



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ  
ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κτενάς Αλέξανδρος

**Επιβλέπων:** Σταύρος Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2018





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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ  
ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κτενάς Αλέξανδρος

**Επιβλέπων:** Σταύρος Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...<sup>η</sup> Ιουλίου 2018

.....

Σταύρος Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Νίκος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Γεωργιάκης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Κτενάς Αλέξανδρος

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

Copyright © Κτενάς Αλέξανδρος, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, της οποίας το θέμα με ενδιέφερε σε μεγάλο βαθμό, καθώς και για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου προσέφερε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον ηλεκτρολόγο μηχανικό και υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος, κ. Παναγιώτη Αναγνωστόπουλο για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εργασίας και τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου, για την στήριξη και τη βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



## Περίληψη

Η ανάγκη μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και η συνεχής βελτίωση των τεχνολογιών ΑΠΕ, έχουν οδηγήσει στην αυξημένη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ στα ΣΗΕ. Το γεγονός αυτό, έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη τοπολογία του δικτύου, το οποίο μετατρέπεται σταδιακά από παθητικό σε ενεργητικό. Η μετάβαση αυτή, οφείλεται επίσης στην ανάπτυξη των συσκευών αποθήκευσης, των συστημάτων τηλεμέτρησης και των έξυπνων μετρητών, η χρήση των οποίων κρίνεται απαραίτητη στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενσωμάτωση όλων αυτών των τεχνολογιών, δίνουν τη δυνατότητα στον διαχειριστή του δικτύου να έχει τη συνολική εποπτεία του και να ελέγχει κεντρικά και συντονισμένα όλες τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες σε αυτό.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση των βελτιώσεων που επιφέρει η προσθήκη των παραπάνω τεχνολογιών και η εφαρμογή του κεντρικού και συντονισμένου ελέγχου των συσκευών του δικτύου στη λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε α) η επίδραση που έχει η βαθμιαία προσθήκη κάθε συσκευής στον κεντρικό και συντονισμένο έλεγχο, β) η επίδραση της θέσης και των ονομαστικών μεγεθών της ισχύος και της ενέργειας της μονάδας αποθήκευσης, γ) τα οφέλη από την χρήση μεταβαλλόμενου Συντελεστή Ισχύος των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής και δ) η επίδραση της διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος σε GAMS που να προσομοιώνει ένα οποιοδήποτε δίκτυο διανομής και να δίνει ως αποτέλεσμα την βέλτιστη λειτουργία του σε ημερήσια βάση. Το δίκτυο αυτό μπορεί να περιλαμβάνει απεριόριστο αριθμό φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων, συσκευών αποθήκευσης, πυκνωτών, ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, καθώς και ελεγχόμενα από τον διαχειριστή φορτία. Χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι δείκτες για την ποσοτικοποίηση και παρουσίαση των πλεονεκτημάτων του κεντρικού και συντονισμένου ελέγχου και της επίδρασης της μεταβολής των βασικών χαρακτηριστικών των παραπάνω συστημάτων και συσκευών, που αφορούν το Hosting Capacity, τη ρύθμιση της τάσης, τις απώλειες του δικτύου και άλλα τεχνικά θέματα.

## **Λέξεις κλειδιά**

Διεσπαρμένη παραγωγή, Δίκτυα διανομής ενέργειας, Ενεργητικά δίκτυα, Κεντρικός συντονισμένος έλεγχος, Βέλτιστη ροή ισχύος, Βελτιστοποίηση, Ρύθμιση τάσης, ΣΑΤΥΦ, Απώλειες ισχύος, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ΑΠΕ, Αποθηκευτική μονάδα, Μπαταρία, Ελεγχόμενα φορτία, Διαχείριση Ζήτησης, GAMS



## Abstract

The necessity to reduce the environmental footprint of power systems and the gradual improvement of RES technologies, has led to increased penetration of RES units in the power system. This has led to significant changes in network topology, which is gradually being transformed from passive into active. This transition is also due to the development of storage devices, telemetry systems and smart meters, the use of which is deemed necessary in modern electrical power systems. Embedding all of these technologies, allows the network administrator to have its overall supervision and centrally and coordinatedly control all devices connected to it.

This diploma thesis aims at exploring the improvements accomplished by the addition of the above technologies and the implementation of the central and coordinated control of the network devices in its operation. More specifically, the topics of research were a) the effect of the gradual addition of each device to the central and coordinated control, b) the effect of the position and nominal sizes of the power and energy of the storage unit, c) the benefits of using a variable Power Factor of Distributed Energy Resources and d) the effect of the controllable loads penetration into the grid. For this reason, an algorithm in GAMS has been developed that simulates any distribution network and presents its optimal operation on a daily basis. This network may include an unlimited number of photovoltaic power plants and wind farms, storage devices, capacitors, generating sets, and controllable loads. Various KPIs were used to quantify and present the benefits of the centralized and coordinated control and the effect of changing the key features of the above-mentioned systems and technologies related to Host Capacity, voltage regulation, network losses and other technical issues.

## **Keywords**

Distributed Generation, Distribution power networks, Optimal power flow, Optimization, Active network, Smart grid, Centralized coordinated control, Voltage control, OLTC, Power losses, Renewable energy sources RES, Energy storage, Battery, Controllable loads, Demand Side Management, GAMS

## Περιεχόμενα

<b>Ευχαριστίες</b> .....	<b>5</b>
<b>Περίληψη</b> .....	<b>7</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>9</b>
<b>Περιεχόμενα</b> .....	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων</b> .....	<b>15</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....	<b>21</b>
<b>Συνομογραφίες – Συντμήσεις</b> .....	<b>23</b>
<b>1 Εισαγωγή</b> .....	<b>25</b>
<b>2 Θεωρητικό Υπόβαθρο</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας – ΣΗΕ</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ)</b> .....	<b>30</b>
<b>2.4 Διεσπαρμένη Παραγωγή</b> .....	<b>31</b>
2.4.1 Ορισμός.....	31
2.4.2 Τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	32
2.4.3 Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	33
2.4.3 Εμπόδια για την διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής .....	35
<b>2.5 Έξυπνα δίκτυα ενέργειας – Smart Energy Grids</b> .....	<b>36</b>
2.5.1 Οι αδυναμίες του τρέχοντος ηλεκτρικού δικτύου.....	36
2.5.2 Ορισμός Έξυπνου Ηλεκτρικού Δικτύου .....	38
2.5.3 Πλεονεκτήματα Έξυπνου Ηλεκτρικού Δικτύου.....	39
2.5.4 Οι προκλήσεις του Έξυπνου Δικτύου.....	40
<b>2.6 Αποθήκευση Ενέργειας</b> .....	<b>42</b>
2.6.1 Εισαγωγή.....	42
2.6.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	42
2.6.3 Εφαρμογές .....	43

2.6.3.1	Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	43
2.6.3.2	Στρεφόμενη εφεδρεία.....	44
2.6.3.3	Εξομάλυνση φορτίου .....	44
2.6.3.4	Βελτίωση ποιότητας ενέργειας.....	44
2.6.3.5	Αύξηση αξιοπιστίας.....	45
<b>2.7</b>	<b>Ρύθμιση τάσης .....</b>	<b>45</b>
2.7.1	Εισαγωγή.....	45
2.7.2	ΣΑΤΥΦ .....	46
2.7.3	Ρυθμιστές τάσης – VR.....	51
2.7.4	Πυκνωτές.....	54
2.7.5	Άεργος λειτουργία των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.....	54
<b>2.8</b>	<b>Διαχείριση της ζήτησης – Ελεγχόμενα φορτία.....</b>	<b>55</b>
2.8.1	Εισαγωγή.....	55
2.8.2	Ορισμοί .....	56
2.8.3	Προγράμματα απόκρισης ζήτησης .....	58
<b>2.9</b>	<b>Βελτιστοποίηση .....</b>	<b>60</b>
2.9.1	Εισαγωγή.....	60
2.9.2	Μαθηματικός Προγραμματισμός .....	61
2.9.3	Το λογισμικό GAMS .....	63
2.9.3.1	Εισαγωγή .....	63
2.9.3.2	Δομή ενός μοντέλου σε GAMS.....	64
2.9.3.2.1	Σύνολα .....	65
2.9.3.2.2	Εισαγωγή δεδομένων .....	66
2.9.3.2.3	Μεταβλητές .....	67
2.9.3.2.4	Εξισώσεις .....	69
2.9.3.2.5	Δήλωση Μοντέλου.....	70
2.9.3.2.6	Ταξινόμηση μοντέλων .....	70
2.9.3.2.7	Δήλωση Επίλυσης .....	72
2.9.3.2.8	Έξοδος – Output.....	72

2.9.3.2.9	Περίληψη επίλυσης .....	73
<b>3</b>	<b><i>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....</i></b>	<b>75</b>
<b>4</b>	<b><i>Είσοδοι, παραδοχές και αποτελέσματα.....</i></b>	<b>79</b>
<b>4.1</b>	<b><i>Εισαγωγή Δεδομένων.....</i></b>	<b>79</b>
4.1.1	<i>Τοπολογία δικτύου - Γραμμή R220.....</i>	79
4.1.2	<i>Χρονοσειρές.....</i>	81
<b>4.2</b>	<b><i>Ελεγχόμενα Φορτία.....</i></b>	<b>83</b>
<b>4.3</b>	<b><i>Ανάλυση Μοντέλου Βελτιστοποίησης.....</i></b>	<b>86</b>
4.3.1	<i>Μοντελοποίηση του συστήματος.....</i>	86
4.3.1.1	<i>Μετασχηματιστής .....</i>	86
4.3.1.2	<i>Φωτοβολταϊκά πάρκα.....</i>	87
4.3.1.3	<i>Αποθηκευτικές μονάδες .....</i>	88
4.3.1.4	<i>Πυκνωτής .....</i>	91
4.3.1.5	<i>Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη .....</i>	91
4.3.1.6	<i>Ελεγχόμενα Φορτία.....</i>	91
4.3.1.7	<i>Ροή φορτίου – Τάση.....</i>	93
4.3.2	<i>Θερμικό όριο γραμμών και μετασχηματιστή.....</i>	95
4.3.3	<i>Αντικειμενική Συνάρτηση .....</i>	96
4.3.4	<i>Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου .....</i>	97
<b>4.4</b>	<b><i>Δείκτες Αξιολόγησης (Key Performance Indicators).....</i></b>	<b>98</b>
<b>4.5</b>	<b><i>Baseline Scenario (BL).....</i></b>	<b>100</b>
<b>4.6</b>	<b><i>Smart Grid Scenario (SG).....</i></b>	<b>101</b>
<b>4.7</b>	<b><i>Excel αποτελεσμάτων.....</i></b>	<b>101</b>
<b>5</b>	<b><i>Κεντρικός και συντονισμένος έλεγχος των συσκευών του δικτύου ....</i></b>	<b>111</b>
5.1	<i>Βαθμιαία προσθήκη δυνατότητας ελέγχου κάθε συσκευής. ....</i>	111
5.2	<i>Απώλειες ενέργειας της μπαταρίας .....</i>	116
5.3	<i>Συμπεράσματα.....</i>	117
<b>6</b>	<b><i>Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την ισχύ και την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας.....</i></b>	<b>121</b>

6.1	Μπαταρίες σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας.....	121
6.1.1	Ρύθμιση της τάσης.....	121
6.1.2	Ελαχιστοποίηση των απωλειών.....	128
6.2	Μπαταρίες σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος	132
6.2.1	Ρύθμιση της τάσης.....	132
6.2.2	Ελαχιστοποίηση των απωλειών.....	135
6.3	Συμπεράσματα.....	137
<b>7</b>	<b><i>Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον Συντελεστή Ισχύος των σταθμών ΔΠ</i></b>	<b>141</b>
7.1	Επίδραση του Συντελεστή Ισχύος των σταθμών ΔΠ στις τάσεις του δικτύου.	141
7.2	Επίδραση του Συντελεστή Ισχύος των σταθμών ΔΠ στις απώλειες του δικτύου	147
7.3	Συμπεράσματα.....	153
<b>8</b>	<b><i>Ανάλυση ευαισθησίας με βάση το ποσοστό διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων.....</i></b>	<b>155</b>
8.1	Hosting Capacity.....	155
8.2	Ρύθμιση της τάσης.....	168
8.3	Απώλειες ενεργούς ισχύος.....	181
8.4	Περικοπή παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.....	186
8.5	Συμπεράσματα.....	193
<b>9</b>	<b><i>Συμπεράσματα.....</i></b>	<b>197</b>
<b>10</b>	<b><i>Βιβλιογραφία.....</i></b>	<b>199</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Οι τρεις λειτουργίες ενός ΣΗΕ.....	28
Εικόνα 2: Χάρτης ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος Απρίλιος 2017 [2].....	29
Εικόνα 3: Συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (αριστερά) και ηλεκτρικό δίκτυο με ΔΠ (δεξιά) .....	31
Εικόνα 4: Μεταβολή του τρόπου διατήρησης της ισορροπίας παραγωγής και ζήτησης στο σύγχρονο δίκτυο [12].....	39
Εικόνα 5: ΣΑΤΥΦ [34].....	47
Εικόνα 6: Ενδεικτική μεταβολή της τάσης στο σημείο που επιδιώκεται να τηρείται σταθερή .....	49
Εικόνα 7: Σύστημα ελέγχου του ΣΑΤΥΦ.....	49
Εικόνα 8: Ρύθμιση τάσης με LDC .....	51
Εικόνα 9: Αυτομετασχηματιστής.....	52
Εικόνα 10: Ρυθμιστές τάσης σε σειρά [40].....	53
Εικόνα 11: Φαινόμενη ισχύς αντιστροφέα με συντελεστή ισχύος διάφορο της μονάδας ....	55
Εικόνα 12: Διαφορετικές καμπύλες φορτίου ανάλογα με τη μέθοδο DSM .....	56
Εικόνα 13: Καμπύλη φορτίου μετά από διαχείριση ζήτησης.....	57
Εικόνα 14: Προφίλ ζήτησης διαφόρων μεθόδων Διαχείρισης Ζήτησης .....	58
Εικόνα 15: Μονογραμμικό διάγραμμα γραμμής R220.....	80
Εικόνα 16: Ποσοστό φόρτισης ανά ώρα.....	83
Εικόνα 17: 30% Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων.....	84
Εικόνα 18: 30% Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α .....	84
Εικόνα 19: 30% Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β .....	85
Εικόνα 20: 30% Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων τύπου Γ.....	86
Εικόνα 21: Τελικός έλεγχος της ισχύος του αντιστροφέα ενός φωτοβολταϊκού πάρκου ....	88
Εικόνα 22: Λειτουργία της μπαταρίας.....	90
Εικόνα 23: Άεργος λειτουργία και όρια ενός φωτοβολταϊκού πάρκου .....	103
Εικόνα 24: Λειτουργίας της αποθηκευτικής μονάδας .....	104
Εικόνα 25: Προφίλ ζήτησης ενέργειας μετά τη βελτιστοποίηση .....	105

Εικόνα 26: Παραγωγή ενέργειας από τα Η/Ζ.....	106
Εικόνα 27: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής ΜΤ .....	107
Εικόνα 28: Προφίλ της τάσης για κάθε ώρα ανά κόμβο .....	108
Εικόνα 29: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα .....	108
Εικόνα 30: Προφίλ των ρευμάτων για κάθε ώρα ανά κλάδο .....	109
Εικόνα 31: KPIs για κάθε σενάριο.....	113
Εικόνα 32: Συνεισφορά κάθε σεναρίου στις απώλειες του δικτύου.....	114
Εικόνα 33: Συνεισφορά κάθε σεναρίου στο Hosting Capacity .....	115
Εικόνα 34: Συνεισφορά κάθε σεναρίου στη ρύθμιση της τάσης.....	115
Εικόνα 35: Λειτουργία της μπαταρίας όταν εντάσσονται οι απώλειες της μπαταρίας στην Α.Σ .....	116
Εικόνα 36: Απώλειες ενέργειας πριν και μετά τη προσθήκη της μπαταρίας .....	117
Εικόνα 37: KPI 4 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής ΜΤ σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας.....	123
Εικόνα 38: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής ΜΤ πριν την προσθήκη μπαταρίας.....	124
Εικόνα 39: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα πριν την προσθήκη μπαταρίας... ..	124
Εικόνα 40: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής ΜΤ με μπαταρία 1 MWh/1 MW .....	125
Εικόνα 41: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα με μπαταρία 1 MWh/1 MW.....	125
Εικόνα 42: Διάγραμμα λειτουργίας μπαταρίας 1 MWh/1 MW με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης .....	126
Εικόνα 43: Λειτουργία της μπαταρίας 3 MWh/1 MW με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης .....	127
Εικόνα 44: Λειτουργία της μπαταρίας 5 MWh/1 MW με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης .....	127
Εικόνα 45: KPI 1 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής ΜΤ διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας.....	129
Εικόνα 46: Λειτουργία της μπαταρίας 1 MWh/1 MW με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών.....	130
Εικόνα 47: Λειτουργία της μπαταρίας 7 MWh/1 MW με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών.....	131
Εικόνα 48: Λειτουργία της μπαταρίας 10 MWh/1 MW με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών.....	131



Εικόνα 49: KPI 4 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος .....	133
Εικόνα 50: Λειτουργία της μπαταρίας 5 MWh/1 MW .....	134
Εικόνα 51: Λειτουργία της μπαταρίας 5 MWh/3 MW .....	134
Εικόνα 52: Λειτουργία της μπαταρίας 5 MWh/5 MW .....	135
Εικόνα 53: KPI 1 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος .....	137
Εικόνα 54: KPI 1 για κάθε περίπτωση.....	139
Εικόνα 55: KPI 4 για κάθε περίπτωση.....	140
Εικόνα 56: KPI 4 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα .....	142
Εικόνα 57: ΣΙ των σταθμών ΔΠ .....	143
Εικόνα 58: Άεργος λειτουργία και όρια πρώτου σταθμού ΔΠ.....	143
Εικόνα 59: Άεργος λειτουργία και όρια δεύτερου σταθμού ΔΠ .....	144
Εικόνα 60: Άεργος λειτουργία και όρια τρίτου σταθμού ΔΠ.....	144
Εικόνα 61: Άεργος λειτουργία και όρια τέταρτου σταθμού ΔΠ.....	145
Εικόνα 62: Άεργος λειτουργία και όρια πέμπτου σταθμού ΔΠ.....	145
Εικόνα 63: Άεργος λειτουργία και όρια έκτου σταθμού ΔΠ.....	146
Εικόνα 64: Άεργος λειτουργία και όρια έβδομου σταθμού ΔΠ .....	146
Εικόνα 65: Άεργος λειτουργία και όρια όγδοου σταθμού ΔΠ .....	147
Εικόνα 66: KPI 1 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα .....	148
Εικόνα 67: Άεργος λειτουργία και όρια πρώτου σταθμού ΔΠ.....	149
Εικόνα 68: Άεργος λειτουργία και όρια δεύτερου σταθμού ΔΠ .....	150
Εικόνα 69: Άεργος λειτουργία και όρια τρίτου σταθμού ΔΠ.....	150
Εικόνα 70: Άεργος λειτουργία και όρια τέταρτου σταθμού ΔΠ.....	151
Εικόνα 71: Άεργος λειτουργία και όρια πέμπτου σταθμού ΔΠ.....	151
Εικόνα 72: Άεργος λειτουργία και όρια έκτου σταθμού ΔΠ.....	152
Εικόνα 73: Άεργος λειτουργία και όρια έβδομου σταθμού ΔΠ .....	152
Εικόνα 74: Άεργος λειτουργία και όρια όγδοου σταθμού ΔΠ .....	153
Εικόνα 75: Επίδραση της διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων στο Hosting Capacity (MW) του δικτύου .....	156

Εικόνα 76: KPI 2 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	157
Εικόνα 77: KPI 2 με σενάριο αναφοράς το BL .....	158
Εικόνα 78: Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ .....	159
Εικόνα 79: KPI 3 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	160
Εικόνα 80: KPI 5 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	161
Εικόνα 81: KPI 3 με σενάριο αναφοράς το BL .....	162
Εικόνα 82: KPI 5 με σενάριο αναφοράς το BL .....	163
Εικόνα 83: Προφίλ των ρευμάτων για κάθε ώρα ανά κλάδο .....	164
Εικόνα 84: Ωριαίο προφίλ της τάσης κατά μήκος της γραμμής ΜΤ .....	165
Εικόνα 85: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα .....	165
Εικόνα 86: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α .....	166
Εικόνα 87: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β .....	167
Εικόνα 88: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C .....	167
Εικόνα 89: Επίδραση της διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων στην τάση .....	168
Εικόνα 90: KPI 4 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	169
Εικόνα 91: KPI 4 με σενάριο αναφοράς το BL .....	170
Εικόνα 92: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	171
Εικόνα 93: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	172
Εικόνα 94: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 50% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	172
Εικόνα 95: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	173
Εικόνα 96: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	173
Εικόνα 97: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 50% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	174

Εικόνα 98: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	174
Εικόνα 99: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	175
Εικόνα 100: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 50% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	175
Εικόνα 101: Λειτουργία της μπαταρίας για διείσδυση 50% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	176
Εικόνα 102: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT χωρίς ελεγχόμενα φορτία με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	177
Εικόνα 103: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα χωρίς ελεγχόμενα φορτία με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης .....	177
Εικόνα 104: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	178
Εικόνα 105: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	178
Εικόνα 106: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου B με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	179
Εικόνα 107: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου B με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	179
Εικόνα 108: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίου τύπου A με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης .....	180
Εικόνα 109: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης.....	180
Εικόνα 110: Επίδραση της διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων στις απώλειες ενεργού ισχύος.....	181
Εικόνα 111: KPI 1 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	182
Εικόνα 112: KPI 1 με σενάριο αναφοράς το BL .....	184
Εικόνα 113: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών .....	185
Εικόνα 114: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου B με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών .....	185
Εικόνα 115: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών .....	186

Εικόνα 116: Συγκεντρωτικό διάγραμμα περικοπών, ομαδοποιημένες με βάση το είδος των ελεγχόμενων φορτίων .....	189
Εικόνα 117: Συγκεντρωτικό διάγραμμα περικοπών, ομαδοποιημένες με βάση το ποσοστό διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων.....	189
Εικόνα 118: Περικοπές για ελεγχόμενα φορτία τύπου Α.....	190
Εικόνα 119: Περικοπές για ελεγχόμενα φορτία τύπου Β.....	190
Εικόνα 120: Περικοπές για ελεγχόμενα φορτία τύπου C .....	191
Εικόνα 121: Περικοπές για 10% διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων .....	192
Εικόνα 122: Περικοπές για 30% διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων .....	192
Εικόνα 123: Περικοπές για 50% διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων .....	193

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Τάση στην MT για όλους τους συνδυασμούς τάσης στην YT και tap .....	48
Πίνακας 2: Τύποι προβλημάτων που επιλύονται μέσω του GAMS .....	71
Πίνακας 3: Τελική τοπολογία μετά την απλοποίηση του δικτύου για την γραμμή R220 .....	81
Πίνακας 4: Ποσοστό φόρτισης φωτοβολταϊκής παραγωγής και κατανάλωσης ανά ώρα ....	82
Πίνακας 5: Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου .....	97
Πίνακας 6: Ενεργός ισχύς σταθμών ΔΠ .....	102
Πίνακας 7: Άεργος ισχύς και ΣΙ σταθμών ΔΠ.....	102
Πίνακας 8: Περικοπές ενεργού ισχύος σταθμών ΔΠ.....	103
Πίνακας 9: Τιμές των τάσεων .....	107
Πίνακας 10: Σενάρια – Προσθήκη δυνατότητας ελέγχου συσκευών .....	111
Πίνακας 11: Αποτελέσματα για κάθε σενάριο .....	112
Πίνακας 12: KPIs για κάθε σενάριο .....	112
Πίνακας 13: Συνεισφορά κάθε σεναρίου σε κάθε KPI.....	114
Πίνακας 14: RMS τιμή της απόκλισης της τάσης με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας .....	122
Πίνακας 15: KPI 4 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας .....	122
Πίνακας 16: Απώλειες ενέργειας (MWh) με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας .....	128
Πίνακας 17: KPI 1 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας .....	129
Πίνακας 18: RMS τιμή της απόκλισης της τάσης με μπαταρίες σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος.....	132
Πίνακας 19: KPI 4 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος .....	133
Πίνακας 20: Απώλειες ενέργειας (MWh) με μπαταρίες σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος.....	136
Πίνακας 21: KPI 1 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος .....	136
Πίνακας 22: KPI 1 για κάθε περίπτωση .....	139

Πίνακας 23: KPI 4 για κάθε περίπτωση .....	139
Πίνακας 24: RMS τιμή της διακύμανσης της τάσης του δικτύου για κάθε περίπτωση ΣΙ.	141
Πίνακας 25: KPI 4 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα .....	141
Πίνακας 26: Απώλειες του δικτύου σε MWh για κάθε περίπτωση ΣΙ .....	148
Πίνακας 27: KPI 1 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα .....	148
Πίνακας 28: Επίδραση της διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων στο Hosting Capacity (MW) του δικτύου .....	155
Πίνακας 29: KPI 2 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	156
Πίνακας 30: KPI 2 με σενάριο αναφοράς το BL .....	158
Πίνακας 31: Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ (λ).....	159
Πίνακας 32: KPI 3 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	160
Πίνακας 33: KPI 5 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	161
Πίνακας 34: KPI 3 με σενάριο αναφοράς το BL .....	162
Πίνακας 35: KPI 5 με σενάριο αναφοράς το BL .....	163
Πίνακας 36: RMS τιμή της απόκλισης της τάσης ανάλογα με τη διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων .....	168
Πίνακας 37: KPI 4 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	169
Πίνακας 38: KPI 4 με σενάριο αναφοράς το BL .....	170
Πίνακας 39: Επίδραση της διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων στις απώλειες ενεργού ισχύος (MWh).....	181
Πίνακας 40: KPI 1 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία .....	182
Πίνακας 41: KPI 1 με σενάριο αναφοράς το BL .....	183
Πίνακας 42: Περικοπές ενέργειας ομαδοποιημένες με βάση το είδος των ελεγχόμενων φορτίων .....	187
Πίνακας 43: Περικοπές ενέργειας ομαδοποιημένες με βάση το ποσοστό διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων .....	188

## Συντομογραφίες – Συντμήσεις

ΣΗΕ	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΔ	Δίκτυα Διανομής
ΔΔΗΕ	Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
Α/Π	Αιολικό Πάρκο
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΜΤ	Μέση Τάση
ΧΤ	Χαμηλή Τάση
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
Υ/Σ	Υποσταθμός
ΡΤ	Ρυθμιστής Τάσης
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΣΙ	Συντελεστής Ισχύος
ΣΑΤΥΦ	Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο
ΑΣ	Αντικειμενική Συνάρτηση
Η/Ζ	Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη
PF	Power Factor
DG	Distributed Generation
DER	Distributed Energy Resources
OLTC	On Load Tap Changer

LDC	Line Drop Compensation
VR	Voltage Regulator
SVR	Static Var Compensator
DSM	Demand Side Management
DR	Demand Response
HC	Hosting Capacity
KPI	Key Performance Indicator
SG	Smart Grid
BL	Baseline
LP	Linear Program
IP	Integer Program
MILP	Mixed-Integer Linear Program
MIQP	Mixed-Integer Quadratic Program
MIQCQP	Mixed-Integer Quadratically-Constrained Quadratic Program



# 1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή ενός βελτιστοποιημένου τρόπου λειτουργίας των δικτύων διανομής μέσω ενός κεντρικού και συντονισμένου ελέγχου των συσκευών που είναι συνδεδεμένες σε αυτά και η αξιολόγηση της επίδρασης της μεταβολής των βασικών χαρακτηριστικών των συσκευών αυτών με χρήση διαφόρων δεικτών. Στα πλαίσια της διπλωματικής, μελετήθηκε η επίδραση που έχει η βαθμιαία προσθήκη κάθε συσκευής στον κεντρικό και συντονισμένο έλεγχο. Επίσης, εκτιμήθηκε πόσο επηρεάζουν η θέση και τα ονομαστικά μεγέθη της ισχύος και της ενέργειας της μονάδας αποθήκευσης στην ρύθμιση της τάσης και στις απώλειες ενέργειας. Επιπλέον, αξιολογήθηκαν τα οφέλη που προκύπτουν από την χρήση μεταβαλλόμενου Συντελεστή Ισχύος των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής. Τέλος, εκπονήθηκε ανάλυση της επίδρασης της χρησιμοποίησης ελεγχόμενων φορτίων στο Hosting Capacity, στην ρύθμιση της τάσης, στις απώλειες του δικτύου και σε άλλα τεχνικά θέματα.

