγωγιμότητα αυξάνει με αποτέλεσμα να αυξάνει και η πτώση τάσης. Συνεπώς, για τη διατήρηση του επιπέδου τάσης εντός της νεκρής ζώνης (deadband) προκύπτει μείωση του λόγου  $r$ . Η αρχική λήψη του μετασχηματιστή είναι  $r_0 = 0.99$  αμ. Όσο ο λόγος μετασχηματισμού παραμένει μεγαλύτερος της ελάχιστης τιμής, διατηρεί τα επίπεδα τάσης εντός της νεκρής ζώνης, με τη λειτουργία του να τερματίζει όταν  $r = 0.8$  αμ. Στο σημείο εκείνο, η ελεγχόμενη τάση αρχίζει να παρουσιάζει πτώση επηρεάζοντας ανάλογα και το υπόλοιπο σύστημα.

Στο Σχ. 5.5 παρουσιάζεται η ροή ενεργού ισχύος από τον μετασχηματιστή προς τη γραμμή διανομής. Η ισχύς είναι θετική που σημαίνει ροή από την ΥΤ στη ΜΤ. Με την εμφάνιση της διαταραχής αύξησης φορτίου και τις πτώσεις τάσεων που την ακολουθούν, η ισχύς μειώνεται σχεδόν γραμμικά. Όταν οι τάσεις πέσουν κάτω από το ελάχιστο προκαθορισμένο επίπεδο, ενεργοποιείται η λειτουργία ΣΑΤΥΦ που διατηρεί τις τάσεις εντός της νεκρής ζώνης. Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι φανερή στο τμήμα όπου η ισχύς αυξάνεται και μειώνεται παρουσιάζοντας σταθερή μέση τιμή. Όταν το ΣΑΤΥΦ τερματίσει, η ισχύς παρουσιάζει αναμενόμενη πτώση λόγω των αντίστοιχων πτώσεων τάσης που προκαλούν μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος των φορτίων. Μια πληροφορία που εξάγεται από το Σχ. 5.5 είναι η καταναλισκόμενη ισχύς των φορτίων του συστήματος διανομής. Δεδομένου ότι η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μηδενική στη συγκεκριμένη προσομοίωση, όλη η ισχύς που απαιτείται από τα φορτία παρέχεται από το δίκτυο μεταφοράς ΥΤ, η οποία πριν τη διαταραχή έχει περίπου την τιμή

11.2 MW (0.112 αμ), που ταυτίζεται με το άθροισμα της ζητούμενης ισχύος του Πιν. 5.4 όπως είναι αναμενόμενο.

Στο Σχ. 5.6 παρατηρείται ότι κατά την έναρξη της διαταραχής οι τάσεις των ζυγών διανομής αρχίζουν να παρουσιάζουν ομαλή πτώση. Καθώς οι τάσεις βρίσκονται εντός ορίων, το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται αργότερα, όπως φαίνεται από τα Σχ. 5.4 και 5.5, και προσπαθεί να διατηρήσει τη τάση του δευτερεύοντος άνω του ελάχιστου ορίου. Η ρύθμιση τάσης έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη αποκατάσταση των επιπέδων τάσης σε όλους τους ζυγούς φορτίου της γραμμής διανομής. Αυτό επιτυγχάνεται στο χρονικό διάστημα όπου ο λόγος μετασχηματισμού παραμένει εντός ορίων. Στη συνέχεια συναντάται το όριο λόγου  $M/\Sigma$   $r_{min}$  με αποτέλεσμα το ΣΑΤΥΦ να τερματίζει τη λειτουργία του επιτρέποντας ανεξέλεγκτες πτώσεις τάσεων. Από το Σχ. 5.6 παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η απόσταση από τον ζυγό 30, τόσο χαμηλότερα είναι τα επίπεδα της τάσης στους πιο απομακρυσμένους ζυγούς, κάτι που μπορεί να δημιουργεί προβλήματα.

Σημειώνεται ότι το Σχ. 5.7 που παριστάνει τη σταθερή πτώση τάσης του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου (ζυγός 302) παρουσιάζεται ενδεικτικά καθώς μέσω αυτού φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος  $t_c$  σύμφωνα με τη κρίσιμη τάση  $V_c$  που προκύπτει από τη P-V χαρακτηριστική της προσομοίωσης, που έχει σχεδιαστεί στο Σχ. 5.8 και προσφέρει όπως προαναφέρθηκε τον έμμεσο τρόπο με τον οποίο εξάγεται η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς προς τον ζυγό του φορτίου και άρα το όριο ευστάθειας τάσεως. Στις επόμενες προσομοιώσεις παρουσιάζεται απευθείας ο κρίσιμος χρόνος  $t_c$ .

Στο Σχ. 5.8 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη Ισχύος – Τάσης (P-V) του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου, η οποία αναλύθηκε στην ενότητα 1.5.3. Από την καμπύλη εξάγεται η MMI και η κρίσιμη τάση  $V_c$  στην οποία εμφανίζεται.

Οι κρίσιμες τιμές για MMI για τη **προσομοίωση 1** παρουσιάζονται στον Πιν. 5.7, όπως αυτές εξηγήθηκαν στην εισαγωγή της ενότητας 5.2.

Πίνακας 5. 7 Κρίσιμες τιμές MMI **προσομοίωσης 1** (χωρίς ΦΒ παραγωγή)

$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)
0.739	0.99	0.81	1792	131.755

Από τον πίνακα 5.7 παρατηρείται ότι ο κρίσιμος λόγος μετασχηματισμού  $r_c$  είναι οριακά μεγαλύτερος από τον ελάχιστο λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ  $r_{min}$ , το οποίο σημαίνει ότι το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος παρουσιάζεται κατά τον τερματισμό της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ. Το γεγονός αυτό εκφράζεται και από το ότι ο χρόνος  $t_c$  είναι σχεδόν ίσος με τον χρόνο όπου τερματίζει το ΣΑΤΥΦ σύμφωνα με το Σχ. 5.4.

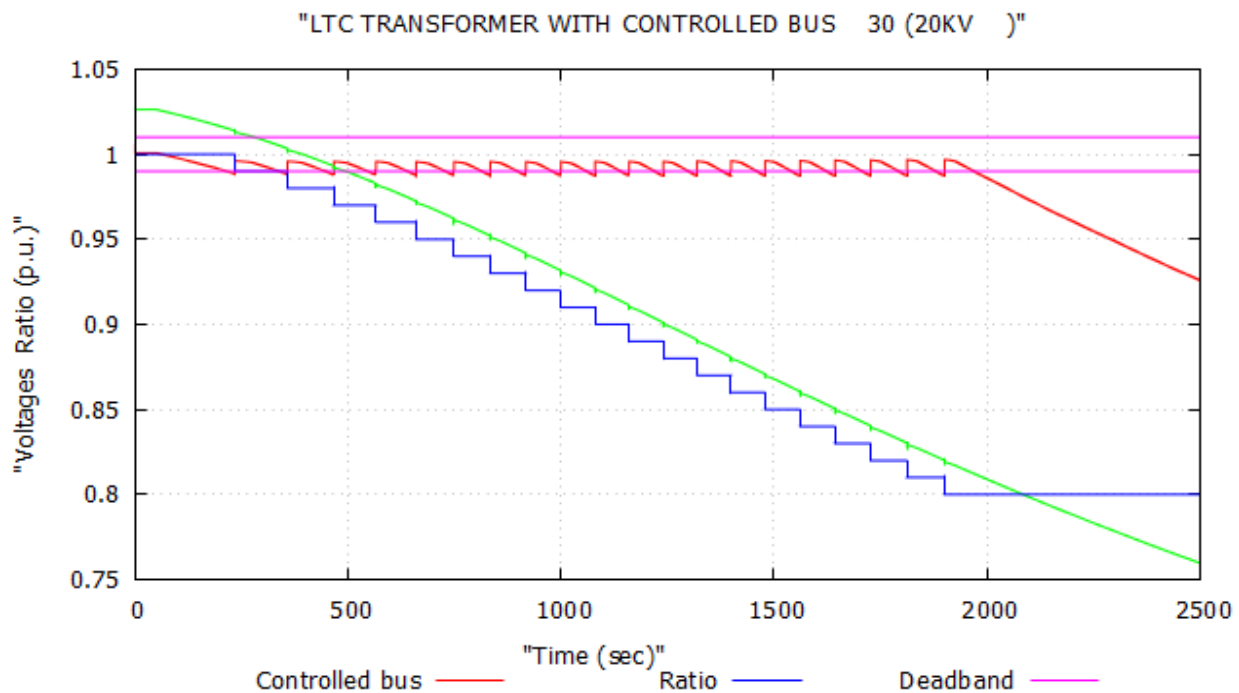
Επιπρόσθετα η κρίσιμη τάση είναι συγκριτικά μικρότερη της αρχικοποιημένης τάσης μόνιμης λειτουργίας (1 αμ), με αποτέλεσμα το ΣΗΕ να μη βρίσκεται κοντά στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος κατά τη συνήθη λειτουργία του. Τα αποτελέσματα του Πιν. 5.7 θα χρησιμοποιηθούν ως μέτρο σύγκρισης για τις **προσομοιώσεις 2** και **3** στην τελική ενότητα του Κεφαλαίου, 5.5.

## 5.2.2 Προσομοίωση 2 - ΦΒ παραγωγή με ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος

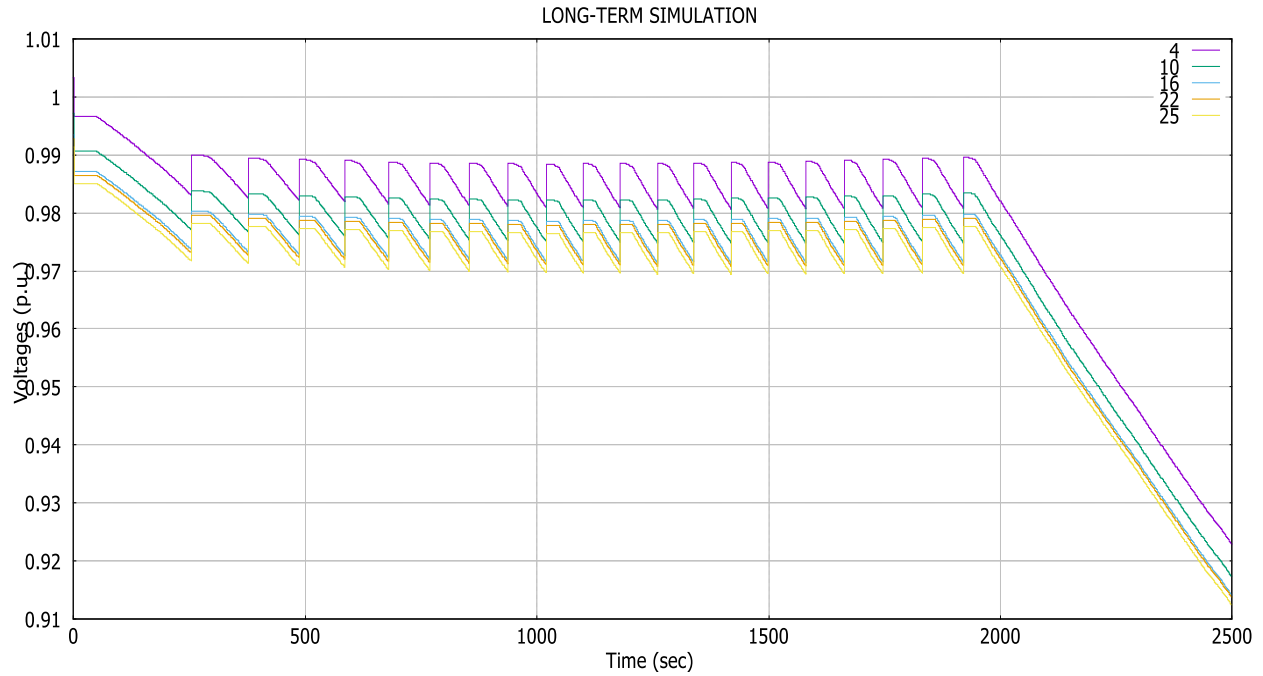
Στην **προσομοίωση 2** εξετάζεται το σύστημα με ενταγμένη ΦΒ παραγωγή με ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος στους μετατροπείς, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.8.2. Η προσομοίωση πραγματοποιείται για δύο σταθερά επίπεδα παραγωγής (50% και 90% της ονομαστικής παραγωγής) και για μεταβαλλόμενη παραγωγή μέσω χρονοσειράς ισχύος βασισμένη σε πραγματικά στοιχεία. Όπως αναφέρθηκε, για τη συγκεκριμένη οικογένεια προσομοιώσεων δεν εμφανίζεται η άεργος παραγωγή καθώς λόγω της ρύθμισης του μοναδιαίου συντελεστή ισχύος είναι μηδενική. Σημειώνεται ότι για επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας της ρύθμισης των μετατροπέων έχει ελεγχθεί η άεργος παραγωγή των ΦΒ μονάδων.

### 5.2.2.1 Προσομοίωση 2.1 - 50% φωτοβολταϊκή παραγωγή

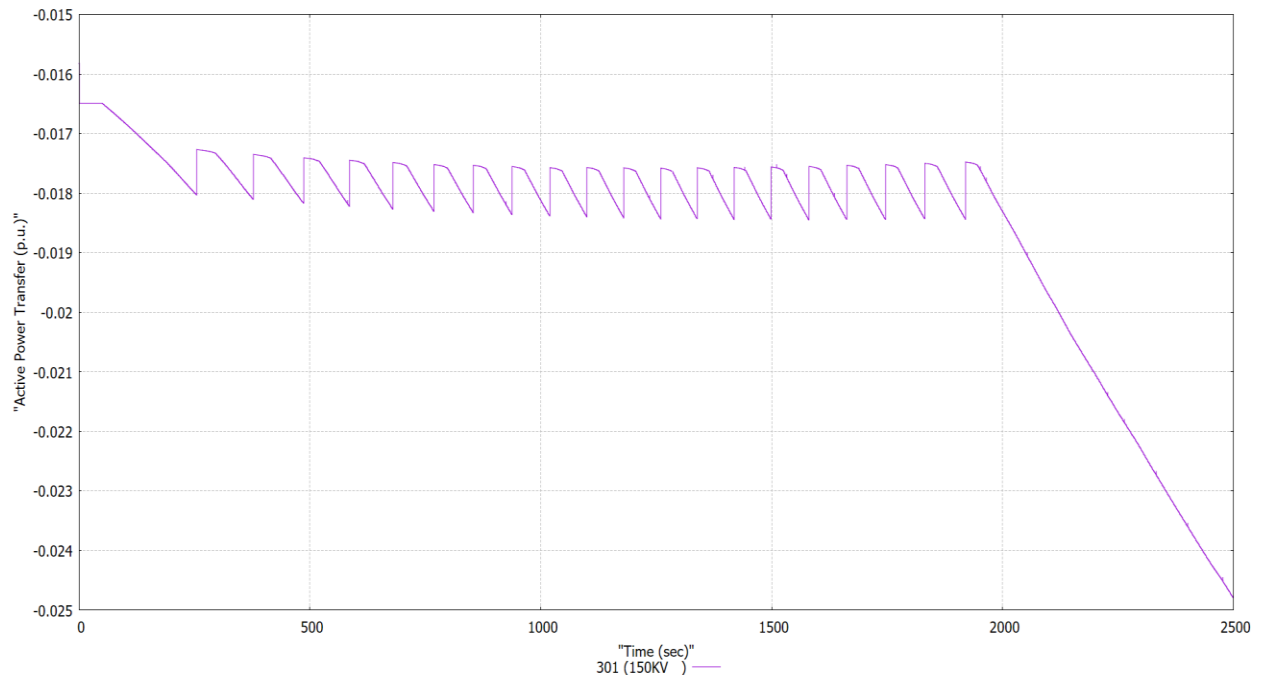
Αρχικά προσομοιώνεται το σύστημα για σταθερή φωτοβολταϊκή παραγωγή που ισούται με τη μισή ονομαστική του κάθε πάρκου σύμφωνα με τον πίνακα 5.5 (**προσομοίωση 2.1**). Στα επόμενα Σχήματα 5.9, 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται οι μεταβλητές του μετασχηματιστή, οι τάσεις των ζυγών φωτοβολταϊκής παραγωγής και η ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή, ενώ στο Σχ. 5.12 η καμπύλη P-V του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου. Τέλος δίνεται ο πίνακας με τις κρίσιμες μεταβλητές που επεξηγήθηκαν στην εισαγωγή της ενότητας 5.2.



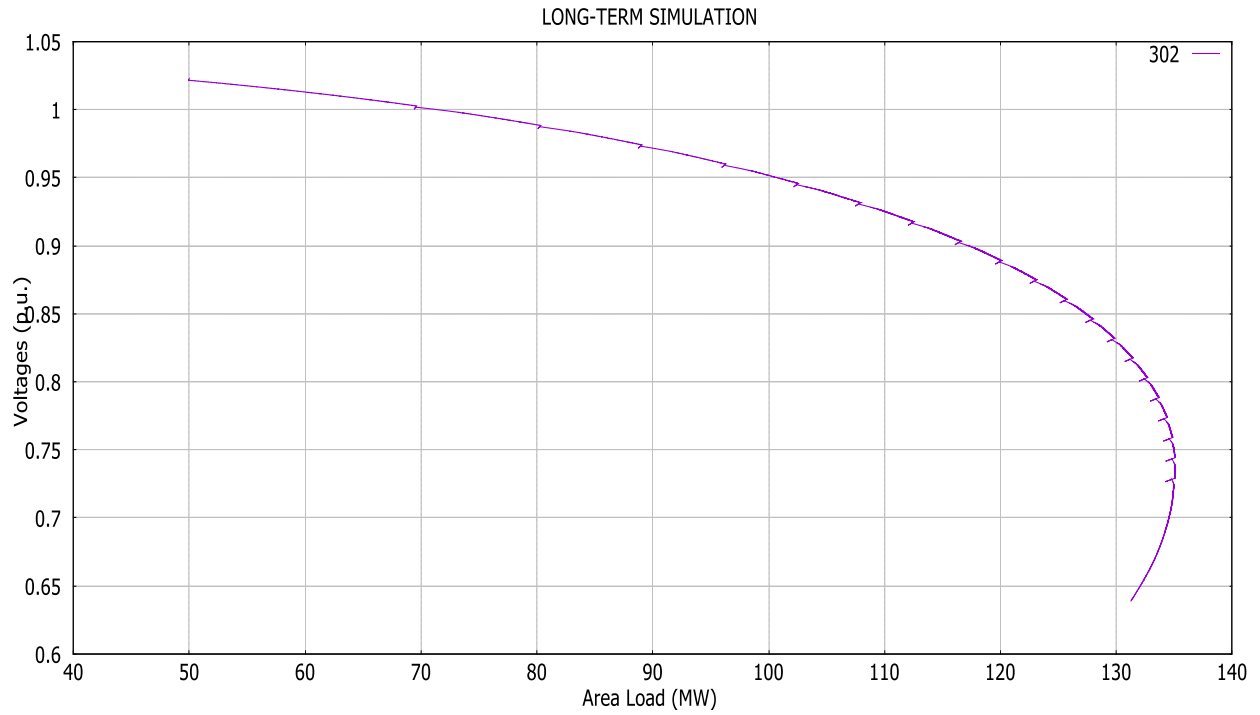
Σχ. 5. 9 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής **προσομοίωσης 2.1** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή)



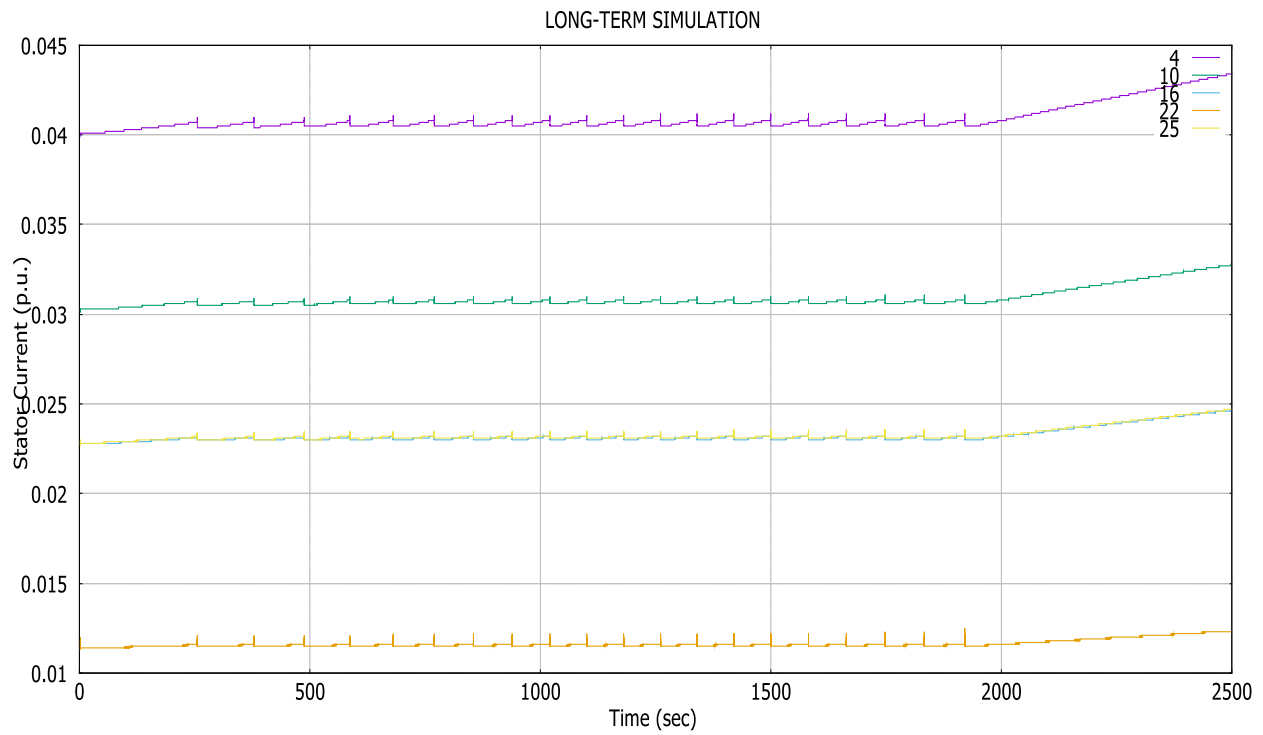
Σχ. 5. 10 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 2.1** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 11 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή **προσομοίωσης 2.1** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 12 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 **προσομοίωσης 2.1** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 13 Ρεύματα Δ.Π. από ΦΒ **προσομοίωσης 2.1** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή)



Με την ένταξη της ΦΒ παραγωγής, το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με αρχική λήψη  $r_0 = 1$  όπως φαίνεται στο Σχ. 5.9. Αυτό επιφέρει κάποιες αλλαγές στα αρχικά επίπεδα της τάσης του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, αλλά ταυτόχρονα δίνει το περιθώριο περισσότερων βημάτων πτώσης του λόγου μετασχηματισμού, με αποτέλεσμα να μπορεί να διατηρεί τη τάση διανομής εντός της νεκρής ζώνης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Τα επίπεδα τάσης των απομακρυσμένων ζυγών ΦΒ παραγωγής του Σχ. 5.10 (ζυγοί 16, 22, 25) είναι υψηλότερα σε σχέση με τη **προσομοίωση 1**, με ανάλογο αντίκτυπο στα επίπεδα τάσης του συστήματος διανομής ΜΤ. Το γεγονός αυτό εξηγεί και την αύξηση της αρχικής λήψης του ΣΑΤΥΦ, καθώς με μικρότερη αρχική λήψη η τάση του ελεγχόμενου ζυγού ΜΤ θα ήταν υψηλότερη, και πιο κοντά στα όρια της νεκρής ζώνης. Καθώς η διαφορά των επιπέδων τάσης δεν είναι μεγάλη, η αρχική λήψη αλλάζει κατά ένα βήμα.

Στο Σχ. 5.11 η ροή ισχύος στον μετασχηματιστή είναι αρνητική, δηλαδή από τη ΜΤ προς την ΥΤ. Από τον Πίν. 5.5 προκύπτει ότι η μέγιστη ισχύς που δύναται να παράγουν τα πέντε ΦΒ πάρκα είναι 25.25 MW. Στη συγκεκριμένη **προσομοίωση 2.1** η παραγωγή ισχύος τίθεται στο 50%, δηλαδή 12.625 MW που ξεπερνάει την ζήτηση των φορτίων που όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 5.2.1 της **προσομοίωσης 1** ισούται περίπου με 11.2 MW, με αποτέλεσμα την αντίστροφη ροή ισχύος. Η ροή αυξάνει με την εμφάνιση της διαταραχής λόγω μείωσης της κατανάλωσης φορτίου στη διανομή. Η διατήρηση της τάσης μέσω του ΣΑΤΥΦ διατηρεί κατ' αντιστοιχία και το επίπεδο ισχύος μέχρι τον τερματισμό του.

Στο Σχ. 5.12 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική P-V του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου που είναι απαραίτητη για την εξαγωγή κρίσιμων στοιχείων ΜΜΙ του Πίν. 5.8. Συγκριτικά με την αντίστοιχη καμπύλη της **προσομοίωσης 1** φαίνεται η αύξηση τόσο της ΜΜΙ όσο και της κρίσιμης τάσης  $V_c$ .

Τέλος, εμφανίζεται η συμπεριφορά των ρευμάτων της ΦΒ παραγωγής στο Σχ. 5.13. Παρατηρείται από τις κυματώσεις ότι για τη μεγαλύτερη διάρκεια της διαταραχής οι τιμές του ρεύματος διατηρούνται σχεδόν σταθερές γιατί προκύπτουν από σταθερή ισχύ και σχεδόν σταθερή τάση. Μετά τον τερματισμό του ΣΑΤΥΦ οι τάσεις πέφτουν με σταθερό ρυθμό και αντίστοιχα αυξάνουν τα ρεύματα χωρίς όμως να πλησιάζουν το επιτρεπόμενο όριο.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ο Πίν. 5.8 με τα κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ.

Πίνακας 5. 8 Κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ **προσομοίωσης 2.1** (ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή

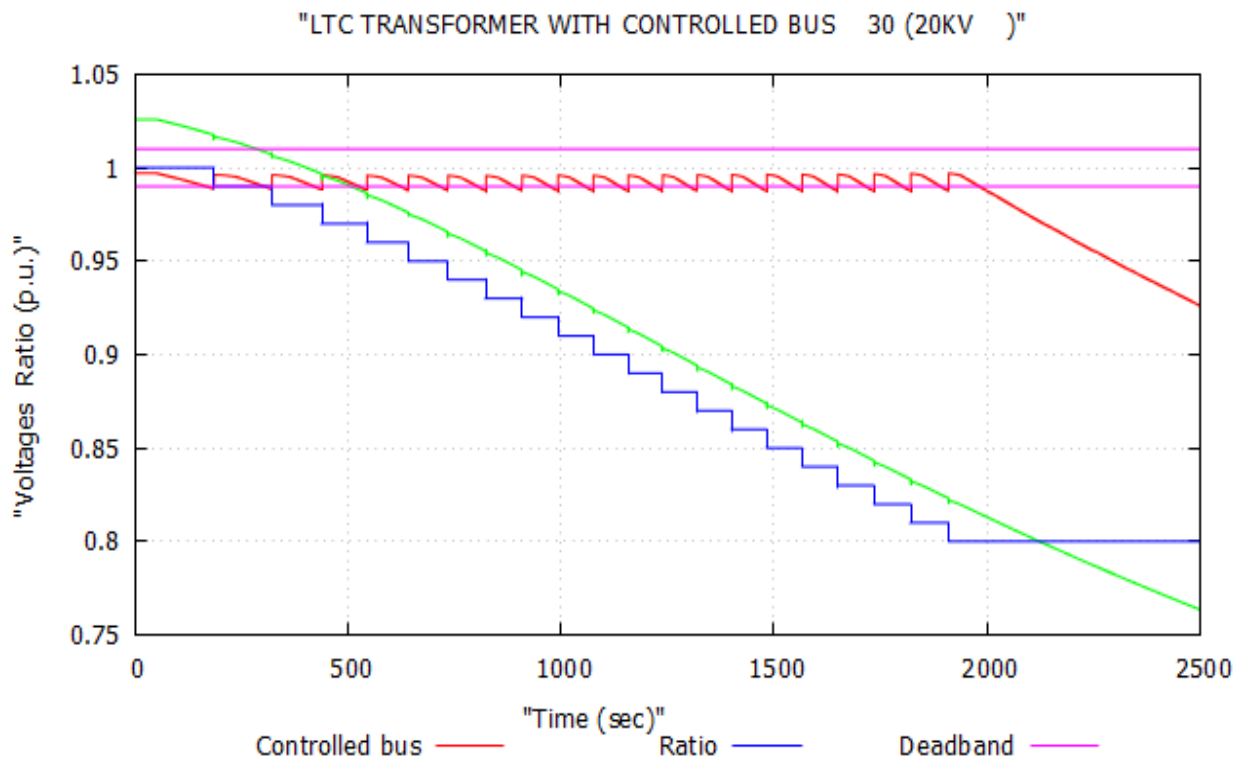
$V_c$ (αμ)	$r_0$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%) σε σχέση με <b>προσομοίωση 1</b>
0.744	1.00	0.82	1832	135.086	13.192

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίν. 5.8, η ΜΜΙ εμφανίζεται εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ καθώς ο λόγος μετασχηματισμού  $r_c$  είναι υψηλότερος του ελαχίστου  $r_{min}$ . Η διεσπαρμένη ΦΒ παραγωγή λόγω της έγχυσης ισχύος καλύπτει τη ζήτηση και ανεβάζει τα επίπεδα τάσης σε σχέση με την **προσομοίωση 1**, επιτρέποντας έτσι υψηλότερη αρχικοποίηση του λόγου μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ και ταυτόχρονα την εμφάνιση της κρίσιμης τάσης  $V_c$  σε υψηλότερο επίπεδο.

