



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

**Μελέτη τοπικών ελέγχων ρύθμισης τάσης σε δίκτυα διανομής με  
υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ελένη Α. Δαρίδου

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

Αθήνα, Ιούλιος 2017





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

**Μελέτη τοπικών ελέγχων ρύθμισης τάσης σε δίκτυα διανομής με  
υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ελένη Α. Δαρίδου

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11<sup>η</sup> Ιουλίου 2017.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Γεωργιάκης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π..

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....  
Ελένη Α. Δαρίδου

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

Copyright © Ελένη Α. Δαρίδου, 2017  
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 μελετάται η επίδραση τοπικών ελέγχων ρύθμισης τάσης σε δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Η ρύθμιση της τάσης κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για τέτοιου είδους δίκτυα καθώς η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής προκαλεί ιδιαίτερες διακυμάνσεις στην τάση. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε δύο διαφορετικά πρότυπα δίκτυα, ένα χαμηλής και ένα μέσης τάσης, για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής.

Αρχικά, γίνεται μία παρουσίαση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής δίνοντας παράλληλα σημασία στις επιπτώσεις που επιφέρει η ένταξή τους στα δίκτυα διανομής, κυρίως αναφορικά με την τάση του δικτύου. Επίσης, περιγράφονται οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίζονται οι επιπτώσεις αυτές στο προφίλ της τάσης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα είδη των μονάδων αποθήκευσης που εντάσσονται σταδιακά στα δίκτυα διανομής με έμφαση στους συσσωρευτές (μπαταρίες) για τους οποίους αναφέρονται και κάποιες μοντελοποιήσεις για τη χρησιμοποίησή τους σε προσομοιώσεις.

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. Παράλληλα περιγράφεται και το αντίστοιχο λογισμικό που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των δικτύων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων (RSCAD).

Ακολούθως γίνεται η περιγραφή των πρότυπων δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις καθώς και η παρουσίαση και η ανάλυση των τοπικών ελέγχων που εφαρμόστηκαν κατά τις προσομοιώσεις αυτές. Οι έλεγχοι που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία είναι ο έλεγχος με τη χρήση κλασικής Q-V droop και ο γενικευμένος έλεγχος που βασίζεται στο λόγο R/X της γραμμής. Εκτός από αυτούς τους ελέγχους προτείνονται δύο ακόμη έλεγχοι, ένας που συνδυάζει Q-V droop και P-V droop και ένας τροποποιημένος έλεγχος για ρύθμιση τάσης. Με τον τροποποιημένο έλεγχο επιτυγχάνεται περιορισμός των ενεργειακών απαιτήσεων. Αυτό συμβαίνει διότι δεν χρησιμοποιείται ενεργός ισχύς όταν η διακύμανση της τάσης μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά μόνο με τη χρήση αέργου, οπότε και λειτουργεί με Q-V droop. Για μεγαλύτερες διακυμάνσεις λειτουργεί όπως και ο γενικευμένος έλεγχος, λαμβάνοντας υπόψη το λόγο R/X της γραμμής.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις, το πρώτο τμήμα τους αφορά το δίκτυο χαμηλής τάσης στο οποίο εφαρμόστηκαν τοπικοί έλεγχοι μέσω των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών διατάξεων και της μονάδας αποθήκευσης που διαθέτει το συγκεκριμένο δίκτυο. Οι τέσσερις διαφορετικοί έλεγχοι πραγματοποιούνται από τον αντιστροφέα της μπαταρίας με παράλληλο έλεγχο Q-V droop από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών. Οι έλεγχοι αυτοί περιλαμβάνουν ρύθμιση με άεργο ισχύ ή άεργο σε συνδυασμό με ενεργό.

Αντίστοιχες προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και για το δίκτυο μέσης τάσης για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε στους ζυγούς που υπάρχει μονάδα αποθήκευσης. Εξαιτίας του λόγου R/X των γραμμών του δικτύου μέσης τάσης, οι προσομοιώσεις αυτές μας έδωσαν ενδιαφέροντα

αποτελέσματα κατά τη σύγκριση του τροποποιημένου ελέγχου με τους υπόλοιπους, τα οποία δεν ήταν δυνατό να εντοπιστούν στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του δικτύου χαμηλής τάσης.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα δύο πρότυπα δίκτυα και προτείνονται προοπτικές συνέχισης.

## **Λέξεις κλειδιά**

Διεσπαρμένη παραγωγή, φωτοβολταϊκά συστήματα, μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, συσσωρευτές, ρύθμιση τάσης, τοπικός έλεγχος, πρότυπα δίκτυα, ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου, RTDS, αντιστροφείας, τροποποιημένος τοπικός έλεγχος, έλεγχος αέργου ισχύος.

# Abstract

This diploma thesis examines and compares local voltage controls for voltage regulation in distribution networks. Voltage regulation is essential in this kind of networks while the rate of integration of distributed generation is increasing. In this framework we conducted simulations for two different benchmark distribution networks of low and medium voltage.

Initially, we summarise the basic characteristics of distributed energy resources and the effects of their large-scale integration in distribution networks. Afterwards, we examine the most popular methods of mitigating these effects. Furthermore we present the different types of energy storage systems, emphasizing on battery storage systems. Also we refer some battery models which can be used in simulating the characteristics and behavior of the battery storage systems.

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 the different local voltage controls that we used. The voltage is locally controlled by the reactive power of the photovoltaic inverters as well as by the different local control methods conducted by the inverter of the battery storage system. Four different methods are examined, a classic Q-V droop, a method based on R/X ratio of the line, a combination of Q-V and P-V droop and a modified control based on R/X ratio of the line. The last two of them are proposed in this diploma thesis. Our aim is to reduce real power consumption or production while regulating the voltage level.

In the next experiment that was conducted a benchmark medium voltage microgrid was modeled in RSCAD in order to examine the effect of the previous voltage regulation controls. The distributed generation was further increased. 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.

## Keywords

Distributed generation, microgrid, inverter, benchmark microgrid, energy storage systems, battery, local control, modified control, droop, ratio R/X, voltage control.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Νάσο Βασιλάκη για την αμέριστη συμπαράσταση και καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, καθώς και το Μάριο Μανιατόπουλο και όλα τα μέλη του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ για τη βοήθειά τους.

Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω τον κ Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου προσέφερε να αναλάβω την παρούσα διπλωματική εργασία και να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ελένη Δαρίδου  
Ιούλιος 2017



## **Πίνακας περιεχομένων**

1 Διεσπαρμένη παραγωγή.....	11
1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο.....	12
2 Ρύθμιση Τάσης.....	15
2.1 Εισαγωγή.....	15
2.2 Συμβατικές Μέθοδοι.....	16
2.3 Σύγχρονες μέθοδοι.....	19
2.4 Έλεγχοι τάσης.....	22
3 Αποθήκευση ενέργειας.....	24
3.1 Εισαγωγή.....	24
3.2 Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
3.3 Μοντέλα αναπαράστασης συσσωρευτών.....	42
4 Ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου.....	48
4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του RTDS.....	49
4.2 Λογισμικό RSCAD.....	50
5 Περιγραφή Δικτύου.....	54
5.1 Εισαγωγή.....	54
5.2 Προτυποποίηση Δικτύων.....	54
5.3 Πρότυπο δίκτυο Μέσης τάσης.....	73
6 Ρύθμιση τάσης με τη μπαταρία.....	77
6.1 Εισαγωγή.....	77
6.2 Τοπικός έλεγχος με Q-V droop.....	80
6.3 Τοπικός έλεγχος βασισμένος στο λόγο R/X.....	83
6.4 Τοπικός έλεγχος με Q-V droop και P-V droop.....	89
6.5 Τροποποιημένος τοπικός έλεγχος.....	92
6.6 Οριακές συνθήκες.....	94
7 Τοπικός έλεγχος στο δίκτυο χαμηλής τάσης.....	103
7.1 Εισαγωγή.....	103
7.2 Ανάλυση των ελέγχων για τη ρύθμιση τάσης.....	105
7.3 Σύγκριση τοπικών ελέγχων για τη ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο χαμηλής τάσης....	114
8 Τοπικός έλεγχος στο δίκτυο μέσης τάσης.....	117
8.1 Εισαγωγή.....	117
8.2 Ανάλυση των ελέγχων για τη ρύθμιση τάσης.....	119
8.3 Σύγκριση τοπικών ελέγχων για τη ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο χαμηλής τάσης....	126
9 Συμπεράσματα-Προοπτικές συνέχισης.....	128

# 1 Διεσπαρμένη παραγωγή

## 1.1 Εισαγωγή

Τα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί ώστε να λειτουργούν με μία λογική μονής κατεύθυνσης. Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή οι σταθμοί καύσης άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου, οι πυρηνικοί σταθμοί και τα μεγάλης ισχύος υδροηλεκτρικά εργοστάσια, βρίσκονται ως επί των πλείστων κοντά στους πόρους που χρησιμοποιούν. Αυτό όμως σημαίνει ότι βρίσκονται και μακριά από τα σημεία του δικτύου στα οποία υπάρχει η μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, η ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές μέσω των συστημάτων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεγάλη όμως απόσταση, μεταξύ των σημείων παραγωγής από τα σημεία κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις από την πλευρά του δικτύου μεταφοράς με οικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες [1].

Στην εποχή μας όμως η μορφή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζει ακολουθώντας τις αλλαγές στη μορφή και το μέγεθος της ζήτησης. Παρατηρείται μία μείωση του κόστους παραγωγής ενώ αντίθετα το κόστος της μεταφοράς ενέργειας σε μακρινές αποστάσεις είναι σημαντικό. Επιπλέον, η αύξηση των απωλειών κατά τη μεταφορά καθιστά καταλληλότερη την υιοθέτηση ενός αποκεντρωμένου συστήματος στο οποίο η παραγωγή μέρους της ενέργειας γίνεται κοντά στην κατανάλωση. Η αποκέντρωση αυτή του δικτύου επιτυγχάνεται με το σχηματισμό μικροδικτύων (microgrids). Έτσι οι καταναλωτές αλλά και οι παραγωγοί, που αποτελούν το μικροδίκτυο, αλληλεπιδρούν με το δίκτυο διανομής και υπάρχει ροή ηλεκτρικής ενέργειας και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Ο όρος Διεσπαρμένη Παραγωγή (Distributed Generation) περιγράφει την αποκέντρωση της παραγωγής ή της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής διασπείρονται μέσα στο δίκτυο και βρίσκονται κοντά στους καταναλωτές. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται μειωμένες απώλειες ισχύος κατά τη μεταφορά και μικρότερο κόστος μεταφοράς, γεγονός που καθιστά αποδοτικότερο το δίκτυο. Η διεσπαρμένη παραγωγή διαφέρει από την κλασική κεντρική παραγωγή καθώς σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια παράγεται σε μέρη στα οποία δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση συμβατικών σταθμών και έτσι γίνεται αποδοτικότερη γεωγραφική διανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής εξαιτίας της φύσης τους αλλά και της θέσης τους έχουν μικρή εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες [2].

Στη Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ) χρησιμοποιούνται κυρίως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης χρησιμοποιούνται γεννήτριες και μικροτουρμπίνες πετρελαίου ή φυσικού αερίου αλλά και μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας όπως μπαταρίες, flywheel storage, πυκνωτές και άλλες [3][4]. Επιπλέον στη διεσπαρμένη παραγωγή περιλαμβάνονται και οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας (ΣΗΘ). Ο όρος ΑΠΕ αναφέρεται κυρίως στις παρακάτω μορφές ενέργειας [5]:

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 Την ενέργεια της «Βιομάζας»

Αυτή τη στιγμή οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής είναι κυρίως αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις οι οποίες σχηματίζουν τα μικροδίκτυα και συνδέονται στο δίκτυο διανομής (Μέση και Χαμηλή τάση).

## 1.2 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο

Η ενσωμάτωση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο αλλάζει τον τρόπο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Οι καταναλωτές αποκτούν ένα βαθμό ενεργειακής αυτονομίας ενώ το σύστημα γίνεται πιο ευέλικτο και ανοιχτό σε μικρούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας[3]. Τα οφέλη της εγκατάστασης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγή στο δίκτυο είναι σημαντικά τόσο για τους καταναλωτές/παραγωγούς όσο και για το ίδιο το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα κυριότερα από τα οφέλη είναι τα παρακάτω:

- Ρύθμιση τάσης ώστε να αποφευχθούν ανυψώσεις και πτώσεις της τάσης,
- Βελτίωση της ποιότητας ισχύος,
- Μείωση των απωλειών ενέργειας,
- Μείωση της απαιτούμενης χωρητικότητας ισχύος του δικτύου μεταφοράς και διανομής,
- Αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου σε κρίσιμα σημεία σε περίπτωση σφάλματος στο κύριο δίκτυο.

Εντούτοις, το υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχει σχεδιαστεί ώστε να φιλοξενεί παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας στο επίπεδο της διανομής. Έτσι για να γίνει αποτελεσματικά η ενσωμάτωση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής απαιτείται προσεκτική αξιολόγηση και εκτίμηση των επιπτώσεων της σύνδεσής τους στο δίκτυο.

Τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την ενσωμάτωση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι τα παρακάτω:

- Υποβιβασμός της ποιότητας ισχύος λόγω της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης και του flicker
- Προβλήματα στο έλεγχο του συστήματος όπως για παράδειγμα η ρύθμιση της τάσης
- Αδυναμία συντονισμού με τον υφιστάμενο εξοπλισμό προστασίας (διακόπτες, ασφάλειες, διακόπτες ισχύος, circuit breakers, reclosers, fuses, sectionalizing switches)
- Αύξηση της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά τη διάρκεια σφάλματος

- Ανεπιθύμητη νησιδοποίηση από την ενεργοποίηση των μέσων προστασίας εξαιτίας κάποιου σφάλματος στο δίκτυο
- Υπερτάσεις σε ζυγούς καταναλωτών που συνδέονται στον ίδιο μετασχηματιστή διανομής με τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής
- Υπέρβαση των θερμικών ορίων των γραμμών στις οποίες συνδέονται οι μονάδες εξαιτίας της παραγωγής πλεονάζουσας ενέργειας [6]

Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος προέρχεται από τη λειτουργία των ηλεκτρονικών ισχύος (αντιστροφείς, μετατροπείς DC-DC, ανορθωτές) μέσω των οποίων συνδέονται οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο. Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος κρίνεται απαραίτητη για να διαμορφωθεί κατάλληλα η κυματομορφή της τάσης, που προκύπτει από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, ώστε να είναι δυνατή η σύνδεσή τους στο δίκτυο διανομής. Για παράδειγμα οι συστοιχίες φωτοβολταϊκών παράγουν DC τάση ενώ η τάση των αιολικών πάρκων είναι μεν εναλλασσόμενη αλλά με μεγάλες διακυμάνσεις πλάτους και συχνότητας. Έτσι, τα ηλεκτρονικά ισχύος που τοποθετούνται στην έξοδο των μονάδων παραγωγής εξασφαλίζουν ότι η τάση θα έχει την κατάλληλη μορφή για την ομαλή σύνδεση στο δίκτυο. Για την περικοπή των αρμονικών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται φίλτρα στην έξοδο των ηλεκτρονικών ισχύος τα οποία περικόπτουν τις αρμονικές συνιστώσες από κάποια τάξη και πάνω καταφέροντας να περιορίσουν το πρόβλημα. Βέβαια, στις περισσότερες περιπτώσεις το πρόβλημα περιορίζεται αλλά δεν εξαλείφεται τελείως.

Η ενσωμάτωση της διεσπαρμένης παραγωγής απαιτεί και επαναπροσδιορισμό του είδους και της ρύθμισης των μέσων προστασίας που χρησιμοποιούνται. Αυτό γίνεται κατανοητό αν αναλογιστεί κανείς ότι ο ολόκληρος ο σχεδιασμός της προστασίας του δικτύου από το διαχειριστή έχει γίνει με βάση την “παραδοσιακή” μορφή του δικτύου. Με την ενσωμάτωση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής η μορφή του δικτύου αλλάζει, υπάρχει ροή ισχύος και από τους ζυγούς των νέων μονάδων, η λειτουργία των οποίων δεν μπορεί να προβλεφθεί με απόλυτη ακρίβεια. Για παράδειγμα κατά τη διάρκεια κάποιου σφάλματος, εκτός από τις συμβατικές μονάδες, στο ρεύμα σφάλματος συμβάλλουν και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής γεγονός που δεν λαμβάνεται υπόψη από τα μέσα προστασίας. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαίο να γίνει εκ νέου μελέτη για την προστασία και το έλεγχο του δικτύου από τον διαχειριστή.

Το σημαντικότερο πρόβλημα που προκαλεί η ενσωμάτωση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής είναι η μεταβολές στην τάση, κυρίως η ανύψωση αλλά και η πτώση τάσης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στη στοχαστικότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι και οι βασικές μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές εξαρτάται από αστάθμητους παράγοντες, έτσι είναι δύσκολη η πρόβλεψη της και ο ταυτοχρονισμός της με τα φορτία. Κατά τη διάρκεια της μέγιστης ζήτησης μπορεί να είναι ανεπαρκής ή μηδενική η παραγωγή ενώ μπορεί να είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Με αυτόν τον τρόπο οδηγούμαστε σε πτώσεις και ανυψώσεις της τάσης αντίστοιχα λόγω της ανισορροπίας στο ισοζύγιο προσφοράς-ζήτησης. Η μεγάλη αύξηση της

τάσης μπορεί να προκαλέσει υπέρβαση του ορίου των γραμμών και στην χειρότερη περίπτωση αντίστροφη ροή ισχύος. Αυτές οι ανυψώσεις της τάσης μπορεί να μειώσουν τη διάρκεια ζωής των οικιακών συσκευών αλλά και να προκαλέσουν βλάβες στον ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό που συνδέεται στο δίκτυο. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει λεπτομερής αναφορά στις μεθόδους ρύθμισης της τάσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άμβλυνση του προβλήματος.

## 2 Ρύθμιση Τάσης

### 2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα σύγχρονα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν προς μία κατεύθυνση. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στις μεγάλες συμβατικές μονάδες, ανυψώνεται η τάση για τη μεταφορά και στη συνέχεια διανέμεται στα χαμηλότερα επίπεδα τάσης.

Όμως, με την συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής η μορφή του δικτύου αλλάζει. Το δίκτυο διανομής δεν είναι πλέον ένα παθητικό δίκτυο που τροφοδοτεί φορτία. Υπάρχει παραγωγή στη χαμηλή και τη μέση τάση τόσο από συμβατικές μονάδες όσο και από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και η ροή ισχύος εξαρτάται τόσο από τα φορτία όσο και από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.

Η μεταβολή αυτή στη μορφή του δικτύου οδηγεί σε προβλήματα τα συνηθέστερα εκ των οποίων αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το κυριότερο πρόβλημα όμως είναι οι υπερτάσεις αλλά και οι πτώσεις τάσης που προκαλούνται από τη λειτουργία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Για τον περιορισμό του προβλήματος εφαρμόζονται ήδη κάποιες μέθοδοι ενώ παράλληλα υπάρχει μια τάση προς τη διερεύνηση και χρήση νέων μεθόδων [7].

#### **Συμβατικές μέθοδοι ρύθμισης τάσης:**

- Οριοθέτηση του πλήθους των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο
- Εγκατάσταση νέου εξοπλισμού στο δίκτυο
- Λήψεις αλλαγής τάσεων Μετασχηματιστών Ισχύος
- Ρυθμιστές τάσης
- Σύγχρονοι πυκνωτές
- Στατοί πυκνωτές

#### **Σύγχρονες μέθοδοι ρύθμισης τάσης:**

- STATCOM, SVC
- Αποθήκευση ενέργειας (μπαταρίες, υπερπυκνωτές-supercapacitors)
- Περιορισμός της παραγωγής των υφιστάμενων μονάδων όταν παρατηρείται αύξηση του μέτρου της τάσης
- Έλεγχος μέσω αέργου ισχύος
- Αυτοκατανάλωση (self-consumption)
- Demand side management (DSM)

## **2.2 Συμβατικές Μέθοδοι**

### **2.2.1 Οριοθέτηση του πλήθους των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο**

Ένας συμβατικός και κλασικός τρόπος για να μειωθούν τα προβλήματα που προκαλούνται από τη μεγάλη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής είναι ο περιορισμός των μονάδων που μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο. Με τον τρόπο όμως περιορίζουμε και τα οφέλη της σύνδεσης μικρών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής κοντά στο φορτίο. Οπότε γίνεται αντιληπτό ότι είναι προτιμότερο να αναζητηθούν μέθοδοι περιορισμού των μεταβολών στην τάση που θα ευνοούν τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής. Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των ίδιων των μονάδων για τη ρύθμιση της τάσης.

### **2.2.2 Εγκατάσταση νέου εξοπλισμού στο δίκτυο**

Σε περίπτωση που μετά τη μελέτη για την εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε κάποιο σημείο του δικτύου διανομής προκύψουν προβλήματα στο δίκτυο μία λύση που μπορεί να προταθεί είναι η εγκατάσταση νέου εξοπλισμού. Αυτό μπορεί να σημαίνει αναβάθμιση της γραμμής που περιλαμβάνει τη νέα μονάδα παραγωγής, εγκατάσταση νέας αποκλειστικής γραμμής, επέκταση του υποσταθμού, ή κατασκευή νέου υποσταθμού. Όπως γίνεται κατανοητό η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα δαπανηρή είτε για το διαχειριστή του δικτύου είτε και για τους παραγωγούς οι θα επωμιστούν σημαντικό μέρος του κόστους ανάλογα με την λύση που θα επιλεγεί. Ειδικά όμως όταν αναφερόμαστε σε μικρού μεγέθους μονάδες παραγωγής το κόστος αυτό μπορεί να γίνει απαγορευτικό για την πραγματοποίηση της επένδυσης.

### **2.2.3 Λήψεις αλλαγής τάσεων Μετασχηματιστών Ισχύος**

Ο κύριος προορισμός ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι ο μετασχηματισμός 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 λήσεων 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.

## 2.2.4 Ρυθμιστές Τάσης

Λήψεις αλλαγής της σχέσεως μετασχηματισμού υπάρχουν, όπως είπαμε, σε κάθε μετασχηματιστή ισχύος. Εκτός αυτών όμως, υπάρχουν και ειδικοί μετασχηματιστές για τη ρύθμιση της τάσης, οι οποίοι ονομάζονται Ρυθμιστές Τάσης. 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 τάσης 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 τον 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.

## 2.2.5 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 ώρες που 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 πηγή 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 απαιτεί παροχή αέργου ισχύος στο άκρο αφίξεως σε περιόδους μεγάλων φορτίων για να διατηρήσει την τάση της, ενώ για τον ίδιο λόγο σε περιόδους μειωμένου φορτίου απαιτεί απορρόφηση αέργου ισχύος.

## 2.2.6 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

### 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

Μια σύγχρονη λύση για την αντιμετώπιση των φαινομένων ανύψωσης και βύθισης τάσης που παρουσιάζονται στα σύγχρονα ενεργά δίκτυα διανομής είναι η εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [8] [9]. 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 της παραγόμενης ισχύς 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 αντίστοιχης 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.

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 [10].

### **2.3.4 Έλεγχος της αέργου ισχύος των αντιστροφέων της ΔΠ**

Η επόμενη 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 [11].

### **2.3.5 Αυτοκατανάλωση (self-consumption)**

Στην περίπτωση της αυτοκατανάλωσης οι παραγωγοί που είναι ταυτόχρονα και καταναλωτές καταναλώνουν μέρος της ενέργειας που παράγουν. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση του συνολικού φορτίου που “βλέπει” ο μετασχηματιστής διανομής και έτσι περιορίζεται και ο κίνδυνος υπερτάσεων [12][13].

### **2.3.6 Demand Side Management (DSM)**

Ο προγραμματισμός της ζήτησης μπορεί να βοηθήσει να αποφευχθούν υπερτάσεις σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Αυτό μπορεί να γίνει με χρονική μετακίνηση φορτίων από τις ώρες αιχμής σε ώρες χαμηλότερης ζήτησης [13].

## **2.4 Έλεγχος τάσης**

Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες που πραγματοποιούνται σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ρύθμιση της τάσης. Η πραγματοποίηση της λειτουργίας αυτής γίνεται με ελέγχους οι κυριότεροι από τους οποίους περιγράφονται παρακάτω [14].

### **2.4.1 Τοπικός έλεγχος**

Οι τοπικοί έλεγχοι είναι η βασική κατηγορία ελέγχων που πραγματοποιούνται σε ένα μικροδίκτυο. Η κύρια χρήση των τοπικών ελεγκτών είναι ο έλεγχος της λειτουργίας των τοπικών μονάδων παραγωγής. Στόχος τους είναι ο έλεγχος του σημείου λειτουργίας των μονάδων και των ηλεκτρονικών ισχύος που συνδέονται σε αυτές χωρίς τη χρήση συστημάτων επικοινωνίας. Λόγω της απουσίας συστήματος επικοινωνίας η πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων είναι χαμηλή, γεγονός που οδηγεί και σε χαμηλότερο κόστος. Οι μετρήσεις που απαιτούνται για την πραγματοποίηση αυτών των ελέγχων είναι οι τοπικές τάσεις και τα τοπικά ρεύματα (στο σημείο κοινής σύνδεσης). Στα περισσότερα μικροδίκτυα (applications) οι τοπικοί ελεγκτές συνυπάρχουν με άλλους τύπους ελεγκτών, βέβαια κατά τη νησιδοποίηση των μικροδικτύων οι τοπικοί ελεγκτές είναι μόνοι ελεγκτές που απαιτούνται. Οι τοπικοί ελεγκτές πρέπει επίσης να διασφαλίσουν την απρόσκοπτη σύνδεση και αποσύνδεση των μονάδων παραγωγής όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο.

### **2.4.2 Συντονισμένος (ή Κεντρικός) έλεγχος**

Στον συντονισμένο ή κεντρικό έλεγχο εκτός από τους τοπικούς ελεγκτές (LC) υπάρχει ένα κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου (Microgrid Central Controller MCGC) καθώς και ένα σύστημα επικοινωνίας (Distribution Management System DMS). Ο κεντρικός ελεγκτής συγκεντρώνει δεδομένα από το σύνολο του δικτύου μέσω του συστήματος επικοινωνίας και ορίζει τη λειτουργία του κάθε τοπικού ελεγκτή με σκοπό τη καλύτερη λειτουργία του δικτύου. Στη συνέχεια αποστέλλει σε κάθε τοπικό ελεγκτή τις αντίστοιχες οδηγίες. Ο κεντρικός ελεγκτής βρίσκεται σε κάποιο κεντρικό σημείο ενός δικτύου διανομής, σε κάποιο υποσταθμό, ενώ οι τοπικοί ελεγκτές βρίσκονται, όπως και στον τοπικό έλεγχο, στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.

### **2.4.3 Αποκεντρωμένος έλεγχος ( Decentralized control)**

Η δομή και ο εξοπλισμός στον αποκεντρωμένο έλεγχο συμπίπτουν με τον συντονισμένο έλεγχο που αναφέρθηκε παραπάνω, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία κεντρικού ελεγκτή. Σκοπός του αποκεντρωμένου ελέγχου είναι η μεγιστοποίηση της αυτονομίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και των φορτίων. Έτσι στην περίπτωση αυτή έχουμε τη χρήση διάφορων αλγορίθμων (peer-to-peer, gossip-based algorithms) για την επικοινωνία μεταξύ των τοπικών ελεγκτών οι οποίοι αναλαμβάνουν ενεργό ρόλο στον

καθορισμό των παραμέτρων της λειτουργίας του δικτύου. Με τη χρήση των αλγορίθμων αυτών οι τοπικοί ελεγκτές λαμβάνουν δεδομένα από άλλους τοπικούς ελεγκτές και μπορούν να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους ακόμα και χωρίς τη διαμεσολάβηση του κεντρικού ελεγκτή.

Ο αποκεντρωμένος έλεγχος χρησιμοποιείται κυρίως σε μικροδίκτυα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- παρουσία σημαντικού αριθμού μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με διαφορετικούς ιδιοκτήτες που απαιτούν τοπική λήψη αποφάσεων
- ένταξη των μονάδων στην αγορά ενέργειας που απαιτεί ένα βαθμό ανεξαρτησίας στη λήψη αποφάσεων
- όταν οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής έχουν κι άλλα καθήκοντα εκτός από την παροχή ενέργειας προς το δίκτυο, όπως η παραγωγή θερμότητας για τις τοπικές εγκαταστάσεις, η ρύθμιση της τάσης σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, η παροχή εφεδρείας σε κρίσιμα τοπικά φορτία σε περίπτωση αστοχία στο κύριο δίκτυο.

## 3 Αποθήκευση ενέργειας

### 3.1 Εισαγωγή

Η αποθήκευση ενέργειας έχει τη δυνατότητα να προσφέρει πολυάριθμα οφέλη στο ηλεκτρικό δίκτυο τόσο από λειτουργική όσο και από οικονομική άποψη. Γι αυτό το λόγο πολλές εταιρείες έχουν στρέψει την προσοχή τους στις διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον οι αποθηκευτικές μονάδες μεγάλης κλίμακας συμβάλλουν σημαντικά στην αποτελεσματική και πιο αποδοτική λειτουργία του δικτύου. Έτσι, προκύπτουν χαμηλότερες τιμές, λιγότερες εκπομπές αερίων και μεγαλύτερη αξιοπιστία στη διανομή ενέργειας.

Οι συμβατικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι μονάδες παραγωγής άνθρακα ή φυσικού αερίου, πρέπει να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται ακολουθώντας τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Όμως αυτές οι μεγάλες μονάδες δεν έχουν την ευελιξία που απαιτείται για την απότομη αυξομείωση της παραγωγής τους. Για το λόγο αυτό η λειτουργία τους περιορίζεται σε ένα ποσοστό της εγκατεστημένης τους ισχύος, ενώ σπάνια λειτουργούν παράγοντας μέγιστη ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι η ζητούμενη ενέργεια παράγεται με μεγαλύτερο κόστος, ενώ παράλληλα αυξάνονται και οι εκπομπές αερίων που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα. Επιπροσθέτως, η αδυναμία των μεγάλων συμβατικών μονάδων παραγωγής να ακολουθήσουν μεγάλες και ξαφνικές αιχμές του φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές πτώσεις τάσεως αλλά και μείωση της ποιότητας της ισχύος που παρέχεται στους καταναλωτές.

Με την συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να καταστεί ιδιαίτερα χρήσιμη. Όπως έχει αναφερθεί η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές εμπεριέχει μία στοχαστικότητα εξαιτίας της εξάρτησης των πηγών αυτών από τις καιρικές συνθήκες. Με τη χρήση, όμως, μονάδων αποθήκευσης σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας της ενέργειας κατά τις περιόδους μεγάλης παραγωγής. Στη συνέχεια η ενέργεια αυτή αποδίδεται ανάλογα με τη ζήτηση όταν η παραγωγή είναι μειωμένη, όταν δεν έχει ήλιο ή δε φυσάει.

Όμως, η αποθήκευση της ενέργειας από διάφορες πηγές ώστε να χρησιμοποιηθεί αργότερα δεν είναι η μοναδική συμβολή της αποθήκευσης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η υιοθέτηση διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας συμβάλλει στη ρύθμιση της συχνότητας, δίνει τη δυνατότητα για φθηνότερη και αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί αδιάλειπτη πηγή ενέργειας για κρίσιμα φορτία.

Συμβολή των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας [15][16][17]

- ◆ Κατά την παράγωγή:
  - Συμβατική παραγωγή:
    - Δυνατότητα για black start (αυτοδύναμη εκκίνηση)
    - Υποστήριξη των μονάδων παραγωγής
  - Παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές:

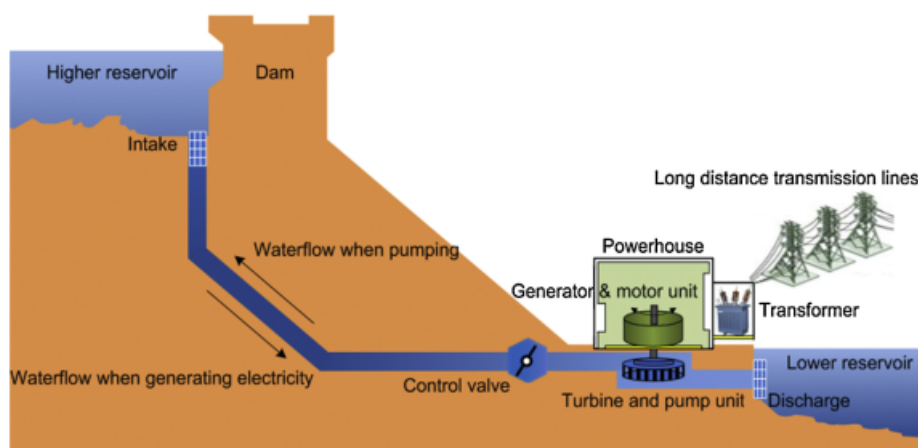
- Ευελιξία στη χρήση διεσπαρμένης παραγωγής [18]
  - Capacity firming
  - Περιορισμός των διαταραχών που προκαλούνται στο ανάντη δίκτυο
  - Μείωση των περιπτώσεων που απαιτείται περικοπή της παραγωγής [10]
- ◆ Κατά τη μεταφορά
    - Συμμετοχή στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας[19][20]
    - Συμμετοχή στην δευτερεύουσα ρύθμιση της συχνότητας
    - Συμμετοχή στην τριτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας
    - Βελτίωση της ευστάθειας της συχνότητας σε αδύναμα δίκτυα
    - Καθυστέρηση της εγκατάστασης νέου εξοπλισμού (μετασχηματιστών, γεννητριών κ.α.)
    - Συμμετοχή στην ρύθμιση του συντελεστή ισχύος
- ◆ Κατά τη διανομή
    - Capacity support
    - Δυναμική, τοπική ρύθμιση τάσης
    - Υποστήριξη του δικτύου σε απρόοπτα συμβάντα
    - Σκόπιμη νησιδοποίηση μέρους του δικτύου για την προστασία φορτίων από σφάλματα στο υπόλοιπο δίκτυο
    - Αντιστάθμιση αέργου ισχύος
    - Βελτίωση της ποιότητας της διανεμόμενης ισχύος [21]
    - Περιορισμός των διαταραχών που προκαλούνται στο ανάντη δίκτυο
- ◆ Καταναλωτές
    - Μείωση της αιχμής της ζήτησης
    - Διαχείριση της κατανάλωσης για μείωση του κόστους (χρονική μετατόπιση φορτίων)
    - Συμβολή στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος
    - Εξασφάλιση αδιάλειπτης παροχής ενέργειας
    - Περιορισμός των διαταραχών που προκαλούνται στο ανάντη δίκτυο
    - Αντιστάθμιση αέργου ισχύος



## 3.2 Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

### 3.2.1 Αντλησιοταμίευση

Η αποθήκευση ενέργειας με την άντληση υδάτων αποτελεί την παλαιότερη και πιο ώριμη τεχνολογικά μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας. Η χρήση της αντλησιοταμίευσης είχε ξεκινήσει ήδη από το 1929. Το 2012 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συστημάτων αντλησιοταμίευσης υπολογίστηκε 127-129GW και έτσι αντιπροσωπεύουν το 99% της εγκατεστημένης ισχύος σε συστήματα αποθήκευσης παγκοσμίως. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1 ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από δύο ταμιευτήρες νερού οι οποίοι έχουν μεταξύ τους υψομετρική διαφορά, έναν αριθμό υδροστροβίλων με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές γεννήτριες, έναν αριθμό αντλιών με τους αντίστοιχους κινητήρες και ένα σύστημα ελέγχου.



Εικόνα 3.1 : Σύστημα αντλησιοταμίευσης.

Κατά το χρονικό διάστημα που η ζήτηση ισχύος είναι χαμηλή και η παραγωγή ενέργειας υψηλή, η περίσσεια ισχύος χρησιμοποιείται ώστε οι κινητήρες να εκκινήσουν τις αντλίες οι οποίες μεταφέρουν νερό από τον κάτω ταμιευτήρα στον πάνω ταμιευτήρα. Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Αντίστοιχα κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρική αφού το νερό απελευθερώνεται από τον πάνω προς τον κάτω ταμιευτήρα. Στην πορεία του περιστρέφει τους υδροστροβίλους παράγοντας ενέργεια μέσω των γεννητριών. Η ποσότητα της ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο δεξαμενών και τον συνολικό όγκο του νερού που αποθηκεύεται. Η ονομαστική ισχύς του συστήματος αντλησιοταμίευσης καθορίζεται από την πίεση του νερού, από το ρυθμό της ροής του διαμέσου των υδροστροβίλων και από την ονομαστική ισχύ αντλιών/υδροστροβίλων και γεννητριών/κινητήρων.

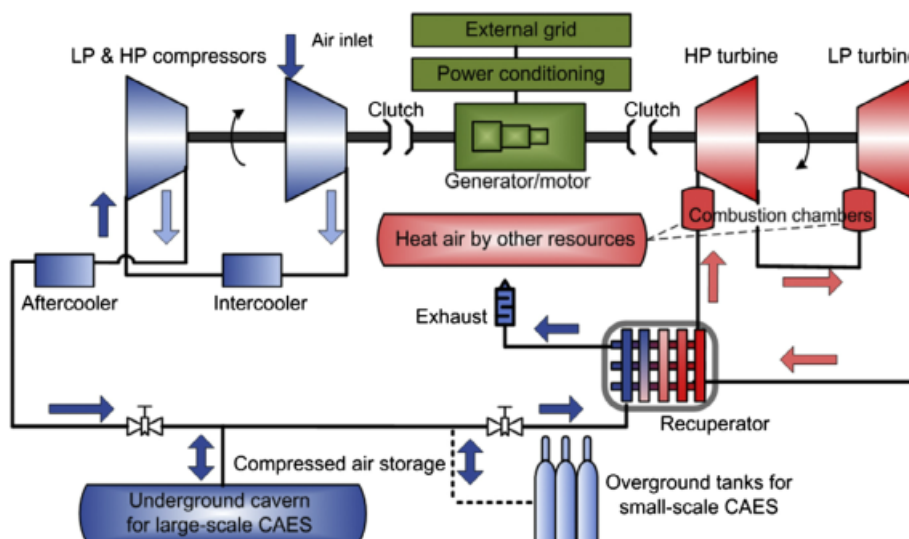
Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας μέχρι και της τάξεως των χιλιάδων MW με απόδοση κύκλου 70-85%

και χρόνο ζωής πάνω από 40 χρόνια. Η φύση των συστημάτων αυτών τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές που περιλαμβάνουν ενεργειακή διαχείριση μέσω χρονικής μετατόπισης του φορτίου, ρύθμιση συχνότητας και για εφεδρεία. Εντούτοις λόγω των γεωγραφικών, γεωλογικών και περιβαλλοντικών περιορισμών η μελέτη και κατασκευή συστημάτων αντλησιοταμίευσης είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτεί επένδυση σημαντικού κεφαλαίου.

Τα τελευταία χρόνια και με τις τεχνολογικές εξελίξεις σχεδιάζονται ή βρίσκονται ήδη σε λειτουργία συστήματα αντλησιοταμίευσης στα οποία χρησιμοποιούνται ως ταμιευτήρες πλημμυρισμένα φρεάτια ορυχείων, υπόγεια σπήλαια και ωκεανοί. Επιπλέον, αναπτύσσονται και συστήματα που συνδυάζουν την αντλησιοταμίευση με την παραγωγή ενέργειας από αιολικά ή φωτοβολταϊκά. Με αυτόν τον τρόπο ευνοείται η υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε απομονωμένα δίκτυα ή δίκτυα διανομής. Οι βελτιώσεις που επιδιώκονται κατά την κατασκευή συστημάτων αντλησιοταμίευσης είναι η αύξηση της ταχύτητας του νερού και της χωρητικότητας των ταμιευτήρων. Επίσης κρίνεται χρήσιμη η εγκατάσταση συστημάτων κεντρικής παρακολούθησης και εξελιγμένων συστημάτων ελέγχου.

### **3.2.2 Αποθήκευση ενέργειας με συμπίεση αέρα (CAES)**

Τα συστήματα αποθήκευσης με συμπίεση αέρα αποτελούν μαζί με την αντλησιοταμίευση τις μόνες τεχνολογίες που έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας (πάνω από 100MW). Στα συστήματα CAES κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης η περίσσεια ενέργειας αποθηκεύεται με τη μορφή συμπιεσμένου αέρα είτε σε υπόγεια σπήλαια είτε σε δεξαμενές. Η συμπίεση του αέρα γίνεται μέσω μίας ηλεκτρικής μηχανής (σε λειτουργία κινητήρα) η οποία εκκινεί μία σειρά συμπιεστών. Όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν επαρκεί για να καλύψει το φορτίο ο αποθηκευμένος συμπιεσμένος αέρας απελευθερώνεται και θερμαίνεται από μία πηγή θερμότητας, από καύση ορυκτών καυσίμων ή από τη θερμότητα που προέρχεται από τη συμπίεση του αέρα. Στη συνέχεια εισέρχεται σε αεριοστροβίλους που συνδέονται με μία γεννήτρια ώστε να παραχθεί η απαραίτητη ισχύς. Η θερμότητα που εκλύεται από αυτή τη διαδικασία μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί με ένα σύστημα ανάκτησης.



Εικόνα 3.2: Σύστημα αποθήκευσης με συμπίεση αέρα (CAES).

Τα συστήματα CAES είναι συνήθως μεγάλης κλίμακας και μπορούν να προσφέρουν στο δίκτυο χρονική μετατόπιση φορτίου, μείωση της αιχμής του φορτίου αλλά και ρύθμιση συχνότητας και τάσης. Η χρήση τους σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως με την αιολική ενέργεια, ώστε να ομαλοποιείται η ισχύς που εξάγεται έχει προσελκύει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο από τον ακαδημαϊκό όσο και από το βιομηχανικό και εμπορικό χώρο. Επιπλέον οι τυπικές τιμές ονομαστικής ισχύος των CAES κυμαίνονται μεταξύ 50-300MW, ενώ παράλληλα λόγω των χαμηλών απωλειών υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπροσθέτως, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και ο γρήγορος χρόνος απόκρισης αυτών των συστημάτων καθώς και ο βαθμός απόδοσής τους που είναι συγκρίσιμος με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης.

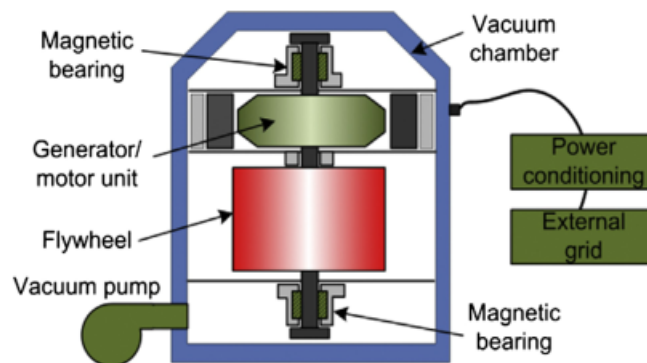
Το σημαντικότερο εμπόδιο που δυσχεραίνει την εγκατάσταση και χρήση μονάδων CAES μεγάλης κλίμακας είναι ο εντοπισμός της τοποθεσίας με τα κατάλληλα γεωγραφικά χαρακτηριστικά ώστε να είναι βιώσιμη η επένδυση. Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται συνήθως σε γεωλογικούς σχηματισμούς όπως πετρώδη σπήλαια, σπήλαια άλατος (salt caverns), σε εξαντλημένα κοιτάσματα αερίων και αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες [22].

Αξίζει να αναφερθεί ότι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συμπίεση αέρα καταναλώνουν ενέργεια για τη συμπίεση του αέρα πριν αυτός αποθηκευτεί άλλα και για τη θέρμανση του κατά την έξοδο του από το σύστημα πριν την είσοδο στους αεροστροβίλους.

Για να μειωθεί αυτή η κατανάλωση ενέργειας έχουν μελετηθεί και δοκιμαστεί συστήματα αδιαβατικής συμπίεσης του αέρα (A-CAES, AA-CAES) στα οποία η θερμότητα που παράγεται κατά τον κύκλο συμπίεσης του αέρα αποθηκεύεται χρησιμοποιώντας συστήματα θερμικής αποθήκευσης (Thermal Energy Storage TES). Στη συνέχεια όταν απαιτείται ενέργεια από το δίκτυο ο αέρας που εξέρχεται από το χώρο αποθήκευσης θερμαίνεται ανακτώντας την αποθηκευμένη θερμότητα (και όχι με τη χρήση ορυκτών καυσίμων).

### 3.2.3 Σφόνδυλοι (Flywheels)

Στα συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο (Flywheel Energy Storage Systems FESS) η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας μίας περιστρεφόμενης μάζας. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από έναν σφόνδυλο, έναν αριθμό ρουλεμάν, μία μηχανή που λειτουργεί ως κινητήρας και ως γεννήτρια, μία μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος και έναν θάλαμο κενού. Ο σφόνδυλος τοποθετείται υπό κενό στο εσωτερικό του θαλάμου, όπου για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών, αιωρείται με τη χρήση μαγνητικών τριβέων. Η μετατροπή της ενέργειας από κινητική σε ηλεκτρική και το αντίστροφο γίνεται μέσω της ηλεκτρικής μηχανής μεταβλητών στροφών, η οποία λειτουργεί είτε ως γεννήτρια αποδεδμεύοντας ενέργεια είτε ως κινητήρας αποθηκεύοντας ενέργεια. Η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στο σφόνδυλο είναι ανάλογη της ροπής αδράνειας του, επομένως και της μάζας του, και ανάλογη του τετραγώνου της γωνιακής του ταχύτητας ( $E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$ ). Για τη βελτιστοποίηση του λόγου ενέργειας – μάζας ο σφόνδυλος πρέπει να στρέφεται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Όμως τα ταχέως περιστρεφόμενα αντικείμενα δέχονται σημαντικές κεντρομόλους δυνάμεις. Έτσι, η αύξηση της μάζας του σφονδύλου μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της χωρητικότητας της ενέργειας, ταυτόχρονα όμως αυξάνεται σημαντικά και η κεντρομόλος δύναμη που του επιβάλλεται. Αυτό καθιστά το σύστημα ιδιαίτερα επιρρεπές σε σφάλματα στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής σε σχέση με υλικά μικρότερης πυκνότητας. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως η αντοχή στον εφελκυσμό είναι από τα κυριότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του σφονδύλου.



Εικόνα 3.3 : Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση σφονδύλου.

Τα συστήματα σφονδύλων (FES) κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους. Στα συστήματα χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποιείται ασάλι για την κατασκευή του σφονδύλου ο οποίος περιστρέφεται με ταχύτητα μικρότερη των  $6 \cdot 10^3$  στροφές/λεπτό (rpm). Οι σφόνδυλοι χαμηλής ταχύτητας είναι κατάλληλοι για εφαρμογές που απαιτούν μέτρια/υψηλή ισχύ για μικρό χρονικό διάστημα. Αντίθετα οι σφόνδυλοι υψηλών ταχυτήτων φτάνουν μέχρι  $10^5$  στροφές/λεπτό και κατασκευάζονται από πιο σύγχρονα και εξελιγμένα υλικά όπως τα ανθρακονήματα. Στα σύγχρονα συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο επιτυγχάνεται πολύ καλή πυκνότητα ενέργειας με υψηλή

απόδοση. Επιπλέον η λειτουργία γίνεται σε κενό για τον περιορισμό της αεροδυναμικής αντίστασης, η συχνότητα της περιστρεφόμενης μάζας είναι υψηλή όπως και η γωνιακή της ταχύτητα. Το πλήθος των εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σφόνδυλοι υψηλών ταχυτήτων συνεχώς διευρύνεται. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή ποιότητα ισχύος που απαιτείται όπως για παράδειγμα στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Γίνεται εύκολα κατανοητό λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται ότι τα συστήματα σφονδύλων υψηλών ταχυτήτων έχουν σημαντική διαφορά κόστους σε σχέση με τα συμβατικά μεταλλικά συστήματα FES.