Τα δίκτυα διανομής που αφορά η παρούσα μελέτη, χαρακτηρίζονται από υψηλή διείδυση διεσπαρμένης παραγωγής και χρήση νέων τεχνολογιών, όπως είναι οι αποθηκευτικές μονάδες και η διαχείριση της ζήτησης. Η συγκεκριμένη διερεύνηση υλοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος GAMS, το οποίο βρίσκει σε κάθε περίπτωση τη βέλτιστη λύση για τη διαχείριση των συσκευών του δικτύου. .

Για την εκπόνηση της εργασίας, αρχικά συγκεντρώθηκαν και μελετήθηκαν αντίστοιχες εργασίες που αφορούσαν την βελτιστοποίηση λειτουργίας των δικτύων διανομής, την αποθήκευση της ενέργειας και τη διαχείριση της ζήτησης. Στη συνέχεια, ακολούθησε η ενασχόληση με το λογισμικό προσομοίωσης του συστήματος και η κατασκευή του μοντέλου. Στο επόμενο στάδιο, πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις που αφορούσαν τα ελεγχόμενα φορτία, που ήταν και ο αρχικός στόχος της διπλωματικής, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν και οι προσομοιώσεις για την ανάλυση ευαισθησίας ως προς τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, την επίδραση του ΣΙ των σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής και τη σταδιακή προσθήκη της δυνατότητας ελέγχου κάθε συσκευής. Στο τέλος συντάχθηκε η αναφορά της διαδικασίας και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύονται τα στοιχεία ενός δικτύου διανομής και ο τρόπος λειτουργίας τους. Επίσης εισάγονται οι έννοιες της διεσπαρμένης παραγωγής, του έξυπνου δικτύου, της αποθήκευσης ενέργειας, της διαχείρισης της ζήτησης και της βελτιστοποίησης.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση στο τομέα της βέλτιστης διαχείρισης των δικτύων διανομής. Παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι, με τους οποίους έχει αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο θέμα σε άλλες δημοσιεύσεις στο παρελθόν. Τέλος παρατίθενται αρκετές δημοσιεύσεις που αφορούν την βέλτιστη λειτουργία των δικτύων διανομής, την αποθήκευση ενέργειας και τη διαχείριση της ζήτησης σε περίπτωση που ο αναγνώστης επιθυμεί να μελετήσει περαιτέρω.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο μοντέλο, όπως η τοπολογία και τα χαρακτηριστικά του δικτύου και οι χρονοσειρές. Επίσης, σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται και ο τρόπος με τον οποίον διαχειρίστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία τα ελεγχόμενα φορτία, ενώ παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές, οι ισοτικές και οι ανισοτικές εξισώσεις, οι επιπλέον περιορισμοί και οι αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάπτυξη του μοντέλου. Επιπλέον, παρατίθεται και ένα δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε. Τέλος αναλύεται ο τρόπος με τον οποίον παρουσιάζονται τα δεδομένα, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση τους.

Στα κεφάλαια 5 έως 8 παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Αυτά περιλαμβάνουν τη βελτίωση που επιφέρει ο κεντρικός και συντονισμένος έλεγχος κάθε συσκευής του δικτύου, την ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με την θέση και το μέγεθος της μπαταρίας, την επίδραση του ΣΙ των σταθμών ΔΠ και την ανάλυση ευαισθησίας με βάση το ποσοστό διείσδυσης ελεγχόμενων από τον διαχειριστή φορτίων στο δίκτυο.

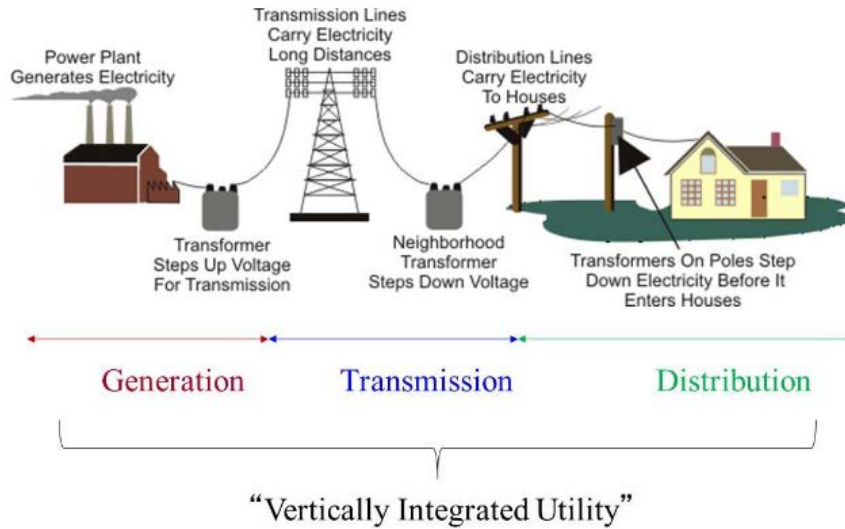
## 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτή που δρομολόγησε τη δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση και είναι ένα από τα πιο καθοριστικά θέματα για την ανάπτυξη και την ευημερία των σύγχρονων κοινωνιών. Η βιομηχανία κάθε χώρας στηρίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια για αυτό και αποτελεί ένα βασικό πυλώνα για την εξέλιξη της. Τις τελευταίες δεκαετίες, πραγματοποιήθηκε μία στροφή στην εξεύρεση νέων τρόπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς τα προηγούμενα χρόνια η παραγωγή στηριζόταν κυρίως στους γαιάνθρακες και το πετρέλαιο, τα αποθέματα των οποίων μειώνονται σημαντικά, ενώ σημαντικό παράγοντα αποτέλεσε και η κλιματική αλλαγή και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τις οποίες συνδέεται η παραδοσιακή μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, αν και τα τελευταία χρόνια οι τεχνολογίες που αφορούν την «πράσινη» ενέργεια γνώρισαν τεράστια ανάπτυξη, η διείσδυση τους στο ελληνικό ΣΗΕ παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις περιορισμένες δυνατότητες των υφιστάμενων δικτύων, τα οποία δεν είναι σε θέση να διαχειριστούν τη στοχαστικότητα και τη περιοδικότητα που χαρακτηρίζουν τη φωτοβολταϊκή και αιολική παραγωγή. Επομένως, για την ολοκλήρωση της μετάβασης στην «πράσινη» ενέργεια και την σταδιακή αποδέσμευση από τους γαιάνθρακες, κρίνεται απαραίτητη η αναβάθμιση της λειτουργίας του υπάρχοντος ΣΗΕ.

### 2.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας – ΣΗΕ

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Η καλή λειτουργία ενός ΣΗΕ προϋποθέτει την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό οικονομικό και οικολογικό κόστος, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. Ένα ΣΗΕ συνίσταται από τρεις ξεχωριστές λειτουργίες: τη παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1: Οι τρεις λειτουργίες ενός ΣΗΕ

- Η **παραγωγή** της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τους κύριους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μαζί με τους μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης για τη μεταφορά του ρεύματος σε υψηλή και σε υπερυψηλή τάση.
- Η **μεταφορά** ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης και από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Το σύστημα της μεταφοράς είναι το ευρύτερο μέρος ενός ΣΗΕ και λειτουργεί βέλτιστα στα υψηλότερα επίπεδα τάσης για την ελαχιστοποίηση των απωλειών.
- Η **διανομή** ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει στους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης αποτελούν και αντικείμενο εξέτασης αυτής της διπλωματικής εργασίας. [1]



Εικόνα 2: Χάρτης ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος Απρίλιος 2017 [2]

## 2.3 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ)

Με τον όρο Δίκτυα Διανομής εννοούμε τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης τα οποία ξεκινούν από τις πύλες αναχωρήσεων μέσης τάσης στους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και φτάνουν μέχρι τον μετρητή της παρεχόμενης ενέργειας στον καταναλωτή. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία στην ουσία αποτελείται από το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης. Τα Δίκτυα Διανομής περιλαμβάνουν:

- Γραμμές διανομής (εναέρια, υπόγεια και υποβρύχια καλώδια ΜΤ), που μεταφέρουν την ενέργεια από τη ΜΤ στη ΧΤ και τη διανέμουν στους καταναλωτές.
- Υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, που αλλάζουν το επίπεδο τάσης της μεταφερόμενης ενέργειας.
- Εξοπλισμό που αφορά στη λειτουργία, στον έλεγχο και στη ζεύξη του δικτύου (διακόπτες αυτόματης επαναφοράς, διακόπτες απομόνωσης, ασφαλειοαποζεύκτες, πυκνωτές ΜΤ, ρυθμιστές τάσης κλπ).

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων. Αυτό διαπιστώνεται και από το γεγονός πως τα δίκτυα διανομής κάθε χώρας έχουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, σε αντίθεση με τα δίκτυα μεταφοράς που είναι διεθνώς όμοια. Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται, ανάλογα με την τάση σε δίκτυα υψηλής τάσης (60-150kV), δίκτυα μέσης τάσης (1-60kV) και δίκτυα χαμηλής τάσης (100-1000V). Οι αναφερόμενες τάσεις είναι πολικές τριφασικού συστήματος. Κατασκευαστικά διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια.

Τα εναέρια δίκτυα συναντώνται κυρίως σε αγροτικές περιοχές και κατασκευάζονται συνήθως σε ακτινική μορφή, δηλαδή οι γραμμές από τις οποίες αποτελείται το δίκτυο, τροφοδοτούνται από το ένα άκρο τους. Είναι φθηνότερα στην κατασκευή τους και έχουν καλύτερη και ευκολότερη αποκατάσταση βλαβών σε σχέση με τα υπόγεια. Το μειονέκτημα τους είναι ότι καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο, ο οποίος στις πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι περιορισμένος, ενώ δεδομένη είναι και η αισθητική ενόχληση.

Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές τα δίκτυα διανομής κατασκευάζονται κυρίως υπόγεια τόσο για λόγους αισθητικής όσο και για χωροταξικούς λόγους. Τα υπόγεια δίκτυα διανομής έχουν ελάχιστη αισθητική επίπτωση και διακρίνονται σε:

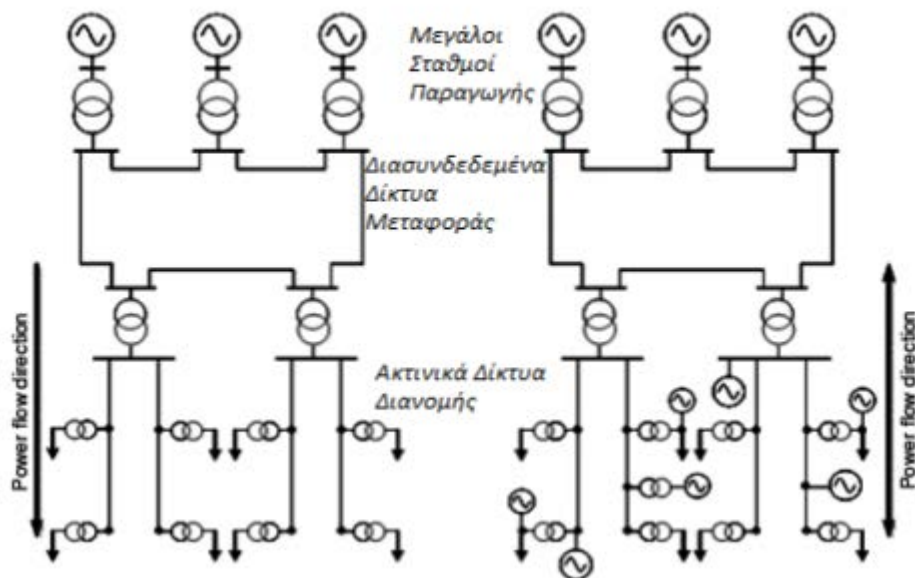
1. Βρογχοειδή: όπου οι γραμμές διανομής ΜΤ ή ΧΤ ξεκινούν και τελειώνουν στο ίδιο σημείο (υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ ή ΜΤ/ΧΤ).

2. Ατρακτοειδή: όπου οι γραμμές ξεκινούν από έναν υποσταθμό και καταλήγουν σε κάποιον άλλο.
3. Διπλής τροφοδότησης: όπου οι καταναλωτές τροφοδοτούνται από δύο διαφορετικές αναχωρήσεις.
4. Δικτυωτά: στα οποία τα καλώδια είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελούν ένα πλέγμα τροφοδοσίας. [1] [3]

## 2.4 Διεσπαρμένη Παραγωγή

### 2.4.1 Ορισμός

Για περισσότερο από μισό αιώνα, η ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει βασιστεί σε σταθμούς με μεγάλες μονάδες παραγωγής συγκεντρωμένους σε μικρές τοποθεσίες. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο, ένας συνδυασμός επιρροών έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον στη χρήση μικρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται απευθείας στο σύστημα διανομής (ΜΤ και ΧΤ) ή στη πλευρά του μετρητή του καταναλωτή, η οποία ονομάζεται διεσπαρμένη παραγωγή. [4] [5]



Εικόνα 3: Συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (αριστερά) και ηλεκτρικό δίκτυο με ΔΠ (δεξιά)

## 2.4.2 Τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή προέρχεται από ανανεώσιμες ή μη πηγές ενέργειας χρησιμοποιώντας καινούριες ή συμβατικές τεχνολογίες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι τύποι τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής (Distributed Energy Resources – DER). [5]

- **Μικροτουρμπίνες:** Είναι μικρές τουρμπίνες που παράγουν ισχύ μεταξύ 25 και 500 kW. Οι μικροτουρμπίνες προήλθαν από τεχνολογίες που υπήρχαν σε μεγάλα φορτηγά ή στις τουρμπίνες των αεροσκαφών.
- **Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης:** Οι παραδοσιακές τουρμπίνες παράγουν ισχύ μεταξύ 500kW και 25MW για ΔΠ και μέχρι 250MW για κεντρική παραγωγή ισχύος. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν είναι φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή ένας συνδυασμός καυσίμων. Οι σύγχρονες τουρμπίνες έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται από 20 έως 45% στο πλήρες φορτίο.
- **Μηχανές εσωτερικής καύσης:** Μία μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5kW για εφεδρική γεννήτρια σε κατοικίες) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα όπως βενζίνη, φυσικό αέριο και diesel.
- **Μηχανές Stirling:** Οι μηχανές Stirling έχουν κατηγοριοποιηθεί ως μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι σφραγισμένα συστήματα με ένα αδρανές αέριο που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Συνήθως είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη (1-25 kW) και προς το παρόν παράγονται σε μικρές ποσότητες για εξειδικευμένες εφαρμογές στη διαστημική και τη θαλάσσια βιομηχανία.
- **Κυψέλες καυσίμου:** Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διεργασία (όχι καύση) για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Επιπροσθέτως της παροχής ενέργειας, μπορούν να προσφέρουν μια πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου και του νερού ή για ψύξη απορρόφησης. Σε κάποιες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου μειώνουν το κόστος για τις υπηρεσίες ηλεκτρισμού 20 με 40%.
- **Αποθήκευση ενέργειας – Συστήματα UPS:** Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας δεν παράγουν καθαρή ενέργεια αλλά μπορούν να προμηθεύουν ηλεκτρική ενέργεια για μικρά χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση



πτώσεων τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης που συμβαίνουν όταν η εταιρία παροχής ή οι πελάτες αλλάζουν προμηθευτές ή φορτία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως Συστήματα Αδιάλειπτου Τροφοδοσίας (UPS). Σαν τέτοια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες διασπαρμένης παραγωγής.

- **Φωτοβολταϊκά συστήματα:** Τα φωτοβολταϊκά κελιά (PV) μετατρέπουν απευθείας το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς να έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς εκπομπές.
- **Αιολικά συστήματα:** Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος είναι ψηλός ούτως ώστε να εκμεταλλευόμαστε τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων όπως δέντρα, λόφοι και κτίρια. Όπως περιστρέφεται η τουρμπίνα με τον άνεμο, μια γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να ποικίλλει σε μέγεθος από λίγα kW σε οικιακές εφαρμογές έως πάνω από 5 MW.

### 2.4.3 Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής σε διάφορους τομείς είναι τα ακόλουθα: [6]

#### 1) Λειτουργικά:

- Η διεσπαρμένη παραγωγή βοηθά στην αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων.
- Υποστήριξη του δικτύου με επικουρικές υπηρεσίες, όπως είναι η παροχή άεργου ισχύος και υποστήριξη τάσης
- Όσο αυξάνεται η ζήτηση, η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει εναλλακτικές λύσεις για αξιόπιστη και οικονομική ισχύ σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις. Προσφέρει σταθερότητα, διασφάλιση στα απρόοπτα και δυνατότητα «black start» (η δυνατότητα μιας μονάδας παραγωγής κατά τη διάρκεια αποκατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να μεταβεί από απενεργοποιημένη κατάσταση σε κατάσταση λειτουργίας και να αρχίσει να παράγει ενέργεια χωρίς να υποβοηθηθεί από το ηλεκτρικό σύστημα).

- Μπορεί να μειώσει την υπερφόρτωση (από την υψηλή ζήτηση φορτίου) των γραμμών διανομής. Αποσυμφορούνται οι ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς και διανομής των μετασχηματιστών.
- Είναι πρακτικά πιο εύκολο να βρεθούν τοποθεσίες για διεσπαρμένη παραγωγή από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνεται και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.
- Ανταποκρίνεται γρηγορότερα σε νέες απαιτήσεις ισχύος.
- Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής είναι ότι οι αυξομειώσεις στην εγκατεστημένη ισχύ μπορούν να γίνουν με μικρές προσαυξήσεις σε πλήρη συμφωνία με τη ζήτηση, σε αντίθεση με την κατασκευή μεγάλων, κεντρικών εργοστασίων ενέργειας κατασκευασμένων για την κάλυψη μελλοντικής κυρίως και όχι τρέχουσας ζήτησης.

## **2) Οικονομικά:**

- Σημαντική ποσότητα ενέργειας που παράγεται από τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής και εγχέεται στο δίκτυο μπορεί να αντισταθμίσει την αγορά ή/και τη παραγωγή ενέργειας από την επιχείρηση ηλεκτρισμού.
- Η παραγωγή της ενέργειας στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται, ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, το οποίο είναι ένα σημαντικό μέρος (πάνω από 30%) του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού.
- Η ιδιοκατανάλωση οδηγεί σε μείωση του κόστους και της ζήτησης αιχμής σε μια εγκατάσταση και συνεπώς μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης.

## **3) Στην κατεύθυνση της αειφόρου ανάπτυξης:**

- Προσφέρει καθαρότερη, πιο αθόρυβη λειτουργία και μειώνει τις εκπομπές ρύπων ελαττώνοντας την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων.
- Μειώνονται οι επενδύσεις στην κατασκευή ή την ενίσχυση των δικτύων μεταφοράς και διανομής, αλλά και κεντρικών σταθμών παραγωγής και υποσταθμών.
- Επιτρέπει την πιο αποτελεσματική οικονομική διαχείριση ενέργειας και φορτίου.

### 2.4.3 Εμπόδια για την διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής στα ΣΗΕ προσκρούει στους περιορισμούς και τις προδιαγραφές που σχετίζονται με την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας και την ευστάθεια των συστημάτων. Μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να συνδέεται στο δίκτυο τηρώντας τις αυστηρές προδιαγραφές που αποσκοπούν στην ομαλή λειτουργία του δικτύου. Αυτές οι προδιαγραφές αφορούν: [7] [8]

- **Την επάρκεια του δικτύου:** Τα στοιχεία του δικτύου στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί η εγκατάσταση παραγωγής πρέπει να μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες λειτουργίας και προστασίας του δικτύου και της εγκατάστασης. Αυτά τα στοιχεία είναι ο Υ/Σ που εξυπηρετεί την εγκατάσταση, οι Μ/Σ, οι γραμμές του δικτύου και τα μέσα ζεύξης και προστασίας
- **Τη διατήρηση της τάσης σε επιτρεπτά όρια:** Όταν τα εξυπηρετούμενα φορτία είναι χαμηλά, δημιουργούνται υπερτάσεις, με αποτέλεσμα να απαιτείται συντονισμένη λειτουργία των μονάδων και ειδικός εξοπλισμός όπως οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ (Load Tap Changers, μεταβλητού λόγου μετασχηματισμού) για το συνεχή έλεγχο της τάσης
- **Τη δημιουργία αρμονικών συνιστωσών της τάσης και του ρεύματος:** Η τάση και τα ρεύματα του δικτύου εμφανίζουν απόκλιση από την ιδεατή καθαρά ημιτονοειδή κυματομορφή. Οι εξάρσεις και οι βυθίσεις που εμφανίζονται στις κυματομορφές προσδίδουν πριονωτή μορφή είναι και αυτές μικρές κυματομορφές με αρμονικές συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας της τάσης ή του ρεύματος, οι οποίες μπορούν να εντοπιστούν και να αναλυθούν. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και τα μη γραμμικά κυκλώματα ισχύος προκαλούν τη δημιουργία αρμονικών συνιστωσών που πρέπει να καταπιέζονται.
- **Τη συμβολή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του σημείου σύνδεσης:** Η ισχύς μιας μονάδας παραγωγής επηρεάζει την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου και, κατά συνέπεια, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που προκύπτουν σε ενδεχόμενα σφάλματα στο δίκτυο
- **Τις αργές μεταβολές της τάσης:** Έτσι ονομάζονται οι μεταβολές της τάσης μόνιμης κατάστασης του δικτύου που υπολογίζονται από την διακύμανση του μέσου όρου της τάσης σε διάστημα 10 min από την ονομαστική τιμή της τάσης. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να οφείλονται σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων παραγωγής ή σε μεταβολές του φορτίου του δικτύου
- **Τις ταχείες μεταβολές της τάσης:** Έτσι αποκαλούνται οποιεσδήποτε ταχείες μεταβολές της τάσης που παρατηρούνται σε χρονικές κλίμακες έως μερικά δευτερόλεπτα. Ταχείες μεταβολές συμβαίνουν λόγω χειρισμών στις εγκαταστάσεις

παραγωγής (π.χ. ζεύξη-απόζευξη, αλλαγή γεννητριών) αλλά και εξαιτίας της μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου

- **Τις εκπομπές flicker:** Είναι το φαινόμενο της οπτικής ενόχλησης από την διακύμανση της φωτεινότητας (τρεμόπαιγμα) σε λαμπτήρες πυράκτωσης. Οφείλεται και αυτό σε διακυμάνσεις στην τάση που προκαλούν οι εγκαταστάσεις παραγωγής ΗΕ. Να σημειωθεί ότι οι κύριες πηγές εκπομπών έντονων flicker είναι οι Α/Γ.
- **Τις μεταβολές της συχνότητας του ΣΗΕ:** Η συχνότητα ενός ΣΗΕ εξαρτάται κάθε στιγμή από το ισοζύγιο παραγωγής- κατανάλωσης. Οποιαδήποτε απόκλιση από αυτή την ισορροπία μεταφράζεται είτε σε απόκλιση από την επιθυμητή συχνότητα του ευρωπαϊκού δικτύου των 50Hz, είτε σε μεγάλες ροές ισχύος στις γραμμές διασύνδεσης του τοπικού δικτύου με τα γειτονικά του, που επιφέρουν καταπόνηση του εξοπλισμού των ΔΔ.

