



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

## Ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ σε δίκτυα με διεσπαρμένη παραγωγή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκιάτης Γ. Ανδρέας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015





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

## Ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ σε δίκτυα με διεσπαρμένη παραγωγή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκιάτης Γ. Ανδρέας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

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

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

.....  
Πάυλος Γεωργιλάκης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....  
**Γκιάτης Γ. Ανδρέας**

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

Copyright © Γκιάτης Γ. Ανδρέας, 2015  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Η αυξημένη διείσδυση φωτοβολταϊκής παραγωγής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) έχει οδηγήσει με το πέρασ του χρόνου σε ανάγκη είτε ελέγχου του δικτύου με συγκεκριμένες συσκευές ρύθμισης είτε σε αναβάθμιση των δικτύων μέσω αναβάθμισης των γραμμών διανομής για καλύτερη ποιότητα ισχύος και μικρότερη πτώση τάσης. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τη συνεχή βελτίωση των δικτύων αλλά και την είσοδο μηχανισμών ρύθμισης τάσης οι οποίοι συνεχώς βελτιώνονται και αναβαθμίζονται.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται ο έλεγχος ρύθμισης τάσης σε παρουσία και μη διεσπαρμένης παραγωγής μέσω μετασχηματιστών ΣΑΤΥΦ. Εξετάστηκαν δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων ρύθμισης της τάσης, ο τοπικός και ο συντονισμένος έλεγχος. Και οι δύο μέθοδοι αποσκοπούν στη σωστή ρύθμιση τάσης στους ζυγούς του δικτύου με διαφορετικό τρόπο χειρισμού. Στην παρούσα εργασία επικράτησε ο τοπικός έλεγχος στον οποίο δεν υπάρχουν τηλεπικοινωνιακά μέσα μεταξύ των διαφόρων συσκευών ρύθμισης τάσης τα οποία θα ήταν και ακριβά και απαιτούν εργασία για να εγκατασταθούν.

Ο έλεγχος εξετάστηκε στη Μ/Τ με τη χρήση ενός μετασχηματιστή ΣΑΤΥΦ ως ρυθμιστή τάσης έχοντας ως δεδομένα μόνο τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος στο δευτερεύον του Μ/Σ και σε περίπτωση ύπαρξης διεσπαρμένης παραγωγής την πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής της επόμενης μέρας. Συνεπώς έγινε ρύθμιση τάσης στο άκρο της γραμμής μέσω ΣΑΤΥΦ, με ενεργοποιημένη τη λειτουργία αντιστάθμισης πτώσης τάσης (LDC) για τον υπολογισμό της πτώσης είτε ανύψωσης τάσης, γνωρίζοντας την αντίσταση  $R$  και την αντίδραση  $X$  της γραμμής διανομής. Σε περίπτωση μεγάλης διείσδυσης φωτοβολταϊκών βέβαια έγινε συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και ρύθμισης αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών.

Το δίκτυο προσομοιώθηκε στο περιβάλλον Simulink του προγράμματος Matlab. Ελέγχθηκαν και προσομοιώθηκαν διάφορα μοντέλα δικτύου είτε με μία γραμμή διανομής είτε με περισσότερες και είτε με συγκεντρωμένο φορτίο είτε με διανεμημένα φορτία σε όλη τη γραμμή διανομής. Σε κάθε περίπτωση η δυσκολία και η πρόκληση σωστής λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ με LDC ήταν στην παρουσία φωτοβολταϊκής παραγωγής, στην οποία υπάρχει ανάλογα με το εύρος διείσδυσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής, αντιστροφή ενεργού ισχύος στο δίκτυο και μεγάλη ανύψωση τάσης στο ΣΚΣ (Σημείο Κοινής Σύνδεσης) η οποία είναι δύσκολο να αντισταθμιστεί μόνο με αντιστάθμιση πτώσης τάσης.

Σε κάθε περίπτωση δικτύου βρέθηκαν τρόποι αντιμετώπισης της ανύψωσης είτε της πτώσης τάσης ώστε τελικά όλο το δίκτυο να λειτουργεί σε αποδεκτές τιμές τάσης. Τα αποτελέσματα συνεργασίας ΣΑΤΥΦ με LDC και αντιστροφών όπου χρειάζεται είναι ενθαρρυντικά.

**Λέξεις κλειδιά:** ρύθμιση τάσης, τοπικός έλεγχος, διεσπαρμένη παραγωγή, φωτοβολταϊκά συστήματα, αντιστροφείας, μετασχηματιστής ΣΑΤΥΦ, αντιστάθμιση πτώσης τάσης, έλεγχος αέργου ισχύος, μέση τάση, αλγόριθμος, Matlab

## Abstract

The increasing PV penetration in power systems has led over time the continuous need either to regulate the voltage of the feeders using various regulating devices or to upgrade the existing electric network for better power flow and lower voltage rise or drop. Much research has been carried out for the continuous improvement of the power system and many regulating devices have been introduced in order to achieve better overall performance of the whole electrical network.

This diploma thesis examines the voltage regulation control in the presence or not of distributed generation using as a regulating device only an on-load-tap-changer (OLTC). Two basic categories have been examined, local voltage control and coordinated voltage control. Both aim to control the voltage of the whole electric network in acceptable operating limits in different ways. In this thesis the local voltage control has prevailed due to the high cost of upgrading the network system with communicating devices.

The medium voltage power system has been examined using only a regulating transformer (OLTC) as a regulating device. The voltage control was local using only the voltage and the current of the secondary of the transformer as well as the resistance  $R$  and impedance  $X$  of the distribution line. In the presence of DG it's also required to have the load and production forecast usually of the next day. Basically it's the OLTC with LDC settings enabled. In high penetration level of DG there has been a cooperation of OLTC with the inverters of the PVs in order to maintain operating voltage profile.

The Matlab/Simulink software package was used to carry out this assessment. Many simulations have been carried out with various load profiles and PV penetration as well as using one or more feeders. The load profile was simulated both as centralized as well as distributed at the feeder. The challenge of voltage regulation was in the presence of PV penetration in which there is reverse power flow and voltage rise at the end user. It was really hard to regulate the voltage only using an OLTC with LDC enabled.

However concerning each simulation case there have been found ways to properly regulate the voltage rise or drop and will be presented below. The results of cooperation of OLTC with LDC enabled and inverters for reactive power control are promising and provide a good picture of proper voltage regulation.

**Key words:** voltage regulation, local voltage control, distributed generation, photovoltaic systems, inverter, OLTC transformer, line drop compensation, reactive power control, medium voltage, algorithm, Matlab

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω θερμά τον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία της οποίας το θέμα με ενδιέφερε σε μεγάλο βαθμό. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με τον οποιοδήποτε τρόπο με βοήθησαν στην εκπόνηση της εργασίας μου στο εργαστήριο των Σ.Η.Ε. και κυρίως το διδακτορικό και ερευνητή Πάνο Κοτσαμπόπουλο και τον απόφοιτο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Μάριο Μανιατόπουλο οι οποίοι με κάθε δυνατό τρόπο με καθοδήγησαν και με βοήθησαν στην ολοκλήρωσή της. Ήταν απόλυτα συνεργάσιμοι και υπομονετικοί καθ' όλη τη διάρκεια συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη διεκπεραίωσή της. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και το φίλο και απόφοιτο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Νίκο Στυλιάρá που επίσης με βοήθησε σε μεγάλο βαθμό στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συνάδελφους μου, Παναγιώτη, Δημήτρη, Γιάννη, Μάριο, Γιώργο, Νίκο, Αριστέα, Ρανώ, Μαρία, Ελένη, Στέλλα με τους οποίους πέρασα μεγάλο κομμάτι της φοιτητικής μου ζωής και μοιραστήκαμε πολλές σκέψεις και ανησυχίες. Τους εύχομαι τα καλύτερα σε επαγγελματικό και προσωπικό επίπεδο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την τεράστια υποστήριξή τους και κατανόηση τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και αφιερώνω την εργασία στη μητέρα μου στην οποία εύχομαι ταχεία ανάρρωση σε αυτή τη δύσκολη στιγμή της ζωής της και στο φίλο μου Αναστάση ο οποίος με το κουράγιο και το θάρρος του έδωσε μαθήματα ζωής. Δεν θα τον ξεχάσουμε ποτέ και είχε τεράστιο αντίκτυπο στις ζωές όλων μας που ήμασταν τυχεροί να τον γνωρίσουμε.

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1.....</b>	<b>11</b>
<b>Επισκόπηση των τεχνολογιών για Διεσπαρμένη Παραγωγή.....</b>	<b>11</b>
1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	13
1.3 Φωτοβολταϊκά.....	14
1.4 Ανεμογεννήτριες.....	14
1.5 Βιομάζα.....	15
1.6 Μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική ενέργεια (Small Hydropower ή SHP).....	16
1.7 Ηλιοθερμική Ενέργεια.....	16
1.8 Γεωθερμική Ενέργεια.....	17
1.9 Παλιρροϊκή Ενέργεια.....	17
1.10 Κυματική Ενέργεια.....	18
1.11 Κυψέλες Καυσίμου.....	18
1.12 Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.....	19
1.13 Αεριοστρόβιλοι.....	19
1.14 Αεριοστρόβιλοι συνδυασμένου κύκλου.....	19
1.15 Μικροστρόβιλοι.....	20
1.16 Συνοπτική παρουσίαση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	20
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>	<b>25</b>
<b>Φωτοβολταϊκά και τρόπος λειτουργίας και εκμετάλλευσής τους.....</b>	<b>25</b>
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση.....	26
2.3 I-V Χαρακτηριστική Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	28
2.4 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών.....	32
2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά το βαθμό απόδοσης.....	33
2.5 Απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	35
2.6 Επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	36
2.7 Η Ισχύς Αιχμής του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου.....	38
2.8 Τα Ηλεκτρονικά των Φωτοβολταϊκών.....	38
2.8.1 Εισαγωγή.....	38



2.8.2 Μονάδες Μετατροπής Ισχύος .....	39
2.8.3 Μετατροπέας (inverter) DC-AC.....	41
2.8.4 Σχεδίαση ενός DC-AC Μετατροπέα .....	44
2.8.5 Ελεγκτής φόρτισης.....	48
2.8.6 Παράλληλος Ρυθμιστής Φόρτισης (Shunt controller) .....	49
2.8.7 Ρυθμιστής φόρτισης σε σειρά (Series controller) .....	49
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>	<b>51</b>
<b>Έλεγχος Τάσης και Αέργου Ισχύος σε δίκτυα διανομής.....</b>	<b>51</b>
3.1 Εισαγωγή.....	51
3.2 Πτώση τάσης σε δίκτυο διανομής .....	52
3.3 Επισκόπηση διαφόρων μεθόδων ελέγχου τάσης και αέργου ισχύος.....	53
3.4 Συντονισμός και έλεγχος στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	54
3.4.1 Κεντρικός Έλεγχος Τάσης.....	54
3.4.2 Συντονισμένος Έλεγχος Τάσης.....	55
3.4.3 Αποκεντρωμένος Έλεγχος Τάσης.....	55
3.5 Βασικός έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος σε συμβατικά δίκτυα .....	56
3.5.1 Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) .....	56
3.5.2 Έλεγχος αέργου ισχύος με συστοιχία πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση .....	66
3.5.3 STATCOM, SVC, DVR .....	67
3.6 Τρόποι ελέγχου τάσης και αέργου ισχύος παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής .....	73
3.6.1 Δυνατότητα ρύθμισης αέργου ισχύος - Power Factor Control .....	73
3.6.2 Μέθοδοι εφαρμογής της ρύθμισης αέργου ισχύος.....	75
3.6.3 Περικοπή ενεργού ισχύος - Active Power Curtailment .....	78
3.6.4 Αποθήκευση περίσσειας ισχύος σε συσσωρευτές (μπαταρίες) .....	80
3.6.5 Αναβάθμιση του δικτύου.....	80
3.6.6 Συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και Ρύθμισης Αέργου Ισχύος εξαρτώμενη από Τάση (Q(U)) (droop control).....	81
<b>Κεφάλαιο 4.....</b>	<b>86</b>
<b>Προσομοιώσεις και παρουσίαση αποτελεσμάτων .....</b>	<b>86</b>
4.1 Εισαγωγή.....	86
4.2 Δίκτυο με μία γραμμή διανομής και συγκεντρωμένο φορτίο .....	86
4.3 Δίκτυο με μία γραμμή διανομής και διαμοιρασμένο φορτίο .....	96
4.4 Δίκτυο με μία γραμμή διανομής και διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Διεσπαρμένης Παραγωγής .....	100
4.5 Δίκτυο με περισσότερες γραμμές διανομής και έναν μετασχηματιστή .....	109

ΣΑΤΥΦ .....	109
4.6 Δίκτυο με μία κύρια γραμμή διανομής και δευτερεύουσες γραμμές πάνω στην κύρια.....	125
4.7 Δίκτυο με μία γραμμή διανομής αλλά με τη χρήση χρονοσειρών για φορτία και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	147
<b>Κεφάλαιο 5.....</b>	<b>152</b>
<b>Συμπεράσματα-Προοπτικές Συνέχισης .....</b>	<b>152</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>154</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>158</b>

# Κεφάλαιο 1

## Επισκόπηση των τεχνολογιών για Διεσπαρμένη Παραγωγή

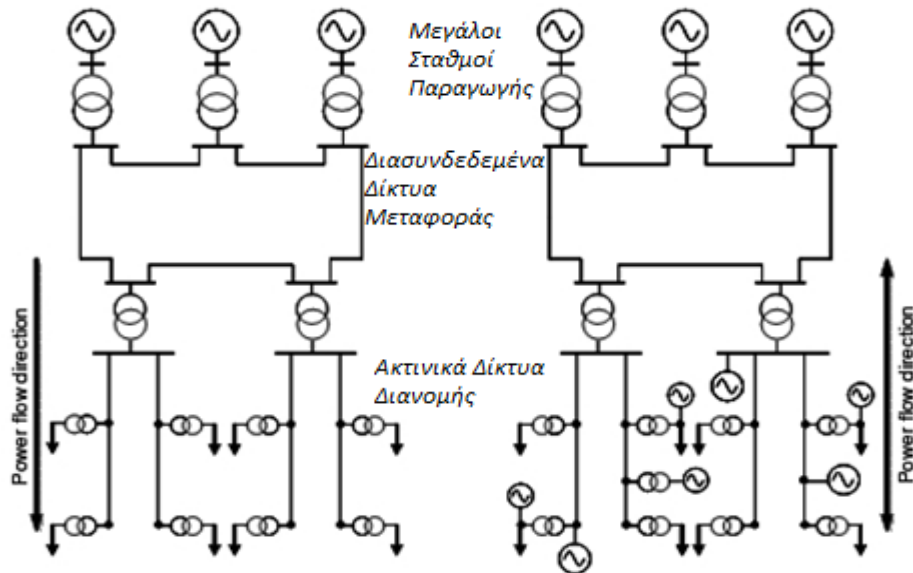
### 1.1 Εισαγωγή

Για περισσότερο από μισό αιώνα, η ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει βασιστεί σε σταθμούς με μεγάλες μονάδες παραγωγής συγκεντρωμένους σε μικρές τοποθεσίες. Στην Ελλάδα, σε αυτούς τους σταθμούς, η τάση ανέρχεται σε υπερυψηλή (ΥΥΤ), υψηλή (ΥΤ) και πρέπει να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις μέσω διασυνδεδεμένων συστημάτων μεταφοράς. Η τάση από την υπερυψηλή στο δίκτυο μεταφοράς πέφτει στη μέση (ΜΤ) που είναι το σύστημα διανομής και έπειτα στη χαμηλή τάση (ΧΤ) όπου και διανέμεται τελικώς στους καταναλωτές.

Τα τελευταία χρόνια, ένας συνδυασμός επιρροών έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον στη χρήση μικρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται στη σύστημα διανομής (μέση και χαμηλή τάση) και έχει ονομαστεί Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ). Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον, απελευθέρωση της αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας, μη ανάγκη κατασκευής νέου δικτύου μεταφοράς, αυξημένη ζήτηση σε παροχή ενέργειας αξιόπιστη προς τον καταναλωτή και μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων ως πόρους παραγωγής είναι μερικά μόνο πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει η ΔΠ.

Η ΔΠ προέρχεται από ανανεώσιμες ή μη πηγές ενέργειας χρησιμοποιώντας καινούριες ή συμβατικές τεχνολογίες. Οι τεχνολογία που χρησιμοποιείται στη ΔΠ περιλαμβάνει μηχανές εσωτερικής καύσης, μικρούς αεριοστρόβιλους ή αεριοστρόβιλους συνδυασμένου κύκλου, ανεμογεννήτριες, μικροστρόβιλους, φωτοβολταϊκά πάνελ, κυψέλες καυσίμου, βιομάζα και μικρές γεωθερμικές μονάδες παραγωγής.

Η δομή ενός συμβατικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και ενός ίδιου συστήματος με διεσπαρμένη παραγωγή φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 1.1). Η παρουσία τοπικής παραγωγής ενέργειας στο δίκτυο διανομής επηρεάζει το εν λόγω δίκτυο. Συγκεκριμένα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα αλλάξει τη ροή ισχύος στο δίκτυο διανομής το οποίο πλέον δεν μπορεί να θεωρηθεί ως δίκτυο μονόδρομης ροής ισχύος. Βέβαια, τα δίκτυα διανομής είχαν σχεδιαστεί υποθέτοντας πως η ροή ισχύος θα είναι μονόδρομη από την παραγωγή προς την κατανάλωση. Συνεπώς, η παρουσία ΔΠ και κυρίως η παρουσία μεγάλης ΔΠ έχει μεγάλο αντίκτυπο στη διαχείριση και τον έλεγχο του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Καθίσταται αναγκαίο λοιπόν να αξιολογήσουμε τον ήδη υπάρχων σχεδιασμό του δικτύου διανομής καθώς και να προτείνουμε καινούριες τεχνολογίες για να αναπτυχθεί σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό η χρήση ανανεώσιμων ή μη πηγών ενέργειας. [1]



Εικόνα 1.1: Συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (αριστερά) και ηλεκτρικό δίκτυο με ΔΠ (δεξιά)

Η παρουσία ΔΠ θα επιδράσει καταλυτικά στον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές από τις επιρροές είναι ο έλεγχος τάσης κ ευστάθειας στο σύστημα διανομής.

Οι ήδη υπάρχουσες συσκευές ελέγχου τάσης στα συμβατικά δίκτυα διανομής χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγω βασισμένα στο γεγονός ότι η τάση μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από τον υποσταθμό και φτάνουμε στους καταναλωτές. Η παρουσία ΔΠ όμως χρήζει τον παραπάνω ισχυρισμό αβάσιμο.

Τα ΣΑΤΥΦ (Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο) αποτελούν μία τέτοια συσκευή. Είναι μετασχηματιστές (ΜΣ) που χρησιμοποιούνται στην ΥΤ/ΜΤ ή στη ΜΤ/ΧΤ για να ελέγξουν την τάση στο δευτερεύον του ΜΣ όταν η ισχύς ρέει από τον πρωτεύον στο δευτερεύον του ΜΣ. Υψηλή διείδυση ΔΠ μπορεί να προκαλέσει αλλαγή στη ροή ισχύος από το δευτερεύον του ΜΣ στο πρωτεύον.

Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ή ακόμα και άλλων συσκευών ελέγχου τάσης επηρεάζεται από την αλλαγή ροής ισχύος. Όσο περισσότερο αλλάζει η ροή ισχύος τόσο περισσότερο λειτουργεί το ΣΑΤΥΦ. Επιπλέον, οι διάφορες τεχνολογίες ΔΠ παράγουν κυμαινόμενη ηλεκτρική ενέργεια η οποία βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας τους και ποια μορφή ενέργειας εκμεταλλεύονται για να παράγουν αυτήν την ενέργεια. Τέλος, δεν έχουν σχεδιαστεί όλες οι τεχνολογίες ΔΠ για να ελέγξουν την τάση που αυξομειώνεται.

Τα παραπάνω που αναφέρθηκαν είναι μερικά μόνο από τα προβλήματα που μπορεί να προκαλέσει η παρουσία ΔΠ. Υπάρχουν όμως κάποια ερωτήματα που αναδύονται, όπως:

- 1) Πώς να συντονιστεί η ΔΠ με τις διαθέσιμες συσκευές ελέγχου τάσης στο σύστημα διανομής προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι το σύστημα διανομής δε θα χάσει την κατάλληλη ρύθμιση τάσης;
- 2) Η αντιστροφή ροής ισχύος λόγω της ΔΠ θα παρεμποδίσει την αποτελεσματικότητα της

λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ;

3) Θα λειτουργεί σε υπερβολικό βαθμό το ΣΑΤΥΦ στην παρουσία ΔΠ με συνεχώς κυμαινόμενη παραγωγή;

4) Πώς να σχεδιαστεί μία ενιαία στρατηγική ελέγχου για μια βέλτιστη τάση και έλεγχο άεργου ισχύος παρουσία ΔΠ;

5) Τι αντίκτυπο έχει η ΔΠ στη σταθερότητα τάσης στο σύστημα;

6) Πώς να μετριάσουμε τον αρνητικό αντίκτυπο της ΔΠ στη σταθερότητα της τάσης;

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε στα παραπάνω ερωτήματα και θεωρητικά αλλά κ πρακτικά χρησιμοποιώντας Simulink του προγράμματος Matlab. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το Matlab 2012a.

## 1.2 Τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής

Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες ΔΠ διαθέσιμες. Η ΔΠ μπορεί να βασιστεί σε διάφορες πρωτογενείς πηγές ενέργειας. Ο τύπος της πρωτογενούς πηγής ενέργειας, σε έναν μεγάλο ο βαθμό, καθορίζει τον τύπο σύνδεσης στο δίκτυο που εφαρμόζεται και τα χαρακτηριστικά εξόδου της ΔΠ.

Με βάση τα χαρακτηριστικά παραγωγής, η ΔΠ μπορεί να ταξινομηθεί ως <<dispatchable >> ή <<non-dispatchable>>. Όταν η ΔΠ είναι dispatchable, ο χειριστής μπορεί να καθορίσει τη δύναμη παραγωγή των μονάδων της με έλεγχο των πρωτογενών πηγών ενέργειας που παρέχονται στις μονάδες. Όταν η ΔΠ είναι μη- dispatchable, ο χειριστής δεν μπορεί να αποδεσμεύσει τις μονάδες ΔΠ επειδή η συμπεριφορά των πηγών ενέργειας δεν μπορεί να ελεγχθεί. Nondispatchable είναι κατά κύριο λόγο οι μονάδες που οδηγούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπου η παραγωγή εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των πηγών ενέργειας.

Η ΔΠ μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο χρησιμοποιώντας απ' ευθείας σύγχρονες γεννήτριες και γεννήτριες επαγωγής ή μέσω ηλεκτρονικών ισχύος.

- Οι σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά για ΔΠ με μηχανές εσωτερικής καύσης, απλούς αεριοστροβίλους και αεριοστροβίλους συνδυασμένου κύκλου. Ακόμα χρησιμοποιούνται στη θερμική ενέργεια, στη βιομάζα και στη γεωθερμική ενέργεια.
- Η ΔΠ με τις γεννήτριες επαγωγής χρησιμοποιείται εκτενώς στην αιολική ενέργεια και σε μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις.
- Η ΔΠ που διασυνδέεται με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιείται στην ηλιακή παραγωγή από φωτοβολταϊκά, στις κυψέλες καυσίμων, στους μικροστροβίλους καθώς και στις ανεμογεννήτριες.

Χρησιμοποιώντας στη ΔΠ σύγχρονες γεννήτριες ή ηλεκτρονικά ισχύος για τη διασύνδεση στο δίκτυο έχουμε το πλεονέκτημα ότι μπορούμε να τις ελέγξουμε ώστε να απορροφούν ή να αποδίδουν άεργο ισχύ.

Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω η ΔΠ είναι μία μικρής κλίμακας παραγωγή που συνδέεται με τα τοπικά συστήματα διανομής. Ως εκ τούτου, όταν το μέγεθος της τεχνολογίας

παραγωγής γίνεται μεγάλο και η παραγωγή δεν μπορεί πλέον να συνδεθεί με το σύστημα διανομής, η παραγωγή δεν θεωρείται πλέον ΔΠ.

Παρακάτω παραθέτουμε μερικές τεχνολογίες ΔΠ που βασίζονται σε διάφορες πρωτογενείς πηγές ενέργειας.

### **1.3 Φωτοβολταϊκά**

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) περιλαμβάνουν την άμεση μετατροπή του φωτός του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς οποιαδήποτε θερμική μηχανή. Τα συστήματα PV έχουν χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για πολύ μικρές εφαρμογές όπως αριθμομηχανές και ρολόγια αλλά και για άντληση νερού, μακρινά κτήρια, τηλεπικοινωνίες, δορυφόρους και διαστημικά οχήματα. Τέλος, χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή ή σε μεγάλη κλίμακα.

Αν και μια φωτοβολταϊκή συσκευή έχει πολύ χαμηλή λειτουργική δαπάνη, απαιτεί μεγάλα κεφάλαια και παρουσιάζει χαμηλή αποδοτικότητα, η οποία καθιστά τα φωτοβολταϊκά συστήματα ακριβά. Χωρίς επιχορηγήσεις, η ενέργεια από φωτοβολταϊκά παραμένει δύο έως πέντε φορές πιο ακριβή από την υπάρχουσα ενέργεια του δικτύου σε μέρη όπου υπάρχει δίκτυο. Εντούτοις, όπου δεν υπάρχει κανένα δίκτυο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να είναι η φτηνότερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα PV μπορούν επίσης να είναι ανταγωνιστικά κατά τη διάρκεια περιόδων μέγιστης ζήτησης.

Η εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων ενθαρρύνεται από τη σχεδόν απεριόριστη διαθεσιμότητα του φωτός του ήλιου, του μακροχρόνιου κύκλου ζωής, του υψηλού σχεδιασμού και της ευκινησίας, της εύκολης συντήρησης (δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένα κινούμενο μέρος), το πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας, το ότι είναι φιλικός προς το περιβάλλον, της δυνατότητας για εφαρμογή εκτός δικτύου και του λίγου απαιτούμενου χρόνου για σχεδιασμό, εγκατάσταση και εκκίνησή τους. Συνήθως, μεμονωμένες μονάδες φωτοβολταϊκών κυμαίνονται από 20W σε 100kW. Τα μειονεκτήματα στα συστήματα PV είναι οι μεγάλες απαιτήσεις σε έδαφος λόγω της διάχυτης φύσης του φωτός, το πιο υψηλό κόστος εγκατάστασης από άλλες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής και η διαλείπουσα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλό συντελεστή φορτίου. [2,3,4]

### **1.4 Ανεμογεννήτριες**

Η αιολική ενέργεια διαδραματίζει έναν βασικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Έως το 2014, περισσότερο από 128.7501 MW είχαν εγκατασταθεί στην Ευρώπη [5]. Η Γερμανία, η Ισπανία και η Δανία είναι οι πρωτοπόρες χώρες στην αιολική ενέργεια και αποτελούν το 78% της συνολικής χωρητικότητας σε αιολικά πάρκα στην Ευρώπη. Και οι παράκτιες και χερσαίες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών αυξάνονται ραγδαία.

Στις μέρες μας, οι μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας ανταγωνίζονται με τις εγκαταστάσεις ορυκτών καυσίμων στην παροχή οικονομικής και

καθαρής ενέργειας σε πολλά μέρη του κόσμου. Από αυτή την άποψη, η αιολική ενέργεια καθίσταται περισσότερο ως κεντρική παραγωγή παρά ΔΠ. Το μέγεθος των εμπορικών ανεμοστρόβιλων έχει αυξηθεί σημαντικά από 50 kW στις αρχές της δεκαετίας του '80 για να φτάσει μέχρι πρόσφατα τα 4,5 MW. Αυτή η αύξηση προφανώς δημιουργεί κλιμακώσεις οικονομικής φύσεως για την τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά.

Η κύρια πρόκληση της τεχνολογίας αιολικών είναι η αξιοπιστία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο παρουσιάζει διάφορα προβλήματα στην απορρόφηση όλης αυτής της παράγουσας ενέργειας. Εφόσον η αιολική παραγωγή ενέργειας είναι βασισμένη σε φυσικές δυνάμεις (αέρας), δεν μπορεί να αποστείλει την απαιτούμενη ενέργεια αλλά μόνο την ενέργεια που παράγει η οποία ενδέχεται στις περισσότερες των περιπτώσεων να μην συμπίπτει με τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Κατά συνέπεια, καθώς το μερίδιο της αιολικής ενέργειας αυξάνεται, η ένταξη των ανεμοστρόβιλων στο ηλεκτρικό δίκτυο θα χρειαστεί περισσότερη προσοχή. Ένα άλλο εμπόδιο είναι διαθεσιμότητα μεταφοράς. Αυτό συμβαίνει επειδή, μερικές φορές, οι καλύτερες θέσεις για τα αιολικά πάρκα είναι σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς πρόσβαση σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.5 Βιομάζα

Οι πόροι βιομάζας περιλαμβάνουν γεωργικά απόβλητα, ζωικό λίπασμα, δασικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανίας, δημοτικά απόβλητα, απόβλητα καθαρισμού λυμάτων, συγκομιδές κτλ. Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια (ή σε θερμότητα) με διάφορες διαδικασίες.

Η πλειοψηφία της ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα παράγεται χρησιμοποιώντας έναν κύκλο ατμού όπου το υλικό της βιομάζας μετατρέπεται αρχικά σε ατμό σε έναν λέβητα. Ο εξαγόμενος ατμός χρησιμοποιείται έπειτα για να κινήσει μια γεννήτρια στροβίλων. Η βιομάζα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μαζί με άνθρακα για να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (co-firing). Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η πιο οικονομική βραχυπρόθεσμη επιλογή για να εισαγάγει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα και ελαττώνει τις εκπομπές αερίων στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από κάρβουνο. Άλλη εναλλακτική λύση είναι να μετατραπεί η στερεά βιομάζα σε ένα αέριο καυσίμων. Το αέριο καυσίμων μπορεί κατόπιν να χρησιμοποιηθεί σε μια έμβολο-οδηγημένη μηχανή, σε μία γεννήτρια αεριοστροβίλων υψηλής αποδοτικότητας ή σε κυψέλες καυσίμου [6].

Η χρήση βιομάζας στην παραγωγή ενέργειας και στην παραγωγή συνδυασμένης θερμότητας και ενέργειας επεκτείνεται σταθερά στην Ευρώπη και κυρίως στην Αυστρία, στη Γερμανία, στο Ηνωμένο Βασίλειο, στη Δανία, στη Φινλανδία και στη Σουηδία. Η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα μέχρι το 2005 είναι γύρω στις 44.000 MW [7].

Τα κύρια εμπόδια στη διάδοση της χρήσης της βιομάζας για την ηλεκτρική παραγωγή είναι το κόστος, η χαμηλή απόδοση μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια και η διαθεσιμότητα σε πρώτη ύλη. Η βιομάζα έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, η οποία κάνει τη μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις δαπανηρή. Πρέπει να αποφεύγεται υπερεκμετάλλευση των

πηγών βιομάζας. Για να βελτιωθεί η αποδοχή χρήσης δασικών περιοχών και γης πρέπει να δοθούν πιστοποιήσεις ότι οι πρώτες ύλες βιομάζας αποκτώνται σε ανεκτά επίπεδα [7].

## 1.6 Μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική ενέργεια (Small Hydropower ή SHP)

Οι στρόβιλοι υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για να παραγάγουν μεγάλης κλίμακας ηλεκτρική ενέργεια που θα χρησιμοποιούνταν γύρω στο 1880. Η επέκταση και η αυξανόμενη πρόσβαση στα δίκτυα μεταφοράς έχει οδηγήσει στη συγκέντρωση της ηλεκτρικής παραγωγής σε μεγάλες μονάδες παραγωγής έτσι ώστε να επωφεληθούν από οικονομικής απόψεως. Αυτό οδήγησε σε μια τάση οικοδόμησης της υδροηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες εγκαταστάσεις παρά σε μικρές για αρκετές δεκαετίες. Εντούτοις, η απελευθεροποίηση της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας έχει συμβάλει, σε μερικές περιοχές, στην ανάπτυξη μικρής παραγωγικής δύναμης σε υδροηλεκτρική ενέργεια από ανεξάρτητους παραγωγούς [8].

Η μικρή υδροηλεκτρική ενέργεια (SHP) χρησιμοποιείται συνήθως για να αναφερθεί σε εγκαταστάσεις με ικανότητα λιγότερη από 10 MW. Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται κανονικά είναι “μίνι” (mini) υδροηλεκτρική ενέργεια με ικανότητα μεταξύ 100 kW και 1 MW και “μίκρο” (micro) υδροηλεκτρική ενέργεια με ικανότητα κάτω από 100 kW.

Η δύναμη που παράγεται από τις μικρές εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά μεγάλη. Η χώρα με τις περισσότερες εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η Γερμανία με πάνω από 7.500 εγκαταστάσεις και ακολουθεί η Αυστρία (2.590), η Ιταλία (2.430), η Γαλλία και η Σουηδία (1.900) και η Τσεχία (1.450). Η Ευρωπαϊκή Ένωση μικρής υδροηλεκτρικής ενέργειας εξέθεσε ότι το 2006, η συνολική εγκατεστημένη δύναμη από SHP στην Ευρώπη ήταν 13.000 MW ενώ μέχρι το 2020 θα φτάσει στα 17.300 MW, μία αύξηση της τάξης του 40%.

## 1.7 Ηλιοθερμική Ενέργεια

Τα ηλιοθερμικά συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με συγκέντρωση εισερχόμενου ηλιακού φωτός και έπειτα παγίδευση της θερμότητάς του, η οποία μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία κάποιου ρευστού σε πολύ υψηλό βαθμό για να παραγάγει αρχικά ατμό και έπειτα ηλεκτρική ενέργεια. Εδώ αρκεί να προσέξουμε ότι αυτή η διαδικασία είναι διαφορετική από αυτήν ενός φωτοβολταϊκού πάνελ όπου το φως του ήλιου μετατρέπεται άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς ενδιάμεση συλλογή θερμότητας [6]. Σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά, η ηλιοθερμική ενέργεια είναι πιο οικονομική, δεδομένου ότι αποβάλλει τις δαπανηρές ημιαγωγικές κυψέλες [4].

Εφαρμογές συγκέντρωσης ηλιακής δύναμης είναι τώρα εφικτές από μερικά κιλοβάτ σε εκατοντάδες μεγαβάτ. Οι ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις μπορούν να είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο ή αυτόνομες και να χρησιμοποιούνται στην κεντρική παραγωγή ή ως διεσπαρμένη παραγωγή. Είναι κατάλληλες για τη λειτουργία υβριδικών ορυκτών ή μπορούν να



συμπεριληφθούν ως οικονομικώς αποδοτική θερμική αποθήκευση για να καλύψουν τις απαιτήσεις "dispatch" [8].

Μία τέτοια εγκατάσταση ηλιοθερμικής παραγωγής ενέργειας της τάξης των 350 MW, βρίσκεται στην έρημο Mojave στην Καλιφόρνια και συνδέεται με τη νότια Καλιφόρνια μέσω του δικτύου μεταφοράς του Έντισον. Αυτή η χωρητικότητα αποτελεί πάνω από το 90% της παγκόσμιας χωρητικότητας σε ηλιοθερμική ενέργεια μέχρι το 1999 [4].

## 1.8 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι διαθέσιμη ως θερμότητα που εκπέμπεται από μέσα από τη γη, συνήθως υπό μορφή καυτού ύδατος ή ατμού. Ενώ η παραπάνω ενέργεια αποτελεί μια άφθονη πηγή, μόνο ένα πολύ μικρό μέρος μπορεί να μετατραπεί εμπορικά σε ηλεκτρική ενέργεια με βάση τη σημερινή τεχνολογία. Από το 1999, η παραγωγική ικανότητα ηλεκτρικής ενέργειας από οι γεωθερμικές πηγές ήταν παγκοσμίως περίπου 8.000 MW. Οι Ηνωμένες Πολιτείες και οι Φιλιππίνες αποτελούν 50% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος από γεωθερμικές μονάδες παγκοσμίως [6].

Οι γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ενέργειας απαιτούν ιδιαίτερα υψηλά κεφάλαια αλλά έχουν χαμηλές λειτουργικές δαπάνες. Οι εγκαταστάσεις είναι καθαρές, χωρίς εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Μία νέα και σημαντική ευκαιρία αναδύεται για τη γεωθερμική ανάπτυξη εφόσον η μείωση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, ως απάντηση στις ανησυχίες του φαινομένου του θερμοκηπίου, θεωρείται ως πίστωση [6].

## 1.9 Παλιρροϊκή Ενέργεια

Η παλιρροϊκή ενέργεια προέρχεται από τις βαρυτικές δυνάμεις της έλξης μεταξύ της γης με το φεγγάρι και της γης με τον ήλιο. Ένα μακρύ φράγμα που ονομάζεται "υδρόφραγμα" χτίζεται εγκάρσιως της εκβολής ενός ποταμού. Όταν η παλίρροια πηγαίνει μέσα και έξω, το νερό ρέει μέσω σηράγγων στο φράγμα. Η άμπωτη και η ροή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γυρίσουν έναν στρόβιλο. Όταν οι παλίρροιες έρχονται, είναι παγιδευμένες στις δεξαμενές πίσω από τα φράγματα, και αργότερα, όταν μειώνονται, το υδρόφραγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως στην κανονική λειτουργία από τις εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας. Υπάρχουν μόνο λίγες περιοχές στον κόσμο που έχουν προσδιοριστεί ως πιθανοί εμπορικοί σταθμοί παλιρροϊκής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση είναι ο σταθμός Λα Ρανς με δυνατότητα παραγωγής 240 MW στη Γαλλία [10].

Όπως άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η παλιρροϊκή ενέργεια είναι καθαρή και χωρίς παραγωγή αερίων θερμοκηπίου. Η συντήρηση και οι λειτουργικές δαπάνες δεν είναι υψηλές. Εντούτοις, η οικοδόμηση ενός υδροφράγματος κατά μήκος της εκβολής ενός ποταμού για έναν παλιρροϊκό παραγωγικό σταθμό είναι ακριβή και έχει επιπτώσεις σε μια πολύ ευρεία περιοχή.

## 1.10 Κυματική Ενέργεια

Η ενέργεια στα κύματα προέρχεται από τη μετακίνηση του ωκεάνιου ύδατος και το μεταβαλλόμενες ύψος και η ταχύτητα των κυμάτων.

Ο κόσμος έχει μια άφθονη πηγή ενέργειας κυμάτων. Παραδείγματος χάριν, υπολογίζεται πως η εμπορικά εφικτή ικανότητα ηλεκτρικής παραγωγής από κύματα στη Σκωτία είναι 14.000 MW. Η κυματική ενέργεια θεωρείται επίσης ως μία από τις πιο υψηλά συγκεντρωμένες εκ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αξίζει εδώ να τονίσουμε ακόμα ότι η χρήση κυματικής ενέργειας έχει τη δυνατότητα να εξοικονομήσει εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Περαιτέρω, έναντι άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η κυματική ενέργεια είναι σχετικά προβλέψιμη. Η ενέργεια κυμάτων είναι κατάλληλη για να ηλεκτροδοτήσει μακρινές κοινότητες. Παρόλα αυτά, έναντι άλλων ανανεώσιμων, η κυματική ενέργεια δεν έχει επιτύχει την εμπορευματοποιημένη αποδοχή ακόμα [11]. Ο μεγαλύτερός του αντίπαλος είναι τα παράκτια αιολικά πάρκα.

Μέχρι πρόσφατα, τα περισσότερα προγράμματα εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας κυμάτων ήταν στο ερευνητικό στάδιο, αν και τα τελευταία χρόνια ένας ουσιαστικός αριθμός εγκαταστάσεων έχει επεκταθεί στη θάλασσα. Οι εξουσιάζοντας χώρες στην ανάπτυξή της είναι μέχρι τώρα η Δανία, η Ινδία, η Ιρλανδία, η Ιαπωνία, η Νορβηγία, η Πορτογαλία, οι Κάτω Χώρες, το Ηνωμένο Βασίλειο και οι ΗΠΑ [12].

Η δυνατότητα παραγωγής κάθε εγκατεστημένης μονάδας είναι σχετικά χαμηλή ξεκινώντας από 3MW έως 20MW όμως αρκετά κεφάλαια επενδύονται στις ήδη υπάρχουσες μονάδες για επέκταση στα 40MW.

## 1.11 Κυψέλες Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν απ' ευθείας τη χημική ενέργεια καυσίμων σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια (ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα) χωρίς καύση.

Αυτό είναι αρκετά διαφορετικό από τις περισσότερες ηλεκτρικές παραγωγικές συσκευές (π.χ., ατμοστρόβιλοι, αεριοστρόβιλοι και μηχανές καύσης) οι οποίες μετατρέπουν αρχικά χημική ενέργεια καυσίμων σε θερμική ενέργεια, έπειτα σε μηχανική ενέργεια και τέλος σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με υψηλές αποδόσεις (από 40 έως 60%), με αμελητέες επιβλαβείς εκπομπές και λειτουργούν τόσο αθόρυβα ώστε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα σε κατοικημένες περιοχές. Κάποια ακόμα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι η εύρεσή τους σε διάφορες κλίμακες παραγωγής και ο εύκολος τρόπος εγκατάστασης-απεγκατάστασής τους. Η κύρια πρόκληση για την εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου είναι το υψηλό κόστος επένδυσής τους [2].

## 1.12 Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

Οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΣ) μετατρέπουν τη θερμότητα από την καύση καυσίμων σε περιστροφική κίνηση που, στη συνέχεια, οδηγεί μια γεννήτρια. Οι ΜΕΣ είναι μια από τις πιο κοινές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη ΔΠ. Αντιπροσωπεύουν μια αποδεδειγμένη τεχνολογία με το χαμηλό κεφαλαιακό κόστος, μεγάλη γκάμα μεγέθους από λίγα kW έως αρκετά MW, καλή αποδοτικότητα, πιθανή θερμική ή ηλεκτρική συμπαράγωγή στα κτήρια και καλή αξιοπιστία λειτουργίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά, συνδυάζοντάς τα με τη δυνατότητα των μηχανών να ξεκινήσουν γρήγορα κατά τη διάρκεια μιας διακοπής λειτουργίας και μη απαιτώντας μεγάλους χώρους εγκατάστασης, τις κάνουν την κύρια επιλογή για έκτακτη ανάγκη ή εφεδρικές παροχές ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα βασικά εμπόδια στη χρήση ΜΕΣ είναι το υψηλό κόστος συντήρησης και καυσίμων, το οποίο είναι το υψηλότερο μεταξύ των τεχνολογιών ΔΠ, οι υψηλές εκπομπές NOX, οι οποίες είναι επίσης οι υψηλότερες μεταξύ των τεχνολογιών ΔΠ και ένας υψηλού επιπέδου θόρυβος λειτουργίας [2,3].

## 1.13 Αεριοστρόβιλοι

Οι αεριοστρόβιλοι αποτελούνται από έναν συμπιεστή, έναν καυστήρα και μια γεννήτρια τουρμπίνας που μετατρέπει την περιστροφική ενέργεια σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι αεριοστρόβιλοι όλων των μεγεθών χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία ενέργειας. Μικροί

βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι της τάξης των 1 - 20 MW χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές συνδυασμένης θερμότητας και ενέργειας (CHP). Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν απαιτείται ατμός υψηλότερης θερμοκρασίας (υψηλότερος από τον ατμό που παράγεται από τις ΜΕΣ). Το κόστος συντήρησης είναι ελαφρώς χαμηλότερο από τις ΜΕΣ. Οι αεριοστρόβιλοι μπορεί να είναι θορυβώδεις αλλά οι εκπομπές NOX είναι κάπως χαμηλότερες από τις μηχανές καύσης και η οικονομικώς αποδοτική τεχνολογία εκπομπής-ελέγχου NOX γίνεται εμπορικά διαθέσιμη [3].

## 1.14 Αεριοστρόβιλοι συνδυασμένου κύκλου

Σε έναν αεριοστρόβιλο συνδυασμένου κύκλου (CCGT), η εξάτμιση μίγματος αέριου καυσίμου ανταλλάσσει την ενέργεια με το νερό στο λέβητα για να παραγάγει ατμό για τον ατμοστρόβιλο. Ο ατμός εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο και διαστέλλεται για να παραγάγει έργο στον άξονα το οποίο μετατρέπεται στην πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια στη γεννήτρια. Τέλος, η ροή εξόδου από το στρόβιλο είναι συμπυκνωμένη και επιστρέφεται στο λέβητα.

Οι αεριοστρόβιλοι συνδυασμένου κύκλου γίνονται όλο και περισσότερο δημοφιλείς κάτι που οφείλεται στην υψηλή αποδοτικότητά τους. Εντούτοις, οι εγκαταστάσεις

αεριοστρόβιλων κάτω των 10 MW δεν είναι γενικά συνδυασμένου κύκλου λόγω των ανεπάρκειας κλιμάκωσης του ατμοστρόβιλου [3].

### 1.15 Μικροστρόβιλοι

Οι μικροστρόβιλοι επεκτείνουν την τεχνολογία αεριοστρόβιλων σε μικρότερες κλίμακες. Η τεχνολογία αναπτύχθηκε αρχικά για εφαρμογές μεταφορών, αλλά πλέον κατέχουν μία καλή θέση στην ηλεκτρική παραγωγή. Ένα από τα εντυπωσιακά τεχνικά χαρακτηριστικά των μικροστρόβιλων είναι η εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα περιστροφής τους που φτάνει μέχρι τις 120.000 στροφές/λεπτό.

Οι μικροστρόβιλοι παράγουν υψηλής συχνότητας ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος. Ένας αντιστροφέας ηλεκτρονικών ισχύος μετατρέπει αυτήν την ισχύ υψηλής συχνότητας σε μια χρησιμοποιήσιμη μορφή. Μία μεμονωμένη μονάδα μικροστρόβιλου κυμαίνεται από 30 - 200 kW, αλλά μπορεί να συνδυαστεί άμεσα σε ένα σύστημα πολλαπλάσιων μονάδων. Οι χαμηλές θερμοκρασίες καύσης μπορούν να διαβεβαιώσουν πολύ χαμηλά επίπεδα εκπομπής NOX. Κάνουν πολύ λιγότερο θόρυβο από έναν στρόβιλο συγκρίσιμου μεγέθους [3].

Οι περισσότεροι μικροστρόβιλοι χρησιμοποιούν φυσικό αέριο. Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιθανόλη, είναι επίσης δυνατή [13]. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι προς το παρόν το μικρό ιστορικό τους και το υψηλό κόστος τους έναντι των μηχανών καύσεως αερίου.

### 1.16 Συνοπτική παρουσίαση των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία εκδηλώνουν μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

#### 1. Κρυσταλλικού Πυριτίου

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων από 14,5% έως 21%,
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων από 13% έως 14,5%.2.

#### 2. Λεπτών Μεμβρανών

- Άμορφου Πυριτίου, ονομαστικής απόδοσης περίπου 7%.
- Χαλκοπυριτών CIS / CIGS, ονομαστικής απόδοσης από 7% έως 11%.

Αξίζει εδώ να αναφέρουμε ότι το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β. Η κυριαρχία αυτή οφείλεται αρχικά στην τεράστια παγκόσμια επιστημονική και τεχνική υποδομή για το υλικό αυτό από τη δεκαετία του '60.

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός όψη του παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια,  $e^-$ ) ή προς τα πίσω (οι οπές,  $h^+$ ), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου.

Η τάση και η ισχύς των Φ/Β στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Ειδικότερα, η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο Φ/Β στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις μέχρι 0,5V και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4 W περίπου. Γι' αυτό, τα Φ/Β στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση Φ/Β γεννητριών τοποθετούνται ανά 10 ως 50 περίπου σε ένα πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Το παραπάνω πλαίσιο ονομάζεται **φωτοβολταϊκό πλαίσιο** και είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των Φ/Β. Ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συναρμολογημένα σε ενιαία κατασκευή αποτελούν ένα **φωτοβολταϊκό πάνελ (PV panel)**. Μία ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή πάνελ με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση ονομάζεται **φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array)** και τοποθετείται συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης. Παρακάτω βλέπουμε σε εικόνα ότι πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια συγκροτούν μία φωτοβολταϊκή συστοιχία και πολλές φωτοβολταϊκές συστοιχίες συγκροτούν ένα φωτοβολταϊκό πάρκο.



**Φ/Β πλαίσιο**



**Φ/ Β Συστοιχία**

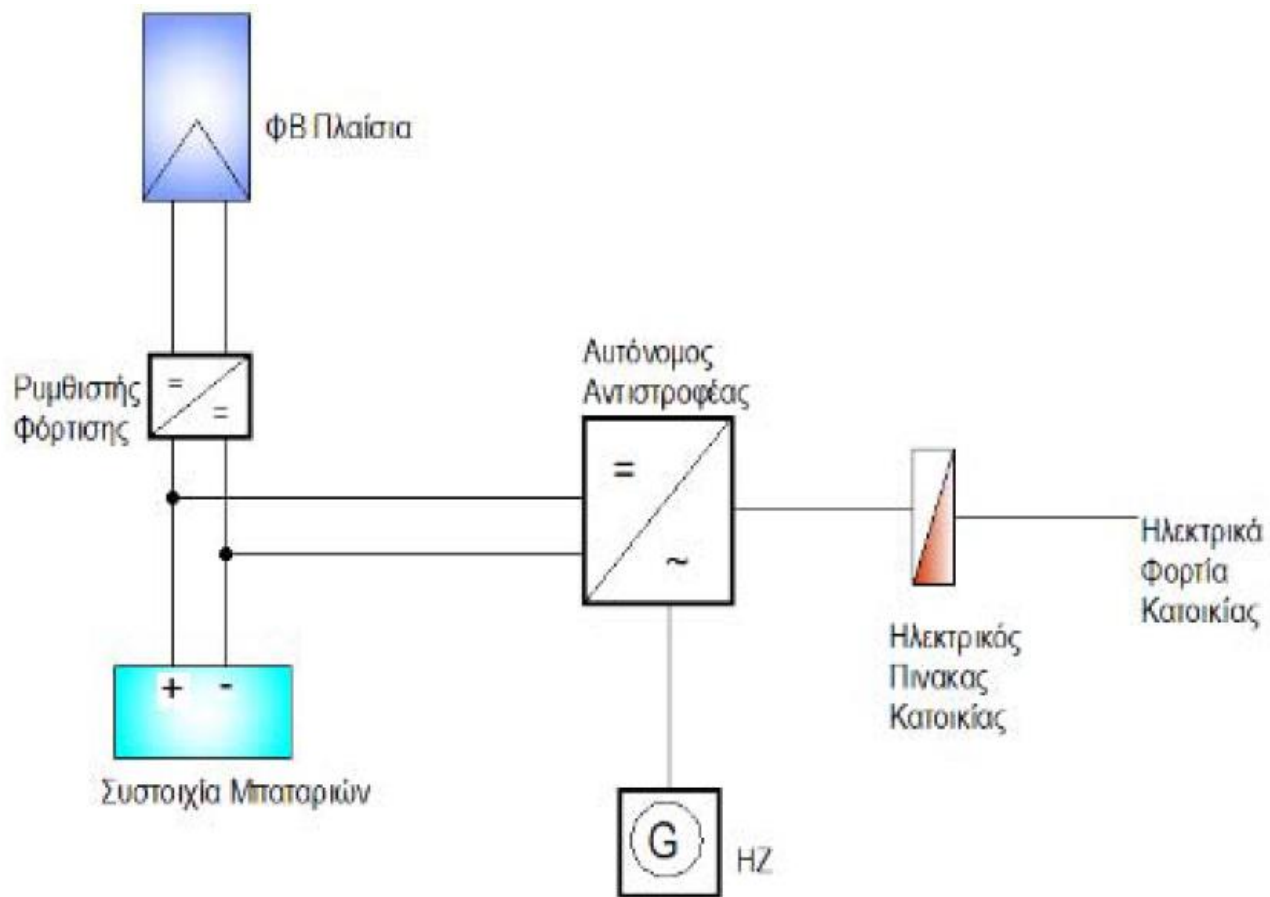


**Φ/Β Πάρκο**

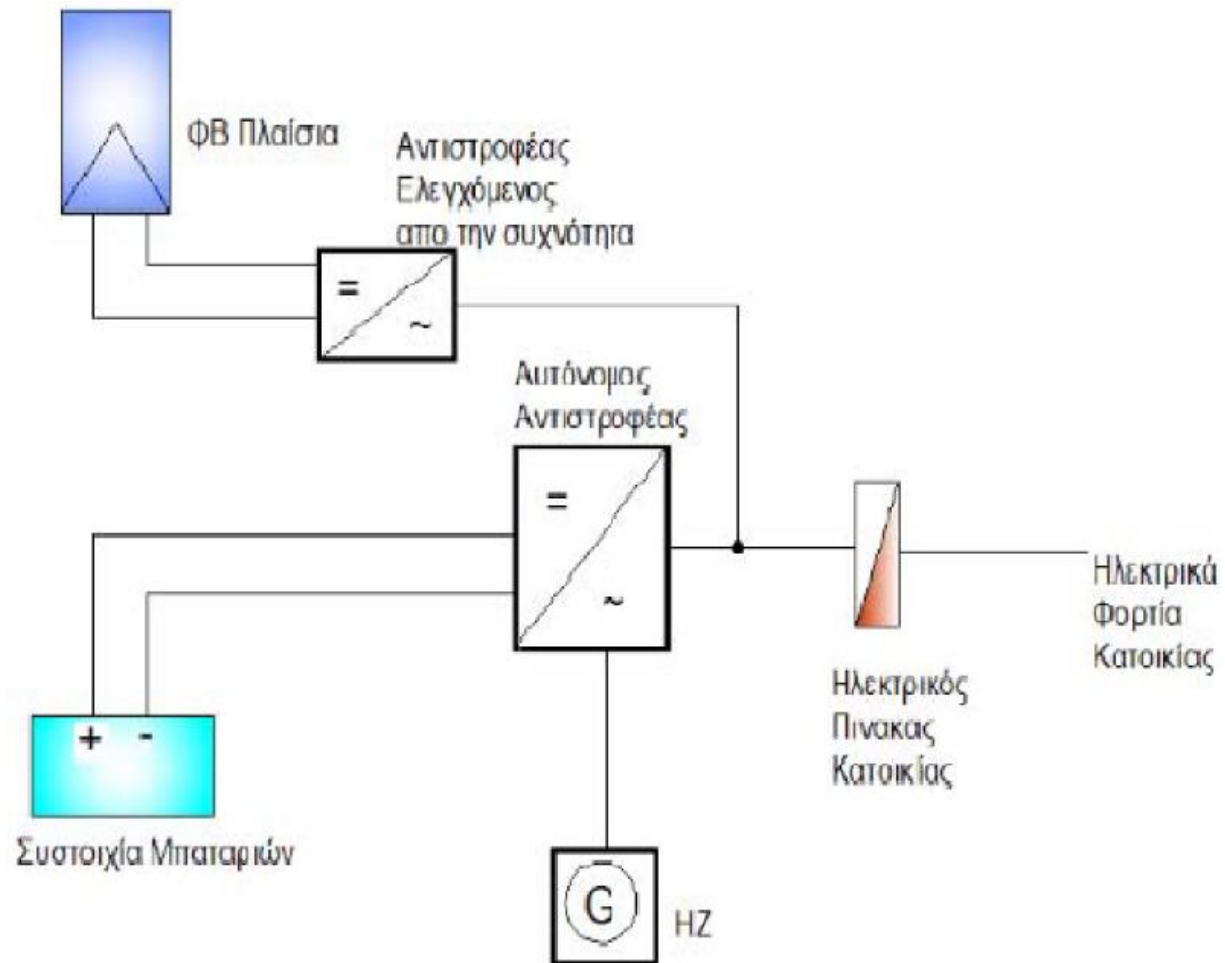
*Εικόνα 1.2: Παρουσίαση ενός Φ/Β πλαισίου, μίας Φ/Β συστοιχίας και ενός Φ/Β πάρκου*

Όσον αφορά τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στα **απομονωμένα ή εκτός δικτύου συστήματα (stand alone ή off-grid connected)** και στα **συνδεδεμένα στο δίκτυο (grid connected)** [14]. Τα τελευταία συνδέονται απευθείας στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής παροχής (AC) στο οποίο διοχετεύουν όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Τα απομονωμένα ή εκτός δικτύου συστήματα έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό τους το ότι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Όταν η ενέργεια αυτή, της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, καλύπτει εξολοκλήρου τις ανάγκες της εγκατάστασης τότε το σύστημα ονομάζεται **αυτόνομο**. Ενώ όταν στην παραγωγή ενέργειας συμμετέχει και άλλη πηγή Α.Π.Ε. (π.χ. ανεμογεννήτρια) ή συμβατική πηγή καυσίμου (π.χ. ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος) τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται ως **υβριδικό**.

Τέλος, όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης των φωτοβολταϊκών με το υπόλοιπο δίκτυο τα φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίζονται σε συστήματα με **AC Σύνδεση** και **DC Σύνδεση**. Και οι δύο τρόποι φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Η μόνη διαφορά των δύο συνδεσμολογιών είναι ότι στην AC σύνδεση στη θέση του ρυθμιστή φόρτισης, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη σωστή φόρτιση των συσσωρευτών (μπαταρίες), χρησιμοποιείται ένας ακόμα αντιστροφέας ελεγχόμενος από τη συχνότητα [15].



Εικόνα 1.3: DC σύνδεση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος



Εικόνα 1.4: AC σύνδεση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος



## Κεφάλαιο 2

### Φωτοβολταϊκά και τρόπος λειτουργίας και εκμετάλλευσής τους

#### 2.1 Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά και συνεπώς παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ. Κατέχουν κυρίαρχη θέση ακόμα και σήμερα στις αγορές και προωθούν με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο την “πράσινη” ανάπτυξη έχοντας πάρα πολλά πλεονεκτήματα όπως τα παρακάτω [14]:

- Λειτουργούν αθόρυβα, καθαρά, χωρίς κατάλοιπα, αποφεύγοντας τη μόλυνση του περιβάλλοντος.
- Λειτουργούν χωρίς κινητά μέρη, με ελάχιστη συντήρηση.
- Λειτουργούν χωρίς καύσιμα.
- Λειτουργούν και με νεφελώδη ουρανό (διάχυτη ακτινοβολία).
- Δεν χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια σε αντίθεση με τα θερμικά συστήματα.
- Κατασκευάζονται από πυρίτιο, ένα από τα πλέον εν αφθονία στοιχεία.
- Είναι πλέον αποδοτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Έχουν γρήγορη απόκριση σε ξαφνικές μεταβολές της ηλιοφάνειας.
- Αν ένα κομμάτι πάθει βλάβη το σύστημα συνεχίζει τη λειτουργία του μέχρι την αντικατάστασή του.
- Έχουν δυνατότητες λειτουργίας σε μια ευρεία περιοχή ισχύων (από mW μέχρι MW).
- Έχουν μεγάλο λόγο ισχύος/βάρος επομένως είναι κατάλληλα για εγκατάσταση σε στέγες.
- Είναι κατάλληλα για επιτόπιες εφαρμογές όπου δεν υπάρχει ή δε συμφέρει η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου.
- Είναι δυνατόν να συναρμολογηθούν τυποποιημένα στοιχεία μαζικής παραγωγής σε σύστημα οποιουδήποτε μεγέθους (και βαθμό απόδοσης πρακτικά ανεξάρτητο του μεγέθους) για να καλύψουν μικρές, μέσες και μεγάλες ενεργειακές ανάγκες.

Παρουσιάζουν βέβαια και κάποια μειονεκτήματα τα οποία θα μπορούσαμε να τα συνοψίσουμε στα εξής:

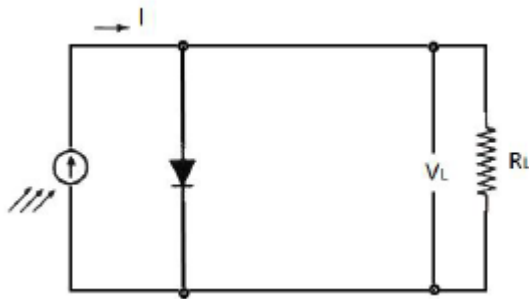
- Τα φωτοβολταϊκά, όπως άλλωστε και όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και ασήμαντο λειτουργικό κόστος, αντίθετα με τις συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες που συνήθως έχουν σχετικά μικρότερο αρχικό επενδυτικό κόστος και υψηλά λειτουργικά κόστη. Βέβαια με τις κρατικές επιχορηγήσεις που έχουν δοθεί τα τελευταία χρόνια σε όλες τις χώρες και στην Ελλάδα

το πρόβλημα αυτό έχει επιλυθεί αλλά δεν παύει να θεωρείται σημαντικός αρνητικός παράγοντας για τον επενδυτή.

- Απαιτείται περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό για να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης από τη ρύπανση (αιθάλη, σκόνη, αλάτι θαλάσσης κτλ.).
- Υπάρχει η ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών λόγω ετεροχρονισμού φορτίου και παραγωγής κάτι το οποίο αυξάνει δραματικά το κόστος επένδυσης εξαιτίας των απαραίτητων συσσωρευτών (μπαταρίες) που χρειάζονται.
- Ανάγκη κάλυψης της κατανάλωσης με ανεμογεννήτριες και συμβατικές μηχανές παραγωγής σε περίπτωση μη αρκετής φωτοβολταϊκής παραγωγής κάτι το οποίο αυξάνει τις λειτουργικές δαπάνες του δικτύου μεταφοράς.

## 2.2 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση

Για να γίνει μια εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα παρακάτω (Εικόνα 2.1). Στο ισοδύναμο αυτό δε συμπεριλαμβάνεται η αντίσταση λόγω της κίνησης των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, όπως ακόμα και η μη άπειρη αντίσταση διαμέσου της διόδου και τα αναπόφευκτα ρεύματα διαρροής [14].



Εικόνα 2.1: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η βασική εξίσωση του ιδανικού ηλιακού κυττάρου είναι η εξής:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) - I_L \quad (2-1)$$

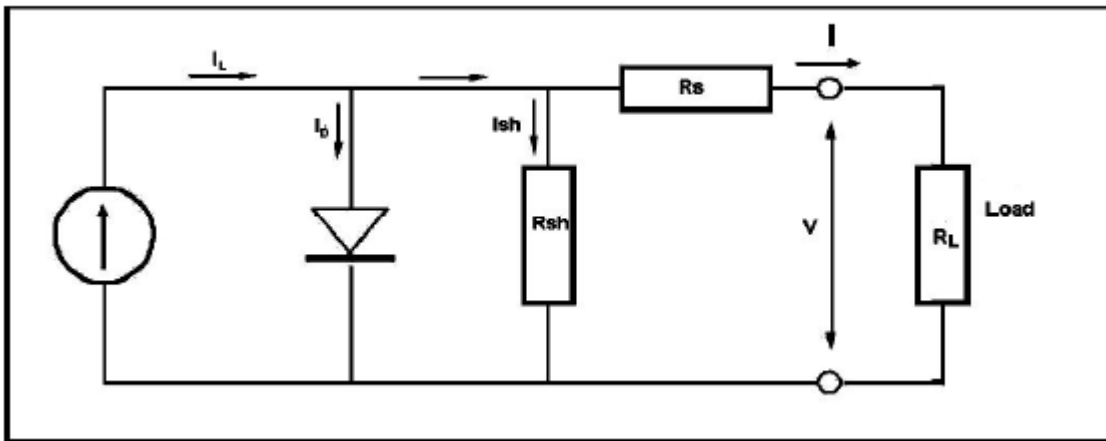
όπου  $I$  το ρεύμα του κυττάρου,  $K$  η σταθερά Boltzman,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου,  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $η$  σταθερή τιμή του  $V$  η τάση του κυττάρου,  $I_L$  το φωτόρευμα και  $I_0$  το ρεύμα κόρου της διόδου που δίνεται από τη σχέση:

$$I_0 = A \left( \frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (2-2)$$

,όπου  $A$  η διατομή του κυττάρου,  $n_i = n = p$  η ενδογενής συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε καθαρό κρύσταλλο πυριτίου,  $L_e$  το μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων το οποίο ισούται με:  $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$  με  $\tau_e$  να είναι η διάρκεια ζωής των ηλεκτρονίων ως φορείς μειονότητας, δηλαδή εκφράζει το χρόνο μεταξύ της δημιουργίας ενός φορέα σε υλικό που αποτελεί φορέα μειονότητας και της επανασύνδεσής του με τον φορέα πλειονότητας.

Τέλος,  $L_h$  είναι το μήκος διάχυσης των οπών και ισούται με:  $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$  με  $\tau_h$  τη διάρκεια ζωής οπών ως φορείς πλειονότητας.

Στην πράξη βέβαια κανένα ηλιακό κύτταρο δεν είναι ιδανικό γι' αυτό τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, που είναι παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου, αφετέρου την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



Εικόνα 2.2: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με αντιστάσεις σε σειρά ( $R_s$ ) και παράλληλα ( $R_{sh}$ ) συνδεδεμένες στο κύκλωμα

Η χαρακτηριστική εξίσωση για το παραπάνω ηλιακό κύτταρο είναι η εξής:

$$I = I_L - I_0 \left\{ e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} - 1 \right\} - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2-3)$$

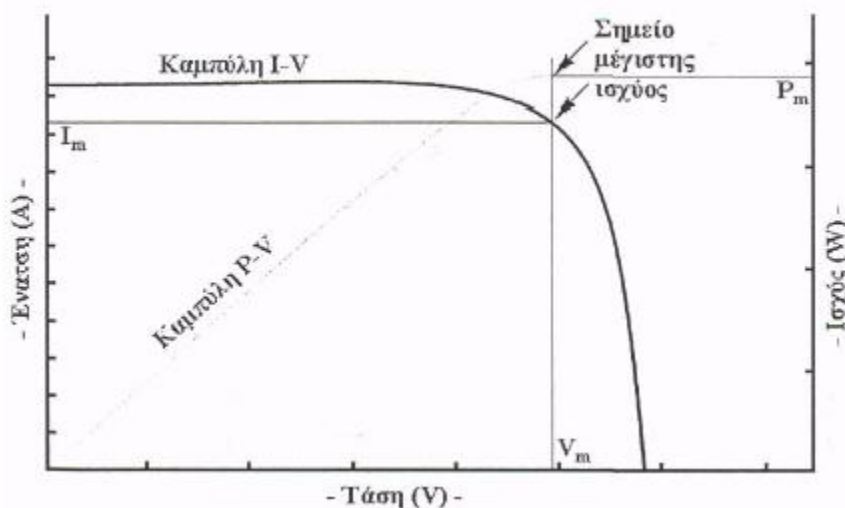
,όπου  $A$  είναι σταθερά με τιμές 1 ή 2 και οφείλεται στα φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή επαφής,

$R_s$  είναι η σε σειρά αντίσταση του κυττάρου. Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου-n) που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού-ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Τυπικές τιμές της  $R_s$  για καλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία κυμαίνονται από 0,1 Ω έως 0,3 Ω,  $V+IR_s = V_D$  είναι η τάση της διόδου επαφής μέσα στο κύτταρο και τέλος  $R_{sh}$  είναι η παράλληλη αντίσταση του κυττάρου. Σχετίζεται με τη διαρροή του ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος

διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Η τιμή της  $R_{sh}$  για πολύ καλής απόδοσης Φ/Β στοιχεία είναι μεγαλύτερη των  $10^3 \Omega$ .

### 2.3 I-V Χαρακτηριστική Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το Φ/Β στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Η γραφική παράσταση μεταξύ ρεύματος στην έξοδο ( $I$ ) και τάσεως στην έξοδο ( $V$ ) ενός ηλιακού κυττάρου καλείται **I-V χαρακτηριστική** και έχει επικρατήσει να παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο και παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 2.3: Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου (Si) για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας (και θερμοκρασίας) και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος,  $I_{sc}$  και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης,  $V_{oc}$ ). Συνεπώς οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν την καμπύλη είναι οι παρακάτω [14,15]:

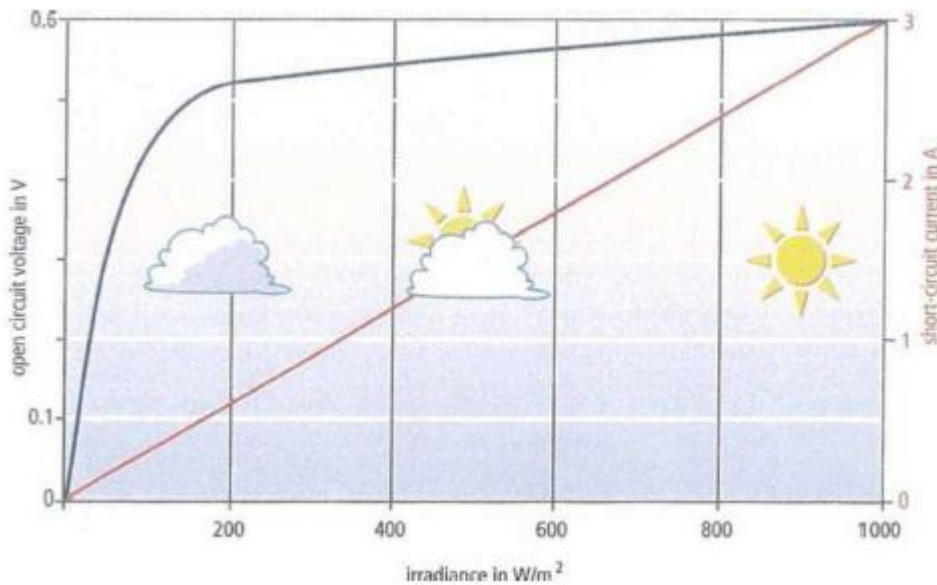
1. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$
2. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$
3. Το σημείο μέγιστης ισχύος  $P_m$
4. Ο συντελεστής πλήρωσης  $ff$  (Fill Factor)
5. Η μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας
6. Η μεταβολή της θερμοκρασίας

Για κάθε μία παράμετρο θα πούμε μερικά σχόλια ώστε να τις κατανοήσουμε καλύτερα.

- Ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  είναι το ρεύμα για τάση  $V = 0$  και αν θεωρήσουμε την σε σειρά αντίσταση  $R_s$  πολύ μικρή τότε το ρεύμα αυτό θα είναι ίσο με το φωτόρευμα  $I_L$ .
- Τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι η τάση για ρεύμα  $I = 0$  και αν τώρα θεωρήσουμε την παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  πολύ μεγάλη τότε από την εξίσωση (2-3) προκύπτει:

$$V_{oc} = \frac{AKT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2-4)$$

Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  καθορίζεται, αφενός από τα χαρακτηριστικά της επαφής p-n, όπως το βασικό υλικό, τη συγκέντρωση των προσμίξεων και τη θερμοκρασία και αφετέρου από την ένταση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την μεταβολή τόσο της τάσης ανοιχτοκύκλωσης όσο και του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε σχέση με την ακτινοβολία που δέχεται το Φ/Β στοιχείο πυριτίου ανά μονάδα επιφάνειας.



Εικόνα 2.4: Μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης  $V_{oc}$  (μπλε καμπύλη) και της βραχυκυκλωμένης έντασης του ρεύματος  $I_{sc}$  (κόκκινη καμπύλη) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου σε συνάρτηση με την ισχύ ακτινοβολίας  $H$ , που δέχεται ανά μονάδα επιφάνειας

Από την εικόνα (2.4) που βλέπουμε παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

1. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  του Φ/Β στοιχείου είναι ανάλογο της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας  $H$  που προσπίπτει στην κυψελίδα.
2. Η τάση ανοικτού κυκλώματος αρχικά αυξάνει, σχετικά απότομα, ως συνάρτηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας  $H$  που προσπίπτει στην κυψελίδα παραμένοντας στη συνέχεια, σχεδόν ανεξάρτητη της  $H$ . Δηλαδή, με το πρώτο φως της ημέρας, η τάση ανοικτού κυκλώματος παίρνει τιμή που μεταβάλλεται αργά (ποσοστιαία μεταβολή), μέσα στο υπόλοιπο χρονικό διάστημα μιας αίθριας ημέρας και σχεδόν μέχρι τη δύση.

- Στο σημείο μέγιστης ισχύος  $P_m$  αντιστοιχεί ρεύμα  $I_m$  και τάση  $V_m$  και βρίσκεται στο σημείο από το οποίο μπορούμε να κατασκευάσουμε το ορθογώνιο με την μεγαλύτερη επιφάνεια μέσα στην  $I-V$  καμπύλη. Μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και το σημείο  $P_m$  παριστάνει τη βέλτιστη αντίσταση φορτίου  $R_{Lopt}$ , που έχει κλίση:  $1/R_{Lopt} = I_m / V_m$ . Επίσης, η  $I-V$  χαρακτηριστική είναι εφαπτόμενη σε κάποια καμπύλη σταθερής ισχύος στο σημείο μέγιστης ισχύος, όπου  $dP / dV = 0$  και επειδή το σημείο επαφής δε μπορεί να καθορισθεί επακριβώς για καμπύλες που κατασκευάζονται με βάση πειραματικά δεδομένα είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια  $P-V$  καμπύλη και να εντοπιστεί το μέγιστο αυτής.

- Ο συντελεστής πλήρωσης (παράγοντας πληρότητας ή συντελεστής ποιότητας)  $ff$  (Fill Factor) είναι ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_m = V_m \cdot I_m$  ενός Φ/Β στοιχείου ή Φ/Β πλαισίου γενικότερα, προς το γινόμενο της τάσεως ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  επί το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  αντίστοιχα, για τη δεδομένη πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και είναι ένα μέτρο του πόσο “τετράγωνη” είναι η  $I-V$  καμπύλη. Δηλαδή:

$$ff = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2-5)$$

Είναι ουσιαστικά συνάρτηση μόνο της τάσεως ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  επειδή εξαρτάται κυρίως απ' αυτήν. Αν ορίσουμε μια κανονικοποιημένη τάση ( $U_{oc} = V_{oc}/(AKT/q)$ ), η ιδανική (μέγιστη) τιμή του συντελεστή πλήρωσης θα δίνεται από τον εμπειρικό τύπο:

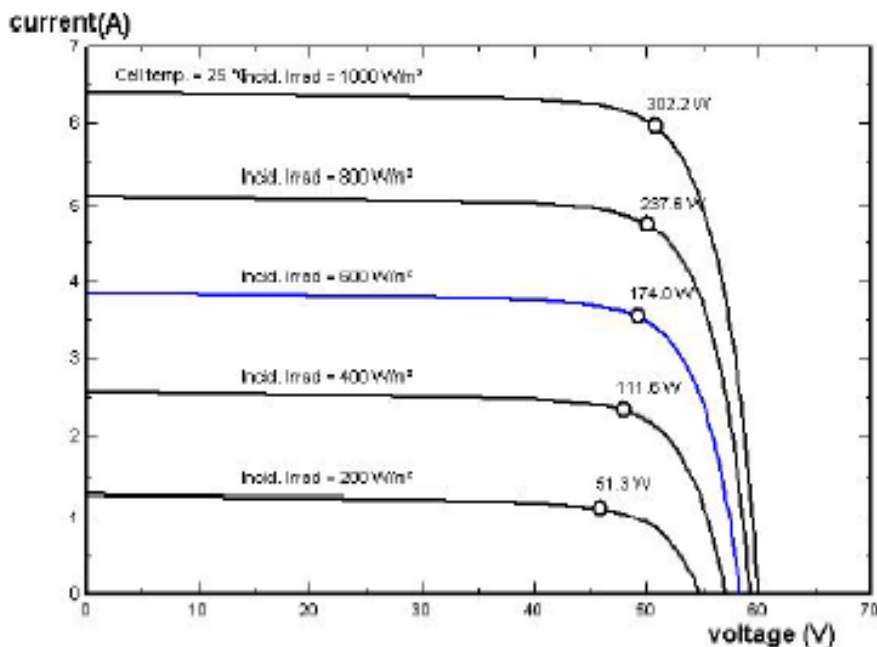
$$ff_o = \frac{U_{oc} - \ln(U_{oc} + 0,72)}{U_{oc} + 1} \quad \text{για } U_{oc} > 10 \quad (2-6)$$

Οι τιμές του συντελεστή πλήρωσης, που καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες, είναι μεταξύ 0 και 1 και πιο συγκεκριμένα τυπικές τιμές του είναι μεταξύ 0,7 και 0,85. Η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του  $ff$ , τόσο περισσότερο η λειτουργία του Φ/Β στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος στην περιοχή τάσεων  $0 - V_{oc}$ . Σ' αυτές τις περιπτώσεις η διάταξη χαρακτηρίζεται αφενός από μικρή ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά, αφετέρου από μεγάλη τιμή παράλληλης αντίστασης. Τυπικές τιμές 0,7 με 0,9 χαρακτηρίζουν Φ/Β στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση αντίστοιχα.

Έχοντας δει τη μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  συναρτήσει της ακτινοβολίας, μπορούμε να δούμε πως μεταβάλλεται και η  $I-V$  χαρακτηριστική του κυττάρου όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας

ακτινοβολίας, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του καθώς και ποιες μεταβολές στις παραμέτρους της  $I-V$  χαρακτηριστικής θα προκληθούν με μεταβολή της θερμοκρασίας.

- Όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του κυττάρου και τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας), μεταβάλλεται και η  $I-V$  χαρακτηριστική του κυττάρου και μάλιστα η απόκριση είναι πολύ γρήγορη (σταθερά χρόνου της τάξεως των  $\mu\text{sec}$ ). Για τους περισσότερους τύπους ηλιακών κυττάρων που έχουν σχεδιασθεί για λειτουργία σε ένταση ακτινοβολίας μιας περίπου ηλιακής σταθεράς, η μορφή της  $I-V$  καμπύλης δε μεταβάλλεται ουσιαστικά με την ένταση στην περιοχή 0,5-2 ηλιακές σταθερές, το ρεύμα  $I_{sc}$  πρακτικά μεταβάλλεται αναλογικά με την ένταση, η τάση  $V_{oc}$  μεταβάλλεται λιγότερο (λογαριθμική εξάρτηση).



Εικόνα 2.5: Χαρακτηριστικές  $I-V$  για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα (Εικόνα 2.5) όπου έχουμε κρατήσει τη θερμοκρασία του Φ/Β πλαισίου σταθερή στους  $25^\circ\text{C}$ , ότι με τη μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας παρατηρείται σημαντική μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της παραγόμενης ισχύος στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αντίθετα η τάση ανοιχτοκύκλωσης μετατοπίζεται ελαφρά όπως αναφέραμε και πιο πάνω.

- Όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του κυττάρου προκαλούνται οι παρακάτω μεταβολές στις παραμέτρους της  $I-V$  χαρακτηριστικής. Με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου:

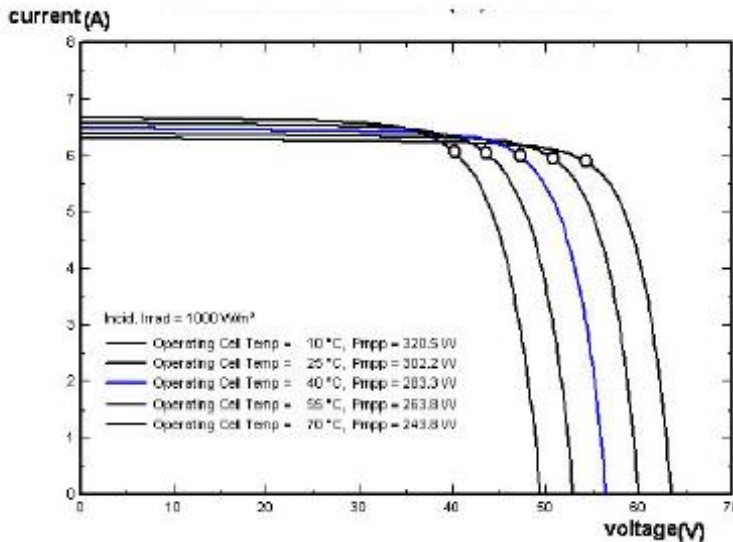
- I. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  αυξάνεται ελαφρά (εξαρτάται βέβαια και από την ένταση της ακτινοβολίας και οφείλεται σε μεταβολή της δυνατότητας συλλογής των φορέων, αφού και το ενεργειακό χάσμα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας).

- II. Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  μειώνεται (οφείλεται σε μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου).

- III. Η ισχύς  $P_m$  ( $P_{mpp}$  ή  $P_{max}$ ) μειώνεται, ενώ μεταβάλλεται και η μορφή της καμπύλης (το σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης γίνεται πιο στρογγυλεμένο με αύξηση της

θερμοκρασίας).

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.6) κρατάμε σταθερή την τιμή της προσπίπτουσας ολικής ακτινοβολίας στα  $1000 \text{ W/m}^2$ . Με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυττάρων του Φ/Β πλαισίου παρατηρείται μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος που αντιστοιχεί σε μείωση της παραγόμενης ισχύος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται ελαφρά. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης από την άλλη μειώνεται αισθητά κάτι που οφείλεται στη μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου.



Εικόνα 2.6: Χαρακτηριστικές I-V για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου

## 2.4 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών

Ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού κυττάρου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n = \frac{V_{oc} I_m}{P_m} = \frac{V_{oc} I_{sc} ff}{P_m} \quad (2-7)$$

όπου  $P_m$  είναι η ολική ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο κύτταρο.

Ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών κυττάρων του εμπορίου κυμαίνεται στο 12-14%, ενώ σε πειραματικά μοντέλα έχουν επιτευχθεί μεγαλύτερες τιμές. Ο θεωρητικά μέγιστος δυνατός βαθμός απόδοσης, με βάση τη σχέση (2-7), εξαρτάται από τις μέγιστες τιμές των  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  και  $ff$ , κυρίως όμως από τις τιμές των δύο πρώτων, διότι όπως έχει αναφερθεί η μέγιστη τιμή του  $ff$  είναι συνάρτηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$ . Έτσι προκύπτει ότι για το πυρίτιο η μέγιστη τιμή της  $V_{oc}$  είναι περίπου 100mV. Η αντίστοιχη μέγιστη τιμή του  $ff$  είναι 0,84 οπότε μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης. Μια λογική εκτίμηση της ελάχιστης τιμής του  $I_0$  που προκύπτει συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος είναι:

$$I_0 = 1,5 \cdot 10^5 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{KT}\right) \quad (2-8)$$

όπου  $E_g$  είναι το ενεργειακό χάσμα.

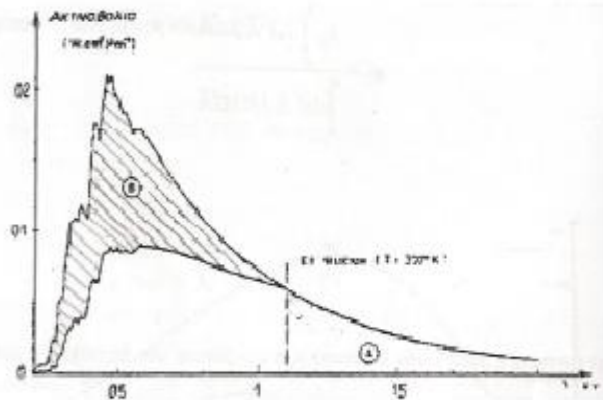


Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η μέγιστη τιμή της  $V_{oc}$  ελαττώνεται όταν ελαττώνεται το ενεργειακό χάσμα, κάτι που είναι αντίθετο από αυτό που ισχύει για το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ . Κατά συνέπεια θα υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του ενεργειακού χάσματος που θα δίνει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης όπως φαίνεται στο σχήμα όπου η μέγιστη απόδοση συμβαίνει για ενεργειακό χάσμα στην περιοχή (1,4-1,6 eV). Το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου (1,1 eV) είναι μικρότερο από το βέλτιστο αλλά η θεωρητικά μέγιστη απόδοση είναι ακόμα πολύ υψηλή, ενώ το αρσενίδιο γαλλίου (GaAs) έχει ένα σχεδόν βέλτιστο ενεργειακό χάσμα (1,4 eV).

#### 2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά το βαθμό απόδοσης

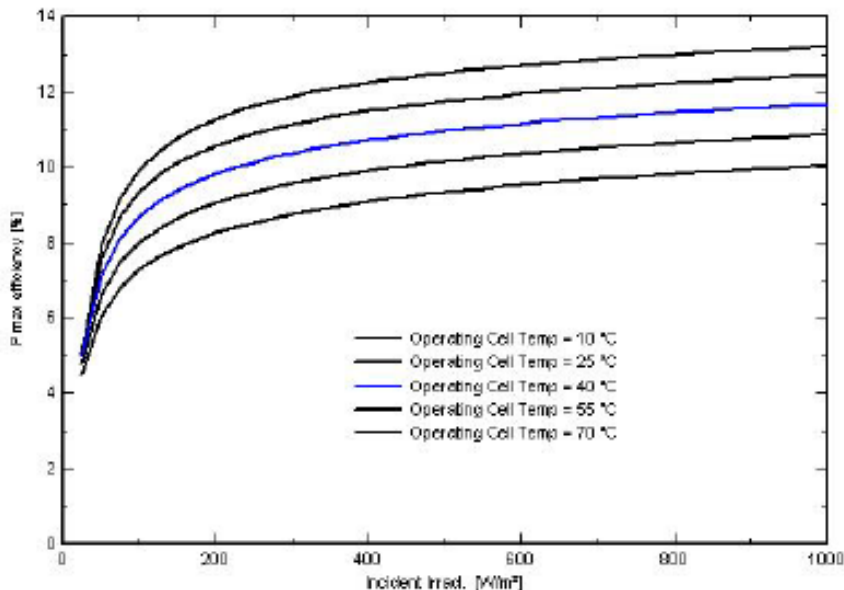
Οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για τη σχετικά χαμηλή τιμή, τόσο θεωρητική όσο και πρακτική, του βαθμού απόδοσης είναι:

- **Ανάκλαση:** Μία μη επεξεργασμένη επιφάνεια πυριτίου ανακλά ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας της τάξεως του 30%. Επεξεργασία της επιφάνειας με χημικά μέσα και/ή επίστρωση με μη ανακλαστικά υλικά περιορίζει δραστικά τις ανακλάσεις μέχρι την τάξη του 3%.
- **Σκίαση από τις επαφές:** Η ανάγκη της κατασκευής ηλεκτροδίων τόσο στην επιφάνεια του υλικού τύπου p όσο και του υλικού τύπου n συνεπάγεται τη δημιουργία ενός μεταλλικού πλέγματος επαφών στην επιφάνεια του κυττάρου που εκτίθεται στο ηλιακό φως. Αυτό συμβαίνει επειδή η αντίσταση στην επιφανειακή κίνηση των φορέων στο πάνω επιφανειακό στρώμα του κυττάρου είναι μεγάλη και πρέπει να υπάρχουν πολλά σημεία απαγωγής των φορέων (ηλεκτρικές επαφές) με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν τα ωμικά φαινόμενα. Το αποτέλεσμα για τα ηλεκτρόδια είναι μια γεωμετρία μεταλλικού πλέγματος στην πάνω επιφάνεια του κυττάρου, που έχει σαν συνέπεια ένα ποσοστό 5-15% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να εκτρέπεται.
- **Ατελής εκμετάλλευση της ενέργειας των φωτονίων:** Όπως είναι γνωστό η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος έχει διαφορετικές εντάσεις σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Δηλαδή στον κρύσταλλο, προσπίπτουν φωτόνια που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών ενέργειας τα οποία είναι δυνατόν ή να διαπεράσουν το κύτταρο, ή να απορροφηθούν παράγοντας μόνο θερμότητα υπό μορφή ταλαντώσεων των ατόμων, ή να δημιουργήσουν ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών, ή να δημιουργήσουν ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών και η επιπλέον ενέργεια τους να μετατραπεί σε θερμότητα. Αυτός ο παράγοντας με τους τέσσερις μηχανισμούς του και μόνο περιορίζει τη μέγιστη δυνατή απόδοση στο 44%. Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.7) έχει χαραχθεί ένα ηλιακό φάσμα του κυττάρου πυριτίου στο οποίο παρατηρούμε ότι η γραμμοσκιασμένη περιοχή B αντιστοιχεί στην περίσσεια ενέργεια των φωτονίων με ενέργεια ανώτερη από το ενεργειακό χάσμα  $E_g$ . Η ζώνη A αντιστοιχεί στη χαμένη ενέργεια από τα μη απορροφούμενα φωτόνια.



Εικόνα 2.7: Ηλιακό φάσμα AMO για ένα ηλιακό κύτταρο πυριτίου (Si)

- Επανασύνδεση: Αυτή μπορεί να συμβεί με διάφορους μηχανισμούς στον κυρίως όγκο του ημιαγωγού, στις επιφάνειες και στις ατέλειες του υλικού.
- Αντίσταση: Μη ικανοποιητικές τιμές τόσο της εν σειρά αντίστασης  $R_s$  όσο και της παράλληλης  $R_{sh}$  τείνουν να ελαττώσουν το συντελεστή  $ff$ , ενώ σε ακραίες περιπτώσεις ελαττώνουν ακόμα και τα  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  με τελική συνέπεια τη μείωση της απόδοσης.
- Θερμοκρασία: Οι φυσικοί μηχανισμοί που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και βαθμού απόδοσης είναι αρκετά πολύπλοκοι. Πάντως τόσο οι αρκετά υψηλές και οι αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες τείνουν να μειώσουν σημαντικά το βαθμό απόδοσης. Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.8) φαίνεται η μείωση της μέγιστης απόδοσης του πλαισίου με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας για ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας.



Εικόνα 2.8: Σχέση θερμοκρασίας με μέγιστη απόδοση ισχύος φωτοβολταϊκού πλαισίου

- **Γήρανση:** Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, άρα και της ισχύος αιχμής του, λόγω γενικότερης αλλοίωσης του φωτοβολταϊκού κυττάρου ως ενσωματωμένου τμήματος του Φ/Β πλαισίου. Οι αιτίες της γήρανσης είναι πολλές όπως αποχρωματισμός των κυττάρων, ράγισμα του γυαλιού κάλυψης, διαχωρισμός του ειδικού πλαστικού μόνωσης από την υγρασία της πίσω πλευράς, και κακή λειτουργία των καλωδιώσεων και του κιβωτίου συνδέσεων. Μετρήσεις μακράς διάρκειας σε πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου δείχνουν μείωση της αποδοτικότητάς του κάτω από πρότυπες συνθήκες περίπου 1% κατ' έτος χρήσης (ρυθμός γήρανσης).

## 2.5 Απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το κάθε Φ/Β πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (απόδοση, τάση, ισχύ κλπ.), που προφανώς διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη των χωριστών ηλιακών στοιχείων που περιέχει. Επομένως, όμοια με την σχέση που ορίζει το συντελεστή πλήρωσης, ο συντελεστής απόδοσης του Φ/Β πλαισίου ( $n_{\pi}$ ) εκφράζει το λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το Φ/Β πλαίσιο ( $P_{\pi}$ ) προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του  $S$ . Προφανώς, την ίδια τιμή θα έχει και ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας  $E$  που παράγει το Φ/Β πλαίσιο επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται επί το ίδιο χρονικό διάστημα. Δηλαδή:

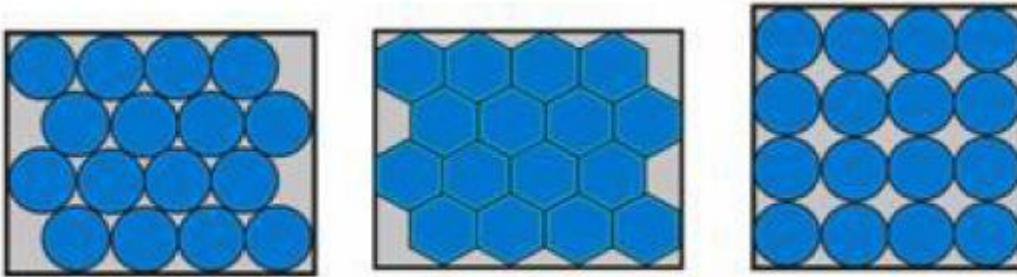
$$n_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{H \cdot S} \left( \frac{W}{(W / m^2) \cdot m^2} \right) \quad (2-9)$$

$$n_{\pi} = \frac{E_{\pi}}{\Pi \cdot S} \left( \frac{kW}{(kW / m^2) \cdot m^2} \right) \quad (2-10)$$

όπου  $\Pi$  είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Η τιμή του  $n_{\pi}$  είναι φανερό ότι εξαρτάται όχι μόνο από τη μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων ( $n$ ), αλλά και από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου ( $\sigma_{\kappa}$ ), που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας προς την συνολική επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Βρίσκουμε εύκολα ότι θα ισχύει η σχέση:

$$n_{\pi} = n \cdot \sigma_{\kappa} \quad (2-11)$$

Η τιμή του  $\sigma_{\kappa}$  εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο Φ/Β πλαίσιο. Συνήθως κυμαίνεται από περίπου 0,78 για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχισμένες σειρές και φτάνει πρακτικά μέχρι 0,98 για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία. Υπάρχουν όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.9) διάφοροι τρόποι παράθεσης ηλιακών στοιχείων από τους οποίους παρατηρούμε ότι ο καλύτερος δυνατός είναι με εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία.



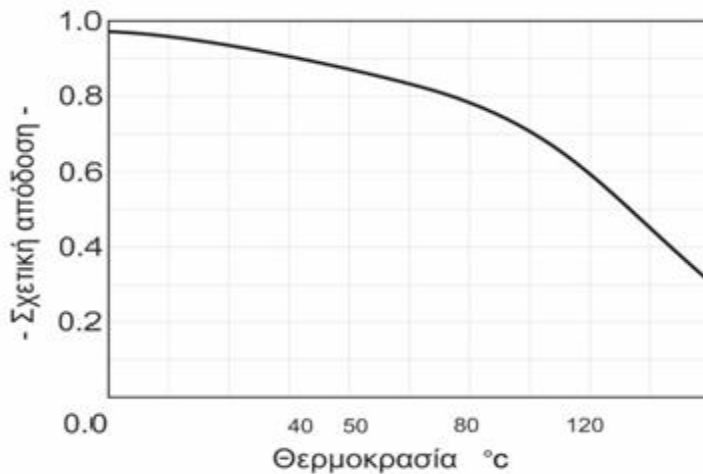
Εικόνα 2.9: Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των ηλιακών στοιχείων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια

## 2.6 Επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης στα φωτοβολταϊκά πλαίσια

Όπως έχουμε ήδη πει η απόδοση των Φ/Β στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Όμως, ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα Φ/Β πλαίσια αντιστοιχεί σε μία συμβατική θερμοκρασία 20°C η οποία συχνά, ιδίως στους θερινούς μήνες, διαφέρει αξιόλογα από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου. Έχει μετρηθεί ότι αφενός και κυρίως λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά 25 ως 30°C, ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου. Ως μέσο όρο στους υπολογισμούς μας παίρνουμε συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας κατά 30°C. Για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής  $\sigma_{\theta}$  με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Το ίδιο εφαρμόζουμε και για τα Φ/Β πλαίσια. Δηλαδή, για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο:

$$n_{\pi} \cdot \sigma_{\theta} \quad (2-12)$$

Σε συμβατική θερμοκρασία ο συντελεστής  $\sigma_{\theta}$  είναι ίσος με την μονάδα και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή. Στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 2.10) βλέπουμε την τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους. Η κλίμακα του άξονα των τεταγμένων δίνει το ποσοστό της απόδοσης του στοιχείου σε σχέση με την απόδοσή του στη συμβατική θερμοκρασία των 20°C. Η κλίμακα της θερμοκρασίας στον άξονα των τετμημένων είναι λογαριθμική.



Εικόνα 2.10: Καμπύλη μεταβολής απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου συναρτήσει της θερμοκρασίας τους

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας του από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνει περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των Φ/Β πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές σε συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη.

Όταν η Φ/Β γεννήτρια βρίσκεται σε μια περιοχή όπου εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας ( $\sigma_p$ ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο Φ/Β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ όταν η επιφάνεια του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του  $\sigma_p$  είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του Φ/Β πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κτλ. Έτσι, όποτε είναι απαραίτητο, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων για τους υπολογισμούς μας, παίρνουμε το γινόμενο του ενδεικτικού συντελεστή απόδοσης  $n_p$ , που δίνεται για συμβατική θερμοκρασία και καθαρή επιφάνεια, επί τους συντελεστές διόρθωσης για τη θερμοκρασία  $\sigma_\theta$  και για τη ρύπανση  $\sigma_p$ . Δηλαδή, η προηγούμενη σχέση (2-10) παίρνει τη γενικότερη μορφή:

$$E = \Pi \cdot S \cdot n_p \cdot \sigma_\theta \cdot \sigma_p \quad (2-13)$$

## 2.7 Η Ισχύς Αιχμής του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Συχνά, δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων (διαστάσεις, συντελεστής κάλυψης, συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων κλπ.), αλλά δίνεται μόνο μια ενδεικτική ισχύς αιχμής ( $P_{\alpha}$ ), που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το Φ/Β πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ήλιου, δηλαδή  $1 \text{ kW/m}^2$ .

Οι μονάδες ισχύος που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός Φ/Β πλαισίου μιας ολόκληρης Φ/Β εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου ονομάζονται συχνά “Βατ Αιχμής” ( $W_p$ , Watt peak) και “Κιλοβάτ Αιχμής” ( $kW_p$ , kilowatt peak). Δηλαδή χρησιμοποιείται ο ίδιος όρος και συμβολισμός (άλλωστε ουσιαστικά είναι και το ίδιο πράγμα) όπως για το μέτρο της επιφάνειας των Φ/Β στοιχείων που γνωρίσαμε προηγουμένως. Από την σχέση που δίνει την απόδοση  $n_p$  είναι φανερό ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$P_{\alpha}(kW_p) = 1(kW / m^2) \cdot S(m^2) \cdot n_p \quad (2-14)$$

Στην περίπτωση λοιπόν, που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής  $P_{\alpha}$  για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Φ/Β πλαισίου αντί για την παραπάνω σχέση χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη σχέση:

$$E(kWh / d) = \Pi(kWh / m^2 d) \cdot \frac{P_{\alpha}(kW_p)}{1(kW / m^2)} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho} \quad (2-15)$$

## 2.8 Τα Ηλεκτρονικά των Φωτοβολταϊκών

### 2.8.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα Φ/Β πλαίσιο είναι υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος (DC). Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (AC) είναι απαραίτητη για τη χρήση πολλών κοινών συσκευών όπως και για τη σύνδεση στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο και επιτυγχάνεται με ένα μετατροπέα τάσης συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα ή αλλιώς μετατροπέας DC-AC [14-15].

Η αποδοτικότητα των μετατροπέων είναι γενικά μεγαλύτερη από 90%, όταν λειτουργούν πάνω από το 10% της μέγιστης παραγωγής τους και μπορεί να φτάσει έως και 96%. Οι μετατροπείς που συνδέονται άμεσα με τα φωτοβολταϊκά ενσωματώνουν μια ηλεκτρονική διάταξη ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος (Maximum Power Point Tracker - MPPT), ρυθμίζοντας συνεχώς τη σύνθετη αντίσταση φορτίων έτσι ώστε ο μετατροπέας να εξάγει πάντα τη μέγιστη ενέργεια από το σύστημα.

Οι μετατροπείς υπάγονται σε δύο κύριες κατηγορίες: α) αυτο-συγχρονιζόμενος και β) συγχρονισμένος βάση μίας σύνδεσης. Ο πρώτος μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα, ενεργοποιούμενος από την πηγή ενέργειας, δηλαδή μόλις υπάρχει ρεύμα από τα Φ/Β τότε

ενεργοποιείται για να μην σπαταλάει ρεύμα από τους συσσωρευτές. Αυτοί που υπάγονται στη δεύτερη κατηγορία ενεργοποιούνται και ελέγχονται από το δίκτυο. Αυτό είναι απαραίτητο για να διατηρήσει το δίκτυο σταθερή ποιότητα ρεύματος και να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα. Αυτής της κατηγορίας οι μετατροπείς σταματάνε όταν υπάρχει βλάβη στο δίκτυο για πρόληψη ηλεκτροπληξίας στα συνεργεία της ΔΕΗ.

Παραδοσιακά, ένας μετατροπέας χρησιμοποιείται για ολόκληρη τη συστοιχία. Ξεχωριστοί μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές συστοιχίες Φ/Β σε περίπτωση που η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγάλη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοπιστία, καθώς εάν προκύψει κάποιο πρόβλημα σε μια μονάδα, απομονώνεται χωρίς να σταματήσει την παραγωγή το υπόλοιπο σύστημα.

## 2.8.2 Μονάδες Μετατροπής Ισχύος

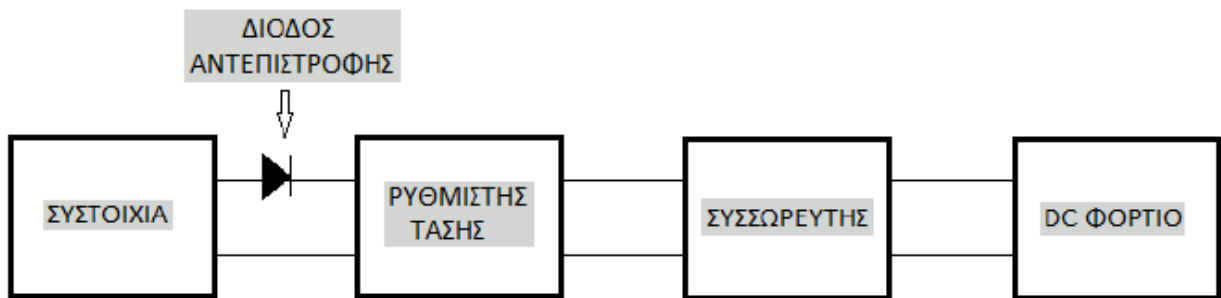
Μονάδες μετατροπής ισχύος είναι οι μονάδες εκείνες που αναλαμβάνουν την προσαρμογή μεταξύ συστοιχίας, συσσωρευτή, φορτίων και εφεδρικής πηγής ενέργειας (αν υπάρχει) μετατρέποντας την «ακατέργαστη» DC ισχύ εξόδου από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία σε ισχύ «κατάλληλης ποιότητας» και σύμφωνης με τις απαιτήσεις του φορτίου.

Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία παράγει DC ισχύ με μεταβολές της τάσης της τάξης του 30%. Αν οι ανάγκες του φορτίου περιορίζονται σε DC ισχύ (π.χ. φωτισμός, DC κινητήρας, άλλα ωμικά φορτία) τότε ο πιο απλός συνδυασμός είναι η απ' ευθείας σύνδεση της συστοιχίας με ένα συσσωρευτή, μέσω διόδου αντεπιστροφής και στη συνέχεια με το φορτίο (Εικόνα 2.11). Η δίοδος αντεπιστροφής τοποθετείται για αποφυγή της εκφόρτισης των συσσωρευτών διαμέσου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, αν μειωθεί σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συνδυασμός αυτός συνίσταται μόνο όταν το μέγιστο ρεύμα της συστοιχίας είναι μικρότερο από το 5% της χωρητικότητας των συσσωρευτών.



Εικόνα 2.11: Αυτορρυθμιζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα

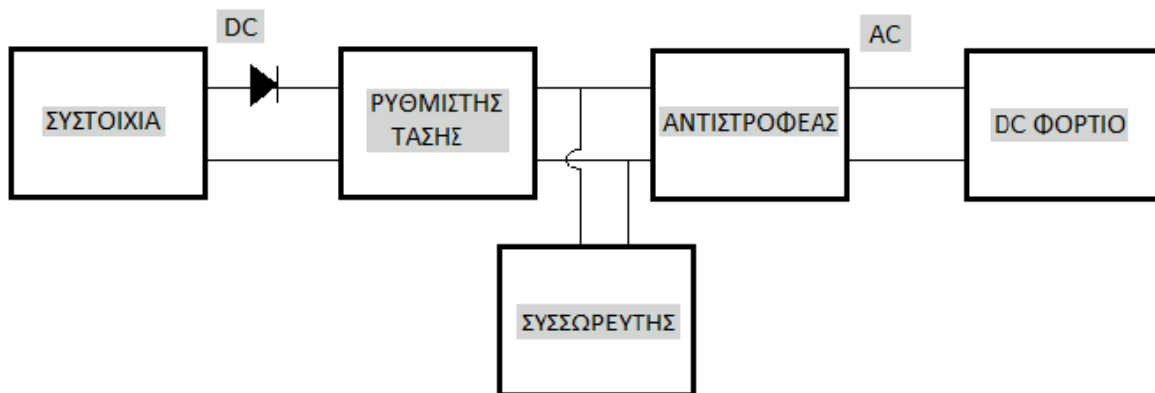
Σε πολλά DC συστήματα, οι μεταβολές της τάσης που οφείλονται σε μεταβολή των καιρικών συνθηκών και χειροτέρευση των χαρακτηριστικών τους κυττάρων λόγω γήρανσης, αντισταθμίζονται με έλεγχο της τάσης της συστοιχίας με τη βοήθεια ρυθμιστών τάσης όπως βλέπουμε παρακάτω (Εικόνα 2.12). Έτσι, παρέχεται ισχύς σε σταθερή τάση με σκοπό να προστατεύσουμε το συσσωρευτή και το φορτίο από ακραίες τιμές της τάσης με όλες τις γνωστές συνέπειες.



Εικόνα 2.12: Φωτοβολταϊκό σύστημα με ρυθμιστή τάσης

Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θέλουμε να εξάγουμε από τη συστοιχία το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή το σημείο λειτουργίας να αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αν το σύστημα είναι αυτόνομο και περιλαμβάνει συσσωρευτές ο αριθμός των σε σειρά συνδεδεμένων στοιχείων των συσσωρευτών πρέπει να είναι κατάλληλος, ώστε η τάση του συσσωρευτή να βρίσκεται στη γειτονιά της τάσης που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος της συστοιχίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση, δεν υπάρχει αυτή η προσαρμογή λόγω μεταβολής της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών (SOC), του ρυθμού φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών, με συνέπεια τη μείωση του συνολικού βαθμού απόδοσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια μονάδα που ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker), που ακολουθώντας κατάλληλη στρατηγική ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος επιτυγχάνει την απαιτούμενη προσαρμογή.

Αν οι ανάγκες του φορτίου απαιτούν AC ισχύ (που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση) χρησιμοποιείται κι ένας αντιστροφέας, inverter, ώστε να μετατρέπει την DC σε AC ισχύ (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13: Φωτοβολταϊκό σύστημα με αντιστροφέα

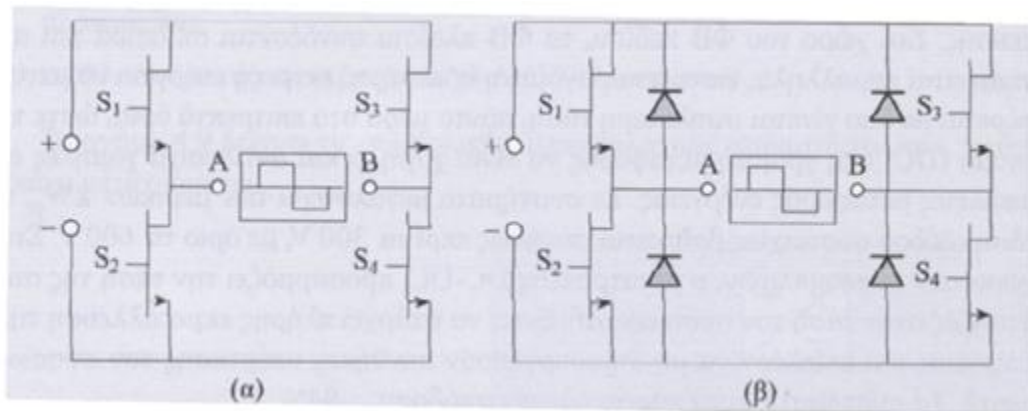
Επίσης, στις παραπάνω μονάδες μετατροπής της ισχύος μπορούμε να κατατάξουμε και τις μονάδες ελέγχου του συστήματος που μπορεί να περιλαμβάνουν: αυτόματη εκκίνηση και θέση εκτός λειτουργίας, εκτίμηση του SOC των συσσωρευτών, θέση σε λειτουργία της



εφεδρικής πηγής ενέργειας, κατανομή φορτίου, εντοπισμό σφαλμάτων/αυτόματη διόρθωση, διακόπτες, γείωση, άλλα συστήματα προστασίας, συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής δεδομένων κλπ.

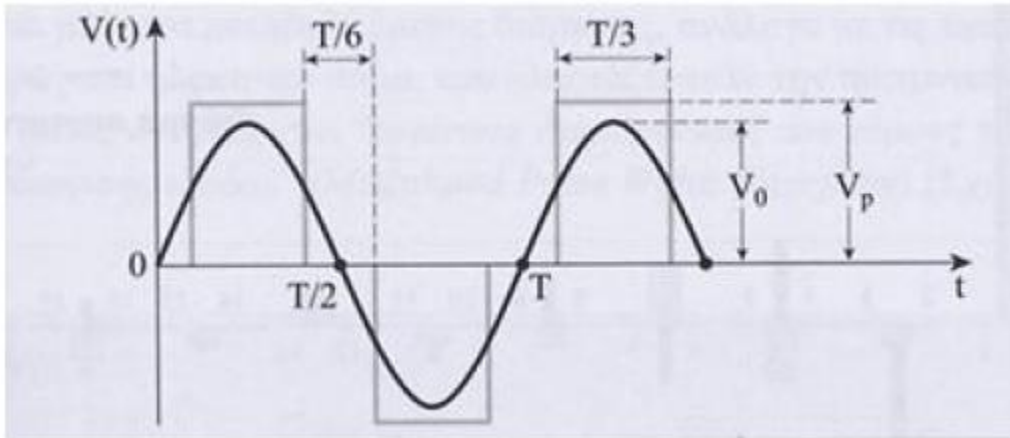
### 2.8.3 Μετατροπείας (inverter) DC-AC

Ο Inverter είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Η βασική αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στην εικόνα (Εικόνα 2.14) που παρατίθεται πιο κάτω. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις που διαθέτουμε πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλωτές εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές οικιακής χρήσεως. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (bipolar transistors ισχύος, MOSFETs, thyristors κλπ), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών διαδοχικά ορθών και ανεστραμμένων (Inversion).



Εικόνα 2.14: (α) Βασική αρχή λειτουργίας του inverter. Τα  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  είναι διακοπτικά στοιχεία. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC conversion) επιτυγχάνεται με άνοιγμα-κλείσιμο των διακοπτικών στοιχείων ανά δύο, χιαστί ( $S_1$ ,  $S_4$  και  $S_2$ ,  $S_3$ ). Όσο τα  $S_1$ ,  $S_4$  είναι αγωγή και τα  $S_2$ ,  $S_3$  σε αποκοπή, τα σημεία A και B έχουν πρόσημα + και - αντίστοιχα. Όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τα A και B έχουν αντίθετα πρόσημα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται η εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση (κέντρο του διαγράμματος). (β) Στο προηγούμενο κύκλωμα προστίθεται σε κάθε διακοπτικό στοιχείο από μία δίοδος, έτσι ώστε να αποκόπτεται η επιστρεφόμενη ισχύς από μη ωμικά φορτία κατανάλωσης

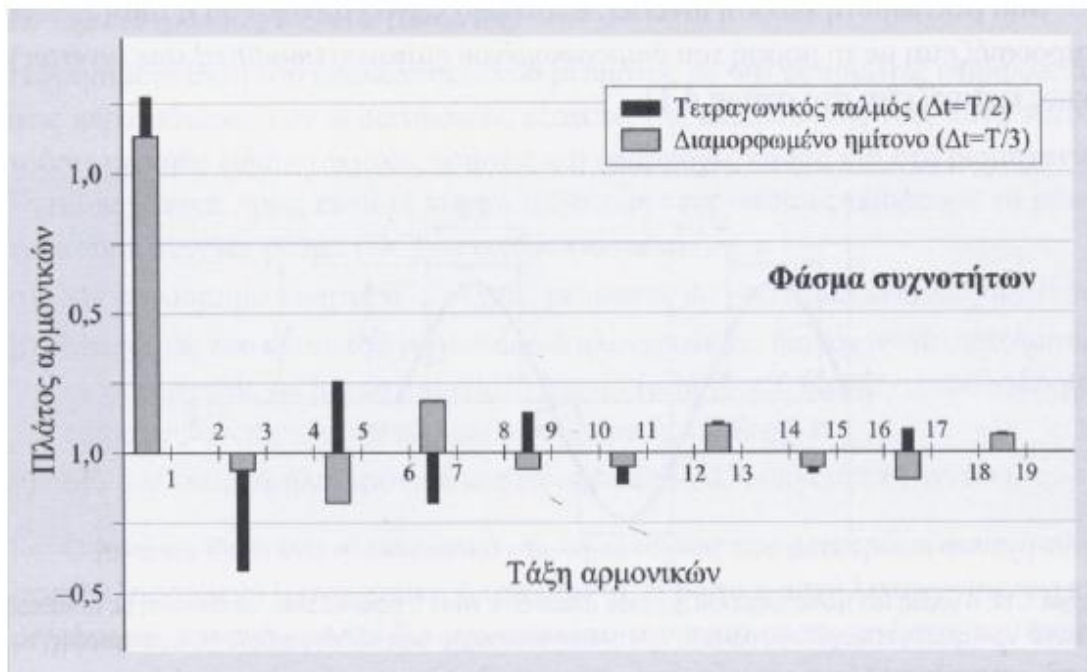
Μία βελτιωμένη έκδοση αντιστροφεία αποτελεί εκείνος του οποίου η τάση εξόδου παρουσιάζεται με τη μορφή του διαμορφωμένου ημιτόνου (modified sine inverter), όπως εμφανίζεται παρακάτω (Εικόνα 2.15). Στο σχήμα αυτό το  $V_p$  είναι το πλάτος του τετραγωνικού παλμού και  $V_0$  είναι το αντίστοιχο πλάτος της θεμελιώδους ημιτονικής κυματομορφής.



Εικόνα 2.15: Η μορφή του τροποποιημένου ημιτόνου σε σύγκριση με το καθαρό ημίτονο

Με κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων κλεισίματος – ανοίγματος των διακοπών, επιτυγχάνουμε μικρή τροποποίηση της κυματομορφής εξόδου του, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι ο αρνητικός τετραγωνικός παλμός είναι μετατοπισμένος χρονικά, σε σχέση με το θετικό, κατά  $T/6$  της περιόδου της συνολικής κυματομορφής. Το χρονικό εύρος των τετραγωνικών τμημάτων είναι  $T/3$ .

Το πλεονέκτημα αυτής της διαμορφωμένης τετραγωνικής κυματομορφής είναι ότι περιορίζεται το μέγεθος των ανωτέρων αρμονικών και άρα περιορίζεται δραστικά η παραμόρφωση σήματος. Πράγματι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των πλατών των ανωτέρων αρμονικών του διαμορφωμένου σήματος, σε σχέση με τον απλό τετραγωνικό παλμό. Πιο συγκεκριμένα το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής (τάξη  $n=1$ ) είναι περίπου 1,15 φορές μεγαλύτερο από το πλάτος του τετραγωνικού παλμού ( $V_0 = 1,15V_p$ ).



Εικόνα 2.16: Φάσμα συχνότητων δύο περιοδικών σημάτων (εναλλασσόμενος τετραγωνικός παλμός και εναλλασσόμενο διαμορφωμένο ημίτονο)

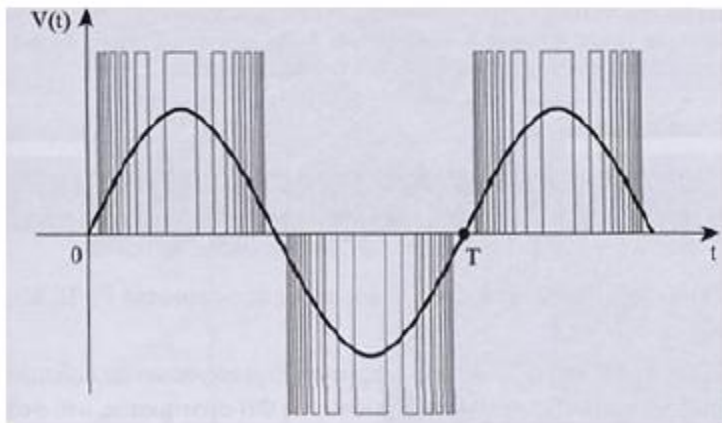
Η περίπτωση με μετατόπιση  $t=T/6$  μεταξύ των αναστραμμένων παλμών χαρακτηρίζεται από μικρότερη παραμόρφωση, που επιβάλουν οι ανώτερες αρμονικές στο σήμα της θεμελιώδους. Οι inverters αυτού του είδους χρησιμοποιούνται ευρέως χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στις συσκευές που τροφοδοτούν και παρουσιάζουν αρκετά καλή απόδοση (μέχρι και 96%, σε πλήρες φορτίο).

Γενικά, η απόδοση των inverters είναι αρκετά υψηλή και φτάνει σε επίπεδα 93-96% (Εικόνα 2.17), εξαρτώμενη από το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί. Απαιτείται υψηλή απόδοση, όχι μόνο όταν τροφοδοτείται το πλήρες φορτίο (100%), αλλά και όταν αυτό είναι μειωμένο. Συγκεκριμένα, βασικό απαιτούμενο χαρακτηριστικό ενός inverter είναι η υψηλή απόδοση (>90%) ακόμα και όταν το φορτίο είναι μόνο 10% του πλήρους. Σημειώνεται, επίσης, ότι η λειτουργία τους συνοδεύεται, κατά περίπτωση από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλών συχνότητων (κυρίως με τον απλό τετραγωνικό παλμό), που περιορίζονται με ειδικά ηλεκτρονικά φίλτρα.



Εικόνα 2.17: Μεταβολή της απόδοσης του inverter συναρτήσει του ποσοστού πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί

Επιβάλλοντας περισσότερα κλεισίματα των διακοπών (S1, S4) και (S2, S3) και μάλιστα μεταβαλλόμενης διάρκειας, ανάλογα με τις τιμές ενός ημιτόνου, παράγεται ηλεκτρικό σήμα που πλησιάζει πολύ την ημιτονική μορφή. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται "inverters διαμόρφωσης του εύρους των παλμών της κυματομορφής εξόδου" και στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την κυματομορφή εξόδου ενός τέτοιου inverter.



Εικόνα 2.18: Η κυματομορφή εξόδου ενός inverter διαμόρφωσης εύρους παλμών

#### 2.8.4 Σχεδίαση ενός DC-AC Μετατροπέα

##### Πλευρά Εισόδου του Μετατροπέα ( Input side)

Επί της ουσίας πρόκειται για την πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται με την έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, η οποία παρέχει ισχύ υπό συνεχή dc τάση και ρεύμα. Τα μεγέθη που παραθέτουμε σε αυτήν την παράγραφο αναφέρονται στην DC πλευρά της συσκευής, δηλαδή σε συνεχές ρεύμα και τάση.

## Κατάσταση λειτουργίας

Ο μετατροπέας έχει ενσωματωμένες στην είσοδο του ηλεκτρονικές διατάξεις που επεξεργάζονται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου της Φ/Β συστοιχίας, ώστε για κάθε χρονική στιγμή να απορροφάμε τη μέγιστη ισχύ από τη συστοιχία. Η παραγωγή και άρα απορρόφηση μέγιστης ισχύος όπως είδαμε αντιστοιχεί στο MPP σημείο λειτουργίας. Με τη χρήση τέτοιων διατάξεων το σημείο λειτουργίας διατηρείται σταθερά στο MPP, προφανώς για τις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η κατάσταση λοιπόν λειτουργίας του μετατροπέα λαμβάνεται να αντιστοιχεί πάντα στο MPP.

## Ελάχιστη και μέγιστη MPP τάση

Οι δύο αυτές χαρακτηριστικές τιμές της τάσης ορίζουν ένα «παράθυρο τάσης», άνω και κάτω όριο τάσης, μέσα στο οποίο ο inverter δύναται να αναζητήσει το MPP. Όταν καθορίζουμε την τάση MPP εξόδου της συστοιχίας αυτή θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στο «παράθυρο τάσης» του μετατροπέα.

Το MPP όπως είδαμε καθορίζεται από το ρεύμα IMPP και την τάση VMPP. Τα μεγέθη αυτά παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων αλλά αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), όπου η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων λαμβάνεται 25°C.

Σε πραγματικές συνθήκες όμως, η θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη και το MPP μετατοπίζεται. Έτσι μια καλή προσέγγιση για τον υπολογισμό του MPP της γεννήτριας, ώστε να εξεταστεί αν αυτό βρίσκεται μέσα στο παράθυρο τάσης είναι η θερμοκρασία λειτουργίας να λαμβάνει τιμές 50°C με 60°C.

## Μέγιστη τάση

Είναι η απόλυτη μέγιστη dc τάση κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες που μπορεί να δεχθεί στην είσοδό του ο μετατροπέας. Η μέγιστη τάση εξόδου της συστοιχίας δεν πρέπει να υπερβαίνει αυτή την τιμή. Πρέπει λοιπόν να εξετάζουμε αν η τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$  της συστοιχίας είναι μικρότερη από το συγκεκριμένο όριο τάσης. Για να είμαστε στην ασφαλή πλευρά, η ακτινοβολία λαμβάνεται στα 1000W/m<sup>2</sup>, ενώ για τη θερμοκρασία μια καλή προσέγγιση είναι -10°C για την Ευρώπη. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η  $V_{oc}$  ελαττώνεται.

## Κατώφλι ισχύος (Power threshold)

Είναι η ελάχιστη ισχύς εισόδου που χρειάζεται ο inverter για να λειτουργήσει. Μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ισχύς που καταναλώνει ο ίδιος ο inverter για τη λειτουργία του.

## **Μέγιστο φωτοβολταϊκό ρεύμα ( $I_{pvmax}$ )**

Είναι το απόλυτο μέγιστο αποδεκτό ρεύμα στην είσοδο του inverter. Για τη διαστασιολόγηση του συστήματος συνήθως εξετάζεται η απαίτηση το  $I_{mpp}$  της συστοιχίας να είναι μικρότερο από την παραπάνω τιμή.

## **Λοιπά στοιχεία**

Άλλα στοιχεία τα οποία μπορεί κανείς να βρει στους καταλόγους με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστών, αλλά δε χρησιμοποιούνται από το συγκεκριμένο πρόγραμμα για το σχεδιασμό και την εξομοίωση είναι τα εξής:

**Η Ονομαστική Φωτοβολταϊκή Ισχύς** που είναι μια συνήθης καθοριζόμενη παράμετρος για τους inverter. Εννοείται ως η συνιστάμενη ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας σε STC συνθήκες.

**Η Μέγιστη Φωτοβολταϊκή Ισχύς** η τιμή της οποίας μπορεί να δίνεται μερικές φορές. Η σημασία της δεν είναι σαφώς ορισμένη. Μπορεί να γίνει αντιληπτή, ως η απόλυτη μέγιστη ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε STC συνθήκες αν και ο ακριβής της ορισμός διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή.

## **Πλευρά Εξόδου του Μετατροπέα (Output side)**

Εννοούμε την πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται στο δίκτυο ή εν γένει στο φορτίο που τροφοδοτεί. Προφανώς στην πλευρά εξόδου έχουμε εναλλασσόμενη (AC) τάση και ρεύμα. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που εξετάζονται στις επόμενες υποπαραγράφους αναφέρονται στην AC πλευρά του μετατροπέα.

## **Ονομαστική ισχύς**

Η ονομαστική ισχύς είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μεγέθη για τους μετατροπείς. Εννοείται ως η ισχύς που μπορεί να παρέχει διαρκώς στο δίκτυο. Όταν έχουμε υπέρβαση των ορίων, δηλαδή σε ακραίες περιπτώσεις υπερπαραγωγής ισχύος στο MPP, εφαρμόζεται κάποια μέθοδος περιορισμού, π.χ. μετατόπιση του σημείου λειτουργίας της  $I-V$  χαρακτηριστικής. Η ονομαστική ισχύς είναι το μόνο από τα μεγέθη που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης.

## **Μέγιστη AC ισχύς**

Η σημασία της δεν είναι σαφώς ορισμένη αν και μερικές φορές παρέχεται από τους κατασκευαστές. Μπορεί να εννοηθεί ως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει ο μετατροπέας στην έξοδο του για ένα χρονικό διάστημα, μετά την υπέρβαση του οποίου επέρχεται η

υπερθέρμανση της συσκευής οπότε και πρέπει να σταματήσει η λειτουργία της στο σημείο αυτό. Αξίζει να τονίσουμε εδώ ότι η συγκεκριμένη ισχύς δεν χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα.

### **Ονομαστική AC τάση**

Είναι η τάση υπό την οποία ο μετατροπέας παρέχει την ονομαστική ισχύ του στην έξοδό του. Εξαρτάται από την τάση του δικτύου για την οποία είναι σχεδιασμένος να συνδέεται ο μετατροπέας. Για μετατροπείς που συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) η ονομαστική πολική τάση εξόδου της συσκευής για την Ελλάδα είναι στα 400V. Υπάρχουν και μετατροπείς με τάση εξόδου στα 20 kV.

### **Ονομαστικό AC ρεύμα**

Είναι το ρεύμα που δίνει στην έξοδό του ο μετατροπέας για ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή ονομαστική τάση και ονομαστική ισχύ.

### **Μονοφασική ή τριφασική σύνδεση**

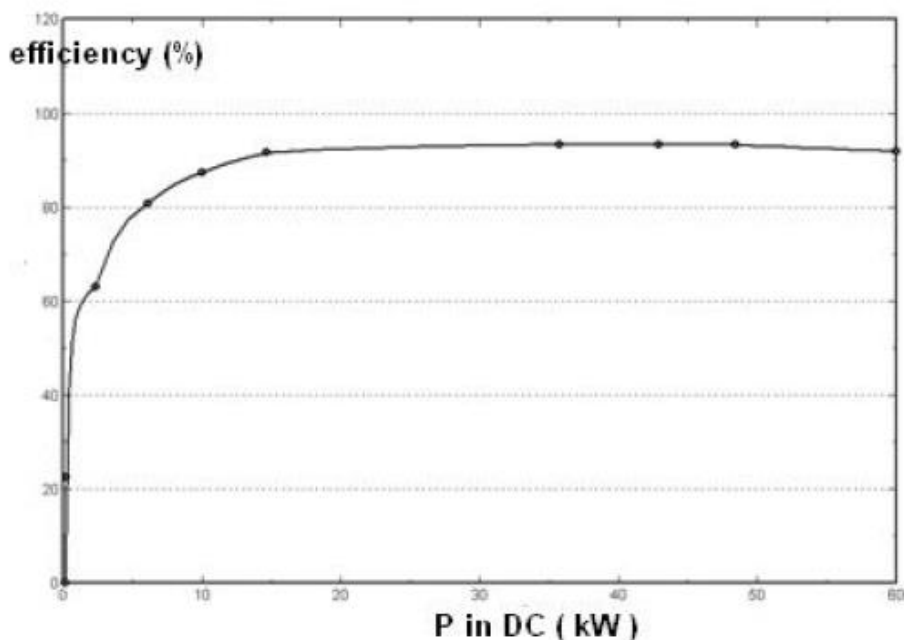
Προφανώς αναφέρεται στον τρόπο σύνδεσης του μετατροπέα στην έξοδο του. Συνήθως έχουμε μονοφασική σύνδεση για μετατροπείς ισχύος μικρότερης των 3kW, ενώ τριφασική σύνδεση για μετατροπείς μεγαλύτερης ποσότητας ισχύος από την παραπάνω.

### **Συχνότητα δικτύου**

Οι περισσότεροι μετατροπείς μπορούν να συνδεθούν σε δίκτυο με συχνότητα 50Hz και 60 Hz. Για την Ελλάδα λαμβάνουμε 50 Hz.

### **Απόδοση**

Γενικά οι μετατροπείς χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (93%-97%), η οποία όμως εξαρτάται από τη στιγμιαία ισχύ. Υπάρχει η απαίτηση ο μετατροπέας να έχει μεγάλη απόδοση και για μικρή ισχύ, και πιο συγκεκριμένα 90% για 10% της ονομαστικής ισχύος. Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.19) φαίνεται η εξάρτηση της απόδοσης του μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου της συσκευής.



Εικόνα 2.19: Απόδοση Μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου της συσκευής

Τέλος, να σημειώσουμε ότι οι κατασκευαστές μετατροπέων δίνουν την «ευρωπαϊκή απόδοση», που επιχειρεί να περιγράψει την απόδοση της συσκευής για τη μέση παραγωγή ισχύος στις συνθήκες λειτουργίας ενός έτους.

### 2.8.5 Ελεγκτής φόρτισης

Η φόρτιση των συσσωρευτών μέσω της φωτοβολταϊκής συστοιχίας απαιτεί συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισης τους, ώστε όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι αποφεύγεται η υπέρταση του συσσωρευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα, απαιτείται έλεγχος του συσσωρευτή όσο αυτός τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική κατάσταση υπερεκφόρτισης [14].

Γενικά ο ελεγκτής φόρτισης-εκφόρτισης, στην πιο περιορισμένη του μορφή, εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα πάνω και προς τα κάτω αντίστοιχα ορισμένα όρια τάσης, όπου ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες.

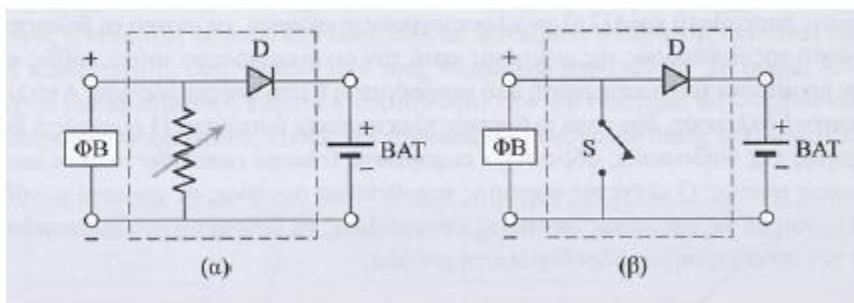
Μια μονάδα ελέγχου φόρτισης-εκφόρτισης, περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές που ελέγχουν ηλεκτρικούς, ηλεκτρομηχανικούς (ρελέ) ή



ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος. Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια δίοδος, για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από εκφόρτιση, μέσω της διάταξης ή του υπόλοιπου συστήματος.

### 2.8.6 Παράλληλος Ρυθμιστής Φόρτισης (Shunt controller)

Χαρακτηριστικό αυτού του ρυθμιστή είναι το ότι το ελεγχόμενο στοιχείο είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το φωτοβολταϊκό σύστημα (shunt controller), με δυνατότητα να λειτουργεί, είτε μεταβαλλόμενο γραμμικά, ανάλογα με τη μέγιστη φόρτιση (Εικόνα 2.20(α)), είτε ως διακόπτης ON/OFF (Εικόνα 2.20(β)). Στην περίπτωση του παράλληλου ρυθμιστή, όταν επιτευχθεί η μέγιστη φόρτιση (όριο τάσης), το ελεγχόμενο σημείο βραχυκυκλώνει το φωτοβολταϊκό σύστημα, χωρίς να προκαλείται καμία βλάβη σε αυτό. Έτσι, απομονώνεται το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα αποθήκευσής της.



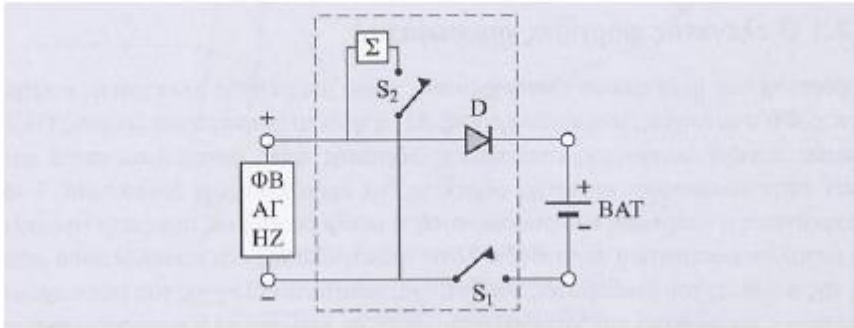
Εικόνα 2.20: Τυπικά διαγράμματα παράλληλου ρυθμιστή φόρτισης, (α) με γραμμικό και (β) με διακοπτικό στοιχείο

### 2.8.7 Ρυθμιστής φόρτισης σε σειρά (Series controller)

Η βασική αρχή λειτουργίας της δεύτερης διάταξης ελέγχου φόρτισης βασίζεται στη χρήση δύο διακοπών  $S_1$ ,  $S_2$  (Εικόνα 2.21). Ο πρώτος διακόπτει το ρεύμα από το σύστημα ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης, όταν η τάση φόρτισης φτάσει στο όριό της. Την ίδια στιγμή ενεργοποιείται ο διακόπτης  $S_2$ , ο οποίος εισάγει στην έξοδο του συστήματος ενέργειας, ένα στοιχείο απόδοσης ( $\Sigma$ ) της επιπλέον ενέργειας, την οποία δεν έχει την δυνατότητα να απορροφήσει το σύστημα αποθήκευσης. Το στοιχείο απόδοσης πρέπει να μπορεί να αποβάλλει εύκολα την αποδιδόμενη σε αυτό ενέργεια προς το περιβάλλον. Ο ρυθμιστής αυτός ονομάζεται ρυθμιστής με το ελεγχόμενο στοιχείο ( $S_1$ ) σε σειρά (Series Controller) και μπορεί να ελέγξει τη φόρτιση συσσωρευτών από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του ρυθμιστή με διαφορές που εντοπίζονται στον τρόπο που προσεγγίζεται η τελική κατάσταση φόρτισης από καθεμία από αυτές τις εκδόσεις.

Η διάταξη φόρτισης συμπληρώνεται από παρόμοια διάταξη ελέγχου εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, με σκοπό την προστασία του συσσωρευτή από υπερεκφόρτιση (overdischarging) και η οποία συνήθως ενσωματώνεται στην πρώτη. Πιο συγκεκριμένα, η αρχή λειτουργίας της εν λόγω διάταξης βασίζεται στη διακοπή του

κυκλώματος παροχής ενέργειας από το συσσωρευτή στην κατανάλωση, όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή μειούμενη φτάσει ορισμένη τιμή (disconnect setpoint).



Εικόνα 2.21: Διάγραμμα ρυθμιστή φόρτισης σε σειρά με στοιχείο απόδοσης ή απόρριψης της περίσσειας ενέργειας

## Κεφάλαιο 3

### Έλεγχος Τάσης και Αέργου Ισχύος σε δίκτυα διανομής

#### 3.1 Εισαγωγή

Η βασική λειτουργία του ρυθμιστή τάσης στο σύστημα διανομής η είναι να κρατηθεί η τάση σταθερή σε ένα αποδεκτό επίπεδο και καθ' όλη τη διάρκεια στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Οι επιθυμητές τάσεις μπορούν να ληφθούν είτε άμεσα ελέγχοντας την τάση ή με τον έλεγχο της ροής αέργου ισχύος η οποία στη συνέχεια έχει επιπτώσεις στην πτώση τάσης. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κανονικά για τον έλεγχο της τάσης και αέργου ισχύος είναι οι μετασχηματιστές ΣΑΤΥΦ (Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο) για τους οποίους θα μιλήσουμε σε παρακάτω κεφάλαια, η χρήση πυκνωτών σε παράλληλη λειτουργία και οι ρυθμιστές τάσης σε βήματα. Τέτοιος εξοπλισμός χρησιμοποιείται συνήθως βασισμένος στην υπόθεση ότι η ισχύς ρέει σε μια κατεύθυνση μόνο και ότι η τάση μειώνεται κατά μήκος της γραμμής, από τον υποσταθμό προς τους καταναλωτές [1].

Ένας μετασχηματιστής ΣΑΤΥΦ είναι ένας μετασχηματιστής με μηχανισμούς αλλαγής της τάσης εξόδου. Τα ΣΑΤΥΦ αποτελούν ένα μεγάλο μέρος των μετασχηματιστών υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ. Οι παράλληλα συνδεδεμένοι πυκνωτές παράγουν την άεργο ισχύ για να αντισταθμιστεί η άεργος απαίτηση σε ισχύ και με αυτόν τον τρόπο βοηθά στην ρύθμιση της τάσης. Οι πυκνωτές μπορούν να εγκατασταθούν στον υποσταθμό (*πυκνωτές υποσταθμών*) ή κατά μήκος της γραμμής (*πυκνωτές τροφοδοτών*). Ένας ρυθμιστής τάσης σε βήματα είναι ένας αυτομετασχηματιστής με αυτοματοποιημένες και διευθετήσιμες αλλαγές λήψης και εγκαθίστανται όταν η γραμμή διανομής είναι αρκετά μεγάλη σε μήκος σε τέτοιο βαθμό ώστε η ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και πυκνωτές δεν επαρκεί.

Ο έλεγχος ρύθμισης τάσης και αέργου ισχύος περιλαμβάνει τον κατάλληλο συντονισμό μεταξύ του διαθέσιμου εξοπλισμού τάσης και αέργου ισχύος. Πολλοί διαχειριστές διανομής δικτύου λειτουργούν τέτοιο εξοπλισμό τοπικά με τη χρήση συμβατικών ελεγκτών για να διατηρηθούν οι τάσεις στο σύστημα διανομής μέσα σε αποδεκτά επίπεδα και για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ισχύος. Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για να βελτιωθεί ο έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος στο σύστημα διανομής τόσο στο σχεδιασμό όσο και στο στάδιο λειτουργίας.