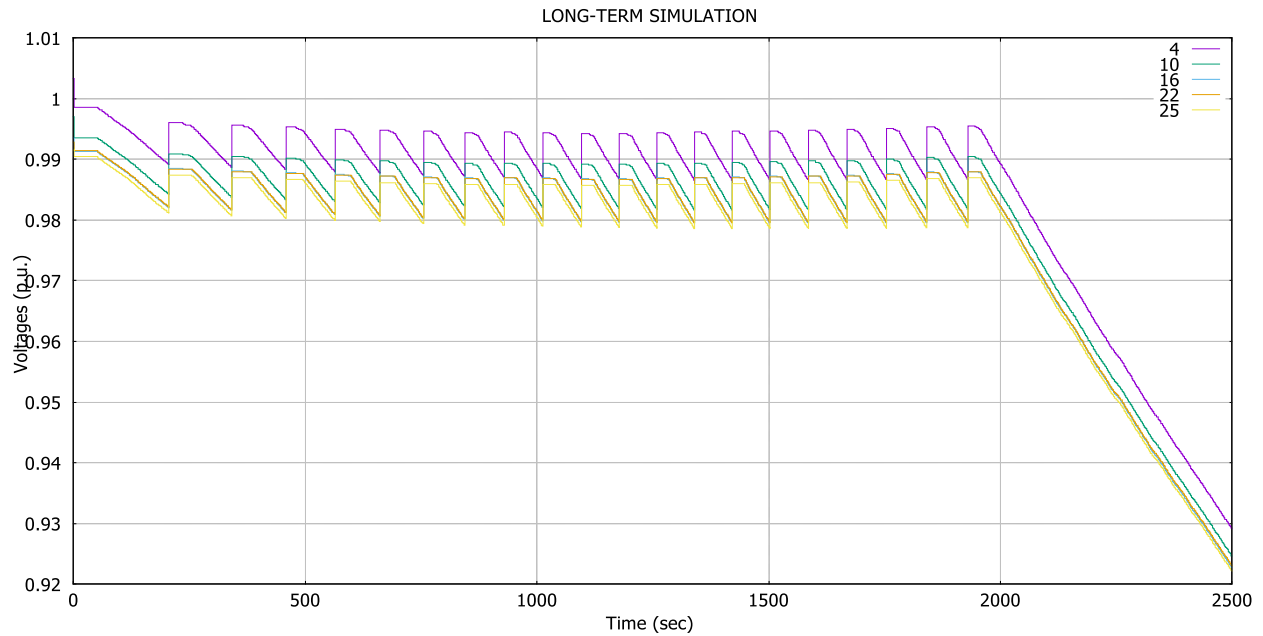
Επιπρόσθετα παρατηρείται αναμενόμενη αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ενεργού ισχύος ( $P_{max}$ ) σε σχέση με τη **προσομοίωση 1** κατά **3.863 MW** (13.192%) λόγω της ΦΒ παραγωγής, καθώς με την έγχυση ενεργού ισχύος καλύπτουν τη ζήτηση των φορτίων.

### 5.2.2.2 Προσομοίωση 2.2 - 90% Φωτοβολταϊκή Παραγωγή

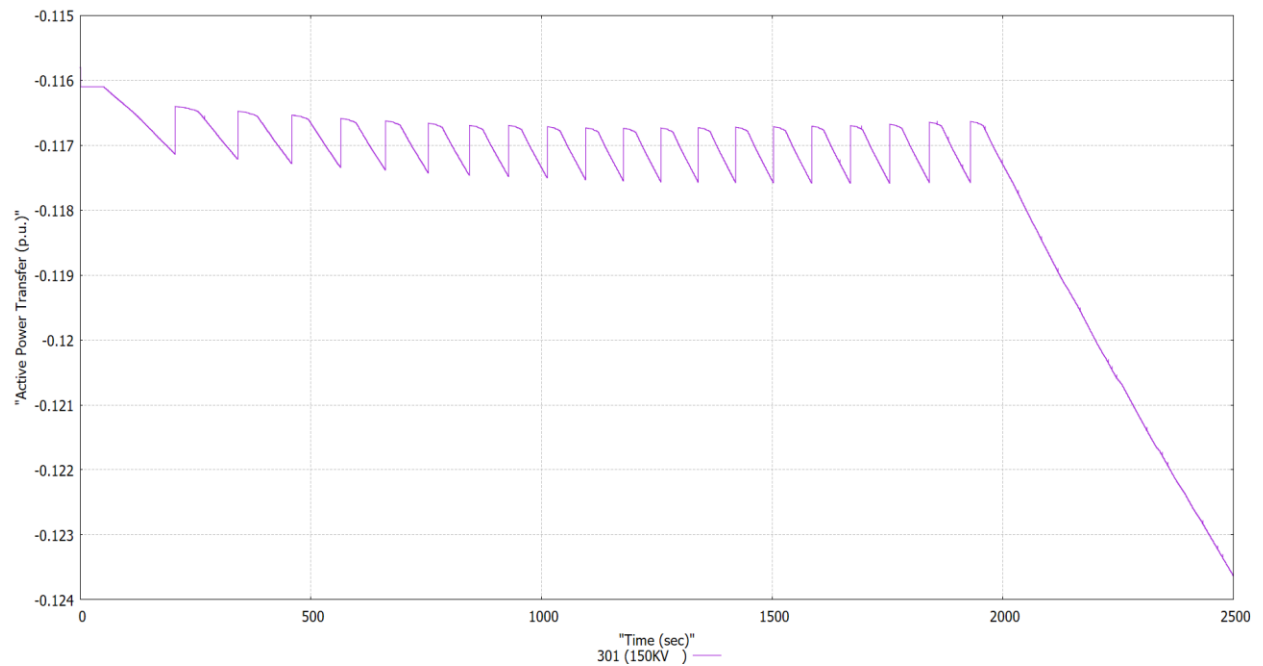
Στη συνέχεια προσομοιώνεται το σύστημα για σταθερή φωτοβολταϊκή παραγωγή που ισούται με το 90% της ονομαστικής παραγωγής του κάθε πάρκου σύμφωνα με τον πίνακα 5.5 (**προσομοίωση 2.2**). Στα Σχ. 5.14 - 5.18 παρουσιάζονται όμοια με την **προσομοίωση 2.1** οι μεταβλητές του μετασχηματιστή, οι τάσεις των ζυγών φωτοβολταϊκής παραγωγής, η ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή και η καμπύλη P-V του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου. Οι μορφές των παρακάτω σχημάτων δεν διαφέρουν από αυτές της **προσομοίωσης 2.1**. Ο σχολιασμός επικεντρώνεται στις διαφορές μεταξύ τους.



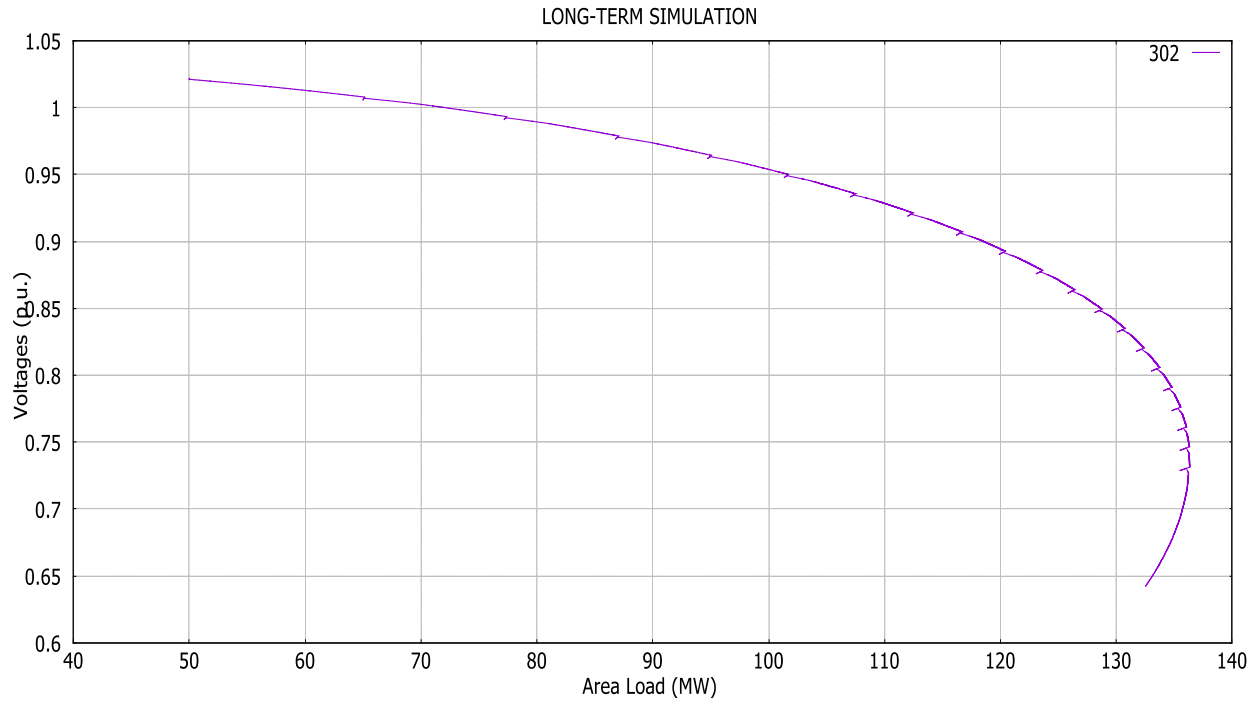
Σχ. 5. 14 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής **προσομοίωσης 2.2** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή)



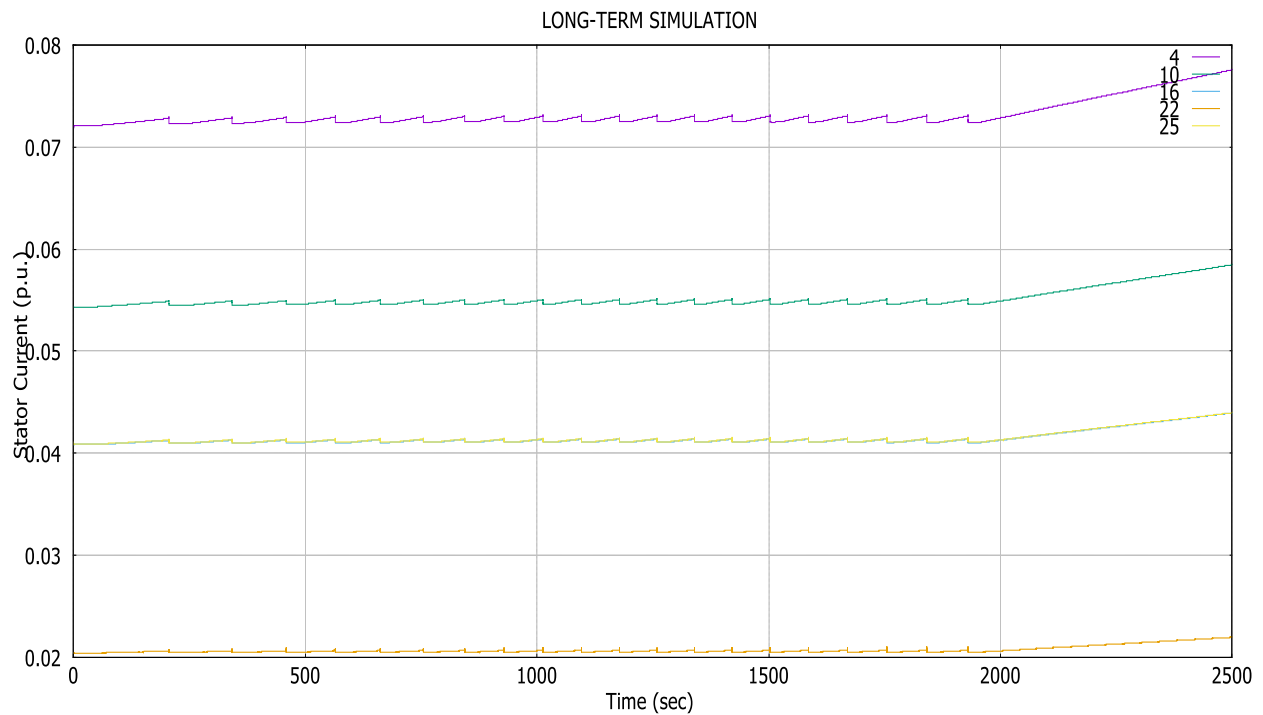
Σχ. 5. 15 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 2.2** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 16 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή **προσομοίωσης 2.2** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 17 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 **προσομοίωσης 2.2** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 18 Ρεύματα ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 2.2** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή)

Σύμφωνα με το Σχ. 5.14, το ΣΑΤΥΦ παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με την **προσομοίωση 2.1** καθώς εκκινεί με ίσια αρχική λήψη ( $r_o = 1$ ) και λειτουργεί για περίπου ίδια χρονική διάρκεια.

Στο Σχ. 5.15 παρατηρείται ότι με την αύξηση της ενεργού παραγωγής ανεβαίνουν και τα επίπεδα τάσης κυρίως των απομακρυσμένων ΦΒ ζυγών, τα οποία διατηρούνται κατά τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ.

Έντονη διαφορά εμφανίζεται στα επίπεδα αντίστροφης ισχύος συγκριτικά με την **προσομοίωση 2.1**. Το 90% της ΦΒ παραγωγής αντιστοιχεί σε 22.725 MW που καλύπτει τη ζήτηση των φορτίων των 11.2 MW. Στην **προσομοίωση 2.1** η κάλυψη της ζήτησης ήταν οριακά μεγαλύτερη με αποτέλεσμα την σχεδόν μηδενική ροή ισχύος. Στη περίπτωση της παρούσας προσομοίωσης η υπερκάλυψη της ζήτησης έχει ως αποτέλεσμα σημαντική αντίστροφη ροή ισχύος από τη ΜΤ στην ΥΤ η οποία βρίσκεται στα -11.6 MW πριν την έναρξη της διαταραχής. Η συμπεριφορά της δεν αλλάζει κατά τη διαταραχή, και ακολουθεί τις διακυμάνσεις της τάσης δεδομένου ότι τα ρεύματα του Σχ. 5.18 παραμένουν σταθερά δίχως να ενεργοποιούνται οι περιοριστές.

Με βάση τα Σχ. 5.14 – 5.16 και σε συνδυασμό με τη χαρακτηριστική P-V του Σχ. 5.17 προκύπτουν τα κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ του Πιν. 5.9.

Πίνακας 5. 9 Κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ **προσομοίωσης 2.2** (ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος για 90% ΦΒ παραγωγή)

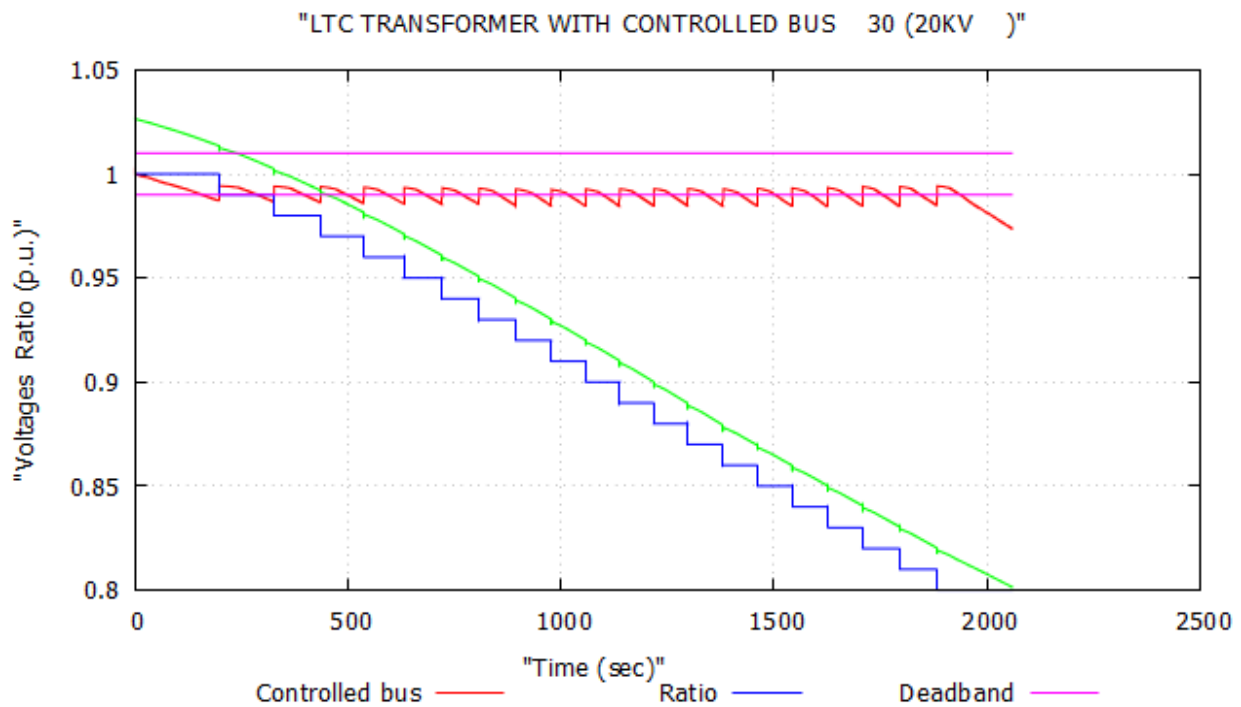
$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%) σε σχέση με <b>προσομοίωση 1</b>
0.732	1.00	0.81	1929	136.335	18.139

Συγκριτικά με τη **προσομοίωση 1** (δίχως ΦΒ παραγωγή) σημαντική είναι η αύξηση της ΜΜΙ κατά **5.112 MW** (20.246%) αλλά και η χρονική καθυστέρηση της εμφάνισής της. Επίσης ο κρίσιμος λόγος μετασηματισμού  $r_c$  είναι ίδιος με την **προσομοίωση 1** και κοντά στον ελάχιστο επιτρεπτό, με σημαντική διαφορά το γεγονός ότι το ΣΑΤΥΦ παραμένει σε λειτουργία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Τέλος, σημειώνεται μείωση της κρίσιμης τάσης  $V_c$ . Το γεγονός ότι η  $V_c$  είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της **προσομοίωσης 1**, όπως και της **προσομοίωσης 2.1** συναρτάται με το γεγονός ότι ο χρόνος μέχρι την επίτευξη μέγιστης μεταφοράς ισχύος  $t_c$  είναι μεγαλύτερος.

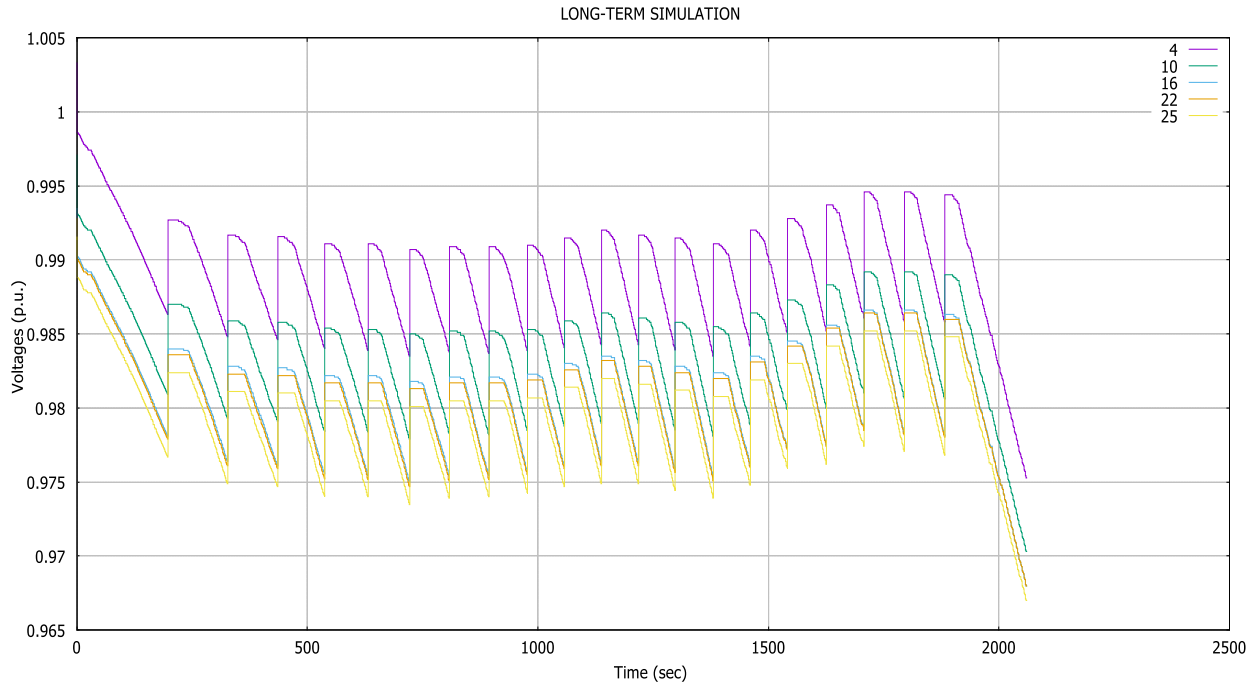
Συγκριτικά με την **προσομοίωση 2.1** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για 50% ΦΒ παραγωγή) το σύστημα παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά. Αξιοσημείωτες διαφορές αποτελούν η αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος κατά **1.249 MW** και η μείωση της κρίσιμης τάσης του φορτίου  $V_c$ . Η αύξηση της ισχύος είναι σχετικά μικρή και είναι αποτέλεσμα της αύξησης της ενεργού παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο σταθερός συντελεστής ισχύος δεν επιτρέπει την παραγωγή αέργου ισχύος από τους μετατροπείς των ΦΒ. Παρά τη μείωση της κρίσιμης τάσης, αυτή εξακολουθεί να εμφανίζεται εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ.

### 5.2.2.3 Προσομοίωση 2.3 – Μεταβλητή Χρονοσειρά ΦΒ Ισχύος

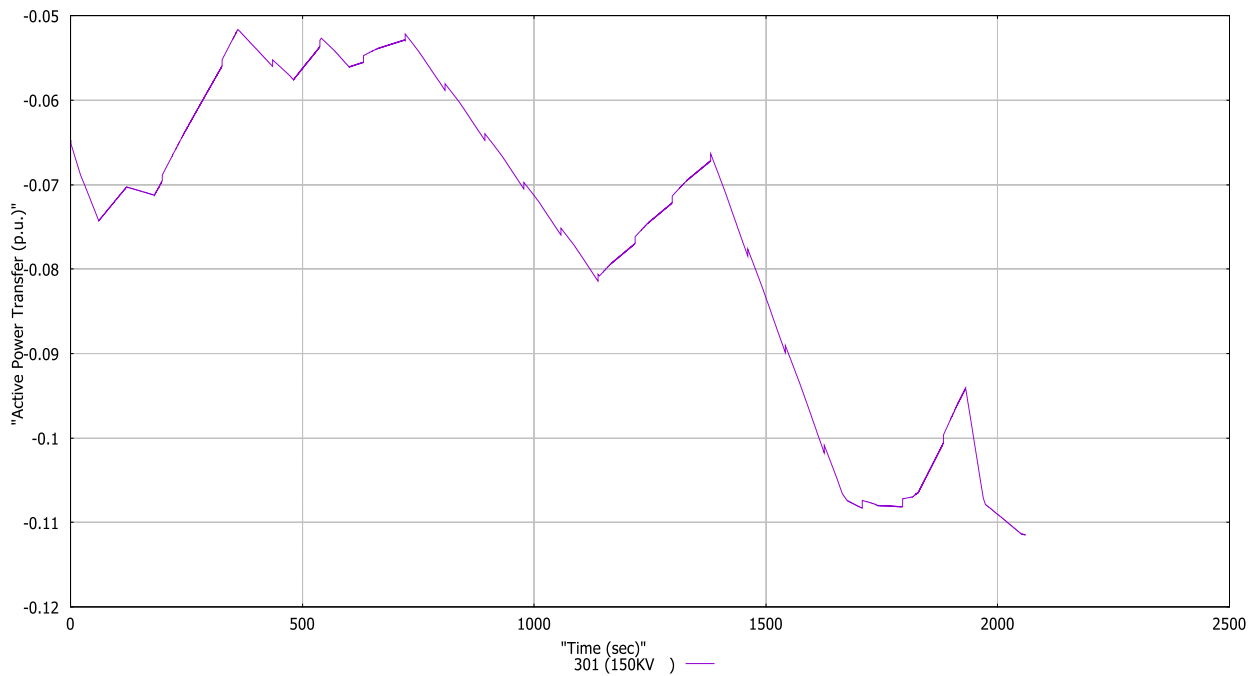
Στη **προσομοίωση 2.3** η ΦΒ παραγωγή αντιστοιχεί στις μεταβλητές χρονοσειρές ΦΒ ισχύος του Σχ. 5.3. Όπως αναφέρθηκε, παρότι η χρονική διάρκεια της μεταβλητής χρονοσειράς είναι 4631 δευτερόλεπτα, στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις 2100s περίπου, λίγο μετά την επίτευξη τη μέγιστης μεταφοράς ισχύος προς το φορτίο. Η διαταραχή είναι η ίδια με τις **προσομοιώσεις 1, 2.1 και 2.2** και διαφέρει μόνο ως προς τη χρονική διάρκεια. Στα Σχ. 5.19-5.23 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις του μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ, των τάσεων της ΦΒ παραγωγής, της ροής ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή, της χαρακτηριστικής P-V του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου και τέλος των ρευμάτων της ΦΒ παραγωγής.



