



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

**Τοπικός και συντονισμένος έλεγχος τάσης σε δίκτυα με
δισπαρμένη παραγωγή σε πραγματικό χρόνο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος Μ. Μανιατόπουλος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2014



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

**Τοπικός και συντονισμένος έλεγχος τάσης σε δίκτυα με
δισπαρμένη παραγωγή σε πραγματικό χρόνο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος Μ. Μανιατόπουλος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

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

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

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2014

.....
Μάριος Μ. Μανιατόπουλος

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

Copyright © Μάριος Μ. Μανιατόπουλος, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων ρύθμισης της τάσης των δικτύων διανομής, ο τοπικός έλεγχος τάσης και ο συντονισμένος έλεγχος τάσης, και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους. Η ρύθμιση της τάσης είναι απαραίτητη στα δίκτυα διανομής λόγω του φαινομένου της ανύψωσης τάσης που παρατηρείται από την ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε αυτά, και κυρίως των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο, ένα για τη μελέτη συστήματος τοπικού ελέγχου σε μικροδίκτυο χαμηλής τάσης, και ένα για τη μελέτη συστήματος συντονισμένου ελέγχου σε δίκτυο μέσης τάσης.

Αρχικά, γίνεται συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και παρουσιάζονται οι επιπτώσεις που επιφέρει η μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση τους στα δίκτυα διανομής. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση των τρόπων αντιμετώπισης αυτών των επιπτώσεων, δίνοντας έμφαση στη μέθοδο ρύθμισης τάσης με τον έλεγχο της ροής αέργου ισχύος των αντιστροφών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, στους μετασχηματιστές με Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και στη σύγκριση μεταξύ των συστημάτων τοπικού ελέγχου τάσης και συντονισμένου ελέγχου τάσης.

Στη συνέχεια γίνεται η παρουσίαση του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS) του εργαστηρίου ΣΗΕ του Ε.Μ.Π. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών του και της λειτουργίας του, καθώς και του αντίστοιχου προγραμματιστικού περιβάλλοντος που χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό των δικτύων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων (RSCAD).

Όσον αφορά τις πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν, η πρώτη αφορά την μοντελοποίηση και την προσομοίωση στο RSCAD ενός πρότυπου μικροδικτύου χαμηλής τάσης για τη μελέτη του τοπικού ελέγχου τάσης. Επιλέχθηκε η επιθυμητή ρύθμιση τάσης να πραγματοποιείται ελέγχοντας τοπικά τη ροή αέργου ισχύος των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου μέσω καμπυλών στατισμού αέργου ισχύος-τάσης. Επίσης, ενσωματώθηκε σύστημα περικοπής ενεργού ισχύος με βάση τη συχνότητα στους αντιστροφείς. Οι προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν αφορούσαν την ημερήσια συμπεριφορά του μικροδικτύου και πραγματοποιήθηκαν τόσο κατά τη συνδεδεμένη λειτουργία του, όσο και κατά τη νησιδοποιημένη. Τέλος, πραγματοποιήθηκε και έλεγχος της απόκρισης του μικροδικτύου στα μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούνται από την μετάβαση απο συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου σε πραγματικό χρόνο.

Η δεύτερη πειραματική διαδικασία αφορά μια προσομοίωση Software in the Loop (SIL), κατά την οποία γίνεται η μοντελοποίηση ενός δικτύου μέσης τάσης στο RSCAD και η ανάπτυξη του αλγορίθμου ενός κεντρικού ελεγκτή στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, για τη μελέτη της λειτουργίας ενός συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης. Αρχικά, γίνεται περιγραφή του δικτύου που αναπτύχθηκε, καθώς και του αλγορίθμου που εκτελείται από τον κεντρικό ελεγκτή για τη ρύθμιση των τάσεων. Τα στοιχεία του δικτύου που συμβάλλουν στη ρύθμιση είναι οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών και ένας μετασχηματιστής με ΣΑΤΥΦ. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος επικοινωνίας μεταξύ του RTDS και του MATLAB και κατόπιν ο τελικός αλγόριθμος που αναπτύξαμε για τη μοντελοποίηση του ελεγκτή. Τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και πραγματοποιούνται συγκρίσεις με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ίδιου δικτύου για σενάρια χωρίς ρύθμιση τάσης και με Τοπικό Έλεγχο Τάσης.

Λέξεις κλειδιά: διεσπαρμένη παραγωγή, φωτοβολταϊκά συστήματα, ρύθμιση τάσης, τοπικός έλεγχος, συντονισμένος έλεγχος, πρότυπα δίκτυα, ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου, RTDS, μικροδίκτυο, αντιστροφέας, έλεγχος αέργου ισχύος, περικοπή ενεργού ισχύος, μετασχηματιστής, ΣΑΤΥΦ, αλγόριθμος, βελτιστοποίηση, MATLAB

Abstract

This diploma thesis examines and compares the two basic categories of voltage regulation methods in distribution networks, local voltage control and coordinated voltage control. Voltage control is necessary in distribution networks due to the voltage rise phenomenon that is caused by the increased penetration of dispersed generation, especially that of photovoltaic systems. In this framework, we conducted two experiments of real time simulations, one for the study of a local voltage control system and one for the study of a coordinated voltage control system.

Initially, we summarise the basic characteristics of distributed energy resources and present the effects of their large-scale integration in distribution networks. Afterwards, we examine the most popular methods of mitigating these effects, while stressing the comparison of local and coordinated voltage control systems. Also, we emphasize on the control of the reactive power of inverters as a means of voltage regulation, as well as on the transformers with On-Load Tap Changers (OLTC).

Next, we present the real-time digital simulator (RTDS) of the Power Systems Lab of NTUA. Its function and characteristics are thoroughly analyzed, as well as those of its corresponding programming environment (RSCAD), that is used for creating the model networks and acquiring the results.

Regarding the experiments that we conducted, in the first one we model and simulate a benchmark low voltage microgrid in RSCAD to study the operation of a local voltage control system. We chose the method of locally controlling the reactive power of the photovoltaic inverters as the voltage regulation method of the system, using reactive power-voltage droops. We also modeled an active power curtailment system for the inverters. The simulations that were executed concerned the daily behavior of the microgrid and we conducted one for its grid-connected mode and one for its islanded mode. Finally, we executed one final simulation to test the response of the microgrid in the transients that are caused by the real-time transition of the microgrid's mode.

The second experiment refers to a Software in the Loop (SIL) simulation, where we model a medium voltage network in RSCAD and develop the algorithm of a central controller in the programming environment MATLAB, in order to study the operation of a coordinated voltage control system. Initially, we describe the network that was modeled and after that we explain the logic operation of the algorithm that is used by the central controller to achieve the desirable voltage control. The network elements that contribute in the voltage regulation are the inverters of the photovoltaic systems and a transformer with OLTC. Afterwards, we describe the means of communication between RTDS and MATLAB and then the final algorithm that was developed for modeling the central controller is presented and explained. Finally, the results of the simulation are presented, analyzed and compared to the corresponding results of the simulations of the same network for scenarios without voltage regulation and with Local Voltage Control.

Key words: dispersed generation, photovoltaic systems, voltage control, local control, coordinated control, benchmark networks, real time digital simulator, RTDS, microgrid, inverter, reactive power control, active power curtailment, transformer, OLTC, algorithm, optimization, MATLAB

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο για τη βοήθεια και την καθοδήγηση του, καθώς και για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους διπλωματούχους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και Μηχανικούς Η/Υ και ερευνητές του εργαστηρίου ΣΗΕ, Βασίλειο Κλεφτάκη, Αθανάσιο Βασιλάκη και Γεωργία Ασημακοπούλου για την πολύτιμη βοήθειά τους και την προθυμία τους να λύσουν κάθε μου απορία.

Φυσικά, δεν θα παραλείψω να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να αναλάβω την παρούσα διπλωματική εργασία και να ασχοληθώ με το αντικείμενο που πάντα με ενδιέφερε περισσότερο, τα δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τη σύντροφο μου Σοφία για την τεράστια υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Περιεχόμενα

1. ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 Εισαγωγή.....	12
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	14
1.3 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένης Παραγωγής στο δίκτυο	15
2. ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Συμβατικές μέθοδοι ρύθμισης τάσης	18
2.2.1 Λήψεις αλλαγής τάσεως Μετασχηματιστών Ισχύος.....	18
2.2.2 Ρυθμιστές Τάσης.....	18
2.2.3 Σύγχρονοι Πυκνωτές.....	19
2.2.4 Στατοί Πυκνωτές.....	20
2.3 Σύγχρονες μέθοδοι ρύθμισης τάσης.....	20
2.3.1 STATCOM, SVC.....	20
2.3.2 Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	21
2.3.3 Περικοπή ενεργού ισχύος της ΔΠ.....	21
2.3.4 Έλεγχος της αέργου ισχύος των αντιστροφών της ΔΠ.....	22
2.4 Τοπικός και Συντονισμένος έλεγχος τάσης.....	23
3. ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Πρότυπα δίκτυα μεταφοράς Υψηλής Τάσης.....	26
3.3 Πρότυπα δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης.....	30
3.4 Πρότυπα δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης.....	32
4. ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ	36
4.1 Εισαγωγή.....	36
4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του RTDS.....	37
4.3 Λογισμικό RSCAD	39
5. ΤΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	42
5.1 Εισαγωγή.....	42
5.2 Περιγραφή του δικτύου	43
5.2.1. Ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης.....	43

5.2.2 Μετασηματιστής MT/XT	44
5.2.3 Γραμμές χαμηλής τάσης.....	45
5.2.4 Φορτία	48
5.2.5 Αντιστροφείς μπαταριών.....	50
5.2.6 Διεσπαρμένη παραγωγή	55
5.3 Προσομοιώσεις – Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	59
5.3.1 Προσομοίωση ημερήσιας συμπεριφοράς μικροδικτύου σε συνδεδεμένη λειτουργία	64
5.3.2 Προσομοίωση ημερήσιας συμπεριφοράς μικροδικτύου σε νησιδοποιημένη λειτουργία ..	71
5.3.3 Προσομοίωση συμπεριφοράς μικροδικτύου κατά τη μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία.....	77
6. ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ	84
6.1 Εισαγωγή.....	84
6.2 Περιγραφή του δικτύου	84
6.2.1 Ισοδύναμο δίκτυο υψηλής τάσης	85
6.2.2 Μετασηματιστής ΥΤ/ΜΤ με λήψεις	86
6.2.3 Γραμμή μέσης τάσης.....	88
6.2.4 Φορτία και Φωτοβολταϊκά	89
6.3 Αλγόριθμος συντονισμένου ελέγχου.....	90
6.4 Range Control	92
6.4.1 Βελτιστοποίηση.....	92
6.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας.....	94
6.4.3 Υλοποίηση στο MATLAB	99
6.5 Level Control.....	104
6.5.1 Λειτουργία.....	105
6.5.2 Υλοποίηση στο MATLAB-RSCAD	107
6.6 Επικοινωνία MATLAB-RSCAD	111
6.7 Παρουσίαση του τελικού αλγορίθμου συντονισμένου ελέγχου στο MATLAB	116
6.8 Προσομοιώσεις – Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	120
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ.....	131
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	136

Κεφάλαιο 1

Διεσπαρμένη Παραγωγή

1.1 Εισαγωγή

Ιστορικά, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτοί που λειτουργούν με την καύση άνθρακα, πετρελαίου ή φυσικού αερίου, οι πυρηνικοί σταθμοί, αλλά και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, βρίσκονται στην πλειονότητα των περιπτώσεων κοντά στην πηγή των πόρων που χρησιμοποιούν και μακριά από τα σημεία κατανάλωσης μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι τα μεγάλα αστικά κέντρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια να πρέπει να μεταφερθεί για μεγάλες αποστάσεις μέσω ενός δικτύου μεταφοράς, το οποίο επιφέρει οικονομικό (κατασκευή, συντήρηση, απώλειες στις γραμμές) αλλά και περιβαλλοντικό κόστος.

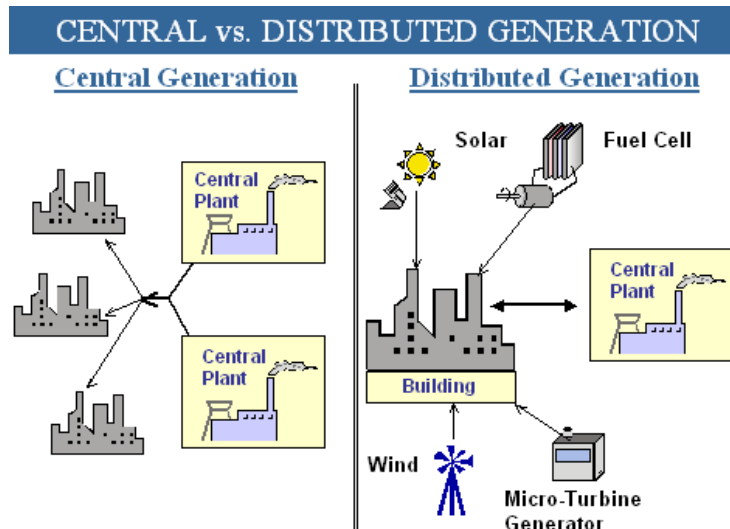
Το μοντέλο αυτό άρχισε να παρουσιάζει προβλήματα στα τέλη της δεκαετίας του 60, καθώς οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής δεν μπορούσαν πλέον να παρέχουν φθηνή, ανταγωνιστική και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια σε πιο απομακρυσμένους καταναλωτές μέσω του δικτύου μεταφοράς, διότι οι σταθμοί έφτασαν σε σημείο να κοστίζουν λιγότερο και να είναι πιο αξιόπιστοι από το δίκτυο, με αποτέλεσμα όλα τα σφάλματα παροχής ισχύος να προέρχονται από προβλήματα του δικτύου. Συνεπώς, τα οφέλη από την αποδοτικότητα δεν οφείλονταν πλέον στην αύξηση της ικανότητας παραγωγής ισχύος των κεντρικών σταθμών, αλλά σε μικρότερες μονάδες παραγωγής που βρίσκονταν σε κοντινότερες αποστάσεις από τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Με τον όρο Διεσπαρμένη Παραγωγή (Distributed Generation – DG) εννοούμε την αποκεντρωμένη παραγωγή ή/και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό πρακτικά προϋποθέτει την ύπαρξη εγκατεστημένων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σημεία του δικτύου που βρίσκονται κοντά στην κατανάλωση, ελαχιστοποιώντας το κόστος, την πολυπλοκότητα και τη μη αποδοτικότητα της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, οι μονάδες αυτές δεν είναι εφικτό να έχουν μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ, λόγω του μεγέθους και της ευελιξίας τους. Στην πλειοψηφία τους οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής έχουν ονομαστική ισχύ της τάξης των 10 MW ή λιγότερο.

Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται με ένα απλό σχήμα η βασική διαφορά μεταξύ κεντρικής και διεσπαρμένης παραγωγής.

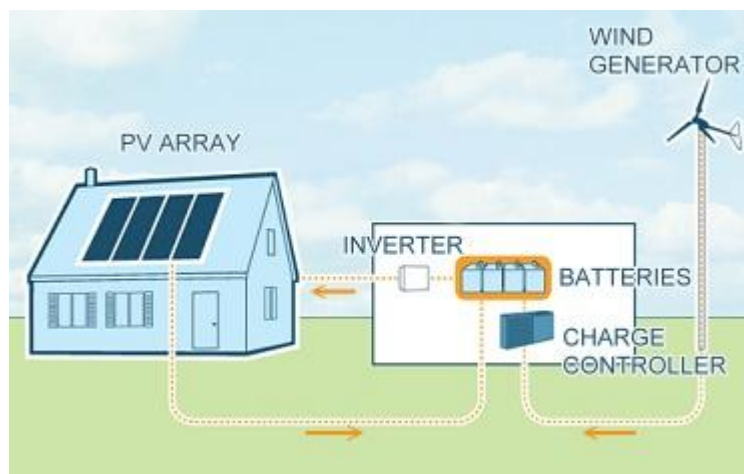
Η Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ) τυπικά χρησιμοποιεί Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον όρο ΑΠΕ αναφερόμαστε κυρίως στις ακόλουθες μορφές ενέργειας:

1. Την «Αιολική» Ενέργεια
2. Την «Ηλιακή» Ενέργεια
3. Τα «Μικρά Υδροηλεκτρικά»
4. Τις «Κυψέλες Καυσίμου»
5. Την ενέργεια των «Θαλασσίων Κυμάτων»
6. Τη «Γεωθερμική» Ενέργεια
7. Την ενέργεια της «Βιομάζας»



Εικόνα 1.1 Κεντρική/Διεσπαρμένη Παραγωγή

Εκτός από ΑΠΕ, η ΔΠ ενδέχεται να χρησιμοποιεί επίσης γεννήτριες και μικροτουρμπίνες ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο), αλλά και μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως μπαταρίες, flywheel storage και άλλες. Οι πιο συνηθισμένες μονάδες ΔΠ είναι οι μικρές φωτοβολταϊκές διατάξεις και οι μικρές ανεμογεννήτριες, οι οποίες εγκαθίστανται στο δίκτυο διανομής (στη Μέση Τάση ή στη Χαμηλή Τάση). Χαρακτηριστικό παράδειγμα Διεσπαρμένης Παραγωγής είναι η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων ή/και ανεμογεννητριών στις ταράτσες κτιρίων ενός αστικού κέντρου (εικόνα 1.2).



Εικόνα 2.2 Χρήση Διεσπαρμένης Παραγωγής για την τροφοδότηση μιας οικίας

1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο κοινή συνείδηση η ανάγκη αποδοτικότερης χρησιμοποίησης των πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα δε η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτό επιβάλλεται όχι μόνον από το πεπερασμένο των «συμβατικών» μη ανανεώσιμων πηγών, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο κλπ, αλλά και από την ανάγκη περιορισμού των δυσμενών επιπτώσεων από τη χρήση τους στο περιβάλλον.

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια οι τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες καταβάλλουν προσπάθειες προσαρμογής προς τα νέα αυτά δεδομένα, με τη λήψη κατάλληλων νομοθετικών μέτρων και ενημέρωση των πολιτών, καθώς και την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ κατά τρόπον ώστε το κόστος τους να είναι συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών πηγών ενέργειας [6].

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση ΑΠΕ είναι πολλά και μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα:

- Είναι φιλικά προς το περιβάλλον, αφού έχουν πρακτικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Είναι ανεξάντλητα, σε αντίθεση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα.
- Απλούστερη κατασκευή και συντήρηση.
- Μεγάλος χρόνος ζωής.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρότερη κλίμακα για την τοπική κάλυψη των αναγκών ενός απομονωμένου φορτίου, βοηθώντας έτσι την ενεργειακή αυτάρκεια αναπτυσσόμενων χωρών ή απομακρυσμένων κατοικημένων περιοχών, χωρίς την ανάγκη κατασκευής δικτύου μεταφοράς.

Φυσικά, οι ΑΠΕ έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα:

- Έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης (της τάξης του 30% ή λιγότερο), που σημαίνει ότι χρειάζεται εγκατάσταση μεγάλου εύρους για να επιτευχθεί μια ικανοποιητική παραγωγή ισχύος.
- Το αρχικό κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση τους είναι αρκετά υψηλό και συνήθως χρειάζεται αρκετή έκταση γης
- Η παροχή και η απόδοση ισχύος αρκετών εκ των ΑΠΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά, τα υδροηλεκτρικά και οι ανεμογεννήτριες, εξαρτώνται από τις κλιματολογικές συνθήκες, την εποχή του έτους, την τοποθεσία της εγκατάστασης και από άλλους παρόμοιους παράγοντες που καθιστούν την παραγωγή μη σταθερή και δύσκολα προβλέψιμη μακροπρόθεσμα. Επίσης για τους παραπάνω λόγους, τέτοιες μονάδες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή της τάσης και της συχνότητας αναφοράς ενός δικτύου, καθιστώντας απαραίτητη την συνύπαρξη και συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή και μέσων αποθήκευσης της.

1.3 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένης Παραγωγής στο δίκτυο

Για λόγους αξιοπιστίας, είναι απαραίτητο οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής να συνδέονται στο ίδιο δίκτυο με τους συμβατικούς κεντρικούς σταθμούς παραγωγής. Ωστόσο, με την ολοένα και αυξανόμενη μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση μονάδων ΔΠ στο κεντρικό δίκτυο, έχουν κάνει την εμφάνιση τους σημαντικά τεχνικά προβλήματα που αφορούν κυρίως τους τομείς της ποιότητας ισχύος, της ευστάθειας τάσης, των αρμονικών συνιστωσών, της ευστάθειας της συχνότητας, των συστημάτων προστασίας και των συστημάτων ελέγχου του δικτύου. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να προηγείται κατάλληλη μελέτη καθώς και έλεγχος των επιπτώσεων πριν πραγματοποιηθεί η ενσωμάτωση μιας νέας μεγάλου εύρους μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Τα προαναφερθέντα τεχνικά προβλήματα που παρουσιάζονται από την έντονη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής στο κεντρικό δίκτυο, οφείλονται κυρίως στη φύση της λειτουργίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 1.2, οι ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται περισσότερο έχουν στοχαστική παραγωγή ενέργειας, καθώς αυτή εξαρτάται από κλιματολογικούς και άλλους αστάθμητους παράγοντες. Συνεπώς, η παροχή ισχύος τους παρουσιάζει έντονες και πολλές φορές απρόβλεπτες διακυμάνσεις, προκαλώντας προβλήματα αστάθειας στις τάσεις και τη συχνότητα του δικτύου.

Τυχόν μεγάλη αύξηση στην παραγωγή ισχύος από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να επιφέρει ανισορροπία στο ισοζύγιο προσφοράς-ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, προκαλώντας ανύψωση στην τάση του δικτύου λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος στις γραμμές. Επίσης, η περίσσεια ενεργού ισχύος στο δίκτυο θα προκαλέσει μείωση της συχνότητας λόγω της φύσης της λειτουργίας των σύγχρονων γεννητριών που απαρτίζουν τους συμβατικούς κεντρικούς σταθμούς παραγωγής. Αντίθετα, απρόβλεπτη και έντονη μείωση στην παραγωγή ισχύος από τις μονάδες ΔΠ μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση της τάσης και αύξηση της συχνότητας λόγω της μη επαρκούς ενεργού ισχύος για την κάλυψη της ζήτησης. Τα παραπάνω φαινόμενα συνθέτουν τα προβλήματα αστάθειας τάσης και συχνότητας που ενδέχεται να παρουσιαστούν στο δίκτυο αν η ΔΠ αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την αντιμετώπιση τους έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι και τεχνικές ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας. Αρκετές από αυτές θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Εξίσου σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η εισχώρηση αρμονικών συνιστωσών στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του δικτύου από την απαραίτητη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος (ανορθωτές, αντιστροφείς, DC-DC μετατροπείς κλπ) κατά τη σύνδεση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Η ύπαρξη των ηλεκτρονικών ισχύος είναι απαραίτητη καθώς οι ΑΠΕ δημιουργούν μια διαφορά δυναμικού στην έξοδο τους που δεν πληρεί τις προϋποθέσεις για σύνδεση στο δίκτυο. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά παράγουν DC τάση, οι ανεμογεννήτριες παράγουν AC τάση μεγάλης διακύμανσης σε πλάτος και συχνότητα κλπ. Χρειάζεται επομένως η εγκατάσταση κατάλληλων ηλεκτρονικών ισχύος στην έξοδο των ΑΠΕ για να κατασκευαστεί μια AC τάση ευσταθούς πλάτους και συχνότητας που να είναι κατάλληλη για σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο. Το πρόβλημα των αρμονικών συνιστωσών δημιουργείται από τα ηλεκτρονικά ισχύος καθώς αποτελούνται κυρίως από διακοπτικά στοιχεία, τα οποία είναι μη-γραμμικά. Ως αποτέλεσμα, οι κυματομορφές εξόδου τους περιέχουν αρκετές αρμονικές συνιστώσες που επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα ισχύος του δικτύου. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου τοποθετούνται φίλτρα εξόδου στα ηλεκτρονικά ισχύος τα οποία έχουν σκοπό να «κόψουν» τις μη επιθυμητές αρμονικές συνιστώσες και να επιτρέπουν τη διέλευση μόνο της θεμελιώδους αρμονικής, που είναι και η επιθυμητή κυματομορφή εξόδου της διάταξης. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι δυνατό τα φίλτρα να

κόβουν όλες τις αρμονικές συνιστώσες, αλλά μόνο μιας τάξης και πάνω, με αποτέλεσμα το πρόβλημα να συνεχίζει να υφίσταται, αν και σαφώς περιορισμένο.

Όσον αφορά τα συστήματα προστασίας και ελέγχου του κεντρικού δικτύου, εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς ότι η μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής κάνει τη λειτουργία αυτών των συστημάτων αρκετά πιο δύσκολη και αναξιόπιστη. Αυτό οφείλεται κυρίως και σε αυτήν την περίπτωση στην στοχαστική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ, που αποτελούν τον κύριο κορμό της ΔΠ. Η απρόβλεπτη και έντονα μεταβλητή συμπεριφορά των ΑΠΕ αναγκάζει τον διαχειριστή του δικτύου να προβεί σε επανασχεδιασμό και κατάλληλη ρύθμιση των συστημάτων προστασίας και ελέγχου για να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία τους. Κάτι τέτοιο φυσικά επιφέρει σημαντικό οικονομικό κόστος και επηρεάζει αρνητικά την αξιοπιστία του δικτύου μέχρι να ολοκληρωθούν οι κατάλληλες τροποποιήσεις σε αυτά τα συστήματα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με το φαινόμενο ανύψωσης της τάσης που προκαλείται στα δίκτυα διανομής από την έντονη διεύρυνση της διεσπαρμένης παραγωγής, όπως περιγράφηκε παραπάνω, καθώς και με τρόπους αντιμετώπισης του.

Κεφάλαιο 2

Ρύθμιση Τάσης

2.1 Εισαγωγή

Ιστορικά, η ρύθμιση της τάσης στα δίκτυα διανομής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που καλείται να επιλύσει ο διαχειριστής του συστήματος. Οι διακυμάνσεις στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου προκαλούν αντίστοιχες διακυμάνσεις και στις τάσεις των ζυγών των δικτύων διανομής. Κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης φορτίου οι τάσεις βυθίζονται, ενώ αντίθετα τις ώρες μικρής ζήτησης (κυρίως τις βραδινές ώρες) παρατηρείται ανύψωση των τάσεων. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν διάφορες συμβατικές μέθοδοι ρύθμισης τάσης, όπως οι λήψεις των μετασχηματιστών ισχύος, οι ρυθμιστές τάσης, οι σύγχρονοι πυκνωτές και οι στατοί πυκνωτές, οι οποίες θα παρουσιαστούν πιο αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

Ωστόσο, η θεώρηση για τη συμπεριφορά του δικτύου που περιγράφηκε προηγουμένως προϋποθέτει ότι το δίκτυο είναι παθητικό (συμβατικό), δηλαδή ότι η ροή ισχύος είναι πάντα μιας κατεύθυνσης, από τους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής προς τα φορτία, μέσω του δικτύου μεταφοράς. Τα τελευταία χρόνια, με τη μεγάλη κλίμακα διεύδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) στα δίκτυα διανομής, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ροή ισχύος αντιστρέφεται, εξαιτίας της μεγάλης παραγωγής ισχύος της ΔΠ που βρίσκεται σε κοντινές αποστάσεις από τους καταναλωτές. Έτσι, αν η παραγωγή ισχύος της ΔΠ είναι αρκετή ώστε να καλύψει τη ζήτηση των καταναλωτών, τυχόν περίσσεια παραγόμενη ισχύς «αναγκάζεται» να ρεύσει αντίθετα, από τα δίκτυα διανομής προς το δίκτυο μεταφοράς και κατ' επέκταση προς τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.

Το φαινόμενο αυτό άλλαξε τα δεδομένα που ίσχυαν σχετικά με τη ρύθμιση τάσης στα δίκτυα διανομής, καθώς πλέον οι διακυμάνσεις της τάσης δεν εξαρτώνται μόνο από τις μεταβολές της ζήτησης των φορτίων, αλλά και από την παραγόμενη ισχύ των μονάδων ΔΠ, η οποία αποτελεί στοχαστικό φαινόμενο όταν προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, όπως έχουμε εξηγήσει στο κεφάλαιο 1. Επίσης, η δυνατότητα διπλής κατεύθυνσης της ροής ισχύος στο δίκτυο δυσχεραίνει την κατάσταση, αφού μπορεί να παρουσιάζεται τόσο βύθιση όσο και ανύψωση των τάσεων οποιαδήποτε χρονική στιγμή, καθιστώντας απρόβλεπτη τη συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου. Συνεπώς, τα συμβατικά μέσα ρύθμισης τάσης που υπάρχουν εγκατεστημένα στα δίκτυα διανομής δεν επαρκούν για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος. Ήταν απαραίτητο λοιπόν να αναπτυχθούν σύγχρονες μέθοδοι ρύθμισης τάσης, που θα λαμβάνουν υπόψιν τους την ύπαρξη της ΔΠ στα δίκτυα διανομής, και μάλιστα θα αξιοποιούν τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών ισχύος που υπάρχουν στις μονάδες της για να επιτύχουν τον επιθυμητό έλεγχο των τάσεων.

Το πιο πρόσφατο ζήτημα έρευνας και μελέτης σχετικά τη ρύθμιση τάσης αφορά την ανάπτυξη συστημάτων που να ελέγχουν κεντρικά τη λειτουργία όλων των μονάδων ρύθμισης τάσης που υπάρχουν εγκατεστημένα στο δίκτυο. Η τεχνική αυτή ονομάζεται Συντονισμένος Έλεγχος Τάσης (Coordinated Voltage Control) και είναι το επόμενο βήμα μετά τον Τοπικό Έλεγχο Τάσης (Local Voltage Control), στον οποίο κάθε μονάδα ρύθμισης τάσης λειτουργεί αυτόνομα μέσα στο δίκτυο, χωρίς συνεργασία με τις υπόλοιπες.

2.2 Συμβατικές μέθοδοι ρύθμισης τάσης

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, για τη διατήρηση των τάσεων εντός των επιτρεπτών ορίων κατά τη διάρκεια μιας ημέρας στα συμβατικά (παθητικά) δίκτυα διανομής, χρησιμοποιείται ένα εύρος μεθόδων ρύθμισης τάσης. Αυτές περιλαμβάνουν την εγκατάσταση ειδικού εξοπλισμού σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου, εκεί όπου επιθυμούμε να πραγματοποιηθεί η ρύθμιση. Οι κυριότερες εξ' αυτών είναι [7]:

- Λήψεις αλλαγής τάσεων Μετασχηματιστών Ισχύος
- Ρυθμιστές Τάσης
- Σύγχρονοι Πυκνωτές
- Στατοί Πυκνωτές

2.2.1 Λήψεις αλλαγής τάσεων Μετασχηματιστών Ισχύος

Ο κύριος προορισμός ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι ο μετασχηματιστής της ενέργειας μεταξύ διαφόρων επιπέδων τάσεως. Εν τούτοις, κάθε μετασχηματιστής, ή αυτομετασχηματιστής, είναι εφοδιασμένος με λήψεις για την αλλαγή της σχέσεως μετασχηματισμού, εκτελώντας κατ' αυτό τον τρόπο και το δευτερεύον καθήκον του για έλεγχο της τάσεως. Στους μικρούς μετασχηματιστές διανομής (εν γένει στους Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ) η αλλαγή αυτή των λήψεων μπορεί να γίνει μόνο με τον μετασχηματιστή εκτός τάσεως (αποσυνδεδεμένο). Στους μεγαλύτερους όμως μετασχηματιστές και αυτομετασχηματιστές του δικτύου (ΥΥΤ/ΥΤ και ΥΤ/ΜΤ) ο έλεγχος αυτός γίνεται κατά κανόνα με αλλαγή της τάσεως υπό φορτίο (Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο – ΣΑΤΥΦ). Κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σπουδαιότερους ή και όλους τους ζυγούς των υποσταθμών διασύνδεσης ή υποβιβασμού του δικτύου.

Η περιοχή μεταβολής της τάσεως στους μικρούς μετασχηματιστές διανομής είναι συνήθως $\pm 5\%$, ενώ στους μεγαλύτερους, οι οποίοι διαθέτουν ΣΑΤΥΦ, είναι της τάξης του $\pm 10\%$, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει μέχρι και $\pm 15\%$ εκατέρωθεν της ονομαστικής τάσεως. Τα βήματα αλλαγής των λήψεων είναι συνήθως 2,5% ή 1,25%. Το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός του γίνεται εξ' αποστάσεως και πολλές φορές αυτόματα. Στην τελευταία περίπτωση το σύστημα παίρνει εντολές από έναν κατάλληλο ηλεκτρονόμο τάσεως, οπότε ο έλεγχος της τάσης του δευτερεύοντος γίνεται με σύστημα κλειστού βρόχου. Ο ηλεκτρονόμος τάσεως συγκρίνει την τάση εξόδου του μετασχηματιστή με μια προκαθορισμένη τιμή αναφοράς και αν διαπιστώσει διαφορά δίνει εντολή ανύψωσης ή μείωσης της τάσεως στο σύστημα αλλαγής λήψης.

2.2.2 Ρυθμιστές Τάσεις

Λήψεις αλλαγής της σχέσεως μετασχηματισμού υπάρχουν, όπως είπαμε, σε κάθε μετασχηματιστή ισχύος. Εκτός αυτών όμως, υπάρχουν και ειδικοί μετασχηματιστές για τη ρύθμιση των τάσεων, οι οποίοι ονομάζονται Ρυθμιστές Τάσεις. Ο κύριος σκοπός των Ρυθμιστών Τάσης δεν είναι ο μετασχηματισμός μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας (γι' αυτό και η ισχύς τους είναι σχετικά μικρή), αλλά η αλλαγή του επιπέδου της τάσεως στο σημείο του δικτύου στο οποίο είναι εγκατεστημένοι. Αντίθετα με τους μετασχηματιστές ισχύος, οι οποίοι βρίσκονται σε προκαθορισμένα σημεία του δικτύου όπως είναι οι υποσταθμοί

υποβιβασμού ή διανομής, οι ρυθμιστές τάσεις εγκαθίστανται σε όποιο σημείο κριθεί σκόπιμο να υπάρξει ρύθμιση της τάσης.

Ο ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού των ρυθμιστών τάσης είναι 1:1, καθώς όπως αναφέραμε δεν έχουν ως σκοπό των μετασχηματισμό της ενέργειας. Με τη χρήση ενός συστήματος αλλαγής λήψεων (συνηθέστερο πλήθος λήψεων είναι 16 ή 32), παρόμοιο με αυτό των μετασχηματιστών ισχύος, ο λόγος αυτός μπορεί να μεταβληθεί μέχρι ένα όριο της τάξης του $\pm 10\%$ συνήθως, με το κατάλληλο βήμα αλλαγής λήψεων. Οι ρυθμιστές τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τη ρύθμιση του μέτρου της τάσης, όσο και για τη ρύθμιση της φασικής γωνίας της.

2.2.3 Σύγχρονοι Πυκνωτές

Το μεγαλύτερο ποσοστό των φορτίων τα οποία τροφοδοτούνται από ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι επαγωγικού χαρακτήρα, απαιτούν δηλαδή τη χορήγηση αέργου ισχύος από το σύστημα. Η ροή αέργου ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής προς τα φορτία προκαλεί πρόσθετες απώλειες ενεργού ισχύος στις γραμμές και τον εξοπλισμό (λόγω του αυξημένου ρεύματος), και κατά συνέπεια μεγαλύτερη πτώση τάσης σε αυτές. Αντίθετα, τις νυχτερινές ώρες όπου η ζήτηση ισχύος είναι χαμηλή, ενδέχεται να παρατηρηθεί ανύψωση των τάσεων του δικτύου λόγω της κυκλοφορίας περίσσειας ποσότητας αέργου ισχύος. Διαπιστώθηκε λοιπόν, ότι ένας τρόπος ρύθμισης της τάσης είναι η εγκατάσταση, σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου, κατάλληλου εξοπλισμού που να λειτουργεί ως πηγή ή καταβόθρα αέργου ισχύος. Έτσι, θα μειώνεται η κυκλοφορία αέργου ισχύος στο δίκτυο και οι τάσεις θα διατηρούνται πιο κοντά στην ονομαστική τιμή τους.

Ένα μέσο που επιτυγχάνει αυτή τη λειτουργία είναι ο σύγχρονος πυκνωτής. Ο σύγχρονος πυκνωτής είναι ουσιαστικά μια κανονική σύγχρονη μηχανή, με τη διαφορά ότι δεν έχει κινητήρια μηχανή ή φορτίο συνδεδεμένο σε αυτήν και συνήθως δεν έχει άξονα ικανό να μεταφέρει ζεύγος, συνεπώς όταν συνδέεται στο δίκτυο λειτουργεί μόνο εν κενώ. Υπό τις συνθήκες αυτές απορροφά μόνο όση ενεργό ισχύ χρειάζεται για την τροφοδότηση των απωλειών του, οι οποίες συνήθως είναι αμελητέες. Φυσικά, όσον αφορά την άεργο ισχύ, συμπεριφέρεται σαν κανονική σύγχρονη μηχανή.

Όταν ο σύγχρονος πυκνωτής συνδέεται στο δίκτυο έχει τη δυνατότητα είτε να αποδώσει άεργο ισχύ όταν υπερδιεγείρεται, είτε να απορροφήσει άεργο ισχύ όταν υποδιεγείρεται. Μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων υπάρχει μια τιμή της διεγέρσεως για την οποία δεν απορροφά ούτε αποδίδει άεργο ισχύ. Στη κατάσταση αυτή το ρεύμα του σύγχρονου πυκνωτή είναι ελάχιστο, αποτελούμενο μόνο από το μικρό ρεύμα των απωλειών. Αυτό σημαίνει ότι ο σύγχρονος πυκνωτής είναι μια ευέλικτη αέργου ισχύος, καθώς μπορεί η ροή της αέργου ισχύος του να μεταβάλλεται εύκολα και συνεχώς κατά μέτρο και πολικότητα, μεταβάλλοντας απλώς τη διέγερση του.

Τα χαρακτηριστικά αυτά κάνουν το σύγχρονο πυκνωτή εξαιρετικά κατάλληλο σαν πηγή αέργου ισχύος, δεδομένου ότι μια γραμμή μεταφοράς απαιτεί παροχή αέργου ισχύος στο άκρο αφίξεως σε περιόδους μεγάλων φορτίων για να διατηρήσει την τάση της, ενώ για τον ίδιο λόγο σε περιόδους ελαφρού φορτίου απαιτεί απορρόφηση αέργου ισχύος.

2.2.4 Στατοί Πυκνωτές

Οι στατοί πυκνωτές είναι συστοιχίες κανονικών πυκνωτών κατάλληλης ποιότητας, οι οποίες συνδέονται εν παραλλήλω σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου για να λειτουργήσουν ως πηγές αέργου ισχύος.

Το βασικό μειονέκτημα τους σε σχέση με τους σύγχρονους πυκνωτές είναι ότι δεν έχουν τη δυνατότητα απορρόφησης αέργου ισχύος, αλλά μόνο παραγωγής, και η παραγωγή αυτή γίνεται μόνο σε βήματα (διακριτά, και όχι σε συνεχές φάσμα όπως στους σύγχρονους). Επίσης, έχουν την τάση να αποδίδουν μικρότερη άεργο ισχύ σε περιόδους βύθισης της τάσης, το οποίο σημαίνει ότι είναι λιγότερο αποτελεσματικοί στη ρύθμιση της τάσης. Άλλα μειονεκτήματα είναι ότι δεν έχουν τη δυνατότητα υπερφόρτισης και ότι η ζεύξη και η αποσύζευξη τους από το δίκτυο συνοδεύεται πολλές φορές από μεγάλα κρουστικά ρεύματα και υπερτάσεις αντίστοιχα.

Ωστόσο, οι στατοί πυκνωτές έχουν και αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους σύγχρονους ως μέσα ρύθμισης της τάσης. Αρχικά, είναι φθηνότεροι και παρουσιάζουν πολύ μικρότερες απώλειες. Επίσης, έχουν καλύτερη απόκριση σε περιπτώσεις σφαλμάτων, καθώς βοηθούν στην επίτευξη της ευστάθειας του συστήματος. Επιπροσθέτως, έχουν το πλεονέκτημα της εύκολης μετακίνησης τους από μια θέση του δικτύου σε μια άλλη, όπως επίσης και της εύκολης αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος τους με την προσθήκη περισσότερων πυκνωτών. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι στατοί πυκνωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν οικονομικά σε μικρές μονάδες και στις θέσεις ακριβώς που απαιτείται η παροχή αέργου ισχύος στα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης.

2.3 Σύγχρονες μέθοδοι ρύθμισης τάσης

Με την έντονη διεύδυση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) στα δίκτυα διανομής διαπιστώθηκε ότι τα παραπάνω συμβατικά μέσα ρύθμισης της τάσης δεν ήταν πια αποτελεσματικά. Χρειάστηκε να αναπτυχθούν νέες σύγχρονες μέθοδοι για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων της τάσης, χρησιμοποιώντας κατά κύριο λόγο πολύπλοκα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος. Τα κυριότερα εξ' αυτών είναι [10]:

- STATCOM, SVC
- Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας
- Περικοπή ενεργού ισχύος της ΔΠ
- Έλεγχος της αέργου ισχύος των αντιστροφών της ΔΠ

2.3.1 STATCOM, SVC

Το STATCOM (Static Compensator) είναι μια συσκευή ρύθμισης αποτελούμενη από ηλεκτρονικά ισχύος (κυριότερο είναι τα IGBTs) η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως πηγή ή ως καταβόθρα αέργου ισχύος. Συνήθως το STATCOM χρησιμοποιείται σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ισχύος ή «φτωχή» ρύθμιση τάσης. Ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί επίσης και για βελτίωση της ευστάθειας της τάσης. Το STATCOM λειτουργεί με τη λογική μετατροπέα τάσης-πηγής (Voltage-Source Converter – VSC), με μια πηγή τάσης πίσω από μια επαγωγική αντίδραση. Η πηγή τάσης είναι ένας DC πυκνωτής, με συνέπεια το STATCOM να έχει πολύ μικρή δυνατότητα παραγωγής ενεργού ισχύος. Ωστόσο, αυτή μπορεί να αυξηθεί αν τοποθετηθεί παράλληλα στον πυκνωτή μια κατάλληλη συσκευή αποθήκευσης ενέργειας. Η άεργος ισχύς στους ακροδέκτες του

STATCOM εξαρτάται από το πλάτος της τάσης της πηγής. Για παράδειγμα, αν η τάση των ακροδεκτών είναι μεγαλύτερη από την AC τάση στο σημείο διασύνδεσης, το STATCOM παράγει αέργο ισχύ, ενώ αντίθετα αν είναι μικρότερη τότε απορροφά άεργο ισχύ.

Μια παρόμοια, αλλά απλούστερη, διάταξη που χρησιμοποιείται είναι το Static Var Compensator (SVC). Αποτελείται κι αυτή από ηλεκτρονικά ισχύος, με τα συνηθέστερα να είναι τα θυρίστορ. Τα STATCOM παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά από τα SVC. Ο χρόνος απόκρισης των STATCOM είναι μικρότερος από των SVC, όπως και η δημιουργία αρμονικών συνιστωσών, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης διακοπτικής συχνότητας των IGBT σε σχέση με τα θυρίστορ. Τα STATCOM επίσης προσφέρουν καλύτερη υποστήριξη αέργου ισχύος όταν η τάσεις είναι χαμηλές, καθώς η άεργος ισχύς τους μειώνεται γραμμικά με την τάση, αντίθετα με τα SVC όπου η άεργος ισχύς είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης. Ωστόσο, τα STATCOM παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες και είναι ακριβότερα από τα SVC, με αποτέλεσμα τα τελευταία να χρησιμοποιούνται ακόμη εκτενώς.

2.3.2 Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Μια έξυπνη λύση για την αντιμετώπιση των φαινομένων ανύψωσης και βύθισης τάσης που παρουσιάζονται στα σύγχρονα ενεργά δίκτυα διανομής είναι η εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πιο δημοφιλείς μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι οι συστοιχίες μπαταριών και τα flywheels (στρεφόμενες μηχανές που αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια ως κινητική ενέργεια).

Χρησιμοποιώντας τέτοια μέσα έχουμε τη δυνατότητα να αποθηκεύουμε τυχόν περίσσεια παραγώμενη ισχύ από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, έτσι ώστε να μην «αναγκάζεται» αυτή να ρέει αντίστροφα μέσα στο δίκτυο προκαλώντας ανύψωση των τάσεων. Αντίστοιχα, αν κάποια περίοδο της ημέρας παρουσιαστεί έλλειψη ισχύος στο δίκτυο και οι τάσεις βυθιστούν, τα μέσα αποθήκευσης μπορούν να δράσουν ως πηγές ισχύος τροφοδοτώντας τα φορτία και βοηθώντας στη ρύθμιση της τάσης.

Για τη σύνδεση των μονάδων αποθήκευσης με το δίκτυο χρησιμοποιούνται αντιστροφείς διπλής κατεύθυνσης (και άλλα απαραίτητα ηλεκτρονικά ισχύος), οι οποίοι ελέγχουν τη ροή της ισχύος από και προς το δίκτυο. Οι αντιστροφείς λαμβάνουν τις αποφάσεις για αποθήκευση ή απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο (αποθήκευση όταν υπάρχει πλεόνασμα ισχύος, παραγωγή όταν υπάρχει έλλειμμα).

Η λογική της χρησιμοποίησης αποθηκευτικών μονάδων ως μέσα ρύθμισης τάσης είναι αρκετά αξιόλογη και αποτελεσματική. Ωστόσο, οι αποθηκευτικές διατάξεις είναι αρκετά ακριβές, με χαμηλή σχέση κόστους-απόδοσης, γι' αυτό και η χρησιμοποίησή τους παραμένει περιορισμένη.

2.3.3 Περικοπή ενεργού ισχύος της ΔΠ

Στην τεχνική αυτή αξιοποιούνται οι δυνατότητες λειτουργίας των ηλεκτρονικών ισχύος (κυρίως των αντιστροφέων), που βρίσκονται εγκατεστημένοι στην έξοδο των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, για την αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης που προκαλείται από την έντονη διείδυση της ΔΠ στα δίκτυα διανομής.

Η λογική της Περικοπής Ενεργού Ισχύος (Active Power Curtailment – APC) βασίζεται στη μέτρηση και τον έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης του αντιστροφέα με το

δίκτυο. Όσο αυτή παραμένει εντός κάποιων επιλεγμένων επιθυμητών ορίων, τότε η παραγωγή ενεργού ισχύος της αντιστοιχίας μονάδας ΔΠ αποδίδεται ολόκληρη στο δίκτυο. Σε περίπτωση όμως που η μετρούμενη τάση ξεπεράσει την επιτρεπτή τιμή, τότε ο αντιστροφέας αποφασίζει να «κόψει» μια ποσότητα από την παραγόμενη ενεργό ισχύ της μονάδας. Σε ακραίες περιπτώσεις ανύψωσης τάσης, μπορεί να χρειαστεί να απομονώσει πλήρως τη μονάδα από το δίκτυο, εκμηδενίζοντας την αποδιδόμενη ενεργό ισχύ της.

Ο τρόπος υπολογισμού της απαραίτητης ποσότητας ενεργού ισχύος που πρέπει να περικοπεί από τον αντιστροφέα μπορεί να γίνει με τη χρήση μιας απλής γραμμικής συνάρτησης, αλλά μπορεί, αν κριθεί απαραίτητο, να αναπτυχθεί ένας πιο πολύπλοκος αλγόριθμος. Η επιλογή εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες της εγκατάστασης. Ένα απλό παράδειγμα χρησιμοποίησης μιας γραμμικής σχέσης για τον υπολογισμό παρουσιάζεται στη συνέχεια:

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

όπου: P_{MPPT} είναι η παραγόμενη ενεργός ισχύς της μονάδας, P_{inv} είναι η αποδιδόμενη ισχύς, V η μετρούμενη τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης, V_{limit} το όριο της τάσης πάνω από το οποίο πρέπει να γίνει περικοπή ενεργού ισχύος, V_{cri} η κρίσιμη τιμή τάσης στην οποία πρέπει να απομονωθεί πλήρως η μονάδα ΔΠ και k η κλίση της γραμμικής σχέσης.

Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, το οποίο είναι και ο λόγος που δεν εφαρμόζεται συχνά, είναι ότι η περικοπή ενεργού ισχύος μεταφράζεται ευθέως σε μείωση του κέρδους. Οι παραγωγοί ισχύος που χρησιμοποιούν μονάδες ΔΠ προτιμούν να καταφύγουν σε άλλες μεθόδους ρύθμισης τάσης, ακόμα κι αν δεν είναι εξίσου αποτελεσματικές, με σκοπό να αποφύγουν την μείωση του οικονομικού οφέλους τους.

2.3.4 Έλεγχος της αέργου ισχύος των αντιστροφέων της ΔΠ

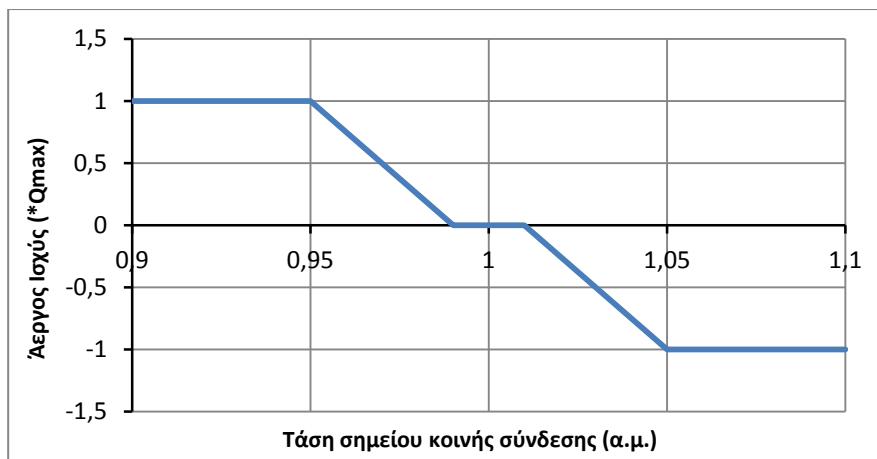
Η τελευταία σύγχρονη μέθοδος ρύθμισης τάσης που θα παρουσιαστεί είναι και εκείνη που εφαρμόζεται ευρύτερα. Αξιοποιεί και αυτή τους αντιστροφείς των μονάδων ΔΠ αλλά για τον έλεγχο της αέργου ισχύος σε αυτήν την περίπτωση, αντίθετα με την τεχνική APC που ελέγχει την ενεργό ισχύ, όπως περιγράψαμε παραπάνω.

Η λογική της βασίζεται σε αυτήν των σύγχρονων πυκνωτών, ότι δηλαδή μπορεί να επιτευχθεί ρύθμιση της τάσης μεταβάλλοντας την παραγωγή και την απορρόφηση αέργου ισχύος σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου. Η διαφορά της μεθόδου αυτής είναι ότι τα σημεία είναι προκαθορισμένα, είναι οι κόμβοι κοινής σύνδεσης των μονάδων ΔΠ με το δίκτυο, και ότι δεν χρειάζεται πρόσθετος εξοπλισμός πέρα από αντιστροφείς που να έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της ροής αέργου ισχύος τους.

Ο έλεγχος της αέργου ισχύος γίνεται με τη μεταβολή του συντελεστή ισχύος λειτουργίας του αντιστροφέα, γι' αυτό και η μέθοδος αυτή ονομάζεται συχνά Έλεγχος Συντελεστή Ισχύος (Power Factor Control – PFC). Δουλεύοντας με επαγωγικό ΣΙ, ο αντιστροφέας έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει άεργο ισχύ, ενώ δουλεύοντας με χωρητικό ΣΙ μπορεί να αποδώσει άεργο ισχύ στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό συνεισφέρει στη ρύθμιση των τάσεων, απορροφώντας άεργο όταν παρατηρείται ανύψωση της τάσης και παράγοντας άεργο όταν παρατηρείται βύθιση της.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος εφαρμογής της μεθόδου PFC είναι με τη μέτρηση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης της μονάδας ΔΠ με το δίκτυο και τη χρησιμοποίηση κατάλληλα επιλεγμένων καμπυλών αέργου ισχύος-τάσης $Q(V)$ που υπολογίζουν την απαραίτητη ποσότητα αέργου ισχύος που πρέπει να απορροφηθεί ή να παραχθεί από τον αντιστροφέα.

Η τυπική μορφή που έχουν οι καμπύλες $Q(V)$ παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1. Από τη μορφή της καμπύλης παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα διάστημα «νεκρής ζώνης» (deadband) γύρω από την ονομαστική τιμή της τάσης στο οποίο δεν κρίνεται απαραίτητο να υπάρξει ροή αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα. Όταν η μετρούμενη τάση αυξηθεί και βγει εκτός του deadband, τότε ο αντιστροφέας αρχίζει να απορροφά αέργο ισχύ (αρνητικές τιμές) ώστε να επιτευχθεί μείωση της. Όταν η τάση φτάσει σε ένα κρίσιμο όριο, τότε ο αντιστροφέας απορροφά την μέγιστη δυνατή αέργο ισχύ και δεν μπορεί να αυξήσει αυτήν την ποσότητα περαιτέρω (κορεσμός). Η μέγιστη δυνατή αέργος ισχύς εξαρτάται από την παραγώμενη ενεργό ισχύ της μονάδας και τον ελάχιστο επιτρεπτό συντελεστή ισχύος του αντιστροφέα σύμφωνα με τη σχέση: $Q_{max} = P_{\text{παρ}} * \tan(\cos^{-1}(\text{ελάχ.}SI))$. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρούμε και για τάσεις μικρότερες της ονομαστικής, όπου ο αντιστροφέας καλείται να αποδώσει αέργο ισχύ στο δίκτυο (θετικές τιμές) για να αυξηθεί η τάση.



Εικόνα 2.1 Τυπική καμπύλη $Q(V)$

2.4 Τοπικός και Συντονισμένος έλεγχος τάσης

Η ανάπτυξη των μεθόδων ρύθμισης τάσης (συμβατικών και σύγχρονων) που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους έγινε αρχικώς με το σκεπτικό αυτόνομης λειτουργίας της κάθε μιας. Σύμφωνα με αυτή τη λογική, κάθε μονάδα ρύθμισης τάσης είναι υπεύθυνη να μετρά και να ελέγχει την τάση μόνο στο σημείο κοινής σύνδεσης της με το δίκτυο διανομής, χωρίς επικοινωνία ή συνεργασία με τυχόν άλλες εγκατεστημένες μονάδες ρύθμισης τάσης σε άλλα σημεία του δικτύου. Η λογική αυτή ονομάζεται Τοπικός (ή Αποκεντρωμένος) Έλεγχος Τάσης [Local (or Decentralized) Voltage Control – LVC]. Ο έλεγχος χαρακτηρίζεται ως Τοπικός ακριβώς επειδή πραγματοποιείται ξεχωριστά και απομονωμένα σε κάθε σημείο που υπάρχει μονάδα ρύθμισης τάσης.

Τα τελευταία χρόνια ωστόσο έχει αρχίσει να δίνεται μεγάλη έμφαση στην έρευνα και την ανάπτυξη μιας πιο σύγχρονης λογικής για τη λειτουργία των μέσων ρύθμισης τάσης. Η νέα αυτή λογική βασίζεται στον ταυτόχρονο έλεγχο όλων των μέσων ρύθμισης τάσης ενός δικτύου διανομής από ένα κεντρικό σημείο, συνήθως σε κάποιον υποσταθμό, και

ονομάζεται Συντονισμένος (ή Κεντρικός) Έλεγχος Τάσης [Coordinated (or Centralized) Voltage Control – CVC). Για τη λειτουργία του Συντονισμένου Ελέγχου Τάσης είναι απαραίτητη η ύπαρξη δικτύου επικοινωνίας μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και των διάσπαρτων μέσων ρύθμισης τάσης του δικτύου διανομής (αντιστροφείς, πυκνωτές, μετασχηματιστές κλπ). Μέσω του δικτύου επικοινωνίας, ο κεντρικός ελεγκτής μπορεί να παρακολουθεί τις τάσεις και τις ροές ισχύος σε επιλεγμένα κρίσιμα σημεία του δικτύου διανομής και να υπολογίζει το βέλτιστο τρόπο με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή ρύθμιση τάσης, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των μονάδων ρύθμισης τάσης που υπάρχουν στο δίκτυο. Χρησιμοποιώντας και πάλι το δίκτυο επικοινωνίας, στέλνει τις κατάλληλες εντολές στις διάφορες μονάδες (αλλαγή λήψης μετασχηματιστή, παραγωγή ή απορρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας αέργου ισχύος από αντιστροφέα, ζεύξη ή αποσύζευξη στατών πυκνωτών, κλπ) ώστε επιτευχθεί η βέλτιστη αυτή ρύθμιση.

Ωστόσο, ο Συντονισμένος Έλεγχος Τάσης παρουσιάζει και αρκετά σημαντικά μειονεκτήματα, γι' αυτό και η εφαρμογή του παραμένει περιορισμένη προς το παρόν. Στον πίνακα που ακολουθεί θα αναλυθούν οι κυριότερες διαφορές μεταξύ Τοπικού και Συντονισμένου ελέγχου, δίνοντας έμφαση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μιας.

Τοπικός Έλεγχος Τάσης	Συντονισμένος Έλεγχος Τάσης
Μικρό αρχικό κόστος εγκατάστασης	Μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης
Δεν χρειάζεται δίκτυο επικοινωνίας	Απαιτείται δίκτυο επικοινωνίας
Σφάλμα σε μια μονάδα ρύθμισης τάσης δεν επηρεάζει όλο το σύστημα	Σφάλμα σε οποιοδήποτε τμήμα του συστήματος ελέγχου τάσης δημιουργεί πρόβλημα στη λειτουργία όλου του συστήματος
Δεν απαιτούνται πολύπλοκα κυκλώματα ελέγχου	Απαιτείται η ανάπτυξη εξελιγμένου κεντρικού ελεγκτή
Οποιαδήποτε αλλαγή στη λειτουργία των ρυθμιστών πρέπει να πραγματοποιηθεί ξεχωριστά σε κάθε μονάδα	Εύκολη παραμετροποίηση και εφαρμογή αλλαγών της λειτουργίας του συστήματος μέσω του κεντρικού ελεγκτή
Μη βέλτιστη ρύθμιση τάσης: αυξημένες απώλειες στις γραμμές, κυκλοφορία περιττής αέργου ισχύος, φθορά μετασχηματιστών λόγω συχνών αλλαγών λήψης και άλλα	Επίτευξη βέλτιστης ρύθμισης τάσης, ελαχιστοποιώντας τις αρνητικές παραμέτρους, μέσω του κεντρικού ελεγκτή
Συνεχείς αλληλεπιδράσεις (πιθανώς αρνητικές) μεταξύ των διαφόρων μονάδων ρύθμισης τάσης, καθώς δεν συνεργάζονται αλλά δρουν αυτόνομα	Ελεγχόμενη και συντονισμένη συνεργασία μεταξύ των μονάδων ρύθμισης τάσης για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος

Πίνακας 2.1 Σύγκριση Τοπικού και Συντονισμένου Ελέγχου Τάσης (πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα)

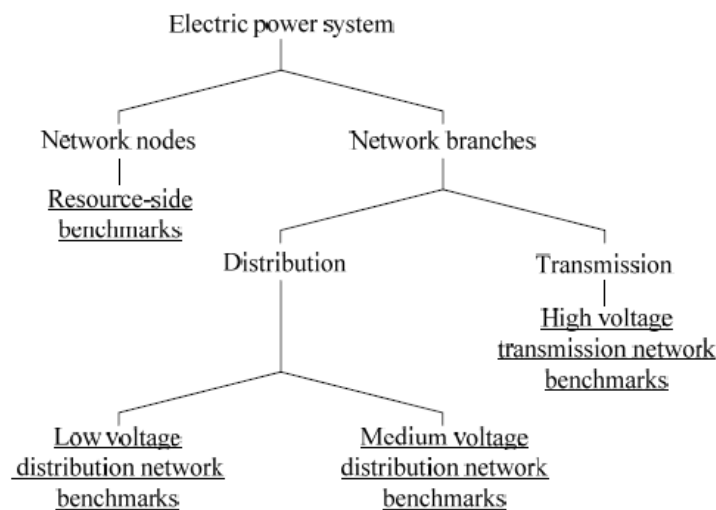
Κεφάλαιο 3

Προτυποποίηση Δικτύων

3.1 Εισαγωγή

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η μετάβαση προς την εκτενή χρήση ανανεώσιμων και διεσπαρμένων πηγών ενέργειας (renewable and distributed energy sources) είναι μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις του 21^{ου} αιώνα. Η επιτυχία αυτής της μετάβασης βασίζεται στην επαρκή διαθεσιμότητα μεθόδων και τεχνικών που να καθιστούν ικάνη την οικονομική, εύρωστη και περιβαλλοντικά υπεύθυνη ενσωμάτωση των διεσπαρμένων πηγών στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κλάδος της βιομηχανίας, τα πανεπιστήμια, αλλά και ερευνητικά ινστιτούτα σε όλο τον κόσμο ασχολούνται ενεργά με την ανάπτυξη τέτοιων μεθόδων και τεχνικών. Αυτό που λείπει, όμως, είναι τα κατάλληλα συστήματα δοκιμών (test systems) που να διευκολύνουν την ανάλυση και την επικύρωση της ορθής λειτουργίας όλων αυτών των μεθόδων που αναπτύσσονται συνεχώς. Σε αυτό το πλαίσιο, προέκυψε η αναγκαιότητα της ανάπτυξης τέτοιων πρότυπων συστημάτων και δικτύων (benchmark systems and networks), που να καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα των χαρακτηριστικών που απαντώνται στα πραγματικά δίκτυα ανά την υφήλιο. Η διαδικασία ανάπτυξης αυτών των δικτύων ονομάζεται προτυποποίηση (network benchmarking).