Τελευταία, πολλοί ερευνητές αντιμετωπίζουν το πρόβλημα του ελέγχου τάσης και αέργου ισχύος επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον τους σε αυτοματοποιημένα συστήματα διανομής. Ο τρόπος που το επιτυγχάνουν αυτό είναι με "offline" έλεγχο ρυθμίσεων του συστήματος διανομής είτε με έλεγχο σε πραγματικό χρόνο. Ο "offline" έλεγχος γίνεται μέσω κατάλληλου σχεδιασμού των πυκνωτών του συστήματος και του ΣΑΤΥΦ ώστε να ανταποκριθούν στις ανάγκες του δικτύου έχοντας σαν βάση πρόβλεψη φορτίου της επόμενης μέρας ή κάποιων ωρών μέσα στην ίδια τη μέρα. Ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο στοχεύει στον

έλεγχο πάλι των πυκνωτών του συστήματος και του ΣΑΤΥΦ ώστε να κρατήσουν την τάση σταθερή αλλά γίνονται με βάση μετρήσεις και υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο. Το κύριο εμπόδιο στον "offline" έλεγχο είναι η εξάρτησή του από ανάγκη ύπαρξης επικοινωνίας μεταξύ του ρυθμιστή και των πυκνωτών σε κάθε ζυγό ξεχωριστά, κάτι που πολλά δίκτυα διανομής δεν το παρέχουν. Το μειονέκτημα του του ελέγχου σε πραγματικό χρόνο από την άλλη απαιτεί ακόμα μεγαλύτερη αυτοματοποίηση του δικτύου διανομής από την ήδη υπάρχουσα.

Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε με έλεγχο τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ σε δίκτυα τα οποία προσομοιώθηκαν σε MatLab κάτι το οποίο παρουσιάζει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον και αναπτύσσεται ραγδαία για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών. Παρακάτω παρατίθεται οτιδήποτε θα συναντήσουμε σε ένα συμβατικό δίκτυο από πτώση τάσης μέχρι και τρόπους ρύθμισης τάσης και αέργου ισχύος.

### 3.2 Πτώση τάσης σε δίκτυο διανομής

Στην παρακάτω εικόνα (3.1) βλέπουμε μία βασική επισκόπηση της πτώσης τάσης στο σύστημα διανομής. Ξέρουμε ότι το ρεύμα  $I$  που διαπερνά όλο το σύστημα υπολογίζεται σαν συνάρτηση της φαινόμενης ισχύος  $S$  και της τάσης του φορτίου  $U_2$  ως εξής :

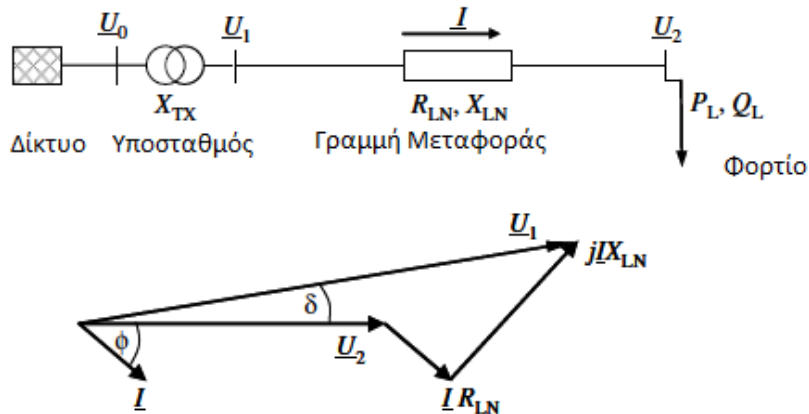
$$I = \frac{\underline{S}^*}{\underline{U}_2^*} = \frac{P_L - jQ_L}{\underline{U}_2^*} \quad (3-1)$$

Η πτώση τάσης στη γραμμή μεταφοράς δίνεται από τον τύπο:

$$|\underline{U}_1 - \underline{U}_2| = |\underline{I}(R_{LN} + jX_{LN})| = \left| \frac{(R_{LN}P_L + X_{LN}Q_L - j(X_{LN}P_L - R_{LN}Q_L))}{\underline{U}_2} \right| \quad (3-2)$$

Αν η ροή ισχύος είναι μικρή στο σύστημα τότε ο παραπάνω τύπος απλοποιείται σε έναν προσεγγιστικό τύπο που θα αναφερθεί αρκετά συχνά :

$$\Delta U \approx \frac{R_{LN}P_L + X_{LN}Q_L}{U_2} \quad (3-3)$$



Εικόνα 3.1: Μονογραμμικό ισοδύναμο και διάγραμμα phasor για την επίδειξη της πτώσης τάσης στο σύστημα διανομής

### 3.3 Επισκόπηση διαφόρων μεθόδων ελέγχου τάσης και αέργου ισχύος

Για να επιτευχθεί σωστός έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος πρέπει να υπάρχει κατάλληλος συντονισμός του εξοπλισμού των παραπάνω στο σύστημα διανομής ώστε να παρέχουμε στο δίκτυο ένα βέλτιστο προφίλ τάσης και ροής αέργου ισχύος σύμφωνα με τους στόχους που θέτουμε και τους λειτουργικούς περιορισμούς που μας επιβάλλονται [1].

Πολλοί διαχειριστές δικτύων λειτουργούν τα ΣΑΤΥΦ και τους πυκνωτές τοπικά χρησιμοποιώντας συμβατικούς ελεγκτές. Με αυτόν τον τρόπο διατηρούν την τάση του δικτύου σε αποδεκτά όρια και προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες ισχύος στο σύστημα.

Διάφοροι καινούριοι μέθοδοι ελέγχου έχουν προταθεί κατά καιρούς. Ένας από αυτούς είναι η κατάλληλη τοποθέτηση και η διαστασιολόγηση πυκνωτών στο δίκτυο ώστε να μπορέσουν και να καλύψουν τις ανάγκες του συστήματος σε άεργο ισχύ αλλά και να βοηθήσουν στη βελτιστοποίηση του προφίλ της τάσης. Ακόμα, για να ενισχυθεί περισσότερο το σύστημα θα μπορούσαν οι πυκνωτές να ανοιγοκλείνουν κατά στο στάδιο της λειτουργίας του συστήματος, χρησιμοποιώντας διάφορες μορφές διαθέσιμου ελέγχου.

Όπως είπαμε και λίγο παραπάνω υπάρχουν δύο τρόποι ελέγχου αυτοματοποιημένων δικτύων διανομής:

- 1) Έλεγχος με ρυθμίσεις εκτός σύνδεσης
- 2) Έλεγχος σε πραγματικό χρόνο

Στην πρώτη περίπτωση ο σχεδιασμός του ελέγχου προκύπτει από την πρόβλεψη φορτίου σε ημερήσια βάση και είναι αρκετά ακριβής από την άποψη ότι η διακύμανση του φορτίου εξαρτάται κυρίως από τον καιρό και συνεπώς είναι προβλέψιμη. Οι προβλέψεις φορτίου σε ημερήσια βάση έχουν κατά μέσο όρο ποσοστό λάθους μικρότερο από 2% οπότε θεωρούνται αρκετά επαρκείς για τον έλεγχο με ρυθμίσεις όταν οι ρυθμιστές τάσης ή αέργου ισχύος (ΣΑΤΥΦ και πυκνωτές) είναι αποσυνδεδεμένοι από το δίκτυο.

Διάφοροι λειτουργικοί περιορισμοί επιβάλλονται στους διαχειριστές δικτύων αλλά οι πιο κύριοι είναι η ρύθμιση της τάσης σε αποδεκτά όρια και η ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος στο σύστημα. Μερικοί ακόμα βάζουν ως περιορισμούς την ελαχιστοποίηση των λειτουργιών που θα κάνουν τα ΣΑΤΥΦ και οι πυκνωτές για να φτιάξουν ένα καλό προφίλ τάσης

διότι μεγάλος αριθμός δραστηριότητας των μετασχηματιστών ΣΑΤΥΦ για παράδειγμα προκαλεί αυξημένα κόστη λόγω πιο τακτικής συντήρησης αυτών.

### 3.4 Συντονισμός και έλεγχος στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Έχουν προταθεί και συζητηθεί διαφορετικές τεχνικές για τον έλεγχο συστημάτων διανομής. Η συζήτηση είναι βασισμένη στην έκταση του έξυπνου και αυτοματοποιημένου ελέγχου συστημάτων διανομής καθώς και ποιο είδος αρχιτεκτονικής πρέπει να έχει ο έλεγχος [1,26]. Γενικά, ο έλεγχος τάσης στα συστήματα διανομής διακρίνεται σε συντονισμένο και τοπικό.

Σε μία συντονισμένη αρχιτεκτονική όλες οι πληροφορίες του δικτύου βρίσκονται σε ένα κεντρικό σύστημα, ενώ στην τοπική αρχιτεκτονική οι πληροφορίες διαδίδονται σε όλο το σύστημα. Με αυτές τις δύο ευρέως διακεκριμένες αρχιτεκτονικές, καθορίζονται τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες σχετικές με τον έλεγχο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας:

1. **Κεντρική (Centralized).** Η λογική ελέγχου γίνεται σε ένα ή περισσότερα κέντρα ελέγχου στα οποία κέντρα υπάρχει ανθρώπινο προσωπικό το οποίο είναι υπεύθυνο για τη σωστή λειτουργία του συστήματος.
2. **Κεντρική σε Υποσταθμό (Substation-Centered).** Για έναν αριθμό γραμμών και φορτίων η λογική του ελέγχου βρίσκεται στον υποσταθμό αυτού του συστήματος. Ανήκει στη μη συγκεντρωμένη αρχιτεκτονική.
3. **Πλήρως διανεμημένη (Fully Distributed).** Η λογική ελέγχου εγκαθίσταται στην τοποθεσία του εξοπλισμού προς ρύθμιση. Ανήκει στη μη συγκεντρωμένη αρχιτεκτονική επίσης.
4. **Υβριδικά Συντονισμένη (Coordinated Hybrid).** Μία ενδιάμεση λογική ελέγχου ανάμεσα στη συγκεντρωμένη και την πλήρως διανεμημένη. Το κεντρικό σύστημα είναι υπεύθυνο για την ασφάλεια και τον έλεγχο των λειτουργιών του δικτύου σε οποιαδήποτε περίπτωση και προσφέρει μια καλύτερη ενσωμάτωση με το επάλληλο δίκτυο.

#### 3.4.1 Κεντρικός Έλεγχος Τάσης

Ο έλεγχος τάσης στα δίκτυα διανομής μπορεί να επιτευχθεί με κεντρικό έλεγχο παρόμοιο με εκείνο στο σύστημα μεταφοράς μέσω αποστολής της ενεργού και αέργου ισχύος και έλεγχου των άλλων στοιχείων του δικτύου. Μία πιθανή λύση του κεντρικού ελέγχου είναι η ενοποίηση των λειτουργιών και εφαρμογών που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία, η διαχείριση είτε εμπορική είτε οικονομική και η μηχανική κατασκευή όλου του δικτύου δηλαδή ουσιαστικά ένας κεντρικός φορέας για όλα τα παραπάνω.

### 3.4.2 Συντονισμένος Έλεγχος Τάσης

Διάφοροι ερευνητές έχουν κάνει εκτεταμένη έρευνα στον τομέα του συντονισμένου ελέγχου τάσης. Παρατηρήθηκε πως η χρήση επικοινωνιών για να συντονιστούν οι μηχανισμοί ελέγχου του δικτύου έχουν θετική επίδραση διότι αποτρέπουν την περικοπή ενεργού ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή κάτι που ικανοποιεί οικονομικά και τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και τον ίδιο το διαχειριστή του συστήματος ο οποίος δεν υποχρεώνεται σε επιπλέον παραγωγή για την κάλυψη των καταναλωτικών αναγκών.

Στην αναφορά (18) προτείνεται μια συντονισμένη στρατηγική ελέγχου μέσω ενός Μ/Σ ΣΑΤΥΦ και του μηχανισμού διεσπαρμένης παραγωγής τα οποία συνδέονται μαζί με συντονισμένο ελεγκτή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με έναν συντονισμένο ρυθμιστή τάσης επιτυγχάνεται ελάττωση στην περικοπή ενεργού ισχύος, ωστόσο αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό οι απώλειες του δικτύου.

Στις αναφορές (19,20,21,22) γίνεται συντονισμός μεταξύ μηχανισμών ρύθμισης τάσης μέσω ενός ελεγκτή ο οποίος ευθύνεται ώστε τη όρια τάσης να είναι επιθυμητά σε όλους τους ζυγούς του δικτύου και ενός δεύτερου ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει το εύρος τάσης μέσω βελτιστοποίησης της ικανότητας απόδοσης αέργου ισχύος των μηχανισμών διεσπαρμένης παραγωγής (π.χ. αντιστροφείς).

Τα μειονεκτήματα του συντονισμένου ελέγχου είναι η ανάγκη άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών που είναι υπεύθυνες για τη ρύθμιση της τάσης. Θεωρείται μειονέκτημα διότι για να επιτευχθούν όλες αυτές οι επικοινωνίες πρέπει να διατεθούν πολλοί χρηματικοί και εργατικοί πόροι για την κατασκευή τους και επίσης όταν μιλάμε για το δίκτυο ΜΤ τότε μιλάμε για κατασκευή επικοινωνιακών γραμμών κάποιων χιλιομέτρων πράγμα ακόμα πιο δύσκολο. Ένα άλλο μειονέκτημα αφορά τους μηχανισμούς διεσπαρμένης παραγωγής (π.χ. αντιστροφείς, γεννήτριες) και κυρίως τους παλιές τεχνολογίας μηχανισμούς που δεν είχαν σχεδιαστεί να έχουν τη ζητούμενη ικανότητα απόδοσης αέργου ισχύος που χρειάζονται τα σημερινά δίκτυα. Για παράδειγμα οι καινούριες ανάγκες απαιτούν τη δυνατότητα μιας γεννήτριας να δουλεύει με συντελεστή ισχύος 0,95 όταν απορροφά άεργο ισχύ και με 0,9 όταν παράγει άεργο ισχύ.

### 3.4.3 Αποκεντρωμένος Έλεγχος Τάσης

Μία σύγχρονη γεννήτρια που λειτουργεί ως ρυθμιστής τάσης είναι μία απλή μορφή αποκεντρωμένου ελέγχου. Η σύγχρονη γεννήτρια με το σύστημα διέγερσής της είναι μία αυτόνομη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και δεν χρειάζεται καμία επικοινωνία με άλλες συσκευές ή άλλα στοιχεία. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος μπορεί επιπλέον να συναντάται σε άλλες μορφές, όπως επιλογή λειτουργικού ελέγχου και περικοπή ενεργού ισχύος.

Ένας αποκεντρωμένος έλεγχος με τη χρήση ενός ΣΑΤΥΦ, συστοιχίας πυκνωτών στον υποσταθμό ενός δικτύου και διεσπαρμένη παραγωγή με σύγχρονες μηχανές αποδείχτηκε ότι είχε θετικές επιδράσεις στη μείωση των απωλειών του δικτύου και των αλλαγών λήψεως του ΣΑΤΥΦ όταν είναι συντονισμένες σωστά. Όταν οι διεσπαρμένη παραγωγή λειτουργεί σε σταθερή τάση τότε πάλι μειώνονται οι αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ. Αν οι διατεθειμένοι

πυκνωτές του δικτύου έχουν την ικανότητα να αντισταθμίσουν τη ζήτηση σε άεργο ισχύ από τα φορτία τότε οι απώλειες του δικτύου δεν επηρεάζονται σημαντικά από την εμφάνιση διεσπαρμένης παραγωγής.

### 3.5 Βασικός έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος σε συμβατικά δίκτυα

Από τις εξισώσεις (3-2) και (3-3) συμπεραίνουμε ότι το φορτίο πάντα προκαλεί πτώση τάσης και ότι το προφίλ της τάσης σε ένα συμβατικό δίκτυο διανομής (μόνο με φορτία) μειώνεται όσο φτάνουμε στο απομακρυσμένο άκρο του συστήματος διανομής. Αυτή η πτώση τάσης και το προφίλ της τάσης είναι η βάση για τη ρύθμιση τάσης στα συστήματα διανομής. Το δευτερεύον του μετασχηματιστή μπορεί να ρυθμιστεί αλλάζοντας το λόγο τάσης και η πτώση τάσης στον τροφοδότη μπορεί να μειωθεί δίνοντας άεργο ισχύ στο δίκτυο μέσω παράλληλα συνδεδεμένων πυκνωτών. Παρακάτω παρατίθενται τρόποι αντιμετώπισης του φαινόμενου της πτώσης τάσης σε ένα δίκτυο αλλά και ανύψωσης τάσης σε περίπτωση εμφάνισης διεσπαρμένης παραγωγής η οποία στην παρούσα εργασία προέρχεται από φωτοβολταϊκά.

#### 3.5.1 Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)

Οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανισμούς αλλαγής της τάσης εξόδου τους χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή λήψεως στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, δεδομένου ότι η τάση ανά σπείρα παραμένει σταθερή. Ο μηχανισμός αυτός, που βρίσκεται συνήθως στην πλευρά υψηλής τάσης καθώς εκεί ρέουν μικρότερα ρεύματα και υπάρχουν περισσότερες σπείρες επιτρέποντας ακριβέστερη ρύθμιση της τάσης, ονομάζεται Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο ή ΣΑΤΥΦ. Τα ΣΑΤΥΦ είναι σχετικά αργοί διακριτοί μηχανισμοί, που μεταβάλλονται μόνο κατά ένα βήμα την φορά, όταν η ελεγχόμενη τάση βρεθεί εκτός μιας νεκρής ζώνης περισσότερο από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Οι χρονικές στιγμές στις οποίες μπορούν να λειτουργήσουν τα ΣΑΤΥΦ, είναι:

$$t_{k+1} = t_k + T_D \quad (3-4)$$

όπου  $T_D$  είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ δυο διαδοχικών αλλαγών του ΣΑΤΥΦ και περιλαμβάνει τόσο τον απαραίτητο μηχανικό χρόνο που απαιτείται για την αλλαγή, όσο και τον εκούσιο χρόνο καθυστέρησης που εισάγεται για αποφυγή άσκοπων κινήσεων και ταλαντώσεων, ειδικά στην περίπτωση που υπάρχουν πολλά ΣΑΤΥΦ σε σειρά [16].

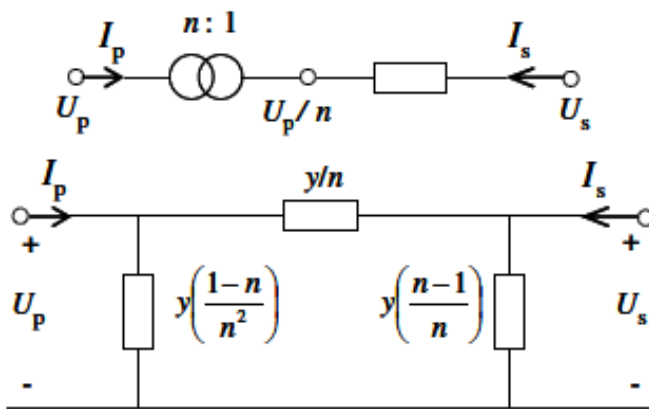
Η δυναμική συμπεριφορά των ΣΑΤΥΦ περιγράφεται από εξισώσεις διαφορών της μορφής:



$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, \text{ \acute{e}\alpha\nu } V > V_{ref} + \frac{d}{2} \text{ και } r < r_{\max} \\ r_k - \Delta r, \text{ \acute{e}\alpha\nu } V > V_{ref} - \frac{d}{2} \text{ και } r > r_{\min} \\ r_k, \text{ διαφορετικά} \end{cases} \quad (3-5)$$

όπου  $V$  είναι η ελεγχόμενη τάση,  $r$  ο λόγος του μετασχηματιστή που φέρει το ΣΑΤΥΦ,  $r_{\min}$  και  $r_{\max}$  το κάτω και άνω όριο αντίστοιχα των τιμών που μπορεί να πάρει αυτός ο λόγος,  $\Delta r$  το βήμα του λόγου μετασχηματισμού,  $V_{ref}$  η τάση αναφοράς και  $d$  η νεκρή ζώνη, η έκταση της οποίας είναι από  $(V_{ref} - d/2)$  έως  $(V_{ref} + d/2)$ .

Ο λόγος ενός μετασχηματιστή μπορεί να αλλάξει προσθέτοντας ή αφαιρώντας ελίγματα είτε στο πρωτεύον είτε στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή με αλλαγές λήψης. Ένας τέτοιος μετασχηματιστής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.2) καθώς και το ισοδύναμο  $\Pi$  του [1]:



Εικόνα 3.2: Μονογραμμικό ισοδύναμο κύκλωμα παρουσία ΣΑΤΥΦ και ισοδύναμο  $\Pi$

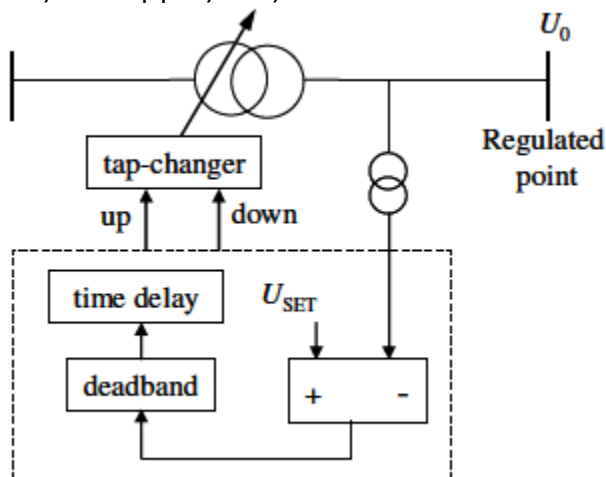
όπου  $I$ ,  $U$  και  $y$  είναι ρεύμα, τάση και αγωγιμότητα αντίστοιχα,  $n$  είναι ο λόγος μετασχηματισμού και  $p$ ,  $s$  είναι πρωτεύον και δευτερεύον αντίστοιχα.

Υπάρχουν δύο ειδών μετασχηματιστές αλλαγής λήψεως: 1) Αυτοί που η αλλαγή λήψης απαιτεί ο μετασχηματιστής να είναι εκτός συστήματος κατά τη διάρκεια αυτής, και 2) αυτοί που έχουν τη δυνατότητα αλλαγής λήψης όταν είναι ακόμα συνδεδεμένοι στο δίκτυο και περνάει ρεύμα από τα τυλίγματα τους (ΣΑΤΥΦ). Εμείς στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τους μετασχηματιστές που έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν τη λήψη τους όταν τα φορτία και ο ίδιος ο Μ/Σ είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο και παρακάτω θα δούμε πως επιτυγχάνεται αυτό.

Ο ελεγκτής του ΣΑΤΥΦ προσπαθεί να κρατήσει σταθερή την τάση  $U_1$  μεταξύ των ορίων:

$$U_{LB} \leq U_1 \leq U_{UB} \quad (3-6)$$

όπου  $U_{LB}=U_{set}-0.5U_{DB}$  είναι το κάτω αποδεκτό όριο της τάσης και  $U_{UB}= U_{set}+0.5U_{DB}$  είναι το άνω αποδεκτό όριο τάσης και  $U_{set}$  είναι η τάση αναφοράς που δίνουμε και  $U_{DB}$  είναι η νεκρή ζώνη που πάλι εμείς δίνουμε στο ΣΑΤΥΦ. Στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 3.3), φαίνεται ο βασικός τρόπος λειτουργίας ενός ΣΑΤΥΦ.



Εικόνα 3.3: Βασικός τρόπος λειτουργίας ενός ΣΑΤΥΦ

Οι μετασχηματιστές ΣΑΤΥΦ έχουν συνήθως ενσωματωμένη τη λειτουργία της αντιστάθμισης της πτώσης τάσης στη γραμμή μεταφοράς (Line Drop Compensation ή LDC). Η εν λόγω λειτουργία βοηθά να κρατηθεί σταθερή η τάση σε έναν ζυγό απομακρυσμένο χωρίς την ανάγκη χρήσης επικοινωνίας με το ζυγό μειώνοντας έτσι σε πολύ μεγάλο βαθμό τις οικονομικές δαπάνες για την εγκατάσταση αυτών. Η αντιστάθμιση με LDC υπολογίζει την πτώση τάσης βασισμένη στο ρεύμα της γραμμής μεταφοράς  $I$ , στην αντίσταση  $R_{LN}$  και στην αντίδραση  $X_{LN}$  και μέσω του ΣΑΤΥΦ διορθώνει την τάση  $U_{LC}$  σε ένα σημείο που θεωρείται το κέντρο του φορτίου (Load Center ή LC) ώστε να την κρατήσει σταθερή σε ένα εύρος τιμών:

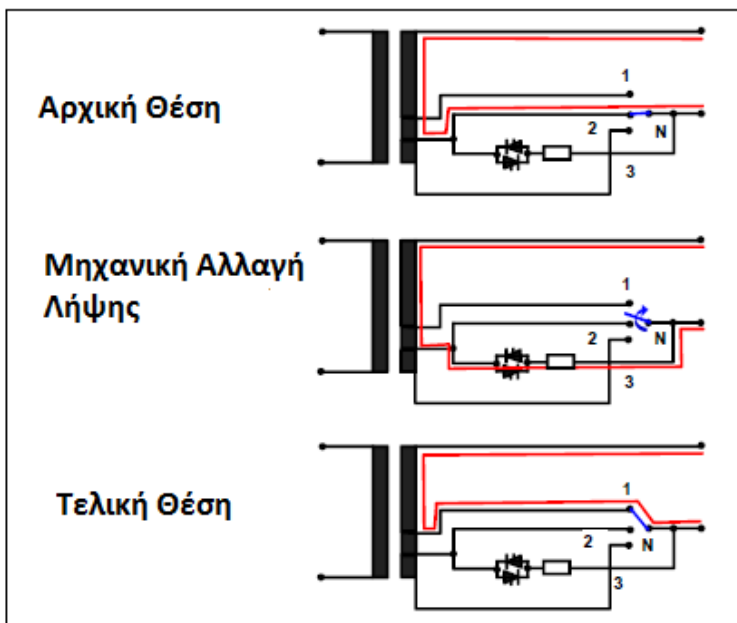
$$U_{LB} \leq U_{LC} \leq U_{UB} \quad (3-7)$$

Αυτό που αξίζει να αναφέρουμε είναι το εύρος ζώνης (bandwidth) και την χρονική καθυστέρηση (time delay) στην παραπάνω λειτουργία. Το ΣΑΤΥΦ θα δράσει για αλλαγή λήψης μόνο σε περίπτωση που η εκτιμώμενη τάση  $U_{LC}$  ξεπεράσει το εύρος που δείξαμε στην εξίσωση (3-7). Είναι αυτονόητο ότι το μέγεθος της νεκρής ζώνης γύρω από την τάση αναφοράς πρέπει να είναι μεγαλύτερο του βήματος του ΣΑΤΥΦ για αποφυγή ταλαντώσεων πάνω και κάτω από την νεκρή ζώνη. Συνεπώς, το συνολικό μέγεθος της νεκρής ζώνης επιλέγεται τουλάχιστον διπλάσιο του βήματος του ΣΑΤΥΦ.

Πέραν όμως του εύρους ζώνης τάσης, το ΣΑΤΥΦ έχει και ένα εύρος ζώνης χρόνου το οποίο το ονομάζουμε <<χρονική καθυστέρηση>> (time delay) και περιλαμβάνει το χρόνο που χρειάζεται το μηχανικό μέρος του μετασχηματιστή για αλλαγή λήψης (μεγέθους 3-10sec), ο οποίος ονομάζεται <<μηχανική χρονική καθυστέρηση>> και στο πρόγραμμα του Matlab το

συναντάμε ως “tap selection time”, έναν πιο μικρό χρόνο της τάξης του 1sec ώστε να αποφευχθούν άσκοπες αλλαγές λήψης σε πολύ απότομες αλλαγές τάσης ακόμα και αν ξεπερνάνε τα όρια του εύρους ζώνης και τέλος έναν πολύ μικρό χρόνο της τάξης των msec (40-60msec) ο οποίος ονομάζεται <<χρονική καθυστέρηση μετάβασης>> και στο Matlab το συναντάμε ως “tap transition time” και είναι ο στιγμιαίος χρόνος κατά τον οποίο γίνεται η αλλαγή λήψης από την κατάσταση που βρίσκεται στην αμέσως προηγούμενη ή επόμενη ανάλογα αν έχουμε ανύψωση ή πτώση τάσης πέραν από το επιθυμητό όριο. Για να μην υπάρχει διακοπή τροφοδότησης του φορτίου κατά τη διάρκεια της αλλαγής λήψης τα ΣΑΤΥΦ είναι εφοδιασμένα με μία αντίσταση σε σειρά από την οποία περνάει όλο το ρεύμα που τροφοδοτούσε τα φορτία αλλά ακόμα και με ηλεκτρονικά μέσα και συγκεκριμένα με θυρίστορ ώστε η διαδικασία αλλαγής να γίνεται όσο πιο γρήγορα και ομαλά (Εικόνα 3.4). Πιο συγκεκριμένα, η λογική με την οποία λειτουργούν τα θυρίστορ έχει ως εξής:

- α) Αν η τάση στο σημείο N είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση στη θέση 2 τότε ενεργοποιούνται τα θυρίστορ για αλλαγή της λήψης από τη 2<sup>η</sup> στην 1<sup>η</sup> λήψη και
- β) Αν η τάση στο σημείο N γίνει ίση με την τάση στο σημείο 1 τότε απενεργοποιούνται τα θυρίστορ γιατί έχει επιτευχθεί η επιθυμητή τάση λειτουργίας.

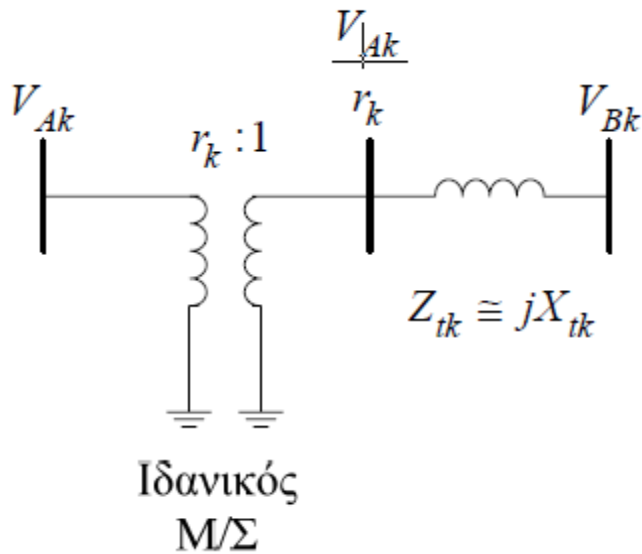


Εικόνα 3.4: Διαδικασία αλλαγής λήψης σε ένα ΣΑΤΥΦ (από τη 2η στην 1η λήψη)

Για την ανάλυση συστημάτων με ΣΑΤΥΦ έχουν προταθεί δυο μοντέλα, ένα συνεχές και ένα διακριτό.

### Διακριτό μοντέλο ΣΑΤΥΦ

Θεωρώντας ότι η αντίδραση μαγνήτισης του μετασχηματιστή είναι άπειρη και αγνοώντας τις ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων, το ισοδύναμο κύκλωμα του ΣΑΤΥΦ με αριθμό  $k$  φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (3.5).



Εικόνα 3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ εξοπλισμένο με αλλαγές λήψης

Όπου  $jX_{tk}$  είναι η ισοδύναμη αντίδραση σκεδάσεως του Μ/Σ ανηγμένη στο δευτερεύον του,  $r_k : 1$  είναι ο λόγος του ιδανικού Μ/Σ ο οποίος εκφράζει τη μεταβλητή σχέση μετασχηματισμού, ενώ  $V_{Bk}$  είναι η ρυθμιζόμενη τάση. Προκειμένου να αυξηθεί η τάση αυτή, ο λόγος  $r_k$  μειώνεται και για να ελαττωθεί, ο λόγος αυξάνει. Στο διακριτό μοντέλο όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ, θεωρούμε ότι αλλάζει ο λόγος του ιδανικού Μ/Σ ακαριαία κατά ένα βήμα μεγέθους  $\Delta r$ . Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε διακριτές τιμές χρόνου, έστω  $t_c$ ,  $c=0,1,\dots$ , οι οποίες δίνονται από τον επαναληπτικό τύπο:

$$t_{c+1} = t_c + T_{D,c} \quad (3-8)$$

Το  $T_{D,c}$  μπορεί να μην είναι σταθερό αλλά να εξαρτάται από τον αριθμό της επανάληψης και το μέγεθος της απόκλισης από την τάσης αναφοράς. Όταν ο χρόνος καθυστέρησης της πρώτης κίνησης είναι μεγαλύτερος των υπολοίπων το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με βάση το λεγόμενο *ακολουθιακό μοντέλο*. Διαφορετικά, όταν ο χρόνος καθυστέρησης είναι σταθερός, το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με βάση το *μη ακολουθιακό μοντέλο*. Στην παρούσα διπλωματική θα ακολουθήσουμε το ακολουθιακό μοντέλο.

Η λογική με την οποία μεταβάλλεται ο λόγος του k-οστού ΣΑΤΥΦ του δικτύου τις χρονικές στιγμές  $t_{c+1}$ , εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών:

$$r_k^{t_{c+1}} = \begin{cases} r_k^{t_c} + \Delta r, & \text{εάν } V_{Bk} > V_{ref} + \frac{d}{2} \text{ και } r_k < r_{\max} \\ r_k^{t_c} - \Delta r, & \text{εάν } V_{Bk} < V_{ref} - \frac{d}{2} \text{ και } r_k > r_{\min} \\ r_k^{t_c}, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3-9)$$

όπου  $r_{\min}$ ,  $r_{\max}$  το κάτω και άνω όριο του ΣΑΤΥΦ,  $\Delta r$  το βήμα του λόγου μετασχηματισμού,  $V_{ref}$  η τάση αναφοράς και  $d$  η νεκρή ζώνη, η έκταση της οποίας είναι από  $(V_{ref} - d/2)$  έως  $(V_{ref} + d/2)$  όπως έχουμε πει κ παραπάνω.

### Συνεχές μοντέλο ΣΑΤΥΦ

Το συνεχές μοντέλο στηρίζεται στην υπόθεση ότι ο λόγος του ΣΑΤΥΦ μπορεί να πάρει όλες τις τιμές μεταξύ  $r_{\min}$  και  $r_{\max}$ , ενώ δεν υπάρχει και νεκρή ζώνη. Η λογική με την οποία μεταβάλλεται ο λόγος δίνεται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$T_C \dot{r}_k = V_{Bk} - V_{ref}, \quad r_{\min} \leq r_k \leq r_{\max} \quad (3-10)$$

όπου εν γένει η χρονική σταθερά  $T_C$  θεωρείται αμετάβλητη. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει προσεγγιστικά τα ΣΑΤΥΦ με χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιείται μία εκούσια επιπλέον χρονική καθυστέρηση στην οποία συνήθως εφαρμόζεται μια χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου, ώστε το ΣΑΤΥΦ να δρα πιο γρήγορα σε μεγάλες αλλαγές της τάσης αναφοράς και το αντίστροφο.

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τη λειτουργία του μηχανισμού αλλαγής λήψης σε έναν Μ/Σ ΣΑΤΥΦ. Μερικοί από αυτούς είναι η μέγιστη ισχύς βραχυκύκλωσης (Short Circuit Capacity), η αναλογία X/R των γραμμών διανομής του δικτύου και προφανώς η ροή ισχύος.

Έχει παρατηρηθεί ότι ισχυρά δίκτυα με μεγάλη μέγιστη ισχύ βραχυκύκλωσης και μεγάλη αναλογία X/R γραμμών διανομής βοηθούν στη μείωση των αναγκαίων αλλαγών λήψεως από πλευράς του ΣΑΤΥΦ.

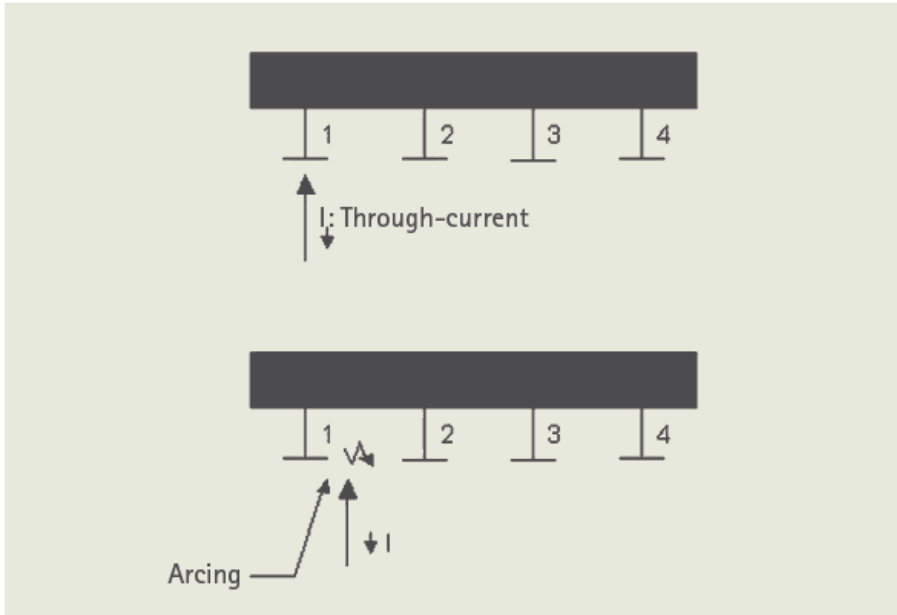
Όσον αφορά την άεργο ισχύ έχει παρατηρηθεί ότι σε ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με επαγωγικό συντελεστή ισχύος οι αλλαγές λήψεως του ΣΑΤΥΦ αυξάνονται [29]. Ακόμα έχει διαπιστωθεί ότι η άεργος ισχύς του φορτίου έχει μεγαλύτερη επίδραση από την ενεργό ισχύ.

## Τεχνικά χαρακτηριστικά των Μετασχηματιστών ΣΑΤΥΦ

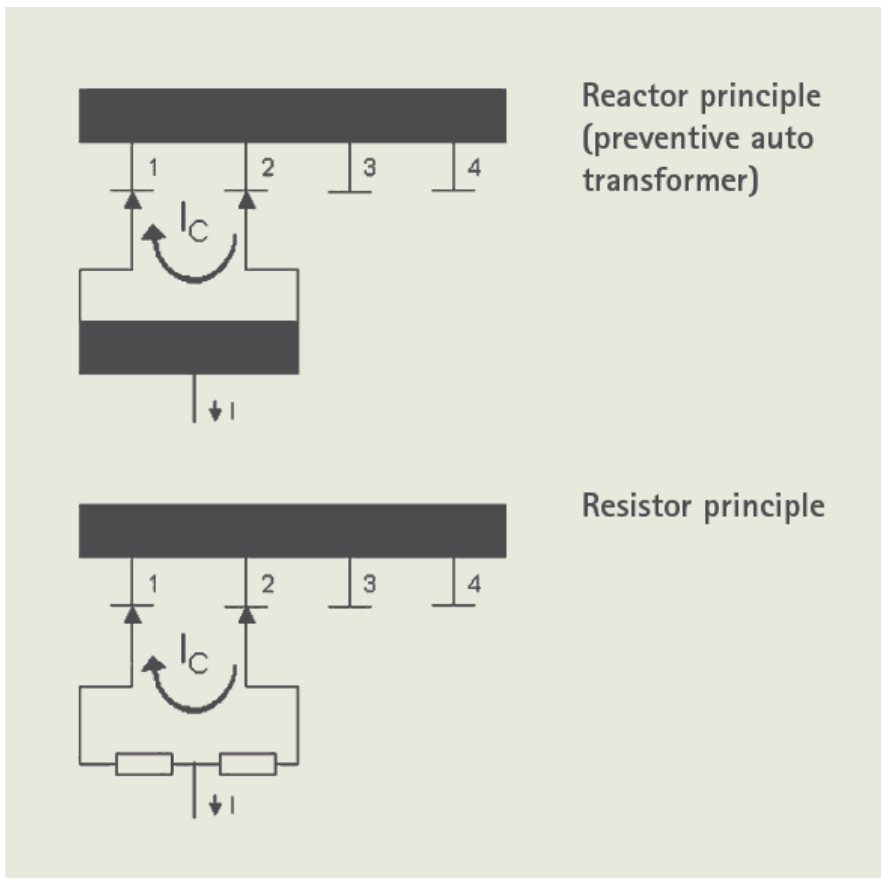
Στο παρόν υποκεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τεχνικά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών ΣΑΤΥΦ και τον ακριβή τρόπο λειτουργίας τους. Η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ έχει διαφορές σε σχέση με τον τρόπο λειτουργίας των απλών μετασχηματιστών. Μοιάζουν αρκετά στον τρόπο λειτουργίας τους και στη συνδεσμολογία τους με τους γνωστούς σε όλους μας αυτομετασχηματιστές [17].

Όπως έχουμε πει οι Μ/Σ ΣΑΤΥΦ λειτουργούν ως ρυθμιστές τάσης αλλάζοντας τις λήψεις τους υπό φορτίο χωρίς να διακόπτεται η ροή ισχύος προς το υπόλοιπο δίκτυο (Εικ 3.6). Πράγματι, τυχόν αλλαγή λήψης χωρίς κατάλληλες συνθήκες συνεχόμενης λειτουργίας του δικτύου ώστε να τροφοδοτηθούν τα φορτία θα δημιουργούσε σοβαρότατα προβλήματα στη σωστή λειτουργία του δικτύου και είναι μη αποδεκτή. Από την αρχή της εξέλιξης των ΣΑΤΥΦ υπάρχουν δύο βασικές αρχές αλλαγής λήψης που έχουν χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και εξαιτίας αυτών των αρχών τα ΣΑΤΥΦ χωρίζονται σε “υψηλής ταχύτητας αντίστασης” (high-speed resistor-type) και “επαγωγής” (reactor-type) όπως βλέπουμε στην εικόνα [3.7]. Κατά την πάροδο του χρόνου και οι δύο αρχές έχουν εξελιχθεί σε αξιόπιστα στοιχεία των μετασχηματιστών τα οποία είναι διαθέσιμα σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών ρεύματος και τάσης. Αυτά τα στοιχεία καλύπτουν τις ανάγκες του σημερινού ηλεκτρικού δικτύου και εξασφαλίζουν βελτιστοποιήσεις στο σύστημα διανομής ή μεταφοράς και καλύτερο έλεγχο αυτού.

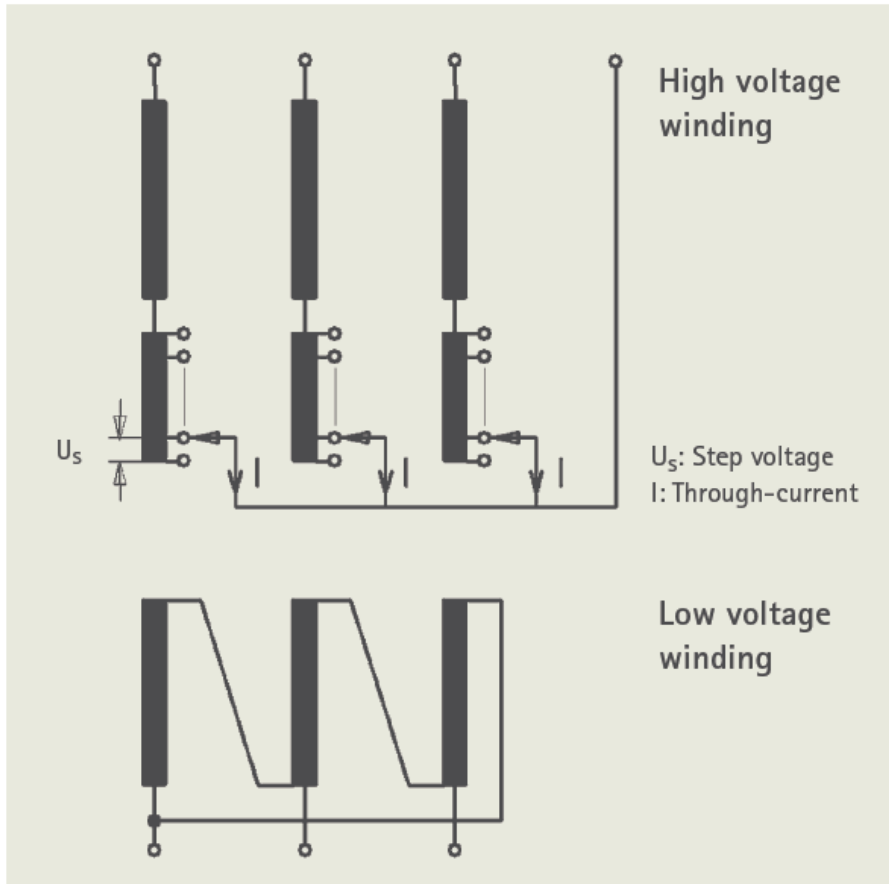
Το ΣΑΤΥΦ αλλάζει την αναλογία του Μ/Σ προσθέτοντας είτε αφαιρώντας ελίγματα είτε από το πρωτεύον είτε από το δευτερεύον του τύλιγμα. Συνεπώς ο Μ/Σ είναι εξοπλισμένος με τυλίγματα λήψεως που είναι συνδεδεμένα στο ΣΑΤΥΦ. Η εικόνα [3.8(α)] δείχνει τον τρόπο δόμησης ενός τριφασικού Μ/Σ ρύθμισης τάσης σε συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου με τη ρύθμιση να λαμβάνει χώρα στο πρωτεύον του Μ/Σ. Απλή αλλαγή λήψης κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου θεωρείται μη αποδεκτή διότι υπάρχει στιγμιαία απώλεια του φορτίου του συστήματος κατά τη διάρκεια αλλαγής λήψης. Για το λόγο αυτό υπάρχει η αρχή “make before break contact concept” η οποία φαίνεται επίσης στην εικόνα [3.8(α)] και λειτουργεί είτε μέσω της χρήσης μίας αντίστασης είτε μίας αντίδρασης οι οποίες ενώνουν γειτονικές λήψεις και μόνο μέσω αυτών γίνεται η αλλαγή από τη μία λήψη στην άλλη. Με τον τρόπο αυτό το ρεύμα και κατ’ επέκταση και το φορτίο δεν αποκόπτεται και κατά τη διάρκεια αλλαγής λήψης συνεχίζει να διαρρέει μέσω της αντίστασης ή αντίδρασης. Την ίδια στιγμή η αντίσταση αυτή περιορίζει το ρεύμα που τις διαρρέει για την περίοδο που βρίσκονται και οι δύο λήψεις σε λειτουργία.



Εικόνα 3.6: Απώλεια του φορτίου λόγω αλλαγής λήψης



Εικόνα 3.7: Βασική αρχή αλλαγής λήψης "make before break" χρησιμοποιώντας αντιστάσεις είτε αντιδράσεις



Εικόνα 3.8(α): Η αρχή διευθέτησης του τυλίγματος ενός ΣΑΤΥΦ σε συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου

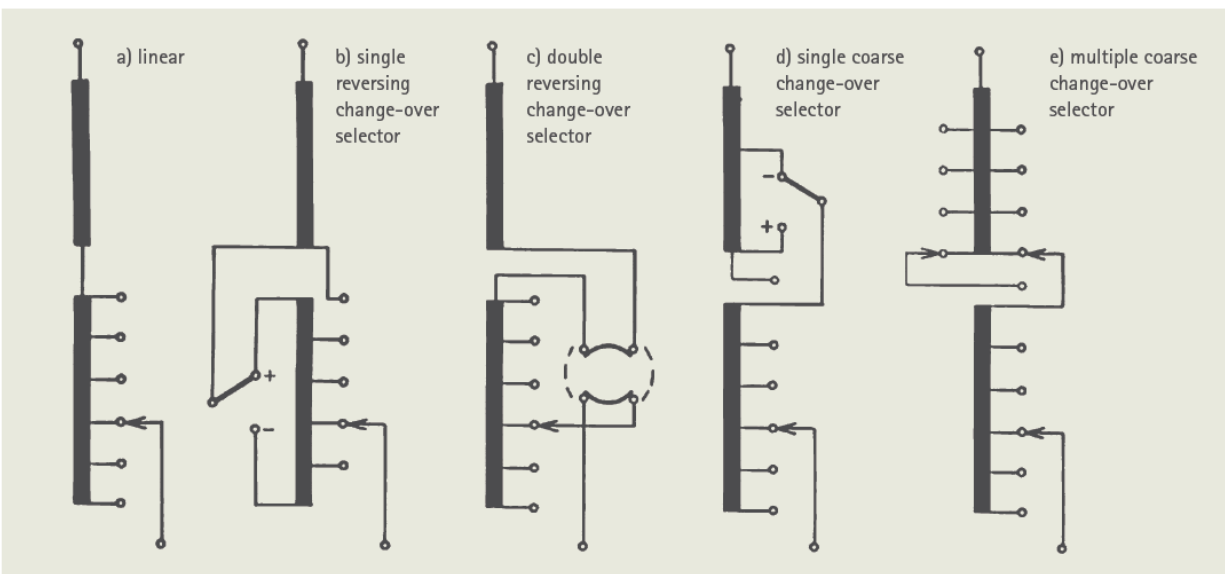
Η τάση μεταξύ δύο λήψεων ονομάζεται “βηματική τάση” (step voltage) και κυμαίνεται μεταξύ του 0,8% και 2,5% της ονομαστικής τάσης του Μ/Σ. Τα κύρια μέρη ενός ΣΑΤΥΦ είναι τα συστήματα διεπαφής για τα ρεύματα της αρχής “make and break” καθώς και τα ρεύματα μεταφοράς είτε διανομής, οι αντιστάσεις μετάβασης από την μία λήψη σε άλλη, τα κινητά μέρη που είναι υπεύθυνα για τη ρύθμιση αλλαγής λήψης, οι συσσωρευτές ενέργειας και ένας κινητήριος μηχανισμός οδήγησης του ΣΑΤΥΦ.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διασύνδεσης των τυλιγμάτων που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση τάσης και ουσιαστικά καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτή η ρύθμιση καθώς και το εύρος ρύθμισης (Εικ. 3.9). Παρακάτω παρατίθενται αυτοί οι τρόποι σύνδεσης.

- Η “γραμμική διευθέτηση” (linear arrangement) εικόνα [3.8(β)] χρησιμοποιείται γενικά σε μετασχηματιστές ισχύος με μεσαίο εύρος ρύθμισης μέχρι 20%. Τα τυλίγματα αλλαγής λήψης προστίθενται σε σειρά με το κύριο τύλιγμα και αλλάζουν την αναλογία του μετασχηματιστή. Η ονομαστική θέση λήψης μπορεί να είναι οποιαδήποτε από τις θέσεις λήψης.



- Η “αντιστροφή μέσω ενός επιλογέα” (reversing change-over selector) εικόνα [...] είναι ακόμα ένας τρόπος λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ με την οποία το επιπλέον τύλιγμα προστίθεται ή αφαιρείται από το κύριο τύλιγμα ώστε το εύρος ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ να διπλασιαστεί είτε οι αλλαγές λήψης να μειωθούν. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το επιπλέον τύλιγμα ρύθμισης αποσυνδέεται από το κύριο τύλιγμα. Οι μεγαλύτερες απώλειες χαλκού παρατηρούνται όταν βρίσκεται η λήψη στην ελάχιστη δυνατή. Η ονομαστική λήψη είναι συνήθως η μεσαία λήψη ή η ουδέτερη λήψη.
- Η “διπλή αντιστροφή μέσω ενός επιλογέα” (double reversing change-over selector) αποφεύγει την αποσύνδεση του τυλίγματος του ΣΑΤΥΦ από το κύριο τύλιγμα του Μ/Σ κατά τη διάρκεια αλλαγής λήψης.
- Χρησιμοποιώντας τη σύνδεση “κοινή αντιστροφή μέσω ενός επιλογέα” (coarse change-over selector) το δευτερεύον τύλιγμα του ΣΑΤΥΦ συνδέεται είτε στη θετική είτε στην αρνητική λήψη του κοινού τυλίγματος. Κατά τη λειτουργία της παραπάνω σύνδεσης το τύλιγμα λήψης αποσυνδέεται από το κύριο τύλιγμα και ελέγχεται η αντίσταση σειράς για τυχόν παρουσίαση προβλημάτων. Στην περίπτωση αυτή οι απώλειες χαλκού είναι ελάχιστες στη χαμηλότερη θέση λήψης. Αυτό το πλεονέκτημα παρόλα αυτά ανεβάζει τις απαιτήσεις σε μονωτικό υλικό και απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό τυλιγμάτων.
- Τέλος, η σύνδεση “πολλαπλή κοινή αντιστροφή μέσω ενός επιλογέα” (multiple coarse change-over selector) επιτυγχάνει την αύξηση σε μεγάλο βαθμό του εύρους ρύθμισης εκ μέρους του ΣΑΤΥΦ. Χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικούς μετασχηματιστές.

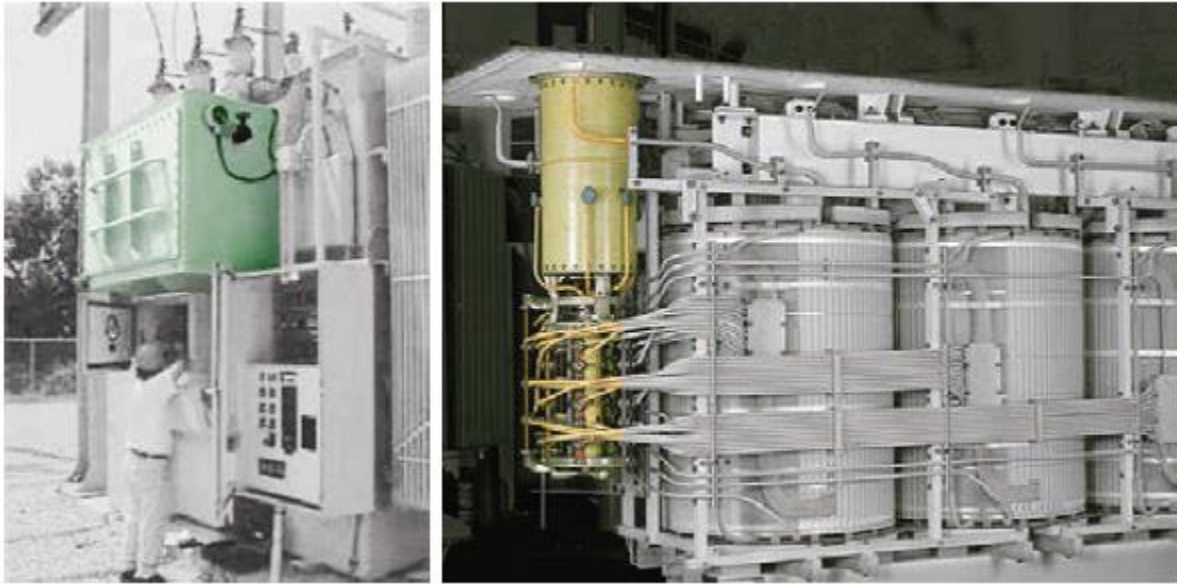


Εικόνα 3.8(β): Βασικοί τρόποι σύνδεσης του τυλίγματος ενός ΣΑΤΥΦ

Ποιος από τους παραπάνω τρόπους σύνδεσης των τυλιγμάτων θα χρησιμοποιηθεί δεν εξαρτάται παρά από το σύστημα και τις απαιτήσεις του δικτύου. Όλοι οι τρόποι σύνδεσης όμως χρησιμοποιούνται είτε σε διπλού τυλίγματος μετασχηματιστές είτε σε αυτομετασχηματιστές είτε σε μετασχηματιστές αλλαγής φάσης. Επίσης, πού θα τοποθετηθούν

τα επιπλέον τυλίγματα (πρωτεύον ή δευτερεύον) του Μ/Σ εξαρτάται από τη σχεδίαση του μετασχηματιστή και από τις απαιτήσεις του κατασκευαστή αλλά και του πελάτη.

Κάτι που αξίζει τέλος να αναφέρουμε για τα ΣΑΤΥΦ αντίστασης είτε αντίδρασης είναι ότι η πλειοψηφία των ΣΑΤΥΦ αντίστασης βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή του Μ/Σ (in-tank OLTCs) (Εικ. 3.9β) ενώ οι επαγωγικοί ΣΑΤΥΦ βρίσκονται σε ξεχωριστό τμήμα του Μ/Σ το οποίο είναι συνήθως συγκολλημένο στη δεξαμενή του Μ/Σ (Εικ. 3.9α).



Εικόνα 3.9: Ενσωματωμένος (In-tank) (β) και αποκομμένος (compartment) (α) τύπος ΣΑΤΥΦ

### 3.5.2 Έλεγχος αέργου ισχύος με συστοιχία πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση

Οι πυκνωτές γνωρίζουμε ότι εγχέουν άεργο ισχύ στο δίκτυο σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Q_C = Q_{C, \text{rat}} U_C^2 \quad (3-11)$$

, όπου  $Q_C$  είναι η άεργος ισχύς που εγχέουν οι πυκνωτές σε MVar,  $Q_{C, \text{rat}}$  είναι η ονομαστική άεργος ισχύς των πυκνωτών πάλι σε MVar και  $U_C$  η τάση σε ανά μονάδα σύστημα (σχετική με την ονομαστική τάση των πυκνωτών).

Η άεργος ισχύς που εγχέουν οι πυκνωτές αντισταθμίζει τη ζήτηση σε άεργο ισχύ από το δίκτυο και συνεπώς βοηθά στην ενίσχυση της τάσης. Για παράδειγμα, αν στο απλό δίκτυο της εικόνας (2.1) συνδέσουμε στο ζυγό του φορτίου μία συστοιχία πυκνωτών με ισχύ  $Q_C$  τότε η πτώση τάσης στον τροφοδότη (feeder) υπολογίζεται περίπου ίση με [1, 28]:

$$\Delta U \approx \frac{R_{LN} P_L + X_{LN} (Q_L - Q_C)}{U_2} \quad (3-12)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι οι πυκνωτές μειώνουν την πτώση τάσης στο δίκτυο. Ακόμα, όταν οι πυκνωτές αντισταθμίζουν κατάλληλα τη ζήτηση σε άεργο ισχύ, τότε παράλληλα μειώνουν το ρεύμα του feeder. Αυτό με τη σειρά του μειώνει τις απώλειες ισχύος στη γραμμή μεταφοράς ( $P_{loss}$ ) σύμφωνα με τον τύπο:

$$I = \frac{\sqrt{P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2}}{U_2} \quad (3-13)$$

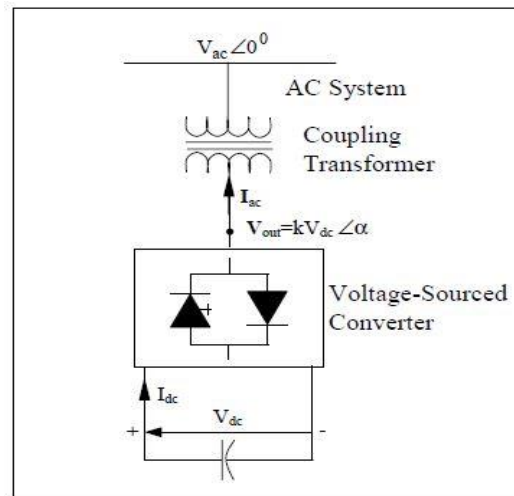
$$P_{loss} = I^2 R_{LN} \quad (3-14)$$

Για να μπορεί να αντισταθμιστεί σωστά η ζήτηση σε άεργο ισχύ εφόσον μπορεί να αλλάζει αρκετά γρήγορα από ελάχιστη σε μέγιστη τιμή, οι πυκνωτές πρέπει να ενεργοποιούνται όταν έχουμε μέγιστο φορτίο και να απενεργοποιούνται στο ελάχιστο φορτίο. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το φορτίο αλλάζει αρκετά συχνά οπότε οι πυκνωτές πρέπει να ελέγχονται τακτικά και κατάλληλα. Διάφοροι συμβατικοί έλεγχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν τους πυκνωτές, όπως ο χρόνος, η τάση και η άεργος ισχύς. Οι πυκνωτές που ελέγχονται από τον χρόνο έχουν εφαρμογές σε δίκτυα με πρόβλεψη φορτίου κυρίως ημερήσια αλλά σε μακροπρόθεσμο σχεδιασμό ώστε να μπορεί να προβλέψει ο ελεγκτής την ενεργοποίηση-απενεργοποίησή τους. Ένα μεγάλο μειονέκτημα αυτού του ελέγχου είναι η μη ελαστικότητα που παρέχει καθώς δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε διακυμάνσεις φορτίου που προκαλούνται από τον καιρό, περίοδο διακοπών κ.α. Όταν ο κύριος ρόλος των πυκνωτών είναι η ρύθμιση τάσης στο δίκτυο τότε πιο κατάλληλοι θεωρούνται οι πυκνωτές ελέγχου τάσης. Τέλος, οι πυκνωτές που ελέγχονται από την άεργο ισχύ χρησιμοποιούνται και είναι αποτελεσματικοί όταν ο ρυθμιστής του συστήματος έχει σκοπό να ελαττώσει τη ροή αέργου ισχύος.

### 3.5.3 STATCOM, SVC, DVR

Το **STATCOM (Static Synchronous Compensator)** είναι μία συσκευή αντισταθμίστριας της οικογένειας των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς (FACTS) που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος για να ελέγχει τη ροή ισχύος και να βελτιώνει την μεταβατική ευστάθεια στα ηλεκτρικά δίκτυα. Αποτελεί στην ουσία μια προέκταση του SVC. Η βασική ιδέα λειτουργίας του είναι ο έλεγχος του ποσού της αέργου ισχύος που εισάγεται ή απορροφάται από το ΣΗΕ στο οποίο είναι συνδεδεμένο το STATCOM με τελικό στόχο τη διατήρηση της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα. Όταν η τάση του συστήματος είναι χαμηλή, το STATCOM παράγει άεργο ισχύ (χωρητική λειτουργία), ενώ όταν είναι υψηλή, τότε απορροφά άεργο (επαγωγική λειτουργία). Η μεταβολή της αέργου ισχύος επιτυγχάνεται με ένα μετατροπέα πηγής τάσης (voltage-sourced converter – VSC), συνδεδεμένο στο δευτερεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή σύζευξης. Ο μετατροπέας πηγής τάσης χρησιμοποιεί διακοπτικές διατάξεις εξαναγκασμένης σβέσης (όπως GTOs, IGBTs ή IGCTs) για να συνθέσει μία εναλλασσόμενη τάση από μία DC τάση. Το STATCOM χρησιμοποιεί αυτήν την παραγόμενη τάση ως αναφορά έτσι ώστε να καθορίσει αν θα εκτελέσει χωρητική ή επαγωγική λειτουργία [18].

Στην πιο απλή μορφή του, το STATCOM αποτελείται από έναν μετασχηματιστή σύζευξης, έναν μετατροπέα πηγής τάσης και μία συσκευή αποθήκευσης DC ενέργειας. Αυτή η συσκευή αποθήκευσης είναι συνήθως ένας σχετικά μικρός DC πυκνωτής κι επομένως το STATCOM είναι δυνατό να ανταλλάξει μόνο άεργο ισχύ με το σύστημα. Αν μία DC μπαταρία ή κάποια άλλη DC πηγή τάσης χρησιμοποιούταν αντί του πυκνωτή, θα ήταν δυνατή η ανταλλαγή και ενεργού ισχύος. Ένα σχηματικό μοντέλο του STATCOM φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (3.10).



Εικόνα 3.10: Σχηματικό μοντέλο ενός STATCOM

Τόσο το πλάτος όσο και η φάση της τάσης εξόδου του STATCOM μπορούν να ελεγχθούν. Αλλάζοντας την φασική γωνία  $\alpha$  των διακοπών του μετατροπέα σε σχέση με τη φασική γωνία της AC τάσης του δικτύου, η τάση στα άκρα του DC πυκνωτή μπορεί να ελεγχθεί, ελέγχοντας έτσι το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της AC τάσης εξόδου του μετατροπέα, αφού  $V_{out} = kV_{dc}$ . Η σταθερά  $k$  σε αυτήν την εξίσωση εξαρτάται από τη διάταξη, τον έλεγχο του μετατροπέα και τον αριθμό των διακοπτικών παλμών. Η διαφορά μεταξύ της τάσης εξόδου του μετατροπέα και της AC τάσης του δικτύου είναι αυτή που καθορίζει τη ροή αέργου ισχύος μέσω του μετασχηματιστή σύζευξης από ή προς το σύστημα.

Η ενεργός ισχύς που διαρρέει τον μετατροπέα καλύπτει τις απώλειές του λόγω της διακοπτικής λειτουργίας και φορτίζει τον DC πυκνωτή σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο τάσης. Ο πυκνωτής φορτίζεται και αποφορτίζεται κατά τη διάρκεια κάθε διακοπτικού κύκλου, αλλά στη μόνιμη κατάσταση, η μέση τιμή της τάσης του παραμένει σταθερή. Αν δεν συνέβαινε αυτό, θα υπήρχε ροή ενεργού ισχύος προς ή από τον μετατροπέα και ο πυκνωτής θα κέρδιζε ή θα έχανε φόρτιση σε κάθε κύκλο. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, όλη η ισχύς από το AC σύστημα χρησιμοποιείται για να καλύψει τις διακοπτικές απώλειες. Η ικανότητα του STATCOM να απορροφά/παρέχει ενεργό ισχύ εξαρτάται από το μέγεθος του DC πυκνωτή και τις ενεργές απώλειες λόγω της διακοπτικής λειτουργίας. Εφόσον τόσο ο DC πυκνωτής όσο και απώλειες είναι σχετικά μικροί, το ποσό της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος είναι επίσης σχετικά μικρό. Αυτό δηλώνει ότι το ρεύμα εξόδου του STATCOM  $I_{ac}$  πρέπει να είναι περίπου  $\pm 90^\circ$  σε σχέση με την τερματική AC τάση του συστήματος.

Η μεταβολή του πλάτους της τριφασικής τάσης εξόδου του μετατροπέα  $V_{out}$  ελέγχει την παραγωγή/απορρόφηση της αέργου ισχύος του STATCOM. Αν το πλάτος της τάσης εξόδου του μετατροπέα  $V_{out}$  αυξηθεί πάνω από την τιμή του πλάτους της AC τάσης του συστήματος  $V_{ac}$ , τότε το AC ρεύμα  $I_{ac}$  ρέει δια μέσου της αντίδρασης του μετασχηματιστή από το μετατροπέα στο AC σύστημα, παράγοντας άεργο ισχύ. Σε αυτήν την περίπτωση, το AC σύστημα απορροφάει χωρητικό ρεύμα που προηγείται κατά μία γωνία  $90^\circ$  την AC τάση του συστήματος, υποθέτοντας ότι οι απώλειες του μετατροπέα είναι μηδενικές. Το AC ρεύμα ρέει από το σύστημα στο μετατροπέα πηγής τάσης αν το πλάτος της τάσης εξόδου του μετατροπέα μειωθεί κάτω από αυτό του AC συστήματος και συνεπώς, ο μετατροπέας απορροφά άεργο ισχύ. Για την επαγωγική λειτουργία, το ρεύμα έπεται της AC τάσης κατά  $90^\circ$ , αγνοώντας και πάλι τις απώλειες του μετατροπέα. Αν τα πλάτη της AC τάσης του συστήματος και του μετατροπέα είναι ίσα, δεν θα υπάρξει ροή AC ρεύματος από/προς τον μετατροπέα και κατά συνέπεια ούτε παραγωγή/απορρόφηση αέργου ισχύος.

Το πλάτος του ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

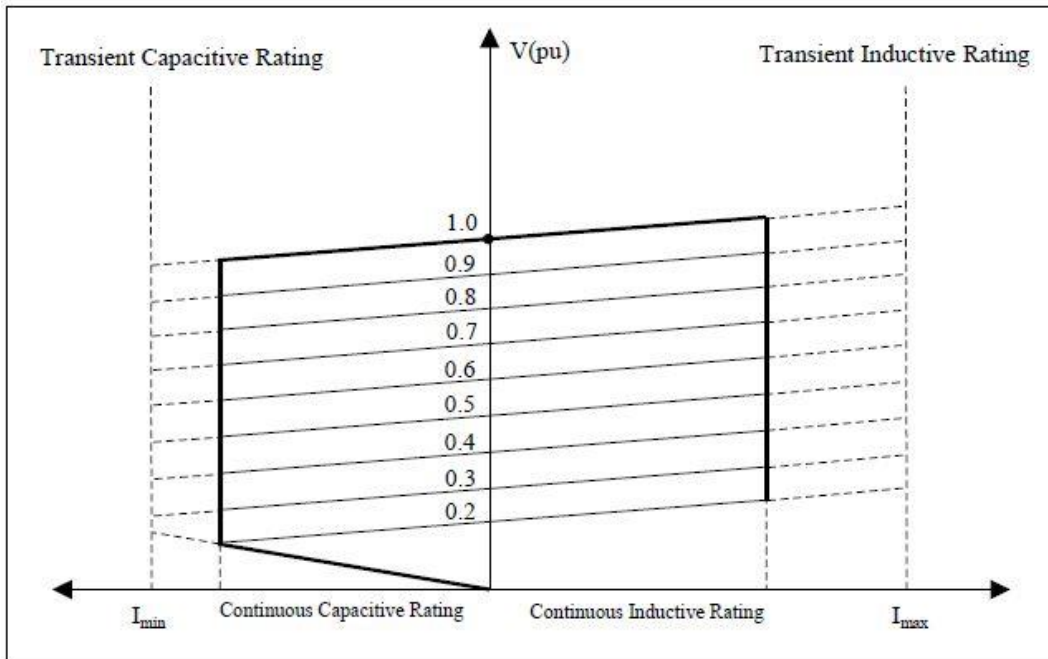
$$I_{ac} = \frac{V_{out} - V_{ac}}{X} \quad (3 - 15)$$

υποθέτοντας ότι το AC ρεύμα ρέει από τον μετατροπέα στο σύστημα, όπου  $V_{out}$  και  $V_{ac}$  είναι τα πλάτη της τάσης εξόδου του μετατροπέα και του AC συστήματος αντίστοιχα, ενώ η μεταβλητή  $X$  αντιπροσωπεύει την αντίδραση του μετασχηματιστή σύζευξης. Η αντίστοιχη άεργος ισχύς μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Q = \frac{V_{out}^2 - V_{out}V_{ac} \cos \alpha}{X} \quad (3 - 16)$$

όπου η  $\alpha$  είναι γωνία μεταξύ της AC τάσης του συστήματος και της τάσης εξόδου του μετατροπέα.