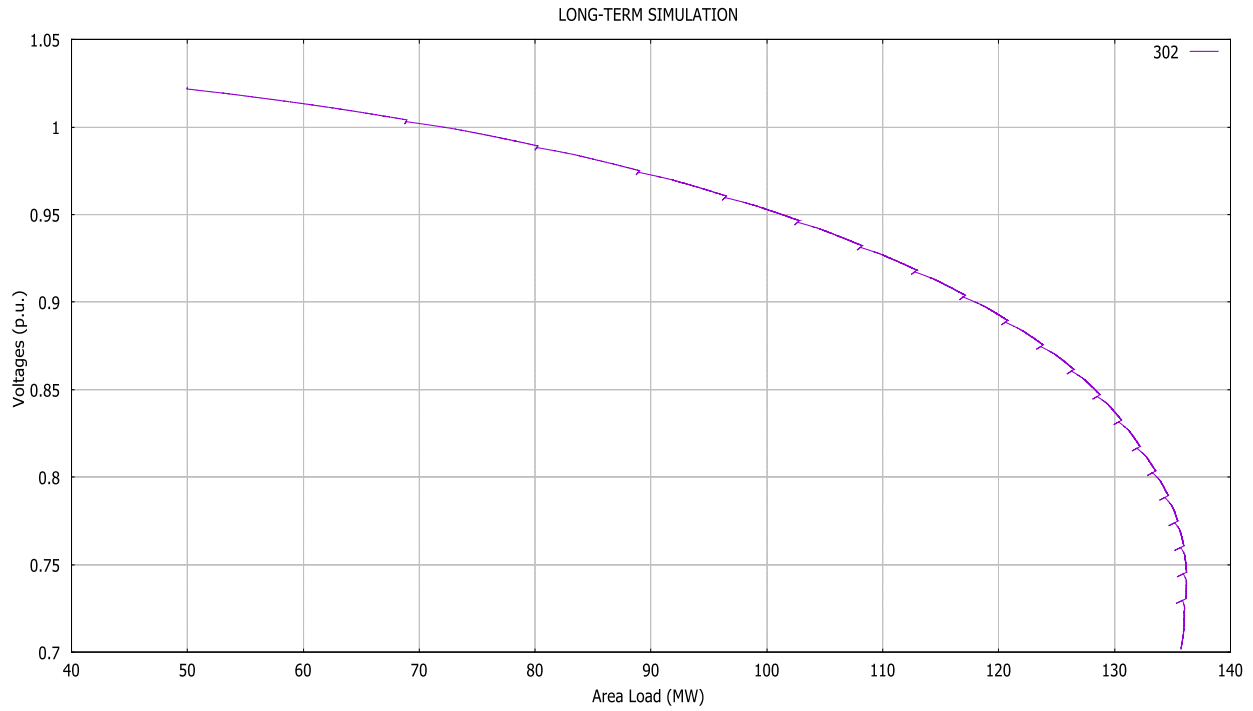
Σχ. 5. 19 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής **προσομοίωσης 2.3** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



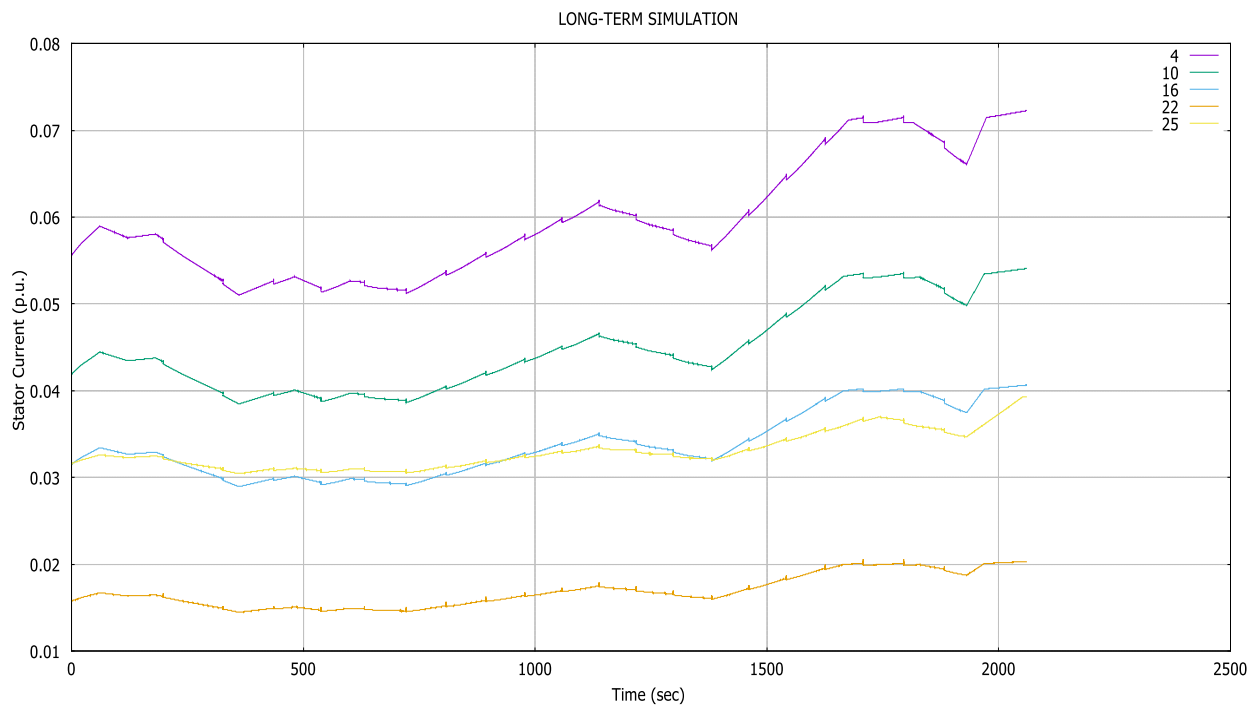
Σχ. 5. 20 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής προσομοίωσης 2.3 (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



Σχ. 5. 21 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή προσομοίωσης 2.3 (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



Σχ. 5. 22 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 **προσομοίωσης 2.3** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



Σχ. 5. 23 Ρεύματα ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 2.3** (ρύθμιση σταθερού συντελεστή ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



Το ΣΑΤΥΦ εκκινεί και πάλι με αρχική λήψη  $r_0 = 1$ . Συγκριτικά με τις **προσομοιώσεις 2.1** και **2.2**, το ΣΗΕ παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά στα προφίλ της τάσης (Σχ. 5.20) κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ. Όπως αναμένεται, η μεγαλύτερη διαφορά εμφανίζεται εξαιτίας της μεταβλητής παραγωγής ενεργού ισχύος, με αποτέλεσμα την διαφορετική μορφή ροής ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή (Σχ. 5.21) και των ρευμάτων της ΦΒ παραγωγής (Σχ. 5.23).

Η ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή του Σχ. 5.22 παρουσιάζει τη πιο έντονη διακύμανση, από  $-5 \text{ W}$  έως  $-11 \text{ W}$  κατά τη διαταραχή. Καθώς η παραγωγή ισχύος είναι μεταβαλλόμενη και η ζήτηση των φορτίων σταθερή, η αρνητική ροή ισχύος αυξάνει όσο αυξάνει και η ΦΒ παραγωγή και το αντίστροφο, όπως εξηγήθηκε στην **προσομοίωση 2.2** στην ενότητα 5.2.2.2. Από το Σχ. 5.2 φαίνεται ότι η ΦΒ ισχύς μεταβάλλεται ανάμεσα στο 55-95% της ονομαστικής για τη χρονική διάρκεια των πρώτων 2100 δευτερολέπτων. Επακόλουθο αυτής της συμπεριφοράς είναι η ροή ισχύος να κυμένεται σε περιοχές ανάμεσα στις ροές των **προσομοιώσεων 2.1** και **2.2**, όπως και συμβαίνει.

Στο Σχ. 5.23 φαίνονται τα ρεύματα των μετατροπέων των ΦΒ ώστε να ελεγχθεί η ενδεχόμενη λειτουργία των περιοριστών ρεύματος με τις μεταβλητές χρονοσειρές ισχύος του Σχ. 5.3. Με τις τάσεις να μη παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις κατά τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, αναμένεται τα ρεύματα για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος να ακολουθούν την ίδια μορφή με τις χρονοσειρές ισχύος. Όπως φαίνεται, τα ρεύματα ποτέ δεν υπερβαίνουν τις ονομαστικές τιμές του Πίνακα 5.5.

Σύμφωνα με τα Σχ. 5.19-5.22, προκύπτουν τα κρίσιμα στοιχεία του Πίνακα 5.10:

Πίνακας 5. 10 Κρίσιμα στοιχεία MMI **προσομοίωσης 2.3** (ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)

$V_c$ (αμ)	$r_0$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%) σε σχέση με <b>προσομοίωση 1</b>
0.746	1.00	0.82	1793	136.262	17.850

Συγκριτικά με την **προσομοίωση 1**, η MMI εμφανίζει αύξηση κατά **4.507 MW** (17.85%), ενώ ταυτόχρονα η κρίσιμη τάση βρίσκεται σε πιο φυσιολογικά επίπεδα. Επιπρόσθετα η MMI εμφανίζεται ταχύτερα συγκριτικά με όλες τις προσομοιώσεις, αν και κοντά στον τερματισμό λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ καθώς η ελάχιστη λήψη  $r_{min}$  απέχει 2 βήματα από την λήψη κατά τη MMI  $r_c$ .

Το μέγιστο επίπεδο μεταφερόμενης ισχύος δεν παρουσιάζει σοβαρή μεταβολή σε σχέση με την **προσομοίωση 2.2** και είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τη **προσομοίωση 2.1**, καθώς σύμφωνα με τις χρονοσειρές ισχύος (Σχ. 5.3) η ΦΒ παραγωγή βρίσκεται πάντα σε ποσοστό μεγαλύτερο του 55% της ονομαστικής, αλλά σπάνια ξεπερνάει το 90%. Τέλος, η κρίσιμη τάση έχει επανέλθει σε παρόμοιο επίπεδο με τη **προσομοίωση 2.1**.

Η χρονομεταβλητή ΦΒ παραγωγή δε μεταβάλλει σημαντικά τα αποτελέσματα ως προς τη MMI με τις προσομοιώσεις με σταθερή ΦΒ παραγωγή.

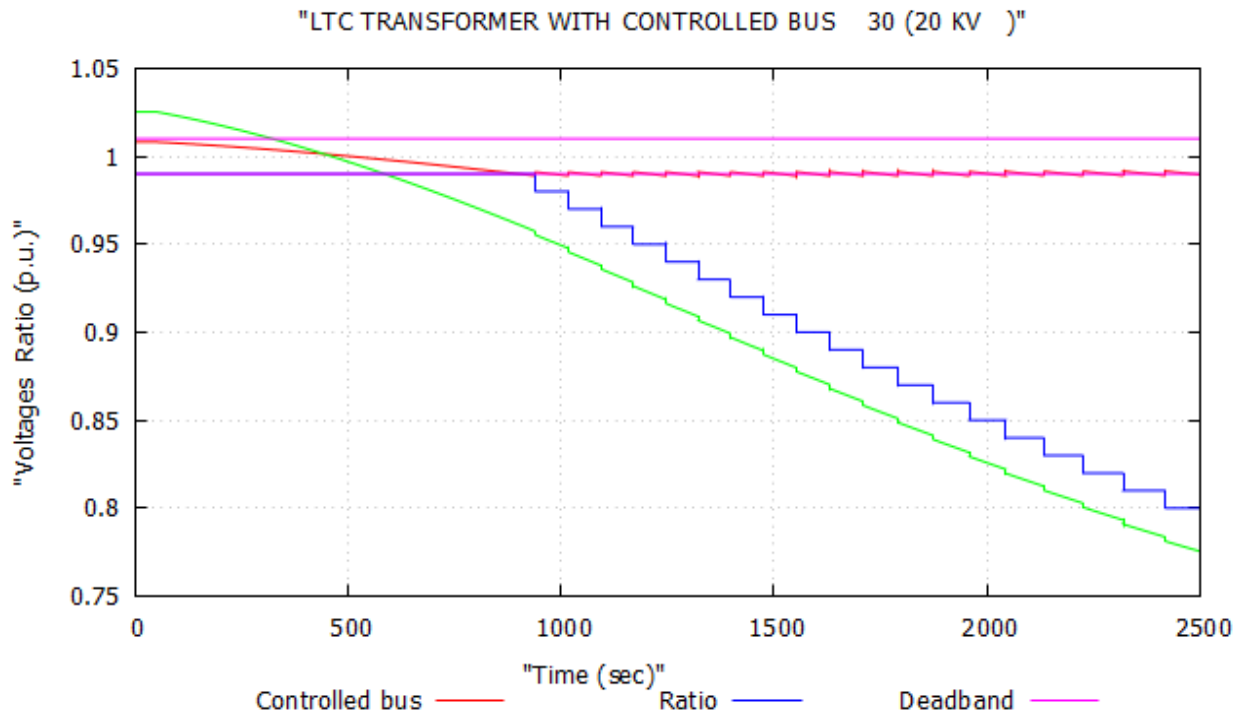
### 5.2.3 Προσομοίωση 3 - ΦΒ παραγωγή με ρύθμιση σταθερής τάσης

Στην **προσομοίωση 3** εξετάζεται το σύστημα με ρύθμιση Σταθερής Τάσης στους μετατροπείς των ΦΒ, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.8.2. Όμοια με την **προσομοίωση 2**, η προσομοίωση πραγματοποιείται για δύο σταθερά επίπεδα παραγωγής (50% της ονομαστικής ισχύος για την **προσομοίωση 3.1** και 90% της ονομαστικής ισχύος για την **προσομοίωση 3.2**) και για μεταβαλλόμενη παραγωγή μέσω χρονοσειράς ισχύος βασισμένη σε πραγματικά στοιχεία ηλιακής ακτινοβολίας και μηχανισμού μέγιστης απολαβής ισχύος (**προσομοίωση 3.3**). Αρχικά θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την εκάστοτε προσομοίωση και στο τέλος θα παρουσιαστεί ο πίνακας των κρίσιμων τιμών και θα πραγματοποιηθεί επεξήγηση και σχολιασμός.

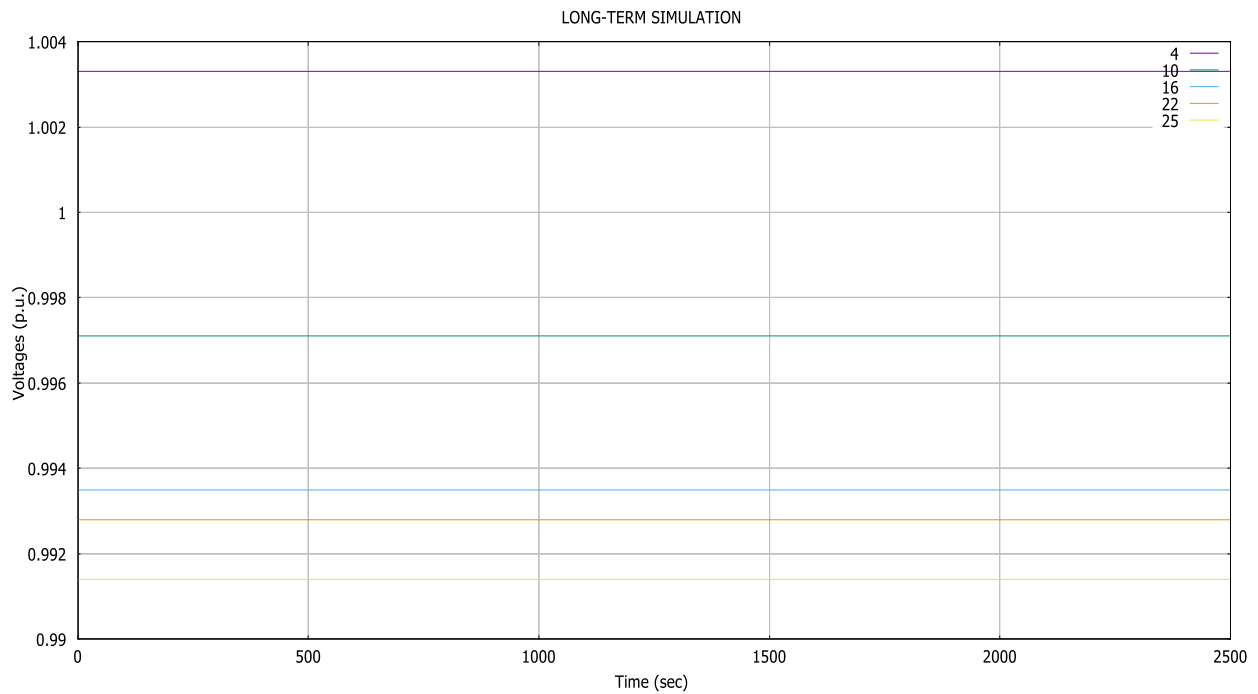
Υπενθυμίζεται ότι η ρύθμιση σταθερής τάσης στους μετατροπείς επιτρέπει την άεργο υποστήριξη και ταυτόχρονα διατηρεί τις τάσεις των ΦΒ ζυγών σταθερές. Έτσι, στην **προσομοίωση 3** παρουσιάζονται μετά τις καμπύλες ρεύματος η άεργος παραγωγή/κατανάλωσή κάθε ΦΒ μετατροπέα. Οι γραφικές παραστάσεις των τάσεων της ΦΒ παραγωγής παρουσιάζονται με σκοπό τη σύγκριση του επιπέδου τους σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις και ταυτόχρονα τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας των μετατροπέων.

#### 5.2.3.1 Προσομοίωση 3.1 - 50% Φωτοβολταϊκή Παραγωγή

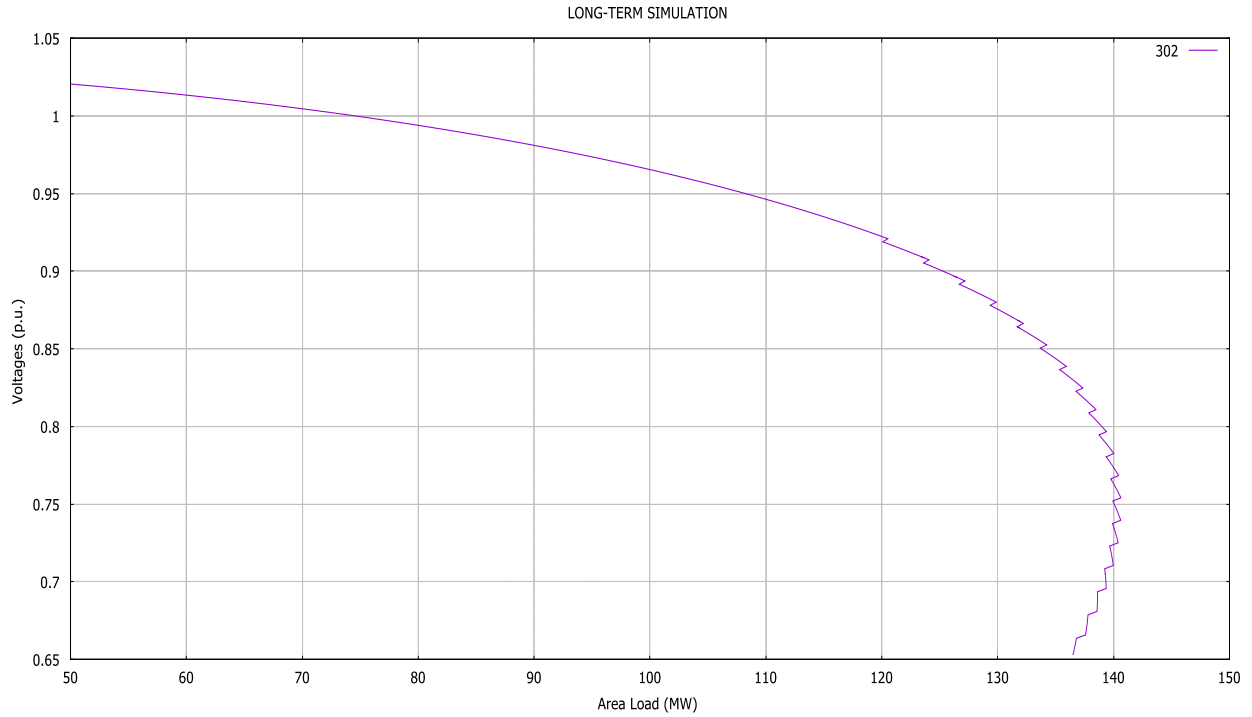
Η **προσομοίωση 3.1** αφορά προσομοίωση της διάταξης για 50% ΦΒ παραγωγή με ρύθμιση Σταθερής Τάσης στους μετατροπείς. Στα Σχ. 5.24 -28 παρουσιάζονται με τη σειρά οι μεταβλητές του μετασχηματιστή, οι τάσεις των ΦΒ ζυγών, η χαρακτηριστική P-V του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου (ζυγός 302) και τέλος τα ρεύματα και η άεργος παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Η ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή δεν παρατίθεται καθώς παραμένει σταθερή και δεν εξάγονται περεταίρω συμπεράσματα.



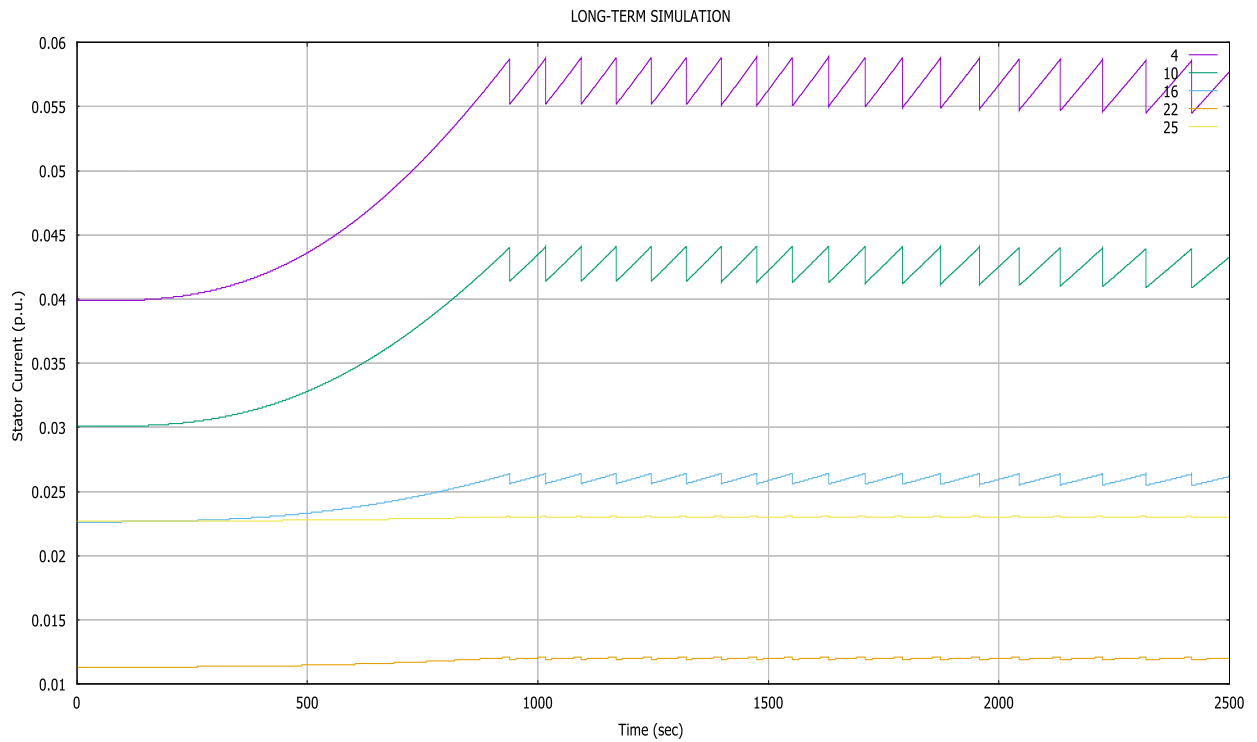
Σχ. 5. 24 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής **προσομοίωσης 3.1** (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή)



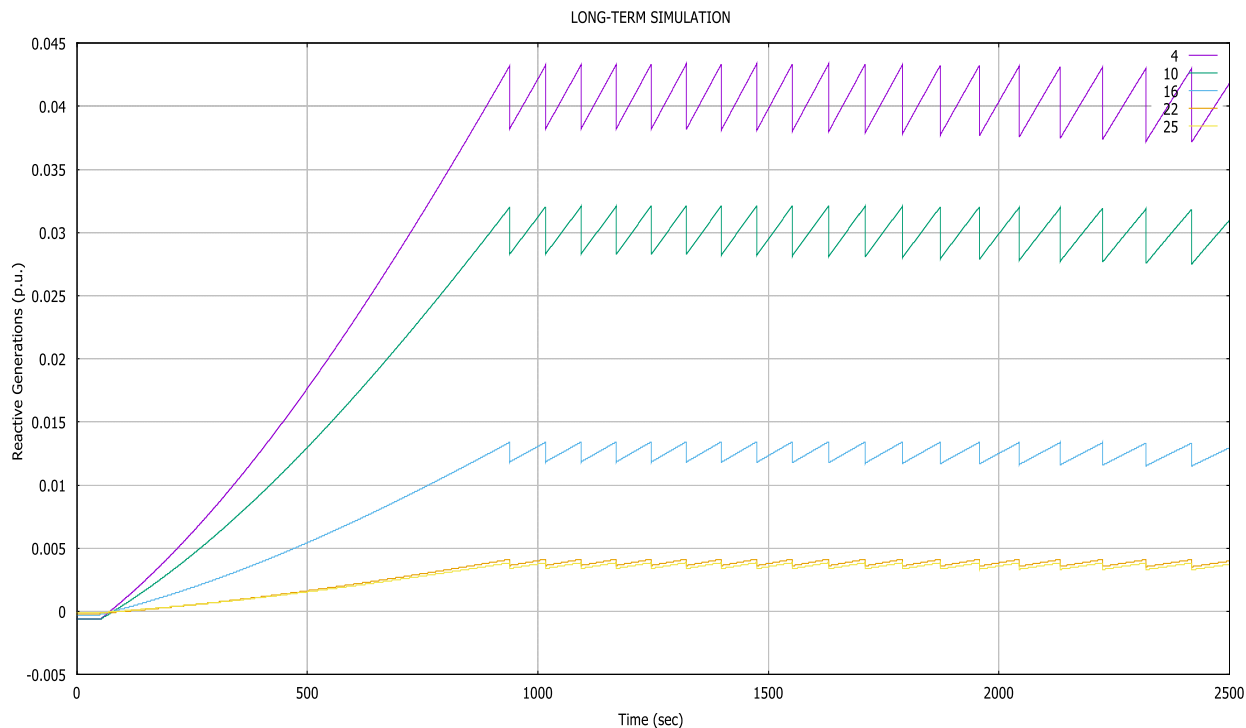
Σχ. 5. 25 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.1** (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 26 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 **προσομοίωσης 3.1** (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 27 Ρεύματα ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.1** (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 28 Άεργος ΦΒ παραγωγή προσομοίωσης 3.1 (ρύθμιση σταθερής τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή)

Το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με αρχικό λόγο μετασχηματισμού  $r_o = 0.99$  με μορφή αντίστοιχη των προηγούμενων προσομοιώσεων όπως φαίνεται στο Σχ. 5.24. Ο αρχικός λόγος διατηρείται σταθερός ακόμα και μετά την έναρξη της διαταραχής, μέχρι το σημείο όπου η διαταραχή ρίχνει την τάση του ελεγχόμενου ζυγού κάτω από την νεκρή ζώνη και το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται. Παρατηρείται ότι το ΣΑΤΥΦ διατηρείται ενεργό για τη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης μέχρι το σημείο όπου ο λόγος μετασχηματισμού ισούται με τον ελάχιστο λόγο  $r_{min} = 0.8$ .

Ο κύριος λόγος της αργής ενεργοποίησης του ΣΑΤΥΦ είναι τα σταθερά επίπεδα τάσεων της ΦΒ παραγωγής που φαίνονται στο Σχ. 5.25. Οι τάσεις διατηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια της διαταραχής σε υψηλά επίπεδα το οποίο επηρεάζει τις τάσεις των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος διανομής ΜΤ όπως έχει αναφερθεί παραπάνω.

Η καμπύλη P-V διατηρεί τη χαρακτηριστική μορφή της και παρουσιάζει το όριο ευστάθειας στα κρίσιμα στοιχεία  $V_c$  και  $P_{max}$ . Από την καμπύλη του Σχ. 5.27 εξάγονται τα κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου στον Πίν. 5.11.

Σύμφωνα με τις αποκρίσεις των ρευμάτων ΦΒ παραγωγής του Σχ. 5.27, παρατηρείται ότι τα ρεύματα δεν ξεπερνούν τα όριά τους. Αντίστοιχα, η άεργος υποστήριξη της τάσης φαίνεται από την άεργο ισχύ των μετατροπέων στο Σχ. 5.28 αρχικά αυξάνει όσο η τάση του ΣΑΤΥΦ μειώνεται εντός της νεκρής ζώνης (NZ), ενώ παραμένει στο ίδιο περίπου επίπεδο όσο η τάση του ΣΑΤΥΦ διατηρείται σχεδόν σταθερή. Δεδομένου ότι η τάση και η ενεργός παραγωγή είναι σταθερές, η άεργος παραγωγή παρουσιάζει ίδια μορφή με τα ρεύματα.

Συγκριτικά με τις περιπτώσεις των **προσομοιώσεων 2.1** και **2.2** φαίνεται από το Σχ. 5.24 ότι το ΣΑΤΥΦ διατηρεί σταθερό λόγο μετασχηματισμού ίσο με τον αρχικό για αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, παρατείνοντας τη λειτουργία του μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Σε αυτό συμβάλλουν τα σταθερά προφίλ των τάσεων των ΦΒ ζυγών (Σχ. 5.27) λόγω της ρύθμισης των μετατροπέων και η άεργος παραγωγή των ΦΒ μονάδων (Σχ. 5.28). Σημειώνεται ότι τα επίπεδα τάσεων του Σχ. 5.25 είναι υψηλότερα ακόμα και σε σύγκριση με την **προσομοίωση 2.2** όπου η ΦΒ παραγωγή βρίσκεται στο 90% της ονομαστικής.

Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα της διεσπαρμένης παραγωγής καθώς οι παράγοντες αυτοί διατηρούν και τις τάσεις των κοντινών ζυγών, με αποτέλεσμα το ΣΑΤΥΦ να χρειαστεί να ενεργοποιηθεί με μεγαλύτερη καθυστέρηση συγκριτικά με τις προηγούμενες προσομοιώσεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα, προκύπτουν τα εξής κρίσιμα στοιχεία:

Πίνακας 5. 11 Κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ **προσομοίωσης 3.1** (ρύθμιση Σταθερής Τάσης για 50% ΦΒ παραγωγή)

$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%) σε σχέση με <b>προσομοίωση 1</b>
0.754	0.99	0.87	1873	140.631	35.152

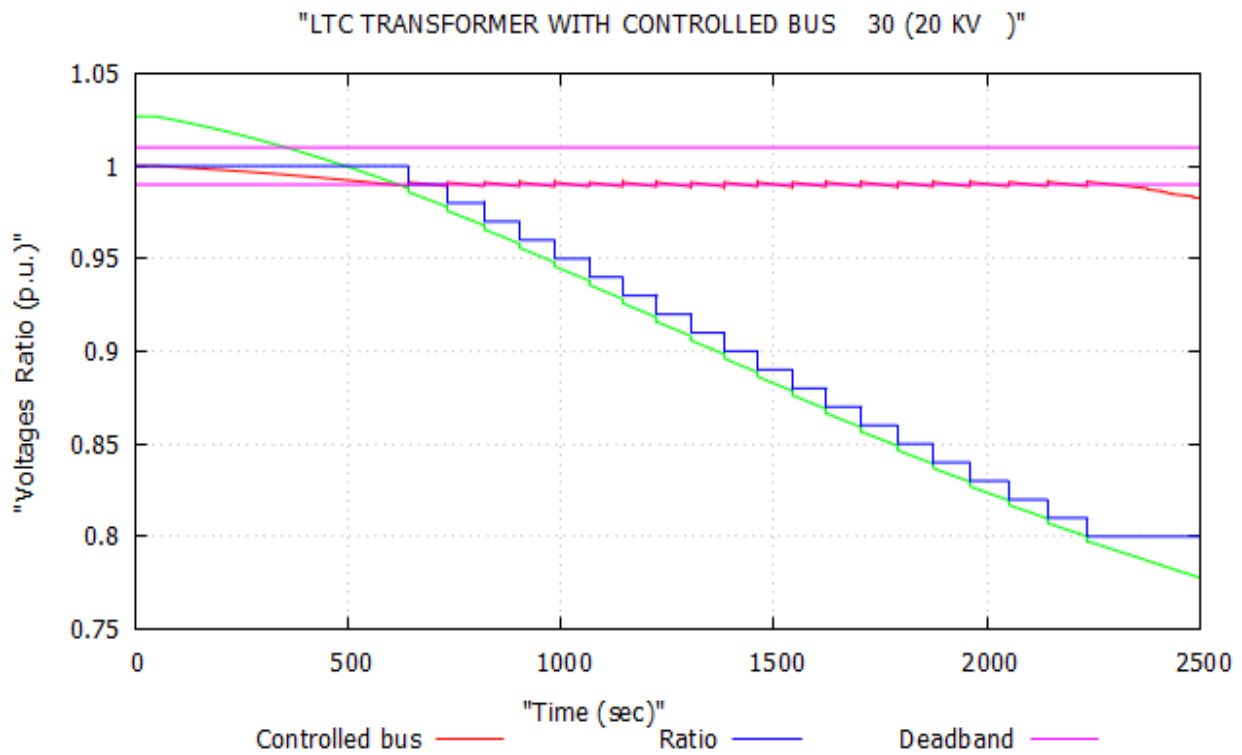
Όπως φαίνεται στον Πιν. 5.11, η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς (ΜΜΙ) εμφανίζεται σε λογική τιμή τάσης  $V_c$  και εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, που χρειάζεται ακόμα επτά (7) βήματα για να τερματίσει σύμφωνα με τον κρίσιμο λόγο μετασχηματισμού  $r_c$ .

Η **προσομοίωση 3.1** εμφανίζει ως τώρα την αρτιότερη συμπεριφορά σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς  $P_{max}$  βρίσκεται εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, με τον κρίσιμο λόγο μετασχηματισμού να απαιτεί επτά ακόμα βήματα πριν εξαντληθεί, το οποίο διατηρεί τη λειτουργία του για το μεγαλύτερο διάστημα της προσομοίωσης και η κρίσιμη τάση βρίσκεται σε πιο επιθυμητό επίπεδο.

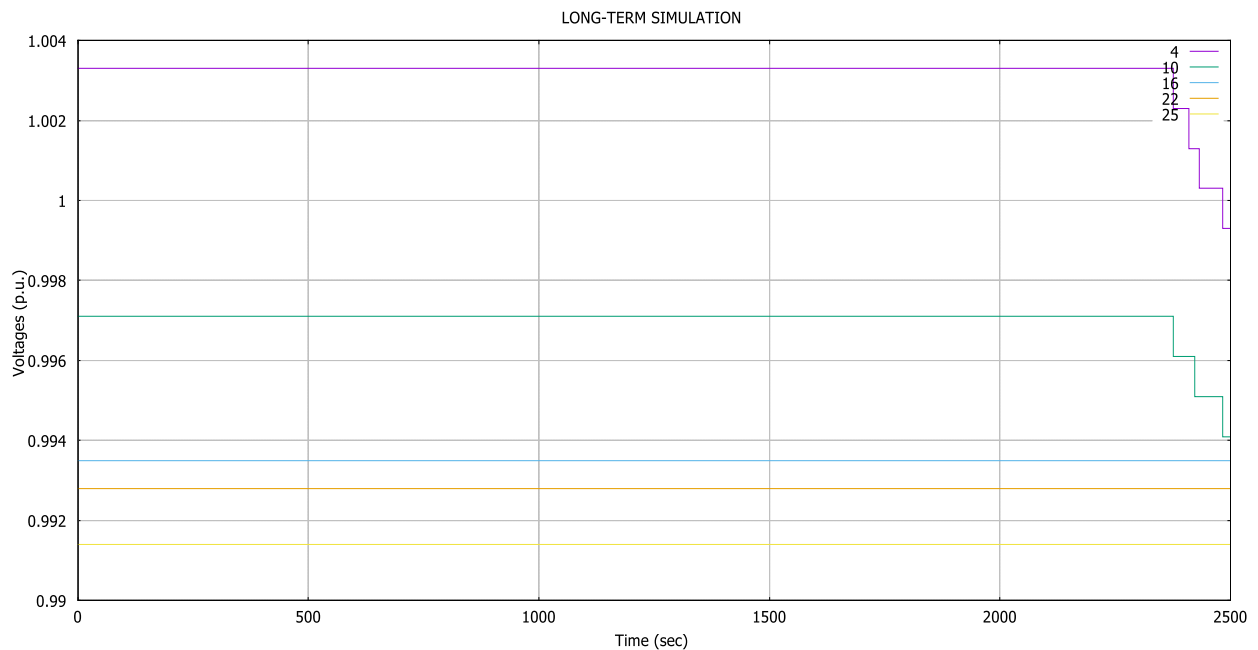
Επιπρόσθετα η ΜΜΙ της **προσομοίωσης 3.1** είναι σε υψηλότερο επίπεδο σε σχέση με την αντίστοιχη **προσομοίωση 2.1** (Σταθερός Συντελεστής Ισχύος με 50% ΦΒ παραγωγή) κατά **5.545 MW** λόγω της άεργου υποστήριξης από τους μετατροπείς των ΦΒ και συνολικά κατά **8.876 MW** (35.152%) σε σχέση με την **προσομοίωση 1** (δίχως ΦΒ παραγωγή).

#### 5.2.3.2 Προσομοίωση 3.2 - 90% Φωτοβολταϊκή Παραγωγή

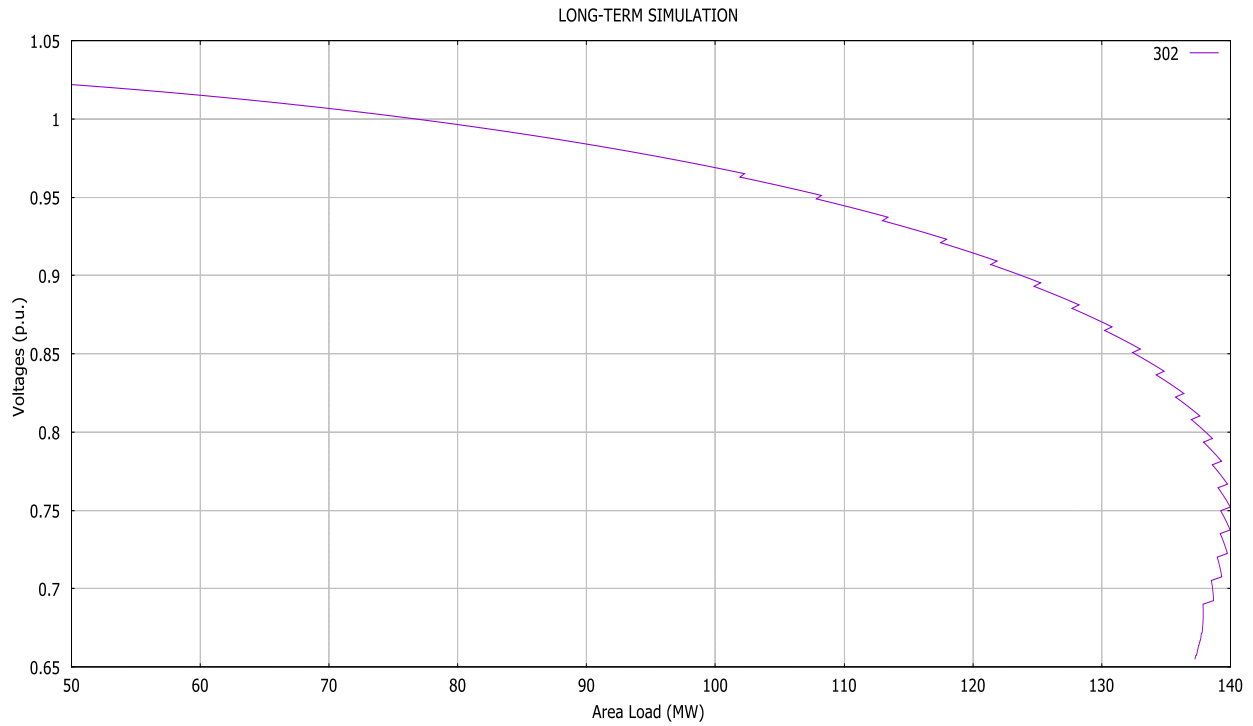
Η **προσομοίωση 3.2** αποτελεί παρουσίαση του συστήματος για ενεργό φωτοβολταϊκή παραγωγή στο 90% της ονομαστικής του Πίν. 11 και ρύθμιση Σταθερής Τάσης στους μετατροπείς. Στα Σχ. 5.29 – 5.33 παρουσιάζονται με τη σειρά οι μεταβλητές του μετασχηματιστή, οι τάσεις των ΦΒ ζυγών, η χαρακτηριστική P-V του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου και τέλος τα ρεύματα και η άεργος παραγωγή των φωτοβολταϊκών, όπως και στην **προσομοίωση 3.1**. Με βάση τα σχήματα εξάγονται και παρουσιάζονται οι κρίσιμες τιμές της ΜΜΙ του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου.



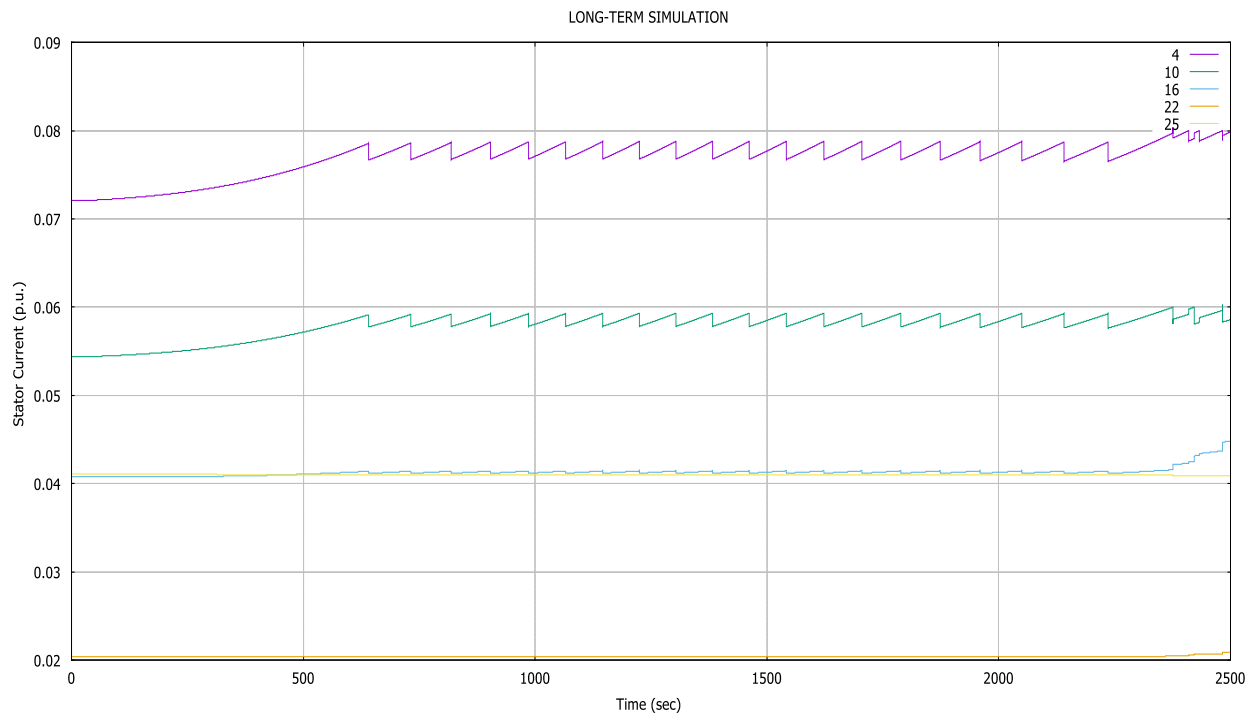
Σχ. 5. 29 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής **προσομοίωσης 3.2** (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 30 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.2** (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή)

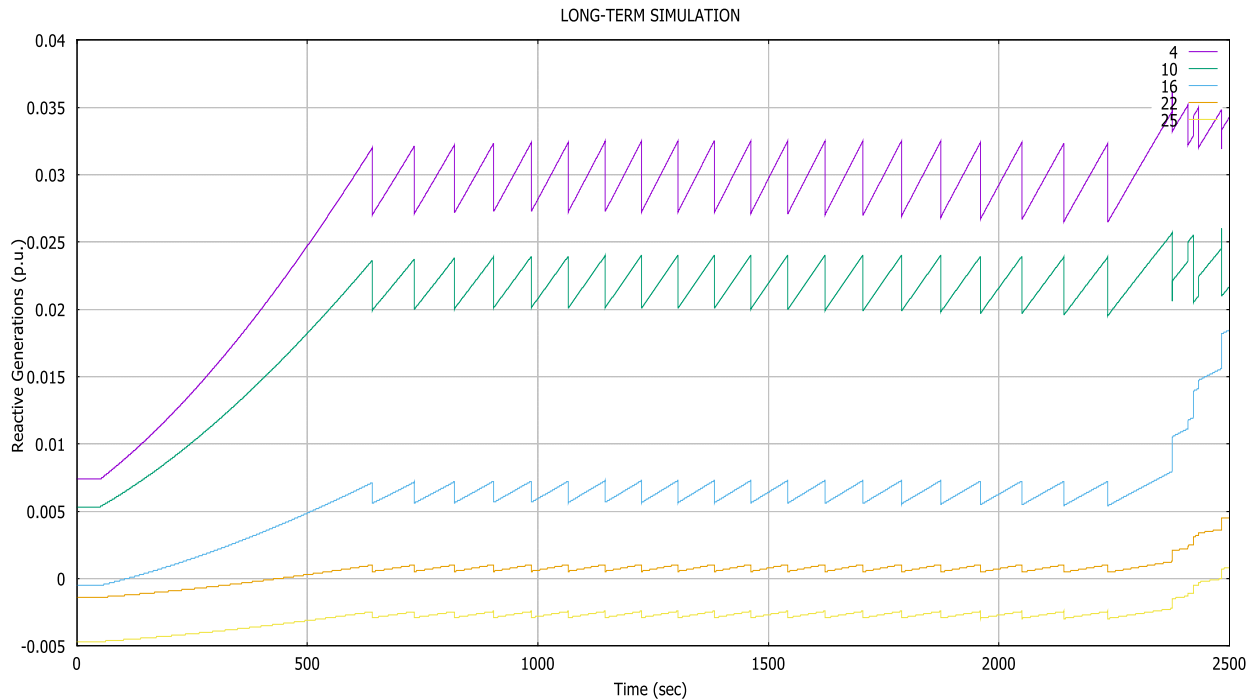


Σχ. 5. 31 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 **προσομοίωσης 3.2** (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή)



Σχ. 5. 32 Ρεύματα ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.2** (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή)





Σχ. 5. 33 Άεργος παραγωγή από ΦΒ προσομοίωσης 3.2 (ρύθμιση σταθερής τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή)

Τα παραπάνω σχήματα έχουν αντίστοιχη μορφή με αυτή της **προσομοίωσης 3.1**. Οι διαφορές εμφανίζονται στο τέλος της προσομοίωσης όπου το ΣΑΤΥΦ έχει τερματίσει. Από το Σχ. 5.29 παρατηρείται ότι το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί για μικρότερη χρονική διάρκεια, οπότε το σύστημα καταλήγει σε αστάθεια. Η συμπεριφορά αυτή είναι εμφανής και στα Σχ. 5.30, 5.32 και 5.33.

Στο Σχ. 5.30, τα επίπεδα τάσης των κοντινών στον ελεγχόμενο ζυγό ΜΤ του μετασχηματιστή (ζυγού 30) ζυγών παραγωγής (ζυγοί 4, 10) παρουσιάζουν έντονες πτώσεις. Όπως φαίνεται στα Σχ. 5.31 και 5.32, λόγω της μεγαλύτερης ενεργού παραγωγής σε σχέση με τη **προσομοίωση 3.1**, όταν το ΣΑΤΥΦ φτάσει στα όρια λειτουργίας του συναντώνται τα όρια ρεύματος στα ΦΒ στους ζυγούς 4 και 10 και έτσι δε μπορούν πλέον να συντηρούν την τερματική τους τάση. Οι υπόλοιποι ΦΒ ζυγοί (16, 22, 25) παραμένουν σταθεροί καθώς τα όρια ρεύματος δεν έχουν συναντηθεί, αλλά παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στις τιμές των ρευμάτων και στην άεργο παραγωγή. Στη περίπτωση όπου η διαταραχή συνεχίζονταν, οι τάσεις των ζυγών αυτών θα παρουσίαζαν αντίστοιχες πτώσεις. Επιπρόσθετα σημειώνεται ότι παρά την αύξηση της ενεργού παραγωγής, οι τάσεις παραμένουν σε ίδια επίπεδα συγκριτικά με την **προσομοίωση 3.1**.

Η χαρακτηριστική P-V παρουσιάζει μικρές διαφορές σε σχέση με την **προσομοίωση 3.1**. Το επίπεδο της κρίσιμης τάσης είναι παρόμοιο, με κύρια διαφορά να αποτελεί το γεγονός ότι η ΜΜΙ είναι ελαφρώς μικρότερη.

Τέλος, στο Σχ. 5.33 η άεργος παραγωγή είναι μικρότερη συγκριτικά με την **προσομοίωση 3.1**. Η διαφορά έγκειται στην αυξημένη ενεργό παραγωγή. Αρχικά η συνολική ισχύς που μπορεί να

παραχθεί είναι σταθερή οπότε η αύξηση της ενεργού σημαίνει μικρότερα περιθώρια αύξησης αέργου υποστήριξης. Ταυτόχρονα η αυξημένη έγχυση ενεργού ισχύος αυξάνει τις τάσεις των ζυγών οπότε απαιτείται λιγότερη άεργος και τέλος επισημαίνεται ότι οι περιοριστές ρεύματος (Σχ. 5.32) περιορίζουν και την άεργο ισχύ (Σχ. 5.33).

Σύμφωνα με τα Σχ. 5.29-5.33, προκύπτουν τα κρίσιμα στοιχεία MMI του Πίνακα 5.12.

Πίνακας 5. 12 Κρίσιμα στοιχεία MMI **προσομοίωσης 3.2** (ρύθμιση Σταθερής Τάσης για 90% ΦΒ παραγωγή)

$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%) σε σχέση με <b>προσομοίωση 1</b>
0.752	1.00	0.85	1874	139.992	32.622

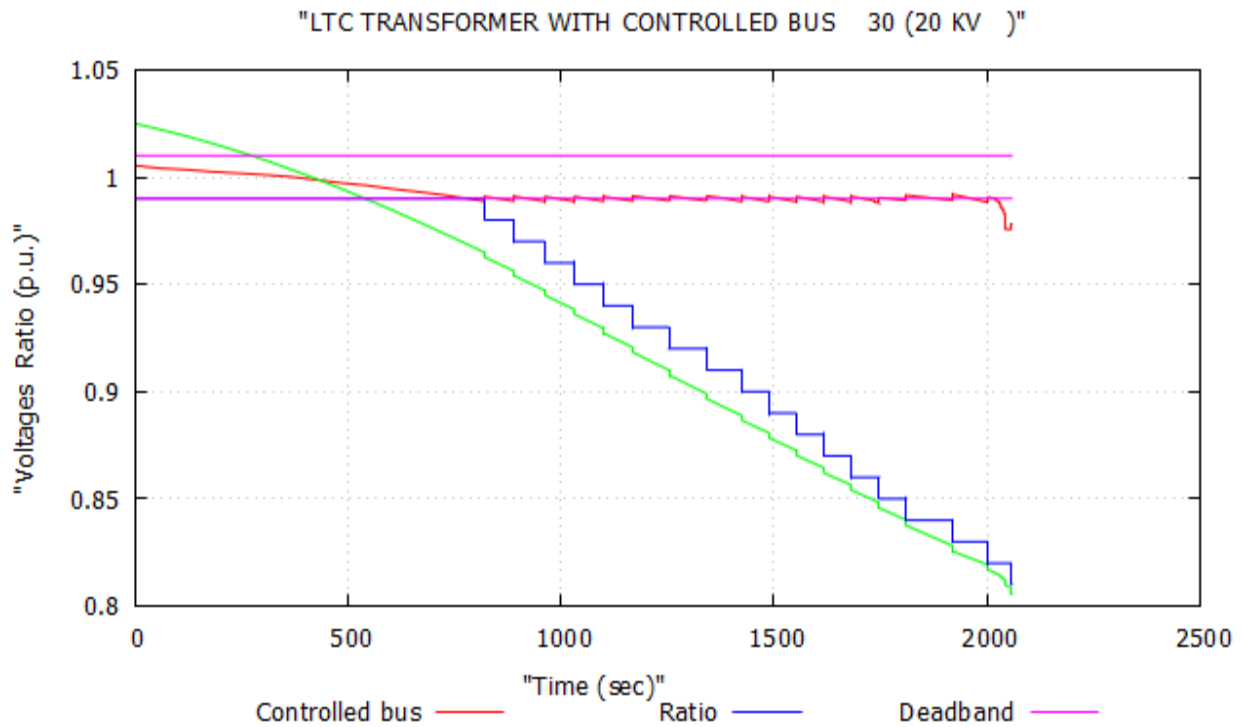
Τα αποτελέσματα της **προσομοίωσης 3.2** λόγω του περιορισμού των ρευμάτων παρουσιάζουν ελαφρά χειρότερη συμπεριφορά συγκριτικά με την **προσομοίωση 3.1** όπως φαίνεται από τα Σχ. 5.29 και 5.30. Ο λόγος μετασχηματισμού  $r_c$  είναι πιο κοντά στον  $r_{min}$  παρά το γεγονός ότι ο αρχικός λόγος μετασχηματισμού  $r_o$  είναι μεγαλύτερος κατά ένα βήμα. Η διαφορά έγκειται στην άεργο υποστήριξη που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά πάρκα. Με την αύξηση της ενεργού παραγωγής, μειώθηκε αντίστοιχα η άεργος παραγωγή όπως φαίνεται και στη σύγκριση του Σχ. 5.33 της συγκεκριμένης προσομοίωσης με το αντίστοιχο Σχ. 5.28 της **προσομοίωσης 3.1**. Βέβαια τα κρίσιμα στοιχεία των **προσομοιώσεων 3.1** και **3.2** δεν απέχουν σημαντικά μεταξύ τους, με την MMI να μειώνεται κατά **-0.639 MW**.

Το σύστημα εξακολουθεί να εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την **προσομοίωση 2** (Σταθερός Συντελεστής Ισχύος), παρουσιάζοντας αύξηση της MMI σε σχέση με την αντίστοιχη **προσομοίωση 2.2** κατά **3.657 MW**. Επιπρόσθετα η κρίσιμη τάση βρίσκεται σε καλύτερο επίπεδο και καθαρά εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, το οποίο παραμένει ενεργό για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια.

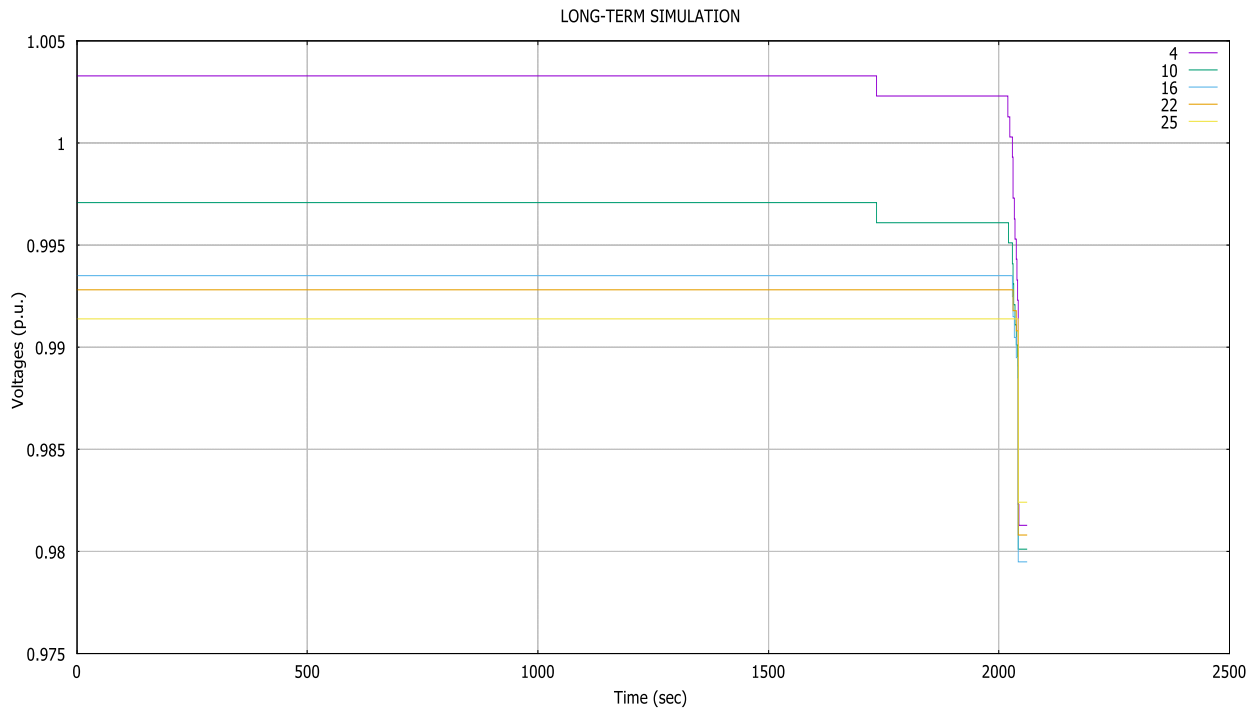
Τέλος, συγκριτικά με την **προσομοίωση 1** (δίχως ΦΒ παραγωγή) υπάρχει αύξηση της MMI κατά **8.237 MW** (32.622%).