Η καθιέρωση μιας κοινής βάσης για τον έλεγχο της ενσωμάτωσης των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας χρησιμοποιώντας πρότυπα δίκτυα αποτελεί σημαντική πρόκληση, καθώς τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα όταν διαθέτουν και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και διαφορετικότητα ανά τον πλανήτη. Έτσι, είναι απαραίτητο η ανάπτυξη των πρότυπων δικτύων να γίνεται με βάση κάποια κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά αφορούν κυρίως το είδος του δικτύου (μεταφοράς, διανομής), το επίπεδο της τάσης (υψηλή, μέση, χαμηλή τάση), την ονομαστική συχνότητα και το είδος της περιοχής που εξυπηρετούν (αγροτική, αστική, βιομηχανική κλπ). Η βασική κατηγοριοποίηση και ιεραρχία των πρότυπων δικτύων παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1. Οποιοσδήποτε περαιτέρω διαχωρισμός (λόγω συχνότητας, περιοχής κλπ) μπορεί να τοποθετηθεί σε ακόμα χαμηλότερα επίπεδα ιεραρχίας [21].



Εικόνα 3.1 Ιεραρχία και κατηγοριοποίηση πρότυπων δικτύων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα παρουσιάσουμε και θα ασχοληθούμε με πρότυπα δίκτυα που ανήκουν στις 3 βασικότερες κατηγορίες:

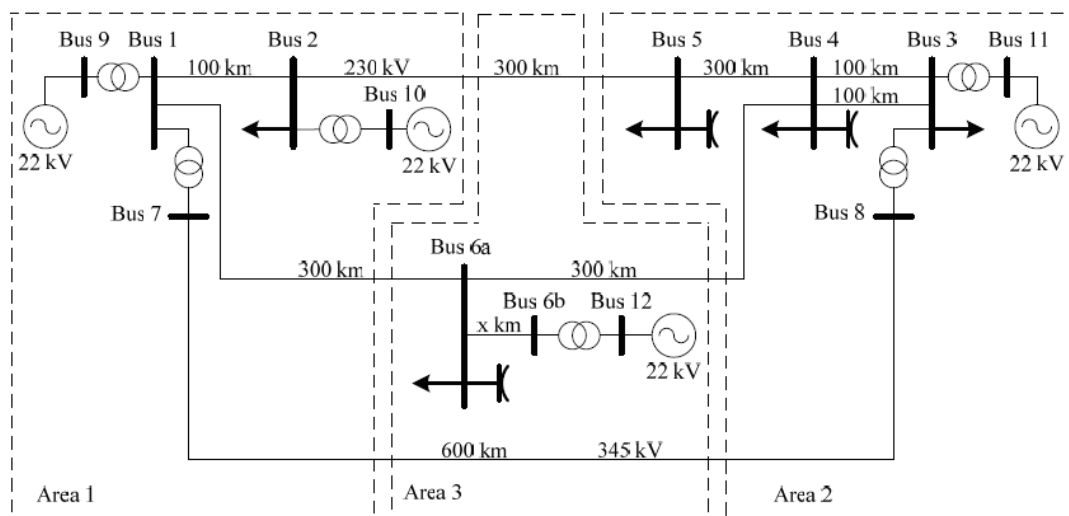
1. Δίκτυα μεταφοράς Υψηλής Τάσης (High Voltage transmission)
2. Δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης (Medium Voltage distribution)
3. Δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης (Low Voltage distribution)

Οι δύο κυριότεροι και ευρέως αναγνωρισμένοι φορείς που έχουν αναλάβει το μεγαλύτερο μερίδιο στην ανάπτυξη πρότυπων δικτύων είναι το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) και το Διεθνές Συμβούλιο για Μεγάλα Συστήματα Ενέργειας (International Council on Large Energy Systems, και στα γαλλικά Conseil International des Grands Réseaux Électriques–CIGRÉ). Η πλειοψηφία των πρότυπων δικτύων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια είναι σχεδιασμένα από τους δύο αυτούς φορείς.

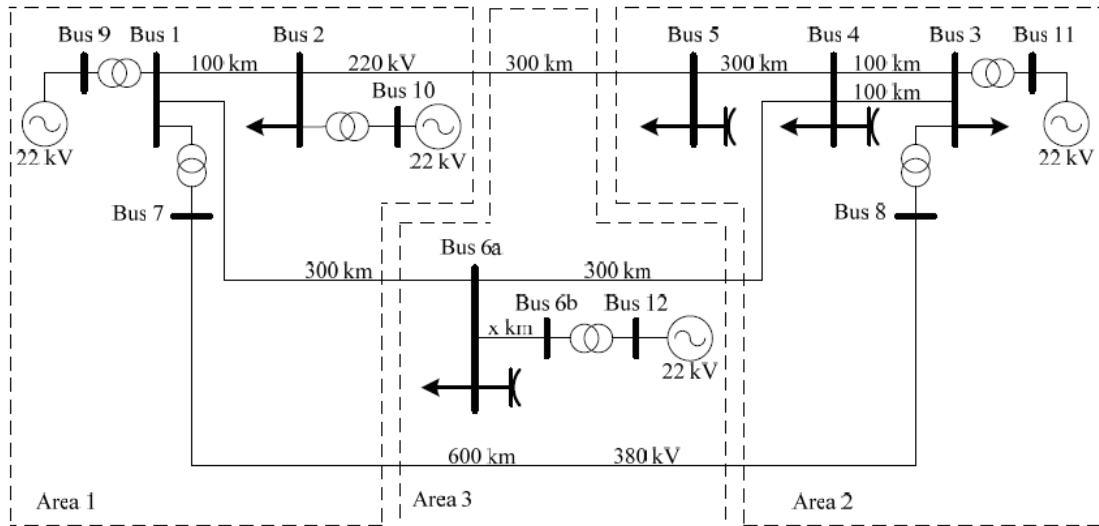
3.2 Πρότυπα δίκτυα μεταφοράς Υψηλής Τάσης

Είναι γνωστό ότι οι περισσότερες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής συνδέονται κυρίως στη μέση και τη χαμηλή τάση. Ωστόσο, πάρα ανανεώσιμων πηγών μεγάλου εύρους, κυρίως φάρμες ανέμου (wind farms) με πολλές εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες, έχουν μεγάλη παραγωγή ισχύος και είναι απαραίτητο να συνδεθούν στο δίκτυο υψηλής τάσης. Για τη μελέτη των μεθόδων και των τεχνικών της ομαλής, οικονομικά συμφέρουσας και περιβαλλοντικά φιλικής εγκατάστασης τους, έγινε η ανάπτυξη πρότυπων δικτύων μεταφοράς υψηλής τάσης.

Η CIGRÉ έχει σχεδιάσει δύο τέτοια πρότυπα, ένα βασισμένο στα χαρακτηριστικά των δικτύων της Βορείου Αμερικής και ένα στα χαρακτηριστικά των Ευρωπαϊκών δικτύων. Οι βασικές διαφορές μεταξύ τους είναι η συχνότητα (60Hz στη Β. Αμερική, 50Hz στην Ευρώπη) και στην ονομαστική τάση (230kV και 345kV στη Β. Αμερική, 220kV και 380kV στην Ευρώπη. Οι υπόλοιπες μικροδιαφορές αφορούν τα φορτία, τις γραμμές, τους μετασχηματιστές κλπ. Ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει την εκτενή ανάλυση των δύο προτύπων στη βιβλιογραφία της εργασίας [21].



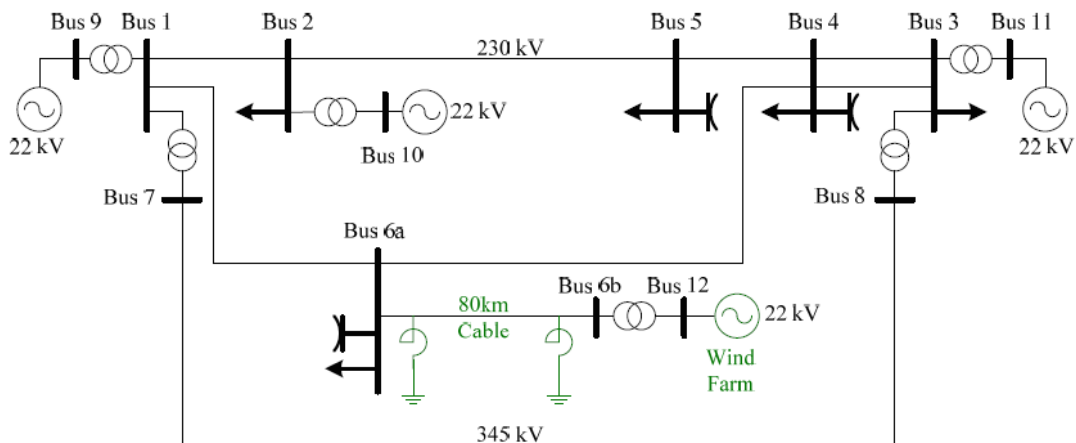
Εικόνα 3.2 Τοπολογία πρότυπου δικτύου μεταφοράς υψηλής τάσης Β. Αμερικής



Εικόνα 3.3 Τοπολογία Ευρωπαϊκού πρότυπου δικτύου μεταφοράς υψηλής τάσης

Ως παράδειγμα πρακτικής εφαρμογής των ανωτέρων δικτύων, πραγματοποιήθηκε από τη CIGRÉ ένα πείραμα για την επαλήθευση της δυνατότητας μιας φάρμας ανέμου να λειτουργεί υπό συνθήκες χαμηλότερης τάσης δικτύου (low voltage ride-through) και για την μελέτη της συμμόρφωσης στις γραμμές του δικτύου που μπορεί να προκληθεί από μεγάλη μείωση της παραγωγής ισχύος από τις ανεμογεννήτριες της φάρμας.

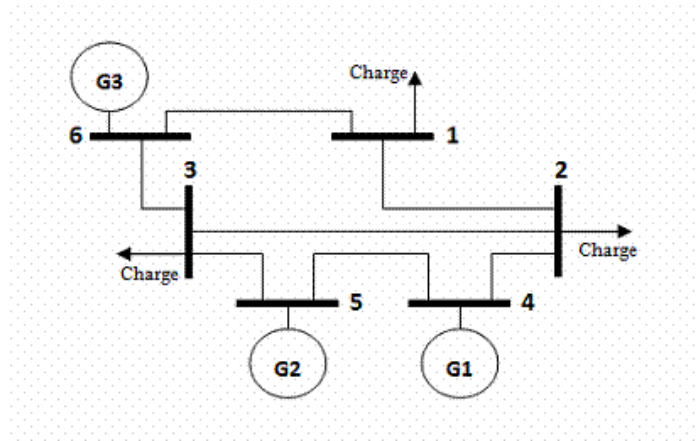
Το πρότυπο δίκτυο τροποποιήθηκε κατάλληλα για τη διεξαγωγή του πειράματος και παρουσιάζεται στην εικόνα 3.4.



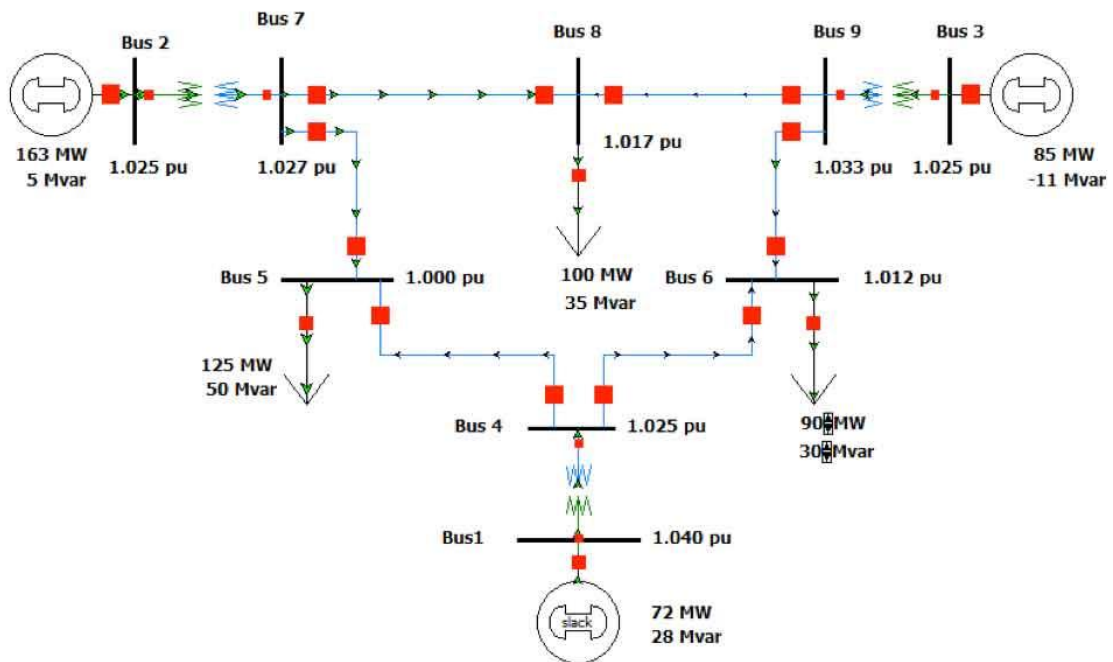
Εικόνα 3.4 Τροποποιημένο πρότυπο δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης Β. Αμερικής για τη διεξαγωγή πειράματος με εγκατεστημένη μια φάρμα ανεμογεννητριών

Από το παραπάνω παράδειγμα γίνεται άμεσα εμφανής η χρησιμότητα της ύπαρξης τέτοιων πρότυπων δικτύων. Με μικρές τροποποιήσεις τα πρότυπα δίκτυα είναι έτοιμα να υπηρετήσουν τους ερευνητικούς σκοπούς της βιομηχανίας, των πανεπιστημίων και άλλων ιδρυμάτων, χωρίς να χρειάζεται η χρονοβόρα ανάπτυξη καινούριων δικτύων δοκιμών για κάθε πείραμα που επιθυμούν να πραγματοποιήσουν.

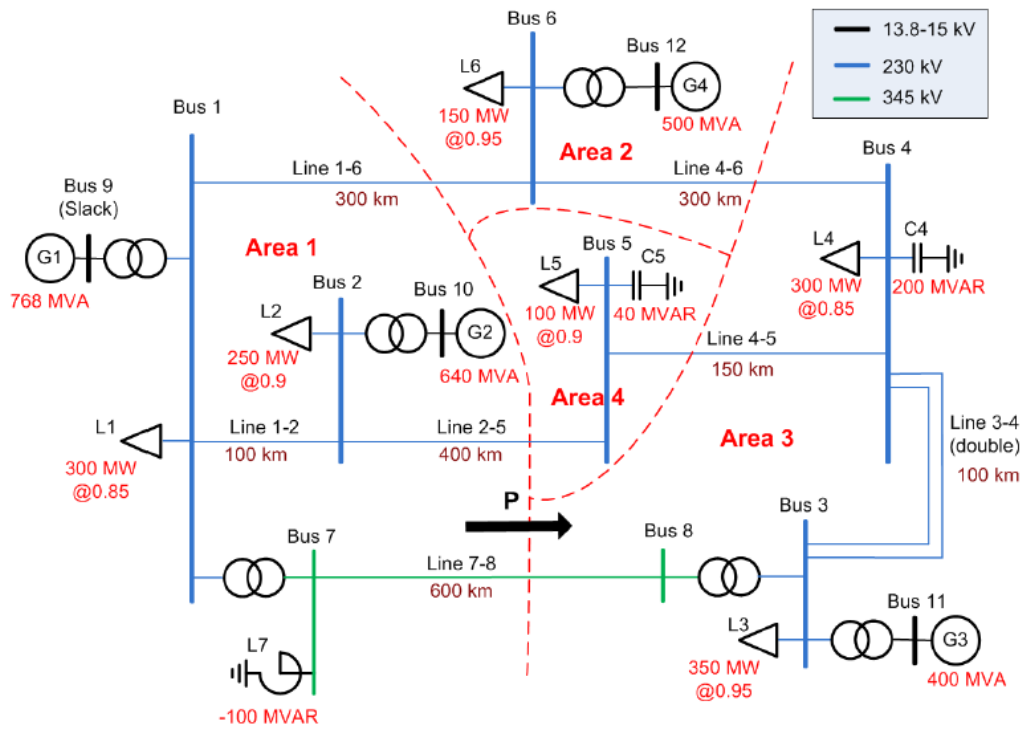
Εκτός από τα πρότυπα δίκτυα της CIGRÉ, τα οποία είναι αρκετά πρόσφατα, και η IEEE έχει αναπτύξει κατά το παρελθόν μια σειρά πρότυπων δικτύων μεταφοράς υψηλής τάσης για τη διεξαγωγή μελετών και πειραμάτων. Η βασική παράμετρος που χαρακτηρίζει τα πρότυπα δίκτυα της IEEE είναι ο αριθμός των ζυγών (number of buses) τους. Γι' αυτό το λόγο η ονομασία αυτών των προτύπων είναι τις περισσότερες φορές IEEE N bus system, όπου N ο αριθμός των ζυγών. Έχουν αναπτυχθεί πάρα πολλά δίκτυα από την IEEE με αυτό το μοτίβο, αλλά αυτά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι τα 6 bus, 9 bus, 12 bus και 14 bus, τα οποία παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν. Υπάρχουν πρότυπα δίκτυα της IEEE που αποτελούνται από εκατοντάδες ζυγούς, όπως το 118 bus και το 300 bus. Αυτά, αλλά και περισσότερα μπορεί να τα αναζητήσει ο αναγνώστης στη βιβλιογραφία της παρούσας διπλωματικής εργασίας [2][3][17][18][19][20][25].



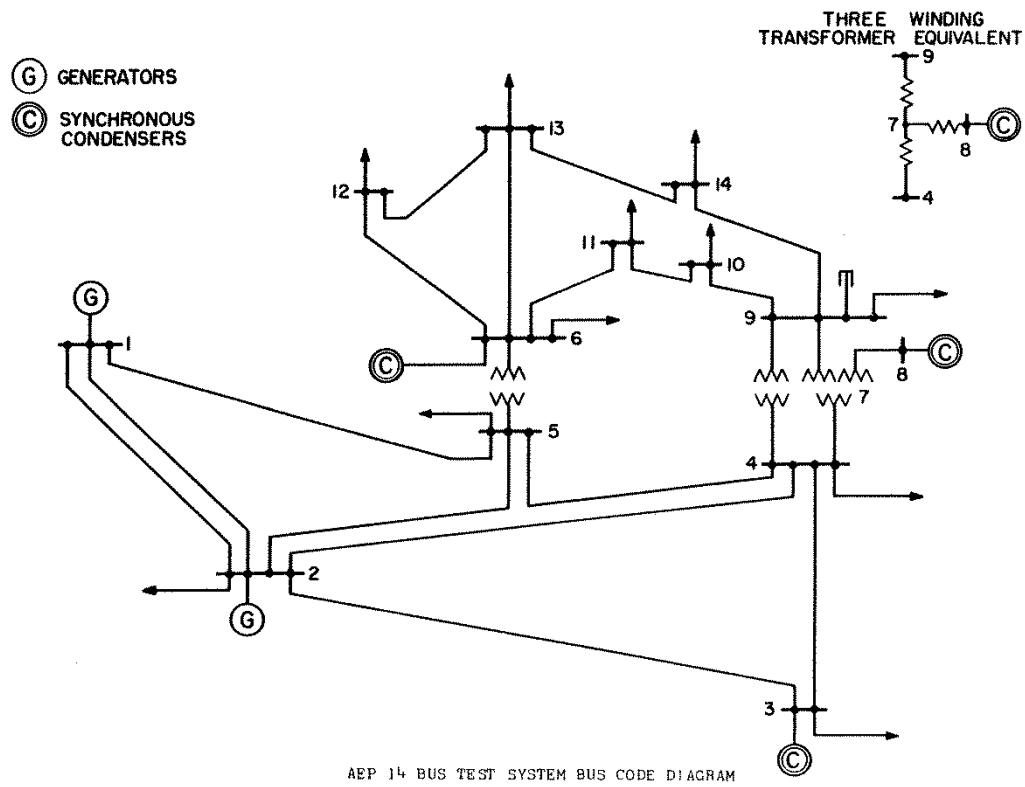
Εικόνα 3.5 IEEE 6 bus system



Εικόνα 3.6 IEEE 9 bus system



Εικόνα 3.7 IEEE 12 bus system



ΑΕΡ 14 BUS TEST SYSTEM BUS CODE DIAGRAM

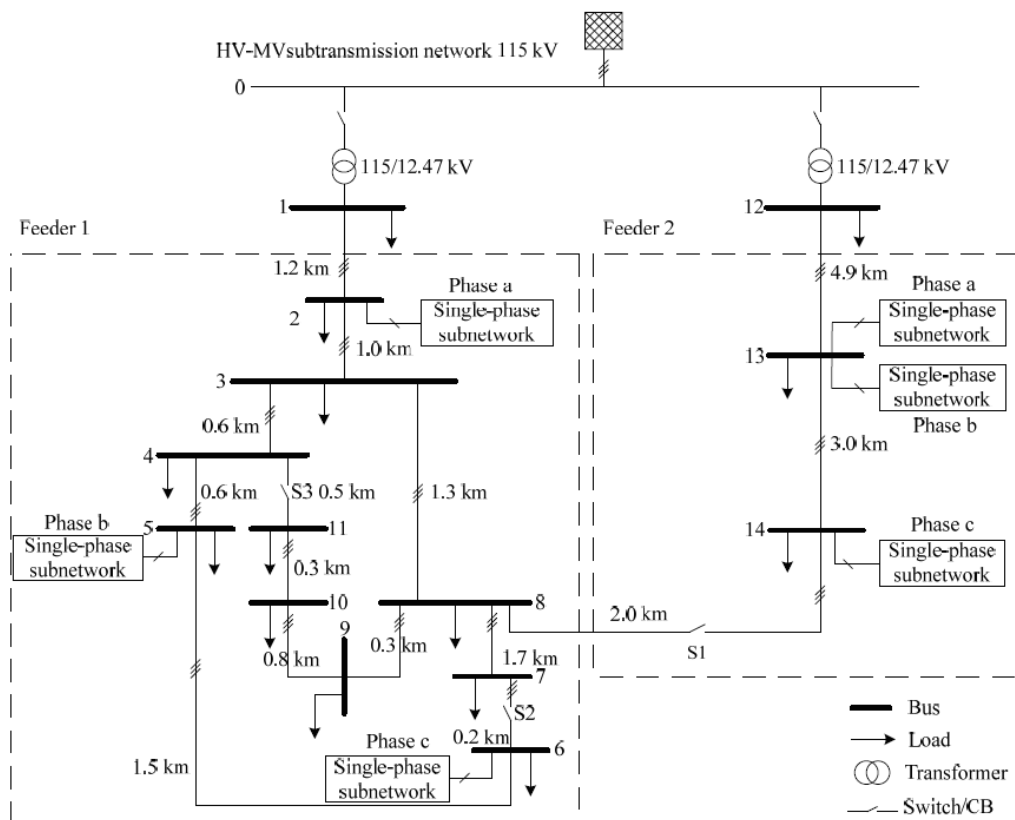
Εικόνα 3.8 IEEE 14 bus system

3.3 Πρότυπα δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης

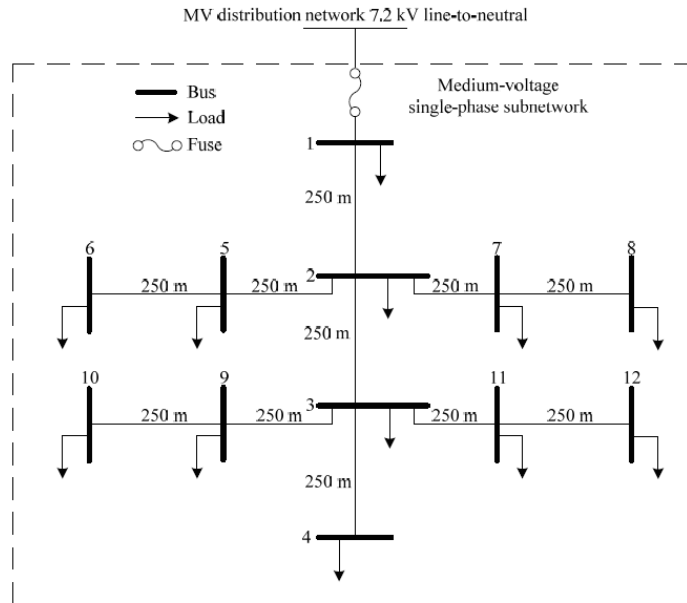
Όπως και για τα δίκτυα υψηλής τάσης, η CIGRÉ έχει αναπτύξει δύο πρότυπα δίκτυα διανομής μέσης τάσης, ένα βασισμένο στα χαρακτηριστικά των δικτύων της Β. Αμερικής και ένα στον Ευρωπαϊκών, τα οποία παρουσιάζονται στις εικόνες 3.9 και 3.11. Τα κύρια δίκτυα αποτελούνται από δύο τροφοδότες (feeders - ξεχωρίζονται από τις διακεκομμένες γραμμές), οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν μέσω του διακόπτη S1.

Τα δύο δίκτυα διαφέρουν και πάλι όσον αφορά τη συχνότητα και την ονομαστική τιμή της τάσης, ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται και μια ακόμα σημαντική διαφορά. Το πρότυπο δίκτυο για τη Β. Αμερική περιέχει αρκετά μονοφασικά υποδίκτυα (single-phase subnetworks) τα οποία έχουν αφετηρία ζυγούς του κεντρικού τριφασικού δικτύου μέσης τάσης. Η τοπολογία ενός τέτοιου πρότυπου μονοφασικού υποδικτύου παρουσιάζεται στην εικόνα 3.10. Αντίθετα, το Ευρωπαϊκό πρότυπο δεν περιλαμβάνει μονοφασικά υποδίκτυα.

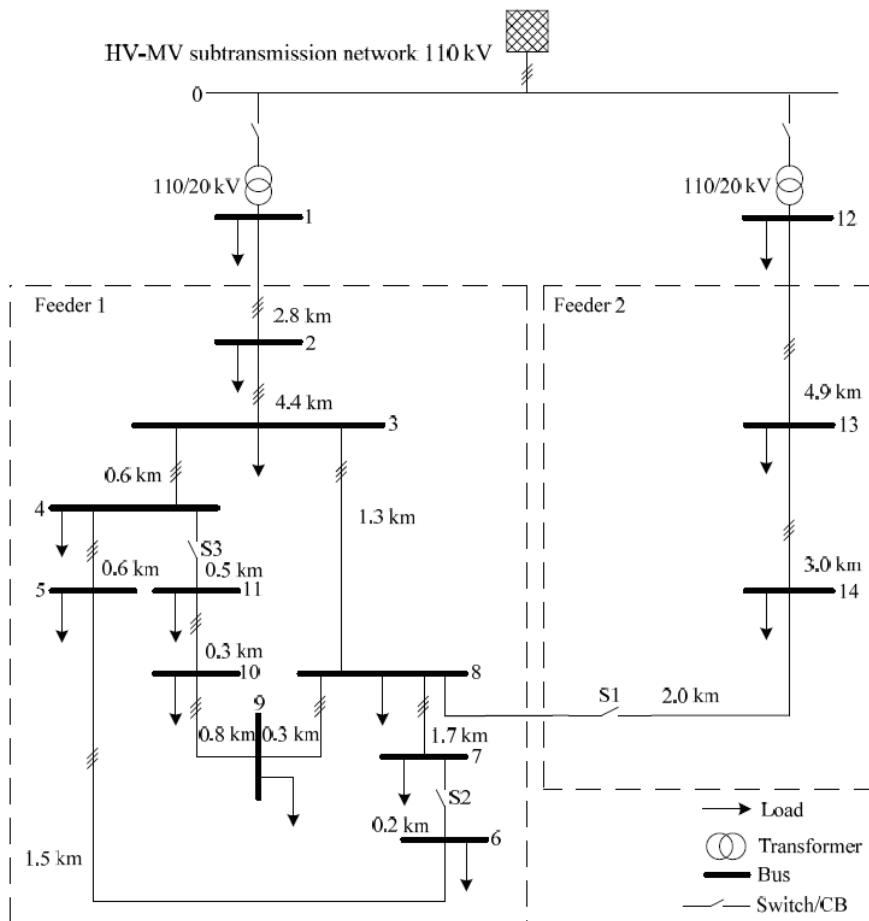
Ένα παράδειγμα χρησιμοποίησης του πρότυπου δικτύου μέσης τάσης, για την μελέτη της εγκατάστασης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.12, όπου παρατηρούμε ότι έχουν τοποθετηθεί στους περισσότερους ζυγούς του ενός τροφοδότη διάφοροι τύποι ανανεώσιμων και διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες και συμπαραγωγή θερμότητας-ηλεκτρικής ισχύος (Combined Heat and Power – CHP).



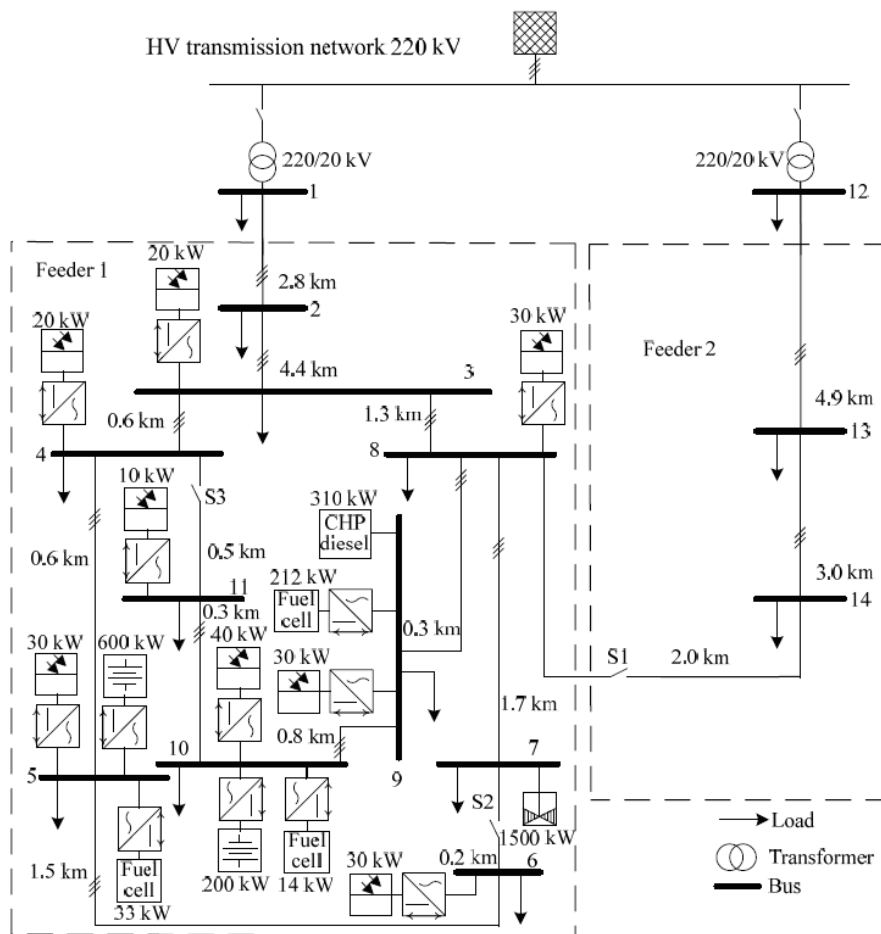
Εικόνα 3.9 Τοπολογία πρότυπου δικτύου διανομής μέσης τάσης Β. Αμερικής



Εικόνα 3.10 Τοπολογία πρότυπου μονοφασικού υποδικτύου διανομής μέσης τάσης Β. Αμερικής



Εικόνα 3.11 Τοπολογία Ευρωπαϊκού πρότυπου δικτύου διανομής μέσης τάσης



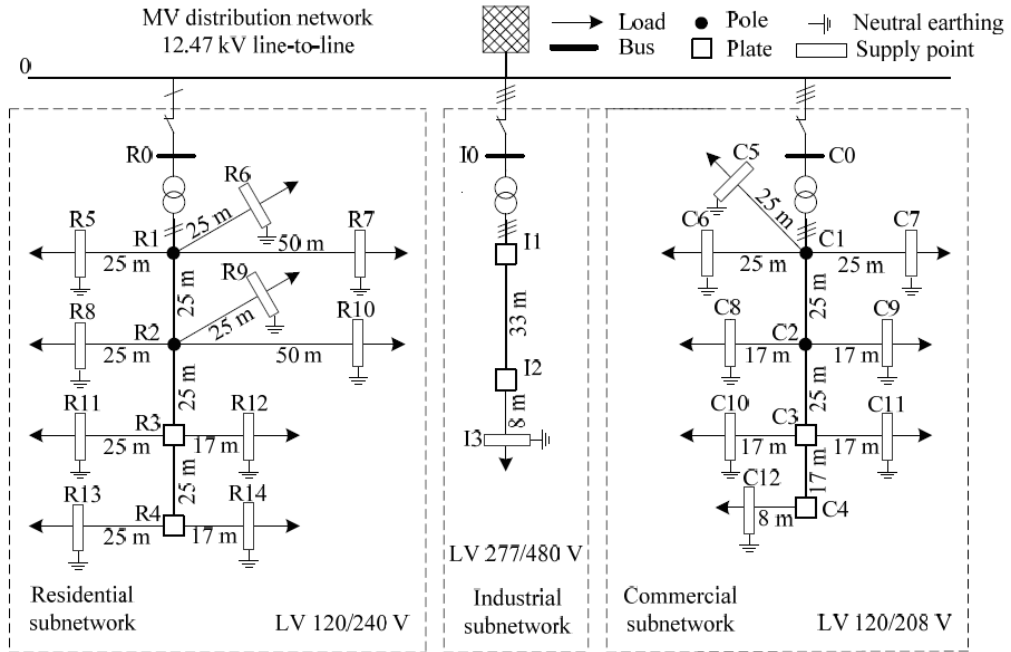
Εικόνα 3.12 Παράδειγμα χρησιμοποίησης του πρότυπου δικτύου διανομής μέσης τάσης για τη μελέτη της εγκατάστασης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Για την εκτενή ανάλυση των παραπάνω δικτύων της CIGRÉ, καθώς και για την ανεύρεση περισσότερων προτύπων δικτύων διανομής μέσης τάσης που έχουν αναπτυχθεί από άλλους φορείς, προτρέπουμε τον αναγνώστη στη βιβλιογραφία της εργασίας [21][22][23][24][26].

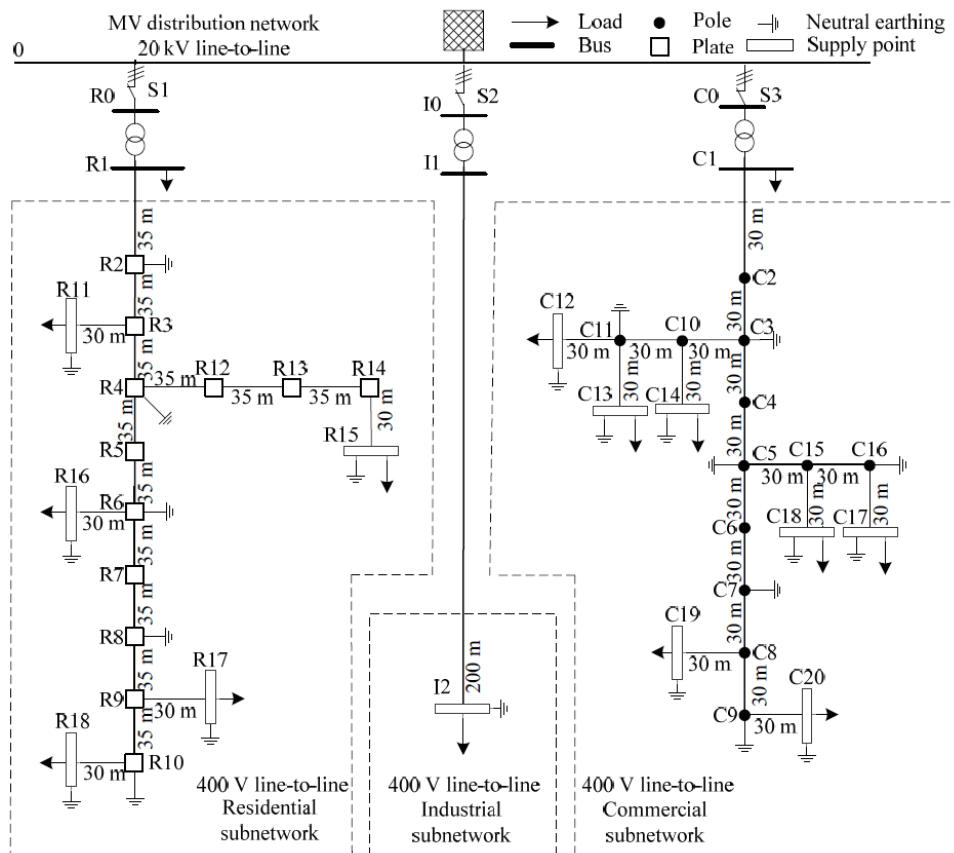
3.4 Πρότυπα δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης

Τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης χωρίζονται σε τρεις βασικές υποκατηγορίες: τα οικιακά δίκτυα (residential), τα βιομηχανικά δίκτυα (industrial) και τα εμπορικά δίκτυα (commercial). Ο καθένας από τους τρεις τύπους υποδικτύου έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που τον διαφοροποιούν σημαντικά από τους υπόλοιπους, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η ανάπτυξη και η μελέτη πρότυπων δικτύων και για τους τρεις.

Η CIGRÉ έχει αντιμετωπίσει με επιτυχία και αυτήν την πρόκληση, σχεδιάζοντας πρότυπα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, τόσο για τους τρεις τύπους υποδικτύων, όσο και για τις διαφοροποιήσεις των χαρακτηριστικών μεταξύ Ευρωπαϊκών και Βορειοαμερικάνικων δικτύων [21]. Τα πρότυπα αυτά παρουσιάζονται στις εικόνες 3.13 και 3.14. Με διακεκομμένες γραμμές είναι εμφανής ο διαχωρισμός των τριών τύπων υποδικτύων.



Εικόνα 3.13 Τοπολογία πρότυπου δικτύου διανομής χαμηλής τάσης Β. Αμερικής

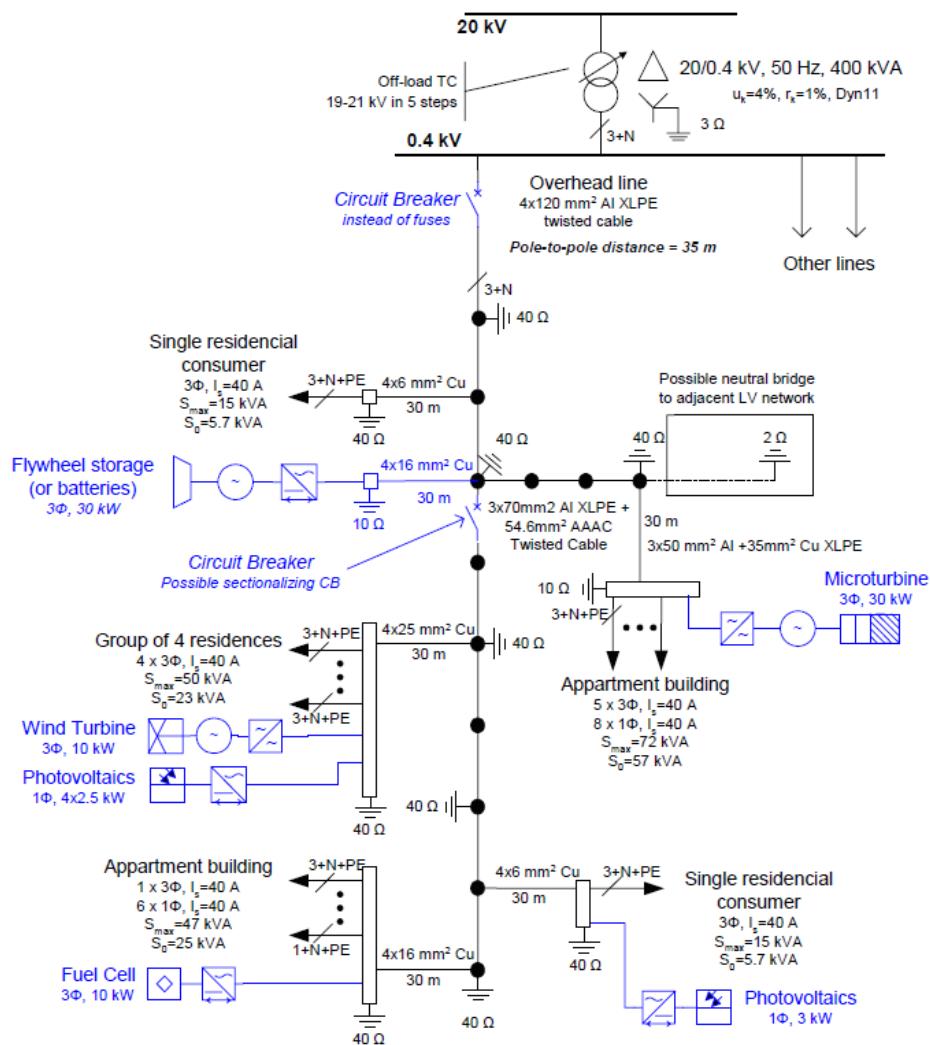


Εικόνα 3.14 Τοπολογία Ευρωπαϊκού πρότυπου δικτύου διανομής χαμηλής τάσης

Για να γίνει πιο κατανοητή η χρησιμότητα ύπαρξης των πρότυπων δικτύων, η CIGRÉ ανέπτυξε μια εφαρμογή υλοποίησης μικροδικτύου, χρησιμοποιώντας το πρότυπο οικιακό υποδίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Τοποθετώντας στους ζυγούς του υποδικτύου μια καλά μελετημένη ποικιλία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς και μια μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι οι μπαταρίες ή το flywheel storage, δημιούργησε και προσομοίωσε ένα ρεαλιστικό μικροδίκτυο [27].

Με την έννοια μικροδίκτυο εννοούμε ένα μικρό κομμάτι του συνολικού δικτύου το οποίο μπορεί να αποκοπεί από το κεντρικό δίκτυο, με τη χρήση διακοπών, και χάρις στην ύπαρξη της διεσπαρμένης παραγωγής που διαθέτει και της δυνατότητας αποθήκευσης περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί αυτόνομα, χωρίς να απαιτείται ανταλλαγή ισχύος με το υπόλοιπο δίκτυο. Για να μπορεί να επιτευχθεί αυτό, πρέπει ο σχεδιασμός του μικροδικτύου να γίνει προσεκτικά και μελετημένα, ώστε να είναι σίγουρο ότι θα υπάρχει αρκετή ποσότητα περίσσειας ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί για να καλύψει τις ανάγκες του μικροδικτύου τις ώρες που η παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών δεν επαρκεί.

Το τελικό μικροδίκτυο που ανέπτυξε η CIGRÉ με τη χρήση του πρότυπου οικιακού δικτύου χαμηλής τάσης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.15.



Εικόνα 3.15 Τοπολογία πρότυπου μικροδικτύου χαμηλής τάσης

Με την εναλλαγή της θέσης του διακόπτη (circuit breaker) που βρίσκεται στην αρχή της γραμμής χαμηλής τάσης, μεταβάλλεται η κατάσταση λειτουργίας του μικροδικτύου από συνδεδεμένη (grid-connected mode), όταν δηλαδή έχει ανταλλαγή ισχύος με το υπόλοιπο δίκτυο, σε νησιδοποιημένη (islanded mode), όταν και λειτουργεί απομονωμένα.

Για το πειραματικό μέρος της διπλωματικής μας εργασίας, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το παραπάνω πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης της CIGRÉ για τη μελέτη του συστήματος τοπικού ελέγχου τάσης. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό να τονιστεί η μεγάλη χρησιμότητα που έχει η ύπαρξη τέτοιων πρότυπων δικτύων στις έρευνες και τις μελέτες πανεπιστημίων, ινστιτούτων και της βιομηχανίας. Το πείραμα μελέτης του τοπικού ελέγχου τάσης που πραγματοποιήσαμε, χρησιμοποιώντας το πρότυπο μικροδίκτυο, παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 4

Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου

4.1 Εισαγωγή

Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (real-time digital simulator – RTDS), που κατασκευάζεται από την εταιρεία RTDS Technologies Inc., είναι ένα υπολογιστικό μηχάνημα που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασική χρησιμότητα του έγγυται στην πραγματοποίηση δοκιμών Hardware in the Loop (HIL), δηλαδή ελέγχους πραγματικών δοκιμών, όπως για παράδειγμα μιας γεννήτριας ή ενός αντιστροφέα, σε συνθήκες που προσομοιώνουν ένα πραγματικό σύστημα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το δοκίμιο ελέγχεται σε άκρως ρεαλιστικές συνθήκες, χωρίς όμως να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του ή πρόκλησης σφάλματος στο σύστημα σε περίπτωση που το δοκίμιο προέκυπτε ελαττωματικό. Έτσι, ο προσομοιωτής πραγματικού χρόνου αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον κλάδο της ηλεκτρικής ισχύος, καθώς εκτός από την εξέταση εξοπλισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκπαίδευση προσωπικού, νέων μηχανικών και φοιτητών, αλλά και για την διερεύνηση τυχόν μελλοντικών μεταβατικών φαινομένων, ώστε να αναπτυχθούν έγκαιρα τρόποι αντιμετώπισης τους και να προληφθούν σφάλματα και καταστροφές εξοπλισμού.

Ο προσομοιωτής αποτελείται από τον συνδυασμό ενός εξελιγμένου υπολογιστικού υλικού και ενός αντίστοιχου λογισμικού ηλεκτρονικού υπολογιστή, του RSCAD. Τα δίκτυα που επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε για τις προσομοιώσεις σχεδιάζονται στο RSCAD, και συγκεκριμένα στο περιβάλλον DRAFT, χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες ηλεκτρικών στοιχείων που διαθέτει. Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης ο χρήστης μπορεί να έχει την εποπτεία των παραμέτρων του δικτύου, καθώς και τυχόν επιθυμητή μεταβολή τους σε πραγματικό χρόνο, μέσω του περιβάλλοντος RUNTIME. Περισσότερα για τα περιβάλλοντα DRAFT και RUNTIME θα παρουσιαστούν αργότερα.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του RTDS, που τον ξεχωρίζει από άλλα διαθέσιμα εργαλεία προσομοίωσης, είναι η δυνατότητα να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, αναπαριστώντας πλήρως ρεαλιστικά το αντίστοιχο πραγματικό δίκτυο που έχουμε μοντελοποιήσει. Αντίθετα, τα εργαλεία προσομοίωσης που χρησιμοποιούν τις υπολογιστικές δυνατότητες ενός απλού ηλεκτρονικού υπολογιστή, είναι πολύ πιο αργά και χρειάζονται να καθοριστεί από πριν η επιθυμητή διάρκεια της προσομοίωσης. Δεν μπορούν να λειτουργούν δηλαδή σε πραγματικό χρόνο, όπως κάνει το RTDS. Αυτή η δυνατότητα είναι εφικτή λόγω της μεγάλης υπολογιστικής ισχύος που διαθέτει, η οποία παρέχεται από ένα πλήθος επεξεργαστών που λειτουργούν παράλληλα. Περισσότερα για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του RTDS θα παρουσιαστούν στην επόμενη παράγραφο.

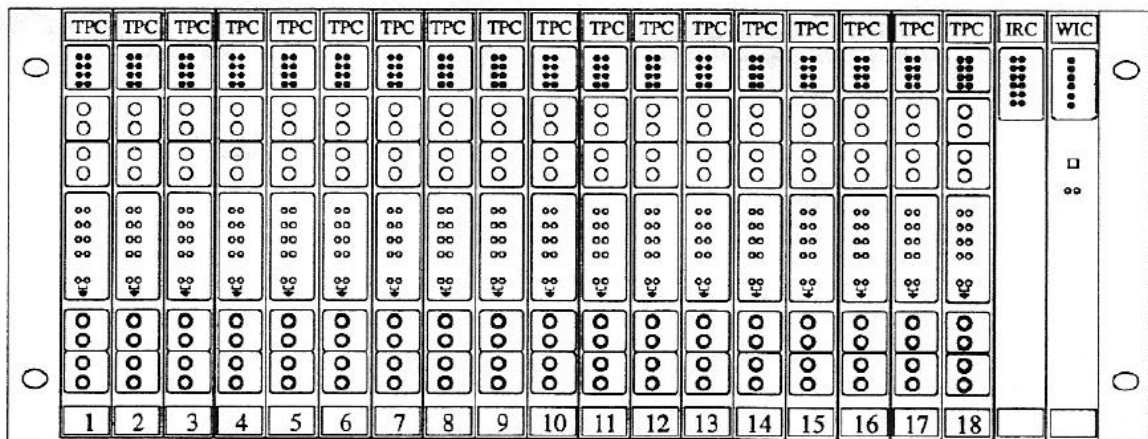
Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται ένας αρκετά απλός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου, ο οποίος διαθέτει 5 κάρτες GPC, που προσδίδουν την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ, και μια κάρτα WIF, η οποία είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία με το λογισμικό RSCAD.



Εικόνα 4.1 Ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)

4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του RTDS

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, το RTDS εκμεταλλεύεται την αρχιτεκτονική της παράλληλης επεξεργασίας χρησιμοποιώντας πολλαπλούς επεργαστές, οι οποίοι βρίσκονται ενσωματωμένοι σε διάφορες κάρτες. Οι κάρτες συνδέονται μεταξύ τους με τη χρήση ενός backbone και όλες μαζί συνθέτουν ένα rack. Ένας απλός προσομοιωτής συνήθως διαθέτει ένα rack, αλλά κατασκευάζονται και αρκετά εξελιγμένοι και ισχυροί προσομοιωτές με περισσότερα. Αυτοί συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μεγάλου εύρους, όπου είναι απαραίτητη η πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύς. Ένα τυπικό rack παρουσιάζεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Τυπικό rack του RTDS

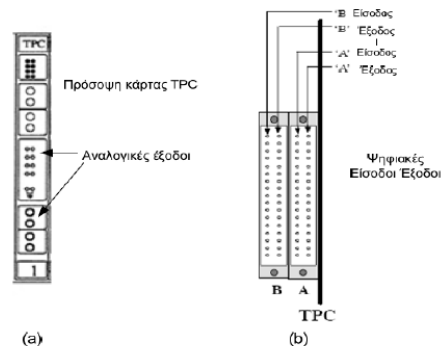
Οι κάρτες που μπορούν να τοποθετηθούν σε κάθε rack είναι διαφόρων ειδών, άλλες με παρόμοιες λειτουργίες και άλλες με μοναδικές. Οι πιο συνηθισμένες κάρτες που συναντά κανείς σε έναν τυπικό προσομοιωτή είναι: TPC (Tandem Processor Card), 3PC (Triple Processor Card), GPC (Giga Processor Card), IRC (Workstation Inter Rack

Communications Card) και WIF (Workstation Interface Card). Πιο αναλυτικά, οι κάρτες αυτές πραγματοποιούν τις εξής λειτουργίες:

➤ **Tandem Processor Card (TPC):** είναι οι πιο απλές κάρτες επεξεργασίας. Κάθε κάρτα διαθέτει 2 ανεξάρτητους επεξεργαστές σήματος NEC77240. Ο μέγιστος αριθμός TPC καρτών που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα rack είναι 18. Κάθε TPC κάρτα διαθέτει τις ακόλουθες θύρες εισόδου-εξόδου:

- 1) 8 αναλογικά κανάλια εξόδου (12 bit, ± 10 volt)
- 2) 4 ψηφιακούς επιλογείς 16 θέσεων
- 3) 2 αναλογικές θύρες εισόδου (12 bit, ± 5 volt)
- 4) 2 ψηφιακές θύρες εισόδου (16 bit)
- 5) 2 ψηφιακές θύρες εξόδου (16 bit)

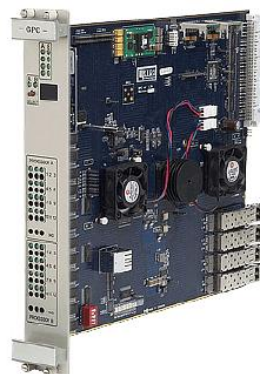
Οι ψηφιακές θύρες βρίσκονται στο πίσω μέρος της κάρτας, ενώ οι αναλογικές θύρες στο μπροστινό.



Εικόνα 4.3 Αναλογικές και ψηφιακές εισοδοι-εξοδοι των καρτών TPC

➤ **Triple Processor Card (3PC):** είναι κι αυτές κάρτες επεξεργασίας αλλά διαθέτουν 3 επεξεργαστές η κάθε μια, και μάλιστα ισχυρότερους σε σχέση με τις κάρτες TPC.

➤ **Giga Processor Card (GPC):** ακόμα πιο ισχυρές κάρτες επεξεργασίας, με 2 επεξεργαστές IBM 750GX RISC συχνότητας 1.0 GHz στην κάθε μια.



Εικόνα 4.4 Κάρτα GPC

- **Workstation Inter Rack Communications Card (IRC):** η κάρτα αυτή χρησιμοποιείται μόνο όταν ο προσομοιωτής διαθέτει περισσότερα από ένα racks. Είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία μεταξύ των επεξεργαστών που βρίσκονται σε διαφορετικά racks.
- **Workstation Interface Card (WIF):** η κάρτα WIF είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία του rack του προσομοιωτή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο εκτελείται το λογισμικό RSCAD. Η επικοινωνία γίνεται μέσω τοπικής σύνδεσης δικτύου (Local Area Connection – LAN) με τη χρήση καλωδίου Ethernet. Η ανταλλαγή δεδομένων πραγματοποιείται σε πακέτα. Ουσιαστικά η κάρτα αυτή είναι εκείνη που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να φορτώνει τα μοντελοποιημένα δίκτυα στο RTDS, καθώς και να εκκινά, να ελέγχει και να σταματά την εκτέλεση των προσομοιώσεων.



Εικόνα 4.5 Κάρτα WIF

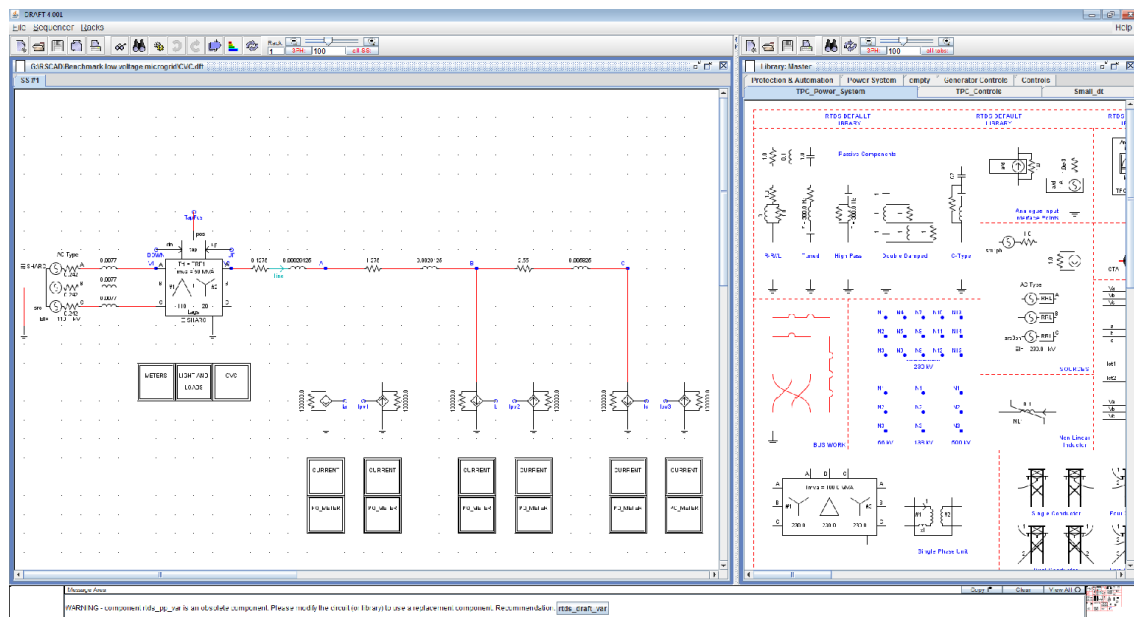
Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου του εργαστηρίου ΣΗΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τον οποίο χρησιμοποιήσαμε για την εκτέλεση των προσομοιώσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διαθέτει ένα rack στο οποίο είναι τοποθετημένες 16 κάρτες TPC, 2 κάρτες 3PC και 1 κάρτα WIF.

4.3 Λογισμικό RSCAD

Το λογισμικό το οποίο χειρίζεται ο χρήστης για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων στο RTDS ονομάζεται RSCAD. Οι βασικές λειτουργίες του αφορούν τον σχεδιασμό του δικτύου που επιθυμούμε να προσομοιώσουμε, την μεταγλώττιση του (compile) στην γλώσσα προγραμματισμού που αναγνωρίζουν οι επεξεργαστές του RTDS και στον χειρισμό της προσομοίωσης (έναρξη, λήξη, μεταβολή παραμέτρων κλπ).

Οι δύο πρώτες λειτουργίες πραγματοποιούνται στο περιβάλλον DRAFT του RSCAD. Χρησιμοποιώντας στοιχεία ηλεκτρικής ισχύος (power components) και στοιχεία ελέγχου (control components) από τις διαθέσιμες βιβλιοθήκες που βρίσκονται στο αριστερό μέρος της διεπιφάνειας εργασίας (User Interface) συνθέτουμε το επιθυμητό δίκτυο στον ελεύθερο χώρο στα αριστερά. Όταν ολοκληρώσουμε τη σύνθεση του δικτύου, χρησιμοποιούμε την επιλογή Compile που βρίσκεται στην οριζόντια μπάρα εργασίας στο επάνω μέρος για να μεταγλωττίσουμε το δίκτυο μας στην γλώσσα προγραμματισμού του RTDS. Αν το δίκτυο

που υλοποιήσαμε έχει λάθη, η μεταγλώττιση θα αποτύχει και το λογισμικό θα μας ενημερώσει για τα λάθη που εντοπίστηκαν ώστε να προβούμε στις απαραίτητες διορθώσεις. Το περιβάλλον DRAFT του RSCAD παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6.



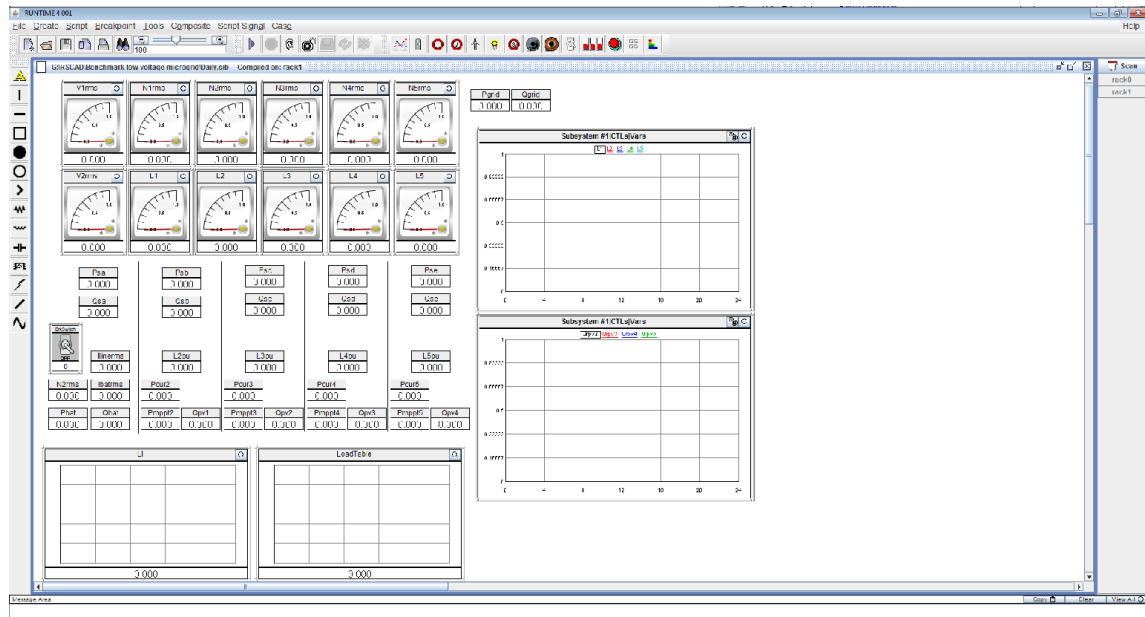
Εικόνα 4.6 Περιβάλλον DRAFT του RSCAD

Για τον χειρισμό των προσομοιώσεων χρησιμοποιούμε το περιβάλλον RUNTIME. Σε αυτό, έχουμε τη δυνατότητα να επιλέγουμε πότε θα ξεκινήσει η εκτέλεση της προσομοίωσης, πότε θα σταματήσει, καθώς και να έχουμε τον έλεγχο όλων των επιθυμητών παραμέτρων της προσομοίωσης κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της.