Η χαρακτηριστική V-I του STATCOM παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (3.11). Σε αυτήν, φαίνεται η ικανότητα του STATCOM να στηρίζει πολύ χαμηλές τάσεις δικτύου, μέχρι και 0.15 ανά μονάδα, που είναι τιμή που έχει να κάνει με την αντίδραση του μετασχηματιστή σύζευξης. Αυτό έρχεται σε μεγάλη αντίθεση με την αντίστοιχη διάταξη FACTS με thyristor, δηλαδή το SVC, το οποίο σε κατάσταση πλήρους χωρητικής εξόδου μετατρέπεται σε έναν μη ελεγχόμενο πυκνωτή. Ένα STATCOM μπορεί να στηρίζει τάσεις δικτύου σε ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες τάσεως, με την προϋπόθεση ότι ο DC πυκνωτής περιέχει αρκετή ενέργεια για να υποστηρίξει τις απώλειες.



Εικόνα 3.11: Χαρακτηριστική λειτουργίας V-I ενός STATCOM

Τα **SCV (Static Var Compensator)** είναι ένα σύνολο ηλεκτρικών συσκευών τα οποία παρέχουν γρήγορης απόκρισης άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο και εμφανίζονται κυρίως στην ΥΤ. Τα SVC ανήκουν στην οικογένεια συσκευών συστημάτων μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος, ρυθμίζοντας τη τάση, το συντελεστή ισχύος, τις αρμονικές και βοηθούν στη σταθεροποίηση του συστήματος. Αντίθετα από ένα σύγχρονο συμπυκνωτή που είναι μια περιστρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή, το SVC δεν έχει κανένα σημαντικό κινούμενο μέρος (εκτός από τον εσωτερικό μηχανισμό διανομής) [18].

Το SVC είναι μια αυτοματοποιημένη συσκευή αντιστάθμισης της σύνθετης αντίστασης της γραμμής, με σκοπό να κάνει το σύστημα να λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Τα SVC χρησιμοποιούνται σε δύο κύριες καταστάσεις:

- Συνδεδεμένος με το σύστημα ισχύος, για να ρυθμίσει την τάση μεταφοράς ( Transmission SVC).
- Συνδεδεμένος κοντά στα μεγάλα βιομηχανικά φορτία, για να βελτιώσει την ποιότητα ισχύος (Industrial SVC).

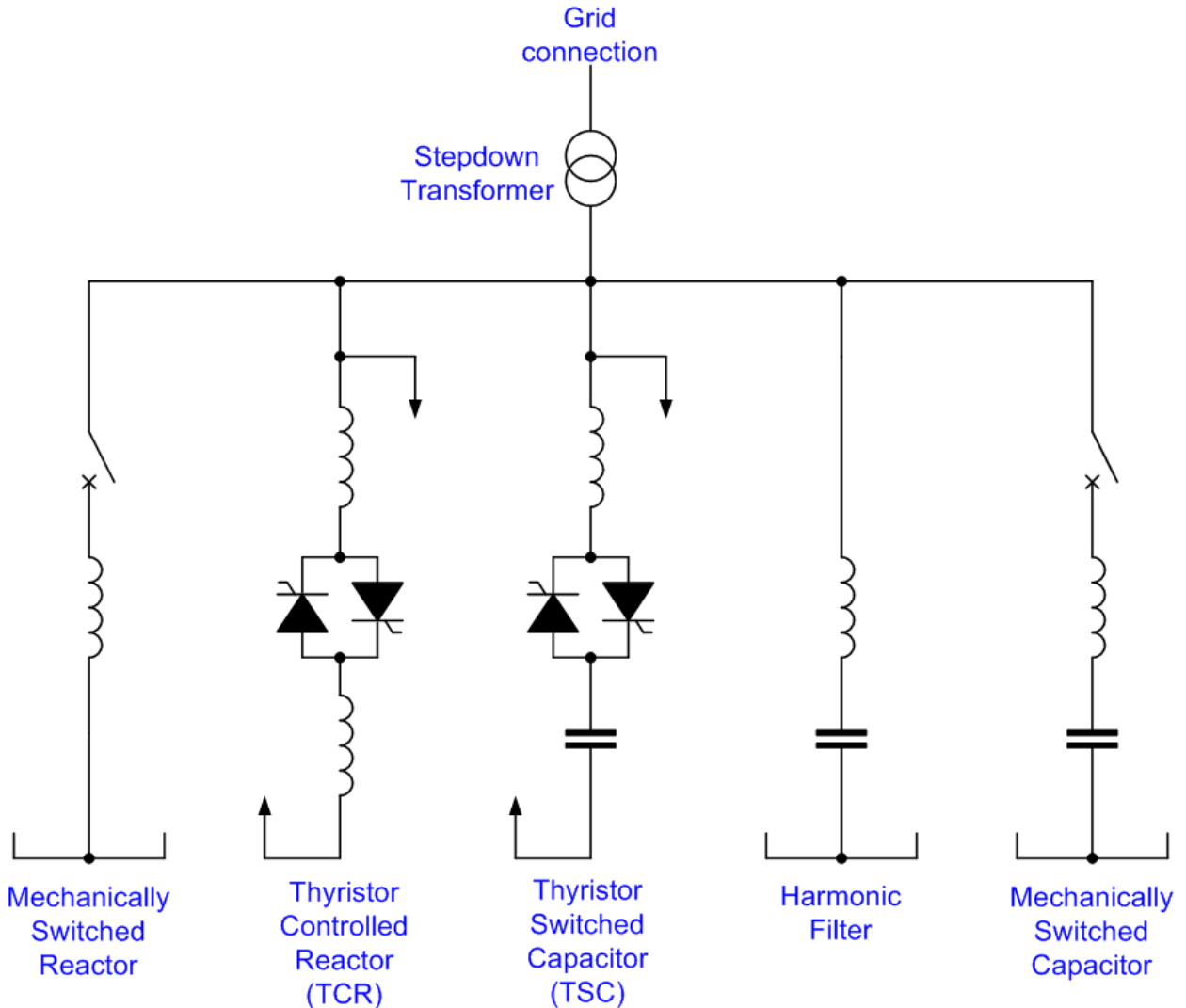
Στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας (ΥΤ), το SVC χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την τάση του δικτύου. Εάν το φορτίο του συστήματος είναι χωρητικό, το SVC θα χρησιμοποιήσει ελεγχόμενα thyristors για να καταναλώσει άεργο ισχύ από το σύστημα, ώστε να μειώσει την τάση του δικτύου. Υπό επαγωγικό φορτίο, οι εγκατεστημένοι πυκνωτές του συστήματος ενεργοποιούνται αυτόματα παρέχοντας άεργο ισχύ στο δίκτυο και συνεπώς αυξάνουν τη τάση.

Στις βιομηχανικές εφαρμογές, τα SVC τοποθετούνται κατά κύριο λόγο κοντά στα υψηλά και γρήγορα μεταβαλλόμενα φορτία, όπως χυτήρια, όπου μπορούν να καταστείλουν τις διακυμάνσεις (flicker) της τάσης.

Χαρακτηριστικά, ένα SVC περιλαμβάνει μία ή περισσότερες συστοιχίες πυκνωτών ή αντιδραστήρες εκ των οποίων τουλάχιστον μία συστοιχία ελέγχεται από θυρίστορ

(thyristors). Στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν ένα SVC περιλαμβάνουν είναι συνήθως τα εξής:

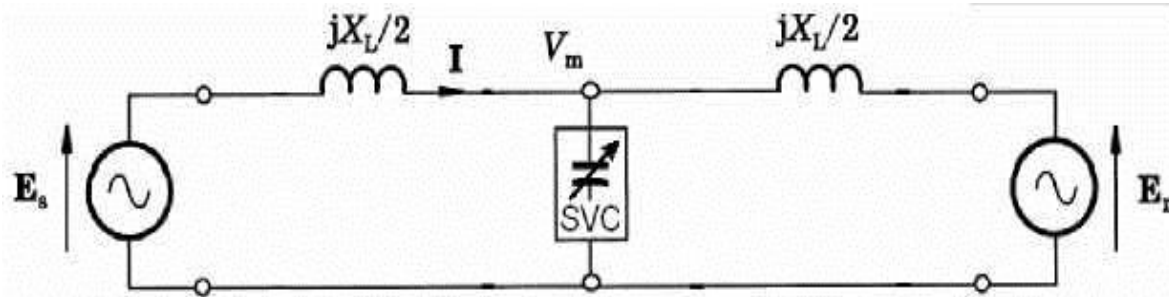
- Αντιδραστήρες ελεγχόμενοι από θυρίστορ (TCR), όπου ο αντιδραστήρας μπορεί να είναι πυρήνα αέρα ή σιδήρου.
- Πυκνωτές ελεγχόμενοι από θυρίστορ (TSC).
- Φίλτρα αρμονικών.
- Αντιδραστήρες ή πυκνωτές ελεγχόμενοι μηχανικά (μέσω ενός διακλαδωτή κυκλώματος).



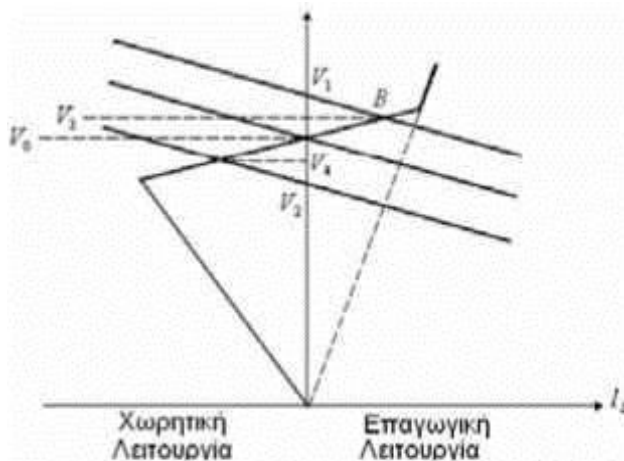
Εικόνα 3.12: Τρόποι σύνδεσης και λειτουργίας ενός SVC συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο



Παρακάτω παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα δικτύου με έλεγχο SVC (Εικ. 3.13) και πιο κάτω η χαρακτηριστική V-I ενός SVC (Εικ. 3.14).



Εικόνα 3.13: Παράδειγμα κυκλώματος παρουσία SVC



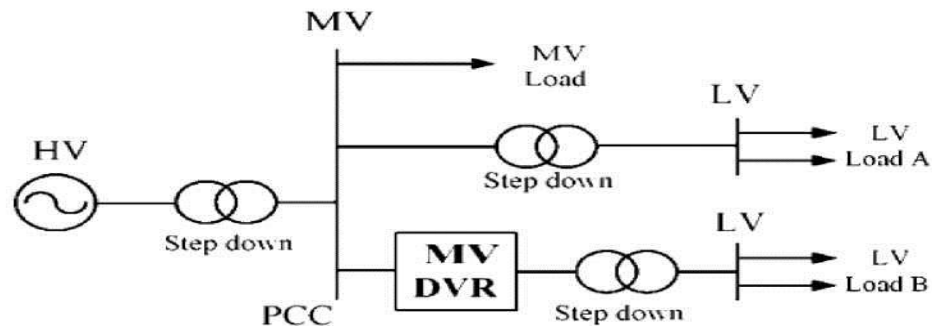
Εικόνα 3.14: Χαρακτηριστική λειτουργίας V-I ενός SVC

Έστω ότι το σύστημα στην παραπάνω χαρακτηριστική λειτουργεί υπό τάση  $V$ . Εάν η τάση του συστήματος αυξηθεί (σε σχέση με το σημείο λειτουργίας  $V$ ), το SVC μετακινεί το σημείο λειτουργίας στο  $B$  απορροφώντας επαγωγικό ρεύμα και κρατάει την τάση στο  $V_3$ . Κατά παρόμοιο τρόπο το SVC κρατάει την τάση στο  $V_4$  εάν η τάση του συστήματος μειωθεί παράγοντας αυτή τη φορά χωρητικό ρεύμα.

Τέλος, το **DVR (Dynamic Voltage Restorer)** είναι επίσης μια συσκευή με ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιείται για τη στήριξη της τάσης του δικτύου, και την προστασία ευαίσθητων φορτίων από τις διαταραχές τάσης στο ΣΚΣ. Συνήθως η σύνδεσή του γίνεται στο δίκτυο ΜΤ, αλλά τα τελευταία χρόνια έχει εξελιχθεί σε μια λύση με καλή σχέση τιμής-



απόδοσης για τα δίκτυα ΧΤ. Η χρήση του στη Μέση Τάση το υποβάλλει σε συχνή εμφάνιση σφαλμάτων, με αποτέλεσμα να ρέουν στο εσωτερικό του μεγάλα ρεύματα πριν προλάβουν να ενεργοποιηθούν τα μέσα προστασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη πτώση τάσης στο ΣΚΣ, κάτι που επηρεάζει τα φορτία που είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Εάν δε γίνει σωστός έλεγχος της διάταξης, το DVR μπορεί να συνεισφέρει στη βύθιση τάσης, στην προσπάθειά του να αντισταθμίσει την πτώση τάσης που παρατηρείται, χειροτερεύοντας έτσι το πρόβλημα, και πετυχαίνοντας τον αντίθετο στόχο από τον επιθυμητό. [19]



Εικόνα 3.15: Διάταξη DVR συνδεδεμένη στο δίκτυο MT [19]

Αξίζει εδώ να τονίσουμε ότι το Statcom έχει καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με το SVC. Στην περίπτωση που η τάση του συστήματος βυθίζεται σε βαθμό που το ρεύμα εξόδου του Statcom μεγιστοποιείται, το άεργο ρεύμα εξόδου του δεν επηρεάζεται από το μέτρο της τάσης. Συνεπώς χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη σταθερότητα όταν η τάση είναι μονίμως κάτω του ορίου. Αντίθετα, το άεργο ρεύμα εξόδου του SVC είναι ανάλογο του τετραγώνου της τάσης. Αυτό σημαίνει ότι η παρεχόμενη άεργος ισχύς μειώνεται ταχύτατα με τη μείωση της τάσης, οπότε δεν μπορεί να παρέχει αξιόπιστη στήριξη στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, το STATCOM έχει ταχύτερες αποκρίσεις, και μικρότερες εγχύσεις αρμονικών συνιστωσών. Ωστόσο, το STATCOM προκαλεί μεγαλύτερες απώλειες, και είναι ακριβότερη διάταξη σε σχέση με το SVC, συνεπώς το τελευταίο, που αποτελεί και παλαιότερη τεχνολογία, εξακολουθεί να είναι αρκετά διαδεδομένο [18].

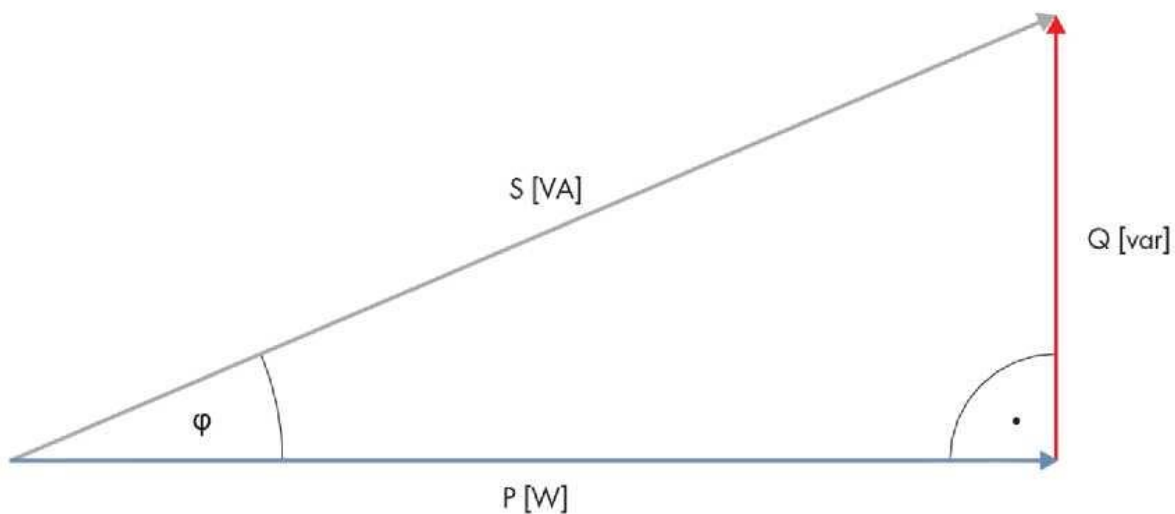
Τα μειονεκτήματα των παραπάνω διατάξεων είναι αφενός το υψηλό κόστος εγκατάστασής τους, και αφετέρου ο προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης τοποθέτησής τους, όταν μάλιστα το φορτίο και η διανεμημένη παραγωγή της γραμμής μεταβάλλονται συνεχώς.

### 3.6 Τρόποι ελέγχου τάσης και αέργου ισχύος παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής

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

Με βάση τη σχέση (3-3) στην οποία αντί για  $P_L$  και  $Q_L$  έχουμε  $(P_G - P_L)$  και  $(Q_G - Q_L)$  παρατηρούμε ότι ενδεχόμενη μεταβολή της αέργου ισχύος θα επηρεάσει την ανύψωση τάσης στο ζυγό. Στα δίκτυα ΥΤ όπου  $X \gg R$ , μπορεί να εφαρμοσθεί η μέθοδος της απορρόφησης αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των Φ/Β για τη μείωση της τάσης στους ζυγούς. Ουσιαστικά οι αντιστροφείς των Φ/Β αναγκάζονται να δουλέψουν με επαγωγικό συντελεστή ισχύος, ενώ αντίστοιχα σε περίπτωση βύθισης τάσης παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο δουλεύοντας με χωρητικό συντελεστή ισχύος. Η δυνατότητα αυτή ονομάζεται Power Factor Control (PFC).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κάθε inverter έχει ένα όριο στη φαινόμενη ισχύ εξόδου του, που προκύπτει από το μέγιστο ρεύμα εξόδου του. Το όριο στο ρεύμα είναι αποτέλεσμα του ρεύματος αντοχής των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα. Έτσι, μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι αδύνατο να καταναλώσει την απαιτούμενη άεργο, ώστε να φτάσει η τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί αντιστροφέας με μεγαλύτερη ονομαστική φαινόμενη ισχύ από την ονομαστική ισχύ εξόδου των Φ/Β. Παρακάτω παρατίθεται ένα σχήμα στο οποίο φαίνεται η άεργος ισχύς που μπορεί να παραχθεί ή να απορροφηθεί αντίστοιχα από έναν αντιστροφέα σε σχέση με την τιμή της φαινόμενης και ενεργού ισχύος του [20].



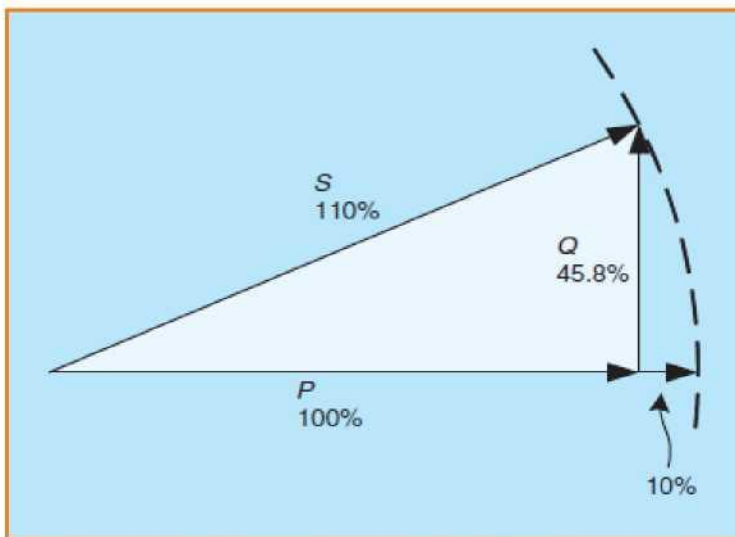
Εικόνα 3.16: Φαινόμενη ισχύς αντιστροφέα με συντελεστή ισχύος διάφορο της μονάδας

Ο λόγος που πρέπει να χρησιμοποιηθεί αντιστροφέας με μεγαλύτερη ονομαστική φαινόμενη ισχύ από την ονομαστική ισχύ εξόδου των Φ/Β παρουσιάζεται στο παρακάτω εύκολο παράδειγμα.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που μπορεί να παράγει  $P=10MW$  ενεργού ισχύος. Στην περίπτωση που ο αντιστροφέας λειτουργεί με μοναδιαίο

συντελεστή ισχύος, δηλαδή δεν παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης αέργου ισχύος, η φαινόμενη ισχύς του είναι  $S=P=10MVA$ . Στην περίπτωση ωστόσο που θέλουμε να δουλεύει με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi = 0,95$ , τότε ο αντιστροφείας θα πρέπει να μπορεί να χειριστεί  $Q = P \tan\phi = 3,3MVar$  αέργου ισχύος. Συνεπώς η φαινόμενη ισχύς του θα πρέπει να είναι:  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 10,5MVA$ . Οπότε πρέπει να γίνει επιλογή αντιστροφείας με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ από αυτή των Φ/Β.

Εύκολα προκύπτει όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα ότι η αύξηση της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφείας κατά μόλις 10%, αυξάνει την ικανότητα αέργου ισχύος από μηδέν έως περίπου 46% κατά τη διάρκεια της μέγιστης παραγωγής από τα Φ/Β. Αυτό οδηγεί σε ένα συντελεστή ισχύος από 0.91 επαγωγικό (απορρόφηση αέργου) έως 0.91 χωρητικό (παραγωγή αέργου) [21].



Εικόνα 3.17: Σχέση φαινόμενης ισχύος του αντιστροφείας και ικανότητα διαχείρισης αέργου ισχύος

### 3.6.2 Μέθοδοι εφαρμογής της ρύθμισης αέργου ισχύος

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι εφαρμογής της ρύθμισης αέργου ισχύος για τη μείωση της τάσης σε ένα δίκτυο με μεγάλη διείδυση φωτοβολταϊκών. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι οι εξής [22]:

- Καθορισμένη αέργου ισχύος [Fixed Q]
- Καθορισμένος συντελεστής ισχύος [Fixed  $\cos\phi$ ]
- Συντελεστής ισχύος εξαρτώμενος από την ενεργό ισχύ [ $\cos\phi(P)$ ]
- Άεργου ισχύος εξαρτώμενη από την τάση [ $Q(U)$ ]

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

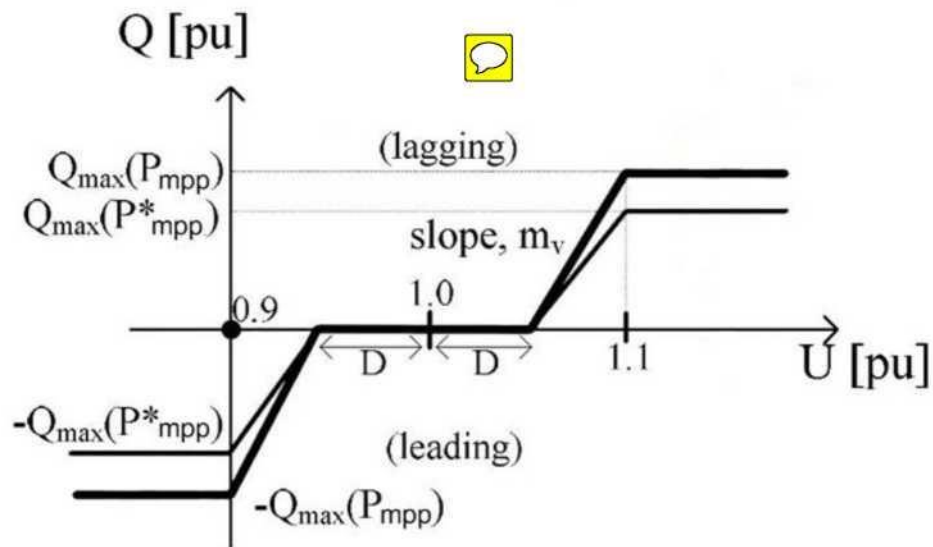
Το πρόβλημα αυτό λύνει η μέθοδος του καθορισμένου συντελεστή ισχύος [*Fixed cosφ*]. Στην περίπτωση αυτή, η αέργος ισχύς που απορροφούν οι αντιστροφείς είναι εξαρτώμενη της παραγόμενης ενεργού ισχύος του  $\Phi/B$  ( $Q = P \tan \phi$ ). Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργός ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής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

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

Οι παραπάνω μέθοδοι υποστηρίζουν την τάση του δικτύου έμμεσα, μετρώντας μόνο την παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών, και κάνοντας την υπόθεση ότι αύξηση της παραγωγής θα οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη αύξηση της τάσης, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τα φορτία στους ζυγούς. Σε πολλές περιπτώσεις, τα διαστήματα μεγιστοποίησης της  $\Phi/B$  παραγωγής μπορεί να συμπίπτουν με μεγάλη ζήτηση από τα φορτία, οπότε να μην εμφανιστεί καν το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης.

Η μέθοδος όπου η αέργος ισχύς είναι εξαρτώμενη της τάσης [*Q(U)*] μετράει κατευθείαν την τάση του ζυγού, και ο καθορισμός της αέργου που θα απορροφηθεί γίνεται με τη χρήση καμπυλών στατισμού (Droop Control) (Εικ. 3.18). Με τη μέθοδο αυτή, σε περίπτωση που η τάση είναι εντός επιθυμητών ορίων, ο αντιστροφέας δεν απορροφά άεργο, μειώνοντας έτσι κατά πολύ τις άεργες απώλειες που εμφανίζονται στις υπόλοιπες μεθόδους. Επίσης, σε περίπτωση που είχαμε περισσότερους από έναν αντιστροφείς λόγω περισσότερων από μία φωτοβολταϊκών παραγωγών, ανάλογα με το επίπεδο της τάσης σε κάθε ζυγό, γίνεται απορρόφηση διαφορετικής ποσότητας αέργου από τον κάθε αντιστροφέα. Η καμπύλη στατισμού droop που μπορεί να επιβληθεί στον αντιστροφέα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα όπου παρατηρούμε ότι για ένα διάστημα  $(-D, D)$  δεν υπάρχει ούτε απορρόφηση ούτε παραγωγή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς. Το  $D$  ( $\rho u$ ) είναι το πλάτος του εύρους ζώνης της τάσης στο οποίο δεν είναι επιθυμητό να απορροφάται άεργος ισχύς, δεδομένου ότι δεν εμφανίζεται έντονο πρόβλημα ανύψωση ή πτώσης τάσης. Ουσιαστικά είναι ένας συντελεστής ευαισθησίας του αντιστροφέα για το πότε θα αρχίσει να παράγει ή να απορροφά άεργο ισχύ. Όσο πιο μικρό είναι το πλάτος  $D$  τόσο πιο μεγάλη θεωρείται η ευαισθησία, δηλαδή τόσο πιο εύκολα μπαίνει σε λειτουργία ο αντιστροφέας για να στηρίξει την τάση στο ζυγό που είναι

συνδεδεμένος.



Εικόνα 3.18: Διαχείριση αέργου ισχύος για στήριξη της τάσης του δικτύου

Στην παραπάνω περίπτωση η αέργος ισχύς που θα πρέπει να απορροφηθεί ή να παραχθεί από τον αντιστροφέα δίνεται από τον παρακάτω τύπο (3-17):

$$Q = \begin{cases} Q_{\max}, & V \leq 0.97 \\ Q_{\max} \frac{V - 1 + D}{0.03 - D}, & 0.9 < V < 1 - D \\ 0, & 1 - D \leq V \leq 1 + D \\ Q_{\max} \frac{V - 1 - D}{0.03 - D}, & 1 + D < V < 1.03 \\ Q_{\max}, & V \geq 1.03 \end{cases} \quad (3-17)$$

όπου  $Q_{\max} = P_{MPP} \cdot \tan \phi_{inv}$ , με  $\cos \phi_{inv}$  να είναι ο μικρότερος συντελεστής ισχύος λειτουργίας του αντιστροφέα διότι όσο πιο μικρός ο συντελεστής ισχύος τόσο πιο μεγάλη η δυνατότητα σε παραγωγή ή απορρόφηση αέργου ισχύος από αυτόν. Βέβαια πρέπει να προσέξουμε ώστε η να θέσουμε τέτοιο  $\cos \phi_{inv}$  ώστε η μέγιστη ποσότητα αέργου ισχύος που παράγουν οι αντιστροφείς να μην υπερφορτίζουν τις γραμμές μεταφοράς και τον Μ/Σ..

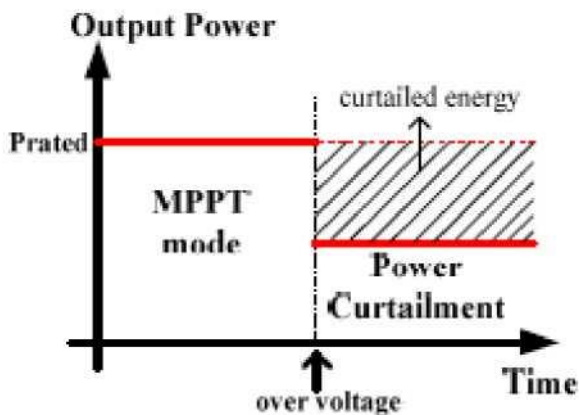
Είναι άξιο προσοχής, ότι ο προτεινόμενος ελεγκτής αέργου ισχύος έχει τη δυνατότητα

να προσφέρει άεργο ισχύ στο δίκτυο σε περίπτωση βύθισης τάσης, δουλεύοντας έτσι με χωρητικό χαρακτήρα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να παρέχει πλήρη στήριξη στη ρύθμιση τάσης του δικτύου.

### 3.6.3 Περικοπή ενεργού ισχύος - Active Power Curtailment

Ο έλεγχος των αντιστροφών με καμπύλες στατισμού (droop control), είναι συνηθισμένη τεχνική που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία και το διαμοιρασμό ισχύος σε γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες παράλληλα, και αφορά συνήθως τη σχέση μεταξύ ενεργού ισχύος και συχνότητας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης τάσης, μπορούμε να επιβάλουμε στον inverter έλεγχο droop που θα συνδέει την ενεργό ισχύ με την τάση [23].

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



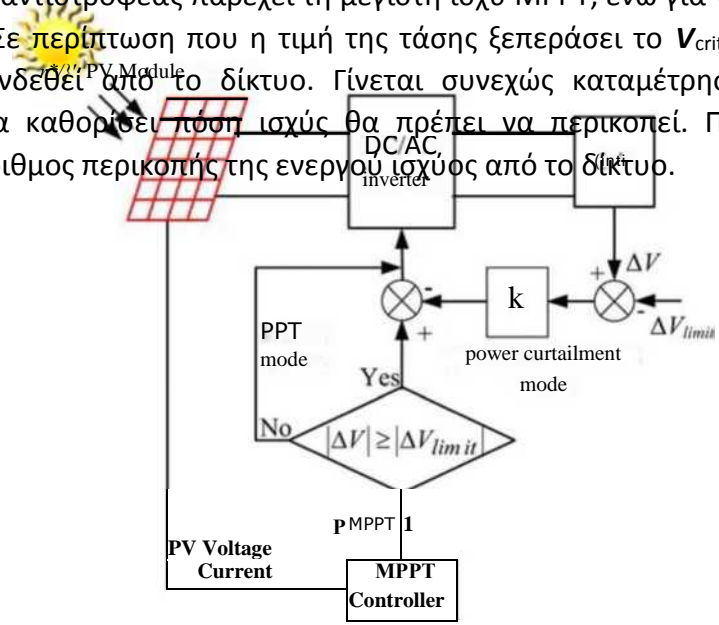
Εικόνα 3.19: Περικοπή ενεργού ισχύος λόγω ανύψωσης τάσης

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

$$P_{inv} = \begin{cases} P_{MPPT}, & V \leq V_{limit} \\ P_{MPPT} - k(V - V_{limit}), & V_{limit} < V \leq V_{crit} \\ 0 & V > V_{crit} \end{cases} \quad (3-18)$$

όπου  $P_{MPPT}$  είναι η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να παράγει η συστοιχία των Φ/Β για μια δεδομένη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (MW),  $k$  ένας παράγοντας κλίσης

[συντελεστής στατισμού - droop coefficient] (MW/KV), ενώ  $V_{limit}$  είναι η τάση πάνω από την οποία η ισχύς που προσφέρει ο αντιστροφέας μειώνεται με το συντελεστή κλίσης  $k$ . Όσο ισχύει  $V < V_{limit}$ , ο αντιστροφέας παρέχει τη μέγιστη ισχύ MPPT, ενώ για  $V > V_{limit}$  μειώνει την ισχύ εξόδου του. Σε περίπτωση που η τιμή της τάσης ξεπεράσει το  $V_{crit}$ , ο αντιστροφέας θα πρέπει να αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Γίνεται συνεχώς καταμέτρηση της τάσης στους ακροδέκτες για να καθοριστεί ποση ισχύς θα πρέπει να περικοπεί. Παρακάτω ακολουθεί σχηματικά ο αλγόριθμος περικοπής της ενεργού ισχύος από το δίκτυο.



Εικόνα 3.16: Αλγόριθμος ελέγχου τάσης για περικοπή ενεργού ισχύος [24]

Πρέπει να σημειωθεί ότι η στρατηγική αυτή περιορισμού της ενεργού ισχύος δεν είναι η καλύτερη δυνατή εφόσον ουσιαστικά περιορίζεται η εκμεταλλεύσιμη ισχύς που παράγουν τα Φ/Β κάτι το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλου προβλήματος ανύψωσης τάσης οδηγεί σε σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος, γεγονός που αδικεί ορισμένους παραγωγούς έναντι άλλων με σημαντικές οικονομικές απώλειες. Εκτός όμως του παραγωγού ζημιώνεται και το ίδιο το δίκτυο το οποίο αντί να εκμεταλλεύεται μία ανανεώσιμη ενέργεια χρειάζεται να παράγει μόνο του την καθορισμένη ενέργεια μέσω κυρίως υδροηλεκτρικών ώστε να καλύψει τα καταναλωτικά του φορτία. Μια λύση θα μπορούσε να είναι η αποθήκευση της ισχύος που έχει περικοπεί σε συσσωρευτές όπως θα δούμε παρακάτω.

### 3.6.4 Αποθήκευση περίσσειας ισχύος σε συσσωρευτές (μπαταρίες)

Όπως έχουμε αναφέρει, σε περίπτωση που η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση των φορτίων, τότε αυτή καλύπτει τις ανάγκες των φορτίων, και η περίσσεια ισχύος εγχέεται στο δίκτυο, συμβάλλοντας στην αύξηση της τάσης των ζυγών. Μια λύση του προβλήματος είναι η αποθήκευση της περίσσειας ισχύος σε συσσωρευτές [20].

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

Πρόκειται για μια πολύ αξιόλογη προοπτική, ωστόσο οι αποθηκευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι πολύ ακριβές, και η σχέση κόστους-απόδοσης είναι πολύ μικρή, ιδίως σε περιπτώσεις πολύ μεγάλης φωτοβολταϊκής παραγωγής, όπου θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεγάλες διατάξεις συσσωρευτών άρα ακόμα πιο ακριβές διατάξεις. Καθότι η μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας επικεντρώνεται σε δίκτυα MT οπότε τα φορτία ξεκινούν από 250KVA έως και 15MVA και εξίσου ανάλογα θα είναι και οι φωτοβολταϊκές παραγωγές η αποθήκευση περίσσειας ισχύος σε μπαταρίες καθίσταται ασύμφορη.

Στη ΧΤ τάση όμως θα ήταν μία πολύ καλή επιλογή σε αντίθεση με την περικοπή ενεργού ισχύος. Αυτή τη μέθοδο ρύθμισης τάσης μας δίνει τη δυνατότητα να την μελετήσουμε ο έξυπνος αντιστροφέας "Sunny Island" ο οποίος βρίσκεται στο εργαστήριο των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και είχαμε τη δυνατότητα να δούμε πως λειτουργεί.

### 3.6.5 Αναβάθμιση του δικτύου

Ένας τελευταίος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος ανύψωσης τάσης είναι η αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου. Τα συμβατικά δίκτυα είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να τροφοδοτούν με ισχύ φορτία σε συγκεκριμένη απόσταση, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τη διεσπαρμένη παραγωγή. Με τη διείσδυση όμως των ΑΠΕ και την αντίστροφη ροή ισχύος στο δίκτυο, οι ισορροπίες έχουν αλλάξει. Για να μπορέσει το δίκτυο να ανταπεξέλθει στις αλλαγές, είναι δυνατό να γίνει αναβάθμιση των συστατικών του. Για παράδειγμα μπορεί να γίνει αντικατάσταση των γραμμών με χρήση αγωγών με καλύτερη ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (μικρότερη σύνθετη αντίσταση), είτε και δημιουργία νέων γραμμών. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν Μ/Σ μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα υπερφόρτισής τους, λόγω των μεγάλων άεργων ρευμάτων, και τη ροή μεγάλων ποσοτήτων ισχύος στο δίκτυο [20].



Με βάση τον τύπο (3-3) προκύπτει ότι μείωση της αντίστασης  $R$  και της αντίδρασης  $X$  της γραμμής, δηλαδή της σύνθετης αντίστασης του δικτύου θα επιφέρει μείωση των διακυμάνσεων της τάσης. Συνεπώς, πρόκειται για μία λύση που θα μετριάσει το πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό, ωστόσο η εφαρμογή της συνεπάγεται πολύ μεγάλο κόστος, ιδίως αν πρόκειται για την αντικατάσταση γραμμών του υπόγειου δικτύου. Ο παράγοντας αυτός καθιστά τη συγκεκριμένη πρόταση τη λιγότερο συμφέρουσα, σε σύγκριση με τους υπόλοιπους προτεινόμενους τρόπους.

### **3.6.6 Συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και Ρύθμισης Αέργου Ισχύος εξαρτώμενη από Τάση ( $Q(U)$ ) (droop control)**

Πρόκειται για έναν τρόπο τον οποίο δοκιμάσαμε στην παρούσα εργασία σε περίπτωση διεύθυνσης μεγάλης φωτοβολταϊκής παραγωγής και μικρής κατανάλωσης από τα φορτία. Σε μία τέτοια περίπτωση η οποία είναι και η χειρότερη περίπτωση είναι πολύ μεγάλη η ανύψωση τάσης που θα παρατηρηθεί στο ΣΚΣ οπότε ακόμα και να μπορέσει ο Μ/Σ να την ρυθμίσει με όλες του της αλλαγές λήψης θα έχουν πέσει σε μεγάλο βαθμό οι τάσεις του ίδιου του Μ/Σ αλλά και των υπολοίπων ζυγών, στα οποία υπάρχουν άλλα φορτία τα οποία και εκείνα πρέπει να βρίσκονται εντός επιτρεπτών ορίων τάσης για να έχουν σωστή λειτουργία.

Στην περίπτωση αυτή λοιπόν ο αλγόριθμός μας εφαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε το ΣΑΤΥΦ μέσω της μεθόδου LDC που θα δούμε στην παρούσα εργασία να ελέγχει την τάση στο ΣΚΣ αλλά ταυτόχρονα να ελέγχει αν και οι υπόλοιπες τάσεις στους ζυγούς που φέρουν φορτία βρίσκονται εντός ορίων. Όταν έχει διορθωθεί η τάση στο ΣΚΣ αλλά οι υπόλοιπες τάσεις βγουν εκτός ορίων τότε εισέρχεται στον αλγόριθμο η *Ρύθμιση Αέργου Ισχύος εξαρτώμενη από Τάση ( $Q(U)$ )* μέσω droop control που έχουμε εξηγήσει παραπάνω. Το ΣΑΤΥΦ με LDC παύει να ελέγχει την τάση στο ΣΚΣ αλλά ελέγχει την τάση η οποία έχει βγει σε μεγαλύτερο βαθμό εκτός ορίων, ενώ οι αντιστροφείς πλέον, μέσω της παραγωγής αέργου ισχύος εξαρτώμενη από τάση είναι υπεύθυνοι για τη σωστή ρύθμιση της τάσης στο ΣΚΣ.

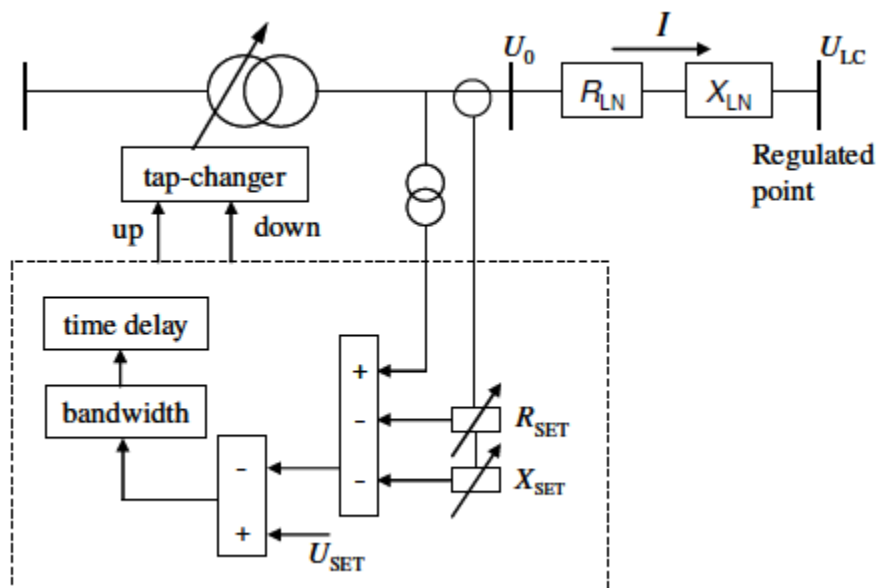
Για να μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις σε υπερυψηλές και υψηλές τάσεις αλλά ακόμα και σε μεσαίες τάσεις χρησιμοποιούμε δύο μετασχηματιστές, τους μετασχηματιστές ρεύματος (current transformer ή CT) και τους μετασχηματιστές τάσης (voltage transformer ή VT).

Μέσω προσαρμογών των  $R_{LN}$  και  $X_{LN}$  με τα ελίγματα των δύο παραπάνω μετασχηματιστών παίρνουμε τα  $R_{set}$  και  $X_{set}$  που θα χρησιμοποιήσουμε στην αντιστάθμιση με LDC. Παρακάτω φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται τα  $R_{set}$  και  $X_{set}$ , όπου  $N_{CT}$  είναι οι σπείρες του μετασχηματιστή ρεύματος και  $N_{PT}$  οι σπείρες του μετασχηματιστή τάσης [1].

$$R_{set} = \frac{N_{CT}}{N_{PT}} R_{LN} \quad (3-19)$$

$$X_{set} = \frac{N_{CT}}{N_{PT}} X_{LN} \quad (3-20)$$

Πιο κάτω (Εικόνα 3.17) βλέπουμε μία πιο λεπτομερή απεικόνιση ενός ΣΑΤΥΦ με ενεργοποιημένη τη λειτουργία αντιστάθμισης γραμμής (LDC) όπου προσπαθούμε να αντισταθίσουμε την τάση στο άκρος της γραμμής (regulated point).



Εικόνα 3.17: Λειτουργία του ΣΑΤΥΦ με ενεργοποιημένη τη λειτουργία LDC

Η τάση στο σημείο ρύθμισης κατά τη διάρκεια μέγιστου και ελάχιστου φορτίου θα είναι:

$$\begin{aligned} U_{LC} &= U_{0,max} - I_{max}(R_{LN}\cos\phi + X_{LN}\sin\phi) \\ U_{LC} &= U_{0,min} - I_{min}(R_{LN}\cos\phi + X_{LN}\sin\phi) \end{aligned} \quad (3-21)$$

όπου  $U_{0,max}$  και  $U_{0,min}$  είναι οι μέγιστη και ελάχιστη τάση αντίστοιχα στο δευτερεύον του Μ/Σ,  $I_{max}$  και  $I_{min}$  το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα γραμμής και  $\cos\phi$  είναι ο συντελεστής ισχύος στη θέση του ΣΑΤΥΦ.

Στην πράξη τα περισσότερα ΣΑΤΥΦ λειτουργούν με απενεργοποιημένη τη λειτουργία αντιστάθμισης γραμμής. Αυτό γιατί χωρίς το LDC ενεργοποιημένο είναι πιο εύκολος ο έλεγχός τους και αποφεύγονται τυχόν αχρείαστα λάθη. Τέτοιου είδους λάθη για παράδειγμα είναι ότι

η αντιστάθμιση με LDC εμπλέκει, όπως βλέπουμε και από τις εξισώσεις (3-21), τόσο τις παραμέτρους φορτίου όσο και τις παραμέτρους του ΣΑΤΥΦ κάτι το οποίο θα επηρεάσει την απόδοση του LDC. Ακόμα αν δεν προσέξουμε το λόγο X/R που θα χρησιμοποιήσουμε στη γραμμή μεταφοράς πάλι ενδέχεται να προκαλέσουμε περαιτέρω προβλήματα για την αντιστάθμιση με LDC. Στη διπλωματική ωστόσο θα χρησιμοποιηθεί η αντιστάθμιση πτώσης τάσης στη ρύθμιση της πτώσης τάσης καθώς αποτελεί πιο οικονομική λύση για την είσοδο της διεσπαρμένης παραγωγής και της ενσωμάτωσης αυτής στο δίκτυο.

Συνεχίζουμε τη ρύθμιση φτιάχνοντας έναν σωστό και αξιόπιστο αλγόριθμο για την LDC μέθοδο η οποία σε περιπτώσεις διείσδυσης ηλεκτρικής παραγωγής στο δίκτυο από οποιαδήποτε μορφή, δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά διότι στον τύπο της το ρεύμα το οποίο της δίνεται δεν είναι το σωστό ρεύμα το οποίο διαρρέει τις σύνθετες αντιστάσεις του δικτύου. Το ρεύμα υπολογίζεται μέσω της τοπολογίας του δικτύου και μέσω της γραμμικής προσέγγισης της αναφοράς (25) στην οποία παρουσιάζεται ότι στην περίπτωση μιας γραμμής διανομής με διαμοιρασμένο φορτίο τότε το ρεύμα στο άκρο του απομακρυσμένου ζυγού προφανώς δεν θα είναι το ίδιο ρεύμα με το ρεύμα στην αρχή αυτής. Αντιθέτως το ρεύμα προσεγγίζεται γραμμικά μέσω του τύπου:

$$I(x) \approx (f - L)^{-1} [(I_f - I_r)x + (I_r f - I_f L)] \quad (3-22)$$

όπου  $f$  είναι η απόσταση του ρυθμιστή (regulator) σε σχέση με τη θέση του Μ/Σ του δικτύου που στην περίπτωσή μας είναι μηδενική αφού βάζουμε το ρυθμιστή στον υποσταθμό που βρίσκεται ο Μ/Σ,  $L$  είναι η απόσταση του απομακρυσμένου ζυγού από το ΣΑΤΥΦ,  $I_f$  είναι το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ και  $I_r$  το ρεύμα που απορροφά το απομακρυσμένο φορτίο.

Παίρνοντας την παραδοχή όμοιων φορτίων κατανεμημένα σε μία γραμμή μεταφοράς τότε μπορούμε να ξέρουμε το ρεύμα  $I_r$  που απορροφά κάθε φορτίο εφόσον είναι ανάλογο του ρεύματος εισόδου της γραμμής διανομής. Για παράδειγμα αν έχουμε τρία ομοιόμορφα φορτία σε μία γραμμή τότε το ρεύμα που απορροφά κάθε φορτίο είναι:  $I_r = I_f / 3$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω η πτώση τάσης στο της γραμμής θα δίνεται από τον τύπο:

$$V_d = \int_{x=f}^L z I(x) dx \approx \frac{z}{2} (L - f) (I_r + I_f) \quad (3-23)$$

όπου  $z$  είναι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής ανά χιλιόμετρο.

Άρα, η τάση στον απομακρυσμένο ζυγό θα δίνεται από τον τύπο:

$$V_{calc} = V_{oltc} - \frac{z}{2} (I_{oltc} + I_r) L \quad (3-24)$$

Τα παραπάνω είναι εφαρμόσιμο όπως αναφέραμε σε περίπτωση διαμοιρασμού φορτίου για καλύτερα αποτελέσματα εύρεσης της πτώσης τάσης σε περίπτωση διαμοιρασμού φορτίων σε μία γραμμή διανομής. Πέραν αυτού όμως πρέπει να ξέρουμε την τοπολογία του δικτύου για να μπορέσουμε να αποφανθούμε για τα ρεύματα που διαπερνούν κάθε σύνθετη αντίσταση. Πράγματι, σε ένα δίκτυο με πέραν από μία γραμμή διανομής τα πράγματα

περιπλέκονται και πάλι η LDC θα ήταν αδύνατο να υπολογίσει σωστές πτώσεις τάσης γνωρίζοντας μόνο το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ.

Στην παραπάνω περίπτωση αν χρησιμοποιήσουμε και τις γωνίες τάσης και ρεύματος παίρνουμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα πτώσης τάσης. Πράγματι τελικά η εξίσωση (3-24) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \frac{\tilde{z}}{2}(\tilde{I}_{oltc} + \tilde{I}_r)L \quad (3-25)$$

Η παραπάνω υλοποίηση στο Simulink ήταν μία περίπλοκη διαδικασία λόγω των πολλών πράξεων αλλά έδωσε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την απλή χρήση μέτρων που παρουσιάζεται στην ανωτέρω παρουσίαση εργασίας [25].

Συγκεκριμένα για να αναπαραστήσουμε τη σύνθετη αντίσταση ανά χιλιόμετρο  $z$  σε διανυσματική μορφή  $\tilde{z}$  παίρνουμε το μέτρο της κατά τα γνωστά:  $z = \sqrt{R^2 + X^2}$  και τη γωνία της:  $\varphi = \arctan(X / R)$ .

Πέραν της παραπάνω αλλαγής στον αλγόριθμο υπολογισμού της αντιστάθμισης γραμμής, ερχόμαστε να παρουσιάσουμε την πρότασή μας η οποία δεν είναι άλλη από την απλή αναλογία φορτίων. Πράγματι, σε ένα δίκτυο με παραπάνω από μία γραμμές διανομής το ρεύμα που παίρνει από τον Μ/Σ η κάθε γραμμή είναι ουσιαστικά ποσοστό του ρεύματος στο δευτερεύον του Μ/Σ, το οποίο ποσοστό καθορίζεται από την αναλογία του φορτίου που απορροφά εκείνη η γραμμή σε σχέση με την ολική κατανάλωση. Με τον πολύ απλό τρόπο έχουμε το σωστό ρεύμα που θα χρησιμοποιήσουμε στον αλγόριθμο για την εύρεση της πτώσης τάσης χωρίς την ανάγκη μετρήσεων αλλά μόνο με τη γνώση της τάσης και του ρεύματος του Μ/Σ.

Τα πράγματα βέβαια περιπλέκονται όπως θα δούμε και στις προσομοιώσεις σε επόμενο κεφάλαιο όταν εισέρχεται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που στην περίπτωσή μας είναι από φωτοβολταϊκά. Και εκεί όμως έχουμε τη δυνατότητα εφαρμογής της παραπάνω διαδικασίας με μόνο που αυτή τη φορά θα πρέπει στον αλγόριθμό μας να βάλουμε θετικό πρόσημο στον τύπο (3-24) διότι έχουμε ανύψωση τάσης οπότε αντιστροφή ρεύματος λόγω αντιστροφής ισχύος προς το δίκτυο. Υπάρχουν πολλά δίκτυα τα οποία μπορούμε να προσομοιώσουμε για να δούμε σε ισχύ τη μέθοδό μας και αυτά τα δίκτυα θα προσομοιωθούν και θα αξιολογηθούν μετέπειτα.

Σε περίπτωση όμως μεγάλης φωτοβολταϊκής διείδυσης και ενώ το ΣΑΤΥΦ κάνει τις απαραίτητες αλλαγές λήψης για να ρυθμίσει την πτώση τάσης στον απομακρυσμένο ζυγό μπορεί να παρατηρηθεί ότι κάποιες άλλες τάσεις βγαίνουν εκτός ορίων. Αυτό κυρίως θα συμβεί σε δίκτυα με παραπάνω από μια γραμμή διανομής παράλληλα μεταξύ τους και πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα διότι όλες οι τάσεις φορτίων πρέπει να είναι σε αποδεκτά όρια λειτουργίας.

Εδώ εισέρχεται η συνεργασία του ΣΑΤΥΦ με LDC και της παροχής αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή (όταν βέβαια έχει αυτή τη δυνατότητα). Στην περίπτωση αυτή ο ΣΑΤΥΦ ρυθμίζεται να παρέχει στήριξη στον απομακρυσμένο ζυγό της γραμμής διανομής πάλι

μέσω LDC ενώ η στο ΣΚΣ παρέχεται άεργος ισχύς μέσω Droop Control για τη σωστή ρύθμιση της τάσης.

Παρόλο που είναι μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία η σωστή χρήση του σωστού αλγορίθμου σε κάθε περίπτωση δικτύου με διαφορετικές καταναλώσεις και παραγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, την πραγματοποιήσαμε στο Matlab μέσω Simulink. Τα αποτελέσματά της συνεργασίας είναι πολύ ενθαρρυντικά και θα παρουσιαστούν αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

## Κεφάλαιο 4

### Προσομοιώσεις και παρουσίαση αποτελεσμάτων

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τον τρόπο που λειτουργήσαμε το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Το πιο μεγάλο κομμάτι της εργασίας ήταν η κατασκευή στο Simulink του Matlab ενός και περισσοτέρων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με ή χωρίς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β κυρίως. Τα δίκτυα αυτά μελετήθηκαν ένα ένα για τον τρόπο λειτουργίας τους στην παρουσία Φ/Β και ΣΑΤΥΦ. Παρακάτω παραθέτω κάποια πιθανά σενάρια ηλεκτρικών δικτύων, τα προβλήματα που αντιμετώπισα για την σωστή και ομαλή λειτουργία τους υπό την παρουσία Διεσπαρμένης Παραγωγής και τέλος τις λύσεις που θα βοηθήσουν να ξεπεραστούν τα προβλήματα πτώσης και ανύψωσης τάσης. Αξίζει εδώ να τονιστεί ότι όλες οι τιμές αντιστάσεων και αντιδράσεων γραμμής καθώς και τα φορτία της ΜΤ αναφέρονται σε πραγματικές τιμές που θα συναντήσουμε σε δίκτυα ΜΤ και οι τιμές αυτές μπορούν να υποστηριχτούν από το δίκτυο και οι τιμές αυτές μπορούν να αντέξουν τα ρεύματα τα οποία τις διαρρέουν χωρίς να προκληθεί πρόβλημα υπερθέρμανσης τους [29].

#### 4.2 Δίκτυο με μία γραμμή διανομής και συγκεντρωμένο φορτίο

Είναι η πιο απλή περίπτωση και εκείνη με τα λιγότερα προβλήματα αλλά ακόμα και αυτή πρέπει να εξεταστεί. Το απλό δίκτυο μέσης τάσης που ελέγχουμε λειτουργεί στα 50Hz και έχει πηγή ονομαστικής τάσης 150kV, ισχύ βραχυκύκλωσης 5000MVA (πολύ ισχυρό δίκτυο), γραμμή μεταφοράς 2km ACSR 3x95 με αντίσταση  $R = 0,215\Omega/\text{km}$  και αντίδραση  $X = 0,334\Omega/\text{km}$ , φορτίο σταθερής ισχύος 1MW με συντελεστή ισχύος φορτίου  $\cos\phi = 0,95$  επαγωγικό. Ο μετασχηματιστής του δικτύου έχει ονομαστική ισχύ 25 MVA, τάση πρωτεύοντος 150kV και δευτερεύοντος 20kV και φέρει μηχανισμό αλλαγής λήψεων. Πιο συγκεκριμένα, το ΣΑΤΥΦ έχει 17 λήψεις με βήμα 0,01875 ανά μονάδα. Παρακάτω δίνεται το σχήμα του ανωτέρου αναφερθέντος δικτύου όπως σχεδιάστηκε στο Simulink του Matlab (Εικόνα 4.1).

Το δίκτυο αυτό που αναφέρθηκε, στο Matlab αναπαραστάθηκε σε ανά μονάδα σύστημα όπου η αντίσταση βάσης θα είναι:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{(20 \cdot 10^3)^2 \text{ V}}{25 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 16\Omega \quad (4-1)$$

Η ισχύς βραχυκύκλωσης στην πλευρά της ΥΤ θα είναι 5000MVA που αναπαρίσταται από σύνθετη

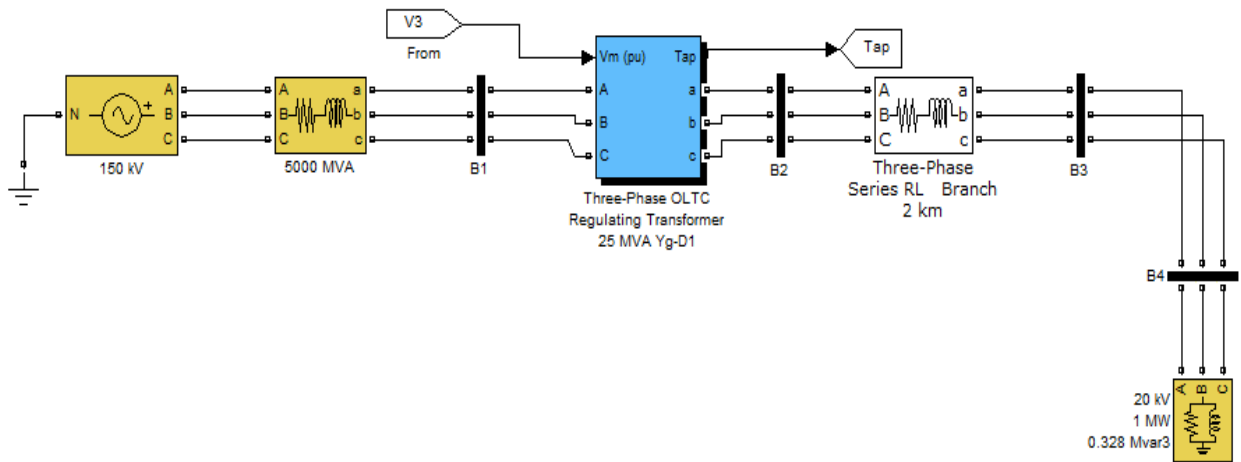
$$R_{sc} = \frac{V_B^2}{S_{sc}} = \frac{(150 \cdot 10^3)^2 \text{ V}}{5000 \cdot 10^6 \text{ VA}} / 10 = 0,45\Omega \quad (4-2)$$

αντίσταση σε σειρά με τιμές:

$$X_{sc} = \frac{V_B^2}{S_{sc}} = \frac{(150 \cdot 10^3)^2 \text{ V}}{5000 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 4,5 \Omega$$

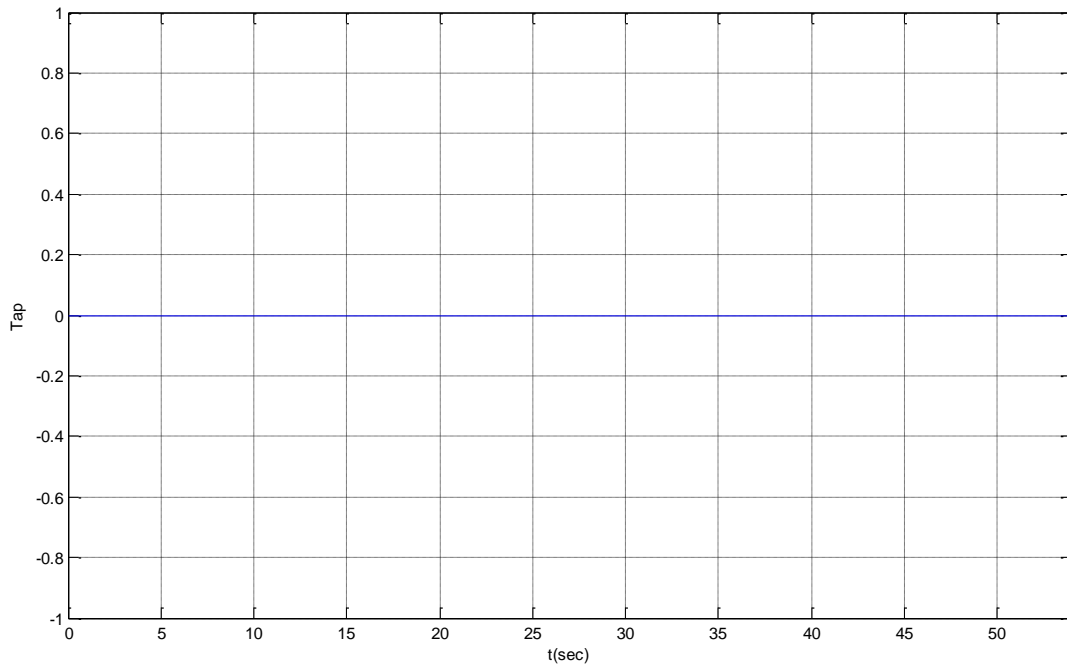
και (4-3)

ώστε ο λόγος X/R στην ΥΤ να είναι αρκετά μεγάλος (ίσος με 10) αφού γνωρίζουμε πως στην ΥΤ η αντίδραση υπερσχύει της αντίστασης ώστε να έχουμε καλύτερη ροή ισχύος με λιγότερες απώλειες ισχύος.

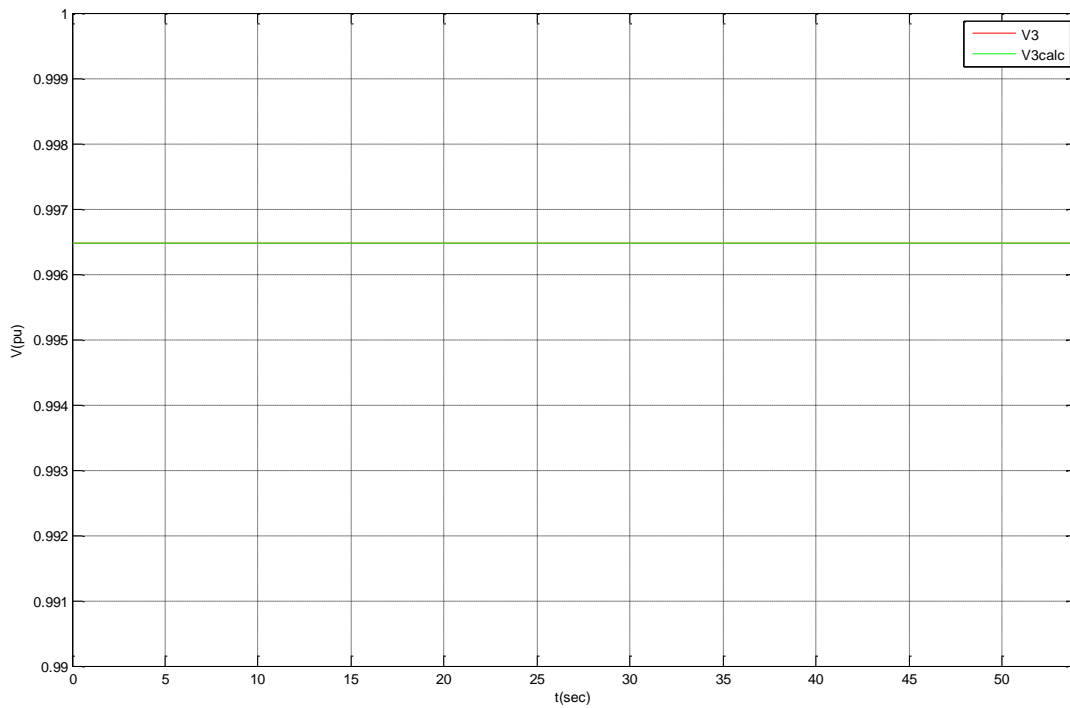


Εικόνα 4.1: Δίκτυο με μία γραμμή διανομής 2km ACSR 3x95 και συγκεντρωμένο φορτίο 1MW

Όλος ο μηχανισμός του μετασχηματιστή αλλά και του συστήματος αλλαγής λήψης σχεδιάστηκε στο Simulink του Matlab από την αρχή με τη βοήθεια των ήδη υπάρχοντων έτοιμων blocks για την επιπλέον κατανόηση της λειτουργίας τους. Όλο το simulation διαρκεί 54 sec. Η συνολική καθυστέρηση για αλλαγή λήψης είναι 5,060sec όπου 4sec είναι η μηχανική καθυστέρηση και 1sec είναι η καθυστέρηση ώστε να μην γίνονται ανούσιες και αχρείαστες αλλαγές λήψης σε πολύ απότομες αλλαγές τάσης. Τέλος, 60msec είναι η καθυστέρηση λόγω της μεταφοράς του ρεύματος κατά τη διάρκεια της αλλαγής λήψης από μία αντίσταση 5Ω ώστε να είναι συνεχής η ροή ρεύματος στο δίκτυο. Ως τάση αναφοράς στο ΣΑΤΥΦ βάζουμε 1,0 ανά μονάδα. Η αλλαγή λήψης θα συμβεί εφόσον η τάση στο άκρο του feeder ξεπεράσει το 1,03 ανά μονάδα η εάν πέσει κάτω από 0,97 ανά μονάδα. Παρατηρούμε ότι στην παραπάνω περίπτωση η τάση στο άκρο του feeder έχει μετρούμενη τιμή  $V_4 = 0,9965$ αμ και συνεπώς δεν χρειάζεται το ΣΑΤΥΦ να κάνει κάποια αλλαγή λήψης. Αξίζει εδώ να τονίσουμε ότι η απλή μέθοδος LDC δίνει ως αποτέλεσμα τάσης στο άκρο της γραμμής  $V_{4calc} = 0,9957$  η οποία έχει μηδενική απόκλιση κάτι το οποίο είναι πέραν από επιθυμητό. Στην συγκεκριμένη λοιπόν περίπτωση μπορούμε να πούμε ότι και η απλή μέθοδος LDC δουλεύει οπότε την κρατάμε και συνεχίζουμε σε άλλες προσομοιώσεις. Παρακάτω παραθέτω το διάγραμμα της μετρούμενης και υπολογισμένης τάσης στο άκρο της γραμμής στην οποία δεν υπήρχε αλλαγή λήψης.



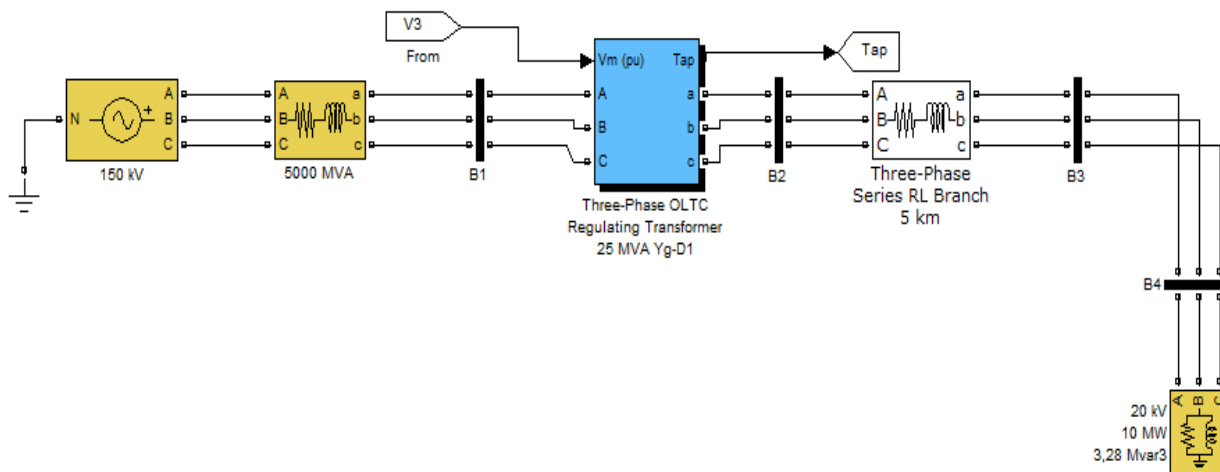
Διάγραμμα 1 Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 2km και συγκεντρωμένο φορτίο 1MW



Διάγραμμα 2: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 2km και συγκεντρωμένο φορτίο 1MW.