### 5.2.3.3 Προσομοίωση 3.3 – Μεταβλητή Χρονοσειρά ΦΒ Ισχύος

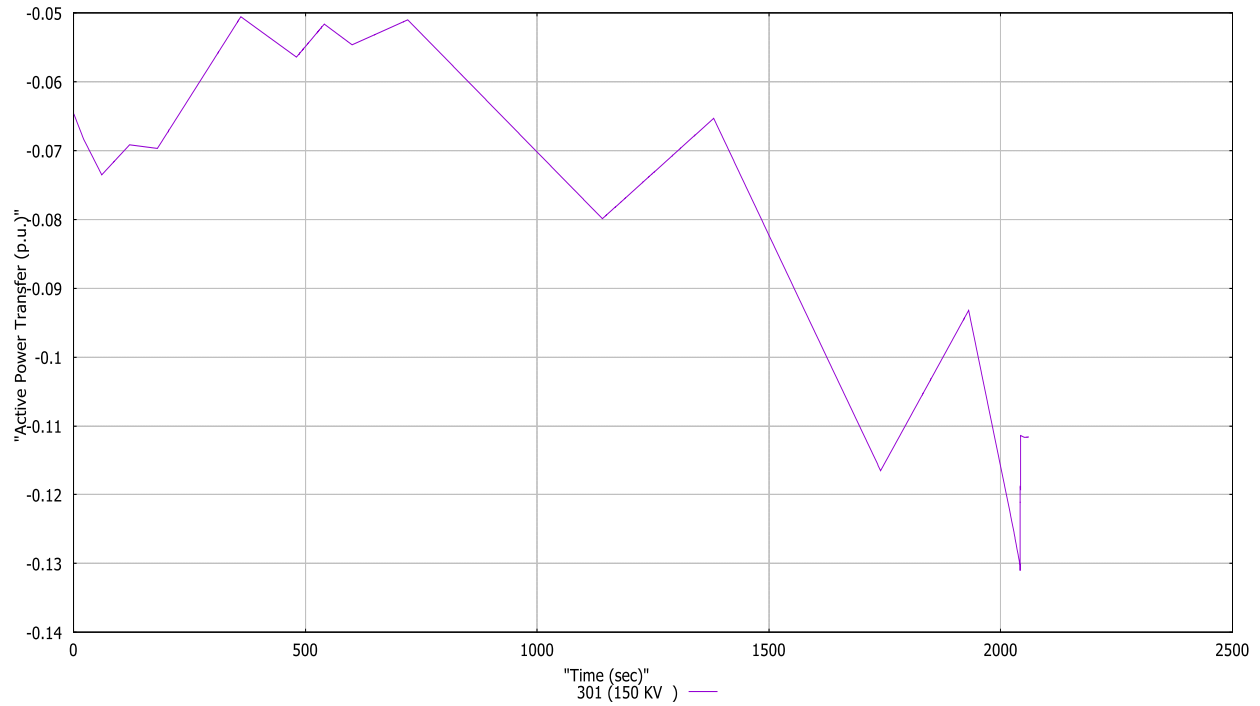
Η **προσομοίωση 3.3** αντιστοιχεί σε μεταβλητή παραγωγή ενεργού ισχύος βασισμένη στις χρονοσειρές παραγωγής του Σχ. 5.3 για το κάθε φωτοβολταϊκό πάρκο, με ρύθμιση Σταθερής Τάσης στους μετατροπείς. Στα Σχ. 5.34 – 5.39 παρουσιάζονται οι μεταβλητές του Μ/Σ διανομής, οι τάσεις των ζυγών ΦΒ παραγωγής, η P-V χαρακτηριστική του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου, η ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή και τέλος τα ρεύματα και η άεργος παραγωγή των ΦΒ μονάδων. Σε αντίθεση με τις **προσομοιώσεις 3.1** και **3.2**, η ροή ενεργού ισχύος παρουσιάζεται λόγω της μεταβλητότητας της παραγωγής ισχύος.



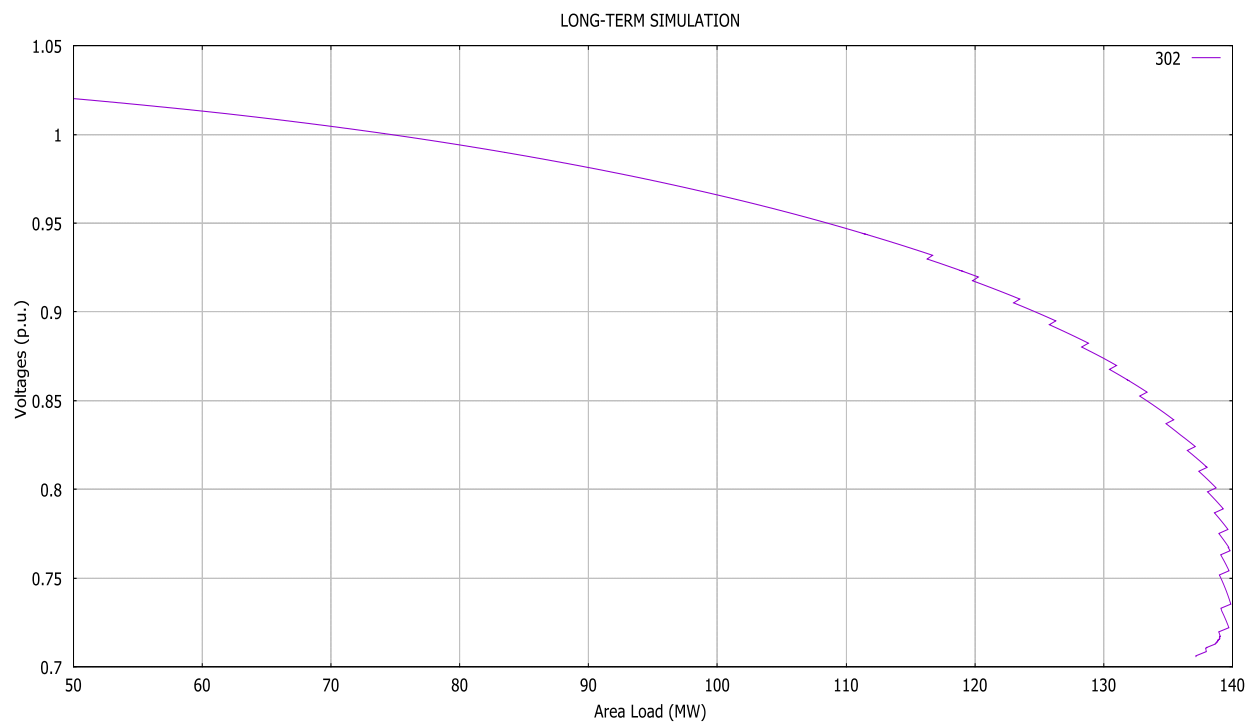
Σχ. 5. 34 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής **προσομοίωσης 3.3** (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



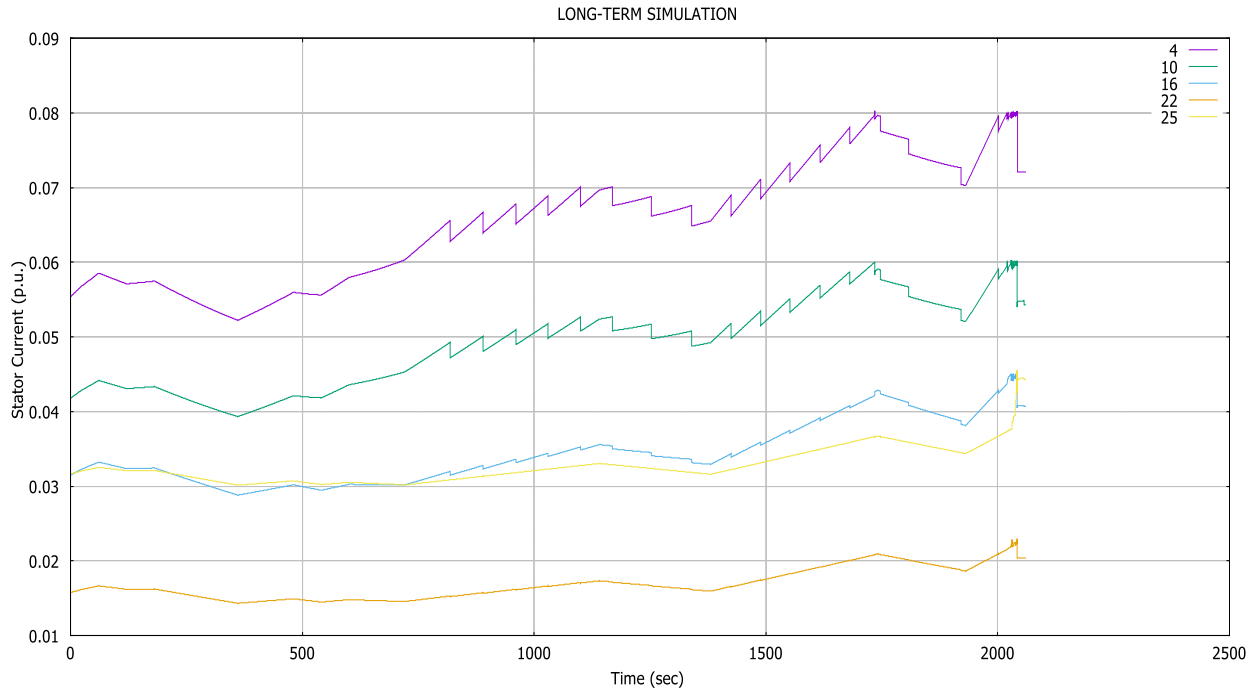
Σχ. 5. 35 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.3** (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



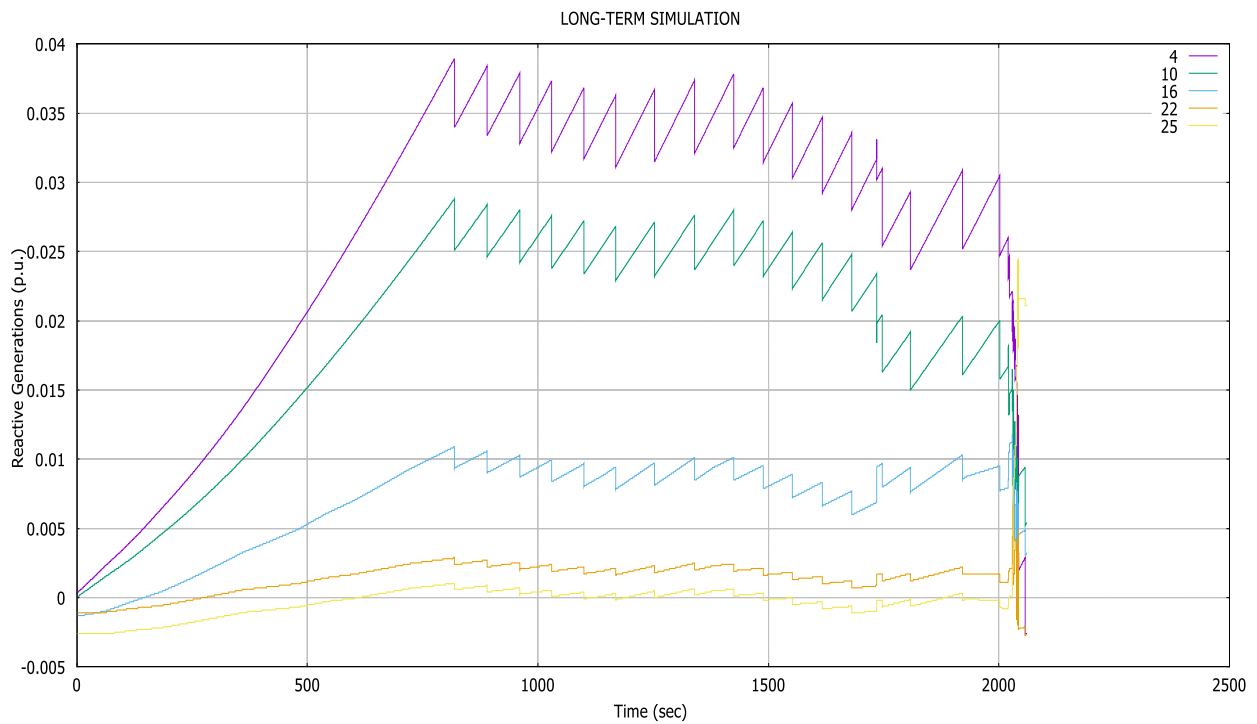
Σχ. 5. 36 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή **προσομοίωσης 3.3** (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



Σχ. 5. 37 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 **προσομοίωσης 3.3** (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



Σχ. 5. 38 Ρεύματα ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.3** (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)



Σχ. 5. 39 Άεργος παραγωγή ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.3** (ρύθμιση σταθερής τάσης για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος)

Η συμπεριφορά του ΣΑΤΥΦ και τα προφίλ των τάσεων των Σχ. 5.34 και 5.35. εμφανίζουν αναμενόμενη συμπεριφορά, ανάλογη των **προσομοιώσεων 3.1** και κυρίως **3.2** λόγω των πτώσεων κατά το τέλος της προσομοίωσης. Μια σημαντική διαφορά είναι ότι οι τάσεις των ΦΒ ζυγών παρουσιάζουν πτώση προς το τέλος της προσομοίωσης. Παρατηρώντας τη χρονοσειρά ισχύος των ΦΒ, σε αυτή τη χρονική περίοδο η ενεργός παραγωγή αυξάνει, και ταυτόχρονα σύμφωνα με το Σχ. 5.9 η άεργος μειώνεται, με αποτέλεσμα την πτώση των τάσεων. Ταυτόχρονα στο τέλος της προσομοίωσης ενεργοποιούνται οι περιοριστές ρευμάτων όλων των μετατροπέων ΦΒ παραγωγής όπως φαίνεται στο Σχ. 5.38 με αποτέλεσμα τον περιορισμό της αέργου υποστήριξης (Σχ. 5.39).

Το ίδιο ισχύει και για την χαρακτηριστική P-V του Σχ. 5.37 και για τα ρεύματα και την άεργο υποστήριξη των ΦΒ πάρκων των Σχ. 5.38 και 5.39 αντίστοιχα. Η άεργος υποστήριξη βρίσκεται σε επίπεδα παρόμοια με την **προσομοίωση 3.2** και μεταβάλλεται ανάλογα με την ενεργό φωτοβολταϊκή παραγωγή. Όταν οι τιμές των ρευμάτων συναντούν τα όριά τους η άεργος παραγωγή περιορίζεται. Όταν το ΣΑΤΥΦ φτάσει στα όριά του, τα ΦΒ δε μπορούν να κρατήσουν σταθερές τις τάσεις λόγω της μεγάλης αύξησης της ενεργού παραγωγής μετά τα 2000s.

Η ροή ενεργού ισχύος του Σχ. 5.36 παρουσιάζει ομοιότητες μεταξύ της **προσομοίωσης 3.3** και της **προσομοίωσης 2.3** (ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) όσον αφορά την μορφή της ροής ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή και του περιορισμού ενεργού και αέργου ισχύος λόγω παραβίασης των περιοριστών. Οι διαφορές στις τιμές είναι απόρροια της αέργου παραγωγής από τις φωτοβολταϊκές μονάδες η οποία επιτρέπεται μόνο με τη ρύθμιση Σταθερής Τάσης. Επιπρόσθετα, όμοια με την **προσομοίωση 2.3** η ροή ισχύος είναι αρνητική και μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η ενεργός παραγωγή των ΦΒ ανάμεσα στις τιμές του 55% έως 90% της ονομαστικής.

Τα παραπάνω δείχνουν ότι η ακριβής απόσταση των ΦΒ με ρύθμιση Σταθερής Τάσεως και ιδίως του περιορισμού του ρεύματος είναι πολύ σημαντικά για την εκτίμηση της αέργου υποστήριξης που μπορούν να δώσουν ως προς τη ΜΜΙ και τη διατήρηση της ευστάθειας τάσεως.

Στον Πίν. 5.13 παρουσιάζονται τα κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ με βάση τα Σχ. 5. 34 – 5.39.

Πίνακας 5. 13 Κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ **προσομοίωσης 3.3** (ρύθμιση Σταθερής Τάσης για χρονοσειρά ισχύος Κεφαλαίου 4)

$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%) σε σχέση με <b>προσομοίωση 1</b>
0.736	0.99	0.84	1921	139.873	32.150

Οι κρίσιμες μεταβλητές του Πιν. 5.13 είναι εντός φυσιολογικών ορίων. Το σημείο μέγιστης ισχύος παρουσιάζεται εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ και αντίστοιχα η μέγιστη ισχύς βρίσκεται σε πολύ κοντινά επίπεδα με αυτά της **προσομοίωσης 3.2**. Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 5.2.2.3 (**προσομοίωση 2.3**), αυτό συμβαίνει αφού η χρονοσειρά ισχύος μεταβάλλεται μεταξύ του 50 και του 90% της ονομαστικής ισχύος των ΦΒ πάρκων.

Σε σχέση με την αντίστοιχη **προσομοίωση 2.3** παρατηρείται αύξηση της ΜΜΙ κατά **3.611 MW**. Ο αυξημένος κρίσιμος χρόνος  $t_c$  είναι αναμενόμενος καθώς το ΣΑΤΥΦ εκκινεί την λειτουργία του

σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι στην **προσομοίωση 2**, με αποτέλεσμα η κρίσιμη τάση  $V_c$  να παρουσιάζεται σε χαμηλότερα επίπεδα.

Συγκριτικά με την **προσομοίωση 1** εξάγεται αύξηση της MMI κατά **8.118 MW** (32.15%) και μικρής μείωσης της κρίσιμης τάσης κατά 0.03 αμ, η οποία εξηγήθηκε παραπάνω.

## 5.3 Ένταξη διάταξης πυκνωτών στο Σύστημα Δοκιμών

### 5.3.1 Τροποποίηση Συστήματος Δοκιμών

Προκειμένου να γίνει η προσομοίωση περισσότερο ρεαλιστική και για να εμφανίζεται η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς σε πιο κανονικά επίπεδα τάσεως, εξετάστηκε η αύξηση της αρχικής τάσης του ζυγού YT του μετασχηματιστή (ζυγός 300) από 1.05 σε 1.09 αμ και η σύνδεση παράλληλης διακοπτικής συστοιχίας πυκνωτών στον ζυγό του απομακρυσμένου φορτίου (ζυγός 302) με σκοπό τη διατήρηση υψηλότερων επιπέδων τάσης στο ακτινικό σύστημα μεταφοράς.

Οι πυκνωτές ενεργοποιούνται όταν το επίπεδο τάσης πέσει κάτω από κάποια προκαθορισμένη τιμή διατηρώντας τα επίπεδα τάσεων και τις ροές αέργου ισχύος σε επιθυμητά επίπεδα.

Η ένταξη της διάταξης πυκνωτών πραγματοποιείται για τις **προσομοιώσεις 1** (χωρίς ΦΒ παραγωγή), **2.3** (ρύθμιση ΣΣΙ για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) και **3.3** (ρύθμιση ΣΤ για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος). Η **προσομοίωση 1** πραγματοποιείται ως μέτρο σύγκρισης, ενώ οι **προσομοιώσεις 2.3** και **3.3** επιλέχθηκαν καθώς αντιπροσωπεύουν λειτουργία πιο κοντά στη πραγματικότητα χάρη στη χρήση της μεταβλητής χρονοσειράς ενεργού ισχύος.

Στις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη ενότητα, υπάρχουν τέσσερις συστοιχίες πυκνωτών ισχύος 5 MVAr κάθε μία. Όταν το επίπεδο τάσης του ζυγού 302 πέσει κάτω του 0.9 αμ συνδέεται η επόμενη διαθέσιμη συστοιχία, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την σύνδεση και των τεσσάρων συστοιχιών. Τονίζεται ότι πριν την ζεύξη της κάθε συστοιχίας επιβάλλεται μια χρονοκαθυστέρηση, ο σκοπός της οποίας είναι να δώσει περιθώριο στο ΣΗΕ να επανέλθει από μόνο του. Αντίστοιχα, εάν η τάση υπερβεί την τιμή 1.05 αμ αποσυνδέεται η πρώτη διαθέσιμη συστοιχία.

Τα στοιχεία της διάταξης πυκνωτών παρουσιάζονται στον Πίν. 5.14.

Πίνακας 5. 14 Στοιχεία Συστοιχίας Πυκνωτών

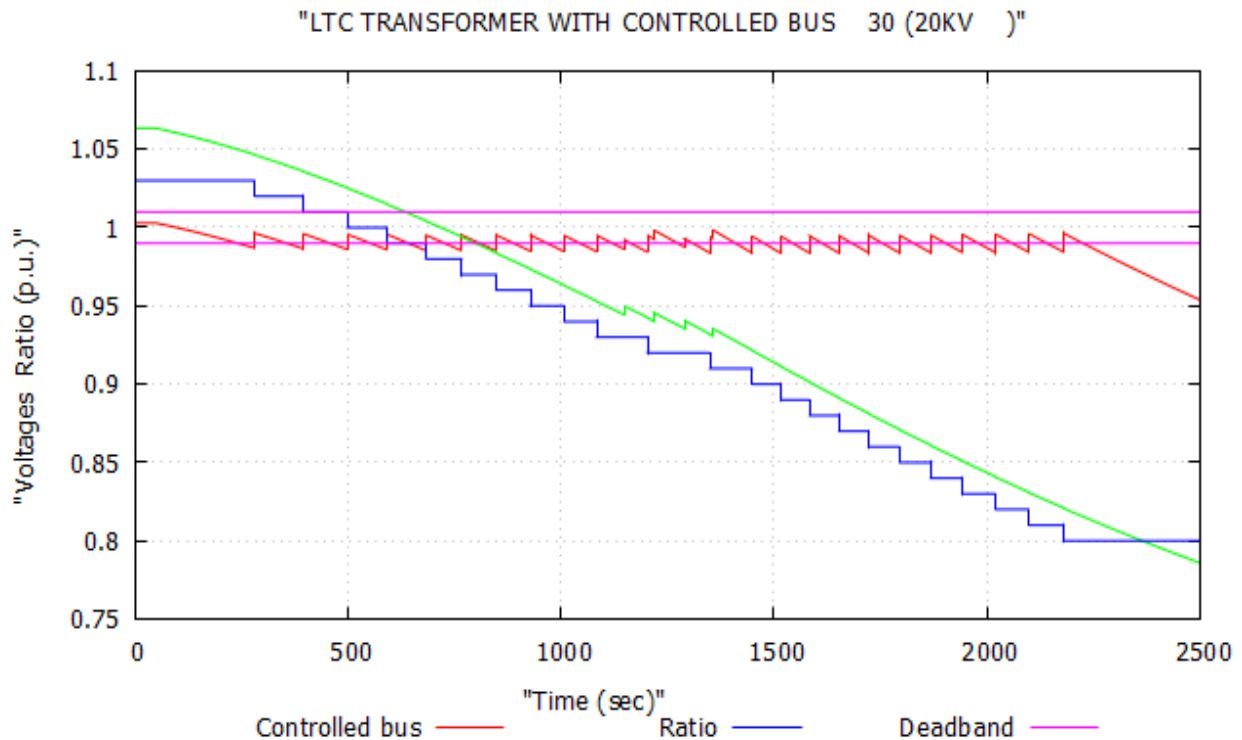
$V_{\min}$ (αμ)	$V_{\max}$ (αμ)	Ισχύς συστοιχίας (MVAr)	Αριθμός Συστοιχιών	Χρονοκαθυστέρηση (sec)
0.9	1.05	5	4	10

Καθώς ο σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι η σύγκριση της επίδρασης των αλλαγών στην MMI, παρουσιάζονται γραφικά οι μεταβλητές του Μ/Σ διανομής, με σκοπό την επισκόπηση της

λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, οι τάσεις των ΦΒ ζυγών παραγωγής με στόχο την επίβλεψη της επίδρασης της ανύψωσης της τάσης του μετασχηματιστή στο δίκτυο διανομής και η P-V καμπύλη του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου για τον εντοπισμό της MMI. Επίσης για την περίπτωση της **προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών** παρουσιάζεται και η ροή ενεργού ισχύος του μετασχηματιστή με σκοπό τη σύγκρισή της με την **προσομοίωση 3.4** της ενότητας 5.4 που πραγματοποιείται παρακάτω.

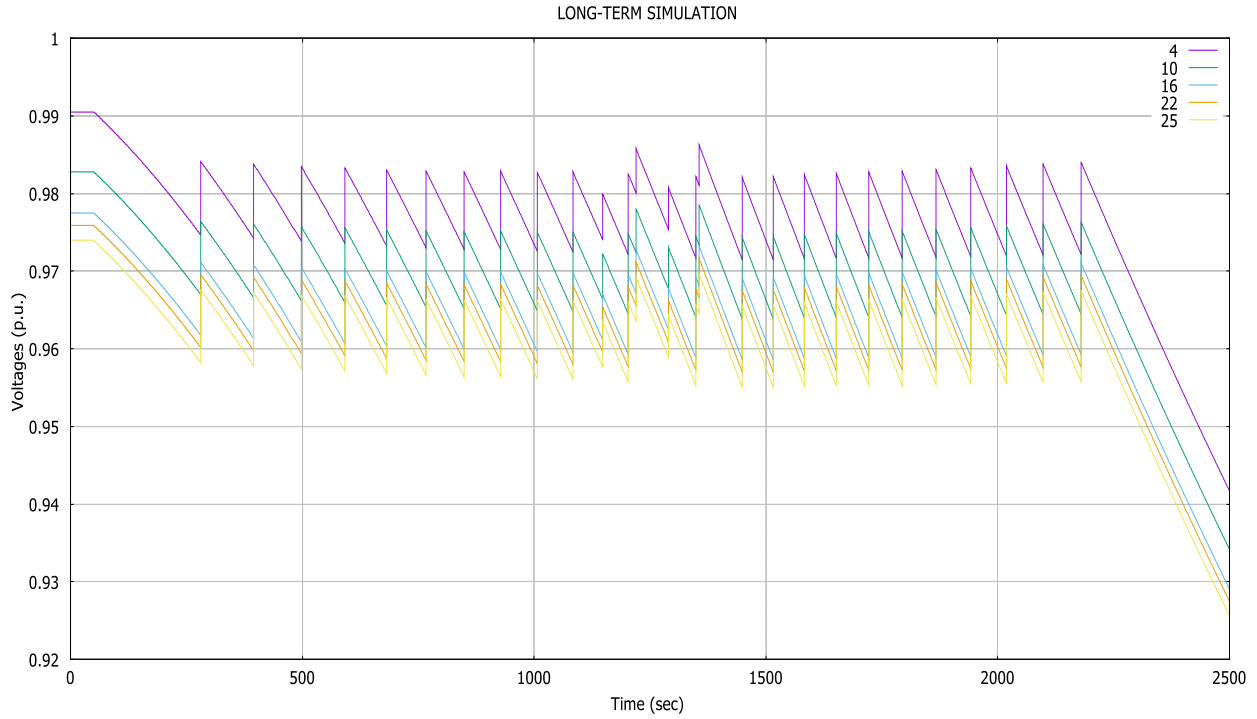
### 5.3.2 Προσομοίωση 1- ΣΗΕ χωρίς ΦΒ παραγωγή με συστοιχία πυκνωτών

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει προσομοίωση δίχως ΦΒ παραγωγή, όπως και στη **προσομοίωση 1**, με την διαφορά ότι υπόκειται στις αλλαγές της τροποποίησης του συστήματος δοκιμών, δηλαδή την αρχική ανύψωση της τάσης του ζυγού ΥΤ του μετασχηματιστή και της ένταξης της συστοιχίας πυκνωτών. Η συγκεκριμένη προσομοίωση εξάγεται ως μέτρο σύγκρισης για τις προσομοιώσεις της παρούσας ενότητας. Στα Σχ. 5.40 – 5.42 παρουσιάζονται οι μεταβλητές του μετασχηματιστή, οι τάσεις των ζυγών ΦΒ παραγωγής και η χαρακτηριστική P-V του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου.