Τοποθετώντας μετρητές στην διεπιφάνεια εργασίας του RUNTIME έχουμε τη δυνατότητα να παρακολουθούμε την τιμή σε πραγματικό χρόνο της επιλεγμένης μεταβλητής του δικτύου. Επίσης, μπορούμε να προσθέσουμε γραφήματα (plots), ώστε να παίρνουμε τη μεταβολή των μεταβλητών αυτών συναρτήσει είτε του χρόνου, είτε άλλων μεταβλητών.

Το πιο σημαντικό όμως που μας προσφέρει το RUNTIME είναι η δυνατότητα να επέμβουμε σε πραγματικό χρόνο στην προσομοίωση του δικτύου, μεταβάλλοντας τις τιμές διαφόρων παραμέτρων, αλλάζοντας την κατάσταση λειτουργίας διακοπών και άλλα. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιούμε στοιχεία μεταβλητής εξόδου (διακόπτες, ολισθητές, κουμπιά, καντράν κ.α.), τα οποία όμως πρέπει να έχουν ενσωματωθεί προηγουμένως και στο δίκτυο που έχουμε σχεδιάσει στο DRAFT. Δηλαδή, κάθε παράμετρος που επιθυμούμε να ελέγχουμε δυναμικά πρέπει να προέρχεται στη σχεδίαση του δικτύου από την έξοδο ενός τέτοιου στοιχείου μεταβλητής εξόδου. Έτσι, διαχειρίζοντας κατάλληλα το αντίστοιχο μοντέλο του στοιχείου στο RUNTIME, μεταβάλλουμε την τιμή της παραμέτρου σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης.

Το περιβάλλον RUNTIME του RSCAD, στο οποίο είναι εμφανείς και αρκετοί μετρητές, γραφήματα και ένας διακόπτης, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7.



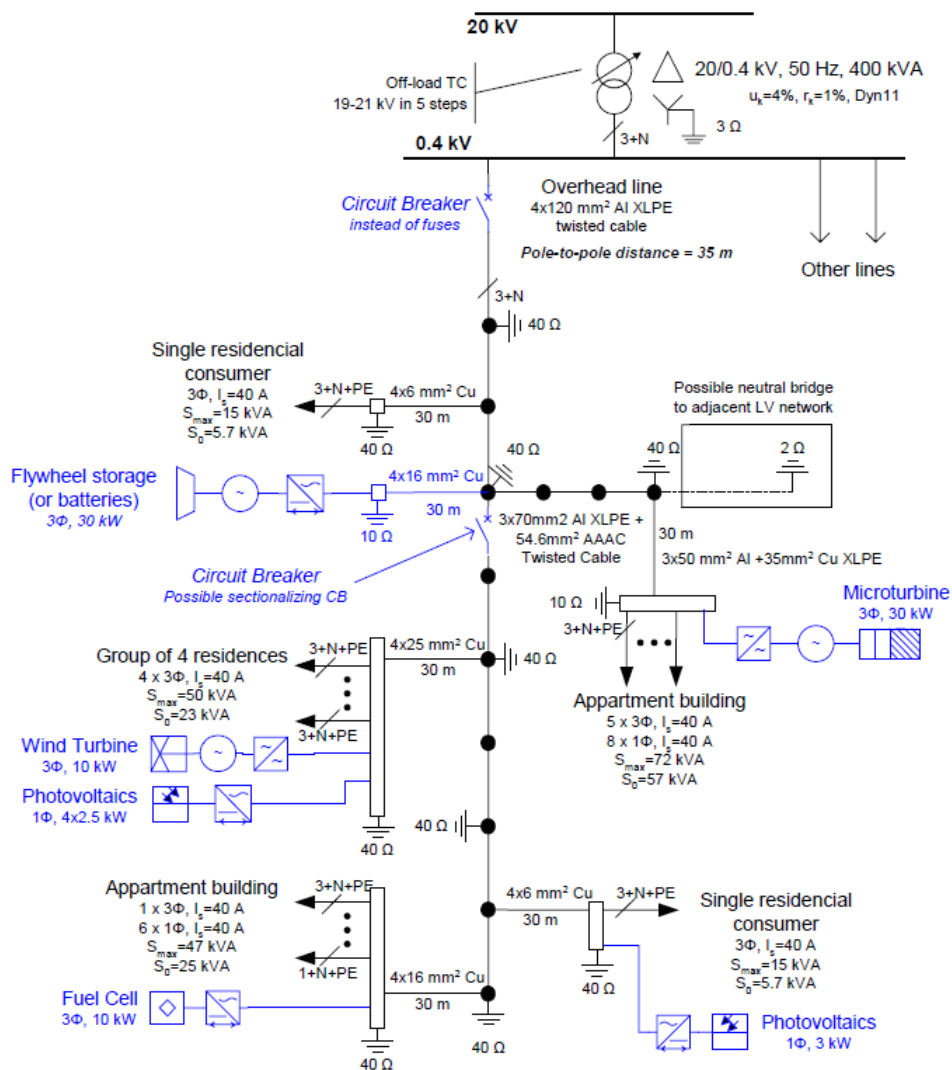
Εικόνα 4.7 Περιβάλλον RUNTIME του RSCAD

Κεφάλαιο 5

Τοπικός Έλεγχος σε Μικροδίκτυο Χαμηλής Τάσης

5.1 Εισαγωγή

Για την μελέτη του τοπικού ελέγχου τάσης επιλέχθηκε το πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης της CIGRÉ (benchmark low voltage microgrid), το οποίο έχει παρουσιαστεί επιγραμματικά στο κεφάλαιο 3 [27]. Το μικροδίκτυο αυτό αποτελείται από μια κύρια εναέρια γραμμή χαμηλής τάσης, στην οποία συνδέονται 5 καταναλωτές οικιακού φορτίου μέσω συνδέσεων παροχής (service connections) ή/και άλλων εναέριων γραμμών, καθώς και μια σειρά από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης ισχύος. Η τοπολογία του παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5.3 Πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης με διεσπαρμένη παραγωγή

5.2 Περιγραφή του δικτύου

Το δίκτυο που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης RSCAD για την διεξαγωγή της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο, αποτελεί ουσιαστικά το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του παραπάνω πρότυπου μικροδικτύου, με κάποιες διαφοροποιήσεις οι οποίες θα παρουσιαστούν κατά την ανάλυση των στοιχείων που απαρτίζουν το δίκτυο.

Γνωρίζουμε ότι στα δίκτυα χαμηλής τάσης υπάρχουν έντονες ασυμμετρίες μεταξύ των τριών φάσεων, συνεπώς μια ανά φάση ανάλυση τέτοιων δικτύων δεν είναι αρκετά ρεαλιστική. Όμως, λόγω περιορισμένου αριθμού επεξεργαστών του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS) του εργαστηρίου ΣΗΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση στο τριφασικό πλήρες δίκτυο. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι για τους σκοπούς του πειράματος, δηλαδή την μελέτη του τοπικού ελέγχου τάσης ενός δικτύου χαμηλής τάσης, είναι ικανοποιητική η ανά φάση ανάλυση του, καθώς η ύπαρξη ή μη ύπαρξη ασυμμετριών μεταξύ της φάσης που θα αναλυθεί και των άλλων δύο δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή όλων των στοιχείων που απαρτίζουν το δίκτυο που δημιουργήθηκε στο RSCAD, συμπεριλαμβανομένων και των διατάξεων ελέγχου τους, όπου αυτές υπάρχουν.

5.2.1 Ισοδύναμο δίκτυο Μέσης Τάσης

Στο πρότυπο μικροδίκτυο δεν γίνεται αναφορά στο ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης, δεν δίνεται δηλαδή η ισχύς βραχυκύκλωσης του ή ο λόγος R/X, παρά μόνο η ονομαστική τάση του, 20kV. Ωστόσο, μέσα από τη βιβλιογραφία, βρέθηκαν οι τυπικές παράμετροι του ισοδύναμου δικτύου μέσης τάσης για τα πρότυπα Ευρωπαϊκά δίκτυα χαμηλής τάσης [21]. Αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Nominal system voltage [kV]	Short circuit power, S_{SC} [MVA]	R/X ratio
20 LL	100	1

Πίνακας 5.1 Παράμετροι ισοδύναμου δικτύου Μέσης τάσης των πρότυπων Ευρωπαϊκών δικτύων Χαμηλής τάσης

Με χρήση των παραμέτρων αυτών υπολογίζονται η ισοδύναμη αντίσταση και αυτεπαγωγή του δικτύου μέσης τάσης:

- $Z_s = \frac{(20 \cdot 10^3 \text{ V})^2}{100 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 4 \Omega$
- $Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \xrightarrow{R_s = X_s} R_s = \frac{Z_s}{\sqrt{2}} = 2.828 \Omega = X_s$
- $L_s = \frac{X_s}{100 \cdot \pi} = 0,009 \text{ H}$

Για την μοντελοποίηση της πολικής τάσης των 20kV επιλέχθηκε το μοντέλο της ιδανικής μονοφασικής ημιτονικής πηγής του RSCAD. Οι παράμετροι που εισήχθησαν στο παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων της πηγής στο πρόγραμμα είναι:

- Ονομαστική φασική τάση: 11,547 kV
- Συχνότητα: 50 Hz
- Αρχική γωνία: 0°

Το παράθυρο εισαγωγής των άνωθεν παραμέτρων για το μοντέλο της πηγής στο RSCAD, με ενημερωμένες τις τιμές του, είναι το ακόλουθο:

Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Es	Initial Source Mag (L-G, RMS)	11.547	kV	0.0	
F0	Initial Frequency	50	Hz	0	
Ph	Initial Phase	0.0	deg	-360.0	360.0

Εικόνα 5.2 Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων της ιδανικής μονοφασικής ημιτονικής πηγής τάσης

5.2.2 Μετασχηματιστής MT/XT

Ο τριφασικός μετασχηματιστής του πρότυπου μικροδικτύου έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Τάση Πρωτεύοντος	20 kV
Τάση Δευτερεύοντος	400 V
Λόγος Μετασχηματισμού	50
Συχνότητα	50 Hz
Ονομαστική Ισχύς	400 KVA
Τάση βραχυκύκλωσης	4%
Σχετική ωμική τάση βραχυκύκλωσης	1%

Πίνακας 5.2 Παράμετροι τριφασικού μετασχηματιστή MT/XT του πρότυπου μικροδικτύου χαμηλής τάσης

Όπως προαναφέραμε, θα υλοποιηθεί το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του μικροδικτύου, επομένως τα ανωτέρω χαρακτηριστικά πρέπει να μετασχηματιστούν σε φασικά μεγέθη και να εισαχθούν στο μοντέλο του ιδανικού μετασχηματιστή του RSCAD. Έτσι παίρνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

Τάση Πρωτεύοντος	11,547 kV
Τάση Δευτερεύοντος	230 V
Λόγος Μετασχηματισμού	50
Συχνότητα	50 Hz
Ονομαστική Ισχύς	133.334 KVA
Τάση βραχυκύκλωσης	4%
Σχετική ωμική τάση βραχυκύκλωσης	1%

Πίνακας 5.3 Παράμετροι μονοφασικού ισοδύναμου μετασχηματιστή

Υπενθυμίζουμε ότι η βάση αντίστασης Z_B στο ανά μονάδα σύστημα παραμένει ίδια μεταξύ τριφασικού και μονοφασικού συστήματος, γι' αυτό και δεν μεταβάλλονται οι ποσοστιαίες τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης και της σχετικής ωμικής τάσης βραχυκύκλωσης:

$$Z_{B,3\phi} = \frac{V_{B,πολ}^2}{S_{B,3\phi}} = \frac{(\sqrt{3} * V_{B,φασ})^2}{3 * S_{B,φ}} = \frac{V_{B,φασ}^2}{S_{B,φ}} = Z_{B,φ}$$

Το παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων του μετασχηματιστή στο RSCAD, με ενημερωμένες τιμές σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3, είναι το εξής:

rtds_trf_1ph					
TRANSFORMER PARAMETERS		MONITORING CURRENT			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Name	Transformer Name	DT			
Tmva	Transformer rating (1 Phase)	0.133334	MVA	0.0001	
V1	Base primary voltage (RMS)	11.547	kV	0.0001	
V2	Base secondary voltage (RMS)	0.230	kV	0.0001	
f	Base Frequency	50	Hz	1.0	300.0
xl	Leakage inductance of Tx	0.04	p.u.	0.005	1.0
nll	No Load Loss (min=0.0001 p.u.)	0.01	p.u.	0.0001	0.5

Εικόνα 5.3 Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων του ιδανικού μονοφασικού μετασχηματιστή του RSCAD

5.2.3 Γραμμές χαμηλής τάσης

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, το δίκτυο περιλαμβάνει μια κύρια εναέρια γραμμή στην οποία συνδέονται, μέσω άλλων εναέριων γραμμών ή συνδέσεων παροχής (service connections), οι καταναλωτές και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Κάθε 35 μέτρα υπάρχουν οι απαραίτητοι στύλοι για την στήριξη των εναέριων γραμμών, όπου αυτές υπάρχουν. Κάθε γραμμή διαφέρει από τις άλλες ως προς τον τύπο του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη, καθώς και ως προς τη διάμετρο, ανάλογα με τις ανάγκες σε ισχύ που καλείται να καλύψει.

Στην εικόνα της τοπολογίας του πρότυπου μικροδικτύου που παρουσιάστηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου είναι εμφανή τα χαρακτηριστικά των γραμμών σε κάθε σημείο του δικτύου, καθώς και οι αποστάσεις στις οποίες εκτείνονται.

Ο πίνακας υπολογισμού των ανά φάση ισοδύναμων αντιστάσεων όλων των τύπων γραμμών που χρησιμοποιούνται στο μικροδίκτυο είναι ο εξής:

	Line type	R_{ph} (Ω/km)	X_{ph} (Ω/km)	$R_{neutral}$ (Ω/km)	R_0 (Ω/km)	X_0 (Ω/km)
1	OL - Twisted cable 4x120 mm ² Al	0.284 ⁽¹⁾	0.083		1.136	0.417
2	OL - Twisted cable 3x70 mm ² Al + 54.6 mm ² AAAC	0.497 ⁽¹⁾	0.086	0.630	2.387	0.447
3	OL - Al conductors 4x50 mm ² equiv. Cu	0.397 ⁽¹⁾	0.279			
4	OL - Al conductors 4x35 mm ² equiv. Cu	0.574 ⁽¹⁾	0.294			
5	OL - Al conductors 4x16 mm ² equiv. Cu	1.218 ⁽¹⁾	0.318			
6	UL - 3x150 mm ² Al + 50 mm ² Cu	0.264 ⁽²⁾	0.071	0.387 ⁽²⁾		
7	SC - 4x6 mm ² Cu	3.690 ⁽³⁾	0.094		13.64	0.472
8	SC - 4x16 mm ² Cu	1.380 ⁽³⁾	0.082		5.52	0.418
9	SC - 4x25 mm ² Cu	0.871 ⁽³⁾	0.081		3.48	0.409
10	SC - 3x50 mm ² Al + 35 mm ² Cu	0.822 ⁽²⁾	0.077	0.524 ⁽²⁾	2.04	0.421
11	SC - 3x95 mm ² Al + 35 mm ² Cu	0.410 ⁽²⁾	0.071	0.524 ⁽²⁾		

OL: Overhead line, UL: Underground line, SC: Service connection

Πίνακας 5.4 Δεδομένα υπολογισμού ισοδύναμης αντίστασης για διάφορα είδη γραμμών χαμηλής τάσης

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε την ανά φάση αντίσταση και αυτεπαγωγή των γραμμών του πρότυπου μικροδικτύου. Έτσι έχουμε:

Κύρια Γραμμή:

- Τύπος γραμμής: Overhead line – Twisted Cable 120mm² Al
- Ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο: $R_{ph} = 0,284 \Omega/km$
- Επαγωγική αντίδραση ανά χιλιόμετρο: $X_{ph} = 0,083 \Omega/km$
- Απόσταση από στύλο σε στύλο: 35 m
- Ωμική αντίσταση από στύλο σε στύλο: $R_{35m} = 0,284 * 0,035 = 0,00994 \Omega$
- Επαγωγική αντίδραση από στύλο σε στύλο: $X_{35m} = 0,083 * 0,035 = 0,0029 \Omega$
- Αυτεπαγωγή από στύλο σε στύλο: $L_{35m} = X_{35m} / 100\pi = 9,23 * 10^{-6} H$

Κατά την δημιουργία του δικτύου στο πρόγραμμα προσομοίωσης RSCAD, όπου υπάρχουν τουλάχιστον 3 συνεχόμενοι στύλοι στο πρότυπο μικροδίκτυο χωρίς διακλαδώσεις στο μεταξύ τους διάστημα, έχουν αθροιστεί οι ωμικές αντιστάσεις και οι αυτεπαγωγές για το διάστημα αυτό.

Γραμμή προς 1^ο φορτίο:

- Τύπος γραμμής: Service connection – 6mm² Cu
- Ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο: $R_{ph} = 3,69 \Omega/km$
- Επαγωγική αντίδραση ανά χιλιόμετρο: $X_{ph} = 0,094 \Omega/km$
- Μήκος γραμμής: 30 m
- Ωμική αντίσταση: $R = 3,69 * 0,03 = 0,1107 \Omega$
- Επαγωγική αντίδραση: $X = 0,094 * 0,03 = 0,00282 \Omega$
- Αυτεπαγωγή: $L = X / 100\pi = 8,97 * 10^{-6} H$

Γραμμή προς αντιστροφέα μπαταριών:

- Τύπος γραμμής: Service connection – 16mm² Cu
- Ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο: $R_{ph} = 1,38 \text{ } \Omega/\text{km}$
- Επαγωγική αντίδραση ανά χιλιόμετρο: $X_{ph} = 0,082 \text{ } \Omega/\text{km}$
- Μήκος γραμμής: 30 m
- Ωμική αντίσταση: $R = 1,38 * 0,03 = 0,0414 \text{ } \Omega$
- Επαγωγική αντίδραση: $X = 0,082 * 0,03 = 0,00246 \text{ } \Omega$
- Αυτεπαγωγή: $L = X/100\pi = 7,83 * 10^{-6} \text{ H}$

Γραμμή προς 2^ο φορτίο:

Η γραμμή αυτή αποτελείται από 2 τμήματα. Το 1^ο τμήμα είναι εναέριο, χρησιμοποιώντας 3 στύλους σε αποστάσεις 35 μέτρων (συνολικό μήκος τμήματος: 105 μέτρα), ενώ το 2^ο είναι σύνδεση παροχής (service connection) με μήκος 30 μέτρα. Έτσι έχουμε:

1^ο Τμήμα:

- Τύπος γραμμής: Overhead line – Twisted Cable 70mm² Al (δεν ασχολούμαστε με τον αγωγό του ουδετέρου, ο οποίος είναι διαφορετικού τύπου στο συγκεκριμένο τμήμα, καθώς μελετάμε το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του δικτύου)
- Ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο: $R_{ph} = 0,497 \text{ } \Omega/\text{km}$
- Επαγωγική αντίδραση ανά χιλιόμετρο: $X_{ph} = 0,086 \text{ } \Omega/\text{km}$
- Μήκος γραμμής: 105 m
- Ωμική αντίσταση: $R = 0,497 * 0,105 = 0,0522 \text{ } \Omega$
- Επαγωγική αντίδραση: $X = 0,086 * 0,105 = 0,00903 \text{ } \Omega$
- Αυτεπαγωγή: $L = X/100\pi = 2,874 * 10^{-5} \text{ H}$

2^ο Τμήμα:

- Τύπος γραμμής: Service connection - 50mm² Al
- Ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο: $R_{ph} = 0,822 \text{ } \Omega/\text{km}$
- Επαγωγική αντίδραση ανά χιλιόμετρο: $X_{ph} = 0,077 \text{ } \Omega/\text{km}$
- Μήκος γραμμής: 30 m
- Ωμική αντίσταση: $R = 0,822 * 0,03 = 0,02466 \text{ } \Omega$
- Επαγωγική αντίδραση: $X = 0,077 * 0,03 = 0,00231 \text{ } \Omega$
- Αυτεπαγωγή: $L = X/100\pi = 7,353 * 10^{-6} \text{ H}$

Γραμμή προς 3^ο φορτίο:

- Τύπος γραμμής: Service connection – 25mm² Cu
- Ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο: $R_{ph} = 0,871 \text{ } \Omega/\text{km}$
- Επαγωγική αντίδραση ανά χιλιόμετρο: $X_{ph} = 0,081 \text{ } \Omega/\text{km}$
- Μήκος γραμμής: 30 m
- Ωμική αντίσταση: $R = 0,871 * 0,03 = 0,2613 \text{ } \Omega$
- Επαγωγική αντίδραση: $X = 0,081 * 0,03 = 0,00243 \text{ } \Omega$
- Αυτεπαγωγή: $L = X/100\pi = 7,735 * 10^{-6} \text{ H}$

Γραμμή προς 4^ο φορτίο:

- Τύπος γραμμής: Service connection – 6mm² Cu
- Ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο: $R_{ph} = 3,69 \Omega/\text{km}$
- Επαγωγική αντίδραση ανά χιλιόμετρο: $X_{ph} = 0,094 \Omega/\text{km}$
- Μήκος γραμμής: 30 m
- Ωμική αντίσταση: $R = 3,69 * 0,03 = 0,1107 \Omega$
- Επαγωγική αντίδραση: $X = 0,094 * 0,03 = 0,00282 \Omega$
- Αυτεπαγωγή: $L = X/100\pi = 8,97 * 10^{-6} \text{ H}$

Γραμμή προς 5^ο φορτίο:

- Τύπος γραμμής: Service connection – 16mm² Cu
- Ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο: $R_{ph} = 1,38 \Omega/\text{km}$
- Επαγωγική αντίδραση ανά χιλιόμετρο: $X_{ph} = 0,082 \Omega/\text{km}$
- Μήκος γραμμής: 30 m
- Ωμική αντίσταση: $R = 1,38 * 0,03 = 0,0414 \Omega$
- Επαγωγική αντίδραση: $X = 0,082 * 0,03 = 0,00246 \Omega$
- Αυτεπαγωγή: $L = X/100\pi = 7,83 * 10^{-6} \text{ H}$

5.2.4 Φορτία

Τα φορτία του πρότυπου μικροδικτύου αποτελούνται αποκλειστικά από οικιακούς καταναλωτές. Κάθε γραμμή παροχής που ξεκινάει από την κεντρική εναέρια γραμμή χαμηλής τάσης τροφοδοτεί ουσιαστικά μια ομάδα καταναλωτών, όπως είναι π.χ. μια πολυκατοικία. Για την μελέτη του τοπικού ελέγχου τάσης σε ένα τέτοιο δίκτυο, που είναι ο σκοπός του πειράματος, δεν χρειάζεται να μελετηθεί κάθε ξεχωριστός καταναλωτής κάθε ομάδας καταναλωτών, αλλά το σύνολο του φορτίου που αντιστοιχεί σε ολόκληρη την ομάδα. Π.χ. μας ενδιαφέρει το συνολικό φορτίο μιας πολυκατοικίας και όχι το φορτίο κάθε διαμερίσματος ξεχωριστά.

Παρατηρώντας την εικόνα που δίνει την τοπολογία του πρότυπου μικροδικτύου, που έχει παρουσιασθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου, βλέπουμε ότι για κάθε ομάδα καταναλωτών δίνονται δύο τιμές τριφασικής φαινόμενης ισχύος, η S_{max} και η S_0 . Η S_{max} δίνει την μέγιστη φαινόμενη τριφασική ισχύ ολόκληρης της ομάδας καταναλωτών, ενώ η S_0 δίνει την συνεισφορά της ομάδας στο συνολικό φορτίο όλης της γραμμής χαμηλής τάσης, όπως αυτή προκύπτει από τυποποιημένους συντελεστές ταυτοχρονισμού για οικιακούς καταναλωτές. Δίνεται επίσης στην περιγραφή του προτύπου ότι ο συντελεστής ισχύος όλων των οικιακών καταναλωτών του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί σταθερός και ίσος με 0,85 (επαγωγικός).

Για τον υπολογισμό της φασικής ενεργού ισχύος και φασικής αέργου ισχύος κάθε ομάδας καταναλωτών θα χρησιμοποιήσουμε ως τιμή αναφοράς για τη φαινόμενη ισχύ την S_0 και όχι την S_{max} , καθώς θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά ολόκληρης της γραμμής χαμηλής τάσης ως σύνολο, επομένως πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν τον ετεροχρονισμό των φορτίων.

Σύμφωνα λοιπόν με όλα τα παραπάνω έχουμε:

1° Φορτίο:

- Φασική ενεργός ισχύς: $P_{1ph} = \frac{S_{01}}{3} * 0,85 = \frac{5,7 \text{ KVA}}{3} * 0,85 = 1,615 \text{ KW}$
- Φασική άεργος ισχύς: $Q_{1ph} = \frac{S_{01}}{3} * \sin(\cos^{-1}(0,85)) = \frac{5,7 \text{ KVA}}{3} * 0,5268 = 1 \text{ KVar}$

2° Φορτίο:

- Φασική ενεργός ισχύς: $P_{2ph} = \frac{S_{02}}{3} * 0,85 = \frac{57 \text{ KVA}}{3} * 0,85 = 16,15 \text{ KW}$
- Φασική άεργος ισχύς: $Q_{2ph} = \frac{S_{02}}{3} * 0,5268 = \frac{57 \text{ KVA}}{3} * 0,5268 = 10 \text{ KVar}$

3° Φορτίο:

- Φασική ενεργός ισχύς: $P_{3ph} = \frac{S_{03}}{3} * 0,85 = \frac{25 \text{ KVA}}{3} * 0,85 = 7,083 \text{ KW}$
- Φασική άεργος ισχύς: $Q_{3ph} = \frac{S_{03}}{3} * 0,5268 = \frac{25 \text{ KVA}}{3} * 0,5268 = 4,39 \text{ KVar}$

4° Φορτίο:

- Φασική ενεργός ισχύς: $P_{4ph} = \frac{S_{04}}{3} * 0,85 = \frac{5,7 \text{ KVA}}{3} * 0,85 = 1,615 \text{ KW}$
- Φασική άεργος ισχύς: $Q_{4ph} = \frac{S_{04}}{3} * 0,5268 = \frac{5,7 \text{ KVA}}{3} * 0,5268 = 1 \text{ KVar}$

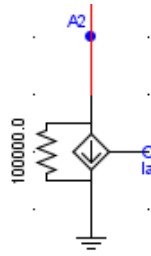
5° Φορτίο:

- Φασική ενεργός ισχύς: $P_{5ph} = \frac{S_{05}}{3} * 0,85 = \frac{25 \text{ KVA}}{3} * 0,85 = 7,083 \text{ KW}$
- Φασική άεργος ισχύς: $Q_{5ph} = \frac{S_{05}}{3} * 0,5268 = \frac{25 \text{ KVA}}{3} * 0,5268 = 4,39 \text{ KVar}$

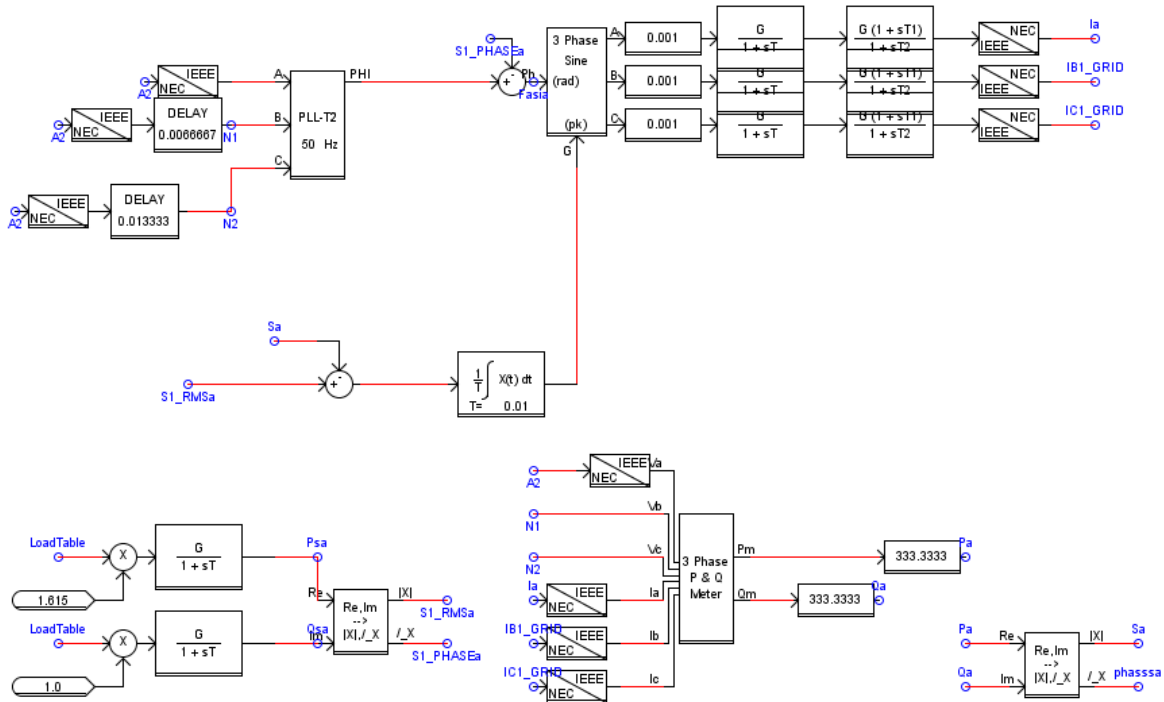
Για την αναπαράσταση των φορτίων στο πρόγραμμα RSCAD υιοθετήθηκε ένα μοντέλο εξαρτημένης πηγής έντασης που λειτουργεί ως πηγή P-Q (με φορά ρεύματος όμως προς τη γη, επομένως στην πράξη λειτουργεί ως καταβόθρα P-Q). Το μοντέλο λειτουργεί ως εξής: Δέχεται ως είσοδο την τάση στα άκρα της εξαρτημένης πηγής, καθώς και την επιθυμητή ενεργό και άεργο ισχύ του φορτίου και κατασκευάζει την κατάλληλη κυματομορφή ρεύματος σε πλάτος και φάση, την οποία στέλνει ως σήμα εισόδου στην εξαρτημένη πηγή έντασης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ισχύς που παίρνει σαν είσοδο.

Οι επιθυμητές τιμές της ενεργού και της άεργος ισχύος κάθε φορτίου προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των μέγιστων φασικών τιμών των ισχύων, όπως αυτές υπολογίστηκαν παραπάνω, με την ανά μονάδα τιμή μιας καμπύλης οικιακού φορτίου (1 όταν η καμπύλη είναι στο μέγιστο σημείο, 0.5 όταν είναι στο 50% του μεγίστου κλπ). Περισσότερες πληροφορίες για την καμπύλη οικιακού φορτίου θα παρουσιαστούν σε επόμενη παράγραφο.

Το κυκλωματικό στοιχείο της εξαρτημένης πηγής έντασης στο RSCAD, καθώς και το κύκλωμα ελέγχου της, που δημιουργεί την κατάλληλη κυματομορφή του ρεύματος, παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα.



Εικόνα 5.4 Εξαρτημένη πηγή έντασης στο RSCAD



Εικόνα 5.5 Κύκλωμα ελέγχου του μοντέλου της εξαρτημένης πηγής έντασης που λειτουργεί ως πηγή P-Q

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η ανάπτυξη του ανωτέρω κυκλώματος ελέγχου της εξαρτημένης πηγής έντασης δεν έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αλλά αντλήθηκε ως έχει από προηγούμενα πειράματα προσομοίωσης σε πραγματικό που είχαν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο ΣΗΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

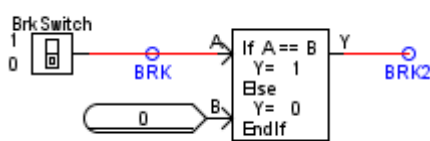
5.2.5 Αντιστροφείας μπαταριών

Στην τοπολογία του πρότυπου μικροδικτύου προτείνεται η ύπαρξη ενός flywheel storage ως μέσο αποθήκευσης ισχύος, με εναλλακτική λύση τις μπαταρίες. Εμείς επιλέξαμε τις μπαταρίες για την μοντελοποίηση του δικτύου στο RSCAD. Επίσης, οι μπαταρίες αυτές αποφασίστηκε να έχουν τον χαρακτήρα εφεδρείας (back-up) του μικροδικτύου, όταν αυτό βρίσκεται σε συνδεδεμένη λειτουργία (όταν δηλαδή έχει ανταλλαγή ισχύος με το ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης). Αυτό σημαίνει ότι κατά τη συνδεδεμένη λειτουργία του μικροδικτύου θα βρίσκονται σε πλήρη φόρτιση, αλλά απομονωμένες, χωρίς ανταλλαγή ισχύος με αυτό. Ο ρόλος τους, ή πιο σωστά, ο ρόλος του αντιστροφέα τους, θα είναι να δημιουργεί την

κυματομορφή της τάσης (πλάτος και συχνότητα) και να παρέχει την απαραίτητη ισχύ στο μικροδίκτυο μόνο όταν αυτό βρίσκεται σε νησιδοποιημένη λειτουργία (islanded mode).

Για τη μετάβαση της λειτουργίας του δικτύου από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη και το αντίστροφο, διασφαλίζοντας παράλληλα τη σωστή λειτουργία αυτής της μοντελοποίησης, έχουν τοποθετηθεί 2 διακόπτες (circuit breakers), ένας μετά τον μετασχηματιστή MT/XT και ένας μετά τον αντιστροφέα τον μπαταριών. Οι δύο αυτοί διακόπτες βρίσκονται σε αντίθετη κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή όταν ο ένας είναι κλειστός ο άλλος είναι ανοιχτός, και ελέγχονται από το ίδιο κύκλωμα ελέγχου. Έτσι εξασφαλίζεται ότι δεν μπορούν να βρεθούν ποτέ στην ίδια κατάσταση λειτουργίας.

Το κύκλωμα ελέγχου των διακοπών, όπως αυτό αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα RSCAD, είναι το ακόλουθο:



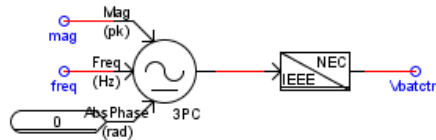
Εικόνα 5.6 Κύκλωμα ελέγχου διακοπών μετάβασης από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία και το αντίστροφο

Εμείς χειριζόμαστε τον διακόπτη BrkSwitch από το περιβάλλον RUNTIME του RSCAD καθώς «τρέχει» η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, αλλάζοντας έτσι την κατάσταση και των δύο διακοπών του μικροδικτύου ταυτόχρονα.

Για την αναπαράσταση του αντιστροφέα των μπαταριών στο RSCAD υιοθετήθηκε ένα μοντέλο εξαρτημένης πηγής τάσης. Αυτό σημαίνει ότι η τάση που θα έχει ως έξοδο ο αντιστροφέας θα είναι πάντα ένα καθαρό ημίτονο. Συνεπώς, το μοντέλο μας ενσωματώνει (χωρίς να παρουσιάζεται) το φίλτρο εξόδου LC ενός πραγματικού αντιστροφέα μπαταριών. Ο ρόλος του φίλτρου αυτού είναι να «κόψει» τις αρμονικές συνιστώσες της παλμικής κυματομορφής τάσης που προκύπτει από την τεχνική της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM), την οποία χρησιμοποιούν κατά κόρον οι αντιστροφεείς μπαταριών, έτσι ώστε να προκύψει ημιτονοειδής κυματομορφή τάσης στην έξοδο του φίλτρου.

Το κύκλωμα ελέγχου της εξαρτημένης πηγής τάσης, που λειτουργεί ως το μοντέλο του αντιστροφέα των μπαταριών όπως προαναφέρθηκε, είναι υπεύθυνο για να κατασκευάσει από το μηδέν την κυματομορφή της τάσης (πλάτος και συχνότητα) όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε νησιδοποιημένη λειτουργία. Θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο γεννήτριας ημιτονικών σημάτων, που υπάρχει στις βιβλιοθήκες του RSCAD, το οποίο δέχεται ως είσοδο τρεις παραμέτρους για να παράξει το επιθυμητό σήμα:

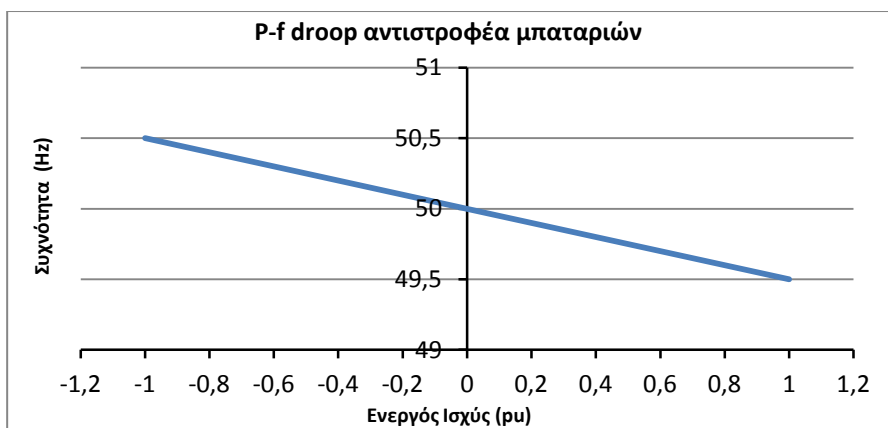
- Πλάτος ημιτόνου
- Συχνότητα ημιτόνου
- Αρχική φασική γωνία



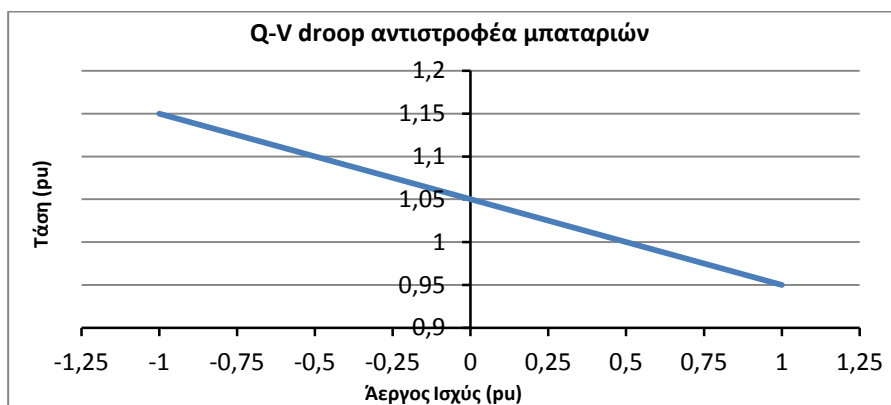
Εικόνα 5.7 Μοντέλο γεννήτριας ημιτονικού σήματος του RSCAD

Η αρχική φασική γωνία δεν επηρεάζει σημαντικά την τελική κυματομορφή, ούτε τη συμπεριφορά του συστήματος, καθώς το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα θα ρυθμίσει κατάλληλα τη γωνία του για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες του δικτύου σε άεργο ισχύ. Έτσι, μπορεί να τεθεί ίση με μηδέν.

Απομένει λοιπόν να αναπτυχθούν τα κυκλώματα που θα παράγουν το επιθυμητό πλάτος και την επιθυμητή συχνότητα του ημιτόνου της γεννήτριας σημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση καμπυλών (droops) Q-V (αέργου ισχύος-τάσης) και P-f (ενεργού ισχύος-συχνότητας). Οι καμπύλες αυτές δίνουν την τιμή που πρέπει να έχουν η τάση και η συχνότητα του αντιστροφέα, συναρτήσει των απαιτήσεων του δικτύου σε άεργο και ενεργό ισχύ αντίστοιχα. Από τη βιβλιογραφία αντλήθηκαν οι τυπικές μορφές αυτών των καμπυλών για τον αντιστροφέα μπαταριών ενός μικροδικτύου οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια [12].



Εικόνα 5.8 Καμπύλη droop ενεργού ισχύος-συχνότητας του αντιστροφέα μπαταριών



Εικόνα 5.9 Καμπύλη droop αέργου ισχύος-τάσης του αντιστροφέα μπαταριών

Η καμπύλη P-f παρουσιάζει την ονομαστική συχνότητα των 50Hz για μηδενική ζήτηση ενεργού ισχύος, την ελάχιστη επιτρεπτή συχνότητα των 49,5Hz για μέγιστη ζήτηση ενεργού ισχύος και την μέγιστη επιτρεπτή συχνότητα των 50,5Hz για μέγιστη απορρόφηση ενεργού ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι σε ένα μικροδίκτυο, όπου υπάρχουν αρκετές μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, υπάρχουν κάποιες ώρες που ο αντιστροφείας χρειάζεται να τροφοδοτεί το δίκτυο με ένεργο ισχύ (όταν η παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών δεν επαρκεί για την κάλυψη των φορτίων), και κάποιες ώρες που χρειάζεται να απορροφήσει περίσσεια ενεργού ισχύος (όταν η παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση των φορτίων). Επομένως, σε μια μέση ισορροπημένη κατάσταση η ανταλλαγή ενεργού ισχύος του αντιστροφεία μπαταριών με το μικροδίκτυο θα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, και η συχνότητα θα είναι πολύ κοντά στην ονομαστική των 50Hz.

Δεν συμβαίνει το ίδιο όμως και με την καμπύλη Q-V. Μελετώντας την καμπύλη παρατηρούμε ότι η ονομαστική τάση 1 ανά μονάδα δίνεται για ζήτηση αέργου ισχύος ίση με το 50% της μέγιστης, τάση 1,05 α.μ. για μηδενική ζήτηση αέργου ισχύος και τάση 0,95 α.μ. για μέγιστη ζήτηση αέργου ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι είναι πολύ δύσκολο, έως αδύνατον, ο αντιστροφείας μπαταριών να χρειαστεί να απορροφήσει ένεργο ισχύ, άρα σε μια μέση κατάσταση (50% ζήτηση), θα δημιουργεί τάση ονομαστικής τιμής. Για να χρειαστεί να απορροφήσει ένεργο ισχύ ο αντιστροφείας θα πρέπει το μικροδίκτυο να βρίσκεται σε μια κατάσταση όπου οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής θα παράγουν μεγαλύτερη ένεργο από τη ζήτηση των φορτίων σε ένεργο. Όμως, οι αντιστροφείες των μονάδων ΔΠ παράγουν ένεργο ισχύ όταν η τάση στον ζυγό σύνδεσης τους έχει πέσει αισθητά, σε μια προσπάθεια να την αυξήσουν (περισσότερα περί των αντιστροφείων ανανεώσιμων πηγών στην επόμενη παράγραφο). Για να έχει πέσει όμως αρκετά η τάση στους ζυγούς, σημαίνει ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη ζήτηση ισχύος από τα φορτία, το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την προϋπόθεση η ΔΠ να παράγει περισσότερη ένεργο από τη ζήτηση. Γι' αυτό το λόγο, είναι πρακτικά αδύνατον να χρειαστεί απορρόφηση αέργου ισχύος από τον αντιστροφεία μπαταριών.

Για να κατασκευάσουμε τώρα αυτές τις καμπύλες στο RSCAD, χρησιμοποιώντας κυκλωματικά στοιχεία, πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε τις εξής σταθερές παραμέτρους:

- Ονομαστικό πλάτος τάσης (διότι η γεννήτρια ημιτονικών σημάτων δέχεται το πλάτος του ημιτόνου ως είσοδο, όχι την ενεργό τιμή)
- Μέγιστη ζήτηση ενεργού ισχύος
- Μέγιστη ζήτηση αέργου ισχύος

Η ονομαστική ενεργός τιμή της τάσης είναι 230V, επομένως το ονομαστικό πλάτος της είναι:

$$V_{peak,nom} = 230V * \sqrt{2} = 325,27 V$$

Σύμφωνα με όσα υπολογίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο για τα φορτία, η μέγιστη ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος (συνυπολογίζοντας τον ετεροχρονισμό των φορτίων) είναι:

$$P_{max} = 1,615 + 16,15 + 7,083 + 1,615 + 7,083 KW = 33,546 KW$$

$$Q_{max} = 1 + 10 + 4,39 + 1 + 4,39 KVar = 20,78 KVar$$

Έτσι, επιλέγουμε έναν αντιστροφέα μπαταριών με ονομαστική φαινόμενη ισχύ 45KVA και ελάχιστο συντελεστή ισχύος 0,8 (επαγωγικό ή χωρητικό, ανάλογα με τη ροή της ισχύος). Οπότε, η ονομαστική ενεργός και άεργος ισχύς του είναι:

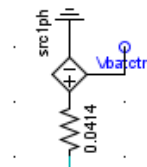
$$P_{nom} = 45KVA * 0,8 = 36KW$$

$$Q_{nom} = 36KW * \tan(\cos^{-1}(0,8)) = 27KVar$$

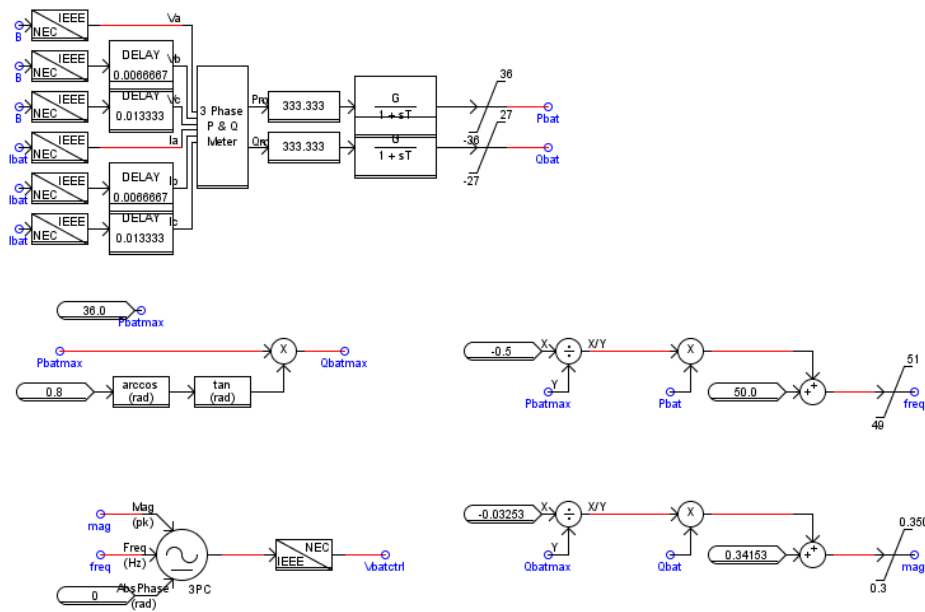
Έχοντας τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των droops, υπολογίζουμε τις εξισώσεις των δύο ευθειών (σημειώνουμε ότι οι τάσεις είναι σε kV, η συχνότητα σε Hz και η άεργος ισχύς σε KVar):

- P-f: $f = \frac{-0,5}{P_{nom}} * P + 50$
- Q-V: $Πλάτος = \frac{-0,03253}{Q_{nom}} * Q + 0,34153$

Το μοντέλο της εξαρτημένης πηγής τάσης στο RSCAD που μοντελοποιεί τον αντιστροφέα των μπαταριών, καθώς και το τελικό κύκλωμα ελέγχου της, παρουσιάζονται στη συνέχεια:



Εικόνα 5.10 Μοντέλο εξαρτημένης πηγής τάσης στο RSCAD



Εικόνα 5.11 Κύκλωμα ελέγχου της εξαρτημένης πηγής τάσης που μοντελοποιεί τον αντιστροφέα των μπαταριών

Το μοντέλο της εξαρτημένης πηγής τάσης έχει τουλάχιστον μια αντίσταση σε σειρά, επομένως ως τιμή της αντίστασης αυτής βάλουμε την ωμική αντίσταση της σύνδεσης παροχής του αντιστροφέα με την κεντρική γραμμή χαμηλής τάσης του μικροδικτύου, όπως αυτή υπολογίστηκε στην παράγραφο 5.2.3 (0,0414Ω).

Στο κύκλωμα ελέγχου, το πρώτο block είναι ένας τριφασικός μετρητής ισχύος ο οποίος μετράει την ροή ενεργού και αέργου ισχύος από τον κλάδο της εξαρτημένης πηγής προς το υπόλοιπο δίκτυο. Οι μετρούμενες ισχείς πολλαπλασιάζονται αρχικά με μια συνάρτηση κέρδους με τιμή 333,333 (1000/3), ώστε να πάρουν φασικές τιμές και μονάδες σε KW και Kvar αντίστοιχα, και στη συνέχεια διέρχονται μέσα από φίλτρα πρώτης τάξης και περιοριστές πλάτους ώστε να εξομαλύνονται οι απότομες μεταβολές και να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του κυκλώματος.

5.2.6 Διεσπαρμένη παραγωγή

Στην τοπολογία του πρότυπου μικροδικτύου προτείνεται η ύπαρξη διαφόρων διαφορετικών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια, μικροτουρμπίνα και κυψέλη καυσίμου. Για τους σκοπούς του πειράματος αυτής της εργασίας δεν χρίστηκε απαραίτητο να αναπτυχθεί μοντέλο προσομοίωσης για κάθε είδος μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που προτείνεται, παρά μόνο για ένα, το οποίο επιλέχθηκε να είναι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Συνεπώς, η μικροτουρμπίνα, η ανεμογεννήτρια και η κυψέλη καυσίμου αντικαταστάθηκαν στο κύκλωμα που προσομοιώσαμε από φωτοβολταϊκά ίδιας ονομαστικής ισχύος και θέσης μέσα στο δίκτυο. Στον ζυγό όπου υπήρχαν και ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά, η ισχύς της ανεμογεννήτριας ενσωματώθηκε στην ισχύ των φωτοβολταϊκών.

Η ονομαστική ισχύς των τεσσάρων πλέον φωτοβολταϊκών διατάξεων υπολογίστηκε από την εικόνα της τοπολογίας του μικροδικτύου. Όπου δίνεται τριφασική ισχύς για τη διεσπαρμένη παραγωγή τη διαιρούμε δια 3 για να πάρουμε την αντίστοιχη μονοφασική. Οι μονοφασικές ισχείς εισάγονται ως έχουν. Δεν δίνεται συντελεστής ισχύος για τη διεσπαρμένη παραγωγή στην περιγραφή του προτύπου. Επιλέγουμε εμείς ελάχιστο συντελεστή ισχύος ίσο με 0,8 (επαγωγικό ή χωρητικό, ανάλογα με τη ροή της ισχύος) για όλους τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών που θα προσομοιωθούν.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, έχουμε:

1^η Φωτοβολταϊκή διάταξη:

$$\text{Ονομαστική ενεργός ισχύς: } P_{pv1} = \frac{30KW}{3} = 10 KW$$

2^η Φωτοβολταϊκή διάταξη:

$$\text{Ονομαστική ενεργός ισχύς: } P_{pv2} = \frac{10KW}{3} + 4 * 2,5KW = 13,333 KW$$

3^η Φωτοβολταϊκή διάταξη:

$$\text{Ονομαστική ενεργός ισχύς: } P_{pv3} = 3 KW$$

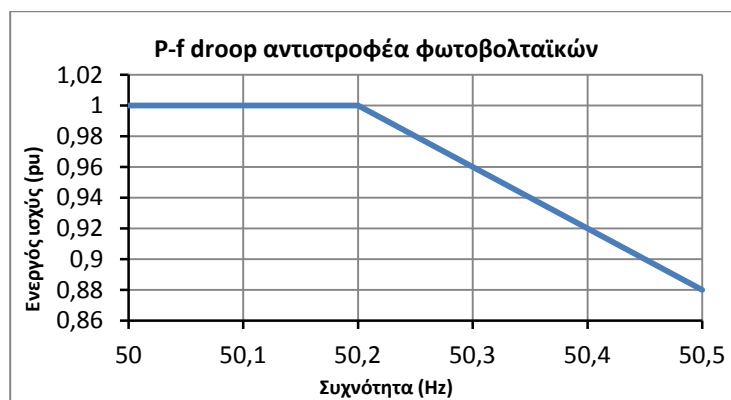
4^η Φωτοβολταϊκή διάταξη:

$$\text{Ονομαστική ενεργός ισχύς: } P_{pv4} = \frac{10KW}{3} = 3,333 KW$$

Για την αναπαράσταση των φωτοβολταϊκών και των αντιστροφών τους στο κύκλωμα που δημιουργήσαμε στο RSCAD υιοθετήθηκε πάλι το μοντέλο εξαρτημένης πηγής έντασης, που λειτουργεί ως πηγή P-Q (ίδιο με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τα φορτία, όμως τώρα με τη φορά του ρεύματος να είναι προς το δίκτυο αντι προς τη γη).

Κάθε σύγχρονος αντιστροφείας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διαθέτει ένα κύκλωμα ελέγχου περικοπής ενεργού ισχύος (power curtailment), ο ρόλος του οποίου είναι να μειώνει την παραγωγή ενεργού ισχύος της πηγής όταν η συχνότητα του δικτύου αυξάνεται πάνω από ένα όριο, έτσι ώστε να βοηθήσει στη σταθεροποίηση του (αφού, ως γνωστόν, η συχνότητα του δικτύου αυξάνεται όταν υπάρχει πολύ μικρή ζήτηση ενεργού ισχύος σε σχέση με την παραγωγή). Φυσικά, αυτό συμβαίνει στα πραγματικά δίκτυα διότι το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής γίνεται από σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες ορίζουν τη συχνότητα του δικτύου. Στο δίκτυο που κατασκευάζουμε εμείς στο RSCAD έχουμε μοντελοποιήσει το ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης ως μια ιδανική πηγή τάσης, επομένως, κατά τη συνδεδεμένη λειτουργία του μικροδικτύου, η συχνότητα θα είναι πάντα σταθερή και ίση με 50Hz. Όταν όμως το μικροδίκτυο λειτουργεί σε νησιδοποιημένη λειτουργία, απομονωμένο από το ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης, τότε υπεύθυνος για τη δημιουργία της τάσης του μικροδικτύου, σε πλάτος και συχνότητα, είναι ο αντιστροφείας των μπαταριών, ο οποίος αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Τότε λοιπόν, η συχνότητα του μικροδικτύου δεν θα είναι σταθερή, καθώς ο αντιστροφείας ορίζει τη συχνότητα σύμφωνα με την καμπύλη P-f που έχει παρουσιαστεί. Έτσι, αποφασίστηκε να μοντελοποιηθεί το κύκλωμα ελέγχου περικοπής ενεργού ισχύος για τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών, ώστε να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του κατά την νησιδοποίηση του μικροδικτύου.

Το κύκλωμα περικοπής βασίζεται και αυτό σε μια καμπύλη P-f, διαφορετική φυσικά από εκείνη του αντιστροφεία μπαταριών. Η τυπική μορφή της, η οποία είναι και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα μας, παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



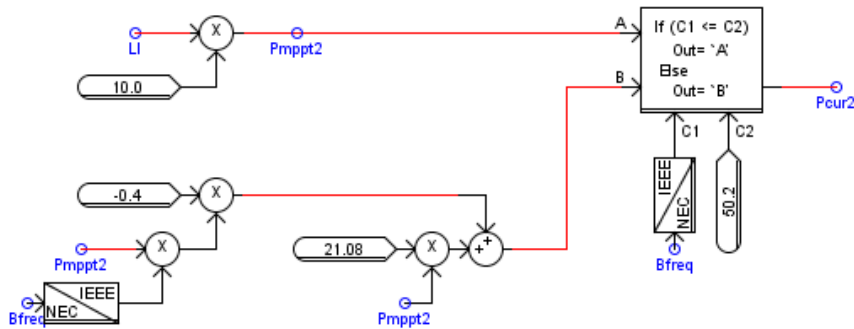
Εικόνα 5.12 Καμπύλη P-f για περικοπή ενεργού ισχύος φωτοβολταϊκών

Η καμπύλη ορίζει ότι για κάθε αύξηση της συχνότητας κατά 0,1 Hz, πάνω από το όριο των 50,2 Hz, θα επιφέρει μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος κατά 4%. Φυσικά, η κλίση της καμπύλης και το όριο της συχνότητας για την έναρξη της περικοπής μπορούν να επιλεγθούν διαφορετικά, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε δικτύου.

Για τον υπολογισμό της μέγιστης δυνατής παραγωγής ενεργού ισχύος κάθε χρονική στιγμή θα χρησιμοποιήσουμε τη μοντελοποίηση μιας ημερήσιας καμπύλης ηλιοφάνειας, σε ανά μονάδα τιμές, όπως ακριβώς κάναμε και για τα φορτία με μια ημερήσια καμπύλη ζήτησης οικιακού φορτίου. Περισσότερες πληροφορίες για τις δύο καμπύλες θα παρουσιαστούν σε επόμενη παράγραφο.

Η παραγόμενη ενεργός ισχύς λοιπόν, για δεδομένη τιμή ηλιοφάνειας, προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ονομαστικής ενεργού ισχύος κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης με την αντίστοιχη ανά μονάδα τιμή ηλιοφάνειας. Έτσι, για ηλιοφάνεια 1 α.μ., η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενεργού ισχύος θα ισούται με την ονομαστική, ενώ για ηλιοφάνεια 0,5 α.μ. θα ισούται με το 50% της ονομαστικής κ.ο.κ.

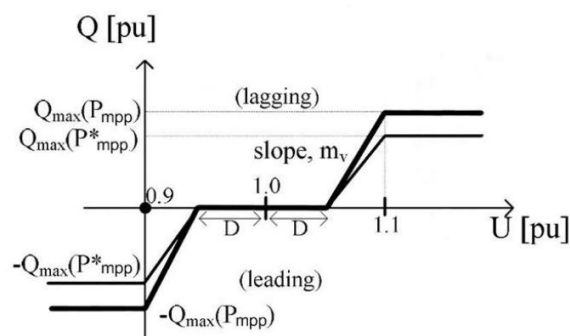
Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε στο RSCAD και μοντελοποιεί όσα αναφέρθηκαν παραπάνω δίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 5.13 Κύκλωμα ελέγχου περιοχής ενεργού ισχύος για τους αντιστροφέας φωτοβολταϊκών

Στο μικροδίκτυο που υλοποιήσαμε για την προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, τα μόνα στοιχεία που μπορούν να συνεισφέρουν στην ρύθμιση της τάσης του δικτύου (εκτός του αντιστροφέα μπαταριών κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία) είναι οι αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών, μέσω της παραγωγής (για αύξηση της τάσης) ή απορρόφησης (για μείωση της τάσης) αέργου ισχύος. Συνεπώς, ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα κύκλωμα ελέγχου της ροής αέργου ισχύος από και προς τον κάθε αντιστροφέα φωτοβολταϊκών. Από τις διάφορες μεθόδους υλοποίησης ενός τέτοιου ελέγχου, επιλέχθηκε η μέθοδος των καμπυλών αέργου ισχύος-τάσης (Q-V droop), δηλαδή εξάρτηση της αέργου από μια μετρούμενη τιμή τάσης. Συγκεκριμένα, ο κάθε αντιστροφέας θα μετράει την τάση στον κόμβο διασύνδεσης του με το υπόλοιπο δίκτυο και μέσω της καμπύλης $Q(V)$ θα υπολογίζει την κατάλληλη τιμή της αέργου ισχύος που πρέπει να παράξει ή να απορροφήσει. Αυτή ακριβώς η διάταξη ελέγχου είναι όλη η ουσία αυτού του πειράματος, ο τοπικός έλεγχος της τάσης σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης. Ο έλεγχος είναι τοπικός επειδή ο κάθε αντιστροφέας κάνει ρύθμιση της τάσης αυτόνομα, με μόνη είσοδο την τάση στον κόμβο διασύνδεσης του, χωρίς επικοινωνία με το υπόλοιπο δίκτυο ή τους άλλους αντιστροφέας.