Τα συστήματα με σφόνδυλο έχουν διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις χημικές τεχνολογίες αποθήκευσης. Έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και σημαντική αντοχή που τους επιτρέπει να ολοκληρώνουν κύκλους λειτουργίας με μεγάλη συχνότητα χωρίς να υπάρχουν επιπτώσεις στην απόδοσή τους. Επίσης έχουν πολύ γρήγορη απόκριση και έτσι έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται άμεσα και αποτελεσματικά σε ξαφνικές αλλαγές. Συγκεκριμένα η μετάβαση από πλήρη αποφόρτιση σε πλήρη φόρτιση μπορεί να διαρκέσει μερικά δευτερόλεπτα ή και λιγότερο, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους από το βάθος εκφόρτισης. Έτσι είναι κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής ισχύος και χαμηλής ενέργειας που απαιτούν πολλούς κύκλους λειτουργίας. [22][23].

Συνήθως τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους μπορούν να αποδώσουν επαρκή ισχύ άμεσα αλλά για σύντομο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιούνται ως αυτόνομα συστήματα για εφεδρεία ισχύος αλλά σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης όπως μπαταρίες ή γεννήτριες καυσίμου. Η βασικότερη αδυναμία των συστημάτων FES είναι το γεγονός ότι οι σφόνδυλοι παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες όταν βρίσκονται σε αναμονή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σχετικά υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, μέχρι ~20% της αποθηκευμένης ενέργειας ανά ώρα.

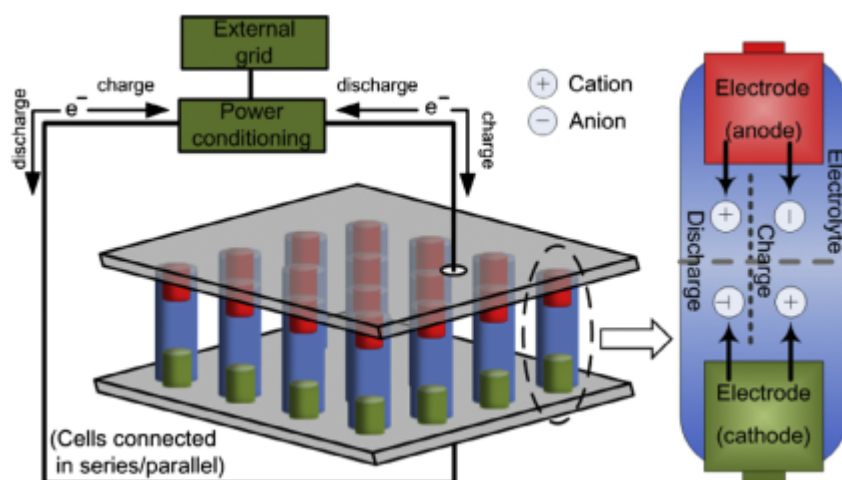
Η έρευνα και η ανάπτυξη στον τομέα των συστημάτων FES περιλαμβάνει το υλικό των σφονδύλων ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής και η πυκνότητα ισχύος, τη χρήση ηλεκτρικών μηχανών υψηλής ταχύτητας αλλά και τη βελτίωση της ικανότητας των ρουλεμάν και της τεχνολογίας των σφονδύλων.

### **3.2.4 Ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας (μπαταρίες)**

#### ***1 Κλασικοί συσσωρευτές/μπαταρίες (BESS)***

Η χρήση επαναφορτιζόμενων μπαταριών για την αποθήκευση ενέργειας είναι ήδη ευρέως διαδεδομένη σε εφαρμογές που σχετίζονται με τη βιομηχανία αλλά και με την καθημερινή ζωή. Ένα σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες (BESS) αποτελείται από έναν αριθμό ηλεκτροχημικών κυψελών οι οποίες συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα ώστε να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια με συγκεκριμένη τάση. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό των κυψελών. Η κάθε κυψέλη περιέχει δύο ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος) και έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος μπορεί να είναι σε στερεή υγρή ή παχύρρευστη μορφή. Η κάθε κυψέλη έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική και αντίστροφα. Κατά τη εκφόρτιση οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις συμβαίνουν στις ανόδους

και τις καθόδους ταυτόχρονα. Στο εξωτερικό κύκλωμα παρέχονται ηλεκτρόνια από τις ανόδους και συλλέγονται από τις καθόδους. Ενώ κατά τη φόρτιση πραγματοποιούνται οι αντίστροφες αντιδράσεις καθώς εφαρμόζεται εξωτερική τάση στα δύο ηλεκτρόδια.



Εικόνα 3.4 : Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας συστήματος μπαταριών.

Οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται για πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς όπως για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος, για τη διαχείριση της ενέργειας, αλλά και στα συστήματα μεταφοράς. Η κατασκευή των συστημάτων αποθήκευσης με μπαταρίες γίνεται συνήθως σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επίσης, οι μπαταρίες μπορούν να τοποθετηθούν, ανάλογα με την εφαρμογή, στο εσωτερικό κτιρίων αλλά και σε ειδικές εγκαταστάσεις όπου απαιτείται. Επί του παρόντος τα κύρια εμπόδια για την ενσωμάτωση των μπαταριών σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας είναι ο μικρός αριθμός κύκλων και το υψηλό κόστος συντήρησης. Επιπροσθέτως εξαιτίας της τοξικότητας των χημικών που χρησιμοποιούνται πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη βάση στην ανακύκλωση και απόρριψη των χρησιμοποιημένων μπαταριών. Ακόμη σε πολλούς τύπους μπαταριών δεν είναι δυνατή η πλήρης αποφόρτιση διότι η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται από το βάθος εκφόρτισης.

## Είδη συσσωρευτών:

### 2 Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος

Ο πιο ευρέως διαδεδομένος τύπος μπαταριών είναι μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Η κάθοδος είναι από διοξείδιο του μολύβδου ( $PbO_2$ ) ενώ η άνοδος από μολύβδο ( $Pb$ ) και ο ηλεκτρολύτης είναι θειικό οξύ. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν μικρό χρόνο απόκρισης και ελάχιστο ποσοστό αυτοεκφόρτισης ( $<0.3\%$ ). Επίσης έχουν σχετικά υψηλή απόδοση ανά κύκλο ( $\sim 63-90\%$ ) και χαμηλό κόστος κεφαλαίου.

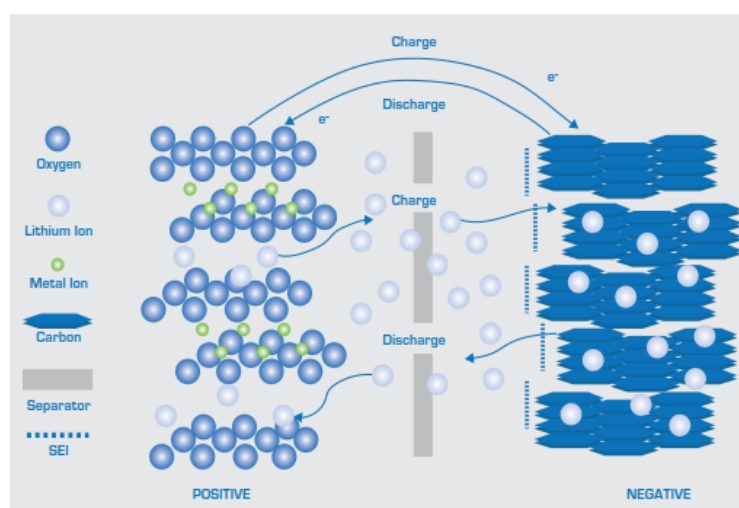
Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται σε σταθερές συσκευές ως εφεδρική παροχή ενέργειας σε συστήματα δεδομένων και τηλεπικοινωνιών αλλά και σε εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Εκτός από τις σταθερές εφαρμογές οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται και σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα. Βέβαια είναι ακόμα περιορισμένη η χρήση τους σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας σε επίπεδο δικτύου. Αυτό οφείλεται κυρίως στο σχετικά μικρό αριθμό κύκλων, στη χαμηλή πυκνότητα ενέργειας

καθώς και τη μικρή ειδική ενέργεια. Ακόμη κάποια είδη μπαταριών δεν λειτουργούν σωστά σε χαμηλές θερμοκρασίες οπότε απαιτείται η χρήση ειδικών συστημάτων θερμικής διαχείρισης γεγονός που αυξάνει σημαντικά το κόστος της εγκατάστασης.

Η έρευνα και η ανάπτυξη στον τομέα των μπαταριών μολύβδου-οξέος εστιάζει κυρίως σε καινοτόμα υλικά για βελτίωση της απόδοσης με αύξηση του αριθμού των κύκλων και του βάθους εκφόρτισης. Επιπλέον υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση μπαταριών σε εφαρμογές με παραγωγή ενέργειας από αιολικά ή φωτοβολταϊκά αλλά και στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αρκετά σύγχρονα και εξελιγμένα συστήματα μπαταριών μολύβδου-οξέος που παρουσιάζουν πολύ γρήγορη απόκριση συγκρίσιμη με τους σφονδύλους και τους υπερπυκνωτές αναπτύσσονται και έχουν ήδη αρχίσει να παρουσιάζονται.

### 3 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου

Στις μπαταρίες ιόντων λιθίου η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από οξειδία λιθίου όπως  $\text{LiCoO}_2$  ή  $\text{LiMO}_2$  και η άνοδος από άνθρακα σε μορφή γραφίτη. Ο ηλεκτρολύτης συνήθως είναι ένα μη υδατικό οργανικό υγρό το οποίο περιέχει διαλυμένα άλατα λιθίου, όπως  $\text{LiClO}_4$ . Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου θεωρούνται κατάλληλες για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται μικρός χρόνος απόκρισης αλλά και μικρές διαστάσεις/βάρος του εξοπλισμού. Επιπλέον οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν υψηλή απόδοση ανά κύκλο (~97%). Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα τους είναι ότι το βάθος εκφόρτισης επηρεάζει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών. Ακόμη είναι απαραίτητη η χρήση ενσωματωμένου συστήματος για τον έλεγχο και τη διαχείριση της λειτουργίας τους γεγονός που αυξάνει σημαντικά το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.



Εικόνα 3.5 : Λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών Ιόντων-Λιθίου [15].

Η έρευνα σχετικά με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου εστιάζει στην αύξηση της ισχύος που μπορούν να παρέχουν με τη χρήση νανοϋλικών αλλά και στην ενίσχυση της ειδικής ενέργειας της μπαταρίας αναπτύσσοντας πιο εξελιγμένα υλικά για τα ηλεκτρόδια και το

διάλυμα του ηλεκτρολύτη. Ήδη αρκετές εταιρείες έχουν ασχοληθεί με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου μεγάλης κλίμακας για χρήση στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

#### **4 Μπαταρίες Νατρίου-Θείου (NaS)**

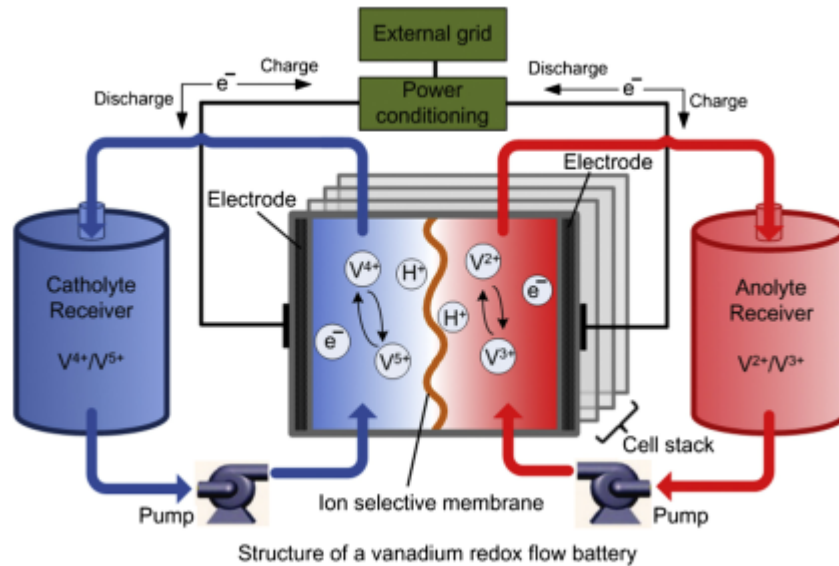
Οι μπαταρίες νατρίου-θείου χρησιμοποιούν λειωμένο νάτριο και λειωμένο θείο για τα δύο ηλεκτρόδια ενώ ο ηλεκτρολύτης είναι beta-alumina σε στερεά κατάσταση. Οι αντιδράσεις συνήθως απαιτούν θερμοκρασίες 574-624 K ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα ηλεκτρόδια θα βρίσκονται σε υγρή μορφή. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μπαταριών NaS είναι οι σχετικά υψηλές πυκνότητες ενέργειας, η σχεδόν μηδενική αυτοεκφόρτιση, η υψηλή ονομαστική χωρητικότητα σε σχέση με άλλους τύπους μπαταριών καθώς και η υψηλή ικανότητα ισχύος ανά παλμό. Επιπλέον σε αυτόν τον τύπο μπαταριών χρησιμοποιούνται φθηνά, μη τοξικά υλικά τα οποία ανακυκλώνονται εύκολα. Βέβαια το υψηλό ετήσιο κόστος λειτουργίας των μπαταριών νατρίου-θείου σε συνδυασμό με το εξειδικευμένο σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας αποτελούν τους σημαντικότερους λόγους που περιορίζουν τη χρήση τους.

Οι μπαταρίες νατρίου-θείου αποτελούν μία από τις πιο κατάλληλες υποψήφιες τεχνολογίες για την εφαρμογές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής ισχύος. Η έρευνα και η ανάπτυξη εστιάζουν κυρίως στη βελτίωση των δεικτών επίδοσης των κυψελών και στη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας των μπαταριών NaS.

#### **5 Μπαταρίες ροής (Flow batteries)**

Οι μπαταρίες ροής αποτελούνται από έναν αριθμό ηλεκτροχημικών κυψελών. Η ενέργεια μεταφέρεται μέσω δύο υγρών ηλεκτρολυτών, από τους οποίους ο ένας είναι θετικά φορτισμένος και άλλος αρνητικά. Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει δύο διαμερίσματα, την άνοδο και την κάθοδο, ένα για κάθε ηλεκτρολύτη. Οι δύο ηλεκτρολύτες διαχωρίζονται από μία μεμβράνη η οποία κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης επιτρέπει τη διέλευση σε συγκεκριμένα ιόντα ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες χημικές αντιδράσεις. Οι ηλεκτρολύτες είναι αποθηκευμένοι σε διαφορετικές δεξαμενές και εισάγονται μέσα στη μπαταρία όταν απαιτηθεί μέσω υδραυλικών αντλιών.





Εικόνα 3.6: Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας των μπαταριών ροής (μπαταρία βαναδίου, VRB).

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής αποθηκεύουν ενέργεια στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη. Όμως, το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που έχουν, το οποίο τους δίνει πλεονέκτημα έναντι των άλλων τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης, είναι το γεγονός ότι η ικανότητα απόδοσης ισχύος είναι ανεξάρτητη από την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας. Η ικανότητα απόδοσης ισχύος καθορίζεται από το ενεργό εμβαδό της στοιβάς των κυψελών και τη διαχείριση των υδραυλικών αντλιών, ενώ η χωρητικότητα αποθήκευσης εξαρτάται από την ποσότητα του διαθέσιμου ηλεκτρολύτη αλλά και το μέγεθος των δεξαμενών. Η χωρητικότητα των μπαταριών ροής μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας μεγαλύτερες δεξαμενές για τους ηλεκτρολύτες[15]. Επιπλέον το ποσοστό της αυτοεκφόρτισης των μπαταριών ροής είναι πολύ χαμηλό επειδή οι ηλεκτρολύτες αποθηκεύονται σε ξεχωριστές σφραγισμένες δεξαμενές.

Στα μειονεκτήματα των μπαταριών ροής περιλαμβάνονται οι χαμηλές επιδόσεις εξαιτίας της ανομοιομορφίας στην πίεση των σταγόνων του ηλεκτρολύτη και στους περιορισμούς που προέρχονται από την ανάγκη για μεταφορά του ηλεκτρολύτη από τις δεξαμενές στις κυψέλες και αντίστροφα. Επίσης το κόστος της κατασκευής τους είναι σχετικά υψηλό ενώ ταυτόχρονα απαιτείται η χρήση πιο περίπλοκων συστημάτων σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα μπαταριών.

Οι μπαταρίες ροής κρίνονται κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν ισχύ από μερικές δεκάδες kW μέχρι μερικές δεκάδες MW. Οι ενεργειακές απαιτήσεις των εφαρμογών αυτών μπορούν να κυμαίνονται από 500kWh μέχρι μερικές εκατοντάδες MWh. Σε αυτά τα επίπεδα ισχύος και ενέργειας οι μπαταρίες ροής είναι η πιο οικονομική επιλογή[23]. Η έρευνα στο πεδίο των μπαταριών ροής καλύπτει τη μείωση του κόστους, τη χρήση αποδοτικών και αξιόπιστων ηλεκτροδίων και αξιόπιστων μεμβρανών με υψηλή επιλεκτικότητα. Ακόμη ιδιαίτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνουν και τα συστήματα διαχείρισης ισχύος και ενέργειας των μπαταριών σε συστήματα μεγάλης κλίμακας. Κάποια είδη μπαταριών ροής χρησιμοποιούνται ή έχουν τις προδιαγραφές ώστε να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον σε συστήματα αποθήκευσης σε επίπεδο δικτύου. Σε αυτές τις τεχνολογίες

περιλαμβάνονται οι μπαταρίες ροής βαναδίου, οι μπαταρίες ψευδαργύρου βρωμίου και οι μπαταρίες πολυθειούχου βρωμιδίου.

Οι μπαταρίες ροής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μπαταρίες οξειδοαναγωγής (Redox Flow Batteries), όπου όλα τα χημικά είδη που λαμβάνουν μέρος στην αποθήκευση ενέργειας βρίσκονται κάθε στιγμή σε μορφή διαλύματος.
- Μπαταρίες υβριδικής οξειδοαναγωγής, στις οποίες η ηλεκτροχημική κυψέλη επικαλύπτεται από τουλάχιστον ένα τα χημικά είδη κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα μπαταριών πραγματικής οξειδοαναγωγής είναι οι μπαταρίες σιδήρου-χρωμίου (Iron-Chromium Batteries ICB) και οι μπαταρίες βαναδίου (Vanadium Redox Flow Batteries VRB). Οι μπαταρίες σιδήρου-χρωμίου είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον σε σχέση με άλλα ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας καθώς τα στοιχεία τους παρουσιάζουν χαμηλή τοξικότητα. Για το λόγο αυτό η χρήση μπαταριών σιδήρου-χρωμίου RFB αποτελεί μία από τις ασφαλέστερες μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας τόσο για το προσωπικό που απασχολείται στις εγκαταστάσεις του συστήματος όσο και για το περιβάλλον. Οι μπαταρίες σιδήρου-χρωμίου χρησιμοποιούνται ήδη εφεδρικά στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Παράλληλα γίνονται προσπάθειες για μείωση του κόστους και ενίσχυση της αξιοπιστίας τους. Έτσι τα συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες σιδήρου-χρωμίου έχουν την προοπτική να συμβάλλουν σημαντικά και στην αποθήκευση ενέργειας σε επίπεδα ισχύος των MW[23].

Οι μπαταρίες ροής βαναδίου αποτελούν μία από της πιο ώριμες τεχνολογίες μπαταριών ροής. Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται με τη χρήση οξειδοαναγωγικών ζευγών βαναδίου τόσο στην αρνητική όσο και στη θετική πλευρά των κυψελών ( $V^{2+}/V^{3+}$  στην αρνητική και  $V^{4+}/V^{5+}$  στη θετική). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι στο συγκεκριμένο τύπο μπαταριών ροής χρησιμοποιείται μόνο ένα ενεργό υλικό (βανάδιο) σε τέσσερις όμως οξειδωτικές καταστάσεις. Κατά τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης κατιόντα υδρογόνου ανταλλάσσονται μέσω της μεμβράνης.

Οι μπαταρίες βαναδίου προσφέρουν σχετικά υψηλή τάση ανά κυψέλη σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες μπαταριών ροής πραγματικής οξειδοαναγωγής όπως οι μπαταρίες σιδήρου-χρωμίου. Η ιδιότητα αυτή όπως είναι λογικό δίνει ένα πλεονέκτημα στις μπαταρίες βαναδίου καθώς οδηγεί σε υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος. Επίσης, έχουν πολύ γρήγορες αποκρίσεις ( $<0.001s$ ) και μεγάλο αριθμό κύκλων (10000-16000+). Παράλληλα η απόδοσή τους κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα (~85%). Για να διευρυνθεί το εύρος των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται μπαταρίες βαναδίου υπάρχουν τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν. Ένα μειονέκτημα που έχει η μπαταρία βαναδίου είναι η αυξημένη οξείδωση που προκαλεί το βανάδιο στην οξειδωτική κατάσταση  $V^{5+}$  γεγονός που προκαλεί περισσότερη χημική επιβάρυνση στα υλικά που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρόδια, τις μεμβράνες και το σύστημα διαχείρισης των ηλεκτρολυτών. Επιπλέον απαιτείται περαιτέρω μείωση του κόστους λειτουργίας του συστήματος.

Οι εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν ενίσχυση της ποιότητας ισχύος με εξομάλυνση της τάσης, συσκευές UPS, κάλυψη αιχμής (peak shaving), αύξηση της ασφάλειας τροφοδοσίας και ενσωμάτωση με συστήματα ΑΠΕ. Η πλειονότητα των έργων ανάπτυξης της τεχνολογίας εστιάζει σε σταθερές εφαρμογές εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας ενέργειας[22]. Σύμφωνα με το EPRI (Electric Power Research Institute) οι μπαταρίες βαναδίου είναι κατάλληλες για συστήματα με εύρος ισχύος 100kW-10MW με διάρκεια αποφόρτισης 2-8 ώρες [23].

Στις μπαταρίες πραγματικής οξειδοαναγωγής γίνεται πλήρης διαχωρισμός της ενέργειας και της ισχύος παρέχοντας έτσι όλα τα πλεονεκτήματα των μπαταριών ροής. Αντιθέτως στις μπαταρίες υβριδικής οξειδοαναγωγής δεν μπορεί να εξασφαλιστεί αυτός ο διαχωρισμός επειδή η ενέργεια αποθηκεύεται στο μέταλλο το οποίο επικαλύπτεται κατά τη φόρτιση.

Ένα παράδειγμα μπαταριών υβριδικής οξειδοαναγωγής είναι οι μπαταρίες ψευδαργύρου - βρωμίου. Σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια αποθηκεύεται καθώς όταν κατά την φόρτιση το ηλεκτρόδιο της ανόδου επικαλύπτεται από μία στρώση στερεού ψευδαργύρου. Έτσι, η συνολική χωρητικότητα ενέργειας εκτός από το μέγεθος των δεξαμενών των ηλεκτρολυτών εξαρτάται και από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Επομένως, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των μπαταριών υβριδικής οξειδοαναγωγής η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι ανεξάρτητη από την ικανότητα παροχής ισχύος, σε αντίθεση με τις μπαταρίες πραγματικής οξειδοαναγωγής.

### **3.2.5 Πυκνωτές- Υπερπυκνωτές (ηλεκτρική αποθήκευση ενέργειας)**

#### **1 Πυκνωτές**

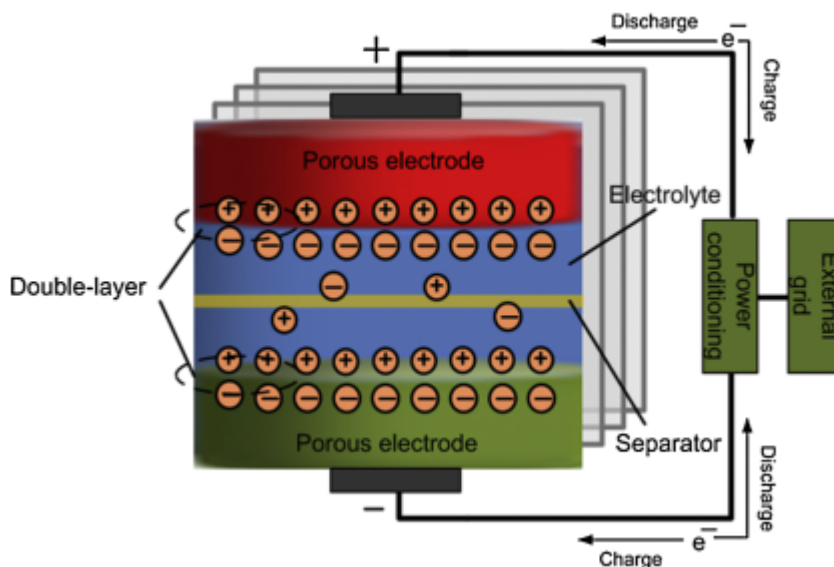
Ένας πυκνωτής αποτελείται από τουλάχιστον δύο ηλεκτρικούς αγωγούς (συνήθως μεταλλικά φύλλα) οι οποίοι χωρίζονται μεταξύ τους από μία λεπτή στρώση μονωτικού, συνήθως είναι κεραμικό, γυαλί ή πλαστική ταινία. Όταν φορτίζεται ο πυκνωτής η ενέργεια αποθηκεύεται στο διηλεκτρικό υλικό σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Η μέγιστη τάση λειτουργίας του πυκνωτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά διάσπασης του διηλεκτρικού υλικού. Οι πυκνωτές είναι κατάλληλοι για την αποθήκευση μικρών ποσοτήτων ενέργειας και την παροχή μεταβλητής τάσης. Έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και μικρό χρόνο φόρτισης συγκριτικά με τις συμβατικές μπαταρίες. Βέβαια η χωρητικότητά τους είναι περιορισμένη, η πυκνότητα ενέργειας χαμηλή και παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες ενέργειας εξαιτίας του υψηλού ποσοστού αυτοεκφόρτισης. Σύμφωνα αυτά τα χαρακτηριστικά οι πυκνωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μερικές εφαρμογές ποιότητας ισχύος όπως η διόρθωση της ισχύος στην υψηλή τάση, η ομαλοποίηση της εξόδου των μονάδων παραγωγής, γεφύρωση και ανάκτηση της ενέργειας στα συστήματα μεταφοράς.

#### **2 Υπερπυκνωτές (Supercapacitors)**

Οι υπερπυκνωτές, ή ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλής στρώσης αποτελούνται από δύο αγωγίμα ηλεκτρόδια, έναν ηλεκτρολύτη και μία πορώδη διαχωριστική μεμβράνη. Εξαιτίας

της δομής τους οι υπερπυκνωτές έχουν χαρακτηριστικά των συμβατικών πυκνωτών αλλά και των ηλεκτροχημικών μπαταριών. Η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή ηλεκτροστατικού φορτίου στις επιφάνειες μεταξύ του ηλεκτρολύτη και των δύο αγωγίμων ηλεκτροδίων. Οι πυκνωτές διπλής στρώσης λειτουργούν σε ένα θερμοκρασιακό εύρος από  $-40^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $70^{\circ}\text{C}$ .

Οι πυκνότητες ισχύος και ενέργειας των υπερπυκνωτών είναι μεταξύ των τιμών των αντίστοιχων χαρακτηριστικών των επαναφορτιζόμενων μπαταριών και των συμβατικών πυκνωτών. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των υπερπυκνωτών είναι ο μεγάλος αριθμός των κύκλων ( $>10^5$  κύκλους) και η υψηλή απόδοση ανά κύκλο ( $\sim 84-97\%$ ). Παρά τα πλεονεκτήματά τους οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται και από υψηλό ποσοστό ημερήσιας αυτοεκφόρτισης (5-40%) αλλά και σημαντικό κόστος κεφαλαίου ανά μονάδα ενέργειας (€/kWh). Οι εφαρμογές ποιότητας ισχύος στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υπερπυκνωτές περιλαμβάνουν συσκευές UPS, γεφύρωση της ισχύος με τον εξοπλισμό, ενεργοποίηση βαλβίδων σε εργοστάσια αλλά και εφαρμογές παλμικής ισχύος. Η ανάπτυξη των πυκνωτών διπλής στρώσης επικεντρώνεται κυρίως στη χρήση νέων εξελιγμένων υλικών με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας τους.

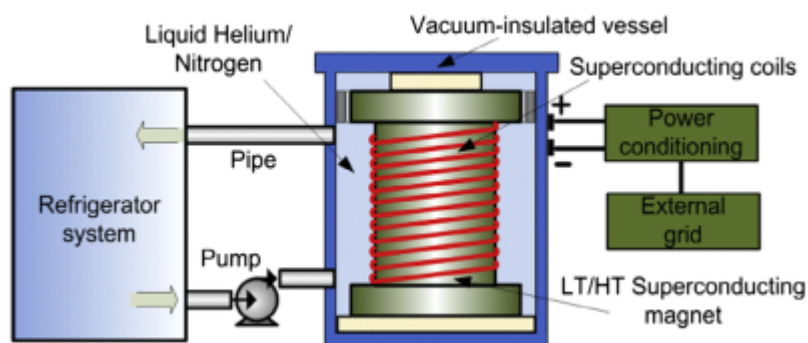


Εικόνα 3.7 : Σχηματικό διάγραμμα υπερπυκνωτή (supercapacitor).

### 3.2.6 Υπεραγωγίμη Μαγνητική Αποθήκευση (SMES)

Η τεχνολογία SMES είναι η μοναδική τεχνολογία άμεσης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος. Ένα τυπικό σύστημα SMES αποτελείται από τρία βασικά μέρη: τη μονάδα υπεραγωγού, το κρυογόνο σύστημα ψύξης, το μονωμένο δοχείο και το σύστημα μετατροπής ισχύος. Στα συστήματα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από το συνεχές ρεύμα που ρέει στο υπεραγωγίμο πηνίο. Το πηνίο έχει ψυχθεί ώστε να πέσει η θερμοκρασία του κάτω από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας. Τα υπεραγωγίμα υλικά σε τέτοιες θερμοκρασίες, μερικών Kelvin, βρίσκονται στην

υπεραγώγιμη κατάσταση, παρουσιάζουν μηδενική αντίσταση και η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευθεί με σχεδόν μηδενικές απώλειες. Τέτοια υλικά είναι ο υδράργυρος το βανάδιο και σε εφαρμογές αποθήκευσης χρησιμοποιείται κυρίως Νιόβιο-Τιτάνιο του οποίου η κρίσιμη θερμοκρασία είναι 9.2K. Κατά τη φάση της εκφόρτισης τα συστήματα SMES απελευθερώνουν την ηλεκτρική ενέργεια μέσω του συστήματος μετατροπής της ισχύος. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ένα σύστημα SMES καθορίζεται από την αυτεπαγωγή του πηνίου και το ρεύμα που ρέει σε αυτό.



Εικόνα 3.8 : Σχηματικό διάγραμμα συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης.

Τα συστήματα SMES κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την λειτουργία των πηνίων που χρησιμοποιούν σε αυτά που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, ~5K (Low Temperature Superconducting, LTS-SMES) και σε αυτά που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες ~70K (High Temperature Superconducting, HTS-SMES). Η τεχνολογία LTS-SMES είναι πιο ώριμη και εμπορικά διαθέσιμη, ενώ η ,HTS-SMES βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης. Το εύρος της ισχύος των συστημάτων SMES που είναι εμπορικά διαθέσιμα είναι 0.1-10 MW, ενώ αναπτύσσονται συστήματα των 100MWh για τα επόμενα χρόνια.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των συστημάτων υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης είναι η σχετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος (~4000W/L), ο μικρός χρόνος απόκρισης (της τάξεως των milliseconds), μικρός χρόνος πλήρους αποφόρτισης (< 1λεπτό), υψηλή απόδοση ανά κύκλο (~95~98%) και μεγάλη διάρκεια ζωής (μέχρι και 30 χρόνια). Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, τα συστήματα SMES έχουν τη δυνατότητα σχεδόν πλήρους αποφόρτισης με πολύ περιορισμένη φθορά μετά από την ολοκλήρωση χιλιάδων πλήρων κύκλων.

Από την άλλη πλευρά το κόστος του κεφαλαίου που απαιτείται είναι υψηλό, ενώ παράλληλα πρέπει να εκτιμηθούν και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ισχυρών μαγνητικών πεδίων που χρησιμοποιούνται.. Επιπλέον το ποσοστό αυτοεκφόρτισης κυμαίνεται από 10 μέχρι 15% και τα πηνία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες ενέργειας.

Πρόσφατα έχει γίνει σημαντική προσπάθεια έρευνας και ανάπτυξης ώστε να μειωθεί το κόστος των υπεραγώγιμων πηνίων και των συστημάτων ψύξης. Επίσης αναπτύσσονται υλικά, για συστήματα HTS-SMES, τα οποία να είναι λιγότερο κρυογενετικά ευαίσθητα.

### 3.2.7 Solar Fuel

Η τεχνολογία των solar fuels βρίσκεται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης, έχουν όμως προσελκύσει το ενδιαφέρον τόσο του ακαδημαϊκού όσο και του βιομηχανικού χώρου. Σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με solar fuels η ηλιακή ενέργεια συγκεντρώνεται και μετατρέπεται σε αποθηκεύσιμα καύσιμα μέσω τριών διαφορετικών διαδικασιών, της φυσικής φωτοσύνθεσης, της τεχνητής φωτοσύνθεσης και των θερμοχημικών μεθόδων. Έτσι από την ηλιακή ενέργεια μπορούν παραχθούν καύσιμα όπως ηλιακό υδρογόνο ή καύσιμα με βάση τον άνθρακα. Τα καύσιμα αυτά αποθηκεύονται και στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Με τις δύο πρώτες διαδικασίες η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για να μετατραπεί το νερό ή το διοξείδιο του άνθρακα σε οξυγόνο και άλλα στοιχεία. Στην τεχνητή φωτοσύνθεση χρησιμοποιούνται σπάνια στοιχεία, όπως Ρουθίνιο (Ru), Παλλάδιο (Pd) και Ρήνιο (Re), ως καταλύτες. Οι θερμικές μέθοδοι απαιτούν την ανάπτυξη ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών για τη διάσπαση του νερού στα δομικά του στοιχεία.

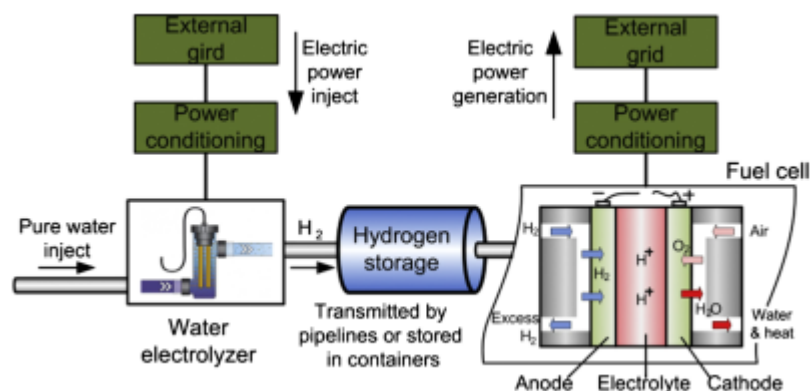
Η τεχνολογία των solar fuels είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο αλλά εκτιμάται ότι η ονομαστική ισχύς ενός τέτοιου συστήματος μπορεί δυνητικά να φτάσει τα 20 MW με ειδική ενέργεια (specific energy) 800 Wh/kg. Επιπλέον η διάρκεια της αποθήκευσης μπορεί να κυμαίνεται από λίγες ώρες μέχρι και αρκετούς μήνες. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση ηλιακών καυσίμων είναι η χρήση των σπάνιων και ακριβών στοιχείων αλλά και η μεγάλη έκταση που απαιτείται για την εγκατάστασή των συλλεκτών της ηλιακής ενέργειας. Στην επίλυση των παραπάνω προβλημάτων στοχεύει και η τρέχουσα έρευνα στον τομέα των solar fuels.

### 3.2.8 Αποθήκευση υδρογόνου και κυψέλες καυσίμου

Στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υδρογόνου η αποθήκευση ενέργειας και η παραγωγή ενέργειας είναι δύο ξεχωριστές διαδικασίες. Για την αποθήκευση της ενέργειας συνήθως χρησιμοποιείται μία μονάδα ηλεκτρόλυσης του νερού. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη για αποθήκευση ενέργεια διασπά το νερό, το οξυγόνο απελευθερώνεται και το υδρογόνο που παράγεται αποθηκεύεται σε δοχεία υψηλής πίεσης ή/και μεταφέρεται με σωλήνες για να χρησιμοποιηθεί αργότερα. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το αποθηκευμένο υδρογόνο χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου οι οποίες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του αποθηκευμένου υδρογόνου και του οξυγόνου, από τον αέρα, σε ηλεκτρική.

Η κυψέλη καυσίμου είναι μία συσκευή ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας. Παράγει ηλεκτρική ενέργεια με την εξωτερική παροχή καυσίμου (άνοδος) και οξειδωτικού (κάθοδος), τα οποία αντιδρούν παρουσία ηλεκτρολύτη. Γενικά, τα αντιδρώντα ρέουν προς την κυψέλη καυσίμου και τα προϊόντα ρέουν εκτός αυτής, ενώ ο ηλεκτρολύτης παραμένει συνεχώς μέσα στο κελί. Μία αντιστρέψιμη κυψέλη καυσίμου είναι σχεδιασμένη να καταναλώνει ένα χημικό A παράγοντας ηλεκτρισμό και ένα χημικό B και αντίστροφα να καταναλώνει ηλεκτρισμό και το χημικό B παράγοντας το χημικό A. Η χημική αντίδραση

που πραγματοποιείται είναι η παρακάτω:  $2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O+energy$  . Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.



Εικόνα 3.9 : Αποθήκευση υδρογόνου και κυψέλες καυσίμου.

Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των κυψελών καυσίμου και των μπαταριών είναι ότι οι πρώτες καταναλώνουν αντιδρώντα που πρέπει να αναπληρώνονται καθώς και ότι τα ηλεκτρόδια τους δεν συμμετέχουν στις αντιδράσεις, αλλά έχουν απλά καταλυτικό ρόλο. Η πιο κοινή μορφή κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιεί υδρογόνο σαν καύσιμο και οξυγόνο σαν οξειδωτικό[22].

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι οι δυνατότητες που δίνει το εύρος της εγκατεστημένης ισχύος τους, που ξεκινάει από λίγα kW μέχρι και πλησιάζει το 1GW. Επίσης, τα ποσοστά των ρύπων που εκλύονται κατά την παραγωγή ενέργειας από κυψέλες καυσίμου είναι πολύ χαμηλά σε σχέση με την καύση ορυκτών καυσίμων. Ενώ σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η χαμηλή τους απόδοσή με τιμές της τάξεως του 20-40%[15].

Οι κυψέλες καυσίμου σε συνδυασμό με την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σταθερές εφαρμογές, για παροχή ισχύος, για ψύξη/θέρμανση ή για εφεδρεία(back-up). Επιπλέον στον τομέα των μεταφορών ενδεχομένως να αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα στα οχήματα. Αυτή τη στιγμή η κυριότερη χρήση των κυψελών καυσίμου είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Παρ' όλα αυτά σημαντική μπορεί να είναι και η συμβολή τους στην εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης καλύπτοντας εποχιακές και εβδομαδιαίες διακυμάνσεις και παρέχοντας άλλες βοηθητικές υπηρεσίες.

Για να ενταχθεί η τεχνολογία κυψελών καυσίμου σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας πρέπει να μειωθεί το κόστος της και να αυξηθεί η αξιοπιστία της. Αξίζει να αναφερθεί ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην αποδόμηση ή την ανακύκλωση των κυψελών μετά τη ολοκλήρωση των κύκλων λειτουργίας τους εξαιτίας της χρήσης τοξικών μετάλλων ως ηλεκτρόδια ή ως ηλεκτρολύτες.

### 3.2.9 Θερμική Αποθήκευση (Thermal Energy Storage TES)

Η θερμική αποθήκευση περιλαμβάνει μία ποικιλία τεχνολογιών οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικές προσεγγίσεις για την αποθήκευση ενέργειας σε μονωμένα

δοχεία. Ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης συνήθως αποτελείται από ένα αποθηκευτικό μέσο σε κάποιο δοχείο ή δεξαμενή, ένα σύστημα ψύξης, ένα σύστημα σωληνώσεων, αντλίες και σύστημα ελέγχου.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας τους τα συστήματα TES διακρίνονται στα συστήματα TES χαμηλής θερμοκρασίας και τα συστήματα υψηλής θερμοκρασίας. Τα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας αποτελούνται από δύο είδη, τα υδροφόρα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας και την κρυογονική αποθήκευση ενέργειας. Τα υδροφόρα συστήματα συνήθως χρησιμοποιούν κρύο ή παγωμένο νερό και κάποιες διαδικασίες επαναθέρμανσης και είναι κατάλληλα κυρίως για περιορισμό της αιχμής και για βιομηχανικά ψυκτικά φορτία. Στην κρυογονική αποθήκευση χρησιμοποιούνται ψυκτικά μέσα όπως το υγρό άζωτο ή ο υγροποιημένος αέρας. Τα συστήματα υψηλής θερμοκρασίας αποτελούνται από τα συστήματα TES λανθάνουσας θερμότητας, αισθητής θερμότητας και αποθήκευση ενέργειας σε σκυρόδεμα. Στην τελευταία μέθοδο γίνεται χρήση σκυροδέματος ή κεραμικών υλικών για την αποθήκευση ενέργειας ενώ η ενέργεια συνήθως μεταφέρεται με τη ροή συνθετικών ελαίων.



## 3.3 Μοντέλα αναπαράστασης συσσωρευτών

### 3.3.1 Εισαγωγή

Η σημαντική συμβολή των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί στην ανάγκη για μελέτη της λειτουργίας τους. Έτσι, η ενσωμάτωση των συστημάτων αυτών στις μοντελοποιήσεις και τις προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται για την ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου κρίνεται απαραίτητη.

Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μοντέλα για τα συστήματα αυτά. Εστιάζοντας τώρα στα συστήματα αποθήκευσης με τη χρήση συσσωρευτών τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί αναπαριστούν τα βασικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών σε διαφορετικό βαθμό. Άλλα είναι πιο λεπτομερή και παρέχουν μεγάλη ακρίβεια, αυξάνοντας έτσι και την πολυπλοκότητά τους και άλλα μοντέλα εστιάζουν περισσότερο στη γενική συμπεριφορά των συσσωρευτών χωρίς να λαμβάνουν υπόψη όλες τις εσωτερικές διεργασίες. Ανάλογα με το σκοπό και τον τύπο των προσομοιώσεων που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε κάνουμε και την κατάλληλη επιλογή μοντέλου για τους συσσωρευτές. Παρακάτω περιγράφονται κάποια βασικά μοντέλα αναπαράστασης συσσωρευτών.

#### *1 Ηλεκτροχημικά μοντέλα*

Ο σχεδιασμός των ηλεκτροχημικών μοντέλων βασίζεται στις χημικές διαδικασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό των στοιχείων των μπαταριών. Αυτές οι χημικές διαδικασίες περιγράφονται με μεγάλη ακρίβεια από τα συγκεκριμένα μοντέλα. Η εξαιρετικά λεπτομερής όμως περιγραφή των χημικών διαδικασιών καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη και πολύπλοκη την διαμόρφωση των μοντέλων.

Τα ηλεκτροχημικά μοντέλα εξαιτίας της ακρίβειας τους απαιτούν τη γνώση μεγάλου πλήθους παραμέτρων για την πραγματοποίηση των επιθυμητών υπολογισμών. Ενδεικτικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε το μοντέλο που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα Dualfoil το οποίο χρειάζεται περισσότερα από 50 στοιχεία όπως το πάχος των ηλεκτροδίων, η αρχική συγκέντρωση άλατος στον ηλεκτρολύτη και η συνολική θερμοχωρητικότητα. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων είναι δύσκολο να γίνει για τις μπαταρίες που κυκλοφορούν στο εμπόριο οι οποίες χρησιμοποιούνται στις συνήθεις εφαρμογές.

Εκτός από το πλήθος των παραμέτρων αξίζει να σημειωθεί ότι τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν και μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα γεγονός που τα καθιστά ανεπαρκή για χρήση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Το μοντέλο των Doyle, Fuller και Newman [24] για μπαταρίες λιθίου και ιόντων λιθίου αποτελείται από ένα σύστημα έξι συζευγμένων μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Η επίλυση του συστήματος δίνει τόσο την τάση και το ρεύμα του κάθε κελιού σε συνάρτηση με το χρόνο, όσο και τις τιμές πλήθους παραμέτρων ως συνάρτηση του χρόνου.

Τέλος όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση των ηλεκτροχημικών μοντέλων βασίζεται στις χημικές διαδικασίες στο εσωτερικό των κυψελών των μπαταριών. Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν ότι για κάθε τεχνολογία και τύπο συσσωρευτών απαιτείται και μοντέλο διαφορετικού σχεδιασμού.

## 2 Ηλεκτρικά μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των μπαταριών με ηλεκτρικά μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά στοιχεία όπως αντιστάτες, πυκνωτές κ.α. Η μοντελοποίηση για τους διάφορους τύπους μπαταριών δεν είναι ίδια. Εντούτοις όλα τα μοντέλα βασίζονται στον παρακάτω κορμό[25].

- Ένας αντιστάτης αναπαριστά την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας
- Ένας πυκνωτής αναπαριστά τη χωρητικότητα της μπαταρίας
- Η αποφόρτιση της μπαταρίας περιγράφεται μέσω ενός κυκλώματος
- Ένας πίνακας αναφοράς ο οποίος δίνει τη σχέση της τάσης με την κατάσταση φόρτισης (SOC)

Παρά το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά είναι αρκετά πιο απλά από τα ηλεκτροχημικά, ο προσδιορισμός των παραμέτρων και ιδιαίτερα του πίνακα αναφοράς χρειάζεται πολλά πειραματικά δεδομένα από τη λειτουργία της μπαταρίας.

## 3 Αναλυτικά μοντέλα

Τα αναλυτικά μοντέλα περιγράφουν τη λειτουργία των μπαταριών με πιο αφαιρετικό τρόπο σε σχέση με τα ηλεκτροχημικά και τα μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος. Οι κυριότερες ιδιότητες των μπαταριών μοντελοποιούνται συνήθως με μερικές εξισώσεις. Το γεγονός αυτό καθιστά τα μοντέλα αυτά πιο εύκολα στη χρήση σε σχέση με τα πολύπλοκα ηλεκτροχημικά και τα ηλεκτρικά μοντέλα.