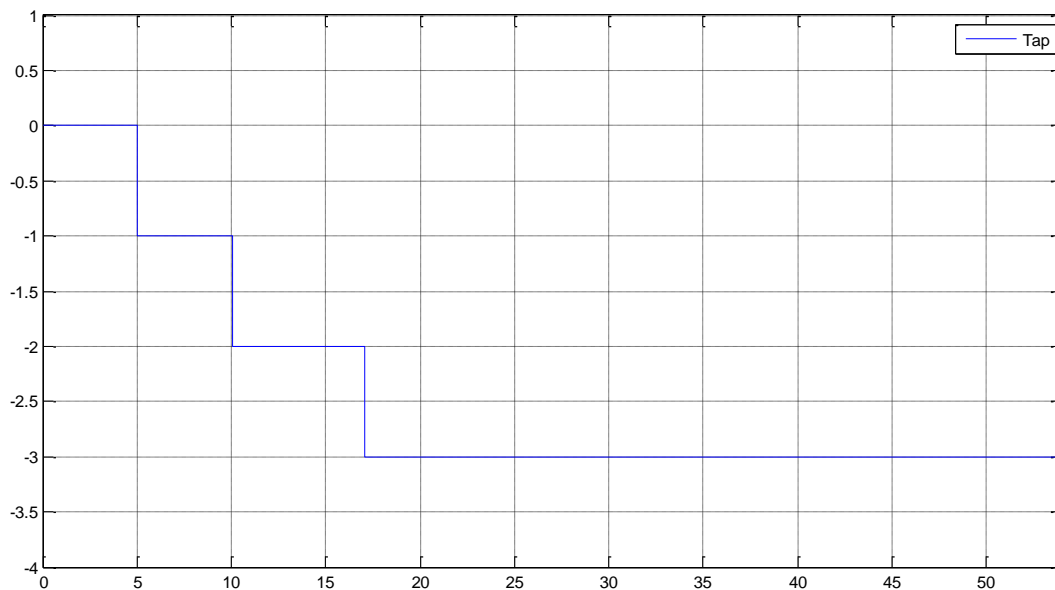


Για να παρατηρήσουμε κάποια αλλαγή λήψης αυξάνουμε και την τιμή των χιλιομέτρων της γραμμής μεταφοράς και την τιμή της ισχύος κατανάλωσης. Τα καινούρια μας δεδομένα είναι 5km γραμμή μεταφοράς ACSR 3x95 με  $R = 0.215\Omega/\text{km}$ ,  $X = 0.334\Omega/\text{km}$  και 10MW ισχύ κατανάλωσης με ίδιο συντελεστή ισχύος φορτίου.

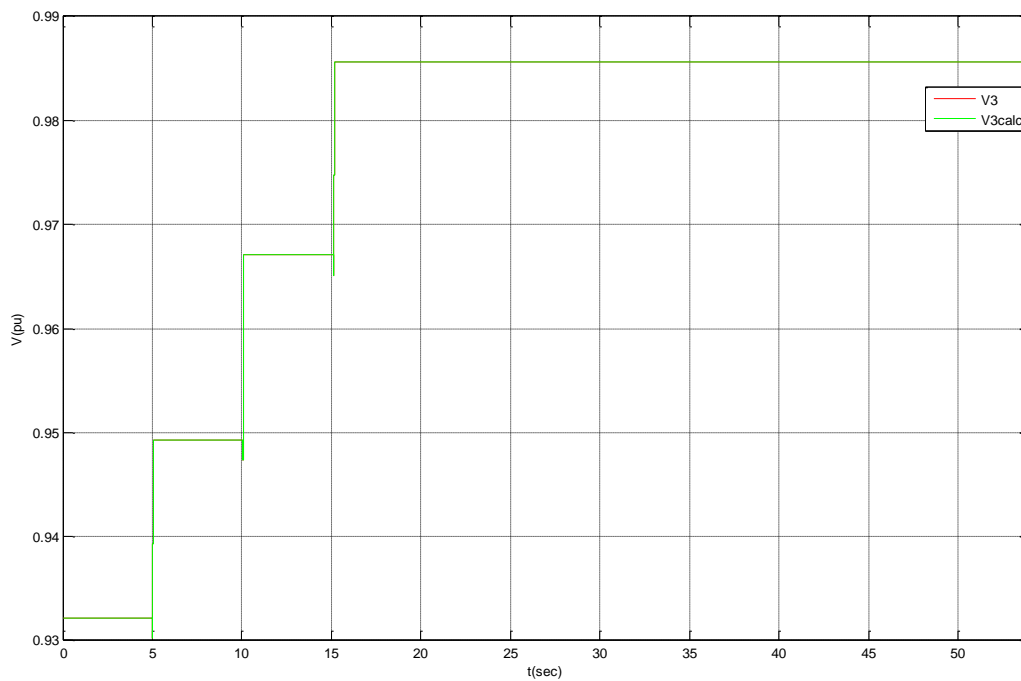


Εικόνα 4.2: Δίκτυο με μία γραμμή διανομής 5km ACSRx95 και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW

Με τα δεδομένα αυτά τρέχουμε πάλι την προσομοίωσή μας και βρίσκουμε τα παρακάτω αποτελέσματα στα οποία βλέπουμε ότι η πραγματική τάση έχει τιμή  $V_4 = 0,9856\text{αμ}$  και η υπολογισμένη τάση έχει τιμή  $V_{4\text{calc}} = 0,9858\text{αμ}$  κάτι το οποίο έχει απόκλιση 0,02%. Παρατηρούμε 3 αλλαγές λήψης για να φτάσει η τάση στο άκρο της γραμμής μέσα στο επιτρεπόμενο εύρος.



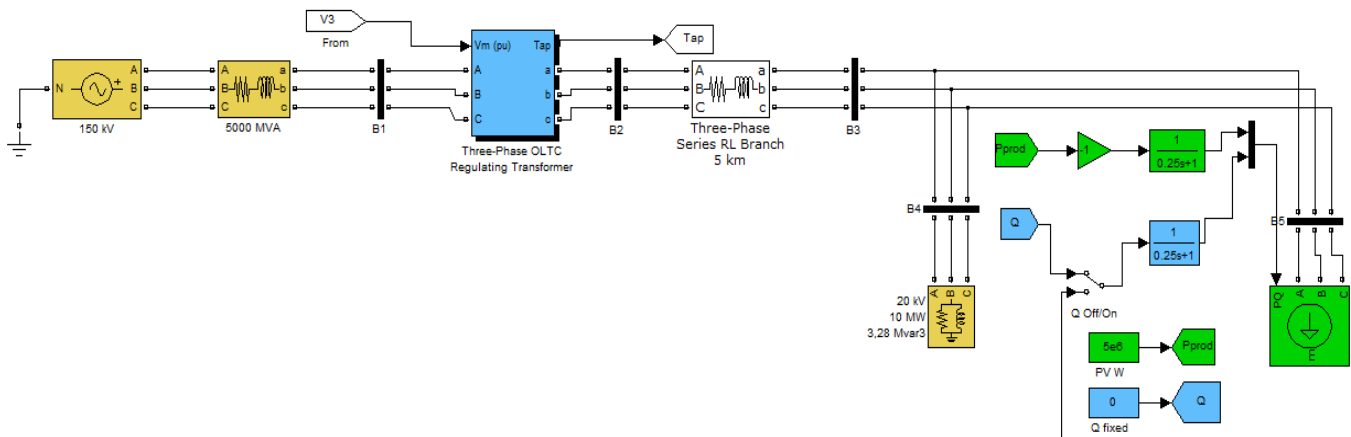
Διάγραμμα 3: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW



Διάγραμμα 4: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW.

Έπειτα βάζουμε στο άκρο του feeder φωτοβολταϊκή παραγωγή. Να τονίσουμε εδώ ότι η εισαγωγή των φωτοβολταϊκών έγινε στο Simulink του Matlab ως δυναμικό φορτίο αντιστρόφου ισχύος μέσω τιμών ενεργού ισχύος οι οποίες πρώτα περνούσαν από ένα φίλτρο της μορφής:  $\frac{1}{0.25s+1}$  για πιο ομαλή διείδυση της ενεργού ισχύος στο δίκτυο και καλύτερες διακυμάνσεις τάσεως στο ΣΚΣ. Όσο πιο μεγάλος είναι ο συντελεστής του  $s$  στον παρονομαστή τόσο πιο ομαλή αυτή η διείδυση οπότε βρέθηκε ότι ο συντελεστής αυτός που δόθηκε (0,25) δίνει καλές διακυμάνσεις ισχύος άρα και τάσης και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις με παρουσία φωτοβολταϊκής παραγωγής.

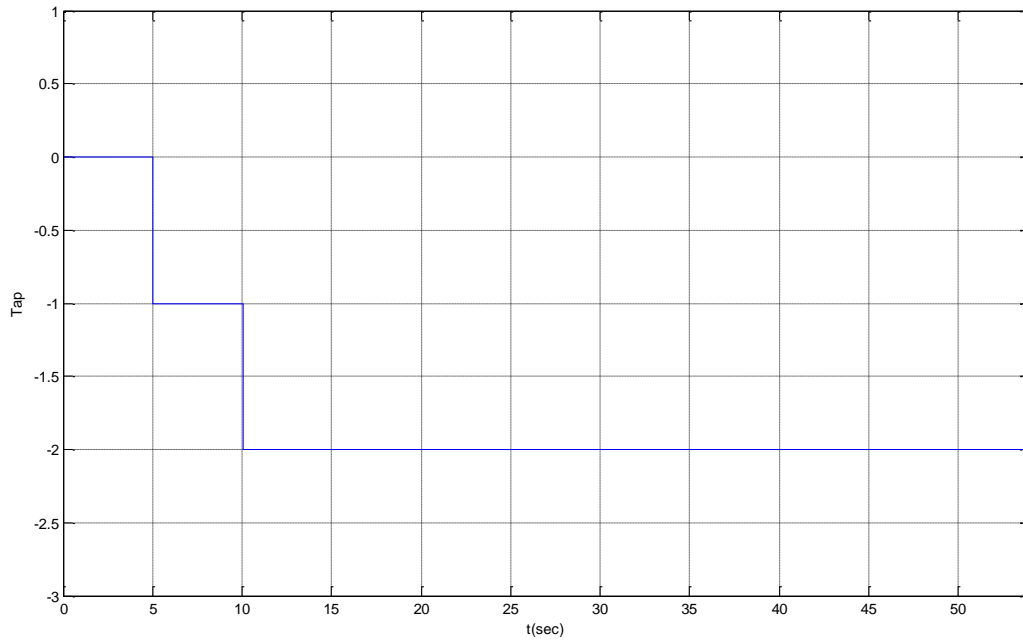
Όσο πιο μικρή η παραγωγή των Φ/Β τόσο πιο ελάχιστη η διαφορά τάσης σε σχέση με την παραπάνω απλή περίπτωση. Όμως, αυξάνοντας την παραγωγή σε μέγεθος ίσο ή μεγαλύτερο από την κατανάλωση του φορτίου παρατηρείται μία αύξηση της τάσης στο άκρο του feeder η οποία οδηγεί σε ανύψωση τάσης όσο μεγαλώνει η παραγωγή. Ξεκινάμε βάζοντας στο παραπάνω δίκτυο των 5km 10MW παραγωγή και 5MW φωτοβολταϊκών.



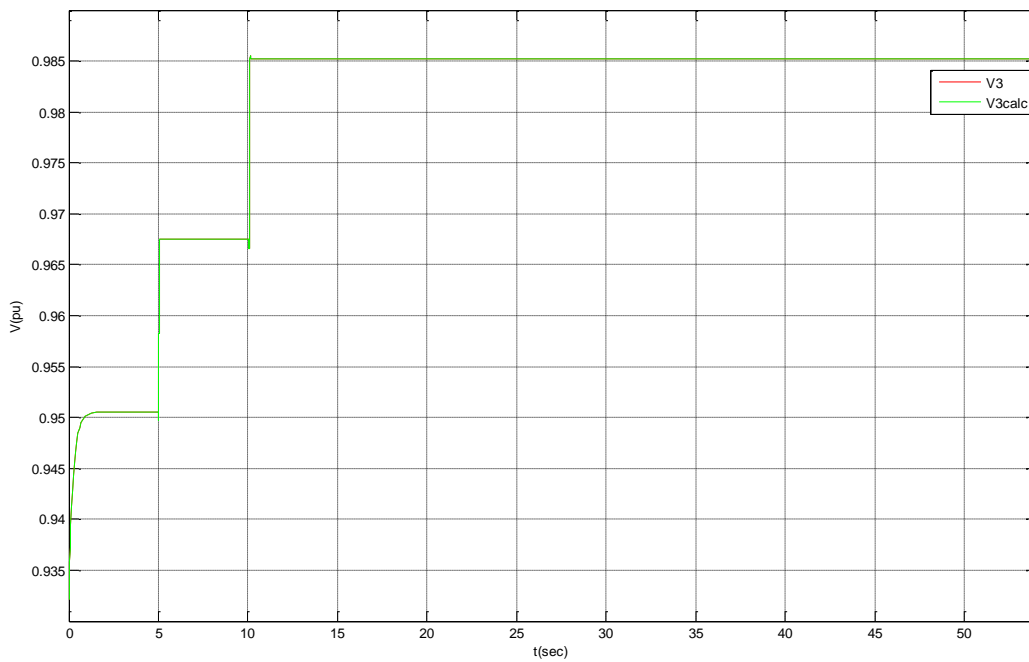
Εικόνα 4.3: Δίκτυο με μία γραμμή διανομής 5km ACSR 3x95, συγκεντρωμένο φορτίο 10MW και Φ/Β παραγωγή 5MW

Παρατηρούμε ότι χρειάζονται δύο αλλαγές λήψης ώστε η τάση στο άκρο της γραμμής να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο ανάμεσα στο εύρος που του δώσαμε. Εδώ η πραγματική τάση έχει τιμή  $V_4 = 0,9852\alpha\mu$  και η μετρούμενη από τη μέθοδο LDC έχει τιμή  $V_{4calc} = 0,9852\alpha\mu$ . Η απόκλιση εδώ είναι της τάξης του 0% κάτι το οποίο είναι δικαιολογημένο και αποδεκτό συνεπώς και στην περίπτωση αυτή είναι ορθό να κρατήσουμε την απλή μέθοδο LDC.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα και οι γραφικές παραστάσεις του παραπάνω δικτύου.

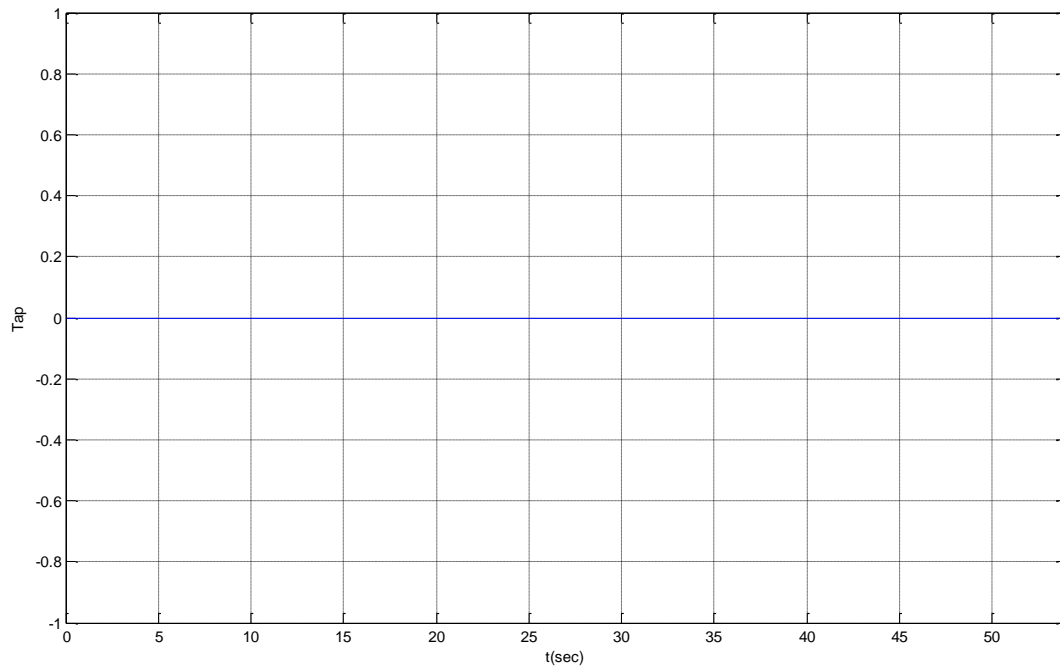


Διάγραμμα 5: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW παρουσία Φ/Β παραγωγής 5MW

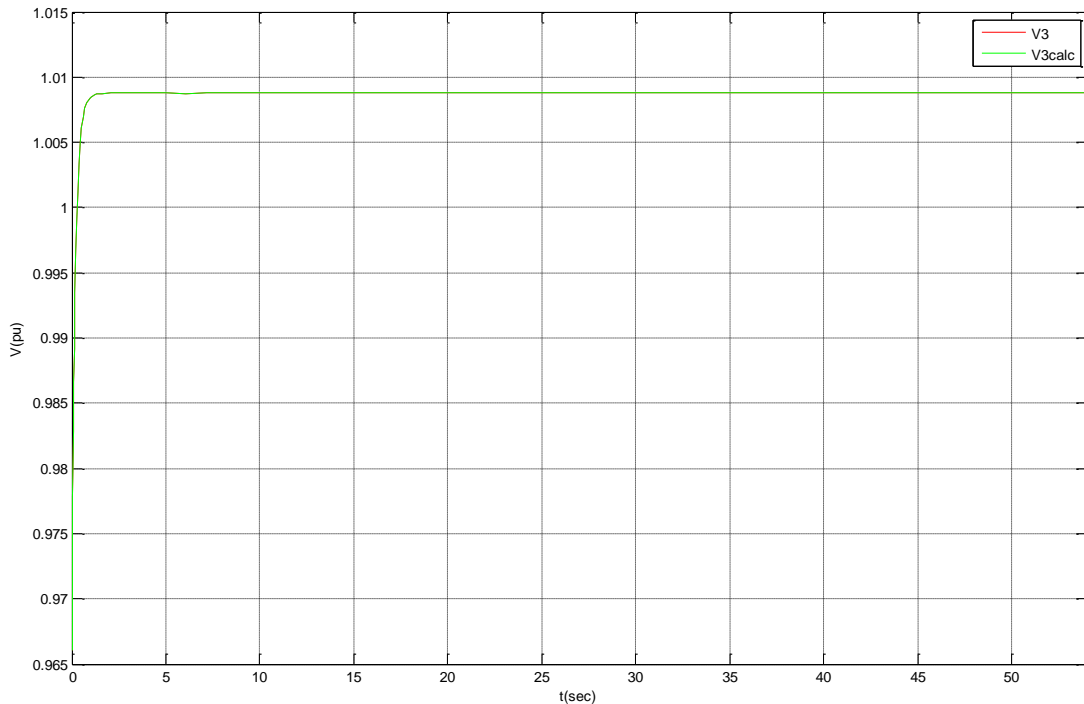


Διάγραμμα 6: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW παρουσία Φ/Β παραγωγής 5MW

Βάζοντας παραγωγή Φ/Β 20 MW με ίδιο φορτίο 10MW και ίδια γραμμή μεταφοράς 5km παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



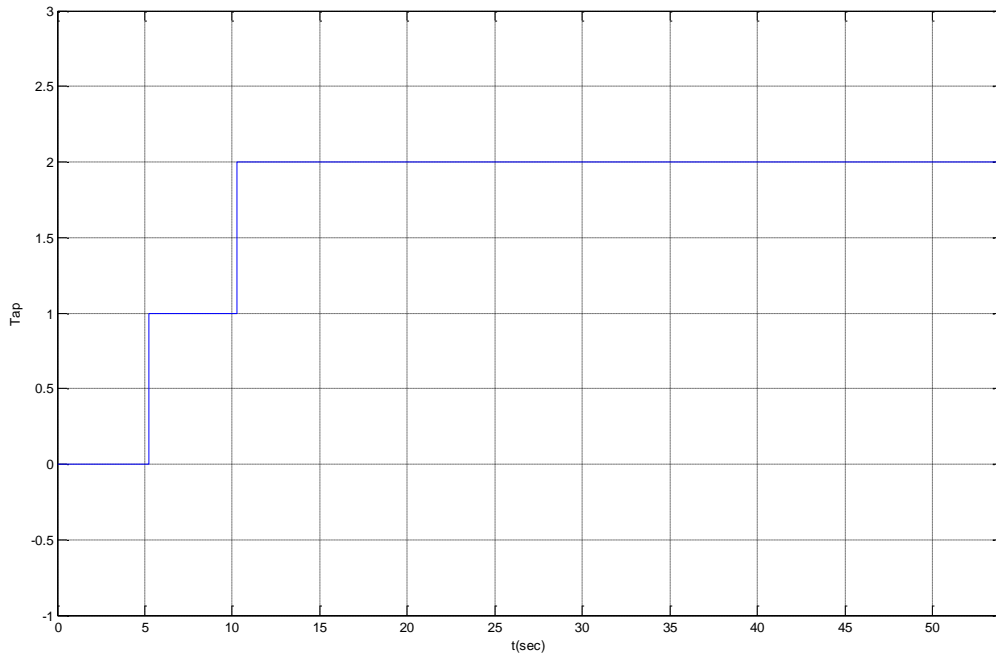
Διάγραμμα 7: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW



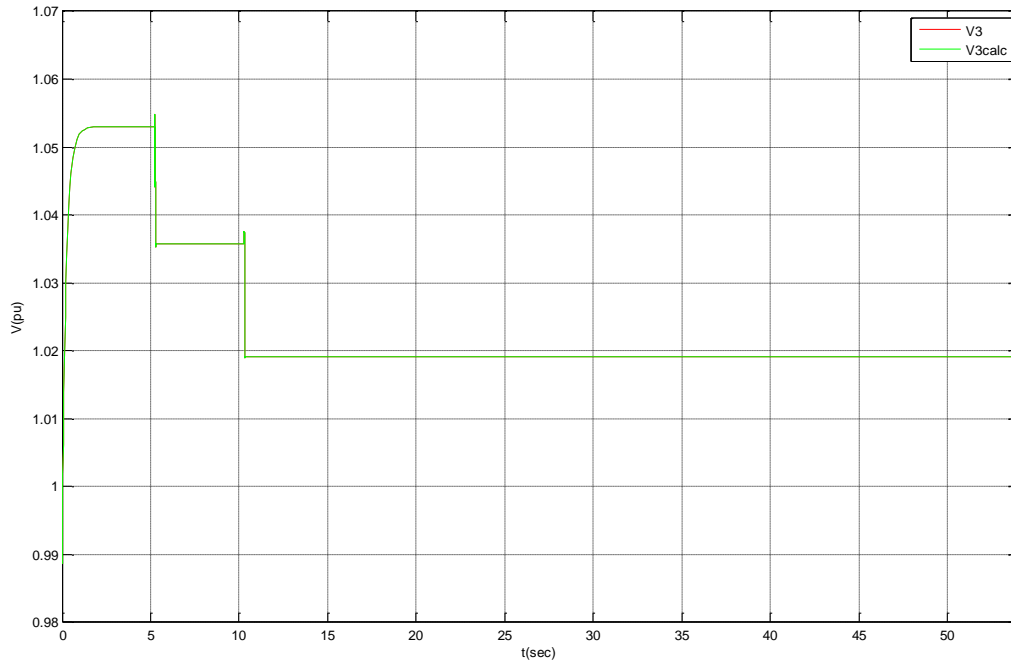
*Διάγραμμα 8: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW παρουσία Φ/Β παραγωγής 5MW*

Παρατηρούμε στην παραπάνω περίπτωση ότι το ΣΑΤΥΦ δεν χρειάστηκε να κάνει κάποια αλλαγή λήψης και πως και η πραγματική και η μετρούμενη τιμή της τάσης είχαν την ίδια ακριβώς τιμή  $V_3 = V_{3calc} = 1,0088$ αμ κάτι που δίνει μηδενική απόκλιση. Ο λόγος που το ΣΑΤΥΦ δεν έκανε κάποια αλλαγή λήψης είναι διότι την πτώση τάσης που έχει το δίκτυο λόγω της σύνθετης αντίστασης, την καλύπτει η ανύψωση τάσης λόγω φωτοβολταϊκής παραγωγής. Συνεπώς, η τάση στο άκρο της γραμμής είναι κοντά στο 1αμ και δεν είναι αναγκαία κάποια αλλαγή λήψης.

Παρατηρούμε ακόμα στην τελευταία προσομοίωση οτι παρόλο που βάλουμε αρκετά μεγάλη φωτοβολταϊκή παραγωγή δεν είχαμε ανύψωση τάσης οπότε και ο ΣΑΤΥΦ δεν έκανε αλλαγή λήψης. Αυτό συμβαίνει διότι έχουμε γραμμή μεταφοράς μικρής σύνθετης αντίστασης και μεγάλη κατανάλωση ισχύος στο φορτίο οπότε εξισώνεται με αυτόν τον τρόπο η ανύψωση τάσης. Για να δούμε καλή ανύψωση τάσης λοιπόν αρκεί να αλλάξουμε γραμμή μεταφοράς με μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση αλλά και να μειώσουμε την ισχύ στο φορτίο. Τα νέα δεδομένα του δικτύου είναι γραμμή μεταφοράς 5km ACSR 3x35 που έχει κλάσμα  $\frac{R}{X} \approx 2$  με  $R = 0.576\Omega/\text{km}$  και  $X = 0.397\Omega/\text{km}$  και ισχύ φορτίου 1MW με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi = 0.95$  επαγωγικό. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιήθηκε είναι 10MW.



Διάγραμμα 9: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x35 5km και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW παρουσία Φ/Β παραγωγής 10MW



Διάγραμμα 10: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x35 5km και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW παρουσία Φ/Β παραγωγής 10MW

Στην παραπάνω περίπτωση παρατηρούμε ότι το ΣΑΤΥΦ χρειάστηκε να κάνει 2 αλλαγές λήψης ώστε η τάση στο άκρο της γραμμής να φτάσει τελικά στο  $V_4 = 1,0191\alpha\mu$  κάτι το οποίο το υπολόγισε με απόλυτα καλή προσέγγιση και η LDC μέθοδος η οποία είχε μηδενική απόκλιση.

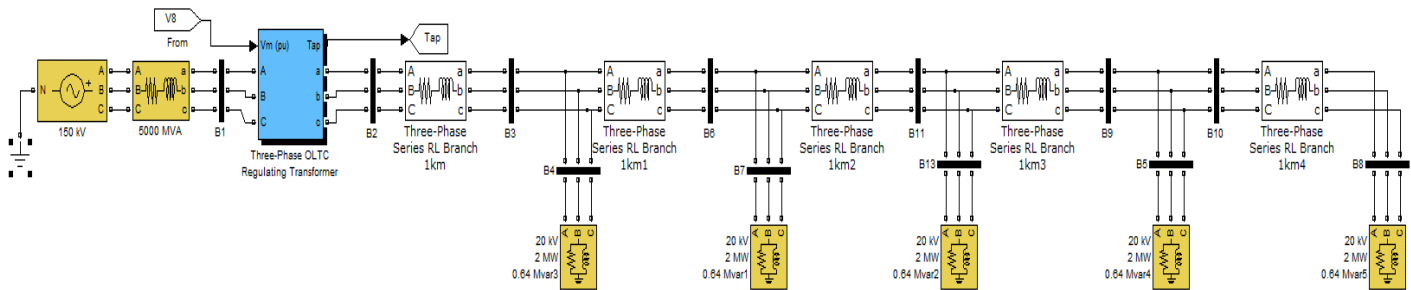
Μία παρατήρηση και για τα παραπάνω δίκτυα και για τα επόμενα δίκτυα που θα αναλύσουμε σε επόμενα κεφάλαια είναι ότι χρησιμοποιήθηκε στην πλευρά της ΥΤ μεγάλη ισχύς βραχυκύκλωσης (5000MVA) κάτι το οποίο σημαίνει πολύ ισχυρό δίκτυο. Αυτό που παρατηρήθηκε έπειτα από προσομοιώσεις με διάφορες τιμές ισχύος βραχυκύκλωσης είναι ότι όσο πιο μεγάλη η ισχύς βραχυκύκλωσης τόσο καλύτερες τιμές τάσης βλέπαμε και στο δευτερεύον του Μ/Σ και κατ' επέκταση και στο άκρο της γραμμής.

Τέλος, το συμπέρασμα του κεφαλαίου αυτού με μία γραμμή διανομής και ένα συγκεντρωμένο φορτίο με ή χωρίς την παρουσία φωτοβολταϊκής παραγωγής μπορεί να μελετηθεί μέσω της LDC μεθόδου ώστε να είναι γνωστές όλες οι τάσεις του δικτύου γνωρίζοντας μόνο την τάση και το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ καθώς και τα χαρακτηριστικά της γραμμής. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει σωστή ρύθμιση του δικτύου με έναν κεντρικό έλεγχο και όχι με συντονισμένο έλεγχο. Συνεπώς, τυχόν τηλεπικοινωνίες μεταξύ του Μ/Σ και του άκρου της γραμμής δεν είναι απαραίτητες και τα οικονομικά οφέλη της χρήσης ΣΑΤΥΦ με ενεργοποιημένη την LDC λειτουργία είναι σημαντικά.

### **4.3 Δίκτυο με μία γραμμή διανομής και διαμοιρασμένο φορτίο**

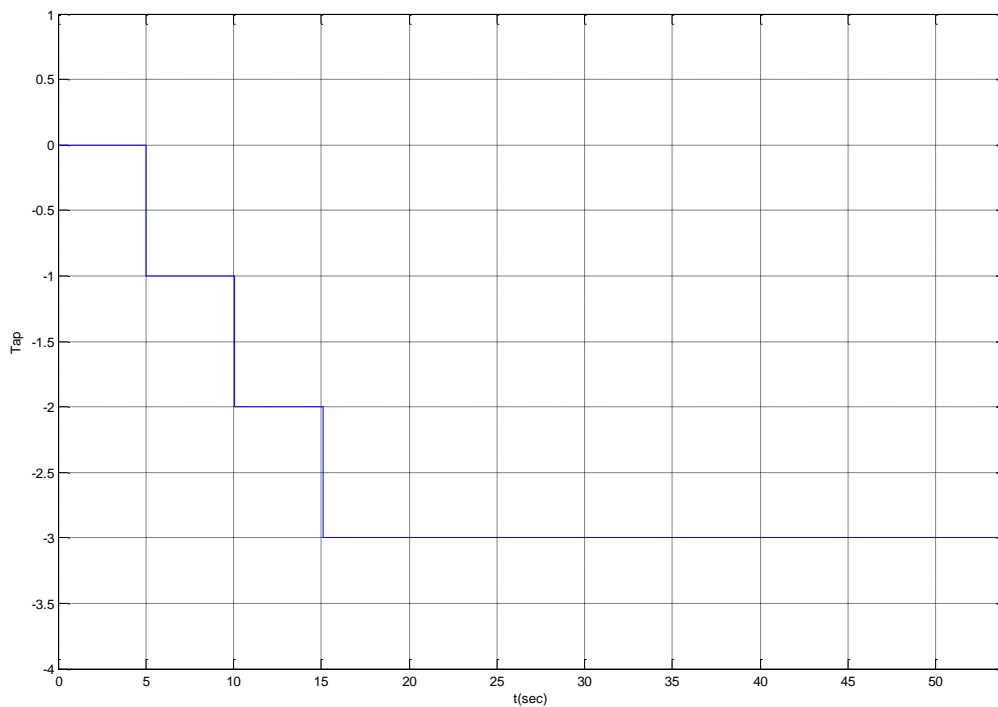
Μία ακόμα περίπτωση που εξετάσαμε εδώ είναι να μοιράσουμε το φορτίο ώστε να δούμε πως ανταποκρίνεται η LDC. Παρατηρήσαμε λοιπόν ότι η πτώση τάσης, χωρίς παραγωγή στο άκρο της γραμμής με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά και το ίδιο συνολικό φορτίο αλλά μοιρασμένο σε 5 φορτία των 2MW σε απόσταση 1 km το ένα από το άλλο, είναι μικρότερη από την πτώση τάσης με ένα ενιαίο φορτίο στο τέλος του feeder. Η εξήγηση είναι πολύ απλή. Στην πρώτη περίπτωση ενιαίου φορτίου σε όλο τον feeder κυκλοφορεί το ίδιο ακριβώς ρεύμα σε τιμή κάνοντας εύκολη τη δουλειά του LDC που δεν έχει παρά να μετρήσει το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ και να υπολογίσει την πτώση τάσης. Στη δεύτερη περίπτωση όμως το ρεύμα που κυκλοφορεί στον feeder δεν είναι το ίδιο σε όλο το μήκος της γραμμής αλλά πέφτει όσο προχωράει προς το άκρο. Αυτό συμβαίνει προφανώς διότι κάθε φορά που φτάνει σε ένα από τα φορτία, το φορτίο εκείνο τραβάει ρεύμα και έτσι το ρεύμα που συνεχίζει στον feeder είναι μειωμένο. Μέχρι να φτάσουμε λοιπόν στον τελευταίο κόμβο το ρεύμα έχει μειωθεί σε σχέση με το ρεύμα που βγαίνει από το δευτερεύον του Μ/Σ και άρα η πτώση τάσης στο άκρο θα είναι μικρότερη στη δεύτερη περίπτωση. Αυτός και μόνο είναι ένας τρόπος βελτιστοποίησης της πτώσης τάσης σε έναν απομακρυσμένο κόμβο, δηλαδή ο διαμοιρασμός του φορτίου σε ισόποσα μικρότερα φορτία (Εικόνα 4.4).



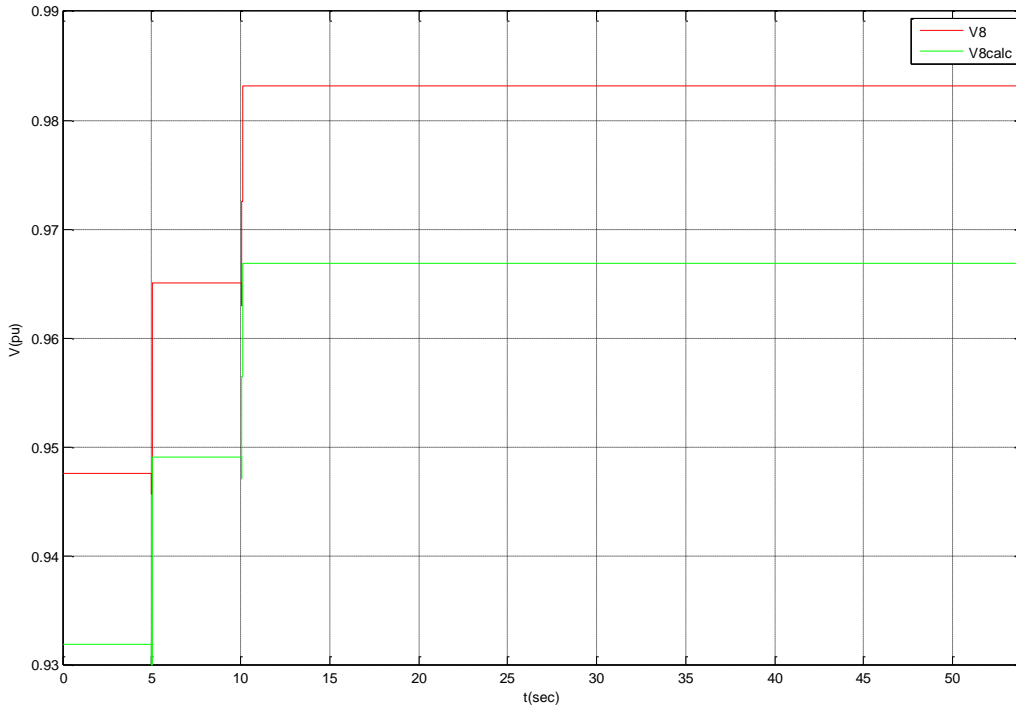


Εικόνα 4.4: Δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW)

Στην παραπάνω περίπτωση λοιπόν αν παίρναμε την απλή μέθοδο LDC ακόμα και αν βάζαμε σαν σύνθετη αντίσταση την ολική σύνθετη αντίσταση όλων των γραμμών η υπολογισμένη πτώση τάσης στο άκρο της γραμμής θα ήταν πολύ μεγαλύτερη από την πραγματική. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται και παρακάτω.



Διάγραμμα 11: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με απλή χρήση της μεθόδου LDC

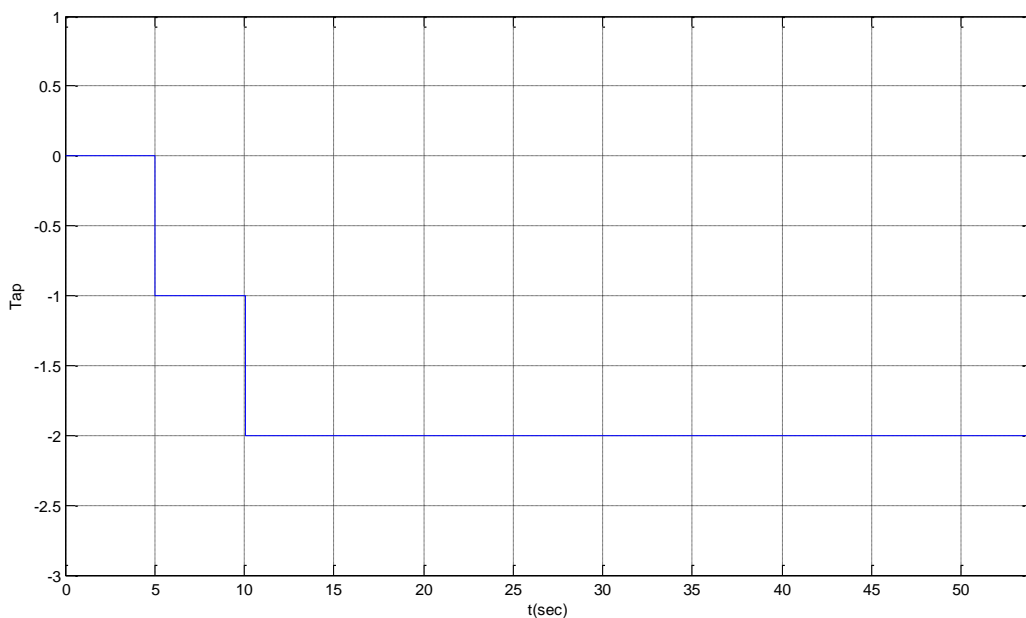


Διάγραμμα 12: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με απλή χρήση LDC μεθόδου

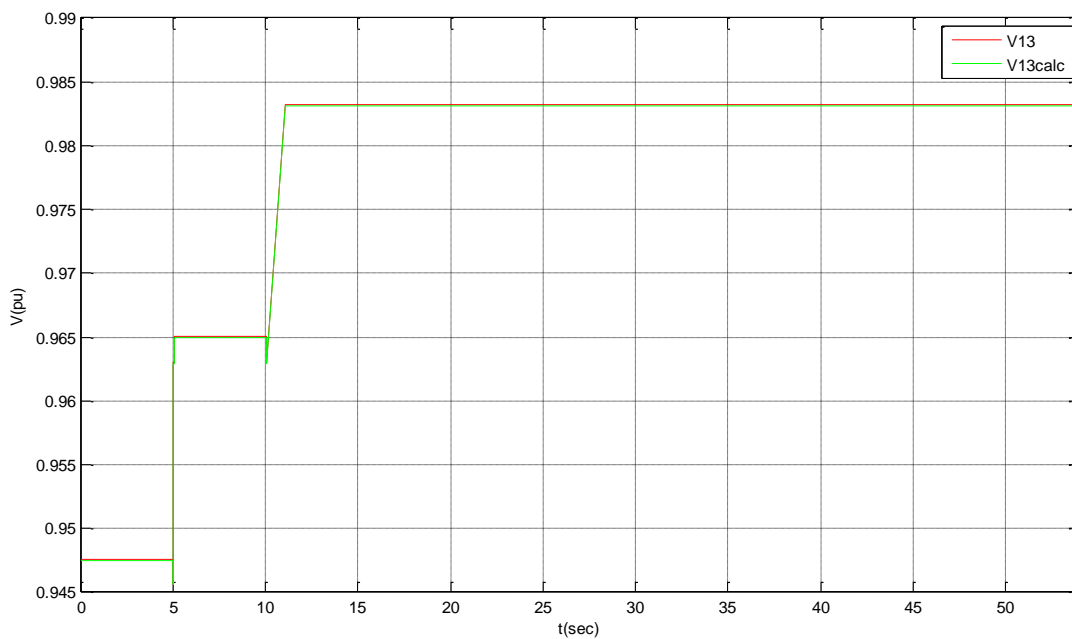
Εδώ παρατηρούμε ότι η απόκλιση της πραγματικής με την υπολογισμένη από την LDC μέθοδο έχουν τόσο μεγάλη απόκλιση (-1,66%) που βάζοντας σαν είσοδο στο ΣΑΤΥΦ την υπολογισμένη τάση στο άκρο της γραμμής το ΣΑΤΥΦ κάνει μία επιπλέον αλλαγή λήψης χωρίς να είναι απαραίτητο αφού η τάση στο άκρο είχε ήδη φτάσει σε επιτρεπτά όρια αλλά η υπολογισμένη τάση δεν τα είχε φτάσει οπότε έγινε αλλαγή λήψης. Αυτό είναι το πρόβλημα της απλής μεθόδου LDC η οποία αδυνατεί να υπολογίσει την πραγματική πτώση τάσης και υπολογίζει μία πολύ μεγαλύτερη αφού δεν λαμβάνει υπόψιν τη συνεχή πτώση του ρεύματος γραμμής λόγω των φορτίων μέχρι να φτάσει στο άκρο της γραμμής. Τα παραπάνω αποτελέσματα μας ωθούν να αλλάξουμε ριζικά τον αλγόριθμο υπολογισμού της τάσης στο άκρο της γραμμής κάτι το οποίο πραγματοποιούμε παρακάτω. Παίρνοντας τη μέθοδό μας και λαμβάνοντας υπόψιν την εξίσωση:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \frac{\tilde{z}}{2} (\tilde{I}_{oltc} + \tilde{I}_r) L \quad (3-25)$$

όπου όλα είναι γνωστά και  $I_r$  είναι το ρεύμα που απορροφά το φορτίο στο άκρο της γραμμής το οποίο αφού τα φορτία είναι ισόποσα θα είναι το 1/5 του ολικού ρεύματος. Με χρήση των γωνιών έναρξης τάσης και ρεύματος μόνο και γνωρίζοντας τις αντιστάσεις γραμμής παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



Διάγραμμα 13: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της μεθόδου μας LDC



Διάγραμμα 14: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της μεθόδου μας LDC

Αυτό που αξίζει να σχολιασθεί εδώ είναι ότι ενώ στην περίπτωση του συσσωρευμένου φορτίου η τάση ήταν  $V_4 = 0,9852\alpha\mu$  και αυτό έπειτα από **τρεις αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ**, στην παραπάνω περίπτωση διαμοιρασμού του φορτίου η τάση στο άκρο της γραμμής ήταν  $V_{11} = 0,9832\alpha\mu$  και πραγματοποιήθηκε με **δύο αλλαγές λήψεως** πράγμα το οποίο απέτρεψε το ΣΑΤΥΦ να κάνει επιπλέον αλλαγές άρα βοηθά στη μείωση του κόστους συντήρησής του. Ένα ακόμα πράγμα που αξίζει να επισημάνουμε είναι η απόλυτη ακρίβεια με την οποία υπολόγισε η LDC μέθοδος μας την τάση στο άκρο της γραμμής η οποία ήταν επίσης  $V_{calc} = 0.9832\alpha\mu$ .

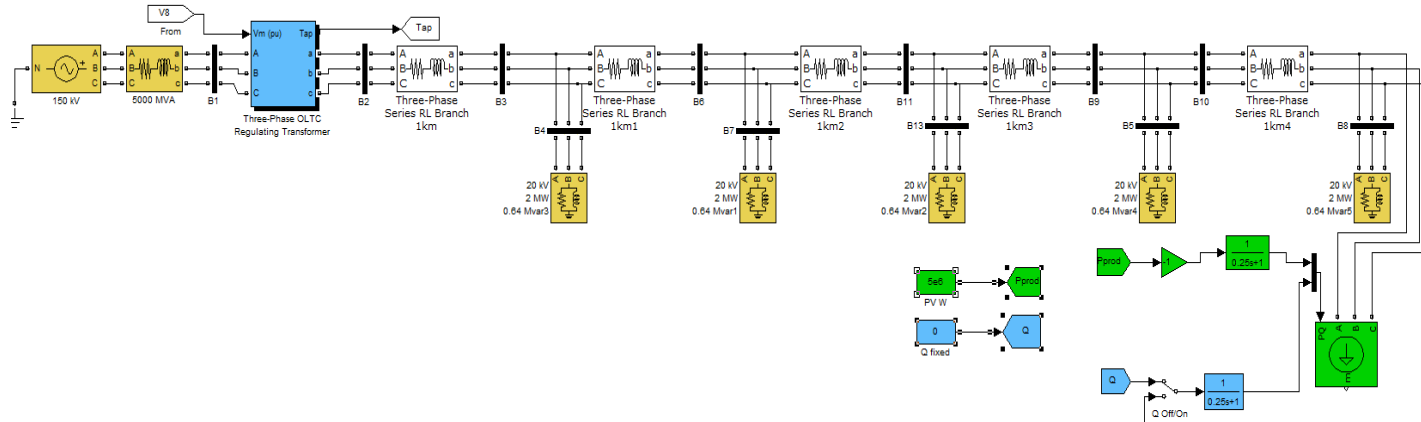
#### **4.4 Δίκτυο με μία γραμμή διανομής και διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Διεσπαρμένης Παραγωγής**

Βάζοντας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β στην τελευταία περίπτωση αρχίζουν να περιπλέκονται τα πράγματα για την LDC η οποία δεν μπορεί να βρει τη σωστή πτώση τάσης στο άκρο του feeder εφόσον δεν έχει το σωστό ρεύμα το οποίο διαρρέει τον κόμβο εκείνο. Πράγματι, ο LDC τρόπος παίρνει το ρεύμα που έχει στο δευτερεύον του Μ/Σ και έχει σαν στόχο να υπολογίσει την πτώση τάσης στο άκρο του feeder μέσω του ρεύματος αυτού και των R και X συνιστωσών της γραμμής μεταφοράς ξέροντας ότι μόνο πτώση τάσης μπορεί να έχει αυτή η γραμμή. Η παραγωγή όμως ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β στέλνει πίσω στο δίκτυο περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας ορισμένες ώρες της ημέρας με αποτέλεσμα να υπάρχει αντιστροφή πραγματικής ισχύος στο δίκτυο κάτι το οποίο προκαλεί ανύψωση τάσης στο ΣΚΣ( Σημείο Κοινής Σύνδεσης) κατά κύριο λόγο αλλά και σε άλλα σημεία του δικτύου. Μετρώντας στο ΣΚΣ την τάση και στέλνοντας τις τιμές των τάσεων στο ΣΑΤΥΦ εκείνο θα μπορούσε σίγουρα να βοηθήσει να ρυθμιστεί αυτή η τάση και να επανέλθει σε αποδεκτά όρια. Αυτή όμως η λύση αν και πολύ απλή είναι ασύμφορη κυρίως από οικονομικής άποψης καθώς απαιτεί τηλεπικοινωνίες μεταξύ των πιο απομακρυσμένων ζυγών ενός feeder με τον regulator του Μ/Σ. Αυτό σημαίνει εγκατάσταση καλωδίων κάποιων χιλιομέτρων αν υποθέσουμε ότι βρισκόμαστε στη ΜΤ και δεκάδων μέτρων αν βρισκόμαστε στη ΧΤ. Κάτι τέτοιο είναι πρακτικώς αδύνατο να συμβεί στο άμεσο μέλλον στην Ελλάδα καθώς είναι μία πολύ ακριβή επένδυση και αρκετά χρονοβόρα στην οποία πρέπει να διατεθούν πολλοί οικονομικοί και εργατικοί πόροι χωρίς να είναι αναγκαίο και απαραίτητο καθώς υπάρχουν λύσεις πιο οικονομικές και εφικτές κάποιες από τις οποίες θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία.

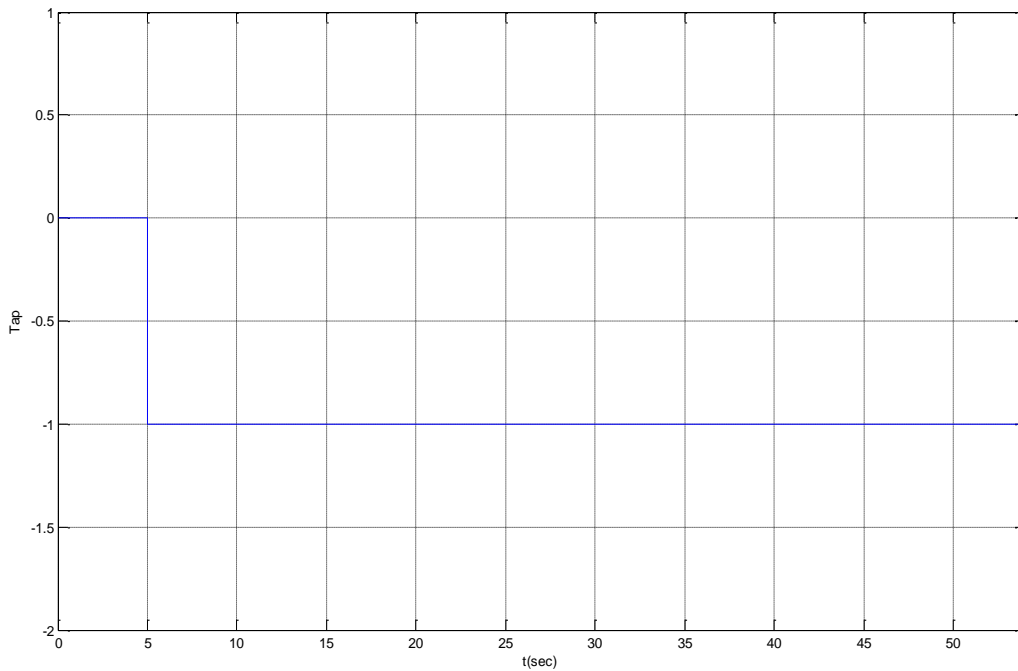
Πηγαίνοντας πίσω λοιπόν στο παραπάνω παράδειγμα χωρίς τη χρήση επικοινωνιών αλλά μόνο με LDC είναι αδύνατο να διαβάσει από την πλευρά του δευτερεύοντος του Μ/Σ την πτώση τάσης στο άκρο του feeder και ο λόγος είναι ότι δεν <<βλέπει>> το σωστό ρεύμα το οποίο διαρρέει το άκρο αλλά ένα ρεύμα αρκετά μικρότερο και με λανθασμένη φορά και συνεπώς δεν μπορεί να κάνει σωστό υπολογισμό τάσης. Για του λόγου το αληθές δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις οποίες από την μικρότερη τιμή πηγαίνοντας στη μεγαλύτερη το LDC έχανε όλο και περισσότερο το σωστό υπολογισμό τάσης έως ότου όταν η παραγωγή ξεπερνούσε την κατανάλωση και συνεπώς είχαμε αντιστροφή ενεργού ισχύος δεν πλησίαζε η υπολογισμένη τιμή καν την πραγματική.

Δουλεύοντας στο παραπάνω δίκτυο το οποίο έχουμε διαμοιρασμό φορτίου σε 5 φορτία των 2MW με συντελεστή ισχύος 0,95 επαγωγικό και γραμμή μεταφοράς 1km από το

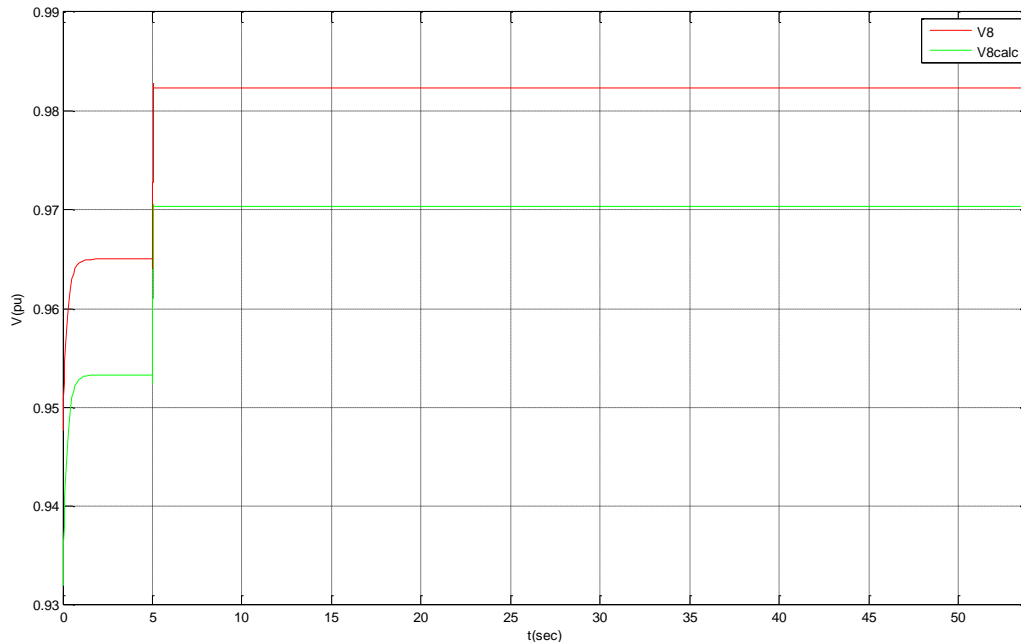
ένα φορτίο στο επόμενο και με παραγωγή 5MW φωτοβολταϊκών αλλά χωρίς τη χρήση της μεθόδου μας για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης στον απομακρυσμένο κόμβο παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW παρουσία Φ/Β παραγωγής 5MW



Διάγραμμα 15: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της απλής μεθόδου LDC παρουσία Φ/Β παραγωγής 5MW



Διάγραμμα 16: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της απλής μεθόδου LDC παρουσία Φ/Β παραγωγής 5MW

Εδώ παρατηρούμε ότι δεν έγιναν ανούσιες και επιπλέον αλλαγές λήψης αλλά παρόλα αυτά υπάρχει αρκετή απόκλιση της μετρούμενης τάσης από την υπολογισμένη τάση της τάξης του -1,22% με τη μετρούμενη πραγματική τάση να είναι  $V_8 = 0,9823$ αμ και την υπολογισμένη από την LDC μέθοδο να είναι  $V_{calc} = 0.9703$ αμ. Σε άλλες τιμές σύνθετων αντιστάσεων γραμμής και άλλες τιμές φορτίων αυτό θα δημιουργούσε πρόβλημα στον υπολογισμό των αλλαγών λήψεων, που έπρεπε να γίνουν για να διορθωθεί το πρόβλημα πτώσης ή ανύψωσης τάσης, οπότε γίνεται επιτακτική η ανάγκη για εύρεση άλλου αλγορίθμου υπολογισμού της τάσης.

Για να διορθωθεί το παραπάνω πρόβλημα χωρίς τη χρήση των τιμών των τάσεων στο άκρο του feeder έπρεπε με κάποιο τρόπο να περάσουμε στον regulator μας την τιμή της τάσης που θα μπορούσε να έχει ο τελευταίος κόμβος στο άκρο του feeder με συγκεκριμένες τιμές φορτίου και παραγωγής. Έπειτα από πολλές προσομοιώσεις και υπολογισμούς σε τέτοιου είδους περιπτώσεις διαμοιρασμού φορτίου με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο άκρο της γραμμής ο αλγόριθμος της μεθόδου LDC παίρνει ανάλογα με το μέγεθος της παραγωγής τις παρακάτω μορφές:

- Σε περίπτωση όπου η παραγωγή είναι μικρότερη από την κατανάλωση στο σημείο κοινής σύνδεσης τότε:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \frac{\tilde{z}}{2} (\tilde{I}_{oltc} + \tilde{I}_r) L$$

όπως είδαμε παραπάνω, όπου  $I_r$  είναι το ρεύμα που τραβάει το φορτίο στο άκρο της γραμμής το οποίο υπολογίζεται σαν ποσοστό του ολικού ρεύματος  $I_{roltc}$ . Το ποσοστό αυτό θα είναι το κλάσμα της κατανάλωσης του μείον την παραγωγή στο άκρο με τη διαφορά της συνολικής κατανάλωσης-παραγωγής.

- Σε περίπτωση όπου η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση του φορτίου στο άκρο της γραμμής αλλά μικρότερη από την ολική κατανάλωση όλων των φορτίων τότε ο αλγόριθμός μας γίνεται:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \frac{\tilde{z}}{2} (\tilde{I}_{oltc} + \tilde{I}_r) L'$$

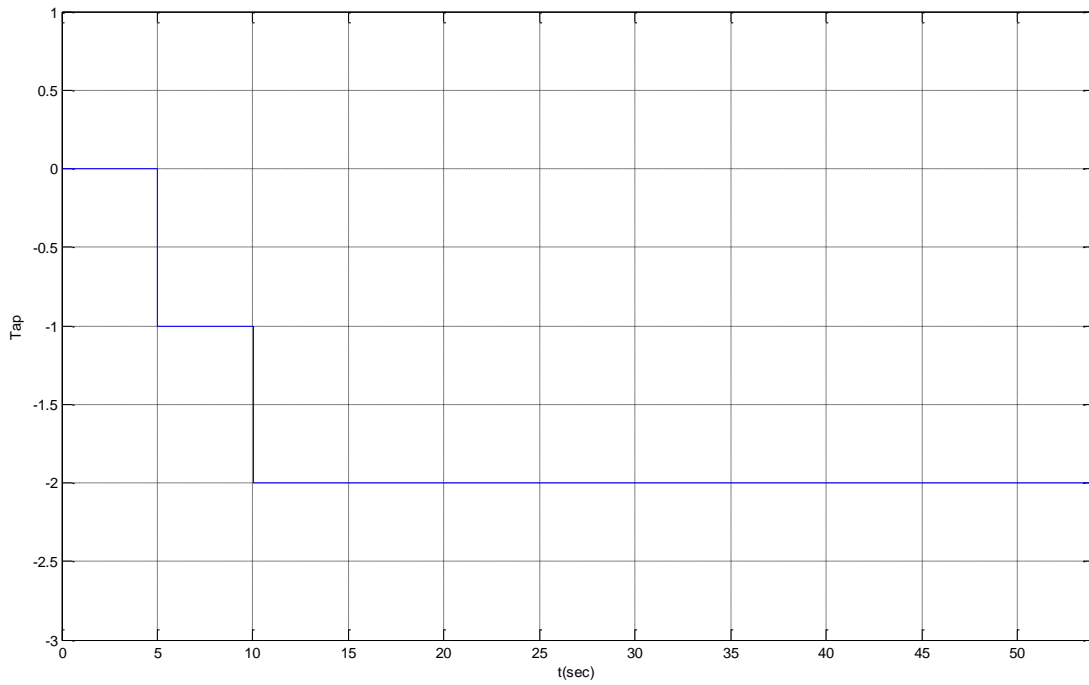
Εδώ αλλάζουν πολλά δεδομένα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι όσο η φωτοβολταϊκή παραγωγή καλύπτει τις ανάγκες της κατανάλωσης κάποιων φορτίων τότε εκείνοι οι ζυγοί έχουν προσεγγιστικά ίδια τάση με την τάση του προηγούμενου ζυγού. Οπότε αρκεί να βρούμε την τάση σε εκείνον το ζυγό ώστε να βρούμε την τάση στο άκρο της γραμμής. Συνεπώς, αφαιρούμε τους ζυγούς τους οποίους τους καλύπτει η φωτοβολταϊκή παραγωγή και στους απομείναντες ζυγούς συνεχίζουμε όπως στην παραπάνω περίπτωση. Άρα  $L'$  είναι η απόσταση μέχρι την οποία δεν καλύπτονται τα φορτία από την παραγωγή φωτοβολταϊκών. Πρακτικά αυτό συμβαίνει γιατί η παραγωγή που έχουμε από τα φωτοβολταϊκά ουσιαστικά καλύπτει τις ανάγκες κάποιων φορτίων κατανάλωσης και οι υπόλοιπες καταναλώσεις καλύπτονται από το δίκτυο.

- Σε περίπτωση όπου η παραγωγή ξεπεράσει σε τιμή την ολική κατανάλωση τότε έχουμε αντιστροφή ισχύος στο δίκτυο και συνεπώς και αντιστροφή ρεύματος στο δίκτυο το οποίο διαπερνά όλες τις σύνθετες αντιστάσεις του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμός μας γίνεται:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \tilde{z} \tilde{I}_{oltc} L'' \quad (3-26)$$

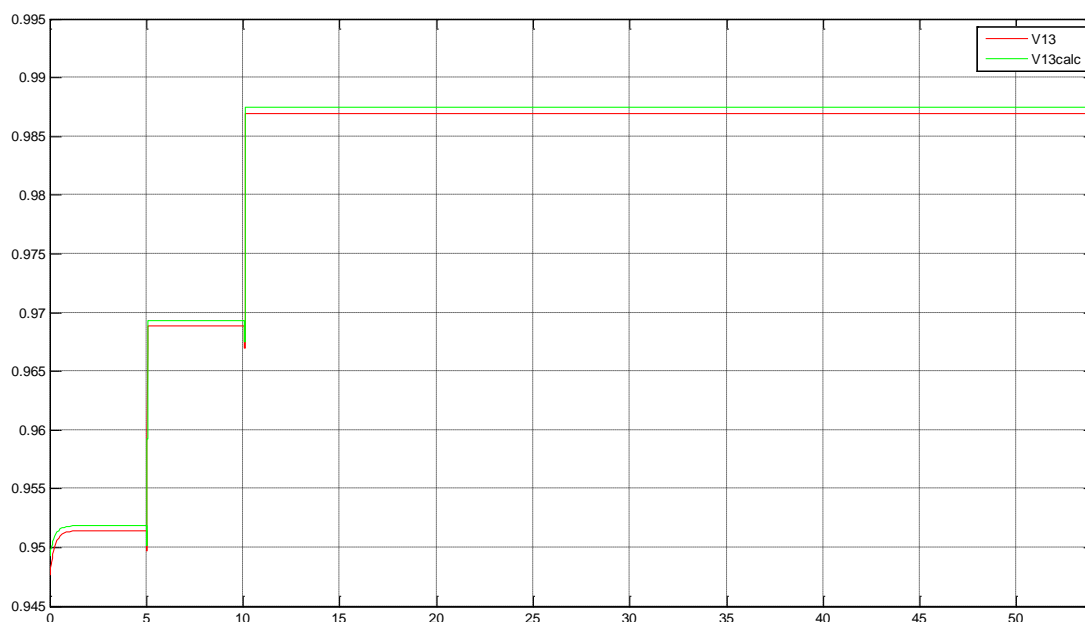
όπως και στην απλή περίπτωση που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο με τη μόνη διαφορά ότι υπολογίζουμε την πτώση τάσης σε κάθε σημείο της γραμμής διανομής μέχρι να φτάσουμε στο άκρη της γραμμής όπου  $L''$  το μήκος της γραμμής διανομής στο επιμέρους σημείο του δικτύου.

Για να δούμε τις παραπάνω περιπτώσεις αναλυτικά προσομοιώνουμε το δίκτυο μας στις περιπτώσεις αυτές και παίρνουμε τα αποτελέσματα τα οποία αναλύουμε ώστε να δούμε αν όντως λειτούργησε η μέθοδός μας. Ξεκινάμε με την πρώτη περίπτωση και βάζουμε πάλι 10MW διαμοιρασμένο φορτίο σε 5 φορτία των 2MW με συντελεστή 0,95 επαγωγικό και παραγωγή φωτοβολταϊκών 1MW. Τότε η διαφορά της συνολικής κατανάλωσης από την παραγωγή είναι 9MW και το φορτίο μας στο πέρας της γραμμής καταναλώνει 2MW άρα το  $I_r$  θα είναι:  $I_r = \frac{2-1}{10-1} = \frac{1}{9} * I_{roltc}$ . Η εξήγηση είναι ότι η παραγωγή αυτή χρησιμοποιείται για ιδιοκατανάλωση του φορτίου στο άκρο της γραμμής και δεν διαχέεται πίσω στο υπόλοιπο δίκτυο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτής της περίπτωσης.



*Διάγραμμα 17: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της δικής μας μεθόδου LDC παρουσία Φ/Β παραγωγής 1MW*

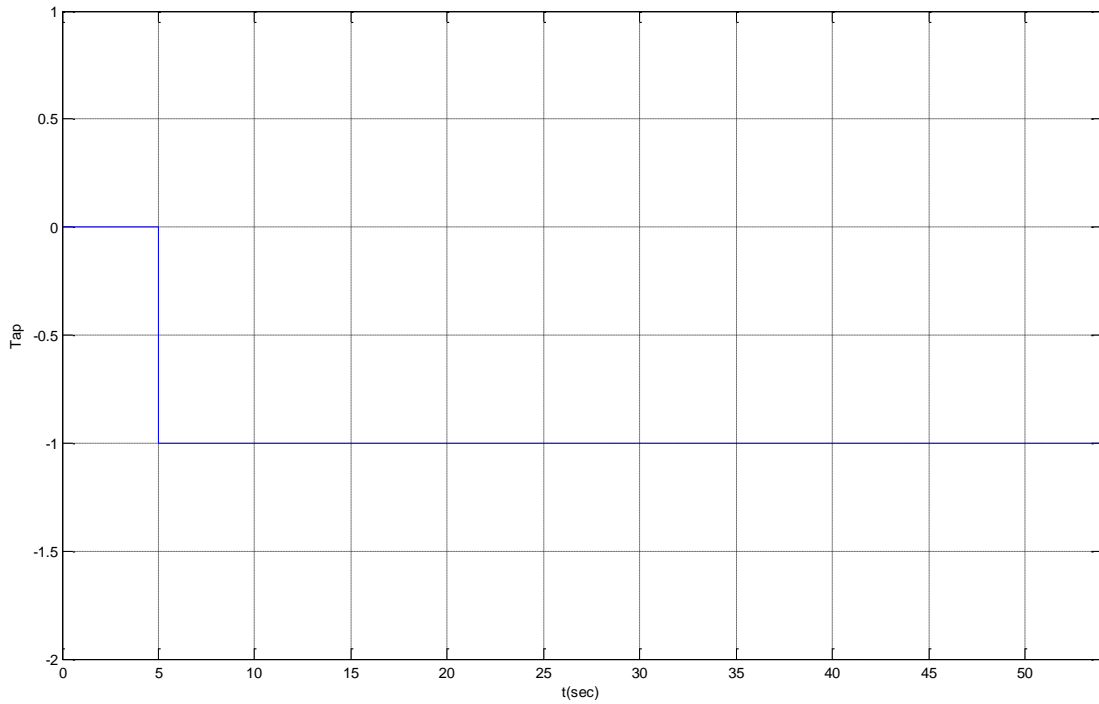




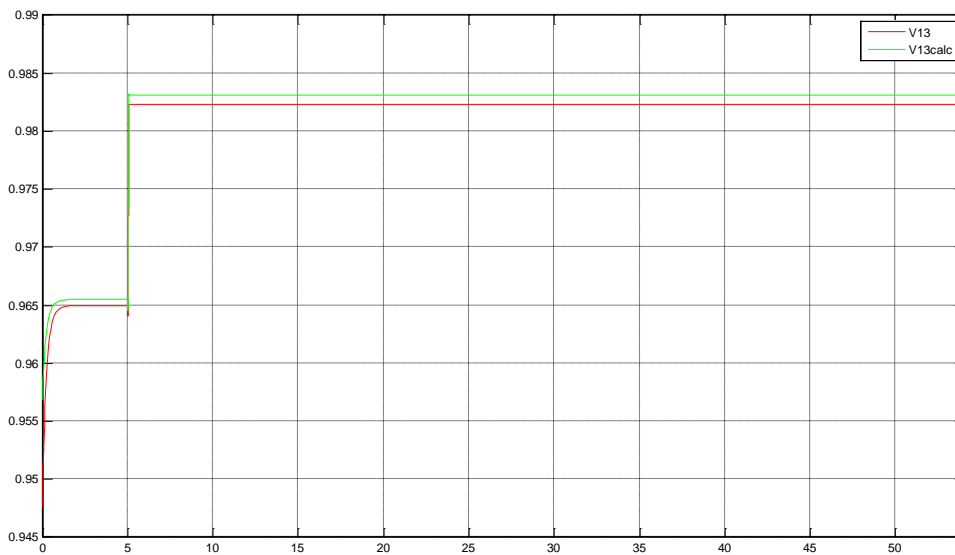
Διάγραμμα 18: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της δικής μας μεθόδου LDC παρουσία Φ/Β παραγωγής 1MW

Εδώ η μετρούμενη τάση έχει τιμή  $V_{13} = 0,9869$ αμ και η υπολογισμένη από την μέθοδό μας έχει τιμή  $V_{13calc} = 0,9875$ αμ κάτι το οποίο έχει απόκλιση 0,06% και είναι απόλυτα αποδεκτό σαν σφάλμα. Το ΣΑΤΥΦ έπρεπε να κάνει δύο αλλαγές λήψης για να επιτρέψει στην τάση να εισέλθει στα επιτρεπτά όρια άρα έπρεπε να πέσει κατά 2 λήψεις ώστε να ανεβάσει την τάση στο δευτερεύον.