Μέσα από τη βιβλιογραφία αντλήθηκε η τυπική μορφή των καμπυλών Q-V για αντιστροφέας φωτοβολταϊκών, η οποία παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα [10]:



Εικόνα 5.14 Καμπύλη droop Q-V αντιστροφέας φωτοβολταϊκών

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει αυτήν την καμπύλη είναι:

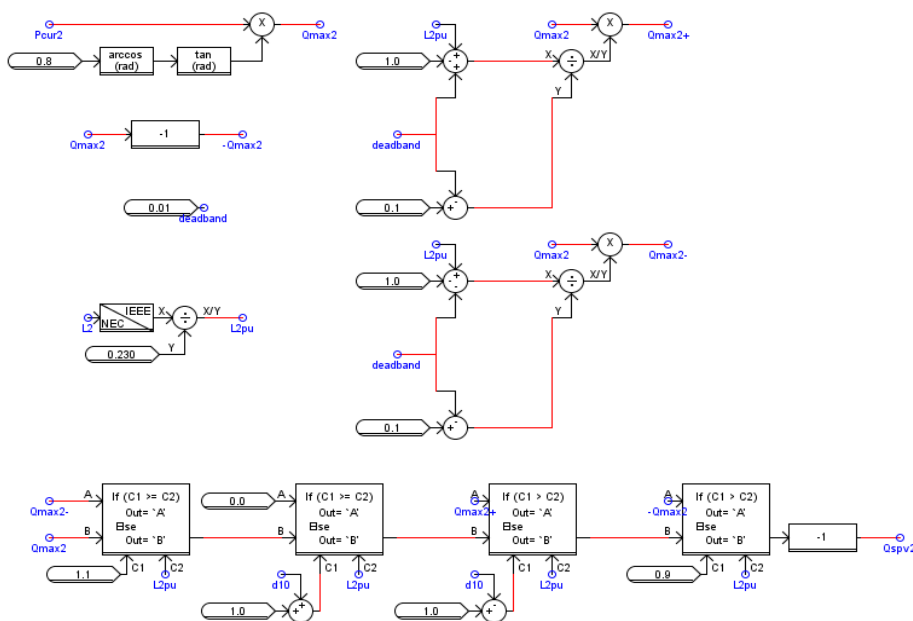
$$Q = \begin{cases} -Q_{max} , & V < 0.9pu \\ Q_{max} \left(\frac{V - 1 + D}{0.1 - D} \right) , & 0.9pu \leq V < 1 - D \\ 0 , & 1 - D \leq V \leq 1 + D \\ Q_{max} \left(\frac{V - 1 - D}{0.1 - D} \right) , & 1 + D < V \leq 1.1pu \\ Q_{max} , & V > 1.1pu \end{cases}$$

Μελετώντας την καμπύλη συμπεραίνουμε ότι οι θετικές τιμές αέργου ισχύος ισοδυναμούν με απορρόφηση ισχύος (ώστε να μειωθεί η τάση), ενώ οι αρνητικές τιμές με παραγωγή (ώστε να αυξηθεί). Επίσης, το διάστημα $2 \cdot D$ είναι ένα διάστημα «νεκρής ζώνης» (dead-band) στο οποίο η τάση θεωρείται ικανοποιητικά κοντά στην ονομαστική της τιμή, επομένως δεν απαιτείται καθόλου ροή αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα. Η παράμετρος D επιλέγεται με βάση τις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε δικτύου και φυσικά μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε αντιστροφέα.

Παρατηρούμε επίσης ότι η μέγιστη τιμή της αέργου ισχύος είναι συνάρτηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος, και όχι της ονομαστικής τιμής της. Αυτό είναι απόλυτα λογικό, καθώς σε κάθε στιγμή η άεργος ισχύς που παράγει ή απορροφά ο αντιστροφέας δεν πρέπει να παραβιάζει τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος του (0,8 για τη δική μας μοντελοποίηση). Συνεπώς, σε κάθε χρονική στιγμή, η εξάρτηση της μέγιστης αέργου ισχύος (Q_{max}) από την παραγόμενη ενεργό ισχύ είναι: $Q_{max} = P * \tan(\cos^{-1}(0,8))$.

Στη δική μας μοντελοποίηση για τα φωτοβολταϊκά και τους αντιστροφέες τους η παραγόμενη ενεργός ισχύς προκύπτει ως η έξοδος από το κύκλωμα περικοπής ενεργού ισχύος που αναλύθηκε παραπάνω. Προφανώς, αν δεν χρειάζεται να γίνει περικοπή, η παραγόμενη ισχύς είναι ίση με τη μέγιστη δυνατή για δεδομένη τιμή ηλιοφάνειας.

Το κύκλωμα ελέγχου που υλοποιήθηκε στο RSCAD και μοντελοποιεί όσα αναλύθηκαν παραπάνω σχετικά με τον τοπικό έλεγχο τάσης με χρήση καμπυλών Q-V στους αντιστροφέες των φωτοβολταϊκών παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 5.15 Κύκλωμα ρύθμισης τάσης με χρήση καμπύλης Q-V

Επειδή επιθυμούμε για τα φωτοβολταϊκά οι θετικές τιμές ισχύος να ισοδυναμούν με παραγωγή και οι αρνητικές τιμές με απορρόφηση, το τελευταίο βήμα που γίνεται από το παραπάνω κύκλωμα είναι ο πολλαπλασιασμός της αέργου ισχύος που υπολογίζεται με -1, καθώς η καμπύλη $d\text{loop } Q-V$ που μοντελοποιήσαμε έχει την αντίθετη θεώρηση σχετικά με τις θετικές και τις αρνητικές τιμές.

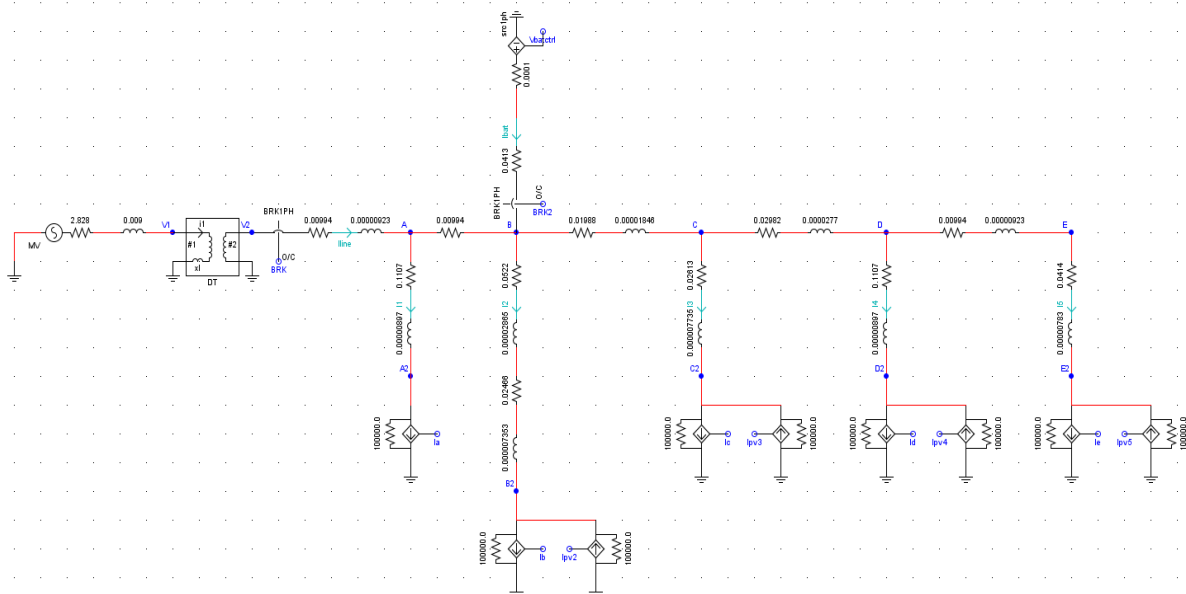
Για τις παραμέτρους D των καμπυλών $Q-V$ των τεσσάρων φωτοβολταϊκών διατάξεων του μικροδικτύου επιλέχθηκαν οι εξής τιμές:

- $D1 = 0,01$
- $D2 = 0,01$
- $D3 = 0,005$
- $D4 = 0,005$

Η επιλογή έγινε με βάση την απόσταση των διατάξεων από τον ζυγό σύνδεσης με το ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης. Οι ζυγοί όπου συνδέονται οι φωτοβολταϊκές διατάξεις 3 και 4 (προτελευταίος και τελευταίος στύλος της εναέριας κεντρικής γραμμής χαμηλής τάσης αντίστοιχα) βρίσκονται σε αρκετά μεγαλύτερες αποστάσεις απ' ότι οι ζυγοί των δύο πρώτων διατάξεων, επομένως είναι πιο ευαίσθητοι σε μεταβολές (ανυψώσεις και βυθίσεις) της τάσης. Έτσι, επιλέχθηκε να έχουν μικρότερο deadband αυτές οι δύο καμπύλες $Q-V$ ώστε να ρυθμίζεται καλύτερα η τάση αυτών των ζυγών.

5.3 Προσομοιώσεις – Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στην εικόνα 5.16 παρουσιάζεται το τελικό δίκτυο που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα RSCAD για την προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο του προς μελέτη πρότυπου μικροδικτύου. Περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 5.2, χωρίς όμως να είναι εμφανείς οι διατάξεις ελέγχου όπου αυτές υπάρχουν, για να μην είναι δυσνόητο από τον όγκο της επιπρόσθετης πληροφορίας.



Εικόνα 5.16 Το τελικό δίκτυο που υλοποιήθηκε στο RSCAD για την ανά φάση μοντελοποίηση του πρότυπου μικροδικτύου χαμηλής τάσης της CIGRÉ

Συνοψίζοντας, οι διαφορές μεταξύ του πρότυπου μικροδικτύου χαμηλής τάσης της CIGRÉ και του δικτύου που αναπτύξαμε στο λογισμικό RSCAD για την εκτέλεση των προσομοιώσεων είναι:

- Υλοποίηση μονοφασικού ισοδύναμου δικτύου.
- Παράλειψη μοντελοποίησης του συστήματος αλλαγής λήψεων χωρίς φορτίο του μετασχηματιστή MT/XT.
- Παράλειψη αντίστασης και γειώσεων ουδετέρου.
- Χρησιμοποίηση του μέσου αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες) ως εφεδρεία (απομονωμένο κατά τη συνδεδεμένη λειτουργία).
- Αντικατάσταση όλων των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με φωτοβολταϊκές διατάξεις.

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του μικροδικτύου και τη μελέτη της λειτουργίας του τοπικού ελέγχου τάσης μέσω των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών, επιλέχθηκε να γίνουν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις με βάση την κατάσταση λειτουργίας του. Αυτές είναι:

1. Προσομοίωση ημερήσιας συμπεριφοράς σε συνδεδεμένη λειτουργία
2. Προσομοίωση ημερήσιας συμπεριφοράς σε νησιδοποιημένη λειτουργία
3. Προσομοίωση της συμπεριφοράς του μικροδικτύου κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία

Για τις δύο πρώτες προσομοιώσεις το ιδανικότερο θα ήταν να «τρέξουν» για ένα πραγματικό 24ωρο, αντλώντας δεδομένα για την ηλιοφάνεια και τη ζήτηση φορτίου σε πραγματικό χρόνο. Κάτι τέτοιο όμως δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί, αφενός μεν επειδή δεν υπήρχε τρόπος μέτρησης της ζήτησης οικιακού φορτίου κάθε χρονική στιγμή στο εργαστήριο ΣΗΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της εργασίας, αφετέρου δε επειδή δεν υπήρχε η δυνατότητα δημιουργίας 24ωρων γραφικών παραστάσεων (plots) από το περιβάλλον RUNTIME του RSCAD, καθώς υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των δεδομένων που μπορεί να αποθηκεύσει στη μνήμη του για τη δημιουργία των γραφικών παραστάσεων, με συνέπεια να μην υπάρχουν οπτικά αποτελέσματα προς παρουσίαση.

Φυσικά, αυτό το γεγονός δεν αναιρεί ότι η προσομοίωση εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, καθώς όποια μεταβολή παραμέτρων επιβάλλουμε ως χρήστες στο δίκτυο πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης, με άμεση απόκριση του δικτύου στη μεταβολή, χωρίς να χρειάζεται επανεκκίνηση της. Το πείραμα μας επομένως, μπορεί να μην προσομοιώνει επακριβώς την πραγματική ημερήσια συμπεριφορά του μικροδικτύου, θα αποτελέσει όμως τη βάση για περαιτέρω μελέτη και ανάλυση του ίδιου ή και παρόμοιων δικτύων, όπως μπορεί να είναι για παράδειγμα μια προσομοίωση Power Hardware In-the-Loop (PHIL). Σε αυτήν, κάποιο από τα μοντελοποιημένα στοιχεία του δικτύου, όπως για παράδειγμα ένας αντιστροφέας φωτοβολταϊκών, μπορεί να αντικατασταθεί με έναν πραγματικό αντιστροφέα, ο οποίος θα συνδεθεί στον ψηφιακό εξομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS), για την εξακρίβωση της ορθής ή μη ορθής λειτουργίας του σε περιβάλλον προσομοίωσης, αντί να γίνει αυτός ο έλεγχος με τη σύνδεση του στο πραγματικό δίκτυο, με ρίσκο να καταστραφεί ο ίδιος ή να δημιουργήσει προβλήματα στη συμπεριφορά του δικτύου από τυχόν σφάλματα.

Για την προσομοίωση λοιπόν ενός πραγματικού 24ώρου σε λιγότερο χρόνο ήταν απαραίτητο να γίνει μοντελοποίηση μιας ημερήσιας καμπύλης οικιακού φορτίου και μιας ημερήσιας καμπύλης ηλιοφάνειας. Η μοντελοποίηση αυτή θα βασιστεί στη λογική ότι επιθυμούμε να έχουμε κάποιες ανά μονάδα τιμές για ηλιοφάνεια και ζήτηση φορτίου, οι οποίες θα πρέπει να είναι χρονικά αντιστοιχισμένες, ώστε οι τιμές κάθε ζεύγους ηλιοφάνειας-ζήτησης φορτίου να αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή μιας πραγματικής ημέρας.

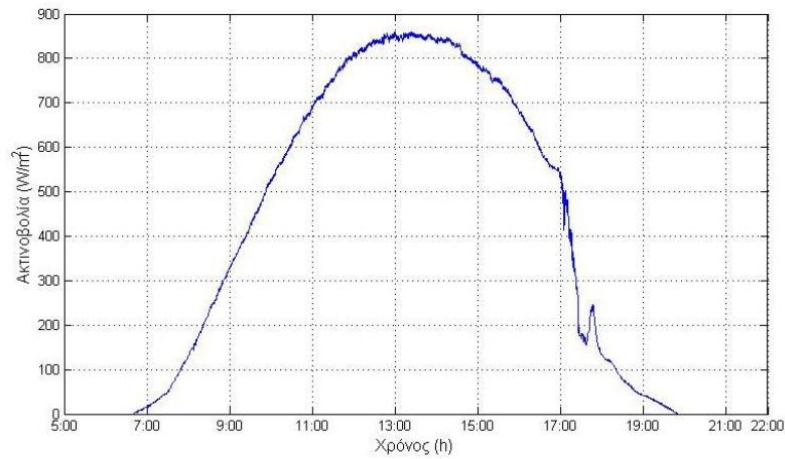
Η επιλογή για τον αριθμό των διαφορετικών τιμών που θα μοντελοποιούν ένα 24ωρο έγινε με βάση τις δυνατότητες του περιβάλλοντος RUNTIME του RSCAD στην αποθήκευση δεδομένων για τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων (plots). Έπειτα από δοκιμές, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν 24 ανά μονάδα τιμές που θα αντιστοιχούν μια προς μια στις 24 ώρες μιας ημέρας.

Οι 24 τιμές αυτές υπολογίστηκαν δειγματοληπτικά από τυποποιημένες ημερήσιες καμπύλες ηλιοφάνειας και ζήτησης οικιακού φορτίου που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία [28][10]. Στις εικόνες που ακολουθούν (5.17-5.20) παρουσιάζονται οι καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά, καθώς και οι καμπύλες που προέκυψαν από τη δειγματοληψία εικοσιτεσσάρων σημείων για τις ανάγκες του πειράματος.

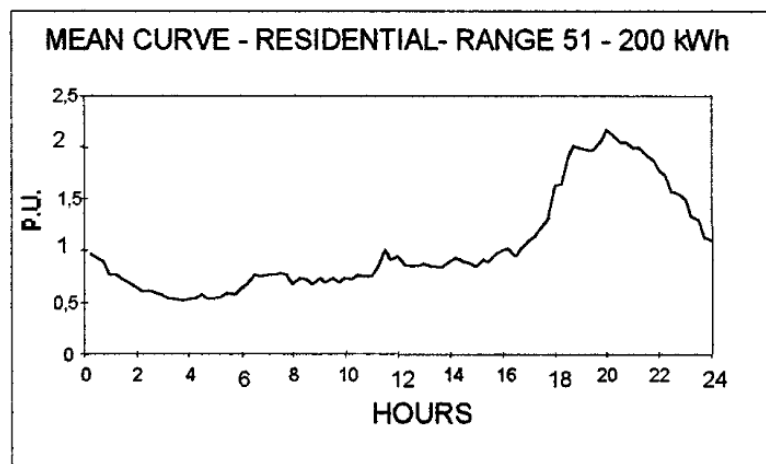
Οι ανά μονάδα τιμές που εξήχθησαν από τη δειγματοληψία των καμπυλών αναφοράς δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ωρα της ημέρας	Ανά μονάδα τιμή ηλιοφάνειας	Ανά μονάδα τιμή ζήτησης φορτίου
1:00	0	0,4
2:00	0	0,325
3:00	0	0,3
4:00	0	0,25
5:00	0	0,275
6:00	0	0,3
7:00	0,05	0,4
8:00	0,15	0,375
9:00	0,3	0,375
10:00	0,5	0,4
11:00	0,7	0,45
12:00	0,9	0,5
13:00	1	0,475
14:00	0,95	0,475
15:00	0,85	0,475
16:00	0,7	0,5
17:00	0,5	0,5
18:00	0,2	0,7
19:00	0,05	0,9
20:00	0	1
21:00	0	0,875
22:00	0	0,75
23:00	0	0,625
00:00	0	0,5

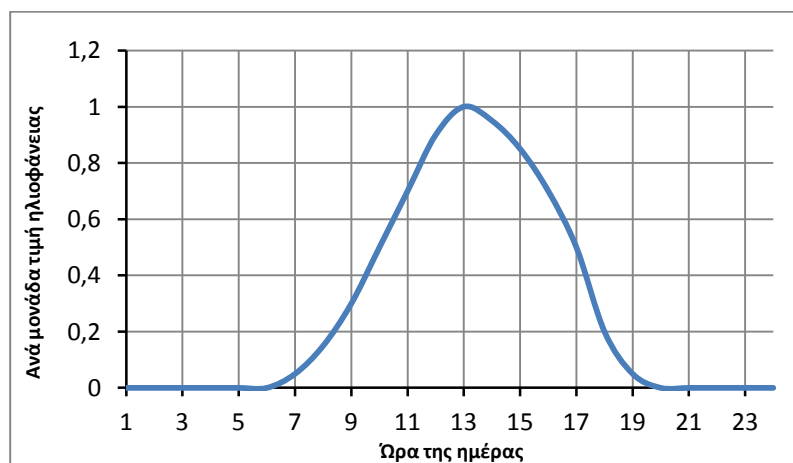
Πίνακας 5.5 Ανά μονάδα τιμές ηλιοφάνειας και ζήτησης φορτίου, όπως προέκυψαν από τη δειγματοληψία 24 σημείων των καμπυλών αναφορά.



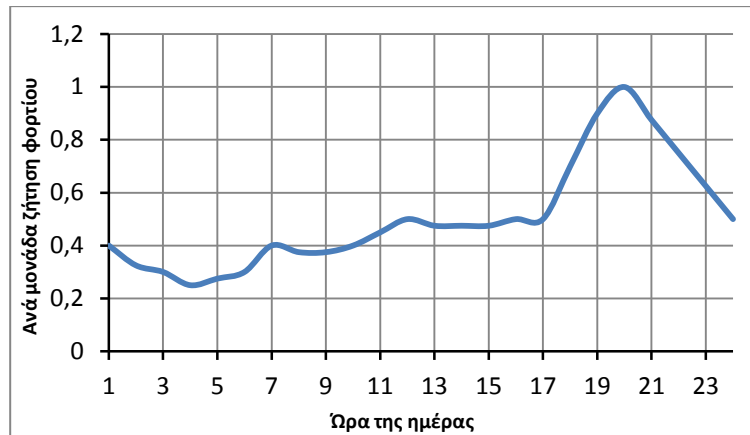
Εικόνα 5.17 Ημερήσια καμπύλη αναφοράς ηλιοφάνειας (τις ώρες 22:00 έως 5:00 που δεν αποτυπώνονται στον οριζόντιο άξονα η τιμή της καμπύλης είναι μηδενική) [10]



Εικόνα 5.18 Ημερήσια καμπύλη αναφοράς ζήτησης οικιακού φορτίου [28]



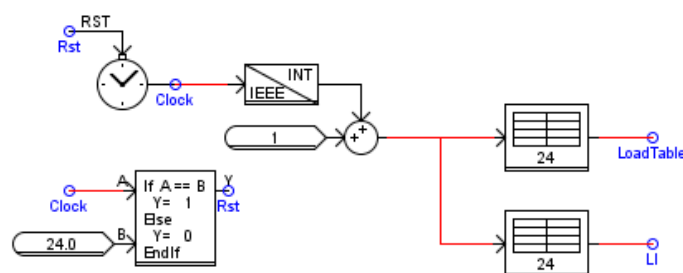
Εικόνα 5.19 Δειγματοληπτημένη και ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη ηλιοφάνειας



Εικόνα 5.20 Δειγματοληπτημένη και ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη ζήτησης οικιακού φορτίου

Για τη μοντελοποίηση των παραπάνω δειγματοληπτημένων τιμών, και την αυτόματη μετάβαση από μια τιμή στην επόμενη κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, υλοποιήθηκε στο RSCAD ένα κύκλωμα το οποίο αποτελείται από δύο πίνακες δεδομένων (στοιχείο Table Lookup Function της βιβλιοθήκης του RSCAD), στους οποίους εισάγουμε τις ανά μονάδα τιμές ηλιοφάνειας και ζήτησης φορτίου που υπολογίσαμε, και ένα ρολόι-μετρητή το οποίο κάθε δευτερόλεπτο αυξάνει την τιμή εξόδου του κατά 1 (με αφετηρία το 0). Επειδή οι πίνακες δεδομένων πρέπει να δέχονται ως είσοδο ακέραιους αριθμούς από το 1 έως το 24, ώστε να δίνουν στην έξοδο τους την τιμή που έχουμε εισάγει στο αντίστοιχο κελί, πρέπει το κύκλωμα χρονισμού να παράγει την εξής ακολουθία ακεραίων: 1,2,3,...,24,1,2,3,...,24 κ.ο.κ. Για να επιτευχθεί αυτό ενσωματώνουμε στο κύκλωμα τα εξής: Αρχικώς, στην έξοδο του μετρητή προστίθεται πάντα μια μονάδα, έτσι ώστε η έξοδος 0 να γίνεται 1, η έξοδος 2 να γίνεται 3 κλπ, και στη συνέχεια υλοποιούμε έναν έλεγχο επαναφοράς (reset) του μετρητή στην αρχική έξοδο 0, όταν η έξοδος του γίνει 24 (για έξοδο 23 θα έχουμε πάρει την τελευταία τιμή του πίνακα καθώς προστίθεται και η μονάδα).

Το τελικό κύκλωμα που υλοποιήσαμε, το οποίο μοντελοποιεί τις τιμές ηλιοφάνειας και ζήτησης φορτίου ενός πραγματικού 24ώρου σε 24 δευτερόλεπτα, παρουσιάζεται στην εικόνα 5.21.



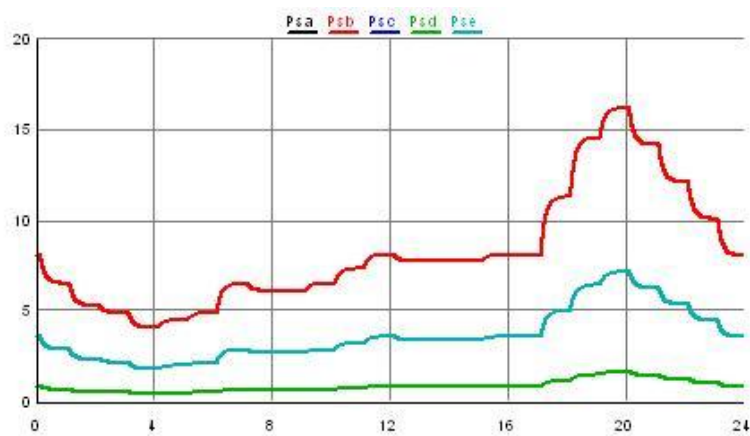
Εικόνα 5.21 Κύκλωμα μεταβολής των τιμών ηλιοφάνειας και ζήτησης οικιακού φορτίου ανά δευτερόλεπτο χρόνου προσομοίωσης

5.3.1 Προσομοίωση ημερήσιας συμπεριφοράς μικροδικτύου σε συνδεδεμένη λειτουργία

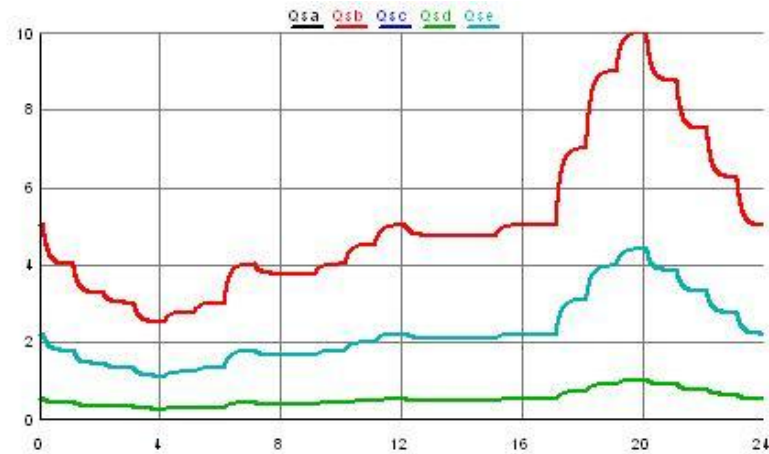
Στην πρώτη προσομοίωση που εκτελέσαμε θέλαμε να μελετήσουμε την απόκριση του δικτύου και του τοπικού ελέγχου τάσης στις διακυμάνσεις που προκαλούνται στις τάσεις και τις ροές ισχύος του μικροδικτύου από την μεταβολή της ηλιοφάνειας και της ζήτησης φορτίου, όπως αυτές συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, όταν το μικροδίκτυο τροφοδοτείται αποκλειστικά από το ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης. Έτσι, ο αντιστροφείας των μπαταριών έμεινε απομονωμένος από το μικροδίκτυο, καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης αυτής της προσομοίωσης, μέσω των circuit breakers που αναλύθηκαν στην παράγραφο 5.2.5.

Η προσομοίωση είχε περιοδικό χαρακτήρα, καθώς κάθε 24 δευτερόλεπτα γινόταν η έναρξη της επόμενης προσομοιούμενης ημέρας. Τα αποτελέσματα λοιπόν έχουν εξαχθεί για μια περίοδο 24 δευτερολέπτων, με τη χρονική στιγμή 0 να ισοδυναμεί με τα μεσάνυχτα (00:00).

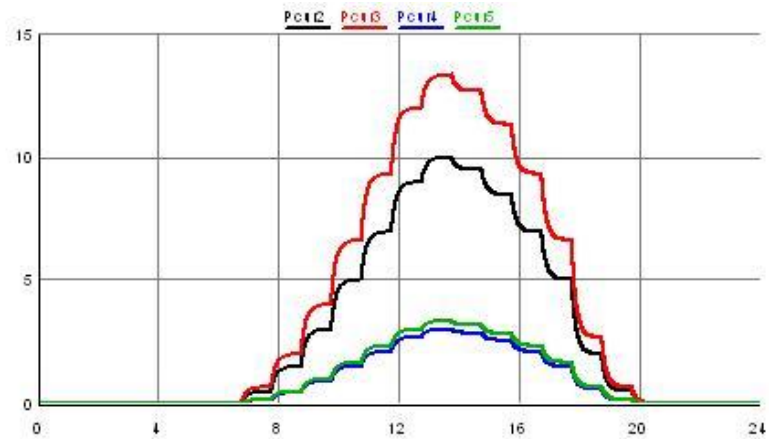
Τα πρώτα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν είναι η καταναλισκόμενη ενεργός και άεργος ισχύ των 5 καταναλωτών, καθώς και η παραγόμενη ενεργός ισχύς των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Οι τιμές των ισχύων είναι σε KW και KVar. Περιμένουμε ότι οι καμπύλες αυτές θα έχουν παρόμοια μορφή με τις δειγματοληπτημένες ανά μονάδα ημερήσιες καμπύλες ηλιοφάνειας και ζήτησης οικιακού φορτίου και τις παραθέτουμε για επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του κυκλώματος χρονισμού που παρουσιάστηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου 5.3.



Εικόνα 5.22 Ημερήσια καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς των 5 φορτίων του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ενεργός ισχύς σε KW)



Εικόνα 5.23 Ημερήσια καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς των 5 φορτίων του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ενεργός ισχύς σε KVar)



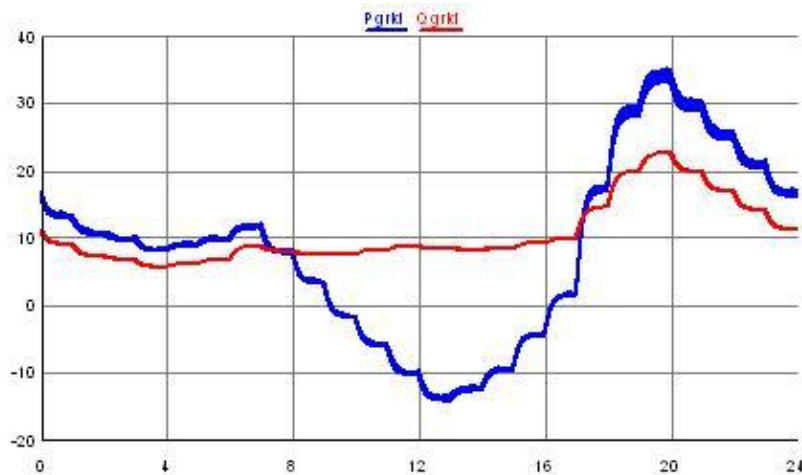
Εικόνα 5.24 Ημερήσια παραγόμενη ενεργός ισχύς των 4 φωτοβολταϊκών διατάξεων του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ενεργός ισχύς σε KW)

Παρατηρούμε από τις άνωθεν γραφικές παραστάσεις ότι όντως πήραμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα για τις μετρούμενες μεταβλητές του δικτύου. Στα 2 γραφήματα που αφορούν τα φορτία είναι εμφανείς μόνο 3 διαφορετικές καμπύλες διότι τα ζεύγη 1^{ος}-4^{ος} και 3^{ος}-5^{ος} καταναλωτής έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ, επομένως οι καμπύλες τους συμπίπτουν κάθε χρονική στιγμή.

Προφανώς, όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών, τα συστήματα περικοπής ενεργού ισχύς που έχουμε ενσωματώσει στους αντιστροφείς τους, δεν κόβουν καθόλου ενεργό ισχύ καθώς, κατά τη συνδεδεμένη λειτουργία, η συχνότητα παραμένει σταθερή στα 50Hz λόγω της μοντελοποίησης του ισοδύναμου δικτύου μέσης τάσης ως ιδανική πηγή τάσης.

Η καμπυλότητα που παρουσιάζεται στις μεταβολές των τιμών όλων των παραπάνω γραφικών παραστάσεων οφείλεται στα φίλτρα πρώτης τάξης που έχουμε τοποθετήσει στο μικροδίκτυο για να εξομαλύνονται οι απότομες μεταβολές (steps) των παραμέτρων του δικτύου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά οι ροές ενεργού και άεργου ισχύος (σε KW και KVar αντίστοιχα) από το δευτερεύον του μετασχηματιστή, δηλαδή από την αρχή της κεντρικής γραμμής χαμηλής τάσης.

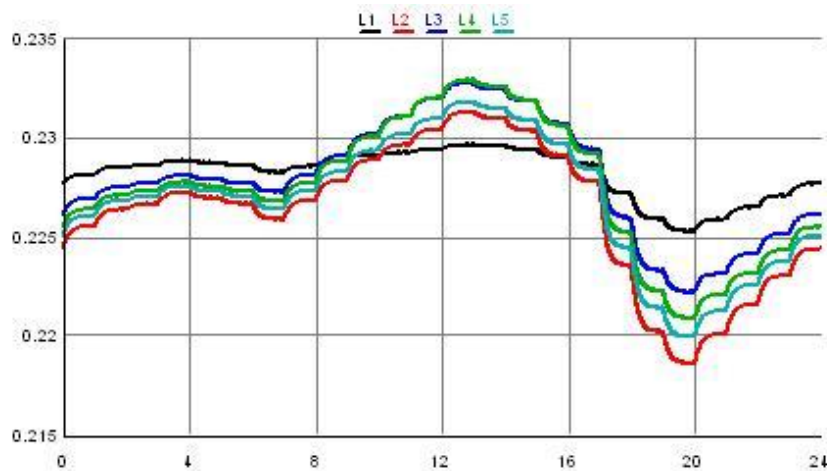


Εικόνα 5.25 Ημερήσια ροή ενεργού (μπλε) και άεργου (κόκκινο) ισχύος από το δευτερεύον του μετασχηματιστή MT/XT (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ισχύς σε KW και KVar)

Η βασική παρατήρηση που προκύπτει από την παραπάνω εικόνα είναι ότι, τις ώρες της ημέρας που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, οι ροές των ισχύων ακολουθούν τη ζήτηση του φορτίου, ενώ αντίθετα τις ώρες με ηλιοφάνεια η ροή της ενεργού ισχύος γίνεται αρνητική, δηλαδή έχει κατεύθυνση από το μικροδίκτυο προς το δίκτυο μέσης τάσης. Αυτό φυσικά οφείλεται στο γεγονός ότι τις ώρες αυτές η παραγωγή ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση των φορτίων, με αποτέλεσμα η περίσσεια ισχύς από τη διαφορά αυτών των δύο μεγεθών να ρέει προς το δίκτυο μέσης τάσης.

Δεν συμβαίνει το ίδιο και για την άεργο ισχύ φυσικά, αφού το δίκτυο μέσης τάσης είναι αυτό που χρειάζεται να καλύψει την ζήτηση της ακόμα και τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας. Τις ώρες αυτές, αν μη τι άλλο, η ζήτηση άεργου ισχύος θα είναι αυξημένη, διότι τα συστήματα τοπικού ελέγχου τάσης στους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών θα δίνουν εντολή να γίνει απορρόφηση άεργου ισχύος από τους αντιστροφείς, έτσι ώστε να μειωθούν οι τάσεις στους ζυγούς, οι οποίες θα έχουν πάρει αυξημένες τιμές λόγω της μεγάλης παραγωγής ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά.

Στην εικόνα 5.26 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση των τάσεων των ζυγών σύνδεσης των καταναλωτών με το δίκτυο για μια προσομοιούμενη ημέρα. Ο άξονας των τάσεων είναι σε kV.



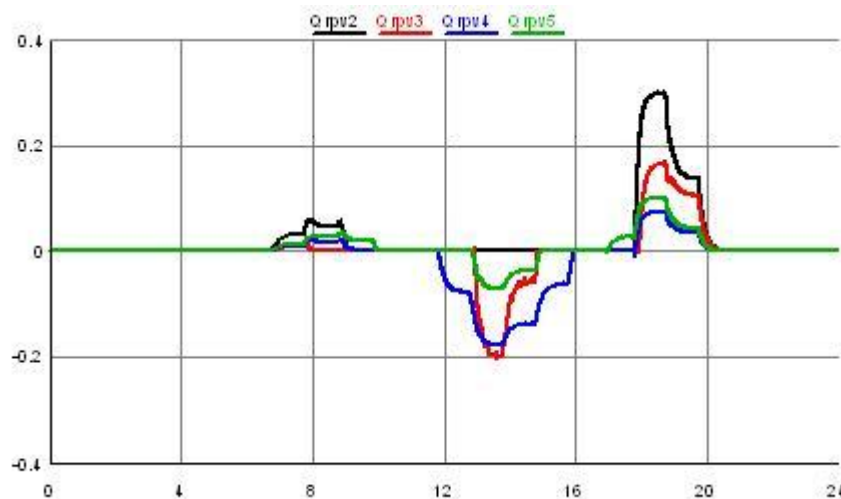
Εικόνα 5.26 Ημερήσιες τάσεις των ζυγών των φορτίων του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: τάση σε kV)

Από τη μελέτη του άνωθεν γραφήματος προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Τις ώρες της ημέρας όπου υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια (9:00 με 17:00 περίπου) οι τάσεις όλων των ζυγών αυξάνονται, αλλά κυρίως των τεσσάρων ζυγών όπου υπάρχουν συνδεδεμένες φωτοβολταϊκές διατάξεις (L2,L3,L4,L5). Προφανώς η αύξηση αυτή οφείλεται στην έγχυση ενεργού ισχύος στους ζυγούς από τα φωτοβολταϊκά, με τις μέγιστες τιμές τάσεων να παρατηρούνται στη 1 το μεσημέρι όπου η ηλιοφάνεια αγκίζει τη μέγιστη τιμή της (1 α.μ.).
- Τις πρώτες βραδυνές ώρες (18:00 με 00:00 περίπου) οι τάσεις όλων των ζυγών βυθίζονται σημαντικά. Αυτό φυσικά οφείλεται στην αυξημένη ζήτηση φορτίου που παρουσιάζεται εκείνες τις ώρες, με την μέγιστη βύθιση να παρατηρείται όταν η ζήτηση παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Τις ώρες αυτές η ηλιοφάνεια είναι πολύ περιορισμένη, οπότε τα φωτοβολταϊκά δεν μπορούν να συνεισφέρουν επαρκώς στην αύξηση των τάσεων με παραγωγή ενεργού ισχύος.
- Η τάση του ζυγού του πρώτου καταναλωτή (L1) είναι αυτή τις μικρότερες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Αυτό είναι φυσιολογικό για δύο λόγους. Πρώτον, δεν υπάρχει φωτοβολταϊκή διάταξη συνδεδεμένη στον ζυγό αυτό, αντίθετα με τους ζυγούς των άλλων τεσσάρων καταναλωτών. Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει έγχυση ενεργού ισχύος στον ζυγό από κάποια άλλη πηγή πέραν του δικτύου, επομένως όποια διακύμανση οφείλεται στην ενεργό ισχύ των φωτοβολταϊκών επηρεάζει αυτόν τον ζυγό μόνο μέσω της ευαισθησίας του ως προς τις μεταβολές στους άλλους ζυγούς. Δεύτερον, απέχει την λιγότερη απόσταση από τον ζυγό του μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα να μην υφίσταται μεγάλες πτώσεις τάσης από τις γραμμές. Έτσι, ακόμα και τις ώρες μεγάλης ζήτησης φορτίου, η τάση αυτού του ζυγού υφίσταται την μικρότερη βύθιση.
- Η μεγαλύτερη βύθιση τάσης, τις ώρες υψηλής ζήτησης, παρατηρείται στον ζυγό του 2^{ου} καταναλωτή (L2). Αυτό οφείλεται στο ότι η σύνδεση του με την κεντρική γραμμή χαμηλής τάσης έχει την μεγαλύτερη απόσταση (105 μέτρα εναέριας γραμμής και άλλα 30 μέτρα σύνδεσης παροχής), με συνέπεια να υφίσταται μεγάλη πτώση τάσης από τις απώλειες στις γραμμές αυτές.

- Η μεγαλύτερη ανύψωση τάσης, τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας, παρατηρείται στους ζυγούς του 3^{ου} και του 4^{ου} καταναλωτή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στους ζυγούς αυτούς η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών έχει συγκρίσιμη τιμή σε σχέση με την ονομαστική τιμή των φορτίων τους (13,333KW παραγωγή/7,083KW κατανάλωση στο ζυγό 3 και 3KW παραγωγή/1,615KW κατανάλωση στο ζυγό 4), κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στους άλλους 2 ζυγούς όπου υπάρχουν φωτοβολταϊκά (10KW παραγωγή/16,15 KW κατανάλωση στο ζυγό 2 και 3,333KW παραγωγή/7,083KW κατανάλωση στο ζυγό 5).

Συνεχίζουμε την παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτής της προσομοίωσης με την κύρια ουσία όλου του πειράματος, τον τοπικό έλεγχο της τάσης στο μικροδίκτυο. Στην εικόνα που ακολουθεί (5.27) παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της ροής άεργου ισχύος (σε KVar) από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών, όπως αυτή προκύπτει από την μέθοδο ρύθμισης τάσης με καμπύλες droop Q-V που αναλύθηκε στην παράγραφο 5.2.6.



Εικόνα 5.27 Ημερήσια ροή άεργου ισχύος από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ενεργός ισχύς σε KVar)

Από τη μελέτη της άνωθεν εικόνας εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Το σύστημα του τοπικού ελέγχου λειτουργεί σωστά, καθώς παρατηρούμε ότι οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών παράγουν άεργο ισχύ (θετικές τιμές) όταν οι τάσεις είναι μειωμένες (κυρίως τις πρώτες βραδυνές και πρωινές ώρες όπου υπάρχει μεγάλη ζήτηση φορτίου και μικρή ηλιοφάνεια) ενώ αντίθετα απορροφούν άεργο ισχύ (αρνητικές τιμές) όταν οι τάσεις είναι αυξημένες, όπως δηλαδή συμβαίνει τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας.
- Ο κάθε αντιστροφέας παράγει ή απορροφά άεργο ανάλογα με την τάση στο ζυγό σύνδεσής του, όπως ήταν το αναμενόμενο. Παρατηρούμε δηλαδή ότι στο ζυγό 2, όπου η τάση έχει τις μικρότερες τιμές όταν δεν υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια (νωρίς το πρωί και νωρίς το βράδυ), η παραγωγή άεργου του αντίστοιχου αντιστροφέα είναι η μεγαλύτερη από τις 4. Αντίστοιχα στους ζυγούς 3 και 4, όπου η τάση παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας, οι αντίστοιχοι αντιστροφείς απορροφούν την μεγαλύτερη ποσότητα άεργου.

- Η ποσότητα της άεργου που παράγει ή απορροφά ο κάθε αντιστροφέας κάθε χρονική στιγμή είναι αρκετά μικρή, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 0,3KVar στον ζυγό 2 τις ώρες μέγιστης ζήτησης φορτίου. Για να εντοπίσουμε τα αίτια αυτού του φαινομένου πρέπει να μελετήσουμε την μαθηματική σχέση που διέπει την καμπύλη Q-V που μοντελοποιήσαμε για τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών. Υπενθυμίζουμε ότι η σχέση αυτή είναι η εξής:

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

Παρατηρούμε ότι για να παράξει (ή να απορροφήσει) ο αντιστροφέας την μέγιστη επιτρεπτή άεργο ισχύ, πρέπει η τάση στον ζυγό να ξεπεράσει τα όρια του $\pm 10\%$ της ονομαστικής. Μελετώντας τώρα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τάσεις των ζυγών, βλέπουμε ότι η μέγιστη αρνητική απόκλιση από την ονομαστική τιμή αγγίζει μόλις το -5% (218,5V στον ζυγό 2 τις ώρες μέγιστου φορτίου) και η μέγιστη θετική απόκλιση μόλις το $+1,5\%$ (233,5V στους ζυγούς 3 και 4 τις ώρες μέγιστης ηλιοφάνειας). Συνεπώς, οι τάσεις στους ζυγούς κατά τη διάρκεια μιας ημέρας δεν τείνουν να ξεφύγουν εκτός των επιτρεπτών ορίων, με αποτέλεσμα η απαραίτητη ροή αέργου ισχύος που προκύπτει από τα συστήματα τοπικού ελέγχου τάσης των αντιστροφέων, να είναι πολύ μικρή. Ένα ακόμη αίτιο είναι ότι την περίοδο μεγάλης ζήτησης φορτίου, όταν και παρουσιάζεται η μέγιστη απόκλιση από την ονομαστική τιμή της τάσης, η ηλιοφάνεια είναι πολύ λίγη, με συνέπεια η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών να είναι επίσης μικρή. Αυτό έχει άμεση επίπτωση στην μέγιστη επιτρεπτή τιμή αέργου ισχύος (Q_{max}) που μπορεί να παράξει ή να απορροφήσει ο αντιστροφέας, έτσι ώστε να μην παραβιάζεται ο ελάχιστος συντελεστής ισχύος του, όπως προκύπτει από την σχέση: $Q_{max} = P * \tan(\cos^{-1}(0,8))$.

Συμπεραίνουμε επομένως ότι ναι μεν το σύστημα τοπικού ελέγχου που έχουμε εγκαταστήσει λειτουργεί ορθά, το πρότυπο μικροδίκτυο όμως που μελετάμε έχει σχεδιασθεί πολύ σωστά για τη συνδεδεμένη λειτουργία του, με αποτέλεσμα οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς να παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις από την ονομαστική τάση των 230V.

Προσομοίωση με μεταβολή στην καμπύλη Q-V και στην ισχύ των φωτοβολταϊκών

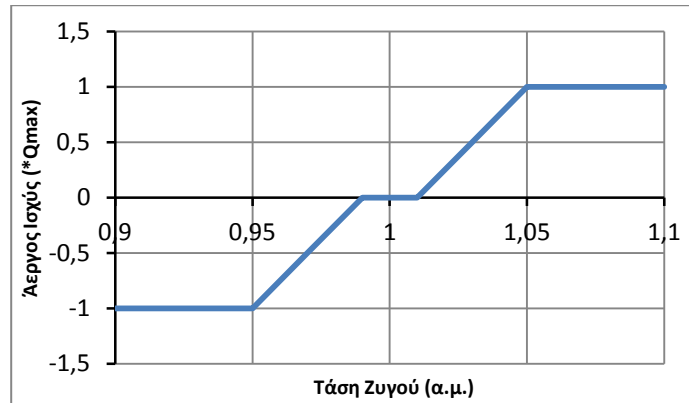
Σε μια προσπάθεια να γίνει καλύτερα αντιληπτή και ελέγξιμη η ρύθμιση τάσης με τη χρήση των καμπυλών Q-V στους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών, αποφασίστηκε να γίνουν κάποιες αλλαγές στις παραμέτρους του μικροδικτύου έτσι ώστε να αυξηθεί η ροή αέργου ισχύος των αντιστροφέων.

Η πρώτη αλλαγή αφορά τον τριπλασιασμό των ονομαστικών τιμών ενεργού ισχύος των τεσσάρων φωτοβολταϊκών διατάξεων, έτσι ώστε να αυξηθεί η διείδυση τους και να προκληθούν μεγαλύτερες ανυψώσεις στις τάσεις των ζυγών. Οι νέες τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός Ζυγού	Αρχική ονομαστική τιμή (KW)	Νέα ονομαστική τιμή (KW)
2	10	30
3	13,333	40
4	3	9
5	3,333	10

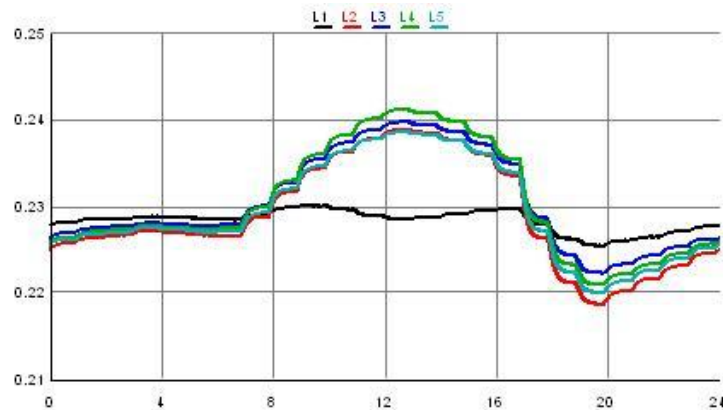
Πίνακας 5.6 Αρχικές και νέες τιμές των ονομαστικών τιμών της ενεργού ισχύς των τεσσάρων φωτοβολταϊκών διατάξεων

Η δεύτερη αλλαγή αφορά την καμπύλη droop Q-V του συστήματος τοπικού ελέγχου τάσης. Η καμπύλη που έχει χρησιμοποιηθεί στην αρχική προσομοίωση είχε τα επιτρεπτά όρια τάσης (δηλαδή τα όρια όπου η παραγόμενη ή απορροφούμενη άεργος ισχύς έπαιρνε τη μέγιστη τιμή της Q_{max}) στο $\pm 10\%$. Έγινε η επιλογή να μεταβληθούν αυτά τα όρια στο $\pm 5\%$, δηλαδή η άεργος να παίρνει τη μέγιστη τιμή για τάση 0,95 α.μ. ή 1,05 α.μ. Αυτή η αλλαγή ουσιαστικά διπλασιάζει την κλίση της καμπύλης στα διαστήματα $\{0,95 \text{ έως } (1-D)\}$ και $\{(1+D) \text{ έως } 1,05\}$. Η καινούρια καμπύλη (για $D=0,01$) παρουσιάζεται παρακάτω:



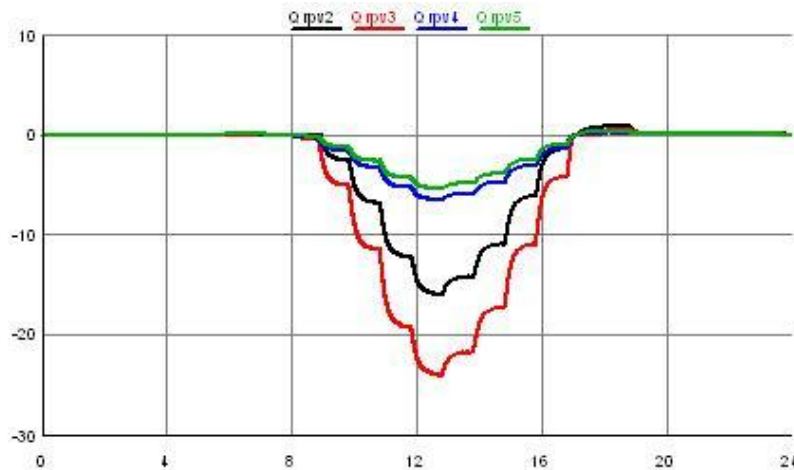
Εικόνα 5.28 Νέα μορφή καμπύλης Q-V αντιστροφών φωτοβολταϊκών για όρια τάσης $\pm 5\%$ και $D=0,01$

Έχοντας ενσωματώσει αυτές τις αλλαγές στο δίκτυο μας, επαναλάβουμε την προσομοίωση συνδεδεμένης λειτουργίας του μικροδικτύου και παρουσιάζουμε τις νέες ημερήσιες γραφικές παραστάσεις για τις τάσεις στους ζυγούς των φορτίων και την άεργο ισχύ των αντιστροφών.



Εικόνα 5.29 Νέες ημερήσιες τάσεις των ζυγών των φορτίων του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: τάση σε kV)

Από το διάγραμμα των τάσεων των ζυγών παρατηρούμε την μεγαλύτερη ανύψωση που παρουσιάζεται τις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια, σε σχέση με την εκείνη της αρχικής προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, στην αρχική προσομοίωση η μέγιστη ανύψωση ήταν της τάξης του +1,5% (233,5V), ενώ σε αυτήν αγγίζει το +4,6% (240,6V).



Εικόνα 5.30 Νέα ημερήσια ροή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: άεργος ισχύς σε KVar)

Όπως ήταν αναμενόμενο, η τριπλάσια διείσδυση των φωτοβολταϊκών, μέσω της μεγαλύτερης ανύψωσης τάσης και της μεγαλύτερης επιτρεπτής αέργου των αντιστροφέων (Q_{max}), αλλά και η αλλαγή των ορίων της τάσης από το $\pm 10\%$ στο $\pm 5\%$ συνέβαλαν στο να παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένη απορρόφηση αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς κατά τις ώρες με ηλιοφάνεια (μέγιστη απορρόφηση 24Kvar στο ζυγό 3). Η απορρόφηση αυτή δρα σαν αύξηση της ζήτησης του φορτίου του μικροδικτύου, επιφέροντας μείωση των τάσεων των ζυγών (οι οποίες έχουν αυξηθεί σημαντικά λόγω της μεγάλης παραγωγής ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά), έως ότου επέλθει η ισορροπία για κάποιες νέες μειωμένες τιμές τάσεων.

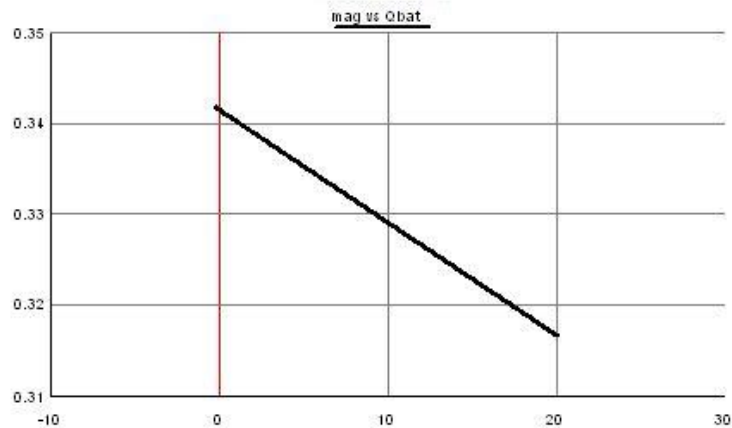
5.3.2 Προσομοίωση ημερήσιας συμπεριφοράς μικροδικτύου σε νησιδοποιημένη λειτουργία

Η δεύτερη προσομοίωση που εκτελέσαμε μελετήθηκε πάλι η συμπεριφορά του μικροδικτύου στις μεταβολές της ηλιοφάνειας και της ζήτησης φορτίου κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, με τη διαφοροποίηση ότι για αυτή την προσομοίωση το μικροδίκτυο βρισκόταν αποκλειστικά σε νησιδοποιημένη λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι έχει αποκοπεί η ροή ισχύος από και προς το ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης, αλλά έχει συνδεθεί πλέον ο αντιστροφέας των μπαταριών με το μικροδίκτυο. Η μετάβαση από τη συνδεδεμένη στη νησιδοποιημένη λειτουργία επιτεύχθηκε με την ταυτόχρονη αλλαγή κατάστασης των δύο διακοπών (circuit breakers) που αναλύθηκαν στην παράγραφο 5.2.5.

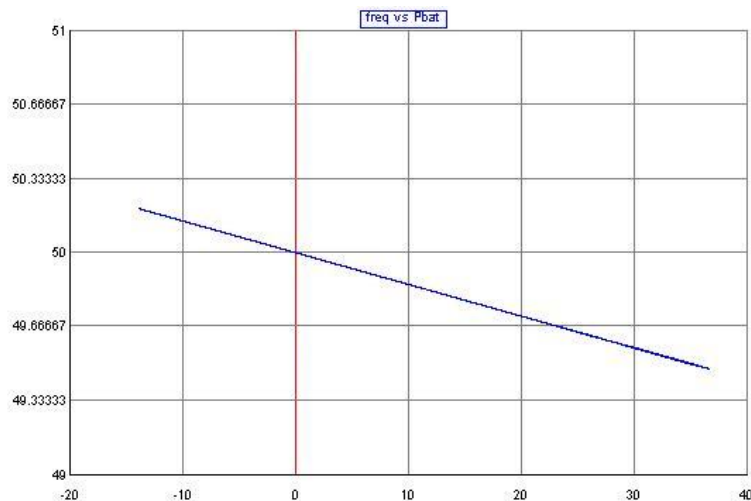
Στη νέα αυτή κατάσταση λειτουργίας, ο αντιστροφέας των μπαταριών κατασκευάζει την κυματομορφή της τάσης, μέσω των καμπυλών Q-V και P-f, την οποία επιβάλλει στο

μικροδίκτυο. Επίσης λειτουργεί ως ο βασικός παροχέας ισχύος για την κάλυψη της ζήτησης των φορτίων.

Το πρώτο πράγμα που θέλαμε να επαληθεύσουμε από την προσομοίωση είναι ότι έχουμε μοντελοποιήσει σωστά τις καμπύλες droop Q-V και P-f του αντιστροφέα μπαταριών. Έτσι, μελετήσαμε την εξάρτηση του πλάτους της τάσης εξόδου του αντιστροφέα από την ροή αέργου ισχύος του και την εξάρτηση της συχνότητας του δικτύου από την ροή ενεργού ισχύος του για μια περίοδο 24 δευτερολέπτων, που όπως έχουμε περιγράψει μοντελοποιεί ένα πραγματικό 24ωρο. Τα αποτελέσματα αποτυπώθηκαν στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν.



Εικόνα 5.31 Ημερήσια εξάρτηση του πλάτους της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μπαταριών (κάθετος άξονας σε kV) από την ροή αέργου ισχύος του (οριζόντιος άξονας σε KVar)

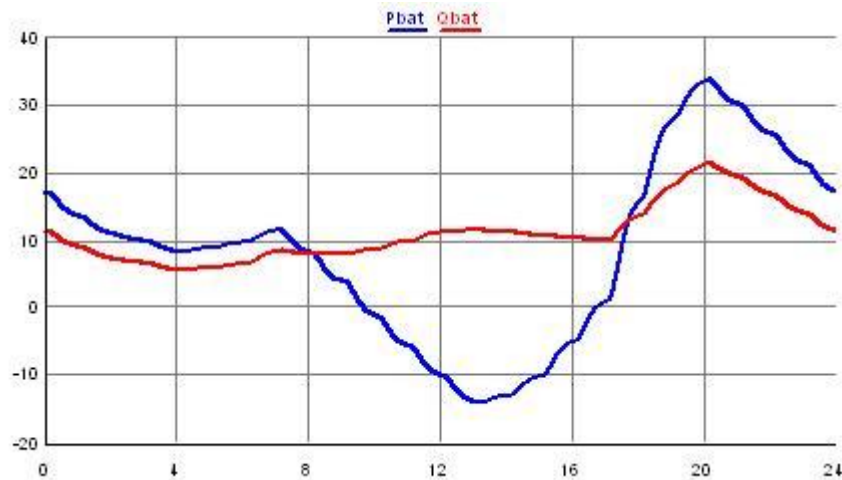


Εικόνα 5.32 Ημερήσια εξάρτηση της συχνότητας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μπαταριών (κάθετος άξονας σε Hz) από την ροή ενεργού ισχύος του (οριζόντιος άξονας σε KW)

Παρατηρούμε ότι οι δύο γραφικές παραστάσεις συμπίπτουν με τις καμπύλες droop του αντιστροφέα μπαταριών που έχουμε μοντελοποιήσει, οι οποίες έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 5.2.5. Έχοντας επιβεβαιώσει πλέον την ορθή λειτουργία του αντιστροφέα των

μπαταριών, μπορούμε να προχωρήσουμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα υπόλοιπα μεγέθη του μικροδικτύου.

Αρχικά, παρουσιάζεται η ημερήσια ροή ενεργού και αέργου ισχύος (σε KW και KVar αντίστοιχα) από τον αντιστροφέα των μπαταριών.



Εικόνα 5.33 Ημερήσια ροή ενεργού και αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα μπαταριών (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ισχύς σε KW και KVar)

Παρατηρούμε ότι η άνωθεν γραφική παράσταση συμπίπτει με την αντίστοιχη για τις ροές ενεργού και αέργου ισχύος από το δευτερεύον του μετασχηματιστή κατά την προσομοίωση σε συνδεδεμένη λειτουργία. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν για εκείνες τις καμπύλες ισχύουν και για τις παραπάνω. Αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς ο αντιστροφέας των μπαταριών αντικατέστησε ουσιαστικά το δίκτυο μέσης τάσης ως ο κύριος παροχέας ισχύος του μικροδικτύου.

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η συνολική αρνητική ροή ενεργού ισχύος (δηλαδή ροή από το μικροδίκτυο προς τις μπαταρίες) είναι σημαντικά μικρότερη από τη θετική ροή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι μπαταρίες, μέσα σε ένα 24ωρο, θα εκφορτίζονται περισσότερο απ' ό,τι θα φορτίζονται, με συνέπεια το μικροδίκτυο να μην μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, σε νησιδοποιημένη λειτουργία, για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Όσον αφορά τις καμπύλες ζήτησης ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων, προφανώς θα έχουν παραμείνει ίδιες με αυτές της προσομοίωσης σε συνδεδεμένη λειτουργία, καθώς δεν άλλαξε κάποια παράμετρος που να τις επηρεάζει.

Δεν ισχύει το ίδιο όμως και για τις καμπύλες παραγωγής ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών, καθώς υπάρχει η πιθανότητα να έχουν παρουσιαστεί διαφοροποιήσεις, οι οποίες θα οφείλονται στο σύστημα περικοπής ενεργού ισχύος, συναρτήσεως της συχνότητας, που έχει ενσωματωθεί στους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών. Η συχνότητα του δικτύου δεν παραμένει σταθερή στα 50Hz, όπως στην προσομοίωση συνδεδεμένης λειτουργίας, κάτι το οποίο είναι εμφανές και από την εικόνα 5.32, με αποτέλεσμα την πιθανότητα περικοπής ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών, αν η συχνότητα ξεπεράσει το όριο των 50,2Hz που έχει χρησιμοποιηθεί στο κύκλωμα μοντελοποίησης της περικοπής.