### *Νόμος του Peukert*

Το πιο απλό αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των μπαταριών λαμβάνοντας υπόψη τις μη γραμμικές ιδιότητές τους είναι ο νόμος του Peukert. Οι κυριότερη ιδιότητα του νόμου αυτού είναι ότι ενσωματώνει τη μη γραμμική σχέση μεταξύ του χρόνου ζωής των μπαταριών και του ρυθμού αποφόρτισης. Σημαντικό μειονέκτημα του νόμου Peukert είναι η αδυναμία μοντελοποίησης του φαινομένου ανάκτησης. Σύμφωνα με το νόμο Peukert η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπορεί να προσεγγιστεί μέσω του παρακάτω τύπου:

$$T = \frac{\alpha}{I^b}$$

Όπου T είναι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και I το ρεύμα αποφόρτισης. Οι σταθερές α, b υπολογίζονται πειραματικά. Η τιμή της σταθεράς α είναι κοντά στην τιμή της χωρητικότητας της μπαταρίας και η τιμή της b κυμαίνεται συνήθως στο διάστημα από 1.2 μέχρι 1.7.

Ο νόμος του Peukert έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για σταθερά συνεχή φορτία αλλά υστερεί στην περίπτωση μεταβλητών ή διακοπτόμενων φορτίων. Για το λόγο αυτό οι Rakhmatov και Vrudhula ανέπτυξαν μία εκτεταμένη μορφή του νόμου του Peukert για

τέτοιου είδους φορτία. Η οποία αδυνατεί όμως να καλύψει το φαινόμενο της ανάκτησης όπως ακριβώς και ο νόμος του Peukert.

$$L = \frac{\alpha}{\left[ \frac{\sum_{k=1}^n I_k \cdot (t_k - t_{k-1})}{L} \right]^b}$$

Όπου το ρεύμα αποφόρτισης  $I$  αντικαθίσταται από το μέσο όρο του ρεύματος αποφόρτισης μέχρι τη χρονική στιγμή  $t=L$ , καλύπτοντας έτσι και τις περιπτώσεις μεταβλητών και διακοπτόμενων φορτίων.

### ***Rakhmatov και Vrudhula***

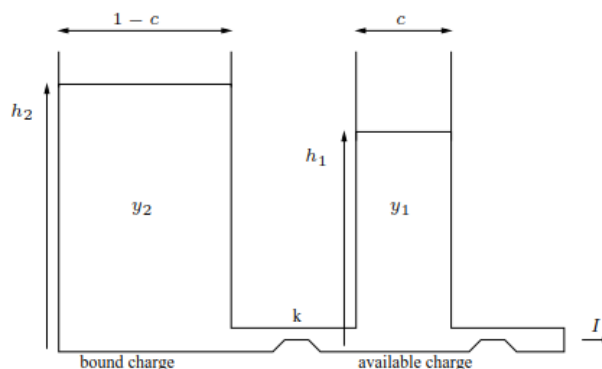
Οι Rakhmatov και Vrudhula[26] μετά τη βελτίωση του νόμου του Peukert πρότειναν ένα νέο αναλυτικό μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων (νόμος Fick) και περιγράφει τη διαδικασία της διάχυσης του ενεργού υλικού στη μπαταρία. Για να υπολογιστεί ο χρόνος ζωής της μπαταρίας πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η χρονική στιγμή κατά την οποία η τιμή της συγκέντρωσης του ενεργού υλικού στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου πέσει κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή, επίπεδο αποκοπής  $C_{\text{cutoff}}$ .

### ***Kinetic Battery Model***

Το KiBaM είναι το τρίτο αναλυτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Manwell και McGowan [27]. Το KiBaM είναι αρκετά διαισθητικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί τις παραμέτρους των μπαταριών που παρέχονται από τους κατασκευαστές. Το KiBaM αποτελείται από δύο διαφορετικά μέλη, το μοντέλο χωρητικότητας και το μοντέλο τάσης.

#### **Μοντέλο χωρητικότητας**

Ο σχεδιασμός του μοντέλου της χωρητικότητας βασίζεται στη θεώρηση ότι το ένα μέρος της χωρητικότητας της μπαταρίας είναι άμεσα διαθέσιμο (available charge) ενώ το υπόλοιπο είναι δεσμευμένο (bound charge) στους χημικούς δεσμούς των στοιχείων της.



Εικόνα 3.10: Μοντέλο δύο δεξαμενών του KiBaM

Κατά τη μοντελοποίηση, η οποία φαίνεται στην εικόνα 3.10, το φορτίο της μπαταρίας βρίσκεται μοιρασμένο σε δύο συνδεδεμένες δεξαμενές. Το διαθέσιμο φορτίο μπορεί να αποδοθεί ανά πάσα στιγμή ενώ το δεσμευμένο μπορεί να μόνον να μεταφερθεί από τη μία δεξαμενή στην άλλη. Ο ρυθμός με τον οποίο ρέει το φορτίο μεταξύ των δύο δεξαμενών εξαρτάται από την υψομετρική τους διαφορά ( $h_2-h_1$ ) και από την παράμετρο  $k$ . Η παράμετρος  $c$  αποτελεί το κλάσμα του συνολικού φορτίου της μπαταρίας που αποτελεί μέρος της άμεσα διαθέσιμης δεξαμενής. Οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις περιγράφουν τη μεταβολή στο φορτίο των δύο δεξαμενών.

$$\frac{dq_1}{dt} = -I - k \cdot (1-c) \cdot q_1 + k \cdot c \cdot q_2$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k \cdot (1-c) \cdot q_1 - k \cdot c \cdot q_2$$

Η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας περιγράφεται από τον όρο  $q_{\max,0}$  οποίος είναι το φορτίο που μπορεί να αποδοθεί αν η μπαταρία αποφορτίζεται με πολύ αργό ρυθμό. Οι αρχικές συνθήκες του παραπάνω συστήματος διαφορικών εξισώσεων είναι οι εξής:

$$q_1(0) = c \cdot q_0$$

$$q_2(0) = (1-c) \cdot q_0$$

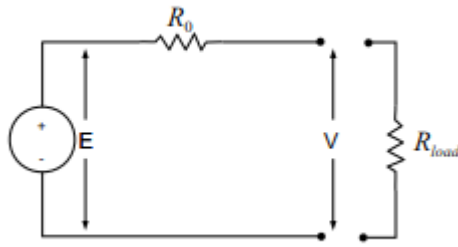
Όπου  $q_0$  είναι το αρχικό φορτίο της μπαταρίας το οποίο μπορεί να ισούται με το μέγιστο φορτίο  $q_{\max,0}$  ή να είναι μικρότερο, ανάλογα με την κατάσταση της μπαταρίας τη στιγμή που ξεκινάμε τη μελέτη της λειτουργίας της.

Όταν συνδέεται με τη μπαταρία φορτίο που απαιτεί ρεύμα τιμής  $I$  αρχίζει να μειώνεται το διαθέσιμο ηλεκτρικό φορτίο και κατά συνέπεια μειώνεται το ύψος της δεξαμενής 1. Έτσι αυξάνεται η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο δεξαμενών. Μετά την αποσύνδεση της μπαταρίας από το φορτίο αρχίζει η ροή ηλεκτρικού φορτίου από τη δεξαμενή του δεσμευμένου φορτίου (δεξαμενή 2) προς τη δεξαμενή διαθέσιμου μέχρι τη στιγμή που θα εξισωθεί το ύψος των δύο δεξαμενών. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι κατά τη διάρκεια μίας περιόδου αδράνειας αυξάνεται το ποσοστό της συνολικής ενέργειας της μπαταρίας που είναι διαθέσιμο.

### Μοντέλο τάσης

Το KiBaM εκτός από τη χωρητικότητα της μπαταρίας δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης και της τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας κατά την αποφόρτιση. Στο μοντέλο τάσης η μπαταρία σχεδιάζεται ως μία πηγή τάσης σε σειρά με μία εσωτερική αντίσταση (εικόνα 3.11). Το επίπεδο της τάσης διαφέρει ανάλογα με το βάθος εκφόρτισης και δίνεται από τον τύπο:

$$V = E - I \cdot R_0$$



Εικόνα 3.11: Μοντέλο μπαταρίας σύμφωνα με το KiBaM

όπου:

$I$  είναι το ρεύμα αποφόρτισης

$R_0$  είναι η εσωτερική αντίσταση

$E$  είναι η εσωτερική τάση της μπαταρίας η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$E = E_0 + A \cdot X + \frac{C \cdot X}{D - X}$$

όπου:

$E_0$  είναι η εσωτερική τάση της πλήρως φορτισμένης μπαταρίας για μηδενικό ρεύμα

$A$  είναι η παράμετρος που εκφράζει την αρχική γραμμική μεταβολή της εσωτερικής τάσης της μπαταρίας σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης

$C, D$  είναι οι παράμετροι που αναπαριστούν τη μείωση της τάσης της μπαταρίας όταν βρίσκεται στο τελικό στάδιο της αποφόρτισης

$X$  είναι το κανονικοποιημένο φορτίο που απομακρύνεται από τη μπαταρία για συγκεκριμένο ρεύμα αποφόρτισης

$$X = q_{max} \cdot \frac{q_{out}}{q_{max,(I)}}$$

- $q_{max(I)}$  είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας για ρυθμό αποφόρτισης  $I$  και υπολογίζεται ως εξής:

$$q_{max,(I)} = \frac{k \cdot c \cdot T \cdot q_{max,0}}{1 - e^{-k \cdot T} + c \cdot (k \cdot T - 1 + e^{-k \cdot T})} \quad \text{με} \quad T = \frac{q_{max,(I)}}{I}$$

- $q_{out}$  είναι το σύνολο του φορτίου που έχει αποβάλλει η μπαταρίας

$$q_{out} = \int I dt = q_{max} - q_1 - q_2$$

Οι παραπάνω παράμετροι αντλούνται από τα δεδομένα αποφόρτισης που παρέχονται από τους κατασκευαστές.

Το KiBaM αρχικά αναπτύχθηκε για τη μοντελοποίηση μπαταριών μολύβδου-οξέος μεγάλης κλίμακας. Το προφίλ αποφόρτισης των συγκεκριμένων μπαταριών με πολύ καλή ακρίβεια από τις παραπάνω εξισώσεις V,E. Αυτό όμως δεν ισχύει για όλους τους τύπους των μπαταριών, όπως οι ιόντων λιθίου για παράδειγμα καθώς έχουν διαφορετικό προφίλ αποφόρτισης. Αντιθέτως το μοντέλο χωρητικότητας του KiBaM, δηλαδή το μοντέλο των δύο δεξαμενών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους τύπους μπαταριών, για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής της μπαταρίας, καθώς λαμβάνει υπόψη τη γραμμική συμπεριφορά της χωρητικότητας των μπαταριών αλλά και το φαινόμενο ανάκτησης κάτι που δεν συμβαίνει με τα προηγούμενα μοντέλα.

## 4 Ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου

Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (real-time digital simulator, RTDS), προϊόν της εταιρείας RTDS Technologies Inc., είναι μία υπολογιστική συσκευή για την προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Με τη χρήση του συγκεκριμένου συστήματος καθίσταται δυνατή η πραγματοποίηση δοκιμών κλειστού βρόχου (Hardware In the Loop) διάφορων ηλεκτρικών συσκευών ή συσκευών προστασίας ή αυτομάτου ελέγχου όπως για παράδειγμα ένας αντιστροφέας, μία γεννήτρια ή μία μπαταρία. Το πλεονέκτημα της τεχνικής κλειστού βρόχου έναντι των δοκιμών σε πραγματικά συστήματα έγκειται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει ο κίνδυνος πρόκλησης καταστροφής τόσο στη συγκεκριμένη συσκευή όσο και στο υπόλοιπο σύστημα. Οι εφαρμογές του ψηφιακού προσομοιωτή περιλαμβάνουν διάφορους τομείς της βιομηχανίας, της ηλεκτρικής ενέργειας, του αυτομάτου ελέγχου αλλά και στον πανεπιστημιακό τομέα και στην εκπαίδευση των μηχανικών.

Ο προσομοιωτής αποτελείται από ένα εξελιγμένο υπολογιστικό υλικό μέρος και από το λογισμικό, RSCAD, το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για τη διασύνδεση του υλικού με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή του χρήστη. Μέσω του RSCAD σχεδιάζονται τα μοντέλα των υπό μελέτη δικτύων χρησιμοποιώντας το περιβάλλον DRAFT. Στη συνέχεια η εκτέλεση της προσομοίωσης, η εποπτεία των παραμέτρων και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο γίνεται από το περιβάλλον RUNTIME του RSCAD.



Εικόνα 4.1: Προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS) εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του προσομοιωτή RTDS σε σχέση με άλλα διαθέσιμα ψηφιακά εργαλεία προσομοίωσης είναι η δυνατότητα να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Έτσι μπορεί να αναπαρασταθεί πλήρως ρεαλιστικά το δίκτυο που έχουμε μοντελοποιήσει. Άλλα υπολογιστικά εργαλεία πραγματοποιούν προσομοιώσεις πολύ πιο αργά και δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε πραγματικό χρόνο διότι χρησιμοποιούν την υπολογιστική ισχύ του ηλεκτρικού υπολογιστή. Στον αντίποδα το σύστημα RTDS αξιοποιεί την υπολογιστική ισχύ πλήθους επεξεργαστών που λειτουργούν παράλληλα.

## 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του RTDS

Ο προσομοιωτής RTDS εκμεταλλεύεται την παράλληλη λειτουργία πολλαπλών επεξεργαστών οι οποίοι βρίσκονται ενσωματωμένοι στις διάφορες κάρτες. Ένας αριθμός καρτών συνθέτει ένα rack. Οι κάρτες ενός rack συνδέονται μεταξύ τους με ένα backbone μέσω του οποίου διεκπεραιώνεται η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των καρτών. Ένας απλός προσομοιωτής διαθέτει συνήθως ένα rack αλλά κατασκευάζονται και πιο εξελιγμένα συστήματα, με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, και μεγαλύτερο αριθμό racks. Σε κάθε σύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες κάρτες μερικές από τις οποίες είναι οι GPC (Giga Processor Card), 3PC (Triple Processor Card), IRC (Workstation Inter Rack Communications Card), WIF (Workstation InterFace Card και TPC (Tandem Processor Card).

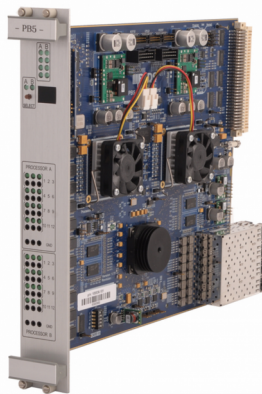
Τα βασικά χαρακτηριστικά των καρτών περιγράφονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

- **Tandem Processor Card (TPC):** Οι κάρτες αυτού του τύπου είναι οι πιο απλές κάρτες επεξεργασίας. Κάθε κάρτα διαθέτει δύο ανεξάρτητους επεξεργαστές και ο μέγιστος αριθμός TPC καρτών που μπορεί να τοποθετηθούν στο ίδιο rack είναι δεκαοκτώ. Κάθε TPC κάρτα διαθέτει τις εξής θύρες εισόδου-εξόδου:
  1. 8 αναλογικά κανάλια εξόδου (12 bit,  $\pm 10$  volt)
  2. 4 ψηφιακούς επιλογείς 16 θέσεων
  3. 2 αναλογικές θύρες εισόδου (12 bit,  $\pm 5$  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 στο μπροστινό.

- **Triple Processor Card (3PC):** είναι κάρτες επεξεργασίας που διαθέτουν 3 επεξεργαστές η κάθε μία οι οποίοι είναι ισχυρότεροι σε σχέση με αυτούς των TPC καρτών.
- **Giga Processor Card (GPC):** ακόμα πιο ισχυρές κάρτες επεξεργασίας με 2 επεξεργαστές η κάθε μία.





Εικόνα 4.2: Κάρτα GPC[28]

- **Workstation Inter Rack Communications Card (IRC):** ο ρόλος της κάρτας αυτής είναι η επικοινωνία μεταξύ επεξεργαστών που βρίσκονται σε διαφορετικά racks. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μόνο σε συστήματα που διαθέτουν περισσότερα racks.
- **Workstation Interface Card (WIF):** ο ρόλος της κάρτας WIF είναι η επικοινωνία του rack του προσομοιωτή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένο και εκτελείται το RSCAD. Η επικοινωνία αυτή γίνεται μέσω της τοπικής σύνδεσης δικτύου.



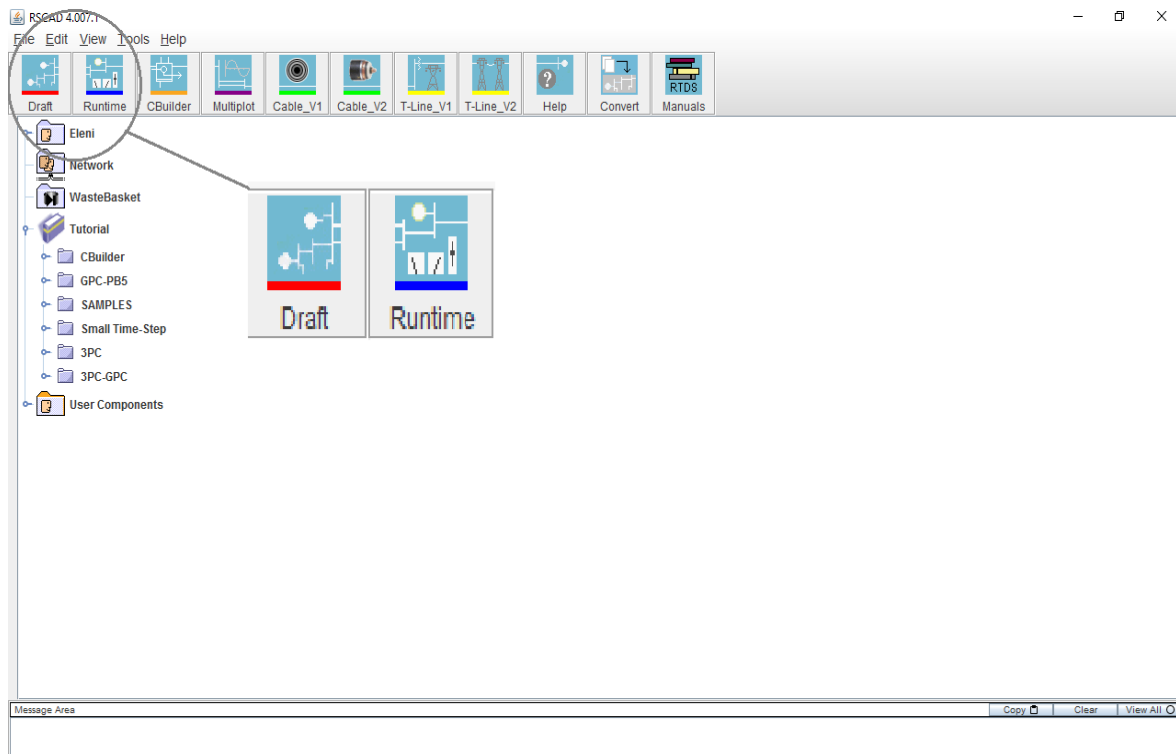
Εικόνα 4.3: Κάρτα WIF [28]

Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου του εργαστηρίου ΣΗΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι απαιτούμενες προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας διαθέτει 16 κάρτες TPC, 2 κάρτες 3PC και μία κάρτα WIF τοποθετημένες σε ένα rack.

## 4.2 Λογισμικό RSCAD

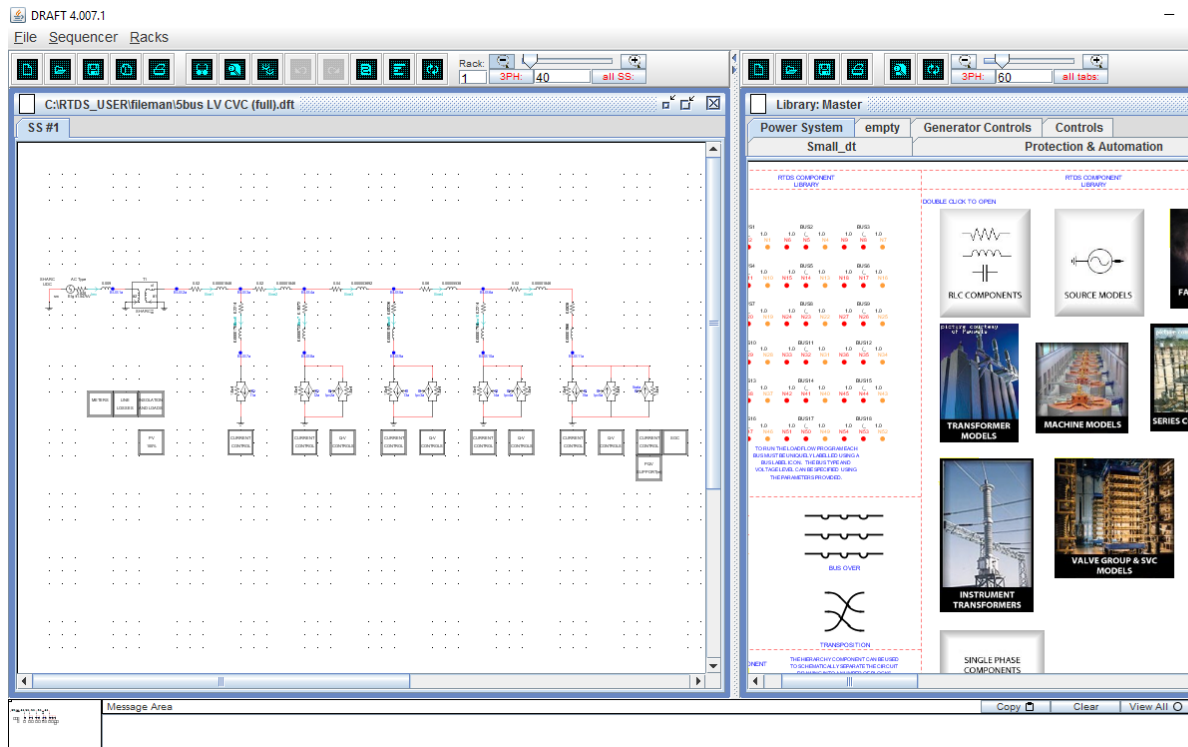
Το λογισμικό του RTDS που διαχειρίζεται ο χρήστης για το σχεδιασμό και την εποπτεία των προσομοιώσεων ονομάζεται RSCAD. Στις βασικές λειτουργίες του λογισμικού RSCAD περιλαμβάνονται ο σχεδιασμός του δικτύου που πρόκειται να

προσομοιώσουμε, η μεταγλώττιση (compile) του στη γλώσσα που αναγνωρίζουν οι επεξεργαστές του RTDS και τέλος η εποπτεία και η διαχείριση της προσομοίωσης.

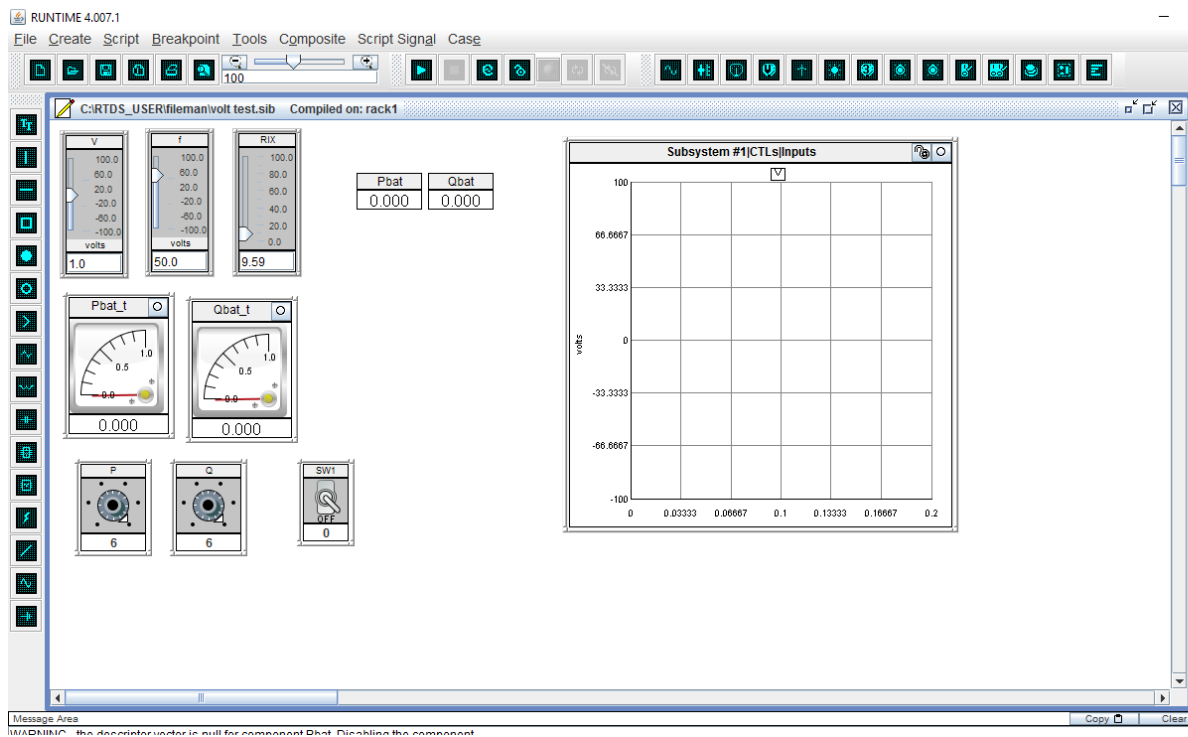


Εικόνα 4.4: Αρχική σελίδα του λογισμικού RSCAD

Το πρόγραμμα RSCAD έχει διάφορα τμήματα, τα δύο κυριότερα είναι τα τμήματα Draft και Runtime. Στο περιβάλλον Draft πραγματοποιούνται οι δύο πρώτες λειτουργίες του RSCAD δηλαδή ο σχεδιασμός και η μεταγλώττιση του επιθυμητού δικτύου. Για το σχεδιασμό του δικτύου χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρικά στοιχεία που διατίθενται στις βιβλιοθήκες του προγράμματος στο δεξί μέρος της διεπιφάνειας εργασίας (εικόνα 4.5). Ενδεικτικά οι βιβλιοθήκες περιλαμβάνουν στοιχεία ηλεκτρικής ισχύος και στοιχεία ελέγχου. Την ολοκλήρωση του σχεδιασμού ακολουθεί η διαδικασία της μεταγλώττισης. Από τη γραμμή εργαλείων χρησιμοποιούμε την επιλογή Compile ώστε να ξεκινήσει η μεταγλώττιση του δικτύου στη γλώσσα του RTDS. Σε περίπτωση που εντοπιστούν λάθη στο δίκτυο που σχεδιάσαμε η μεταγλώττιση σταματάει και το πρόγραμμα μας ενημερώνει για την ύπαρξη τους ώστε να τα διορθώσουμε. Όταν το δίκτυο διορθωθεί πλήρως ολοκληρώνεται η διαδικασία της μεταγλώττισης και ακολουθεί η πραγματοποίηση της προσομοίωσης την οποία ελέγχουμε μέσω του περιβάλλοντος Runtime.



Εικόνα 4.5: Περιβάλλον DRAFT του λογισμικού RSCAD.



Εικόνα 4.6: Περιβάλλον RUNTIME του λογισμικού RSCAD.

Για την εποπτεία και το χειρισμό των προσομοιώσεων χρησιμοποιούμε το περιβάλλον Runtime. Μέσω αυτού έχουμε τη δυνατότητα να ορίσουμε την έναρξη και τη λήξη της προσομοίωσης αλλά και να ελέγχουμε τις τιμές των παραμέτρων που μας

ενδιαφέρουν σε πραγματικό χρόνο. Τοποθετώντας μετρητές στη διεπιφάνεια εργασίας του Runtime παρακολουθούμε σε πραγματικό χρόνο τις τιμές όλων των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να προσθέσουμε και plots για να εξάγουμε τη μεταβολή τους ως προς το χρόνο ή ως προς κάποια άλλη μεταβλητή.

Η σημαντικότερη όμως λειτουργία το Runtime είναι το γεγονός ότι παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής των τιμών διάφορων παραμέτρων από το χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και σε πραγματικό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα εφόσον έχουμε εισάγει στο δίκτυό μας κατά τη σχεδίαση στοιχεία μεταβλητής εξόδου όπως διακόπτες, ολισθητές ή κουμπιά μπορούμε να αλλάξουμε την τιμή τους κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης.

## 5 Περιγραφή Δικτύου

### 5.1 Εισαγωγή

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα μικροδίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης της CIGRE [29]. Έτσι, σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα RSCAD τα ανά φάση ισοδύναμα των πρότυπων μικροδικτύων με κάποιες διαφοροποιήσεις οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στα δίκτυα χαμηλής τάσης οι ασυμμετρίες μεταξύ των τριών φάσεων είναι έντονες και εν γένει μία ανά φάση μελέτη τους δεν είναι πλήρως ρεαλιστική. Παρά ταύτα, εξαιτίας του αριθμού των επεξεργασιών του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS) του εργαστηρίου ΣΗΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, δεν είναι δυνατή η προσομοίωση του τριφασικού πλήρους δικτύου. Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής η ανά φάση μοντελοποίηση και προσομοίωση του δικτύου είναι ικανοποιητική.

Στη συνέχεια θα γίνει μία παρουσίαση και ανάλυση των στοιχείων των δικτύων που σχεδιάστηκαν στο RSCAD καθώς και των διατάξεων ελέγχου που περιλαμβάνονται.

### 5.2 Προτυποποίηση Δικτύων

Με τη συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής, φωτοβολταϊκά, μονάδες συμπαραγωγής, μικρές ανεμογεννήτριες και κυψέλες καυσίμου αλλάζουν τον τρόπο λειτουργίας των δικτύων. Όπως γίνεται κατανοητό η λειτουργία του δικτύου καθορίζεται από πλήθος διαφορετικών μονάδων παραγωγής και έτσι απαιτείται ενδελεχής μελέτη και επανασχεδιασμός του δικτύου. Για να πραγματοποιηθούν όμως οι απαιτούμενες μελέτες και να αναπτυχθούν οι κατάλληλες μέθοδοι και τεχνικές, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από τις νέες και συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες, χρειάζονται τα κατάλληλα συστήματα δοκιμών. Για αυτό το σκοπό έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται πρότυπα συστήματα και δίκτυα.

#### 5.2.1 Πρότυπο δίκτυο χαμηλής τάσης

##### *1 Γενικά χαρακτηριστικά του δικτύου χαμηλής τάσης*

Η πλειοψηφία των δημόσιων δικτύων χαμηλής τάσης έχουν ακτινική διάταξη. Ένας αριθμός αναχωρήσεων (feeders) ξεκινάνε από τους ζυγούς του υποσταθμού υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ. Κάθε αναχώρηση εκτίνεται γραμμικά και έχει και μία ή περισσότερες διακλαδώσεις (spurs). Οι καταναλωτές συνδέονται σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής ή των διακλαδώσεων. Οι καταναλώσεις αυτές μπορεί να είναι είτε τριφασικές είτε

μονοφασικές. Η παρουσία πλήθους μονοφασικών καταναλωτών αλλά και μονοφασικών γραμμών καθιστά τα δίκτυα χαμηλής τάσης εν γένει ασύμμετρα. Ο υποσταθμός μέσης τάσης αποτελείται συνήθως από ένα μετασχηματιστή με τιμές ισχύος από μερικές εκατοντάδες kVA μέχρι και 1 MVA. Ο μετασχηματιστής είναι εφοδιασμένος με λήψεις για την αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού στην πλευρά της μέσης τάσης, παρέχοντας έτσι μία ρύθμιση  $\pm 5\%$  η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εκτός φορτίου, όταν ο μετασχηματιστής είναι αποσυνδεδεμένος.

Τα συστήματα προστασίας που χρησιμοποιούνται στα δημόσια δίκτυα χαμηλής τάσης αποτελούνται ως επί το πλείστον από στοιχεία υπερέντασης, κυρίως ασφάλειες. Ο μετασχηματιστής προστατεύεται από συνδέσεις ασφαλειών στην πλευρά της μέσης τάσης. Στην έξοδο του μετασχηματιστή συνήθως δεν υπάρχει κάποια γενική ασφάλεια αλλά κάθε αναχώρηση προστατεύεται από τις δικές της ασφάλειες.

Οι γραμμές του δικτύου χαμηλής τάσης είναι είτε υπόγειες, κυρίως στις αστικές περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, είτε πιο συχνά εναέριας με γυμνούς αγωγούς αλουμινίου ή χαλκού. Για περιβαλλοντικούς λόγους αλλά και λόγους μόνωσης έχει χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια συνεστραμμένοι μονωμένοι αγωγοί στις εναέριας γραμμές.

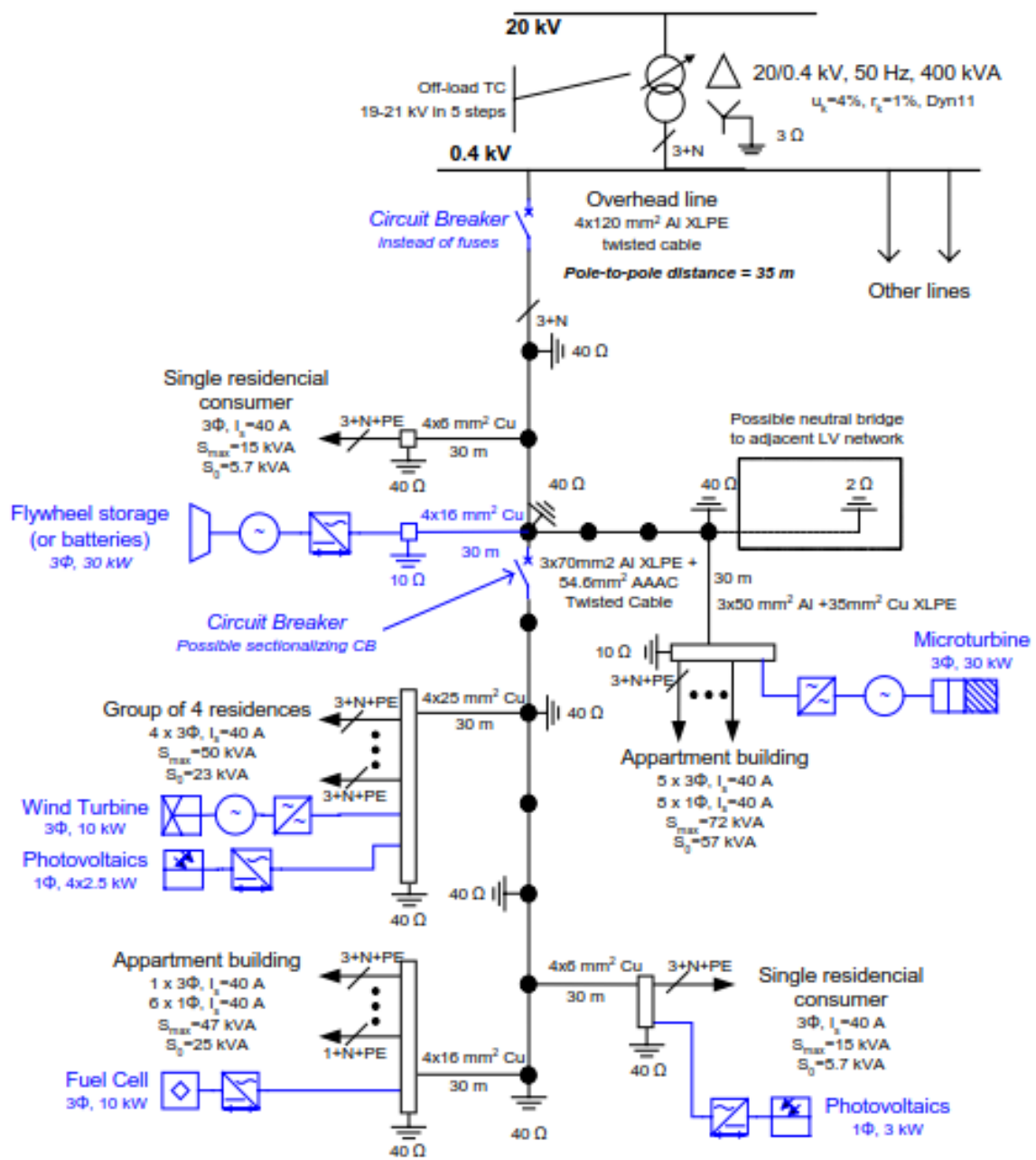
Η γείωση των δημοσίων δικτύων χαμηλής τάσης χρησιμοποιούνται τα συστήματα γείωσης TN και TT.

## **2 Περιγραφή του πρότυπου δικτύου χαμηλής τάσης CIGRE**

Με βάση την παραπάνω περιγραφή των δικτύων χαμηλής τάσης αναπτύχθηκε το πρότυπο δίκτυο από τη CIGRE (εικόνα 5.1). Η εναέρια γραμμή, των συνεστραμμένων αγωγών XLPE εξυπηρετεί έναν περιορισμένο αριθμό καταναλωτών σε μία προαστιακή περιοχή. Στην εναέρια γραμμή συνδέονται 5 οικιακοί καταναλωτές μέσω συνδέσεων παροχής (service connections) ή άλλων εναέριων γραμμών σε συνδυασμό με συνδέσεις παροχής, καθώς και μία σειρά από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.

Κάθε κατανάλωση χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα  $I_s$ , το οποίο αντιστοιχεί στο ονομαστικό ρεύμα των στοιχείων προστασίας υπερέντασης του καταναλωτή. Η τιμή της μέγιστης ζήτησης  $S_{max}$  για κάθε ομάδα καταναλωτών εξαρτάται από το πλήθος των καταναλωτών που την αποτελούν και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τυποποιημένους συντελεστές ταυτοχρονισμού για οικιακούς καταναλωτές. Τέλος η τιμή ισχύος  $S_0$  εκφράζει τη συνεισφορά της κάθε ομάδας στη μέγιστη συνολική ζήτηση της συγκεκριμένης αναχώρησης.

Στο πρότυπο αυτό δίκτυο περιλαμβάνονται και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής διάφορων τύπων όπως φωτοβολταϊκά, μονάδες συμπαραγωγής, ανεμογεννήτριες και κυψέλες καυσίμου. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αποτελεί περίπου τα 2/3 του μέγιστου φορτίου ώστε να μπορούν να προσομοιωθούν και διάφορα σενάρια διαχείρισης φορτίου.



Εικόνα 5.1: Πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης

### 3 Ισοδύναμο δίκτυο Μέσης Τάσης

Στο πρότυπο μικροδίκτυο αναφέρεται μόνο η ονομαστική τιμή της τάσης του δικτύου μέσης τάσης, ενώ δε γίνεται αναφορά στο ισοδύναμο δίκτυο με στοιχεία όπως η ισχύς βραχυκύκλωσης ή ο λόγος R/X. Οι τυπικές παράμετροι για το ισοδύναμο δίκτυο μέσης τάσης για τα πρότυπα Ευρωπαϊκά δίκτυα αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία [30] και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Nominal system voltage	Short circuit power Ssc	R/X ratio
[kV]	[MVA]	
20LL	100	1

Πίνακας 5.1: Παράμετροι ισοδύναμου δικτύου μέσης τάσης για πρότυπα Ευρωπαϊκά δίκτυα.

Με τη χρήση των παραμέτρων αυτών υπολογίζουμε την ισοδύναμη αντίσταση και αυτεπαγωγή του δικτύου μέσης τάσης ως εξής:

$$Z_s = \frac{(20 \cdot 10^3 \text{ V})}{(100 \cdot 10^6 \text{ VA})} = 4 \Omega$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \quad \text{και} \quad R_s = X_s \quad \text{οπότε} \quad R_s = X_s = \frac{Z_s}{\sqrt{2}} = 2.828 \Omega$$

$$L_s = \frac{X_s}{100 \cdot \pi} = 0.009 \text{ H}$$

Για τη μοντελοποίηση της πολικής τάσης των 20kV της μέσης τάσης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της ιδανικής μονοφασικής πηγής της βιβλιοθήκης του RSCAD που περιέχει τα μονοφασικά στοιχεία. Στο παράθυρο των παραμέτρων του συγκεκριμένου μοντέλο εισήχθησαν τα παρακάτω στοιχεία (εικόνα 5.2):

- Ονομαστική φασική τάση: 11.547 kV
- Συχνότητα: 50 Hz
- Αρχική γωνία: 0°



rtds_sharcu_SRC1PH2N					
AC SOURCE INITIAL VALUES		MONITORING	REMOTE FAULTS		
CONFIGURATION		3PC CONFIGURATION		RRL	
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Es	Initial Source Mag (lg-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 μονοφασικής πηγής τάσης.

#### 4 Μετασχηματιστής MT/XT

Ο τριφασικός μετασχηματιστής του πρότυπου μικροδικτύου που μοντελοποιήθηκε έχει τα παρακάτω 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

Το δίκτυο θα μελετηθεί μέσω του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος, όπως προαναφέρθηκε. Για το λόγο οι παράμετροι που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα πρέπει πρώτα να μετατραπούν σε ανά φάση μεγέθη και στη συνέχεια να εισαχθούν στο μοντέλο του ιδανικού μονοφασικού μετασχηματιστή του RSCAD (Πίνακας 5.3).

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 του μετασχηματιστή MT/XT του πρότυπου μικροδικτύου χαμηλής τάσης

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το παράθυρο εισαγωγής των παραμέτρων του μετασχηματιστή στο περιβάλλον DRAFT του RSCAD.

The figure displays three sequential screenshots of the 'rtds\_sharc\_TRF2WTAP' parameter input dialog box in RSCAD. Each window has tabs for 'VARIABLE MONITORING' and 'PLOT VARIABLE NAMES', and sub-tabs for 'TRANSFORMER PARAMETERS', 'Winding #1', and 'Winding #2'.

**First Screenshot (General Parameters):**

Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Name	Transformer Name	T1			
Tmva	Transformer rating ( 1 Phase )	0.4	MVA	0.0001	
type	Transformer Model	Ideal			
f	Base Frequency	50	Hz	1.0	300.0
xl	Leakage inductance of Tx	0.04	p.u.	0.005	1.0
nl	No Load Loss	0.025	p.u.	0.0000	0.5
tapCh	Tap Changer	No			
edge	Tap Trigger on	Rising Edge			
prtyp	Type of Processor Card	3PC		0	2

**Second Screenshot (Winding #1 Parameters):**

Name	Description	Value	Unit	Min	Max
V1	Base primary voltage ( RMS )	0.23	kV	0.0001	
Im1	Magnetizing Current	1.0	%	1E-4	1e3

**Third Screenshot (Winding #2 Parameters):**

Name	Description	Value	Unit	Min	Max
V2	Base secondary voltage ( RMS )	11.547	kV	0.0001	
Im2	Magnetizing Current	1.0	%	1E-4	1e3

Εικόνα 5.3: Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων μετασχηματιστή

## 5 Γραμμές χαμηλής τάσης

Το δίκτυο που μοντελοποιείται περιλαμβάνει μια εναέρια γραμμή στην οποία συνδέονται μέσω εναέριων γραμμών ή συνδέσεων παροχής οι καταναλωτές και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Οι στύλοι που απαιτούνται για τη στήριξη των εναέριων γραμμών τοποθετούνται ανά 35 μέτρα. Η κάθε γραμμή ανάλογα με την ισχύ που διαχειρίζεται διαφέρει ως προς τον τύπο του υλικού που χρησιμοποιείται αλλά και ως προς τη διάμετρο.

Στην εικόνα 5.1, που φαίνεται η τοπολογία του μικροδικτύου, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της κάθε γραμμής και οι (αντίστοιχες) αποστάσεις. Τα χαρακτηριστικά του κάθε τύπου γραμμής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4.

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από τον πίνακα υπολογίζουμε για κάθε γραμμή του πρότυπου μικροδικτύου την ανά φάση αντίσταση και αυτεπαγωγή. Αν  $l$  το μήκος της γραμμής σε χιλιόμετρα, η αντίσταση  $R$  και η αυτεπαγωγή  $L$  υπολογίζονται ως εξής:

$$R = R_{ph} \cdot l$$

$$X = X_{ph} \cdot l$$

$$L = \frac{X}{100\pi}$$

Σε περίπτωση που μία γραμμή αποτελείται από δύο ή περισσότερα τμήματα με διαφορετικού τύπου αγωγούς χωρίς διακλαδώσεις στο μεταξύ τους διάστημα, υπολογίζονται οι ωμικές αντιστάσεις και οι αυτεπαγωγές του κάθε τμήματος ξεχωριστά και στη συνέχεια αθροίζονται για να προκύψουν η συνολική ωμική αντίσταση και η συνολική αυτεπαγωγή της γραμμής.

Γραμμή	Τύπος Γραμμής	μήκος(m)	R( $\Omega$ )		L(H)	
Κύρια γραμμή	Overhead line-Twisted Cable 120mm <sup>2</sup> Al		0.00994/35m		9.23*10 <sup>-6</sup> /35m	
Κύρια γραμμή μεταξύ φορτίων 1-2	Overhead line-Twisted Cable 120mm <sup>2</sup> Al	70	0.02		1.846*10 <sup>-5</sup>	
Κύρια γραμμή μεταξύ φορτίων 2-3	Overhead line-Twisted Cable 120mm <sup>2</sup> Al	140	0.04		3.692*10 <sup>-5</sup>	
Κύρια γραμμή μεταξύ φορτίων 3-4	Overhead line-Twisted Cable 120mm <sup>2</sup> Al	210	0.06		5.538*10 <sup>-5</sup>	
Κύρια γραμμή μεταξύ φορτίων 4-5	Overhead line-Twisted Cable 120mm <sup>2</sup> Al	70	0.02		1.846*10 <sup>-5</sup>	
Γραμμή προς 1ο φορτίο	Service connection-6mm <sup>2</sup> Cu	60	0.2214		1.794*10 <sup>-5</sup>	
Γραμμή προς 2ο φορτίο	Overhead line-Twisted Cable 70mm <sup>2</sup> Al	210	0.1044	0.15372	5.748*10 <sup>-5</sup>	7.22*10 <sup>-5</sup>
	Service connection - 50mm <sup>2</sup> Al	60	0.04932		1.471*10 <sup>-5</sup>	
Γραμμή προς 3ο φορτίο	Service connection - 50mm <sup>2</sup> Cu	60	0.05226		1.547*10 <sup>-5</sup>	
Γραμμή προς 4ο φορτίο	Service connection - 6mm <sup>2</sup> Cu	60	0.2214		1.794*10 <sup>-5</sup>	
Γραμμή προς 5ο φορτίο	Service connection - 16mm <sup>2</sup> Cu	60	0.0828		1.566*10 <sup>-5</sup>	

Πίνακας 5.4: Ανά φάση χαρακτηριστικά γραμμών

## 6 Φορτία

Το πρότυπο μικροδίκτυο αποτελείται αποκλειστικά από ομάδες οικιακών καταναλωτών. Κάθε γραμμή χαμηλής τάσης που ξεκινάει από την κεντρική εναέρια γραμμή τροφοδοτεί μία ομάδα καταναλωτών. Για τις προσομοιώσεις και την ανάλυση που θα κάνουμε μας ενδιαφέρει το συνολικό φορτίο της ομάδας και όχι το φορτίο κάθε καταναλωτή ξεχωριστά.