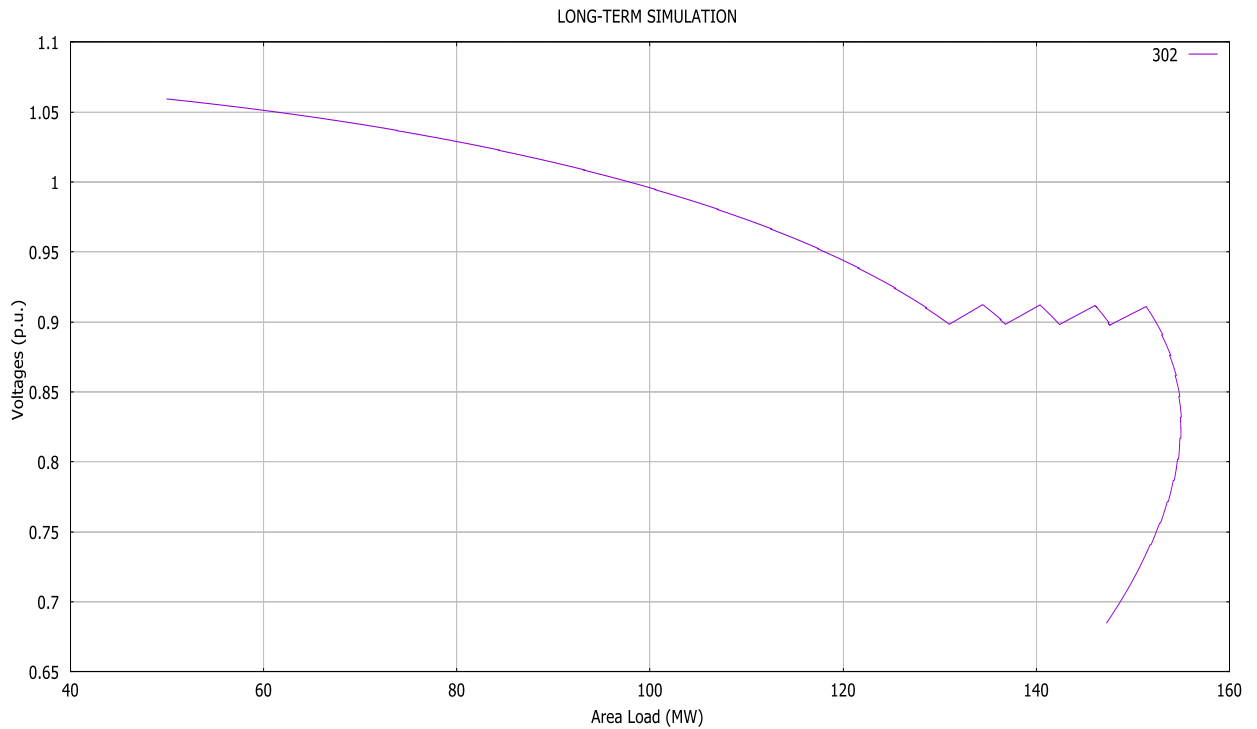


Σχ. 5. 40 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής **προσομοίωσης 1** με συστοιχία πυκνωτών





Σχ. 5. 41 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής (μηδενικού φορτίου για τη συγκεκριμένη προσομοίωση) προσομοίωσης 1 με συστοιχία πυκνωτών



Σχ. 5. 42 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 προσομοίωσης 1 με συστοιχία πυκνωτών

Από το Σχ. 5.40 παρατηρείται ότι με την ανύψωση της αρχικής τάσης του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου απαιτείται ξανά αρχικοποίηση του λόγου μετασχηματισμού  $r_o = 1.03$  σε σχέση με την **προσομοίωση 1** ( $r_o = 0.99$ ) δίχως συστοιχία πυκνωτών ώστε η τάση του ελεγχόμενου ζυγού να διατηρείται εντός της νεκρής ζώνης του μετασχηματιστή. Κατά τη διάρκεια της διαταραχής ο λόγος μετασχηματισμού παρουσιάζει πτώση με σκοπό την διατήρηση των επιπέδων τάσεις όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις. Η ενεργοποίηση της συστοιχίας πυκνωτών είναι εμφανής στις εντονότερες κυματώσεις των τάσεων του μετασχηματιστή. Επίσης παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια των κυματώσεων αυτών ο λόγος μετασχηματισμού παραμένει σταθερός, καθώς η ανύψωση των επιπέδων τάσης πραγματοποιείται από τη πυκνωτική διάταξη.

Αντίστοιχες κυματώσεις παρατηρούνται και στις τάσεις των ΦΒ πάρκων του Σχ. 5.41. Οι τάσεις διατηρούν σταθερή μέση τιμή κατά τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ και πτώση κατά τον τερματισμό του. Μία διαφορά που εντοπίζεται συγκριτικά με την **προσομοίωση 1** είναι η ανύψωση του επιπέδου τους λόγω της αντίστοιχης ανύψωσης στην τάση του μετασχηματιστή. Η διαφορά είναι μικρή καθώς με τις τροποποιήσεις επαναπροσδιορίζεται και η αρχική λήψη του μετασχηματιστή όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η λειτουργία της διακοπτικής συστοιχίας των πυκνωτών είναι έντονα εμφανής στο Σχ. 5.42 από τις κυματώσεις ισχύος που παρουσιάζονται. Κάθε κυμάτωση δείχνει την αποφόρτιση μίας συστοιχίας πυκνωτών όταν η τάση ελέγχου πέσει κάτω από 0.9 αμ. Όταν αποφορτιστούν και οι τέσσερις συστοιχίες, το σύστημα συνεχίζει την λειτουργία του μέχρι τον τερματισμό του ΣΑΤΥΦ.

Κατ' αντιστοιχία με τις προηγούμενες προσομοιώσεις παρουσιάζεται ο Πίν. 5.15 με τα κρίσιμα στοιχεία MMI της παρούσας προσομοίωσης.

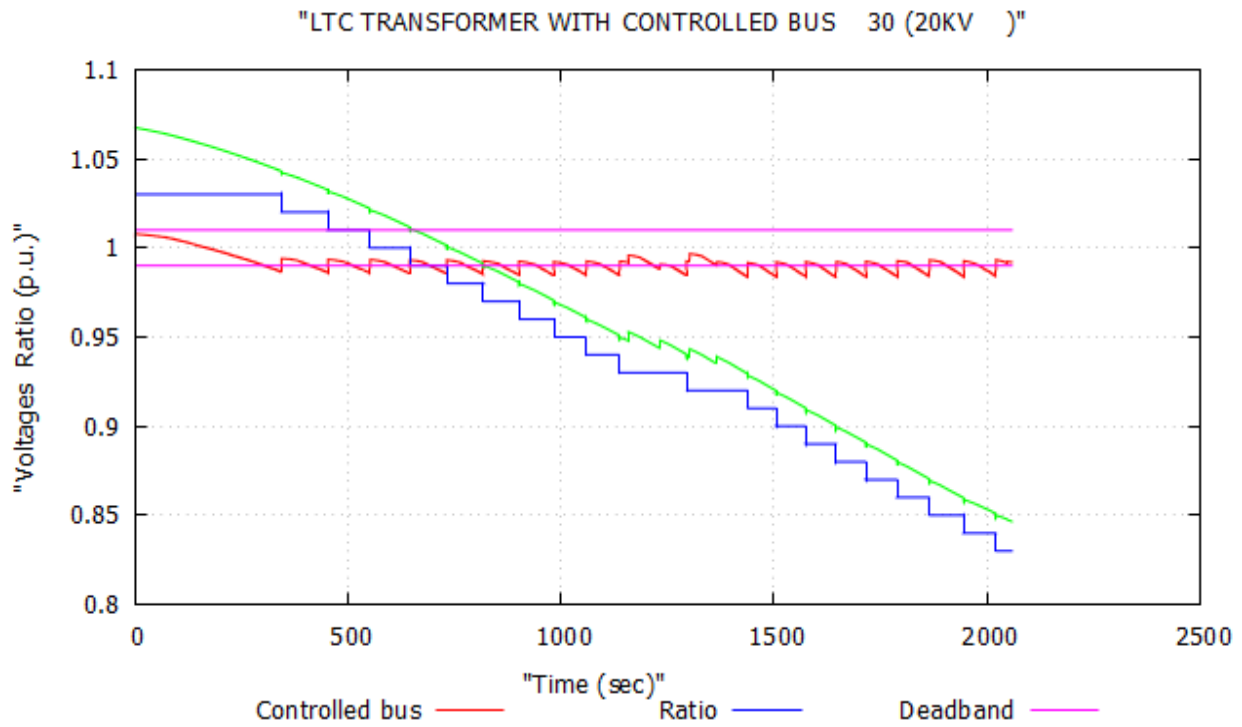
Πίνακας 5. 15 Κρίσιμα στοιχεία MMI χωρίς ΦΒ παραγωγή και με συστοιχία πυκνωτών

$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)
0.832	1.03	0.87	1722	155.022

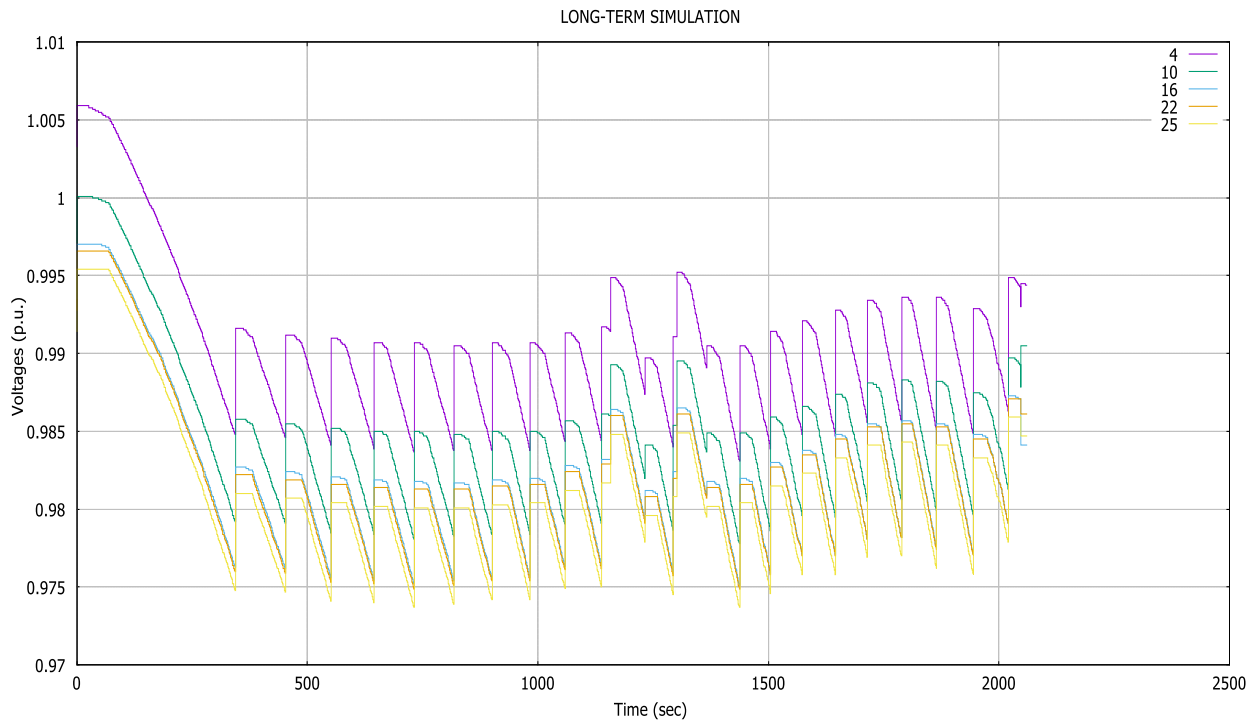
Η τροποποίηση του συστήματος έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση της  $V_c$  κατά 0.093 αμ και την αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος κατά **23.267 MW** σε σύγκριση με την **προσομοίωση 1**. Τέλος, το σημείο μέγιστης ισχύος βρίσκεται καθαρά εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ με τον λόγο  $r_c$  να βρίσκεται στη τιμή 0.87 αμ.

### 5.3.3 Προσομοίωση 2.3 – Μεταβλητή Χρονοσειρά ΦΒ Ισχύος

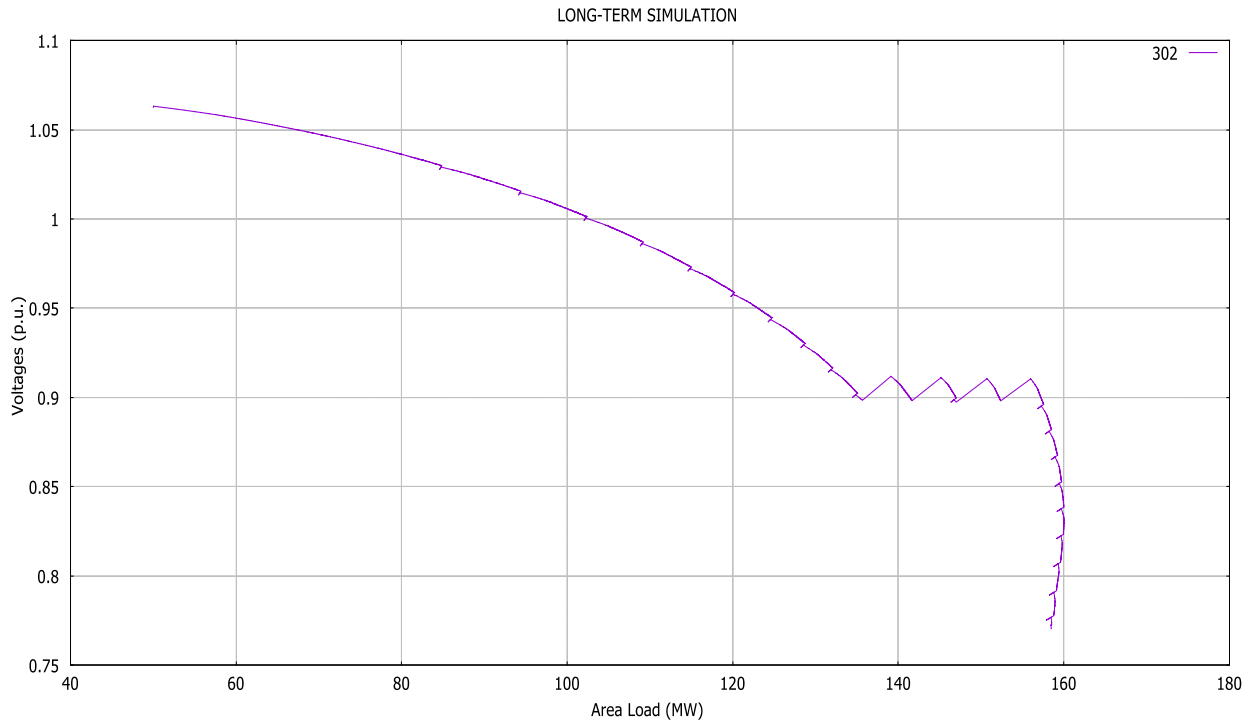
Η **προσομοίωση 2.3 με συστοιχία πυκνωτών** είναι η αντίστοιχη της **προσομοίωσης 2.3** (μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος με ρύθμιση ΣΣΙ) με τις τροποποιήσεις του συστήματος που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στα Σχ. 5.43 – 5.45 παρουσιάζονται όμοια με την **προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών** οι μεταβλητές του μετασχηματιστή, οι τάσεις των ΦΒ ζυγών και η χαρακτηριστική P-V του ζυγού φορτίου YT.



Σχ. 5. 43 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής προσομοίωσης 2.3 με συστοιχία πυκνωτών



Σχ. 5. 44 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής προσομοίωσης 2.3 με συστοιχία πυκνωτών



Σχ. 5. 45 Χαρακτηριστική P-V ζυγού 302 προσομοίωσης 2.3 με συστοιχία πυκνωτών

Στα Σχ. 5.43 παρατηρείται όμοια επίδραση της αρχικής ανύψωσης τάσης στον αρχικό λόγο μετασχηματισμού  $r_o = 1.03$  συγκριτικά με την **προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών**, με το ΣΑΤΥΦ να διατηρεί τη λειτουργία του καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στις έντονες κυματώσεις της ελεγχόμενης τάσης, και στις τάσεις των ΦΒ ζυγών του Σχ. 5.44 φαίνεται η ενεργοποίηση της πυκνωτικής διάταξης.

Στο Σχ. 5.45 παρουσιάζεται η P-V καμπύλη, χάρη στην οποία εξάγονται η κρίσιμη τάση και η MMI της προσομοίωσης. Όμοια με την **προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών**, στη χαρακτηριστική αυτή είναι εμφανής η αποφόρτιση της συστοιχίας πυκνωτών που ενεργοποιείται όταν η τάση του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου παρουσιάσει τιμή μικρότερη από 0.9 αμ.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πιν. 5.16 με τα κρίσιμα στοιχεία MMI της προσομοίωσης

Πίνακας 5. 16 Κρίσιμα στοιχεία MMI προσομοίωσης 2.3 με συστοιχία πυκνωτών

$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%) σε σχέση με <b>προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών</b>
0.832	1.03	0.87	1745	160.019	19.790

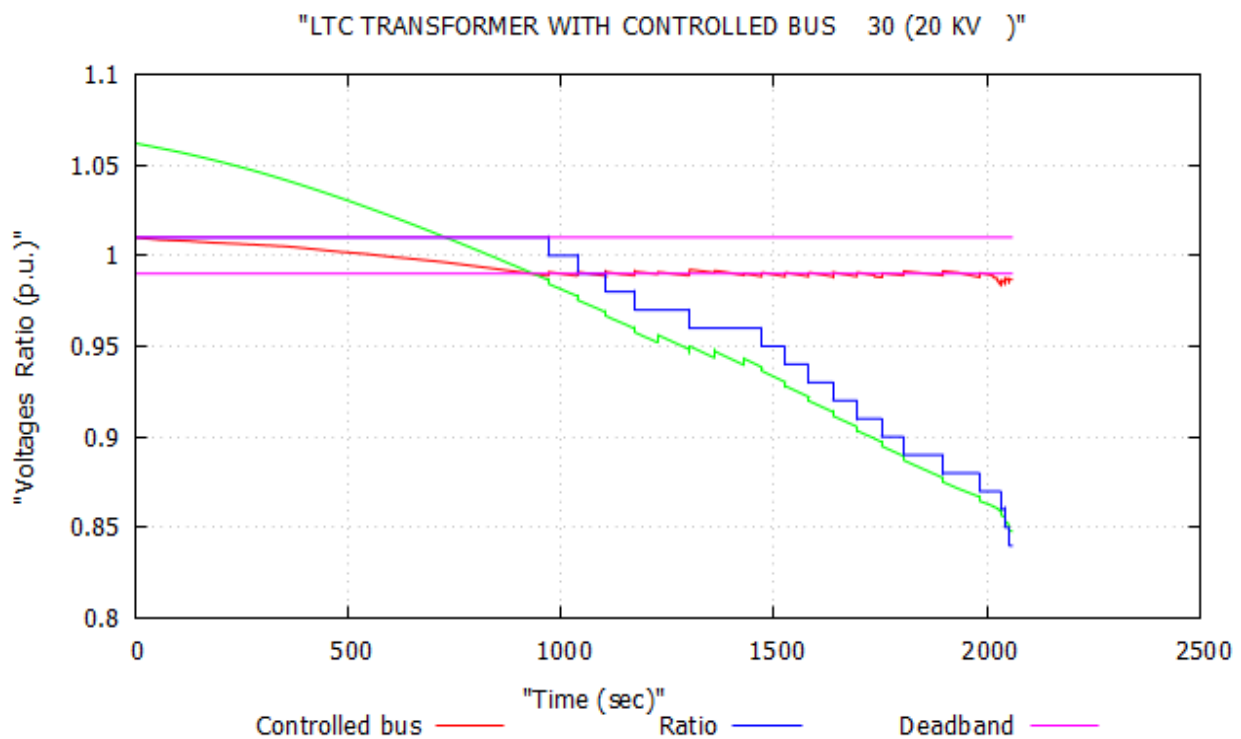
Το σύστημα παρουσιάζει την MMI κατά την λειτουργία του ΣΑΤΥΦ. Σε σύγκριση με την **προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών** παρουσιάζει ίδια κρίσιμη τάση  $V_c$  με την MMI να

εμφανίζεται σε κοντινό χρονικό διάστημα  $t_c$ . Η πιο σημαντική διαφορά είναι η αύξηση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος κατά **4.997 MW** (19.79%).

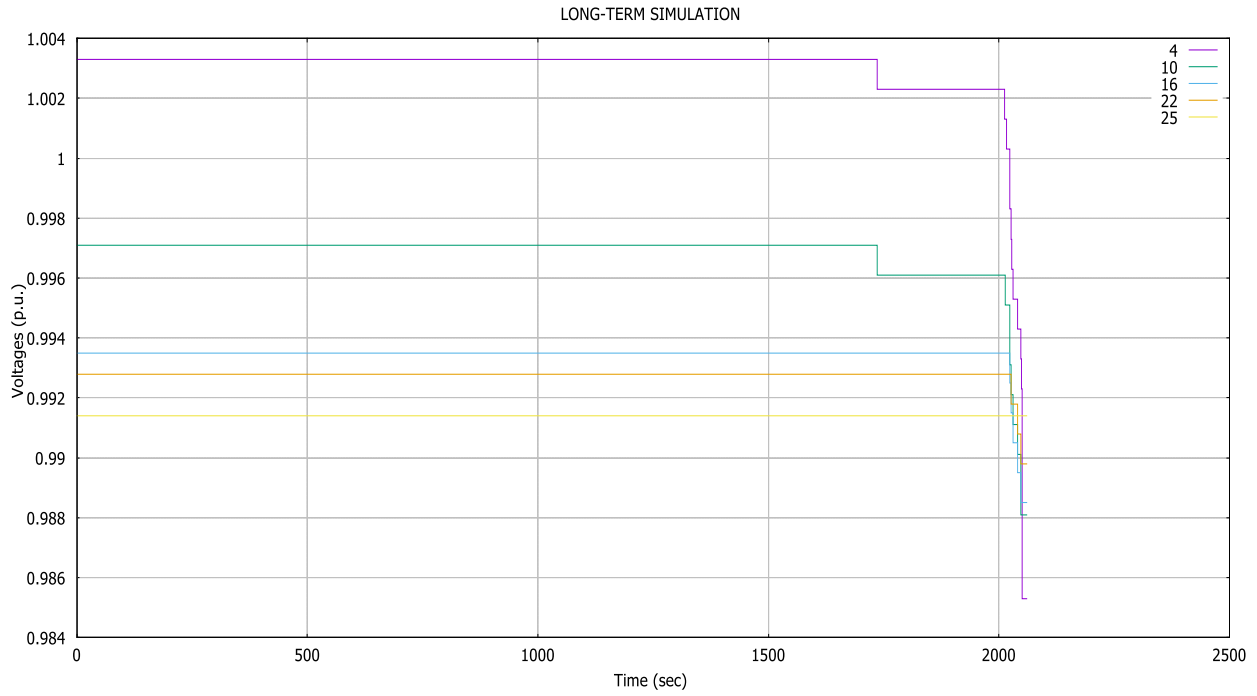
Συγκριτικά με την **προσομοίωση 2.3** το σύστημα παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με τις αρχικές τάσεις να είναι ανυψωμένες λόγω της ΥΤ του μετασχηματιστή, η οποία αντισταθμίζεται στην πλευρά της ΜΤ με την αντίστοιχη αύξηση του αρχικού λόγου μετασχηματισμού  $t_0$  από 1.00 σε 1.03. Οι αλλαγές της παρούσας προσομοίωσης σε σχέση με την **προσομοίωση 2.3** επέφεραν αύξηση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος κατά **23.157 MW**.

### 5.3.4 Προσομοίωση 3.3 – Μεταβλητή Χρονοσειρά ΦΒ Ισχύος

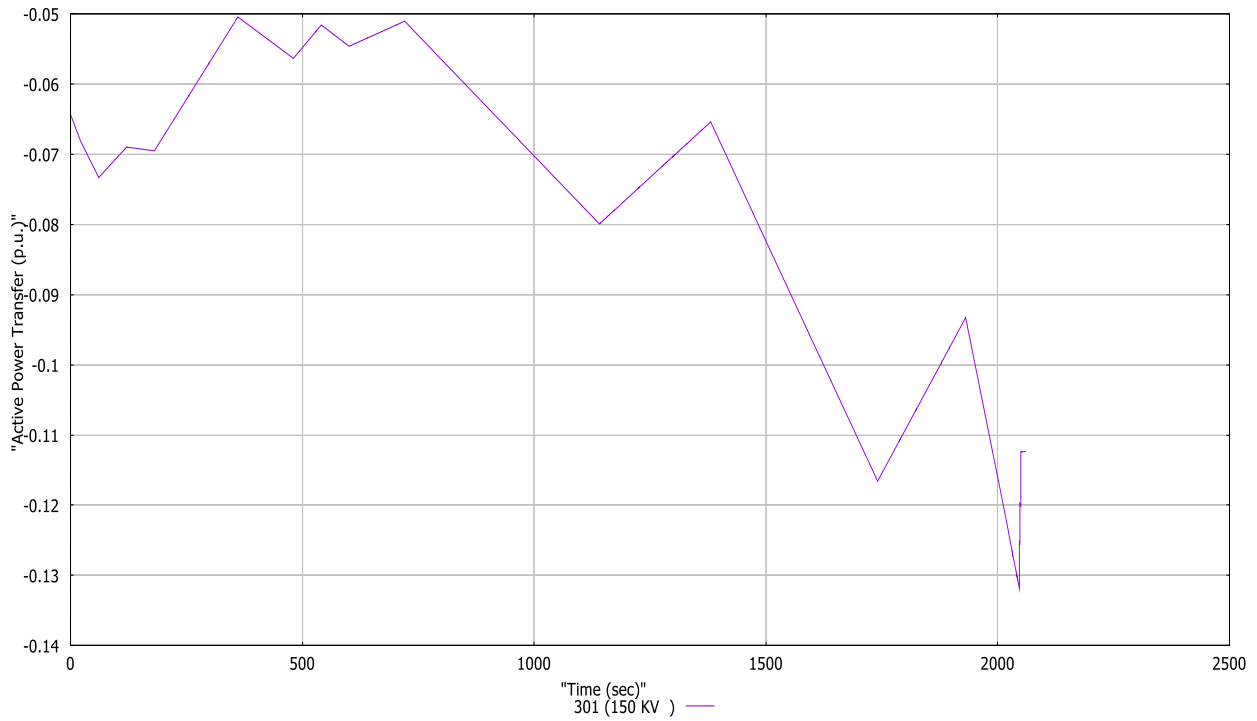
Τέλος, παρουσιάζεται η **προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών**, που αντιστοιχεί στην **προσομοίωση 3.3** (μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος με ρύθμιση σταθερής τάσης). Τα σχήματα που παρουσιάζονται είναι τα ίδια με αυτά των προηγούμενων προσομοιώσεων της ενότητας 5.3 με τη διαφορά ότι παρουσιάζεται και η ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή και η άεργος παραγωγή των ΦΒ. Οι γραφικές παραστάσεις αποκτούν νόημα ως μέτρο σύγκρισης με την **προσομοίωση 3.4** που πραγματοποιείται στην παρακάτω ενότητα 5.4.