Παρουσιάζεται λοιπόν στην εικόνα 5.34 η καμπύλη μεταβολής της συχνότητας του δικτύου για μια περίοδο 24 δευτερολέπτων.

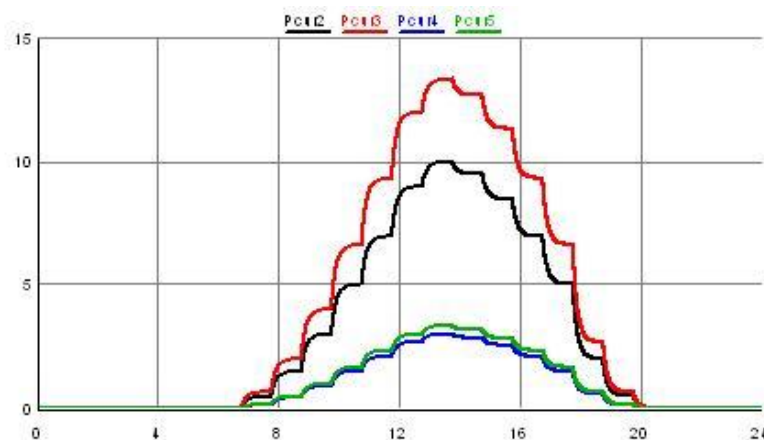


Εικόνα 5.34 Ημερήσια μεταβολή της συχνότητας κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: συχνότητα σε Hz)

Δύο βασικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από την καμπύλη της συχνότητας:

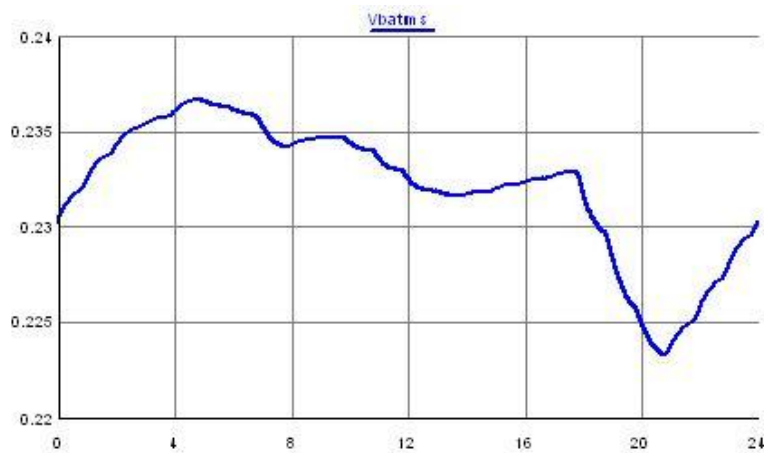
- Πρώτον, η συχνότητα υπακούει στην καμπύλη P-f του αντιστροφέα μπαταριών, καθώς παρατηρούμε ότι είναι μικρότερη από 50Hz, όταν η ροή ενεργού ισχύος του αντιστροφέα είναι θετική, και μεγαλύτερη από 50Hz όταν η ροή είναι αρνητική. Η μέγιστη τιμή συχνότητας παρατηρείται στη 1 το μεσημέρι, όταν και η παραγόμενη ενεργός ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι μέγιστη, με αποτέλεσμα να έχουμε ροή περίσσειας ισχύος από το μικροδίκτυο προς τις μπαταρίες. Αντίθετα, η ελάχιστη τιμή της συχνότητας παρατηρείται στις 8 το βράδυ, όταν η ζήτηση των φορτίων γίνεται μέγιστη και η ηλιοφάνεια παίρνει μηδενική τιμή.
- Δεύτερον, η συχνότητα αγγίζει αλλά δεν ξεπερνάει το όριο των 50,2Hz του συστήματος περικοπής ενεργού ισχύος. Συνεπώς, δεν θα έχουμε περικοπή ισχύος ούτε κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία.

Για να επαληθεύσουμε και το παραπάνω συμπέρασμα παρουσιάζουμε την καμπύλη ημερήσιας παραγόμενης ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών (σε KW) για τη νησιδοποιημένη λειτουργία, η οποία προέκυψε, ως αναμενόταν, ταυτοτικά ίδια με την αντίστοιχη καμπύλη της συνδεδεμένης λειτουργίας.

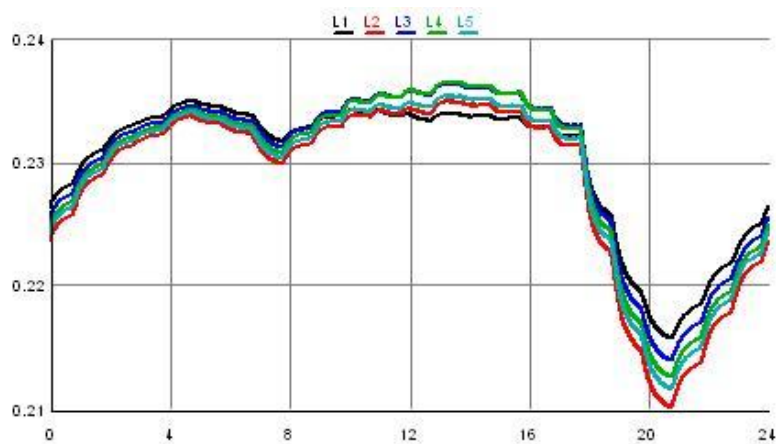


Εικόνα 5.35 Ημερήσια παραγόμενη ενεργός ισχύς των 4 φωτοβολταϊκών διατάξεων κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ενεργός ισχύς σε KW)

Συνεχίζουμε με τη μελέτη των τάσεων του μικροδικτύου. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται η τάση εξόδου του αντιστροφέα μπαταριών και οι τάσεις των πέντε ζυγών των φορτίων, για μια περίοδο ως συνήθως.



Εικόνα 5.36 Ημερήσια τάση εξόδου του αντιστροφέα μπαταριών (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: τάση σε kV)



Εικόνα 5.37 Ημερήσιες τάσεις των 5 ζυγών των φορτίων κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: τάση σε kV)

Η πρώτη παρατήρηση που κάνουμε είναι ότι η τάση εξόδου του αντιστροφέα υπακούει στην καμπύλη Q-V, καθώς αυξάνεται όταν μειώνεται η ροή αέργου ισχύος και μειώνεται όταν αυξάνεται η ροή αέργου. Η ροή της αέργου ισχύος του αντιστροφέα έχει παρουσιαστεί στην εικόνα 5.33.

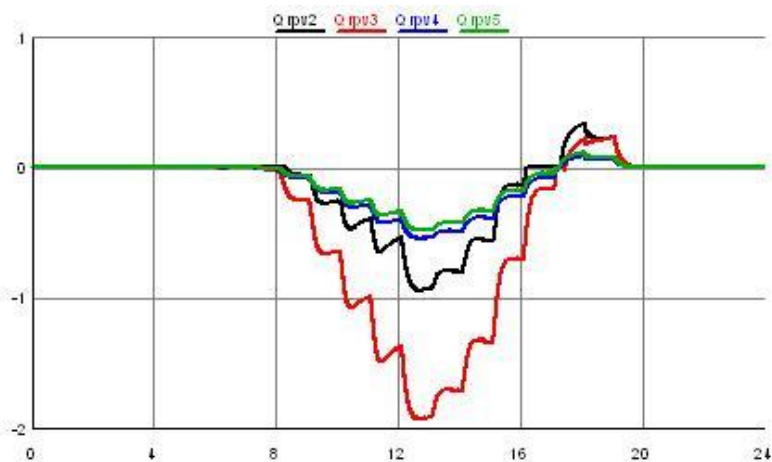
Παρατηρούμε επίσης ότι οι τάσεις του δικτύου ακολουθούν πιστά την τάση του αντιστροφέα τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, ενώ αντίθετα παρουσιάζουν διαφοροποίηση, και συγκεκριμένα ανύψωση, της ώρες ηλιοφάνειας. Αναμενόμενο αποτέλεσμα καθώς η έγχυση ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά τις ώρες αυτές προκαλεί αύξηση των τάσεων στους ζυγούς του μικροδικτύου.

Η μέγιστη τιμή τάσης παρατηρείται στους ζυγούς 3 και 4 την ώρα μέγιστης ηλιοφάνειας και είναι της τάξης του +2,6% (236V). Η ελάχιστη τιμή τάσης παρατηρείται στο ζυγό 2 την ώρα μέγιστης ζήτησης φορτίου και είναι της τάξης του -8,6% (210,2V).

Από αυτές τις τιμές συμπεραίνουμε ότι κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία οι τάσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερες ανυψώσεις και βυθίσεις απ' ό τι στην συνδεδεμένη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη συνδεδεμένη λειτουργία η τάση αναφοράς του δικτύου προερχόταν από το ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης, το οποίο έχει μοντελοποιηθεί ως ιδανική πηγή τάσης, με αποτέλεσμα να έχει σταθερό πλάτος. Αντίθετα, στη νησιδοποιημένη λειτουργία, η τάση αναφοράς του μικροδικτύου προέρχεται από τον αντιστροφέα μπαταριών, ο οποίος ρυθμίζει το πλάτος της ανάλογα με τη ροή αέργου ισχύος του (καμπύλη Q-V). Έτσι, επειδή η καμπύλη droop του αντιστροφέα έχει φθίνουσα κλίση, όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση φορτίου το πλάτος εξόδου του αντιστροφέα μειώνεται, με αποτέλεσμα η μείωση αυτή να δρα αθροιστικά με τη μείωση που προκαλείται στις τάσεις των ζυγών από την καταναλισκόμενη ισχύ. Παρομοίως, κατά τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας που η ζήτηση του φορτίου κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα, το πλάτος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι μεγαλύτερο από το ονομαστικό, συνεπώς η ανύψωση τάσης στους ζυγούς να γίνεται ακόμα μεγαλύτερη.

Εκ πρώτης όψης φαίνεται ότι ο αντιστροφέας εντείνει το πρόβλημα στις τάσεις του δικτύου και προκαλείται η απορία γιατί η καμπύλη Q-V έχει αρνητική κλίση αντί για θετική. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό είναι ότι με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται ακριβέστερα η πραγματική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι κύριες πηγές των δικτύων, δηλαδή οι σύγχρονες γεννήτριες. Με άλλα λόγια, η συμπεριφορά που παρουσιάζει το μικροδίκτυο στη νησιδοποιημένη λειτουργία είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα απ' ό τι στη συνδεδεμένη λειτουργία, όπου το δίκτυο μέσης τάσης έχει μοντελοποιηθεί ως ιδανική πηγή.

Για το τέλος αφήσαμε και πάλι τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος τοπικού ελέγχου του μικροδικτύου μέσω των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών. Στην εικόνα 5.38 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της ημερήσιας ροής αέργου ισχύος των τεσσάρων αντιστροφέων.



Εικόνα 5.38 Ημερήσιες ροές αέργου ισχύος των τεσσάρων αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: άεργος ισχύς σε KVar)

Ο τοπικός έλεγχος τάσης λειτουργεί σωστά και στη νησιδοποιημένη λειτουργία, καθώς παρατηρούμε ότι οι αντιστροφεείς των φωτοβολταϊκών απορροφούν άεργο ισχύ όταν υπάρχει ανύψωση τάσης και παράγουν άεργο όταν οι τάσεις βυθίζονται. Φυσικά, οι αντιστροφεείς αδυνατούν να βοηθήσουν στη ρύθμιση των τάσεων τις ώρες μικρής ηλιοφάνειας, όπως είναι οι ώρες μεγάλης ζήτησης φορτίου, καθώς δεν μπορεί να παραχθεί

ή να απορροφηθεί ικανοποιητική ποσότητα αέργου χωρίς να παραβιάζεται ο ελάχιστος συντελεστής ισχύος τους [$Q_{max} = P * \tan(\cos^{-1}(0,8))$]. Συνεπώς, οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών συνεισφέρουν στη ρύθμιση της τάσης κατά κύριο λόγο τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας, όπως είναι εμφανές και από την εικόνα 3.58.

Αντίθετα με τη συνδεδεμένη λειτουργία, όπου οι ανυψώσεις των τάσεων των ζυγών ήταν πολύ μικρές, με αποτέλεσμα να μην απορροφάται μεγάλη ποσότητα αέργου από τους αντιστροφείς, στη νησιδοποιημένη λειτουργία οι τάσεις των ζυγών παίρνουν μεγαλύτερες τιμές (για λόγους που εξηγήθηκαν στα συμπεράσματα της εικόνας 5.37). Γι' αυτό το λόγο παρατηρούνται και αυξημένες τιμές απορρόφησης αέργου από τους αντιστροφείς στην εικόνα 3.58, με τη μέγιστη απορρόφηση να αγγίζει τα 1,95Kvar στον ζυγό 3.

Τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της λειτουργίας του τοπικού ελέγχου τάσης και για τις δύο λειτουργίες του μικροδικτύου (συνδεδεμένη και νησιδοποιημένη) συνοψίζονται στα εξής:

- Τα συστήματα τοπικού ελέγχου του δικτύου βοηθούν στη ρύθμιση της τάσης και βελτιώνουν τα ημερήσια προφίλ των τάσεων, τόσο κατά τη συνδεδεμένη, όσο και κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία.
- Το πρότυπο μικροδίκτυο είναι προσεκτικά σχεδιασμένο, με κατάλληλα επιλεγμένες ονομαστικές τιμές για τα φορτία και τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, ώστε να μην παρουσιάζονται μεγάλες αυξομειώσεις στις τάσεις των ζυγών (σε καμία περίπτωση δεν παραβιάστηκαν τα επιτρεπτά όρια του $\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής).
- Δεν μπόρεσε να υπάρξει ικανοποιητική ρύθμιση τάσης τις ώρες μεγάλης ζήτησης φορτίου, καθώς έχει γίνει μοντελοποίηση μόνο για φωτοβολταϊκές διατάξεις οι οποίες δεν μπορούν να συνεισφέρουν τις ώρες μικρής ή καθόλου ηλιοφάνειας. Ο τοπικός έλεγχος τάσης θα είναι σαφώς πιο αποτελεσματικός αν εκτός από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις υπάρχουν και οι υπόλοιπες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που προτείνονται από το πρότυπο μικροδίκτυο, δηλαδή η ανεμογεννήτρια, η μικροτουρμπίνα και η κυψέλη καυσίμου, με τους αντίστοιχους αντιστροφείς τους.

5.3.3 Προσομοίωση της συμπεριφοράς μικροδικτύου κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία

Η τελευταία προσομοίωση στην οποία υποβάλαμε το μικροδίκτυο ήταν για τη μελέτη της απόκρισης του στα μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούνται από την αλλαγή κατάστασης των δύο circuit breakers κατά την μετάβαση από τη συνδεδεμένη στη νησιδοποιημένη λειτουργία, οι οποίες έχουν μελετηθεί αναλυτικά στις παραγράφους 5.3.1 και 5.3.2.

Για την προσομοίωση αυτή δεν χρησιμοποιούμε πλέον τη μοντελοποίηση ενός πραγματικού 24ώρου, μέσω των πινάκων ανά μονάδα τιμών ηλιοφάνειας και ζήτησης φορτίου, καθώς μας ενδιαφέρει η μελέτη των μεταβατικών φαινομένων σε πραγματικό χρόνο. Αντ' αυτού, θα εξετάσουμε δύο διαφορετικά σενάρια ηλιοφάνειας-ζήτησης, διατηρώντας σταθερές τις τιμές τους κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των προσομοιώσεων.

Τα δύο αυτά σενάρια επιλέχθηκε να είναι οι ακραίες καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί κάποια στιγμή το μικροδίκτυο, δηλαδή μέγιστης ηλιοφάνειας-ελάχιστου φορτίου και ελάχιστης ηλιοφάνειας-μέγιστου φορτίου. Αν παρατηρήσουμε αποδεκτή απόκριση για τις

ακραίες αυτές περιπτώσεις, τότε θα ξέρουμε ότι θα είναι αποδεκτή και για όλο το ενδιάμεσο φάσμα τιμών ηλιοφάνειας και ζήτησης.

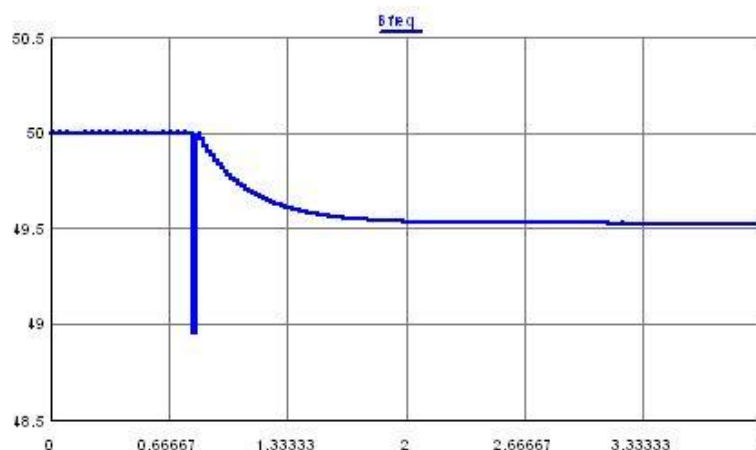
Ελάχιστη ηλιοφάνεια – Μέγιστο φορτίο

Στο δεύτερο προς εξέταση σενάριο θέτουμε την ηλιοφάνεια ίση με 0 (ελάχιστη τιμή 24ωρου) και τη ζήτηση φορτίου ίση με 1 ανά μονάδα. Το σενάριο αυτό απαντάται καθημερινά στην πραγματικότητα σύμφωνα με τις καμπύλες ηλιοφάνειας-ζήτησης, καθώς συμβαίνει κατά τις πρώτες βραδυνές ώρες κάθε 24ώρου.

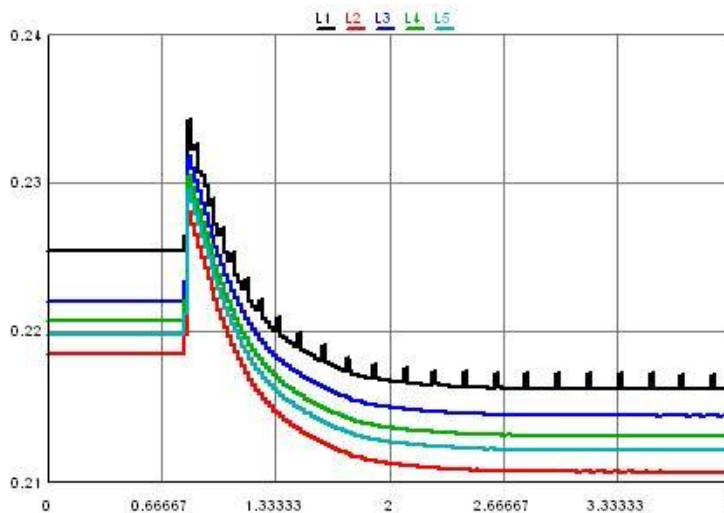
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του σεναρίου αυτού για το ίδιο χρονικό παράθυρο των τεσσάρων δευτερολέπτων όπως και πριν. Προφανώς δεν υπάρχουν αποτελέσματα για τις ισχείς των φωτοβολταϊκών, αφού είναι μηδενικές για μηδενική ηλιοφάνεια.



Εικόνα 5.44 Ροή ενεργού και αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα μπαταριών κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ισχύς σε KW και KVar)



Εικόνα 5.45 Συχνότητα του μικροδικτύου κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: συχνότητα σε Hz)



Εικόνα 5.46 Τάσεις των ζυγών των φορτίων κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: τάση σε kV)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε τα εξής:

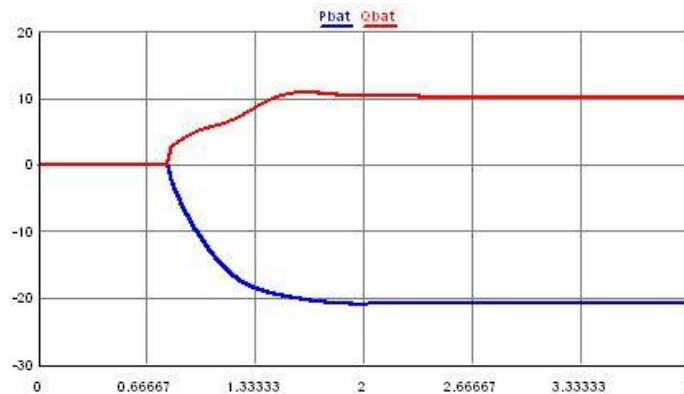
- Μετά την μετάβαση ο αντιστροφέας μπαταριών αρχίζει να παράγει ενεργό και άεργο ισχύ για να καλύψει τη ζήτηση των φορτίων, η οποία έχει τη μέγιστη τιμή της.
- Η συχνότητα του δικτύου, μετά από το πέρας του μεταβατικού φαινομένου διάρκειας λίγων milisecond κατά το οποίο βυθίζεται σημαντικά έως τα 48,95Hz, ισορροπεί στην ελάχιστη επιτρεπτή τιμή των 49,5Hz. Φυσιολογικό αποτέλεσμα που οφείλεται στην μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος του αντιστροφέα των μπαταριών, σύμφωνα με την P-f καμπύλη droop του.
- Οι τάσεις των ζυγών των φορτίων, μετά το πέρας του μεταβατικού φαινομένου διάρκειας λίγων milisecond κατά το οποίο αυξάνονται αλλά παραμένουν οντως ορίων, ισορροπούν σε νέες τιμές μειωμένες κατά 8V περίπου η κάθε μια σε σχέση με τις αρχικές τιμές τους. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αυξημένη παραγωγή αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα μπαταριών, η οποία είναι μεγαλύτερη από το 50% της μέγιστης, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου του να είναι μικρότερη από την ονομαστική.

Μέγιστη ηλιοφάνεια – Ελάχιστο φορτίο

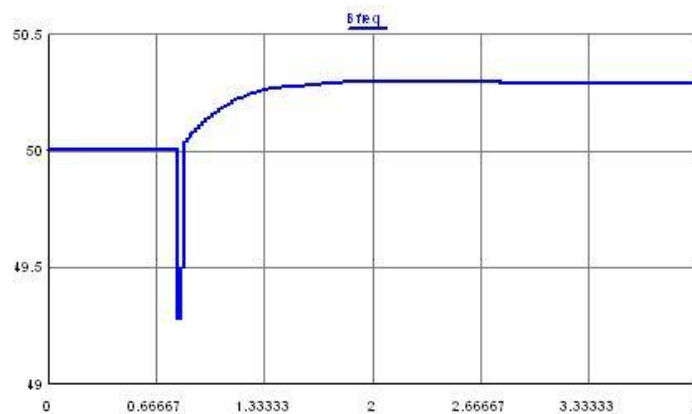
Στην εξέταση αυτού του σεναρίου θέτουμε την ανά μονάδα τιμή της ηλιοφάνειας ίση με 1 και την ανά μονάδα τιμή ζήτησης του φορτίου ίση με 0,25 (ελάχιστη ζήτηση που παρατηρείται σε ένα 24ωρο). Το σενάριο αυτό δεν αντιστοιχεί σε κάποια πραγματική ώρα της ημέρας, σύμφωνα με τις ημερήσιες καμπύλες για την ηλιοφάνεια και τη ζήτηση, το εξετάζουμε ωστόσο διότι είναι μια ακραία, αλλά πιθανή, κατάσταση στην οποία μπορεί να βρεθεί το μικροδίκτυο έστω για μια μέρα του έτους και πρέπει να είμαστε σίγουροι ότι θα μπορεί να ανταποκριθεί στη μετάβαση της λειτουργίας του από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η προσομοίωση εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, οπότε ο οριζόντιος άξονας όλων των γραφικών παραστάσεων που θα ακολουθήσουν είναι σε δευτερόλεπτα. Το χρονικό παράθυρο στο οποίο επιλέξαμε να μελετήσουμε το φαινόμενο είναι τέσσερα δευτερόλεπτα. Η αλλαγή της κατάστασης των διακοπών συμβαίνει περίπου στα 0,8 δευτερόλεπτα.

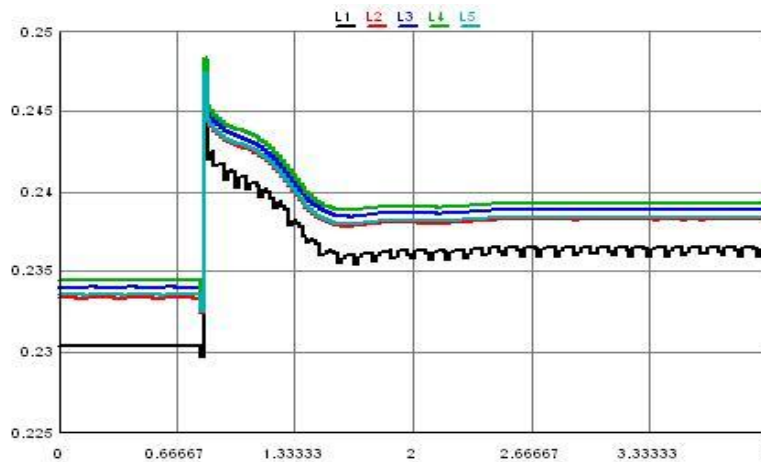
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία αφορούν τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος από τη μπαταρία, τη συχνότητα του δικτύου, τις τάσεις των ζυγών των φορτίων και την ενεργό και άεργο ισχύ των φωτοβολταϊκών διατάξεων.



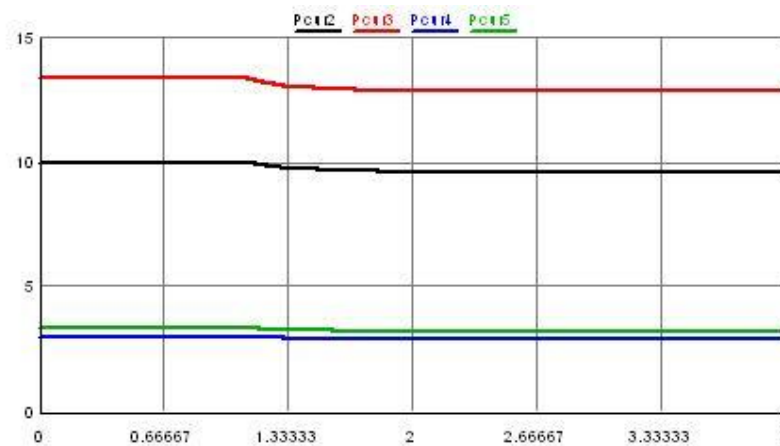
Εικόνα 5.39 Ροή ενεργού και αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα μπαταριών κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ισχύς σε KW και KVar)



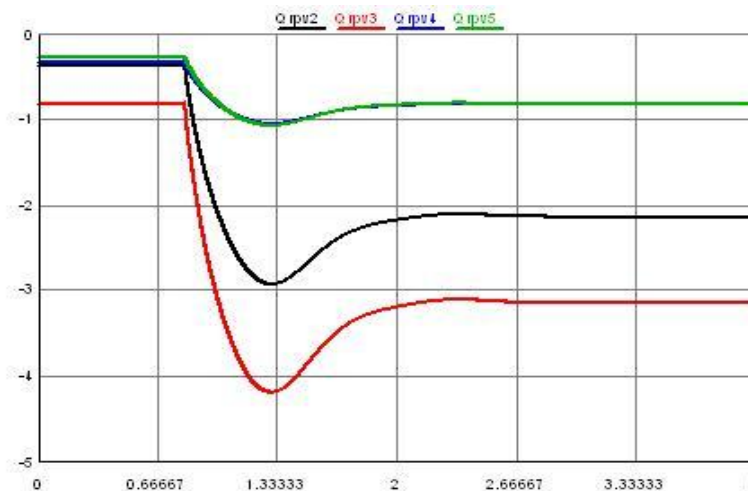
Εικόνα 5.40 Συχνότητα του μικροδικτύου κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: συχνότητα σε Hz)



Εικόνα 5.41 Τάσεις των ζυγών των φορτίων (kV) κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: τάση σε kV)



Εικόνα 5.42 Παραγόμενη ενεργός ισχύς των φωτοβολταϊκών (KW) κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: ενεργός ισχύς σε KW)



Εικόνα 5.43 Ροή αέργου ισχύς από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών κατά την μετάβαση από συνδεδεμένη σε νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου (οριζόντιος άξονας: χρόνος, κάθετος άξονας: άεργος ισχύς σε KVar)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε τα εξής:

- Ο αντιστροφέας μπαταριών, αμέσως μετά την αλλαγή κατάστασης λειτουργίας του μικροδικτύου, αρχίζει να παράγει άεργο ισχύ για να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων και των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών και να απορροφάει ενεργό ισχύ, καθώς υπάρχει μέγιστη παραγωγή ενεργού από τα φωτοβολταϊκά τη στιγμή της μετάβασης.
- Η συχνότητα του δικτύου παρουσιάζει μια μεταβατική βύθιση έως τα 49,3Hz (-1,4%), η οποία είναι εκτός των επιτρεπτών ορίων των $\pm 0,5\text{Hz}$, αλλά η χρονική διάρκεια της είναι μερικά milisecond. Στη συνέχεια ισορροπεί στην τιμή των 50,3Hz. Φυσιολογικό αποτέλεσμα καθώς ο αντιστροφέας των μπαταριών, ο οποίος ορίζει τη συχνότητα, απορροφά ενεργό ισχύ και η τιμή της, σύμφωνα με την καμπύλη droop P-f, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 50Hz. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην παράγραφο 5.2.5 για να θυμηθεί τη μορφή της καμπύλης droop.
- Οι τάσεις των ζυγών των φορτίων παρουσιάζουν μια μεταβατική ανύψωση έως τα 248V (+7,8%), η οποία είναι εντός των ορίων του $\pm 10\%$, και η χρονική διάρκεια της είναι μερικά milisecond. Στη συνέχεια ισορροπούν σε νέες τιμές, περίπου 5V υψηλότερες η κάθε μια από τις αρχικές πριν τη μετάβαση. Η ανύψωση που παρουσιάζουν οι νέες τάσεις οφείλονται στην καμπύλη droop Q-V του αντιστροφέα μπαταριών, καθώς η άεργος ισχύς που παράγει για να καλύψει τις ανάγκες του δικτύου είναι λιγότερη από το μισό της ονομαστικής του, επομένως η τάση εξόδου έχει τιμή μεγαλύτερη από την ονομαστική. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην παράγραφο 5.2.5 για να θυμηθεί τη μορφή της καμπύλης droop.
- Το σύστημα περικοπής ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών ενεργοποιήθηκε, καθώς όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η συχνότητα ισορρόπησε στην τιμή των 50,3Hz, η οποία είναι μεγαλύτερη από το όριο των 50,2Hz του συστήματος περικοπής. Παρατηρούμε επομένως την μείωση της παραγωγής όλων των φωτοβολταϊκών διατάξεων της τάξης του 4%, η οποία αντιστοιχεί ορθώς σε αύξηση της συχνότητας κατά 0,1Hz πάνω από το όριο. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην παράγραφο 5.2.6 για να θυμηθεί τη μορφή της καμπύλης P-f του συστήματος περικοπής ενεργού ισχύος των αντιστροφέων φωτοβολταϊκών.
- Η απορροφούμενη άεργος ισχύς από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών αυξάνεται μετά τη μετάβαση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση των τάσεων όλων των ζυγών που παρατηρήθηκε και αναλύθηκε προηγουμένως, σύμφωνα με την καμπύλη droop Q-V των αντιστροφέων (κεφάλαιο 5.2.6).

Κεφάλαιο 6

Συντονισμένος Έλεγχος σε Δίκτυο Μέσης Τάσης

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτύξουμε μοντέλα προσομοίωσης για ένα δίκτυο μέσης τάσης και έναν κεντρικό ελεγκτή, ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για το συντονισμένο έλεγχο τάσης στο δίκτυο. Τα στοιχεία του δικτύου που θα συμβάλλουν στη ρύθμιση της τάσης είναι ένας μετασχηματιστής YT/MT με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών διατάξεων.

Ο κεντρικός ελεγκτής παίρνει μετρήσεις για διάφορες παραμέτρους του δικτύου (τάσεις, ισχύς, θέση λήψης του μετασχηματιστή κλπ) και εκτελώντας έναν αλγόριθμο, ο οποίος θα παρουσιαστεί αναλυτικά στην παράγραφο 6.3, υπολογίζει τις μεταβολές που πρέπει να γίνουν στη ροή αέργου ισχύος κάθε αντιστροφέα φωτοβολταϊκών και στις λήψεις του μετασχηματιστή έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη επιθυμητή ρύθμιση τάσης.

6.2 Περιγραφή του δικτύου

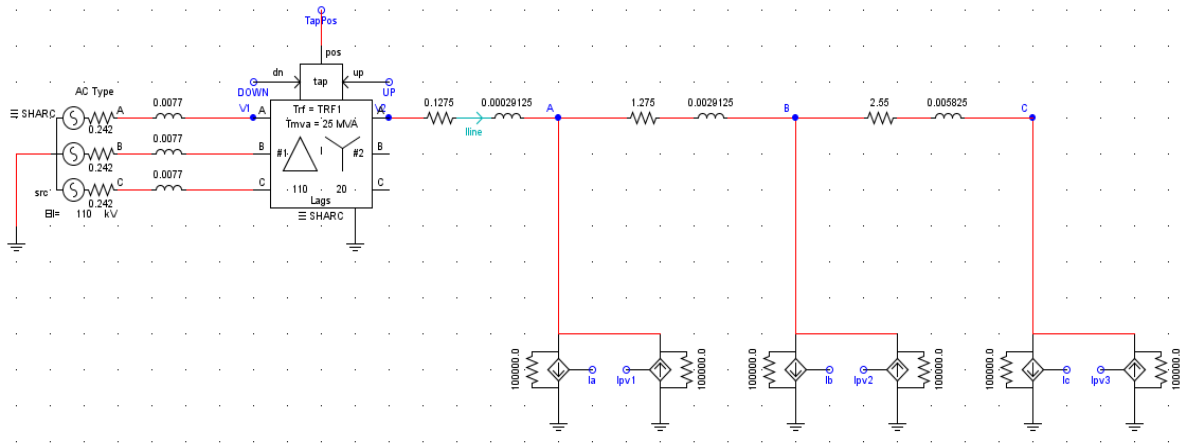
Για την προσομοίωση και τη μελέτη του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης (coordinated voltage control) δεν επιλέχτηκε ένα πρότυπο δίκτυο, όπως είχε γίνει για τον τοπικό έλεγχο. Αντ' αυτού, αναπτύχθηκε ένα αρκετά απλουστευμένο ακτινικό δίκτυο μέσης τάσης, αλλά με ρεαλιστικά χαρακτηριστικά που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία [21]. Η επιλογή για ένα απλό δίκτυο έγινε διότι προτιμήθηκε να δοθεί έμφαση στην πολυπλοκότητα του αλγορίθμου του κεντρικού ελεγκτή του συστήματος ρύθμισης τάσης. Με την υλοποίηση αυτή ως βάση, δίνεται η δυνατότητα για εύκολη μελλοντική επέκταση της εφαρμογής του αλγορίθμου σε μεγαλύτερο και πολυπλοκότερο δίκτυο.

Το δίκτυο μέσης τάσης που υλοποιήθηκε αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Ισοδύναμο δίκτυο υψηλής τάσης
- Μετασχηματιστής με λήψεις (taps) YT/MT, με δυνατότητα αλλαγής λήψεων υπό φορτίο (On-Load Tap Changer – OLTC)
- Γραμμή μέσης τάσης
- Τρεις ζυγοί που στον καθένα υπάρχουν από ένα φορτίο και μια φωτοβολταϊκή διάταξη με τον αντιστροφέα της

Η υλοποίηση του δικτύου έγινε ανά φάση, καθώς στη μέση τάση οι ασυμμετρίες δεν είναι μεγάλες και η μελέτη μιας φάσης είναι ικανοποιητική για τον σκοπό του πειράματος αυτού, που είναι η προσομοίωση ενός συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης. Ωστόσο, στο πρόγραμμα προσομοίωσης RSCAD δεν υπάρχει μονοφασικό μοντέλο για μετασχηματιστή με λήψεις, οπότε το ισοδύναμο δίκτυο υψηλής τάσης αλλά και ο μετασχηματιστής έχουν τριφασική μοντελοποίηση στο δίκτυο που υλοποιήσαμε. Χρησιμοποιώντας όμως τη μια φάση από τις τρεις στην έξοδο του μετασχηματιστή και τον ουδέτερο, καταφέραμε να έχουμε την ανά φάση μοντελοποίηση για τη γραμμή, τα φορτία και τα φωτοβολταϊκά.

Το τελικό δίκτυο που αναπτύξαμε στο RSCAD παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.1 Δίκτυο μέσης τάσης που αναπτύχθηκε στο RSCAD για τη μελέτη του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης

6.2.1 Ισοδύναμο δίκτυο Υψηλής Τάσης

Για την μοντελοποίηση του ισοδύναμου δικτύου υψηλής τάσης αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία [21] ρεαλιστικά στοιχεία για τις παραμέτρους του, για πρότυπα ευρωπαϊκά δίκτυα μέσης τάσης, τα οποία παρατίθενται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Nominal system voltage	Short circuit power, S_{SC}	R/X ratio
[kV]	[MVA]	
110	5000	0.1

Πίνακας 6.1 Παράμετροι ισοδύναμου δικτύου υψηλής τάσης για πρότυπα ευρωπαϊκά δίκτυα

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του πίνακα 6.1 υπολογίζουμε την σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου δικτύου υψηλής τάσης:

- $X_s \cong \frac{(110 \cdot 10^3 \text{ V})^2}{5000 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 2,42 \Omega$
- $R_s = 0,1 * X_s = 0,242 \Omega$
- $L_s = \frac{X_s}{100 * \pi} = 0,0077 \text{ H}$

Για τη μοντελοποίηση της πολικής τάσης των 110kV χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ιδανικής τριφασικής ημιτονικής πηγής του RSCAD. Οι παράμετροι που εισήχθησαν στα παράθυρα εισαγωγής παραμέτρων της πηγής στο πρόγραμμα είναι:

- Ονομαστική πολική τάση: 110 kV
- Συχνότητα: 50 Hz
- Αρχική γωνία: 0°
- Εν σειρά εσωτερική αντίσταση: 0,242 Ω (η αντίσταση του ισοδύναμου δικτύου YT που υπολογίστηκε προηγουμένως)

Τα παράθυρα εισαγωγής των άνωθεν παραμέτρων για το μοντέλο της πηγής στο RSCAD, με ενημερωμένες τις τιμές τους, είναι τα ακόλουθα:

If_rtds_sharc_sld_SRC					
P & Q MONITORING		MONITORING	SIGNAL NAMES	REMOTE FAULTS	
AC SOURCE INITIAL VALUES			AC SOURCE INITIAL POWER OUTPUT		
CONFIGURATION		3PC CONFIGURATION	POSITIVE SEQUENCE RRL		
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Es	Initial Source Mag (L-L, RMS)	110	kV	0.0	
F0	Initial Frequency	50	Hz	0	
Ph	Initial Phase	0.0	deg	-360.0	360.0

If_rtds_sharc_sld_SRC					
P & Q MONITORING		MONITORING	SIGNAL NAMES	REMOTE FAULTS	
AC SOURCE INITIAL VALUES			AC SOURCE INITIAL POWER OUTPUT		
CONFIGURATION		3PC CONFIGURATION	POSITIVE SEQUENCE RRL		
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
R1s	Resistance (series)	0.242	Ohms	1e-6	1E38
R1p	Resistance (parallel)	1.0	Ohms	1e-6	1E38
L1p	Inductance (parallel)	0.1	H	1e-6	1E38

Εικόνες 6.2-6.3 Παράθυρα εισαγωγής παραμέτρων για το μοντέλο της ιδανικής τριφασικής ημιτονικής πηγής του RSCAD

6.2.2 Μετασχηματιστής YT/MT με λήψεις

Οι βασικές παραμέτροι ενός μετασχηματιστή YT/MT, με δυνατότητα αλλαγής λήψεων υπό φορτίο, αντλήθηκαν και πάλι από τη βιβλιογραφία για τα πρότυπα ευρωπαϊκά δίκτυα [21] και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Connection	V_1	V_2	Z_B^\dagger	S_{rated}
	[kV]	[kV]	[Ω]	[MVA]
3-ph Dyn1	110	20	0.016+j1.92	25

Πίνακας 6.2 Παράμετροι μετασχηματιστή YT/MT για πρότυπα ευρωπαϊκά δίκτυα

Η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή στον παραπάνω πίνακα είναι ανηγμένη στο δευτερεύον του. Στο μοντέλο του μετασχηματιστή στο RSCAD χρειάζεται να εισαχθούν οι τιμές της επαγωγικής αντίδρασης και των απωλειών κενού φορτίου σε ανά μονάδα τιμές. Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε:

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

- $R_{p.u.} = \frac{R}{Z_B} = \frac{0,016}{16} = 0,001$
- $X_{p.u.} = \frac{X}{Z_B} = \frac{1,92}{16} = 0,12$
- $P_{Cu,p.u.} = \frac{3 \cdot I^2 \cdot R}{S_B} = \frac{3 \cdot \frac{S^2}{3 \cdot V^2} \cdot R}{S_B} = \frac{0,5 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 0,02$

Για τις λήψεις του μετασχηματιστή έγινε η επιλογή του αριθμού των 17 συνολικά λήψεων, με βήμα 1% (0,01 ανά μονάδα). Η ονομαστική λήψη είναι η 9^η (για ονομαστική τάση δευτερεύοντος 1 α.μ.) και υπάρχουν 8 χαμηλότερες λήψεις και 8 υψηλότερες, με τελικό εύρος τιμών για την τάση του δευτερεύοντος από 0,92 α.μ. (λήψη 1^η) έως 1,08 α.μ. (λήψη 17^η).

Για την αλλαγή λήψης, το μοντέλο του Μ/Σ στο RSCAD διαθέτει 2 θύρες εισόδου, μια για μείωση της λήψης (dn) και μια για αύξηση (up). Το σήμα εισόδου που πυροδοτεί την αλλαγή επιλέχθηκε να είναι η μετάβαση από την ακέραια τιμή 0 στην ακέραια τιμή 1 (Rising Edge ενός παλμού). Η άλλη επιλογή για την πυροδότηση ήταν η μετάβαση από ακέραιο 1 σε ακέραιο 0 (Falling Edge), αλλά προτιμήθηκε η πρώτη. Τα σήματα που θα χρειάζονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης για την αλλαγή των λήψεων θα δημιουργούνται και θα στέλνονται στο Μ/Σ από τον κεντρικό ελεγκτή του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης. Επίσης το μοντέλο διαθέτει και μια θύρα εξόδου (pos) που δίνει την παρούσα λήψη του Μ/Σ.

Όλες οι παράμετροι του Μ/Σ που παρουσιάστηκαν παραπάνω εισήχθησαν στα παράθυρα παραμέτρων του μοντέλου στο RSCAD και παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.

If_rtds_sharc_sld_TRF3P2W					
WINDING #2		TAP CHANGER B		MONITORING	
CONFIGURATION		WINDING #1			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Trf	Transformer Name	TRF1			
YD1	Winding #1 Connection	Delta			
YD2	Winding #2 Connection	Y			
Lead	Delta lags or leads Y	Laas			
type	Transformer Model Type	Ideal			
tapCh	Tap Changer (type cannot be Linear)	Step/Limit			
edge	Tap Trigger on	Rising Edge			
inps	Tap Changer Inputs	CC			
Trmva	Transformer rating (3 Phase)	25	MVA	0.0001	
f	Base Frequency	50	Hz	1.0	300.0
xl	Leakage inductance of Tx	0.12	p.u.	0.001	
NLL	No load losses	0.02	p.u.	0.00	1.0
NLLtp	No load loss branch type	Windina			
prtyp	Type of Processor Card	3PC		0	2

Update Cancel Cancel All

If_rtds_sharc_sld_TRF3P2W					
WINDING #2		TAP CHANGER B		MONITORING	
CONFIGURATION		WINDING #1			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
VL1	Base primary voltage (L-L RMS)	110	kV	0.0001	
Im1	Magnetizing Current	1.0	%	1E-4	1e3

If_rtds_sharc_sld_TRF3P2W					
WINDING #2	TAP CHANGER B	MONITORING	SIGNAL NAMES		
CONFIGURATION			WINDING #1		
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
VL2	Base secondary voltage (L-L RMS)	20	kV	0.0001	
Im2	Magnetizing Current	1.0	%	1E-4	1e3

If_rtds_sharc_sld_TRF3P2W					
WINDING #2	TAP CHANGER B	MONITORING	SIGNAL NAMES		
CONFIGURATION			WINDING #1		
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
step	Step size	0.01	p.u.	0.00001	0.1
TR2	Starting Tap Position	1.0	p.u.	0.7	1.4
limH	Upper limit	1.08	p.u.	0.7	1.4
limL	Lower limit	0.92	p.u.	0.7	1.4

Εικόνες 6.4-6.7 Παράθυρα εισαγωγής παραμέτρων για το μοντέλο του τριφασικού μετασχηματιστή με λήψεις του RSCAD

6.2.3 Γραμμή μέσης τάσης

Στο δίκτυο που αναπτύξαμε υπάρχει μόνο μια κεντρική γραμμή μέσης τάσης. Έγινε η επιλογή η γραμμή να είναι εναέριου τύπου. Τα στοιχεία για την ανά φάση σύνθετη αντίσταση της ανά χιλιόμετρο (Ω/km) αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία για πρότυπα ευρωπαϊκά δίκτυα [21] και παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Ωμική αντίσταση τυπικής εναέριας γραμμής μέσης τάσης ανά χιλιόμετρο:
 $R_{ph} = 0,51 \Omega/\text{km}$
- Επαγωγική αντίδραση τυπικής εναέριας γραμμής μέσης τάσης ανά χιλιόμετρο:
 $X_{ph} = 0,366 \Omega/\text{km}$

Από την επαγωγική αντίδραση προκύπτει η αυτεπαγωγή της γραμμής ανά χιλιόμετρο:
 $L_{ph} = 0,366/(100*\pi) = 0,001165 \text{ H}/\text{km}$

Οι αποστάσεις μεταξύ του Μ/Σ και των ζυγών επιλέχθηκαν με τη λογική ότι η γραμμή μέσης που ξεκινάει από τον Μ/Σ (ο οποίος μοντελοποιεί ουσιαστικά έναν υποσταθμό υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ) εξυπηρετεί αρχικά μια κοντινή πόλη, η οποία έχει μεγάλη ζήτηση φορτίου και σχετικά μικρή παραγωγή από φωτοβολταϊκά, και στη συνέχεια εκτείνεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις προς αγροτικές περιοχές όπου τα φορτία είναι μικρότερα αλλά υπάρχει μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά. Περισσότερα για τα φορτία και τις φωτοβολταϊκές διατάξεις του δικτύου θα παρουσιαστούν στις επόμενες δύο παραγράφους.

Σύμφωνα λοιπόν με τον παραπάνω σχεδιασμό για το δίκτυο, οι αποστάσεις που αποφασίστηκε να διανύει η γραμμή μέσης τάσης και οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων και αυτεπαγωγών των αντίστοιχων τμημάτων είναι:

- Μετασχηματιστής – 1^{ος} Ζυγός: 250 μέτρα
 $R = 0,51 * 0,25 = 0,1275 \Omega$
 $L = 0,001165 * 0,25 = 2,9125 * 10^{-4} \text{ H}$

- 1^{ος} Ζυγός – 2^{ος} Ζυγός: 2500 μέτρα
 $R = 0,51 * 2,5 = 1,275 \Omega$
 $L = 0,001165 * 2,5 = 2,9125 * 10^{-3} H$
- 2^{ος} Ζυγός – 3^{ος} Ζυγός: 5000 μέτρα
 $R = 0,51 * 5 = 2,55 \Omega$
 $L = 0,001165 * 5 = 5,825 * 10^{-3} H$

6.2.4 Φορτία και Φωτοβολταϊκά

Η μοντελοποίηση των φορτίων και των φωτοβολταϊκών διατάξεων στο RSCAD έγινε με τον ίδιο τρόπο όπως και στο δίκτυο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 5 για τη προσομοίωση του τοπικού ελέγχου τάσης, δηλαδή ως εξαρτημένες πηγές ρεύματος που λειτουργούν ως πηγές P-Q. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην παράγραφο 5.2.4 για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας αυτής της μοντελοποίησης.

Όλα τα φορτία του δικτύου επιλέχθηκε να είναι οικιακά. Οι ονομαστικές τιμές της ισχύος για τα φορτία και τα φωτοβολταϊκά επιλέχθηκαν από εμάς, τηρώντας όμως τον θεωρητικό σχεδιασμό του δικτύου που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2.3, δηλαδή μεγάλη ζήτηση φορτίου σε κοντινή απόσταση και μεγάλη εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτός ο σχεδιασμός θα προκαλέσει αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις στις τάσεις των ζυγών κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, το οποίο θα επιτρέψει στο σύστημα συντονισμένου ελέγχου που θα υλοποιηθεί να δουλέψει αρκετά, προσφέροντας ικανοποιητικό όγκο αποτελεσμάτων προς ανάλυση.

Οι συντελεστές ισχύος των φορτίων και των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών επιλέχθηκαν μελετώντας τη βιβλιογραφία, με βάση τυπικά δίκτυα μέσης τάσης και τυπικούς αντιστροφείς. Η τελική επιλογή ήταν:

- Συντελεστής Ισχύος οικιακών φορτίων: 0,97 επαγωγικός [21]
- Ελάχιστος Συντελεστής Ισχύος αντιστροφών φωτοβολταϊκών: 0,8

Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών μπορούν να λειτουργήσουν σε κάθε τιμή συντελεστή ισχύος που δεν είναι μικρότερος από 0,8 επαγωγικό ή 0,8 χωρητικό, γι' αυτό και δίνεται η τιμή του ελάχιστου αυτού ορίου.

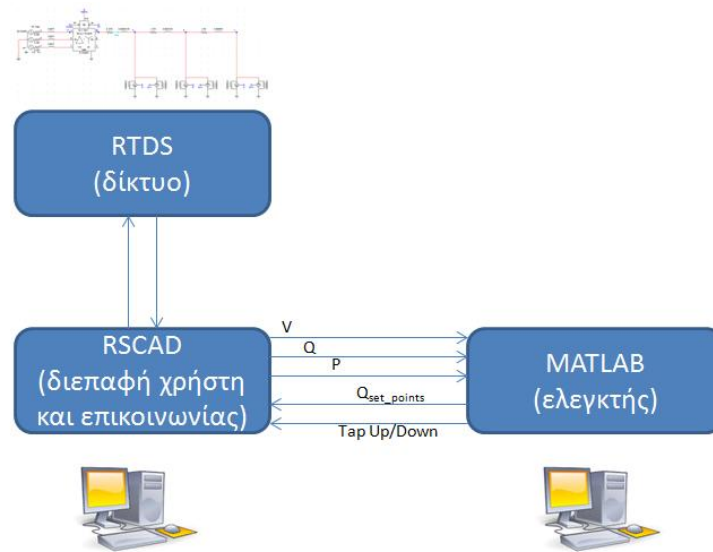
Οι τελικές τιμές για τις ονομαστικές ισχύεις των φορτίων και των φωτοβολταϊκών παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός Ζυγού	Ονομαστική ενεργός ισχύς οικιακού φορτίου	Σ.Ι. Οικιακού φορτίου	Ονομαστική άεργος ισχύς οικιακού φορτίου	Ονομαστική ενεργός ισχύς Φ/Β	Ελάχιστος Σ.Ι. Φ/Β	Μέγιστη άεργος ισχύς Φ/Β
1	16000 KW	0,97	4010 Kvar	500 KW	0,8	375 Kvar
2	550 KW	0,97	138 Kvar	800 KW	0,8	600 Kvar
3	35 KW	0,97	8,7 Kvar	4000 KW	0,8	3000 Kvar

Πίνακας 6.3 Ονομαστικές τιμές ισχύος για τα φορτία και τα φωτοβολταϊκά του δικτύου

6.3 Αλγόριθμος συντονισμένου ελέγχου

Ο αλγόριθμος λειτουργίας του κεντρικού ελεγκτή του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αποτελεί μια ελαφρώς διαφοροποιημένη έκδοση του αλγορίθμου DG DemoNet, ο οποίος έχει αναπτυχθεί από ομάδα ερευνητών του Αυστριακού Ινστιτούτου Τεχνολογίας (Austrian Institute of Technology – AIT) [16]. Ο διαφοροποιημένος αλγόριθμος της εργασίας υλοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, μαζί με τον απαραίτητο κώδικα για την real-time επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων με το λογισμικό RSCAD του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS), στον οποίο προσομοιώνεται το προς εξέταση δίκτυο μέσης τάσης που αναλύθηκε στην παράγραφο 6.2.



Εικόνα 6.8 Λογική λειτουργίας της διάταξης RTDS/RSCAD/MATLAB για την προσομοίωση του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης

Ο αλγόριθμος χειρίζεται δύο μέσα ρύθμισης τάσης για να επιτύχει τον επιθυμητό έλεγχο, τις λήψεις ενός μετασχηματιστή με δυνατότητα αλλαγής λήψεων υπό φορτίο (OLTC) και τη ροή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής του εκάστοτε δικτύου. Τα δύο απαραίτητα αυτά στοιχεία έχουν μοντελοποιηθεί και ενσωματωθεί στο δίκτυο που αναπτύξαμε στο RSCAD για τη μελέτη του συντονισμένου ελέγχου τάσης και η ανάλυση τους έγινε στην παράγραφο 6.2.

Στόχος του αλγορίθμου είναι να διατηρεί όλες τις τάσεις τις οποίες ελέγχει εντός των επιτρεπτών ορίων που του έχουν τεθεί, με τη λιγότερη δυνατή ροή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και με τις λιγότερες δυνατές αλλαγές λήψεων του μετασχηματιστή. Με τον τρόπο αυτό οι απώλειες του δικτύου που οφείλονται στο άεργο ρεύμα ελαχιστοποιούνται αλλά και η διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή αυξάνεται, καθώς θα αποφεύγονται συχνές και περιττές αλλαγές λήψεων, ενώ παράλληλα θα επιτυγχάνεται και η επιθυμητή ρύθμιση τάσης.

Τα επιτρεπτά όρια για την τάση είναι σημαντική μεταβλητή για τη λειτουργία του αλγορίθμου. Η τιμή τους εισάγεται στον ελεγκτή ως παράμετρος και μπορεί να είναι διαφορετική από δίκτυο σε δίκτυο, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις ανάγκες του. Για το δίκτυο που αναπτύξαμε εμείς, επειδή είναι αρκετά μικρό και απλουστευμένο, επιλέχτηκαν τα όρια της τάσης να τεθούν στο $\pm 5\%$, δηλαδή το άνω όριο (Upper Limit) στο 1,05 α.μ. και

το κάτω όριο (Lower Limit) στο 0,95 α.μ. Ο ελεγκτής υπολογίζει τη διαφορά του άνω ορίου από το κάτω (στη δική μας περίπτωση είναι $1,05-0,95=0,1$ α.μ.) και αποθηκεύει την τιμή αυτή σε μια μεταβλητή που ονομάζεται Ζώνη Τάσεων (Voltage Band – VB), η οποία είναι μείζονος σημασίας για τον αλγόριθμο.

Η εκτέλεση του αλγορίθμου αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο ονομάζεται Έλεγχος Εύρους τάσεων (Range Control) και είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της ελάχιστης απαραίτητης ροής αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς, ενώ το δεύτερο στάδιο, που ονομάζεται Έλεγχος Επιπέδου τάσεων (Level Control), είναι υπεύθυνο για το χειρισμό των αλλαγών λήψεων του μετασχηματιστή. Τα στάδια πρέπει να εκτελούνται πάντα με τη σειρά, καθώς είναι σημαντικό να έχει ολοκληρωθεί το Range Control πριν ξεκινήσει η εκτέλεση του Level Control, για λόγους που θα γίνουν κατανοητοί στη συνέχεια.

Η λογική ροή εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι η εξής:

- ❖ **Πρώτο στάδιο (Range Control):** Το στάδιο ξεκινάει με την μέτρηση όλων των προς εξέταση τάσεων του δικτύου (V_i , $i=1,2,\dots,n$, όπου n το πλήθος των μετρούμενων τιμών), της παραγόμενης ενεργού ισχύος κάθε μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής (P_i , $i=1,2,\dots,n$) αλλά και τυχόν ροής αέργου ισχύος (Q_i , $i=1,2,\dots,n$) από τους αντιστροφείς τους, η οποία, αν υπάρχει, θα έχει προκύψει από προγενέστερη εκτέλεση του αλγορίθμου. Η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τάση του συνόλου των μετρούμενων τιμών ($V_{\max} - V_{\min}$) ονομάζεται Έυρος Τάσης (Voltage Range - εξού και το όνομα του σταδίου). Στόχος του σταδίου είναι η μείωση του Voltage Range, να έρθουν δηλαδή οι τάσεις «πιο κοντά» η μια στην άλλη, αλλά όχι περισσότερο από όσο είναι απολύτως απαραίτητο για να επιτευχθεί η επιθυμητή ρύθμιση, ώστε να αποφευχθεί περιττή κυκλοφορία αέργου ισχύος. Για την επίτευξη αυτού του στόχου γίνεται η εκτέλεση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος υπολογίζει πόση είναι η απαραίτητη μεταβολή στη ροή αέργου ισχύος κάθε αντιστροφείας (ΔQ_i , $i=1,2,\dots,n$) ώστε να γίνει το Voltage Range μικρότερο από το Voltage Band με την ελάχιστη δυνατή συνολική ροή αέργου ισχύος όλων των αντιστροφείων ($\sum_{i=1}^n (|Q_i + \Delta Q_i|)$). Είναι σημαντικό να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι η συνθήκη $\text{Voltage Range} < \text{Voltage Band}$ είναι το μόνο κριτήριο που τίθεται αναφορικά με τις τάσεις στο πρώτο στάδιο του αλγορίθμου. Συνεπώς οι τιμές των τάσεων, μετά το πέρας του σταδίου, θα έχουν έρθει μεν «πιο κοντά» η μια στην άλλη, αλλά κανείς δεν εγγυάται ότι δεν θα παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια τάσης που έχουν τεθεί ως παράμετρος. Για να λυθεί αυτό το ζήτημα υπάρχει το δεύτερο στάδιο του αλγορίθμου.
- ❖ **Δεύτερο στάδιο (Level Control):** Όταν ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο, ο κάθε αντιστροφείας διεσπαρμένης παραγωγής έχει λάβει εντολή από τον κεντρικό ελεγκτή να μεταβάλλει την παραγωγή (ή απορρόφηση) αέργου ισχύος του κατά μια τιμή ΔQ , διαφορετική για τον καθένα. Η αλλαγή αυτή στη ροή αέργου ισχύος των αντιστροφείων θα αλλάξει τις τάσεις που ελέγχονται, έτσι ώστε οι νέες τιμές τους να ικανοποιούν τη συνθήκη $\text{Voltage Range} < \text{Voltage Band}$, όπως έχει καθοριστεί από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του πρώτου σταδίου. Το δεύτερο στάδιο ξεκινάει μετρώντας τις καινούριες αυτές τιμές τάσεων του δικτύου ($V_{\text{new},i}$, $i=1,2,\dots,n$) και ελέγχει αν κάποια (έστω μια) από αυτές παραβιάζει κάποιο από τα άνω ή κάτω όρια τάσης. Αν δεν υπάρχει παραβίαση των ορίων, τότε δεν γίνεται άλλη ενέργεια και η εκτέλεση του αλγορίθμου ολοκληρώνεται επιτυχώς, καθώς όλες οι τάσεις του δικτύου βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων, με τη χρησιμοποίηση της ελάχιστης δυνατής ροής αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς, όπως αυτή έχει υπολογιστεί στο πρώτο στάδιο. Αντίθετα, αν παραβιάζεται κάποιο όριο, τότε υπολογίζεται από μια γραμμική εξίσωση η νέα τιμή που

πρέπει να λάβει η τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, αλλάζοντας κατάλληλα τη θέση λήψης του, έτσι ώστε να αλλάξει το επίπεδο όλων των τάσεων του δικτύου και να μην παραβιάζεται πλέον κανένα όριο. Σε αυτό το σημείο γίνεται εμφανής και η κρισιμότητα που έχει η ακολουθία των σταδίων. Είναι απαραίτητο να έχει προηγηθεί το Range Control πριν γίνει οποιαδήποτε αλλαγή στις λήψεις του μετασχηματιστή, διότι μόνο έτσι θα υπάρχει βεβαιότητα ότι δεν θα συνεχίζει να παραβιάζεται κάποιο όριο τάσης και μετά από αυτήν.