Στο πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης που χρησιμοποιούμε δίνονται τα χαρακτηριστικά του φορτίου της κάθε ομάδας καταναλωτών. Παρατηρούμε ότι αναφορικά με την ισχύ των καταναλωτών παρέχονται δύο τιμές της φαινόμενης ισχύος.  $S_{max}$  είναι η μέγιστη φαινόμενη τριφασική ισχύς ολόκληρης της ομάδας καταναλωτών, ενώ η  $S_0$  εκφράζει τη συνεισφορά της ομάδας στο συνολικό φορτίο της γραμμής, όπως προκύπτει από τυποποιημένους συντελεστές ταυτοχρονισμού για οικιακούς καταναλωτές. Επίσης

δίνεται ότι ο συντελεστής ισχύος των οικιακών καταναλωτών του συγκεκριμένου δικτύου μπορεί να θεωρηθεί επαγωγικός ίσος με 0.85 και σταθερός.

Για τη μοντελοποίηση του φορτίου των καταναλωτών χρειάζεται ο υπολογισμός της φασικής ενεργού ισχύος και της φασικής αέργου ισχύος. Κατά τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιούμε την τιμή  $S_0$  που είναι η συνεισφορά της ομάδας στο συνολικό φορτίο και όχι τη μέγιστη τιμή του  $S_{max}$ , αφού μας ενδιαφέρει η συνολική λειτουργία της γραμμής και οφείλουμε να λάβουμε υπόψη τον ετεροχρονισμό των φορτίων. Οι τιμές που εισάγουμε στο RSCAD για την ισχύ των φορτίων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5 και ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

$$\text{Φασική ενεργός ισχύς: } P_{ph} = \frac{S_0}{3} \cdot 0.85$$

$$\text{Φασική αέργου ισχύς: } Q_{ph} = \frac{S_0}{3} \cdot \sin(\arccos(0.85))$$

	$P_{ph}$ (kW)	$Q_{ph}$ (kVar)
1ο φορτίο	1.5	1
2ο φορτίο	15	10
3ο φορτίο	6.5	4
4ο φορτίο	1.5	1
5ο φορτίο	6.5	4

Πίνακας 5.5: Φασικές ισχύς φορτίων στις οποίες έχει ληφθεί υπόψη ο ταυτοχρονισμός των φορτίων για την εισαγωγή στη μοντελοποίηση του RSCAD

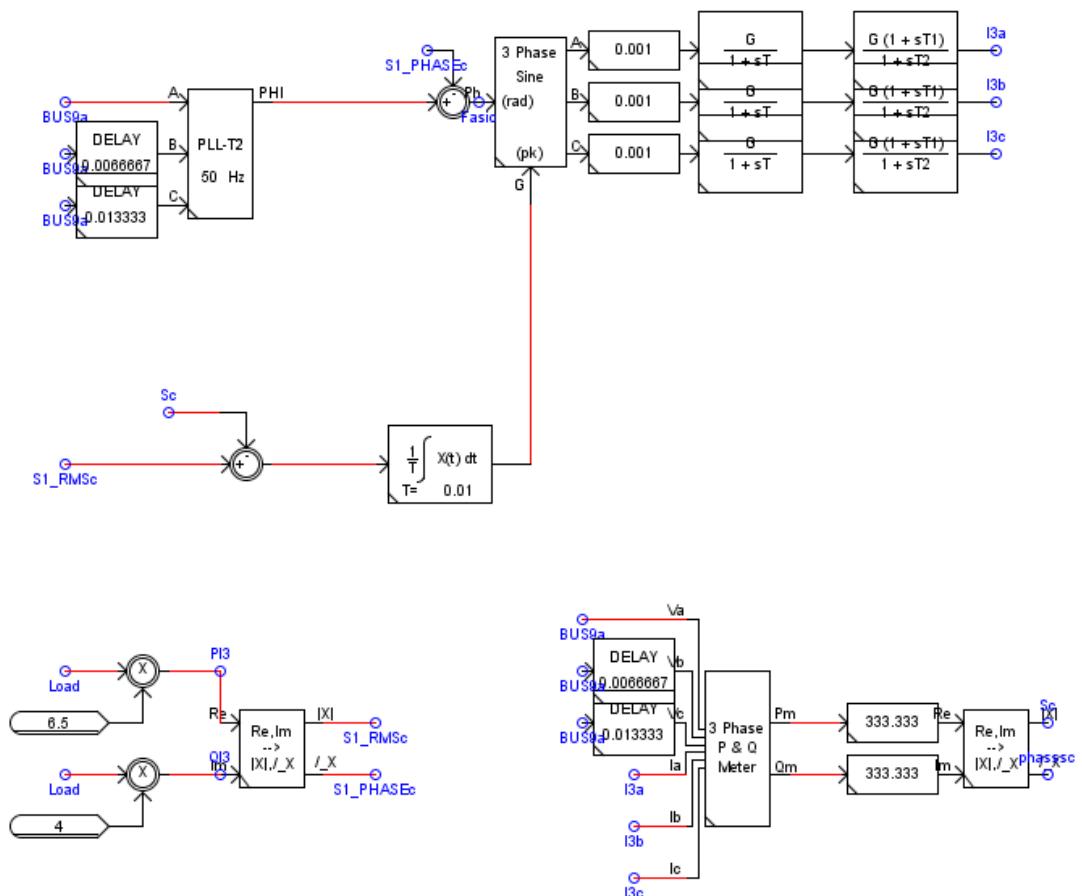
Για την αναπαράσταση των φορτίων στο πρόγραμμα RSCAD υιοθετήθηκε ένα μοντέλο εξαρτημένης πηγής έντασης που λειτουργεί ως πηγή P-Q (με φορά ρεύματος όμως προς τη γη, επομένως στην πράξη λειτουργεί ως καταβόθρα P-Q). Το μοντέλο λειτουργεί ως εξής: Δέχεται ως είσοδο την τάση στα άκρα της εξαρτημένης πηγής, καθώς και την επιθυμητή ενεργό και αέργου 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 αέργου 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 παρακάτω.

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 του RSCAD



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

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η ανάπτυξη του κυκλώματος ελέγχου της εξαρτημένης πηγής έντασης δεν έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αλλά αντλήθηκε από

προηγούμενα πειράματα προσομοίωσης που είχαν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο ΣΗΕ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## 7 Διεσπαρμένη παραγωγή

Παρατηρούμε ότι στο πρότυπο μικροδίκτυο η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελείται από διαφορετικού τύπου μονάδες όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια, μικροτουρμπίνα και κυψέλη καυσίμου. Για τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας δεν κρίθηκε απαραίτητο να αναπτυχθούν διαφορετικά μοντέλα για κάθε διαφορετικό τύπο διεσπαρμένης παραγωγής. Έτσι γίνεται η θεώρηση ότι όλες οι μονάδες είναι φωτοβολταϊκά πλαίσια αντίστοιχης ονομαστικής ισχύος.

Επιπλέον για την μελέτη της λειτουργίας του μικροδικτύου κάτω από διαφορετικές συνθήκες έγινε η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Το ποσοστό διείσδυσης ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής εγκατεστημένης διεσπαρμένης παραγωγής ( $S_{DG}$ ) προς το συνολικό εγκατεστημένο φορτίο ( $S_{maxLoad}$ ).

$$integration_{DG} = \frac{S_{DG}}{S_{maxLoad}}$$

Το πρότυπο μικροδίκτυο είναι σχεδιασμένο με ένα ποσοστό διείσδυσης περίπου 31.65%. Αυξάνοντας ανάλογα την εγκατεστημένη ισχύ της κάθε μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής αυξάνουμε το ποσοστό της συνολικής διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής στο μικροδίκτυο που σχεδιάσαμε σε 100%. Οι ακριβείς τιμές της ισχύος της κάθε μονάδας για κάθε περίπτωση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Διεσπαρμένη παραγωγή/Ισχύς	Πρότυπο CIGRE (διείσδυση 31.65%)	διείσδυση 100%
1η Φωτοβολταϊκή διάταξη (2ο φορτίο)	10	30
2η Φωτοβολταϊκή διάταξη (3ο φορτίο)	5	15
3η Φωτοβολταϊκή διάταξη (4ο φορτίο)	1	3
4η Φωτοβολταϊκή διάταξη (5ο φορτίο)	5	15

Πίνακας 5.6: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Για την αναπαράσταση των φωτοβολταϊκών και των αντιστροφών τους στο κύκλωμα που δημιουργήσαμε στο RSCAD υιοθετήθηκε, όπως και στην περίπτωση των φορτίων, το μοντέλο εξαρτημένης πηγής έντασης, που λειτουργεί ως πηγή P-Q (σε αντίθεση με την μοντελοποίηση των φορτίων η φορά του ρεύματος σε αυτή την περίπτωση είναι προς το δίκτυο αντί προς τη γη).

Οι σύγχρονοι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται στις μονάδες ανανεώσιμων πηγών διαθέτουν ένα κύκλωμα ελέγχου για περικοπή ενεργού ισχύος (power curtailment), το κύκλωμα αυτό μειώνει την παραγωγή ενεργού ισχύος όταν η συχνότητα του δικτύου αυξάνεται πέρα από ένα όριο. Με αυτό τον τρόπο συμβάλλει στην εξισορρόπηση της συχνότητας όταν η ζήτηση ενεργού ισχύος είναι πολύ μικρή σε σχέση με την παραγωγή. Βέβαια στο δίκτυο που σχεδιάσαμε το δίκτυο μέσης τάσης μοντελοποιήθηκε ως ιδανική πηγή τάσης, ως εκ τούτου η συχνότητα θα είναι πάντα σταθερή. Στην νησιδοποιημένη λειτουργία είναι σημαντική η συμβολή των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών στη ρύθμιση της συχνότητας. Επειδή στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής δεν θα γίνει μελέτη της νησιδοποιημένης λειτουργίας του μικροδικτύου, το συγκεκριμένο κύκλωμα δεν συμπεριλήφθηκε στο δίκτυο που μοντελοποιήσαμε.

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε μελετήθηκε και η συμβολή των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών στη ρύθμιση καθώς αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε η χρήση καμπυλών αέργου ισχύος - τάσης (Q-V droop). Ο κάθε αντιστροφέας μετράει την τάση στο σημείο σύνδεσης του με το δίκτυο στη συνέχεια και σύμφωνα με την καμπύλη Q(V) υπολογίζει την τιμή της αέργου ισχύος που χρειάζεται να απορροφήσει ή να παράξει ώστε



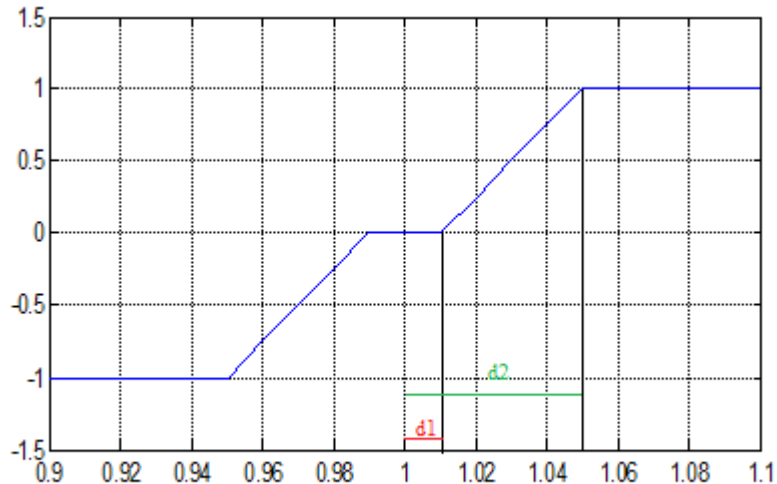
να σταθεροποιηθεί η τάση. Τέλος, η τιμή της αέργου που προκύπτει από την Q-V droop συγκρίνεται με τη μέγιστη τιμή αέργου που έχει τη δυνατότητα να παράξει ή να απορροφήσει ο αντιστροφέας, η οποία εξαρτάται από την ενεργό ισχύ που παράγουν τα φωτοβολταϊκά ( $P_{mppt}$ ) τη συγκεκριμένη στιγμή. Στην περίπτωση που το μέτρο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης αυξάνεται πέρα από μία οριακή τιμή οι αντιστροφείς απορροφούν άεργο ισχύ με στόχο τη μείωση της. Αντιθέτως οι αντιστροφείς παράγουν άεργο όταν παρατηρείται μείωση του μέτρου της τάσης. Όταν η μεταβολή της τάσης υπερβεί μία τιμή  $d_2$  η άεργος ισχύς που απορροφάται ή παράγεται παραμένει σταθερή και ίση με τη μέγιστη δυνατή. Στη δική μας υλοποίηση επιλέχθηκε  $d_2=0.05$  για τους αντιστροφείς όλων των φωτοβολταϊκών. Η επιλογή της τιμής για το  $d_2$  εξαρτάται από το σχεδιασμό και τις απαιτήσεις του δικτύου. Η μέγιστη μεταβολή της τάσης  $\Delta_{fmax}$  κυμαίνεται στο 5% της ονομαστικής [31]. Για το λόγο αυτό τέθηκε η παράμετρος  $d_2$  ίση με το 5% (0.05) της ονομαστικής τάσης.

Αξίζει να τονιστεί ότι επιλέχθηκε μία ζώνη εκατέρωθεν της ονομαστικής τιμής της τάσης (deadband) με πλάτος  $2*d_1$ . Όταν η τιμή της τάσης βρίσκεται εντός της ζώνης αυτής δεν θεωρείται απαραίτητο να επέμβει ο αντιστροφέας και να πραγματοποιήσει ρύθμιση με την παραγωγή ή την απορρόφηση αέργου ισχύος. Το διάστημα  $(1-d_1, 1+d_1)$  με  $d_1=0.01$  αποτελεί το deadband των αντιστροφέων των δύο πρώτων φωτοβολταϊκών διατάξεων στο δίκτυο που σχεδιάστηκε.

Η  $d_1$  μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε αντιστροφέα ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του κάθε δικτύου. Για τους δύο τελευταίους αντιστροφείς επιλέχθηκε μικρότερο deadband, με  $d_1=0.005$ , διότι βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από το ζυγό μέσης τάσης και είναι πιο ευαίσθητοι στις μεταβολές της τάσης.

Παρακάτω παρατίθενται η καμπύλη αέργου ισχύος – τάσης και οι αντίστοιχες εξισώσεις.

$$Q = \begin{cases} -Q_{max}, & V < 1 - d_2 \\ Q_{max} \frac{V - 1 - d_1}{(d_2 - d_1)}, & 1 - d_2 \leq V \leq 1 - d_1 \\ 0, & 1 - d_1 < V < 1 + d_1 \\ Q_{max} \frac{V - 1 - d_1}{(d_2 - d_1)}, & 1 + d_1 \leq V \leq 1 + d_2 \\ Q_{max}, & V > 1 + d_2 \end{cases}$$



Εικόνα 5.6: Καμπύλη αέργου ισχύος – τάσης (Q-Vdroop) των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών.

## 8 Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας

Στο πρότυπο δίκτυο χαμηλής τάσης της CIGRE υπάρχει μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, flywheel, στο σημείο διακλάδωσης της γραμμής, δηλαδή σχετικά κοντά στην αρχή της γραμμής που ξεκινάει από το μετασχηματιστή MT/XT. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής αφαιρέθηκε η μονάδα αποθήκευσης από το συγκεκριμένο σημείο. Παράλληλα τοποθετήθηκε μία νέα μονάδα αποθήκευσης στην ομάδα καταναλωτών που απέχει περισσότερο από τον υποσταθμό υποβιβασμού τάσης, στην προκειμένη περίπτωση στο 5ο φορτίο του δικτύου. Η μονάδα αυτή αποτελείται από συσσωρευτές οι οποίοι θεωρήσαμε ότι είναι ίδιου τύπου με τους συσσωρευτές του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ οι οποίοι έχουν μοντελοποιηθεί σε προγενέστερη διπλωματική εργασία[32]. Για την αναπαράσταση αυτών και του αντιστροφέα τους στο RSCAD χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο εξαρτημένης πηγής έντασης, που λειτουργεί ως πηγή P-Q, με τη φορά του ρεύματος να είναι προς το δίκτυο όπως ακριβώς και στα φωτοβολταϊκά.

Οι συσσωρευτές τίθενται σε λειτουργία ρύθμισης τάσης και διερευνάται η συμπεριφορά τους και η συμβολή τους στο δίκτυο καθώς αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκε στο RSCAD το μοντέλο KiBaM για τους συσσωρευτές ώστε να έχουμε τη δυνατότητα παρακολούθησης και της στάθμης φόρτισης σε πραγματικό χρόνο.

## 9 Διαστασιολόγηση και μοντελοποίηση συσσωρευτών

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο οι εξισώσεις του αναλυτικού μοντέλου KiBaM είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{dq_1}{dt} = -I - k \cdot (1-c) \cdot q_1 + k \cdot c \cdot q_2$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k \cdot (1-c) \cdot q_1 - k \cdot c \cdot q_2$$

με αρχικές συνθήκες:

$$q_1(0) = c \cdot q_0$$

$$q_2(0) = (1-c) \cdot q_0$$

Το αρχικό φορτίο της μπαταρίας  $q_0$  μπορεί να ισούται με το μέγιστο φορτίο  $q_{\max,0}$  ή να είναι μικρότερο, ανάλογα με την κατάσταση της μπαταρίας τη στιγμή που ξεκινάμε τη μελέτη της λειτουργίας της.

Οι σταθερές που χαρακτηρίζουν το μοντέλο χωρητικότητας, τις οποίες πρέπει να προσδιορίσουμε, είναι:

- $q_{\max,0}$ , η μέγιστη χωρητικότητα σε Ah, όταν η εκφόρτιση γίνεται με πολύ μικρό ρεύμα
- $c$ , εκφράζει το ποσοστό του συνολικού φορτίου που είναι άμεσα διαθέσιμο
- $k$ , σε  $\text{hrs}^{-1}$  εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο το δεσμευμένο φορτίο γίνεται διαθέσιμο.

Η μονάδα αποθήκευσης απαιτείται να παρέχει την ονομαστική ισχύ στους αντίστοιχους καταναλωτές για περίπου 37 λεπτά, 0.62h [33]. Έτσι,  $47 \text{ kVA} \cdot 0.62 \text{ h} = 29.14 \text{ kWh}$  είναι η απαιτούμενη ενέργεια. Με την dc τάση 250V προκύπτει ότι η χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης είναι

$$\frac{47 \text{ kVA} \cdot 0.62 \text{ h}}{250 \text{ V}} = 116.56 \text{ Ah}$$

Οι παράμετροι  $k$  και  $c$  εξαρτώνται από τον τύπο των συσσωρευτών και μπορούν να προσδιοριστούν από την καμπύλη χωρητικότητας – χρόνου εκφόρτισης που είτε παρέχεται από τον κατασκευαστή είτε προκύπτει πειραματικά. Οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική έχουμε θεωρήσει ότι είναι ίδιου τύπου με τους συσσωρευτές του εργαστηρίου ΣΗΕ και για το λόγο αυτό οι τιμές τους αντλήθηκαν από προηγούμενη μοντελοποίηση και είναι οι εξής [32]:

$$c = 0.0439$$

$$k = 4.784 \text{ h}^{-1}$$

Για τη μοντελοποίηση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων του KiBaM χρησιμοποιήθηκε το block Statespace από τη βιβλιοθήκη του περιβάλλοντος DRAFT του

RSCAD, το οποίο προσδιορίζει γραμμικά συστήματα που περιγράφονται από εξισώσεις κατάστασης της παρακάτω μορφής:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A] \cdot x + [B] \cdot u \\ y &= [C] \cdot x + [D] \cdot u \end{aligned}$$

Όπου:

- $u$  είναι η είσοδος του συστήματος
- $y$  η έξοδος του συστήματος
- $x$  οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος.

Οι εξισώσεις του KiBaM σύμφωνα με την παραπάνω μορφή φαίνονται παρακάτω με τις το άμεσα διαθέσιμο και το δεσμευμένο φορτίο,  $q_1$  και  $q_2$  αντίστοιχα, να αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος και την έξοδό του και το ρεύμα εκφόρτισης/φόρτισης  $I$  την είσοδο του συστήματος:

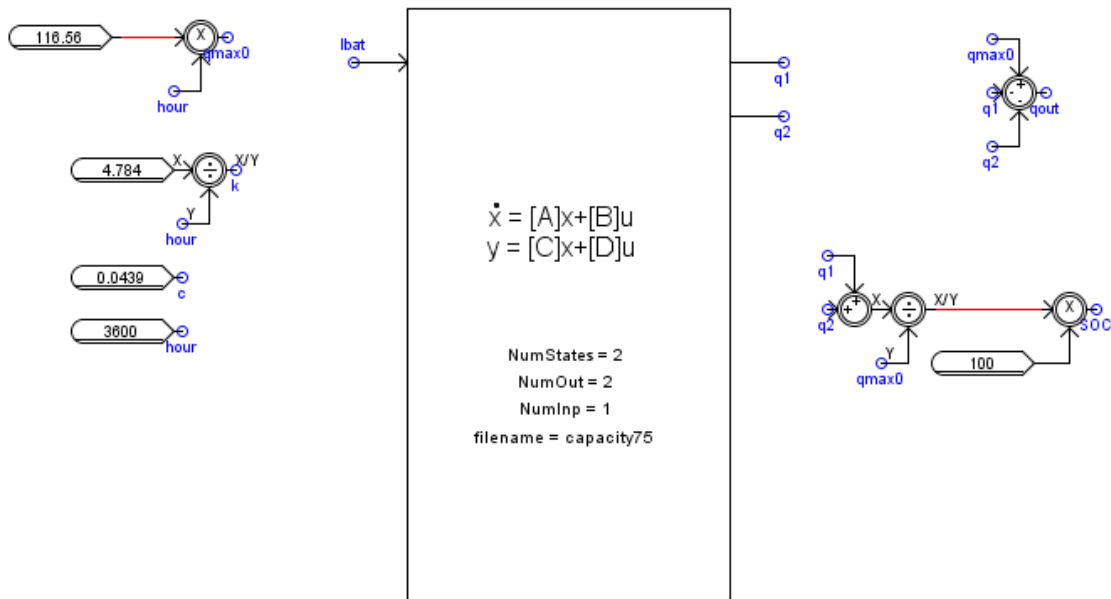
$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k \cdot (1-c) & k \cdot c \\ k \cdot (1-c) & -k \cdot c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot I$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$$

Το μοντέλο χωρητικότητας του KiBaM σχεδιάζεται στο περιβάλλον DRAFT του RSCAD. Για την ορθότητα των υπολογισμών η χωρητικότητα με μονάδες Ah πολλαπλασιάζεται με 3600 για τη μετατροπή των ωρών (h) σε δευτερόλεπτα (sec) και η παράμετρος  $k$  διαιρείται με 3600 ώστε οι μονάδες της να γίνουν  $\text{sec}^{-1}$ . Έτσι προκύπτει η τελική μορφή του συστήματος:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001270055 & 0.000058338 \\ 0.001270055 & -0.000058338 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot I$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$$



Εικόνα 5.7: Μοντέλο χωρητικότητας KiBaM στο RSCAD

Στο παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων του block Statespace εισάγουμε το πλήθος των εισόδων, το πλήθος των εξόδων και το πλήθος των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

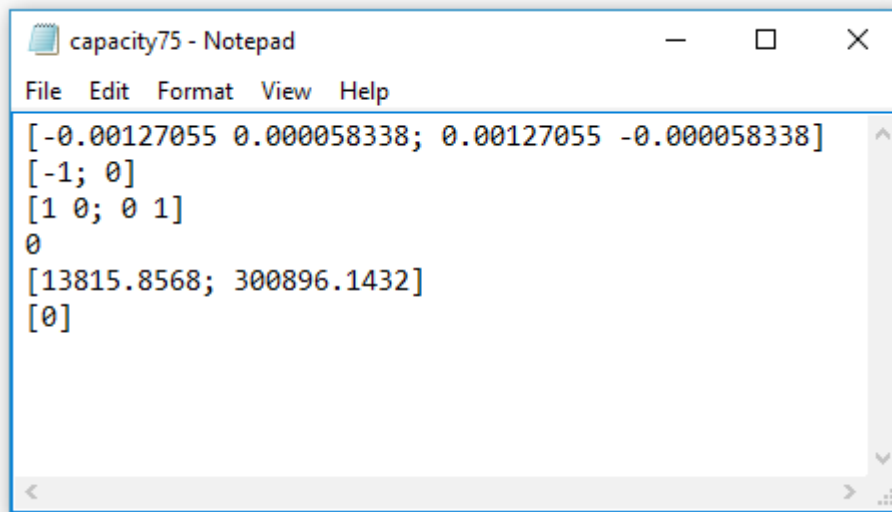
_rtds_STATESPACE.def					
CONFIGURATION					
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
NumInp	Number of Inputs	1		0	10
NumOut	Number of Outputs	2		0	10
NumStates	Number of States	2		1	70
dss	Allow Descriptor System Modelling	No		0	1
filename	Name of file containing matrices	capacity75		0	0
Proc	Assigned Controls Processor	2		1	36
Pri	Priority Level	399		1	
prtyp	Solve Model on card type:	GPC/PB5		1	2

Εικόνα 5.8: Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων για το block Statespace στο περιβάλλον DRAFT του RSCAD.

Επίσης εισάγουμε και το όνομα του αρχείου κειμένου (.txt), στο οποίο καταγράφονται ανά γραμμή οι πίνακες A, B, C και D του συστήματος καθώς και οι αρχικές τιμές των

μεταβλητών κατάστασης,  $q_1(0)$  και  $q_2(0)$ , και της εισόδου  $I(0)$ . Στην υλοποίηση που πραγματοποιήσαμε την αρχική τιμή του ρεύματος εκφόρτισης/φόρτισης (είσοδος συστήματος) την ορίσαμε μηδενική. Επιπλέον θέσαμε ως αρχική τιμή της χωρητικότητας το 75% της μέγιστης τιμής της ( $q_{max,0}$ ). Έτσι υπολογίστηκαν ανάλογα οι αρχικές τιμές του δεσμευμένου και του διαθέσιμου φορτίου, που αποτελούν και τις μεταβλητές κατάστασης ως εξής:

$$\begin{bmatrix} q_1(0) \\ q_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \cdot q_0 \\ (1-c) \cdot q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \cdot 0.75 \cdot q_{max,0} \\ (1-c) \cdot 0.75 \cdot q_{max,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13815.8568 \text{ A} \cdot \text{sec} \\ 300896.1432 \text{ A} \cdot \text{sec} \end{bmatrix}$$

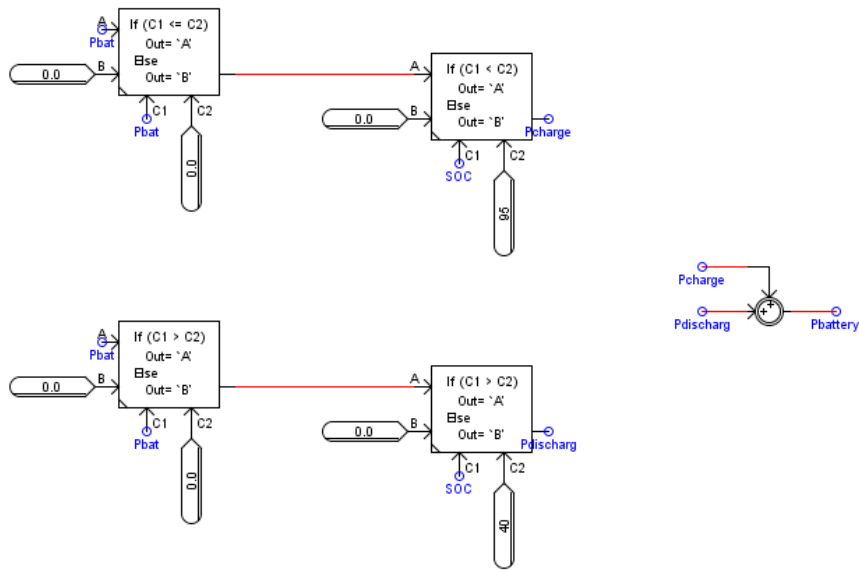


Εικόνα 5.9:

Αρχείο κειμένου με τις παραμέτρους του συστήματος διαφορικών εξισώσεων του μοντέλου χωρητικότητας του KiBaM. Οι τέσσερις πρώτες γραμμές είναι οι πίνακες  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  αντίστοιχα, η πέμπτη γραμμή και η έκτη είναι οι αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης ( $q_1(0), q_2(0)$ ) και της εισόδου ( $I_0$ ) αντίστοιχα.

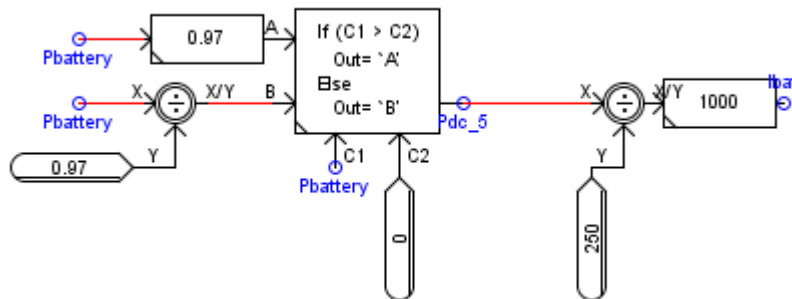
## Υπολογισμός ρεύματος εκφόρτισης/φόρτισης

Από τα κυκλώματος ελέγχου της τάσης προκύπτει κάθε στιγμή μία τιμή για την ενεργό ισχύ ( $P_{bat}$ ) που πρέπει να απορροφήσει ή να αποδώσει η μονάδα αποθήκευσης. Η σύμβαση που υιοθετήθηκε είναι ότι οι αρνητικές τιμές ισχύος θα αντιστοιχούν σε απορρόφηση ισχύος από τους συσσωρευτές (φόρτιση) ενώ οι θετικές τιμές αντιστοιχούν σε απόδοση ισχύος στο δίκτυο (εκφόρτιση). Για την διασφάλιση της σωστής λειτουργίας των συσσωρευτών θεωρήθηκε ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της κατάστασης φόρτισης (State of Charge - SoC) είναι 95% ενώ η ελάχιστη 40%. Για το λόγο αυτό γίνεται έλεγχος της κατάστασης φόρτισης όπως φαίνεται και στην εικόνα. Κατά τη φόρτιση επιτρέπεται η λειτουργία των συσσωρευτών μόνο όταν  $SoC < 95\%$ , ενώ κατά την εκφόρτιση μόνο όταν  $SoC > 40\%$ . Υπό αυτές της προϋποθέσεις υπολογίζεται η τελική τιμή της ισχύος ( $P_{battery}$ ) από την οποία προκύπτει το ρεύμα εκφόρτισης/φόρτισης ( $I_{bat}$ ). Η τελική τιμή της ισχύος είναι είτε ίση με αυτή που προέκυψε από τα κυκλώματα ελέγχου της τάσης είτε μηδενική όταν απαιτείται φόρτιση  $SoC \geq 95\%$  ή όταν απαιτείται εκφόρτιση με  $SoC \leq 40\%$ .



Εικόνα 5.10: Κύκλωμα ελέγχου της κατάστασης φόρτισης

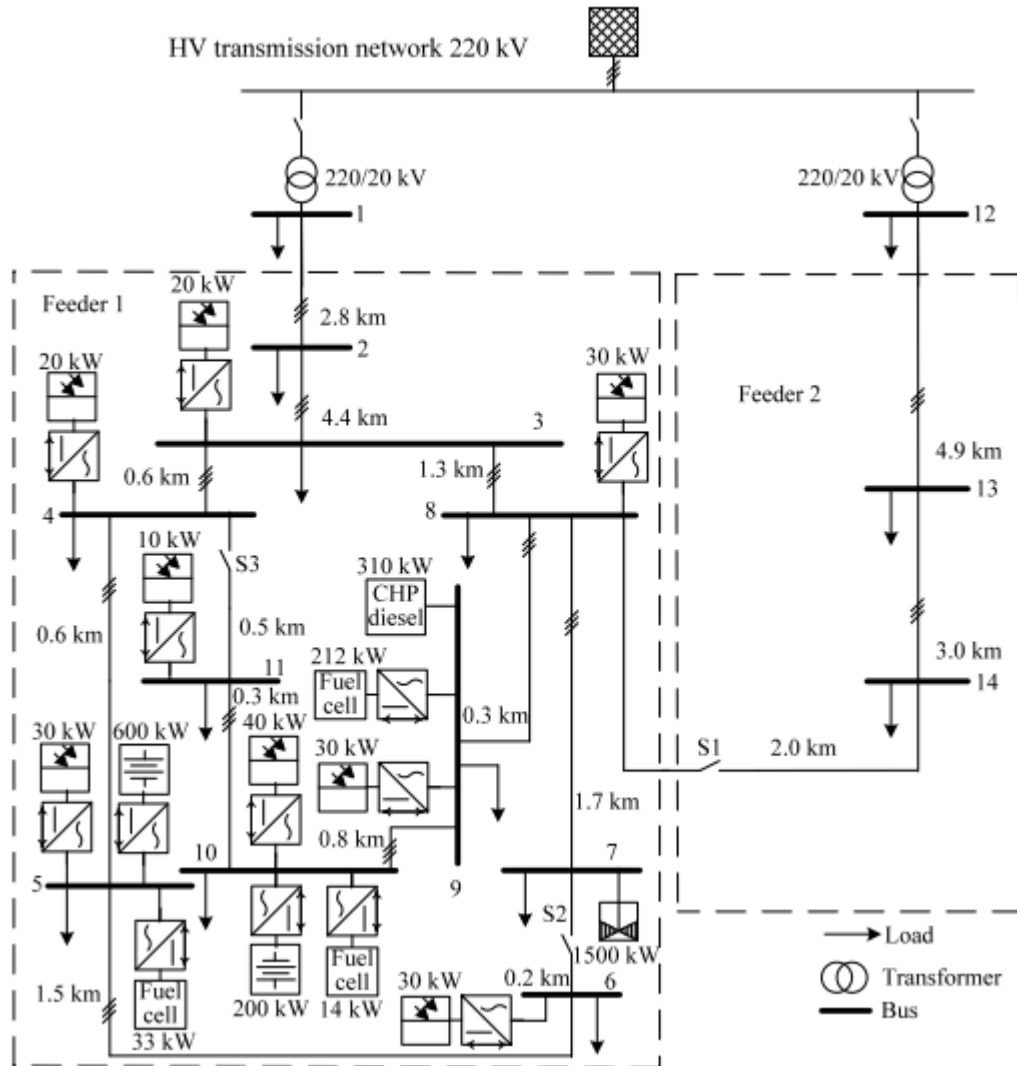
Στη συνέχεια και λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση του αντιστροφέα και την dc τάση των συσσωρευτών υπολογίζουμε την τιμή του ρεύματος εκφόρτισης/φόρτισης ( $I_{bat}$ ) που αποτελεί και την είσοδο του συστήματος διαφορικών εξισώσεων του μοντέλου χωρητικότητας. Θεωρήσαμε ότι η απόδοση του αντιστροφέα είναι 97% τόσο κατά τη μετατροπή από AC σε DC όσο και κατά τη μετατροπή από DC σε AC.



Εικόνα 5.11: Υπολογισμός ρεύματος εκφόρτισης/φόρτισης των συσσωρευτών.

### 5.3 Πρότυπο δίκτυο Μέσης τάσης

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων στη μέση τάση χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο δίκτυο μέσης τάσης για Ευρωπαϊκά δίκτυα της CIGRE το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας μόνο για την πρώτη αναχώρηση του μετασχηματιστή.



Εικόνα 5.12: Πρότυπο ευρωπαϊκό δίκτυο μέσης τάσης CIGRE



## 1 Ισοδύναμο υψηλής τάσης

Στον πίνακα φαίνονται οι παράμετροι του ισοδύναμου δικτύου υψηλής τάσης στο οποίο συνδέεται η πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή του υποσταθμού.

Ονομαστική τάση συστήματος	Ισχύς βραχυκύκλωσης $S_{sc}$	R/X ratio
[kV]	[MVA]	
220	5000	0.1

Πίνακας 5.7: Παράμετροι του ισοδύναμου υψηλής τάσης για πρότυπα ευρωπαϊκά δίκτυα

Με τη χρήση των παραμέτρων αυτών υπολογίζουμε την ισοδύναμη αντίσταση και αυτεπαγωγή του δικτύου μέσης τάσης ως εξής:

$$X_s \approx \frac{(220 \cdot 10^3 \text{ V})^2}{(20000 \cdot 10^6 \text{ VA})} = 2.42 \Omega$$

$$R_s = 0.1 \cdot X_s = 0.242 \Omega$$

$$L_s = \frac{X_s}{100 \cdot \pi} = 0.00774 \text{ H}$$

Για τη μοντελοποίηση της πολικής τάσης των 220kV της μέσης τάσης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της τριφασικής πηγής της βιβλιοθήκης του RSCAD. Στο παράθυρο των παραμέτρων του συγκεκριμένου μοντέλο εισήχθησαν τα παρακάτω στοιχεία:

- Ονομαστική πολική τάση: 220 kV
- Συχνότητα: 50 Hz
- Αρχική γωνία: 0°

## 2 Μετασχηματιστής YT/MT

Ο τριφασικός μετασχηματιστής του πρότυπου μικροδικτύου που μοντελοποιήθηκε έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Node from	Node to	Connection	$V_1$	$V_2$	$Z_{tr}$	$S_{rated}$
			[kV]	[kV]	[Ω]	[MVA]
0	1	3-ph Dyn1	220	20	0.19+j1.91	25

Πίνακας 5.8: Χαρακτηριστικά μετασχηματιστή YT/MT

Το δίκτυο θα μελετηθεί μέσω του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος, όπως προαναφέρθηκε. Για το μετασχηματιστή χρησιμοποιούμε το τριφασικό μοντέλο του RSCAD και συνδέουμε το μονοφασικό ισοδύναμο του πρότυπου δικτύου μέσης τάσης στην μία φάση του μετασχηματιστή.

### 3 Γραμμές

Στο δίκτυο μέσης τάσης που αναπτύξαμε υπάρχει μία κεντρική εναέρια γραμμή της οποίας τα ανά χιλιόμετρο χαρακτηριστικά αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία και είναι τα παρακάτω:

$$R_{ph}=0.501 \Omega/km$$

$$X_{ph}=0.716 \Omega/km$$

Έτσι υπολογίζεται και η αυτεπαγωγή της γραμμής ανά χιλιόμετρο ως εξής:

$$L_{ph}=\frac{X}{100 \cdot \pi}=\frac{0.716}{100 \cdot \pi}=0.00228 H/km$$

Τα μήκη των γραμμών είναι τα ίδια που προτείνονται στο πρότυπο[29] και οι συνολική τιμή της αντίστασης και της αυτεπαγωγής για το κάθε τμήμα της γραμμής υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τις παραπάνω τιμές με το αντίστοιχο μήκος.

### 4 Φορτία και διεσπαρμένη παραγωγή

Το δίκτυο μέσης τάσης που μοντελοποιήθηκε περιέχει οικιακά αλλά και βιομηχανικά/εμπορικά φορτία. Τα φορτία του κάθε ζυγού και οι τιμές που προτείνονται παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8.

Node	Apparent Power, $S$ [kVA]		Power Factor, $pf$	
	Residential	Commercial / Industrial	Residential	Commercial / Industrial
1	15300	5100	0.98	0.95
2	---	---	---	---
3	285	265	0.97	0.85
4	445	---	0.97	---
5	750	---	0.97	---
6	565	---	0.97	---
7	---	90	---	0.85
8	605	---	0.97	---
9	---	675	---	0.85
10	490	80	0.97	0.85
11	340	---	0.97	---
12	15300	5280	0.98	0.95
13	---	40	---	0.85
14	215	390	0.97	0.85

Πίνακας 5.9: Τιμές οικιακών και εμπορικών/βιομηχανικών φορτίων του πρότυπου δικτύου μέσης τάσης της CIGRE ανά ζυγό.

Το ποσοστό διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής στο συγκεκριμένο δίκτυο υπολογίστηκε στο 50%. Για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά των μεθόδων ρύθμισης επιλέχθηκε και η αύξηση της διείσδυσης από 50% σε 80% με αναλογική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος όλων των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Η μοντελοποίηση των φορτίων και των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο RSCAD έγινε με μία πηγή P-Q με τη φορά του ρεύματος με φορά προς τη γη για τον κάθε ζυγό. Έτσι η συνολική ισχύς για τον κάθε ζυγό προκύπτει από την υπέρθεση της ισχύος του

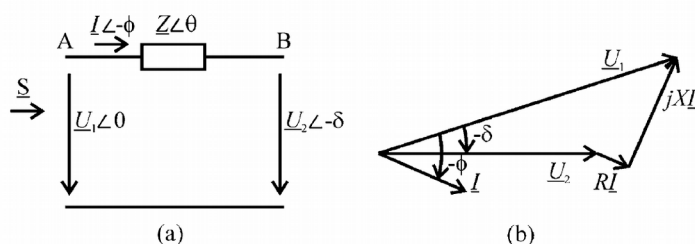
φορτίου και των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής. Με τη επιλογή της συγκεκριμένης φοράς είναι κατανοητό ότι τα φορτία υπερτίθενται έχοντας θετικό πρόσημο. Η ισχύς των μονάδων παραγωγής μπαίνει με αρνητικό πρόσημο όταν εκφράζει παραγωγή και με θετικό στην περίπτωση που απορροφά ισχύ. Η σύμβαση αυτή επιβάλλεται εξαιτίας της φοράς του ρεύματος της πηγής που επιλέξαμε.

## 6 Ρύθμιση τάσης με τη μπαταρία

### 6.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη των ελέγχων μέσω των οποίων μπορεί να γίνει ρύθμιση της τάσης σε ένα μικροδίκτυο χαμηλής τάσης στα πλαίσια τοπικού ελέγχου με τη χρήση μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας. Η κάθε μονάδα ρύθμισης τάσης μετράει την τάση στο σημείο σύνδεσής της με το δίκτυο. Στη συνέχεια και αν παρατηρηθεί απόκλιση της τάσης από την επιθυμητή τιμή, πραγματοποιεί τις κατάλληλες ενέργειες για τη ρύθμισή της. Η ρύθμιση αυτή γίνεται με την έγχυση ή απορρόφηση ενέργειας.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε υποθέσει ότι κατά τη ρύθμιση της τάσης δεν υπάρχουν απαιτήσεις ενεργού ισχύος και έτσι η μέγιστη τιμή της αέργου ισχύος που έχει τη δυνατότητα να διαχειριστεί ο αντιστροφάας των μπαταριών είναι ίση με την ονομαστική του.



Εικόνα 6.1: (a) Ροή ισχύος διαμέσου της γραμμής (b) Διανυσματικό διάγραμμα

Για να γίνει κατανοητή η σχέση της τάσης με την άεργο και ενεργό ισχύ που διακινούνται, παρατηρούμε την εικόνα 6.1 στην οποία φαίνεται η ροή ισχύος διαμέσου μίας γραμμής με σύνθετη αντίσταση  $Z$ . Η φαινόμενη ισχύς υπολογίζεται ως εξής:

$$S = P + j \cdot Q = V_1 \cdot (I_1)^* = V_1 \cdot \left( \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{Z} \right)^* \quad (6.1)$$

$$S = V_1 \cdot \left( \frac{V_1 - V_2 \cdot e^{j\delta}}{Z \cdot e^{-j\theta}} \right) \quad (6.2)$$

$$S = \frac{V_1^2}{Z} \cdot e^{j\theta} - \frac{V_1 \cdot V_2}{Z} \cdot e^{j(\theta + \delta)} \quad (6.3)$$

Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις για την ενεργό και την άεργο ισχύ αντίστοιχα:

$$P = \frac{V_1^2}{Z} \cdot \cos(\theta) - \frac{V_1 \cdot V_2}{Z} \cdot \cos(\theta + \delta) \quad (6.4)$$

$$Q = \frac{V_1^2}{Z} \cdot \sin(\theta) - \frac{V_1 \cdot V_2}{Z} \cdot \sin(\theta + \delta) \quad (6.5)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $Z \cdot \cos(\theta) = R$  και  $Z \cdot \sin(\theta) = X$  έχουμε:

$$P = \frac{V_1}{R^2 + X^2} \cdot [R \cdot (V_1 - V_2 \cdot \cos(\delta)) + X \cdot V_2 \cdot \sin(\delta)] \quad (6.6)$$

$$Q = \frac{V_1}{R^2 + X^2} \cdot [-R \cdot V_2 \cdot \sin(\delta) + X \cdot (V_1 - V_2 \cdot \cos(\delta))] \quad (6.7)$$

Μετά από πράξεις προκύπτουν και οι παρακάτω σχέσεις οι οποίες εκφράζουν τη σχέση της τάσης με την ενεργό και την άεργο ισχύ:

$$V_2 \cdot \sin(\delta) = \frac{X \cdot P - R \cdot Q}{V_1} \quad (6.8)$$

$$V_1 - V_2 \cdot \cos(\delta) = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{V_1} \quad (6.9)$$

Για μικρή γωνία ισχύος  $\delta$  έχουμε  $\sin(\delta) \approx \delta$  και  $\cos(\delta) \approx 1$ . Οπότε οι παραπάνω σχέσεις παίρνουν τη μορφή:

$$\delta \approx \frac{X \cdot P - R \cdot Q}{V_1 \cdot V_2} \quad (6.10)$$

$$V_1 - V_2 \approx \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{V_1} \quad (6.11)$$

Από τη σχέση (6.11) συμπεραίνουμε ότι η ενεργός αλλά και η άεργος ισχύς έχουν καθοριστική επίδραση στην τιμή της τάσης που αναπτύσσεται. Το μέγεθος της επίδρασης της ενεργού και της άεργου ισχύος καθορίζεται από τις τιμές της ωμικής και της επαγωγικής αντίστασης αντίστοιχα.

Στις γραμμές μεταφοράς παρατηρείται ένας έντονα επαγωγικός χαρακτήρας ( $X \gg R$ ). Επομένως βλέπουμε από τη σχέση (6.11) ότι η μεταβολή της άεργου ισχύος έχει σημαντικά μεγαλύτερη επίδραση στην τάση σε σχέση με την ενεργό. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να παραλείψουμε τον ωμικό όρο στις σχέσεις (6.10) και (6.11):

$$\delta \approx \frac{X \cdot P}{V_1 \cdot V_2} \quad (6.12)$$

$$V_1 - V_2 \approx \frac{X \cdot Q}{V_1} \quad (6.13)$$

Από τις σχέσεις αυτές έχει προκύψει και ο κλασικός έλεγχος της τάσης μέσω καμπυλών αέργου ισχύος-τάσης (Q-V droops) και της συχνότητας με καμπύλες ενεργού ισχύος-τάσης (P-f droops) με εξισώσεις:

$$f - f_0 = -K_p \cdot (P - P_0) \quad (6.14)$$

$$V - V_0 = -K_q \cdot (Q - Q_0) \quad (6.15)$$

Όπου  $f_0, V_0$  είναι οι ονομαστικές τιμές της τάσης και της συχνότητας και  $P_0, Q_0$  είναι οι στιγμιαίες τιμές της ενεργού και της αέργου ισχύος αντίστοιχα. Οι συντελεστές  $K_p$  και  $K_q$  υπολογίζονται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα και λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη επιτρεπτή μεταβολή για τη συχνότητα και την τάση ως εξής:

$$K_p = \frac{\Delta f_{max}}{S_{max}} \quad (6.16)$$

$$K_q = \frac{\Delta V_{max}}{S_{max}} \quad (6.17)$$

Ο υπολογισμός της κλίσης των καμπυλών σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις γίνεται ώστε να επιτευχθεί αναλογικός διαμοιρασμός του φορτίου, κυρίως όταν έχουμε παράλληλα συνδεδεμένους αντιστροφείς με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Αναφορικά με τις μέγιστες μεταβολές της συχνότητας και της τάσης οι τυπικές τιμές που αντλούνται από τη βιβλιογραφία είναι 1%-2% και περίπου 5% της ονομαστικής τους τιμής αντίστοιχα [31].