Συνεχίζουμε με την δεύτερη περίπτωση στην οποία με ίδια χαρακτηριστικά φορτίου όπως και προηγουμένως βάζουμε 5MW παραγωγή φωτοβολταϊκών. Τα διαγράμματα της περίπτωσης αυτής παρουσιάζονται πιο κάτω.



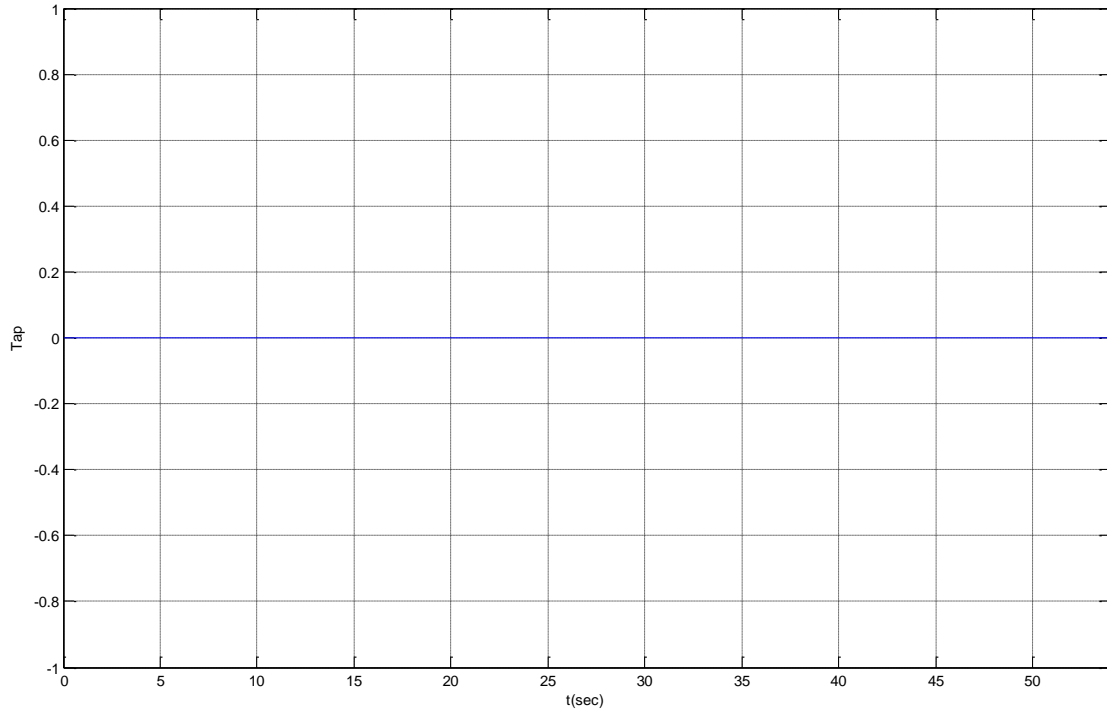
Διάγραμμα 19: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της δικής μας μεθόδου LDC παρουσία Φ/Β παραγωγής 5MW



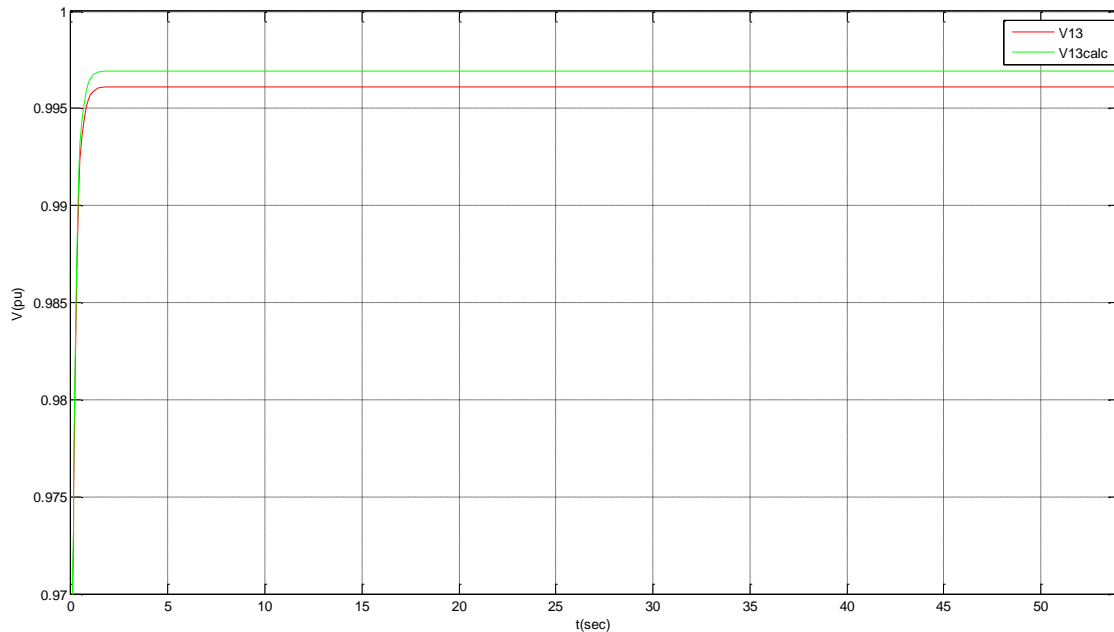
Διάγραμμα 20: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της δικής μας μεθόδου LDC παρουσία Φ/Β παραγωγής 5MW

Η μέθοδός μας LDC λειτούργησε πάλι σωστά και με πολύ καλά αποτελέσματα. Η μετρούμενη τάση στο άκρο της γραμμής είναι  $V_{13} = 0,9823\mu\text{m}$  και η μετρούμενη από τη μέθοδό μας είναι  $V_{13\text{calc}} = 0,9832\mu\text{m}$  που δίνει απόκλιση 0,09%. Το ΣΑΤΥΦ χρειάστηκε να κάνει μόνο μία αλλαγή λήψης για να ανεβάσει την τάση στο δευτερεύον ώστε να είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια η τάση στο άκρο της γραμμής.

Τέλος, μελετώντας την τρίτη και τελευταία περίπτωση παίρνουμε ένα δίκτυο με τα ίδια χαρακτηριστικά όπου η παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι 20MW. Τα αποτελέσματα δίνονται στα κάτωθεν διαγράμματα.



*Διάγραμμα 21: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της δικής μας μεθόδου LDC παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW*



Διάγραμμα 22: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 5km (5\*1km) και διαμοιρασμένο φορτίο 10MW (5\*2MW) με χρήση της δικής μας μεθόδου LDC παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW

Εδώ παρατηρούμε ότι παρόλο που βάλαμε αρκετά μεγάλη παραγωγή φωτοβολταϊκών δεν υπήρξε κάποια ανύψωση τάσης σε μεγάλο βαθμό ώστε να χρειαστεί η επέμβαση του ΣΑΤΥΦ για τη διόρθωσή της. Αυτό συμβαίνει όπως είπαμε παραπάνω διότι η πτώση τάσης που έχουμε λόγω των φορτίων και των σύνθετων αντιστάσεων αντισταθμίζεται από την παραγωγή από φωτοβολταϊκά στο άκρο της γραμμής διανομής. Ακόμα βλέπουμε ότι η μέθοδός μας για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης ήταν αρκετά ακριβής με τη μετρούμενη τάση να είναι  $V_{13} = 0,9961$ αμ και την υπολογισμένη  $V_{13calc} = 0,9969$ αμ κάτι το οποίο δίνει απόκλιση 0,08% η οποία προσεγγίζει κατά πολύ τη μετρούμενη και αποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί σωστά.

## 4.5 Δίκτυο με περισσότερες γραμμές διανομής και έναν μετασχηματιστή ΣΑΤΥΦ

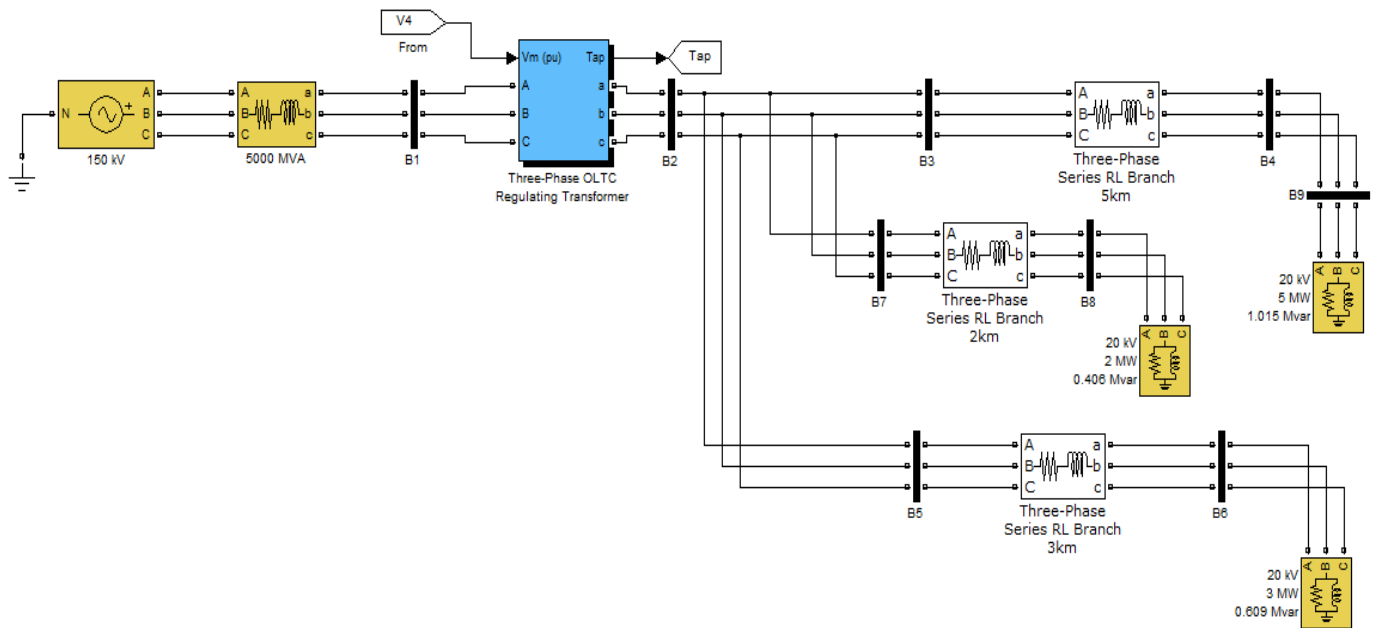
Στην περίπτωση αυτή αρχίζει και περιπλέκεται αρκετά το δίκτυο οπότε δυσκολεύει και ο τρόπος ρύθμισης τάσης με έναν μόνο Μ/Σ ΣΑΤΥΦ. Εδώ θα ασχοληθούμε με περισσότερες περιπτώσεις καθώς έχουμε και μεγαλύτερη ποικιλία αλλαγών που μπορούμε να κάνουμε στο δίκτυο ώστε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του Μ/Σ ΣΑΤΥΦ. Η πρώτη περίπτωση είναι τρεις γραμμές παράλληλα συνδεδεμένες στον κόμβο σύνδεσης του δευτερεύοντος του Μ/Σ με φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος, όπου τα φορτία είναι κατανομημένα στο άκρο της γραμμής αποκλειστικά. Σ' αυτήν την περίπτωση είναι δεδομένο καταρχήν όπως είπαμε και πιο πάνω ότι σε κάθε γραμμή η πτώση τάσης είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι θα ήταν αν είχαμε ένα διαμοιρασμό φορτίου σ' όλο το μήκος της γραμμής. Αυτό που αλλάζει σε σχέση με μία γραμμή είναι ότι ο Μ/Σ ΣΑΤΥΦ δεν έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει την τάση σε περισσότερους από έναν κόμβους αλλά μόνο σε έναν κόμβο. Σύμφωνα με τις αλλαγές που πρέπει να γίνουν στο ΣΑΤΥΦ για να επιτευχθεί η σωστή τάση στον κόμβο εκείνο θα υπάρξουν προφανώς και αλλαγές σε όλο το υπόλοιπο δίκτυο. Άρα, έχουμε να προσέξουμε εδώ που θα γίνεται η ρύθμιση της τάσης κάθε φορά και όταν γίνεται η ρύθμιση της τάσης σε εκείνο το σημείο να μην βγαίνουν εκτός ορίων οι τάσεις στο υπόλοιπο δίκτυο.

Για να υπολογίσουμε στην παραπάνω περίπτωση την πτώση τάσης πρέπει πρώτα να σημειώσουμε τα εξής:

- I. Ουσιαστικά εδώ έχουμε τη χρήση του απλού αλγορίθμου υπολογισμού πτώσης τάσης LDC με τη διαφορά ότι εδώ χρησιμοποιούμε επιπλέον έναν απλό διαιρέτη ρεύματος ο οποίος ουσιαστικά υπολογίζεται από το ποσοστό που κατέχει το φορτίο στο οποίο θέλουμε να ρυθμίσουμε την τάση σε σχέση με το ολικό καταναλισκόμενο φορτίο όλου του δικτύου. Αυτό το ποσοστό πολλαπλασιασμένο με το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ μας δίνει το ρεύμα του διαρρέει την εκάστοτε γραμμή διανομής.
- II. Το μήκος των γραμμών διανομής δεν επηρεάζει το παραπάνω ποσοστό στο διαιρέτη ρεύματος σε σημαντικό βαθμό. Το μήκος των γραμμών διανομής χρειάζεται μόνο για την πτώση τάσης που θα έχει η γραμμή διανομής από εκείνο το σημείο μέχρι να φτάσουμε στο φορτίο που θέλουμε να υπολογίσουμε την πτώση τάσης.
- III. Η μέθοδος με το διαιρέτη ρεύματος παύει να ισχύει όταν υπάρχει παραγωγή φωτοβολταϊκών και από εκεί και έπειτα ο αλγόριθμος θα υπολογίζεται με βάση το ρεύμα της εκάστοτε γραμμής διανομής. Αυτό πρακτικά δεν μας επηρεάζει καθώς τα ρεύματα της κάθε γραμμής είναι δυνατόν να μετρηθούν εφόσον βρίσκονται κοντά στο δευτερεύον του Μ/Σ και δεν χρειάζονται επιπλέον τηλεπικοινωνιακά μέσα για τη μέτρηση αυτών.
- IV. Πρέπει να εξετάζουμε σε περίπτωση αλλαγής λήψης του ΣΑΤΥΦ αν βγαίνουν εκτός ορίων οι τάσεις στα άκρα των υπόλοιπων γραμμών και να το διορθώσουμε μέσω μίας κοινής αποδεκτής λύσης ώστε όλες οι τάσεις να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα επιτρεπτά όρια. Να σημειώσουμε εδώ ότι με

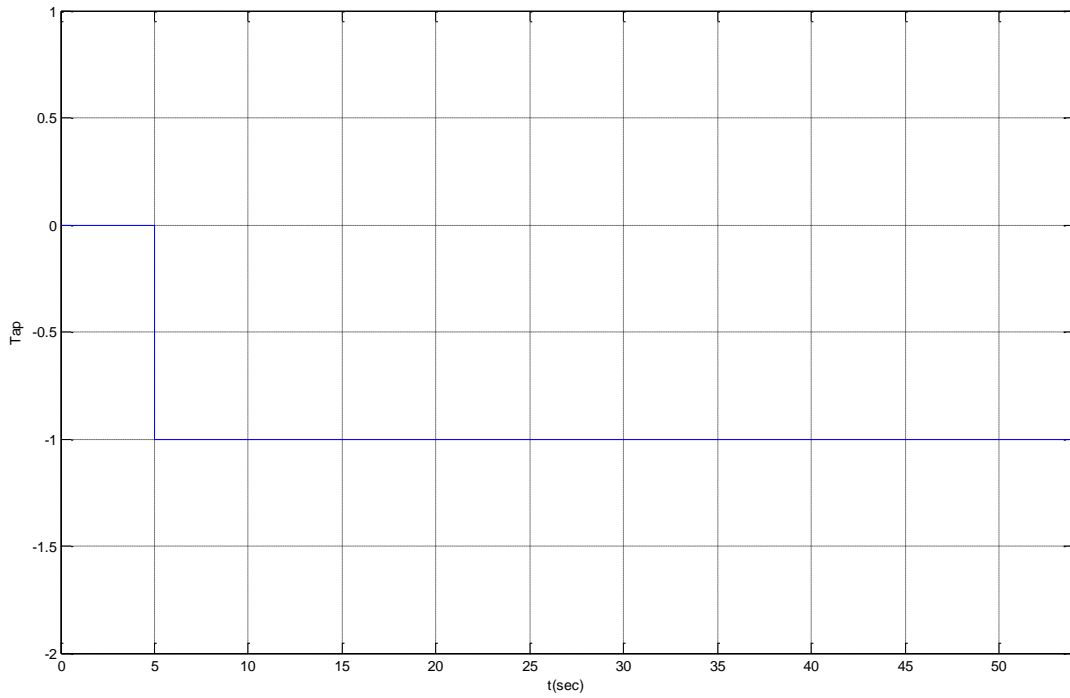
έναν ΣΑΤΥΦ δεν μπορούμε να κάνουμε κάτι παραπάνω διότι από κατασκευής του έχει τη δυνατότητα να ελέγχει μία μόνο τάση και να τη διορθώνει ανάλογα οπότε στην περίπτωση παραπάνω από μίας γραμμής διανομής στην ουσία κάνει υπέρβαση.

Έχοντας τα παραπάνω υπόψιν ξεκινάμε μία προσομοίωση στην οποία θέτουμε στην πρώτη γραμμή διανομής 5km γραμμή ACSR 3x95 με  $R = 0,215\Omega/\text{km}$  και  $X = 0,334\Omega/\text{km}$ . Το φορτίο σε αυτή τη γραμμή είναι 5MW συντελεστή 0,98 επαγωγικό. Η δεύτερη γραμμή έχει τα ίδια χαρακτηριστικά αλλά είναι 2km και το φορτίο είναι 2MW. Η τρίτη γραμμή είναι 3km και έχει φορτίο ίδιων χαρακτηριστικών όπως παραπάνω αλλά τιμή 3MW (Εικόνα 4.6).

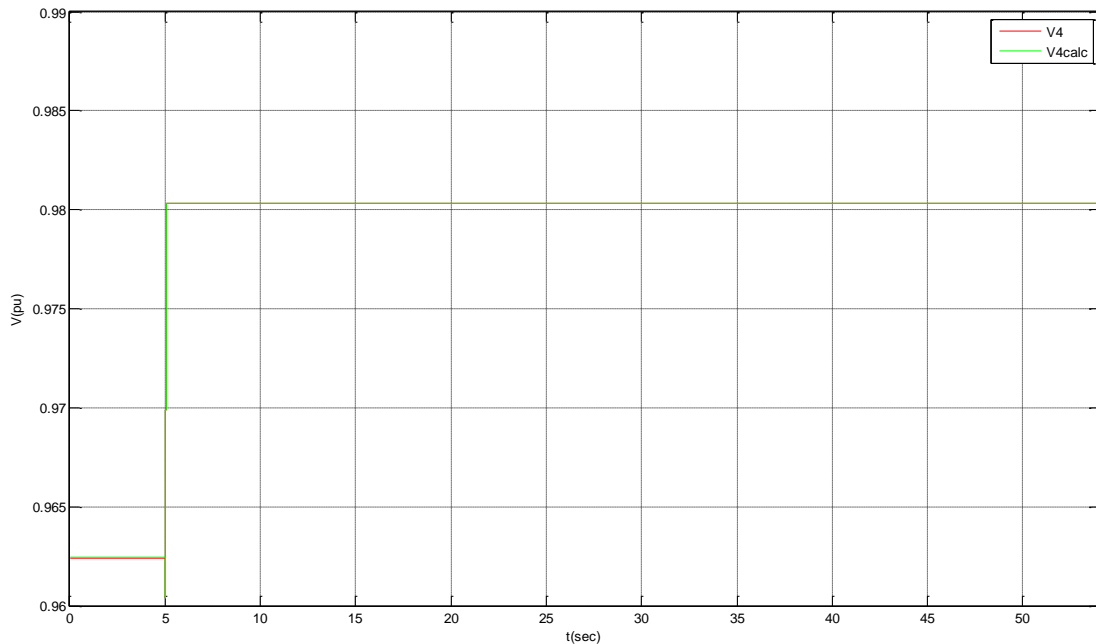


Εικόνα 4.6: Δίκτυο με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 και συγκεντρωμένο φορτίο στο άκρο κάθε γραμμής

Τα αποτελέσματα της άνωθεν προσομοίωσης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



*Διάγραμμα 23: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 5km (5, 2 και 3km αντίστοιχα) και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW (5, 2 και 3MW αντίστοιχα) με χρήση της απλής μεθόδου LDC με χρήση αναλογίας φορτίων*



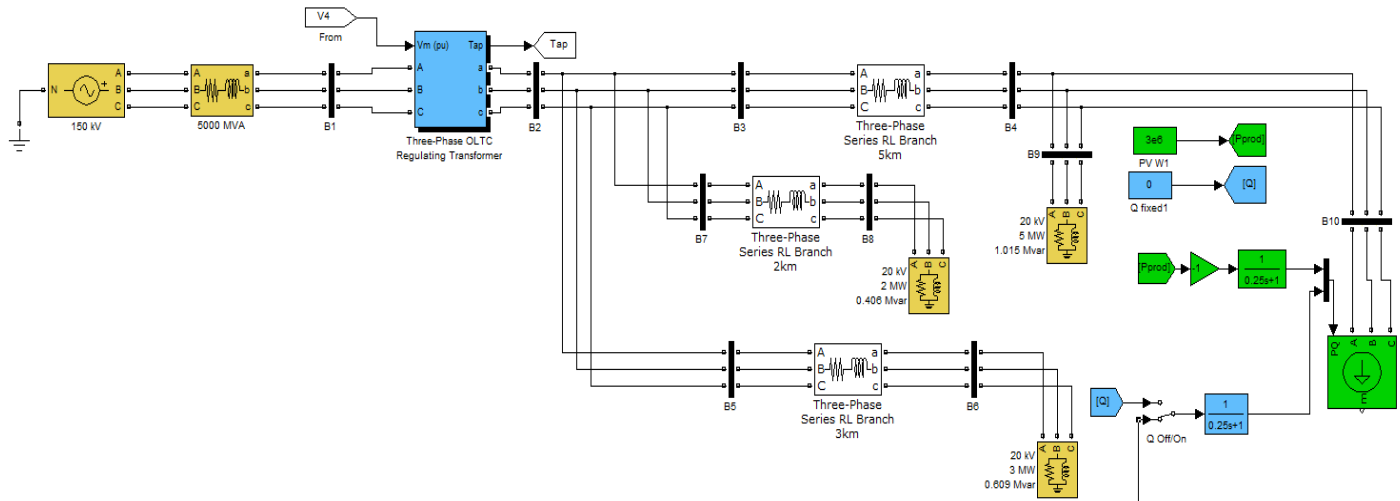
Διάγραμμα 24: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 5km (5, 2 και 3km) και συγκεντρωμένο φορτίο (5, 2 και 3MW) με χρήση της απλής μεθόδου LDC και της χρήσης αναλογίας φορτίου

Όπως παρατηρούμε χρειάστηκε μία αλλαγή λήψης ώστε η τάση στο άκρο της πρώτης γραμμής η οποία λόγω μεγαλύτερου φορτίου και μεγαλύτερης γραμμής διανομής έχει και μεγαλύτερη πτώση τάσης να φτάσει σε επίπεδο εντός των ορίων τάσης. Η μετρούμενη τιμή τάσης με την υπολογισμένη στο άκρο της γραμμής είναι  $V_4 = 0,9803\text{pu}$  και  $V_{4\text{calc}} = 0,9803\text{pu}$  αντίστοιχα κάτι το οποίο έχει απόκλιση 0% που σημαίνει ότι ο αλγόριθμός μας δουλεύει. Παρατηρήθηκε εδώ ότι οι τάσεις στα άκρα των υπόλοιπων γραμμών διανομής ήταν και αυτές εντός ορίων οπότε δεν χρειάζεται να κάνουμε κάποια άλλη ρύθμιση στον αλγόριθμό μας.

Συνεχίζουμε τις προσομοιώσεις μας βάζοντας στο παραπάνω υπάρχων δίκτυο στην πρώτη γραμμή διανομής διάφορες τιμές φωτοβολταϊκής παραγωγής. Εδώ να τονίσουμε ότι πάλι πρέπει να πάρουμε τις τρεις περιπτώσεις όπου στην πρώτη η παραγωγή είναι μικρότερη από την κατανάλωση στη γραμμή μεταφοράς όπου γίνεται η σύνδεση των Φ/Β, η δεύτερη είναι όταν η τιμή της παραγωγής είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση του φορτίου στο ΣΚΣ αλλά μικρότερη από την τιμή της ολικής κατανάλωσης του φορτίου και η τρίτη όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την ολική κατανάλωση των φορτίων του δικτύου στην οποία έχουμε και επιστροφή ισχύος στο δίκτυο.

Ξεκινάμε με την πρώτη περίπτωση και βάζουμε 3MW φωτοβολταϊκή παραγωγή στην πρώτη γραμμή διανομής (Εικόνα 4.7).



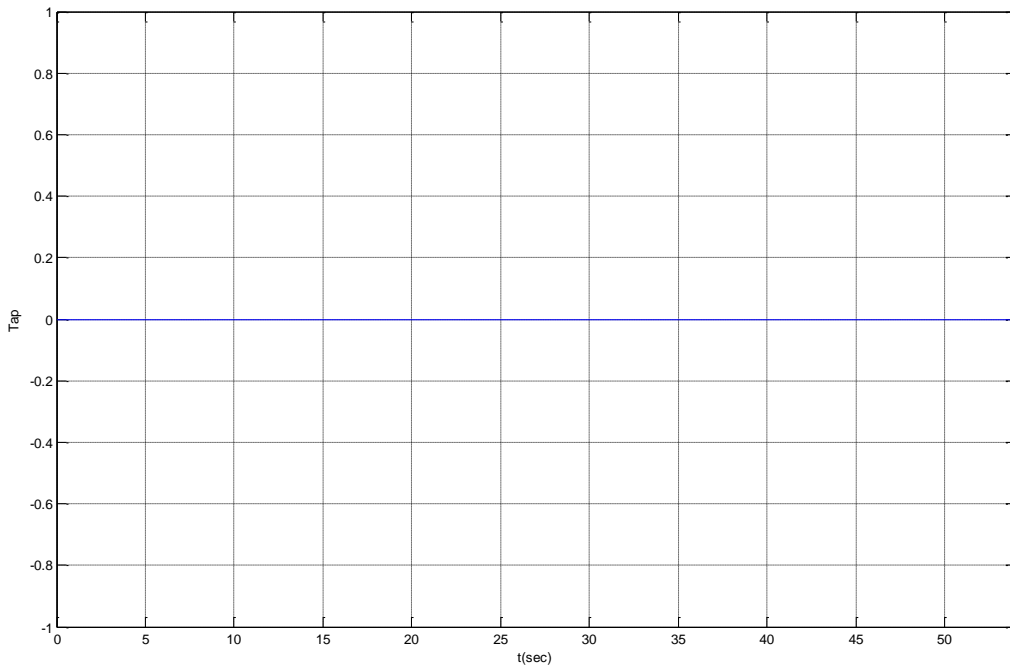


Εικόνα 4.7: Δίκτυο με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 και συγκεντρωμένο φορτίο στο άκρο κάθε γραμμής παρουσία Φ/Β παραγωγής στο άκρο της πρώτης γραμμής διανομής

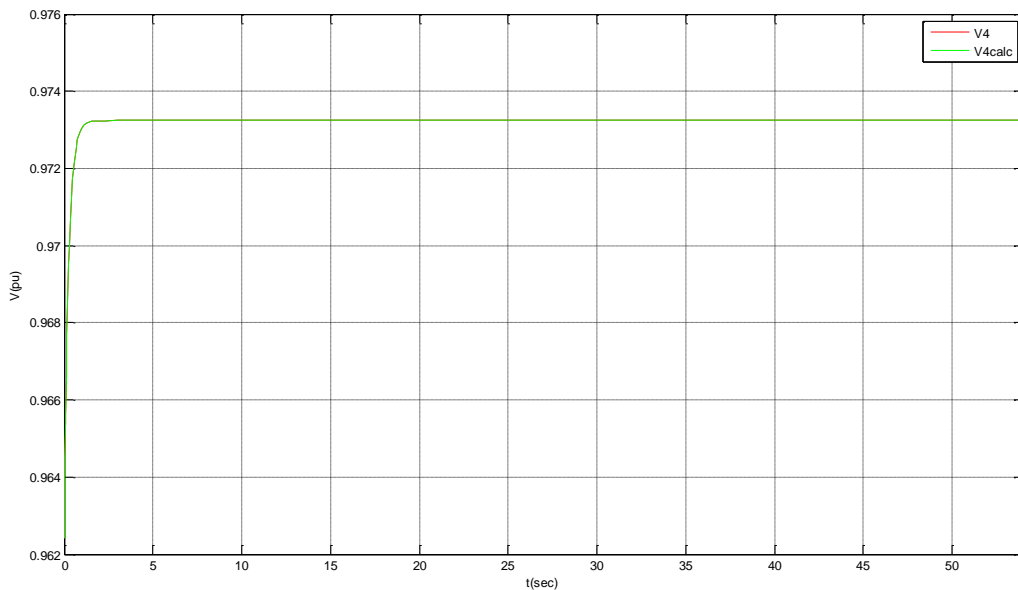
Ο αλγόριθμός μας πρέπει να αλλάξει γιατί όπως είδαμε και στις παραπάνω περιπτώσεις σε μία γραμμή διανομής ο απλός αλγόριθμος της LDC δεν <<βλέπει>> το σωστό ρεύμα για να υπολογίσει την τάση στο άκρο οπότε και βγάζει λάθος αποτελέσματα. Επειδή όμως μπορούμε να έχουμε μετρούμενα τα ρεύματα που δέχεται η κάθε γραμμή εφόσον είναι δίπλα στο δευτερεύον του ΣΑΤΥΦ και δεν θα χρειαστούν τηλεπικοινωνιακά μέσα τότε ο αλγόριθμος LDC που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι ο απλός αλγόριθμος υπολογισμού πτώσης τάσης, δηλαδή:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \tilde{z} \tilde{I} \quad (3-28)$$

όπου L το μήκος της γραμμής μεταφοράς την οποία εξετάζουμε,. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 25: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 5km (5, 2 και 3km αντίστοιχα) και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW (5, 2 και 3MW αντίστοιχα) με χρήση της απλής μεθόδου LDC με χρήση αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 3MW



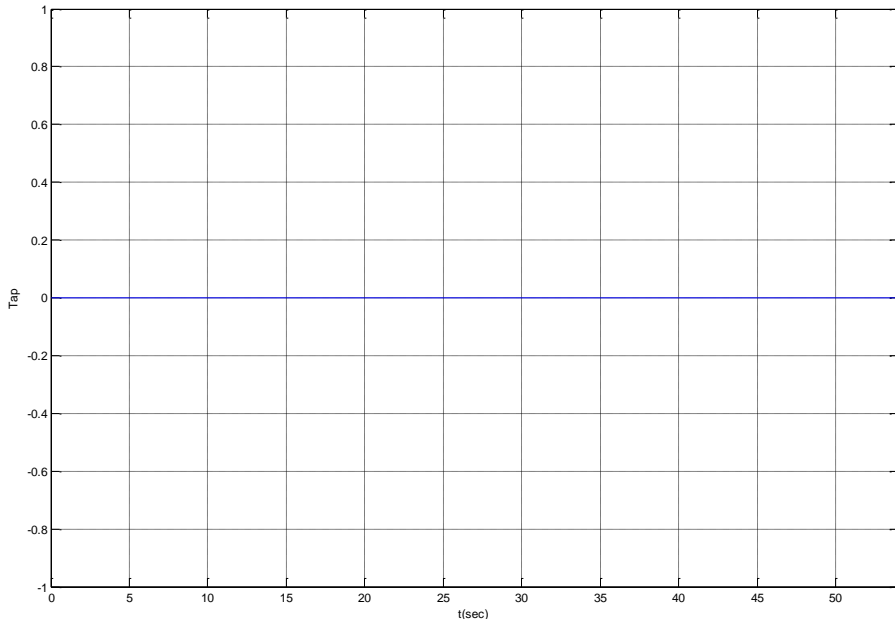
Διάγραμμα 26: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 5km (5, 2 και 3km) και συγκεντρωμένο φορτίο (5, 2 και 3MW) με χρήση της απλής μεθόδου LDC και της χρήσης αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 3MW

Παρατηρούμε εδώ ότι δεν έχουμε κάποια αλλαγή λήψης από το ΣΑΤΥΦ διότι η τάση στο ΣΚΣ είναι ήδη εντός επιτρεπτών ορίων. Η μετρούμενη τάση στο άκρο έχει τιμή  $V_4 = 0,9732\alpha\mu$  και η υπολογισμένη τάση  $V_{4calc} = 0,9732\alpha\mu$  που σημαίνει απόκλιση 0%. Παρατηρήθηκε εδώ ότι οι τάσεις στα άκρα των υπόλοιπων γραμμών διανομής ήταν και αυτές εντός ορίων οπότε δεν χρειάζεται να κάνουμε κάποια άλλη ρύθμιση στον αλγόριθμό μας.

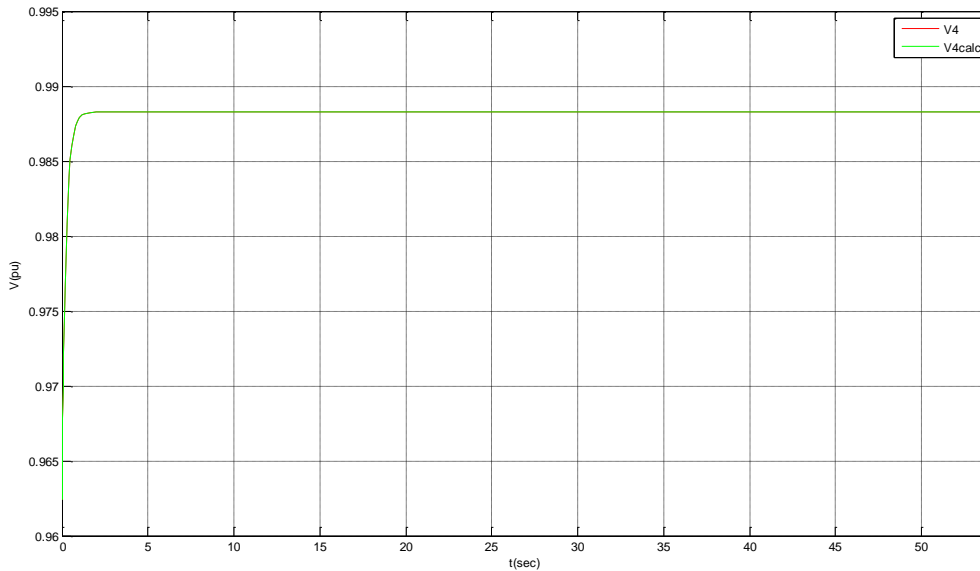
Συνεχίζουμε την προσομοίωση βάζοντας 8MW παραγωγή ισχύος που είναι μεγαλύτερη από τα 5MW της γραμμής αλλά μικρότερη από τα 10MW ολόκληρης της κατανάλωσης του δικτύου. Ο αλγόριθμός μας παραμένει ο ίδιος με την παραπάνω περίπτωση δηλαδή:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \tilde{z}I\tilde{L}$$

όπου  $I$  είναι το ρεύμα που διαρρέει την αντίστοιχη γραμμή διανομής της οποίας αναζητούμε την ανύψωση ή πτώση τάσης και  $L$  το μήκος της αντίστοιχης γραμμής. Έτσι έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα στα οποία πάλι δεν υπήρχε κάποια αλλαγή λήψης από τον Μ/Σ ΣΑΤΥΦ και η μετρούμενη και υπολογισμένη τάση έχουν τιμές  $V_4 = 0,9883\alpha\mu$  και  $V_{4calc} = 0,9883\alpha\mu$  αντίστοιχα που δίνει απόκλιση 0% που είναι παραπάνω από ικανοποιητική για να αποφανθούμε ότι ο αλγόριθμος δούλεψε σωστά. Παρατηρήθηκε και σε αυτή την περίπτωση ότι οι τάσεις στα άκρα των υπόλοιπων γραμμών διανομής ήταν και αυτές εντός ορίων οπότε δεν χρειάζεται να κάνουμε κάποια άλλη ρύθμιση στον αλγόριθμό μας.



Διάγραμμα 27: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 5km (5, 2 και 3km αντίστοιχα) και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW (5, 2 και 3MW αντίστοιχα) με χρήση της απλής μεθόδου LDC με χρήση αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 8MW

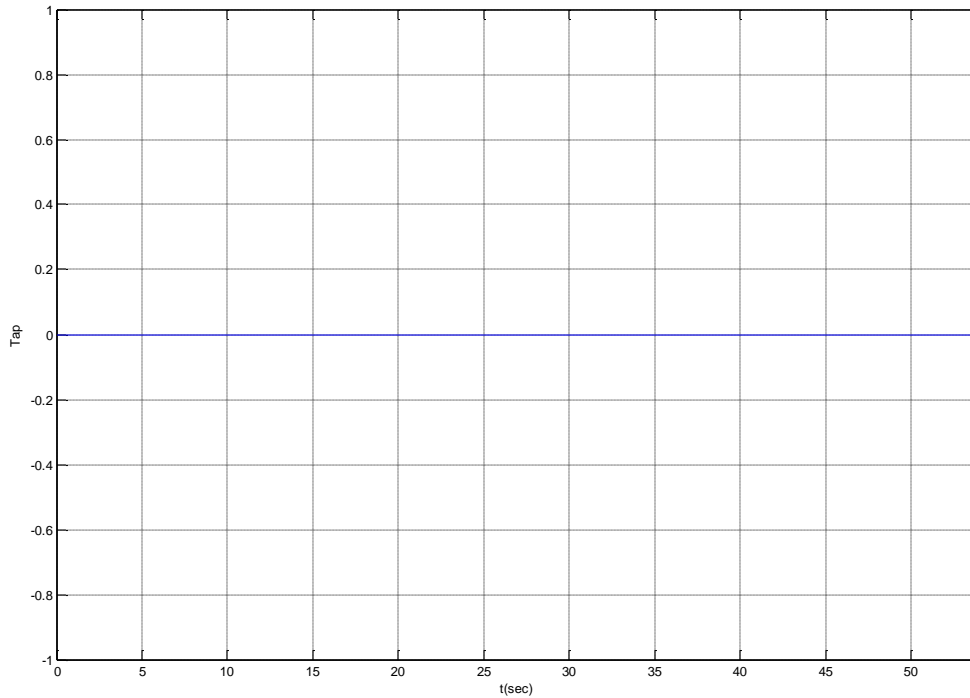


Διάγραμμα 28: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 5km (5, 2 και 3km) και συγκεντρωμένο φορτίο (5, 2 και 3MW) με χρήση της απλής μεθόδου LDC και της χρήσης αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 8MW

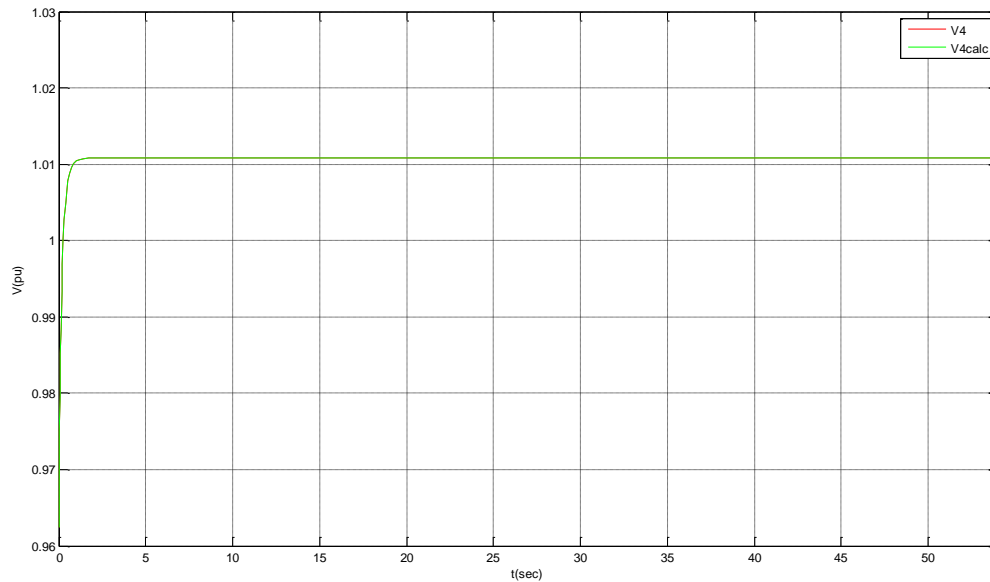
Τέλος, βάζουμε στο παραπάνω δίκτυο παραγωγή φωτοβολταϊκών 20MW για να δούμε και την τρίτη και πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση στην οποία έχουμε αντιστροφή ενεργού ισχύος προς το δίκτυο. Και στην περίπτωση αυτή παίρνουμε τον αλγόριθμο της εξίσωσης (3-28) δηλαδή:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \tilde{z}\tilde{I}L$$

Τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα δίνουν μηδενικές αποκλίσεις πραγματικής και υπολογισμένης τάσης από LDC. Και σε αυτήν την περίπτωση δεν υπήρξαν αλλαγές λήψης και οι τάσεις στις υπόλοιπες γραμμές διανομής δεν τέθηκαν εκτός ορίων. Η μετρούμενη τάση στο ΣΚΣ ήταν  $V_4 = 1,011$ αμ ενώ η υπολογισμένη από τον αλγόριθμο τάση ήταν  $V_{4calc} = 1,011$ αμ δηλαδή ουσιαστικά ίδιες.



Διάγραμμα 29: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 5km (5, 2 και 3km αντίστοιχα) και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW (5, 2 και 3MW αντίστοιχα) με χρήση της απλής μεθόδου LDC με χρήση αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW



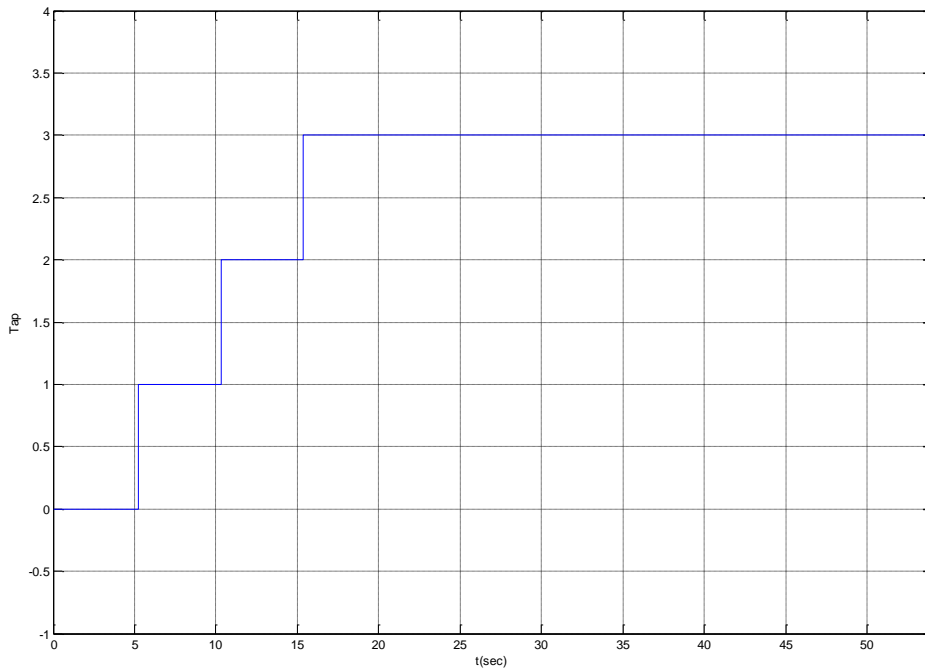
Διάγραμμα 30: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x95 5km (5, 2 και 3km) και συγκεντρωμένο φορτίο (5, 2 και 3MW) με χρήση της απλής μεθόδου LDC και της χρήσης αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW

Στην παραπάνω περίπτωση παρόλο που βάλαμε αρκετά μεγάλη παραγωγή δεν είδαμε κάποια αλλαγή λήψης από το ΣΑΤΥΦ και επίσης και οι υπόλοιπες τάσεις του δικτύου βρίσκονται και εκείνες εντός ορίων τάσης.

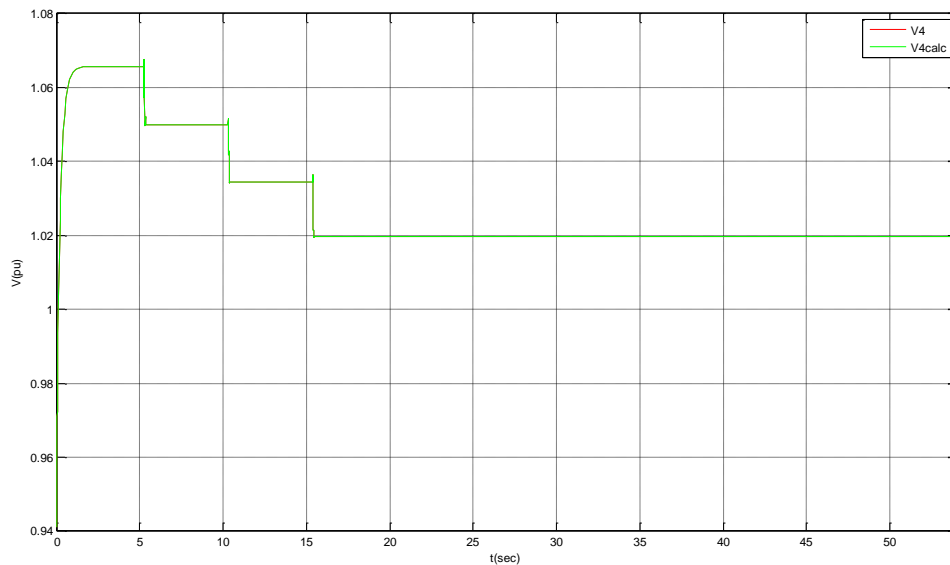
Με τα ίδια χαρακτηριστικά όπως στην παραπάνω τελευταία περίπτωση και αλλαγμένες τις σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών διανομής από ACSR 3x95 σε ACSR 3x35 με  $\frac{R}{X} = 2$  και τιμές  $R = 0,576\Omega/\text{km}$  και  $X = 0,397\Omega/\text{km}$  παίρνω τα παρακάτω διαγράμματα όπου βλέπω ότι το ΣΑΤΥΦ χρειάστηκε τρεις αλλαγές λήψης για να διορθώσει το πρόβλημα ανύψωσης στο ΣΚΣ λόγω της μεγάλης φωτοβολταϊκής παραγωγής και των μεγάλων τιμών σύνθετης αντίστασης των γραμμών διανομής. Πράγματι, το πρόβλημα στον απομακρυσμένο κόμβο λύθηκε και ακόμα παρατηρούμε ότι ο παραπάνω αλγόριθμός μας, στον οποίο άλλαξε μόνο η τιμή της  $z$  που είναι η σύνθετη τιμή αντίστασης γραμμής, λειτούργησε σωστά. Η τελική τιμή της τάσης στο ΣΚΣ είναι  $V_4 = V_{4\text{calc}} = 1,02\alpha\mu$ . Το πρόβλημα όμως εδώ είναι ότι εξαιτίας των αλλαγών λήψεως τέθηκαν εκτός ορίων οι τιμές των τάσεων στις άλλες δύο γραμμές διανομής και η τιμή της τάσης στο δευτερεύον του Μ/Σ. Όλες οι τάσεις έπεσαν λόγω των αλλαγών λήψεως και σε πολύ μεγάλο βαθμό. Οι τελικές τιμές αυτών των τάσεων έγιναν:  $V_2 = 0,9239\alpha\mu$   $V_6 = 0,9104\alpha\mu$  και  $V_8 = 0,9178\alpha\mu$ .

Ενώ η τιμή της τάσης στο δευτερεύον του Μ/Σ δεν μας ενδιαφέρει που έπεσε τόσο διότι ο Μ/Σ ΣΑΤΥΦ μπορεί να λειτουργήσει σε τόσο χαμηλές τιμές τάσης χωρίς να πέσει σε αστάθεια και κα επέκταση το δίκτυο σε κατάρρευση τάσης πολύ εντούτοις οι τιμές των άλλων δυο γραμμών διανομής μας ενδιαφέρουν άμεσα διότι ουσιαστικά εκεί βρίσκονται φορτία είτε καταναλωτικά είτε βιομηχανικά στα οποία δεν θέλουμε σε καμία περίπτωση να τεθούν εκτός λειτουργικών ορίων δηλαδή στη ΜΤ εκτός  $\pm 0,03\alpha\mu$  [27]. Πρέπει με κάποιο τρόπο να διορθωθεί αυτό και ένα ΣΑΤΥΦ δεν είναι ικανό να μπορέσει να ρυθμίσει και τις τρεις αυτές τάσεις. Θα μπορούσαμε να πάρουμε μία μέση λύση ώστε και οι τρεις τάσεις να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα όρια τάσεων αλλά και αυτό δεν είναι η σωστή ενέργεια που πρέπει να ακολουθηθεί διότι πάλι τα φορτία μας θα λειτουργούν με μικρότερη ή μεγαλύτερη από την επιτρεπτή τάση.

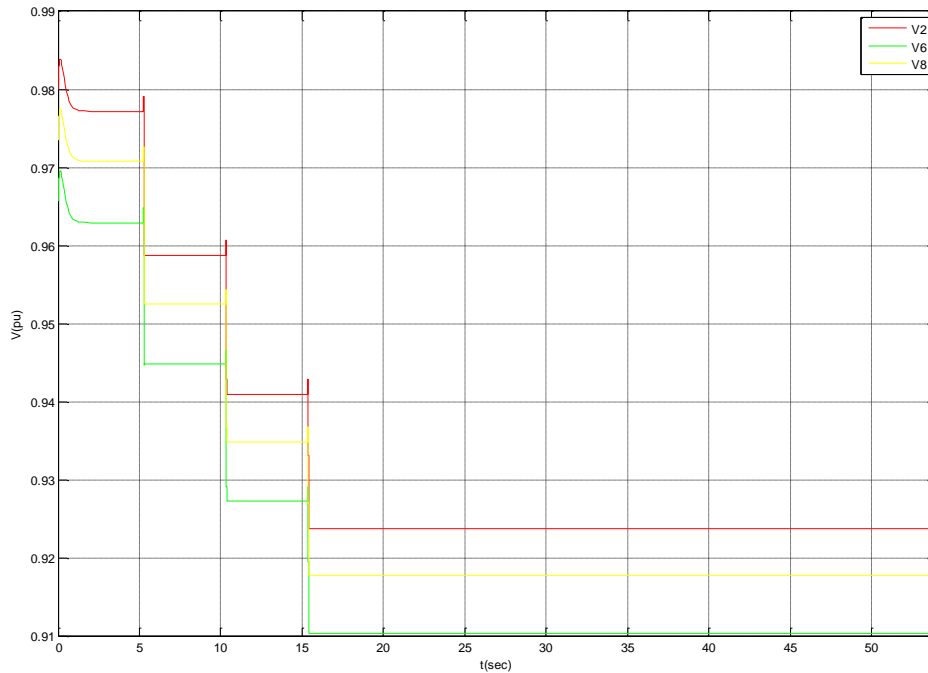
Πράγματι η μέση λύση θα ήταν να ανεβάσουμε τα όρια αποδοχής τάσεως του ΣΑΤΥΦ από  $\pm 0,03\alpha\mu$  σε  $\pm 0,05\alpha\mu$  άρα θα γινόντουσαν δύο λιγότερες αλλαγές λήψης που σημαίνει ότι οι τάσεις θα είχαν τιμές:  $V_4 = 1,05\alpha\mu$   $V_2 = 0,959\alpha\mu$   $V_6 = 0,945\alpha\mu$  και  $V_8 = 0,953\alpha\mu$ . Οι τιμές όμως αυτές των φορτίων στους κόμβους 6 και 8 είναι πολύ μακριά από τις αποδεκτές με αποτέλεσμα τα φορτία και πάλι να έχουν σοβαρά προβλήματα σωστής λειτουργίας λόγω της υπότασης.



Διάγραμμα 31: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x35 5km (5, 2 και 3km αντίστοιχα) και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW (5, 2 και 3MW αντίστοιχα) με χρήση της απλής μεθόδου LDC με χρήση αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW



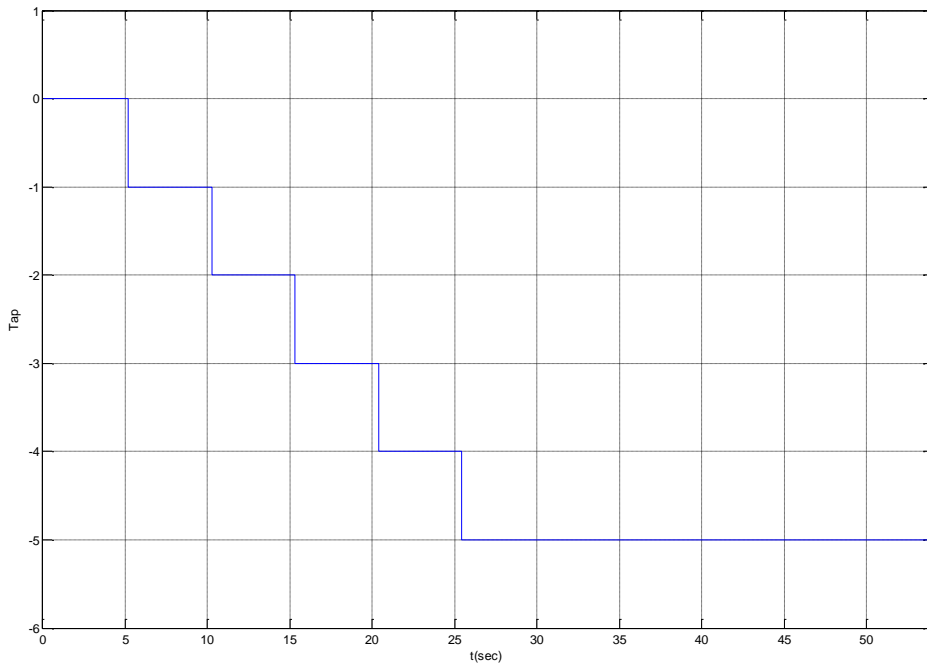
Διάγραμμα 32: Τάση άκρου της γραμμής πραγματική και υπολογισμένη σε δίκτυο με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x35 5km (5, 2 και 3km) και συγκεντρωμένο φορτίο (5, 2 και 3MW) με χρήση της απλής μεθόδου LDC και της χρήσης αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW



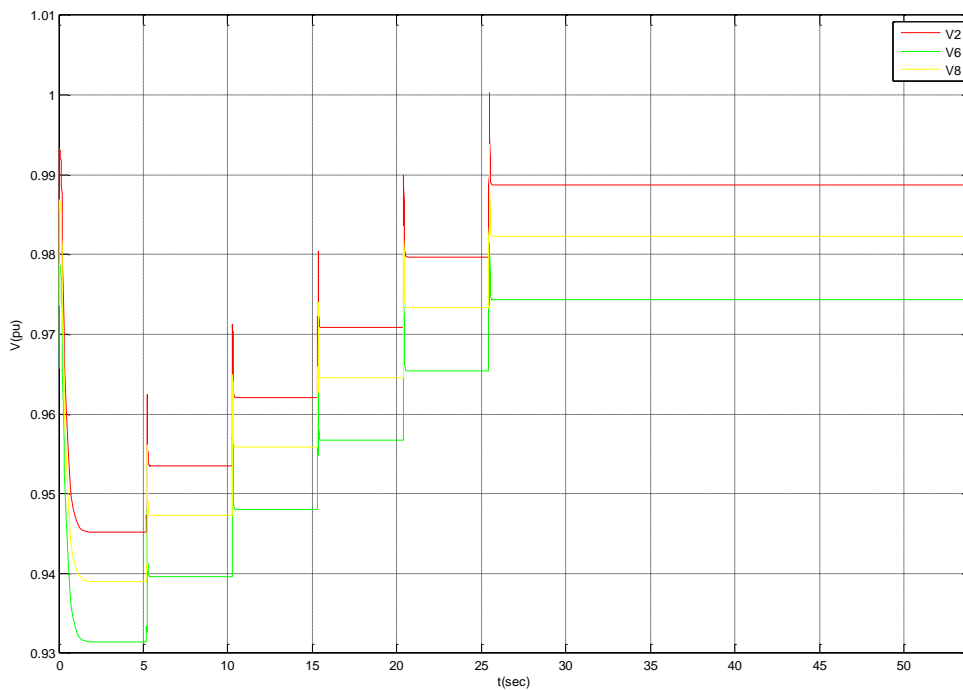
Διάγραμμα 33: Τάσεις των υπολοίπων γραμμών διανομής και τάση δευτερεύοντος του ΣΑΤΥΦ σε δίκτυο με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x35 5km (5, 2 και 3km) και συγκεντρωμένο φορτίο (5, 2 και 3MW) με χρήση της απλής μεθόδου LDC και της χρήσης αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW

Εφόσον το ΣΑΤΥΦ δεν έχει τη δυνατότητα να διορθώσει τις τάσεις όλου του δικτύου του δίνεται μέσω του αλγορίθμου η επιλογή να φέρει εντός ορίων την τάση που μετά την διόρθωση της τάσης στο ΣΚΣ έχει πέσει πιο πολύ εκτός ορίων που στην προκειμένη περίπτωση είναι η τάση στον ζυγό έξι. Την ρύθμιση της τάσης στο ΣΚΣ αναλαμβάνει ο δεύτερος τρόπος ρύθμισης τάσης που έχουμε αναφέρει πιο πάνω ο οποίος είναι η έγχυση αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της droop control η οποία είναι και η καλύτερη μέθοδος για έγχυση όσο το δυνατόν μικρότερης αέργου ώστε να επιτευχθεί η σωστή ρύθμιση τάσης στο ΣΚΣ. Ουσιαστικά έχουμε συνεργασία των δύο τρόπων αντιμετώπισης του προβλήματος ανύψωσης τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ και LDC αυτή τη φορά στη γραμμή με το περισσότερο πρόβλημα και παροχής αέργου ισχύος από αντιστροφείς των Φ/Β μέσω της droop control στο ΣΚΣ. Τα αποτελέσματα της παραπάνω συνεργασίας φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.

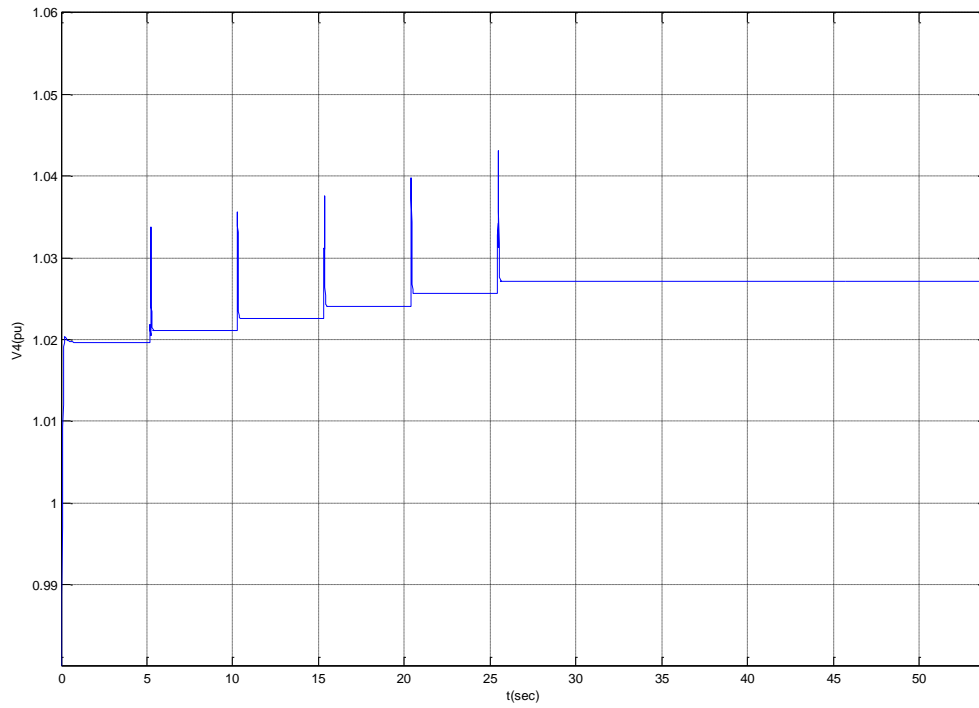




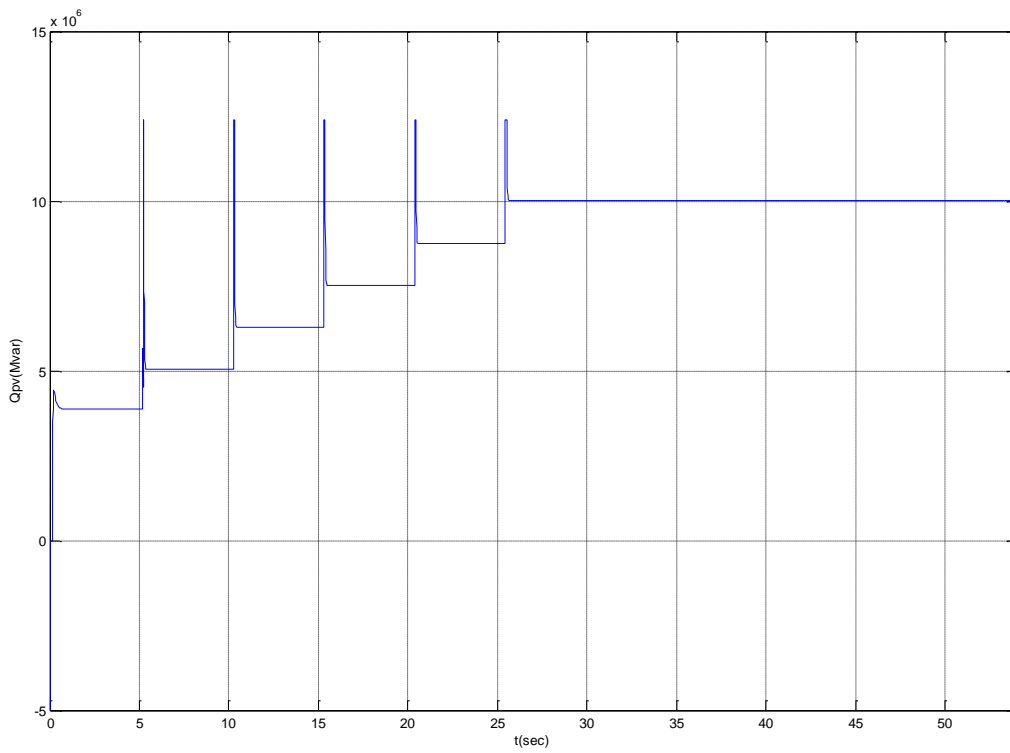
Διάγραμμα 34: Λήψη του ΣΑΤΥΦ με 3 γραμμές διανομής ACSR 3x35 5km (5, 2 και 3km αντίστοιχα) και συγκεντρωμένο φορτίο 10MW (5, 2 και 3MW αντίστοιχα) με χρήση της απλής μεθόδου LDC με χρήση αναλογίας φορτίων και της Droop Control παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW



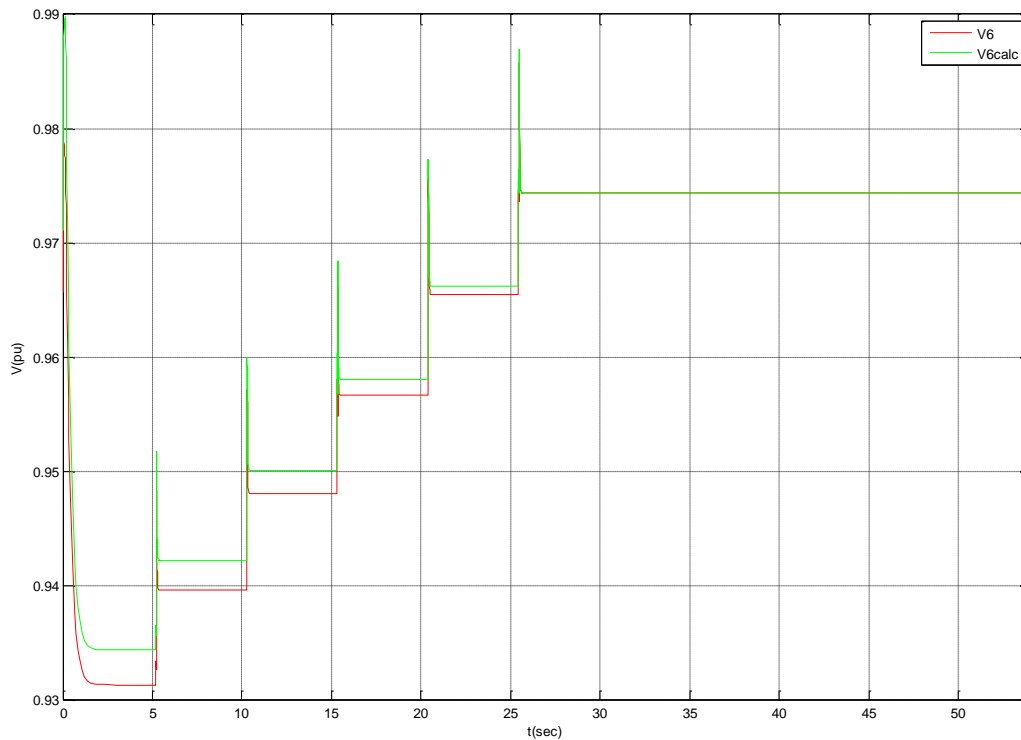
Διάγραμμα 35: Υπόλοιπες τάσεις με τη συνεργασία μεθόδου LDC και Droop Control



Διάγραμμα 36: Τάση σημείου κοινής σύνδεσης κατά τη συνεργασία LDC και Droop Control



Διάγραμμα 37: Απορροφούμενη άεργος ισχύς των Φ/Β για τη διατήρηση τάσης μέσω Droop Control στο ΣΚΣ



Διάγραμμα 38: Τάση της γραμμής διανομής πραγματική και υπολογισμένη μέσω της μεθόδου LDC και της αναλογίας φορτίων

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε τα εξής:

- Με τις παραπάνω ρυθμίσεις και βάζοντας στους αντιστροφείς  $\cos\phi_{lim} = 0.85$  ώστε να έχουμε ακόμα μεγαλύτερη παραγωγή αέργου ισχύος από αυτούς παρατηρούμε ότι με πέντε αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ και δίνοντας  $Q_{PV} = 10,02\text{MVar}$  άεργο ισχύ οι αντιστροφείς στο δίκτυο όλες οι τάσεις τέθηκαν εντός επιτρεπτών ορίων με την τάση στο ΣΚΣ να είχε τελική τιμή  $V_4 = 1,027\text{αμ}$ . Οι υπόλοιπες τάσεις έχουν τιμές:  $V_2 = 0,9888\text{αμ}$ ,  $V_6 = 0,9744\text{αμ}$  και  $V_8 = 0,9823\text{αμ}$  ενώ η υπολογιστική τιμή της τάσης στο ζυγό 6 μέσω του άνωθεν αλγορίθμου έχει τιμή  $V_{6calc} = 0,9744\text{αμ}$  με μηδενική απόκλιση από την μετρούμενη.
- Η τάση στο άκρο του ΣΚΣ βλέπουμε ότι προφανώς επηρεάζεται από τις αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ και οδεύει στο να βγει εκτός ορίων τάσης αλλά η συνεχής παροχή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς την κρατάει εντός επιθυμητών ορίων. Συνεπώς, η συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και έγχυσης αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή, δουλεύει άψογα στην περίπτωση παραπάνω γραμμών διανομής παράλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους και με ενιαίο φορτίο στο άκρο τους κάτι το οποίο μας ικανοποιεί διότι προσφέρει στο δίκτυο σωστή στήριξη.