Έχοντας παρουσιάσει συνοπτικά τη λογική ροή λειτουργίας του αλγορίθμου συντονισμένου ελέγχου τάσης που υλοποιήθηκε, θα συνεχίσουμε στις επόμενες παραγράφους με την αναλυτική περιγραφή και επεξήγηση του ακριβούς τρόπου λειτουργίας των δύο σταδίων, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο υλοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

6.4 Range Control

Στην παράγραφο αυτή θα μελετηθεί αναλυτικά το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου, ο Έλεγχος Εύρους Τάσεων (Range Control). Θα παρουσιαστεί η αντικειμενική συνάρτηση για την ελαχιστοποίηση της αέργου ισχύος των αντιστροφών, θα γίνει ανάλυση της ευαισθησίας των τάσεων του δικτύου στις μεταβολές της αέργου ($\partial V/\partial Q$), η οποία είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση, καθώς και θα περιγραφεί λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο υλοποιήθηκαν όλα τα παραπάνω στο MATLAB.

6.4.1 Βελτιστοποίηση

Υπενθυμίζουμε αρχικά ότι στόχος του Range Control είναι να διατηρεί τη διαφορά της μέγιστης τάσης του δικτύου από την ελάχιστη τάση (Voltage Range) μικρότερη από τη Ζώνη Τάσεων (Voltage Band), με τη μικρότερη δυνατή ροή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί για την επίτευξη αυτού του στόχου, καθώς και όλες οι συνθήκες και οι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

$$\min_{\Delta Q} \sum_{i=1}^n (Q_i + \Delta Q_i)^2 \quad (1)$$

$$|Q_i + \Delta Q_i| \leq P_i * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) \quad (2)$$

$$\max(V_i + \Delta V_i) - \min(V_i + \Delta V_i) \leq 0,9 * VB \quad (3)$$

$$[\Delta V_i]_{nx1} = \left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right]_{n \times n} * [\Delta Q_i]_{nx1} \quad (4)$$

Η σχέση (1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση έχει στόχο να ελαχιστοποιήσει το άθροισμα των τετραγώνων της συνολικής ροής αέργου ισχύος n πλήθους αντιστροφών. Η συνολική ροή

αέργου εκφράζεται ως το άθροισμα της παρούσας μετρούμενης τιμής Q_i , η οποία έχει σταθερή τιμή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της βελτιστοποίησης, και της μεταβολής στη ροή της αέργου ΔQ_i , η οποία είναι και η μοναδική μεταβλητή της αντικειμενικής συνάρτησης. Ουσιαστικά, οι n διαφορετικές τιμές για τις μεταβολές της αέργου ισχύος κάθε αντιστροφέα ΔQ_i αποτελούν την έξοδο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Ο τετραγωνισμός του αθροίσματος ($Q_i + \Delta Q_i$) γίνεται για δύο λόγους. Πρώτον, διότι η αέργος ισχύς μπορεί να έχει και θετικές τιμές (για παραγωγή) και αρνητικές (για απορρόφηση), επομένως αν δεν υπήρχε το τετράγωνο, οι ελάχιστες τιμές θα υπολογίζονταν ως οι αρνητικότερες, αντί για τις μηδενικές που είναι το επιθυμητό. Πρακτικά ο τετραγωνισμός λειτουργεί εδώ σαν απόλυτη τιμή. Δεύτερον, διότι ο τετραγωνισμός κάνει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης να είναι κυρτό (convex minimization problem), το οποίο σημαίνει ότι η αντικειμενική συνάρτηση, σε κάθε περιοχή του πεδίου ορισμού της, θα παρουσιάζει ένα και μόνο ένα ολικό ελάχιστο, κάνοντας τη λύση που θα παραχθεί από τη βελτιστοποίηση να είναι και η μοναδική ορθή λύση [4].

Η σχέση (2) αναπαριστά τον περιορισμό στην αέργο ισχύ που μπορεί να παράξει ή να απορροφήσει ο κάθε αντιστροφέας με βάση την παρούσα παραγόμενη ενεργό ισχύ του (P_i) και τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος του (PF_{min}). Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης συνυπολογίζει αυτόν τον περιορισμό έτσι ώστε η μεταβολή στην αέργο ισχύ που θα προκύψει ως αποτέλεσμα για κάποιον αντιστροφέα να μην τον φέρει εκτός των επιτρεπτών ορίων του.

Οι σχέσεις (3) και (4) αποτελούν την κύρια συνθήκη του προβλήματος όσον αφορά τις τάσεις του δικτύου που θα προκύψουν μετά το πέρας της βελτιστοποίησης. Η πρώτη από τις δύο εκφράζει τη συνθήκη Voltage Range < Voltage Band που αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.3. Ουσιαστικά λέει ότι η διαφορά της μέγιστης νέας τάσης του δικτύου από την ελάχιστη νέα τάση θα πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% του Voltage Band. Η νέα τάση κάθε ζυγού προκύπτει ως το άθροισμα της μετρούμενης τάσης (V_i) και της μεταβολής που θα συμβεί σε αυτήν (ΔV_i) από τις μεταβολές στην αέργο ισχύ των αντιστροφών (ΔQ_i). Η σχέση (4) εκφράζει την συσχέτιση των ΔV_i από τις μεταβλητές του προβλήματος ΔQ_i .

Η επιλογή για το 90% του VB γίνεται ώστε να υπάρχουν περιθώρια ασφαλείας από τα επιτρεπτά όρια των τάσεων, αν και έρχεται με κόστος επιπλέον ροής αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς. Πιο αναλυτικά, αν η βελτιστοποίηση έφερνε τις τάσεις τόσο κοντά ώστε η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη να συμπίπτει ακριβώς με το Voltage Band (100% του VB) τότε, σε περίπτωση που παραβιαζόταν κάποιο όριο, η αλλαγή της θέσης λήψης του μετασχηματιστή θα είχε τον κίνδυνο να «βγάλει εκτός» μια τάση από το άλλο όριο. Τότε ο ελεγκτής θα προσπαθούσε να διορθώσει τη νέα παραβίαση ορίου, ξαναλλάζοντας τη λήψη στην προηγούμενη θέση, στην οποία υπήρχε η αρχική παραβίαση, και θα γινόταν ένας φαύλος κύκλος αλλαγών λήψεων χωρίς να διορθώνεται το πρόβλημα, το οποίο θα ήταν προβληματικό για τη λειτουργία του συστήματος συντονισμένου ελέγχου. Όσο μεγαλύτερο είναι το βήμα λήψεων του μετασχηματιστή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να συμβεί αυτό το φαινόμενο, με αποτέλεσμα να ενδέχεται να χρειαστεί και περαιτέρω αύξηση του περιθωρίου ασφαλείας, κάτω από το 90% του VB που έχουμε επιλέξει εμείς για βήμα λήψεων του M/Σ 1%.

Για τον υπολογισμό των μεταβολών στις τάσεις του δικτύου ΔV_i που προκύπτουν από τις μεταβολές στην αέργο ισχύ των αντιστροφών ΔQ_i είναι απαραίτητη η ανάλυση ευαισθησίας των τάσεων του δικτύου ως προς τις μεταβολές της αέργου ($\partial V / \partial Q$). Από την ανάλυση προκύπτει ο $n \times n$ πίνακας ευαισθησίας $\left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right]$ ο οποίος, πολλαπλασιαζόμενος με τον πίνακα στήλη $n \times 1$ των μεταβολών στην αέργο ισχύ $[\Delta Q_i]$, δίνει ως αποτέλεσμα τον πίνακα

στήλη $n \times 1$ των μεταβολών των τάσεων $[\Delta V_i]$. Προφανώς, όσο πιο ακριβής είναι η ανάλυση ευαισθησίας, τόσο πιο κοντά στις θεωρητικές νέες τιμές των τάσεων που υπολογίζονται μέσω αυτής ($V_i + \Delta V_i$) θα είναι οι πραγματικές τιμές των τάσεων του δικτύου ($V_{new,i}$), όπως αυτές θα διαμορφωθούν μετά την εκτέλεση της βελτιστοποίησης και την εντολή του κεντρικού ελεγκτή προς τους αντιστροφείς να μεταβάλλουν την άεργο ισχύ τους κατά ΔQ_i . Ακόμη όμως και στην περίπτωση που η ανάλυση ευαισθησίας δεν είναι τέλεια, το όριο ασφαλείας που έχει τεθεί για το Voltage Band στη συνθήκη (90%) θα υπερκαλύψει το σφάλμα που θα προκύψει μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών τιμών των νέων τάσεων του δικτύου.

6.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Για την υλοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας των τάσεων ως προς την άεργο ισχύ, που είναι απαραίτητη για την εκτέλεση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιήσαμε το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος του Hadi Saadat [29] για επίλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson, με τροποποιήσεις και βελτιώσεις από το εργαστήριο ΣΗΕ της σχολής ΗΜΜΥ Ε.Μ.Π. Ο αλγόριθμος υπήρχε έτοιμος στη διάθεση μας, καθώς έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τη διεξαγωγή εργαστηριακής άσκησης ενός προπτυχιακού μαθήματος ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας της σχολής ΗΜΜΥ Ε.Μ.Π.

Σε κάθε επανάληψη της εκτέλεσης του αλγορίθμου υπολογίζεται η Ιακωβιανή Μήτρα (Jacobian Matrix) του δικτύου. Όταν επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση της μεθόδου N-R, τότε ο πίνακας έχει λάβει τις τελικές ορθές τιμές του. Ο πίνακας είναι μεγέθους $2n \times 2n$, όπου n ο αριθμός των ζυγών του δικτύου, χωρίς τον ζυγό ταλάντωσης. Αντιστρέφοντας την Ιακωβιανή μήτρα, προκύπτει ο $2n \times 2n$ πίνακας ευαισθησίας του δικτύου, ο οποίος περιέχει τους εξής 4 $n \times n$ υποπίνακες ευαισθησίας: γωνία τάσης-ενεργός ισχύς, γωνία τάσης-άεργος ισχύς, μέτρο τάσης-ενεργός ισχύς και μέτρο τάσης-άεργος ισχύς.

$$S_V = \text{Jacobian}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix}$$

Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο χρειάζεται τον πίνακα ευαισθησίας του μέτρου της τάσης ως προς την άεργο ισχύ $\left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right]$, ο οποίος είναι ο κάτω δεξιά $n \times n$ υποπίνακας του ολικού πίνακα ευαισθησίας S_V .

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου και τον υπολογισμό του ζητούμενου υποπίνακα ευαισθησίας του δικτύου μέσης τάσης που έχουμε αναπτύξει και περιγράψει στην παράγραφο 6.2, χρειάζεται να συμπληρωθεί στο MATLAB μια φόρμα εισαγωγής δεδομένων που περιγράφουν το δίκτυο, η οποία είναι κομμάτι του αλγορίθμου για την επίλυση της ροής φορτίου. Η τυπική μορφή της φόρμας, χωρίς δηλαδή να έχει συμπληρωθεί με τα στοιχεία του δικού μας δικτύου, παρουσιάζεται στην εικόνα 6.9.

Αρχικά, ζητείται η επιθυμητή βάση ισχύος για τους ανά μονάδα υπολογισμούς (basemva), η επιθυμητή ακρίβεια σύγκλισης της μεθόδου (accuracy) και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που θα εκτελεστούν από τον αλγόριθμο (maxiter).

```

1 - clear
2
3 - basemva = 1; accuracy = 0.0001; maxiter = 100;
4
5
6 %
7 %      Bus Bus Voltage Angle ---Load----- Generator----- Injected
8 %      No  code Mag.   Degree MW   Mvar MW   Mvar Qmin Qmax Mvar
9 busdata=[1  1  1.00  0.0  0.0  0.0  0.00  0  0  0  0
10          2  0  1.00  0.0  0.0  0.0  0.00  0  0  0  0
11          3  0  1.00  0.0  0.0  0.0  0.00  0  0  0  0
12          4  0  1.00  0.0  0.009 0.0044 0.003 0  0  0  0
13          5  0  1.00  0.0  0.009 0.0044 0.003 0  0  0  0
14          6  0  1.00  0.0  0.009 0.0044 0.003 0  0  0  0
15          7  0  1.00  0.0  0.009 0.0044 0.003 0  0  0  0
16          8  0  1.00  0.0  0.009 0.0044 0.003 0  0  0  0];
17
18 %
19 %      Bus bus  R      X      1/2 B      = 1 for lines
20 %      nl  nr  p.u.  p.u.  p.u.  > 1 or < 1 tr. tap at bus nl
21 linedata=[1  2  0.001 0.01  0          1
22           2  3  0.052 0.1513 0          1
23           3  4  0.3229 0.1654 0          1
24           4  5  0.3229 0.1654 0          1
25           5  6  0.3229 0.1654 0          1
26           6  7  0.3229 0.1654 0          1
27           7  8  0.3229 0.1654 0          1];
28
29
30
31 Lfbybust % form the bus admittance matrix
32
33 Lfnewtont % Power flow solution by Newton-Raphson method
34
35 Busoutt % Prints the power flow solution on the screen

```

Εικόνα 6.9 Τυπική μορφή φόρμας εισαγωγής δεδομένων για τον αλγόριθμο ανάλυσης ροής φορτίου στο MATLAB

Στη συνέχεια ζητείται να συμπληρωθεί ένας πίνακας (busdata) με τα δεδομένα για τους ζυγούς του δικτύου. Η κάθε γραμμή αυτού του πίνακα αναπαριστά έναν ζυγό, επομένως πρέπει να συμπληρωθούν τόσες γραμμές του πίνακα όσοι είναι και οι ζυγοί. Στην πρώτη στήλη (Bus No) δίνουμε έναν μοναδικό αριθμό που θα αντιστοιχεί στον ζυγό αυτό. Στη δεύτερη στήλη (Bus code) συμπληρώνουμε έναν αριθμό που χαρακτηρίζει το είδος του ζυγού: 1 για ζυγό ταλάντωσης, 2 για ζυγό PV και 0 για ζυγό PQ. Στις στήλες 3 και 4 (Voltage Mag. και Angle Degree) συμπληρώνονται οι αρχικές τιμές για τα μέτρα των τάσεων (σε ανά μονάδα) και τις γωνίες (σε μοίρες) των ζυγών. Εάν δεν είναι γνωστές, τότε χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές οι 1 α.μ. και 0 μοίρες. Στις στήλες 5 και 6 συμπληρώνονται οι ισχείς (ενεργός σε MW και άεργος σε Mvar αντίστοιχα) τυχόν φορτίων που υπάρχουν στον ζυγό. Εάν δεν υπάρχει φορτίο στο ζυγό, τότε δίνουμε μηδενικές τιμές. Στις στήλες 7 και 8 συμπληρώνονται οι ισχείς (ενεργός σε MW και άεργος σε Mvar αντίστοιχα) τυχόν γεννήτριας ή άλλης πηγής (όπως ανανεώσιμες πηγές) που υπάρχουν στον ζυγό. Εάν δεν υπάρχουν, δίνουμε μηδενικές τιμές. Στις στήλες 9 και 10 συμπληρώνουμε το μέγιστο και το ελάχιστο όριο αέργου ισχύος που μπορεί να παράξει ή να απορροφήσει αντίστοιχα η γεννήτρια (αν υπάρχει) του ζυγού, σύμφωνα με τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος της. Τέλος, στη στήλη 11 συμπληρώνεται τυχόν επιπλέον έγχυση αέργου ισχύος στο ζυγό, η οποία μπορεί να προέρχεται π.χ. από μια συστοιχία πυκνωτών.

Στη συνέχεια πρέπει να συμπληρωθεί ο πίνακας linedata, ο οποίος αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των γραμμών που ενώνουν τους ζυγούς του δικτύου. Συμπληρώνουμε τόσες γραμμές πίνακα όσες είναι και οι γραμμές του δικτύου. Στις στήλες 1 και 2 βάζουμε τους αριθμούς των ζυγών αναχώρησης και άφιξης της γραμμής αντίστοιχα. Οι αριθμοί των ζυγών πρέπει να είναι αυτοί που έχουμε επιλέξει στην πρώτη στήλη του πίνακα busdata. Στις επόμενες τρεις στήλες συμπληρώνουμε τις ανά μονάδα τιμές της ωμικής αντίστασης, επαγωγικής αντίδρασης και το ήμισυ της συνολικής εγκάρσιας αγωγιμότητας της γραμμής.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι πρέπει να υπολογίσουμε τις ανά μονάδα τιμές των αντιστάσεων και των επαγωγικών αντιδράσεων του δικτύου μέσης τάσης που έχουμε υλοποιήσει (Εικόνα 6.1). Επιλέγοντας βάση ισχύος 4MVA και βάσεις για την τάση 110kV από τη μεριά του πρωτεύοντος του Μ/Σ και 20kV από τη μεριά του δευτερεύοντος, έχουμε:

- $S_B = 4 \text{ MVA}$
- $V_{B1} = 110 \text{ kV}$
- $V_{B2} = 20 \text{ kV}$
- $Z_{B1} = \frac{V_{B1}^2}{S_B} = 3025 \ \Omega$
- $Z_{B2} = \frac{V_{B2}^2}{S_B} = 100 \ \Omega$

Σύνθετη αντίσταση ισοδύναμου δικτύου υψηλής τάσης:

$$R_{s,p.u.} = \frac{0,242 \ \Omega}{Z_{B1}} = 8 * 10^{-5}$$

$$X_{s,p.u.} = \frac{2,42 \ \Omega}{Z_{B1}} = 8 * 10^{-4}$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή:

$$R_{\mu,p.u.} = \frac{0,016 \ \Omega}{Z_{B2}} = 1,6 * 10^{-4}$$

$$X_{\mu,p.u.} = \frac{1,92 \ \Omega}{Z_{B2}} = 0,0192$$

Σύνθετη αντίσταση 1^{ου} τμήματος γραμμής μέσης τάσης:

$$R_{line1,p.u.} = \frac{0,1275 \ \Omega}{Z_{B2}} = 0,001275$$

$$X_{line1,p.u.} = \frac{0,0915 \ \Omega}{Z_{B2}} = 0,000915$$

Σύνθετη αντίσταση 2^{ου} τμήματος γραμμής μέσης τάσης:

$$R_{line2,p.u.} = \frac{1,275 \ \Omega}{Z_{B2}} = 0,01275$$

$$X_{line2,p.u.} = \frac{0,915 \ \Omega}{Z_{B2}} = 0,00915$$

Σύνθετη αντίσταση 3^{ου} τμήματος γραμμής μέσης τάσης:

$$R_{line3,p.u.} = \frac{2,55 \ \Omega}{Z_{B2}} = 0,00255$$

$$X_{line3,p.u.} = \frac{1,83 \ \Omega}{Z_{B2}} = 0,0183$$

Έχοντας πλέον το απλουστευμένο και ανά μονάδα ισοδύναμο δίκτυο, παρατηρούμε ότι έχουμε 4 ζυγούς. Ο 1^{ος} ζυγός, ο οποίος είναι ο ζυγός της ισοδύναμης πηγής υψηλής τάσης, θα είναι ο ζυγός ταλάντωσης (μέτρο τάσης 1 α.μ. και γωνία 0 μοίρες), και οι άλλοι 3 ζυγοί, στους οποίους είναι συνδεδεμένα τα φορτία και οι φωτοβολταϊκές διατάξεις, θα είναι ζυγοί PQ. Συνεπώς, η γραμμή που ενώνει τους ζυγούς 1 και 2 θα περιλαμβάνει την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση της υψηλής τάσης, του μετασχηματιστή και του 1^{ου} τμήματος της γραμμής. Το άθροισμα όλων αυτών σε ανά μονάδα τιμές είναι:

$$R_{\text{ισοδύναμο,p.u.}} = R_{s,p.u.} + R_{\mu,p.u.} + R_{\text{line1,p.u.}} = 1,515 * 10^{-3}$$

$$X_{\text{ισοδύναμο,p.u.}} = X_{s,p.u.} + X_{\mu,p.u.} + X_{\text{line1,p.u.}} = 0,020915$$

Απομένει πλέον να συμπληρώσουμε τα δεδομένα για τις καταναλισκόμενες και παραγόμενες ισχύεις των ζυγών 2, 3 και 4, όμως εδώ τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Η προσομοίωση που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε θα εκτελεστεί σε πραγματικό χρόνο για 24 ώρες, με δεδομένα εισόδου για την ηλιοφάνεια και τη ζήτηση του φορτίου τα οποία θα μεταβάλλονται με το χρόνο. Επομένως, ο πίνακας busdata δεν θα πρέπει να περιέχει σταθερές τιμές για τις ισχύεις, αλλά μεταβλητές. Συνεπώς, ο πίνακας ευαισθησίας θα πρέπει να ξαναυπολογίζεται με τα νέα δεδομένα κάθε φορά που θα πρέπει να εκτελεστεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης.

Σε μια προσπάθεια να εξετάσουμε αν είναι εφικτό να αποφευχθεί αυτή τη διαδικασία, κάναμε μια σειρά πολλών δοκιμών υπολογισμού του πίνακα ευαισθησίας, για διάφορες τιμές ηλιοφάνειας-ζήτησης φορτίου και μελετήσαμε τα αποτελέσματα. Αυτό που διαπιστώθηκε είναι ότι οι μεταβολές που παρουσιάζονται στον πίνακα ευαισθησίας για τις διαφορετικές τιμές ενεργού και αέργου ισχύος των ζυγών είναι πάρα πολύ μικρές, της τάξης του τρίτου σημαντικότερου δεκαδικού ψηφίου. Το αποτέλεσμα δεν αποτελεί ιδιαίτερη έκπληξη, καθώς είναι γνωστό ότι τη μεγαλύτερη συμβολή στις ευαισθησίες ενός δικτύου την έχουν τα παθητικά στοιχεία, με κυριότερο εξ' αυτών (και το μόνο που υπάρχει στο δίκτυο που έχουμε υλοποιήσει εμείς) τις γραμμές του δικτύου.

Φτάνοντας σε αυτό το συμπέρασμα, παρατηρούμε επίσης ότι θα υπάρχει ήδη σφάλμα μεταξύ του πίνακα ευαισθησίας που θα υπολογίσουμε μέσω του αλγορίθμου αυτού στο MATLAB και του πίνακα ευαισθησίας που θα αναγνωρίζει το πρόγραμμα RSCAD για το δίκτυο που έχουμε αναπτύξει σε αυτό. Το σφάλμα αυτό θα οφείλεται στο ότι υπάρχουν στοιχεία του δικτύου στο RSCAD που δεν τα έχουμε συμπεριλάβει στην ανάλυση ευαισθησίας στο MATLAB, όπως είναι οι αλλαγές λήψεων του M/Σ και οι εξαρτημένες πηγές ρεύματος, με τις παράλληλες αγωγιμότητες τους, οι οποίες μοντελοποιούν τα φορτία και τα φωτοβολταϊκά. Το σφάλμα αυτό θα είναι μεγαλύτερο από το σφάλμα που θα προκύψει αν δεν υπολογίζουμε τον πίνακα ευαισθησίας σε κάθε εκτέλεση της βελτιστοποίησης αλλά επιλέξουμε έναν σταθερό πίνακα.

Έχοντας όλα τα παραπάνω κατά νου, πήραμε την απόφαση να υπολογίσουμε τον πίνακα ευαισθησίας μια φορά και να χρησιμοποιήσουμε τις τιμές του για όλες τις φορές που θα εκτελεστεί η βελτιστοποίηση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το ζεύγος τιμών για την ηλιοφάνεια και τη ζήτηση φορτίου που χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας επιλέχθηκε να αντιστοιχεί στην ώρα της ημέρας που οι τάσεις του δικτύου θα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διασπορά λόγω της διεύθυνσης των φωτοβολταϊκών, δηλαδή τις ώρες μέγιστης ηλιοφάνειας. Σύμφωνα με τυπικές καμπύλες ηλιοφάνειας και ζήτησης οικιακού φορτίου, η ζήτηση φορτίου τις ώρες μέγιστης ηλιοφάνειας είναι στο 60% της μέγιστης. Η επιλογή αυτή έγινε με το σκεπτικό ότι εκείνες τις ώρες θα παρουσιάζεται το

μεγαλύτερο πρόβλημα στις τάσεις του δικτύου, αλλά ταυτόχρονα οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών θα μπορούν να συνεισφέρουν στη ρύθμιση της τάσης με τη μέγιστη δυνατή ροή αέργου ισχύος τους, διότι και η παραγωγή ενεργού τους θα είναι η μέγιστη. Επομένως, αυτό το χρονικό διάστημα είναι το πιο κρίσιμο για την επίτευξη της μείωσης του Voltage Range και τη λειτουργία του σταδίου Range Control γενικότερα. Το μεγαλύτερο σφάλμα στον πίνακα ευαισθησίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης θα παρουσιάζεται όταν η απόκλιση της ηλιοφάνειας και της ζήτησης φορτίου από τις τιμές που επιλέχθηκαν (100% και 60% αντίστοιχα) γίνεται μέγιστη, γεγονός που θα συμβαίνει τις μετεμεσονύχτιες βραδυνές ώρες, όταν η ζήτηση φορτίου είναι η ελάχιστη (20%) και η ηλιοφάνεια είναι μηδενική. Όμως, με μηδενική ηλιοφάνεια οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών δεν θα μπορούν έτσι κι αλλιώς να συμβάλλουν στη ρύθμιση της τάσης, οπότε το μέγιστο σφάλμα στον πίνακα ευαισθησίας δεν θα έχει επίπτωση στη λειτουργία του αλγορίθμου.

Με βάση την επιλογή αυτή, στον πίνακα busdata της φόρμας εισαγωγής δεδομένων του αλγορίθμου στο MATLAB θα συμπληρωθούν οι ονομαστικές τιμές ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών και το 60% των ονομαστικών τιμών ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων. Το σφάλμα που θα προκύπτει τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας, που η ηλιοφάνεια και η ζήτηση θα έχουν διαφορετικές τιμές, θα είναι μικρό όπως προαναφέραμε, και θα υπερκαλύπτεται από το όριο ασφαλείας για το Voltage Band που υπάρχει στη συνθήκη του προβλήματος ελαχιστοποίησης (90% του VB), επομένως δεν διατρέχεται κίνδυνος μη ορθής λειτουργίας του συστήματος.

Τελικώς, η συμπληρωμένη φόρμα εισαγωγής δεδομένων για την επίλυση της ροής φορτίου με τη μέθοδο N-R στο MATLAB παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:

```

1 clear
2
3 basemva = 4; accuracy = 0.001; maxiter = 100;
4
5
6 %      Bus Bus Voltage Angle ---Load--- -----Generator----- Injected
7 %      No  code Mag. Degree MW Mvar MW Mvar Qmin Qmax Mvar
8 busdata=[1 1 1.00 0.0 0 0 0 0 0 0 0
9           2 0 1.00 0.0 9.6 2.406 0.5 0 -0.375 0.375 0
10          3 0 1.00 0.0 0.330 0.828 0.8 0 -0.6 0.6 0
11          4 0 1.00 0.0 0.021 0.00522 4 0 -3 3 0];
12
13
14 %      Line code
15 %      Bus bus R X 1/2 B = 1 for lines
16 %      nl nr p.u. p.u. p.u. > 1 or < 1 tr. tap at bus nl
17 linedata=[1 2 0.001515 0.020915 0 1
18            2 3 0.01275 0.00915 0 1
19            3 4 0.0255 0.0183 0 1];
20
21
22 % Ο ΖΥΓΟΣ 1 ΕΙΝΑΙ Ο ΖΥΓΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ
23
24 Lfybust % form the bus admittance matrix
25
26 Lfnwntont % Power flow solution by Newton-Raphson method

```

Εικόνα 6.10 Φόρμα εισαγωγής δεδομένων για την ανάλυση ροής φορτίου στο MATLAB συμπληρωμένη με τα στοιχεία του δικτύου μέσης τάσης που έχουμε αναπτύξει για την προσομοίωση. Ζήτηση φορτίου: 60%, Ηλιοφάνεια: 100%

Όταν ολοκληρωθεί η εκτέλεση του αλγορίθμου επίλυσης της ροής φορτίου με τη μέθοδο N-R και έχει επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση, παίρνουμε την 6x6 Ιακωβιανή μήτρα και αντιστρέφοντας την, τον 6x6 πίνακα ευαισθησίας του δικτύου:

$$S_V = \begin{bmatrix} 0.0214 & 0.0208 & 0.0199 & -0.0010 & -0.0008 & -0.0008 \\ 0.0213 & 0.0300 & 0.0291 & -0.0016 & -0.0147 & -0.0146 \\ 0.0213 & 0.0295 & 0.0464 & -0.0023 & -0.0158 & -0.0414 \\ 0.0021 & 0.0016 & 0.0008 & 0.0226 & 0.0228 & 0.0228 \\ 0.0021 & 0.0142 & 0.0125 & 0.0224 & 0.0410 & 0.0411 \\ 0.0020 & 0.0139 & 0.0363 & 0.0216 & 0.0396 & 0.0575 \end{bmatrix}$$

Εμείς χρειαζόμαστε τον κάτω δεξιά 3x3 υποπίνακα που αφορά την ευαισθησία του μέτρου της τάσης από την άεργο ισχύ $\left[\frac{\partial V}{\partial Q}\right]$. Επίσης, οι τιμές του πίνακα έχουν υπολογιστεί στο ανά μονάδα σύστημα. Για να πάρουμε τις πραγματικές τιμές εργαζόμαστε ως εξής:

$$x = \frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{\Delta V_{pu} * V_{B2}}{\Delta Q_{pu} * S_B} = \frac{\Delta V_{pu}}{\Delta Q_{pu}} * \frac{20 * 10^3}{4 * 10^6} = \left(\frac{\Delta V}{\Delta Q}\right)_{pu} * 0,005$$

Τελικώς, ο 3x3 πίνακας ευαισθησίας μέτρου τάσης από άεργο ισχύ $\left[\frac{\partial V}{\partial Q}\right]$ σε πραγματικές τιμές προκύπτει ο εξής:

$$\left[\frac{\partial V}{\partial Q}\right] = \begin{bmatrix} 0,0001132 & 0,0001138 & 0,0001141 \\ 0,0001118 & 0,0002048 & 0,0002056 \\ 0,0001080 & 0,0001978 & 0,0002875 \end{bmatrix}$$

Αυτός είναι και ο τελικός πίνακας ευαισθησίας που θα χρησιμοποιήσουμε για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του Range Control, ο οποίος, πολλαπλασιαζόμενος εκ δεξιών με τον πίνακα στήλη των μεταβολών της ροής αέργου ισχύος των αντιστροφών $\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix}$, μας δίνει

τον πίνακα στήλη $\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}$ με τις μεταβολές στα μέτρα των τάσεων των τριών ζυγών PQ του δικτύου.

6.4.3 Υλοποίηση βελτιστοποίησης στο MATLAB

Για την υλοποίηση του κεντρικού ελεγκτή του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί ο απαραίτητος αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.4.1 στο MATLAB. Για να επιλέξουμε τον κατάλληλο τρόπο επίλυσης μελετήσαμε τη φύση του προβλήματος. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε τις σχέσεις που αποτελούν το πρόβλημα βελτιστοποίησης που

καλούμαστε να επιλύσουμε, τόσο την αντικειμενική συνάρτηση, όσο και τους περιορισμούς που πρέπει να πληρεί.

$$\min_{\Delta Q} \sum_{i=1}^n (Q_i + \Delta Q_i)^2 \quad (1)$$

$$|Q_i + \Delta Q_i| \leq P_i * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) \quad (2)$$

$$\max(V_i + \Delta V_i) - \min(V_i + \Delta V_i) \leq 0,9 * VB \quad (3)$$

$$[\Delta V_i]_{nx1} = \left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right]_{nxn} * [\Delta Q_i]_{nx1} \quad (4)$$

Από την αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί (1), παρατηρούμε ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού (quadratic programming), καθώς αφορά την ελαχιστοποίηση μιας τετραγωνικής συνάρτησης n μεταβλητών, υποκείμενη σε γραμμικούς περιορισμούς για τις μεταβλητές αυτές [5]. Η γενική μορφή ενός προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού είναι η εξής:

$$\min_x (f(x) = \frac{1}{2} * x^T * Q * x + c^T * x),$$

υποκείμενη σε έναν ή περισσότερους περιορισμούς της μορφής:

$Ax \leq b$ (ανισοτικοί περιορισμοί)

$Ex = d$ (ισοτικοί περιορισμοί)

όπου τα x, c, b, d είναι διανύσματα (πίνακες στήλη), ο Q είναι συμμετρικός τετραγωνικός πίνακας και οι A και E πίνακες

Το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB διαθέτει έτοιμη στις βιβλιοθήκες του μια συνάρτηση επίλυσης προβλημάτων τετραγωνικού προγραμματισμού, την quadprog. Η συνάρτηση αυτή επιλύει προβλήματα της παραπάνω μορφής, και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιεί τα ακόλουθα ονόματα για τα ορίσματα της συνάρτησης:

$$\min_x \left(\frac{1}{2} * x^T * H * x + f^T * x \right), \quad (5)$$

$$A * x \leq b \quad (6)$$

$$Aeq * x = beq \quad (7)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (8)$$

Η κλήση της συνάρτησης απαιτεί ως ορίσματα τους παραπάνω πίνακες και γίνεται ως εξής: $x = \text{quadprog}(H, f, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$. Η συνάρτηση επιστρέφει ως αποτέλεσμα το διάνυσμα x που περιέχει τις τιμές των μεταβλητών για τις οποίες ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση και ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί. Αν το πρόβλημα που επιθυμούμε να λύσουμε δεν έχει καθόλου περιορισμούς κάποιου συγκεκριμένου είδους, τότε οι αντίστοιχοι πίνακες πρέπει να είναι κενοί. Π.χ. στο δικό μας πρόβλημα δεν υπάρχουν ισοτικοί περιορισμοί, επομένως οι πίνακες Aeq και beq πρέπει να έχουν οριστεί στο MATLAB ως: Aeq=[] και beq=[].

Το μόνο που χρειάζεται πλέον για να επιλυθεί το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του σταδίου Range Control στο MATLAB είναι να το μετασχηματίσουμε στην παραπάνω μορφή που

αντιλαμβάνεται η συνάρτηση quadprog. Πρέπει δηλαδή να υπολογίσουμε κατάλληλα τους πίνακες H,f,A,b,lb,ub έτσι ώστε να αναπαριστούν το πρόβλημα που συνθέτουν οι σχέσεις (1) έως (4).

Ξεκινάμε από την μεταβλητή του προβλήματος μας. Από την αντικειμενική συνάρτηση (1) βλέπουμε ότι η μεταβλητή της είναι το διάνυσμα (πίνακας στήλη) ΔQ_i , για $i=1,\dots,n$, η οποία αναπαριστά τις n το πλήθος μεταβολές στη ροή αέργου ισχύος των αντιστροφών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής του εκάστοτε δικτύου. Το δίκτυο που έχουμε υλοποιήσει στο RSCAD για την προσομοίωση και μελέτη του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης διαθέτει τρεις φωτοβολταϊκές διατάξεις με τους αντιστροφείς τους, μια σε κάθε ζυγό φορτίου του δικτύου. Επομένως, το πλήθος των μεταβολών της ροής αέργου ισχύος των αντιστροφών ΔQ_i είναι $n=3$ και η μεταβλητή x του προβλήματος ελαχιστοποίησης είναι τελικώς το διάνυσμα:

$$x = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix}$$

Στη συνέχεια θα μετασχηματίσουμε την αντικειμενική συνάρτηση (1) στη μορφή (5).

$$\sum_{i=1}^3 (Q_i + \Delta Q_i)^2 = \Delta Q_1^2 + \Delta Q_2^2 + \Delta Q_3^2 + 2Q_1\Delta Q_1 + 2Q_2\Delta Q_2 + 2Q_3\Delta Q_3 + Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2$$

Ο τελευταίος όρος του παραπάνω αθροίσματος ($Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2$) δεν περιέχει καμία μεταβλητή και είναι σταθερός. Συνεπώς, δεν επηρεάζει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης και μπορούμε να τον παραλείψουμε χωρίς συνέπειες. Οι δύο πρώτοι όροι που απομένουν, οι οποίοι περιέχουν τις μεταβλητές της συνάρτησης ΔQ_i , μπορούν να γραφούν σε μητρική μορφή ως εξής:

$$\Delta Q_1^2 + \Delta Q_2^2 + \Delta Q_3^2 = [\Delta Q_1 \quad \Delta Q_2 \quad \Delta Q_3] * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = x^T * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * x$$

$$2Q_1\Delta Q_1 + 2Q_2\Delta Q_2 + 2Q_3\Delta Q_3 = [2Q_1 \quad 2Q_2 \quad 2Q_3] * \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = [2Q_1 \quad 2Q_2 \quad 2Q_3] * x$$

Εύκολα παρατηρούμε πλέον ότι για να έρθει η συνάρτηση στην τελική επιθυμητή μορφή (5) πρέπει να ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\frac{1}{2} * x^T * H * x = x^T * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * x$$

$$f^T * x = [2Q_1 \quad 2Q_2 \quad 2Q_3] * x$$

Άρα, οι πίνακες H και f που αναπαριστούν την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι τελικώς:

$$H = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} 2Q_1 \\ 2Q_2 \\ 2Q_3 \end{bmatrix}$$

Συνεχίζουμε τον υπολογισμό των πινάκων που πρέπει να δωθούν ως ορίσματα στην quadprog με τη σχέση (2), η οποία αποτελεί τον ανισοτικό περιορισμό για τη μέγιστη επιτρεπτή ροή αέργου ισχύος που μπορεί να έχει ο κάθε αντιστροφείας $|Q_i + \Delta Q_i|$, όπως αυτή προκύπτει από την παραγόμενη ενεργό ισχύ του P_i και τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος του PF_{min} (0,8 για τους 3 αντιστροφείς του δικτύου μας, όπως διατυπώθηκε στην παράγραφο 6.2.4):

$$\begin{aligned}
|Q_i + \Delta Q_i| &\leq P_i * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) \Rightarrow \\
-P_i * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) &\leq Q_i + \Delta Q_i \leq P_i * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) \Rightarrow \\
-P_i * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_i &\leq \Delta Q_i \leq P_i * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_i \Rightarrow \\
\begin{bmatrix} -P_1 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_1 \\ -P_2 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_2 \\ -P_3 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_3 \end{bmatrix} &\leq \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} P_1 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_1 \\ P_2 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_2 \\ P_3 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_3 \end{bmatrix} \Rightarrow
\end{aligned}$$

$$lb \leq x \leq ub$$

Επομένως, οι πίνακες lb και ub για τους ανισοτικούς περιορισμούς άνω και κάτω ορίων του προβλήματος είναι:

$$lb = \begin{bmatrix} -P_1 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_1 \\ -P_2 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_2 \\ -P_3 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_3 \end{bmatrix}, \quad ub = \begin{bmatrix} P_1 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_1 \\ P_2 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_2 \\ P_3 * \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) - Q_3 \end{bmatrix}$$

Ο τελευταίος περιορισμός του προβλήματος διατυπώνεται στη σχέση (3), η οποία αποτελεί τη συνθήκη ελέγχου για τις τάσεις Voltage Range < Voltage Band, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Για τον υπολογισμό του Voltage Range είναι απαραίτητη η εύρεση της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης του δικτύου. Αυτό όμως δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από τη συνάρτηση quadprog του MATLAB. Η quadprog πρέπει να λάβει ως ορίσματα τους πίνακες A και b, οι οποίοι θα ικανοποιούν τη συνθήκη $Ax \leq b$. Επομένως, πρέπει να μετασχηματίσουμε τη σχέση (3) σε μια μητρική μορφή που να αντιστοιχεί στην παραπάνω συνθήκη.

Για να το επιτύχουμε αυτό παρατηρούμε ότι όταν ικανοποιείται η συνθήκη (3), δηλαδή η διαφορά της μέγιστης τάσης από την ελάχιστη είναι μικρότερη από την επιθυμητή τιμή, ταυτοτικά θα ικανοποιείται η συνθήκη και για κάθε άλλη διαφορά τάσεων του δικτύου. Επομένως, εφόσον δεν είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τη μέγιστη και την ελάχιστη τάση του δικτύου κατά την εκτέλεση της ελαχιστοποίησης, θα εφαρμόσουμε τη συνθήκη ελέγχου της σχέσης (3) για όλες τις διαφορές τάσεων του δικτύου, επιτυγχάνοντας το ίδιο τελικό αποτέλεσμα.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, έχουμε:

$$\max(V_i + \Delta V_i) - \min(V_i + \Delta V_i) \leq 0,9 * VB, \quad \text{για } i = 1,2,3 \Rightarrow$$

$$(V_i + \Delta V_i) - (V_j + \Delta V_j) \leq 0,9 * VB, \quad \text{για } i, j = 1,2,3 \text{ και } i \neq j \Rightarrow$$

$$\Delta V_i - \Delta V_j \leq 0,9 * VB - V_i + V_j, \quad \text{για } i, j = 1,2,3 \text{ και } i \neq j \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 - \Delta V_2 \\ \Delta V_1 - \Delta V_3 \\ \Delta V_2 - \Delta V_3 \\ \Delta V_2 - \Delta V_1 \\ \Delta V_3 - \Delta V_1 \\ \Delta V_3 - \Delta V_2 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} (0,9 * VB) - V_1 + V_2 \\ (0,9 * VB) - V_1 + V_3 \\ (0,9 * VB) - V_2 + V_3 \\ (0,9 * VB) - V_2 + V_1 \\ (0,9 * VB) - V_3 + V_1 \\ (0,9 * VB) - V_3 + V_2 \end{bmatrix}$$

Το επόμενο βήμα για το μετασχηματισμό της σχέσης (3) είναι να φέρουμε την παραπάνω μητρική ανισότητα στη μορφή $A * x \leq b$. Το δεύτερο μέλος της ανισότητας δείχνει να έχει βρεθεί, αρκεί να καταφέρουμε να φέρουμε το πρώτο μέλος στη μορφή $A * x$, όπου x

υπενθυμίζουμε ότι είναι το διάνυσμα στήλη των μεταβλητών του προβλήματος $x = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix}$.

Για να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα, πρέπει να συσχετίσουμε με κάποιον τρόπο τις μεταβολές στις τάσεις (ΔV_i) με τις μεταβολές στην άεργο ισχύ των αντιστροφών (ΔQ_i). Η συσχέτιση αυτή προκύπτει από τη σχέση (4) του προβλήματος μας, δηλαδή από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε και αναλύθηκε στην παράγραφο 6.4.2.

Από την ανάλυση προέκυψε ο πίνακας ευαισθησίας μέτρου τάσης ως προς άεργο ισχύ του δικτύου:

$$\left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right] = \begin{bmatrix} 0,0001132 & 0,0001138 & 0,0001141 \\ 0,0001118 & 0,0002048 & 0,0002056 \\ 0,0001080 & 0,0001978 & 0,0002875 \end{bmatrix}$$

Για να αποφύγουμε τη συνεχή χρήση των παραπάνω τιμών και να είναι πιο κατανοητά τα βήματα της μεθόδου που ακολουθούμε, θα ορίσουμε ένα όνομα για κάθε στοιχείο του πίνακα. Έτσι παίρνουμε:

$$\left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0001132 & 0,0001138 & 0,0001141 \\ 0,0001118 & 0,0002048 & 0,0002056 \\ 0,0001080 & 0,0001978 & 0,0002875 \end{bmatrix}$$

Οι μεταβολές των τάσεων είναι επομένως:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} * \Delta Q_1 + S_{12} * \Delta Q_2 + S_{13} * \Delta Q_3 \\ S_{21} * \Delta Q_1 + S_{22} * \Delta Q_2 + S_{23} * \Delta Q_3 \\ S_{31} * \Delta Q_1 + S_{32} * \Delta Q_2 + S_{33} * \Delta Q_3 \end{bmatrix}$$

Άρα, ο πίνακας των διαφορών τάσεων γίνεται:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 - \Delta V_2 \\ \Delta V_1 - \Delta V_3 \\ \Delta V_2 - \Delta V_3 \\ \Delta V_2 - \Delta V_1 \\ \Delta V_3 - \Delta V_1 \\ \Delta V_3 - \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{11} - S_{21}) * \Delta Q_1 + (S_{12} - S_{22}) * \Delta Q_2 + (S_{13} - S_{23}) * \Delta Q_3 \\ (S_{11} - S_{31}) * \Delta Q_1 + (S_{12} - S_{32}) * \Delta Q_2 + (S_{13} - S_{33}) * \Delta Q_3 \\ (S_{21} - S_{31}) * \Delta Q_1 + (S_{22} - S_{32}) * \Delta Q_2 + (S_{23} - S_{33}) * \Delta Q_3 \\ (S_{21} - S_{11}) * \Delta Q_1 + (S_{22} - S_{12}) * \Delta Q_2 + (S_{23} - S_{13}) * \Delta Q_3 \\ (S_{31} - S_{11}) * \Delta Q_1 + (S_{32} - S_{12}) * \Delta Q_2 + (S_{33} - S_{13}) * \Delta Q_3 \\ (S_{31} - S_{21}) * \Delta Q_1 + (S_{32} - S_{22}) * \Delta Q_2 + (S_{33} - S_{23}) * \Delta Q_3 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} S_{11} - S_{21} & S_{12} - S_{22} & S_{13} - S_{23} \\ S_{11} - S_{31} & S_{12} - S_{32} & S_{13} - S_{33} \\ S_{21} - S_{31} & S_{22} - S_{32} & S_{23} - S_{33} \\ S_{21} - S_{11} & S_{22} - S_{12} & S_{23} - S_{13} \\ S_{31} - S_{11} & S_{32} - S_{12} & S_{33} - S_{13} \\ S_{31} - S_{21} & S_{32} - S_{22} & S_{33} - S_{23} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = A * x$$

Καταφέραμε λοιπόν να μετασχηματίσουμε τη σχέση (3) στη μορφή $A * x \leq b$, και οι τελικοί πίνακες A και b που θα εισαχθούν ως ορίσματα στην συνάρτηση quadprog του MATLAB είναι:

$$A = \begin{bmatrix} S_{11} - S_{21} & S_{12} - S_{22} & S_{13} - S_{23} \\ S_{11} - S_{31} & S_{12} - S_{32} & S_{13} - S_{33} \\ S_{21} - S_{31} & S_{22} - S_{32} & S_{23} - S_{33} \\ S_{21} - S_{11} & S_{22} - S_{12} & S_{23} - S_{13} \\ S_{31} - S_{11} & S_{32} - S_{12} & S_{33} - S_{13} \\ S_{31} - S_{21} & S_{32} - S_{22} & S_{33} - S_{23} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} (0,9 * VB) - V_1 + V_2 \\ (0,9 * VB) - V_1 + V_3 \\ (0,9 * VB) - V_2 + V_3 \\ (0,9 * VB) - V_2 + V_1 \\ (0,9 * VB) - V_3 + V_1 \\ (0,9 * VB) - V_3 + V_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{όπου: } \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0001132 & 0,0001138 & 0,0001141 \\ 0,0001118 & 0,0002048 & 0,0002056 \\ 0,0001080 & 0,0001978 & 0,0002875 \end{bmatrix}$$

Οι μεταβλητές $VB, PF_{\min}, V_1, V_2, V_3, Q_1, Q_2, Q_3, P_1, P_2$ και P_3 και που υπάρχουν στους πίνακες-ορίσματα της συνάρτησης quadprog αναπαριστούν το Voltage Band, τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος των αντιστροφών και τις μετρούμενες τιμές των τάσεων, της αέργου ισχύος των αντιστροφών και της παραγόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής του δικτύου αντίστοιχα. Το VB και ο ελάχιστος συντελεστής ισχύος παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης, έτσι ορίζεται η τιμή τους μια φορά στην αρχή του αλγορίθμου που υλοποιήσαμε στο MATLAB. Αντίθετα, οι τάσεις και οι ισχείς του δικτύου μεταβάλλονται ανάλογα με την ηλιοφάνεια, τη ζήτηση φορτίου, τη θέση λήψης του μετασχηματιστή και τη ροής αέργου των αντιστροφών. Είναι επομένως απαραίτητο να ενημερώνονται με τις σωστές τιμές τους (μέσω της επικοινωνίας του MATLAB με το πρόγραμμα προσομοίωσης RSCAD, που θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο) πριν την κάθε κλήση της συνάρτησης quadprog.

6.5 Level Control

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει η αναλυτική παρουσίαση της λειτουργίας και της υλοποίησης του δεύτερου σταδίου του αλγορίθμου του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης, του Ελέγχου Επιπέδου Τάσεων (Level Control). Όπως έχουμε αναφέρει και στην συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας του αλγορίθμου, το στάδιο αυτό είναι υπεύθυνο για τον χειρισμό των λήψεων του μετασχηματιστή υπό φορτίο (on-load tap changer). Ελέγχει αν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί αλλαγή λήψης, αλλά και ποιά θα είναι η νέα αυτή λήψη.

6.5.1 Λειτουργία

Η λειτουργία του σταδίου Level Control ξεκινάει μόλις έχει ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο (Range Control). Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του Range Control έχει υπολογίσει τις απαραίτητες μεταβολές στις ροές αέργου ισχύος των αντιστροφών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και τους έχει στείλει εντολή για να προβούν στις μεταβολές αυτές. Η αλλαγή στην άεργο ισχύ που ρέει στο δίκτυο θα μεταβάλλει τις τιμές των τάσεων των ζυγών, και πιο συγκεκριμένα, θα πάρουν τέτοιες τιμές ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες του προβλήματος ελαχιστοποίησης που μελετήθηκε στην περιγραφή του Range Control σταδίου, δηλαδή η διαφορά της μέγιστης νέας τάσης από την ελάχιστη νέα τάση (Voltage Range) να είναι μικρότερη από το 90% της Ζώνης Τάσεων (Voltage Band), με τη χρησιμοποίηση της ελάχιστης δυνατής αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς. Η μόνη περίπτωση στην οποία δεν θα συμβαίνει αυτό είναι όταν οι τάσεις έχουν τόσο μεγάλη διασπορά, δηλαδή το VR είναι τόσο μεγάλο, που ακόμα και αν οι αντιστροφείς συνεισφέρουν με τη μέγιστη επιτρεπτή αέργου ισχύ τους για τη ρύθμιση των τάσεων δεν θα μπορέσει να ικανοποιηθεί η συνθήκη $VR < 0,9 * VB$ κατά την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης. Κάτι τέτοιο όμως είναι δύσκολο να συμβεί, καθώς η μεγάλη διασπορά στις τάσεις οφείλεται στη μεγάλη διείδυση των ανανεώσιμων πηγών, αλλά όσο μεγαλύτερη είναι η παραγόμενη ενεργός ισχύς από αυτές, τόσο μεγαλύτερα θα είναι και τα επιτρεπτά όρια άεργου ισχύος των αντιστροφών τους. Αν το στάδιο Range Control αποτυγχάνει όντως να ρυθμίσει τις τάσεις ώστε να ικανοποιούν την επιθυμητή αυτή συνθήκη, θα πρέπει να γίνουν κατάλληλες αλλαγές σε κάποιες παραμέτρους του δικτύου και του ελεγκτή (όπως ο ελάχιστος ΣΙ των αντιστροφών, τα επιτρεπτά όρια τάσης, κλπ).

Με την έναυση λοιπόν του σταδίου Level Control, και με την προϋπόθεση ότι το δίκτυο στο οποίο εφαρμόζουμε το σύστημα συντονισμένου ελέγχου τάσεων είναι καλά σχεδιασμένο, οι τάσεις των ζυγών θα έχουν τιμές οι οποίες θα ικανοποιούν τη συνθήκη $VR < 0,9 * VB$. Η συνθήκη όμως αυτή δεν εγγυάται ότι όλες οι τάσεις θα είναι εντός των επιτρεπτών ορίων που έχουμε θέσει ($\pm 5\%$ για το δικό μας δίκτυο), μόνο ότι η διαφορά της μέγιστης τάσης από την ελάχιστη θα τηρεί το επιθυμητό όριο. Η συνθήκη την οποία ελέγχει το στάδιο Level Control για να αποφασίσει αν χρειάζεται να γίνει αλλαγή στη θέση λήψης του μετασχηματιστή είναι ακριβώς αυτή, αν παραβιάζεται δηλαδή έστω το ένα από τα δύο όρια τάσης. Είναι πρακτικά αδύνατον να παραβιάζονται και τα δύο όρια ταυτόχρονα, καθώς έχει προηγηθεί το στάδιο του Range Control. Η μόνη περίπτωση που μπορεί να συμβεί αυτό είναι να έχει αποτύχει το Range Control να ικανοποιήσει τη συνθήκη $VR < 0,9 * VB$, το οποίο, όπως αναφέραμε παραπάνω, θα οφείλεται σε κακό σχεδιασμό του δικτύου.

Για τον έλεγχο της παραβίασης των ορίων της τάσης, το Level Control πρέπει να μετρά τις τιμές των τάσεων του δικτύου μετά την ολοκλήρωση του πρώτου σταδίου. Έχοντας λάβει αυτές τις τιμές, εντοπίζει την μέγιστη (V_{max}) την ελάχιστη (V_{min}) εξ' αυτών και προχωράει στους εξής ελέγχους:

- Είναι η $V_{max} > 1,05$ α.μ. (Upper Limit)?
- Είναι η $V_{min} < 0,95$ α.μ. (Lower Limit)?

Εαν και οι δύο έλεγχοι βγουν ψευδείς, τότε ο αλγόριθμος του κεντρικού ελεγκτή ολοκληρώνεται επιτυχώς, καθώς ο στόχος του έχει επιτευχθεί: όλες οι τάσεις βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων (στάδιο Level Control), με τη χρησιμοποίηση της ελάχιστης δυνατής αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς της διεσπαρμένης παραγωγής (στάδιο Range Control).

Εάν τουλάχιστον ένας από τους δύο ελέγχους βγει αληθής, το Level Control συμπεραίνει ότι πρέπει να γίνει αλλαγή στη θέση λήψης του μετασχηματιστή, έτσι ώστε να μετατοπιστεί το επίπεδο όλων των τάσεων και να είναι πλέον όλες εντός των επιτρεπτών ορίων. Για τον υπολογισμό της νέας θέσης λήψης του μετασχηματιστή, χρησιμοποιείται η ακόλουθη γραμμική εξίσωση:

$$V_{set} = V_{current} + (V_{UL} - V_{max} - \frac{VB - (V_{max} - V_{min})}{2}), \text{ όπου:}$$

- V_{UL} είναι η τάση του άνω επιτρεπτού ορίου (1,05 α.μ. για το δίκτυο μας)
- VB είναι το Voltage Band (άνω όριο τάσης μείον κάτω όριο τάσης)
- V_{max}, V_{min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τάση του δικτύου αντίστοιχα
- $V_{current}$ είναι η τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή
- V_{set} είναι η νέα επιθυμητή τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την νέα τιμή τάσης που θα πρέπει να λάβει το δευτερεύον του μετασχηματιστή, έτσι ώστε όλες οι τάσεις του δικτύου μετά την αλλαγή αυτή να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων και το περιθώριο ασφαλείας ($VB - VR$) να ισομοιράζεται στα διαστήματα [άνω όριο-μέγιστη τάση] και [κάτω όριο-ελάχιστη τάση]. Φυσικά, η επιτυχής ολοκλήρωση του σταδίου Range Control είναι απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να είναι εγγυημένη η επίτευξη αυτού του στόχου με τη λύση της εξίσωσης.

Επόμενο βήμα είναι να «μεταφραστεί» η τάση V_{set} στον αντίστοιχο απαραίτητο αριθμό αλλαγών λήψεων του μετασχηματιστή που χρειάζονται για να πάρει το δευτερεύον του τιμή τάσης όσο το δυνατόν πλησιέστερη σε αυτήν. Είναι προφανές ότι δεν είναι πάντα δυνατόν να επιτευχθεί η ακριβής τάση V_{set} στο δευτερεύον, διότι ο υπολογισμός της από την εξίσωση έχει συνεχές φάσμα τιμών, ενώ αντίθετα οι λήψεις του μετασχηματιστή έχουν διακριτές τιμές, με σταθερό βήμα. Για την εύρεση λοιπόν του απαραίτητου αριθμού αλλαγού λήψεων, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

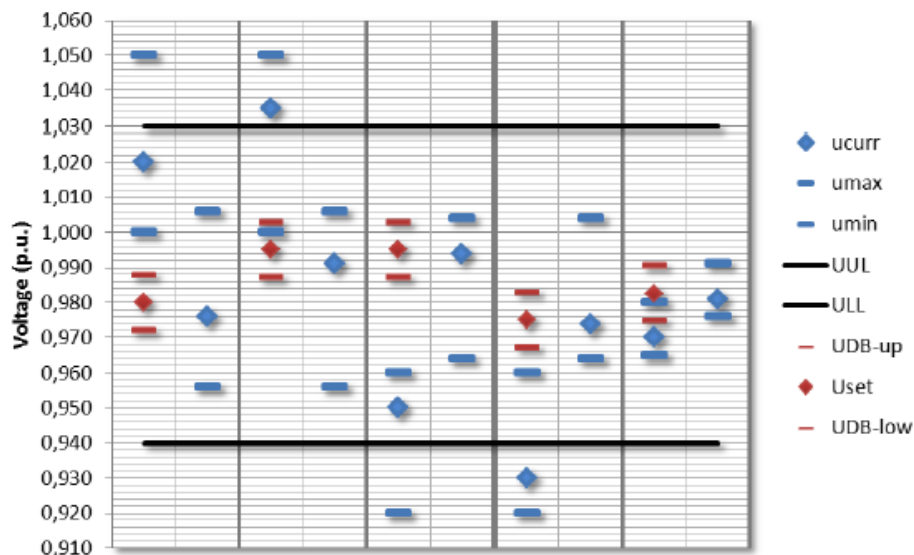
$$Tap\ Changes = round\left(\frac{V_{set} - V_{current}}{\text{βήμα λήψεων}}\right)$$

Η εξίσωση αυτή στρογγυλοποιεί σε ακέραιο αριθμό τον όρο $\frac{V_{set} - V_{current}}{\text{βήμα λήψεων}}$. Η διαφορά $V_{set} - V_{current}$ δείχνει, σε ανά μονάδα τιμή, το σφάλμα μεταξύ της παρούσας τιμής της τάσης του δευτερεύοντος $V_{current}$ και της επιθυμητής τιμής της V_{set} . Διαιρώντας τη διαφορά αυτή με το βήμα λήψεων του μετασχηματιστή (0,01 α.μ. για τον μετασχηματιστή του δικτύου που υλοποιήσαμε εμείς), προκύπτει ένας πραγματικός αριθμός που δείχνει τον αριθμό των λήψεων που της αντιστοιχούν, δηλαδή πόσες αλλαγές λήψης πρέπει να γίνουν για να μηδενιστεί το σφάλμα (θετική τιμή αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες θέσεις λήψεων ενώ αρνητική τιμή σε μικρότερες). Όμως, επειδή οι λήψεις του μετασχηματιστή έχουν διακριτές τιμές, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, πρέπει να στρογγυλοποιηθεί ο πραγματικός αυτός αριθμός στον κοντινότερο ακέραιο. Τελικώς, τα πιθανά αποτελέσματα της εξίσωσης είναι:

- $Tap\ Changes = 0$: Δεν χρειάζεται να γίνει αλλαγή θέσης λήψης του μετασχηματιστή
- $Tap\ Changes = k$, k θετικός ακέραιος: Χρειάζεται να γίνουν k αλλαγές θέσεων λήψης προς μεγαλύτερες τιμές (αύξηση τάσεων)
- $Tap\ Changes = -k$, k θετικός ακέραιος: Χρειάζεται να γίνουν k αλλαγές θέσεων λήψης προς μικρότερες τιμές (μείωση τάσεων)

Τελευταίο βήμα του σταδίου Level Control είναι να στείλει την τιμή της μεταβλητής Tap Changes στο σύστημα χειρισμού λήψεων του μετασχηματιστή ώστε να γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές και να μετατοπιστούν όλες οι τάσεις του δικτύου εντός των επιτρεπτών ορίων. Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται επιτυχώς ο αλγόριθμος του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης.

Στην εικόνα 6.11 παρουσιάζονται πέντε παραδείγματα (ένα σε κάθε στήλη) της λειτουργίας του σταδίου Level Control.



Εικόνα 6.11 Παραδείγματα λειτουργίας Level Control [16]

Από τα παραδείγματα παρατηρούμε ότι μετά την ολοκλήρωση της αλλαγής θέσης λήψης, η τάση του δευτερεύοντος (*ucurr*) δεν συμπίπτει ακριβώς με την επιθυμητή τιμή που προκύπτει από την εξίσωση (*Uset*), γεγονός που όπως εξηγήσαμε οφείλεται στις διακριτές τιμές των λήψεων του μετασχηματιστή σε σχέση με το συνεχές φάσμα τιμών της *Uset*.

Επίσης παρατηρούμε ότι το στάδιο Level Control μετατοπίζει όλο το φάσμα των τάσεων σε ένα νέο επίπεδο, αλλά δεν επηρεάζει τη διασπορά τους. Αυτό είναι κομμάτι της λειτουργίας του πρώτου σταδίου (Range Control), γι' αυτό και είναι απαραίτητο να προηγείται χρονικά του Level Control, ώστε μετά την αλλαγή στη θέση λήψης, το φάσμα των τάσεων να «χωράει» ολόκληρο εντός των επιτρεπτών ορίων.