Ένα επιπλέον βασικό πρόβλημα που εμφανίζουν οι εγκαταστάσεις που εκμεταλλεύονται την ηλιακή και την αιολική ενέργεια (και δεν το εμφανίζουν οι άλλες μορφές ΔΠ) είναι η μειωμένη δυνατότητα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της παραγωγής τους. Η στοχαστικότητα των καιρικών φαινομένων μεταφράζεται, αντίστοιχα, σε συνεχώς μεταβαλλόμενη ισχύ εξόδου των εγκαταστάσεων. Το χαρακτηριστικό αυτό δυσκολεύει το βραχυχρόνιο προγραμματισμό παραγωγής εκ μέρους του διαχειριστή, και έχει ως αποτέλεσμα η διείσδυση αυτών των δύο μορφών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να έχει φθάσει, πλέον, στα όρια της. Συνολικά, η διείσδυση των ΑΠΕ φθάνει σε ένα ποσοστό 30- 40% ως προς την εγκατεστημένη ισχύ, ενώ είναι κάτω από το 20% ως προς την συνολική κατανάλωση ενέργειας και κάνουν τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ιδιαίτερα δύσκολη.

## 2.5 Έξυπνα δίκτυα ενέργειας – Smart Energy Grids

### 2.5.1 Οι αδυναμίες του τρέχοντος ηλεκτρικού δικτύου

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει φέρει προφανώς την αυτοματοποίηση στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και στα συστήματα ελέγχου της, ωστόσο σε καμία περίπτωση δε μπορούμε να πούμε ότι έφερε την επανάσταση στον τομέα αυτό, όπως έχει κάνει σε τόσους άλλους τομείς της βιομηχανίας. Με τη πάροδο του χρόνου όμως, οι απαιτήσεις μας αλλάζουν, γεγονός που απαιτεί και τα συστήματά μας να μπορούν να

συμβαδίζουν και να ανταποκρίνονται σε αυτές. Έχουμε πλέον αρχίσει να αντιλαμβανόμαστε τις αδυναμίες του παρόντος ηλεκτρικού δικτύου.

Το σημερινό δίκτυο στηρίζεται στη διακίνηση ενός τεράστιου όγκου πληροφορίας από και προς τα κέντρα παραγωγής, καθώς αποτελείται από μεγάλους κεντρικούς ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς, χτισμένους σε στρατηγικά σημεία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερφόρτωση του δικτύου και η πληροφορία από τον καταναλωτή να φτάνει πολλές φορές με καθυστερήσεις στον παραγωγό (high data latency), γεγονός το οποίο στερεί τη δυνατότητα στο σύστημα να διενεργεί έλεγχο σε πραγματικό χρόνο.

Μία άλλη αδυναμία του τρέχοντος δικτύου έγκειται στη μονόπλευρη φύση της επικοινωνίας και διανομής ενέργειας, η οποία υπαγορεύει πως ενέργεια μεταφέρεται μόνο από τον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό στο δίκτυο. Επομένως το δίκτυο αδυνατεί να ενσωματώσει με επιτυχία τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας με τρόπο που να μην επηρεάζεται η αξιοπιστία του συστήματος, έχει παράλληλα και σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, η ρύπανση του οποίου αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στις μέρες μας. [5] [8]

Επιπλέον, η αδυναμία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με εύκολο τρόπο, έχει ως αποτέλεσμα, προκειμένου το τρέχον δίκτυο να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της επόμενης ημέρας, να γίνεται μια πρόβλεψη για την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Το φορτίο δεν μπορεί να προβλεφθεί πάντα με απόλυτη επιτυχία και αυτό έχει πολύ συχνά ως αποτέλεσμα είτε την παραγωγή περισσότερης ενέργειας από όση πραγματικά θα χρειαστεί, με αποτέλεσμα η επιπλέον αυτή ενέργεια να μη χρησιμοποιείται πουθενά (αλλά το κόστος της παραγωγής της να επιβαρύνει τον πελάτη), είτε τη διακοπή ρεύματος (rolling blackouts) λόγω μιας κακής εκτίμησης η οποία είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή λιγότερης ενέργειας από αυτή που πραγματικά ζητήθηκε την επόμενη μέρα. [8]

Τέλος, ένα ακόμα πολύ σημαντικό μειονέκτημα του σημερινού δικτύου, είναι η έλλειψη δυνατότητας να επανέλθει σε κατάσταση λειτουργίας κατόπιν οποιασδήποτε βλάβης, χωρίς τη φυσική παρέμβαση ενός χειριστή. [6]

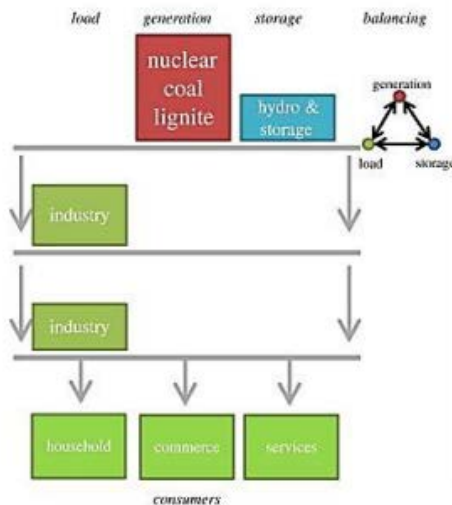
Κρίνεται λοιπόν απαραίτητος ο επανασχεδιασμός του ηλεκτρικού δικτύου, ώστε αυτό να μπορεί να ανταποκριθεί στις αυξανόμενες απαιτήσεις της εποχής. Στο νέο αυτό δίκτυο οι τεχνολογίες της επικοινωνίας και της πληροφορίας θα διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο σε όλα τα επιμέρους στάδια από την παραγωγή μέχρι την κατανάλωση. Κάπως έτσι γεννήθηκε η ιδέα του Smart Grid. [9]

## 2.5.2 Ορισμός Έξυπνου Ηλεκτρικού Δικτύου

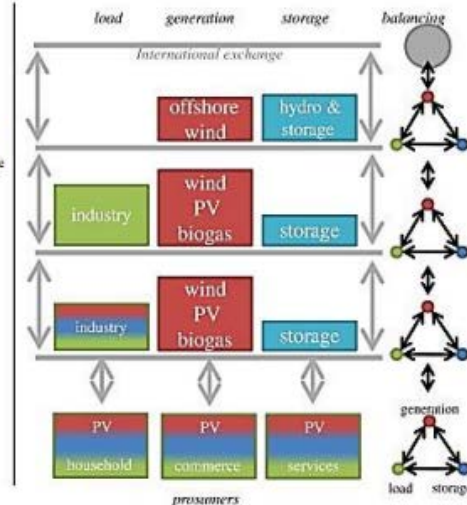
Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή [10] παρουσιάζει το Έξυπνο Δίκτυο ως ένα εξελιγμένο ηλεκτρικό δίκτυο, του οποίου αναπόσπαστο κομμάτι είναι η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ παραγωγού και καταναλωτή και τα ευφυή συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης της λειτουργίας του. Σε μία άλλη εκδοχή, το European Commission Task Force for Smart Grid [11] ορίζει το έξυπνο δίκτυο ως ένα ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο με αποδοτικό τρόπο μπορεί να ενσωματώσει τη συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των παραγόντων που βρίσκονται συνδεδεμένοι σε αυτό (παραγωγοί, καταναλωτές ή και καταναλωτές που παράγουν ενέργεια) ώστε να διασφαλίσει ένα οικονομικά αποδοτικό, βιώσιμο σύστημα ενέργειας με χαμηλές απώλειες και υψηλής ποιότητας υπηρεσία, σε ένα ασφαλές και αξιόπιστο δίκτυο.

Από τους παραπάνω ορισμούς, μπορεί κανείς να καταλάβει πως ένα Έξυπνο Δίκτυο δεν είναι τίποτα άλλο παρά η μετεξέλιξη του τρέχοντος ηλεκτρικού δικτύου σε ένα δίκτυο στο οποίο η τεχνολογία της πληροφορίας και επικοινωνίας θα έχει τον πρώτιστο ρόλο. Στην ουσία, η τεχνολογία της πληροφορίας θα επιτρέπει πλέον τον απομακρυσμένο έλεγχο όλων των σταδίων από την παραγωγή στη κατανάλωση, την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης (δίνοντας την ευκαιρία στον καταναλωτή να μετέχει και στην παραγωγή ως prosumer), την εξασφάλιση βιωσιμότητας (sustainability) και ποιότητας υπηρεσιών, την κατανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την επεξεργασία της πληροφορίας σε τοπικό επίπεδο, την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας και την έξυπνη μέτρηση της κατανάλωσης της, έχοντας ως κυρίαρχο στόχο την εξασφάλιση αξιοπιστίας, αποδοτικότητας και ασφάλειας. [9]

### Top-down supply system (central control)



### → Multi-level exchange system (subsidiarity, shared responsibility)



Εικόνα 4: Μεταβολή του τρόπου διατήρησης της ισορροπίας παραγωγής και ζήτησης στο σύγχρονο δίκτυο [12]

### 2.5.3 Πλεονεκτήματα Έξυπνου Ηλεκτρικού Δικτύου

Τα έξυπνα δίκτυα υπόσχονται μια πληθώρα πλεονεκτημάτων και βελτιώσεων, οι οποίες αφορούν πολλαπλούς τομείς. Παρακάτω καταγράφονται κάποιες από τις ιδιότητες ενός έξυπνου δικτύου και πώς αυτές αναμένονται να βελτιώσουν το υπάρχον δίκτυο: [12] [13] [14]

- **Ποιότητα ενέργειας.** Η χρήση εξελιγμένων μεθόδων και εξοπλισμού παρακολούθησης του δικτύου οδηγεί σε έγκαιρη διάγνωση και διόρθωση των σφαλμάτων εξασφαλίζοντας τη ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην εξυπηρέτηση μεγαλύτερου εύρους πελατών με διαφορετικές ανάγκες, όπως για παράδειγμα ευαίσθητος εξοπλισμός όπως υπολογιστικά συστήματα που χρειάζονται σταθερή παροχή ηλεκτρισμού.
- **Αξιοπιστία.** Το έξυπνο δίκτυο έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει προβλήματα και αυτόματα να κατευθύνει τη ροή της ενέργειας ή να απομονώνει μια περιοχή ώστε να ελαχιστοποιεί την απώλεια παροχής ηλεκτρισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ανθεκτικότητα του δικτύου σε φυσικές καταστροφές, επιθέσεις ή

διαταραχές. Αυτή η ιδιότητα λέγεται και self-healing, δηλαδή αυτο-ίαση του δικτύου χωρίς την παρέμβαση ανθρώπινου δυναμικού.

- **Ευελιξία.** Το έξυπνο δίκτυο διευκολύνει τη σύνδεση και λειτουργία των πηγών ενέργειας όλων των μεγεθών και τεχνολογιών, όπως ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πηγών αποθήκευσης ενέργειας, μικρής κλίμακας συστημάτων συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας και κατανεμημένων πηγών παραγωγής.
- **Μείωση κόστους.** Το δίκτυο διαχειρίζεται τους πόρους που έχει αποδοτικά, βελτιστοποιώντας τη λειτουργία του, έχοντας έτσι την ικανότητα να αντιμετωπίζει αυξημένη ζήτηση ενέργειας, χωρίς να απαιτούνται πρόσθετες υποδομές. Επιπλέον, η παρακολούθηση του εξοπλισμού και η έγκαιρη αντικατάστασή του σε περίπτωση γήρανσης ή βλάβης, ελαχιστοποιεί τα κόστη που σχετίζονται με την αγορά εξοπλισμού, συντήρησης και λειτουργίας του.
- **Απελευθέρωση της αγοράς.** Δίνεται η δυνατότητα σε νέες επιχειρήσεις να μπορούν να εισέρχονται και να καινοτομούν εύκολα σε διάφορους τομείς του ηλεκτρικού δικτύου, ενώ αυξάνεται και ο ανταγωνισμός.
- **Ενδυνάμωση του καταναλωτή.** Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του έξυπνου δικτύου είναι οι δυνατότητες που προσφέρει στον καταναλωτή. Οι καταναλωτές μέσω της ενσωμάτωσης έξυπνων μετρητών, έξυπνων συσκευών και άλλων τεχνολογιών στο δίκτυο, είναι σε θέση πλέον να προσαρμόζουν τις συνήθειές τους βασισμένοι σε προσωπικά κίνητρα, όπως οικονομικά ή περιβαλλοντικά.
- **Φιλικό στο περιβάλλον.** Η ευρεία ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με την αποφυγή ενεργοποίησης μονάδων με μεγάλο περιβαλλοντικό κόστος τις ώρες αιχμής, καθιστά το έξυπνο δίκτυο κατά κύριο λόγο "πράσινο", συμβάλλοντας στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής και οδηγώντας σε σημαντική περιβαλλοντική βελτίωση. [15]

#### 2.5.4 Οι προκλήσεις του Έξυπνου Δικτύου

Ωστόσο, όπως κάθε μεγάλη αλλαγή, η μετάβαση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε μια πιο εξελιγμένη μορφή έχει εγείρει κάποια ζητήματα και φόβους, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν με προσοχή και επιμέλεια ώστε η υλοποίηση της να είναι επιτυχής. Παρακάτω φαίνονται κάποια από αυτά τα ζητήματα:

- **Ασφάλεια.** Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των έξυπνων δικτύων αφορά την ασφάλεια των συστημάτων του [16]. Το κακόβουλο λογισμικό και οι κυβερνοεπιθέσεις που συναντάμε σήμερα στα παραδοσιακά υπολογιστικά συστήματα, μπορούν εύκολα να διευρυνθούν στα έξυπνα δίκτυα με στόχο την



κλοπή ευαίσθητων πληροφοριών ή την αποσταθεροποίηση του δικτύου [17]. Αν μάλιστα λάβουμε υπόψη μας πόσο βασική υποδομή μιας περιοχής είναι το ηλεκτρικό δίκτυο, τότε τα αποτελέσματα μιας τέτοιας επίθεσης θα μπορούσαν να είναι καταστροφικά. Επομένως είναι πολύ σημαντικό κατά τον σχεδιασμό των έξυπνων δικτύων, η ασφάλεια να αποτελεί πρωταρχικό μέλημα και οι λύσεις που προτείνονται να ελέγχονται εκτενώς από αρμόδια εργαστήρια για την αξιοπιστία και αντοχή τους σε απειλές. [18]

- **Ιδιωτικότητα των καταναλωτών.** Με την εφαρμογή των τεχνολογιών του έξυπνου δικτύου όπως έξυπνοι μετρητές, αισθητήρες και η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ κέντρου ελέγχου και των συσκευών αυτών, έρχεται στην επιφάνεια ένα άλλο ευαίσθητο ζήτημα, αυτό της ιδιωτικότητας των καταναλωτών. Οι λεπτομερείς πληροφορίες για τη χρήση ηλεκτρισμού που καταγράφονται για κάθε πελάτη μπορούν να αποκαλύψουν με μεγάλη ακρίβεια τις συνήθειες και τις συμπεριφορές του καταναλωτή, και να δημιουργήσουν ένα προφίλ των συσκευών που χρησιμοποιεί. [19] Αυτή η πράξη εκλαμβάνεται ως παραβίαση της ιδιωτικότητας και της προσωπικής ζωής των καταναλωτών. Αν επιπλέον τα δεδομένα αυτά γίνουν διαθέσιμα σε κακόβουλους φορείς, τότε υπάρχει ακόμα και φυσικός κίνδυνος των πελατών. Για παράδειγμα, αν μια εταιρεία διαθέτει μέσω διαδικτύου τα δεδομένα στους πελάτες της χωρίς κατάλληλη προστασία και κρυπτογράφηση, κάποιος διαρρήκτης μπορεί να τα αποκτήσει και να τα χρησιμοποιήσει για να συμπεράνει πότε μπορεί να λείπουν οι ιδιοκτήτες από το χώρο, βασιζόμενος στην πτώση κατανάλωσης ενέργειας. [20] [21]
- **Υψηλά κόστη.** Όπως είναι αναμενόμενο, η μετάβαση στο έξυπνο δίκτυο θα έχει κάποιο σημαντικό κόστος. Τα πιθανά υψηλά κόστη για αντικατάσταση του εξοπλισμού στα σπίτια των καταναλωτών μπορεί να καθυστερήσουν την ευρεία αποδοχή των μετρητών. Επιπλέον, η αδυναμία εγκατάστασης του εξοπλισμού από τις οικονομικά ασθενέστερες ομάδες του πληθυσμού θα μπορούσε να οδηγήσει σε χαμηλότερης ποιότητας ενέργεια ή και ολική απώλεια πρόσβασης στο ηλεκτρικό δίκτυο. [22]

Συμπερασματικά, παρόλο που η έλευση του έξυπνου δικτύου δίνει ελκυστικές υποσχέσεις που θα οδηγήσουν σε ένα καλύτερο μέλλον, δε λείπουν τα πιθανά ρίσκα και οι απειλές σε κάποιους τομείς. Η επιτυχία της μετάβασης στα έξυπνα δίκτυα βασίζεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στη σωστή και λεπτομερή ενημέρωση όλων των εμπλεκόμενων φορέων, η οποία θα εξαλείψει αδικαιολόγητους φόβους και αρνητικές αντιλήψεις, αλλά και τη σωστή αντιμετώπιση και διευθέτηση των λογικών αμφιβολιών για υπαρκτά ζητήματα της μετάβασης σε αυτή την επόμενη γενιά συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα πολύ αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι η περίπτωση της Ολλανδικής κυβέρνησης,

η οποία το 2008 ανακάλεσε τα σχέδια για υποχρεωτική εγκατάσταση έξυπνων μετρητών, λόγω αντιδράσεων της Ολλανδικής Ένωσης Καταναλωτών, η οποία θεώρησε ότι ζητήματα ιδιωτικότητας και ασφάλειας των δεδομένων, όπως αυτά αναφέρθηκαν παραπάνω, θα συνιστούσαν παραβίαση της Σύμβασης για την Προστασία των Δικαιωμάτων του Ανθρώπου και των Θεμελιωδών Ελευθεριών. Ως αποτέλεσμα αυτού, η κυβέρνηση άλλαξε τη νομοθεσία ώστε η εγκατάσταση να γίνει προαιρετική. [15] [23]

## 2.6 Αποθήκευση Ενέργειας

### 2.6.1 Εισαγωγή

Η αποδοτική αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας έχει αποτελέσει μια μεγάλη πρόκληση για την ανθρωπότητα, και η δυσκολία να επιτευχθεί εξηγεί εν μέρει την κατασκευή και διαχείριση των ηλεκτρικών δικτύων με γνώμονα την άμεση κατανάλωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. [24] Οικονομικοί και τεχνολογικοί παράγοντες περιόρισαν την εφαρμογή της στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, με εξαίρεση τις υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Ωστόσο, η περαιτέρω ανάπτυξη της αποθήκευσης υδραυλικής ενέργειας είναι περιορισμένη σε σχέση με την ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας που έχει προκύψει, λόγω της μεταβλητότητας και της στοχαστικότητας των αναπτυσσόμενων ανανεώσιμων πηγών, της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας. Γι αυτό το λόγο νέες τεχνολογίες αναπτύσσονται σχετικά με την αποθήκευση ενέργειας. Η μπαταρία φαίνεται να είναι η πιο υποσχόμενη από αυτές λόγω των πρόσφατων βελτιώσεων στην τεχνολογία της και στην οικονομία χώρου που προσφέρει. Η αποθήκευση γρήγορης απόκρισης, έχει την τάση να επιδρά στην καμπύλη ζήτησης μετασχηματίζοντάς την σε πιο επίπεδη με αποτέλεσμα, να ενισχύει την αξιοπιστία του δικτύου. Επίσης οι μπαταρίες, λόγω της δυνατότητας τους να αποκρίνονται ταχύτατα, καταστούν δυνατή την πραγματοποίηση ταχύτατων ελέγχων σε έξυπνα δίκτυα, ενώ μπορούν να συμβάλλουν και στην αποσυμφόρηση των δικτύων διανομής και μεταφοράς. [15] [25]

### 2.6.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Οι διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που υπάρχουν έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως ισχύς, ενέργεια, αποδοτικότητα, διάρκεια ζωής, διάρκεια κύκλου φόρτισης, επιβάρυνση στο περιβάλλον, κόστος, χρόνος απόκρισης και επιλέγονται ανάλογα με την εφαρμογή και τις ανάγκες της. Μπορούν να

κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες ομάδες ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες σχεδιάστηκαν: [26]

- εφαρμογές ισχύος
- εφαρμογές ενέργειας.

Οι εφαρμογές ισχύος είναι αυτές που απαιτούν υψηλή ισχύ σε πολύ μικρό χρόνο εκφόρτισης. Αντιθέτως, οι εφαρμογές ενέργειας έχουν μεγαλύτερους χρόνους εκφόρτισης με σκοπό να δώσουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας.

Μπορούμε να θεωρήσουμε τις ακόλουθες έξι βασικές κατηγορίες τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας: [27]

- **Μπαταρίες στερεάς κατάστασης.** Ένα εύρος από ηλεκτροχημικές μεθόδους αποθήκευσης, που περιλαμβάνουν εξελιγμένες χημικές μπαταρίες και πυκνωτές.
- **Μπαταρίες ροής.** Ένα είδος μπαταριών στο οποίο η ενέργεια αποθηκεύεται κατευθείαν στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα για μεγαλύτερο χρόνο ζωής και γρήγορους χρόνους απόκρισης.
- **Σφόνδυλοι** Μηχανικές συσκευές που εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια από περιστροφή για να αποδώσουν άμεσα ηλεκτρική ενέργεια.
- **Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα** Εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν συμπιεσμένο αέρα για να δημιουργήσουν αποθέματα ενέργειας.
- **Θερμικές Τεχνολογίες** που χρησιμοποιούν θερμότητα για να παράξουν ενέργεια.
- **Αποθηκευμένα ύδατα αντλήσεως.** Χρησιμοποίηση μεγάλων όγκων νερού για αποθήκευση ενέργειας.

Οι διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν να συμπληρώσουν η μία την άλλη, υβριδικά συστήματα με πολλαπλές μεθόδους αποθήκευσης έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλότερης ποιότητας ενέργεια και ισχύ στους καταναλωτές. [15] [28]

## 2.6.3 Εφαρμογές

### 2.6.3.1 Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Παρόλο που οι τεχνολογίες που αφορούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν δεχτεί σημαντικές αλλαγές και έχουν γίνει αξιόπιστες, το πρόβλημα της στοχαστικότητας και της απρόβλεπτης συμπεριφοράς της παραγωγής, ακόμα και σε κλίμακα χρόνου μερικών δευτερολέπτων παραμένει. Η αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της εξόδου αυτών των πηγών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ενσωματώνοντας

ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο θα αποτελείται από στοιχεία γρήγορης απόκρισης που θα εξομαλύνουν τις απότομες αλλαγές στην παραγωγή που αναφέρθηκαν παραπάνω, είτε απορροφώντας είτε δίνοντας ενέργεια όταν χρειάζεται. Αυτά τα συστήματα βελτιώνουν την εισαγωγή φωτοβολταϊκών και αιολικών εγκαταστάσεων στο δίκτυο. [29] [30]

### **2.6.3.2 Στρεφόμενη εφεδρεία**

Οι διαχειριστές των δικτύων είναι υποχρεωμένοι να έχουν επιπλέον μονάδες παραγωγής που ισούνται ή είναι μεγαλύτερες από τη μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής σε λειτουργία, για να αντιμετωπίσουν πιθανό σφάλμα και αποσύνδεση αυτής της μονάδας. Επειδή οι επιπλέον μονάδες μπορεί να χρειάζονται κάποιο χρόνο για την εκκίνηση, η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι ωφέλιμη επειδή αυτά τα συστήματα είναι άμεσα διαθέσιμα και μπορούν να υποστηρίξουν το φορτίο μέχρι η εφεδρική μονάδα να μπορεί να το αναλάβει.