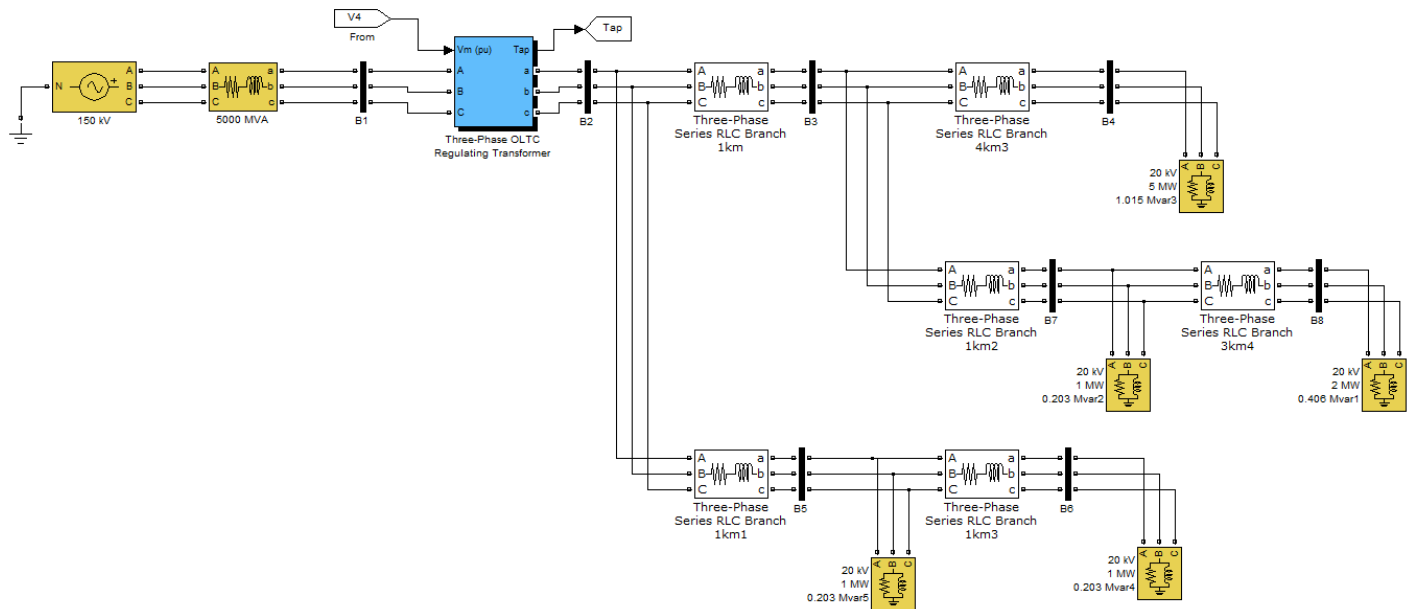
## 4.6 Δίκτυο με μία κύρια γραμμή διανομής και δευτερεύουσες γραμμές πάνω στην κύρια

Μία άλλη περίπτωση είναι η επιλογή ενός δικτύου με έναν κύριο feeder πάνω στον οποίο θα υπάρχουν δύο ακόμα μικρότεροι feeder σε διαφορετικά σημεία του αρχικού. Εδώ προτεραιότητα αρχικά έχει να ρυθμίσουμε το δίκτυο ώστε να μην υπάρχουν πτώσεις τάσεως μεγαλύτερες στους δευτερεύοντες feeders γιατί δεν θα ήταν ούτως ή άλλως κάτι λογικό αφού τα παρακλάδια δεν θα μπορούσαν να έχουν τόσο μεγάλα φορτία. Επίσης, όταν βάλουμε την παραγωγή Φ/Β εκείνη θα είναι σε αυτήν την περίπτωση στον κύριο feeder οπότε εκεί που είναι το ΣΚΣ θα γίνει και η ρύθμιση τάσης από το ΣΑΤΥΦ. Τα φορτία και στον κύριο feeder και στα παρακλάδια θα είναι ομοιόμορφα διαμοιρασμένα σε όλη τη γραμμή ώστε όπως είπαμε παραπάνω να είναι μικρότερη η πτώση τάσης στο άκρο της γραμμής σε σχέση με το αν ήταν συγκεντρωμένο όλο το φορτίο στο άκρο του feeder. Και εδώ παρουσιάστηκαν πολλά προβλήματα στον τρόπο με τον οποίο θα ρυθμίσουμε τον regulator ώστε το δίκτυο να παίρνει τις σωστές τάσεις στο άκρο όλων των feeder αλλά πιο συγκεκριμένα στο άκρο του κύριου feeder ο οποίος είναι εκείνος που μας ενδιαφέρει να κάνουμε τη ρύθμιση τάσης και με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β και χωρίς τη συμβολή αυτών.

Παρατηρήθηκε ότι με την απλή μέθοδο LDC όταν δεν έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β δεν μπορούσε να λειτουργήσει σωστά μέσω μέτρησης μόνο των τοπικών μετρήσεων στο δευτερεύον του Μ/Σ εφόσον σε καμία περίπτωση δεν είναι αυτό το ρεύμα το οποίο διαπερνά τις επιμέρους σύνθετες αντιστάσεις μέχρι να φτάσει στον απομακρυσμένο ζυγό. Πράγματι, το ρεύμα διαμοιράζεται όσο <<προχωράει>> προς τους ζυγούς των φορτίων με αποτέλεσμα να πέφτει σε τιμή οπότε η απλή μέθοδος υπολογίζει πολύ μεγάλη πτώση τάσης αφού στους υπολογισμούς της έχει τόσο μεγάλο ρεύμα δευτερεύοντος.

Για να το διορθώσουμε αυτό πρέπει μέσω του ρεύματος στο δευτερεύον του Μ/Σ ΣΑΤΥΦ να υπολογίσουμε το ρεύμα που καταλήγει στο ΣΚΣ όπου θα γίνει η ρύθμιση τάσης. Ο τρόπος που θα το κάνουμε αυτό είναι όπως και πιο πάνω γνωρίζοντας τις καταναλώσεις στους καταναλωτές και παίρνοντας μία απλή αναλογία φορτίων κατανάλωσης για να υπολογίσουμε τα ρεύματα που διαρρέουν κάθε φορά τις σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών διανομής. Βρέθηκε ότι το φορτίο είναι εκείνο που ευθύνεται κυρίως για την ποσότητα του ολικού ρεύματος που θα περάσει σε κάθε γραμμή διανομής και πως οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών διανομής είναι υπεύθυνες για την πτώση τάσης που θα έχουμε πάνω στις γραμμές εκείνες.

Παίρνοντας τα παραπάνω κατασκευάζουμε ένα δίκτυο με Μ/Σ ΣΑΤΥΦ ονομαστικής τάσης 150/20kV με ονομαστική φαινόμενη ισχύ 25MVA. Έχουμε τρεις γραμμές διανομής συνολικά όπου η πρώτη γραμμή η οποία είναι η κύρια είναι 5km ACSR 3x35 και έχει φορτίο 5MW με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi = 0,98$  επαγωγικό. Στην αρχή της γραμμής αυτής ξεκινά η δεύτερη γραμμή διανομής η οποία έχει συνολικό μήκος 2km ACSR 3x35. Στο πρώτο της χιλιόμετρο είναι ένα φορτίο 1MW και στο άκρο της ένα ακόμα φορτίο 2MW και τα δύο με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi = 0,98$  επαγωγικό. Στο τέλος του πρώτου χιλιόμετρου της κύριας γραμμής ξεκινά η τρίτη και τελευταία γραμμή διανομής η οποία έχει συνολικό μήκος 4km ACSR 3x35. Στο πρώτο της χιλιόμετρο είναι ένα φορτίο 1MW και στο άκρο της ένα ακόμα φορτίο 1MW και τα δύο με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi = 0,98$  επαγωγικό (Εικόνα 4.8).

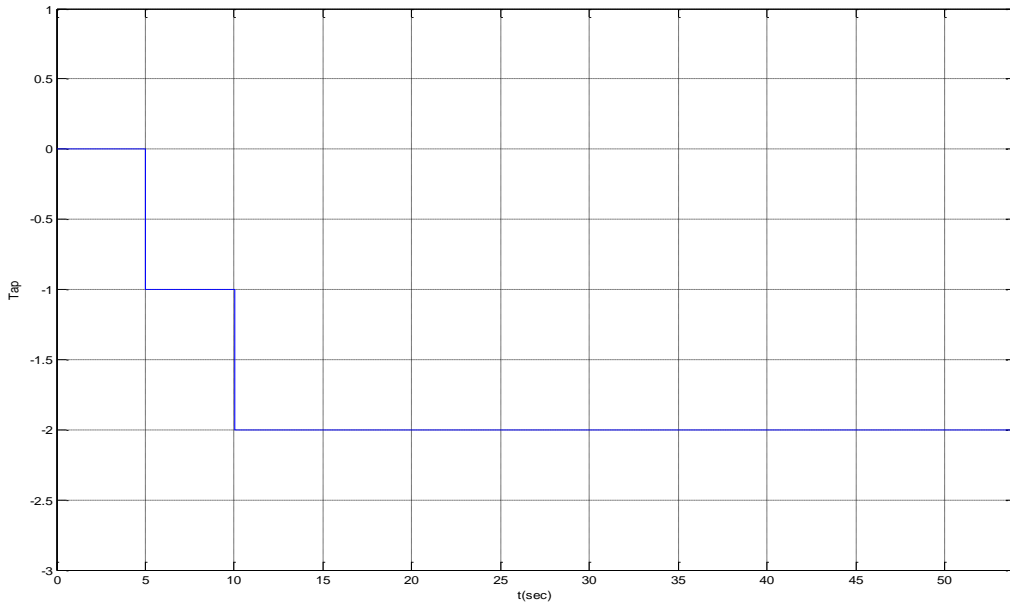


Εικόνα 4.8: Δίκτυο με 1 κύρια γραμμή διανομής και 2 γραμμές ακόμα (ACSR 3x95) πάνω στην κύρια με διαμοιρασμένο φορτίο

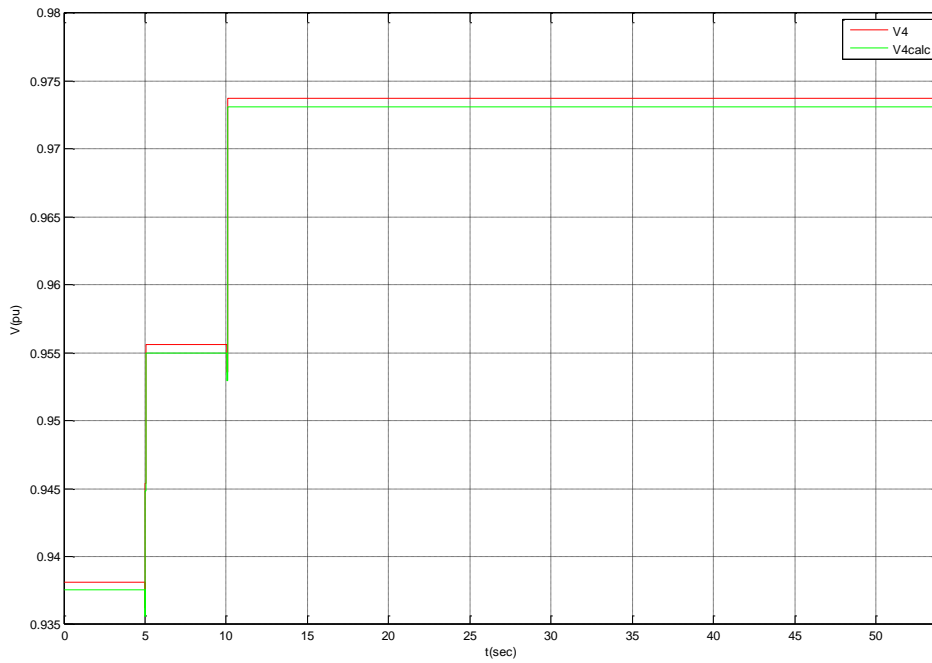
Ξέροντας την ισχύ των φορτίων μας μέσω πρόβλεψης φορτίου της επόμενης μέρας και τα χαρακτηριστικά των γραμμών διανομής φτιάχνουμε τον αλγόριθμο LDC ο οποίος θα είναι:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \tilde{z} * \frac{P_{dem1}}{P_{tot}} * \tilde{I}_{oltc} * L1 - \tilde{z} * \frac{P1}{P_{tot}} * L2 * \tilde{I}_{oltc}$$

όπου  $L_1$  είναι το μήκος της γραμμής διανομής στον οποίο συνδέεται η τρίτη γραμμή διανομής,  $L_2$  είναι το υπόλοιπο μήκος της κύριας γραμμής διανομής μετά τη σύνδεση της τρίτης γραμμής,  $P_{dem1}$  είναι το άθροισμα της ισχύς κατανάλωσης της κύριας και της τρίτης γραμμής,  $P_1$  είναι η τιμή της ισχύος του φορτίου στο άκρο της κύριας γραμμής και  $P_{tot}$  είναι η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς όλων των φορτίων του δικτύου. Από τον υπολογισμό των παραπάνω βρίσκουμε τα επόμενα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 39: Λήψη του ΣΑΤΥΦ σε δίκτυο με 1 κύρια γραμμή διανομής και 2 γραμμές ακόμα (ACSR 3x95) πάνω στην κύρια με διαμοιρασμένο φορτίο

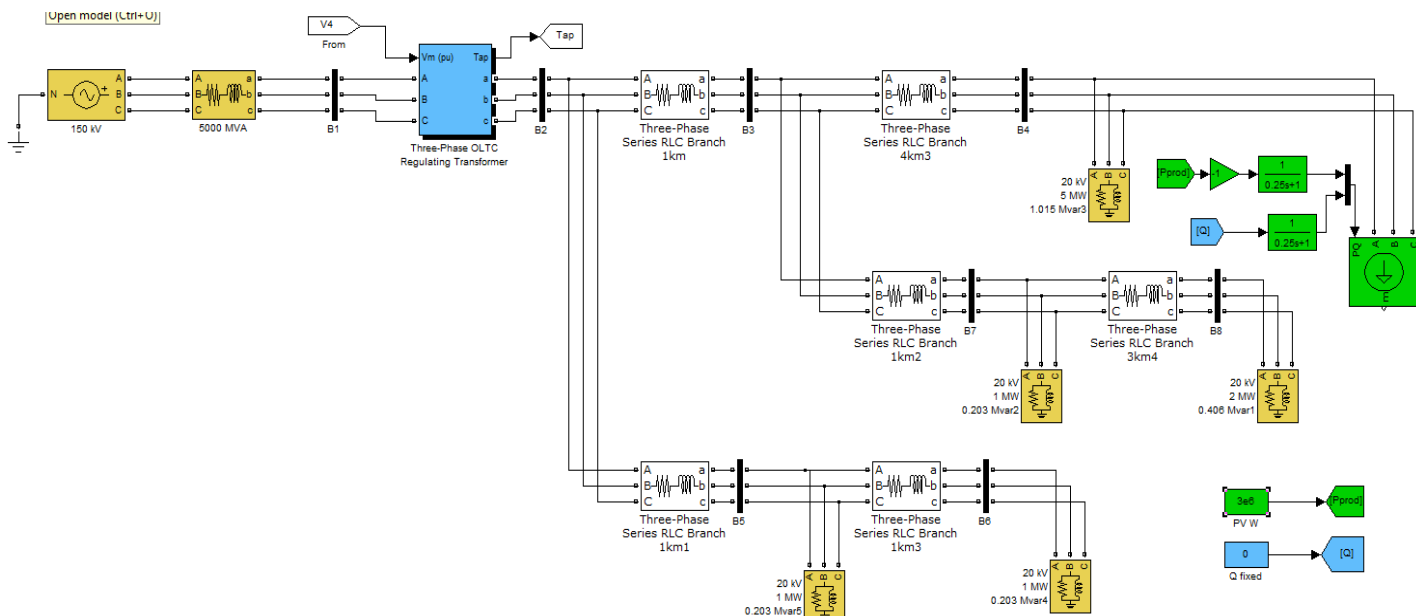


Διάγραμμα 40: Τάση της κύριας γραμμής διανομής πραγματική και υπολογισμένη μέσω της μεθόδου LDC και της αναλογίας φορτίων

Παρατηρούμε ότι χρειάστηκαν δύο αλλαγές λήψης για να βρεθεί η τάση στο άκρο της κύριας γραμμής διανομής σε επιθυμητά όρια λειτουργίας. Τελικά η τιμή της μετρούμενης τάσης είναι:  $V_4 = 0,9737\alpha\mu$ , ενώ η υπολογισμένη από τον αλγόριθμό μας τάση είναι:  $V_{4calc} = 0,9732\alpha\mu$  που δίνει απόκλιση  $-0,05\%$ . Συνεπώς ο αλγόριθμός μας καθώς και ο Μ/Σ ΣΑΤΥΦ λειτουργήσε σωστά.

Στην επόμενη προσομοίωση παίρνουμε ακριβώς το παραπάνω δίκτυο βάζοντάς του παραγωγή ισχύος από Φ/Β (Εικόνα 4.9). Αξίζει να σημειώσουμε εδώ ότι θα δούμε πάλι τις τρεις περιπτώσεις όπου:

- $P_G \leq P_L$
- $P_L < P_G \leq P_{tot}$
- $P_G > P_{tot}$



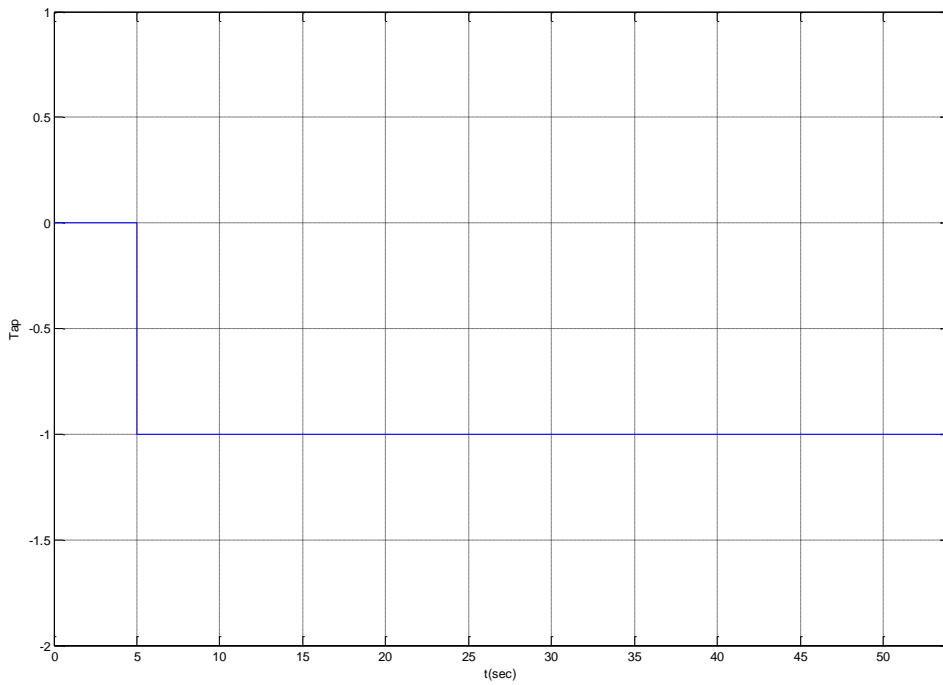
Εικόνα 4.9: Δίκτυο με 1 κύρια γραμμή διανομής και 2 γραμμές ακόμα (ACSR 3x95) πάνω στην κύρια με διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Φ/Β παραγωγής

Παίρνουμε την πρώτη περίπτωση όπου  $P_G \leq P_L$  και βάζουμε παραγωγή φωτοβολταϊκών ίση με 3MW. Ο παραπάνω αλγόριθμος υπολογισμού τάσης πρέπει πάλι να αλλάξει εφόσον δεν βλέπει σωστό ρεύμα και υπολογίζει μεγαλύτερη πτώση τάσης από την πραγματική. Ο καινούριος αλγόριθμος θα είναι:

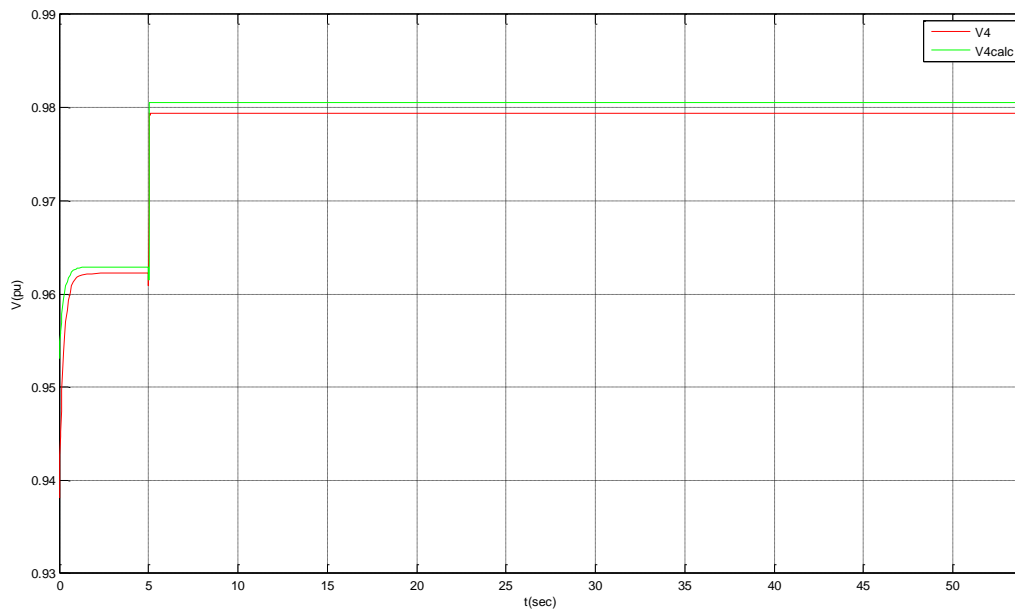
$$V_{calc} = V_{r_{oltc}} - z * \frac{P_{dem1}}{P_{tot}} * I_{r_{oltc}} * L1 - \frac{P_{dem2}}{P_{tot}} * L2 * I_{r_{oltc}}$$

ο οποίος είναι ίδιος με τον προηγούμενο με τη διαφορά ότι τα  $P_{dem}$  περιλαμβάνουν με αρνητικό πρόσημο την ισχύ παραγωγής σε κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.





Διάγραμμα 41: Λήψη του ΣΑΤΥΦ σε δίκτυο με 1 κύρια γραμμή διανομής και 2 γραμμές ακόμα (ACSR 3x95) πάνω στην κύρια με διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Φ/Β παραγωγής 3MW



Διάγραμμα 42: Τάση της κύριας γραμμής διανομής πραγματική και υπολογισμένη μέσω της μεθόδου LDC και της αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 3MW

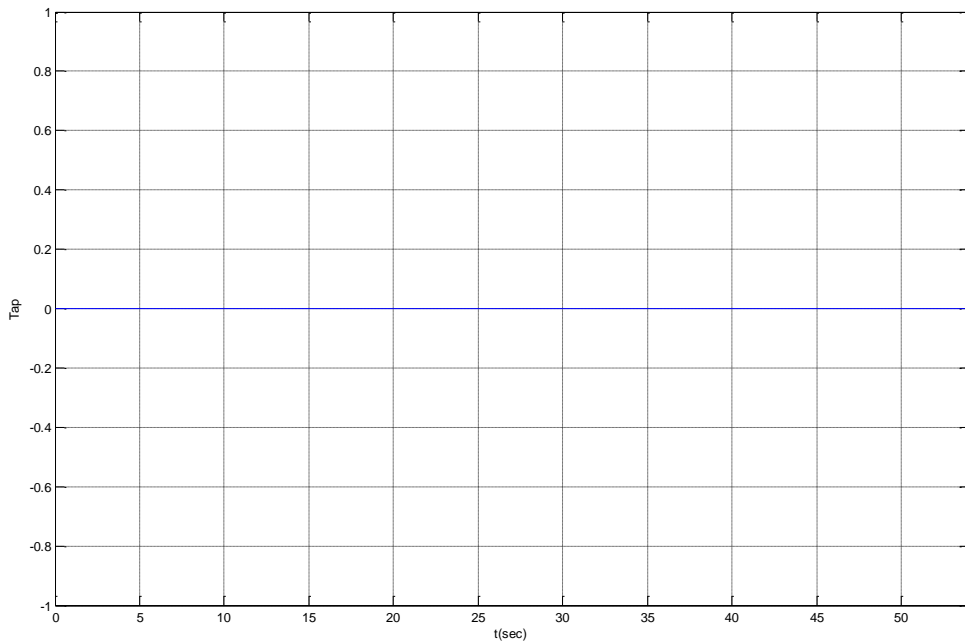
Στην παραπάνω περίπτωση δεν υπάρχει καμία διαφορά σε σχέση με την απλή περίπτωση όπου δεν υπάρχει παραγωγή ισχύος πέραν του τρόπου που υπολογίζουμε την ολική ισχύ κατανάλωσης πλέον ή την ισχύ κατανάλωσης της κύριας γραμμής στις οποίες πρέπει να συνυπολογίσουμε την παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά. Μόνο έτσι θα βρούμε σωστές αναλογίες φορτίων και συνεπώς σωστά ρεύματα που διαρρέουν τις γραμμές και συνεπώς σωστή πτώση τάση στον αλγόριθμο LDC.

Στις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε μία αλλαγή λήψης του ΣΑΤΥΦ για να ανυψώσει την τάση στο ΣΚΣ η οποία είχε βγει εκτός ορίων. Ο αλγόριθμος λειτούργησε και εδώ με αρκετά μικρή απόκλιση εφόσον η τάση στο ΣΚΣ είναι:  $V_4 = 0,9794\text{αμ}$ , ενώ η υπολογισμένη από τον αλγόριθμό μας τάση είναι:  $V_{4\text{calc}} = 0,9807\text{αμ}$  που δίνει απόκλιση 0,13%.

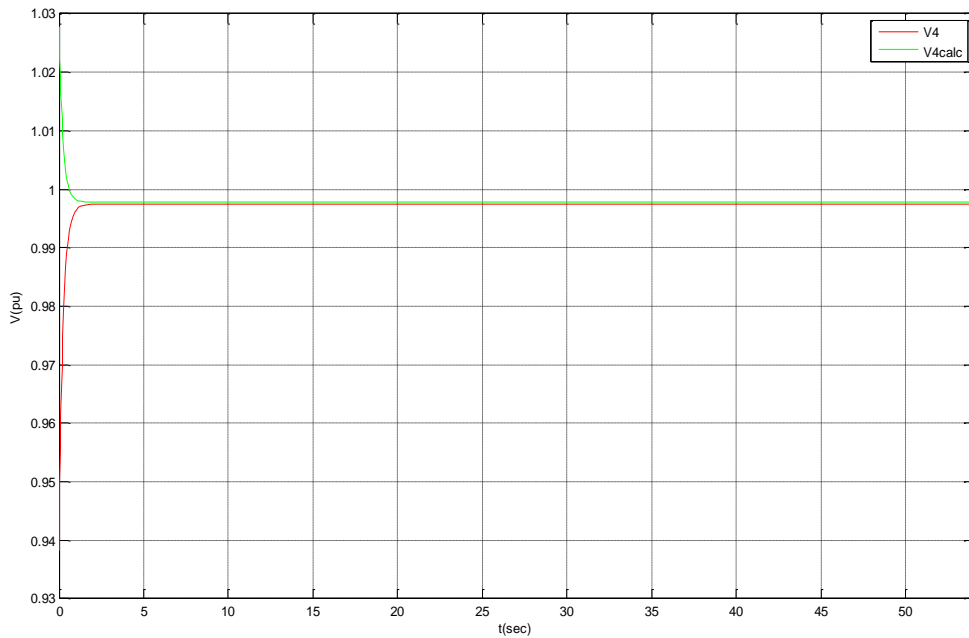
Συνεχίζουμε την προσομοίωση βάζοντας 8MW παραγωγή ισχύος που είναι μεγαλύτερη από τα 5MW της κύριας γραμμής αλλά μικρότερη από τα 10MW ολόκληρης της κατανάλωσης του δικτύου για να δούμε τη δεύτερη περίπτωση. Εδώ υπήρχαν αρκετά προβλήματα στην εύρεση αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί. Πράγματι, ο αλγόριθμος γίνεται πολύ περίπλοκος λόγω των πολλών υποπεριπτώσεων που μπορεί να υπάρξουν σύμφωνα με τη σχέση παραγωγής και κατανάλωσης. Στην περίπτωση των 8MW παραγωγής με ίδιο δίκτυο όπως παραπάνω ο αλγόριθμός μας γίνεται:

$$V_{\text{calc}} = V_{r_{\text{oltc}}} + Z * \frac{P_{\text{pr}} + P_{\text{load}} + P_{\text{load3}}}{P_{\text{pr}} + P_{\text{load}}} * \frac{P_{\text{dem}} + P_{\text{load3}}}{P_{\text{dem}} + P_{\text{load2}} + P_{\text{load3}}} * L2 * \\ I_{r_{\text{oltc}}} + Z * \frac{P_{\text{dem}} - P_{\text{load3}}}{P_{\text{dem}} - P_{\text{load3}} + P_{\text{load2}}} * \frac{P_{\text{dem}} + P_{\text{load3}}}{P_{\text{dem}} + P_{\text{load2}} + P_{\text{load3}}} * L1 * I_{r_{\text{oltc}}}$$

όπου  $P_{\text{dem}}$  είναι η διαφορά της παραγωγής με την κατανάλωση στο ΣΚΣ,  $P_{\text{load}}$  είναι το η ισχύς του φορτίου στο ΣΚΣ,  $P_{\text{load2}}$  είναι η συνολική ισχύς της γραμμής διανομής 2,  $P_{\text{load3}}$  είναι η συνολική ισχύς της γραμμής διανομής 3 και  $P_{\text{pr}}$  είναι η ισχύς παραγωγής των Φ/Β. Έτσι έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα στα οποία πάλι δεν υπήρχε κάποια αλλαγή λήψης από τον Μ/Σ ΣΑΤΥΦ και η μετρούμενη και υπολογισμένη τάση έχουν τιμές  $V_4 = 0,9974\text{αμ}$  και  $V_{4\text{calc}} = 0,9978\text{αμ}$  αντίστοιχα που δίνει απόκλιση 0,04% κάτι που σημαίνει πως ο αλγόριθμος δούλεψε σωστά. Παρατηρήθηκε και σε αυτή την περίπτωση ότι οι τάσεις στα άκρα των υπόλοιπων γραμμών διανομής ήταν και αυτές εντός ορίων οπότε δεν χρειάζεται να κάνουμε κάποια άλλη ρύθμιση στον αλγόριθμό μας. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα της περίπτωσης αυτής.



Διάγραμμα 43: Λήψη του ΣΑΤΥΦ σε δίκτυο με 1 κύρια γραμμή διανομής και 2 γραμμές ακόμα (ACSR 3x95) πάνω στην κύρια με διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Φ/Β παραγωγής 8MW



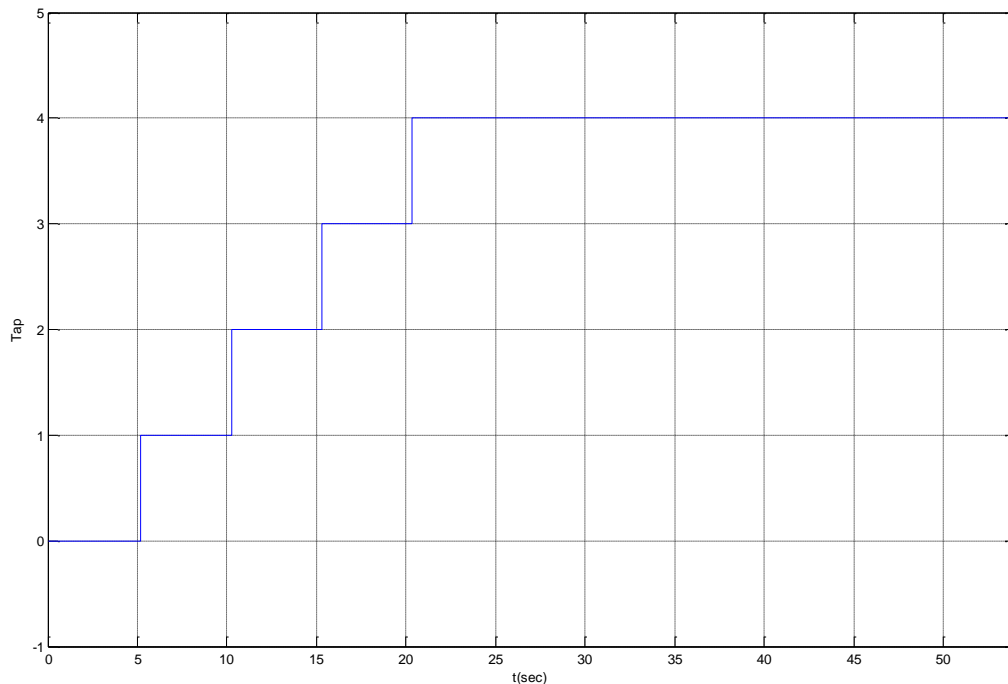
Διάγραμμα 44: Τάση της κύριας γραμμής διανομής πραγματική και υπολογισμένη μέσω της μεθόδου LDC και της αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 8MW

Τέλος, βάζουμε στο παραπάνω δίκτυο Φ/Β ισχύ μεγαλύτερη από την ολική κατανάλωση στα φορτία. Στην προσομοίωση αυτή βάλουμε Φ/Β παραγωγή 25MW. Εδώ πάλι θα αλλάξει ο αλγόριθμος διότι έχουμε περίσσεια ισχύος ουσιαστικά 15MW η οποία επιστρέφει μέσω του Μ/Σ πίσω στο δίκτυο. Ο καινούργιος αλγόριθμος δίνεται από τον τύπο:

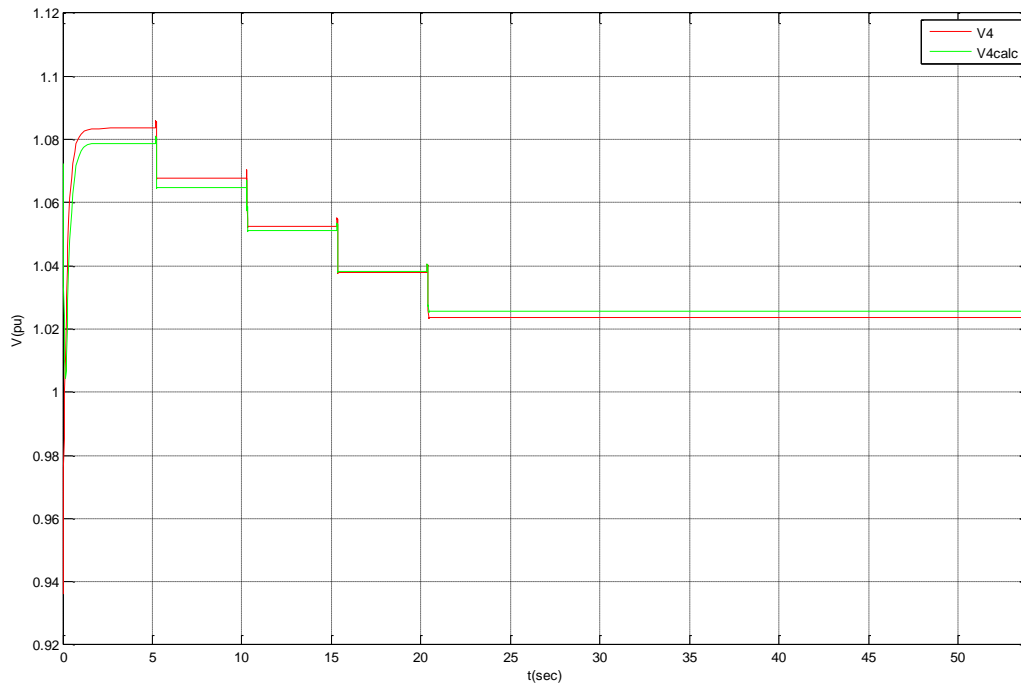
$$V_{calc} = V_{r_{oltc}} + z * \frac{P_{dem} - P_{load2} - P_{load3}}{P_{pr}} * \frac{P_{dem} - P_{load3} + P_{load2}}{P_{dem}} * L1 * I_{r_{oltc}} + z * \frac{P_{pr}}{P_{pr} + P_{load1}} * \frac{P_{dem}}{P_{dem} - P_{load3}} * \frac{P_{dem} - P_{load3} + P_{load2}}{P_{dem} - P_{load3}} * L2 * I_{r_{oltc}}$$

το οποίο έπειτα από απλοποιήσεις γίνεται:

$$V_{calc} = V_{r_{oltc}} + z * \frac{P_{dem} - P_{load2} - P_{load3}}{P_{dem} - P_{load3}} * L1 * I_{r_{oltc}} + z * \frac{P_{pr}}{P_{pr} + P_{load1}} * \frac{P_{dem}}{P_{dem} - P_{load3}} * \frac{P_{dem} - P_{load3} + P_{load2}}{P_{dem} - P_{load3}} * L2 * I_{r_{oltc}}$$

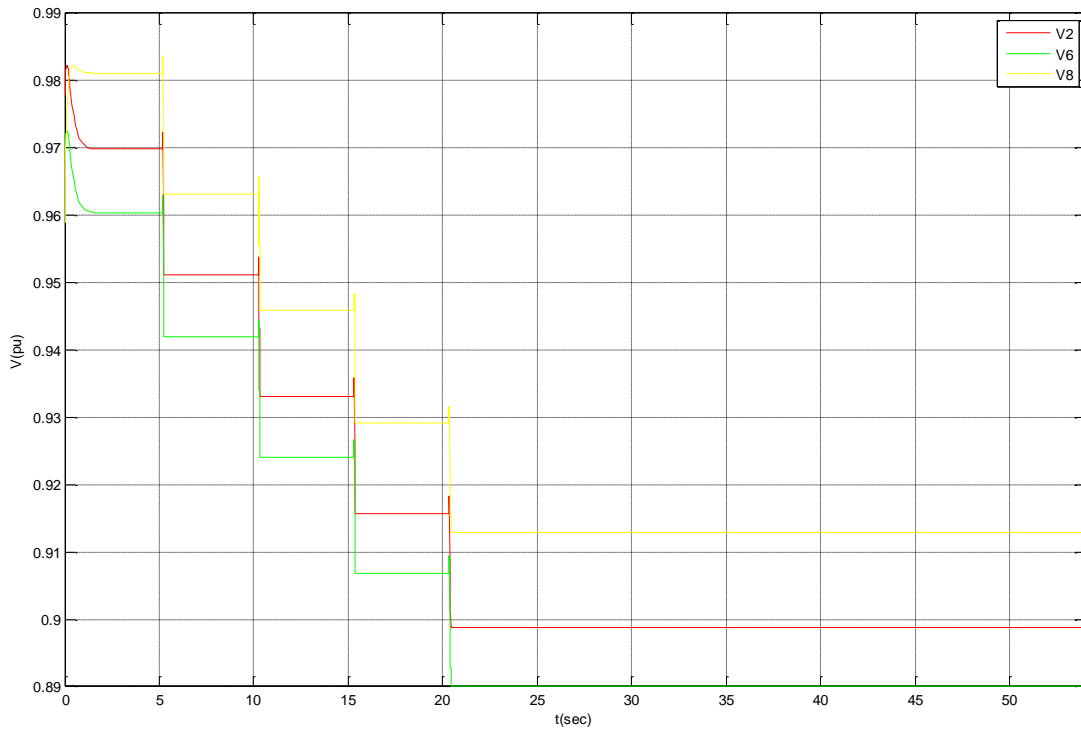


Διάγραμμα 45: Λήψη του ΣΑΤΥΦ σε δίκτυο με 1 κύρια γραμμή διανομής και 2 γραμμές ακόμα (ACSR 3x95) πάνω στην κύρια με διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Φ/Β παραγωγής 25MW



Διάγραμμα 46: Τάση της κύριας γραμμής διανομής πραγματική και υπολογισμένη μέσω της μεθόδου LDC και της αναλογίας φορτίων παρουσία Φ/Β παραγωγής 25MW

Στα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι και πάλι ο αλγόριθμός μας δούλεψε όπως θα έπρεπε με τάσεις  $V_4 = 1,024$ αμ και  $V_{4calc} = 1,026$ αμ που δίνει απόκλιση 0,19%. Το ΣΑΤΥΦ έκανε τέσσερις αλλαγές λήψης για να αντιμετωπίσει την ανύψωση στο ΣΚΣ και τα κατάφερε να την φέρει σε επιτρεπτά όρια. Αυτό όμως που παρατηρήθηκε εδώ όπως και σε παραπάνω περίπτωση τριών γραμμών διανομής παράλληλα συνδεδεμένων είναι οτι έχουν πέσει εκτός ορίων οι τάσεις στις υπόλοιπες δύο γραμμές διανομής κάτι το οποίο πρέπει να αποφευχθεί.



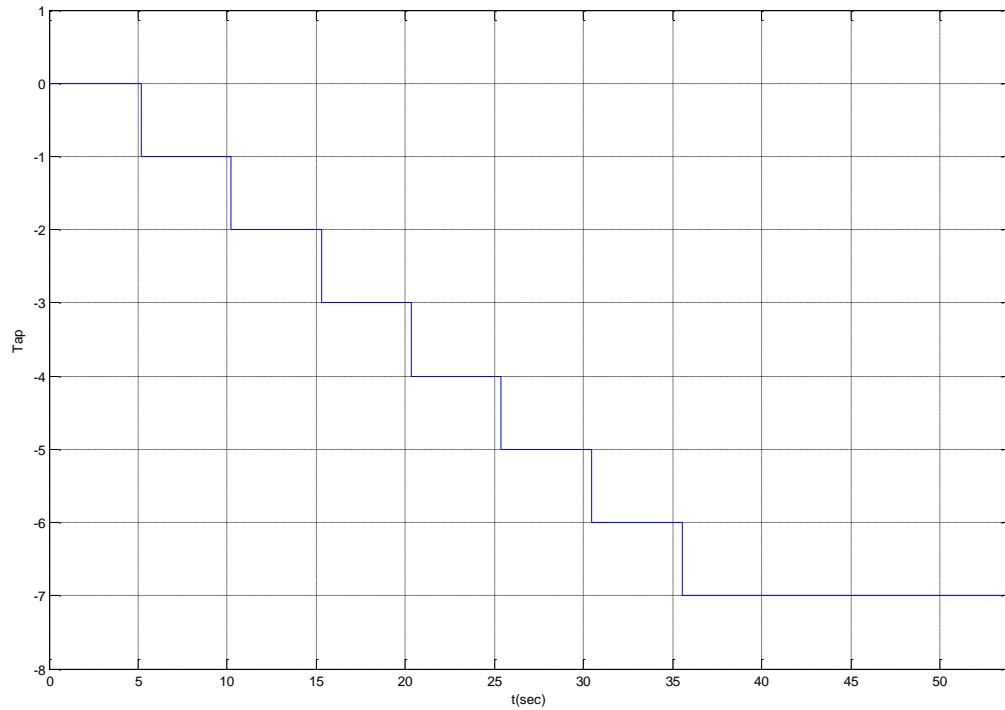
Διάγραμμα 47: Υπόλοιπες μετρούμενες τάσεις των ζυγών στα άκρα της κάθε γραμμής διανομής και στο δευτερεύον του ΣΑΤΥΦ παρουσία Φ/Β παραγωγής 25MW μόνο με χρήση LDC μεθόδου μας

Για να το ρυθμίσουμε αυτό πάλι θα καταφύγουμε στην εισαγωγή αέργου ισχύος μέσω των αντιστροφένων μέσω droop control για στήριξη της τάσης ενώ το ΣΑΤΥΦ θα επιστρατευθεί να κάνει ρύθμιση τάσης στο ζυγό της γραμμής με την τάση η οποία βρίσκεται περισσότερο εκτός ορίων δηλαδή στην περίπτωση μας τον ζυγό 6. Με τις παραπάνω ρυθμίσεις και βάζοντας στους αντιστροφείς  $\cos\phi_{lim} = 0.85$  ώστε να έχουμε ακόμα μεγαλύτερη παραγωγή αέργου ισχύος από αυτούς έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα στα οποία παρατηρούμε ότι με επτά αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ και δίνοντας  $Q = 13,8MVar$  άεργο ισχύ οι αντιστροφείς στο δίκτυο όλες οι τάσεις τέθηκαν εντός επιτρεπτών ορίων με την τάση στο ΣΚΣ να είχε τελική τιμή  $V_4 = 1,027\alpha\mu$ . Οι υπόλοιπες τάσεις έχουν τιμές:  $V_2 = 0,9843\alpha\mu$   $V_6 = 0,9762\alpha\mu$   $V_8 = 0,982\alpha\mu$  ενώ η υπολογιστική τιμή της τάσης στο ζυγό 6 μέσω του νέου αλγορίθμου έχει τιμή  $V_{6calc} = 0,9758\alpha\mu$  με απόκλιση  $-0,04\%$  από την μετρούμενη. Ο νέος αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για το ζυγό 6 είναι:

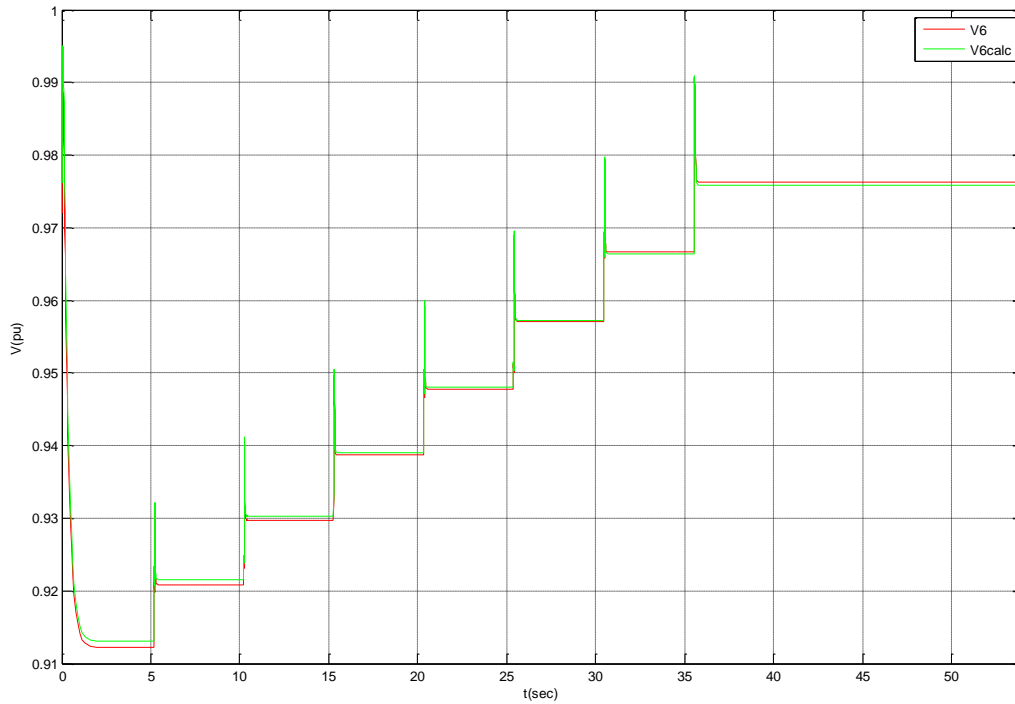
$$V_{calc} = V_{r_{oltc}} - \frac{z}{2} * \frac{P_{load3}}{P_{dem} - P_{load2} + P_{load3}} * \left( \frac{P_{load6}}{P_{load3}} + 1 \right) * L_4 * I_{r_{oltc}}$$

όπου  $P_{load6}$  είναι η ισχύς κατανάλωσης στο ζυγό 6 και  $L_4$  το μήκος της δεύτερης γραμμής διανομής στην οποία και ψάχνουμε την πτώση τάσης πλέον. Παρατηρούμε ότι ο παραπάνω τύπος είναι ένας συνδυασμός της γραμμικής προσέγγισης πτώσης τάσης σε μία γραμμή διανομής με διαμοιρασμένο φορτίο και αναλογίας ισχύων παραγωγής και κατανάλωσης για

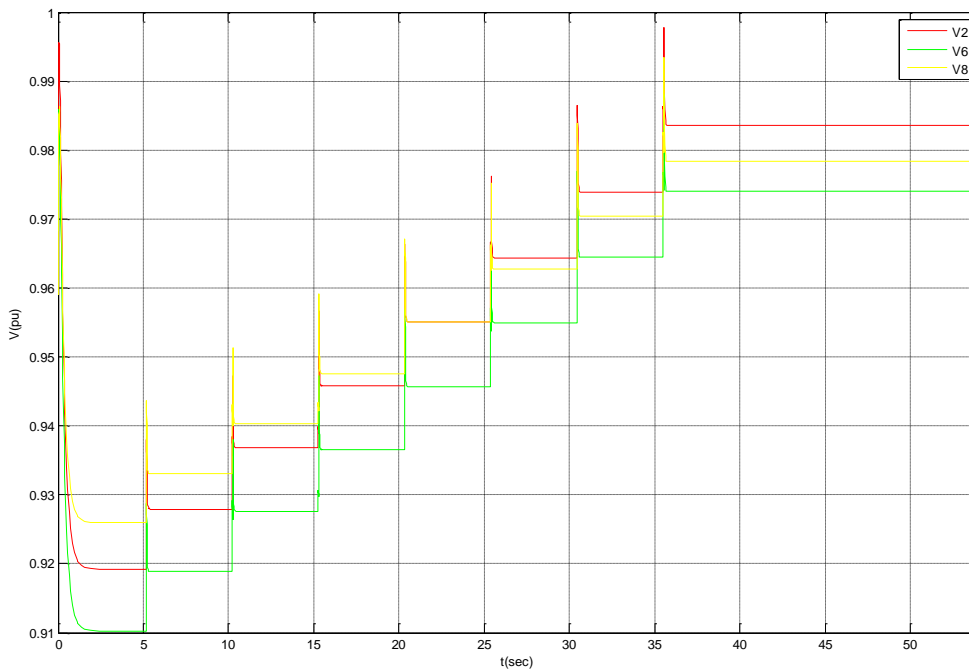
σωστή εύρεση του ρεύματος που διαπερνά τη γραμμή διανομής της οποία αναζητούμε την πτώση τάσης.



Διάγραμμα 48: Λήψη του ΣΑΤΥΦ σε περίπτωση 1 κύριας γραμμής διανομής και 2 ακόμα δευτερεύουσες (ACSR 3x35) παρουσία Φ/Β παραγωγής 25MW όταν υπάρχει συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και Droop Control.

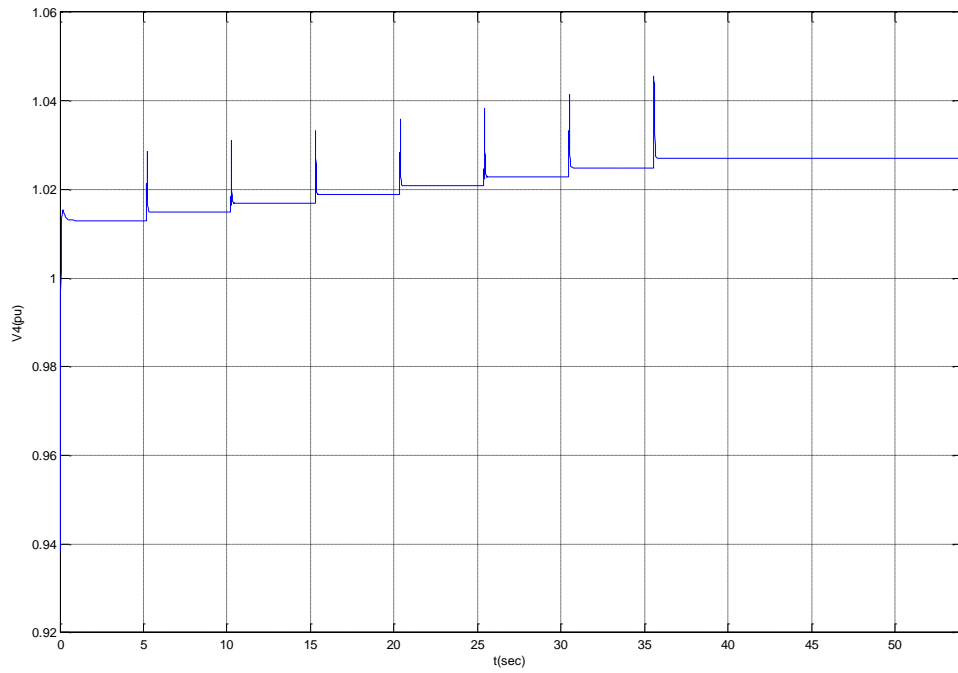


Διάγραμμα 49: Τάση της γραμμής διανομής που έχει τη μεγαλύτερη πτώση τάσης (ζυγός 6) και ρύθμιση αυτής μέσω του ΣΑΤΥΦ με LDC μέθοδο (συνεργασία ΣΑΤΥΦ και Droop Control)

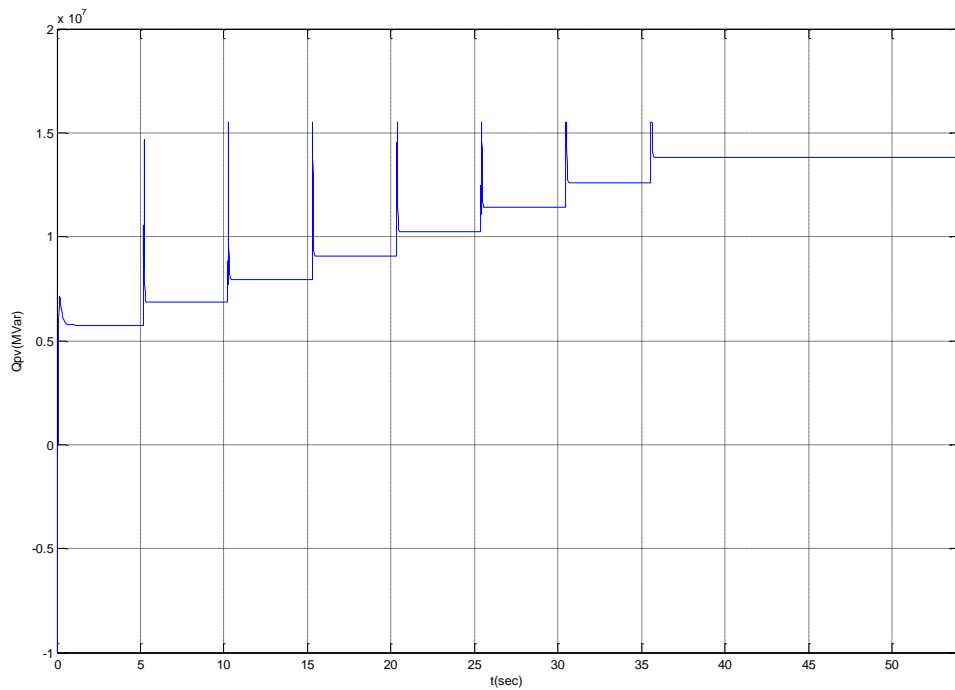


Διάγραμμα 50: Υπόλοιπες τάσεις που εισέρχονται εντός ορίων λειτουργίας κατά τη διάρκεια συνεργασίας ΣΑΤΥΦ και Droop Control





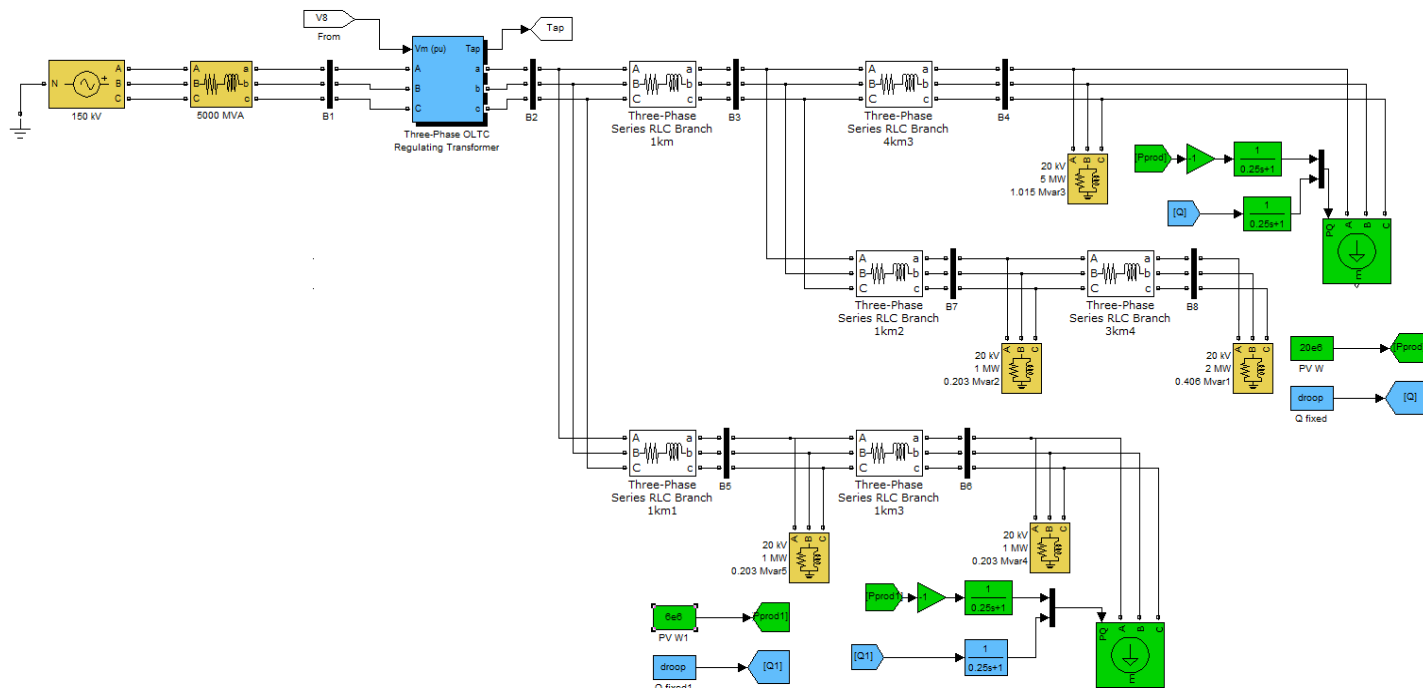
Διάγραμμα 51: Τάση στο ΣΚΣ κατά για την οποία μόνο υπεύθυνη είναι η Droop Control



Διάγραμμα 52: Απορροφούμενη άεργος ισχύς των αντιστροφών των Φ/Β ώστε η τάση στο ΣΚΣ (ζυγός 4) να παραμείνει εντός ορίων λειτουργίας

Όσο για την τάση στο άκρο του ΣΚΣ βλέπουμε ότι προφανώς επηρεάζεται από τις αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ και οδεύει στο να βγει εκτός ορίων τάσης αλλά η συνεχής παροχή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς την κρατάει εντός επιθυμητών ορίων. Συνεπώς, η συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και έγχυσης αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή, δουλεύει επίσης πολύ καλά και σε παράλληλα συνδεδεμένες γραμμές διανομής με διαμοιρασμένο φορτίο σε όλο τους το μήκος για την παροχή στήριξης τάσης στο δίκτυο.

Μία τελευταία περίπτωση ακόμα πιο περίπλοκη προς εξέταση είναι τρεις γραμμές διανομής με διαμοιρασμένο φορτίο στο μήκος τους και παραπάνω από μία παραγωγές ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β. Μία παραγωγή Φ/Β μπαίνει στην κύρια γραμμή και μία ακόμα σε μία από τις άλλες δύο δευτερεύουσες γραμμές. Δεν έχει μεγάλη διαφορά στον τρόπο χειρισμού του σε σχέση με τις παραπάνω περιπτώσεις. Παίρνουμε λοιπόν το άνωθεν δίκτυο της τελευταίας περίπτωσης που μελετήσαμε με τα ίδια χαρακτηριστικά γραμμών διανομής σε τιμές και μήκη και ίδιες τιμές φορτίων κατανάλωσης στις αντίστοιχες γραμμές διανομής (Εικόνα 4.10).



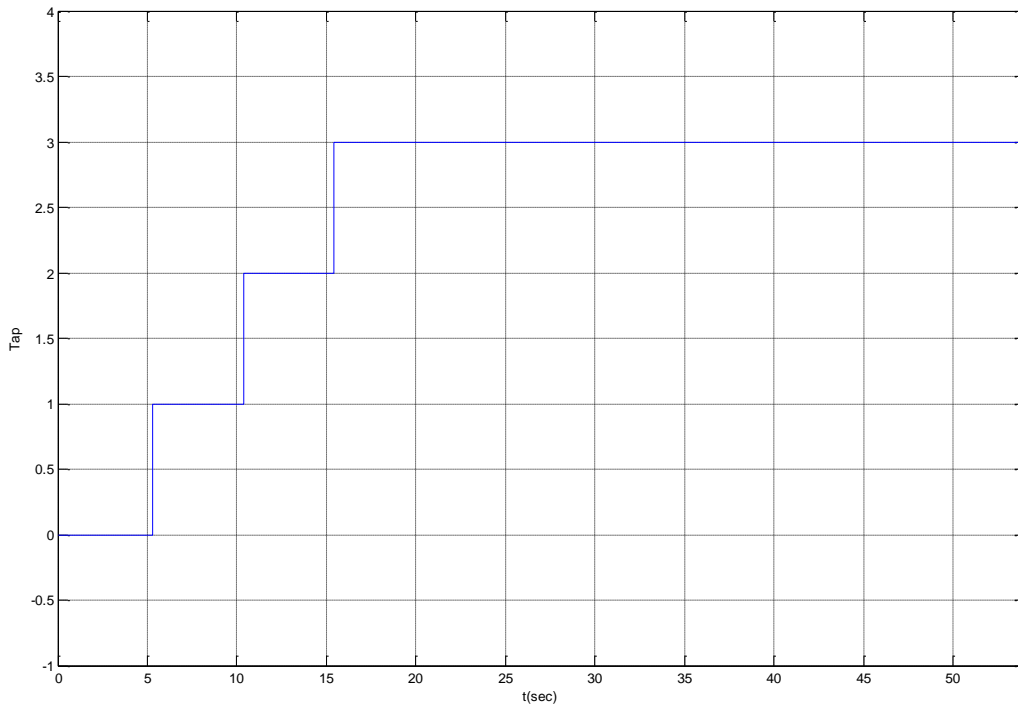
Εικόνα 4.10: Δίκτυο με 1 κύρια γραμμή διανομής και 2 γραμμές ακόμα (ACSR 3x95) πάνω στην κύρια με διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Φ/Β παραγωγής σε παραπάνω από μία γραμμή διανομής

Παίρνουμε μία δυσμενή περίπτωση για να δούμε τους χειρισμούς του ΣΑΤΥΦ αν τον βάλουμε να κάνει ρύθμιση τάσης στον απομακρυσμένο ζυγό της κύριας γραμμής. Στην κύρια γραμμή βάζουμε παραγωγή Φ/Β 20MW που ουσιαστικά είναι 400% διεύδυση ισχύος σε σχέση με το φορτίο κατανάλωσης και στη δεύτερη γραμμή διανομής στο ζυγό 6 βάζουμε ισχύ Φ/Β 6MW δηλαδή 300% διεύδυση σε σχέση με το φορτίο κατανάλωσης στον αντίστοιχο ζυγό. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούμε είναι ο εξής για το ζυγό της κύριας γραμμής:

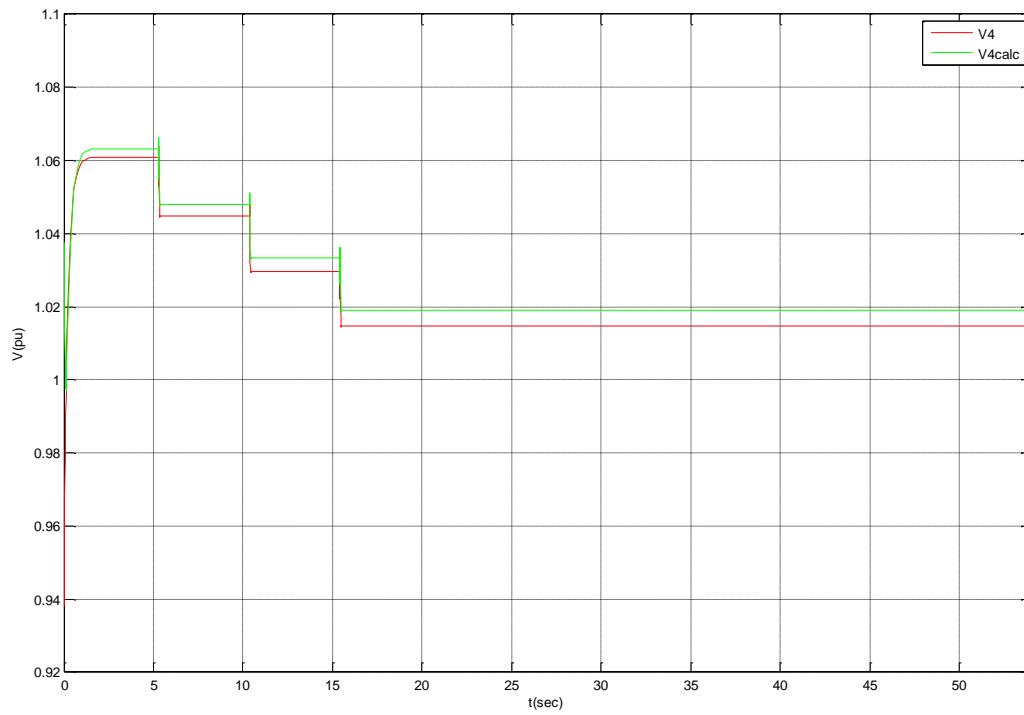
$$V_{calc} = V_{r_{oltc}} + z * \frac{P_{dem} - P_{load3}}{P_{dem} - P_{load3} + P_{dem2}} * \frac{P_{pr}}{P_{pr} + P_{load1}} * \frac{P_{dem} + P_{load3}}{P_{dem}} * L2$$

$$* I_{r_{oltc}} + z * \frac{P_{dem1}}{P_{dem1} + P_{dem2}} * \frac{P_{dem}}{P_{dem} + P_{load3}} * L1 * I_{r_{oltc}}$$

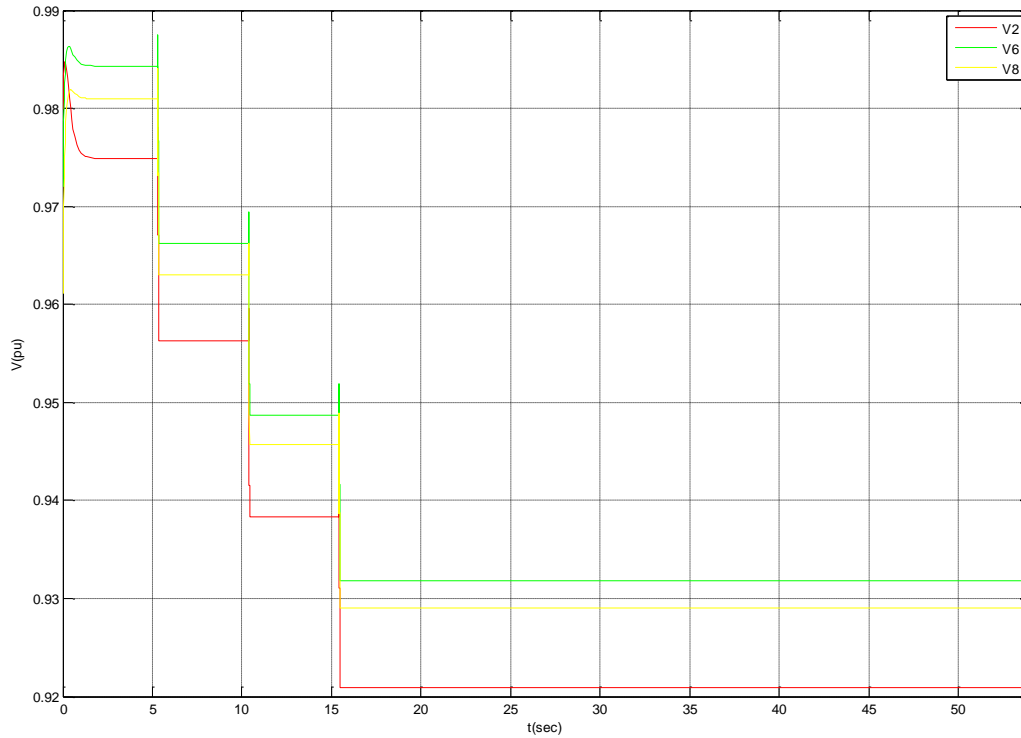
όπου  $P_{dem}$  είναι η διαφορά της παραγωγής από την κατανάλωση στο ΣΚΣ της κύριας γραμμής,  $P_{dem2}$  είναι η διαφορά της παραγωγής από την κατανάλωση στο δεύτερο ΣΚΣ της δευτερεύουσας γραμμής,  $P_{load1}$ ,  $P_{load2}$  και  $P_{load3}$  είναι οι καταναλώσεις φορτίων στις γραμμές 1,2 και 3 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα στα οποία φαίνεται ότι λειτούργησε σωστά ο αλγόριθμος φέρνοντας ο ΣΑΤΥΦ τη τάση στο ΣΚΣ της κύριας γραμμής σε αποδεκτά επίπεδα με τιμές  $V_4 = 1,015\alpha\mu$  και  $V_{4calc} = 1,019$  με απόκλιση 0,4%. Όμως αυτό που έχει σημασία είναι οτι οι υπόλοιπες τάσεις του δικτύου με την τάση και του ΣΑΤΥΦ τέθηκαν τελείως εκτός αποδεκτών ορίων λόγω των τριών αλλαγών λήψεως που έκανε ο Μ/Σ για να διορθώσει την ανύψωση στο ΣΚΣ της κύριας γραμμής διανομής.