6.5.2 Υλοποίηση στο MATLAB-RSCAD

Αρχική επιθυμία μας ήταν να υλοποιηθεί ολόκληρος ο αλγόριθμος του συστήματος συντονισμένου ελέγχου στο MATLAB, έτσι ώστε να αποτελεί ξεχωριστό κομμάτι από το δίκτυο που είναι υλοποιημένο στο RSCAD. Αυτό θα έδινε τη δυνατότητα να μπορεί να θεωρηθεί το όλο πείραμα ως προσομοίωση Software in the Loop, δηλαδή έλεγχος σε πραγματικό χρόνο της λειτουργίας ενός ελεγκτή σε συνθήκες που προσομοιώνουν ένα πραγματικό δίκτυο. Δυστυχώς, στην πορεία συνειδητοποιήσαμε ότι ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου του μετασχηματιστή με δυνατότητα αλλαγής λήψεων υπό φορτίο του RSCAD μας αποτρέπει από το να υλοποιήσουμε ολόκληρο το σύστημα ελέγχου του στο MATLAB. Συνεπώς, το στάδιο Level Control έχει υλοποιηθεί σε δύο τμήματα, ένα στο MATLAB και ένα στο RSCAD.

Ο λόγος για τον οποίο δεν μπορούμε να υλοποιήσουμε το σύστημα ελέγχου αλλαγής λήψεων του μετασχηματιστή στο MATLAB είναι ο εξής. Το μοντέλο του μετασχηματιστή διαθέτει δύο εισόδους για τα σήματα ελέγχου των λήψεων, μια για αλλαγή της λήψης προς τα κάτω και μια για αλλαγή της λήψης προς τα πάνω. Το σήμα που πρέπει να εφαρμοστεί στις εισόδους αυτές για να πυροδοτήσει τις αλλαγές λήψης πρέπει να είναι ένα ακέραιο σήμα με μεταβολή της τιμής του από το μηδέν στη μονάδα. Εάν επιθυμούμε δηλαδή μια μεταβολή της θέσης λήψης κατά δύο θέσης πάνω, πρέπει να εφαρμόσουμε στη θύρα εισόδου up ένα σήμα το οποίο θα έχει αρχική τιμή 0, στη συνέχεια θα παίρνει την τιμή 1 (πρώτη αλλαγή λήψης), μετά θα πρέπει να επιστρέφει στο 0 και τέλος να ξαναπαίρνει την τιμή 1 (δεύτερη αλλαγή λήψης). Η δημιουργία ενός τέτοιου σήματος στο MATLAB και εν συνεχεία η αποστολή του στο RSCAD δεν ήταν δυνατή με τον τρόπο επικοινωνίας που έχουμε στη διάθεση μας για τη σύνδεση των δύο προγραμμάτων. Περισσότερα για το σύστημα επικοινωνίας θα παρουσιαστούν στην επόμενη παράγραφο.

Το ιδανικότερο σενάριο θα ήταν να είχε τη δυνατότητα το μοντέλο του μετασχηματιστή στο RSCAD να δέχεται έναν ακέραιο αριθμό στην είσοδο ελέγχου του και να προβαίνει σε τόσες αλλαγές θέσης λήψης όσες και ο αριθμός αυτός. Στην περίπτωση αυτή, θα υλοποιούσαμε όλο το στάδιο Level Control στο MATLAB, ακριβώς όπως το περιγράψαμε στην παράγραφο 6.5.1, και θα στέλναμε στο RSCAD την τιμή της μεταβλητής Tap Changes. Εάν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αυτή η ιδανική υλοποίηση είναι ισοδύναμη με αυτήν που πραγματοποιήσαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς ο περιορισμός που παρουσιάζεται οφείλεται στα χαρακτηριστικά ενός μοντέλου και όχι σε ένα πραγματικό φαινόμενο, τότε μπορούμε τελικώς να χαρακτηρίσουμε το πείραμα μας ως προσομοίωση Software in the Loop.

Τμήμα υλοποίησης στο MATLAB

Το τμήμα του σταδίου Level Control που αναπτύχθηκε στο MATLAB αφορά τη μέτρηση των τιμών των τάσεων του δικτύου, μετά την ολοκλήρωση του σταδίου Range Control, την εύρεση της μέγιστης (V_{max}) και ελάχιστης (V_{min}) τάσης και τον έλεγχο των συνθηκών παραβίασης των επιτρεπτών ορίων. Αν δεν παραβιάζεται κανένα από τα δύο όρια, τότε δεν στέλνεται σήμα προς το RSCAD για αλλαγή θέσης λήψης του μετασχηματιστή και ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται. Αντίθετα, αν παραβιάζεται κάποιο όριο, το MATLAB στέλνει σήμα στο RSCAD ότι πρέπει να γίνει αλλαγή στη θέση λήψης. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε στο MATLAB και υλοποιεί τις παραπάνω λειτουργίες είναι ο ακόλουθος:

```
Vnew(1,k)= ReadMeter('Arms',JTCPOBJ);
Vnew(2,k)= ReadMeter('Brms',JTCPOBJ);
Vnew(3,k)= ReadMeter('Crms',JTCPOBJ);

MAX=max([Vnew(1,k) Vnew(2,k) Vnew(3,k)]);
MIN=min([Vnew(1,k) Vnew(2,k) Vnew(3,k)]);

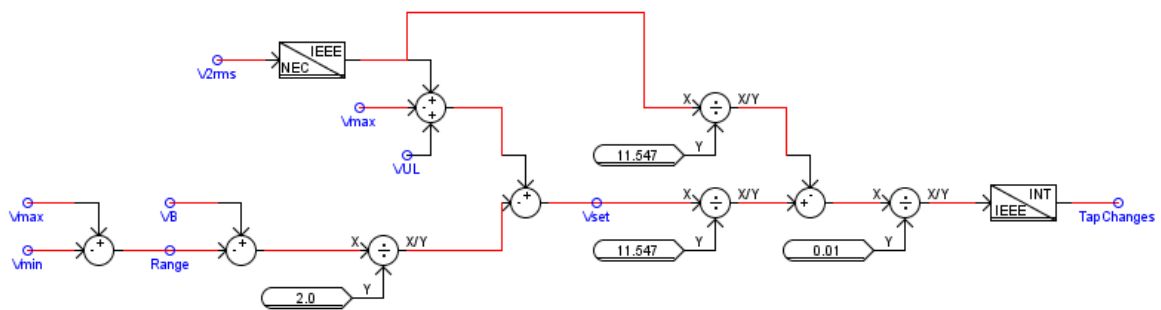
if MAX>=UL
msg2 = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : ULC" = %f; ',1);
jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2);
end
if MIN<=LL
msg2 = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : LLC" = %f; ',1);
jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2);
end
```

Οι συναρτήσεις ReadMeter και jtcp αφορούν την επικοινωνία μεταξύ του MATLAB και του RSCAD και θα αναλυθούν στην επόμενη παράγραφο.

Τμήμα υλοποίησης στο RSCAD

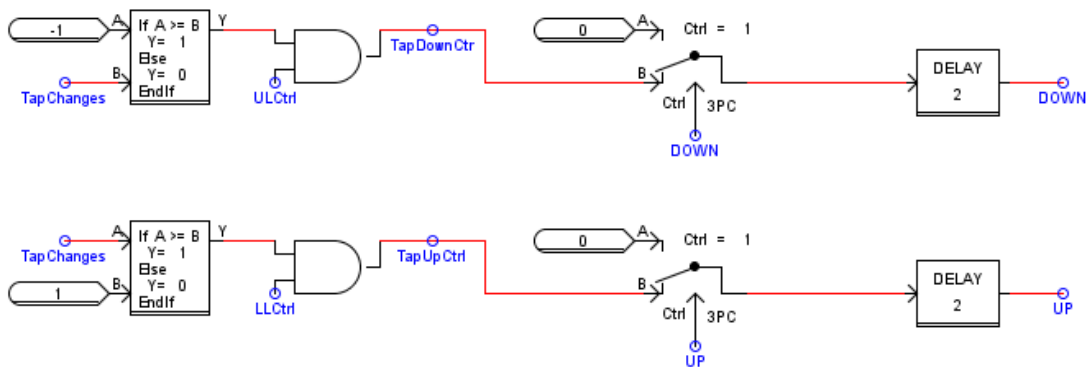
Το τμήμα του σταδίου Level Control που αναπτύχθηκε στο RSCAD αφορά τον υπολογισμό της νέας θέσης λήψης που πρέπει να λάβει το δευτερεύον του μετασχηματιστή, καθώς και τη δημιουργία των κατάλληλων σημάτων που θα εφαρμόζονται στις θύρες εισόδου του.

Το κύκλωμα που παρουσιάζεται στην εικόνα 6.12 είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της μεταβλητής Tap Changes που αναλύθηκε στην παράγραφο 6.5.1. Η εξίσωση υπολογισμού του V_{set} είναι ενσωματωμένη στο ίδιο κύκλωμα. Η μεταβλητή V_{2rms} είναι η τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, δηλαδή η αντίστοιχη μεταβλητή $V_{current}$ των εξισώσεων. Οι διαιρέσεις με την τιμή 11,547 είναι για να υπολογιστούν οι ανά μονάδα τιμές των τάσεων (11,547 kV είναι η ονομαστική φασική μέση τάση $[20kV/\sqrt{3}]$). Το στοιχείο *IEEE/INT* μετατρέπει την τιμή εισόδου του από πραγματική σε ακέραια, μοντελοποιώντας ουσιαστικά τη στρογγυλοποίηση του όρου $\frac{V_{set}-V_{current}}{\text{βήμα λήψεων}}$.



Εικόνα 6.12 Κύκλωμα υπολογισμού του αριθμού των απαραίτητων αλλαγών της θέσης λήψης του μετασχηματιστή

Στην επόμενη εικόνα (6.13) παρουσιάζονται τα κυκλώματα δημιουργίας των κατάλληλων σημάτων προς τις θύρες εισόδου του μετασχηματιστή για τις αλλαγές της θέσης λήψης του. Η λογική της λειτουργίας τους θα εξηγηθεί για το πάνω κύκλωμα της εικόνας, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του σήματος για μείωση της θέσης λήψης, αλλά ακριβώς αντίστοιχος είναι και ο τρόπος λειτουργίας του κάτω κυκλώματος, που αφορά τη δημιουργία του σήματος για αύξηση της θέσης λήψης.



Εικόνα 6.13 Κυκλώματα δημιουργίας σημάτων προς τις θύρες εισόδου του μετασχηματιστή για την επίτευξη των αλλαγών της θέσης λήψης του

Αρχικά ελέγχεται αν η μεταβλητή TapChanges είναι μικρότερη ή ίση από -1. Εάν είναι, που σημαίνει ότι χρειάζεται να γίνει τουλάχιστον μια αλλαγή (αλλά μπορεί και παραπάνω) της θέσης λήψης προς τα κάτω, τότε το πρώτο σήμα εισόδου της λογικής πύλης AND που ακολουθεί γίνεται 1.

Το δεύτερο σήμα εισόδου της πύλης AND προέρχεται από το MATLAB. Εάν ο έλεγχος παραβίασης του άνω ορίου που γίνεται στο MATLAB είναι θετικός, τότε το σήμα ελέγχου ULCtrl παίρνει την τιμή 1 και ουσιαστικά δίνει τη δυνατότητα στο σήμα εξόδου του ελέγχου της μεταβλητής TapChanges να διέλθει από την πύλη AND. Υπενθυμίζουμε ότι η έξοδος της πύλης AND γίνεται 1 μόνο όταν και οι 2 εισοδοί της είναι 1.

Η μεταβλητή TapDownCtr παίρνει επομένως την τιμή 1 (από την αρχική τιμή της που ήταν 0) όταν και μόνο όταν η μεταβλητή TapChanges πληρεί το κριτήριο $\text{TapChanges} \geq 1$ και ο έλεγχος παραβίασης του άνω ορίου τάσης είναι θετικός. Η μεταβολή αυτή στην τιμή της μεταβλητής TapDownCtr διέρχεται μέσα από ένα στοιχείο χρονικής καθυστέρησης 2 δευτερολέπτων, η οποία μοντελοποιεί το χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένας πραγματικός μετασχηματιστής για να αλλάξει τη λήψη του κατά μια θέση, και αποθηκεύεται στη μεταβλητή DOWN. Η μεταβλητή DOWN τώρα είναι αυτή που εφαρμόζεται στην θύρα εισόδου “dn” του μετασχηματιστή και θα πυροδοτήσει την μείωση της λήψης του κατά μια θέση.

Παράλληλα, η DOWN εφαρμόζεται και στη θύρα ελέγχου ενός επιλογέα σήματος (Ctrl 3PC), ο οποίος, για όση διάρκεια η μεταβλητή αυτή έχει την τιμή 1, θα «κόβει» τη μεταβλητή TapDownCtr και αντ’ αυτού θα επιτρέπει σε ένα ακέραιο σήμα μηδενικής τιμής να φτάνει (έπειτα από τη χρονική καθυστέρηση 2 δευτερολέπτων) στη μεταβλητή DOWN, αλλάζοντας την τιμή της από 1 σε 0. Αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο ώστε να διασφαλίζεται ότι το σήμα που εφαρμόζεται στη θύρα εισόδου του μετασχηματιστή θα μηδενίζεται μετά την αλλαγή της θέσης λήψης του, έτσι ώστε σε περίπτωση που πρέπει να γίνουν κι άλλες αλλαγές θέσης, να βρίσκεται σε μηδενική αρχική κατάσταση για να μπορεί να πυροδοτηθεί εκ νέου από τον επόμενο παλμό.

Καθώς αλλάζει η θέση λήψης του μετασχηματιστή την πρώτη φορά, το κύκλωμα υπολογισμού της μεταβλητής TapChanges, το οποίο λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο αφού είναι κομμάτι του RSCAD, θα μετράει νέες τιμές για την τάση του δευτερεύοντος, και για τη μέγιστη και ελάχιστη τάση. Επομένως, η μεταβλητή TapChanges θα παίρνει νέα τιμή, και συγκεκριμένα θα αυξάνεται κατά 1, καθώς πλέον θα χρειάζονται κατά 1 λιγότερες αλλαγές προς τα κάτω ώστε να γίνει η τάση του δευτερεύοντος ίση με τη V_{set} .

Η νέα αυξημένη τιμή της μεταβλητής TapChanges ελέγχεται πάλι αν είναι μικρότερη ή ίση από -1 και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η μεταβλητή αυτή πάρει την τιμή 0, δηλαδή όταν δε θα χρειάζονται πλέον άλλες αλλαγές στη λήψη του μετασχηματιστή.

Σημειώνεται εδώ ότι ο έλεγχος παραβίασης των ορίων της τάσης στο MATLAB πραγματοποιείται μόνο μια φορά, δηλαδή η μεταβλητή ULCtrl διατηρεί την τιμή της μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι απαραίτητες αλλαγές στη θέση λήψης. Αυτό είναι επιθυμητό να συμβαίνει, καθώς αυτή είναι η λογική λειτουργίας του σταδίου Level Control. Ελέγχει στην αρχή της εκτέλεσης του αν παραβιάζονται τα όρια, και αν ναι, υπολογίζει τη νέα επιθυμητή θέση λήψης και στέλνει στον μετασχηματιστή εντολή να μεταβεί σε αυτή.

Όταν ολοκληρωθεί όλη η διαδικασία για τη μετάβαση της λήψης του μετασχηματιστή στη νέα επιθυμητή θέση και η μεταβλητή TapChanges έχει πάρει την τιμή 0, το στάδιο Level Control ολοκληρώνεται επιτυχώς και ο αλγόριθμος του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης τίθεται σε ετοιμότητα για να εκτελεστεί εκ νέου από την αρχή, όταν κριθεί σκόπιμο.

6.6 Επικοινωνία MATLAB-RSCAD

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα για την επιτυχή πραγματοποίηση του συγκεκριμένου πειράματος είναι η απαραίτητη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του RSCAD, στο οποίο προσομοιώνεται το δίκτυο μέσης τάσης το οποίο έχουμε αναπτύξει, και του MATLAB, στο οποίο προσομοιώνεται ο αλγόριθμος του κεντρικού ελεγκτή του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης.

Η σύνδεση και η επικοινωνία τους για προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο είχε πραγματοποιηθεί και στο παρελθόν στο εργαστήριο ΣΗΕ της σχολής ΗΜΜΥ του Ε.Μ.Π., σε προγενέστερα πειράματα, επομένως δεν ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί όλη από την αρχή, μόνο να προσαρμοστεί κατάλληλα στις απαιτήσεις της δικής μας προσομοίωσης.

Η επικοινωνία τους πραγματοποιείται μέσω σύνδεσης δικτύου, είτε τοπική (Local Area Connection), είτε μέσω του διαδικτύου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα δύο προγράμματα μπορεί να εκτελούνται σε διαφορετικούς υπολογιστές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Φυσικά, η δυνατότητα αυτή έρχεται με ένα κόστος σε χρονική καθυστέρηση της επικοινωνίας τους και πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν. Η δική μας επιλογή ήταν να «τρέχουν» και τα δύο προγράμματα στον ίδιο υπολογιστή, έτσι ώστε να μειωθούν στο απολύτως ελάχιστο οι χρονικές καθυστερήσεις και για να είναι πιο εύκολος ο εποπτικός έλεγχος τους από ένα άτομο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των προσομοιώσεων.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή πακέτων δεδομένων μεταξύ των δύο προγραμμάτων είναι το TCP/IP, δηλαδή το πιο ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο δικτυακής επικοινωνίας. Η χρήση του πρωτοκόλλου αυτού επιφέρει την αναγκαιότητα της ύπαρξης ενός διακομιστή (server) και ενός πελάτη (client). Ο διακομιστής είναι εκείνο το στοιχείο του δικτύου που προσφέρει κάποια υπηρεσία (π.χ. μια ιστοσελίδα) και ο πελάτης είναι το στοιχείο που ζητά πρόσβαση σε αυτή την υπηρεσία. Όσον αφορά τη σύνδεση των δύο προγραμμάτων για την υλοποίηση του πειράματος μας, ως διακομιστής θα θεωρείται το RSCAD και ως πελάτης το MATLAB.

Το RSCAD, ως διακομιστής, εκτελεί τον μικρό κώδικα που παρουσιάζεται παρακάτω για να «ανοίξει» μια συγκεκριμένη θύρα επικοινωνίας (Port) με το υπόλοιπο δίκτυο, μέσω της εντολής `ListenOnPort(8085, true)`, και στη συνέχεια περιμένει να του ζητηθεί πρόσβαση στις υπηρεσίες του από κάποιον πελάτη (το MATLAB στη συγκεκριμένη περίπτωση). Οι δύο μεταβλητές `temp_float` και `temp_string` που ορίζονται στην αρχή του κώδικα είναι εκείνες που παίρνουν τις τιμές των δεδομένων που εισέρχονται ή εξέρχονται από τη θύρα. Με τις εντολές `fprintf` τυπώνεται μήνυμα στον χρήστη του RSCAD ότι έγινε έναρξη της προσομοίωσης και ότι η θύρα επικοινωνίας με τους clients έκλεισε.

```
float temp_float;
string temp_string;

fprintf(stdmsg, "Initialization of RTDS simulation");

ListenOnPort(8085, true);

fprintf(stdmsg, "Execution of script is done\n");
```

Ο κορμός της επικοινωνίας των δύο προγραμμάτων είναι ένας μεγάλος αλγόριθμος που εκτελείται στο MATLAB, ο οποίος διαχειρίζεται όλες τις παραμέτρους που σχετίζονται με αυτήν. Βασικότερες λειτουργίες του είναι η έναρξη και ο τερματισμός της σύνδεσης τους, καθώς και η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Ο αλγόριθμος αυτός έχει δοθεί αυτούσιος

στο εργαστήριο ΣΗΕ του Ε.Μ.Π. από την εταιρεία που έχει κατασκευάσει τον ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου του εργαστηρίου, την RTDS Technologies Inc., ακριβώς για αυτόν τον σκοπό. Η λειτουργία του αλγορίθμου επιτυγχάνει έναν μη συμβατικό τρόπο επικοινωνίας server-client. Κανονικά, στα τυπικά δίκτυα επικοινωνιών, οι clients απλά ζητούν πρόσβαση στις υπηρεσίες και τους πόρους του διακομιστή και εκείνος αποφασίζει αν θα τις εκπληρώσει. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αλλάζει τις ισορροπίες στην επικοινωνία server-client των δύο προγραμμάτων καθώς είναι εκείνος που δίνει τις εντολές στο RSCAD για το τι να κάνει και πότε, παρ' όλο που αποτελεί κομμάτι του MATLAB, δηλαδή του client.

Οι βασικές λειτουργίες του υλοποιούνται με την κλήση των ακόλουθων συναρτήσεων:

- $JTCPOBJ = jtcp('REQUEST', Host, Port)$: Εντοπίζει την θύρα επικοινωνίας (Port) που έχει ανοίξει σε προγενέστερο χρόνο το RSCAD και συνδέεται μαζί του μέσω αυτής. Παράλληλα, αποθηκεύει στη μεταβλητή $JTCPOBJ$ όλη την απαραίτητη πληροφορία σχετικά με τη θύρα επικοινωνίας που χρειάζονται οι υπόλοιπες συναρτήσεις του αλγορίθμου.
- $jtcp('close', JTCPOBJ)$: Σηματοδοτεί τον τερματισμό της σύνδεση server-client και δίνει εντολή να κλείσει η θύρα επικοινωνίας.
- $jtcp('writes', JTCPOBJ, msg)$: Στέλνει την πληροφορία που περιέχεται στη μεταβλητή msg προς το RSCAD μέσω της θύρας επικοινωνίας των δύο προγραμμάτων.
- $rmsg = jtcp('read', JTCPOBJ)$: Διαβάζει την πληροφορία που έχει σταλεί από το RSCAD μέσω της θύρας επικοινωνίας και την αποθηκεύει σε μια μεταβλητή ($rmsg$).

Στη συνέχεια θα περιγραφεί αναλυτικότερα πώς επιτυγχάνεται η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο προγραμμάτων με τη χρήση των ανωτέρω συναρτήσεων.

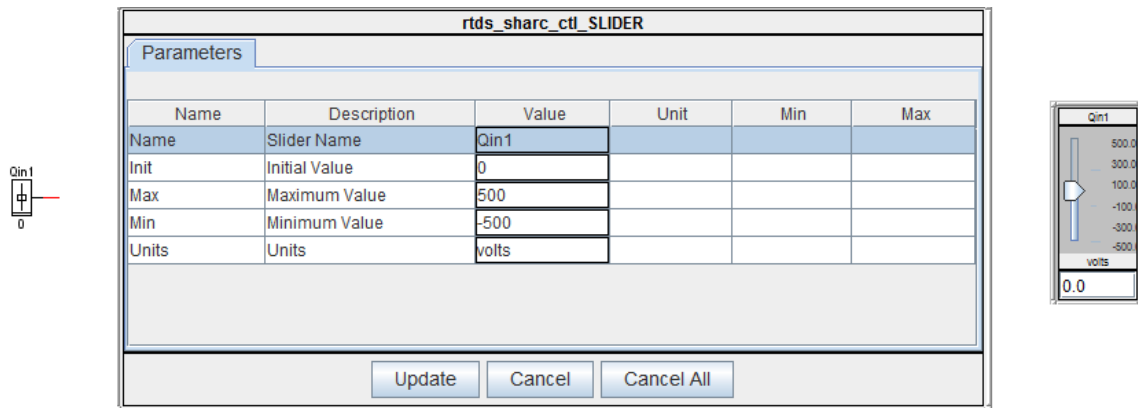
Αποστολή δεδομένων από το MATLAB στο RSCAD

Όταν εκτελείται μια προσομοίωση στο RSCAD και επιθυμούμε να επιφέρουμε μια μεταβολή σε κάποια παράμετρο του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, χωρίς δηλαδή να τερματιστεί η προσομοίωση για να γίνουν οι αντίστοιχες αλλαγές στο δίκτυο, τότε είναι απαραίτητο η παράμετρος που θέλουμε να μεταβάλλουμε να δέχεται τις τιμές της από κάποιο στοιχείο μεταβλητής εξόδου, την οποία να μπορούμε να ελέγχουμε από το περιβάλλον RUNTIME του RSCAD. Τέτοια στοιχεία είναι οι διακόπτες (switches), τα κουμπιά (buttons), τα καντράν (dials) και οι ολισθητές (sliders). Αυτά τα στοιχεία μας δίνουν τη δυνατότητα να αλλάζουμε χειροκίνητα την τιμή εξόδου τους ενώ εκτελείται η προσομοίωση, επιτυγχάνοντας τις επιθυμητές μεταβολές στις παραμέτρους του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Ένα παράδειγμα χρησιμοποίησης ενός τέτοιου στοιχείου πραγματοποιήθηκε κατά την εκτέλεση του πειράματος τοπικού ελέγχου σε μικροδίκτυο χαμηλής τάσης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5, κατά την οποία ελέγχαμε την κατάσταση λειτουργίας του μικροδικτύου (συνδεδεμένη ή νησιδοποιημένη) μέσω ενός διακόπτη στο περιβάλλον RUNTIME.

Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι για να μπορούν τα δεδομένα που αποστέλλονται από το MATLAB στο RSCAD να μεταβάλλουν σε πραγματικό χρόνο τις παραμέτρους του προσομοιωμένου δικτύου, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν στοιχεία μεταβλητής εξόδου ελεγχόμενα από το RUNTIME, όπως αυτά που περιγράφηκαν παραπάνω. Τα

στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση μας ήταν οι ολισθητές (sliders), οι οποίοι έχουν ως έξοδο συνεχές φάσμα πραγματικών αριθμών, με αρχική τιμή και άνω και κάτω όρια που ορίζονται στο παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων τους στο RSCAD.

Ένας ολισθητής, το παράθυρο παραμέτρων του αλλά και η αναπαράσταση του στο περιβάλλον RUNTIME, όπου μπορούμε να μεταβάλλουμε την τιμή εξόδου του, παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 6.14 Κυκλωματικό στοιχείο για τον ολισθητή, το αντίστοιχο παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων του καθώς και η αναπαράστασή του στο RUNTIME για μεταβολή της τιμής εξόδου του

Φυσικά, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της συγκεκριμένης προσομοίωσης, οι μεταβολές στους ολισθητές δε θα γίνονται χειροκίνητα, αλλά ο αλγόριθμος επικοινωνίας μεταξύ MATLAB και RSCAD είναι εκείνος που θα δίνει εντολή στους ολισθητές να πάρουν τις νέες επιθυμητές τιμές, οι οποίες θα υπολογίζονται από τον αλγόριθμο του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης που έχουμε αναπτύξει στο MATLAB.

Για να γίνει πιο κατανοητή αυτή η λειτουργία, θα χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα τις τιμές για τις ροές αέργου ισχύος των αντιστροφών του δικτύου, όπως αυτές υπολογίζονται μετά την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης που αναλύθηκε στην παράγραφο 6.4. Οι νέες τιμές για την άεργο ισχύ των αντιστροφών, οι οποίες υπολογίζονται στο MATLAB, πρέπει να σταλούν σε πραγματικό χρόνο στο RSCAD έτσι ώστε να ενημερωθούν τα μοντέλα των αντιστροφών με τις νέες αυτές τιμές και να επέλθουν οι αντίστοιχες μεταβολές στις τάσεις του δικτύου. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται η συνάρτηση `jtcp('writes',JTCPOBJ,msg)` που παρουσιάσαμε προηγουμένως. Το κρίσιμο σημείο εδώ είναι η κατασκευή της μεταβλητής `msg` που θα περιέχει τις νέες τιμές και θα σταλεί στο RSCAD ώστε να μεταβληθούν οι κατάλληλοι ολισθητές. Η μεταβλητή `msg` είναι μια ακολουθία χαρακτήρων (string) και η σύνταξή της πρέπει να είναι η ακόλουθη:

```
msg = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Qin1" = %f;
SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Qin2" = %f; SetSlider "Subsystem
#1 : CTLs : Inputs : Qin3" = %f; ', Qnew(1,1), Qnew(2,1), Qnew(3,1));
```

Στη συνέχεια, καλείται η συνάρτηση `jtcp('writes',JTCPOBJ,msg)` και ο αλγόριθμος επικοινωνίας MATLAB-RSCAD στέλνει την κατάλληλη εντολή στο περιβάλλον RUNTIME, ώστε οι ολισθητές με ονόματα `Qin1`, `Qin2` και `Qin3` να μεταβούν στις τιμές `Qnew(1,1)`, `Qnew(2,1)` και `Qnew(3,1)` αντίστοιχα. Προφανώς, στις τρεις αυτές μεταβλητές `Qnew(1,1)`, `Qnew(2,1)` και `Qnew(3,1)` έχουν αποθηκευτεί οι νέες τιμές για τις ροές αέργου ισχύος των αντιστροφών που προκύπτουν ως το άθροισμα των προηγούμενων τιμών τους Q_i με τις μεταβολές ΔQ_i που υπολογίζονται από την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης με τη συνάρτηση `quadprog`, δηλαδή: $Q_{new}(i,1)=Q_i+\Delta Q_i$.

Το συνολικό πλήθος όλων των παραμέτρων που δέχονται τις τιμές τους από το MATLAB κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, και επομένως το πλήθος των απαραίτητων ολισθητών, είναι 7. Αυτές είναι:

- Τα σήματα ελέγχου ULC (Upper Limit Control) και LLC (Lower Limit Control) που υπολογίζονται στο στάδιο Level Control του αλγορίθμου συντονισμένου ελέγχου τάσης (παράγραφος 6.5) και αφορούν την παραβίαση (τιμή 1) ή όχι (τιμή 0) του άνω και κάτω επιτρεπτού ορίου τάσης αντίστοιχα. Τα σήματα αυτά οδηγούνται στα κυκλώματα παραγωγής των κατάλληλων σημάτων για την αλλαγή θέσης λήψης του μετασχηματιστή.
- Οι ροές αέργου ισχύος των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών Qin1, Qin2 και Qin3. Αποτελούν βασικό κομμάτι της λειτουργίας του συντονισμένου ελέγχου τάσης και οι τιμές τους υπολογίζονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του σταδίου Range Control (παράγραφος 6.4), με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.
- Οι ανά μονάδα τιμές ηλιοφάνειας και ζήτησης οικιακού φορτίου Insolin και Loadin. Καθώς δεν υπήρχε δυνατότητα λήψης δεδομένων για αυτές τις παραμέτρους σε πραγματικό χρόνο από κάποιο άλλο μέσο, χρησιμοποιήθηκαν και πάλι δεδομένα που προέκυψαν από τη δειγματοληψία καμπυλών αναφοράς ημερήσιας ηλιοφάνειας και ημερήσια ζήτησης φορτίου, όπως και στην προσομοίωση του κεφαλαίου 5. Ο αριθμός των δειγματοληπτημένων τιμών αυξήθηκε για αυτό το πείραμα στις 96, ο οποίος αντιστοιχεί σε τιμές ανά 15 λεπτά ενός πραγματικού 24ώρου. Η άυξηση των δειγματοληπτημένων τιμών από 24, που είχαμε χρησιμοποιήσει στο πείραμα του κεφαλαίου 5, σε 96 ήταν εφικτός διότι πλέον υπήρχε η δυνατότητα αποθήκευσης και εποπτείας όλων των παραμέτρων στο MATLAB, αντί να μας περιορίζουν οι δυνατότητες του RSCAD.

Αποστολή δεδομένων από το RSCAD στο MATLAB

Για να πραγματοποιηθεί η αντίθετη ροή δεδομένων, δηλαδή να διαβάσει το MATLAB κάποιες τιμές παραμέτρων που υπάρχουν στο περιβάλλον RUNTIME κατά την διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης, χρειάζεται να έχουν προηγηθεί κάποια βήματα.

Αρχικά, όλες τις τιμές που επιθυμούμε να διαβάσει το MATLAB πρέπει να υπάρχουν σε μετρητές (meters) στο περιβάλλον RUNTIME. Οι μετρητές είναι κάποια στοιχεία που δείχνουν σε κάθε χρονική στιγμή την αριθμητική τιμή που έχει η επιλεγμένη μεταβλητή του δικτύου. Στη συνέχεια, πρέπει να δοθεί η κατάλληλη εντολή από τον κεντρικό αλγόριθμο επικοινωνίας των δύο προγραμμάτων ώστε η τιμή του μετρητή που πρέπει να διαβαστεί να αποθηκευτεί σε μια προσωρινή μεταβλητή του RSCAD (την temp_float που έχουμε αναφέρει στην αρχή της παραγράφου). Τέλος, με μια ακόμα εντολή του κεντρικού αλγορίθμου επικοινωνίας, γίνεται διάβασμα της προσωρινής αυτής μεταβλητής και η τιμή της στέλνεται μέσω της θύρας επικοινωνίας στο MATLAB, όπου και αποθηκεύεται.

Μια σημαντική διαφορά που παρουσιάζει η αποστολή τιμών από το RSCAD στο MATLAB σε σχέση με την αντίθετη κατεύθυνση αποστολής, είναι ότι οι τιμές πρέπει να αποστέλλονται και να διαβάζονται μία-μία. Δηλαδή, η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως πρέπει να επαναλαμβάνεται κάθε φορά που χρειάζεται να γίνει η μεταφορά μιας τιμής από το RSCAD στο MATLAB. Αντίθετα, για την αντίστροφη αποστολή δεδομένων είδαμε ότι μπορούμε να αλλάζουμε τις τιμές όσων ολισθητών του RSCAD επιθυμούμε με μια μόνο εντολή του κεντρικού αλγορίθμου. Επειδή λοιπόν η διαδικασία

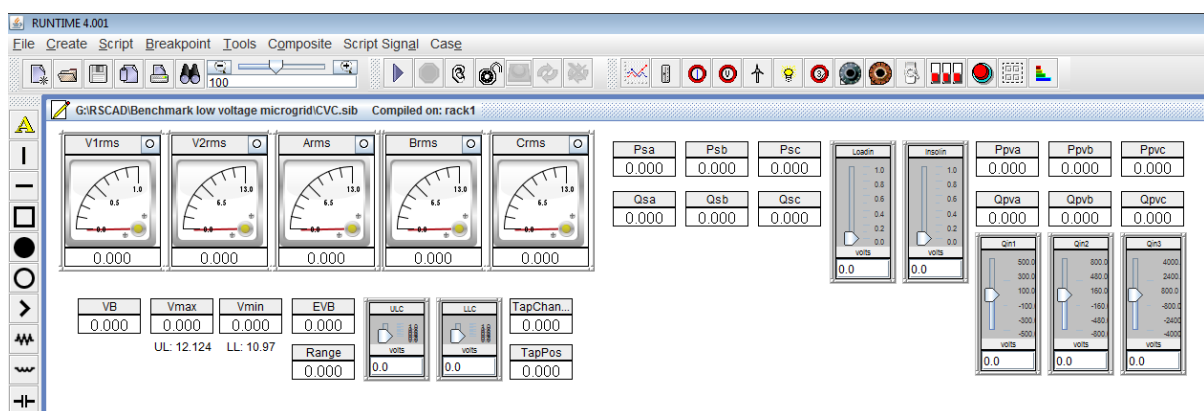
ανάγνωσης μιας τιμής από το RSCAD χρειάζεται να πραγματοποιείται συχνά και περιέχει αρκετές εντολές, ήταν απαραίτητη η χρησιμοποίηση μιας συνάρτησης στο MATLAB που να την υλοποιεί. Η συνάρτηση αυτή έχει ονομαστεί ReadMeter και ο αναγνώστης μπορεί να την αναζητήσει στο Παράρτημα της εργασίας. Η συνάρτηση *jtcp('read', JTCPOBJ)* του κεντρικού αλγορίθμου επικοινωνίας, η οποία, όπως έχουμε αναφέρει στην αρχή της παραγράφου, είναι υπεύθυνη για το διάβασμα της τιμής που στέλνεται από το RSCAD μέσω της θύρας επικοινωνίας, είναι ενσωματωμένη στον κώδικα της ReadMeter.

Για λόγους που δεν μας είναι γνωστοί, καθώς ολόκληρος ο κώδικας του κεντρικού αλγορίθμου επικοινωνίας αλλά και ο βασικός κορμός της συνάρτησης ReadMeter μας έχουν δωθεί από την εταιρεία του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS Technologies Inc.), έχει παρατηρηθεί ότι ορισμένες φορές η συνάρτηση αυτή διαβάζει λανθασμένη τιμή. Πιο συγκεκριμένα, η λανθασμένη τιμή που επιστρέφει ως αποτέλεσμα σε μια τέτοια περίπτωση είναι πάντα η τιμή της αμέσως προηγούμενης κλήσης της. Το πρόβλημα επιλύθηκε επιτυχώς με την προσθήκη χρονικής καθυστέρησης μεταξύ των κλήσεων της συνάρτησης, αλλά και με το να καλείται η συνάρτηση δύο φορές για κάθε τιμή που πρέπει να διαβαστεί.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα χρησιμοποίησης της συνάρτησης ReadMeter για το διάβασμα της τιμής ενός μετρητή του RSCAD. Έστω ότι επιθυμούμε να διαβάσουμε τον μετρητή που δείχνει την θέση λήψης του μετασχηματιστή του δικτύου και να την αποθηκεύσουμε στο MATLAB στην θέση *i* ενός πίνακα-γραμμή με όνομα Taps. Η μεταβλητή που πρέπει να διαβαστεί ονομάζεται TapPos, επομένως και ο μετρητής της θα έχει αυτό το όνομα. Ο κώδικας που εκτελείται για την υλοποίηση αυτής της μεταφοράς πληροφορίας από το RSCAD στο MATLAB (με τη χρησιμοποίηση της χρονικής καθυστέρησης και της διπλής κλήσης της συνάρτησης για την εξάλειψη των σφαλμάτων) είναι:

```
Taps(i)=ReadMeter('TapPos',JTCPOBJ);
pause(1);
Taps(i)=ReadMeter('TapPos',JTCPOBJ);
pause(1);
```

Το τελικό παράθυρο RUNTIME που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση, με όλους τους απαραίτητους μετρητές για τις τάσεις και τις ισχείς του δικτύου καθώς και τους 7 ολισθητές για την λήψη δεδομένων από το MATLAB, παρουσιάζεται στην εικόνα 6.15.



Εικόνα 6.15 Παράθυρο RUNTIME για την προσομοίωση του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης

6.7 Παρουσίαση του τελικού αλγορίθμου συντονισμένου ελέγχου στο MATLAB

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί ολόκληρος ο κώδικας που αναπτύξαμε στο MATLAB για την υλοποίηση του κεντρικού ελεγκτή του συστήματος συντονισμένου ελέγχου.

Πρώτο βήμα κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου είναι η σύνδεση του MATLAB με το RSCAD. Ορίζεται η διεύθυνση IP του υπολογιστή στον οποίο «τρέχει» το RSCAD, καθώς και η θύρα επικοινωνίας (Port) την οποία έχει ανοίξει, και στη συνέχεια καλείται η κατάλληλη συνάρτηση του αλγορίθμου επικοινωνίας (jtcp) ώστε να ολοκληρωθεί επιτυχώς η σύνδεση των δύο προγραμμάτων. Οι παραπάνω λειτουργίες εκτελούνται από το ακόλουθο τμήμα κώδικα (οτιδήποτε βρίσκεται μετά από το σύμβολο % ή %% αποτελεί σχόλιο για την κατανόηση της λειτουργίας του κώδικα):

```
%% Initialization
clear all
Host = '127.0.0.1';
Port = 8085;

%Open the connection
JTCTOBJ = jtcp('REQUEST',Host,Port); % Runtime is acting as TCP socket server
```

Επόμενο βήμα είναι να οριστούν οι μεταβλητές και οι σταθερές που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια του κώδικα. Πρώτα ορίζονται οι πίνακες στους οποίους θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα είναι οι τάσεις πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου, οι τάσεις μετά την εκτέλεση, η ενεργός και άεργος ισχύς των φωτοβολταϊκών και η θέση λήψης του μετασχηματιστή. Οι πίνακες για τις τάσεις και τις ισχύεις έχουν μέγεθος 3x96, διότι έχουμε 3 ζυγούς και 96 διαφορετικές τιμές για την ηλιοφάνεια και τη ζήτηση φορτίου, επομένως θα εκτελεστούν 96 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Αντίστοιχα, ο πίνακας για τη θέση λήψης είναι 1x96.

Κατόπιν, ορίζονται οι δύο 1x96 πίνακες που περιέχουν τις ανά μονάδα τιμές ηλιοφάνειας και ζήτησης φορτίου αντίστοιχα που προσομοιώνουν ένα πραγματικό 24ωρο. Οι 96 επαναλήψεις που προκύπτουν από το πλήθος των τιμών αυτών αντιστοιχούν σε εκτέλεση του αλγορίθμου κάθε 15 λεπτά πραγματικού χρόνου, αλλά φυσικά μπορούμε να αυξήσουμε το πλήθος τους έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος αυτός και να υπάρχει ακόμη καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας.

Στη συνέχεια ορίζονται ο πίνακας ευαισθησίας $\left[\frac{\partial V}{\partial Q}\right]$, ο πίνακας A που προκύπτει από τον πίνακα ευαισθησίας και αποτελεί όρισμα της συνάρτησης quadprog, τα άνω και κάτω όρια τάσης ($\pm 5\%$), το 90% του Voltage Band, ο ελάχιστος συντελεστής ισχύος των φωτοβολταϊκών, και τέλος οι πίνακες-ορίσματα της συνάρτησης quadprog H, Aeq και beq. Τα υπόλοιπα ορίσματα της συνάρτησης (b, f, lb, ub) έχουν μεταβλητές τιμές και πρέπει να υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη της εκτέλεσης, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω. Το τμήμα κώδικα που υλοποιεί όλους τους ανωτέρω ορισμούς μεταβλητών και σταθερών είναι:

```
%% Code

V=zeros(3,96);
Vnew=zeros(3,96);
Q=zeros(3,96);
P=zeros(3,96);
Taps=zeros(1,96);
```

```

Insol=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.0125 0.025 0.0375 0.05
0.075 0.1 0.125 0.15 0.1875 0.225 0.2625 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 0.65 0.7
0.75 0.8 0.85 0.9 0.925 0.95 0.975 1 0.9875 0.975 0.9625 0.95 0.925 0.9 0.875 0.85
0.8125 0.775 0.7375 0.7 0.65 0.6 0.55 0.5 0.425 0.35 0.275 0.2 0.1625 0.125 0.0875
0.05 0.0375 0.025 0.0125 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

```

```

Load=[0.3 0.29 0.28 0.27 0.26 0.25 0.24 0.23 0.2275 0.225 0.2225 0.22 0.21 0.2 0.2
0.2 0.21 0.22 0.23 0.24 0.25 0.2625 0.275 0.2875 0.3 0.3125 0.325 0.3375 0.35
0.3625 0.375 0.3875 0.4 0.4125 0.425 0.4375 0.45 0.4625 0.475 0.4875 0.5 0.5125
0.525 0.5375 0.55 0.5625 0.575 0.5875 0.6 0.595 0.59 0.585 0.58 0.575 0.57 0.565
0.56 0.555 0.55 0.545 0.54 0.535 0.53 0.525 0.52 0.515 0.51 0.505 0.5 0.525 0.55
0.575 0.6 0.65 0.7 0.75 0.8 0.85 0.9 0.95 1 0.975 0.95 0.925 0.9 0.85 0.8 0.75 0.7
0.65 0.6 0.55 0.5 0.45 0.4 0.35];

```

```

Asen=[0.0001132 0.0001138 0.0001141
0.0001118 0.0002048 0.0002056
0.0001080 0.0001978 0.0002875];

```

```

A=[Asen(1,1)-Asen(2,1) Asen(1,2)-Asen(2,2) Asen(1,3)-Asen(2,3)
Asen(1,1)-Asen(3,1) Asen(1,2)-Asen(3,2) Asen(1,3)-Asen(3,3)
Asen(2,1)-Asen(3,1) Asen(2,2)-Asen(3,2) Asen(2,3)-Asen(3,3)
Asen(2,1)-Asen(1,1) Asen(2,2)-Asen(1,2) Asen(2,3)-Asen(1,3)
Asen(3,1)-Asen(1,1) Asen(3,2)-Asen(1,2) Asen(3,3)-Asen(1,3)
Asen(3,1)-Asen(2,1) Asen(3,2)-Asen(2,2) Asen(3,3)-Asen(2,3)];

```

```

UL=12.12435;
LL=10.96965;
EVB=0.9*(UL-LL);
PFmin=tan(acos(0.8));
H=[2 0 0;0 2 0; 0 0 2];
Aeq=[];
beq=[];

```

Επόμενο και βασικότερο στάδιο του κώδικα είναι η εκτέλεση των 96 επαναλήψεων που θα προσομοιώσουν το πραγματικό 24ωρο. Κάθε επανάληψη αποτελεί ουσιαστικά και μια εκτέλεση του αλγορίθμου συντονισμένου ελέγχου τάσης. Κάθε εκτέλεση αρχίζει με το στάδιο Range Control, και μετά την ολοκλήρωση του, προχωρά στο στάδιο Level Control.

Φυσικά, σε κάθε επανάληψη, πριν αρχίσει η εκτέλεση του σταδίου Range Control, πρέπει να προηγηθεί η ενημέρωση του RSCAD με τις τιμές για την ηλιοφάνεια και τη ζήτηση φορτίου που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη επανάληψη. Όπως γίνεται αντιληπτό, αυτό το κομμάτι δεν θα υπάρχει σε έναν πραγματικό ελεγκτή, καθώς η ηλιοφάνεια και η ζήτηση φορτίου είναι δύο πραγματικά μεγέθη τα οποία δεν χρειάζονται μοντελοποίηση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Για τη δική μας προσομοίωση όμως, επειδή δεν είχαμε τη δυνατότητα μέτρησης σε πραγματικό χρόνο αυτών των δύο παραμέτρων του δικτύου, έπρεπε να βρούμε ένα εργαλείο για να τις μοντελοποιήσουμε. Στο πείραμα του κεφαλαίου 5, όπου δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου το MATLAB, η μοντελοποίηση έγινε στο ίδιο το RSCAD, αλλά με μεγάλους περιορισμούς στο μέγιστο πλήθος τους αλλά και στην ανάκτηση των γραφικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Έτσι, για το πείραμα του συντονισμένου ελέγχου τάσης, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το MATLAB για τη μοντελοποίηση τους, εφόσον αποτελεί ήδη αναπόσπαστο κομμάτι της προσομοίωσης και θα μας προσέφερε καλύτερα αποτελέσματα.

Αφού σταλλούν λοιπόν στο RSCAD οι *i*-οστές τιμές των πινάκων ηλιοφάνειας και ζήτησης φορτίου, ξεκινά η εκτέλεση του σταδίου Range Control. Γίνεται μέτρηση των τάσεων των τριών ζυγών του δικτύου (μέσω επικοινωνίας με το RSCAD), καθώς και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος των φωτοβολταϊκών, και οι τιμές που διαβάζονται αποθηκεύονται στις αντίστοιχες θέσεις των πινάκων που έχουν οριστεί προηγουμένως. Έχοντας πλέον όλες τις απαραίτητες τιμές για τις τάσεις και τις ισχύεις, υπολογίζονται τα υπόλοιπα ορίσματα της

συνάρτησης quadprog που εξαρτώνται από αυτές, δηλαδή οι πίνακες f, b, lb και ub. Στη συνέχεια, καλείται η quadprog, η οποία επιλύει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του σταδίου Range Control, και τα αποτελέσματα της, δηλαδή οι τρεις μεταβολές στις ροές αέργου ισχύος των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών ΔQ_1 , ΔQ_2 , ΔQ_3 , αποθηκεύονται στον πίνακα-στήλη x. Οι μεταβολές αυτές αθροίζονται με τις τιμές των ροών αέργου ισχύος που έχουν μετρηθεί προηγουμένως ώστε να προκύψουν οι νέες τιμές τους ($Q_{new,i}=Q_i+\Delta Q_i$). Οι νέες τιμές που υπολογίζονται με αυτόν τον τρόπο αποστέλλονται πίσω στο RSCAD και οδηγούνται στα μοντέλα των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών ώστε να μεταβάλλουν τις ροές αέργου ισχύος τους. Το τμήμα κώδικα που υλοποιεί τις παραπάνω ενέργειες είναι:

```
for i=1:96

    msg2 = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Insolin" = %f;
    SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Loadin" = %f; ', Insol(i), Load(i));

    jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2);

    pause(5);
    V(1,i)=ReadMeter('Arms',JTCPOBJ);
    pause(1);
    V(1,i)=ReadMeter('Arms',JTCPOBJ);
    pause(1);
    V(2,i)=ReadMeter('Brms',JTCPOBJ);
    pause(1);
    V(2,i)=ReadMeter('Brms',JTCPOBJ);
    pause(1);
    V(3,i)=ReadMeter('Crms',JTCPOBJ);
    pause(1);
    V(3,i)=ReadMeter('Crms',JTCPOBJ);
    pause(1);
    Q(1,i)=ReadMeter('Qpva',JTCPOBJ);
    pause(1);
    Q(1,i)=ReadMeter('Qpva',JTCPOBJ);
    pause(1);
    Q(2,i)=ReadMeter('Qpvb',JTCPOBJ);
    pause(1);
    Q(2,i)=ReadMeter('Qpvb',JTCPOBJ);
    pause(1);
    Q(3,i)=ReadMeter('Qpvc',JTCPOBJ);
    pause(1);
    Q(3,i)=ReadMeter('Qpvc',JTCPOBJ);
    pause(1);
    P(1,i)=ReadMeter('Ppva',JTCPOBJ);
    pause(1);
    P(1,i)=ReadMeter('Ppva',JTCPOBJ);
    pause(1);
    P(2,i)=ReadMeter('Ppvb',JTCPOBJ);
    pause(1);
    P(2,i)=ReadMeter('Ppvb',JTCPOBJ);
    pause(1);
    P(3,i)=ReadMeter('Ppvc',JTCPOBJ);
    pause(1);
    P(3,i)=ReadMeter('Ppvc',JTCPOBJ);
    pause(1);

    f=[2*Q(1,i);2*Q(2,i);2*Q(3,i)];

    b=[EVB-V(1,i)+V(2,i);EVB-V(1,i)+V(3,i);EVB-V(2,i)+V(3,i);EVB-
    V(2,i)+V(1,i);EVB-V(3,i)+V(1,i);EVB-V(3,i)+V(2,i)];

    lb=[-P(1,i)*PFmin-Q(1,i);-P(2,i)*PFmin-Q(2,i);-P(3,i)*PFmin-Q(3,i)];

    ub=[P(1,i)*PFmin-Q(1,i);P(2,i)*PFmin-Q(2,i);P(3,i)*PFmin-Q(3,i)];
```

```

x=quadprog(H,f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

Qnew=[Q(1,i)+x(1,1);Q(2,i)+x(2,1);Q(3,i)+x(3,1)];

msg2 = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Qin1" = %f;
SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Qin2" = %f; SetSlider "Subsystem #1
:   CTLs : Inputs : Qin3" = %f; ', Qnew(1,1), Qnew(2,1), Qnew(3,1));

jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2);

```

Στο αυτό το σημείο της εκτέλεσης της *i*-οστής επανάληψης έχει ολοκληρωθεί το στάδιο Range Control. Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών έχουν μεταβάλλει τις ροές αέργου ισχύος τους με αποτέλεσμα να έχουν προκαλέσει αντίστοιχες μεταβολές στις τάσεις των ζυγών του δικτύου. Ξεκινάει επομένως η εκτέλεση του σταδίου Level Control. Γίνεται μέτρηση των νέων τιμών των τάσεων του δικτύου (V_{new}) και υπολογίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη εξ' αυτών. Κατόπιν, γίνονται οι δύο έλεγχοι παραβίασης των ορίων της τάσης (MAX>Upper Limit και MIN<Lower Limit) και αν κάποιος από τους δύο είναι θετικός, αποστέλλεται στο RSCAD η τιμή 1 για το αντίστοιχο σήμα ελέγχου παραβίασης ορίου (ULC ή LLC), το οποίο οδηγείται στο κύκλωμα αλλαγής της θέσης λήψης του μετασχηματιστή. Το κύκλωμα αυτό έχει μοντελοποιηθεί στο RSCAD για λόγους που αναλύθηκαν στην παράγραφο 6.5. Στο σημείο αυτό γίνεται παύση της εκτέλεσης του αλγορίθμου για μερικά δευτερόλεπτα ώστε να δοθεί ο απαραίτητος χρόνος στο μετασχηματιστή να μεταβεί στην σωστή θέση λήψης του. Στη συνέχεια, διαβάζεται από το RSCAD η τιμή που έχει η νέα θέση λήψης του μετασχηματιστή μετά την ολοκλήρωση του σταδίου Level Control και αποθηκεύεται στην αντίστοιχη θέση του πίνακα Taps. Τέλος, γίνεται αποστολή στο RSCAD μηδενικών τιμών για τα σήματα ελέγχου παραβίασης ορίων ULC και LLC ώστε να μην μπορεί να γίνει οποιαδήποτε αλλαγή στη θέση λήψης του μετασχηματιστή μέχρι την επόμενη εκτέλεση του σταδίου Level Control. Ο κώδικας που υλοποιεί τα παραπάνω είναι ο ακόλουθος:

```

Vnew(1,i)=ReadMeter('Arms',JTCPOBJ);
pause(1);
Vnew(1,i)=ReadMeter('Arms',JTCPOBJ);
pause(1);
Vnew(2,i)=ReadMeter('Brms',JTCPOBJ);
pause(1);
Vnew(2,i)=ReadMeter('Brms',JTCPOBJ);
pause(1);
Vnew(3,i)=ReadMeter('Crms',JTCPOBJ);
pause(1);
Vnew(3,i)=ReadMeter('Crms',JTCPOBJ);
pause(1);

MAX=max([Vnew(1,i) Vnew(2,i) Vnew(3,i)]);
MIN=min([Vnew(1,i) Vnew(2,i) Vnew(3,i)]);

if MAX>=UL
    msg2 = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : ULC" = %f; ', 1);
    jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2);
end

if MIN<=LL
    msg2 = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : LLC" = %f; ', 1);
    jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2);
end

pause(12);

```

```

Taps(i)=ReadMeter('TapPos',JTCPOBJ);
pause(1);
Taps(i)=ReadMeter('TapPos',JTCPOBJ);
pause(1);

msg2 = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : ULC" = %f; SetSlider
"Subsystem #1 : CTLs : Inputs : LLC" = %f; ', 0, 0);

jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2);

end

```

Τελευταίο βήμα στην εκτέλεση του αλγορίθμου, αφού έχουν ολοκληρωθεί όλες οι επαναλήψεις, είναι να τερματιστεί η σύνδεση μεταξύ του MATLAB και του RSCAD και να κλείσει η θύρα επικοινωνίας μεταξύ τους. Το τμήμα κώδικα που πραγματοποιεί αυτή την ενέργεια είναι:

```

%% Close the connection! Important!

jtcp('close',JTCPOBJ);

```

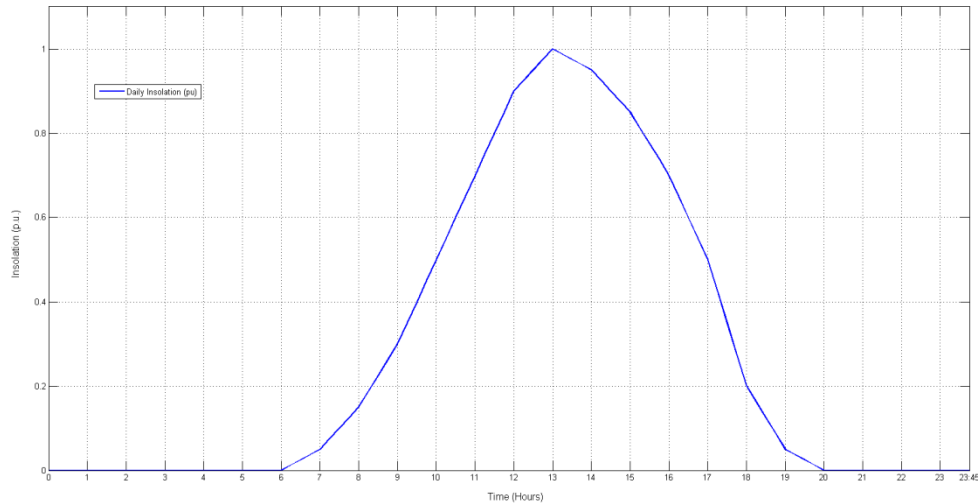
6.8 Προσομοίωση – Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστούν και θα μελετηθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση της προσομοίωσης του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης.

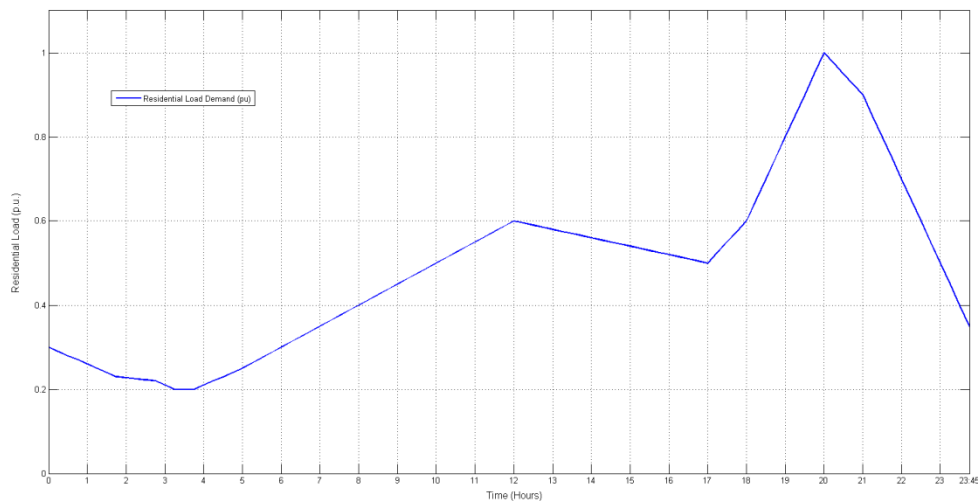
Αρχική μας επιθυμία ήταν να εκτελεστεί η προσομοίωση για 24 πραγματικές ώρες, παίρνοντας την τιμή της ηλιοφάνειας σε πραγματικό χρόνο από το πυρανόμετρο που είναι εγκατεστημένο στην οροφή του εργαστηρίου ΣΗΕ του Ε.Μ.Π. Για τη ζήτηση φορτίου θα χρησιμοποιούσαμε και σε αυτήν την περίπτωση πίνακες δεδομένων καθώς δεν υπήρχε τρόπος μέτρησης των πραγματικών τιμών της κάθε χρονική στιγμή. Ωστόσο, όταν εκτελέσαμε την προσομοίωση με αυτόν τον τρόπο και παρατηρήσαμε τα αποτελέσματα, διαπιστώθηκε ότι το πυρανόμετρο παρουσίαζε σημαντικό πρόβλημα στη λειτουργία του. Έδινε ανεξήγητες τιμές ηλιοφάνειας, ακόμα και κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι οποίες καθιστούσαν την προσομοίωση πρακτικά άχρηστη. Έγιναν προσπάθειες να βρεθεί ακριβώς η αιτία του προβλήματος και να διορθωθεί άμεσα, αλλά χωρίς επιτυχία. Το πυρανόμετρο χρειάστηκε να απεγκατασταθεί από την οροφή του εργαστηρίου και να σταλλεί για επισκευή, μια διαδικασία που απαιτούσε μεγάλο χρονικό διάστημα.

Συνεπώς, δεν ήταν εφικτό να έχουμε τις τιμές ηλιοφάνειας σε πραγματικό χρόνο και αναγκαστήκαμε να καταφύγουμε στην δεύτερη προτιμότερη λύση, δηλαδή να έχουμε τις τιμές σε πίνακες δεδομένων, όπως και στο πείραμα του κεφαλαίου 5. Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενες παραγράφους, δημιουργήσαμε πίνακες 96 τιμών για την ηλιοφάνεια και τη ζήτηση οικιακού φορτίου. Οι 96 αυτές τιμές προσομοιώνουν ένα πραγματικό 24ωρο, με αντιστοιχία 1 τιμή για κάθε τέταρτο της ώρας. Φυσικά, με αύξηση του μεγέθους των πινάκων μπορούμε να μειώσουμε το χρονικό διάστημα αυτής της αντιστοιχίας. Το μέγιστο όριο της συχνότητας εκτέλεσης είναι 1/λεπτό, καθώς κατά τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι η εκτέλεση μιας επανάληψης του αλγορίθμου διαρκεί κάτι λιγότερο από 1 λεπτό. Επομένως, με την χρησιμοποίηση πινάκων ηλιοφάνειας και ζήτησης φορτίου 1440 στοιχείων επιτυγχάνουμε την καλύτερη δυνατή προσομοίωση μιας ολόκληρης ημέρας (ένα 24ωρο αποτελείται από 1440 λεπτά).

Οι καμπύλες ηλιοφάνειας και ζήτησης οικιακού φορτίου που προέκυψαν από τις 96 ανά μονάδα τιμές που χρησιμοποιήσαμε παρουσιάζονται στις εικόνες 6.16 και 6.17. Οι οριζόντιοι άξονες όλων των γραφικών παραστάσεων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να είναι εμφανής η αντιστοιχία με την ώρα της ημέρας. Το σημείο 0 αντιστοιχεί στην 1^η από τις 96 τιμές και αναφέρεται στις 12 τα μεσάνυχτα (00:00). Το τελευταίο σημείο του άξονα (23:45) αντιστοιχεί στην 96^η τιμή και αναφέρεται στις 12 παρά τέταρτο το βράδυ, όπως υποδηλώνει και η ονομασία του.