### **2.6.3.3 Εξομάλυνση φορτίου**

Η κατανάλωση της ενέργειας παρουσιάζει αιχμές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για να καλυφθούν αυτές οι αιχμές, οι εταιρείες παραγωγής ηλεκτρισμού χρησιμοποιούν μονάδες οι οποίες μπορούν να ξεκινήσουν σε μικρό χρόνο και να καλύψουν το επιπλέον φορτίο. Αυτές οι μονάδες μπορεί να χρησιμοποιούνται μόνο μερικές ώρες το χρόνο, γεγονός που αυξάνει πολύ το κόστος της ενέργειας που παράγεται από αυτές. Μια επίσης ακριβή εναλλακτική είναι η κατασκευή νέων σταθμών βάσης. Οι επενδύσεις αυτές μπορούν να αποφευχθούν ή να καθυστερήσουν με τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία μπορούν να καλύπτουν αυτές τις αιχμές στο φορτίο και να φορτίζονται όταν η ζήτηση είναι χαμηλή. [31]

### **2.6.3.4 Βελτίωση ποιότητας ενέργειας**

Οι ξαφνικές αλλαγές και διαφορές στην παραγωγή ενέργειας και τη ζήτηση μπορούν να αντισταθμίζονται με τα γρήγορα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στη συχνότητα του δικτύου, αλλά και η τάση να παραμένει μέσα στα επιτρεπόμενα όρια. [32] Επίσης, καθώς τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να είναι καταναλωμένα, άρα κοντά στα φορτία και στους τελικούς καταναλωτές, είναι δυνατόν να αντισταθμίζουν την άεργο ισχύ, διακυμάνσεις στην τάση, αρμονικές και ζητήματα με το συντελεστή ισχύος που

προκύπτουν από αυτά. Όλα αυτά συμβάλλουν στη σημαντική βελτίωση της ποιότητας της ενέργειας.

### 2.6.3.5 Αύξηση αξιοπιστίας

Στη περίπτωση ενός μικροδικτύου, το οποίο είναι στην απομονωμένη λειτουργία, μια μικρή διακοπή στην παραγωγή ενέργειας λόγω σφάλματος, μπορεί να αντιμετωπιστεί με παροχή ενέργειας από κάποιο σύστημα αποθήκευσης, μέχρι να διορθωθεί το σφάλμα ή να γίνει επανασύνδεση στο κύριο δίκτυο. Έτσι μειώνεται ο χρόνος και οι επιπτώσεις από τις διακοπές ενέργειας και αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος.

Όλες οι παραπάνω εφαρμογές έχουν ως αποτέλεσμα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από μειωμένα κόστη σε όλους τους τομείς που υποστηρίζονται από την αποθήκευση ενέργειας. Επιπλέον όμως, έχουν και ως αποτέλεσμα και περιβαλλοντικά οφέλη, αφού η ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που δεν καταναλώνεται τη στιγμή που παράγεται μπορεί να αποθηκευθεί και να καταναλωθεί σε διαφορετικό χρόνο, χωρίς να χρειάζεται να μπου σε λειτουργία μονάδες που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα και επιβαρύνουν το περιβάλλον. [15]

## 2.7 Ρύθμιση τάσης

### 2.7.1 Εισαγωγή

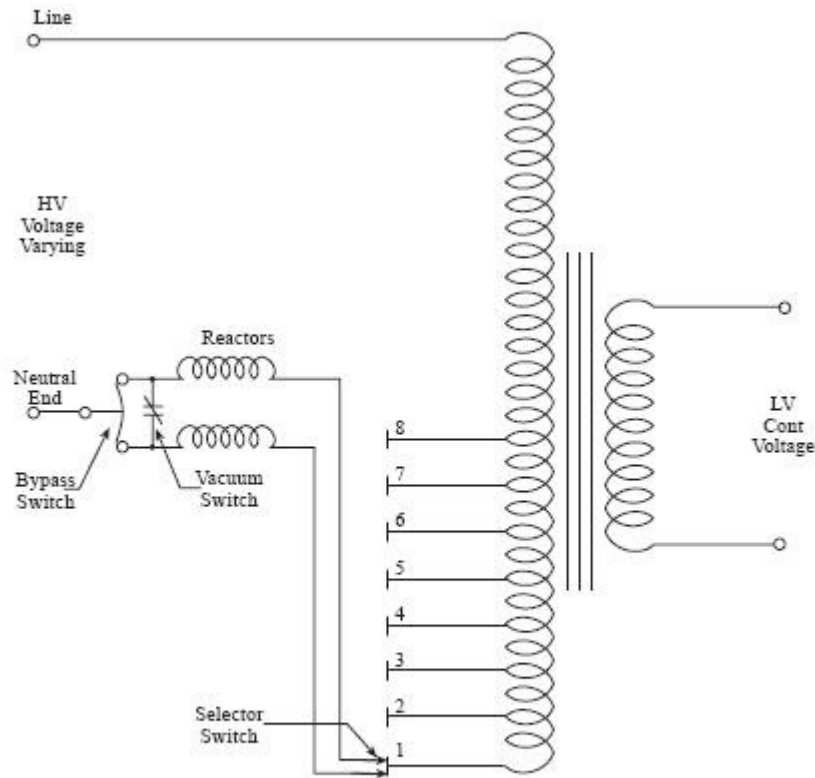
Η ρύθμιση της τάσης στα δίκτυα διανομής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που καλείται να επιλύσει ο διαχειριστής του δικτύου. Οι διακυμάνσεις στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας προκαλούν αντίστοιχες διακυμάνσεις στις τάσεις των ζυγών. Κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης φορτίου οι τάσεις βυθίζονται, ενώ αντίθετα τις ώρες χαμηλής ζήτησης παρατηρείται ανύψωση των τάσεων. Επιπλέον, όσο απομακρυνόμαστε από τον ζυγό του Μ/Σ υπάρχει πτώση τάσης στη γραμμή. Η μέση τάση κάθε κόμβου δεν πρέπει να ξεπερνά τα όρια του  $\pm 5\%$  και η διακύμανση της τάσης του κόμβου να είναι  $\pm 3\%$  γύρω από τη μέση τιμή. Τα κλασσικά μέσα που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της τάσης είναι τα ακόλουθα: [17]

- Μετασχηματιστές με Σύστημα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο-ΣΑΤΥΦ (On Load Tap Changer - OLTC)
- Ρυθμιστές Τάσης ΡΤ (Voltage Regulator VR)
- Πυκνωτές οι οποίοι εγκαθίστανται στους ζυγούς ΜΤ των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ ή επί των γραμμών ΜΤ
- Οι λήψεις των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ, οι οποίες μπορεί να μεταβάλλονται μόνον όταν ο Μ/Σ είναι αποσυνδεδεμένος από το δίκτυο και μεταβάλλουν το λόγο μετασχηματισμού κατά 0, ±2,5%, ±5%.

### 2.7.2 ΣΑΤΥΦ

Το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται ενσωματωμένο στους Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ και πρόκειται για το βασικότερο μέσο ρύθμισης της τάσης στα δίκτυα διανομής. Το ΣΑΤΥΦ μεταβάλλει το λόγο μετασχηματισμού μέσω ενός τυλίγματος ρυθμίσεως, το οποίο βρίσκεται σε σειρά με ένα από τα δύο κύρια τυλίγματα του Μ/Σ. Το τύλιγμα ρυθμίσεως περιλαμβάνει διάφορες λήψεις, και ανάλογα με το σε ποια λήψη βρίσκεται, μπορούμε να αυξήσουμε ή να μειώσουμε τη τάση στο δευτερεύον του Μ.Σ.

Η αλλαγή της λήψης στο ΣΑΤΥΦ γίνεται υπό φορτίο, δηλαδή η ροή ισχύος δεν διακόπτεται. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο κινητών επαφών. Το φορτίο αρχικά τροφοδοτείται και από τις δύο επαφές. Όταν πραγματοποιείται αλλαγή λήψης, η μία επαφή μετακινείται και πλέον έχουμε τροφοδότηση του φορτίου πάλι και από τις δύο επαφές, οι οποίες όμως βρίσκονται σε διαφορετική λήψη. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι από τη στιγμή που θα κλείσει η δεύτερη επαφή, ενώ η πρώτη δεν θα έχει ανοίξει ακόμα, δημιουργείται μεγάλο ρεύμα μεταξύ των δύο επαφών, καταπονώντας και τις επαφές και τα τυλίγματα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα προστίθενται είτε ωμικές είτε επαγωγικές αντιστάσεις μεταξύ των δύο επαφών, για τη μείωση της έντασης του ρεύματος.



### On-Load Tap Changer

Εικόνα 5: ΣΑΤΥΦ [34]

Στην Ελλάδα, καθώς και στη παρούσα εργασία, οι Μ/Σ διαθέτουν 17 λήψεις στο τύλιγμα ΥΤ για το ΣΑΤΥΦ με βήμα  $\Delta V$  ανά λήψη 1,25%. Στην πραγματικότητα, μεταβάλλεται ο αριθμός των σπειρών στην ΥΤ κατά 1,25% σε κάθε αλλαγή λήψης. Η τιμή της ΜΤ δίνεται από τον τύπο:

$$V_{MT} = V_{YT} * \frac{N_{MT}}{N_{YT}} = 100 * V_{YT} * \frac{V_{MT,nom}}{V_{YT,nom} * (100 \pm k * 1,25)}$$

Όπου:

$V_{MT,nom}$  η ονομαστική τάση στη ΜΤ

$V_{YT,nom}$  η ονομαστική τάση στη ΥΤ

$k$  ο αριθμός των βημάτων της λήψης.

Από τον παραπάνω τύπο για ονομαστική τάση στην ΥΤ και στη ΜΤ 150 kV και 21 kV αντίστοιχα, προκύπτει ο Πίνακας 1, όπου υπολογίζεται η τάση στη ΜΤ για κάθε συνδυασμό τάσης στην ΥΤ και βήματος στο ΣΑΤΥΦ (tap)

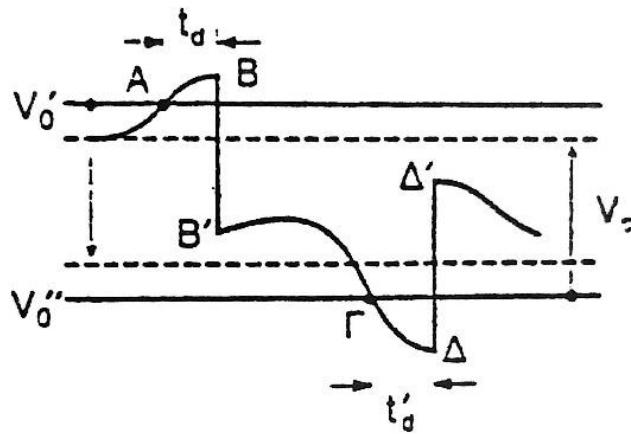
tap	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
N.YT	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0	-1,25	-2,5	-3,75	-5	-6,25	-7,5	-8,75	-10	-11,25	-12,5
V_Y.T	V_M.T																
131,25	17,09	17,29	17,50	17,71	17,93	18,15	18,38	18,61	18,85	19,09	19,34	19,60	19,86	20,14	20,42	20,70	21,00
133,125	17,34	17,54	17,75	17,96	18,18	18,41	18,64	18,87	19,12	19,36	19,62	19,88	20,15	20,42	20,71	21,00	21,30
135	17,58	17,79	18,00	18,22	18,44	18,67	18,90	19,14	19,38	19,64	19,89	20,16	20,43	20,71	21,00	21,30	21,60
136,875	17,83	18,04	18,25	18,47	18,70	18,93	19,16	19,41	19,65	19,91	20,17	20,44	20,72	21,00	21,29	21,59	21,90
138,75	18,07	18,28	18,50	18,72	18,95	19,19	19,43	19,67	19,92	20,18	20,45	20,72	21,00	21,29	21,58	21,89	22,20
140,625	18,31	18,53	18,75	18,98	19,21	19,44	19,69	19,94	20,19	20,45	20,72	21,00	21,28	21,58	21,88	22,18	22,50
142,5	18,56	18,78	19,00	19,23	19,46	19,70	19,95	20,20	20,46	20,73	21,00	21,28	21,57	21,86	22,17	22,48	22,80
144,375	18,80	19,02	19,25	19,48	19,72	19,96	20,21	20,47	20,73	21,00	21,28	21,56	21,85	22,15	22,46	22,77	23,10
146,25	19,05	19,27	19,50	19,73	19,98	20,22	20,48	20,73	21,00	21,27	21,55	21,84	22,14	22,44	22,75	23,07	23,40
148,125	19,29	19,52	19,75	19,99	20,23	20,48	20,74	21,00	21,27	21,55	21,83	22,12	22,42	22,73	23,04	23,37	23,70
150	19,53	19,76	20,00	20,24	20,49	20,74	21,00	21,27	21,54	21,82	22,11	22,40	22,70	23,01	23,33	23,66	24,00
151,875	19,78	20,01	20,25	20,49	20,74	21,00	21,26	21,53	21,81	22,09	22,38	22,68	22,99	23,30	23,63	23,96	24,30
153,75	20,02	20,26	20,50	20,75	21,00	21,26	21,53	21,80	22,08	22,36	22,66	22,96	23,27	23,59	23,92	24,25	24,60
155,625	20,27	20,51	20,75	21,00	21,26	21,52	21,79	22,06	22,35	22,64	22,93	23,24	23,55	23,88	24,21	24,55	24,90
157,5	20,51	20,75	21,00	21,25	21,51	21,78	22,05	22,33	22,62	22,91	23,21	23,52	23,84	24,16	24,50	24,85	25,20
159,375	20,76	21,00	21,25	21,51	21,77	22,04	22,31	22,59	22,88	23,18	23,49	23,80	24,12	24,45	24,79	25,14	25,50
161,25	21,00	21,25	21,50	21,76	22,02	22,30	22,58	22,86	23,15	23,45	23,76	24,08	24,41	24,74	25,08	25,44	25,80
163,125	21,24	21,49	21,75	22,01	22,28	22,56	22,84	23,13	23,42	23,73	24,04	24,36	24,69	25,03	25,38	25,73	26,10
165	21,49	21,74	22,00	22,27	22,54	22,81	23,10	23,39	23,69	24,00	24,32	24,64	24,97	25,32	25,67	26,03	26,40
166,875	21,73	21,99	22,25	22,52	22,79	23,07	23,36	23,66	23,96	24,27	24,59	24,92	25,26	25,60	25,96	26,32	26,70
168,75	21,98	22,24	22,50	22,77	23,05	23,33	23,63	23,92	24,23	24,55	24,87	25,20	25,54	25,89	26,25	26,62	27,00
170,625	22,22	22,48	22,75	23,02	23,30	23,59	23,89	24,19	24,50	24,82	25,14	25,48	25,82	26,18	26,54	26,92	27,30
172,5	22,47	22,73	23,00	23,28	23,56	23,85	24,15	24,46	24,77	25,09	25,42	25,76	26,11	26,47	26,83	27,21	27,60
174,375	22,71	22,98	23,25	23,53	23,82	24,11	24,41	24,72	25,04	25,36	25,70	26,04	26,39	26,75	27,13	27,51	27,90
176,25	22,95	23,22	23,50	23,78	24,07	24,37	24,68	24,99	25,31	25,64	25,97	26,32	26,68	27,04	27,42	27,80	28,20

**Πίνακας 1: Τάση στην MT για όλους τους συνδυασμούς τάσης στην YT και tap**

Στον Πίνακα 1 φαίνονται επίσης οι θέσεις που πρέπει να βρίσκεται η λήψη για κάθε τάση στην YT για να έχουμε ονομαστική τιμή τάσης στην MT. Γίνεται κατανοητό ότι το ΣΑΤΥΦ αποτελεί το βασικότερο εργαλείο για τη διατήρηση της τάσης σε αποδεκτά επίπεδα, καθώς μπορεί να εκμηδενίσει οποιαδήποτε υπέρταση μέχρι 161,25kV και οποιαδήποτε υπόταση μέχρι 131,25kV έρχεται από την YT, για να έχουμε στον ζυγό MT ονομαστική τάση 21kV. [33]

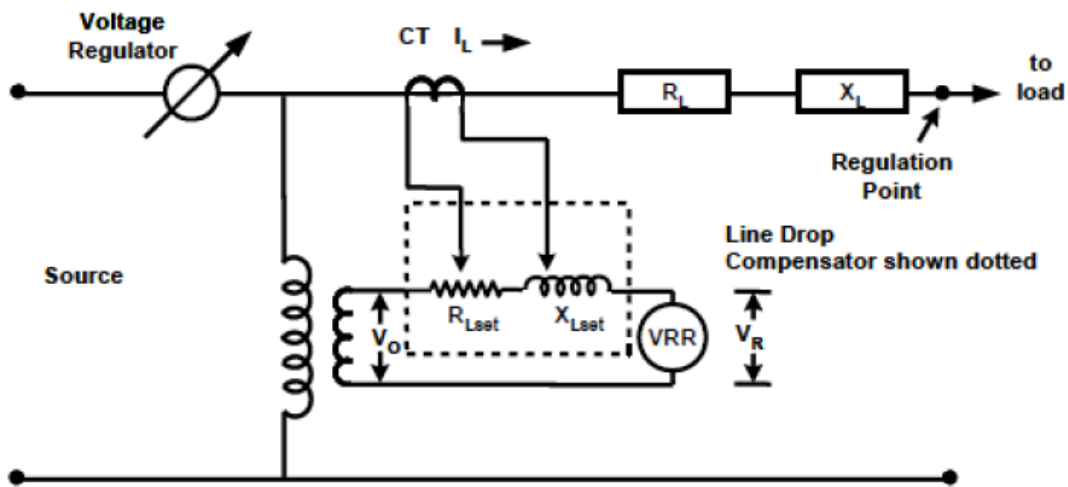
Για να λειτουργεί σωστά το ΣΑΤΥΦ, πρέπει να έχουν ρυθμιστεί σωστά οι παράμετροι του Εύρους ζώνης (Bandwidth) και του time delay. Το bandwidth ορίζει τα όρια της ζώνης στα οποία το ΣΑΤΥΦ δεν αλλάζει λήψη. Το bandwidth είναι το εύρος ζώνης μέσα στο οποίο η τάση θεωρείται αποδεκτή και δεν γίνεται αλλαγή της λήψης του ΣΑΤΥΦ. Το time delay είναι ο χρόνος στον οποίο αν η τάση βρεθεί εκτός ορίων του bandwidth τότε πραγματοποιείται αλλαγή της λήψης του ΣΑΤΥΦ. Στην Εικόνα 6 βλέπουμε την τάση, όταν περάσει το κάτω όριο της τάσης για χρονικό διάστημα  $td$ , τότε βλέπουμε την βηματική αύξηση της τάσης λόγω της αλλαγής της λήψης. [34]





Εικόνα 6: Ενδεικτική μεταβολή της τάσης στο σημείο που επιδιώκεται να τηρείται σταθερή

Η ρύθμιση της τάσης στο ΣΑΤΥΦ πραγματοποιείται με τη μέθοδο της αντιστάθμισης της πτώσης τάσης (Line Drop Compensation-LDC). Το ΣΑΤΥΦ με αυτή την μέθοδο αποσκοπεί στο να κρατήσει σταθερή την τάση σε κάποιο σημείο (σημείο ρύθμισης) στη γραμμή ΜΤ. Το 'σημείο ρύθμισης' τίθεται με βάση το κριτήριο της ελαχιστοποίησης των τετραγωνικών αποκλίσεων της τάσης. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στον υπολογισμό της πτώσης τάσης μέχρι το σημείο ρύθμισης μέσω ενός κυκλώματος το οποίο προσομοιώνει την γραμμή ΜΤ, την τάση της οποίας ρυθμίζει. Όταν αυξάνεται το φορτίο τότε το ΣΑΤΥΦ θα πρέπει να αυξάνει την τάση στο ζυγό ΜΤ ώστε να αντισταθμίζεται η πτώση τάσης λόγω του αυξημένου φορτίου. Το αντίθετο θα συμβαίνει όταν μειώνεται το φορτίο.



Εικόνα 7: Σύστημα ελέγχου του ΣΑΤΥΦ

Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται η διάταξη του LDC, που αποτελείται από Μ/Σ τάσης, Μ/Σ έντασης και μεταβλητή ωμική και επαγωγική αντίσταση. Με κατάλληλη επιλογή των σχέσεων μετασχηματισμού έντασης και τάσης καθώς και των μεταβλητών αντιστάσεων  $R_{Lset}$  και  $X_{Lset}$ , είναι δυνατόν να υπολογιστεί η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, η οποία δίνεται από τον τύπο: [35]

$$\Delta V = \frac{\lambda_V}{\lambda_I} I * (R_{eq} * \cos\varphi + X_{eq} * \sin\varphi)$$

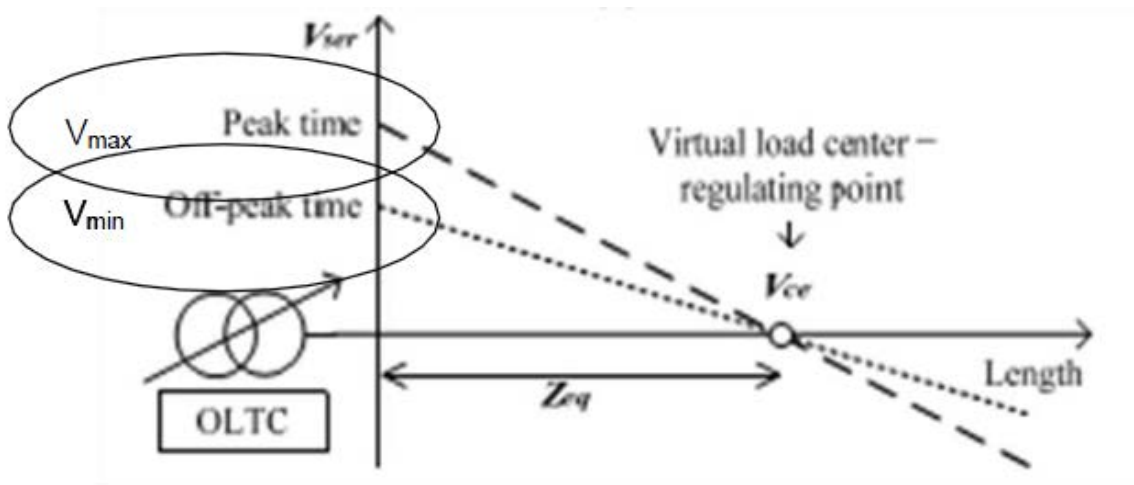
Όπου:

- $R_{eq}$  η τιμή της μεταβλητής ωμικής αντίστασης
- $X_{eq}$  η τιμή της μεταβλητής επαγωγικής αντίστασης
- $\lambda_V$  ο λόγος μετασχηματισμού του Μ/Σ τάσης
- $\lambda_I$  ο λόγος μετασχηματισμού του Μ/Σ έντασης

Με την παραδοχή ότι το φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος της γραμμής και το είδος των καλωδίων είναι παντού ίδιο, έχουν δημοσιευθεί διάφορες μελέτες και οδηγίες για τις ρυθμίσεις των αντιστάσεων της LDC. Για να κρατήσουμε σταθερή την τάση στο μέσο της γραμμής χρειάζεται να θέσουμε ως R και X της συνολικής ωμικής και επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής. [36] Η εμπειρική επιλογή 3/8 αντί της προφανούς 4/8 οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα που διαρρέει τα διάφορα σημεία της γραμμής μέχρι το σημείο της ρύθμισης δεν θα έχει την ίδια τιμή με το ρεύμα που μετράται στον Μ/Σ και εν γένει ( στην κλασική περίπτωση χωρίς DG) θα φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από τον ζυγό. Σύμφωνα με την οδηγία διανομής N 31 το κατάλληλο σημείο ρύθμισης είναι εκείνο το οποίο βρίσκεται το 40% του συνολικού φορτίου της γραμμής. [33]

Εναλλακτική εκτίμηση των κατάλληλων ρυθμίσεων αποτελεί η μέθοδος που λαμβάνει υπόψη της τις τάσεις στον «πρώτο» και στον «τελευταίο» πελάτη. [36] Ο πρώτος πελάτης είναι αυτός που βρίσκεται πιο κοντά στον ζυγό και δεν θα πρέπει να «βλέπει» υψηλή τάση ανεξάρτητα του φορτίου, ενώ και ο τελευταίος πελάτης (ο μακρινότερος από τον ζυγό MT) δεν θα πρέπει να βλέπει αντίστοιχα χαμηλή τάση.

Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε πως στην πραγματικότητα, λόγω της έλλειψης όλων των ιδανικών παραγόντων που πρέπει να ισχύουν όπως τις αναφέραμε προηγουμένως, οι εταιρίες ηλεκτρισμού υπολογίζουν τις παραμέτρους του ΣΑΤΥΦ (Τάση αναφοράς, R , X) λύνοντας ένα σύστημα τριών εξισώσεων θεωρώντας ποιες θα ήταν οι επιθυμητές τάσεις του ζυγού MT στις περιπτώσεις του μέγιστου και ελάχιστου φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται δύο ζεύγη τιμών ( $V_{max}, I_{max}$ ) και ( $V_{min}, I_{min}$ ) όπως φαίνεται στην Εικόνα 8 και χρησιμοποιώντας τον τύπο για την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής και την αναλογία της ωμικής και επαγωγικής αντίστασης της γραμμής προκύπτουν οι παράμετροι της ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ. [33]

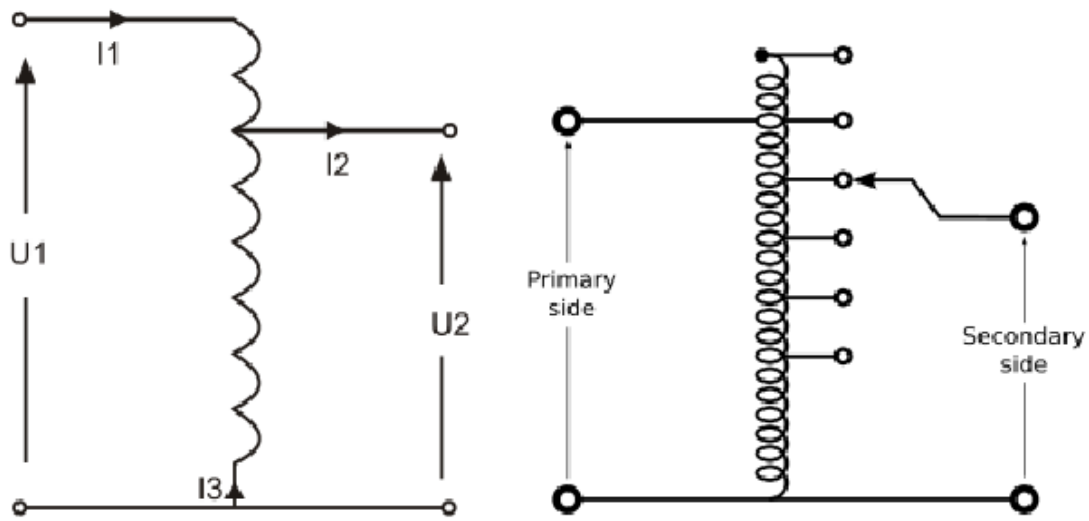


Εικόνα 8: Ρύθμιση τάσης με LDC

### 2.7.3 Ρυθμιστές τάσης - VR

Ο ρυθμιστής τάσης (Voltage Regulator - VR), είναι ένας αυτομετασχηματιστής που τοποθετείται κατά μήκος της γραμμής σε δίκτυα διανομής, με σκοπό στο τέλος της γραμμής να υπάρχει παρόμοιο επίπεδο τάσης με την αρχή. Με αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζουμε την πτώση τάσης που δημιουργείται κατά μήκος της γραμμής.

Σε αντίθεση με τον κλασικό μετασχηματιστή, τα τυλίγματα του αυτομετασχηματιστή είναι ηλεκτρικά ενωμένα. [37] Στην ουσία έχει ένα τύλιγμα και διάφορους ακροδέκτες. Η τάση στο πρωτεύον εφαρμόζεται σε δύο ακροδέκτες, ενώ η τάση στο δευτερεύον είναι αποτέλεσμα δύο άλλων ακροδεκτών. Συνήθως ο ένας ακροδέκτης είναι κοινός και για τις δύο πλευρές. Ο αυτομετασχηματιστής παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.

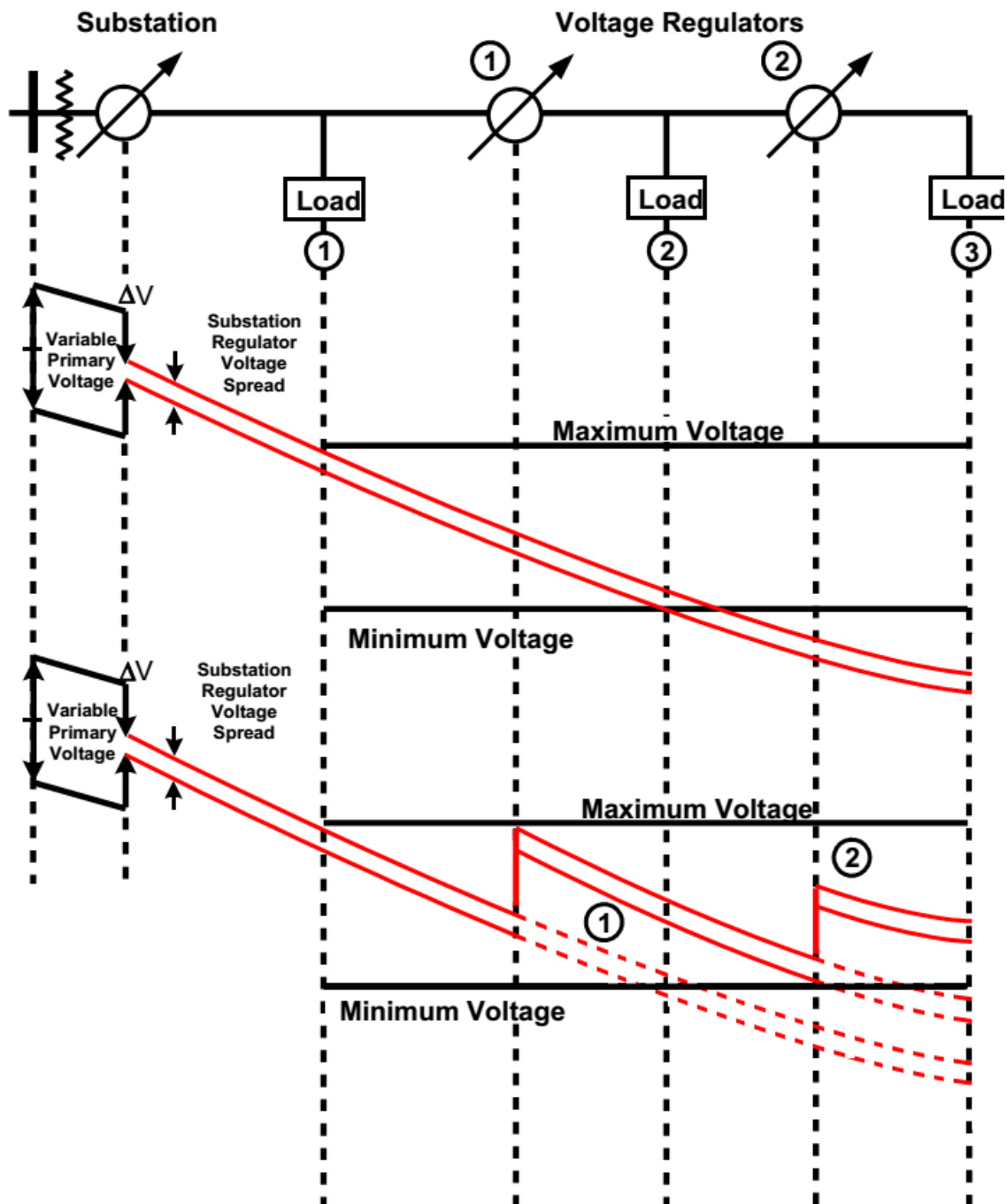


**Εικόνα 9: Αυτομετασχηματιστής**

Αποτέλεσμα της παραπάνω συνδεσμολογίας είναι οι δύο πλευρές να έχουν κάποιον αριθμό σπειρών κοινό. Γνωρίζοντας ότι η επαγόμενη τάση ανά σπείρα είναι ίδια, η κάθε πλευρά θα έχει τάση ανάλογα με τον αριθμό των σπειρών και άρα ισχύει ότι:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Ο αυτομετασχηματιστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση συστημάτων που λειτουργούν υπό διαφορετικά επίπεδα τάσης, για την προσαρμογή διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών στην επιθυμητή τάση και σαν ρυθμιστής τάσης σε μεγάλα αγροτικά δίκτυα διανομής για την βελτίωση της τάσης των τελικών καταναλωτών. [37] Πολύ συχνά μάλιστα, σε υψηλά φορτισμένες γραμμές μεγάλου μήκους, χρησιμοποιούνται περισσότεροι από έναν VR για την επίτευξη της επιθυμητής τάσης. Η λειτουργία των VR παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Ρυθμιστές τάσης σε σειρά [40]

Παρατηρούμε ότι όταν η διαφορά μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής της τάσης είναι μεγαλύτερη από την τιμή  $V_{max}-V_{min}$ , το ΣΑΤΥΦ αδυνατεί να διατηρήσει την τάση εντός των ορίων κατά μήκος της γραμμής και επομένως κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη των ρυθμιστών τάσης.

Όπως και στο ΣΑΤΥΦ, η λειτουργία των ρυθμιστών τάσης καθορίζεται αυτόματα μέσω της ρύθμισης LDC που αναλύθηκε προηγουμένως.

#### 2.7.4 Πυκνωτές

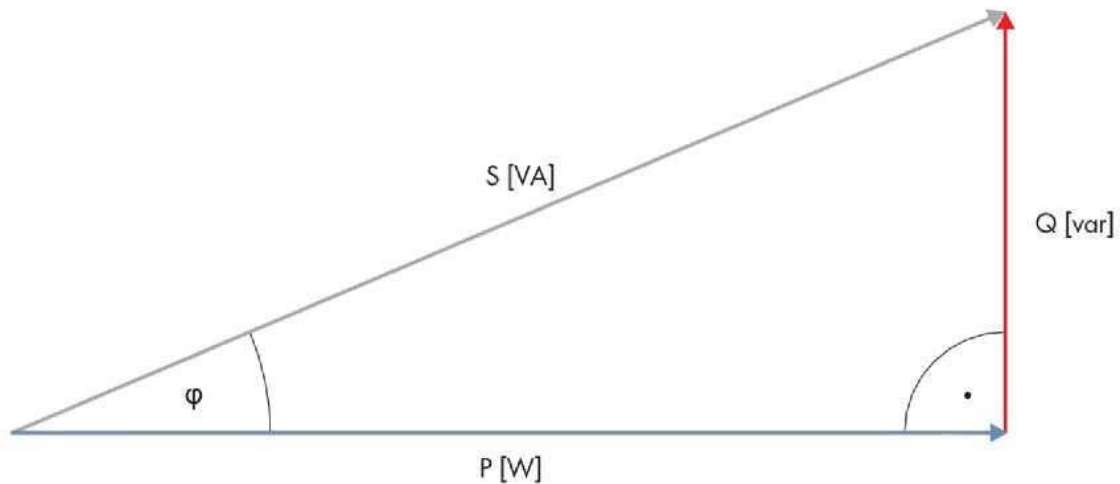
Το μεγαλύτερο ποσοστό των φορτίων είναι επαγωγικού χαρακτήρα, απαιτούν δηλαδή τη χορήγηση αέργου ισχύος από το δίκτυο. Η ροή αέργου ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής προς τα φορτία προκαλεί πρόσθετες απώλειες ενεργού ισχύος στις γραμμές και τον εξοπλισμό, λόγω του αυξημένου ρεύματος, και κατά συνέπεια μεγαλύτερη πτώση τάσης σε αυτές. Αντίθετα, τις νυχτερινές ώρες όπου η ζήτηση ισχύος είναι χαμηλή ενδέχεται να παρατηρηθεί ανύψωση των τάσεων του δικτύου λόγω της κυκλοφορίας περίσσειας ποσότητας αέργου ισχύος. Κρίθηκε λοιπόν απαραίτητη η εγκατάσταση πυκνωτών σε διάφορα σημεία του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η κυκλοφορία αέργου ισχύος και οι τάσεις διατηρούνται πιο κοντά στην ονομαστική τους τιμή.

Υπάρχουν πολλά είδη πυκνωτών, τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν είναι αποζεύξιμοι ή όχι, αν έχουν βαθμίδες και με τον τρόπο με τον οποίο ελέγχονται. Στην παρούσα εργασία. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πυκνωτές με σταθερή ισχύ (μία βαθμίδα) και έχουν τη δυνατότητα ελέγχου ζεύξης τους στο δίκτυο.

Τέλος, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης για την εγκατάσταση των πυκνωτών σε ένα δίκτυο: ο κεντρικός και ο διανεμημένος. Η κεντρική παροχή αέργου ισχύος (δηλαδή όλοι οι πυκνωτές να είναι συνδεδεμένοι σε ένα κεντρικό σημείο) υποστηρίζει ότι πρέπει να υπάρχει κάποιος γενικός τρόπος στο δίκτυο που να διορθώνει τον ΣΙ για όλα τα φορτία που συνδέονται στον συγκεκριμένο ζυγό. Αντίθετα, η διανεμημένη παροχή αέργου ισχύος υποστηρίζει ότι κάθε φορτίο στο ζυγό, θα πρέπει να έχει ότι απαιτείται για να διορθώνει τον ΣΙ του ανάλογα με τα πρότυπα. [17]

#### 2.7.5 Άεργος λειτουργία των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας

Με την διείσδυση μονάδων ΔΠ στα δίκτυα αποκτάμε καινούρια εργαλεία που μπορούν να συντελέσουν στη σωστή ρύθμιση της μέσω της συνεισφοράς των μονάδων ΔΠ στη ρύθμιση της αέργου ισχύος. Οι μονάδες αυτές έχουν τη δυνατότητα να μην εγχέουν στο δίκτυο μόνο ενεργό ισχύ, αλλά να παράγουν και να καταναλώνουν άεργο ισχύ κατά το δοκούν. Επίσης η εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, είτε σε μονάδες ΑΠΕ με την μορφή υβριδικού σταθμού είτε μόνες τους στο δίκτυο, όπου θα ελέγχονται από το διαχειριστή, θα συνεισφέρουν στην καλύτερη λειτουργία του δικτύου.



Εικόνα 11: Φαινόμενη ισχύς αντιστροφέα με συντελεστή ισχύος διάφορο της μονάδας

## 2.8 Διαχείριση της ζήτησης – Ελεγχόμενα φορτία

### 2.8.1 Εισαγωγή

Μέχρι σήμερα, λόγω και της αδυναμίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με οικονομικό τρόπο, κατά τη λειτουργία ενός ΣΗΕ, η ζήτηση και η κατανάλωση ενέργειας έπρεπε πάντα να ταυτίζονται. Η οποιαδήποτε ανισορροπία ανάμεσα σε αυτά τα δύο μεγέθη, θα καθιστούσε ασταθή τη λειτουργία του δικτύου. Αυτό αναγκάζει τη συνολική εγκατεστημένη παραγωγική ικανότητα του δικτύου να είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη τιμή της ζήτησης, έχοντας παράλληλα πάντα εξασφαλισμένη εφεδρεία σε περίπτωση σφάλματος κάποιας μονάδας παραγωγής. Όπως είναι φυσικό λοιπόν, κάποιες μονάδες παραγωγής συνδέονται για μικρό χρονικό διάστημα στο δίκτυο, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας του. Επιπλέον, το κόστος της ενέργειας αυξάνεται όταν χρησιμοποιούνται μονάδες παραγωγής με υψηλότερο κόστος παραγωγής π.χ. μονάδες πετρελαίου έναντι λιγνίτη. [38] [39]

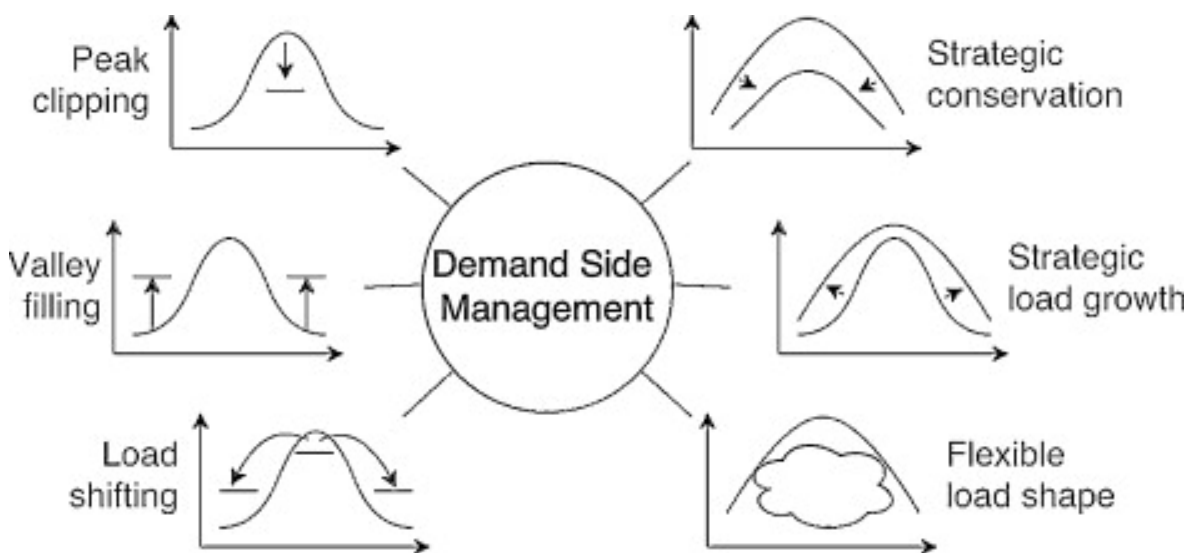
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η διαχείριση της ζήτησης (Demand Side Management), παρουσιάζεται ως μια πολιτική που εξυπηρετεί με επάρκεια την προαναφερθείσα τάση εξισορρόπησης, μειώνοντας το κόστος και προσφέροντας την απαραίτητη ευελιξία στο δίκτυο.

## 2.8.2 Ορισμοί

Το Federal Energy Regulatory Commission [40] ορίζει την **απόκριση ζήτησης** (Demand Response –DR) ως τις αλλαγές στο τρόπο χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας από τους τελικούς καταναλωτές, σχεδιασμένες να περιορίσουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας όταν η αξιοπιστία του δικτύου βρίσκεται σε κίνδυνο. Οι καταναλωτές υιοθετούν αυτές τις αλλαγές, ανταποκρινόμενοι στις αλλαγές της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο πέρασμα του χρόνου ή σε άλλα οικονομικά κίνητρα.

Οι ενέργειες των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και των κυβερνήσεων, που μπορούν να επιφέρουν αυτές τις αλλαγές στη συμπεριφορά των καταναλωτών συνιστούν τη **Διαχείριση της ζήτησης** (Demand Side Management –DSM) [40]

Οι διαφορετικοί στόχοι που μπορούν να τεθούν σε μία πολιτική διαχείρισης της ζήτησης, με σκοπό τη μεταβολή της καμπύλης φορτίου φαίνονται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα:

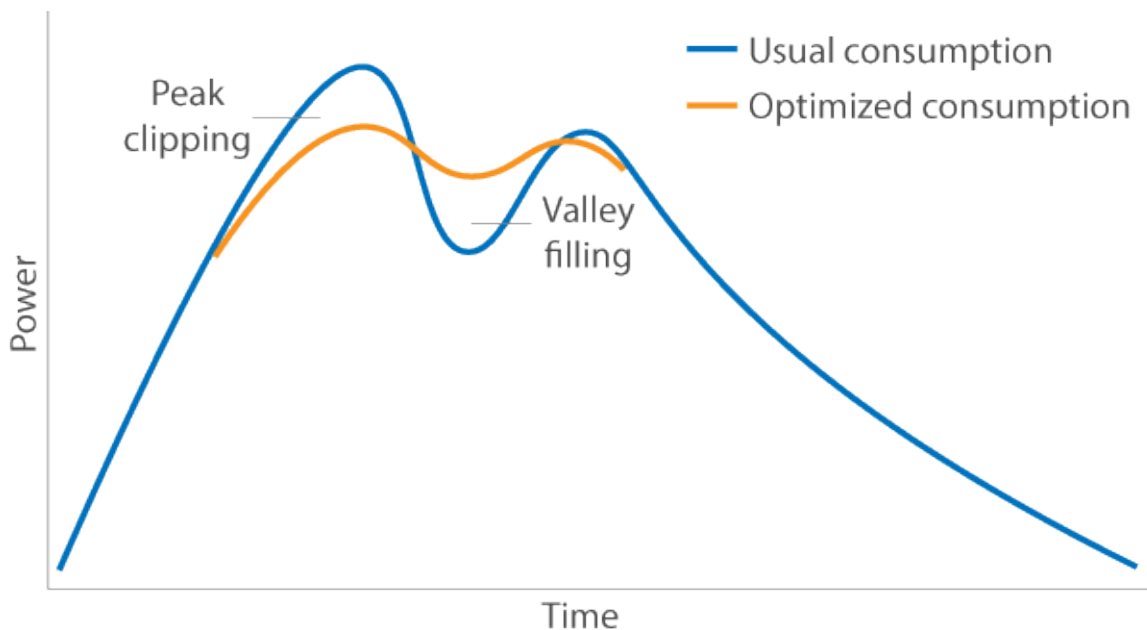


Εικόνα 12: Διαφορετικές καμπύλες φορτίου ανάλογα με τη μέθοδο DSM

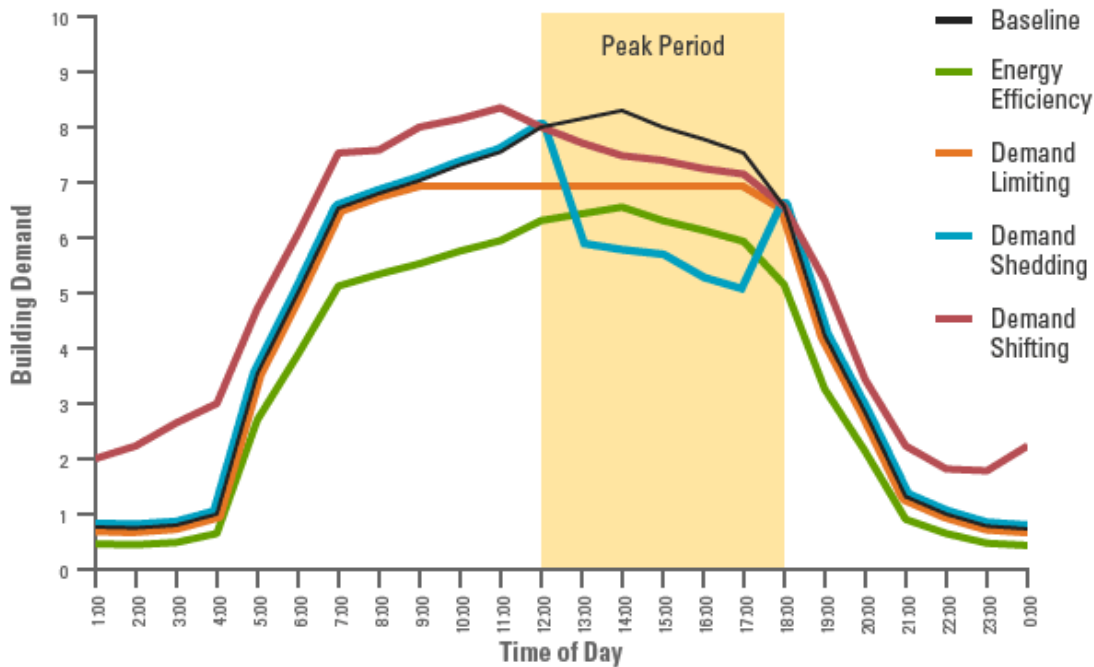


Οι έξι τρόποι μεταβολής της ζήτησης είναι οι εξής:

- **Περικοπή αιχμής (Peak Clipping):** Μείωση της ζήτησης σε περιόδους αιχμής.
- **Πλήρωση των «κοιλιάδων» (Valley Filling):** Αύξηση κατανάλωσης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης με σκοπό τη βελτίωση του συντελεστή φορτίου του συστήματος.
- **Μετατόπιση Φορτίου (Load Shifting):** Μείωση της ζήτησης σε περιόδους αιχμής και ταυτόχρονη αύξηση ζήτησης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.
- **Ενεργειακή Αποδοτικότητα (Strategic Conservation ή Energy Efficiency):** Μείωση της συνολικής ζήτησης εξαιτίας ενεργειακά αποδοτικότερου εξοπλισμού.
- **Εξηλεκτρισμός (Electrification ή Strategic Growth):** περιλαμβάνει την ανάπτυξη της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επιτευχθούν κι άλλοι αντικειμενικοί στόχοι όπως η οικονομική ανάπτυξη. Δηλαδή, συμπεριλαμβάνει την ανάπτυξη της αγοράς και του αριθμού καταναλωτών
- **Ευέλικτη καμπύλη φορτίου (Flexible Load Shape):** Ευελιξία φορτίου με σκοπό της άμεσης ανταπόκρισης σε επείγουσες καταστάσεις.