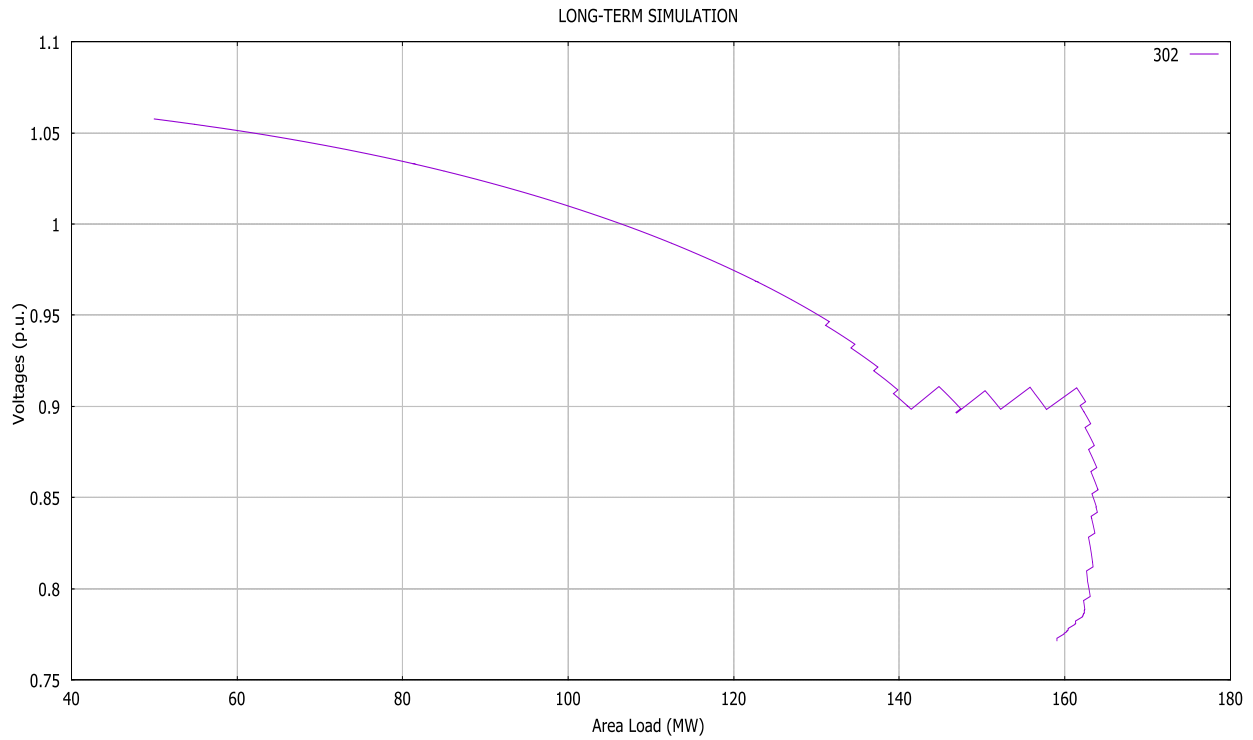
Σχ. 5. 46 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών



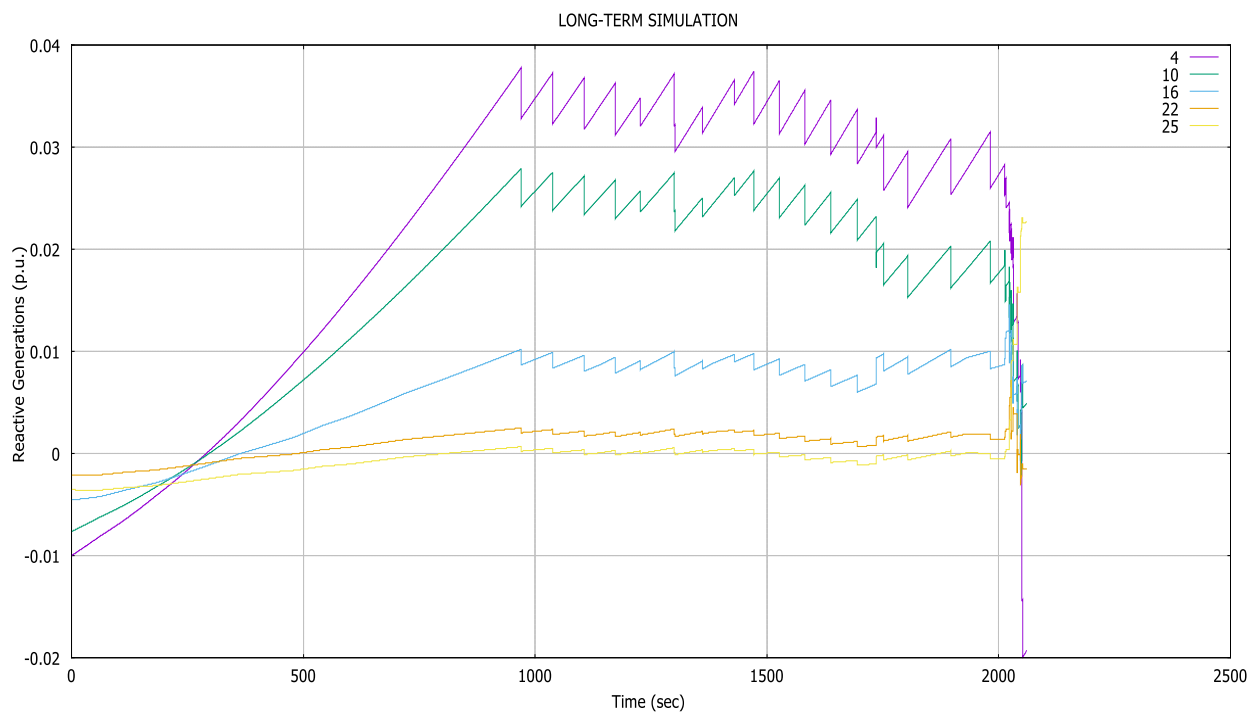
Σχ. 5. 47 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών



Σχ. 5. 48 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών



Σχ. 5. 49 Χααρακτηριστική P-V ζυγού 302 προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών



Σχ. 5. 50 Άεργος παραγωγή ζυγών ΦΒ παραγωγής προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα, το σύστημα παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με την **προσομοίωση 3.3**. Όπως και στις υπόλοιπες προσομοιώσεις της ενότητας 5.3, οι διαφορές εμφανίζονται στις υψηλότερες τιμές των τάσεων της ΦΒ παραγωγής και κυρίως στην αύξηση της κρίσιμης τάσης και της ΜΜΙ λόγω της συστοιχίας πυκνωτών.

Στο προφίλ τάσης του ελεγχόμενου ζυγού του ΜΣ από το Σχ. 5.46 φαίνεται ότι η τάση παραμένει εντός ορίων σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της διαταραχής, ενώ το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται ακόμα εντός λειτουργίας αλλά να προσεγγίζει γρήγορα τον ελάχιστο λόγο μετασχηματισμού.

Οι τάσεις των ΦΒ ζυγών του Σχ. 5.47 παρουσιάζουν καθολική πτώση προς το τέλος της διαταραχής που συνάδει με την μείωση της ενεργού παραγωγής που φαίνεται στο Σχ. 5.48. Στο σημείο αυτό φαίνεται και η ενεργοποίηση των περιοριστών ρεύματος όπως και στην **προσομοίωση 3.3**. Υπενθυμίζεται ότι στη περίπτωση αντίστροφης ροής ισχύος η μείωση της ενεργού παραγωγής επιφέρει μείωση της αρνητικής ροής.

Τέλος, στο Σχ. 5.49 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική P-V που αντίστοιχα με τις προηγούμενες προσομοιώσεις γίνεται εμφανής η λειτουργία της συστοιχίας πυκνωτών.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ο Πίνακας 5.17 με τα κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ:

Πίνακας 5. 17 Κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ **προσομοίωσης 3.3** με συστοιχία πυκνωτών

V <sub>c</sub> (αμ)	r <sub>o</sub>	r <sub>c</sub>	t <sub>c</sub> (sec)	P <sub>max</sub> (MW)	Μεταβολή P <sub>max</sub> (%) σε σχέση με <b>προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών</b>
0.854	1.01	0.92	1695	164.005	35.576

Η **προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών** παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με τις προηγούμενες προσομοιώσεις σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5.17. Ο λόγος μετασχηματισμού απαιτεί μικρότερη μεταβολή στην αρχή και διατηρείται σταθερός για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα τη διατήρηση των τάσεων κατά τη διάρκεια της διαταραχής. Επίσης η ΜΜΙ είναι υψηλότερη, εμφανίζεται ταχύτερα και σε πιο φυσιολογικά επίπεδα τάσης και λόγου μετασχηματισμού.

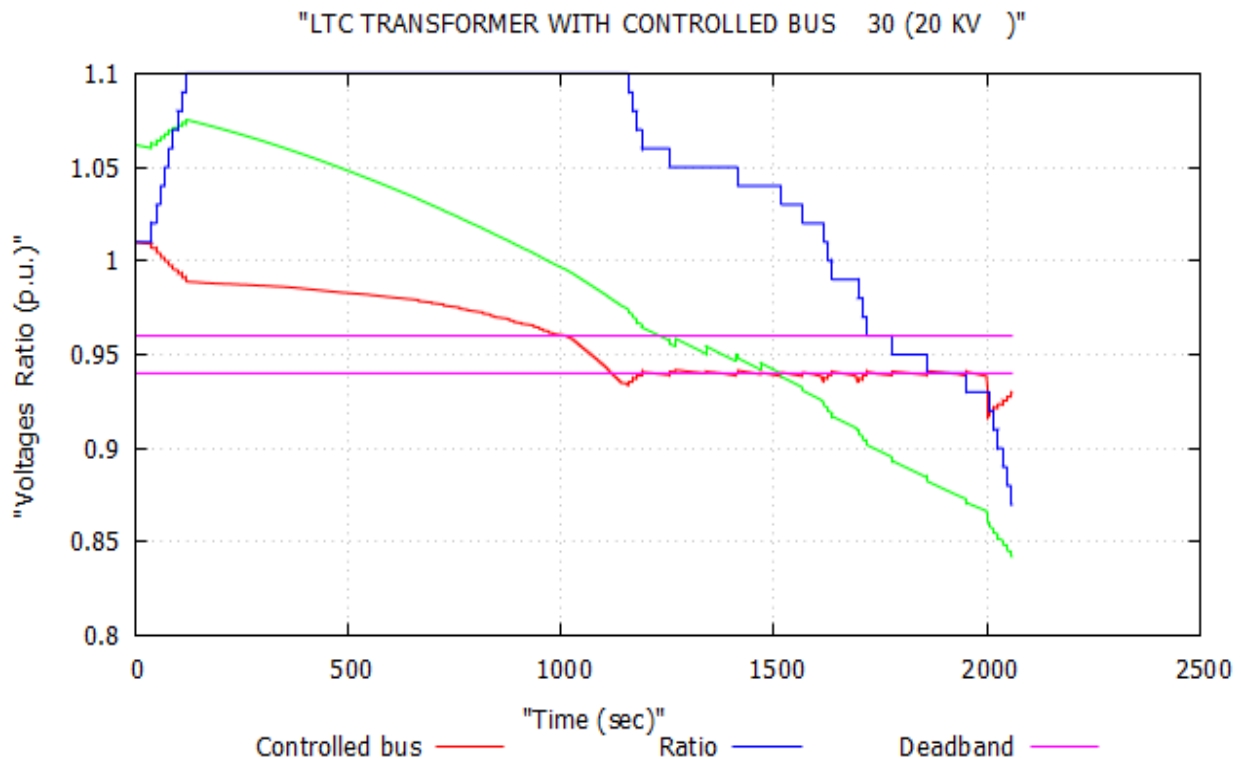
Συγκριτικά με την **προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών** παρατηρείται αύξηση της ΜΜΙ κατά **9.028 MW (35.576%)** και σε σχέση με την **προσομοίωση 2.3 με συστοιχία πυκνωτών** υπάρχει αύξηση κατά **3.986 MW**.

## 5.4 Μείωση τάσης αναφοράς ΣΑΤΥΦ για αύξηση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος

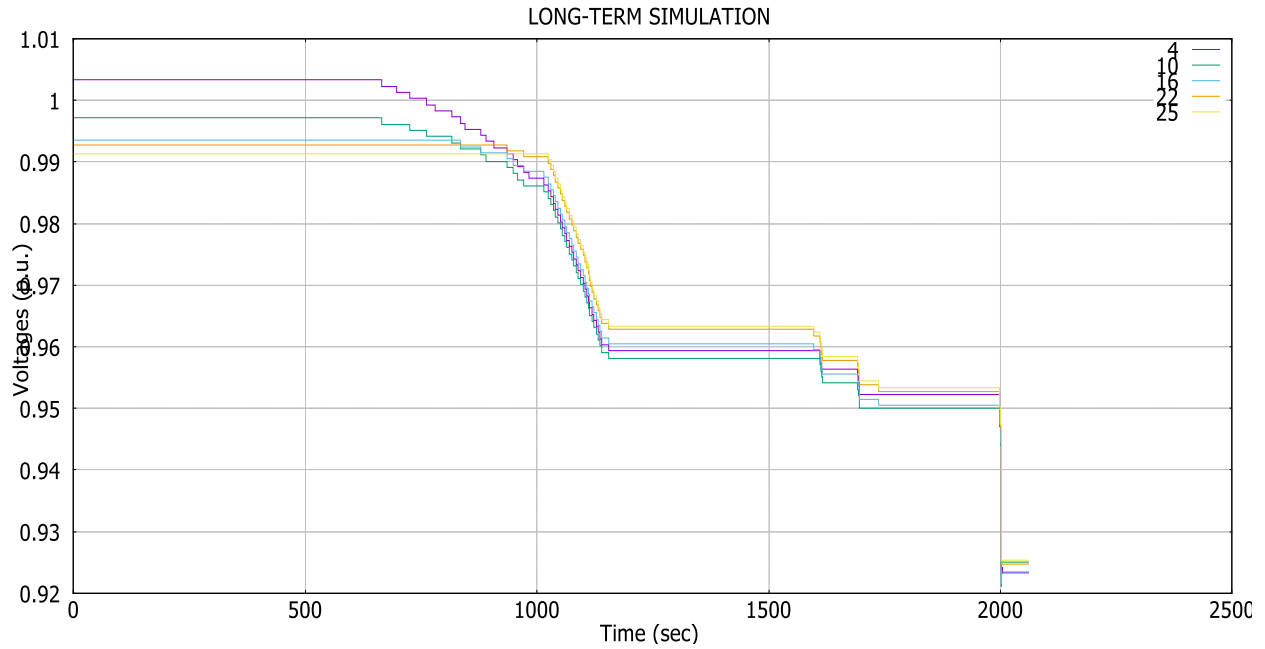
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση της μείωσης της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ στη ΜΜΙ. Για τη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η αλλαγή που εμφανίζει η μείωση τάσης αναφοράς για την **προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών** (ρύθμιση ΣΤ για μεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ



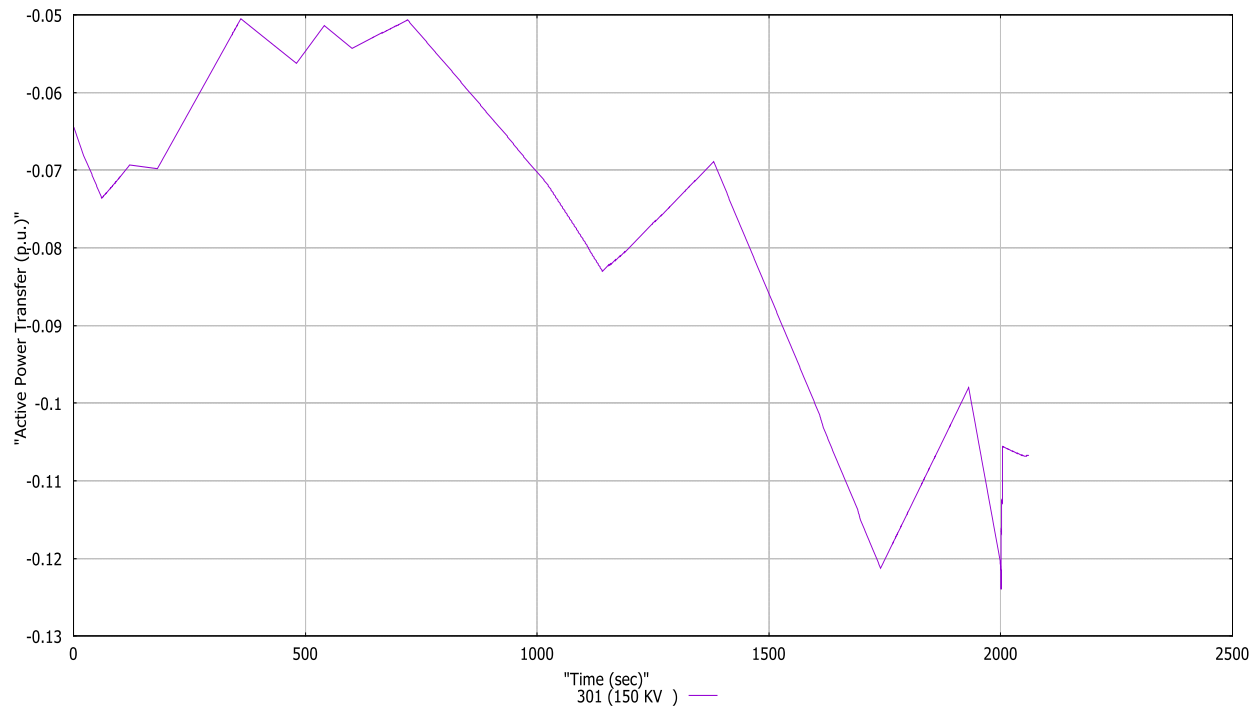
ισχύος). Η προσομοίωση της συγκεκριμένης ενότητας θα αναφέρεται στην συνέχεια της εργασίας ως **προσομοίωση 3.4**. Με σκοπό την καθαρότητα της σύγκρισης, ο αρχικός λόγος μετασχηματισμού παραμένει ίδιος με την **προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών** και μεταβάλλεται η νεκρή ζώνη του μετασχηματιστή από [0.99, 1.1] σε [0.94, 0.96]. Η αλλαγή αυτή εξαναγκάζει το ΣΑΤΥΦ σε μεταβολές του λόγου μετασχηματισμού έτσι ώστε να λειτουργεί με τάσεις εντός των νέων ορίων. Με την έμμεση αλλαγή της τάσης αναφοράς (set point) του ΣΑΤΥΦ μέσω της νέας νεκρής ζώνης, αναμένεται αλλαγή στο φορτίο που καταναλώνεται. Τα σχήματα που παρουσιάζονται παρακάτω (Σχ. 5.51 - 5.55) είναι οι μεταβλητές του μετασχηματιστή διανομής, οι τάσεις των ζυγών ΦΒ παραγωγής, η ροή ενεργού ισχύος, η P-V χαρακτηριστική και η άεργος παραγωγή. Η ροή ενεργού ισχύος παρουσιάζεται και συγκρίνεται με τη ροή της **προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών** ώστε να φανεί η διαφορά της αλλαγής της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Παρόμοια και η άεργος παραγωγή των ΦΒ. Τέλος, σημειώνεται ότι η αρχικοποίηση του  $r_0$  είναι ίδια με αυτή της **προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών** με στόχο την επίδειξη της διαφοράς μεταξύ τους, καθώς το σύστημα θα επιχειρήσει την αλλαγή του με βάση τη νέα νεκρή ζώνη. Επιπρόσθετα, όπως και στην ενότητα 5.3, στον πίνακα κρίσιμων στοιχείων προστίθεται και η ποσοστιαία διαφορά της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε σύγκριση με την **προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών** ώστε να γίνει προφανής η επίδραση της μείωσης της τάσης αναφοράς, σύμφωνα με την εξίσωση (5.1).



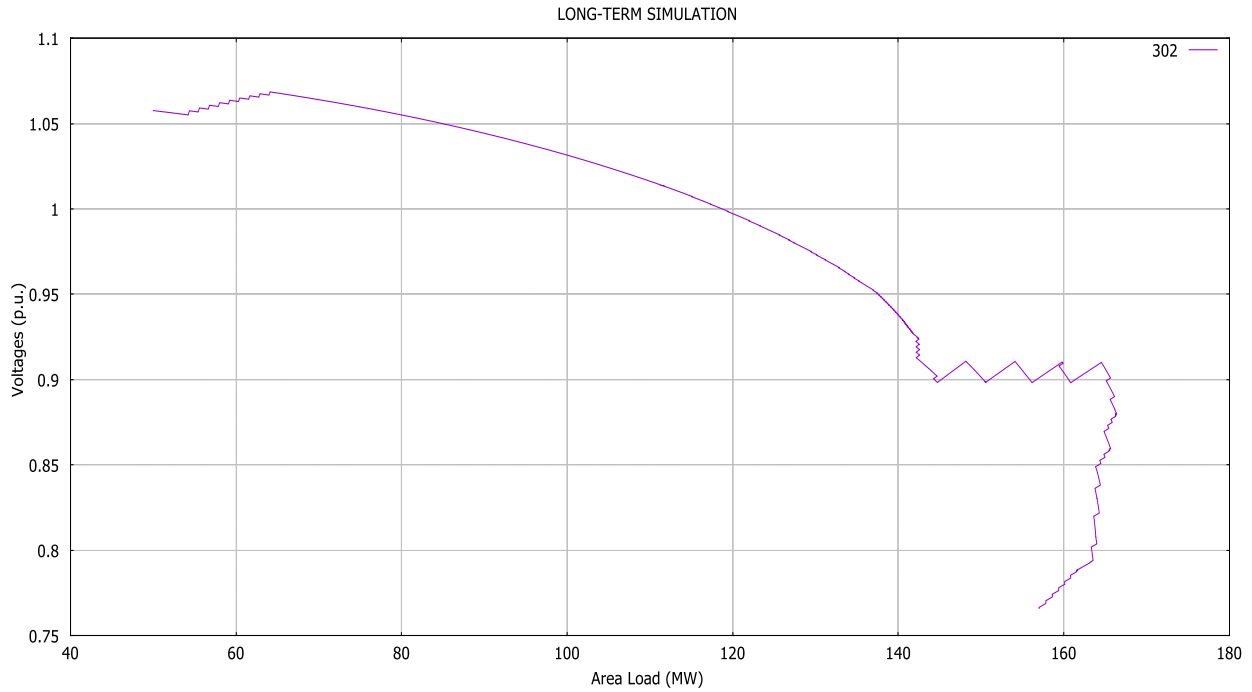
Σχ. 5. 51 Μεταβλητές Μ/Σ διανομής **προσομοίωσης 3.4** (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ)



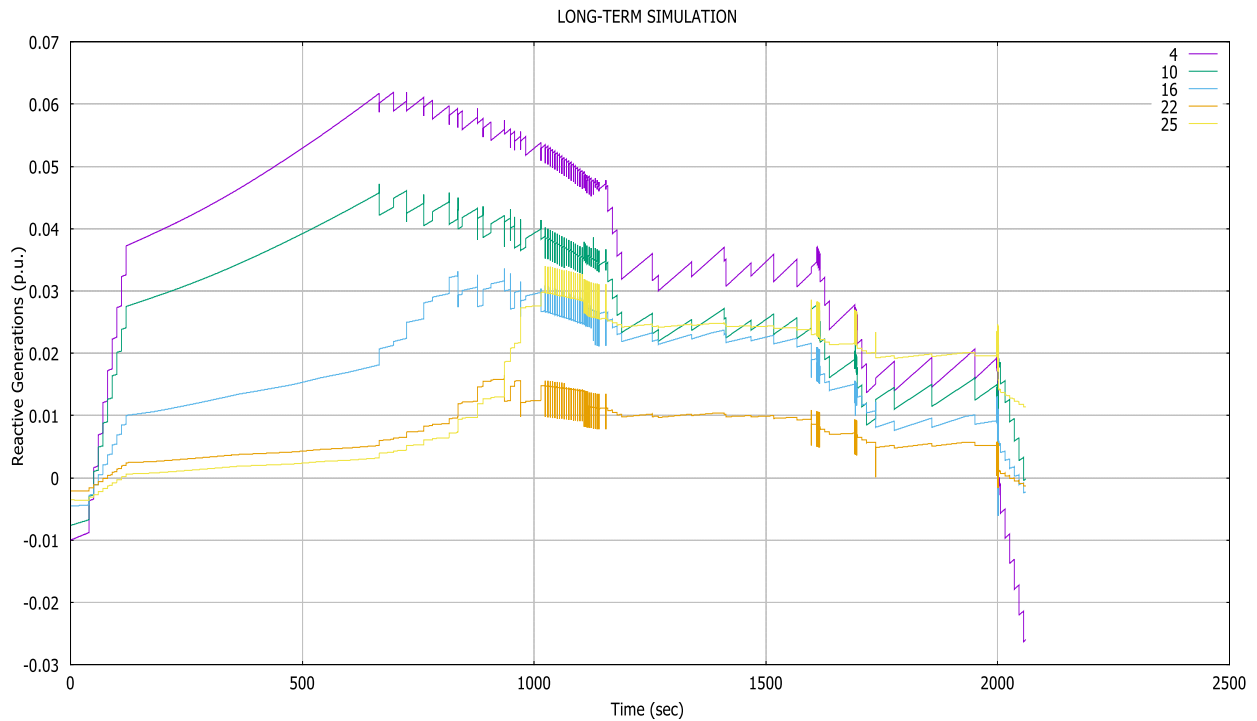
Σχ. 5. 52 Τάσεις ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.4** (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ)



Σχ. 5. 53 Ροή ενεργού ισχύος στον μετασχηματιστή **προσομοίωσης 3.4** (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ)



Σχ. 5. 54 Χαρακτηριστική P-V καμπύλη **προσομοίωσης 3.4** (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ)



Σχ. 5. 55 Άεργος παραγωγή ζυγών ΦΒ παραγωγής **προσομοίωσης 3.4** (Σταθερή τάση με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ)

Συγκριτικά με την **προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών** εντονότερη διαφορά εμφανίζεται στο Σχ. 5.51, όπου η αλλαγή της νεκρής ζώνης εξαναγκάζει το ΣΑΤΥΦ σε συνεχόμενες ανόδους του λόγου μετασχηματισμού μέχρι το μέγιστο επιτρεπτό ώστε να ρίξει τα επίπεδα τάσεων. Η διαταραχή αρχικά ευνοεί αυτή τη διαδικασία καθώς και η ίδια προκαλεί πτώση τάσεων. Στο σημείο όπου η τάση του δευτερεύοντος εισέρχεται εντός ορίων, ο λόγος μετασχηματισμού είναι μέγιστος και λόγω της διαταραχής απαιτείται αντίστοιχα απότομη μείωση ώστε να παραμείνει εντός ορίων. Το αποτέλεσμα είναι η ελεγχόμενη τάση να βγει εκτός ορίων γρήγορα κατά τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, για μικρό όμως χρονικό διάστημα. Σημειώνεται ότι με σωστή αρχικοποίηση δεδομένης της νέας νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ όπως έγινε στις **προσομοιώσεις 1, 2 και 3**, το σύστημα θα παρουσίαζε καλύτερη συμπεριφορά, και η συγκεκριμένη προσομοίωση γίνεται με τις προηγούμενες αρχικοποιήσεις για ευκολότερη σύγκριση της επίδρασης των αλλαγών της **προσομοίωσης 3.4**.

Κατ' αναλογία με τις μεταβολές του λόγου μετασχηματισμού και την εισαγωγή της ελεγχόμενης τάσης εντός της νέας NZ μεταβάλλεται και το επίπεδο των τάσεων της ΦΒ παραγωγής όπως φαίνεται στο Σχ. 5.52. Δεδομένης της ρύθμισης σταθερής τάσης, οι αλλαγές παρουσιάζονται ως τρία διαφορετικά επίπεδα τάσεων καθώς οι τάσεις παρουσιάζουν πτώσεις όταν εξαναγκαστούν εξ' αιτίας της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ και της μεταβαλλόμενης ενεργού ισχύος.

Στην ροή ενεργού ισχύος του Σχ. 5.53 παρουσιάζεται αύξηση της αρνητικής ροής ενεργού ισχύος κατά το διάστημα όπου η ελεγχόμενη τάση βρίσκεται εντός της νέας Νεκρής Ζώνης σε σχέση με την **προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών**. Παραδείγματος χάριν στην χρονική στιγμή 1400s όπου η ισχύς παρουσιάζει την τιμή -0.07αμ στη συγκεκριμένη προσομοίωση, η αντίστοιχη τιμή της **προσομοίωσης 3.3 με συστοιχία πυκνωτών** είναι -0.064αμ. Καθώς μειώνεται η κατανάλωση αυξάνεται η ενεργός ισχύς που τον διαρρέει από την MT στην YT.

Η χαρακτηριστική P-V παρουσιάζει αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος κατά την αρχή της προσομοίωσης όπου αυξάνεται ο λόγος μετασχηματισμού και η YT παρουσιάζει πτώση.

Στο Σχ. 5.55 εξάγεται η άεργος παραγωγή των ΦΒ πάρκων. Διαφορές παρατηρούνται στην άεργο υποστήριξη του Σχ. 5.5 της παρούσας προσομοίωσης σε σχέση με την **προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών**. Η διαφορά στην μορφή είναι αναμενόμενη δεδομένης της αρχικοποίησης του αρχικού λόγου μετασχηματισμού στο ίδιο επίπεδο και στις δύο προσομοιώσεις με αποτέλεσμα την μεταβολή του για την σωστή επαναρχικοποίηση της ελεγχόμενης τάσης εντός της νέας νεκρής ζώνης. Η σημαντική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι δύναται η παροχή αυξημένης αέργου ισχύος, η οποία επιδρά ΜΜΙ όπως επεξηγήθηκε στην **προσομοίωση 3**. Η πρώτη πτώση των τάσεων ταυτίζεται και με την αντίστοιχη πτώση της αέργου παραγωγής που φαίνεται στα Σχ. 5.52 και 5.55.