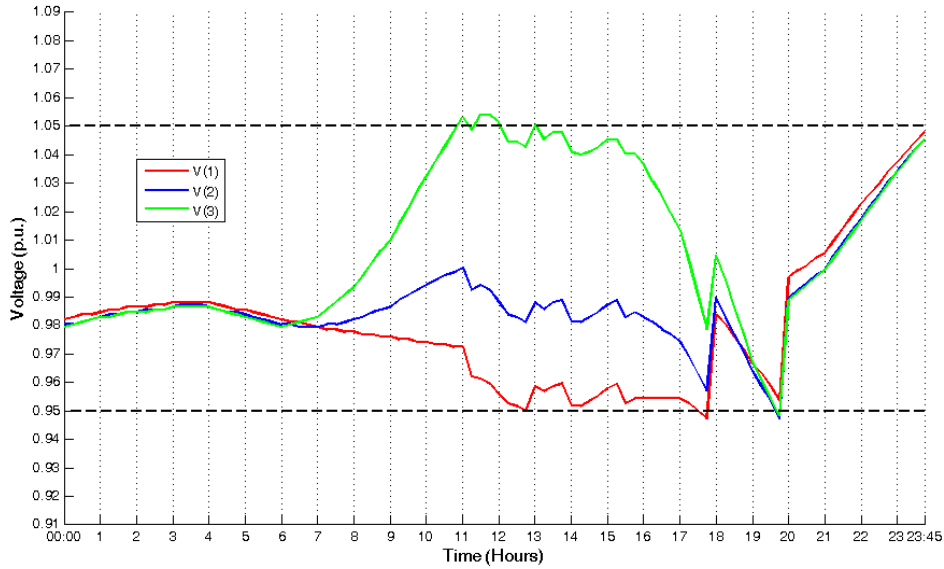
Εικόνα 6.16 Ημερήσια καμπύλη ηλιοφάνειας σε ανά μονάδα τιμές



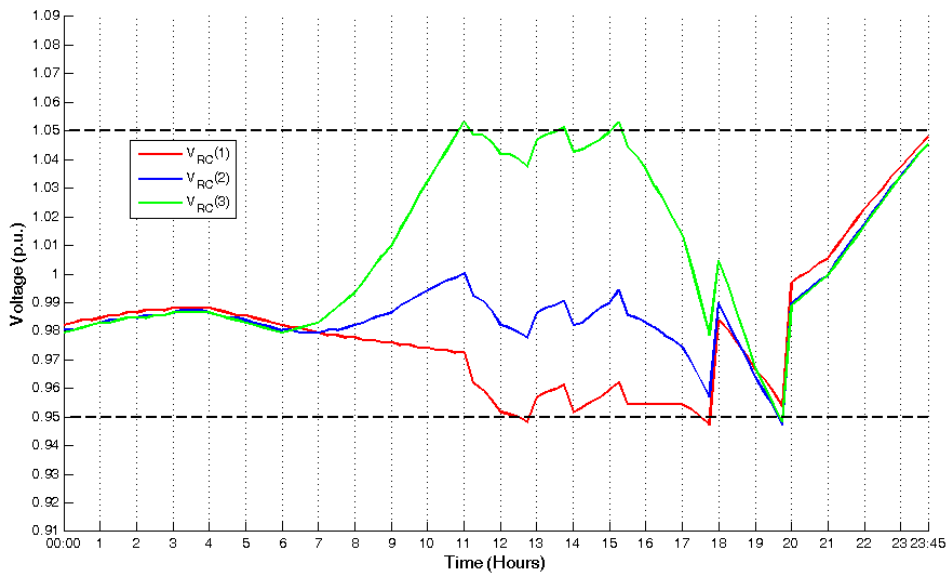
Εικόνα 6.17 Ημερήσια καμπύλη ζήτησης οικιακού φορτίου σε ανά μονάδα τιμές

Εκτελώντας τελικώς την προσομοίωση της ημερήσιας λειτουργίας του αλγορίθμου συντονισμένου ελέγχου τάσης, για το δίκτυο μέσης τάσης που αναπτύξαμε στο RSCAD, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω 96 τιμές ηλιοφάνειας και ζήτησης φορτίου, μετρήσαμε και αναπαραστήσαμε γραφικά τα αποτελέσματα για τις τάσεις του δικτύου, σε κάθε στάδιο εκτέλεσης του αλγορίθμου (πριν το Range Control, μετά το Range Control και μετά το Level Control), τη διαφορά μέγιστης-ελάχιστης τάσης (Voltage Range), τη θέση λήψης του μετασχηματιστή, τις παραγωγές ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών, τις ροές αέργου

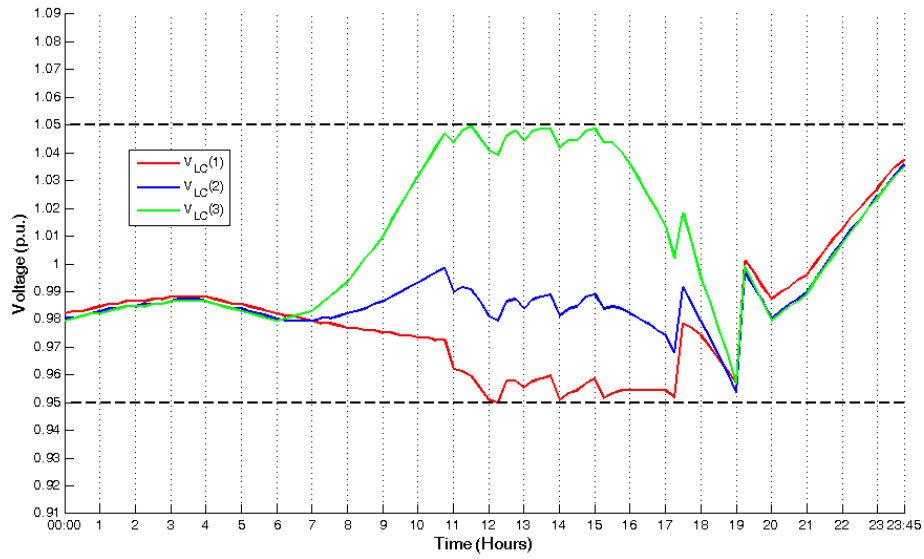
ισχύος των αντιστροφών, καθώς και τις μεταβολές στις ροές αέργου ισχύος των αντιστροφών (ΔQ) που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του σταδίου Range Control. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται αρχικώς στις παρακάτω εικόνες και στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση τους.



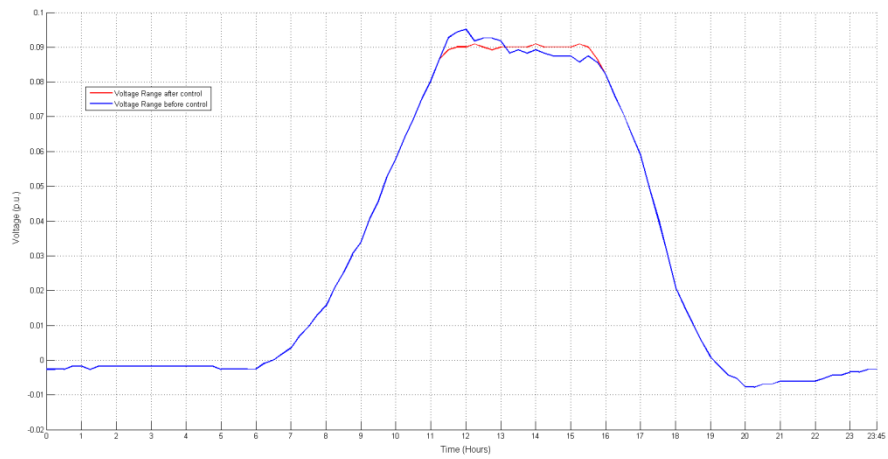
Εικόνα 6.18 Τάσεις των τριών ζυγών του δικτύου πριν την εκτέλεση του σταδίου Range Control (σε ανά μονάδα τιμές)



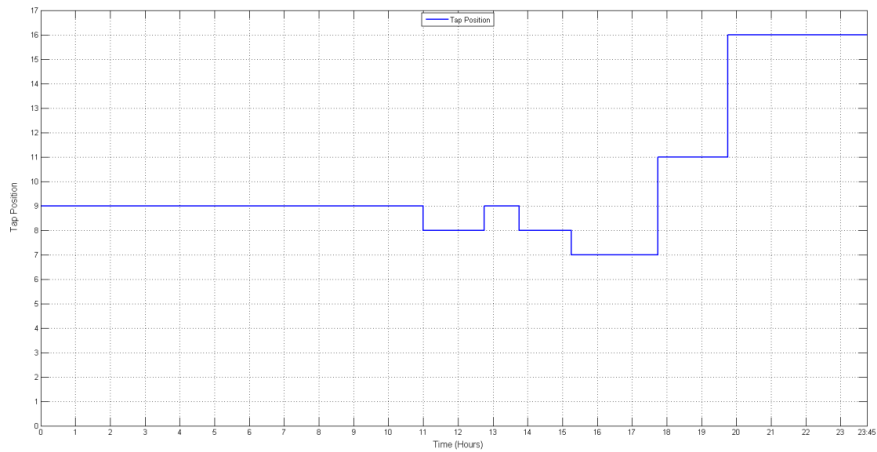
Εικόνα 6.19 Τάσεις των τριών ζυγών του δικτύου μετά την εκτέλεση του σταδίου Range Control (σε ανά μονάδα τιμές)



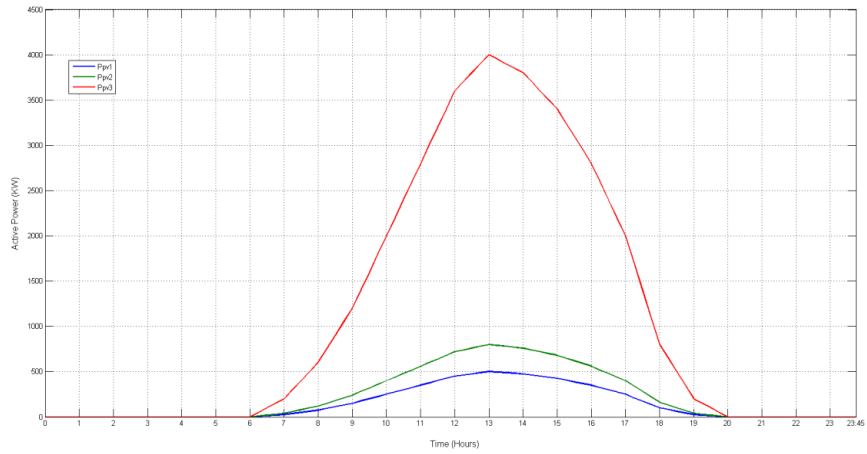
Εικόνα 6.20 Τάσεις των τριών ζυγών του δικτύου μετά την εκτέλεση του σταδίου Level Control (σε ανά μονάδα τιμές)



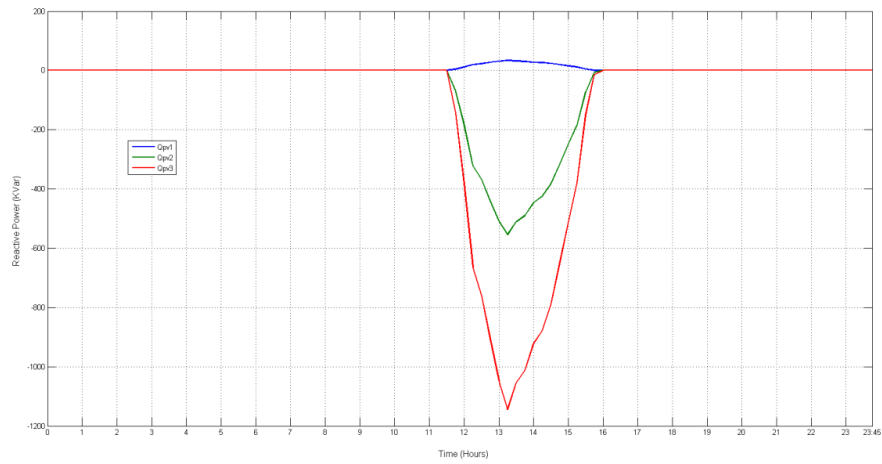
Εικόνα 6.21 Διαφορά μέγιστης-ελάχιστης τάσης (Voltage Range) πριν και μετά την εκτέλεση του σταδίου Range Control (σε ανά μονάδα τιμές)



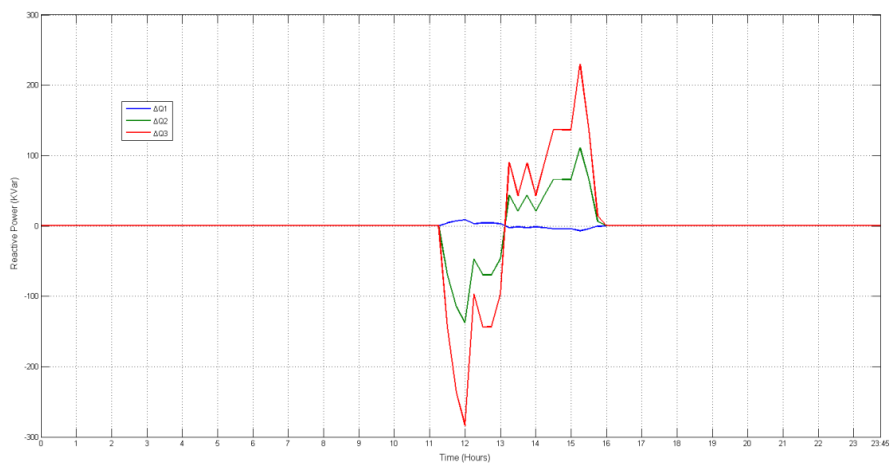
Εικόνα 6.22 Θέση λήψης (Tap Position) του μετασχηματιστή



Εικόνα 6.23 Παραγωγή ενεργού ισχύος των τριών φωτοβολταϊκών διατάξεων



Εικόνα 6.24 Ροή αέργου ισχύος των τριών αντιστροφών των φωτοβολταϊκών διατάξεων



Εικόνα 6.25 Μεταβολές των ροών αέργου ισχύος των αντιστροφών (ΔQ), όπως προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του σταδίου Range Control

Από την μελέτη των ανωτέρω γραφικών παραστάσεων παρατηρούμε τα εξής σχετικά με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

- **00:00-06:00:** Σε αυτό το χρονικό διάστημα το δίκτυο παρουσιάζει τις μικρότερες μεταβολές. Δεν υπάρχει καθόλου ηλιοφάνεια και η ζήτηση φορτίου κυμαίνεται στα χαμηλότερα επίπεδα της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι τάσεις να παρουσιάζουν μια μικρή πτώση εξ' αιτίας της μικρής αυτής ζήτησης και η μικρή διασπορά που υπάρχει μεταξύ τους οφείλεται στις πτώσεις τάσεις στις γραμμές μεταξύ των ζυγών. Γι' αυτό και η τάση του 1^{ου} ζυγού, ο οποίος είναι ο κοντινότερος στον μετασχηματιστή, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή τάσης και ακολουθούν ο 2^{ος} και ο 3^{ος} ζυγός αντίστοιχα. Η μικρή διασπορά είναι εμφανής από το γράφημα του Voltage Range (εικόνα 6.21), όπου παρατηρούμε ότι η διαφορά μέγιστης-ελάχιστης τάσης είναι σχεδόν μηδενική. Συνεπώς, το στάδιο Range Control ορθώς κρίνει ότι δεν είναι απαραίτητη η ροή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών για να ικανοποιηθεί το κριτήριο $Voltage\ Range < 0,9 * Voltage\ Band$ και οι τιμές των μεταβολών της αέργου ΔQ είναι μηδενικές (φυσικά, δεν θα μπορούσαν να συνεισφέρουν έτσι κι αλλιώς οι αντιστροφείς αυτές τις ώρες της ημέρας καθώς δεν υπάρχει ηλιοφάνεια). Χωρίς μεταβολή στην αέργο των αντιστροφέων, οι τάσεις μετά το πέρας του σταδίου Range Control (V_{RC}) παραμένουν ακριβώς οι ίδιες. Οι τάσεις αυτές δεν παραβιάζουν ούτε το άνω ούτε το κάτω όριο τάσης (1,05 α.μ. και 0,95 α.μ. αντίστοιχα – αναπαριστώνται με μαύρες διακεκομμένες γραμμές στα γραφήματα των τάσεων), επομένως το στάδιο Level Control δεν προχωράει σε αλλαγή της θέσης λήψης του μετασχηματιστή.
- **06:00-11:15:** Στο διάστημα αυτό εμφανίζεται και αυξάνεται σταδιακά η ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενεργού ισχύος από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις, όπως είναι εμφανές από την εικόνα 6.23. Η παραγωγή ενεργού ισχύος στους ζυγούς 2 και 3 είναι πλέον μεγαλύτερη από την ζήτηση, με αποτέλεσμα η αντίστροφη ροή ενεργού ισχύος να ανυψώνει τις τάσεις στους ζυγούς αυτούς. Η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών του 3^{ου} ζυγού είναι αρκετά μεγαλύτερη από του 2^{ου}, άρα και η ανύψωση τάσης στον 3^ο ζυγό είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Αντίθετα, στον 1^ο ζυγό η ζήτηση φορτίου εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή, με αποτέλεσμα η τάση του να βυθίζεται. Αυτό το φαινόμενο (βύθιση τάσης 1^{ου} ζυγού – μεγάλη ανύψωση τάσης 3^{ου} ζυγού) αυξάνει σταδιακά τη διασπορά των τάσεων, κάτι που γίνεται εύκολα αντιληπτό από το γράφημα του Voltage Range (εικόνα 6.21). Ωστόσο, το VR δεν γίνεται μεγαλύτερο από 0,09 α.μ. ($90\% * Voltage\ Band = 0,9 * (1,05 - 0,95) = 0,09$) σε αυτό το διάστημα, επομένως το στάδιο Range Control ορθά πάλι υπολογίζει ότι δεν χρειάζεται ροή αέργου από τους αντιστροφείς για να ικανοποιείται η συνθήκη (εικόνες 6.24 και 6.25). Έτσι, και οι τάσεις μετά το Range Control (V_{RC}) δεν μεταβάλλονται. Στις 11:00, παρατηρούμε ότι το στάδιο Level Control μετρά την τάση του 3^{ου} ζυγού να είναι μεγαλύτερη από το άνω όριο, εξ' αιτίας της αυξανόμενης διείσδυσης των φωτοβολταϊκών. Επομένως, στέλνεται σήμα για υπολογισμό της νέας θέσης λήψης του μετασχηματιστή και μετάβαση σε αυτήν, η οποία παρατηρούμε από την εικόνα 6.22 ότι είναι η θέση 8 (0,99 α.μ., εφόσον η θέση 9 είναι η ονομαστική και έχουμε βήμα 1%). Η νέα λήψη διαφέρει μόνο κατά 1 θέση από την αρχική διότι η διασπορά των τάσεων είναι αρκετά μεγάλη και υπάρχει κίνδυνος παραβίασης του άλλου ορίου αν γινόντουσαν περισσότερες αλλαγές θέσης. Ο συνυπολογισμός αυτού του κινδύνου επιτυγχάνεται από την εξίσωση υπολογισμού της νέας επιθυμητής τάσης δευτερεύοντος που έχει αναλυθεί στην παράγραφο 6.5.1.

- **11:15-13:00:** Σε αυτό το χρονικό διάστημα η ηλιοφάνεια συνεχίζει να αυξάνεται και αγγίζει τελικώς τη μέγιστη τιμή της στη 1 το μεσημέρι. Πλέον, η διείσδυση των φωτοβολταϊκών είναι τόσο μεγάλη που η διαφορά μέγιστης-ελάχιστης τάσης (Voltage Range – VR) ξεπερνάει το όριο του 0,09 α.μ. (εικόνα 6.21). Συνεπώς, το στάδιο Range Control, επιλύοντας το πρόβλημα ελαχιστοποίησης, υπολογίζει τις κατάλληλες μεταβολές στις ροές αέργου ισχύος των τριών αντιστροφών των φωτοβολταϊκών ώστε να ικανοποιηθεί το κριτήριο $VR < 0,9 * VB$ και η συνολική απόλυτη ροή αέργου να είναι η ελάχιστη δυνατή. Οι νέες τιμές αέργου στέλνονται στους αντιστροφείς και οι τάσεις του δικτύου παίρνουν τις νέες τιμές τους (V_{RC}), τέτοιες ώστε να πληρείται η συνθήκη. Από την εικόνα 6.21 παρατηρούμε ότι το στάδιο εκτελεί με επιτυχία τη λειτουργία του, καθώς το VR μετά τον έλεγχο διατηρείται σχεδόν σταθερό στο 0,09 α.μ. (οι όποιες μικρές διακυμάνσεις οφείλονται σε θέματα ακρίβειας ευαισθησίας που έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 6.4.2). Στις 12:45 παρατηρείται παραβίαση του κάτω ορίου τάσης από την νέα τιμή της τάσης του 1^{ου} ζυγού ($V_{RC,1}$), επομένως το στάδιο Level Control αυξάνει τη θέση λήψης του μετασχηματιστή κατά 1 θέση (εικόνα 6.22). Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε ότι το στάδιο Level Control ελέγχει τις τάσεις μετά την ολοκλήρωση του Range Control, δηλαδή τις τάσεις V_{RC} . Αυτός είναι και ο λόγος που, ενώ στην εικόνα 6.18 παρατηρούμε παραβιάσεις των ορίων και άλλες χρονικές στιγμές σε αυτό το διάστημα, δεν γίνονται αλλαγές στη θέση λήψης του μετασχηματιστή, καθώς οι τάσεις αυτές μετρώνται πριν την έναρξη του σταδίου Range Control, και όχι μετά το πέρας του όπως οι V_{RC} .
- **13:00-15:45:** Το χρονικό αυτό διάστημα αρχίζει με την ηλιοφάνεια στη μέγιστη τιμή της συνεχίζεται με τη σταδιακή μείωση της. Η μείωση της ηλιοφάνειας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Επομένως, οι τάσεις των ζυγών 2 και 3, οι οποίες στη 1 το μεσημέρι παρουσίαζαν τη μέγιστη ανύψωση εξ' αιτίας της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών, αρχίζουν σταδιακά να μειώνονται. Η μείωση αυτή ωθεί τη διαφορά μέγιστης-ελάχιστης τάσης (VR) να πέσει κάτω από το όριο των 0,09 α.μ. Όμως, για να συμβεί αυτό το φαινόμενο, συμβάλλουν και οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών, καθώς έχουν ροές αέργου ισχύος εκείνο το χρονικό διάστημα. Άρα, όταν το στάδιο Range Control λύνει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης, υπολογίζει ότι πλέον δεν είναι απαραίτητη τόση άεργος για να ικανοποιείται η συνθήκη $VR < 0,9 * VB$ και δίνει ως αποτέλεσμα θετικές τιμές για τις μεταβολές στις ροές αέργου ισχύος των αντιστροφών (εικόνα 6.25). Οι αντιστροφείς δηλαδή αρχίζουν να μειώνουν την απόλυτη ροή αέργου τους, μέχρις ότου το VR να γίνει ίσο με 0,09 VB (εικόνα 6.21). Λόγω της μείωσης αυτής στις ροές αέργου των αντιστροφών και την άυξηση της διασποράς των τάσεων που έχει ως αποτέλεσμα, παρατηρούνται 2 παραβιάσεις του άνω ορίου από την τάση $V_{RC,3}$, στις 13:45 και στις 15:15. Το στάδιο Level Control πραγματοποιεί από μια μείωση της θέσης λήψης για κάθε παραβίαση (εικόνα 6.22).
- **15:45-23:45:** Από τις 15:45 και μετά, η διείσδυση των φωτοβολταϊκών έχει μειωθεί πλέον τόσο ώστε η συνθήκη $VR < 0,9 * VB$ να ικανοποιείται χωρίς να απαιτείται καθόλου ροή αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς, όπως γινόταν και στο διάστημα 6-11 το πρωί. Το στάδιο Range Control δίνει πάντα μηδενικές τιμές για την άεργο των αντιστροφών, όπως φαίνεται και από τις εικόνες 6.24 και 6.25. Το VR μειώνεται σταδιακά κάτω από το όριο του 0,09 α.μ. και δεν υπάρχει διαφοροποίηση πλέον σε αυτό πριν και μετά το στάδιο Range Control (εικόνα 6.21), όπως είναι λογικό, και οι τάσεις V_{RC} που μετρά το στάδιο Level Control συμπίπτουν και πάλι ταυτοτικά με τις τάσεις πριν την έναρξη του σταδίου Range Control (εικόνες 6.18, 6.19). Η ζήτηση του φορτίου αυξάνεται

σημαντικά τις πρώτες βραδυνές ώρες και φτάνει τη μέγιστη τιμή της στις 20:00. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βυθίζονται οι τάσεις και να παρουσιάζονται 2 παραβιάσεις του κάτω ορίου, η πρώτη από την τάση $V_{RC,1}$ και η δεύτερη από τις τάσεις $V_{RC,2}$ και $V_{RC,3}$. Στην πρώτη παραβίαση υπάρχει ακόμη ηλιοφάνεια, επομένως οι τάσεις των ζυγών 2 και 3 παρουσιάζουν ανύψωση, γι' αυτό και η χαμηλότερη τάση είναι αυτή του 1^{ου} ζυγού. Αντίθετα, στην δεύτερη παραβίαση η ηλιοφάνεια έχει σχεδόν μηδενιστεί, επομένως οι τάσεις των ζυγών 2 και 3 είναι πλέον μικρότερες από του 1^{ου} εξ' αιτίας των πτώσεων τάσης στις γραμμές του δικτύου. Το στάδιο Level Control προβαίνει σε αύξηση της θέσης λήψης κατά 4 θέσεις για την πρώτη παραβίαση (7->11) και κατά 5 θέσεις για τη δεύτερη παραβίαση (11->16). Το πλήθος των αλλαγών είναι μεγαλύτερο σε αυτές τις 2 περιπτώσεις από εκείνες που γίνονταν στο διάστημα έντονης ηλιοφάνειας, διότι η διασπορά των τάσεων είναι μικρότερη και μπορούν να μεταβούν όλες κοντά στην ονομαστική τιμή χωρίς κίνδυνο παραβίασης του άλλου ορίου. Στις 23:45, όπου παίρνουμε την τελευταία μέτρηση της προσομοίωσης, οι τάσεις είναι αυξημένες κατά πολύ, λόγω της μείωσης της ζήτησης φορτίου, αλλά δεν έχει παραβιαστεί ακόμα το άνω όριο, γι' αυτό και δεν έχει αλλάξει η θέση λήψης. Είναι όμως σίγουρο ότι όταν αρχίσει ο κύκλος της επόμενης ημέρας και η ζήτηση φορτίου μειωθεί κι άλλο, το άνω όριο θα παραβιαστεί και η θέση λήψης του μετασχηματιστή θα μειωθεί.

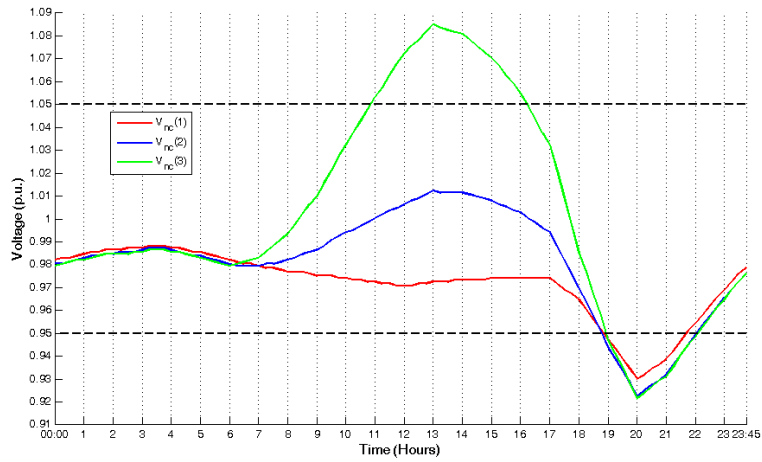
Προσομοίωση δικτύου χωρίς μέσα ρύθμισης τάσης και δικτύου με Τοπικό Έλεγχο Τάσης για σύγκριση αποτελεσμάτων

Για να γίνει πιο εμφανής η αποτελεσματικότητα του Συντονισμένου Ελέγχου Τάσης, σε σχέση με τον Τοπικό Έλεγχο, αποφασίσαμε να εκτελέσουμε δύο ακόμα προσομοιώσεις στο δίκτυο μέσης τάσης που έχουμε αναπτύξει στο RSCAD και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά τους με αυτά του Συντονισμένου Ελέγχου.

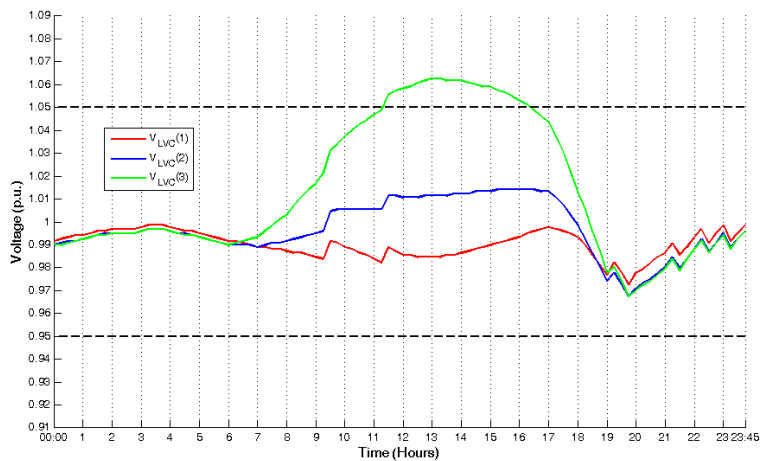
Στην πρώτη εξ' αυτών απενεργοποιήσαμε πλήρως τη λειτουργία του κεντρικού ελεγκτή, αφήνοντας το δίκτυο χωρίς κανένα μέσο ρύθμισης τάσης, και καταγράψαμε τις τάσεις των τριών ζυγών του δικτύου για ένα προσομοιούμενο 24ωρο, ακριβώς όπως και στην προσομοίωση για το συντονισμένο έλεγχο.

Στη δεύτερη, αφαιρέσαμε τον κεντρικό ελεγκτή και δώσαμε τη δυνατότητα στον μετασχηματιστή και τους αντιστροφείς φωτοβολταϊκών να ρυθμίζουν την τάση στο σημείο σύνδεσης τους με το δίκτυο αυτόνομα, σε λογική Τοπικού Ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, ο μετασχηματιστής μετρά την τάση στο δευτερεύον του και αν αυτή παρουσιάζει απόκλιση μεγαλύτερη του $\pm 1\%$ από την ονομαστική ($>1,01$ α.μ. ή $<0,99$ α.μ.), τότε προβαίνει σε μείωση ή αύξηση της λήψης αντίστοιχα κατά μια θέση. Για τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιήσαμε την ίδια μέθοδο ρύθμισης τάσης με αυτή του 1^{ου} μας πειράματος, δηλαδή του Τοπικού Ελέγχου Τάσης σε μικροδίκτυο χαμηλής τάσης (Κεφάλαιο 5). Η μέθοδος αυτή αφορά τη μέτρηση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο και τη χρησιμοποίηση καμπυλών αέργου ισχύος-τάσης (Q-V) για τον υπολογισμό της κατάλληλης ποσότητας αέργου ισχύος που πρέπει να παράξει ή να απορροφήσει ο αντιστροφέας. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη λειτουργία και τη μοντελοποίηση στο RSCAD αυτής της μεθόδου ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην παράγραφο 5.2.6. Τα αποτελέσματα που καταγράψαμε από την εκτέλεση αυτής της προσομοίωσης, για ένα προσομοιούμενο 24ωρο, είναι οι τάσεις των τριών ζυγών, η θέση λήψης του μετασχηματιστή και οι ροές αέργου ισχύος των αντιστροφέων.

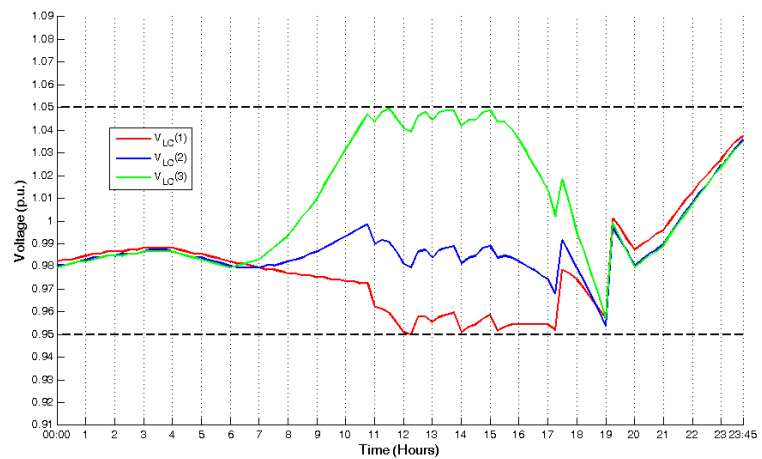
Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραπάνω προσομοιώσεων, καθώς και η σύγκριση τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης συντονισμένου ελέγχου.



Εικόνα 6.26 Τάσεις των τριών ζυγών (σε ανά μονάδα τιμές) για δίκτυο χωρίς καθόλου ρύθμιση τάσης

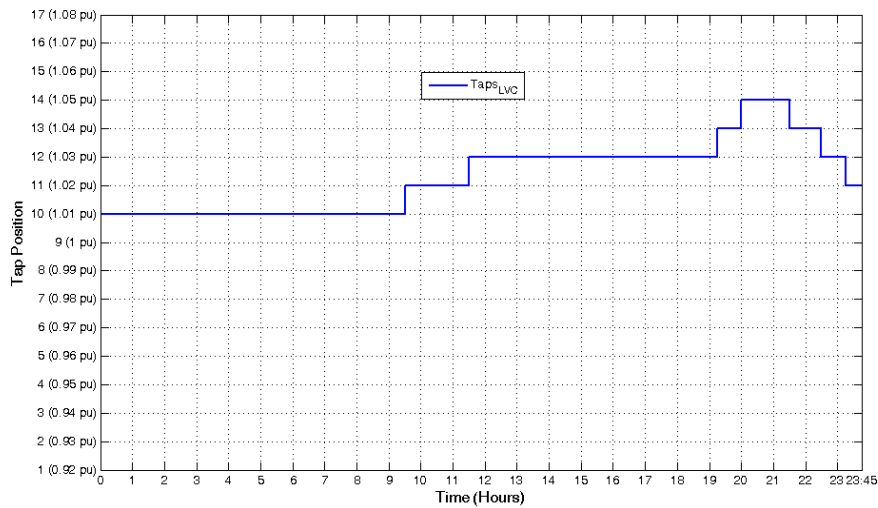


Εικόνα 6.27 Τάσεις των τριών ζυγών (σε ανά μονάδα τιμές) για δίκτυο με Τοπικό Έλεγχο Τάσης (Μετασχηματιστής με ΣΑΤΥΦ και καμπύλες Q-V)

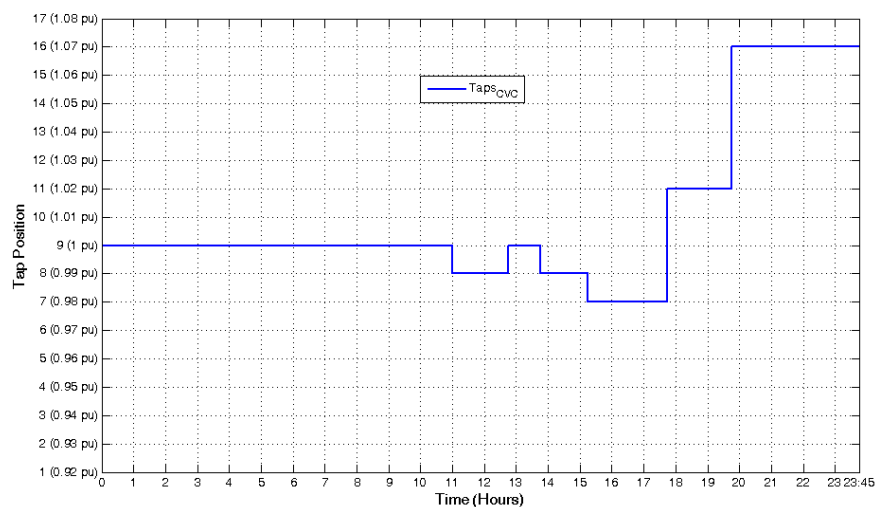


Εικόνα 6.28 Τάσεις των τριών ζυγών (σε ανά μονάδα τιμές) για δίκτυο με Συντονισμένο Έλεγχο Τάσης

Συγκρίνοντας τα 3 παραπάνω γραφήματα για τις τάσεις του δικτύου, χωρίς ρύθμιση τάσης, με τοπικό έλεγχο, και με συντονισμένο έλεγχο, παρατηρούμε ότι μόνο ο συντονισμένος έλεγχος τάσης κατάφερε να διατηρήσει τις τάσεις εντός των επιθυμητών ορίων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Ο τοπικός έλεγχος ανταποκρίθηκε καλά στις βυθίσεις τάσης, όταν δηλαδή υπάρχει μεγάλη ζήτηση φορτίου, αλλά απέτυχε να αντιμετωπίσει επαρκώς την ανύψωση τάσης που προκαλείται από την μεγάλη παραγωγή ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά κατά τις μεσημεριανές ώρες. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι ο μετασχηματιστής μετρά και ελέγχει μόνο την τάση στο δευτερεύον του, με αποτέλεσμα οι ανυψώσεις τάσης στους απομακρυσμένους ζυγούς να μην ανιχνεύονται και να μην μπορούν να αντιμετωπιστούν με αλλαγή λήψης. Έτσι, οι ανυψώσεις τάσεις κατά τον τοπικό έλεγχο αντιμετωπίζονται κυρίως με την απορρόφηση αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών. Σε αυτούς οφείλεται λοιπόν και η μειωμένη τιμή που παρουσιάζουν οι τάσεις των ζυγών του τοπικού ελέγχου κατά τις μεσημεριανές ώρες, σε σχέση με το σενάριο χωρίς καθόλου ρύθμιση τάσης.

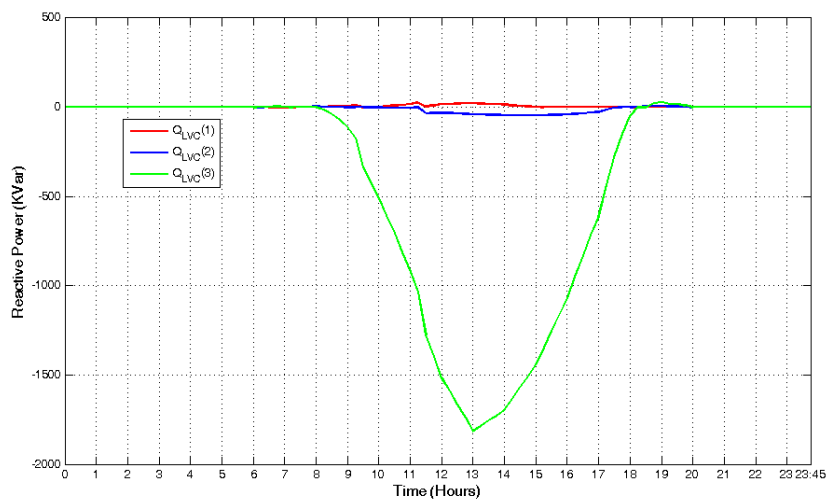


Εικόνα 6.29 Θέση λήψης (Tap Position) του μετασχηματιστή για δίκτυο με Τοπικό Έλεγχο Τάσης

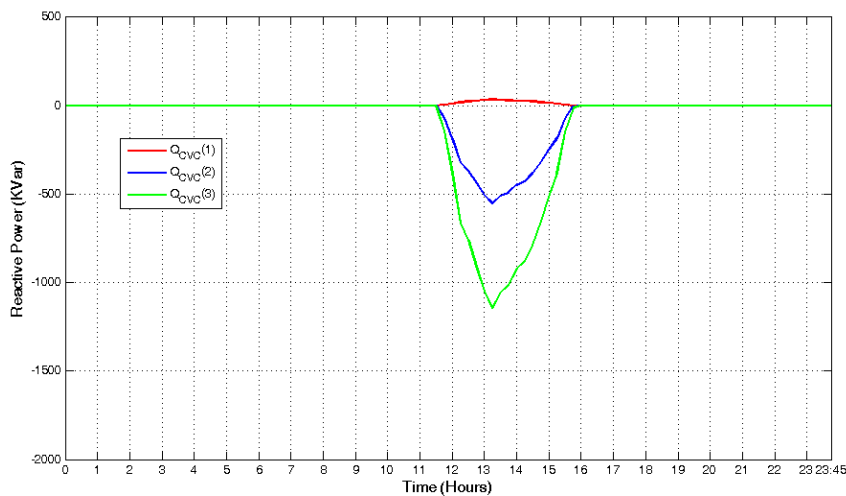


Εικόνα 6.30 Θέση λήψης (Tap Position) του μετασχηματιστή για δίκτυο με Συντονισμένο Έλεγχο Τάσης

Από τη σύγκριση των γραφημάτων της θέσης λήψης του μετασχηματιστή παρατηρούμε ότι κατά τον τοπικό έλεγχο γίνονται λιγότερες αλλαγές σε σχέση με το συντονισμένο (8 αντί για 13), γεγονός που οφείλεται κυρίως στο ότι στον τοπικό έλεγχο ο μετασχηματιστής ρυθμίζει μόνο την τάση στο δευτερεύον του, ενώ στον συντονισμένο συνεισφέρει στη ρύθμιση όλων των τάσεων, μέσω των υπολογισμών του κεντρικού ελεγκτή. Ωστόσο, όπως εξηγήσαμε και προηγουμένως, ο τοπικός έλεγχος αποτυγχάνει να διατηρήσει τις τάσεις εντός των ορίων, επομένως ο μικρότερος αριθμός αλλαγών, και συνεπώς η μικρότερη φθορά του μετασχηματιστή, δεν μπορούν να θεωρηθούν ως επιτυχία του τοπικού ελέγχου. Μάλιστα, παρατηρώντας πιο προσεκτικά τις αλλαγές λήψεις του τοπικού ελέγχου, παρατηρούμε ότι πραγματοποιεί δύο αυξήσεις στη θέση λήψης κατά τις ώρες που υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια (9:30 και 11:30), δυσχεραίνοντας ουσιαστικά το πρόβλημα ανύψωσης τάσης που υπάρχει στον 3^ο ζυγό εκείνες τις ώρες. Το γεγονός αυτό οφείλεται και πάλι στη δυνατότητα του μετασχηματιστή να ελέγχει μόνο την τάση στο δευτερεύον του, καθώς και στην έλλειψη επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ των μονάδων ρύθμισης τάσης.



Εικόνα 6.31 Ροή αέργου ισχύος των τριών αντιστροφών των φωτοβολταϊκών για δίκτυο με Τοπικό Έλεγχο Τάσης



Εικόνα 6.32 Ροή αέργου ισχύος των τριών αντιστροφών των φωτοβολταϊκών για δίκτυο με Συντονισμένο Έλεγχο Τάσης

Τέλος, συγκρίνοντας τις ροές αέργου ισχύος των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών, παρατηρούμε πως η συνολική κυκλοφορία αέργου ισχύος στο δίκτυο κατά τη διάρκεια μιας ημέρας είναι αρκετά μεγαλύτερη κατά τον τοπικό έλεγχο σε σχέση με το συντονισμένο. Πιο συγκεκριμένα, η απορρόφηση αέργου ισχύος του αντιστροφέα του 3^{ου} ζυγού στον τοπικό έλεγχο είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στον συντονισμένο, ενώ αντίθετα η απορρόφηση στον 2^ο ζυγό είναι μεν μικρότερη, αλλά όχι κατά πολύ. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι στον τοπικό έλεγχο ο κάθε αντιστροφέας κάνει αυτόνομα ρύθμιση μόνο της τάσης του σημείου κοινής σύνδεσης του με το δίκτυο. Έτσι, εφόσον μόνο η τάση του 3^{ου} ζυγού ανυψώνεται αρκετά πάνω από το όριο, μόνο αυτός ο αντιστροφέας θα προβεί σε μεγάλη απορρόφηση αέργου ισχύος. Αντίθετα, στον συντονισμένο έλεγχο οι αντιστροφείς συνεργάζονται μεταξύ τους, αλλά και με τον μετασχηματιστή, για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα με την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση για το δίκτυο και τον εξοπλισμό του. Έτσι, με το συντονισμένο έλεγχο, και επιτυγχάνεται η διατήρηση όλων των τάσεων εντός των επιθυμητών ορίων, αλλά και έχουμε πολύ μικρότερη κυκλοφορία αέργου ισχύος στο δίκτυο σε σχέση με τον τοπικό έλεγχο.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα – Προοπτικές Συνέχισης

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της κλιματικής αλλαγής και της σταδιακής μείωσης των αποθεμάτων ορυκτών φυσικών πόρων, όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας, έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη και την εγκατάσταση συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών για την κάλυψη μεγάλου μέρους των αναγκών του πλανήτη σε ενέργεια. Σημαντικότερες εξ αυτών είναι η ηλιακή ακτινοβολία και ο άνεμος, τις οποίες μπορούμε να τις μετατρέψουμε σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων και των ανεμογεννητριών αντίστοιχα.

Η μεγάλη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής, και κυρίως των φωτοβολταϊκών, στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργήσει ένα καινούριο πρόβλημα το οποίο πρέπει να επιλυθεί: την ανύψωση της 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 μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τον τοπικό έλεγχο τάσης και τον συντονισμένο έλεγχο τάσης.

Ο τοπικός έλεγχος τάσης έχει το χαρακτηριστικό ότι πραγματοποιείται τοπικά σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου (συνήθως στους κόμβους σύνδεσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας) με βάση κάποιες προδιαγραφές, χωρίς όμως να υπάρχει συνεργασία μεταξύ των διαφόρων συστημάτων ρύθμισης τάσης που είναι τοποθετημένα στο δίκτυο. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιούμε τους αντιστροφείς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής για να επιτύχουμε τον επιθυμητό έλεγχο της τάσης, τότε σε ένα σύστημα τοπικού ελέγχου ο κάθε αντιστροφέας θα εφαρμόζει αυτόνομα τη ρύθμιση της τάσης στον ζυγό διασύνδεσης του, χωρίς καμία επικοινωνία ή συνεργασία με τους υπόλοιπους αντιστροφείς, και με μόνη μετρούμενη παράμετρο την τάση του ζυγού του. Αυτός ο τρόπος αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης δεν έχει εγγυημένα αποτελέσματα και σίγουρα όχι τα βέλτιστα δυνατά. Πολλές φορές παρουσιάζονται αυξημένες απώλειες στο δίκτυο, κυκλοφορία περιττής αέργου ισχύος και φθορά των μετασχηματιστών από τις συχνές αλλαγές λήψης των ΣΑΤΥΦ, φαινόμενα τα οποία δεν είναι καθόλου επιθυμητά ούτε από λειτουργικής αλλά φυσικά ούτε και από οικονομικής πλευράς.

Αντίθετα, ο συντονισμένος έλεγχος τάσης περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός δικτύου επικοινωνίας μεταξύ των κρίσιμων 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, όπως οι αντιστροφείς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, οι μετασχηματιστές με συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), οι συστοιχίες πυκνωτών και άλλα. 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.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θέλαμε να εξετάσουμε τη λειτουργία του τοπικού και του συντονισμένου ελέγχου τάσης και έτσι πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο σε ένα μικροδίκτυο χαμηλής τάσης και σε ένα δίκτυο μέσης τάσης αντίστοιχα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των

αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων συμβαδίζουν απόλυτα με όσα αναφέραμε προηγουμένως για τον τρόπο λειτουργίας των δύο συστημάτων ρύθμισης τάσης.

Από την προσομοίωση του συστήματος τοπικού ελέγχου σε πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης συμπεραίνουμε ότι:

- Το πρότυπο μικροδίκτυο είναι προσεκτικά σχεδιασμένο καθώς η εγκατεστημένη ισχύς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν προκαλούσε ιδιαίτερα μεγάλο πρόβλημα ανύψωσης τάσης.
- Ο τοπικός έλεγχος βελτίωσε τα προφίλ των τάσεων, τόσο κατά τη συνδεδεμένη όσο και κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου.
- Ο τοπικός έλεγχος θα ήταν πιο αποτελεσματικός αν υπήρχε ποικιλία διαφορετικών τύπων ανανεώσιμων πηγών, αντί για μόνο φωτοβολταϊκά συστήματα όπως στο πείραμα μας. Αυτό συμβαίνει διότι η δυνατότητα των αντιστροφών του δικτύου να συνεισφέρουν στη ρύθμιση της τάσης δεν θα εξαρτάται μόνο από μια εξωτερική παράμετρο, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία, αλλά από περισσότερες, επομένως θα υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αντί για μόνο τις ώρες με ηλιοφάνεια.

Από την προσομοίωση του συστήματος συντονισμένου ελέγχου σε δίκτυο μέσης τάσης προέκυψε το βασικό συμπέρασμα ότι έχουμε μεγάλο έλεγχο πάνω στη λειτουργία του, αλλά και στην επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Γνωρίζουμε ότι η ρύθμιση τάσης που επιτυγχάνεται είναι κάθε χρονική στιγμή η βέλτιστη δυνατή, χωρίς να υπάρχει περιττή ροή αέργου ισχύος στο δίκτυο. Επίσης, η φθορά του μετασχηματιστή είναι μικρή, καθώς πραγματοποιούνται μόνο οι απολύτως απαραίτητες αλλαγές στις λήψεις του, οι οποίες προκύπτουν μέσα από μια σειρά κριτηρίων και ελέγχων. Η ύπαρξη του κεντρικού ελεγκτή και του δικτύου επικοινωνίας μας επιτρέπει να έχουμε ανά πάσα στιγμή την συνολική εποπτεία των παραμέτρων του δικτύου, και μπορούμε εύκολα να αλλάξουμε τη λειτουργία του συστήματος συντονισμένου ελέγχου, αν αυτό κριθεί σκόπιμο, μεταβάλλοντας κατάλληλα τις παραμέτρους του ελεγκτή. Αυτό είναι μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με τα συστήματα τοπικού ελέγχου, στα οποία οποιαδήποτε αλλαγή της λειτουργίας τους πρέπει να πραγματοποιηθεί ξεχωριστά σε κάθε στοιχείο του δικτύου που συμβάλλει στη ρύθμιση της τάσης. Τέλος, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του συντονισμένου ελέγχου τάσης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δικτύου με συστήματα τοπικού ελέγχου, συμπεραίνουμε ότι ο συντονισμένος έλεγχος είναι σαφώς πιο αποτελεσματικός από τον τοπικό στη ρύθμιση τάσης, καθώς επιτυγχάνει τους επιθυμητούς στόχους με την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε έχουν σημαντικές προοπτικές για περαιτέρω εξέλιξη και μελέτη των συστημάτων τοπικού και συντονισμένου ελέγχου τάσης. Αρχικά, θα μπορούσε να γίνει η μοντελοποίηση περισσότερων τύπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πέρα από τα φωτοβολταϊκά, όπως ανεμογεννητριών, μικροτουρμπινών, κυψελών καυσίμου και άλλα. Στη συνέχεια, εφόσον έχει χρησιμοποιηθεί ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου ο οποίος μπορεί να δέχεται σήματα εισόδου από εξωτερικές συσκευές σε πραγματικό χρόνο, θα μπορούσαν να αντικατασταθούν οι πίνακες τιμών για την ηλιοφάνεια, τη ζήτηση φορτίου, την ένταση του ανέμου κλπ, από πραγματικά δεδομένα που θα προέρχονταν από μετρητικά όργανα (πυρανόμετρα, ανεμόμετρα κλπ) και θα οδηγούνταν ως είσοδοι στο RTDS. Αυτό θα προσδώσει μια πιο ρεαλιστική εικόνα στα αποτελέσματα

που θα προκύψουν και θα μπορούν να μελετηθούν τυχόν έντονα μεταβατικά φαινόμενα που παρουσιάζονται στην πραγματικότητα.

Επίσης, θα μπορούσε να γίνει η τριφασική υλοποίηση των δικτύων που αναπτύχθηκαν στο RSCAD, αντί για τη μονοφασική που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία. Παράλληλα τα δίκτυα θα μπορούσαν να επεκταθούν, με την προσθήκη περισσότερων γραμμών, φορτίων, μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης, συστοιχίων πυκνωτών και άλλα. Εκτός από αλλαγές στα χαρακτηριστικά των δικτύων, μπορούν να πραγματοποιηθούν και τροποποιήσεις στα συστήματα ρύθμισης τάσης. Μπορούν να μοντελοποιηθούν περισσότερα μέσα ρύθμισης τάσης, όπως σύγχρονοι και στατοί πυκνωτές, STATCOM κ.α., και ο αλγόριθμος συντονισμένου ελέγχου να εξελιχθεί ώστε να τα συμπεριλαμβάνει κι αυτά, καθώς και τις αλλαγές λήψης του μετασχηματιστή, στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Τέλος, το σημαντικότερο ίσως που θα μπορούσε να πραγματοποιήσει κάποιος, ως άμεση συνέχεια της εργασίας, θα ήταν να αντικαταστήσει ένα ή και περισσότερα μοντέλα αντιστροφών διεσπαρμένης παραγωγής με πραγματικούς αντιστροφείς, οι οποίοι θα συνδεθούν κατάλληλα με το RTDS. Έτσι, 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, χωρίς όμως να διατρέχει κίνδυνο καταστροφής του, όπως μπορεί να συνέβαινε αν γινόταν η εγκατάσταση του στο δίκτυο χωρίς να έχει προηγηθεί ο κατάλληλος έλεγχος της ορθής λειτουργίας του. Κατά αντίστοιχο τρόπο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και προσομοίωση Control Hardware in the Loop (CHIL) για τον κεντρικό ελεγκτή του συστήματος συντονισμένου ελέγχου τάσης. Να αντικατασταθεί δηλαδή η χρησιμοποίηση του MATLAB ως ελεγκτή από έναν πραγματικό ελεγκτή που θα συνδεθεί στο RTDS και θα εκτελεί τον αλγόριθμο συντονισμένου ελέγχου τάσης.

Βιβλιογραφία

- [1] Distributed Generation (Wikipedia): http://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_generation
- [2] IEEE 118 bus system data:
http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf118/pg_tca118bus.htm
- [3] IEEE 300 bus system data:
http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf300/pg_tca300bus.htm
- [4] Convex Optimization (Wikipedia): http://en.wikipedia.org/wiki/Convex_optimization
- [5] Quadratic Programming (Wikipedia):
http://en.wikipedia.org/wiki/Quadratic_programming
- [6] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές”, Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 1997
- [7] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: Τόμος Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας”, Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 1985
- [8] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010
- [9] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr., “Power system analysis”, McGraw-Hill Inc., 1994
- [10] Κορλός Κ. Θεοφάνης, “Αντιμετώπιση φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2012
- [11] Κλεφτάκης Α. Βασίλειος, “Μελέτη προσομοίωσης «Power Hardware In the Loop» και διερεύνηση ανύψωσης τάσης εξαιτίας της διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2011
- [12] Νικόλαος Α. Σουλτανής, “Συμβολή στον έλεγχο και στην προσομοίωση συστημάτων ισχύος χαμηλής τάσης με διεσπαρμένη παραγωγή”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 2009
- [13] Ferry August Viawan, “Voltage control and voltage stability of power distribution systems in the presence of distributed generation”, thesis for the degree of doctor of philosophy, Chalmers University of Technology 2008
- [14] Fredrik Roos, “Coordinated Voltage Control”, master thesis, Lund University 2002
- [15] Tengku Juhana Tengku Hashim, Azah Mohamed, Hussain Shareef, “A review on voltage control methods for active distribution networks”, Electrical review, Universiti Kebangsaan Malaysia 2012
- [16] M. Stifter, B. Bletterie, H. Brunner, D. Burnier, H. Sawsan, F. Andren, R. Schwalbe, A. Abart, R. Nanning, F. Herb, R. Pointner, “DG DemoNet Validation: voltage control from simulation to field test”, *2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies Inc. (ISGT Europe)*, Manchester 2011
- [17] Andrzej Adamczyk, Mufit Altin, Omer Goksu, Remus Teodorescu, Florin Iov, “Generic 12-Bus test system for wind power integration studies”, *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille 2013
- [18] Sameh Kamel Mena Kodsi, Claudio A. Canizares, “Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with facts controllers”, Technical Report 2003
- [19] “Data for the IEEE 24-bus reliability test system”, Dayalbagh Educational Institute
- [20] Diogenes Molina, “Progress report on the development and validation of DiGSILENT PowerFactory model of the 39-Bus benchmark system for stability controls”, *IEEE Task Force on Benchmark Systems for Stability Controls*, Georgia Institute of Technology 2012
- [21] Kai Strunz, Ehsan Abbasi, Chad Abbey, Christophe Andrieu, Udaya Annakkage, Stefano Barsali, Ryan C. Campbell, Robert Fletcher, Feng Gao, Trevor Gaunt, Ani Gole, Nikos Hatziargyriou, Reza Iravani, Geza Joos, Hiroo Konishi, Maren Kuschke, Erkki

- Lakervi, Chen-Ching Liu, Jean Mahseredjian, Farid Mosallat, Dharshana Muthumuni, Antje Orths, Stavros Papathanassiou, Krzysztof Rudion, Zbigniew Styczynski, Suresh C. Verma, "Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources", *CIGRÉ Task Force C6.04.02*, 2013
- [22] Bogdan-Ionut Craciun, Tamas Kerekes, Dezso Sera, Remus Teodorescu, Andrian Timbus, "Benchmark networks for grid integration impact studies of large PV plants", Aalborg University, Denmark
- [23] Amany M. El-Zonkoly, "Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation", *Smart Grid and Renewable Energy*, 2011, 2, 1-11, Arab Academy of Science & Technology, Egypt 2011
- [24] Rohit Bhakar, Narayana Prasad Padhy, Hari Om Gupta, "Reference network development for distribution network pricing", *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES*, New Orleans, LA, USA 2010
- [25] Yuwa Chompoobutgool, Wei Li, Luigi Vanfretti, "Development and implementation of a nordic grid model for power system small-signal and transient stability studies in a free and open source software", *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, San Diego, CA, USA 2012
- [26] Yang Fan, Fan Ming-tian, Zhang Zu-ping, Su Jiam, "China MV distribution network benchmark for network integrated of renewable and distributed energy resources", *China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2010)*, China 2010
- [27] Stavros Papathanassiou, Nikos Hatzargyriou, Kai Strunz, "A Benchmark low voltage microgrid network", *CIGRÉ Symposium: "Power Systems with dispersed generation: Technologies Inc., impact and development, operation and performances"*, Athens, Greece, 2005
- [28] Jose Antonio Jardini, Carlos M. V. Tahan, M. R. Gouvea, Se Un Ahn, F. M. Figueiredo, "Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers", *IEEE Transactions on Power Delivery (Volume:15 , Issue: 1)*, 2000
- [29] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill Inc., 1999

Παράρτημα

Συνάρτηση ReadMeter

Η ReadMeter είναι η συνάρτηση που καλείται από το MATLAB όταν πρέπει να διαβαστεί και να αποθηκευτεί σε κάποια μεταβλητή η τιμή ενός μετρητή του περιβάλλοντος RUNTIME του RSCAD:

```
function [rm] = ReadMeter(String,Obj)
% Capture meter value

msg = sprintf('temp_float = MeterCapture("%s");',String);
jtcp('writes',Obj,msg);
jtcp('writes',Obj,'sprintf(temp_string, "VALSTOP = %f",temp_float);');
jtcp('writes',Obj,'ListenOnPortHandshake(temp_string);');

rmsg = jtcp('read',Obj);
ind=find(rmsg==13);
if isempty(ind)==0
    j=ind(1);
    rmsg=rmsg(1:j-1);
end
rmsg2 = char(rmsg);

while (isempty(strfind(rmsg2, 'VALSTOP')) == 1)
    jtcp('writes',Obj,msg);
    jtcp('writes',Obj,'sprintf(temp_string, "VALSTOP = %f",temp_float);');
    jtcp('writes',Obj,'ListenOnPortHandshake(temp_string);');
    rmsg = jtcp('read',Obj);
    ind=find(rmsg==13);
    if isempty(ind)==0
        j=ind(1);
        rmsg=rmsg(1:j-1);
    end
    rmsg2 = char(rmsg);
end
% disp(rmsg2);
if (regexp(rmsg2, 'VALSTOP'))
    expr2 = 'VALSTOP\s*=\s*(?<var_value1>(-)?\d+(\.d+)?)';
    [tokens value] = regexp(rmsg2, expr2, 'tokens', 'names');
    rm = str2double(value.var_value1);
end

end
```