Σε αντίθεση όμως με τα δίκτυα μεταφοράς, στα δίκτυα διανομής (μέση και χαμηλή τάση) ο λόγος  $R/X$  είναι σημαντικά μεγαλύτερος. Στα δίκτυα μέσης τάσης ο λόγος  $R/X$  πλησιάζει τη μονάδα, ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης ο ωμικός χαρακτήρας της γραμμής υπερिσχύει του επαγωγικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ενεργός ισχύς να επηρεάζει την τάση πιο έντονα από ότι η άεργος. Ο έλεγχος της τάσης μέσω καμπυλών αέργου ισχύος-τάσης (Q-V droops) μπορεί να πραγματοποιηθεί, και πραγματοποιείται, και στα δίκτυα διανομής. Ωστόσο για να επιτευχθεί η επιθυμητή ρύθμιση τάσης απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα αέργου ισχύος σε σχέση με αυτή που θα απαιτούνταν για αντίστοιχη ρύθμιση σε πιο επαγωγικά δίκτυα. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη ροή αέργου ισχύος στο δίκτυο με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών στις γραμμές και ενδεχομένως την υπερφόρτισή τους. Για να αποφευχθεί μία τέτοια περίπτωση κρίνεται χρήσιμο να μελετηθεί και η συμβολή της ενεργού ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης σε δίκτυα με μεγάλο λόγο  $R/X$  όπως είναι τα δίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης.

Όσον αφορά τη χαμηλή τάση, όπως συμπεραίνουμε και από τις σχέσεις (6.10) και (6.11), η ενεργός θα καθορίζει κατά κύριο λόγο την τάση ενώ η άεργος τη συχνότητα. Βέβαια, όπως φαίνεται και στον πίνακα κρίνοντας από τις τυπικές τιμές του λόγου  $R/X$  θα ήταν άτοπο να θεωρήσουμε  $X \ll R$  ώστε να απαλείψουμε τον όρο της επαγωγικής

αντίστασης. Επιπροσθέτως, η αποκλειστική ρύθμιση της τάσης με ενεργό ισχύ, παρότι αποδοτική, δεν είναι συμφέρουσα.

Στα δίκτυα μέσης τάσης, στα οποία ο λόγος R/X των γραμμών κυμαίνεται λίγο χαμηλότερα της μονάδας, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η ενεργός και η άεργος ισχύς επηρεάζουν τόσο την τάση όσο και τη συχνότητα. Οπότε η παράλειψη οποιουδήποτε όρου από τις σχέσεις (6.10) και (6.11) επηρεάζει σημαντικά τη ρύθμιση της τάσης.

Type of line	R' Ω/km	X' Ω/km	I <sub>N</sub> A	$\frac{R'}{X'}$
low voltage line	0.642	0.083	142	7.7
medium voltage line	0.161	0.190	396	0.85
high voltage line	0.06	0.191	580	0.31

Πίνακας 6.1: Τυπικές τιμές των παραμέτρων των γραμμών

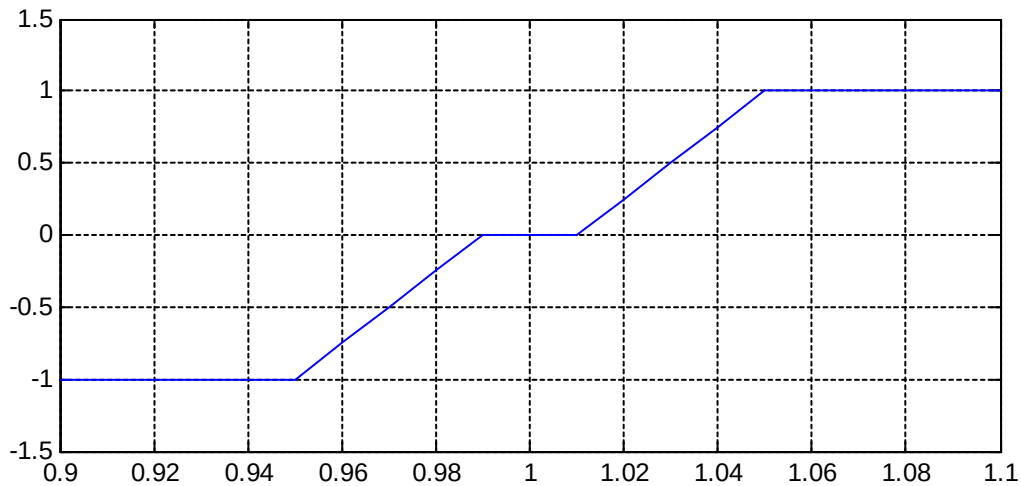
## 6.2 Τοπικός έλεγχος με Q-V droop

Αρχικά ο τοπικός έλεγχος της τάσης από τη μπαταρία στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο γίνεται μέσω μίας καμπύλης (droop) Q-V (αέργου ισχύος-τάσης) αντίστοιχης με αυτή που χρησιμοποιείται και στα φωτοβολταϊκά. Πιο συγκεκριμένα, ο αντιστροφέας της μπαταρίας μετράει την τάση στο σημείο σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο και μέσω της καμπύλης αέργου ισχύος-τάσης υπολογίζει την τιμή της αέργου ισχύος που χρειάζεται να απορροφήσει ή να παράξει. Σε περίπτωση που απαιτείται μείωση της τάσης ο αντιστροφέας της μπαταρίας απορροφά άεργο ισχύ ενώ όταν έχει ως στόχο την αύξηση της τάσης παράγει την απαιτούμενη άεργο ισχύ που προκύπτει από την καμπύλη.

Στην εικόνα 6.2 φαίνεται μορφή της καμπύλης που χρησιμοποιούμε ενώ η εξίσωση της καμπύλης αυτής είναι η παρακάτω:

$$Q = \begin{cases} -Q_{max}, & V < 1 - d_2 \\ Q_{max} \frac{V - 1 + d_1}{(d_2 - d_1)}, & 1 - d_2 \leq V \leq 1 - d_1 \\ 0, & 1 - d_1 < V < 1 + d_1 \\ Q_{max} \frac{V - 1 - d_1}{(d_2 - d_1)}, & 1 + d_1 \leq V \leq 1 + d_2 \\ Q_{max}, & V > 1 + d_2 \end{cases} \quad (6.18)$$

Γύρω από την ονομαστική τιμή της τάσης παρατηρούμε ότι υπάρχει μία “νεκρή ζώνη”(deadband). Όταν η μετρούμενη τάση κυμαίνεται εντός του συγκεκριμένου διαστήματος δεν κρίνεται αναγκαίο να υπάρξει ρύθμιση και έτσι δεν έχουμε ροή αέργου ισχύος. Στην περίπτωση όμως που η μετρούμενη τάση ξεπεράσει τα όρια της “νεκρής ζώνης” (deadband) πραγματοποιείται ρύθμισή μέσω της ροής αέργου ισχύος που υπολογίζεται από την καμπύλη αέργου ισχύος-τάσης. Με την αύξηση της απόλυτης τιμής της διαφοράς της μετρούμενης τάσης από την ονομαστική τιμή ( $|\Delta V|=|V-V_0|$ ) αυξάνεται και η τιμή της αέργου ισχύος που παράγεται ή απορροφάται σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο λόγο αναλογίας. Αυτό συμβαίνει μέχρι τη στιγμή που η αέργος ισχύος που υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης της καμπύλης φτάνει στη μέγιστη τιμή της. Από εκείνο το σημείο και μετά η περαιτέρω μεταβολή της τάσης οδηγεί σε σταθερή παραγωγή ή απορρόφηση αέργου ισχύος και ίση με τη μέγιστη.

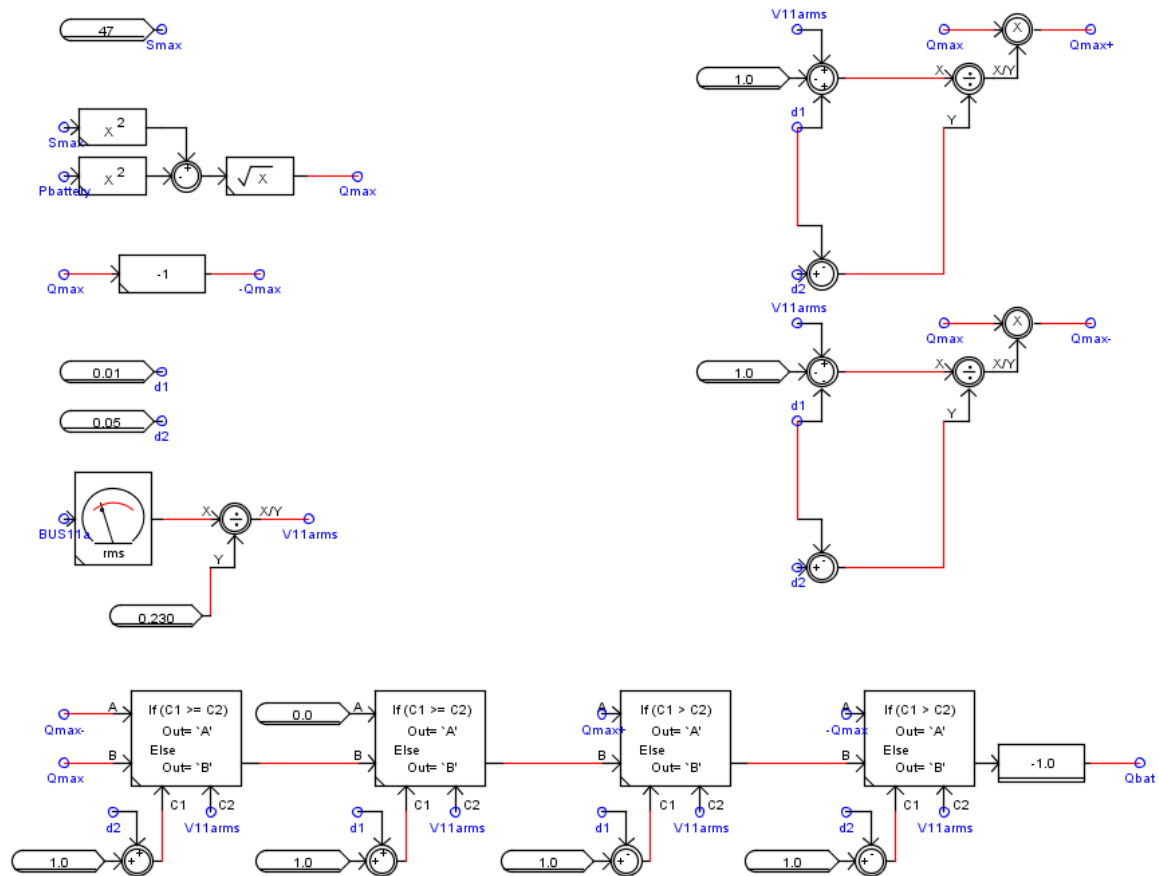


Εικόνα 6.2: Καμπύλη αέργου ισχύος-τάσης (*QV droop*)

Το διάστημα της “νεκρής ζώνης” που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το  $(1-d_1, 1+d_1)$  με  $d_1=0.01$ . Επίσης η μέγιστη μεταβολή της τάσης έχει επιλεγεί ως το 5% της ονομαστικής [31], έτσι για  $|\Delta V|=0.05$  έχουμε και τη μέγιστη παραγωγή ή απορρόφηση αέργου ισχύος. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει και η σταθερά  $d_2=0.05$  της εξίσωσης της καμπύλης αέργου ισχύος-τάσης.

Το κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα των μπαταριών αναπτύχθηκε με το πρόγραμμα RSCAD και για τη ρύθμιση της τάσης μέσω της καμπύλης τάσεως – αέργου ισχύος είναι το παρακάτω.





Εικόνα 6.3: Κύκλωμα ελέγχου για τη ρύθμιση της τάσης μέσω καμπύλης τάσης - αέργου ισχύος ( $QV$  droop)

Η ισχύς  $S_{max}$  προέρχεται από τις προδιαγραφές του αντιστροφέα. Στην περίπτωση μας θεωρούμε ότι ο αντιστροφέας βρίσκεται αποκλειστικά σε λειτουργία ρύθμισης τάσης με καμπύλες αέργου ισχύος – τάσης ( $QV$  droops) και δεν επιτελεί κάποια άλλη λειτουργία. Οπότε υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ή απορρόφησης μέγιστης ισχύος οποιαδήποτε στιγμή, ανάλογα με τις απαιτήσεις της ρύθμισης που πραγματοποιείται.

$Q_{max-}$  και  $Q_{max+}$  είναι οι τιμές της αέργου ισχύος που προκύπτουν από τις καμπύλες για τα διαστήματα  $(1-d_2, 1-d_1)$  και  $(1+d_1, 1+d_2)$  αντίστοιχα.

Ο πολλαπλασιασμός με το  $-1$  πριν τον τελικό υπολογισμό της απαιτούμενη αέργου ( $Q_{bat}$ ) γίνεται καθώς στην μοντελοποίηση μας έχουμε θεωρήσει ότι η απορρόφηση ενέργειας έχει αρνητικό πρόσημο και η παραγωγή θετικό.

### 6.3 Τοπικός έλεγχος βασισμένος στο λόγο R/X

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στα δίκτυα χαμηλής τάσης ο λόγος της ωμικής προς την επαγωγική αντίσταση είναι μεγάλος, ενώ στα δίκτυα μέσης τάσης προσεγγίζει τη μονάδα. Ως εκ τούτου κρίνεται χρήσιμο να μελετήσουμε μία γενικευμένη μέθοδο ρύθμισης τάσης που θα λαμβάνει υπόψη και τον ωμικό χαρακτήρα των γραμμών. Με τη μέθοδο αυτή συμπεριλαμβάνεται και η ενεργός ισχύς στη ρύθμιση της τάσης. Ο συσχετισμός τόσο της ενεργού όσο και της αέργου ισχύος με την τάση φαίνεται στη σχέση (6.11).

Σύμφωνα με τον γενικευμένο έλεγχο που βασίζεται στο λόγο R/X [31], για να αποσυμπλεχθούν η ενεργός και η αέργου ισχύς από τη συχνότητα και την τάση στις αρχικές σχέσεις χρησιμοποιείται ένας ορθογωνικός περιστροφικός πίνακας μετασχηματισμού T. Με αυτό τον τρόπο αυτό γίνεται αλλαγή μεταβλητών και αντί για P και Q χρησιμοποιούμε τις τροποποιημένες μεταβλητές P' και Q' από τις οποίες εξαρτώνται αποκλειστικά πια η συχνότητα και η τάση αντίστοιχα.

Η διαδικασία έχει ως εξής:

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) & -\cos(\theta) \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & \frac{-R}{Z} \\ \frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω μετασχηματισμό οι αρχικές σχέσεις γίνονται:

$$\sin(\delta) = \frac{Z \cdot P'}{V_1 \cdot V_2} \quad (6.21)$$

$$V_1 - V_2 \cdot \cos(\delta) = \frac{Z \cdot Q'}{V_1} \quad (6.22)$$

Για μικρή γωνία ισχύος  $\delta$  ( $\sin(\delta) \approx \delta$ ,  $\cos(\delta) \approx 1$ ) οι (6.21) και (6.22) γίνονται:

$$\delta \approx \frac{Z \cdot P'}{V_1 \cdot V_2} \quad (6.23)$$

$$V_1 - V_2 \approx \frac{Z \cdot Q'}{V_1} \quad (6.24)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι για μικρές γωνίες ισχύος  $\delta$  και μικρή διαφορά  $V_1 - V_2$ , η γωνία ισχύος  $\delta$  εξαρτάται μόνο από τη μεταβλητή  $P'$  και η διαφορά της τάσης από τη μεταβλητή  $Q'$ . Επομένως, μας δίνεται η δυνατότητα να ρυθμίσουμε την τάση με την  $Q'$  και τη συχνότητα, μέσω της γωνίας  $\delta$ , με την  $P'$ .

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι για τον παραπάνω μετασχηματισμό δεν απαιτείται η γνώση των απόλυτων τιμών της ωμικής και της επαγωγικής αντίστασης της γραμμής αλλά αρκεί μία καλή εκτίμηση του λόγου τους  $(R/X)$ .

Στη συνέχεια σχηματίζουμε τις εξισώσεις των καμπυλών (droop) της συχνότητας και της τάσης σχέση με τις νέες μεταβλητές  $P'$  και  $Q'$  αντίστοιχα.

$$f - f_0 = -k_p \cdot (P' - P'_0) \quad (6.25)$$

$$V_1 - V_0 = -k_q \cdot (Q' - Q'_0) \quad (6.26)$$

Οι συντελεστές  $k_p$  και  $k_q$  υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$k_p = \frac{\Delta f_{max}}{S_{max}} \quad (6.27)$$

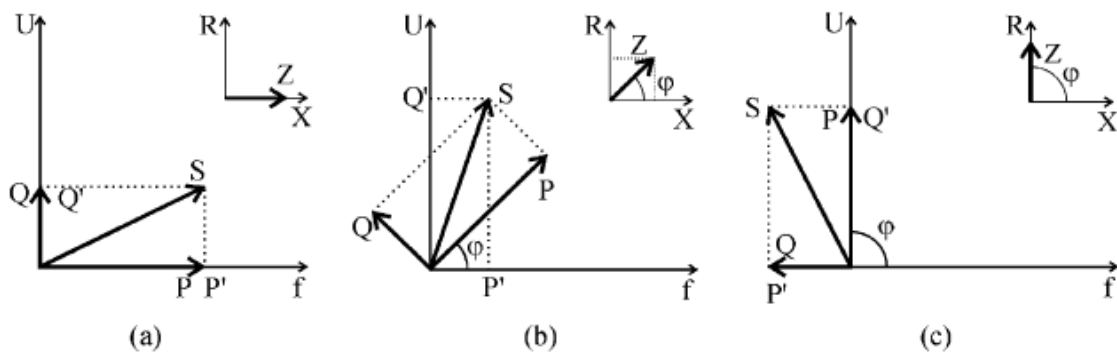
$$k_q = \frac{\Delta V_{max}}{S_{max}} \quad (6.28)$$

Οι παράμετροι  $\Delta f_{max}$  και  $\Delta V_{max}$  είναι οι μέγιστες επιτρεπόμενες μεταβολές στη συχνότητα και την τάση. Οι τυπικές τιμές της  $\Delta f_{max}$  είναι 1-2% της ονομαστικής συχνότητας δηλαδή για το σύστημά μας με ονομαστική συχνότητα 50Hz έχουμε  $\Delta f_{max} = 1\text{Hz}$ . Ενώ για τη  $\Delta V_{max}$  οι τυπικές τιμές κυμαίνονται στο 5% (0.05 pu) της ονομαστικής τάσης δηλαδή στο σύστημά μας  $\Delta V_{max} = 0.0115\text{ V}$  [31].

Τα  $P'_0$  και  $Q'_0$  προκύπτουν από το μετασχηματισμό των  $P_0$  και  $Q_0$ . Επίσης, μετασχηματίζοντας αντίστροφα τις τροποποιημένες μεταβλητές προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις της συχνότητας και της τάσης ως προς την ενεργό και άεργο ισχύ.

$$f - f_0 = -k_p \cdot \left(\frac{X}{Z}\right) \cdot (P - P_0) + k_p \cdot \left(\frac{R}{Z}\right) \cdot (Q - Q_0) \quad (6.29)$$

$$V_1 - V_0 = -k_q \cdot \left(\frac{R}{Z}\right) \cdot (P - P_0) - k_q \cdot \left(\frac{X}{Z}\right) \cdot (Q - Q_0) \quad (6.30)$$



Εικόνα 6.4: Επίδραση ενεργού και αέργου ισχύος στην τάση και τη συχνότητα για διαφορετικές τιμές του λόγου σύνθετης αντίστασης: (a)  $R/X=0$ , (b)  $R/X=1$ , (c)  $R/X=\infty$ .

Από την εικόνα 6.4 μπορούμε να παρατηρήσουμε τον τρόπο με τον οποίο ο λόγος της σύνθετης αντίστασης  $R/X$  καθορίζει το πόσο επηρεάζονται η συχνότητα και η τάση από την ενεργό και την άεργο ισχύ. Επίσης βλέπουμε και τη σχέση της ενεργού και αέργου ισχύος με τις μετασχηματισμένες μεταβλητές  $P'$  και  $Q'$ . Για κυρίως επαγωγικά δίκτυα έχουμε  $P' \simeq P$  και  $Q' \simeq Q$  ενώ για κυρίως ωμικά δίκτυα  $P' \simeq -Q$  και  $Q' \simeq P$ .

Η ρύθμιση της τάσης γίνεται ως εξής:

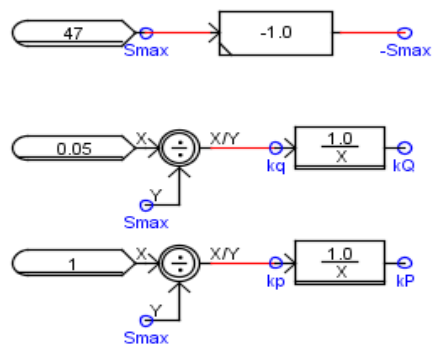
- Υπολογίζουμε τις τιμές των  $P'$  και  $Q'$  που αντιστοιχούν στη μεταβολή της τάσης, που μετράται στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται μέσω των εξισώσεων των τροποποιημένων droop, σχέσεις (6.25) και (6.26).
- Στη συνέχεια με αντίστροφο μετασχηματισμό, σχέση (6.32), υπολογίζουμε και τις τιμές της ενεργού και αέργου ισχύος που απαιτούνται για τη ρύθμιση που επιθυμούμε.

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & \frac{R}{Z} \\ -\frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

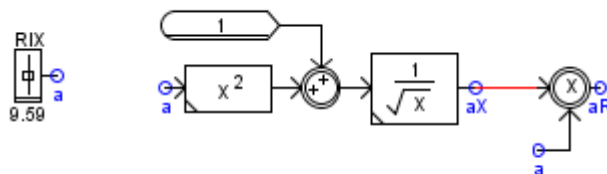
Τέλος, όπως και στην κλασική droop, όταν η μεταβολή της τάσης είναι αρκετά μικρή, όταν δηλαδή βρίσκεται εντός της “νεκρής ζώνης” (deadband) που έχουμε ορίσει, δεν προβαίνουμε σε καμία ενέργεια.

Η διαδικασία όπως μοντελοποιήθηκε στο RSCAD φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 6.5: Μοντελοποίηση στο RSCAD για τον υπολογισμό των συντελεστών των καμπυλών (droops).

Αρχικά υπολογίζονται οι συντελεστές των καμπυλών που θα χρησιμοποιήσουμε (εικόνα 6.5). Για τη διευκόλυνση της περαιτέρω μοντελοποίησης υπολογίζουμε και τις αντίστροφες τιμές των συντελεστών. Επιπλέον, από το λόγο  $R/X$  υπολογίζουμε τους λόγους  $R/Z=aR$  και  $X/Z=aX$  (εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6: Υπολογισμός  $R/Z$  και  $X/Z$  ( $aR, aX$ ) στο περιβάλλον του RSCAD.

Στη συνέχεια στην εικόνα 6.7 βλέπουμε τη μοντελοποίηση στο περιβάλλον του RSCAD για τον υπολογισμό των τροποποιημένων μεταβλητών  $P'$  και  $Q'$ . Ο υπολογισμός γίνεται για την τάση και τη συχνότητα που μετράμε στο σημείο σύνδεσης  $V_{11arms}$  και  $f_{bus11}$  αντίστοιχα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω και σε αυτή τη μέθοδο εισάγουμε μία “νεκρή ζώνη” (deadband) γύρω από την ονομαστική τιμή τόσο στη ρύθμιση της τάσης όσο και της συχνότητας. Οι μεταβολές που βρίσκονται εντός του συγκεκριμένου διαστήματος είναι μικρές και δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία του δικτύου. Για την τάση το διάστημα αυτό είναι  $(1-d_v, 1+d_v)$  με  $d_v=0.005$  και για τη συχνότητα  $(1-d_f, 1+d_f)$  με  $d_f=0.02$ .

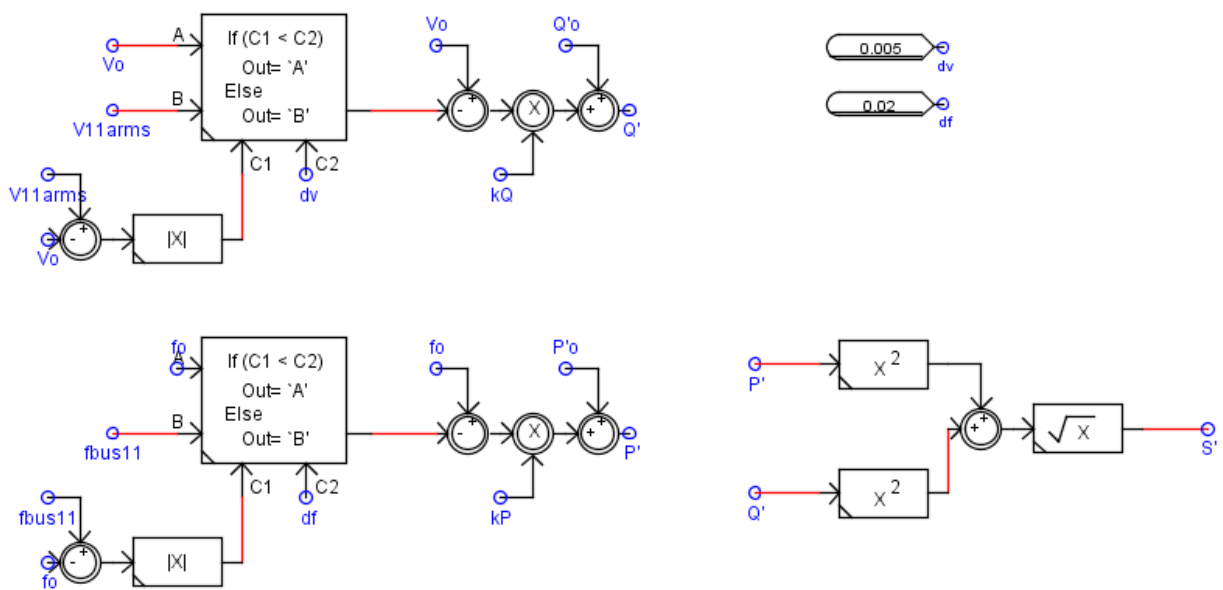
Στην περίπτωση που μελετάμε ένα μικροδίκτυο κατά τη διασυνδεδεμένη του λειτουργία η ρύθμιση της συχνότητας γίνεται από το δίκτυο. Έτσι, οι διακυμάνσεις της συχνότητας είναι πολύ μικρές και δεν απαιτείται τοπική ρύθμιση σε κανένα σημείο του μικροδικτύου. Επομένως ο αντιστροφείας των μπαταριών που χρησιμοποιεί τη μέθοδο ρύθμισης τάσης και συχνότητας που μελετάμε σε αυτή την παράγραφο θα υπολογίζει μηδενική μεταβολή της συχνότητας στο κόμβο σύνδεση με το δίκτυο. Ως εκ τούτου και από

τη σχέση (6.25) προκύπτει  $P' = P'_0$ . Όμως, έχουμε θεωρήσει ότι ο αντιστροφείας έχει ως αποκλειστική λειτουργία τη ρύθμιση αυτή άρα,  $P' = P'_0 = 0$ . Οπότε από τις σχέσεις (6.29) και (6.30) έχουμε ότι

$$P = \left(\frac{R}{Z}\right) \cdot Q' \quad \text{και} \quad Q = \left(\frac{X}{Z}\right) \cdot Q'$$

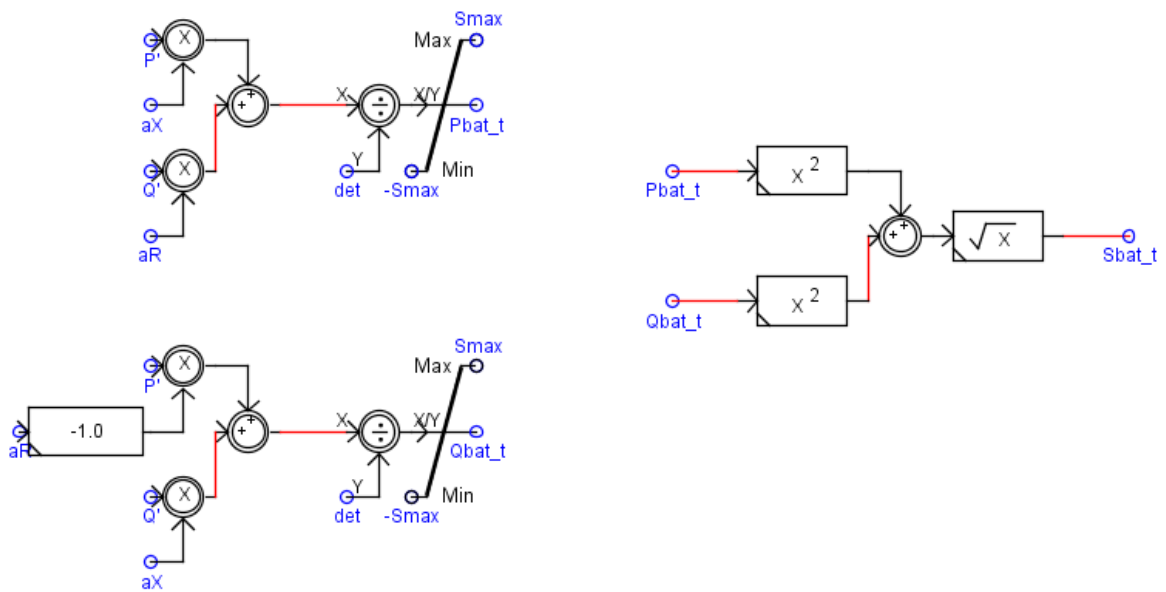
για τη γωνία  $\varphi$  ισχύει:

$$\tan(\varphi) = \frac{Q}{P} = \frac{\left(\frac{X}{Z}\right) \cdot Q'}{\left(\frac{R}{Z}\right) \cdot Q'} \quad \text{δηλαδή,} \quad \tan(\varphi) = \frac{X}{R}$$



Εικόνα 6.7: Μοντελοποίηση στο περιβάλλον RSCAD για τον υπολογισμό των τροποποιημένων μεταβλητών  $P'$  και  $Q'$ .

Μετά τον υπολογισμό των τροποποιημένων μεταβλητών υπολογίζουμε την ενεργό και την άεργο ισχύ που απαιτούνται για τη ρύθμιση που χρειαζόμαστε. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται μέσω της εξίσωσης (6.32) και η μοντελοποίηση του στο RSCAD φαίνεται στην εικόνα 6.8.



Εικόνα 6.8: Μοντελοποίηση στο περιβάλλον RSCAD για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ενεργού και αέργου ισχύος ( $P$  και  $Q$ ) με αντίστροφο μετασχηματισμό των  $P'$  και  $Q'$ .

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι κατά τον υπολογισμό της ενεργού και της αέργου ισχύος έχουμε φροντίσει να θέσουμε όρια ώστε η τιμή τους να μην υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα ( $S_{max}$ ). Αντιθέτως, δεν θέσαμε όρια κατά τον υπολογισμό των τροποποιημένων μεταβλητών. Αυτό συμβαίνει διότι οι τροποποιημένες μεταβλητές  $P'$  και  $Q'$  προκύπτουν από τις εξισώσεις (6.25), (6.26) (droops) και έτσι οι τιμές που θα προκύψουν για τις  $P'$  και  $Q'$  θα είναι εντός ορίων. Βέβαια, παρά την ανεξάρτητη οριοθέτηση της ενεργού ( $P$ ) και της αέργου ισχύος ( $Q$ ) είναι αναγκαίο να εξασφαλίσουμε ότι και η τελική φαινόμενη ισχύς θα είναι μικρότερη ή ίση με την ονομαστική του αντιστροφέα ( $S_{max}$ ). Για το σκοπό αυτό προτείνονται πέντε διαφορετικές λύσεις (περικοπή  $Q'$ ,  $P'$ ,  $Q$ ,  $P$  και περικοπή με σταθερό συντελεστή ισχύος) οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

## 6.4 Τοπικός έλεγχος με Q-V droop και P-V droop

Στον προηγούμενο έλεγχο, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τον λόγο  $R/X$  της γραμμής, παρατηρούμε ότι για να επιτευχθεί η ρύθμιση που χρειαζόμαστε απαιτούνται σημαντικά ποσά ενεργού ισχύος. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η γραμμή είναι κυρίως ωμική και έτσι η ενεργός ισχύς λειτουργεί αποτελεσματικότερα στη ρύθμιση της τάσης σε σχέση με την άεργο. Εντούτοις, το κόστος της ενεργού ισχύος μας οδηγεί στην αναζήτηση μιας μεθόδου με την οποία να μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή ρύθμιση με την ελάχιστη χρήση ενεργού ισχύος.

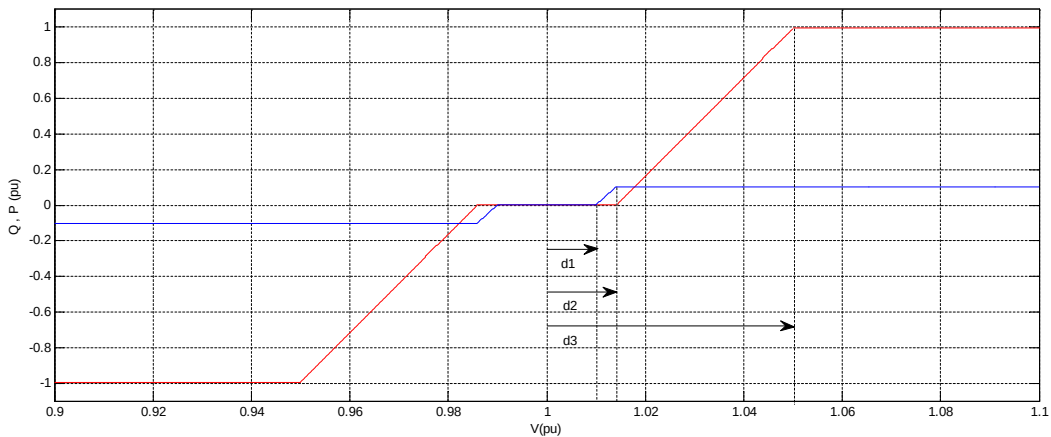
Παρατηρώντας τον προηγούμενο γενικευμένο έλεγχο βλέπουμε ότι ο αντιστροφείας λειτουργεί με συντελεστή ισχύος που εξαρτάται από την αντίσταση της γραμμής,  $\tan(\arccos(\Sigma I)) = X/R$ . Κατά τη λειτουργία αυτή έχουμε και τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη ρύθμιση της τάσης.

Με βάση τα παραπάνω, ο πρώτος έλεγχος που προτείνεται αποτελείται από μία καμπύλη αέργου ισχύος-τάσης (Q-V droop) με  $Q_{dr} = \sin(\arccos(\Sigma I)) \cdot S_{max}$  σε συνδυασμό με μία καμπύλη ενεργού ισχύος-τάσης (P-V droop) με  $P_{dr} = \Sigma I \cdot S_{max}$ . Στόχος του ελέγχου αυτού είναι η χρήση της καμπύλης αέργου ισχύος-τάσης για τις μικρές και πιο συχνές μεταβολές της τάσης που μπορεί να προκύψουν. Επιπλέον, η καμπύλη ενεργού ισχύος-τάσης χρησιμοποιείται σε περίπτωση που παρουσιαστούν πιο έντονες μεταβολές στην τάση. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις καμπύλες Q-V και P-V είναι:

$$Q = \begin{cases} -Q_{dr}, & V < 1 - d_2 \\ Q_{dr} \frac{V - 1 + d_1}{(d_2 - d_1)}, & 1 - d_2 \leq V \leq 1 - d_1 \\ 0, & 1 - d_1 < V < 1 + d_1 \\ Q_{dr} \frac{V - 1 - d_1}{(d_2 - d_1)}, & 1 + d_1 \leq V \leq 1 + d_2 \\ Q_{dr}, & V > 1 + d_2 \end{cases} \quad (6.33)$$

$$P = \begin{cases} -P_{dr}, & V < 1 - d_3 \\ P_{dr} \frac{V - 1 + d_2}{(d_3 - d_2)}, & 1 - d_3 \leq V \leq 1 - d_2 \\ 0, & 1 - d_2 < V < 1 + d_2 \\ P_{dr} \frac{V - 1 - d_2}{(d_3 - d_2)}, & 1 + d_2 \leq V \leq 1 + d_3 \\ P_{dr}, & V > 1 + d_3 \end{cases} \quad (6.34)$$



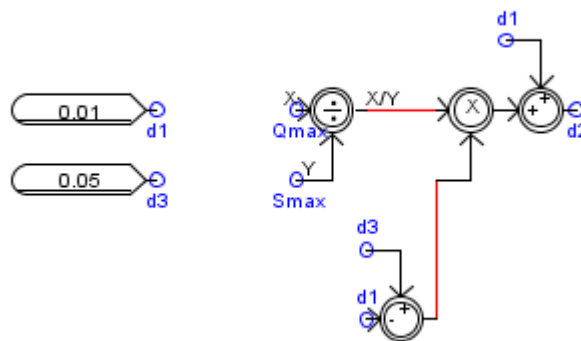


Εικόνα 6.9: ~ Καμπύλη αέργου ισχύος-τάσης (Q-V droop), ~ Καμπύλη ενεργού ισχύος-τάσης (P-V droop) για R/X=9.59.

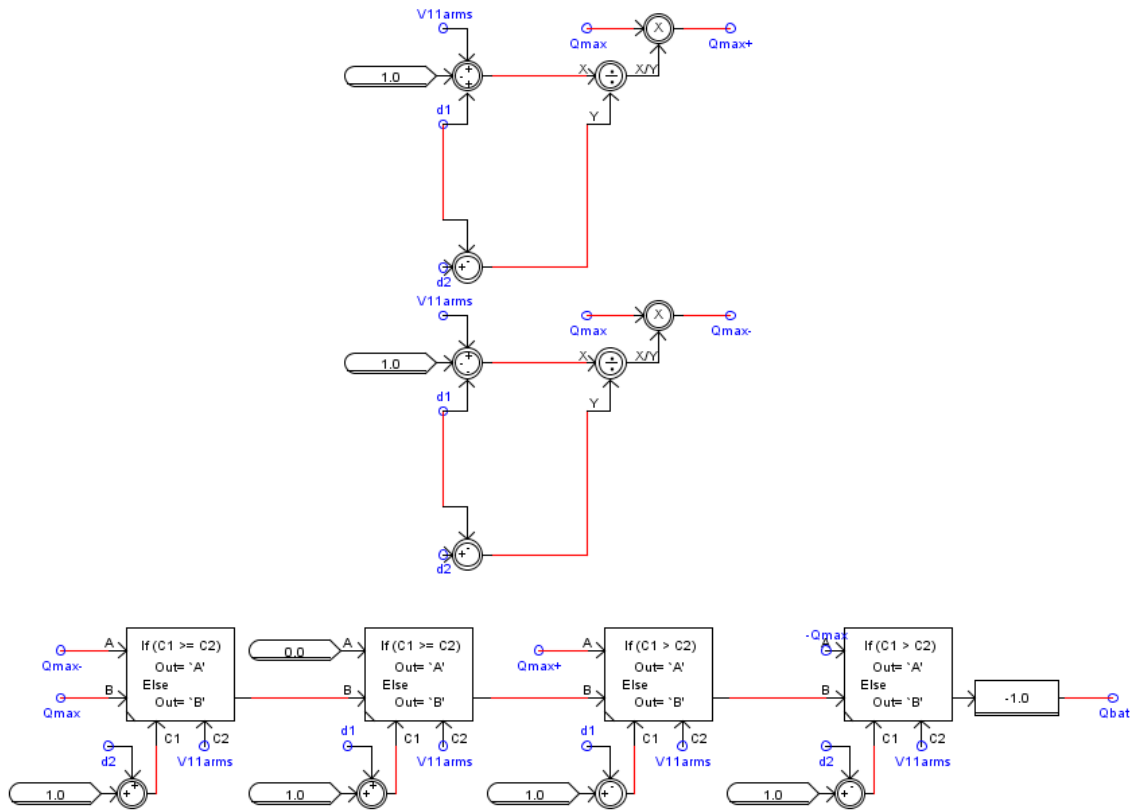
Στην εικόνα 6.9 βλέπουμε τις καμπύλες Q-V droop και P-V droop που χρησιμοποιούνται στον συγκεκριμένο έλεγχο για το δίκτυο χαμηλής τάσης με R/X=9.59. Η “νεκρή ζώνη” (deadband) που εισάγουμε και εδώ  $d_1=0.01$ . Για τη σταθερά d3 επιλέγεται η τιμή  $d_3=0.05$ . Η τιμή του d2, υπολογίζεται από την εξίσωση της κλασική καμπύλης Q-V droop, σχέση (6.18), για  $Q=Q_{dr}$ . Έτσι, προκύπτει:

$$d_2 = d_1 + \frac{(d_3 - d_1) \cdot Q_{max}}{S_{max}} \quad (6.35)$$

Η μοντελοποίηση των δύο καμπυλών Q-V droop και P-V droop στο περιβάλλον του RSCAD φαίνεται στις εικόνες 6.11 και 6.12 αντίστοιχα.



Εικόνα 6.10: Υπολογισμός d2.



Εικόνα 6.11: Q-V droop που χρησιμοποιείται στη μέθοδο Q-V και P-V.

## 6.5 Τροποποιημένος τοπικός έλεγχος

Ακολουθώντας την ίδια λογική με τον προηγούμενο έλεγχο, δηλαδή τον περιορισμό της χρήσης ενεργού ισχύος για μικρές μεταβολές της τάσης, προέκυψε και ένας έλεγχος που συνδυάζει την καμπύλη Q-V droop με τον γενικευμένο έλεγχο που βασίζεται στον λόγο R/X και περιγράφηκε παραπάνω. Σε αυτή την περίπτωση εισάγουμε ένα συντελεστή m ο οποίος παίρνει τις τιμές 0 και 1 και μετατρέπει τον γενικευμένο έλεγχο σε έλεγχο με Q-V droop για ένα διάστημα εκατέρωθεν της “νεκρής ζώνης”. Οι σχέσεις (6.29) και (6.30) γίνονται:

$$f - f_0 = -k_p \cdot \left(\frac{X}{Z_{new}}\right) \cdot (P - P_0) + k_p \cdot \left(\frac{R_{new}}{Z_{new}}\right) \cdot (Q - Q_0) \quad (6.36)$$

$$V_1 - V_0 = -k_q \cdot \left(\frac{R_{new}}{Z_{new}}\right) \cdot (P - P_0) - k_q \cdot \left(\frac{X}{Z_{new}}\right) \cdot (Q - Q_0) \quad (6.37)$$

$$\text{Με } R_{new} = m \cdot R \text{ και } Z_{new} = \sqrt{R_{new}^2 + X^2} = \sqrt{m^2 \cdot R^2 + X^2}$$

Ο συντελεστής m παίρνει τις παρακάτω τιμές στα αντίστοιχα διαστήματα,

$$m = \begin{cases} 0, & 1 - D_m \leq V \leq 1 + D_m \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (6.38)$$

Επειδή όπως εξηγήσαμε η μεταβολή στη συχνότητα είναι μηδενική, οι σχέσεις που έχουν σχέση με αυτή δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς μας. Έτσι, αρκεί να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της σχέσης που αφορά τη μεταβολή της τάσης.

Για m=1 η σχέση (6.37) παίρνει τη αρχική της μορφή, σχέση (6.30), ενώ για m=0 έχουμε ότι  $R_{new} = 0$  και  $Z_{new} = Z$ . Άρα η σχέση (6.37) παίρνει τη μορφή που φαίνεται στη σχέση (6.39) και είναι ίδια με την καμπύλη αέργου ισχύος- τάσης (Q-V droop).

$$V_1 - V_0 = -k_q \cdot \left(\frac{X}{Z}\right) \cdot (Q - Q_0) \quad (6.39)$$

Με αυτό τον τρόπο ρυθμίζουμε τον αντιστροφέα ώστε για ένα διάστημα  $(1 - D_m, 1 + D_m)$  να λειτουργεί με την καμπύλη Q-V ενώ για μεγαλύτερες μεταβολές τις τάσης χρησιμοποιεί τη μέθοδο που περιλαμβάνει τη χρήση και ενεργού ισχύος σύμφωνα με το γενικευμένο έλεγχο που βασίζεται στο λόγο R/X.

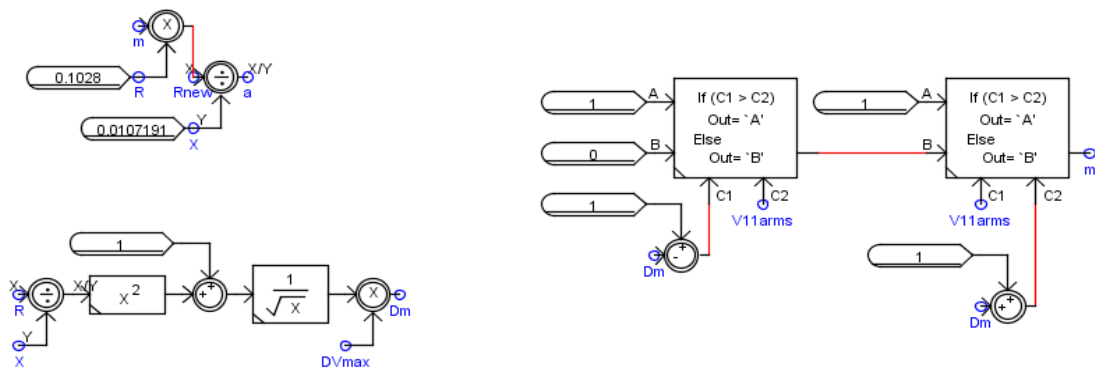
Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του κατάλληλου σημείου στο οποίο θα γίνει αυτή η μετάβαση, δηλαδή ο υπολογισμός της τιμής του  $D_m$ . Ο υπολογισμός της παραμέτρου γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί ότι η εξίσωση του ελέγχου, σχέση (6.40), να είναι

συνεχής. Έτσι, προκύπτει η κατάλληλη τιμή που εξασφαλίζει αυτή τη συνέχεια, σχέση (6.41).

$$V_1 - V_0 = \begin{cases} -k_q \cdot \left(\frac{X}{Z}\right) \cdot (Q - Q_0), & 1 - D_m \leq V \leq 1 + D_m \\ 1 - k_q \cdot \left(\frac{R_{new}}{Z_{new}}\right) \cdot (P - P_0) - k_q \cdot \left(\frac{X}{Z_{new}}\right) \cdot (Q - Q_0) & \text{else} \end{cases} \quad (6.40)$$

$$D_m = \left| -k_q \cdot \left(\frac{X}{Z}\right) \cdot Q_{max} \right| = \left| \frac{-\Delta V_{max}}{S_{max}} \cdot \left(\frac{X}{Z}\right) \cdot Q_{max} \right| = \left| -\Delta V_{max} \cdot \left(\frac{X}{Z}\right) \right| \quad (6.41)$$

Στην εικόνα 6.12 φαίνονται οι προσθήκες που έχουμε κάνει στον αρχικό γενικευμένο έλεγχο με την εισαγωγή του συντελεστή  $m$  και τον υπολογισμό της  $D_m$  μεταβολής της τάσης.