Εικόνα 13: Καμπύλη φορτίου μετά από διαχείριση ζήτησης



Εικόνα 14: Προφίλ ζήτησης διαφόρων μεθόδων Διαχείρισης Ζήτησης

Η μέθοδος της ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy efficiency) εφαρμόζεται σε βάθος χρόνου κι όχι για τον περιορισμό του φορτίου σε ώρες αιχμής. Συνιστά τη συνολική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Για το σκοπό αυτό απαιτείται αναβάθμιση ή αντικατάσταση του υπάρχοντος εξοπλισμού. Είναι φανερό ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα αποσκοπεί στη μόνιμη μείωση της συνολικής χρησιμοποιούμενης ενέργειας, ενώ η απόκριση ζήτησης στη προσωρινή μείωση των αιχμών του συστήματος. [38] [41]

### 2.8.3 Προγράμματα απόκρισης ζήτησης

Η ιδέα της διαχείρισης της ζήτησης δεν είναι κάτι καινούριο. Κάποιες τεχνολογίες για την εφαρμογή της έχουν αναπτυχθεί και υλοποιηθεί. Οι εφαρμογές αυτές έχουν στόχο τη μείωση της κατανάλωσης των χρηστών του δικτύου κατά τη διάρκεια κρίσιμων περιόδων. Ως κρίσιμοι περίοδοι θεωρούνται οι στιγμές που οι τιμές της χονδρεμπορικής αγοράς είναι υψηλές ή οι περίοδοι που η αξιοπιστία του συστήματος βρίσκεται σε κίνδυνο. Τα κίνητρα που δίνονται στους καταναλωτές ώστε να αλλάξουν τη συμπεριφορά τους ως προς τον τρόπο που καταναλώνουν, έχουν τη μορφή πίστωσης στο λογαριασμό τους ή και την αποδοχή πληρωμής ανάλογα με τη μείωση που καταφέρνουν να πετύχουν στη κατανάλωσή τους. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις οι χρήστες που έχουν ενταχθεί

σε ένα τέτοιο πρόγραμμα, ενδέχεται να δεχθούν επιπλέον οικονομική επιβάρυνση, σε περίπτωση απόκλισης από το συμφωνηθέντα στόχο. Τα προγράμματα αυτά διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: βάσει κινήτρων και βάση τιμής: [38] [41]

#### **A) Προγράμματα απόκρισης ζήτησης βάσει κινήτρων:**

- **Νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση:** Δεδομένου ότι οι σταθμοί βάσης έχουν χαμηλότερο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση έχει εφαρμοστεί σε πολλές χώρες. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει μια πιο ισορροπημένη χρήση του ηλεκτρισμού κατά την διάρκεια της ημέρας, διότι το αυξημένο φορτίο της ηλεκτρικής θέρμανσης μετατοπίζεται σε ώρες χαμηλής ζήτησης.
- **Άμεσος έλεγχος φορτίου:** Το πρόγραμμα αυτό απευθύνεται κυρίως σε οικιακούς καταναλωτές και εφαρμόζονται σε συσκευές που μπορούν να σταματούν την λειτουργία τους σε σύντομο χρονικό διάστημα, όπως είναι τα κλιματιστικά, οι θερμοσίφωνες, τα πλυντήρια και στεγνωτήρια, και τα ψυγεία. Απαραίτητη είναι η επικοινωνία μεταξύ της εταιρίας παροχής, του διαχειριστή του συστήματος και του καταναλωτή. Γι' αυτό γίνεται εγκατάσταση ευφών συστημάτων ανταλλαγής πληροφοριών και ελέγχου. Οι πελάτες που συμμετέχουν σε αυτά τα προγράμματα αποζημιώνονται με μειωμένους λογαριασμούς ηλεκτρισμού.
- **Περιοριστές φορτίου:** Οι περιοριστές φορτίου ορίζουν ένα όριο κατανάλωσης σε ατομικούς καταναλωτές. Η τεχνική αυτή δίνει την δυνατότητα στους καταναλωτές να επιλέξουν ποιες συσκευές θα χρησιμοποιήσουν και ποιες καταναλώσεις θα αναβάλλουν.
- **Προγράμματα περικοπής/διακοπής:** απευθύνονται σε χρήστες που καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας, άρα κυρίως σε βιομηχανικούς και σε δεύτερο λόγο σε εμπορικούς καταναλωτές. Οι συμμετέχοντες χρήστες εφόσον συμφωνήσουν στη μείωση της κατανάλωσής τους σε κάποιο συμφωνηθέν όριο, σε περίοδο που το σύστημα τίθεται σε κίνδυνο, απολαμβάνουν έκπτωση ή πίστωση στο λογαριασμό τους. Αν, όμως, παρατηρηθεί απόκλιση από το συμφωνηθέν όριο για την κατανάλωσή τους ενδέχεται να υποστούν ποινές με τη μορφή αύξησης στο λογαριασμό τους.
- **Προγράμματα έκτακτης ανάγκης:** Οι συμμετέχοντες σε αυτή τη περίπτωση δέχονται μειώσεις στην κατανάλωση τους όταν εμφανίζεται μειωμένη αξιοπιστία στο δίκτυο. Πληρώνονται ανάλογα της μείωσης της κατανάλωσης τους για το χρονικό διάστημα στο οποίο το σύστημα βρισκόταν σε κίνδυνο.
- **Προγράμματα χωρητικότητας της αγοράς:** Πρόκειται για παρόμοια προγράμματα με τα προηγούμενα, με τη διαφορά ότι σε περίπτωση ανάγκης είναι

προκαθορισμένη η μείωση του φορτίου, ενώ υπάρχουν ποινές για τους συμμετέχοντες που δεν συμμορφώνονται.

- **Προγράμματα αγοράς επικουρικών υπηρεσιών:** Σε αυτή τη περίπτωση οι καταναλωτές πλειοδοτούν την περικοπή του φορτίου τους, το οποίο χρησιμοποιείται ως εφεδρεία. Οι καταναλωτές των οποίων οι προσφορές θα γίνουν δεκτές, ανταμείβονται για να είναι σε θέση να μειώσουν την κατανάλωση, αν αυτό χρειαστεί, ενώ σε περίπτωση ανάγκης περικοπής φορτίου υπάρχει επιπλέον αμοιβή.

## **B) Προγράμματα απόκρισης ζήτησης βάσει τιμής:**

- **Τιμολόγηση βάσει της ώρας χρήσης:** Οι διακυμάνσεις στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας αντανακλούν το κόστος παραγωγής της, δημιουργώντας κίνητρα για ολίσθηση φορτίου από περιόδους υψηλής σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.
- **Τιμολόγηση πραγματικού χρόνου:** Η αλλαγή της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στο πλαίσιο της χονδρεμπορικής αγοράς επηρεάζει την τιμή αγοράς του καταναλωτή, ο οποίος ενημερώνεται για την τιμολόγηση την προηγούμενη μέρα ή ώρα.
- **Τιμολόγηση κρίσιμης αιχμής:** Ο πάροχος ορίζει μία περίοδο ως κρίσιμη αιχμή, κατά την οποία καθορίζεται υψηλή τιμολόγηση κατανάλωσης. Αυτή η περίοδος μπορεί να οφείλεται είτε στο αυξημένο κόστος παραγωγής (π.χ. πετρέλαιο) είτε στην εμφάνιση κινδύνων για την ευστάθεια του συστήματος. Οι καταναλωτές ενημερώνονται σε σύντομο διάστημα πριν τεθεί σε ισχύ η τιμολόγηση, ενώ συνήθως λαμβάνουν έκπτωση στο λογαριασμό τους για τη συμμετοχή τους στο πρόγραμμα.
- **Τιμολόγηση ακραίας ημέρας:** Ισχύει ότι και στη προηγούμενη τιμολόγηση, με τη διαφορά ότι εφαρμόζεται σε χρονικό διάστημα μίας ημέρας
- **Τιμολόγηση κρίσιμης αιχμής και ακραίας ημέρας:** αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων επιλογών.

## **2.9 Βελτιστοποίηση**

### **2.9.1 Εισαγωγή**

Όπως είπαμε προηγουμένως, η υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης μετατρέπει τα δίκτυα διανομής σε ενεργητικά, τα οποία εφοδιάζονται με συστήματα για τον έλεγχο και τον καθορισμό της συνδυασμένης λειτουργίας των

μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, των αποθηκευτικών μέσων και του ΣΑΤΥΦ. [42] Ο έλεγχος των δικτύων αυτών θα μπορεί να γίνεται με τρεις τρόπους, τον κεντρικό-συντονισμένο έλεγχο, τον ημι-συντονισμένο έλεγχο και τον αποκεντρωμένο έλεγχο. [43]

Ο κεντρικός-συντονισμένος έλεγχος παρέχει έλεγχο της τάσης από τον υποσταθμό σε όλο το υπόλοιπο δίκτυο, χρησιμοποιώντας ευρύ φάσμα επικοινωνιών για το συντονισμό διαφορετικών συσκευών όπως τα ΣΑΤΥΦ, τους ρυθμιστές τάσης και την παραγωγή αέργου ισχύος από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Αποτελεί ακριβή λύση γιατί πρέπει να υπάρχουν αρκετοί μετρητές κατά μήκος του δικτύου, τρόπους επικοινωνίας και κεντρικό σύστημα που θα λύνει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης.

Οι ημι-συντονισμένοι και αποκεντρωμένοι τρόποι ελέγχου πρέπει να έχουν την δυνατότητα να ελέγχουν τις διάφορες συσκευές όπως και τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής τοπικά. Μία σύγχρονη γεννήτρια που λειτουργεί ως ρυθμιστής τάσης είναι μία απλή μορφή αποκεντρωμένου ελέγχου. Η σύγχρονη γεννήτρια με το σύστημα διέγερσής της είναι μία αυτόνομη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και δεν χρειάζεται καμία επικοινωνία με άλλες συσκευές ή άλλα στοιχεία. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος μπορεί επιπλέον να συναντάται σε άλλες μορφές, όπως επιλογή λειτουργικού ελέγχου και περικοπή ενεργού ισχύος. Στην βιβλιογραφία προτείνονται διάφοροι τρόποι για την βελτίωση της με την παρουσία διεσπαρμένη παραγωγής. [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55]

## 2.9.2 Μαθηματικός Προγραμματισμός

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός αποτελεί το πεδίο των μαθηματικών που ασχολείται κυρίως με τη μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Με τον όρο μοντελοποίηση εννοείται η όσο το δυνατό πιο ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικού προβλήματος με μαθηματικές σχέσεις κατάλληλης μορφής, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές επίλυσης του Μαθηματικού Προγραμματισμού και να βρεθεί η ζητούμενη λύση. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός προβλήματος Μαθηματικού Προγραμματισμού είναι τα ακόλουθα:

- **Παράμετροι:** είναι τα εξωγενώς οριζόμενα (εκτός του ελέγχου του αποφασίζοντα) μεγέθη του προβλήματος. Πρόκειται ουσιαστικά για τους γνωστούς όρους του προβλήματος οι οποίοι έχουν σταθερή τιμή στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Συνήθως είναι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης ή εκφράζουν ποσότητες απαραίτητες στη διαμόρφωση των περιορισμών (π.χ. την απαιτούμενη ζήτηση μιας δραστηριότητας).
- **Μεταβλητές απόφασης:** εκφράζουν ουσιαστικά τους αγνώστους του προβλήματος και είναι οι μεταβλητές που ελέγχει ο αποφασίζων, δηλ. εκείνες των

οποίων τις τιμές μπορεί να καθορίσει. Το σύνολο των μεταβλητών απόφασης αποτελεί ουσιαστικά το αντικείμενο της διαδικασίας λήψης απόφασης. Η διαδικασία αριστοποίησης αποσκοπεί στο να βρεθούν οι τιμές εκείνες για τις μεταβλητές απόφασης οι οποίες βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση.

- **Περιορισμοί:** είναι οι μαθηματικές ισοτικές ή ανισοτικές σχέσεις που καθορίζουν το εύρος των τιμών που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Καθορίζουν δηλαδή το πεδίο ορισμού του προβλήματος.
- **Αντικειμενική συνάρτηση:** αποτελεί τη μαθηματική σχέση των μεταβλητών απόφασης που εκφράζει το κριτήριο βελτιστοποίησης. Επιδιώκεται είτε η ελαχιστοποίηση είτε η μεγιστοποίησή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ανάλογα με το είδος των μαθηματικών σχέσεων που περιγράφουν το πρόβλημα, το είδος των μεταβλητών απόφασης, το είδος των παραμέτρων και το πλήθος των αντικειμενικών συναρτήσεων, τα προβλήματα Μαθηματικού Προγραμματισμού μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες. Οι σημαντικότερες κατηγοριοποιήσεις είναι οι ακόλουθες:

Το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα **Γραμμικού Προγραμματισμού** (Linear Programming), όταν οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το πρόβλημα (αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί) είναι γραμμικές ως προς τις μεταβλητές απόφασης, ενώ αν είναι μη γραμμικές χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα **Μη Γραμμικού Προγραμματισμού** (Non Linear Programming). Μία ειδική κατηγορία Μη Γραμμικού Προγραμματισμού αποτελεί ο **Τετραγωνικός Προγραμματισμός**, όπου οι σχέσεις που περιγράφουν το πρόβλημα είναι τετραγωνικές. Με τη μέθοδο Simplex και τις παραλλαγές της να κυριαρχούν στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων εδώ και 60 περίπου χρόνια, προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού με χιλιάδες μεταβλητές απόφασης και περιορισμούς επιλύονται σήμερα σε δευτερόλεπτα. Αντίθετα η επίλυση προβλημάτων Μη Γραμμικού Προγραμματισμού είναι πιο δύσκολη υπόθεση ενώ συνήθως καταλήγει σε τοπικά βέλτιστα τα οποία δεν είναι πάντα και ολικά βέλτιστα. Για τους λόγους αυτούς επιδιώκεται στις περισσότερες περιπτώσεις τα πραγματικά προβλήματα να μοντελοποιούνται ως προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού καταφεύγοντας αρκετές φορές σε προσεγγίσεις μη γραμμικών συστημάτων με γραμμικές σχέσεις.

Τα προβλήματα μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με το είδος των μεταβλητών απόφασης, αν είναι δηλαδή συνεχείς ή ακέραιες. Τα προβλήματα που έχουν μόνο συνεχείς μεταβλητές είναι πιο εύκολο να λυθούν σε σχέση με αυτά που έχουν ακέραιες μεταβλητές, καθώς το εφικτό χωρίο σε ένα πρόβλημα με ακέραιες μεταβλητές παρουσιάζει ασυνέχειες δυσκολεύοντας έτσι κατά πολύ τη διαδικασία επίλυσης. Από την

άλλη μεριά όμως, η δυνατότητα χρήσης ακεραίων μεταβλητών δίνει τη δυνατότητα μιας πιο ρεαλιστικής μοντελοποίησης της πραγματικότητας και επίσης επεκτείνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του Μαθηματικού Προγραμματισμού και σε προβλήματα που έχουν συνδυαστικό χαρακτήρα (συνδυαστική βελτιστοποίηση), τα οποία, χωρίς τη χρήση ακεραίων μεταβλητών θα ήταν αδύνατο να λυθούν. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ακέριες μεταβλητές που συναντώνται σε μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού είναι δυαδικές μεταβλητές δηλαδή παίρνουν τιμή 0 ή 1. Αν ένα μοντέλο Μαθηματικού Προγραμματισμού έχει αποκλειστικά ακέριες μεταβλητές χαρακτηρίζεται ως μοντέλο **Ακέριου Προγραμματισμού** (Integer Programming), ενώ αν έχει και συνεχείς και ακέριες μεταβλητές χαρακτηρίζεται ως μοντέλο **Μικτού Ακέριου Προγραμματισμού** (Mixed Integer Programming).

Σε κάποιες περιπτώσεις οι παράμετροι ενός μοντέλου Μαθηματικού Προγραμματισμού μπορεί να μην εκφράζονται με πραγματικούς αριθμούς αλλά με κατανομές πιθανότητας ή με ασαφείς αριθμούς απεικονίζοντας έτσι την αβεβαιότητα ως προς την τιμή τους. Τότε το πρόβλημα ανάγεται αντίστοιχα σε πρόβλημα **Στοχαστικού Προγραμματισμού** (Stochastic Programming) ή **Ασαφούς Προγραμματισμού** (Fuzzy Programming).

Τέλος, όταν υπάρχουν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις (όπως και στην προκειμένη περίπτωση), το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα **Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού** (Multiobjective Programming). Ο όρος πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι ταυτόσημος με τον όρο διανυσματική βελτιστοποίηση (Vector Optimization). [56] [57]

## 2.9.3 Το λογισμικό GAMS

### 2.9.3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε πως μπορεί ένα δίκτυο διανομής να λειτουργεί βέλτιστα. Για την μελέτη χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα GAMS. Το λογισμικό GAMS (General Algebraic Modeling System) λειτουργεί σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον, μέσα στο οποίο ορίζει και επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης.

Το GAMS έχει την ικανότητα να επιλύει από μικρά προβλήματα (δεκάδες μεταβλητές και περιορισμοί) έως πολύ μεγάλα προβλήματα (χιλιάδες μεταβλητές και περιορισμοί), χρησιμοποιώντας περίπου την ίδια έκταση κώδικα. Επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει ένα πλήθος παρόμοιων περιορισμών, γράφοντας ουσιαστικά μόνο έναν που να ισχύει για όλες τις τιμές μιας παραμέτρου, εκτός των εξαιρέσεων που θα καθορίσει ρητά.

Μιμείται σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος. Αυτό έχει ως συνέπεια, ο κώδικας να είναι σχεδόν αυτο-επεξηγηματικός για εκείνους τους αναγνώστες, οι οποίοι διαθέτουν κάποιο υποτυπώδες υπόβαθρο στο κομμάτι της βελτιστοποίησης. Επιπλέον διαχωρίζει τη διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος από την τεχνική επίλυσης που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα, ο χρήστης γράφει τον κώδικα στο GAMS και έπειτα επιλέγει έναν από τους πολλούς διαθέσιμους solvers, τον οποίο θα χρησιμοποιήσει κατά την επίλυση του προβλήματος. Με αυτό τον τρόπο, ο χρήστης αποδεσμεύεται από τις αλγοριθμικές τεχνικές επίλυσης. [58]

### **2.9.3.2 Δομή ενός μοντέλου σε GAMS**

Σε αυτή τη παράγραφο περιγράφονται τα βασικά συστατικά που αποτελούν τη δομή ενός μοντέλου GAMS, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

#### **Inputs (Είσοδος Δεδομένων):**

- Σύνολα - Sets
- Δεδομένα (Παράμετροι, Πίνακες, Πίνακες στοιχείων) - Data (Parameters, Tables, Scalars)
- Μεταβλητές - Variables
- Καθορισμός των ορίων ή των αρχικών τιμών - Assignment of bounds and/or initial values (optional)
- Εξισώσεις, Ισοτικοί και ανισοτικοί περιορισμοί - Equations
- Δήλωση μοντέλου και επίλυσης - Model and Solve statements
- (Προαιρετική) εμφάνιση δήλωσης - Display statement (optional)

#### **Outputs (Εξοδος Αποτελεσμάτων):**

- Αποτύπωση προγράμματος - Echo Print
- Χάρτες αναφοράς συμβόλων - Symbol Reference Maps
- Λίστα εξισώσεων - Equation Listings
- Αναφορά Κατάστασης - Status Reports
- Αποτελέσματα - Results



### 2.9.3.2.1 Σύνολα

Τα Σύνολα ('SETS') είναι θεμελιώδεις δομικές μονάδες για οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS και του επιτρέπουν να δηλωθεί και να διαβάζεται εύκολα και λειτουργικά. Η σύνταξη για τα απλά σύνολα φαίνεται παρακάτω:

```
SET Set Name          Optional Explanatory Text
/ first Set_Element_Name  Optional Explanatory Text
second Set_Element_Name  Optional Explanatory Text
...
/;
```

Το Όνομα Συνόλου ('Set Name') είναι το εσωτερικό όνομα του συνόλου στο GAMS, που πρέπει να αρχίζει με ένα γράμμα που ακολουθείται από περισσότερα γράμματα ή ψηφία. Μπορεί μόνο να περιέχει τους αλφαριθμητικούς χαρακτήρες, και μπορεί να είναι μέχρι 31 χαρακτήρες. Το συνοδευτικό κείμενο χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σύνολο ή το στοιχείο που προηγείται.

Το Όνομα κάθε Συνόλου Στοιχείου ('Set Element Name') μπορεί να είναι μέχρι 10 χαρακτήρες. Όπως και στις δηλώσεις έτσι και εδώ ισχύουν τα ίδια σχετικά με τα συνοδευτικά κείμενα (είτε μέσα σε αποστροφές είτε χωρίς). Κάθε στοιχείο σε ένα σύνολο πρέπει να χωριστεί από τα άλλα στοιχεία με ένα κόμμα ή με ένα τέλος γραμμής. Αντίθετα, κάθε στοιχείο χωρίζεται από οποιοδήποτε σχετικό κείμενο με κενό.

Το Επεξηγηματικό Κείμενο ('Explanatory Text') δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 254 χαρακτήρες και πρέπει για κάθε στοιχείο που περιγράφει να βρίσκεται στην ίδια γραμμή. Το κείμενο μπορεί να περιέχει ειδικούς χαρακτήρες όπως κάθετους, κόμματα ή ελληνικά ερωτηματικά με την προϋπόθεση ότι βρίσκεται μέσα σε αποστροφές.

Ο αστερίσκος «\*» παίζει έναν ειδικό ρόλο στους ορισμούς συνόλων. Χρησιμοποιείται για την αποφυγή επίπονης δακτυλογράφησης μιας ακολουθίας στοιχείων ενός συνόλου. Παραδείγματος χάριν, για να γράψουμε δέκα χρονολογίες στη σειρά από το 1991 έως το 2000 μπορούμε να γράψουμε: set t "time" /1991 \* 2000 /;, όπου μέσα το σύνολο περιλαμβάνει τα δέκα στοιχεία το 1991, 1992... , 2000. Ο αριθμός αριστερά από το αστερίσκο πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό στα δεξιά.

### 2.9.3.2.2 Εισαγωγή δεδομένων

Ένα από τα κλασικά πρότυπα σχεδιασμού της γλώσσας GAMS είναι η χρήση δεδομένων στη πιο βασική μορφή, η οποία μπορεί να είναι Πίνακας - Στοιχείο, Παράμετροι και Πίνακες δύο ή περισσότερων διαστάσεων.

#### 2.9.3.2.2.1 Πίνακες

Τα στοιχεία μπορούν να δηλωθούν και να αρχικοποιηθούν στο GAMS χρησιμοποιώντας μια δήλωση Πίνακα ('Table'). Για δύο ή περισσότερες διαστάσεις προτιμώνται οι πίνακες από τις παραμέτρους για την εισαγωγή δεδομένων.

Γενικά, η σύνταξη για μια δήλωση πίνακα είναι:

<b>Table</b> Table Name (Set i, Set j ... )	Optional Explanatory Text	
	set_j_element_1	set_j_element_2
set_i_element_1	value_11	value_12
set_i_element_2	value_21	value_22;

Το Όνομα του Πίνακα ('Table Name') είναι το εσωτερικό όνομα του πίνακα στο GAMS. Οι ετικέτες σειρών προέρχονται από το σύνολο i, και οι ετικέτες των στηλών από το σύνολο j.

#### 2.9.3.2.2.2 Πίνακες Στοιχείου

Η δήλωση του Πίνακα Στοιχείου ('Scalars') χρησιμοποιείται για να δηλώσει και να εισάγει τις αρχικές συνθήκες σε μια παράμετρο του GAMS με μηδενική διάσταση. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ακριβώς ένας αριθμός που συνδέεται με την παράμετρο.

Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση πίνακα στοιχείο είναι:

<b>Scalars</b>		
Scalar 1 Name	Optional Explanatory Text	/ Numerical Value /
Scalar 2 Name	Optional Explanatory Text	/ Numerical Value /
... ;		

Το Όνομα του Πίνακα Στοιχείου ('Scalar Name') είναι το εσωτερικό όνομα του πίνακα στοιχείου. Το Συνοδευτικό Κείμενο περιγράφει το στοιχείο και ακολουθεί η τιμή του ('Numerical Value').

#### 2.9.3.2.2.3 Παράμετροι

Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση Παραμέτρου ('Parameter') είναι:

##### **Parameters**

Parameter Name (set dependency)	Optional Explanatory Text
/ first Set Element Name	Associated Value,
second Set Element Name	Associated Value,
... /;	

Το Όνομα της Παραμέτρου ('Parameter Name') είναι το εσωτερικό όνομα της παραμέτρου. Η αρχικοποίηση μιας παραμέτρου απαιτεί έναν κατάλογο στοιχείων ('data element'), κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από μια ετικέτα και μια τιμή. Οι κάθετοι '/' πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην αρχή και στο τέλος του καταλόγου, και τα κόμματα πρέπει να χωρίζουν τα στοιχεία που εισήχθησαν σε μια γραμμή. Το σύμβολο '=' ή το 'κενό' μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χωρίσει τις ετικέτες από τις αντίστοιχες τιμές τους.