Διάγραμμα 53: Λήψη του ΣΑΤΥΦ ώστε να κρατήσει την τάση στο ΣΚΣ της κύριας γραμμής διανομής (ζυγός 4) παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW και 6MW μόνο με τη χρήση της LDC μεθόδου μας



Διάγραμμα 54: Τάση στο ΣΚΣ1 (ζυγός 4) με τη χρήση LDC μεθόδου μας μόνο και παρουσία 20MW στο ΣΚΣ1 και 6MW στο ΣΚΣ2(ζυγός 8)



Διάγραμμα 55: Τάση στους υπόλοιπους ζυγούς που παρατηρούμε ότι μετά τη χρήση της LDC μεθόδου για ρύθμιση στο ΣΚΣ1 (ζυγός 4) βγαίνουν εκτός ορίων

Για να διορθωθεί το πρόβλημα πρέπει να πάρουμε και από τους δύο αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών την άεργο ισχύ που μπορούν να παρέχουν στο δίκτυο για να διορθωθεί η ανύψωση τάσης στα δύο ΣΚΣ ενώ το ΣΑΤΥΦ το δεσμεύουμε να κρατάει σε αποδεκτά όρια την τάση στο ζυγό που δεν υπάρχει Φ/Β παραγωγή δηλαδή στο ζυγό 8. Ο καινούριος αλγόριθμος υπολογισμού της πτώσης τάσης στο ζυγό αυτό γίνεται:

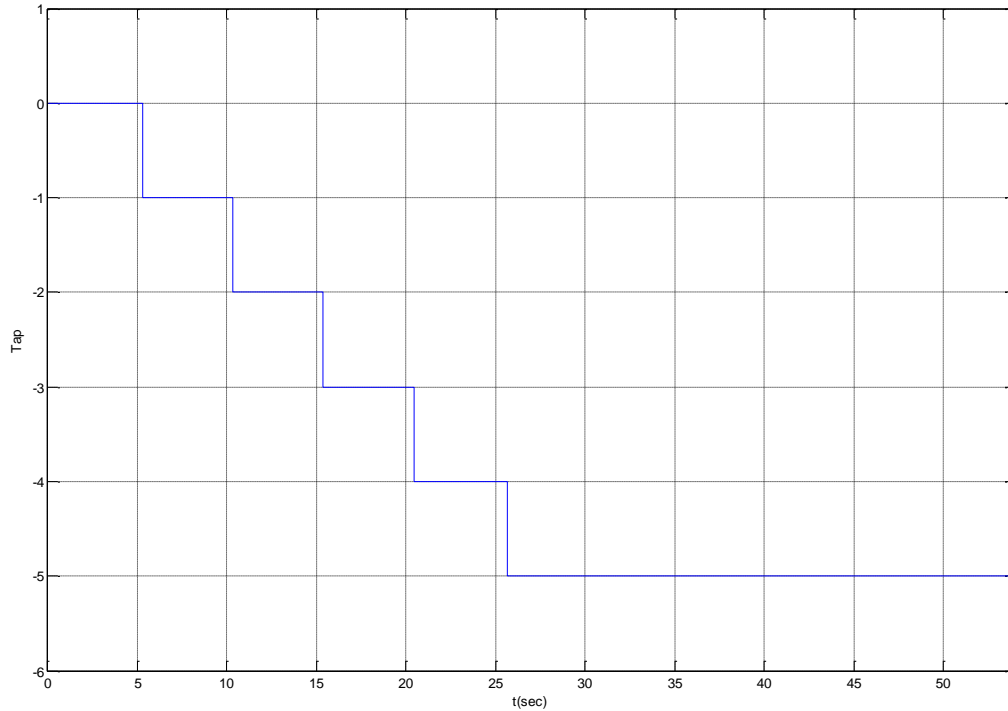
$$V_{calc} = V_{r_{oltc}} + z * \frac{P_{dem} - P_{load3}}{P_{dem} + P_{dem2}} * \frac{P_{load3}}{P_{dem} + P_{load3}} * L1 * I_{r_{oltc}} - \frac{z}{2} * \frac{P_{dem} - P_{load3}}{P_{dem} + P_{dem2}} * \frac{P_{load3}}{P_{dem} + P_{load3}} * \left( \frac{P_{load8}}{P_{load3}} + 1 \right) * L2 * I_{r_{oltc}}$$

όπου  $P_{load8}$  είναι η ισχύς κατανάλωσης του φορτίου στο ζυγό 8.

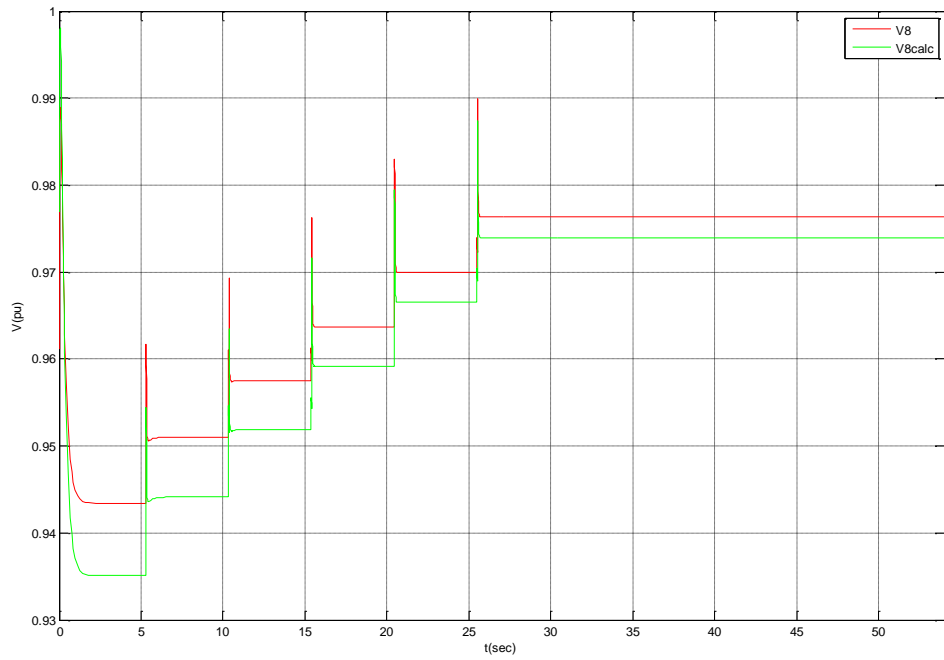
Παρατηρούμε εδώ ότι στον παραπάνω αλγόριθμο βάλामε θετικό πρόσημο για το πρώτο όρο και αρνητικό πρόσημο μετά και ο λόγος είναι διότι ουσιαστικά θέλουμε την τάση στο ζυγό 3 που είναι ο ζυγός που συνδέεται η Τρίτη γραμμή διανομής. Για να μπορέσουμε να βρούμε την τάση στο ζυγό αυτό από την τάση στο δευτερεύον του Μ/Σ θα πρέπει προσθέσουμε τον παραπάνω όρο εφόσον σίγουρα ο ζυγός αυτός θα έχει μεγαλύτερη τάση από το ζυγό του Μ/Σ λόγω της μεγαλύτερης φωτοβολταϊκής παραγωγής της κύριας γραμμής

από τη δευτερεύουσα γραμμή. Έπειτα αφού φτάσουμε στο ζυγό 3 κανονικά αφαιρούμε την πτώση τάσης πάνω στην τρίτη γραμμή διανομής.

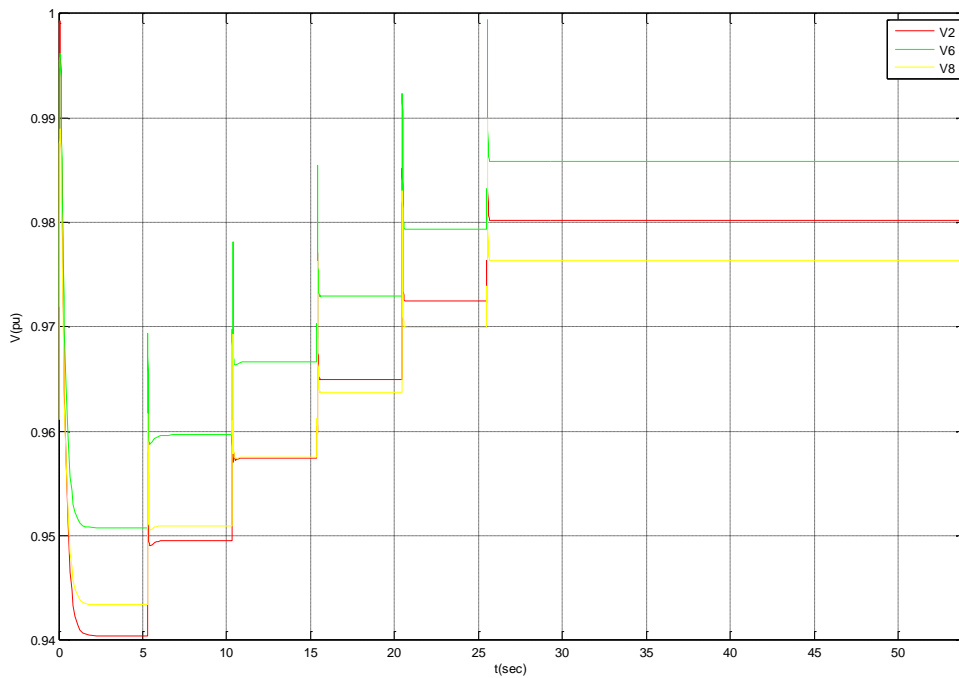
Ακολουθούν τα διαγράμματα με τις καινούριες ρυθμίσεις που έγιναν στο παραπάνω δίκτυο.



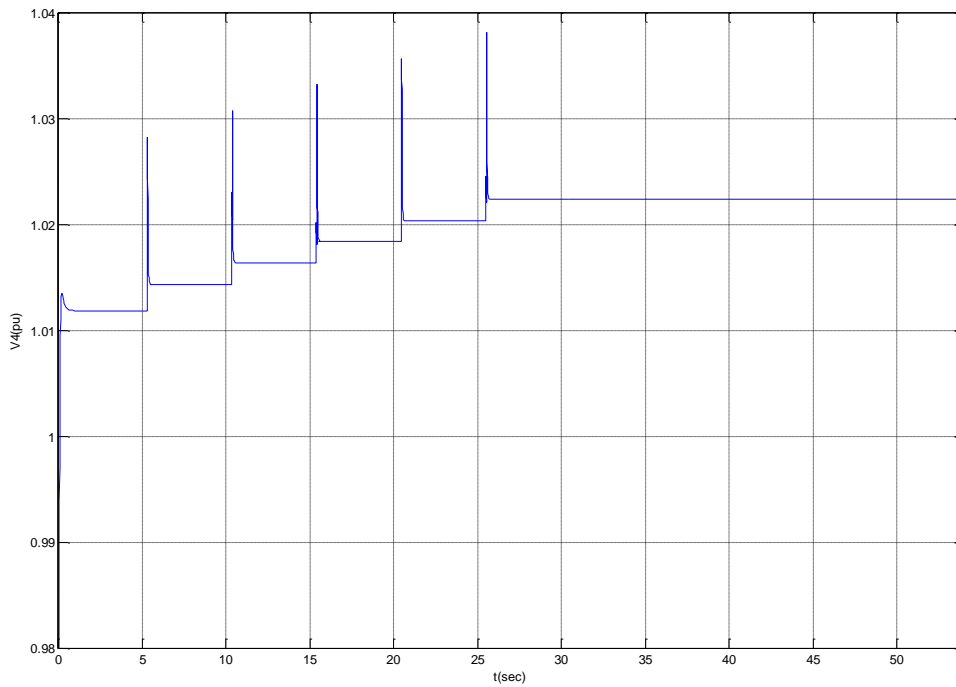
Διάγραμμα 56: Λήψη του ΣΑΤΥΦ ώστε να κρατήσει την τάση στη δευτερεύουσα γραμμή διανομής στην οποία δεν υπάρχει Φ/Β παραγωγή (ζυγός 8) παρουσία Φ/Β παραγωγής 20MW στο ΣΚΣ1 και 6MW στο ΣΚΣ2 με συνεργασία της LDC μεθόδου μας και της Droop Control από πλευράς των Φ/Β αντιστροφών



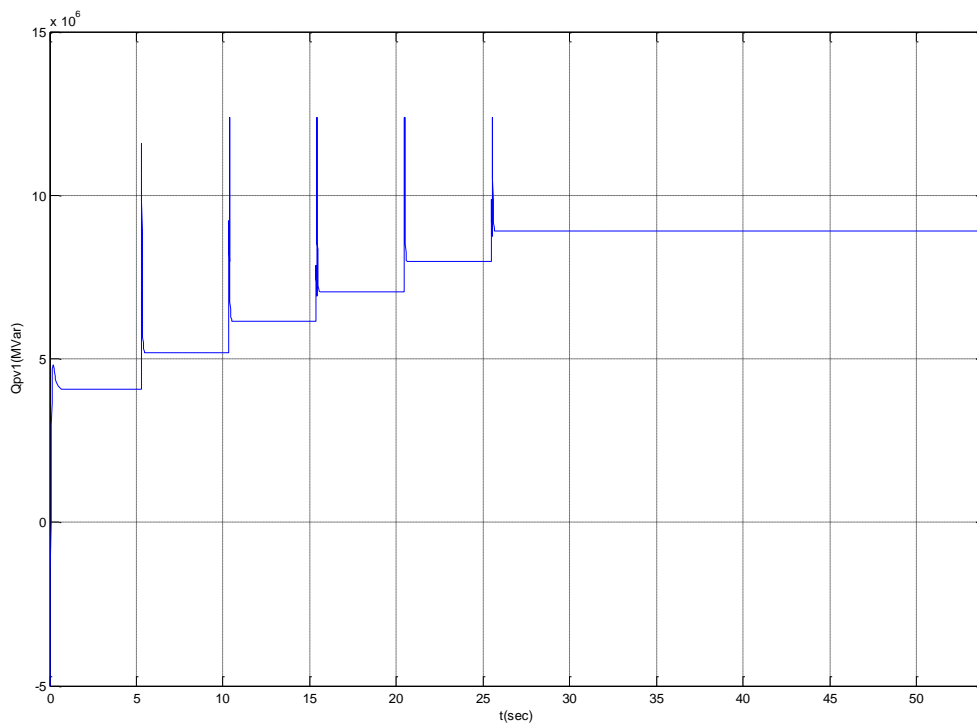
Διάγραμμα 57: Τάση στη δευτερεύουσα γραμμή διανομής που δεν έχει Φ/Β παραγωγή μέσω ρύθμισης από το ΣΑΤΥΦ με χρήση της LDC μεθόδου μας



Διάγραμμα 58: Υπόλοιπες τάσεις δικτύου που παρατηρούμε ότι μπαίνουν όλες εντός ορίων λειτουργίας κατά τη συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και Droop Control στα ΣΚΣ

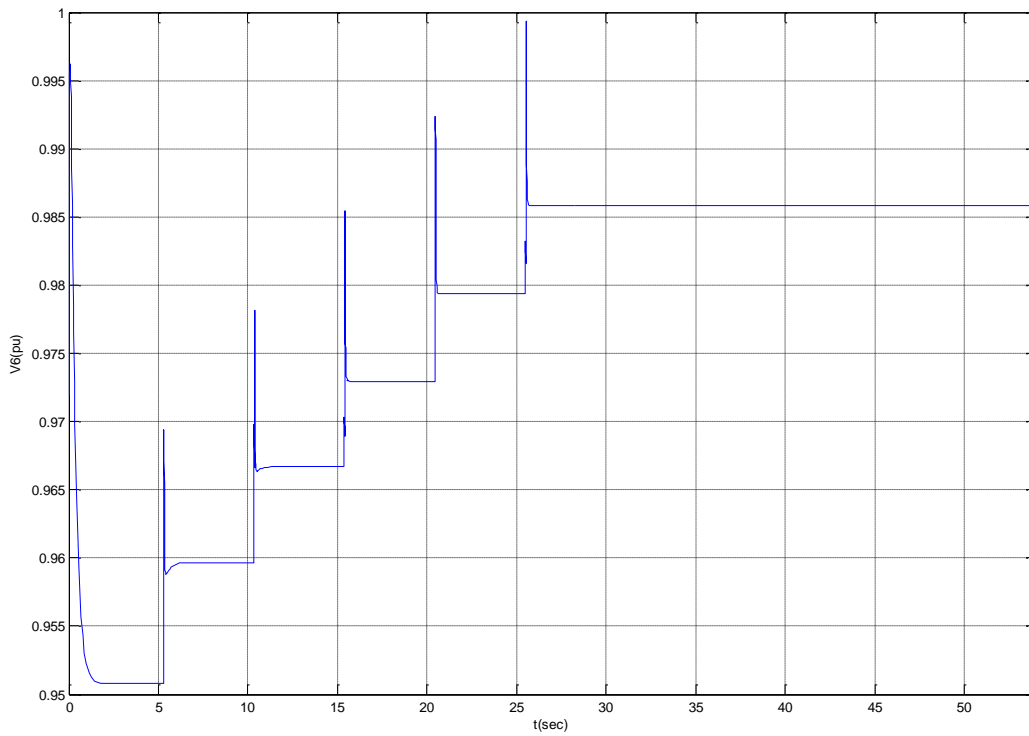


Διάγραμμα 59: Τάση στο ΣΚΣ1 (ζυγός 4) μετά τη ρύθμιση μέσω της Droop Control για απορρόφηση αέργου ισχύος

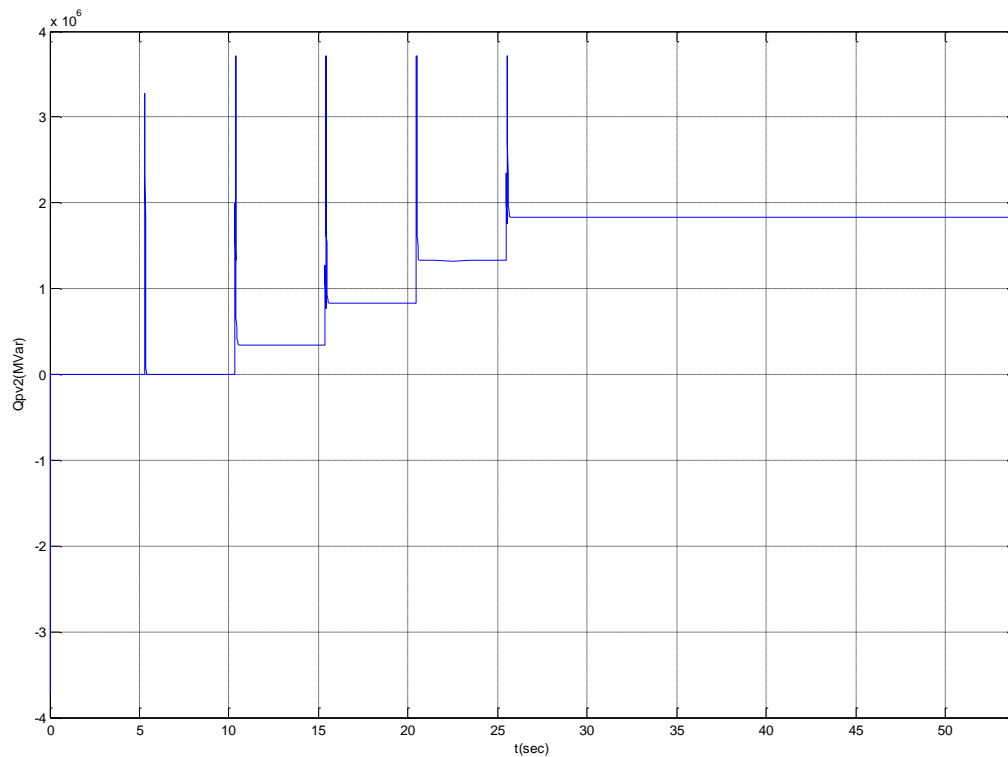


Διάγραμμα 60: Άεργος ισχύς που απορροφάται ώστε να κρατήσει την τάση στο ΣΚΣ1 σε επιτρεπτά όρια





Διάγραμμα 61: Τάση στο ΣΚΣ2 (ζυγός 6) μετά τη ρύθμιση μέσω της Droop Control για απορρόφηση αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των Φ/Β



Διάγραμμα 62: Άεργος ισχύς που απορροφάται από τους αντιστροφείς των Φ/Β ώστε να κρατήσει την τάση στο ΣΚΣ2 (ζυγός 6) σε επιτρεπτά όρια

Για τα παραπάνω διαγράμματα έχουμε τις εξής παρατηρήσεις:

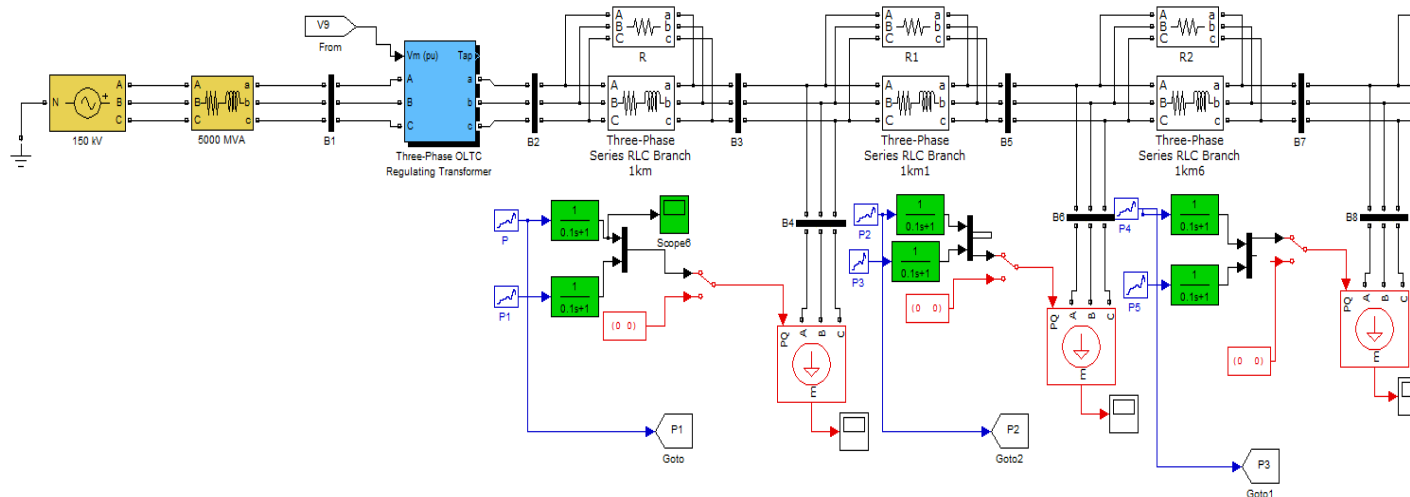
- Χρειάστηκαν 5 αλλαγές λήψης ώστε το ΣΑΤΥΦ να φέρει την τάση του ζυγού που δεν έχει πάνω του φωτοβολταϊκή παραγωγή σε επιτρεπτά όρια. Τελικά η τάση αυτή είχε τιμή  $V_8 = 0,9763\alpha\mu$ . Η υπολογισμένη τάση από τον αλγόριθμο LDC είχε τιμή  $V_{8calc} = 0,9739\alpha\mu$  με απόκλιση  $-0,25\%$  που είναι αρκετά ικανοποιητική.
- Χρειάστηκε ο αντιστροφέας που βρίσκεται στην κύρια γραμμή μεταφοράς να παρέχει τελικά  $Q_{PV1} = 8,9\text{MVar}$  άεργου ισχύος στο δίκτυο ώστε να κρατήσει την τάση του ζυγού εκείνου μέσα σε επιτρεπτά όρια παρόλες τις αλλαγές λήψης του Μ/Σ. Όσο περισσότερο εκτός ορίων τάσης έβγαινε η τάση σε εκείνον το ζυγό τόσο μεγαλύτερη άεργο ισχύ έπρεπε να παρέχει ο αντιστροφέας. Τελικά η τάση είχε τιμή  $V_4 = 1,022\alpha\mu$ .
- Ο αντιστροφέας που βρίσκεται στη δευτερεύουσα γραμμή διανομής έπρεπε με τη σειρά του να παρέχει  $Q_{PV2} = 1,83\text{MVar}$  άεργου ισχύος ώστε η τάση στο ζυγό εκείνο που συνδέεται η δευτερεύουσα φωτοβολταϊκή παραγωγή να μείνει εντός ορίων. Η τάση εκεί μετά από όλες τις ρυθμίσεις είχε τιμή  $V_6 = 0,9858\alpha\mu$
- Όλες οι τάσεις τελικά με τη συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και παροχή άεργου ισχύος μέσω Droop Control τέθηκαν εντός επιτρεπτών ορίων λειτουργίας συμπεριλαμβανομένης και της τάσης στο δευτερεύον του Μ/Σ παρόλο που δεν είναι απαραίτητο όπως έχουμε αναφέρει λόγω της ικανότητας του Μ/Σ να μπορεί να λειτουργήσει σε τόσο χαμηλές τάσεις. Η τάση στο δευτερεύον του Μ/Σ είχε τελικά τάση  $V_2 = 0,9802\alpha\mu$ .

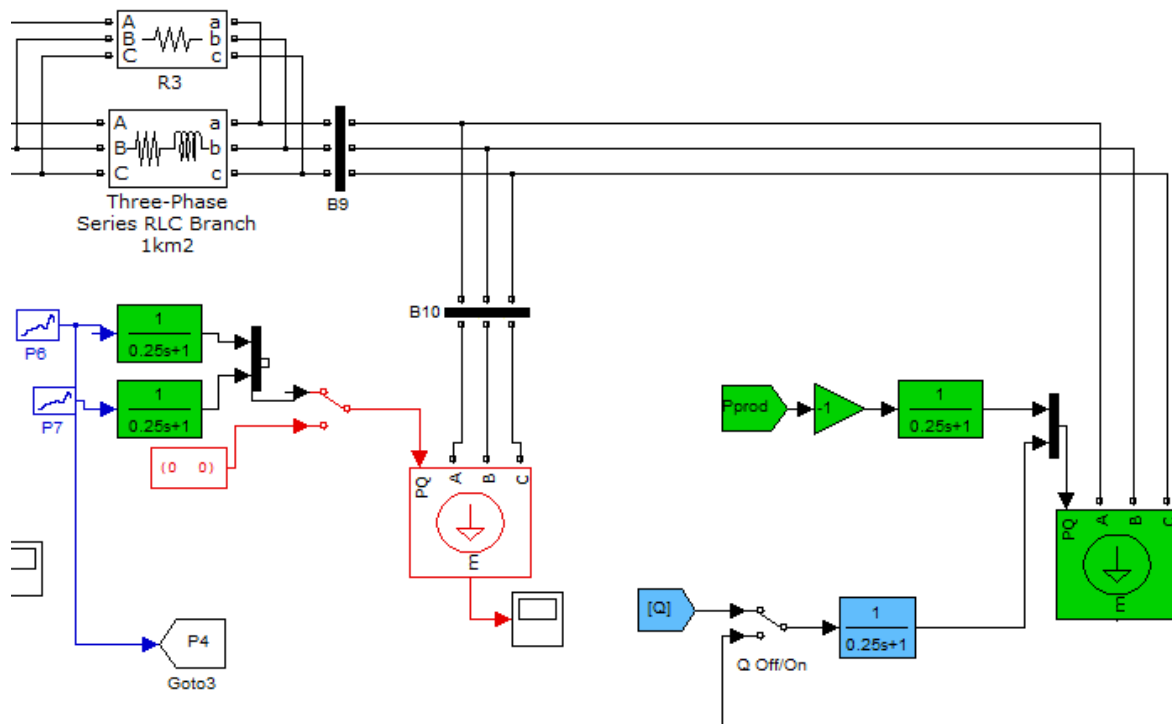
Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις με παραπάνω της μίας γραμμής διανομής μπαίνει και πάλι το ζήτημα της πρακτικής εφαρμογής της μεθόδου σε ένα δίκτυο με πραγματικές τιμές παραγωγής και κατανάλωσης. Για το λόγο αυτό εισήγαμε στο δίκτυο μέσω workspace, πραγματικές τιμές ηλιοφάνειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και κατανάλωσης ενεργού και αέργου ισχύος για τα φορτία αλλά σε μία μόνο γραμμή διανομής.

#### 4.7 Δίκτυο με μία γραμμή διανομής αλλά με τη χρήση χρονοσειρών για φορτία και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο τρόπος λοιπόν επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν μέχρι στιγμής είναι ο συνδυασμός του LDC με τη γραμμική προσέγγιση της δημοσίευσης του άρθρου που παρουσιάστηκε παραπάνω και με τη χρήση αναλογίας φορτίων το οποίο εμπειρικά προήλθε μέσω πολλών δοκιμών και προσομοιώσεων. Ακόμα σε πιο δυσμενείς περιπτώσεις μεγάλης διείδυσης ισχύος από ΔΠ έχουμε επιτυχημένη συνεργασία ΣΑΤΥΦ με LDC και παροχής αέργου ισχύος από τη ΔΠ στο ΣΚΣ. Το επόμενο βήμα στην παραπάνω μέθοδο είναι η αυτοματοποίησή του και ο τρόπος λειτουργίας του σε πραγματικές τιμές κατανάλωσης και παραγωγής κατά τη διάρκεια μίας ημέρας καθώς με ολική γνώση του δικτύου και σταθερές τιμές φορτίων δεν επιτυγχάνουμε κάτι πρακτικό και ουσιαστικό για μία ενδεχόμενη χρήση στο εγγύς μέλλον, απλά αποδεικνύουμε ότι υπάρχει τρόπος να λειτουργήσει.

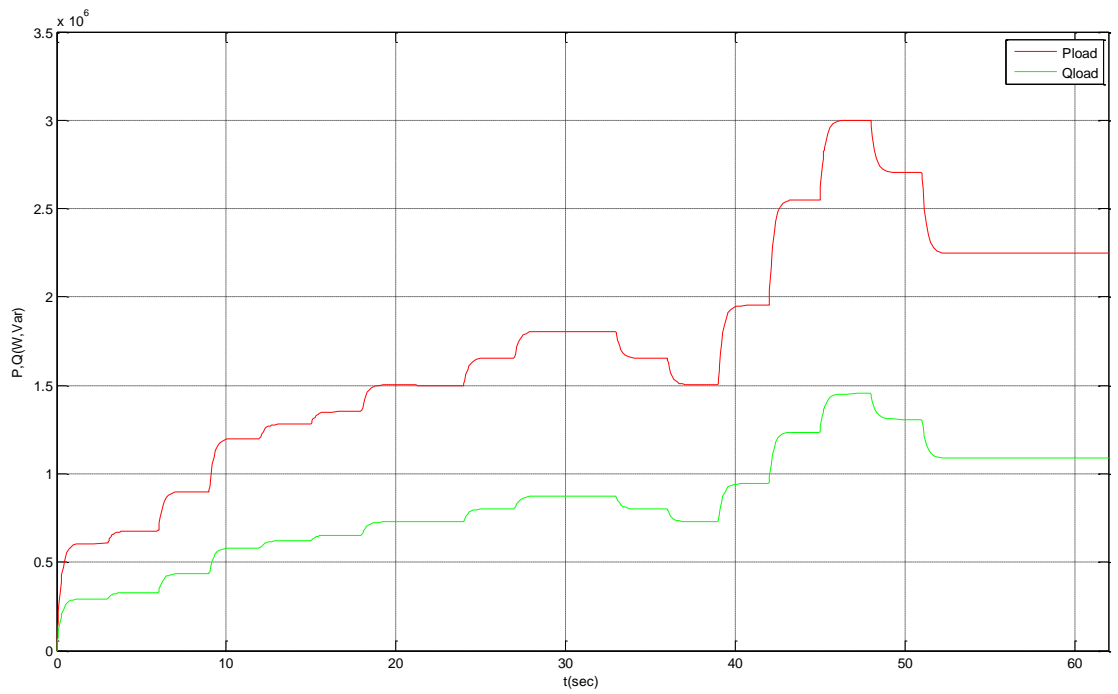
Πράγματι, παίρνουμε ένα δίκτυο στο οποίο έχουμε βάλει τα εξής χαρακτηριστικά: Γραμμή διανομής ACSR 3x95 συνολικού μήκους 3km με απόσταση 1km ανάμεσα στα φορτία, Διαμοιρασμένο φορτίο σε 3 φορτία με πραγματικές τιμές κατανάλωσης από 0 έως 3MW , Φ/Β παραγωγή με πραγματικές τιμές από 0 έως 18MW (Εικόνα 4.9).



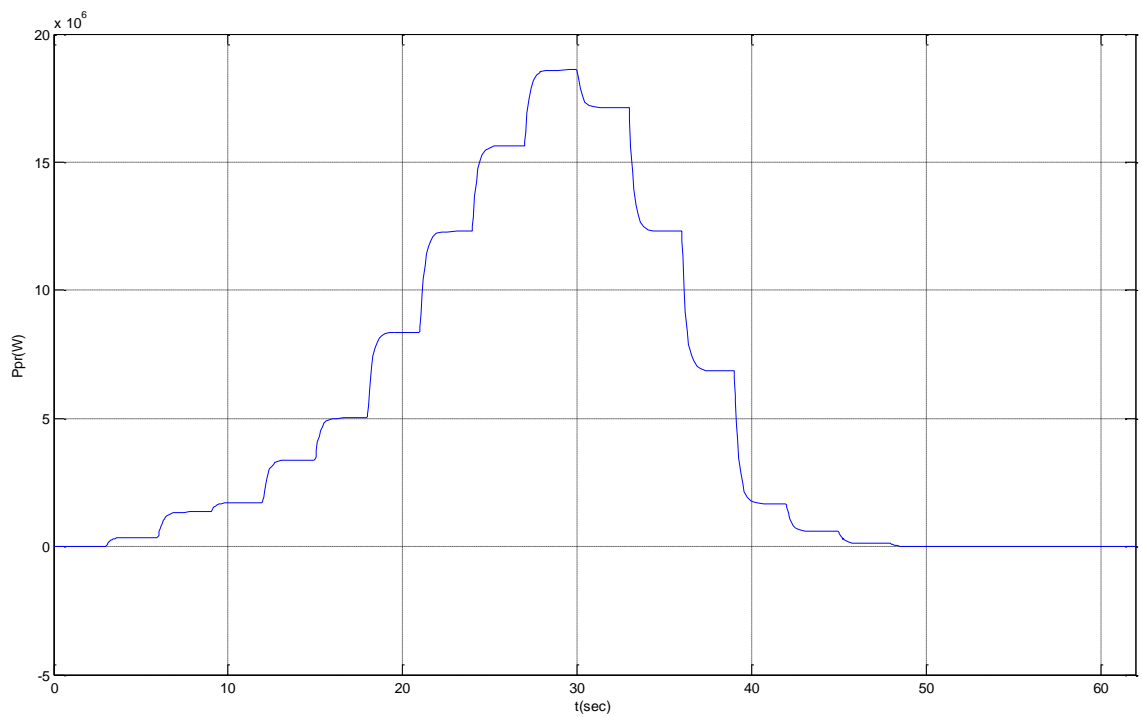


Εικόνα 4.9: Δίκτυο με μία γραμμή διανομής ACSR 3x95 και διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Φ/Β παραγωγής με χρονοσειρές

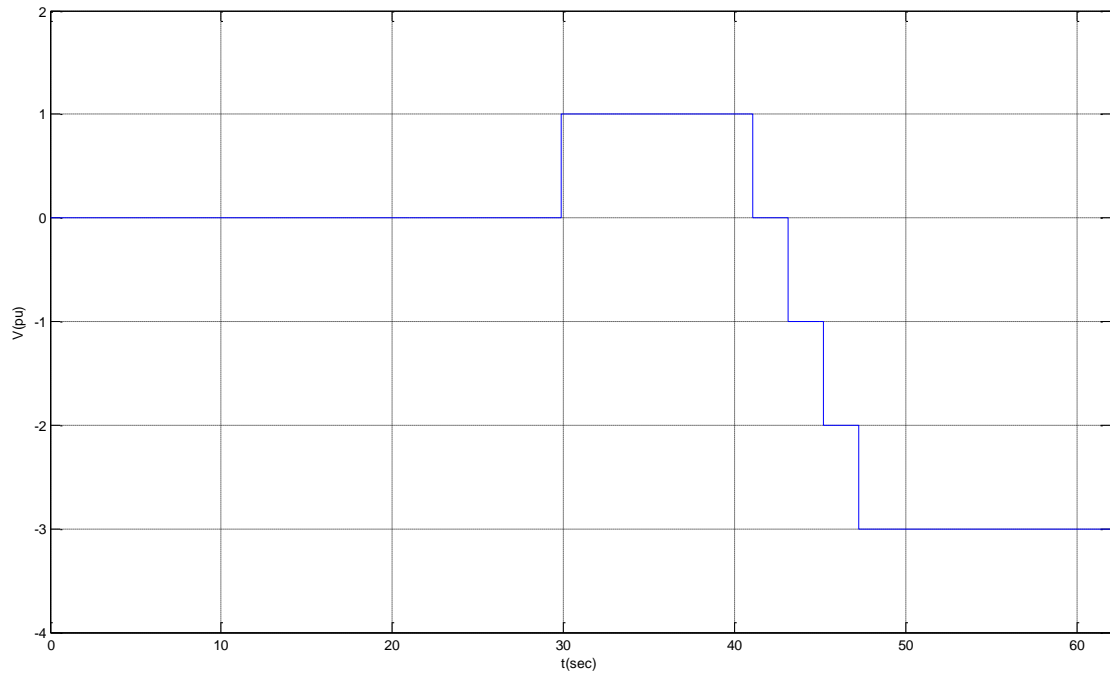
Παρακάτω φαίνονται στα δύο διαγράμματα οι καταναλώσεις του κάθε φορτίου και η παραγωγή των φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τις γραφικές αυτές ήταν ότι δόθηκαν 18 τιμές για τα φορτία με διαφορά τριών δευτερολέπτων η μία από την άλλη ώστε να έχουμε συνολικά όπως και στις παραπάνω προσομοιώσεις 54 δευτερόλεπτα τα οποία αντικατοπτρίζουν μία ημέρα.



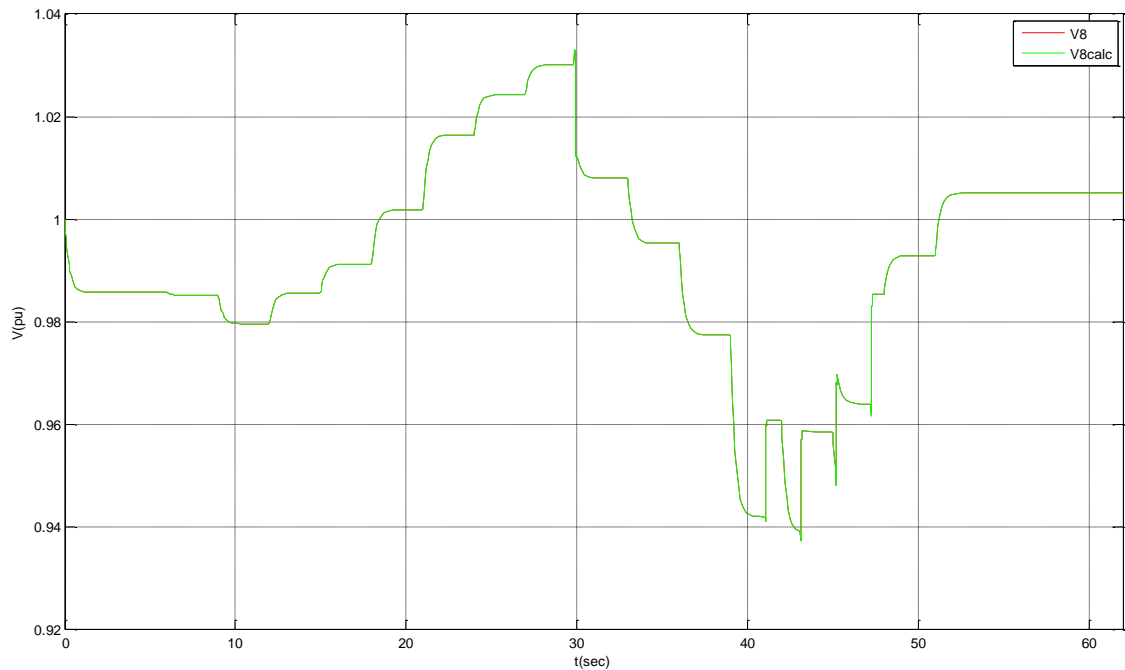
Διάγραμμα 63: Ενεργές και Άεργες Καταναλώσεις του κάθε φορτίου του δικτύου



Διάγραμμα 64: Παραγωγή Φ/Β κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης



Διάγραμμα 65: Λήψη του ΣΑΤΥΦ ώστε να ρυθμίσει την πτώση είτε ανύψωση τάσης στο πέρας της γραμμής διανομής (ACSR 3x95) και διαμοιρασμένο φορτίο παρουσία Φ/Β παραγωγής



Διάγραμμα 66: Τάση στο άκρο της γραμμής διανομής (ACSR 3x95) συνολικά 3km με διαμοιρασμένο φορτίο μεταβλητής τιμής και παρουσία Φ/Β παραγωγής επίσης μεταβλητής τιμής

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε με πιο χαρακτηριστικό τρόπο τις αλλαγές λήψεις ανάλογα με την περίπτωση στην οποία βρίσκεται το δίκτυο ότι το ΣΑΤΥΦ ανταποκρίνεται πλήρως στην απαίτηση για ρύθμιση τάσης στο άκρο της γραμμής. Πράγματι μέχρι τα 30sec δεν υπήρχε ανύψωση τάσης πέραν από 0,03αμ και συνεπώς δεν υπήρχε και λόγος για αλλαγή λήψης. Στο τριακοστό δευτερόλεπτο παρατηρήθηκε ότι η τάση υπερέβη το επιτρεπτό 1,03αμ και το ΣΑΤΥΦ έκανε μία αλλαγή λήψης για μειώσει τελικά την τάση σε επιτρεπτά όρια. Από εκεί και έπειτα υπήρχε μεγαλύτερη ζήτηση φορτίου παρά παραγωγή έως ότου στο τεσσαρακοστό δευτερόλεπτο η τάση έπεσε κάτω από 0,97αμ και το ΣΑΤΥΦ έριξε τις λήψεις του κατά τέσσερις για να το διορθώσει και να σταθεροποιηθεί το δίκτυο. Και σε περίπτωση ανύψωσης τάσης και σε περίπτωση πτώσης τάσης το ΣΑΤΥΦ λειτούργησε σωστά.

Το ακόμα πιο σημαντικό είναι ότι και πάλι λειτούργησε η LDC μέθοδος υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκε και πιο πάνω στην περίπτωση μίας και μόνο γραμμής διανομής Χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού τάσης κάθε κόμβου μέσω του τύπου:

$$\tilde{V}_{calc} = \tilde{V}_{oltc} - \tilde{z}\tilde{I}L$$

όπου σε κάθε κόμβο υπολογιζόταν η τάση και συνέχιζε ο υπολογισμός για την επόμενη τάση σύμφωνα με την τάση που βρέθηκε για τον προηγούμενο κόμβο πάλι μέσω LDC (βλ. Παράρτημα 3 και 4). Τελικά η τάση στο πέρας της γραμμής είχε τιμή  $V_8 = V_{8calc} = 1,0051\alpha\mu$  με μηδενική λοιπόν απόκλιση από την πραγματική.

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα-Προοπτικές Συνέχισης

Η μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, και κυρίως των φωτοβολταϊκών, στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί προβλήματα ανύψωσης τάσης που προκαλείται λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος στο δίκτυο. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι ρύθμισης της τάσης των δικτύων για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, οι οποίες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τον τοπικό και τον συντονισμένο έλεγχο τάσης.

Ο συντονισμένος έλεγχος τάσης περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός δικτύου επικοινωνίας μεταξύ των ζυγών καθώς και έναν κεντρικό ελεγκτή, ο οποίος συλλέγει όλα τα απαραίτητα δεδομένα του δικτύου, και εκτελώντας κάποιον κατάλληλο αλγόριθμο, παίρνει τις τελικές αποφάσεις για τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν από όλα τα στοιχεία του δικτύου που μπορούν να συμβάλλουν στη ρύθμιση της τάσης. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει συνεχής εποπτεία για την συνολική κατάσταση του δικτύου αλλά και οι ενέργειες που πραγματοποιούνται για τη ρύθμιση της τάσης είναι πάντα οι βέλτιστες, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες του δικτύου, η φθορά των μετασχηματιστών και η περιττή ροή αέργου ισχύος. Βέβαια αυτό απαιτεί την εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και των στοιχείων του δικτύου κάτι που συνεπάγεται μεγάλα κόστη εγκατάστασης και το πέρασ μεγάλου χρονικού διαστήματος μέχρι την υλοποίησή του.

Ο τοπικός έλεγχος τάσης έχει το χαρακτηριστικό ότι πραγματοποιείται τοπικά σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου είτε στο δευτερεύον του Μ/Σ είτε στο σύστημα ελέγχου της διεσπαρμένης παραγωγής χωρίς να υπάρχει συνεργασία μεταξύ των διαφόρων συστημάτων ρύθμισης τάσης που είναι τοποθετημένα στο δίκτυο. Ο παραπάνω έλεγχος παρουσιάζει διάφορα προβλήματα καθώς δεν πετυχαίνει τις βέλτιστες ρυθμίσεις τάσης και ελαχιστοποίησης απωλειών στο δίκτυο αλλά είναι πιο οικονομικός από το συντονισμένο έλεγχο και υλοποιείται σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί λοιπόν άμεσα και μέσω χρήσης κατάλληλου αλγορίθμου για την σωστή αντιστάθμιση πτώσης τάσης και της πρόβλεψης παραγωγής και φορτίου της επόμενης μέρας αποτελεί μία πολύ καλή λύση στο πρόβλημα πτώσης ή ανύψωσης τάσης του δικτύου διανομής.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάσαμε τη λειτουργία του τοπικού ελέγχου τάσης και έτσι πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις σε ένα δίκτυο μέσης τάσης. Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν σε τριφασικά δίκτυα. Το μόνο στοιχείο ικανό για ρύθμιση τάσης επιλέχθηκε να είναι ένας μετασχηματιστής ΣΑΤΥΦ και σε εξαιρετικά μεγάλες διεισδύσεις διεσπαρμένης παραγωγής να επέμβουν οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών για απορρόφηση αέργου ισχύος. Παρατηρήθηκε ότι σε δίκτυα με μόνο μία γραμμή διανομής το ΣΑΤΥΦ ήταν ικανό να κρατήσει τις τάσεις του δικτύου σε λειτουργικά επίπεδα ενώ σε περιπτώσεις περισσότερων γραμμών διανομής παράλληλα συνδεδεμένων και μεγάλης



διείσδυσης φωτοβολταϊκών έπρεπε να βοηθήσουν και οι αντιστροφείς των Φ/Β με απορρόφηση ή παραγωγή αέργου ισχύος. Ακόμα υπήρξε πρόβλημα στην ύπαρξη διεσπαρμένης παραγωγής για τη σωστή λειτουργία της αντιστάθμισης πτώσης τάσης ώστε να υπολογιστεί όσο το δυνατόν πιο σωστά η τάση στο άκρο της γραμμής όπου παρουσιάζεται και το μεγαλύτερο πρόβλημα. Με χρήση όμως συγκεκριμένων αλγορίθμων σύμφωνα με την πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής και έχοντας την τοπολογία του δικτύου βρέθηκαν τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος υπολογισμού. Σε εξαιρετικά κρίσιμες ώρες όπου υπάρχει ελάχιστο φορτίο και μέγιστη παραγωγή σε ένα δίκτυο με περισσότερες από μία γραμμές διανομής επιλέχθηκε η επιλογή χρήσης του ΣΑΤΥΦ για ρύθμιση του της γραμμής στην οποία δεν υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή και η οποία έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση φορτίου ενώ στη γραμμή όπου υπάρχει παραγωγή φωτοβολταϊκών παρεμβαίνουν οι αντιστροφείς οι οποίοι απορροφούν άεργο ισχύ με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζεται σωστά το πρόβλημα ανύψωσης τάσης. Βέβαια, η μέθοδος που χρησιμοποιεί την πρόβλεψη φορτίου, μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο σε περίπτωση που η πρόβλεψη έχει μικρή απόκλιση, κάτι το οποίο δεν είναι δεδομένο. Κατά την παραπάνω λειτουργία υπάρχει άψογη συνεργασία μεταξύ ΣΑΤΥΦ με αντιστάθμιση πτώσης τάσης και των αντιστροφένων, χωρίς επιπλοκές του ενός ρυθμιστή προς τον άλλον. Μελετήθηκαν περιπτώσεις δικτύων με στατικά φορτία και παραγωγές αλλά και δυναμικά φορτία μέσω πρόβλεψης φορτίου και παραγωγής και τα αποτελέσματα ρύθμισης τάσης ήταν αρκετά ενθαρρυντικά και στη μία και στην άλλη περίπτωση.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν έχουν σημαντικές προοπτικές εξέλιξης για μελέτη των συστημάτων τοπικού ελέγχου τάσης. Αρχικά, θα μπορούσε να μοντελοποιηθούν περισσότεροι τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως αιολική, βιομάζα, κυψέλες καυσίμου και πολλές άλλες για να υπάρξει μία πιο γενικευμένη εικόνα λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ με τους ρυθμιστές τάσης της εκάστοτε διεσπαρμένης παραγωγής. Ακόμα, θα μπορούσαν να προσομοιωθούν και άλλες περιπτώσεις δικτύων πιο περίπλοκων και με διαφορετικά χαρακτηριστικά γραμμών ώστε και πάλι να μελετηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των ρυθμιστών τάσης. Προσθέτοντας στην παραπάνω σκέψη θα μπορούσε να έχει πρώτο λόγο στη ρύθμιση τάσης κάποιο άλλο μέσο ρύθμισης όπως Statcom το οποίο έχει μεγάλη χρησιμότητα στη ρύθμιση τάσης ειδικά παρουσία αιολικής ενέργειας.

Ακόμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το RTDS για να προσομοιωθούν τα δίκτυα και οι ελεγκτές τους σε πραγματικό χρόνο. Στις εν λόγω προσομοιώσεις θα μπορούσαμε να μεταβάλλουμε κατά βούληση τα δεδομένα είτε φορτίου είτε παραγωγής και ακόμα θα μπορούσαμε να αλλάζουμε τον τρόπο ελέγχου του ΣΑΤΥΦ όπως το εύρος ρύθμισης, τις αρχικές του συνθήκες λειτουργίας κ.τ.λ. Τέλος, η σημαντικότερη ίσως προοπτική συνέχειας της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήταν η αντικατάσταση του μοντέλου των αντιστροφένων διεσπαρμένης παραγωγής με πραγματικούς αντιστροφείς, οι οποίοι θα συνδεθούν κατάλληλα με το RTDS. Με τον τρόπο αυτό το πείραμα αποκτά τον χαρακτήρα μιας προσομοίωσης Power Hardware in the Loop (PHIL), κατά την οποία ένα τμήμα πραγματικού εξοπλισμού ελέγχεται σε συνθήκες πραγματικού δικτύου, επιτρέποντας εξελιγμένα πειράματα σε σχεδόν πραγματικές συνθήκες.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ferry August Viawan, "Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation", Thesis in Chalmers University of Technology, 2008.
- [2] A. Borbely and J.F. Kreider, *Distributed Generation: A New Paradigm for the New Millenium*", CRC Press, 2001.
- [3] IEA, *Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets*, International Energy Agency, France, 2002.
- [4] M.R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press LCC, 1999.
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_in\\_the\\_European\\_Union](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_the_European_Union)
- [6] S. Rahman, "Green Power: What is and Where We Can Find It?" *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 1, pp. 30-37, January - February 2003.
- [7] IEA, "Biomass for Power Generation and CHP", International Energy Agency, 2007. Available at <http://www.iea.org/textbase/techno/essentials3.pdf>, last accessed on 22 September 2007.
- [8] IEA, *Renewables for Power Generation: Status and Prospects*, International Energy Agency, France, 2003.
- [9] IEA, *Renewable Energy, Market and Policy Trends in IEA Countries*, International Energy Agency, France, 2004.
- [10] S. Sheth and M. Shahidehpour, "Tidal Energy in Electric Power Systems", in *Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005.
- [11] R. Dettmer, "Wave Energy Gets Seaworthy", *IEE Review*, September 2002.
- [12] M. Leijon, H. Bernhoff, O. Ågren, J. Isberg, J. Sunberg, M. Berg, K.E. Karlsson and A. Wolfbrandt, "Multiphysics Simulation of Wave Energy to Electric Energy Conversion by Permanent Magnet Linear Generator", *IEEE Transactions on Energy Conversions*, vol. 20, no.1, March 2005.
- [13] M.W. Davis, "Microturbines – an economics and reliability evaluation for commercial, residential and remote load applications", *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1556-1562, 1999.

- [14] ΜΑΡΙΑ ΜΑΡΚΑΤΟΥ, “Σχεδίαση Αυτόνομου Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος”, Διπλωματική Εργασία Πολυτεχνικής Σχολής Πανεπιστημίου Πατρών, 2011.
- [15] Παγγέλα Άννα – Τσακνάκη Σεβαστή, “Σχεδίαση Αυτόνομου Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος για Τροφοδότηση Κατοικίας”, Διπλωματική εργασία ΑΠΘ, 2012.
- [16] Χαράλαμπος Α. Λάμπρου, “ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΕΩΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΣΑΤΥΦ”, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2008.
- [17] Dr. Dieter Dohnal, “PB 25 2/06 EN – On-load tap-changers for power transformers– F0126405 – 09/13 – dp – ©Maschinenfabrik Reinhausen GmbH 2013”.
- [18] Νικόλαος Στυλιάρης, “Μοντελοποίηση Πρότυπων Ανεμογεννητριών και STATCOM για Μελέτες Ευστάθειας ΣΗΕ”, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2014.
- [19] Yun Wei Li, D. Mahinda Vitathgamunwa, Poh Chiang Loh and Frede Blaabjerg, "A dual-functional medium voltage level DVR to limit downstream fault currents"
- [20] Κορλός Κ. Θεοφάνης, “Αντιμετώπιση φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση”, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, 2012.
- [21] J. Bebic, R. Walling, K. O’Brien, and B. Kroposki, “The Sun Also Rises – Planning for Large-Scale Solar Power”, IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 7(3), May/June 2009.
- [22] Erhan Demirok, Pablo Casado Gonzalez, Kenn H. B. Frederiksen, Dezso Sera, Pedro Rodriguez and Remus Teodorescu, "Local reactive power control methods for overvoltage protection of distributed solar inverters in Low-Voltage grids"
- [23] Erhan Demirok, Dezso Sera, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez, U. Borup “Clustered PV Inverters in LV Networks: An Overview of Impacts and Comparison of Voltage Control Strategies”.
- [24] Chia-Hung Lin, Wei-Lin Hsieh, Chao-Shun Chen, Cheng-Ting Hsu, "Optimization of Photovoltaic penetration in distribution systems considering annual duration curve of solar irradiation", IEEE Transactions on Power Delivery, May 2012.
- [25] Kashem M. Muttaqi, An D T Le, Michael Negnevitsky, Gerard Ledwich, “A Coordinated Voltage Control Approach for Coordination of OLTC, Voltage Regulator and DG to Regulate Voltage in a Distribution Feeder”.
- [26] Μάριος Μανιατόπουλος, “Τοπικός και συντονισμένος έλεγχος τάσης σε δίκτυα με διεσπαρμένη παραγωγή σε πραγματικό χρόνο”, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2014.

[27] Control of Grid Connected PV Systems with Grid Support Functions

[28] M.A. Mahmud, M.J. Hossain, H.R Pota, "Analysis of Voltage Rise Effect on Distribution Network with Distributed Generation: Preprints of the 18<sup>th</sup> IFAC World Congress Milano August 28 – September 2, 2001".

[29] Χρήστος Ε. Γκιλφέςης, "Μελέτη επίδρασης φωτοβολταϊκών σε δίκτυα Χ.Τ."

[30] Σταύρος Παπαθανασίου, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Σημειώσεις Παραδόσεων, Αθήνα 2008.

[31] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2001.

[32] Δέρβος Κ. Θ., "Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις", έκδοση ΕΜΠ, 2009.

[33] Θεολόγος Μπαμπαρούτσης, "Βέλτιστη λειτουργία γραμμών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής", Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα 2014.

[34] P. Kotsampopoulos, F. Lehfuss, G. Lauss, B. Bletterie, N. Hatziaargyriou, "The limitations of digital simulation and the advantages of PHIL testing in studying Distributed Generation provision of ancillary services", IEEE Trans. on Industrial Electronics, in press.

[35] Μαλαμάκη Κυριακή-Νεφέλη, " Μέθοδος Ρύθμισης της Τάσης σε γραμμές Χαμηλής Τάσης με Φωτοβολταϊκά Συστήματα και Οικιακούς Καταναλωτές."

[36] Κωνσταντίνος Κότσαλος, " Αποκεντρωμένη ρύθμιση τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής", Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα 2015.

[37] C. Gao, . A. Redfern, "Automatic Compensation Voltage Control Strategy for On-Load Tap Changer Transformers with Distributed Generation".

[38] "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources".

[39] Christian KÖRNER, Matthias HENNIG, Ronald SCHMID, "Gaining Experience with a Regulated Distribution Transformer in a Smart Grid Environment".

[40] Ronald SCHMID, Ralf-Dirk WALZ, Kai BOLDT, Dr. Holger MÜLLER, Karsten HANDT, Gyula HIPSZKI, "On-Load Voltage Regulation in the Low Voltage Grid".

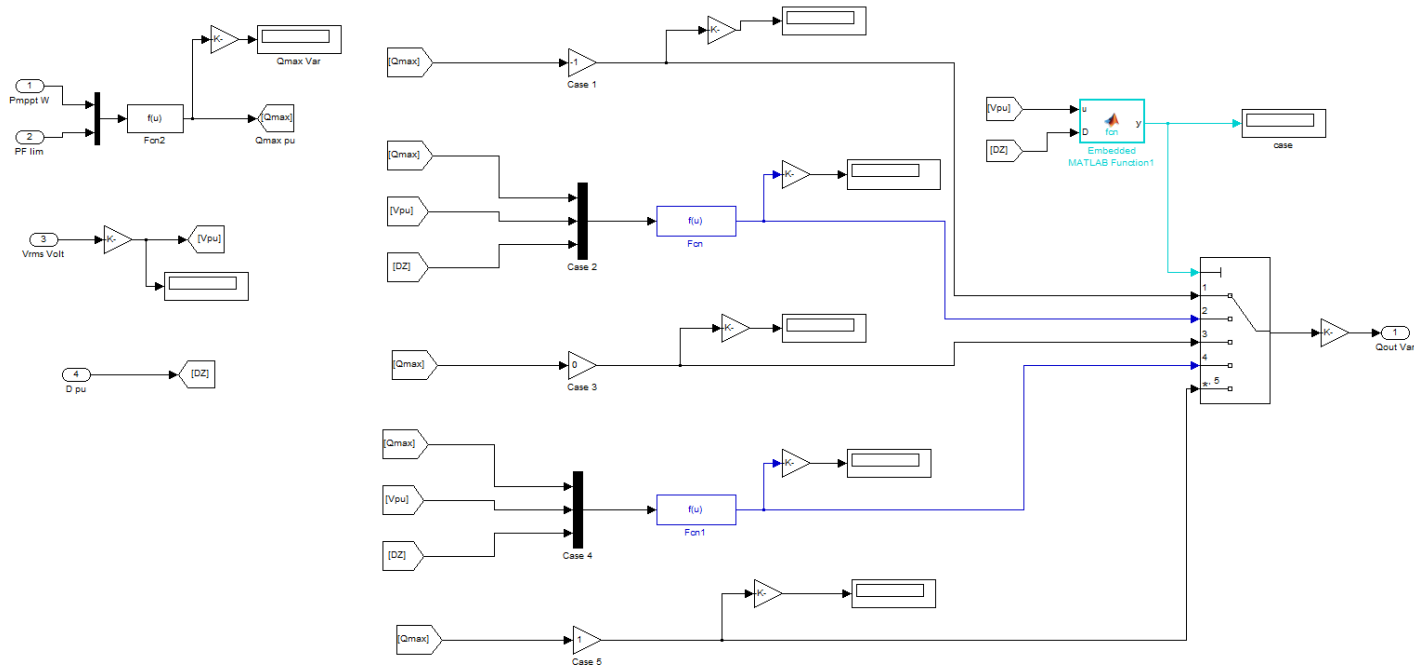
[41] Il-Keun Song, Won-Wook Jung, Chul-Min Chu, Seong-Soo Cho, Hyun-Koo Kang and Joon-Ho Choi, "General and Simple Decision Method for DG Penetration Level in View of Voltage Regulation at Distribution Substation Transformers".

[42] Thomas DEGNER, Gunter ARNOLD, Thorsten REIMANN, Bernd ENGEL, Michael BREEDE, Philipp STRAUSS, "Increasing the Photovoltaic System Host Capacity of Low Voltage Distribution Networks".

[43] S. J. van Zyl, *Member, SAIEE*, and C. T. Gaunt, *Member, IEEE*, "Control Strategies for Distributed Generators Operating on Weak Distribution Networks".

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1.

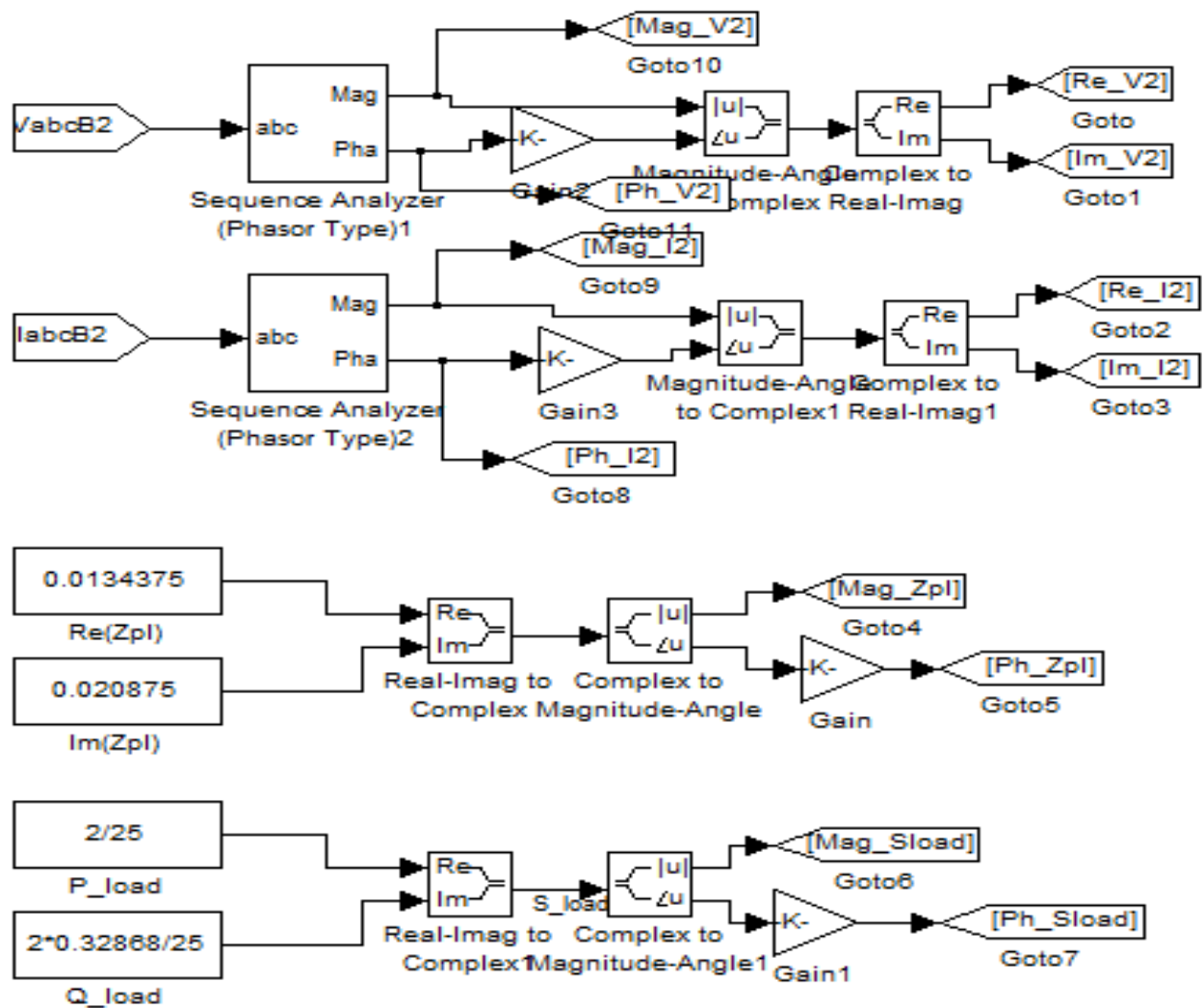


Σχήμα 1: Εφαρμογή droop control στο Simulink

2. Αλγόριθμος Droop Control στο Matlab:

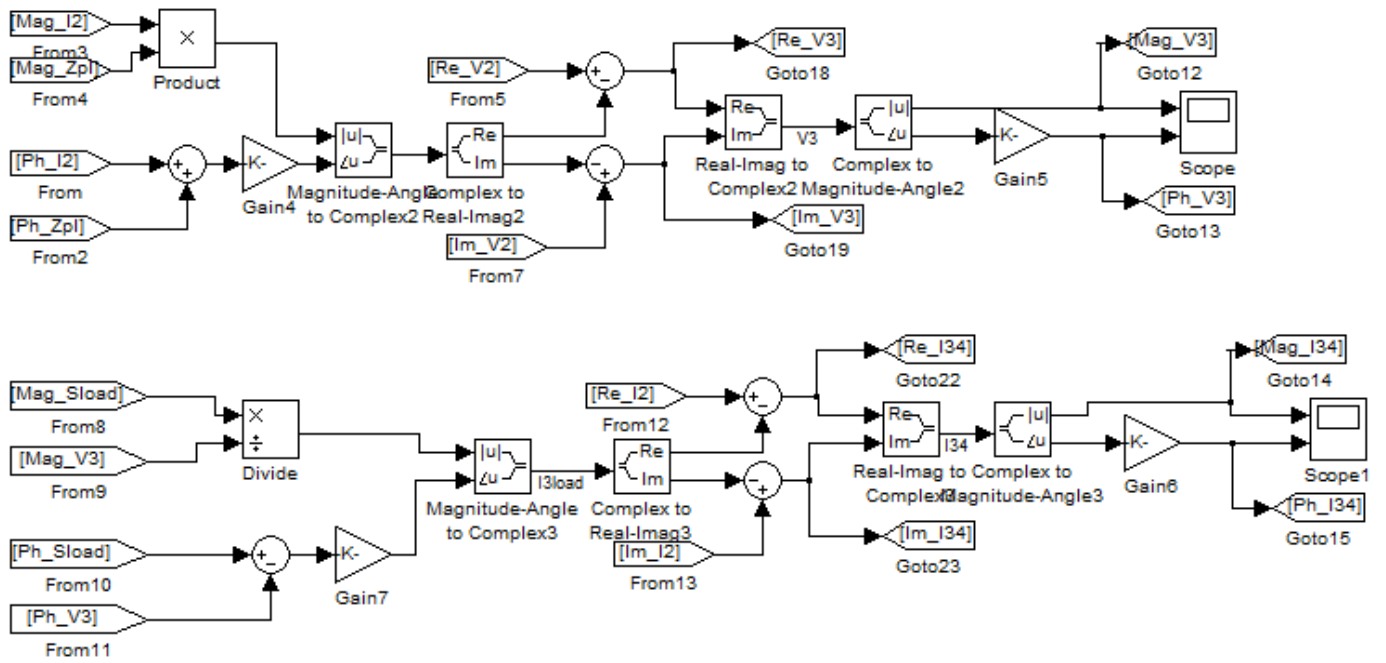
```
function y = fcn(u,D)
%case1
if (u < 0.97)
    y=1;
%case2
elseif ((u >= 0.97) && (u < 1-D))
    y=2;
%case3
elseif (( u >= 1-D) && (u <= 1+D))
    y=3;
%case4
elseif ((u > 1+D) && (u <= 1.03))
    y=4;
%case5
else
    y=5;
end
```

3.



Σχήμα 2: Τρόπος επίλυσης για υπολογισμό μέσω LDC σε περίπτωση διαμοιρασμένου φορτίου με γνωστό το ρεύμα εισόδου στη γραμμή διανομής

4.



Σχήμα 3: Συνέχεια του παραπάνω τρόπου επίλυσης στο Simulink για τη LDC μέθοδο