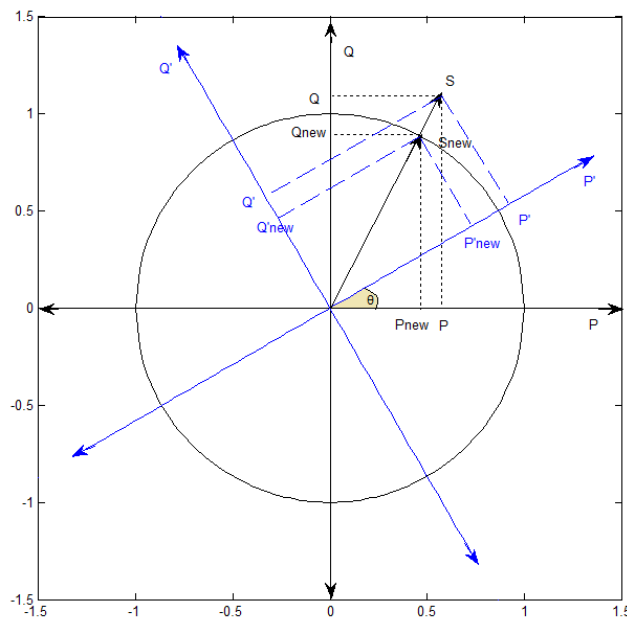
Εικόνα 6.12: Προσθήκες στον PQV έλεγχο μετά την εισαγωγή του συντελεστή  $m$ .

## 6.6 Οριακές συνθήκες

Οι τοπικοί έλεγχοι στους οποίους χρησιμοποιούνται οι τροποποιημένες μεταβλητές ( $P'$  και  $Q'$ ) εμπεριέχουν τον κίνδυνο τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Πιο συγκεκριμένα οι μαθηματικοί υπολογισμοί στους ελέγχους αυτούς είναι πιθανό να έχουν ως αποτέλεσμα για την ενεργό, την άεργο ή/και για τη φαινόμενη ισχύ τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα.

Αναφορικά με τις τροποποιημένες μεταβλητές οι τιμές τους ( $P'$  και  $Q'$ ) προκύπτουν ουσιαστικά από καμπύλες droop σε συνάρτηση με τη συχνότητα και την τάση (εικόνα 6.7 και εικόνα 6.5), οπότε δεν υπερβαίνουν την ονομαστική του αντιστροφέα ( $S_{max}$ ) (ορισμός  $k_p$  και  $k_q$ ). Δεν ισχύει το ίδιο όμως και για τις πραγματικές μεταβλητές  $P$  και  $Q$  οι τιμές των οποίων προκύπτουν από τον αντίστροφο μετασχηματισμό των  $P'$  και  $Q'$  και υπάρχει πιθανότητα να υπερβαίνουν την ονομαστική. Επιπλέον ακόμα και αν οι τιμές της ενεργού και άεργου ισχύος είναι εντός των απαραίτητων ορίων δεν εξασφαλίζεται το ίδιο και για τη φαινόμενη ισχύ η οποία μπορεί να υπερβαίνει την ονομαστική του αντιστροφέα.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω περιπτώσεων επιλέχθηκαν οι λύσεις που περιγράφονται παρακάτω.

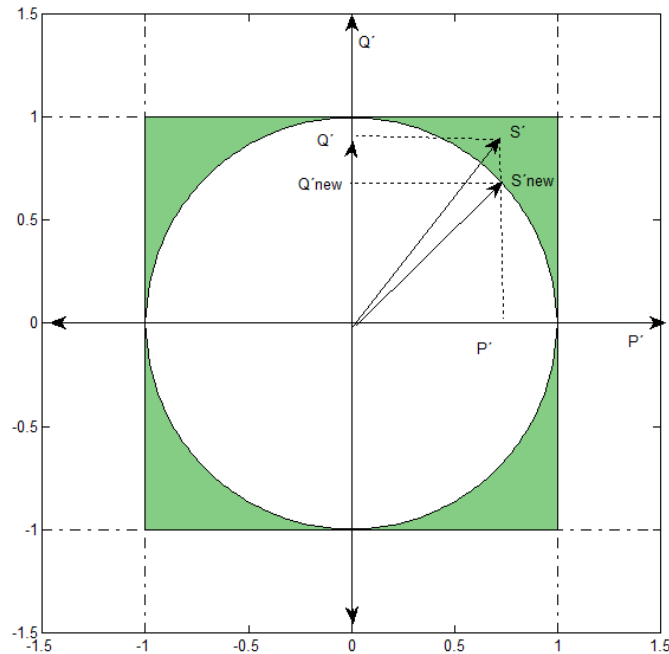


Εικόνα 6.13: Σχέση μεταξύ των συστήματος συντεταγμένων των τροποποιημένων (μπλε) και των πραγματικών μεταβλητών (μαύρο).

Οφείλουμε να διευκρινίσουμε ότι το σύστημα των συντεταγμένων των τροποποιημένων μεταβλητών είναι περιστρεμμένο κατά μία γωνία  $\theta$  σε σχέση με το το σύστημα συντεταγμένων των  $P$  και  $Q$  (εικόνα 6.13). Για ευκολότερη παρατήρηση επιλέχθηκε τα δύο αυτά συστήματα να παρουσιάζονται ξεχωριστά και με διαφορετικά χρώματα και όχι συγκριτικά στο ίδιο σχήμα. Επιπλέον όπως είναι εμφανές το διάνυσμα της

φαινόμενης ισχύος είναι το ίδιο και απλά περιγράφεται σε δύο διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Οπότε σε περίπτωση υπέρβασης της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα ο επαναπροσδιορισμός του διανύσματος της φαινόμενης ισχύος που καλείται να διαχειριστεί ο αντιστροφέας μπορεί να γίνει είτε στον χώρο P-Q, είτε στον χώρο P'-Q'.

### 6.6.1 Περιορισμός των τροποποιημένων μεταβλητών (Q' ή P')

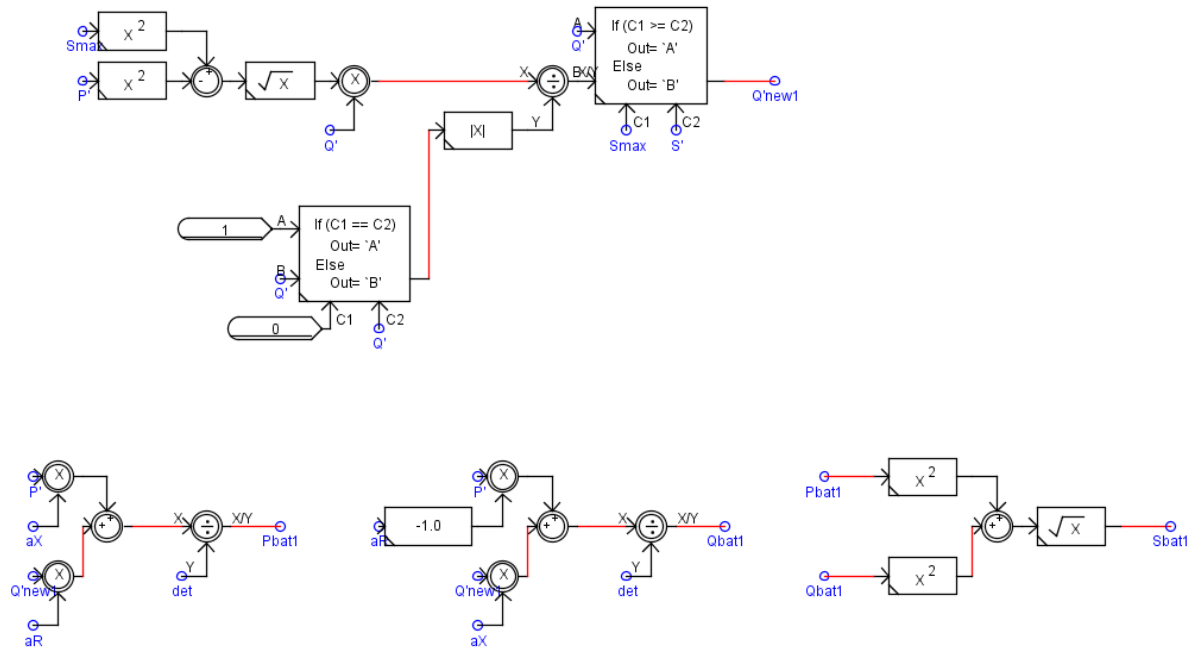


Εικόνα 6.14: Περιοχές στις οποίες μπορεί να προκύψει το διάνυσμα της φαινόμενης ισχύος  $S$  και περιορισμός με μείωση της τροποποιημένης μεταβλητής  $Q'$ .

#### 1 Μείωση της $Q'$

Η πρώτη λύση που μελετήθηκε για την διαχείριση των περιπτώσεων κατά τις οποίες η τιμή της φαινόμενης ισχύος προκύπτει είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα είναι η μείωση της τιμής της τροποποιημένης μεταβλητής  $Q'$ . Στην εικόνα 6.14 έχουν χρωματιστεί οι περιοχές στις οποίες μπορεί να βρεθεί το διάνυσμα της φαινόμενης ισχύος. Για να μειωθεί η τιμή της κρατάμε σταθερή την τιμή της τροποποιημένης μεταβλητής  $P'$  και μειώνουμε την τιμή της  $Q'$  ώστε  $S'_{new} = S_{max}$ . Έτσι,

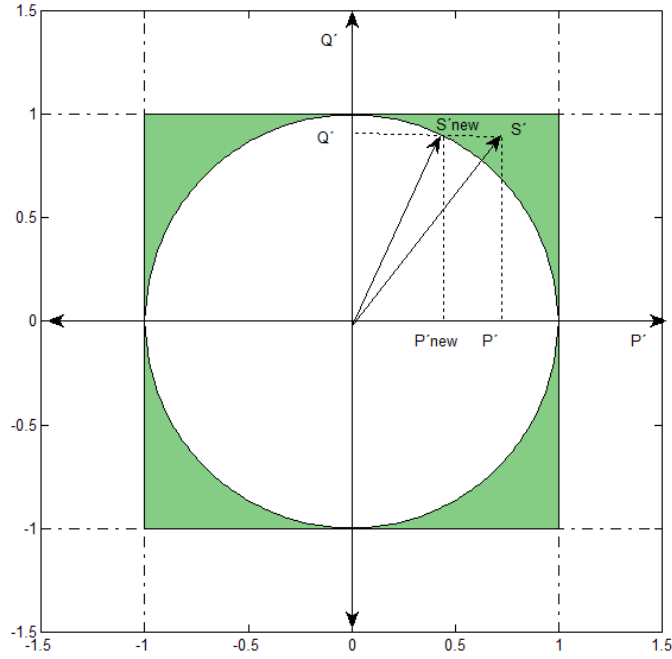
$Q'_{new} = \pm \sqrt{S_{max}^2 - P'^2}$ . Το κύκλωμα που υλοποιεί τον έλεγχο αυτό στο περιβάλλον DRAFT του RSCAD φαίνεται στην εικόνα 6.14. Για να έχει το  $Q'_{new}$  το σωστό πρόσημο πολλαπλασιάζουμε με το αρχικό  $Q'$  και διαιρούμε με την απόλυτη τιμή του. Επιπλέον διαιρούμε με τη μονάδα αν το αρχικό είναι μηδέν για να μην προκύψει πρόβλημα στη διαίρεση με το μηδέν.



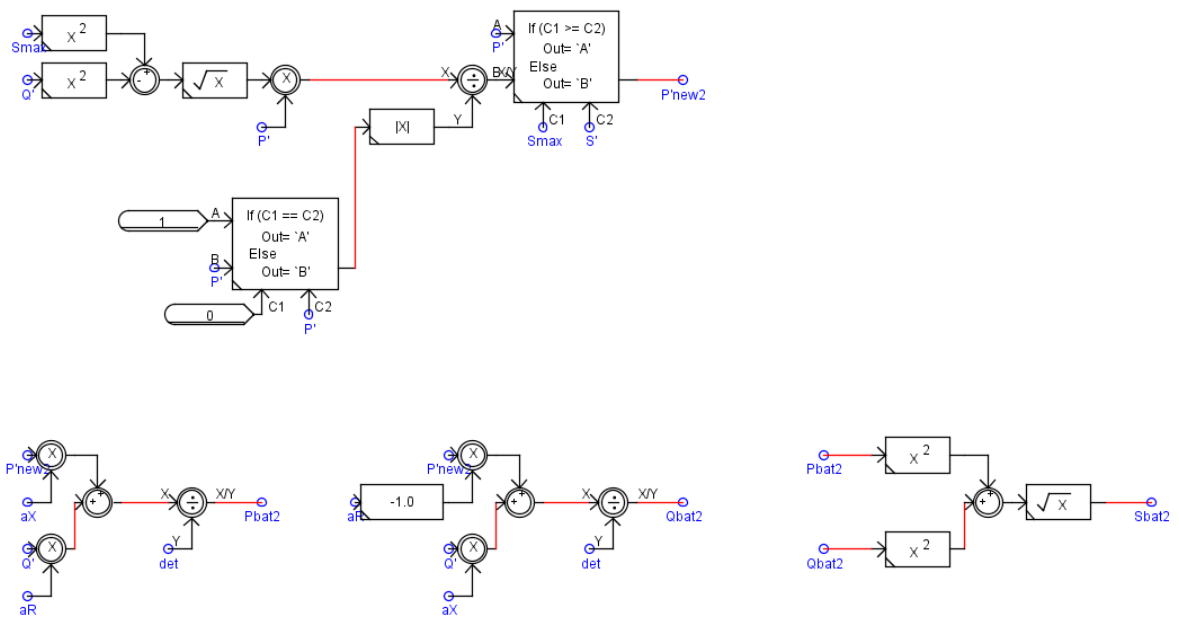
Εικόνα 6.14: Κύκλωμα ελέγχου στο RSCAD της φαινόμενης ισχύος με μείωση της τιμής της μεταβλητής  $Q'$ .

## 2 Μείωση της $P'$

Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε και πάλι η περιοχή στην οποία μπορεί να βρίσκεται το διάλυμα της φαινόμενης ισχύος, όμως η τεχνική που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο περιορισμός της τροποποιημένης μεταβλητής  $P'$  διατηρώντας σταθερή την τιμή της  $Q'$  με  $P'_{new} = \pm \sqrt{S_{max}^2 - Q'^2}$ . Ενώ στην εικόνα 6.16 φαίνεται το κύκλωμα ελέγχου μέσω του οποίου γίνεται ο περιορισμός της  $P'$ . Όπως και στην προηγούμενη τεχνική φροντίζουμε ώστε η νέα τιμή να έχει το κατάλληλο πρόσημο και να μην προκύπτει διαίρεση με το μηδέν.



Εικόνα 6.15: Περιοχές στις οποίες μπορεί να προκύψει το διάνυσμα της φαινόμενης ισχύος  $S$  και περιορισμός με μείωση της τροποποιημένης μεταβλητής  $P'$ .



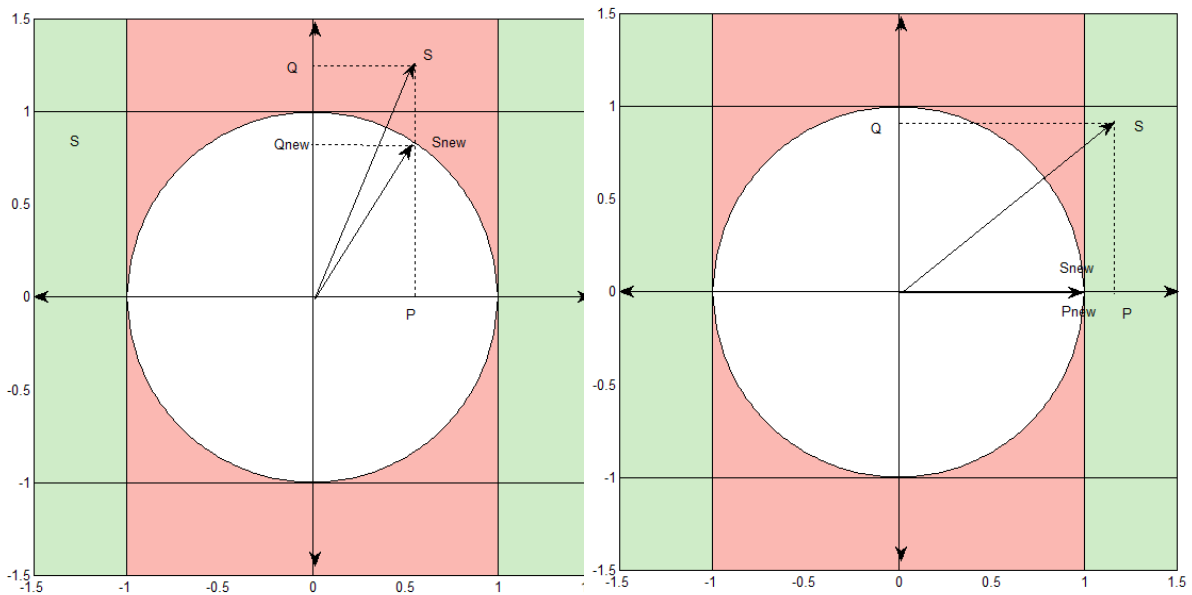
Εικόνα 6.16: Κύκλωμα ελέγχου στο RSCAD της φαινόμενης ισχύος με μείωση της τιμής της μεταβλητής  $P'$ .



## 6.6.2 Περιορισμός της αέργου ισχύος (Q) ή της ενεργού ισχύος (P)

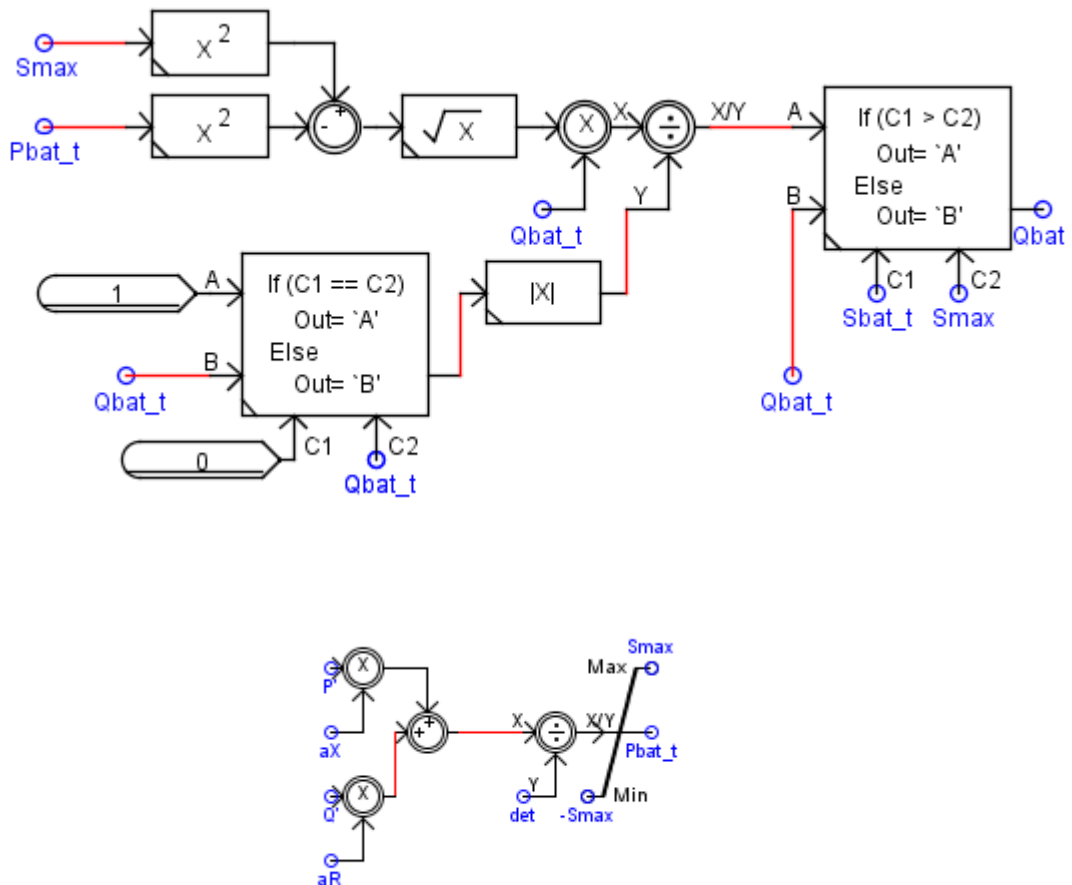
### 1 Μείωση αέργου ισχύος (Q)

Το διάνυσμα της φαινόμενης ισχύος μπορεί να βρεθεί σε δύο διαφορετικές περιοχές ανάλογα με την τιμή της ενεργού ισχύος (στο χώρο P-Q). Έτσι, όπως φαίνεται και στο αριστερό τμήμα της εικόνας 6.15, όταν το μέτρο της ενεργού ισχύος που προκύπτει από τους υπολογισμούς για τη ρύθμιση της τάσης είναι μικρότερο από την ονομαστική τιμή του αντιστροφέα, μειώνουμε κατάλληλα την αέργο σύμφωνα με τη σχέση  $Q_{new} = \pm \sqrt{S_{max}^2 - P^2}$  ώστε η νέα φαινόμενη ισχύς ( $S_{new}$ ) να γίνει ίση με την ονομαστική ( $S_{max}$ ). Όταν η απόλυτη τιμή της ενεργού ισχύος είναι μεγαλύτερη της  $S_{max}$  μειώνεται μέχρι την τιμή αυτή και η αέργος γίνεται μηδενική (δεξιά εικόνα 6.17).



Εικόνα 6.17: Ρύθμιση της φαινόμενης ισχύος (S) με μείωση της αέργου (P) όταν  $|P| \leq S_{max}$  [αριστερά] και  $|P| > S_{max}$  [δεξιά].

Στην εικόνα 6.18 βλέπουμε το κύκλωμα ελέγχου που υλοποιήθηκε στο RSCAD ώστε να γίνει ο έλεγχος και η διόρθωση της φαινόμενης ισχύος που προκύπτει από τους υπολογισμούς. Για να εξασφαλίσουμε ότι η νέα τιμή της αέργου ισχύος έχει το σωστό πρόσημο, το οποίο υποδηλώνει παραγωγή ή απορρόφηση ισχύος, πολλαπλασιάζουμε με την αρχική τιμή της αέργου ισχύος και διαιρούμε με την απόλυτη τιμή της. Επίσης, για να διασφαλίσουμε ότι το σύστημα δεν θα αντιμετωπίσει διαίρεση με το μηδέν διαιρούμε με τη μονάδα όταν η αρχική αέργος είναι μηδενική.

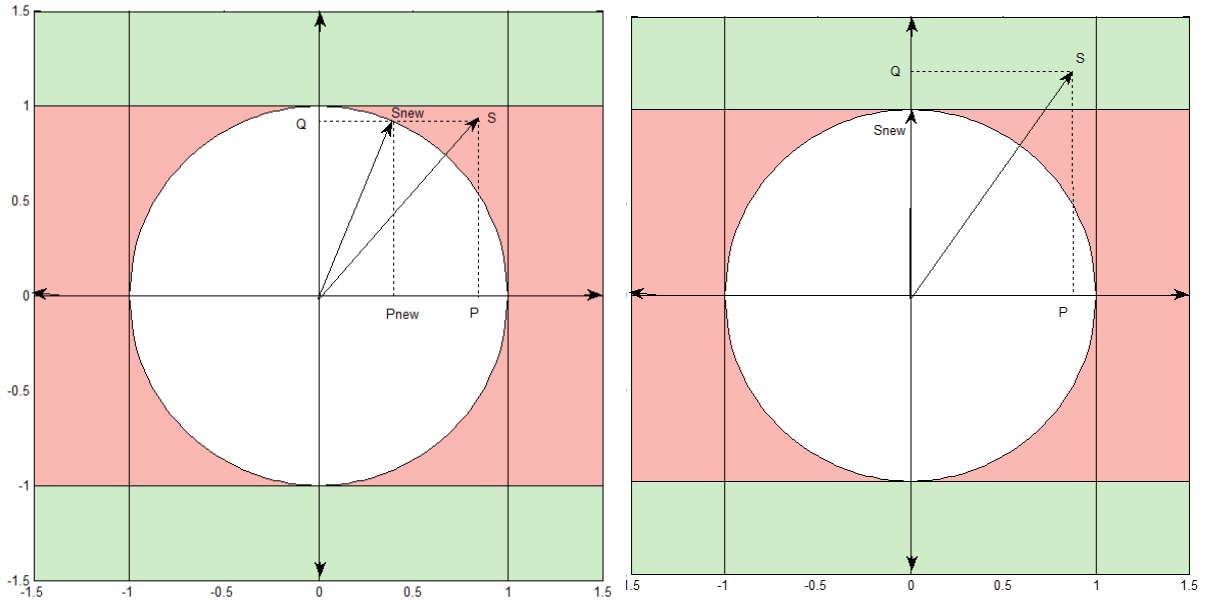


Εικόνα 6.18: Κύκλωμα ελέγχου μείωσης αέργου ισχύος για τη ρύθμιση της τιμής της φαινόμενης ισχύος.

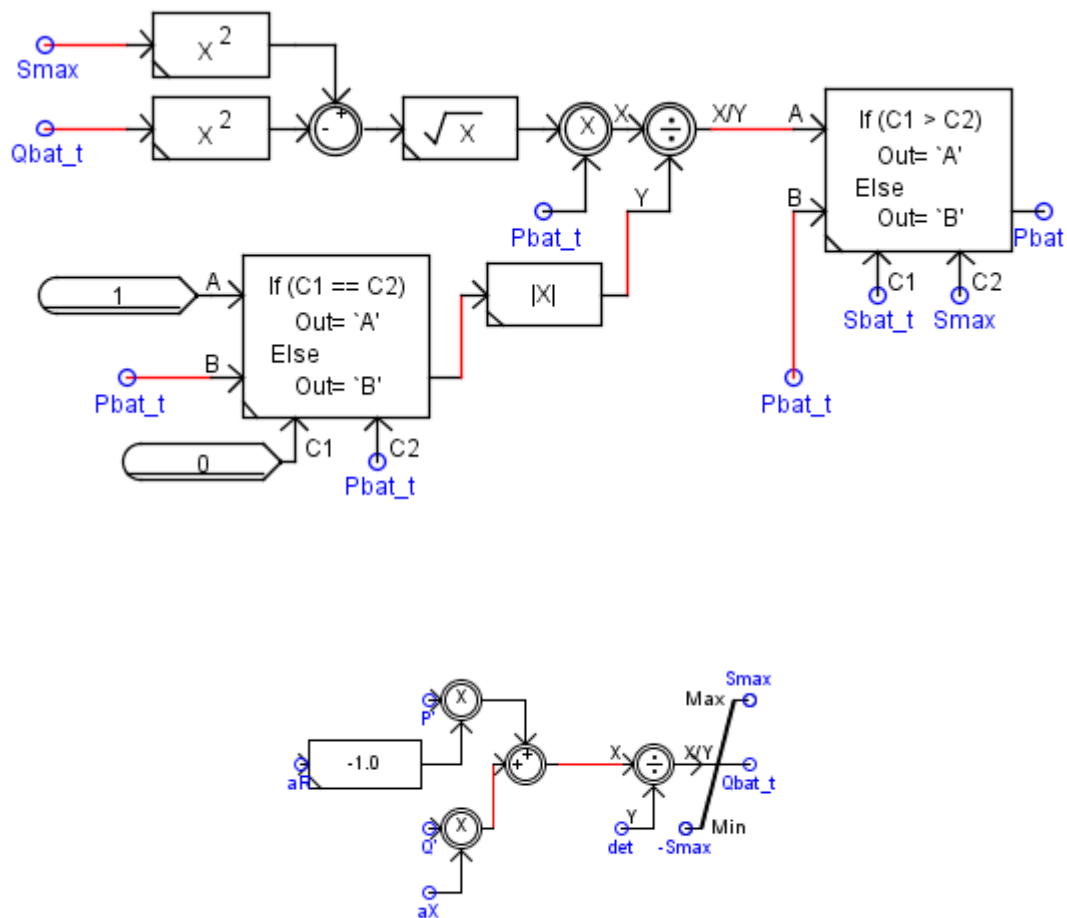
## 2 Μείωση ενεργού ισχύος (P)

Όπως και στην προηγούμενη τεχνική μπορούμε να χωρίσουμε την περιοχή του διανύσματος της φαινόμενης ισχύος σε δύο διαφορετικές περιοχές αυτή τη φορά ανάλογα με την τιμή της αέργου ισχύος. Έτσι, όπως φαίνεται και στο αριστερό τμήμα της εικόνας 6.19, όταν η αέργου ισχύος που προκύπτει από τους υπολογισμούς για τη ρύθμιση της τάσης είναι μικρότερη από την ονομαστική τιμή του αντιστροφέα, μειώνουμε κατάλληλα την ενεργό σύμφωνα με τη σχέση  $P_{new} = \pm \sqrt{S_{max}^2 - Q^2}$  ώστε η νέα φαινόμενη ισχύος ( $S_{new}$ ) να γίνει ίση με την ονομαστική ( $S_{max}$ ). Όταν η απόλυτη τιμή της αέργου προκύπτει μεγαλύτερη της  $S_{max}$  μειώνεται μέχρι την τιμή αυτή και παράλληλα η ενεργός γίνεται μηδενική όπως φαίνεται στο δεξιό τμήμα της εικόνας 6.19.

Στην εικόνα 6.20 παρουσιάζεται το αντίστοιχο κύκλωμα ελέγχου που υλοποιήθηκε στο RSCAD για τη ρύθμιση της τιμής της φαινόμενης ισχύος με μείωση της ενεργού ισχύος. Όπως και στις προηγούμενες τεχνικές εξασφαλίστηκε η ορθότητα του προσήμου.



Εικόνα 6.19: Ρύθμιση της φαινόμενης ισχύος ( $S$ ) με μείωση της ενεργού ισχύος ( $P$ ) όταν  $|Q| \leq S_{max}$  [αριστερά] και  $|Q| > S_{max}$  [δεξιά].



Εικόνα 6.20: Κύκλωμα ελέγχου μείωσης ενεργού ισχύος για τη ρύθμιση της τιμής της φαινόμενης ισχύος.

### 3 Σταθερός συντελεστής ισχύος ( $\cos\phi$ )

Οι τιμές της ενεργού και της αέργου ισχύος μειώνονται αναλογικά σύμφωνα με τις σχέσεις που ακολουθούν ώστε να διατηρηθεί η γωνία σταθερή, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.21.

$$P_{new} = \frac{P}{S} \cdot S_{max} \quad (6.42)$$

$$Q_{new} = \frac{Q}{S} \cdot S_{max} \quad (6.43)$$

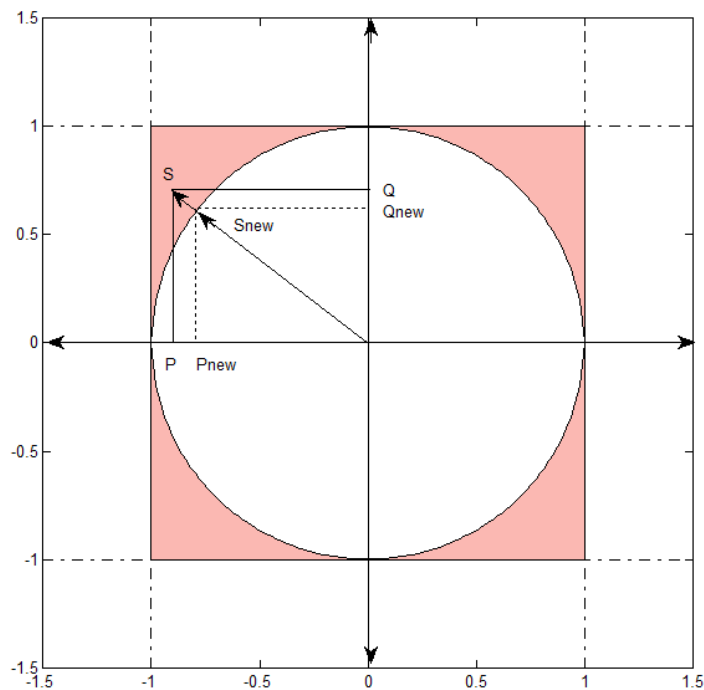
Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η φαινόμενη ισχύς προκύπτει είτε από τις τροποποιημένες μεταβλητές είτε από τις τελικές τιμές της ενεργού και αέργου ισχύος με το ίδιο αποτέλεσμα (εικόνα 6.21), όπως παρατηρούμε από τις παρακάτω πράξεις:

$$R'^2 = \left(\frac{X}{Z} \cdot P - \frac{R}{Z} \cdot Q\right)^2 = \frac{X^2}{Z^2} \cdot P^2 - \frac{2 \cdot X \cdot R}{Z} \cdot P \cdot Q + \frac{R^2}{Z^2} \cdot Q^2$$

$$Q'^2 = \left(\frac{R}{Z} \cdot P + \frac{X}{Z} \cdot Q\right)^2 = \frac{R^2}{Z^2} \cdot P^2 + \frac{2 \cdot X \cdot R}{Z} \cdot P \cdot Q + \frac{X^2}{Z^2} \cdot Q^2$$

$$S' = \sqrt{R'^2 + Q'^2} = \sqrt{\left(\frac{X^2}{Z^2} + \frac{R^2}{Z^2}\right) \cdot P^2 + \left(\frac{R^2}{Z^2} + \frac{X^2}{Z^2}\right) \cdot Q^2} = \sqrt{P^2 + Q^2} = S$$

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μπορούμε να διορθώσουμε την τιμή της φαινόμενης ισχύος αλλάζοντας είτε τις τιμές των τροποποιημένων μεταβλητών είτε των πραγματικών, επιτυγχάνοντας το ίδιο αποτέλεσμα. Επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος, η επεξεργασία της τιμής της ενεργού και της αέργου ισχύος.

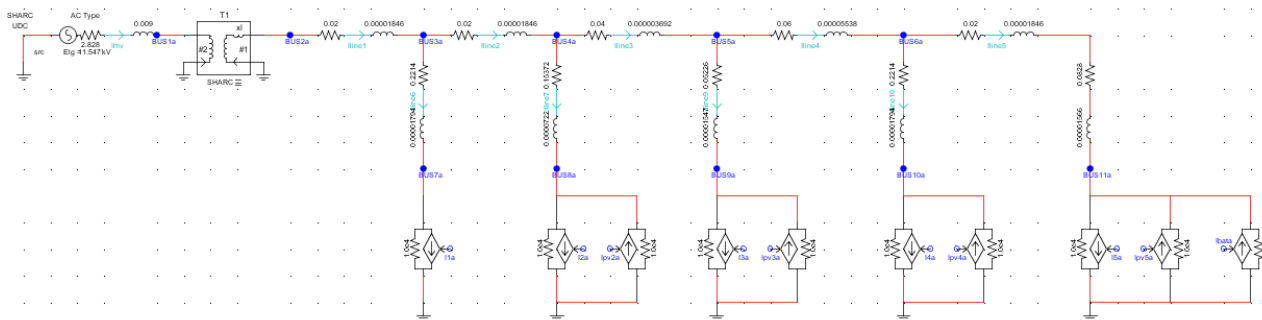


Εικόνα 6.21: Ρύθμιση της φαινόμενης ισχύος (S) με διατήρηση σταθερού συντελεστή ισχύος.

## 7 Τοπικός έλεγχος στο δίκτυο χαμηλής τάσης

### 7.1 Εισαγωγή

Στην εικόνα 7.1 φαίνεται μοντελοποίηση του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε στο RSCAD για την πραγματοποίηση των απαραίτητων προσομοιώσεων σε πραγματικό χρόνο. Περιλαμβάνει μόνο τα στοιχεία ισχύος που περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο και όχι τα κυκλώματα ελέγχου.



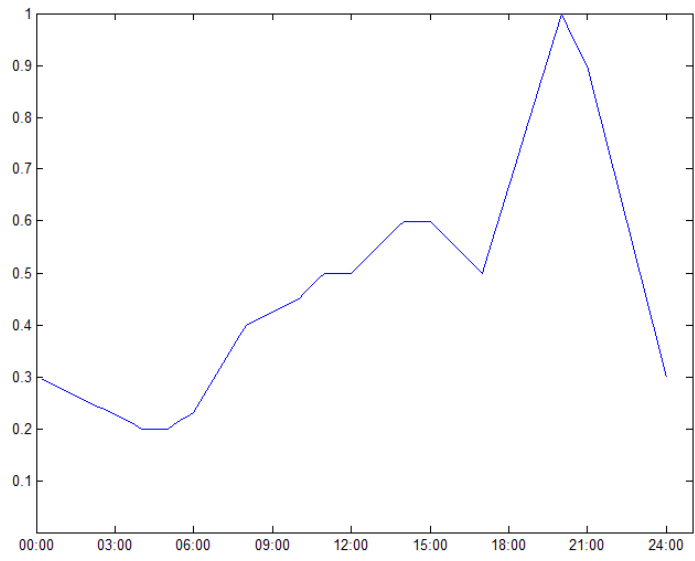
Εικόνα 7.1: Ανά φάση μοντελοποίηση του πρότυπου μικροδικτύου της CIGRE στο περιβάλλον του RSCAD.

Οι βασικές τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρότυπο δίκτυο της CIGRE είναι οι εξής:

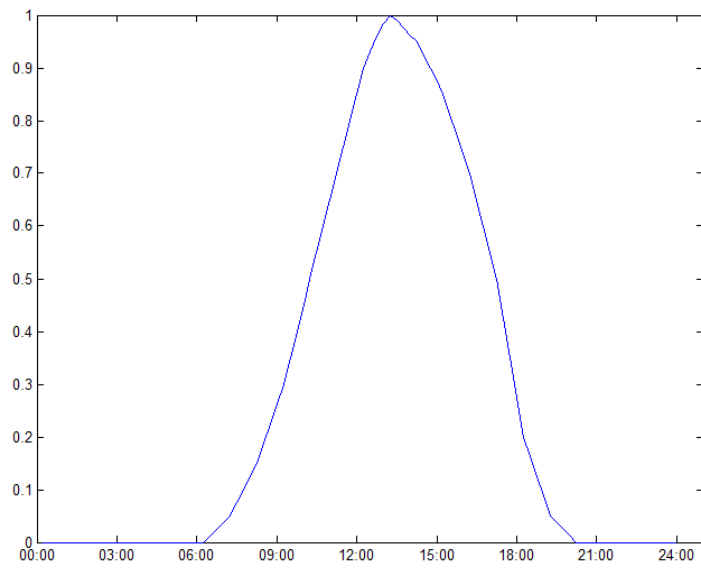
- Υλοποίηση ισοδύναμου μονοφασικού δικτύου
- Παράλειψη της αντίστασης και των γειώσεων του ουδετέρου
- Παράλειψη μοντελοποίησης της αλλαγής λήψεων χωρίς φορτίο του μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ
- Αντικατάσταση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με φωτοβολταϊκές διατάξεις αντίστοιχης ισχύος.
- Αύξηση του μήκους των γραμμών ώστε να γίνουν πιο έντονες οι μεταβολές της τάσης.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο (31.65% και 100%) και για κάθε μία διαφορετική μέθοδο ρύθμισης τάσης μέσω του αντιστροφέα της μονάδας αποθήκευσης. Ο έλεγχος με τις καμπύλες Q-V droop των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών διατάξεων ήταν ενεργοποιημένος σε όλες τις περιπτώσεις.

Η ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη οικιακού φορτίου αντλήθηκε από δεδομένα του εργαστηρίου ΣΗΕ και φαίνεται στην εικόνα 7.2. Η δειγματοληψία είχε γίνει ανά 15 λεπτά οπότε προέκυψαν 96 ανά μονάδα τιμές. Αντιστοίχως προέκυψε η ημερήσια ανά μονάδα καμπύλη ηλιοφάνειας, εικόνα 7.3. Οι τιμές του φορτίου και της ηλιοφάνειας εισάγονται στο RSCAD μέσω του Matlab. Η επικοινωνία μεταξύ των δύο προγραμμάτων γίνεται μέσω του κώδικα που ήταν διαθέσιμος στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ [34].



*Εικόνα 7.2: Ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη οικιακού φορτίου.*



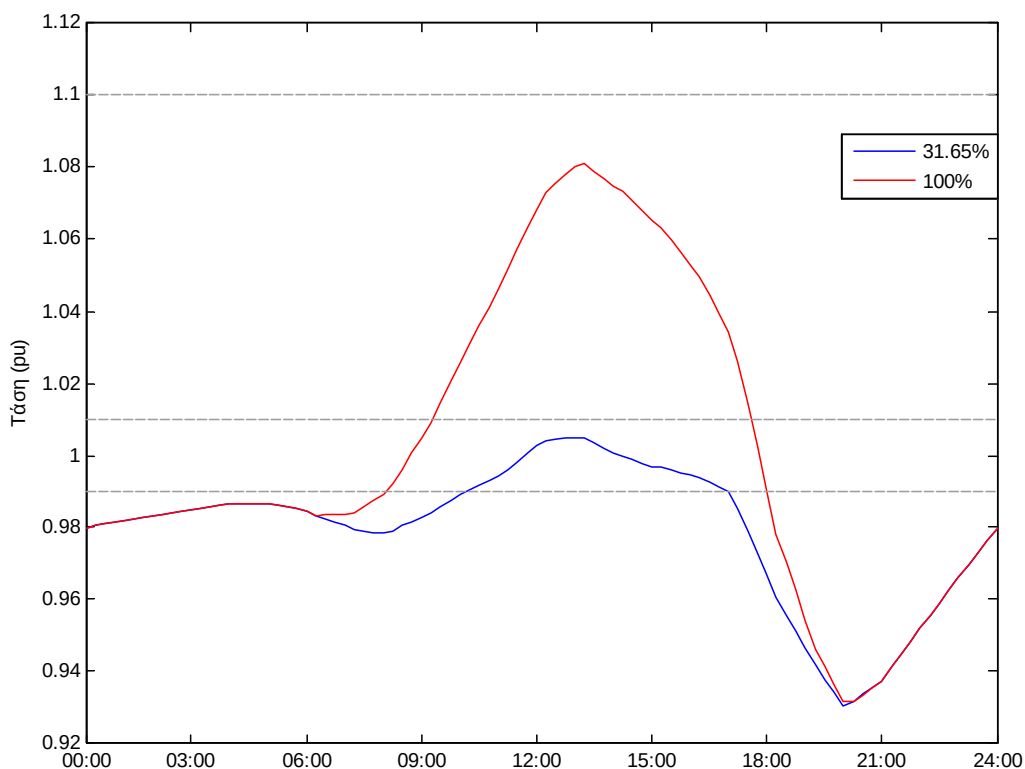
*Εικόνα 7.3: Ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη ηλιοφάνειας*

## 7.2 Ανάλυση των ελέγχων για τη ρύθμιση τάσης

Η ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο χαμηλής τάσης πραγματοποιήθηκε με τους ελέγχους, η περιγραφή των οποίων έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Μελετήθηκε η συμπεριφορά της τάσης του δικτύου για δύο διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής, 31.65% και 100%. Για κάθε ποσοστό διείσδυσης αρχικά πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση χωρίς να εφαρμόσουμε κάποιον έλεγχο για τη ρύθμιση της τάσης, το οποίο ήταν και το βασικό σενάριο για κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η συμπεριφορά του δικτύου με την εφαρμογή τοπικού ελέγχου μέσω καμπυλών Q-V από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Ακολουθώντας διατηρώντας τον προηγούμενο έλεγχο πραγματοποιούμε τοπικό έλεγχο στο ζυγό 11 με τη χρήση του αντιστροφέα της συστοιχίας μπαταριών που είναι εγκατεστημένες στο συγκεκριμένο ζυγό. Ο τοπικός έλεγχος στο ζυγό 11 γίνεται διαδοχικά με τις μεθόδους ελέγχου που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο διατηρώντας παράλληλα και τον έλεγχο από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών.

### 7.2.1 Βασικό σενάριο, χωρίς έλεγχο

Για την ανάλυση της επίδρασης του κάθε ελέγχου θα εστιάσουμε στο ζυγό στον οποίο πραγματοποιείται η ρύθμιση, δηλαδή στο ζυγό 11.



Εικόνα 7.4: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 11 για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο χωρίς καμία ρύθμιση τάσης.



Στην εικόνα 7.4 παρουσιάζεται η τάση του συγκεκριμένου ζυγού όταν η διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι 31,66% και όταν αυξάνεται στο 100% κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου σε ανά μονάδα τιμές.

Τις πρώτες ώρες της ημέρας όταν δεν υπάρχει παραγωγή και το φορτίο είναι σχετικά χαμηλό παρατηρούμε ότι υπάρχει μία μικρή πτώση τάσης. Η πτώση αυτή είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις καθώς εξαρτάται μόνο από την κατανάλωση η οποία δε μεταβλήθηκε από τη μία περίπτωση στην άλλη.

Στη συνέχεια όμως και κατά την αύξηση της ηλιοφάνειας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Παρόλο που η τάση αυξάνεται εξαιτίας της παραγωγής ενεργού ισχύος από της φωτοβολταϊκές διατάξεις στην περίπτωση που η διείσδυση είναι μικρή η αύξηση της τάσης δεν ξεπερνά το 1% της ονομαστικής τιμής της τάσης. Αντιθέτως στην περίπτωση που το ποσοστό διείσδυσης γίνεται 100% η τάση βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα και μάλιστα φτάνει το +8.1% της ονομαστικής στις 14:00, όταν έχουμε και τη μέγιστη παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά.

Μετά το μεσημέρι και προς τις απογευματινές ώρες, όπως μπορούμε να δούμε και από την ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη φορτίου, το φορτίο αυξάνεται, ενώ ταυτόχρονα καθώς μειώνεται η ηλιοφάνεια περιορίζεται η διαθέσιμη ισχύς από τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών. Έτσι παρατηρείται μία πτώση της τάσης και στις δύο καμπύλες. Η πτώση αυτή πραγματοποιείται πιο ομαλά στην περίπτωση της μεγάλης διείσδυσης καθώς η ισχύς που παρέχεται από φωτοβολταϊκά καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του φορτίου μέχρι περίπου στις 20:00. Από το σημείο εκείνο και μετά οι δύο καμπύλες συμπίπτουν καθώς η παραγωγή από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις μηδενίζεται.