#### 2.9.3.2.3 Μεταβλητές

Ο όρος Μεταβλητές ('Variables') αναφέρεται στις ενδογενείς μεταβλητές σύμφωνα με τους οικονομολόγους και στις μεταβλητές απόφασης σύμφωνα με συμβούλους επιχειρήσεων. Είναι οι οντότητες, των οποίων οι τιμές είναι γενικά άγνωστες μέχρι να λυθεί το μοντέλο. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δηλώσεων μεταβλητής και παραμέτρου είναι ότι στη δήλωση μεταβλητής δεν μπορούν να δηλωθούν αρχικές τιμές. Έτσι, τα πολύ μεγάλα μοντέλα μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας έναν μικρό αριθμό μεταβλητών. Είναι σημαντικό ότι οι δηλώσεις μεταβλητών περιλαμβάνουν ένα επεξηγηματικό κείμενο το οποίο είναι όσο το δυνατόν περιγραφικότερο για να σχολιάσει την λύση.

Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση Μεταβλητών είναι:

### Variable type

first Variable Name (set dependency)      Optional Explanatory Text

second Variable Name (set dependency)    Optional Explanatory Text

...;

Ο τύπος των μεταβλητών ('Variable type') είναι ο προαιρετικός μεταβλητός τύπος που αναλύεται λεπτομερώς παρακάτω. Το όνομα των μεταβλητών ('Variable name') είναι το εσωτερικό όνομα της μεταβλητής στο GAMS.

Υπάρχουν πέντε βασικοί τύποι μεταβλητών:

- Free: Ελεύθερες, δεν έχουν κανένα περιορισμό στην τιμή τους, ( $-\infty$  έως  $+\infty$ )
- Positive: Δέχονται μόνο θετικές τιμές (0 έως  $+\infty$ )
- Negative: Δέχονται μόνο αρνητικές τιμές ( $-\infty$  έως 0)
- Binary: Δέχονται μόνο δυαδικές τιμές (0 ή 1)
- Integer: Δέχονται μόνο ακέραιες τιμές (0 έως 100)

Αν δεν αναφέρεται τύπος μεταβλητής αυτή θεωρείται Free. Οι πιο συχνά χρησιμοποιημένοι τύποι είναι οι ελεύθεροι και οι θετικοί για τις περιγραφές των μεταβλητών για τις οποίες οι αρνητικές τιμές είναι χωρίς νόημα, όπως οι χωρητικότητες, οι ποσότητες και οι τιμές πώλησης. Ο πιο δημοφιλής τρόπος δήλωσης των μεταβλητών είναι η απαρίθμηση κατά ομάδες ανάλογα με τον τύπο.

Ένα πρόσθετο σύνολο λέξεων κλειδιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διευκρινίσει τις διάφορες ιδιότητες των μεταβλητών. Μια μεταβλητή στο GAMS, έχει επτά προθέματα:

- **.lo** Το χαμηλότερο όριο της μεταβλητής.
- **.up** Το υψηλότερο όριο της μεταβλητής.
- **.fx** Η σταθερή τιμή της μεταβλητής, η οποία έχει άνω και κάτω όριο το ίδιο. Μία μεταβλητή σταθερής τιμής μπορεί να πάρει αργότερα περισσότερες τιμές, αν επαναπροσδιοριστούν τα όριά της.
- **.l** Το επίπεδο δραστηριότητας για τη μεταβλητή. Είναι ισοδύναμο με την τρέχουσα αξία της μεταβλητής. Λαμβάνει νέες τιμές όταν λύνεται ένα μοντέλο.
- **.m** Η οριακή τιμή της μεταβλητής. Λαμβάνει νέες τιμές όταν λύνεται ένα μοντέλο.

- **.scale** Ο κλιμακωτός παράγοντας της μεταβλητής σε μη γραμμικό προγραμματισμό.
- **.prior** Η διακλαδισμένη τιμή προτεραιότητας μιας μεταβλητής χρησιμοποιείται σε προγραμματιστικά μοντέλα με μικτούς ακέραιους αριθμούς.

#### 2.9.3.2.4 Εξισώσεις

Με τον όρο Εξισώσεις ('Equations'), το GAMS εννοεί τις συμβολικές αλγεβρικές σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για να παράγουν τους περιορισμούς στο μοντέλο. Όπως με τις μεταβλητές, μια εξίσωση στο GAMS θα συνδέσει αυθαίρετα πολλούς περιορισμούς, ανάλογα με την ιδιότητα των καθορισμένων συνόλων.

Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση Εξισώσεων είναι:

##### Equations

First Equation Name (set dependency)      Optional Explanatory Text

Second Equation Name (set dependency)      Optional Explanatory Text

... ;

Το όνομα των Εξισώσεων ('Equation name') είναι το εσωτερικό όνομα της εξίσωσης στο GAMS και ακολουθείται από το επεξηγηματικό κείμενο καταλήγοντας με το ελληνικό ερωτηματικό σύμβολο.

Όσον αφορά τον Ορισμό των Τύπων των Εξισώσεων, αυτός γίνεται αφότου έχει δηλωθεί από πριν το όνομα της κάθε εξίσωσης και εν συνεχεία ορίζεται ο τύπος της εξίσωσης ως εξής:

Equation Name (set dependency)    \$Optional Logical Condition . .

Left Equation Terms      Equation Type      Right Equation Terms;

Δηλώνεται εκ νέου το όνομα της Εξίσωσης ακολουθούμενο πάντα από δύο τελείες ".." πριν την έναρξη της άλγεβρας. Το Αριστερό μέλος της εξίσωσης ('Left Term') αποτελεί τον αλγεβρικό τύπο της, ενώ το Δεξιό ('Right Term') αποτελεί την τελική τιμή, την οποία επιζητείται να λάβει ο αλγεβρικός τύπος.

Το Είδος της Εξίσωσης ('Equation Type') αναφέρεται στο σύμβολο μεταξύ των δύο εκφράσεων που διαμορφώνουν την εξίσωση, και μπορεί να είναι κάποιος από τους ακόλουθους τύπους:

- =E= ('Equality'): το αριστερό μέρος πρέπει να είναι ίσο με το δεξί,
- =G= ('Greater or equal'): το αριστερό μέρος πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί,
- =L= ('Lower or equal'): το αριστερό μέρος πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από το δεξί,

#### 2.9.3.2.5 Δήλωση Μοντέλου

Η Δήλωση Μοντέλου ('Model Statement') χρησιμοποιείται για να οργανώσει τις εξισώσεις σε ομάδες και να τις ονομάσει έτσι ώστε αυτές να μπορούν να επιλυθούν. Γενικά η σύνταξη στο GAMS για ένα μοντέλο απλής δήλωσης είναι:

Model Model Name Optional Explanatory Text / Model Contents / ;

Το Όνομα του Μοντέλου ('Model Name') είναι η εσωτερική ονομασία στο μοντέλο του GAMS, που πρέπει να ξεκινά με γράμμα και μπορεί να περιέχει μέχρι 10 αλφαριθμητικούς χαρακτήρες στο μήκος. Το κείμενο επεξήγησης χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σύνολο ή το στοιχείο που προηγείται από αυτό και δε πρέπει να ξεπερνά τους 80 χαρακτήρες και όλοι να περιλαμβάνονται στην ίδια γραμμή.

Τα Περιεχόμενα του Μοντέλου ('Model Contents') μπορούν να περιλαμβάνουν όλες τις δηλωμένες εξισώσεις, οπότε αρκεί ο συμβολισμός 'all' για να εφαρμοστεί το μοντέλο σε όλες τις εξισώσεις. Σε διαφορετική περίπτωση, πρέπει να οριστούν οι ονομασίες των συγκεκριμένων εξισώσεων, που πρόκειται να μοντελοποιηθούν.

#### 2.9.3.2.6 Ταξινόμηση μοντέλων

Με το GAMS μπορούν να λυθούν διάφοροι τύποι προβλημάτων. Οι τύποι αυτοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Σημαντικό είναι να υπάρχει ξεκάθαρη γνώση για τον τύπο του προβλήματος προτού επιχειρηθεί η λύση. Το GAMS έχει τη δυνατότητα να ελέγχει το μοντέλο στην επιλογή του τύπου του προβλήματος που σκέφτεται να χρησιμοποιήσει ο χρήστης και εμφανίζει επεξηγηματικά μηνύματα εάν ανακαλύπτει κακό συνδυασμό στην εφαρμογή των τύπων (π.χ., όταν ένα γραμμικό μοντέλο περιέχει μη γραμμικούς όρους).

LP	Linear Programming - Γραμμικός Προγραμματισμός. Δεν περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους ή διακριτές (δυναδικές ή ακέραιες) μεταβλητές στο μοντέλο.
NLP	Non-Linear Programming - Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. Περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους, που περιέχουν μόνο τις ομαλές συναρτήσεις του μοντέλου, αλλά χωρίς διακριτές μεταβλητές.
DNLP	Discontinuous Non-Linear Programming – Ασυνεχής Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μη-ομαλοί μη-γραμμικοί όροι, όχι όμως οι διακριτές μεταβλητές.
MIP	Mixed Integer Programming – Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός Περιλαμβάνει διακριτές μεταβλητές, όχι όμως μη-γραμμικούς όρους.
RMIP	Relaxed Mixed Integer Programming - Χαλαρός Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός. Περιέχουν δυναδικές και ακέραιες μεταβλητές υπό τον όρο να παίρνουν τιμές μεταξύ των ορίων τους.
MINLP	Mixed Integer Nonlinear Programming - Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. Περιέχουν μη-ομαλούς μη-γραμμικούς όρους και διακριτές μεταβλητές.
RMINLP	Relaxed Mixed Integer Nonlinear Programming - Χαλαρός Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. Σε σχέση με το MINLP, περιέχει δυναδικές και ακέραιες υπό περιορισμούς.
MPEC	Mathematical Programs with Equilibrium Constraints - Μαθηματικά Προγράμματα με Περιορισμούς Ισορροπίας.
MCP	Mixed Complementarily Problem - Μικτό Πρόβλημα Συμπληρωματικότητας.
CNS	Constrained Nonlinear System - Μη γραμμικό σύστημα με περιορισμούς.

**Πίνακας 2: Τύποι προβλημάτων που επιλύονται μέσω του GAMS**

#### 2.9.3.2.7 Δήλωση Επίλυσης

Ύστερα από τη δήλωση του μοντέλου, το επόμενο βήμα είναι η επίλυση του χρησιμοποιώντας τη Δήλωση Επίλυσης ('Solve Statement'). Όταν το GAMS δει αυτή την εντολή ψάχνει τον κατάλληλο Επιλυτή ('Solver') από τη βιβλιοθήκη του, ώστε να βρει τον τύπο που ταιριάζει στην εφαρμογή. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι το GAMS από μόνο του δε μπορεί να λύσει το κάθε πρόβλημα, αλλά περνά το πρόβλημα σε ένα από τους επιλυτές. Με λίγα λόγια το GAMS παίζει το ρόλο του μεσολαβητή.

Γενικά η σύνταξη στο GAMS για ένα μοντέλο απλής δήλωσης είναι:

Solve Model Name Using Model Type Maximizing or Minimizing Equation Name;

Το Όνομα του Μοντέλου καθορίζεται από την πρότυπη δήλωση, το οποίο και επιλύεται Χρησιμοποιώντας ('Using') έναν από τους Τύπους του Μοντέλου ('Model Type'), που περιγράφονται στον Πίνακα 2, Μεγιστοποιώντας ή Ελαχιστοποιώντας την Αντικειμενική Συνάρτηση.

#### 2.9.3.2.8 Έξοδος – Output

Η Έξοδος ('Output') στο GAMS περιέχει πολλές επιλογές για τον έλεγχο και την κατανόηση ενός μοντέλου. Η έξοδος από μια εφαρμογή του GAMS παράγεται σε ένα αρχείο το οποίο μπορεί να διαβαστεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε συντάκτη κειμένων. Η έξοδος, που δημιουργείται κατά τη διάρκεια του αρχικού ελέγχου του προγράμματος, καλείται σύνταξη ('Compilation'). Περιέχει τα εξής μέρη:

##### **1) Αποτύπωση του προγράμματος**

Η Αποτύπωση του προγράμματος ('Echo Print') εισάγεται στο πρώτο μέρος του αρχείου εξόδου και ουσιαστικά αποτελεί ένα αντίγραφο του αρχείου εισόδου, όπου απαριθμούνται οι γραμμές του αρχείου εισόδου, τοποθετώντας στην αρχή κάθε γραμμής το αντίστοιχο νούμερο της. Οι αριθμοί γραμμών αναφέρονται πάντα στο φυσικό αριθμό των γραμμών στο αρχείο εισαγωγής.

##### **2) Αναφορά σφαλμάτων**

Η αποτελεσματική ανίχνευση και αποκατάσταση των σφαλμάτων ('Error Report') αποτελούν σημαντικά μέρη οποιουδήποτε συστήματος διαμόρφωσης. Η εμπειρία δείχνει ότι στις περισσότερες εντολές σύνταξης κατά τη διάρκεια των αρχικών



σταδίων ανάπτυξης του μοντέλου ανιχνεύονται τα περισσότερα λάθη. Πολλά από τα χαρακτηριστικά λάθη που γίνονται με τις συμβατικές γλώσσες προγραμματισμού συνδέονται με έννοιες που δεν υπάρχουν στο GAMS και δημιουργούν προβλήματα στο χρόνο εκτέλεσης και είναι δύσκολο να εντοπιστούν. Στο GAMS, τα λάθη επισημαίνονται πολύ νωρίς και αναφέρονται με τρόπο κατανοητό προς στο χρήστη συμπεριλαμβανομένων σαφών προτάσεων για το πώς να διορθώσει το πρόβλημα, και να βρει τη προέλευση του λάθους.

### **3) Χάρτης αναφοράς συμβόλων**

Ο Χάρτης Αναφοράς Συμβόλων ('Symbol Reference Map') απαριθμεί όλες τις εντολές δηλώσεων (σύνολα, παράμετροι, πίνακες, μεταβλητές, εξισώσεις, μοντέλα, αρχεία εξόδου κλπ) σε αλφαβητική σειρά, τα ομαδοποιεί ανάλογα με τον τύπο τους, απεικονίζει τον αριθμό της γραμμής όπου εμφανίζονται και κατηγοριοποιεί την κάθε τους εμφάνιση.

### **4) Λίστα Εξισώσεων**

Η Λίστα Εξισώσεων ('Equation Listing') παρέχει εξαιρετική χρησιμότητα στο πρόγραμμα. Παρουσιάζει με τρόπο αναλυτικό όλες τις εξισώσεις οι οποίες έχουν δηλωθεί στο αρχείο εισαγωγής. Συνήθως αναγράφονται σε μορφή μπλοκ, δηλαδή, σε κάθε μπλοκ αναγράφονται οι εξισώσεις υπολογισμού μιας συγκεκριμένης οντότητας για κάθε χρονική στιγμή ή κάθε διαφορετικό διάστημα.

### **5) Λίστα Μεταβλητών**

Το επόμενο τμήμα του αρχείου λίστας είναι η Λίστα Μεταβλητών ('Column Listing'). Παρουσιάζει την αριθμητική τιμή των συντελεστών της κάθε μεταβλητής που εμφανίζεται σε κάθε περιορισμό-εξίσωση και ταξινομούνται κατά στήλη μπροστά από το όνομα της εξίσωσης όπου η εκάστοτε μεταβλητή εμφανίζεται. Σε κάθε μπλοκ μεταβλητών αναγράφονται οι τρεις πρώτες καταχωρήσεις για κάθε μεταβλητή, μαζί με τα όρια και τα επίπεδα τιμών. Υπάρχει, φυσικά, η δυνατότητα ο χρήστης να ορίσει τον ελάχιστο αριθμό αναγραφής στηλών για κάθε μπλοκ μεταβλητών.

### **6) Στατιστικά Μοντέλου**

Τα Στατιστικά του Μοντέλου ('Model Statistics') παρέχουν πληροφορίες για το μέγεθος και τη γραμμικότητα του μοντέλου.

#### **2.9.3.2.9 Περίληψη επίλυσης**

Το GAMS παρουσιάζει μια σύντομη Περίληψη της επίλυσης ('Solve Summary'), όπου αναγράφονται:

- το Όνομα του Μοντέλου και των Μεταβλητών Απόφασης,

- το Είδος και την Κατεύθυνση της Επίλυσης,
- το Όνομα της Επίλυσης και τον αριθμό της γραμμής όπου ξεκινά η επίλυση,
- η Βέλτιστη τιμή της Αντικειμενικής Συνάρτησης,
- ο Πραγματικός Χρόνος Επίλυσης και ο Μέγιστος Επιτρεπτός Χρόνος Επίλυσης ο οποίος ορίζεται συνήθως στα 1.000 δευτερόλεπτα,
- ο Πραγματικός Αριθμός Επαναλήψεων Επίλυσης και ο Μέγιστος Επιτρεπτός Αριθμός Επαναλήψεων ο οποίος ορίζεται συνήθως σε 1.000 επαναλήψεις,
- η Κατάσταση της Επίλυσης ('Solver Status'), δηλαδή αν η επίλυση ολοκληρώθηκε κανονικά ('normal completion'), αν οι επαναλήψεις διακόπηκαν (iteration interrupted) , αν ο χρόνος επίλυσης τελείωσε, αν ο επιλυτής δεν είναι ικανός να βρει λύσεις ('non carable'), αν η επίλυση διεκόπη από το χρήστη κλπ,
- η Κατάσταση του Μοντέλου ('Model Status'), δηλαδή αν οι τιμές που προέκυψαν είναι βέλτιστες ('optimal'), τοπικά βέλτιστες, απεριόριστες ('unbounded'), ακατόρθωτες (infeasible'), τοπικά ακατόρθωτες, ενδιάμεσα ακατόρθωτες, ακέραιες, ενδιάμεσα μη ακέραιες, άγνωστες λόγω κάποιου λάθους ('unknown'), καμία λύση δεν προέκυψε ('non optimized'), είναι μοναδική κλπ. [57] [59]

### 3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο των ΔΔΗΕ και της μαθηματικής βελτιστοποίησης. Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει αναφορά στην ανάλυση της βελτιστοποίησης της λειτουργίας των δικτύων διανομής που έχει γίνει μέχρι και σήμερα.

Ο Hen-Geul Yeh στη δημοσίευση του [60] παρουσιάζει έναν προσαρμοσμένο αλγόριθμο ελέγχου, ο οποίος εξισορροπεί την ανάγκη για ποιότητα ισχύος, δηλαδή έλεγχο της τάσης, με την επιθυμία για ελαχιστοποίηση των απωλειών. Υπάρχει ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών, που όταν η τάση όλων των κόμβων βρίσκεται σε αυτό, ο αλγόριθμος έχει μοναδικό σκοπό την μείωση των απωλειών. Όταν ξεπεραστεί αυτό το όριο, ο αλγόριθμος αυτόματα αλλάζει λειτουργία και έχει ως μοναδική αντικειμενική συνάρτηση την ρύθμιση της τάσης.

Στην [61] παρουσιάζεται η δυνατότητα ελαχιστοποίησης των απωλειών και ρύθμιση της τάσης μέσω ελέγχου της αέργου ισχύος σε δίκτυα διανομής με αυξημένη διείσδυση φωτοβολταϊκής παραγωγής. Χρησιμοποιείται ένα ακτινικό δίκτυο με ενεργά και άεργα φορτία, ενώ οι αντιστροφείς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής έχουν τη δυνατότητα παραγωγής και κατανάλωσης αέργου ισχύος. Στόχος του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στη συγκεκριμένη δημοσίευση είναι να βρεθεί η βέλτιστη λειτουργία κάθε αντιστροφέα για να διατηρούνται οι τάσεις εντός των επιτρεπτών ορίων και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες.

Στην [62] οι Zhaoyu Wang, Hao Chen και Jianhui Wang, προτείνουν έναν υβριδικό έλεγχο τάσης/αέργου ισχύος για δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκής διεσπαρμένης παραγωγής. Η λειτουργία του αποτελείται από δύο βρόγχους ελέγχου:

- Τον κλασικό συντονισμένο έλεγχο όπου καθορίζονται οι ωριαίες τιμές για τον μετασχηματιστή ΣΑΤΥΦ, τους πυκνωτές και τα SVCs, βασισμένες στις προβλέψεις για το φορτίο και τη φωτοβολταϊκή παραγωγή, με στόχο τη μείωση της διακύμανσης της τάσης και των ενεργών απωλειών.
- Τον τοπικό, μη συγκεντρωμένο έλεγχο κατά την διάρκεια συννεφιάς, όπου εφαρμόζεται όταν παρατηρηθούν μεγάλες διακυμάνσεις στην παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πάρκα. Κατά τον έλεγχο αυτό, όλοι οι SVCs και οι πυκνωτές γίνονται αυτό-ελεγχόμενοι και λειτουργούν με βάση τις τοπικές μετρήσεις με μοναδικό σκοπό την ρύθμιση της τάσης. Πρώτα λειτουργούν οι SVCs για να εξομαλύνουν το προφίλ της τάσης, ενώ αν αποτύχουν, αρχίζουν να παρέχουν άεργο ισχύ οι πυκνωτές.

Οι Kojonic και Arden στην δημοσίευση τους [63] αναφέρονται σε ένα κεντρικό έλεγχο για δίκτυα διανομής, χρησιμοποιώντας το Yukon system. Το συγκεκριμένο σύστημα παίρνει μετρήσεις τάσης, αέργου ισχύος και συντελεστή ισχύος ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα και ελέγχει διαφόρους συνδυασμούς λειτουργίας των πυκνωτών, ρυθμιστών τάσης και ΣΑΤΥΦ, με σκοπό να βρει τον βέλτιστο συνδυασμό για την ελαχιστοποίηση του κόστους και της απόκλισης των τιμών των τάσεων και των συντελεστών ισχύος από τις προκαθορισμένες. Στην αρχή του κάθε ελέγχου, ελέγχεται κατά πόσο μία αλλαγή στους πυκνωτές βελτιώνει τη λειτουργία του δικτύου, και αν βρεθεί τότε υλοποιείται. Στη συνέχεια ελέγχεται αν η τάση κάποιου κόμβου είναι εκτός ορίων, και δίνεται εντολή στο ΣΑΤΥΦ ή στους ρυθμιστές τάσης να το διορθώσουν. Αντίθετα, αν όλες οι τάσεις είναι εντός ορίων, δίνεται εντολή να μειωθούν ΣΑΤΥΦ και ρυθμιστές τάσης με την προϋπόθεση να συνεχίζουν να βρίσκονται εντός ορίων.

Μέχρι πριν μερικά χρόνια, μόνο το ΣΑΤΥΦ και οι πυκνωτές βοηθούσαν στην βελτίωση των τάσεων, τα οποία μάλιστα λειτουργούσαν τοπικά. Στη βιβλιογραφία εξετάζονται διάφορα δίκτυα διανομής με διαφορετικούς τρόπου ελέγχου. Παρατηρείται ότι η εισαγωγή των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα ελέγχου, καθώς και ο κεντρικός έλεγχος, οδηγούν σε μείωση των απωλειών, καλύτερο προφίλ τάσης, καθώς και μείωση των αλλαγών λήψεων του ΣΑΤΥΦ. Σε περίπτωση που ο αναγνώστης επιθυμεί περαιτέρω βιβλιογραφία μπορεί να ανατρέξει στην ακόλουθη βιβλιογραφία. [64] [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80] [81] [82] [83] [84] [85] [86] [87] [88] [89] [90] [91] [92] [93] [94] [95] [96] [97] [98] [99] [100] [101] [102] [103]

Τα τελευταία χρόνια, πολλές δημοσιεύσεις μελετούν την επίδραση των αποθηκευτικών μονάδων και των ελεγχόμενων φορτίων στη λειτουργία του δικτύου. Η [104] επικεντρώνεται στο πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής χωρητικότητας και τοποθεσίας της μπαταρίας. Προτείνεται μία πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση που καλύπτει διάφορες βοηθητικές υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν οι μπαταρίες. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του τη ρύθμιση της τάσης, την ελαχιστοποίηση των απωλειών, καθώς και την ελαχιστοποίηση του κόστους της ενέργειας και τη διαχείριση της συμφόρησης, ενώ μπορεί να διαχειριστεί δίκτυα μεγάλης κλίμακας.

Στην [105] οι Yanzhi Wang, Xue Lin και Massoud Pedram, παρουσιάζουν ένα σύστημα ελέγχου για μπαταρίες σε οικιακούς καταναλωτές που έχουν εγκαταστήσει φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στη δημοσίευση παρουσιάζονται αλγόριθμοι που προβλέπουν την φωτοβολταϊκή παραγωγή και την καμπύλη ζήτησης, που χρησιμοποιούνται για τον βέλτιστο έλεγχο της μπαταρίας. Η λειτουργία της μπαταρίας αποτελείται από δύο βρόγχους ελέγχου:

- Ο πρώτος εκτελείται σε εποχές λήψης αποφάσεων (κάθε μήνα), και δημιουργεί ένα γενικό πλάνο για την μελλοντική φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας.
- Ο δεύτερος εκτελείται πιο συχνά και αναθεωρεί την πολιτική που αποφασίστηκε κατά την προηγούμενη λειτουργία, ανάλογα με τις διαφορές που προκύπτουν από τις προβλεπόμενες με τις πραγματικές τιμές της φωτοβολταϊκής παραγωγής και της κατανάλωσης.