Στον Πίν. 5.18 παρουσιάζονται τα κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ της **προσομοίωσης 3.4**

Πίνακας 5. 18 Κρίσιμα στοιχεία ΜΜΙ **προσομοίωσης 3.4 (προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών και μειωμένη τάση αναφοράς ΣΑΤΥΦ)**

$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)
0.881	1.01	1.02	1610	166.3430

Από τον πίνακα 5.18 παρατηρείται ότι με την αλλαγή της τάσης αναφοράς του μετασχηματιστή προκύπτει αύξηση της κρίσιμης τάσης και της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος συγκριτικά με την **προσομοίωση 3.3 με συστοιχία πυκνωτών κατά 2.338 MW** και με την **προσομοίωση 1 με συστοιχία πυκνωτών κατά 11.321 MW (44.836%)**, που είναι και τα θεμιτά αποτελέσματα. Ο περιορισμός της τάσης του ΣΑΤΥΦ μειώνει την ενεργό κατανάλωση με αποτέλεσμα τη δυνατότητα έγχυσης περισσότερης αέργου ισχύος, όπως φαίνεται στην σύγκριση μεταξύ των Σχ. 5.55 και 5.50 με αποτέλεσμα την αύξηση της MMI.

Μεγάλη αλλαγή παρατηρείται στον κρίσιμο λόγο μετασχηματισμού  $r_c$ , η οποία αιτιολογείται με την αρχική ανύψωσή και επαναπροσδιορισμό του κατάλληλου  $r_0$  της διάταξης στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή 1.1 αμ, που παρουσιάζεται στις αρχικές χρονικές στιγμές της προσομοίωσης στο Σχ. 5.49.

## 5.5 Συνολική παρουσίαση και σύγκριση προσομοιώσεων

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στις παραπάνω ενότητες, ο πίνακας 5.19 συγκεντρώνει όλα τα κρίσιμα στοιχεία των **προσομοιώσεων 1, 2 και 3** με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Επιπρόσθετα περιλαμβάνει και τη ποσοστιαία μεταβολή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος της κάθε προσομοίωσης σε σχέση με την **προσομοίωση 1** (χωρίς ΦΒ παραγωγή) για τη παρουσίαση της επίδρασης της εκάστοτε ρύθμισης των ηλεκτρονικών ισχύος της ΦΒ παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η μεταβολή ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος των ΦΒ πάρκων, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5.1) όπου  $P_{max}$  η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς της εκάστοτε προσομοίωσης,  $P_{max.1} = 131.223MW$  η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς της **προσομοίωσης 1** και  $P_{total} = 25.25MW$  η ονομαστική συνολική ισχύς από τα ΦΒ πάρκα.

Πίνακας 5. 19 Κρίσιμα στοιχεία των **προσομοιώσεων 1, 2 και 3**

Προσομοίωση	$V_c$ (αμ)	$r_0$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%)
1	0.739	0.99	0.81	1792	131.755	0.000
2.1	0.744	1.00	0.82	1832	135.086	13.192
2.2	0.732	1.00	0.81	1929	136.335	18.139
2.3	0.746	1.00	0.82	1793	136.262	17.850
3.1	0.754	0.99	0.87	1873	140.631	35.152
3.2	0.752	1.00	0.85	1874	139.992	32.622
3.3	0.736	0.99	0.84	1921	139.873	32.150

Η περίπτωση ρύθμισης Σταθερού Συντελεστή Ισχύος (**προσομοίωση 2**) παρουσιάζει βελτίωση συγκριτικά με τη προσομοίωση δίχως ΦΒ παραγωγή (**προσομοίωση 1**), καθώς συνεισφέρει στη παραγωγή ενεργού ισχύος και άρα στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ. Καθώς όμως ο μοναδιαίος συντελεστής ισχύος επιτρέπει αποκλειστικά τη παραγωγή ενεργού ισχύος, η διεσπαρμένη ΦΒ

παραγωγή δεν δύναται να ενισχύσει το ΣΗΕ με άεργο υποστήριξη κατά τη διαταραχή. Η αύξηση της ενεργού παραγωγής επιφέρει και αύξηση της ΜΜΙ στις **προσομοιώσεις 2.1 και 2.2**, καθώς αυξάνει η έγχυση ενεργού ισχύος και επακόλουθα τα επίπεδα τάσεων του συστήματος διανομής. Στη περίπτωση της **προσομοίωσης 2.3** η ενεργός παραγωγή μεταβάλλεται μεταξύ των επιπέδων των **προσομοιώσεων 2.1 και 2.2** με αποτέλεσμα παρεμφερή κρίσιμα στοιχεία με την **προσομοίωση 2.2**.

Παρόμοια, καλύτερη συμπεριφορά από τη προσομοίωση δίχως ΦΒ παραγωγή (**προσομοίωση 1**) επιδεικνύει η ρύθμιση Σταθερής Τάσης (**προσομοίωση 3**) ως προς τη ΜΜΙ και τα επίπεδα των κρίσιμων τάσεων. Σε αντίθεση με την **προσομοίωση 2**, η ΜΜΙ μειώνεται με την αύξηση της ενεργού παραγωγής. Αυτό συμβαίνει επειδή η αύξηση της ενεργού ισχύος προκαλεί μείωση της αέργου λόγω της μέγιστης φαινόμενης που δύναται να παραχθεί. Παράλληλα, η αύξηση ενεργού προκαλεί την αύξηση των ρευμάτων όπου στη **προσομοίωση 3.2** κόβονται λόγω των περιοριστών μειώνοντας την άεργο παραγωγή. Τέλος, η αύξηση των τάσεων λόγω της ενεργού παραγωγής σημαίνει μικρότερη ανάγκη αέργου υποστήριξης.

Με βάση τα αποτελέσματα του Πιν. 5.19 το ΣΗΕ παρουσιάζει πιο ευσταθή λειτουργία με τη ρύθμιση σταθερής τάσης (**προσομοίωση 3**) καθώς παρουσιάζει τη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ. Επιπρόσθετα, διατηρεί τα επίπεδα των τάσεων των ζυγών παραγωγής, καθώς και των κοντινών ζυγών σε υψηλότερα επίπεδα επιτρέποντας περισσότερα βήματα λειτουργίας στο ΣΑΤΥΦ με αποτέλεσμα την αύξηση της χρονικής διάρκειας όπου το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά τη διαταραχή. Το πόρισμα είναι λογικό καθώς η ρύθμιση σταθερής τάσης όχι μόνο διατηρεί σταθερές τις τάσεις των ΦΒ αλλά επιτρέπει και τη παραγωγή αέργου ισχύος δίνοντας δυνατότητα αέργου υποστήριξης όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.8.2.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πιν. 5.20 με τα ίδια κρίσιμα στοιχεία του Πιν. 5.19 για τις προσομοιώσεις της ενότητας 5.3 και 5.4. Σημειώνεται πως η μεταβολή ισχύος του πίνακα 5.20 υπολογίζεται συγκριτικά με την αντίστοιχη **προσομοίωση 1 με ένταξη συστοιχίας πυκνωτών**. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της εξίσωσης (5.1) θεωρώντας ως  $P_{max.1} = 154.876 \text{ MW}$ , δηλαδή την αντίστοιχη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ της.

Πίνακας 5. 20 Κρίσιμα στοιχεία **προσομοιώσεων 1, 2.3 και 3.3** με ένταξη διάταξης πυκνωτών

Προσομοίωση	$V_c$ (αμ)	$r_o$	$r_c$	$t_c$ (sec)	$P_{max}$ (MW)	Μεταβολή $P_{max}$ (%)
1 με συστοιχία πυκνωτών	0.832	1.03	0.87	1722	155.022	0.000
2.3 με συστοιχία πυκνωτών	0.832	1.03	0.87	1745	160.019	19.790
3.3 με συστοιχία πυκνωτών	0.854	1.01	0.92	1695	164.005	35.576
3.4	0.881	1.01	1.02	1610	166.343	

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.3, η διάταξη πυκνωτών και η αύξηση της αρχικής τάσης του ζυγού MT του μετασχηματιστή βελτίωσε τη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διαταραχή, αυξάνοντας τη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ και φέρνοντας την κρίσιμη τάση σε πιο λογικά επίπεδα για κάθε προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε. Αντίστοιχα με τις **προσομοιώσεις 1, 2 και 3**, η καλύτερη συμπεριφορά εμφανίζεται με τη ρύθμιση σταθερής τάσης που εμφανίζει τη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ στον ταχύτερο χρόνο και σε λογικότερο επίπεδο τάσης.

Η **προσομοίωση 3.4** (μείωση τάσης αναφοράς ΣΑΤΥΦ) παρουσιάζει τη βέλτιστη δυνατή συμπεριφορά του συστήματος σε σύγκριση με όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Ο περιορισμός της τάσης του ΣΑΤΥΦ μειώνει το φορτίο και επιτρέπει την αυξημένη παραγωγή αέργου με αποτέλεσμα η ΜΜΙ να εμφανίζεται σε γρήγορο χρονικό διάστημα εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, να είναι η μέγιστη δυνατή και παράλληλα η κρίσιμη τάση  $V_c$  να βρίσκεται σε επιθυμητό επίπεδο.





# 6 Συμπεράσματα και Προοπτικές

## 6.1 Σύνοψη και βασικά συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε εκτεταμένη επισκόπηση της τεχνολογίας των ΦΒ στοιχείων και συστημάτων και στη συνέχεια παρήχθησαν χαρακτηριστικές καμπύλες Ρεύματος–Τάσεως, Ισχύος–Τάσεως και χρονοσειρές ισχύος από πραγματικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας μέσω κώδικα MATLAB, αξιοποιώντας τις μαθηματικές εξισώσεις που προκύπτουν από τα ηλεκτρικά ισοδύναμα και τα στοιχεία που δίνονται από τον κατασκευαστή του ΦΒ πλαισίου PV A-300, Sunpower. Επίσης αναπτύχθηκε αλγόριθμος Διαταραχής και Παρακολούθησης (Perturb and Observe) που εξασφαλίζει λειτουργία στο Σημείο Μέγιστης Απολαβής Ισχύος (MPPT). Από τον εσωτερικό έλεγχο των βημάτων που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος φάνηκε ότι είναι αποδοτικός και γρήγορος αφού εκτελεί συνήθως δύο έως εννέα ανακυκλώσεις για κάθε νέα τιμή ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια, μέσω του προγράμματος WPSTAB, προσομοιώθηκε δίκτυο διανομής Μέσης Τάσεως συνδεδεμένο μέσω μετασχηματιστή (150/20 kV) με ΣΑΤΥΦ σε ακτινικό δίκτυο μεταφοράς Υψηλής Τάσεως. Στο σύστημα αυτό εισήχθη διαταραχή συνεχούς αύξησης αγωγιμότητας σε απομακρυσμένο ζυγό φορτίου YT και μελετήθηκε η απόκριση του δικτύου στη μακροπρόθεσμη κλίμακα πραγματοποιώντας και συγκρίνοντας προσομοιώσεις με διαφορετικά επίπεδα ενεργού παραγωγής από διεσπαρμένη φωτοβολταϊκή παραγωγή στο δίκτυο διανομής και διαφορετικές ρυθμίσεις στους μετατροπείς ισχύος που την ελέγχουν.

Πιο συγκεκριμένα, οι ρυθμίσεις των μετατροπέων που εξετάστηκαν είναι η ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος και Σταθερής Τάσης όπως αναλύθηκαν στην ενότητα 1.8.2. Οι προσομοιώσεις ακολούθησαν την εξής μορφή για την ίδια διαταραχή:

1. Αρχικά προσομοιώθηκε το σύστημα χωρίς ΦΒ παραγωγή, θεωρώντας τους αντίστοιχους ζυγούς ως φορτία. Η προσομοίωση αυτή αποτελεί μέτρο σύγκρισης για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις.
2. Στη συνέχεια προσομοιώθηκε το σύστημα με ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος στους μετατροπείς. Πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις, μια για το 50% της ονομαστικής παραγωγής, μία για το 90% και μία αξιοποιώντας τη χρονοσειρά ισχύος που προέκυψε από τον κώδικα μέγιστης απολαβής ισχύος που αναπτύχθηκε στο 4ο Κεφάλαιο της Διπλωματικής.
3. Κατ' αντιστοιχία με τη παραπάνω περίπτωση 2, πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες τρεις προσομοιώσεις με ρύθμιση Σταθερής Τάσης στους μετατροπείς ισχύος.
4. Στη συνέχεια αυξήθηκε η αρχική τάση του ζυγού YT του μετασχηματιστή και εντάχθηκε συστοιχία πυκνωτών στον απομακρυσμένο ζυγό φορτίου ώστε η κρίσιμη τιμή της τάσης κατά την εμφάνιση της Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος να είναι πλησιέστερη σε κανονικές τιμές και εξετάστηκε πάλι η συμβολή των ΦΒ στην ευστάθεια τάσεως, ενώ

πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ της προσομοίωσης δίχως και με τη συστοιχία των πυκνωτών ενταγμένη.

5. Τέλος εξετάστηκε και η περίπτωση μείωσης της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ με σκοπό την αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Για κάθε προσομοίωση παρουσιάστηκαν γραφικές παραστάσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν τις τάσεις πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και τον λόγο μετασχηματισμού (λήψη) του ΣΑΤΥΦ, τα ρεύματα και τάσεις των ζυγών ΦΒ παραγωγής, την άεργο παραγωγή των ΦΒ στις προσομοιώσεις Σταθερής Τάσης και τέλος την χαρακτηριστική Ισχύος-Τάσεως του απομακρυσμένου ζυγού φορτίου, απ' όπου προκύπτει η Μέγιστη Μεταφορά Ισχύος προς τον ζυγό. Μέσω των γραφικών παραστάσεων προκύπτουν τα κρίσιμα στοιχεία της κάθε προσομοίωσης, δηλαδή η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς, όπως και ο λόγος μετασχηματισμού, ο χρόνος και η τάση κατά τη λειτουργία στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Σημαντικό κριτήριο αποτελεί το εάν η κρίσιμη τάση εμφανίζεται εντός της περιοχής λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση της τάσης στη διανομή ακόμη και σε συνθήκες Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος στο σύστημα μεταφοράς.

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις παρατηρήθηκε ότι στις προσομοιώσεις με Σταθερό Συντελεστή Ισχύος η αύξηση της ενεργού παραγωγής των ΦΒ επέφερε αύξηση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος. Αντίθετα, στις προσομοιώσεις με Σταθερή Τάση η αύξηση της ενεργού παραγωγής προκαλεί μείωση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος. Η συμπεριφορά αυτή κρίνεται λογική καθώς στη δεύτερη περίπτωση η άεργος υποστήριξη προέρχεται από τη ρύθμιση τάσης των μετατροπέων. Όσο αυξάνει η ενεργός παραγωγή των ΦΒ η τάση τους αυξάνει και απαιτείται μειωμένη άεργος παραγωγή, με αποτέλεσμα μικρότερη άεργο υποστήριξη και ελάττωση της ΜΜΙ στο σύστημα μεταφοράς. Σημειώνεται επίσης ότι σε όλες τις προσομοιώσεις οι κρίσιμες τάσεις βρέθηκαν εντός της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ.

Γενικά παρατηρήθηκε καθολικά καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος ως προς τη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης, όταν εφαρμόζεται η ρύθμιση Σταθερής Τάσης στους μετατροπείς των ΦΒ. Συγκεκριμένα, μεταξύ των προσομοιώσεων με ίδιο επίπεδο ΦΒ παραγωγής για ρύθμιση Σταθερού Συντελεστή Ισχύος και Σταθερής Τάσης παρατηρήθηκε αύξηση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος συγκριτικά με την προσομοίωση δίχως ΦΒ παραγωγή κατά **3.331 MW (13.192%** επί της εγκατεστημένης ισχύος των ΦΒ) για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και **8.876 MW (35.152%)** για σταθερή τάση με ενεργό παραγωγή στο 50% της ονομαστικής. Αντίστοιχα παρατηρήθηκε αύξηση ΜΜΙ κατά **4.580 MW (18.139%)** για Σταθερό Συντελεστή Ισχύος και **8.217 (32.662%)** για Σταθερή Τάση των ΦΒ με ενεργό παραγωγή στο 90% της ονομαστικής. Τέλος με τη χρονομεταβλητή χρονοσειρά ΦΒ ισχύος παρατηρήθηκε αύξηση ΜΜΙ κατά **4.487 MW (17.850%)** για μοναδιαίο Συντελεστή Ισχύος και **8.098 MW (32.150%)** για Σταθερή Τάση. Σημειώνεται και πάλι ότι όλα τα ποσοστά αύξησης αναφέρονται επί της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος των ΦΒ. Έτσι ενώ η αριθμητική διαφορά στην αύξηση της ΜΜΙ είναι μόνο μερικά MW, είναι σημαντικό ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος των ΦΒ. Η παρατήρηση αυτή έχει μεγάλη σημασία γιατί δείχνει ότι εάν μεγάλος αριθμός ΦΒ συστημάτων μετέχει στην υποστήριξη αέργου ισχύος η δυνατότητα βελτίωσης της ευστάθειας τάσεως μπορεί να γίνει υπολογίσιμη.

Η διαφορά στην αύξηση της ΜΜΙ όταν υπάρχει ρύθμιση τάσης από τα ΦΒ έγκειται, όπως προαναφέρθηκε, στο ότι στην περίπτωση αυτή παρέχεται στο σύστημα άεργος υποστήριξη. Ως προς την κατανάλωση ισχύος από τα φορτία, αυτή δεν αλλάζει σημαντικά με τη ρύθμιση Σταθερής Τάσης των ΦΒ, δεδομένου ότι η τάση στη γραμμή διανομής ρυθμίζεται ούτως ή άλλως από το ΣΑΤΥΦ μέχρι το σημείο της ΜΜΙ, όπως προαναφέρθηκε.

Η ανύψωση της υψηλής τάσης στο σύστημα μεταφοράς και η ένταξη της συστοιχίας πυκνωτών βελτίωσε σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος, προκαλώντας αύξηση στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ και στα επίπεδα των κρίσιμων τάσεων κάθε προσομοίωσης. Βάση για σύγκριση θεωρείται πάλι η αντίστοιχη προσομοίωση δίχως ΦΒ παραγωγή. Δεδομένου ότι η προσομοίωση χωρίς ΦΒ παρείχε Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ ίση με **155.022 MW**, παρατηρήθηκε αύξηση κατά **4.997 MW (19.79%)** στη προσομοίωση με Σταθερό Συντελεστή Ισχύος (για μεταβαλλόμενη χρονοσειρά ΦΒ ισχύος) και **8.983 MW (35.576%)** στη προσομοίωση με Σταθερή τάση για την ίδια χρονοσειρά ΦΒ ισχύος. Παρατηρείται ότι τα ποσοστά αύξησης της ΜΜΙ συγκριτικά με την προσομοίωση δίχως ΦΒ παραγωγή για τις περιπτώσεις με συστοιχία πυκνωτών είναι ακόμη μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα που παρουσιάστηκαν στην παραπάνω παράγραφο.

Τέλος η μείωση της τάσεως διανομής του ΣΑΤΥΦ, σε προσομοίωση με τα ΦΒ σε ρύθμιση σταθερής τάσης και με μεταβαλλόμενη χρονοσειρά ΦΒ ισχύος (περίπτωση με συστοιχία πυκνωτών) συνέβαλε στη περεταίρω αύξηση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος κατά **2.338 MW** συγκριτικά με την ίδια προσομοίωση με την αρχική τάση διανομής. Η αλλαγή της τάσης του ΣΑΤΥΦ αυτή προκάλεσε μείωση του φορτίου και έδωσε περιθώρια παραπάνω αέργου υποστήριξης, η οποία συνέβαλλε στην αύξηση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος.

## 6.2 Προοπτικές περαιτέρω έρευνας

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώθηκε στη προσομοίωση ηλεκτρικού μοντέλου ΦΒ διάταξης με βάση τις εξισώσεις που προκύπτουν και την ευρύτερη επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης. Δόθηκε επίσης το θεωρητικό υπόβαθρο για περεταίρω μελέτη φωτοβολταϊκών συστημάτων το οποίο δεν αξιοποιήθηκε σε εφαρμογή.

Στις προοπτικές παραπέρα μελέτης και έρευνας δύναται να μελετηθεί μια φωτοβολταϊκή διάταξη σε επίπεδο κατασκευής, προσομοιώνοντας και συγκρίνοντας διατάξεις με διαφορετικές φωτοδιόδους και προσμίξεις για ίδιες εξωτερικές συνθήκες σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 2. Το συγκεκριμένο κομμάτι αφορά κυρίως την επιστήμη των υλικών και ξεφεύγει του ενδιαφέροντος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά αποτελεί καίριο και σημαντικό πρόβλημα της σημερινής εποχής.

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η μελέτη της βέλτιστης τοποθέτησης ΦΒ συστημάτων βάση των γωνιών μεταξύ ηλίου και συλλέκτη με ταυτόχρονο συνυπολογισμό των καμπυλών διακύμανσης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.3 με στόχο την

επίτευξη του βέλτιστου φωτορεύματος με βάση τους παράγοντες αυτούς. Οι μελέτες αυτές είναι απαραίτητες σε πρακτικό επίπεδο για τη κατασκευή νέων φωτοβολταϊκών πάρκων.

Επιπρόσθετα προοπτικές περαιτέρω έρευνας εμφανίζει η επίδραση της σκίασης σε μια φωτοβολταϊκή διάταξη και συγκεκριμένα η επίδραση σε φωτοβολταϊκό πάρκο υπό συνθήκες μικρής, μερικής και ολικής σκίασης στην παραγωγή ισχύος. Ταυτόχρονα η μελέτη μπορεί να συνδυαστεί με πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα για την διεξαγωγή ρεαλιστικών προσομοιώσεων οι οποίες μπορούν κατ' αντιστοιχία με τη διαδικασία του Κεφαλαίου 5 της παρούσας διπλωματικής να ενταχθούν σε σύστημα για μελέτη της επίδρασης σκίασης στη συμπεριφορά δικτύου διανομής.

Σε προγραμματιστικό επίπεδο, η ανάπτυξη βέλτιστων αλγορίθμων μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT) από τα ΦΒ πάρκα είναι απαραίτητη. Στη συγκεκριμένη εργασία γράφτηκε αλγόριθμος με πρότυπο τον αλγόριθμο διαταραχής και παρακολούθησης (perturb and observe), ενώ αναλύθηκε και αλγόριθμος επαύξησης αγωγιμότητας (Incremental conductance algorithm). Στη πράξη υπάρχουν περισσότεροι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Η μελέτη της διαφοράς μεταξύ αλγορίθμων σε επίπεδο ταχύτητας αλλά και επιτυχούς διασύνδεσης με τον εξοπλισμό ισχύος επιδέχεται παραπάνω έρευνας.

Ακόμη, με βάση τις προσομοιώσεις του συγκεκριμένου δικτύου εξάχθηκαν σημαντικά συμπεράσματα για την επίδραση διεσπαρμένης φωτοβολταϊκής παραγωγής στη μελέτη ευστάθειας τάσης τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως. Περαιτέρω στατιστικά στοιχεία θα μπορούσαν να προκύψουν από τη χρονοσειρά ισχύος που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 δεδομένου ότι αξιοποιήθηκαν τελικά μόνο τα πρώτα 2100 δευτερόλεπτα. Παραπάνω προσομοιώσεις μπορούν να προκύψουν επιλέγοντας διαστήματα ίδιας διάρκειας της ίδιας χρονοσειράς για διαφορετικά τμήματά της, δηλαδή με διαφορετική εκκίνηση και τερματισμό.

Ταυτόχρονα, στη συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκαν ρυθμίσεις Σταθερού Συντελεστή Ισχύος και Σταθερής Τάσης. Η μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί και για ρυθμίσεις χαρακτηριστικής Αέργου Ισχύος – Τάσεως  $Q(V)$  και χαρακτηριστικής Συντελεστή Ισχύος-Ενεργού Ισχύος  $\cos\phi(P)$  που αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.8.2.

Τέλος, στη μελέτη ευστάθειας τάσεως είναι χρήσιμη η περαιτέρω εξέταση δικτύων διανομής, τόσο σε κλίμακα όσο και σε διασύνδεση, καθώς η τοπολογία του δικτύου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ρύθμιση της τάσης. Επιπλέον εξετάστηκε ένα απλό ακτινικό δίκτυο μεταφοράς, στο οποίο θεωρήθηκε ότι το διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσωπεύεται από μία σταθερή ισοδύναμη πηγή Thevenin. Στην πράξη όμως τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι βρογχοειδή και εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα. Αυτή η πολυπλοκότητα των δικτύων μπορεί να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εξετάστηκαν.

# Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς, 'Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας', Αθήνα 2001.
- [2] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, 'Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος', Εκδόσεις Συμμετρία.
- [3] Π. Σ. Γεωργιλιάκης, 'Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας', Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Ε.Μ.Π.
- [4] Β. Κ. Παπαδιά, 'Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας', Τόμοι Ι,ΙΙ Αθήνα 1985.
- [5] Thomas Ackermann, Göran Andersson, Lennart Söder, 'Distributed Generation: a Definition', Department of Electric Power Engineering, Royal Institute of Technology, Electric Power Systems.
- [6] Σ. Ν. Μανιάς, 'Ηλεκτρονικά Ισχύος', Εκδόσεις Συμμετών.
- [7] [Online] EE340, 'Power Flow Analysis'.
- [8] P. Kundur, 'Power System Stability and Control', 1st edition. New York: McGraw-Hill Education, 1994.
- [9] T. van Cutsem, Κ. Βουρνάς, 'Voltage Stability of Electric Power Systems', Springer Science & Business Media, 1998.
- [10] C. W. Taylor, 'Power system voltage stability', McGraw-Hill Ryerson, Limited, 1994.
- [11] Κ. Βουρνάς, 'Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα', Αθήνα 1999.
- [12] Γ. Πριονιστής, 'Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή για Βελτίωση Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ', Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2018.
- [13] Π. Χ. Κοτσαμπόπουλος, 'Προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο επιδράσεων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής με χρήση ψηφιακών μοντέλων και πραγματικού εξοπλισμού', Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάιος 2017.
- [14] [Online], 'Energy Bands Classification and Explanation'.
- [15] Thomas Zimmer, 'Ημιαγωγοί και αγωγοί P-N', University of Bordeaux, France.
- [16] [Online] 'Difference between Conductor, Semiconductor and Insulator'.
- [17] [Online] 'Difference between P-type and N-type'.
- [18] Κ. Θ. Δέρβος, 'Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Από τη θεωρία στην πράξη', Ε.Μ.Π. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ, Αθήνα, Ιανουάριος 2013.
- [19] B. Van Zeghbroeck, 'Principles of Semiconductor Devices', University of Colorado.

- [20] Δ. Λαμπράκης, ‘Αναλογικά Ηλεκτρονικά-Διάλεξη 2: Δίοδος pn’.
- [21] Muhamad Iqbal, ‘An introduction to Solar Radiation’, Department of Mechanical Engineering  
The University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [22] Μ. Π. Παπαδόπουλος, ‘Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές’, Αθήνα 1997.
- [23] [Online] Sunpower A300 Cell Datasheet.
- [24] Giovanni Petrone, Carlos Andres Ramos-Paja, Giovanni Spagnuolo, ‘Photovoltaic Sources Modeling’, Wiley, IEE Press 2017.
- [25] Ferdaous Masmoudi, Fatma Ben Salem, Nabil Derbel, ‘Identification of Internal Parameters of a MonoCrystalline Photovoltaic Cell Models and Experimental Ascertainment’, INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH 2014.
- [26] Azem Hysa, ‘Modeling and Simulation of the Photovoltaic Cells for Different Values of Physical and Environmental Parameters’, Emerging Science Journal December 2019.
- [27] Almantas Pivrikas, Bronson Philippa<sup>3</sup>, Ronald D. White, Gytis Juska, ‘Photocarrier lifetime and recombination losses in photovoltaic systems’.
- [28] Dave Freeman, ‘Introduction to Photovoltaic Systems MPPT’, November 2010.
- [29] Saad Motahhir, Aboubakr El Hammoumi, Abdelaziz El Ghzizal, ‘The Most Used MPPT Algorithms Review and the Suitabl Low-cost Embedded Board for Each Algorithm’, 2019.
- [30] Ali M. Eltamaly, Hassan M. H. Farh, ‘Modern Maximum PowerPoint Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems’, εκδόσεις SPRINGER.
- [31] Gangavarapu Mamatha, ‘Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation for PV Applications’, International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 6 (2), 2015.
- [32] Agnes M. Nakiganda, Thierry Van Cutsem, Petros Aristidou, ‘Microgrid operational optimization with dynamic voltage security constraints’, IEEE Madrid PowerTech, pages 1–6, 2021.
- [33] Ι. Α. Τσούνης, ‘Προσέγγιση Στοχαστικής Παραγωγής Αιολικών Πάρκων για Μακροπρόθεσμη Ανάλυση Ευστάθειας Τάσης’, Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2018.
- [34] Online, <https://www.nrcan.gc.ca/energy/renewable-electricity/solar-photovoltaic/18409>  
Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας Καναδά