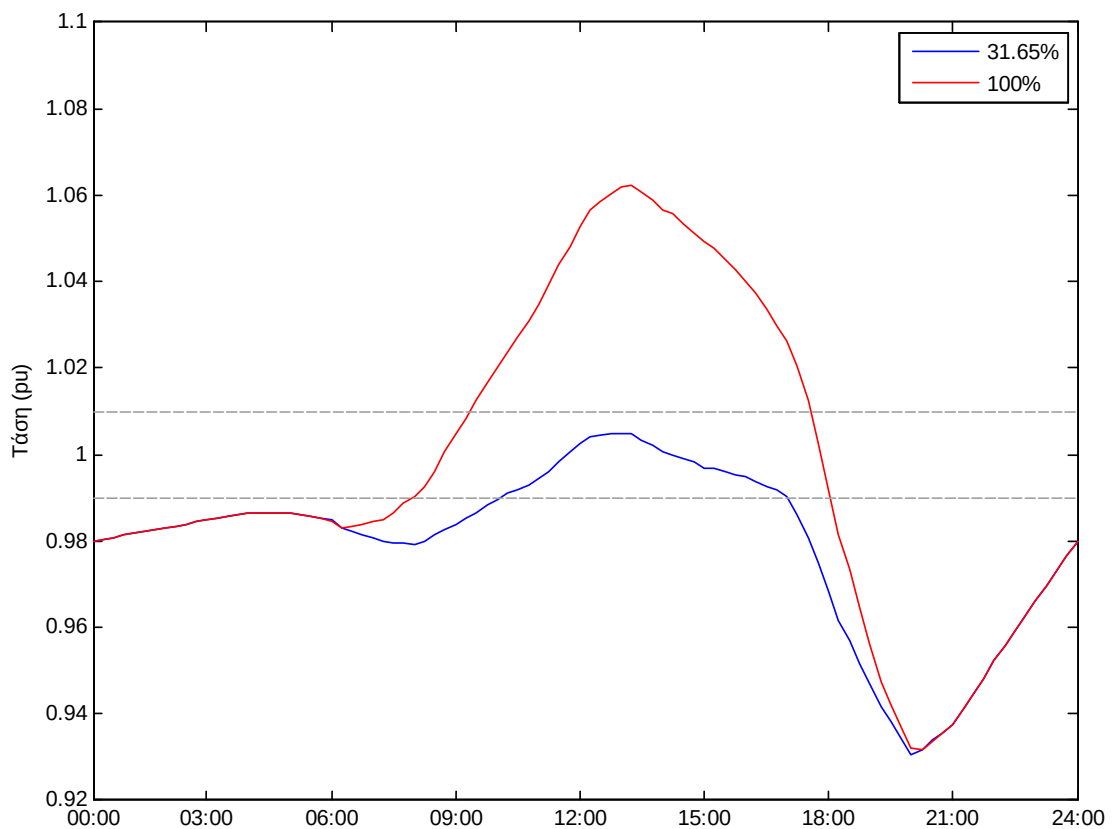
Από τη χρονική στιγμή που μηδενίζεται η παραγωγή των φωτοβολταϊκών και καθώς στο δίκτυο δεν υπάρχουν μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής διαφορετικού τύπου, ανεμογεννήτριες, flywheels ή μπαταρίες, η ζήτηση εξυπηρετείται αποκλειστικά από το δίκτυο. Παράλληλα τις βραδινές ώρες η ζήτηση λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της. Οι συνθήκες αυτές οδηγούν αναπόφευκτα σε πτώση της τάσης η οποία φτάνει μέχρι και το 4% της ονομαστικής λίγο πριν τις 21:00, όταν έχουμε και τη μεγαλύτερη ζήτηση. Όπως στην αρχή της ημέρας έτσι και τώρα η τάση καθορίζεται αποκλειστικά από την καμπύλη του φορτίου και παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ανεξάρτητα από την διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής.

### **7.2.2 Ρύθμιση τάσης με έλεγχο μέσω Q-V droops των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών**

Για την ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο ο πρώτος έλεγχος που εφαρμόζεται είναι ο έλεγχος μέσω των αντιστροφών των φωτοβολταϊκών διατάξεων με τη χρήση καμπυλών Q-V. Κατά τον έλεγχο αυτό, όπως έχει περιγραφεί λεπτομερώς σε προηγούμενο κεφάλαιο, για κάθε στιγμή υπολογίζεται από κάθε αντιστροφή η τιμή της αέργου ισχύος που χρειάζεται να απορροφήσει ή να παράξει ανάλογα με το μέτρο της τάσης στο ζυγό και την παραγωγή ενεργού ισχύος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη τη συγκεκριμένη στιγμή.

Στην εικόνα 7.5 φαίνεται το μέτρο της τάσης κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν επιβάλλεται έλεγχος της τάσης μέσω Q-V droop από τους αντιστροφείς των

φωτοβολταϊκών διατάξεων για τα δύο διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο.



Εικόνα 7.5: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 11 για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής με ρύθμιση τάσης από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών διατάξεων μέσω Q-V καμπυλών.

Όπως είναι αναμενόμενο τόσο στην περίπτωση που έχουμε μικρή διείσδυση όσο και στην περίπτωση μεγάλης διείσδυσης η επίδραση του ελέγχου περιορίζεται στις ώρες της ημέρας. Κατά τις νυχτερινές ώρες οι καμπύλες συμπίπτουν μεταξύ τους όπως συνέβη και κατά την απουσία ελέγχου. Επιπλέον, όπως θα αναλυθεί και σε επόμενο κεφάλαιο, κατά τις συγκεκριμένες ώρες οι καμπύλες του είναι οι ίδιες με τις αντίστοιχες καμπύλες του βασικού σεναρίου, χωρίς ρύθμιση τάσης.

Εστιάζοντας στις πρώτες ώρες της ηλιοφάνειας, 07:00-10:00, παρατηρούμε ότι το μέτρο της τάσης στην περίπτωση που έχουμε μικρή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής αρχικά κυμαίνεται στο -2% της ονομαστικής τιμής της τάσης. Κατά το διάστημα αυτό ο αντιστροφέας στο συγκεκριμένο ζυγό παράγει άεργο ισχύ σύμφωνα με τον έλεγχο που έχουμε ορίσει (Q-V droop). Όταν έχουμε μεγάλη διείσδυση η τάση αυξάνεται πολύ πιο γρήγορα καθώς η παραγωγή είναι τριπλάσια σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ το φορτίο παραμένει το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις.

Κατά τις μεσημεριανές ώρες, όταν μεγιστοποιείται η ηλιοφάνεια, μεγιστοποιείται και το μέτρο της τάσης, φτάνοντας το +6.2% της ονομαστικής στην περίπτωση της μεγάλης

διείσδυσης. Το ποσοστό αυτό είναι χαμηλότερο σε σχέση με το βασικό σενάριο καθώς οι αντιστροφείς απορροφώντας άεργο ισχύ περιορίζουν την αύξηση που προκαλείται από την αυξημένη παραγωγή ενεργού ισχύος. Όταν έχουμε χαμηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής παρατηρούμε ότι λόγω της μικρής εγκατεστημένης ισχύος το μέτρο της τάσης δεν αυξάνεται σημαντικά και βρίσκεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας σε ένα διάστημα  $\pm 1\%$  μέχρι να αρχίσει να αυξάνεται η ζήτηση στις 17:30.

Κατά τις απογευματινές ώρες το μέτρο της τάσης μειώνεται πέρα από το 1% της ονομαστικής τιμής (230V) και στις δύο περιπτώσεις διείσδυσης. Επειδή η ηλιοφάνεια δεν έχει μηδενιστεί μέχρι περίπου στις 20:00 το μέτρο της τάσης μειώνεται με μεγαλύτερη κλίση στην περίπτωση που η διείσδυση είναι 31.65%. Αυτό οφείλεται αφενός μεν στην κάλυψη ενός σημαντικού μέρους της ζήτησης από τη διεσπαρμένη παραγωγή, αφετέρου δε στη μεγαλύτερη δυνατότητα ρύθμισης μέσω του ελέγχου που πραγματοποιούν οι αντιστροφείς όταν η διείσδυση είναι 100%.

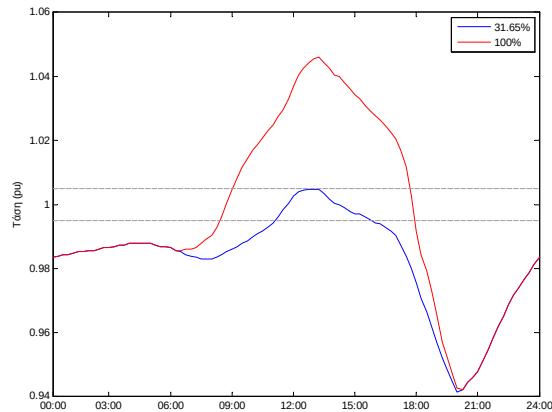
### **7.2.3 Ρύθμιση τάσης με τοπικό έλεγχο μέσω Q-V droop του αντιστροφέα της συστοιχίας μπαταριών**

Στη συνέχεια διατηρώντας σε λειτουργία τον τοπικό έλεγχο που διενεργούν οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών διατάξεων εντάσσεται και η μονάδα αποθήκευσης στον τοπικό έλεγχο του ζυγού 11. Η τοπικός αυτός έλεγχος γίνεται από τον αντιστροφέα μέσω μίας καμπύλης Q-V droop. Αξίζει να επισημανθεί ότι έχει γίνει η υπόθεση ότι η μονάδα αποθήκευσης έχει ως πρωτεύουσα λειτουργία τη ρύθμιση της τάσης και δεν πραγματοποιεί κάποια άλλη λειτουργία (πχ αυτοκατανάλωση). Έτσι, είναι διαθέσιμη οποιαδήποτε στιγμή με τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράξει ή να απορροφήσει.

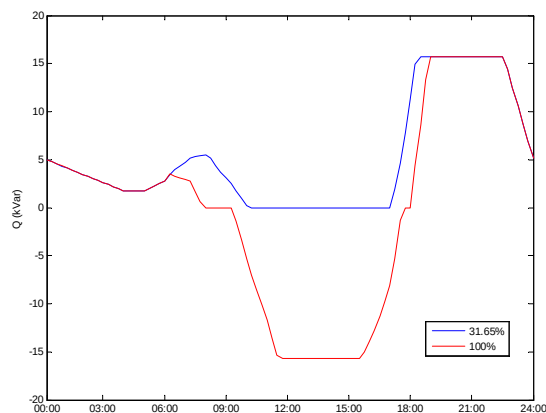
Στην εικόνα 7.6 φαίνεται η τάση στο ζυγό 11 που προκύπτει από τον τοπικό έλεγχο που πραγματοποιεί ο αντιστροφέας της μονάδας αποθήκευσης με τη χρήση καμπύλης Q-V. Παρατηρούμε ότι στο διάστημα 00:00-06:00 ο αντιστροφέας παράγει άεργο ισχύ ώστε να καλύψει την πτώση της τάσης λόγω της έλλειψη παραγωγής από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις. Στο συγκεκριμένο διάστημα η συμπεριφορά του μέτρου της τάσης εξαρτάται μόνο από τη ζήτηση, καθώς δεν υπάρχει παραγωγή από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις, και για το λόγο αυτό είναι η ίδια ανεξάρτητα από το ποσοστό διείσδυσης.

Όσον αφορά της ώρες που αρχίζει η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά, καθώς αυξάνεται η ηλιοφάνεια, στην περίπτωση της μικρή διείσδυσης ο αντιστροφέας των μπαταριών παράγει περισσότερη άεργο ισχύ σε σχέση με την διείσδυση σε μεγάλο βαθμό. Αυτό συμβαίνει μέχρι το σημείο που η συνολική παραγωγή καλύπτει τη ζήτηση με την τάση να πλησιάζει την ονομαστική της τιμή. Στο σημείο αυτό παύει και η λειτουργία ελέγχου της τάσης από τον αντιστροφέα των μπαταριών. Το σημείο αυτό εντοπίζεται στις 08:00 για 100% διείσδυση και στις 10:00 για 31.65%.

Στη συνέχεια και για το δίκτυο με ποσοστό διείσδυσης 31.65% το μέτρο της τάσης βρίσκεται για μεγάλο χρονικό διάστημα στο διάστημα εκατέρωθεν της ονομαστικής τιμής  $\pm 0.05\%$  εντός του οποίου επιλέξαμε να μην εφαρμόζουμε έλεγχο (deadband). Για το λόγο αυτό και όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.7 από τις 10:00 μέχρι τις 17:00 δεν απαιτείται παραγωγή ή απορρόφηση ισχύος από τις μπαταρίες.



Εικόνα 7.6: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 11 με έλεγχο από τον αντιστροφέα των μπαταριών μέσω  $Q-V droop$ .



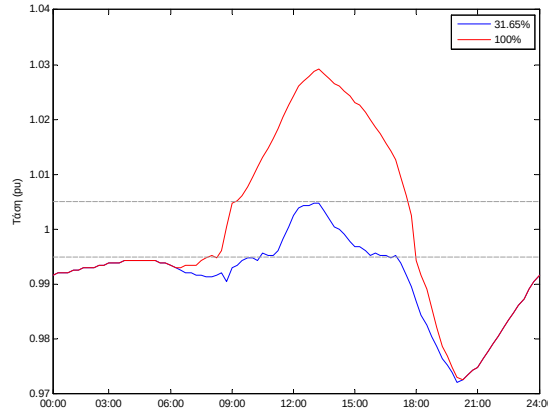
Εικόνα 7.7: Άεργος ισχύς στο ζυγό 11 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών μέσω  $Q-V droop$ .

Αντίθετα, όταν έχουμε μεγάλη διεύδυση διεσπαρμένης παραγωγής καθώς αυξάνεται η ηλιοφάνεια η παραγόμενη ισχύς από τα φωτοβολταϊκά οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της τάσης. Συνεπώς ενεργοποιείται και πάλι ο τοπικός έλεγχος από τον αντιστροφέα των μπαταριών και αυτή τη φορά απορροφά άεργο ισχύ ώστε να επιτευχθεί μείωση της τάσης (09:15-17:45). Επίσης παρατηρούμε ότι η τάση αυξάνεται τόσο σε σχέση με την ονομαστική τιμή ώστε να χρειάζεται μέγιστη απορρόφηση αέργου ισχύος από τις μπαταρίες για το διάστημα 11:30-15:30.

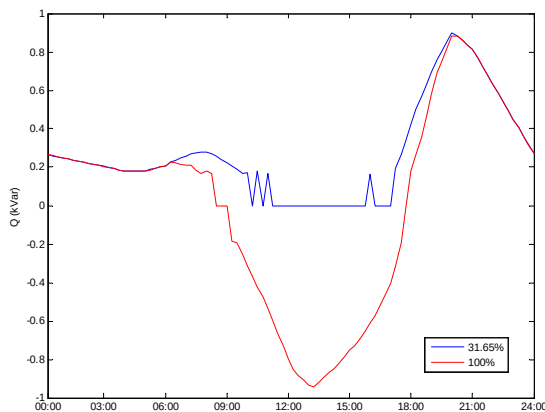
Στη συνέχεια και μέχρι να νυχτώσει, οπότε και η ζήτηση αυξάνεται, έχουμε μία πτώση της τάσης και στις δύο περιπτώσεις με πιο έντονα αποτελέσματα στην περίπτωση της μικρής διεύδυσης. Έτσι παράγεται άεργος ισχύς στο ζυγό 11 ώστε να αντισταθμιστεί αυτή η πτώση μέχρι τη στιγμή που η ηλιοφάνεια μηδενίζεται και η άεργος που απαιτείται από τον αντιστροφέα των μπαταριών μεγιστοποιείται. Διατηρείται στη μέγιστη τιμή για ένα διάστημα μέχρι να αρχίσει η μείωση της ζήτησης, συνεπώς και της τάσης.

## 7.2.4 Ρύθμιση τάσης με τοπικό έλεγχο που είναι βασισμένος στο λόγο R/X

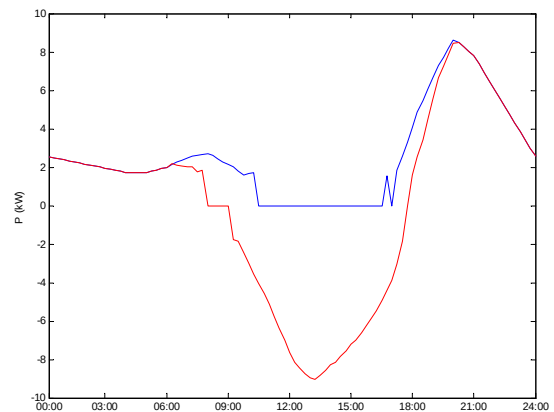
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις εφαρμόζοντας τον έλεγχο ο οποίος λαμβάνει υπόψη το λόγο R/X της γραμμής και με τον τρόπο αυτό υπολογίζει το καλύτερο συνδυασμό ενεργού και αέργου ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης.



Εικόνα 7.8: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 11 με έλεγχο από τον αντιστροφέα των μπαταριών με βέλτιστο συνδυασμό ενεργού και αέργου ισχύος.



Εικόνα 7.9: Αέργος ισχύς στο ζυγό 11 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών με βέλτιστο συνδυασμό P, Q.



Εικόνα 7.10: Ενεργός ισχύς στο ζυγό 11 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών με βέλτιστο συνδυασμό P, Q.

Αξίζει να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι ο συγκεκριμένος έλεγχος, σε αντίθεση με τους προηγούμενους, χρησιμοποιεί εκτός από την άεργο και ενεργό ισχύ. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιεί το λόγο R/X της γραμμής ώστε να επιτύχει καλύτερη ρύθμιση της τάσης.

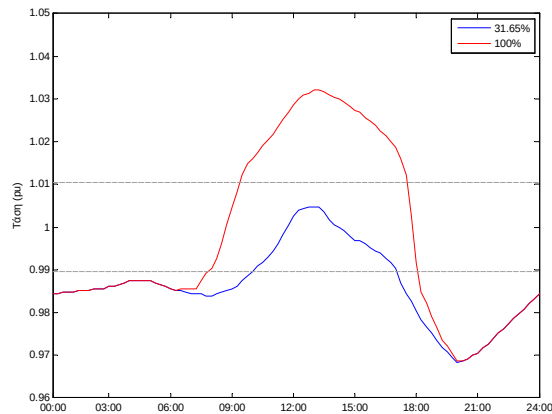
Έτσι, όπως είναι αναμενόμενο, κατά τις βραδυνές ώρες που έχουμε πτώση της τάσης προκύπτει σημαντική παραγωγή ενεργού ισχύος από τη μονάδα αποθήκευσης μέσω του συγκεκριμένου ελέγχου. Η ισχύς που απαιτείται τις συγκεκριμένες ώρες εξαρτάται μόνο από τη φύση του δικτύου και τη ζήτηση. Για το λόγο αυτό στα συγκεκριμένα διαστήματα βλέπουμε τη σύγκλιση των καμπυλών της ενεργού και αέργου ισχύος για χαμηλή διείσδυση με τις αντίστοιχες καμπύλες για υψηλή διείσδυση.

Μία σημαντική διαφορά μεταξύ της συμπεριφοράς του ελέγχου στις δύο περιπτώσεις, είναι ότι στην περίπτωση με χαμηλό ποσοστό διείσδυσης δεν απαιτείται σε καμία χρονική

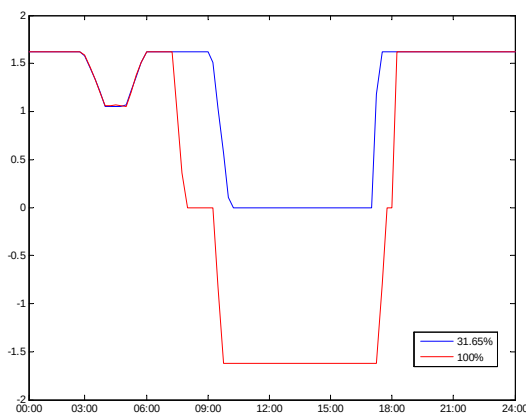
στιγμή της ημέρας απορρόφηση είτε ενεργού είτε αέργου ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την περίοδο μέγιστης παραγωγής από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις η διαφορά της παραγωγής από τη ζήτηση, σε συνδυασμό και με την τοπική ρύθμιση από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών, δεν είναι αρκετή ώστε να προκαλέσει αύξηση της τάσης πέρα από το +0.05% της ονομαστικής γεγονός που θα οδηγούσε στην ανάγκη απορρόφησης ενέργειας από τις μπαταρίες.

### 7.2.5 Ρύθμιση τάσης με τοπικό έλεγχο μέσω Q-V και P-V droop

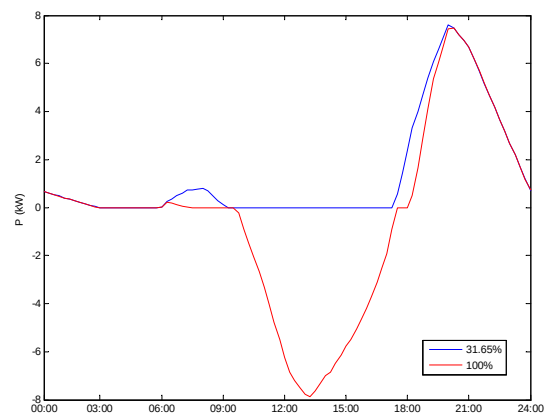
Στη συγκεκριμένη μέθοδο αρχικά η μικρή μεταβολή της τάσης αντιμετωπίζεται μέσω μιας Q-V droop, στη συνέχεια αν η τάση παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβολή εφαρμόζεται μια καμπύλη P-V droop, ενώ η άεργος παραμένει σταθερή στη μέγιστη τιμή της. Το σημείο στο οποίο ξεκινά η χρήση της καμπύλης P-V καθώς και οι τιμές της μέγιστης ενεργού και αέργου ισχύος καθορίζονται από τον λόγο R/X της γραμμής.



Εικόνα 7.11: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 11 με έλεγχο από τον αντιστροφέα των μπαταριών με Q-Vdroop και P-Vdroop.



Εικόνα 7.12: Άεργος ισχύς στο ζυγό 11 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών με Q-Vdroop και P-Vdroop.



Εικόνα 7.13: Ενεργός ισχύς στο ζυγό 11 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών με Q-Vdroop και P-Vdroop.

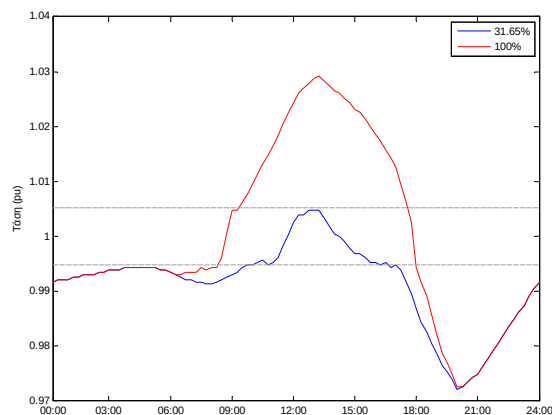
Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται η τάση (εικόνα 7.11), η άεργος (εικόνα 7.12) και η ενεργός ισχύς (εικόνα 7.13). Παρατηρούμε ότι όπως και στους προηγούμενους

ελέγχους στην περίπτωση που έχουμε μικρή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής η τάση κατά τη διάρκεια της ημέρας κυμαίνεται πολύ κοντά στην ονομαστική τιμή, οπότε δεν απαιτείται κάποια ρύθμιση από τον αντιστροφέα των μπαταριών. Πριν και μετά το διάστημα αυτό όταν υπάρχει περιορισμένη ηλιοφάνεια ο τοπικός έλεγχος μέσω του αντιστροφέα των μπαταριών αρχίζει να συμβάλλει στη ρύθμιση της τάσης. Αρχικά με την παραγωγή αέργου ισχύος και στη συνέχεια μετά τη μεγιστοποίηση της αέργου αρχίζει η παραγωγή ενεργού.

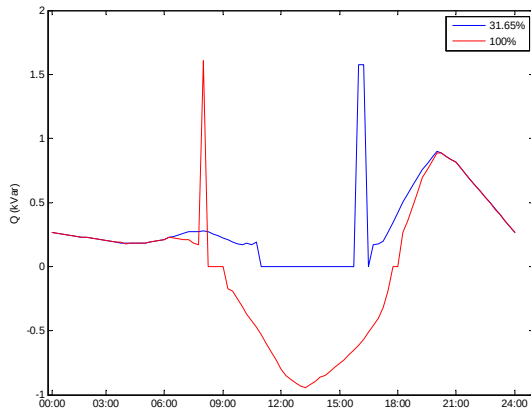
Την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει ο έλεγχος και κατά την αύξηση της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής με εξαίρεση τις ώρες της ημέρας. Κατά τις ώρες αυτές η παραγωγή ενέργειας από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις σε σχέση με τη μειωμένη ζήτηση οδηγούν σε μία σημαντική αύξηση της τάσης. Για τη ρύθμιση της τάσης όπως βλέπουμε στις εικόνες 7.12 και 7.13 οι μπαταρίες μέσω του αντιστροφέα αρχίζουν να απορροφούν άεργο ισχύ η οποία σύντομα μεγιστοποιείται και στη συνέχεια απορροφούν μέρος της περίσσειας ενεργού ισχύος που προκύπτει από την αυξημένη παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά.

### 7.2.6 Ρύθμιση τάσης με τροποποιημένο τοπικό έλεγχο

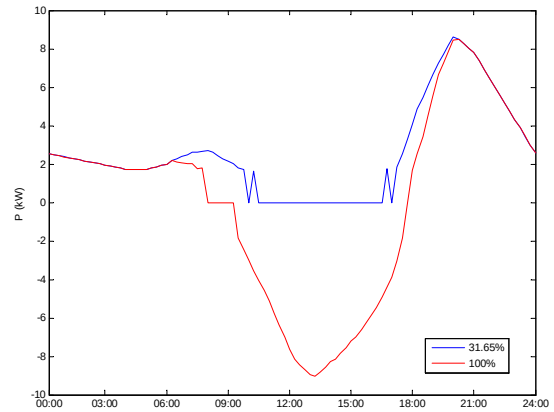
Ο έλεγχος αυτός αποτελεί μία τροποποίηση του ελέγχου που βασίζεται στο λόγο R/X. Για μεταβολές της τάσης εντός ενός διαστήματος, το πλάτος του οποίου εξαρτάται από τον λόγο R/X, ο έλεγχος λειτουργεί ως Q-V droop, ενώ για μεγαλύτερες μεταβολές λειτουργεί με το γενικευμένο έλεγχο που βασίζεται στο λόγο R/X.



Εικόνα 7.14: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού II με τροποποιημένο έλεγχο με βέλτιστο συνδυασμό ενεργού και αέργου ισχύος από τον αντιστροφέα των μπαταριών.



Εικόνα 7.15: Αέργιος ισχύς στο ζυγό 11 λόγω του τροποποιημένου ελέγχου με βέλτιστο συνδυασμό ενεργού και αέργου ισχύος.



Εικόνα 7.16: Ενεργός ισχύς στο ζυγό 11 λόγω του τροποποιημένου ελέγχου με βέλτιστο συνδυασμό ενεργού και αέργου ισχύος.

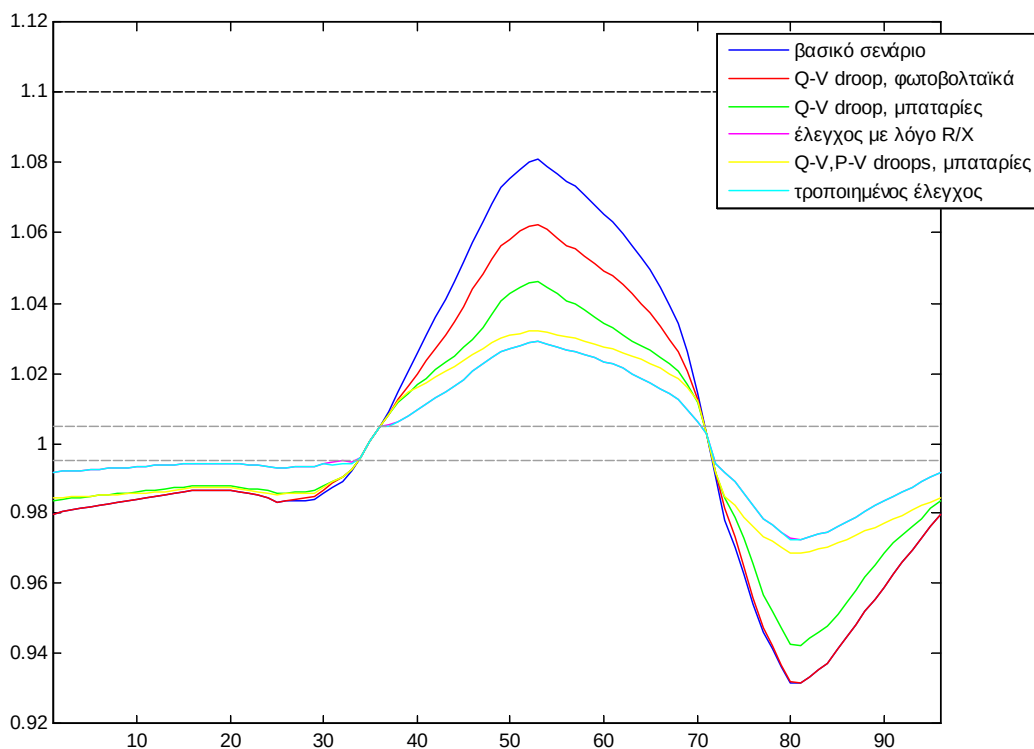
Το συγκεκριμένο δίκτυο παρουσιάζει αρκετά μεγάλο λόγο R/X στις γραμμές του, για το λόγο αυτό η μετάβαση από τη λειτουργία Q-V droop γίνεται πολύ κοντά στα όρια του deadband. Σε αυτά τα μεταβατικά σημεία παρουσιάζονται και απότομες αυξήσεις στην αέργου ισχύ που βλέπουμε στην εικόνα 7.15.

Συγκρίνοντας τον συγκεκριμένο τροποποιημένο έλεγχο για τις δύο διαφορετικές λειτουργίες του δικτύου με 31,65% και 100% διείσδυση μπορούμε να δούμε, όπως και στον γενικευμένο έλεγχο, ότι στην πρώτη περίπτωση δεν υπάρχει απορρόφηση ισχύος αλλά μόνο παραγωγή κατά τις νυχτερινές ώρες και τις ώρες με περιορισμένη ηλιοφάνεια. Αντιθέτως όταν η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής αυξηθεί στο 100%, εκτός από την παραγωγή τις αντίστοιχες ώρες, απαιτείται και απορρόφηση της περίσσειας της ενέργειας που προκύπτει από τη διαφορά παραγωγής – ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας.



### 7.3 Σύγκριση τοπικών ελέγχων για τη ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο χαμηλής τάσης

Για να εντοπίσουμε τις βασικές διαφορές μεταξύ της επίδρασης που έχει ο κάθε έλεγχος στον ζυγό 11, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 7.17) στο οποίο φαίνεται η ημερήσια τάση που προκύπτει με την εφαρμογή του κάθε ελέγχου. Για την καλύτερη ανάδειξη της ρύθμισης που επέρχεται επιλέχθηκε η περίπτωση με 100% διεύθυνση, όπου παρατηρείται η εντονότερη μεταβολή στην τάση.



Εικόνα 7.17: Ανά μονάδα ημερήσια τάση στο ζυγό 11 του δικτύου χαμηλής τάσης με 100% διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής για κάθε διαφορετικό έλεγχο.

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση παρουσιάζεται την ώρα της μέγιστης ηλιοφάνειας στις 13:15. Στο βασικό σενάριο, στο οποίο δεν εφαρμόζουμε κανέναν έλεγχο για τη ρύθμιση της τάσης, η τιμή της φτάνει μέχρι και το +8% της ονομαστικής, δηλαδή μέχρι και 248.4V. Την ώρα που μηδενίζεται η ηλιοφάνεια η τάση λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της η οποία στο συγκεκριμένο δίκτυο προκύπτει κατά 6.8% μικρότερη της ονομαστικής τιμής, 214.3V.

Εφαρμόζοντας τον έλεγχο με τις Q-V droops των φωτοβολταϊκών έχουμε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του προφίλ της τάσης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η τιμή της τάσης στις 13:15 είναι αυξημένη κατά 6.2% (244.3V) σε σχέση με την ονομαστική. Αντιθέτως η πτώση της τάσης που παρατηρείται κατά τις βραδυνές ώρες δεν είναι δυνατόν να βελτιωθεί μόνο με την εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου, καθώς δεν υπάρχει η

δυνατότητα απορρόφησης αέργου ισχύος από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών αφού η παραγωγή τους είναι μηδενική.

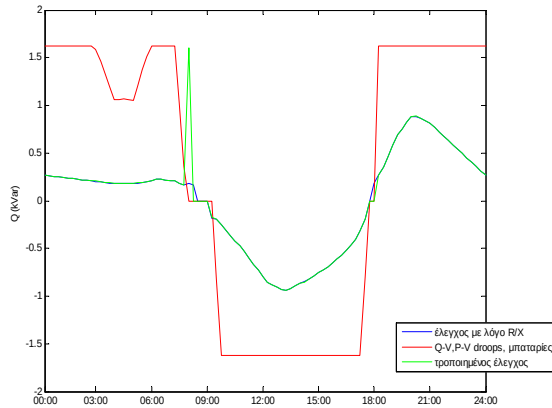
Στην περίπτωση που πέρα από τον έλεγχο μέσω των Q-V droops των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών προσθέσουμε και τον έλεγχο με την καμπύλη Q-V μέσω του αντιστροφέα των μπαταριών επιτυγχάνουμε βελτίωση του προφίλ της τάσης τόσο κατά τις ώρες της ημέρας όσο και κατά τις νυχτερινές ώρες. Έτσι στις 13:15 η τάση είναι αυξημένη κατά 4.6% (240.6V) σε σχέση με την ονομαστική, ενώ στις 20:15 οπότε και παρουσιάζεται το ελάχιστο έχει την τιμή 216.7V δηλαδή -5.8% της ονομαστικής.

Στη συνέχεια και διατηρώντας ενεργό τον έλεγχο μέσω των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών διατάξεων αλλάζουμε τον έλεγχο που πραγματοποιεί ο αντιστροφέας των μπαταριών και εφαρμόζεται ο έλεγχος που βασίζεται στο λόγο R/X. Με τον έλεγχο αυτό λαμβάνουμε και τα καλύτερα αποτελέσματα όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.17. Στο συγκεκριμένο δίκτυο ο συγκεκριμένος έλεγχος δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές με τον τροποποιημένο έλεγχο. Η μικρή τους διαφορά φαίνεται κοντά στα όρια του deadband. Έτσι η μέγιστη τάση κατά τις μεσημεριανές ώρες καθορίζεται καθώς οι μπαταρίες, μέσω του ελέγχου που πραγματοποιεί ο αντιστροφέας, απορροφούν την περίσσεια της ισχύος που προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Η τιμή της τάσης στις 13:15 προκύπτει 236.7V βρίσκεται δηλαδή στο +2.9% της ονομαστικής και είναι η καλύτερη που μπορεί να επιτευχθεί για το συγκεκριμένο δίκτυο με τους ελέγχους που εξετάσαμε.

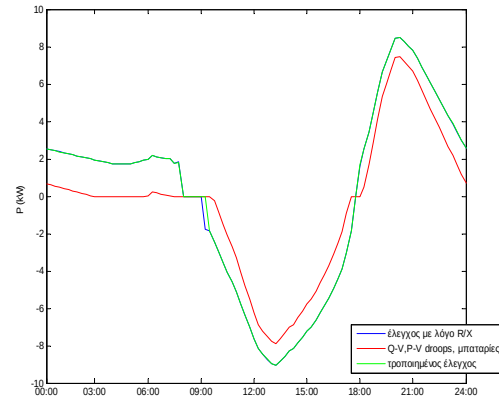
Όσον αφορά την πτώση της τάσης κατά τις βραδυνές ώρες ο συγκεκριμένος έλεγχος παρέχει και σε αυτή την περίπτωση τα καλύτερα αποτελέσματα, σε σχέση με τη ρύθμιση της τάσης, για το συγκεκριμένο δίκτυο που είναι 223.7V δηλαδή -2.7% από την ονομαστική.

Τέλος με τη χρήση των δύο καμπυλών Q-V και P-V παρατηρείται μία συμπεριφορά μεταξύ του προηγούμενου ελέγχου και της χρήσης απλής Q-V droop καθώς οι μπαταρίες απορροφούν και παράγουν ως επί τω πλείστον ενεργό καθώς και ένα μικρό ποσοστό αέργου ισχύος. Ακριβώς επειδή λειτουργεί κυρίως με την P-V droop, λόγω του λόγου R/X της γραμμής, τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου ελέγχου είναι πιο κοντά στα αποτελέσματα του ελέγχου που λαμβάνει υπόψη το λόγο R/X.

Παρακάτω αξίζει να γίνει μία αναφορά στην άεργο και ενεργό και ισχύ που παράγεται ή απορροφάται ως αποτέλεσμα του κάθε ελέγχου, εικόνες 7.18 και 7.19. Στη σύγκριση συμπεριλήφθηκαν μόνο οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν ενεργό και άεργο για τη ρύθμιση της τάσης. Η άεργος του ελέγχου με Q-V droop παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Παρατηρούμε ότι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι τιμές της ενεργού και της αέργου ισχύος που προκύπτουν από τον έλεγχο που βασίζεται στο λόγο R/X και από τον τροποποιημένο έλεγχο συμπίπτουν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, με εξαίρεση πολύ κοντά στα όρια του deadband όπου υπάρχει μία αστάθεια λόγω του μικρού εύρους της ζώνης στην οποία ο έλεγχος λειτουργεί με Q-V droop.



Εικόνα 7.18: Άεργος ισχύς των μπαταριών στο ζυγό II του δικτύου χαμηλής τάσης με 100% διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής για κάθε διαφορετικό έλεγχο.



Εικόνα 7.19: Ενεργός ισχύς των μπαταριών στο ζυγό II του δικτύου χαμηλής τάσης με 100% διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής για κάθε διαφορετικό έλεγχο.

Η διαφορά του έλεγχου που πραγματοποιείται με δύο droops (Q-V και P-V) σε σχέση με τον τροποποιημένο έλεγχο έγκειται στο ότι η άεργος που υπολογίζεται από τον συγκεκριμένο έλεγχο αφού φτάσει μία μέγιστη τιμή, που εξαρτάται από τον λόγο R/X της γραμμής, παραμένει σταθερή και από εκεί και πέρα αναλαμβάνει η droop της ενεργού ισχύος. Αντιθέτως, στην τροποποιημένη μέθοδο αφού ξεπεραστεί το διάστημα στο οποίο λειτουργεί ως Q-V droop, η άεργος υπολογίζεται εκ νέου ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ρύθμιση της τάσης σε συνδυασμό με τον υπολογισμό της ενεργού.

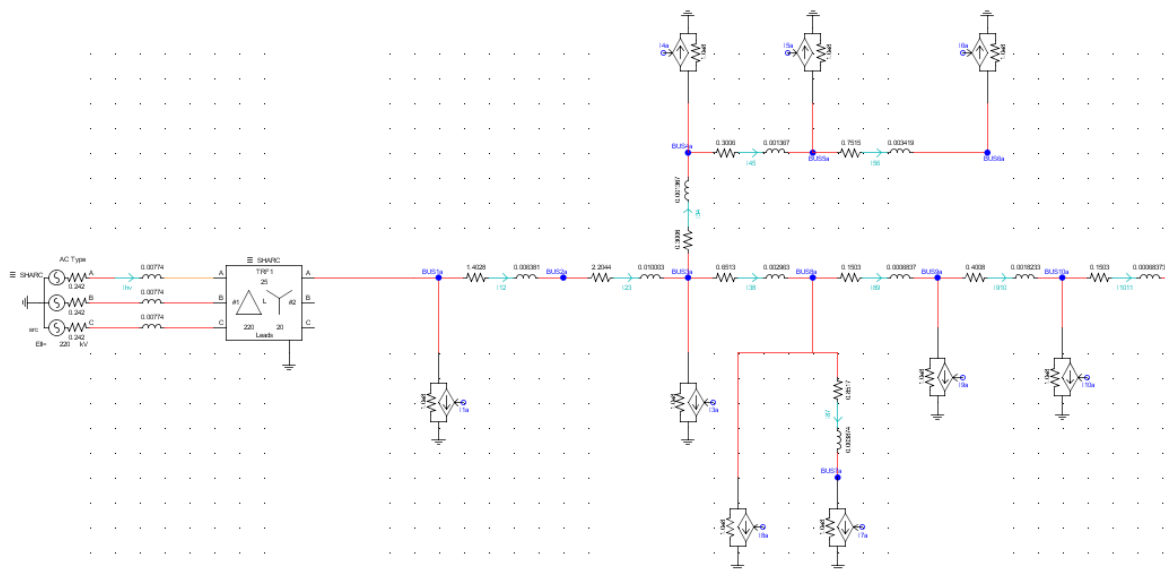
Το πλεονέκτημα του τροποποιημένου ελέγχου γίνεται πιο εμφανές σε δίκτυα χαμηλής τάσης με μικρότερο λόγο R/X σε σχέση με το πρότυπο δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε, σε δίκτυα μέσης τάσης, αλλά και σε πιο ασθενή δίκτυα στα οποία υπάρχει μικρή διακύμανση και της συχνότητας.

## 8 Τοπικός έλεγχος στο δίκτυο μέσης τάσης

### 8.1 Εισαγωγή

Για να μελετήσουμε περαιτέρω τους ελέγχους για τη ρύθμιση τάσης κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις και σε ένα πρότυπο δίκτυο μέσης τάσης. Οι γραμμές των δικτύων μέσης τάσης χαρακτηρίζονται από ένα λόγο  $R/X$  ο οποίος κυμαίνεται γύρω στη μονάδα, σε αντίθεση με τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης που είναι κυρίως ωμικά. Έτσι προκύπτει μεγαλύτερο το διάστημα κατά το οποίο ο τροποποιημένος έλεγχος λειτουργεί με Q-V droop και μπορεί να γίνει αντιληπτή η διαφορά της από τον γενικευμένο έλεγχο που βασίζεται στο λόγο  $R/X$ .

Η περιγραφή του δικτύου της μέσης τάσης έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο και η μοντελοποίηση του στο περιβάλλον DRAFT του RSCAD φαίνεται στην εικόνα 8.1. Σημειώνεται ότι στην ανάλυση που ακολουθεί όλα τα μεγέθη είναι φασικά όπως και στην περίπτωση της χαμηλής τάσης.



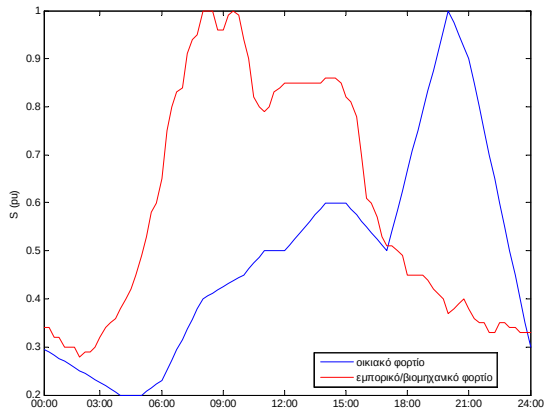
Εικόνα 8.1: Ανά φάση μοντελοποίηση του πρότυπου δικτύου μέσης τάσης της CIGRE στο περιβάλλον του RSCAD.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το συγκεκριμένο δίκτυο περιλαμβάνει οικιακά ή/και βιομηχανικά/εμπορικά φορτία σε όλους τους ζυγούς. Οι τιμές και τα είδη των φορτίων όπως και οι εγκατεστημένη ισχύς και το είδος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής παρουσιάστηκαν επακριβώς σε προηγούμενο κεφάλαιο.

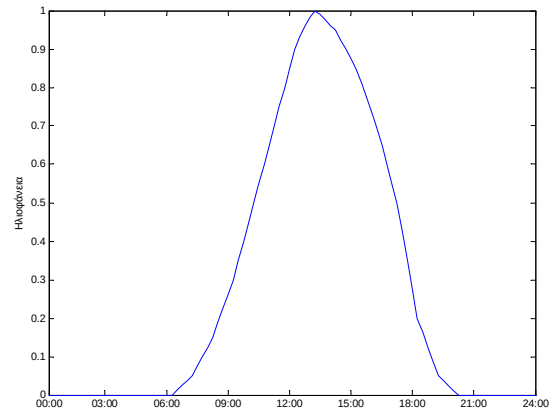
Το ποσοστό διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής στο συγκεκριμένο δίκτυο υπολογίστηκε κοντά στο 50%. Για τη διερεύνηση των τοπικών ελέγχων στο δίκτυο σε σχέση με το ποσοστό διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής αυξήθηκε αναλογικά η εγκατεστημένη ισχύς των υφιστάμενων μονάδων ώστε να αυξηθεί το ποσοστό διείσδυσης σε 80%. Το σύνολο των ελέγχων εφαρμόστηκε και στις δύο περιπτώσεις.

Για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία [29] οι ανά μονάδα ημερήσιες καμπύλες για τα διαφορετικά είδη φορτίων, η ημερήσια καμπύλη της ηλιοφάνειας καθώς και οι ανά μονάδα ημερήσιες καμπύλες της παραγωγής

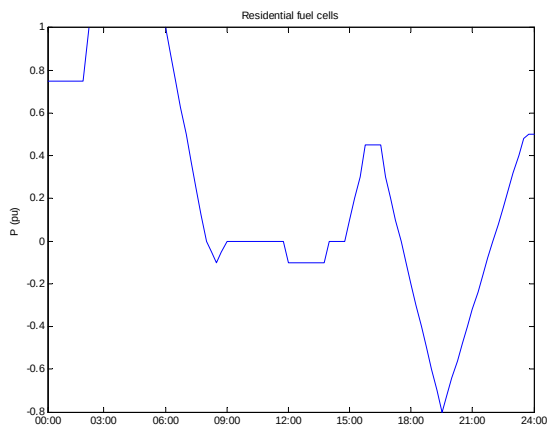
των υπόλοιπων μονάδων παραγωγής (κυψέλες καυσίμου, μονάδες συμπαραγωγής). Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.



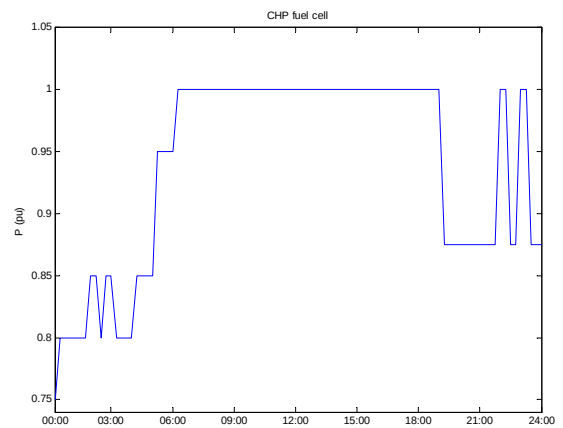
Εικόνα 8.2: Ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη φορτίων.



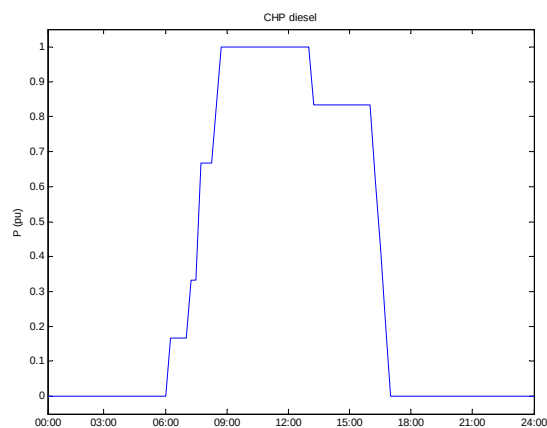
Εικόνα 8.3: Ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη ηλιοφάνειας.



Εικόνα 8.4: Ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη ισχύος fuel cells.



Εικόνα 8.5: Ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη ισχύος CHP fuel cells.



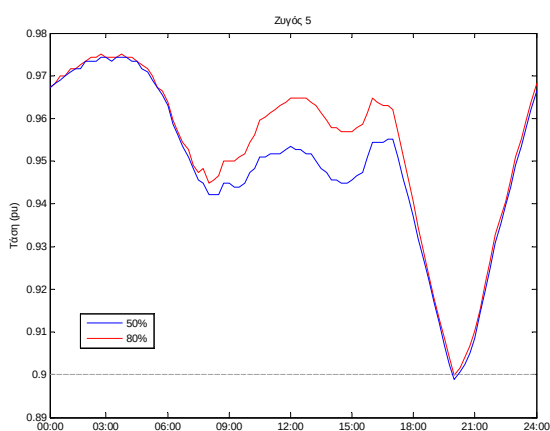
Εικόνα 8.6: Ανά μονάδα ημερήσια καμπύλη ισχύος CHP diesel.

## 8.2 Ανάλυση των ελέγχων για τη ρύθμιση τάσης

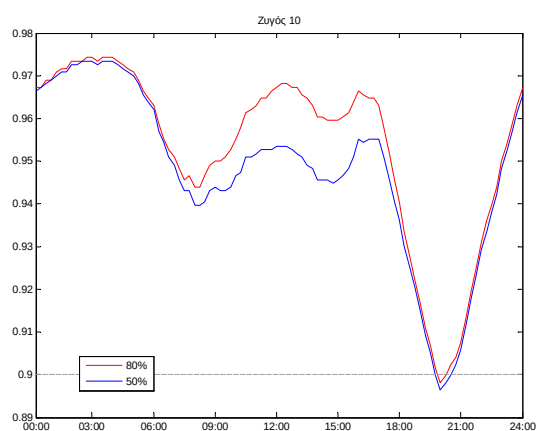
Η ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο μέσης τάσης έγινε με τους ελέγχους, η περιγραφή των οποίων έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Μελετήθηκε η συμπεριφορά της τάσης του δικτύου για δύο διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής 50% και 80%. Για κάθε ποσοστό διείσδυσης αρχικά πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση χωρίς να εφαρμόσουμε κάποιον έλεγχο για τη ρύθμιση της τάσης, το οποίο ήταν και το βασικό σενάριο για κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η συμπεριφορά του δικτύου με την εφαρμογή τοπικού ελέγχου μέσω Q-V droops από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Ακολούθως διατηρώντας τον προηγούμενο έλεγχο πραγματοποιούμε τοπικό έλεγχο στους ζυγούς 5 και 10 με τη χρήση των αντιστροφέων των συστοιχιών των μπαταριών που είναι εγκατεστημένες στους συγκεκριμένους ζυγούς. Ο τοπικός έλεγχος στους ζυγούς γίνεται διαδοχικά με Q-V droop, με γενικευμένο έλεγχο που βασίζεται στο λόγο R/X και με τον τροποποιημένο έλεγχο που προτείνεται στη συγκεκριμένη διπλωματική διατηρώντας παράλληλα και τον έλεγχο από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών.

### 8.2.1 Βασικό σενάριο, χωρίς έλεγχο

Παρακάτω φαίνεται η διαφορά στην τάση των ζυγών 5 και 10 όταν το ποσοστό διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής αυξάνεται από 50% σε 80%.



Εικόνα 8.7: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 5 για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο χωρίς καμία ρύθμιση τάσης.

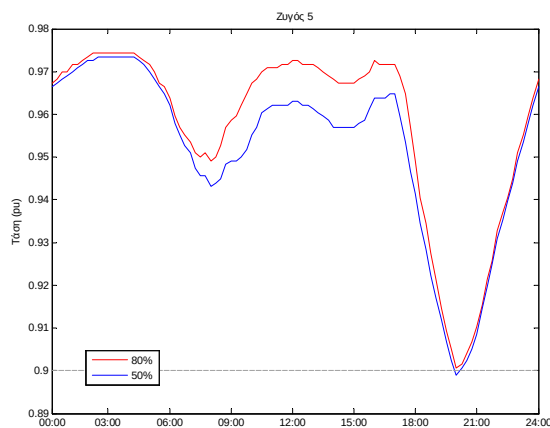


Εικόνα 8.8: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 10 για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο χωρίς καμία ρύθμιση τάσης.

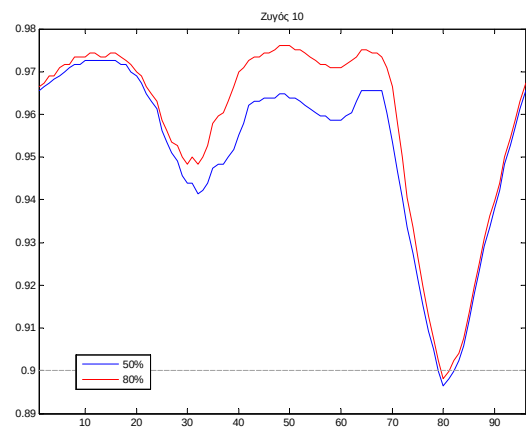
Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των διαφορετικών ποσοστών διείσδυσης οφείλεται αποκλειστικά στη διαφορά στην εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής καθώς η ζήτηση δεν αλλάζει από τη μία περίπτωση στην άλλη. Παρατηρούμε ότι επειδή το μεγαλύτερο μέρος της διεσπαρμένης παραγωγής αποτελείται από φωτοβολταϊκές διατάξεις (55.5%) η διαφορά στην τάση μεταξύ των δύο περιπτώσεων εντοπίζεται κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν η παραγωγή των φωτοβολταϊκών αυξάνεται λόγω της ηλιοφάνειας.

Οφείλουμε βέβαια να εντοπίσουμε και μία μικρή διαφορά σε όλο το μήκος της καμπύλης καθώς εκτός από τα φωτοβολταϊκά στο δίκτυο υπάρχουν μονάδες συμπαραγωγής και κυψέλες καυσίμου. Αυτή η διαφορά είναι λίγο πιο έντονη στο ελάχιστο σημείο της καμπύλης, όταν δεν υπάρχει παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά αλλά οι υπόλοιπες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής οι οποίες λειτουργούν κατά τις βραδινές ώρες, καλύπτουν ένα μικρό μέρος της ζήτησης.

### 8.2.2 Ρύθμιση τάσης με έλεγχο μέσω Q-V droops των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών



Εικόνα 8.9: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 5 με έλεγχο από τον αντιστροφέα των μπαταριών μέσω Q-V droop.

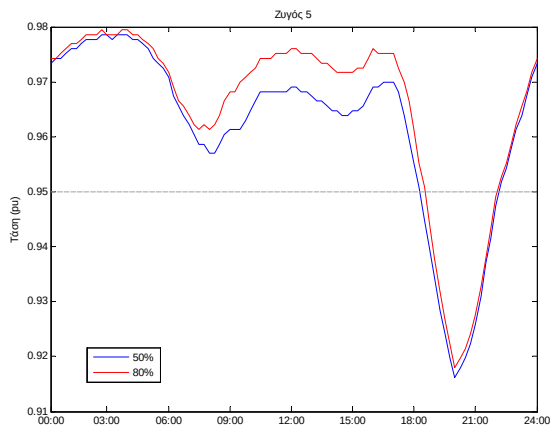


Εικόνα 8.10: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 10 με έλεγχο από τον αντιστροφέα των μπαταριών μέσω Q-V droop.

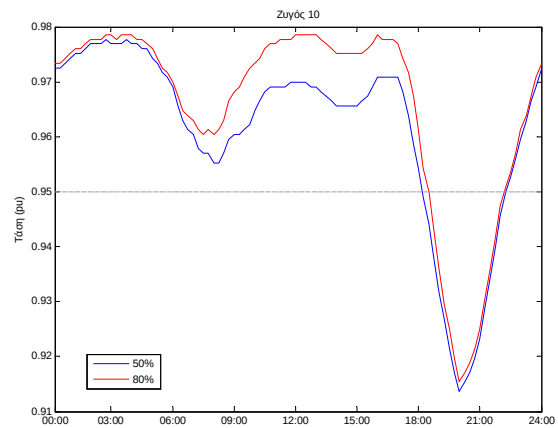
Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών όπως είναι αναμενόμενο συμβάλουν στη ρύθμιση της τάσης μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν υπάρχει και παραγωγή. Στο συγκεκριμένο δίκτυο μέσης τάσης παρατηρούμε ότι η τάση βρίσκεται συνεχώς κάτω από την ονομαστική τιμή του δικτύου. Βέβαια καθώς αυξάνεται η παραγωγή μειώνεται και το περιθώριο ρύθμισης που διαθέτει ο κάθε αντιστροφέας. Οι διαφορές που εντοπίστηκαν στις καμπύλες της τάσης κάθε ζυγού για τη διαφορετική διεύθυνση συνεχίζουν να υφίστανται. Επιπλέον γίνονται πιο έντονες σε σχέση με το βασικό σενάριο καθώς στην περίπτωση του υψηλού ποσοστού διεύθυνσης ο έλεγχος έχει τη δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ισχύος.

### 8.2.3 Ρύθμιση τάσης με τοπικό έλεγχο μέσω Q-V droop του αντιστροφέα της συστοιχίας μπαταριών

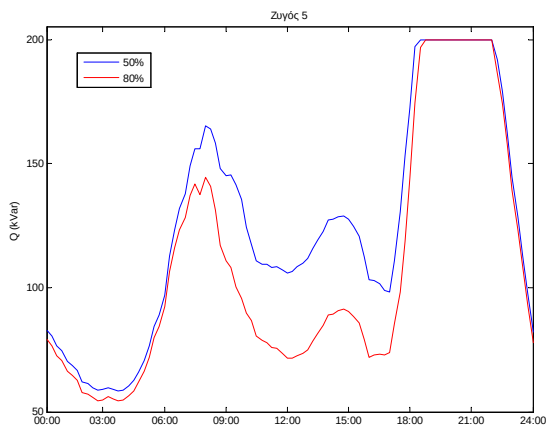
Από τη μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου μετά την εφαρμογή ελέγχου με Q-V droop από τον αντιστροφέα των μπαταριών προέκυψαν οι παρακάτω καμπύλες για την τάση στους δύο ζυγούς στους οποίους είναι εγκατεστημένες οι συστοιχίες των μπαταριών. Επίσης απεικονίζεται σε αντιπαραβολή και η άεργος ισχύς που παράγεται κατά το συγκεκριμένο έλεγχο.



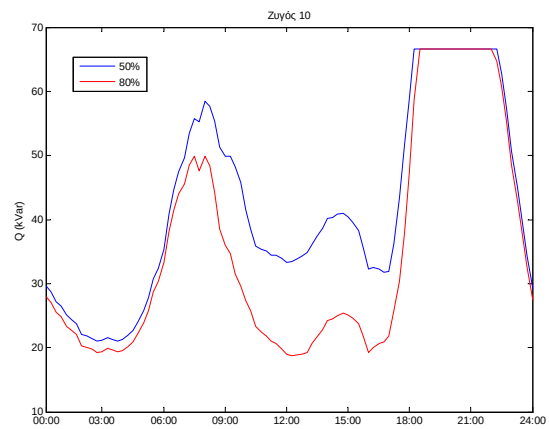
Εικόνα 8.11: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 5 με έλεγχο από τον αντιστροφέα των μπαταριών μέσω Q-V droop.



Εικόνα 8.12: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 10 με έλεγχο από τον αντιστροφέα των μπαταριών μέσω Q-V droop.



Εικόνα 8.13: Άεργος ισχύς στο ζυγό 5 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών μέσω Q-V droop.



Εικόνα 8.14: Άεργος ισχύς στο ζυγό 10 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών μέσω Q-V droop.

Παρατηρώντας της καμπύλες βλέπουμε ότι στην περίπτωση που το ποσοστό διεύθυνσης της διεσπαρμένης παραγωγής είναι υψηλό στην αύξηση της τάσης συμβάλλουν και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Έτσι απαιτείται μικρότερη άεργος από τη συστοιχία των μπαταριών.

Αξίζει να τονίσουμε ότι όπως και προηγουμένως η μεγαλύτερη διαφορά στην τάση μεταξύ των διαφορετικών ποσοστών διεύθυνσης εντοπίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρα καθώς τα φωτοβολταϊκά αποτελούν το είδος της διεσπαρμένης παραγωγής που επικρατεί στο δίκτυο. Καθώς μειώνεται η ηλιοφάνεια οι καμπύλες της τάσης συγκλίνουν και σχεδόν

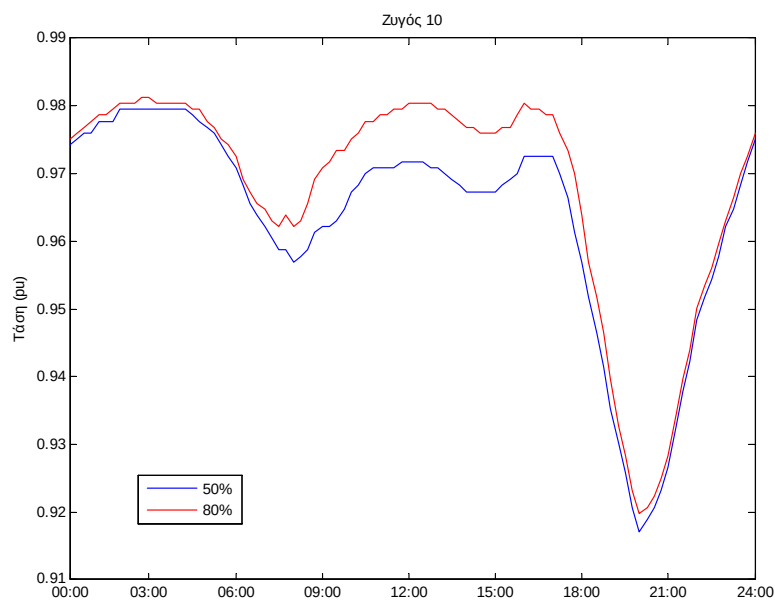


συμπίπτουν κατά τις βραδυνές ώρες. Από ένα σημείο και μετά παρά τη συμβολή των μπαταριών η τάση πέφτει κάτω από το -5% της ονομαστικής και ο έλεγχος μέσω των αντιστροφών των μπαταριών παρέχει τη μέγιστη άεργο σε κάθε ζυγό, 200kVar στο ζυγό 5 και 66.67kVar στον ζυγό 10.

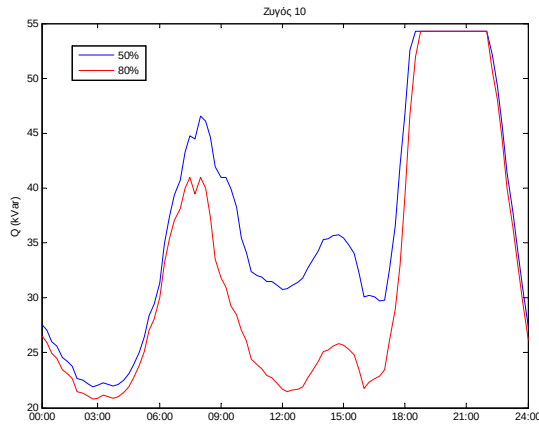
Η τάση στους ζυγούς δεν συμπίπτουν ακριβώς εξαιτίας των υπόλοιπων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, εκτός των φωτοβολταϊκών, που παράγουν ενεργό ισχύ και τις βραδυνές ώρες.

#### 8.2.4 Ρύθμιση τάσης με τοπικό έλεγχο που βασίζεται στο λόγο R/X

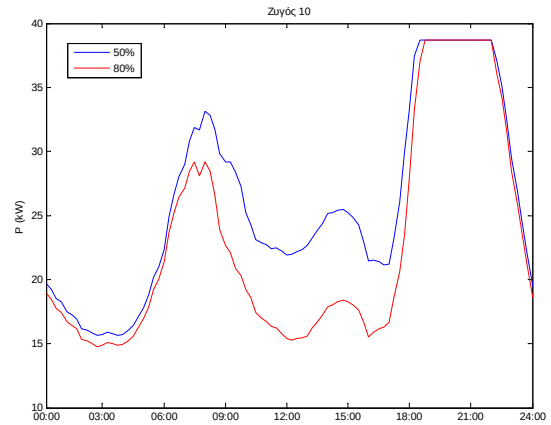
Για την ανάλυση των δύο επόμενων ελέγχων κρίθηκε χρήσιμο να εστιάσουμε στον έναν από τους δύο ζυγούς, συγκεκριμένα στο ζυγό 10 καθώς τα αποτελέσματα για τους δύο ζυγούς, όπως φάνηκε και στους προηγούμενους ελέγχους, ακολουθούν αντίστοιχη συμπεριφορά. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η τάση, η άεργος και ενεργός ισχύς που προκύπτουν από τον έλεγχο που βασίζεται στο λόγο R/X για 50% και 80% διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής.



Εικόνα 8.15: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 10 με έλεγχο από τον αντιστροφή των μπαταριών με βέλτιστο λόγο P/Q.



Εικόνα 8.16: Άεργος ισχύς στο ζυγό 10 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών με με βέλτιστο λόγο  $P/Q$ .



Εικόνα 8.17: Ενεργός ισχύς στο ζυγό 10 λόγω του ελέγχου από τον αντιστροφέα των μπαταριών με βέλτιστο λόγο  $P/Q$ .

Βλέπουμε ότι το προφίλ της τάσης μεταξύ των δύο διαφορετικών περιπτώσεων διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής τείνει να συγκλίνει τις νυχτερινές ώρες κατά τις οποίες η επίδραση της μεγάλης διείσδυσης φωτοβολταϊκών εξαλείφεται. Όμως, εξαιτίας της ύπαρξης κι άλλων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής οι οποίες παρέχουν ισχύ και τις συγκεκριμένες ώρες, η τάση στο ζυγό 10 όταν η διείσδυση είναι 80% είναι συνεχώς υψηλότερη από την περίπτωση χαμηλότερης διείσδυσης. Η διαφορά αυτή εντείνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και φτάνει μέχρι και το 1% της ονομαστικής.

Καθώς η τάση του δικτύου είναι συνεχώς μικρότερη της ονομαστικής ο έλεγχος έχει ως αποτέλεσμα παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η παραγωγή αυτή μεγιστοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας ακολουθώντας την μεγιστοποίηση της ζήτησης. Επίσης συγκρίνοντας την παραγόμενη ισχύ από τις μπαταρίες για τα δύο διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης παρατηρούμε ότι η ισχύς που απαιτείται από τις μπαταρίες για τη ρύθμιση της τάσης είναι μεγαλύτερη όταν το ποσοστό διείσδυσης είναι χαμηλό. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής από όλες τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που συνεπάγεται ανύψωση της τάσης. Για το λόγο αυτό περιορίζεται η ανάγκη για ρύθμιση από τον έλεγχο που επιτελεί ο αντιστροφέας των μπαταριών.

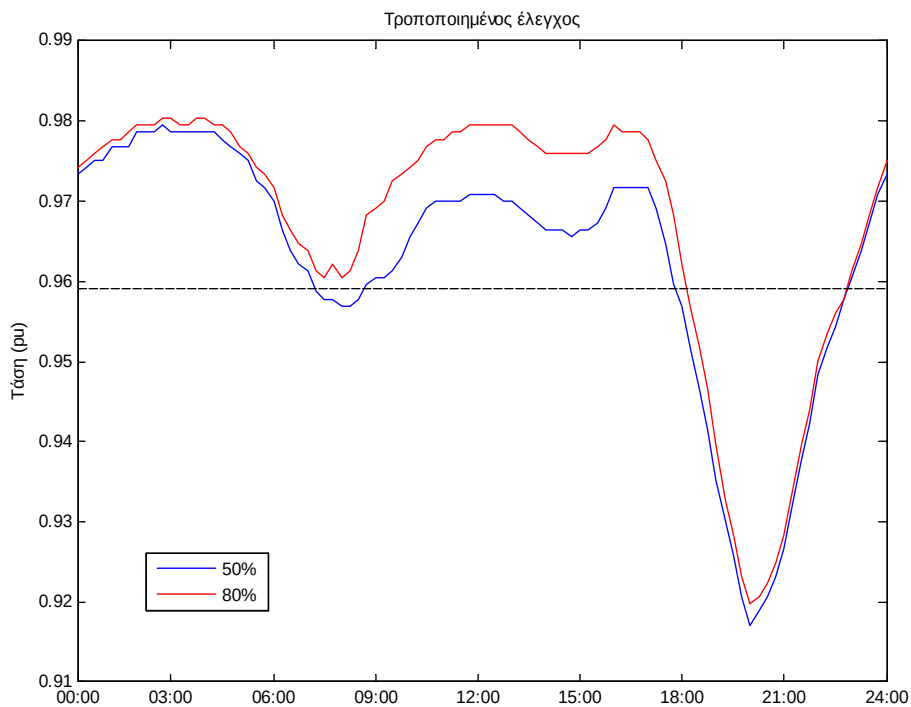
Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε τη μέγιστη τιμή της άεργου και της ενεργού ισχύος που προκύπτουν από τον συγκεκριμένο έλεγχο. Επειδή ο λόγος  $R/X$  της γραμμής είναι μικρότερο από τη μονάδα ( $\sim 0.7$ ), σημαίνει ότι το δίκτυο είναι περισσότερο επαγωγικό και άρα η άεργος ισχύς έχει μεγαλύτερη επίδραση στη ρύθμιση της τάσης σε σχέση με την ενεργό. Για το λόγο αυτό η μέγιστη τιμή της άεργου είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη της ενεργού σύμφωνα με το λόγο  $R/X$ . Αυτό συμβαίνει για την άεργο και την αντίστοιχη ενεργό ισχύ για κάθε στιγμή της ημέρας.

Τέλος να σημειώσουμε ότι τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προέκυψαν χωρίς να λάβουμε υπόψη τη στάθμη φόρτισης των μπαταριών. Όπως είναι λογικό δεν είναι δυνατό να βρίσκονται συνεχώς σε λειτουργία εκφόρτισης. Στην περίπτωση που είχε ληφθεί υπόψη η στάθμη φόρτισης θα έπρεπε να σχεδιαστεί ένα πλάνο φόρτισης/εκφόρτισης για τις

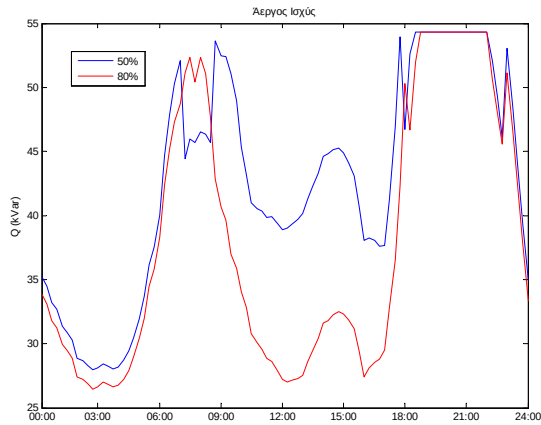
συστοιχίες των μπαταριών στους δύο ζυγούς. Το πιο ορθολογικό σενάριο θα ήταν να φορτίζουν οι μπαταρίες κατά την περίοδο που είναι μεγαλύτερη η παραγωγή, οπότε και θα μειωνόταν η τάση κατά τις μεσημεριανές ώρες, καθώς ένα μέρος της ισχύος θα χρησιμοποιούνταν για τη φόρτιση των μπαταριών. Επίσης, σε ένα σενάριο με μεγαλύτερη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής πιθανότατα θα παρατηρούσαμε αύξηση της τάσης σε τιμές μεγαλύτερης της ονομαστικής (όπως στην περίπτωση μεγάλης διείσδυσης στο δίκτυο χαμηλής τάσης). Κατά τη διάρκεια αυτής της αύξησης θα είχαμε απορρόφηση ενέργειας από τις συστοιχίες των μπαταριών και έτσι θα προέκυπτε διαφορετική λειτουργία για τις μπαταρίες. Βέβαια, όπως και προηγουμένως απαιτείται ξεχωριστή μελέτη για τη λειτουργία κάθε συστοιχίας μπαταριών σε σχέση με τη στάθμη φόρτισης.

### 8.2.5 Ρύθμιση τάσης με τροποποιημένο τοπικό έλεγχο

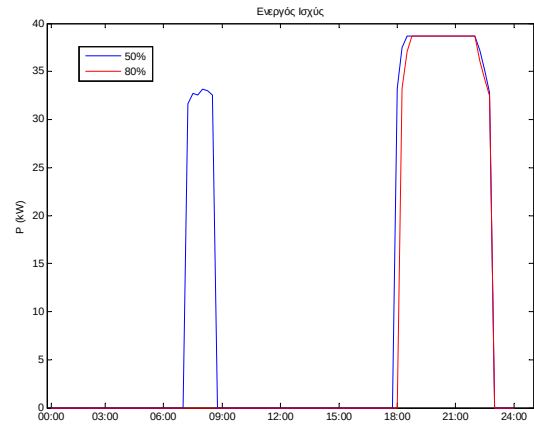
Ο τροποποιημένος έλεγχος προκαλεί την παρακάτω επίδραση στην τάση του ζυγού 10 (εικόνα 8.16).



Εικόνα 8.18: Ημερήσια ανά μονάδα τάση του ζυγού 10 με τροποποιημένο έλεγχο από τον αντιστροφή των μπαταριών.



Εικόνα 8.19: Αεργός ισχύς στο ζυγό 10 λόγω του τροποποιημένου ελέγχου με βέλτιστο λόγο P/Q από τον αντιστροφή των μπαταριών.



Εικόνα 8.20: Ενεργός ισχύς στο ζυγό 10 λόγω του τροποποιημένου ελέγχου με βέλτιστο λόγο P/Q από τον αντιστροφή των μπαταριών.

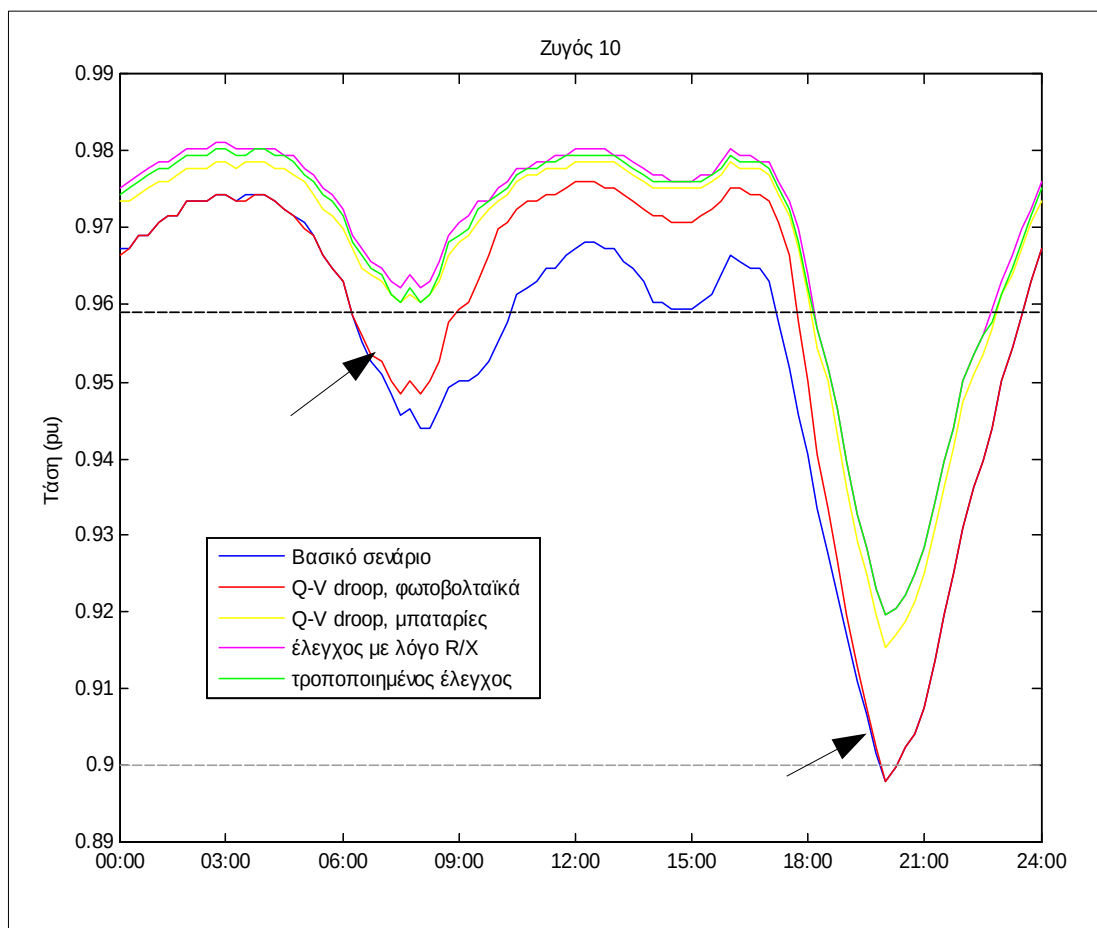
Η σχετική συμπεριφορά μεταξύ των δύο καμπυλών της τάσης για τα διαφορετικά ποσοστά διεύθυνσης παραμένει στο ίδιο προφίλ αλλά η σημαντικότερη διαφορά εντοπίζεται στις καμπύλες της αέργου και της ενεργού ισχύος. Τα σημεία στα οποία εστιάζουμε είναι αυτά στα οποία η τιμή της τάσης είναι τέτοια ώστε να γίνει η μετάβαση από τον έλεγχο με απλή Q-V droop σε έλεγχο με βέλτιστο λόγο P/Q και αντιστρόφως. Η τιμή της τάσης στη οποία συμβαίνει αυτό είναι 11.075kV δηλαδή -4.09% από την ονομαστική τάση.

Στην εικόνα 8.18 φαίνεται ότι με ποσοστό διεύθυνσης 80% ο αντιστροφέας των μπαταριών μπαίνει σε λειτουργία ελέγχου βασισμένου στο λόγο R/X μόνο μία φορά το 24ωρο, κατά τις βραδυνές ώρες όταν η τάση στο ζυγό μειώνεται σημαντικά. Αντιθέτως, στην περίπτωση που το ποσοστό της διεύθυνσης είναι 50% έχουμε αρκετή πτώση της τάσης και τις πρωινές ώρες που οδηγεί στην εναλλαγή του ελέγχου. Το φαινόμενο αυτό εκτός από την καμπύλη της τάσης εντοπίζεται και στις καμπύλες της ενεργού και της αέργου ισχύος.

Όπως και στους προηγούμενους ελέγχους έτσι και τώρα, στο συγκεκριμένο δίκτυο, η συνολική ισχύς που απαιτείται από τις μπαταρίες για τη ρύθμιση της τάσης είναι μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού διεύθυνσης.

### 8.3 Σύγκριση τοπικών ελέγχων για τη ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο χαμηλής τάσης

Για την ανάδειξη των διαφορών μεταξύ των διαφορετικών ελέγχων που επιτελεί ο αντιστροφέας των μπαταριών επιλέχθηκε η μελέτη του ζυγού 10 για ποσοστό διείσδυσης 80%. Στη συγκεκριμένη περίπτωση εντοπίζονται οι πιο έντονες διακυμάνσεις οι οποίες αναδεικνύουν καλύτερα τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 8.21: Ανά μονάδα ημερήσια τάση στο ζυγό 10 του δικτύου χαμηλής τάσης με 80% διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής για κάθε διαφορετικό έλεγχο.

Αρχικά αξίζει να παρατηρήσουμε ότι το βασικό σενάριο σε σχέση με τον τοπικό έλεγχο με τη χρήση Q-V droops από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών διατάξεων διαφέρει μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας οπότε υπάρχει παραγωγή λόγω της ηλιοφάνειας και έτσι δίνεται και δυνατότητα εφαρμογής του ελέγχου. Έτσι οι δύο καμπύλες συμπίπτουν σε μεγάλο μέρος του μήκους τους και αποκλίνουν μόνο τις ώρες της ηλιοφάνειας με την τάση να είναι υψηλότερη όταν εφαρμόζεται ο έλεγχος.

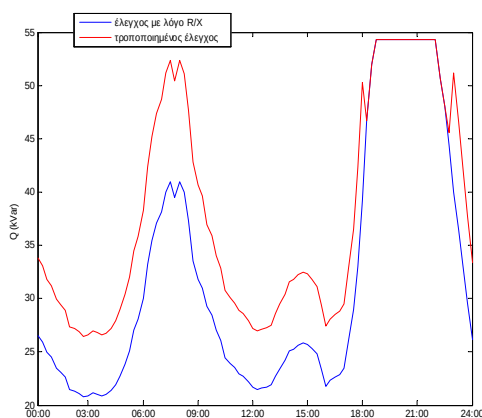
Στη συνέχεια και εφαρμόζοντας εκτός από τον έλεγχο μέσω των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών και τον έλεγχο με καμπύλη Q-V από τον αντιστροφέα των μπαταριών η τάση βελτιώνεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ενώ είναι σημαντική η συμβολή του συγκεκριμένου ελέγχου και κατά τις νυχτερινές ώρες επαναφέροντας την τάση εντός του ορίου του -10% το οποίο είχε ξεπεραστεί και δεν ήταν δυνατό να βελτιωθεί χωρίς τον

έλεγχο από τον αντιστροφέα των μπαταριών. Έτσι η ελάχιστη τιμή της τάσης στην περίπτωση αυτή είναι στο  $-8.6\%$  της ονομαστικής.

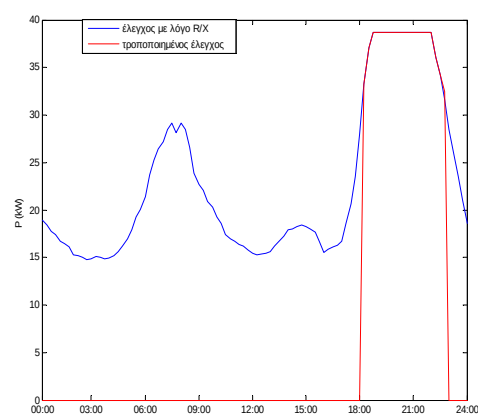
Στη συνέχεια και διατηρώντας τον έλεγχο που επιτελείται από τους αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών εφαρμόζεται ο έλεγχος που βασίζεται στο λόγο R/X από τον αντιστροφέα της συστοιχίας των μπαταριών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε τα καλύτερα αποτελέσματα στην τάση για το συγκεκριμένο δίκτυο. Η ελάχιστη τάση φτάνει στο  $-8.2\%$  της ονομαστικής και οι υπόλοιπες τιμές της αυξάνονται ακόμα περισσότερο σε σχέση με τον προηγούμενο έλεγχο.

Τέλος βλέπουμε και την επίδραση του τροποποιημένου ελέγχου ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία Q-V droop για ένα μεγάλο μέρος της ημέρας και όταν η τάση βρίσκεται ψηλότερα από το  $-4.09\%$  της ονομαστικής, εξοικονομώντας έτσι ενεργό ισχύ σε σχέση με τον γενικευμένο έλεγχο που προηγήθηκε. Μόνο όταν η τάση ξεπεράσει το όριο αυτό γίνεται η μετάβαση στον γενικευμένο έλεγχο που βασίζεται στο λόγο R/X. Η μετάβαση αυτή φαίνεται ξεκάθαρα στα σημεία που η τάση πέφτει κάτω από το συγκεκριμένο όριο. Μέχρι εκείνο το σημείο η καμπύλη της κινείται πολύ κοντά με την καμπύλη της τάσης που προέκυψε από τον απλό έλεγχο με Q-V droop, ενώ από εκεί και πέρα συμπίπτει απόλυτα με την καμπύλη της τάσης με γενικευμένο έλεγχο.

Η διαφορά του τροποποιημένου ελέγχου από τον γενικευμένο γίνεται ακόμα πιο εμφανής συγκρίνοντας την άεργο και την ενεργό ισχύ που απαιτεί ο καθένας (εικόνες 8.22 και 8.23).



Εικόνα 8.22: Αεργός ισχύς των μπαταριών στο ζυγό 10 του 80% διείσδυση για κάθε διαφορετικό έλεγχο.



Εικόνα 8.23: Ενεργός ισχύς των μπαταριών στο ζυγό 10 του 80% διείσδυση για κάθε διαφορετικό έλεγχο.

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται ξεκάθαρα η μεγάλη διαφορά στην ενεργό ισχύ που παράγεται με τον γενικευμένο έλεγχο σε σχέση με τον τροποποιημένο. Όσον αφορά την άεργο ο τροποποιημένος έλεγχος απαιτεί περισσότερη σε σχέση με τον βέλτιστο καθώς για ένα μεγάλο μέρος της ημέρας λειτουργεί ουσιαστικά με καμπύλη Q-V.

## 9 Συμπεράσματα-Προοπτικές συνέχισης

Η παραγωγή ενέργειας τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να αλλάζει προφίλ. Ένα συνεχώς αυξανόμενο ποσοστό της προέρχεται πια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αυτό έχουν οδηγήσει η πολιτικές που υιοθετούνται για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, σε συνδυασμό με τη σταδιακή μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων. Έτσι, έχει δοθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην έρευνα και ανάπτυξη των μονάδων παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κυρίως των φωτοβολταϊκών και των αιολικών.

Η μεγάλη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής και κυρίως των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει προκαλέσει νέα προβλήματα στα δίκτυα διανομής με κυριότερο από τα οποία την ανύψωση της τάσης, καθώς η παραγωγή δεν συγχρονίζεται με τη ζήτηση. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι ρύθμισης της τάσης. Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν οι μέθοδοι ρύθμισης τάσης είναι: οι τοπικοί έλεγχοι τάσης, οι συντονισμένοι και οι αποκεντρωμένοι έλεγχοι.

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.

Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε η μελέτη διάφορων τοπικών ελέγχων για τη ρύθμιση της τάσης χρησιμοποιώντας για τις προσομοιώσεις τον προσομοιωτή πραγματικού χρόνου του εργαστηρίου ΣΗΕ σε δύο πρότυπα δίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης. Πραγματοποιώντας της αντίστοιχες προσομοιώσεις για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής προέκυψαν συμπεράσματα για κάθε έλεγχο.

Όσον αφορά το πρότυπο δίκτυο χαμηλής τάσης όταν η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής κυμαίνεται στα επίπεδα του προτύπου δεν παρατηρείται μεγάλη αύξηση της τάσης και οι έλεγχοι πραγματοποιούν μόνο μία ομαλοποίηση της τάσης. Αντιθέτως υπάρχει πτώση τάσης κατά τις βραδυνές ώρες η οποία βελτιώνεται μόνο στην περίπτωση που εφαρμόζεται έλεγχος και από τον αντιστροφέα των μπαταριών καθώς οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα. Με την αύξηση της διείσδυσης όμως η συμπεριφορά αλλάζει και παρατηρούμε έντονη αύξηση της τάσης. Παράλληλα η συμβολή των ελέγχων καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση που αυξάνεται η διείσδυση.

Συγκρίνοντας τους ελέγχους μεταξύ τους μπορούμε να πούμε ότι ο έλεγχος που βασίζεται στο λόγο  $R/X$  έχει τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη ρύθμιση της τάσης για το συγκεκριμένο δίκτυο καθώς λαμβάνει υπόψη το λόγο  $R/X$  της γραμμής. Αυτό συμβαίνει διότι η άεργος ισχύς των υπόλοιπων ελέγχων δεν έχει την ίδια επίδραση με την ενεργό. Βέβαια τα δίκτυα χαμηλής τάσης παρουσιάζουν έντονο ωμικό χαρακτήρα γεγονός που οδηγεί σε μεγάλη κατανάλωση ή απορρόφηση ενεργού ισχύος. Για το σκοπό αυτό και έχοντας το μυαλό μας και δίκτυα με λίγο χαμηλότερο λόγο  $R/X$  προτείναμε τον τροποποιημένο έλεγχο. Σύμφωνα με τον οποίο για κάποιες μεταβολές της τάσης ο έλεγχος γίνεται με  $Q-V$  droop και στη συνέχεια για μεγαλύτερες μεταβολές με το γενικευμένο έλεγχο που βασίζεται στο λόγο  $R/X$ . Τα αποτελέσματα μας έδειξαν ότι σε δίκτυα με λόγο  $R/X$  πιο κοντά στη μονάδα η συμπεριφορά του συγκεκριμένου ελέγχου είναι πολύ καλή

καθώς γίνεται εξοικονόμηση ενεργού ισχύος ενώ παράλληλα δεν επηρεάζεται σημαντικά η ρύθμιση της τάσης.

Έτσι προχωρήσαμε σε προσομοιώσεις ενός πρότυπου δικτύου μέσης τάσης για δύο διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε λίγο διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τη ρύθμιση που πραγματοποιείται στη χαμηλή τάση. Επειδή ο λόγος R/X των γραμμών του δικτύου της μέσης τάσης που προσομοιώσαμε, είναι μικρότερος της μονάδας (~0.7%) η άεργος ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο από κάθε έλεγχο έχει σημαντικά αποτελέσματα στη βελτίωση του προφίλ της τάσης. Βέβαια, ο έλεγχος που βασίζεται στο λόγο R/X παρέχει και πάλι τα καλύτερα αποτελέσματα, με τον τροποποιημένο έλεγχο να συνδυάζει την χρήση μόνο άεργου ισχύος κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας και την έγχυση ενεργού μόνο όταν η τάση πέσει χαμηλότερα από μία κρίσιμη τιμή.

Ο τροποποιημένος έλεγχος δείχνει να λειτουργεί πολύ καλά σε δίκτυα τέτοιου τύπου που ο λόγος R/X προσεγγίζει τη μονάδα, καθώς κάνει σημαντική εξοικονόμηση ενεργού ισχύος σε σχέση με τον γενικευμένο έλεγχο χωρίς να μειώνεται η ποιότητα των αποτελεσμάτων που παρέχει.

Ο συγκεκριμένος έλεγχος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε ασθενή δίκτυα, τα οποία παρουσιάζουν και μικρές διακυμάνσεις στη συχνότητα, με αξιόλογα αποτελέσματα. Επιπλέον, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συμπεραίνουμε τις σημαντικές διαφορές που προκύπτουν για κάθε έλεγχο σε σχέση με το λόγο R/X του κάθε δικτύου.

Επίσης ακριβώς επειδή η υλοποίηση έγινε στον προσομοιωτή πραγματικού χρόνου, παρέχεται η δυνατότητα δοκιμής των ελέγχων και σε πραγματικό αντιστροφέα ο οποίος θα συνδεθεί με το RTDS για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων Power Hardware in the Loop (PHIL).

Επιπλέον στις προσομοιώσεις θα μπορούσαν να ενταχθούν και τα λεπτομερή χαρακτηριστικά των μπαταριών όπως η στάθμη φόρτισης και να μελετηθούν διάφορα προφίλ λειτουργίας. Τέλος, η ένταξη περισσότερων διαφορετικών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με διαφορετικά προφίλ λειτουργίας θα προσέδιδε στο δίκτυο διαφορετική συμπεριφορά και θα άλλαζαν οι απαιτήσεις των τοπικών ελέγχων για τη ρύθμιση της τάσης.



## Βιβλιογραφία

- [1] Distributed Generation(Wikipedia):[https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed\\_generation](https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_generation)
- [2] Kenji Takahashi, Simon Baker, Lado Kurdgelashvili , Policy Options to Support Distributed Resources , January 2005
- [3] Zhenhua Jiang, Roger A. Dougal, "Hierarchical Microgrid Paradigm for Integration of Distributed Energy Resources", *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, 2008, pp. 1-8.
- [4] Robert H. Lasseter, , "Microgrids and Distributed Generation", *Journal of Energy Engineering*, American Society of Civil Engineers, Sept. 2007
- [5] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές", Αθήνα 1997
- [6] Βασιλική Μπαλαφούτη, "Impact of distributed generation on the power quality in distribution networks", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2007
- [7] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, "Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: Τόμος Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας", Αθήνα 1985
- [8] Energy Storage Association: [energystorage.org](http://energystorage.org).
- [9] M. T. Lawder et al., "Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014-1030, June 2014.
- [10] Charles J. Barnhart, Michael Dale, Adam R. Brandt and Sally M. Benson, "The energetic implications of curtailing versus storing solar- and wind-generated electricity", *Energy Environ. Sci.*, 2013,6, 2804-2810
- [11] M. N. Kabir, Y. Mishra, G. Ledwich, Z. Y. Dong, K. P. Wong, "Coordinated Control of Grid-Connected Photovoltaic Reactive Power and Battery Energy Storage Systems to Improve the Voltage Profile of a Residential Distribution Feeder", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Volume: 10, Issue: 2, May 2014
- [12] Martin Braun, Kathrin Büdenbender, Dirk Magnor, Andreas Jossen, "Photovoltaic self-consumption in Germany using lithium-ion storage to increase self consumed photovoltaic energy", Kassel, Germany
- [13] M. Castillo-Cagigal, E. Caamaño-Martín, E. Matallanas, D. Masa-Bote, A. Gutiérrez , F. Monasterio-Huelin, J. Jiménez-Leube , "PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector ", Madrid, Spain
- [14] Ramon Zamora, Anurag K. Srivastava, "Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs", 2010
- [15] European Association for Storage of Energy , <http://ease-storage.eu/>
- [16] Bruce Dunn et al., "Electrical Energy Storagefor the Grid: A Battery of Choices", *Science* 334, 928 (2011)
- [17] Xuesong Zhou, Yitong Lin and Youjie Ma, "The Overview of Energy Storage Technology", International Conference on Mechatronics and Automation, Proceedings of 2015 IEEE, August 2-5, Beijing, China
- [18] Xiangjun Li, Dong Hui, Xiaokang Lai, "Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations", *IEEE Transactions Sustainable Energy*, Vol. 4, no. 2, April 2013
- [19] Ioan Serban, Corneliu Marinescu, "Control Strategy of Three-Phase Battery Energy Storage Systems for Frequency Support in Microgrids and with Uninterrupted Supply of Local Loads", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 29, Issue: 9, Sept. 2014

- [20] R. Bhatt and B. Chowdhury, "Grid frequency and voltage support using PV systems with energy storage," 2011 North American Power Symposium, Boston, MA, 2011, pp. 1-6. doi: 10.1109/NAPS.2011.6025112
- [21] U. Kwhannet, N. Sinsuphun, U. Leeton and T. Kulworawanichpong, "Impact of Energy Storage in Micro-grid Systems with DGs", International Conference on Power System Technology, 2010
- [22] Ευάγγελος Ι. Βρεττός , "Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών - Υδρογόνου", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2010
- [23] Electric Power Research Institute, <https://www.epri.com/>
- [24] T.F. Fuller, M. Doyle, and J. Newman, "Simulation and optimization of the duallithium ion insertion cell. Journal of the Electrochemical Society," 141:1, 1994.
- [25] M.R. Jongerden, B.R. Haverkort, "Battery Modeling", 2008
- [26] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D.A. Wallach, "A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer.", IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 11(6):1019–1030, December 2003.
- [27] James F. Manwell and Jon G. McGowan, "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. Solar Energy", Solar Energy, 50(5):399–405, May 1993.
- [28] RTDS Technologies, <https://www.rtds.com/>
- [29] Kai Strunz, Ehsan Abbasi, Chad Abbey, Christophe Andrieu, Udaya Annakkage, Stefano Barsali, Ryan C. Campbell, Robert Fletcher, Feng Gao, Trevor Gaunt, Ani Gole, Nikos Hatziaargyriou, 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
- [30] Stavros Papathanassiou, Nikos D. Hatziaargyriou, K. Strunz,, "A Benchmark Low Voltage Microgrid Network", CIGRE Symposium "Power systems with dispersed generation: technologies, impacts on development, operation and performances", April 2005, Athens, Greece
- [31] Karel De Brabandere, Bruno Bolsens, Jeroen Van den Keybus, Achim Woyte, Johan Driesen, Ronnie Belmans, "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters", July 2007
- [32] Αθανάσιος Βασιλάκης, "Μελέτη της συμπεριφοράς των Εικονικών Σύγχρονων Μηχανών στη Στήριξη της Συχνότητας ", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. Οκτώβριος 2012
- [33] Alexandre Oudalov, Daniel Chartouni, and Christian Ohler, "Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 1259-1266, Aug. 2007.
- [34] Μάριος Μ. Μανιατόπουλος, "Τοπικός και συντονισμένος έλεγχος τάσης σε δίκτυα με διεσπαρμένη παραγωγή σε πραγματικό χρόνο", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. Νοέμβριος 2014