Στην [106] έγινε μία προσπάθεια μείωσης της μέγιστης τιμής της ζήτησης μέσω ελέγχου του φορτίου. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού το οποίο χρησιμοποιεί προγράμματα ελέγχου φορτίου σε οικιακές και βιομηχανικές περιοχές στη Florida. Ο αλγόριθμος αποφασίζει τον αριθμό των καταναλωτών που θα πρέπει να εγγραφούν σε κάθε πρόγραμμα και παρέχει μία σχετικά φθηνή και ισχυρή προσέγγιση του ελέγχου του φορτίου.

Οι Johanna L. Mathieu, Maryam Kamgarpour, John Lygeros, και Duncan S. Callaway στην [107] μελέτησαν την διείσδυση οικιακών θερμοστατικών ελεγχόμενων φορτίων, βοηθώντας έτσι στην εξισορρόπηση της ζήτησης με την παραγωγή, σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτή τη δημοσίευση αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού. Το πρώτο απαιτούσε ένα σημαντικό πλήθος υπολογισμών, ενώ η δεύτερη προσέγγιση περιλάμβανε μία αποσύνθεση του μοντέλου σε επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης.

Στην [108] παρουσιάζεται μια στρατηγική διαχείρισης φορτίου βασισμένη στη μέθοδο της μετατόπισης φορτίου, η οποία μπορεί να διαχειριστεί ένα μεγάλος πλήθος διαφόρων ειδών συσκευών. Ο ευρετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, βελτιστοποιεί τη λειτουργία του δικτύου, μεγιστοποιώντας την χρήση ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, ελαχιστοποιώντας την ενέργεια που παρέχεται από το κεντρικό δίκτυο και μειώνοντας την αιχμή του φορτίου.

Στην [109] προτείνεται μία νέα προσέγγιση έξυπνης διαχείρισης φορτίου για το συντονισμό πολλαπλών φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο διανομής. Το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων προβλέπεται να αυξηθεί ραγδαία στο άμεσο μέλλον, αυξάνοντας σημαντικά το φορτίο που συνδέεται στο δίκτυο. Γι αυτό το λόγο, η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να γίνει ελεγχόμενα και συντονισμένα. Στην συγκεκριμένη δημοσίευση μελετώνται οι πιθανές υπερφορτώσεις, οι διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου και οι απώλειες ενέργειας που θα επιφέρει στα δίκτυα διανομής αυτή η αλλαγή.

Η βιβλιογραφία γύρω από το θέμα της διαχείρισης του φορτίου και της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο είναι πολύ μεγάλη και ακολουθεί ένα σημαντικό δείγμα, σε περίπτωση που ο αναγνώστης επιθυμεί περαιτέρω πληροφορίες. [110] [111] [112] [113] [114] [115] [116] [117] [118] [119] [120] [121] [122] [123] [124]

[125] [126] [127] [128] [129] [130] [131] [132] [133] [134] [135] [136] [137] [138] [139]  
[140] [141] [142] [143] [144]

## **4 Είσοδοι, παραδοχές και αποτελέσματα**

### **4.1 Εισαγωγή Δεδομένων**

#### **4.1.1 Τοπολογία δικτύου - Γραμμή R220**

Όλες οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια, βασίζονται στο δίκτυο της γραμμής R220 του Υ/Σ Γενναδίου Ρόδου, το μονογραμμικό διάγραμμα της οποίας φαίνεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: Μονογραμμικό διάγραμμα γραμμής R220



Όπως φαίνεται στο μονογραμμικό διάγραμμα της γραμμής, οι κόμβοι του δικτύου είναι πάρα πολλοί σε αριθμό, γεγονός που θα καθιστούσε τον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου απαγορευτικό. Για το λόγο αυτό, έγιναν κάποιες απλοποιήσεις στο δίκτυο. Η τελική τοπολογία της γραμμής R220 παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

ΤΕΛΙΚΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΓΡ. 220 ΤΟΥ Υ/Σ ΓΕΝΝΑΔΙΟΥ														
Σύνολο	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Κόμβος
37831,5	5097	1655	3827	2560,5	1876,5	6257	2802	1359	2306,5	5265,3	1048,7	3222	555	L (m)
	95	95	95	95 Cu	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
	Cu	Cu	Cu		ACSR	ACSR	ACSR	ACSR	ACSR	ACSR	ACSR	ACSR	ACSR	ACSR
5685	300	610	50	675	200	0	250	1410	1160	50	580	50	350	Ισχύς Μ/Σ (kVA)
4548	240	488	40	540	160	0	200	1128	928	40	464	40	280	Φορτίο (kW)
5000	100	300	0	0	3000	100	0	500	0	600	300	0	100	ΦΒ(kW)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Α/Π(kW)
	-	-	-	-	-	-	ΝΑΙ	-	-	-	-	-	-	Πυκνωτής
1150	-	250	-	250	-	-	-	400	250	-	-	-	-	Η/Ζ(kW)

**Πίνακας 3: Τελική τοπολογία μετά την απλοποίηση του δικτύου για την γραμμή R220**

Η απλοποίηση βασίστηκε στην ενοποίηση πολλών κόμβων με την τοποθέτηση του συνολικού φορτίου σε σημείο ανάλογα με τις αποστάσεις και τα μεγέθη των αρχικών φορτίων, και με σκοπό το τελικό αποτέλεσμα να έχει ίδια συνολικά μεγέθη φορτίου, παραγωγής και μήκους γραμμής. Θεωρήθηκε φορτίο 0,8 της ισχύος κάθε Μ/Σ ενώ αντικαταστήσαμε και το αιολικό πάρκο με φωτοβολταϊκό αντίστοιχης ισχύος. [17]

Εκτός των παραπάνω συστημάτων θεωρήθηκε διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων και ύπαρξη μπαταριών στο δίκτυο. Τα ελεγχόμενα φορτία αποτελούν ποσοστό του συνολικού φορτίου του κάθε κόμβου και παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην Ενότητα 4.2, ενώ η λειτουργία των μπαταριών παρουσιάζεται στην Ενότητα 4.3.1.3. Η θέση και τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, καθώς και το ποσοστό διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων ορίζονται στην αρχή κάθε προσομοίωσης.

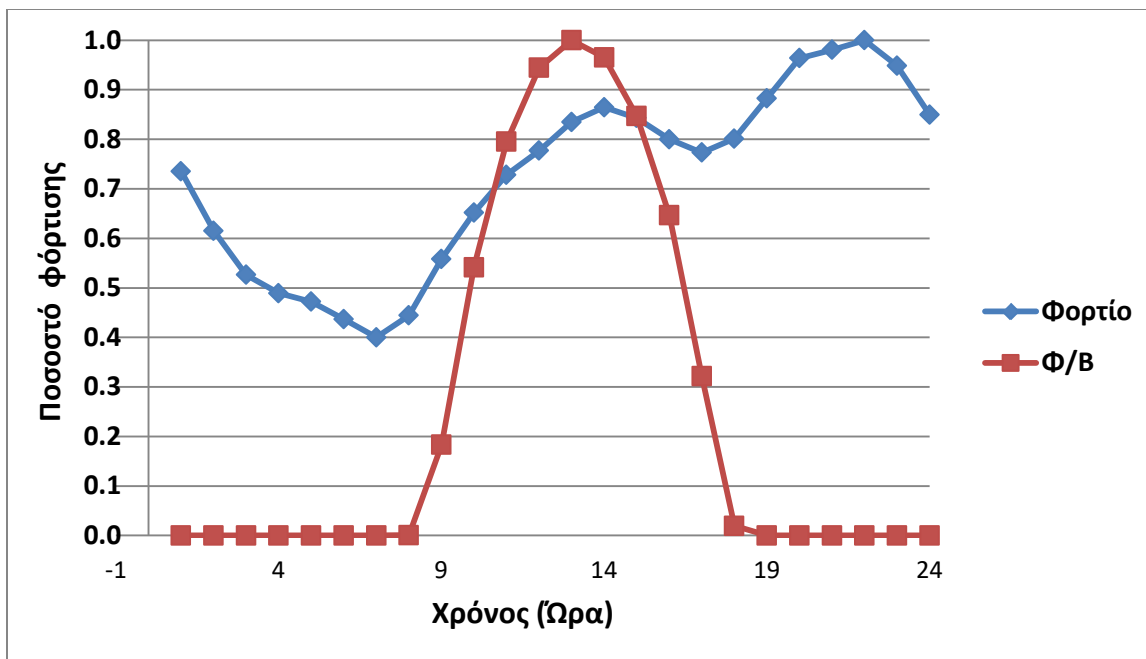
Για να είναι πιο αληθοφάνες το σενάριο βελτιστοποίησης, θεωρήθηκε ότι αναχωρούν από τον Υ/Σ δύο πανομοιότυπες γραμμές.

#### 4.1.2 Χρονοσειρές

Οι ημερήσιες χρονοσειρές φορτίου και φωτοβολταϊκής παραγωγής παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 και στην Εικόνα 16.

Ώρα	Φορτίο	Φ/Β
1	73,5%	0,0%
2	61,5%	0,0%
3	52,6%	0,0%
4	48,9%	0,0%
5	47,2%	0,0%
6	43,7%	0,0%
7	40,0%	0,0%
8	44,4%	0,1%
9	55,8%	18,3%
10	65,2%	54,2%
11	72,8%	79,5%
12	77,7%	94,4%
13	83,5%	100,0%
14	86,5%	96,5%
15	84,3%	84,7%
16	80,0%	64,7%
17	77,3%	32,2%
18	80,1%	1,9%
19	88,3%	0,0%
20	96,4%	0,0%
21	98,1%	0,0%
22	100,0%	0,0%
23	94,9%	0,0%
24	85,0%	0,0%

**Πίνακας 4: Ποσοστό φόρτισης φωτοβολταϊκής παραγωγής και κατανάλωσης ανά ώρα**

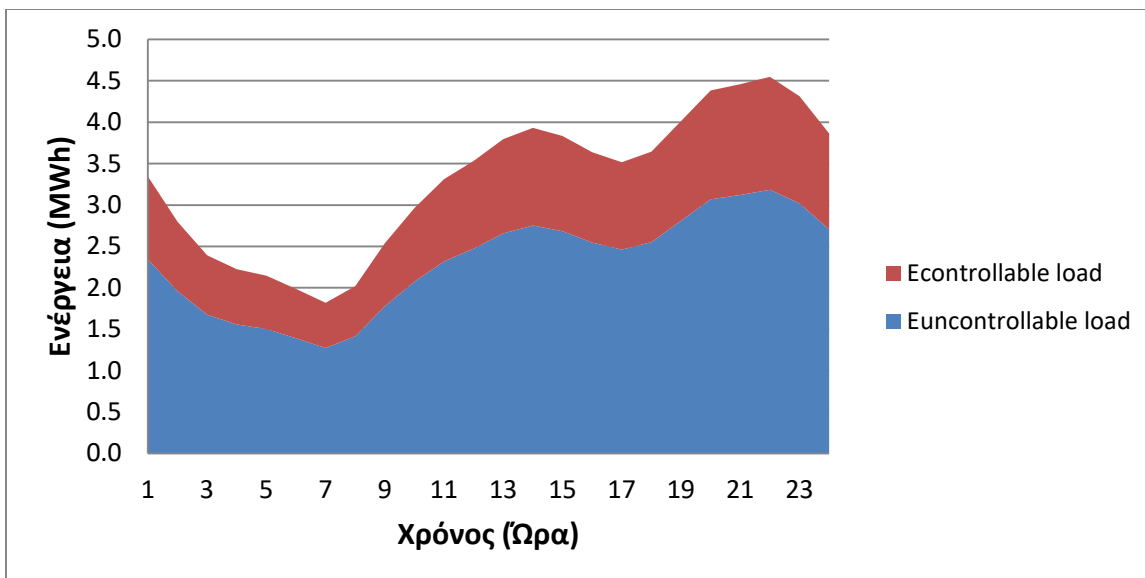


Εικόνα 16: Ποσοστό φόρτισης ανά ώρα

Σε κάθε κόμβο το φορτίο ανά ώρα είναι το ποσοστό του μέγιστου φορτίου, ενώ για τη φωτοβολταϊκή παραγωγή ανά ώρα πρέπει να πολλαπλασιαστεί το ποσοστό φόρτισης με την εγκατεστημένη ισχύ του κάθε κόμβου. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, το συνολικό μέγιστο φορτίο είναι 4548 kW ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πάρκων 5000 kW και αντιστοιχούν σε 79030 kW και 31200 kW ημερήσια ενέργεια αντίστοιχα.

## 4.2 Ελεγχόμενα Φορτία

Τα φορτία διαχωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες: ελεγχόμενα από τον διαχειριστή φορτία και μη ελεγχόμενα (Must-run). Θεωρήθηκε ότι τα ελεγχόμενα φορτία αποτελούν ένα ποσοστό του συνολικού φορτίου του κάθε κόμβου της γραμμής σε επίπεδο ενέργειας.

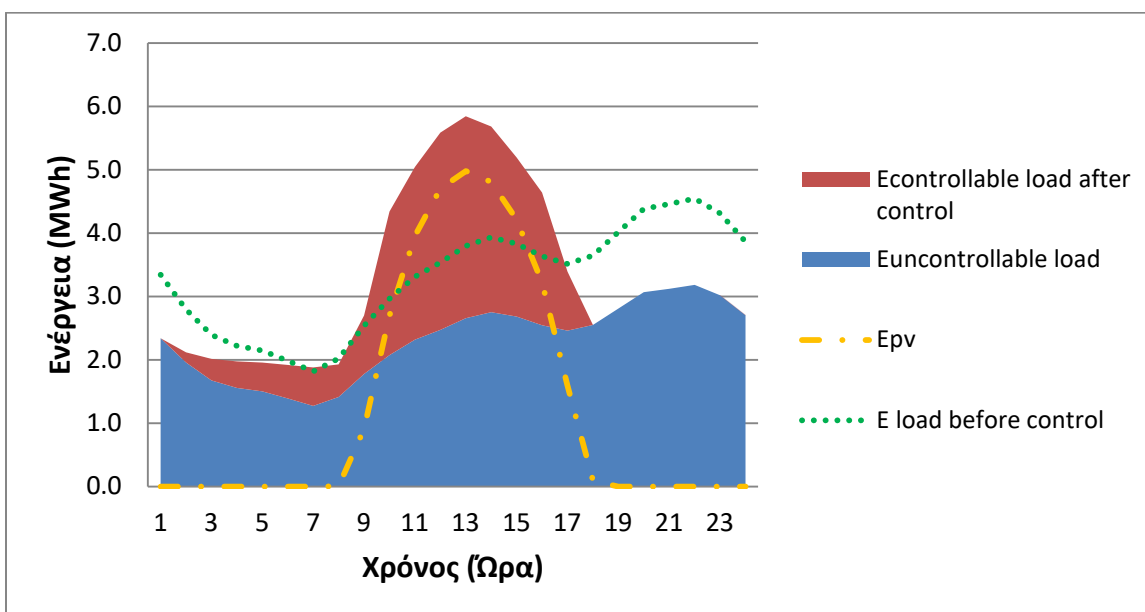


**Εικόνα 17: 30% Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων**

Τα ελεγχόμενα φορτία διαχωρίστηκαν σε τρεις υποκατηγορίες:

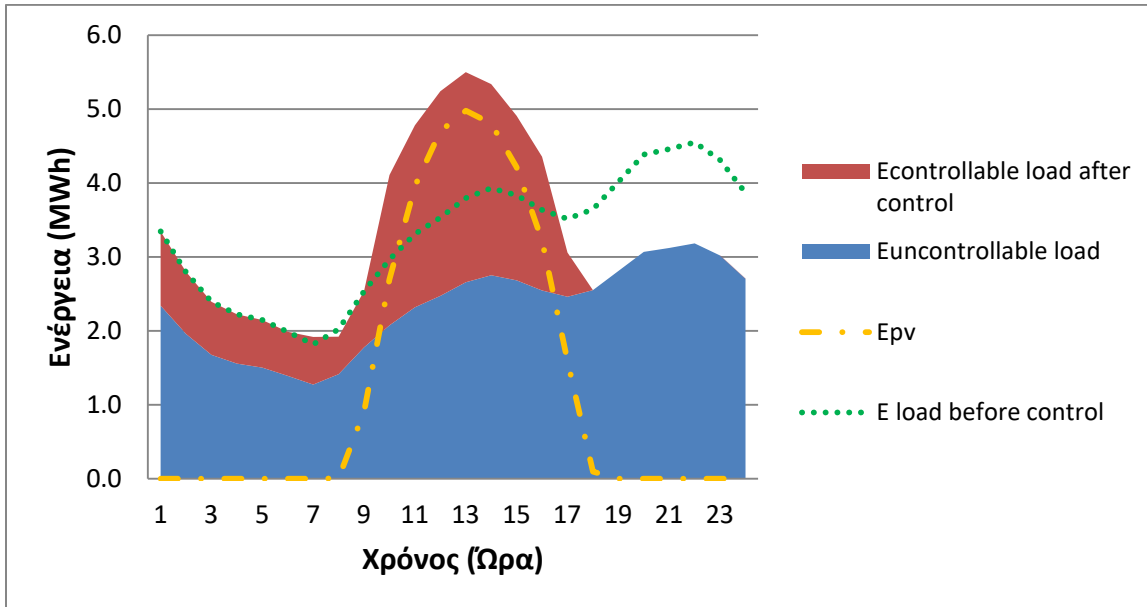
A) Τύπου A: Αυτά τα φορτία μπορούν να αναδιανεμηθούν σε οποιαδήποτε ώρα της ημέρας με μόνο περιορισμό, η συνολική ενέργεια που αντιστοιχεί σε αυτά σε ημερήσια βάση να είναι σταθερή.

Στην Εικόνα 18 παρατηρούμε ότι τα ελεγχόμενα φορτία τύπου A, μεταφέρονται κυρίως τις μεσημεριανές ώρες, όπου υπάρχει υψηλή φωτοβολταϊκή παραγωγή, καθώς και σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.



**Εικόνα 18: 30% Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων τύπου A**

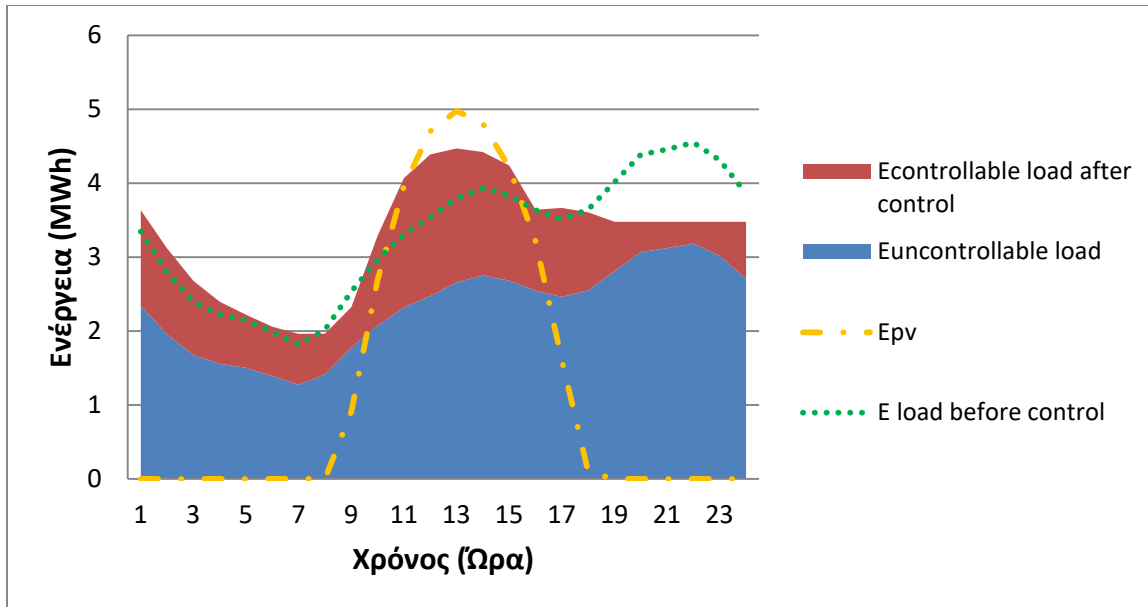
Β) Τύπου Β: Αυτά τα φορτία μπορούν να αναδιανεμηθούν μόνο σε προγενέστερο χρόνο από τη στιγμή που ήταν προγραμματισμένα κανονικά, επίσης με τον περιορισμό, η συνολική ενέργεια που αντιστοιχεί σε αυτά σε ημερήσια βάση να είναι σταθερή (Εικόνα 19).



**Εικόνα 19: 30% Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β**

Στην περίπτωση των ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β, παρατηρούμε μια μετατόπιση των φορτίων από τις βραδινές ώρες στις μεσημεριανές όπου καλύπτονται κυρίως από την φωτοβολταϊκή παραγωγή, ενώ η καμπύλη φορτίου τις πρωινές ώρες να παραμένει σταθερή.

Γ) Τύπου Γ: Η ενέργεια που αντιστοιχεί σε αυτά τα φορτία μπορεί να αναδιανεμηθεί σε ένα χρονικό εύρος  $\pm 2$  ώρες από τη στιγμή που ήταν προγραμματισμένα κανονικά (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: 30% Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων τύπου Γ

Σε αυτή τη περίπτωση μεταφέρονται όσο είναι δυνατόν τα φορτία στις μεσημεριανές ώρες όπου υπάρχει φωτοβολταϊκή παραγωγή, ενώ υπάρχει μία εξομάλυνση στη καμπύλη φορτίου, εξαλείφοντας τις κορυφές.

### 4.3 Ανάλυση Μοντέλου Βελτιστοποίησης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες του προβλήματος βελτιστοποίησης και οι δυνατότητες του. [33]

#### 4.3.1 Μοντελοποίηση του συστήματος

##### 4.3.1.1 Μετασχηματιστής

Στον Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ υπάρχει ενσωματωμένο το ΣΑΤΥΦ. Για την μοντελοποίηση αυτής της δυνατότητας του Μ/Σ εισήχθηκε μία ακέραια μεταβλητή «**tap**», η οποία αντιστοιχεί στην τιμή που παίρνει κάθε ώρα η λήψη του ΣΑΤΥΦ. Η ελάχιστη τιμή της μεταβλητής είναι 0, που αντιστοιχεί στην ελάχιστη λήψη, ενώ η μέγιστη τιμή της μεταβλητής είναι 17, που αντιστοιχεί στη μέγιστη λήψη.

#### 4.3.1.2 Φωτοβολταϊκά πάρκα

Η ισχύς που μπορούν να παράξουν τα φωτοβολταϊκά κάθε ώρα είναι συγκεκριμένη ( $P_{pv}$ ). Ωστόσο, ανάλογα με το αν επιτρέπονται ή όχι οι περικοπές στη φωτοβολταϊκή παραγωγή ορίζεται η μεταβλητή « $P_{pvcurt}$ », ώστε τελικά η ισχύς που παρέχει στο δίκτυο να είναι  $P_{pv}-P_{pvcurt}$ . Η μεταβλητή  $P_{pvcurt}$  παίρνει τιμές από 0 έως  $Curtlimit * P_{pv}$ , όπου το  $Curtlimit$  είναι μία σταθερά που έχει οριστεί και αντιπροσωπεύει το % όριο από τη συνολική παραγωγή που μπορεί να περικοπεί.

Επιπλέον, ορίστηκε η μεταβλητή « $Q_{pv}$ » που αντιστοιχεί στην άεργο ισχύ που παρέχει κάθε ώρα το φωτοβολταϊκό πάρκο. Αυτή η μεταβλητή υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς:

- 1) Όριο φαινόμενης ισχύος: Ο κάθε αντιστροφείας, και άρα ολόκληρο το φωτοβολταϊκό πάρκο, χαρακτηρίζεται από την ισχύ του. Η φαινόμενη ισχύς του πάρκου δεν μπορεί να ξεπερνά το όριο αυτό, δηλαδή:

$$\sqrt{(P_{PV} + P_{PVcurt})^2 + Q_{PV}^2} \leq S_{nom} \quad (4.1)$$

- 2) Όριο μέγιστης άεργου ισχύος: Ο χρήστης επιλέγει την μέγιστη άεργο ισχύ που μπορεί να παράγει η να απορροφά το κάθε φωτοβολταϊκό πάρκο, μέσω του ελάχιστου συντελεστή ισχύος για μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δώσει διαφορετικό ΣΙ για επαγωγική και για χωρητική λειτουργία.

$$Q_{PV} \leq (\cos(SI\_Q\_limit\_xwrit)) \cdot P_{PVnom} \quad (4.2)$$

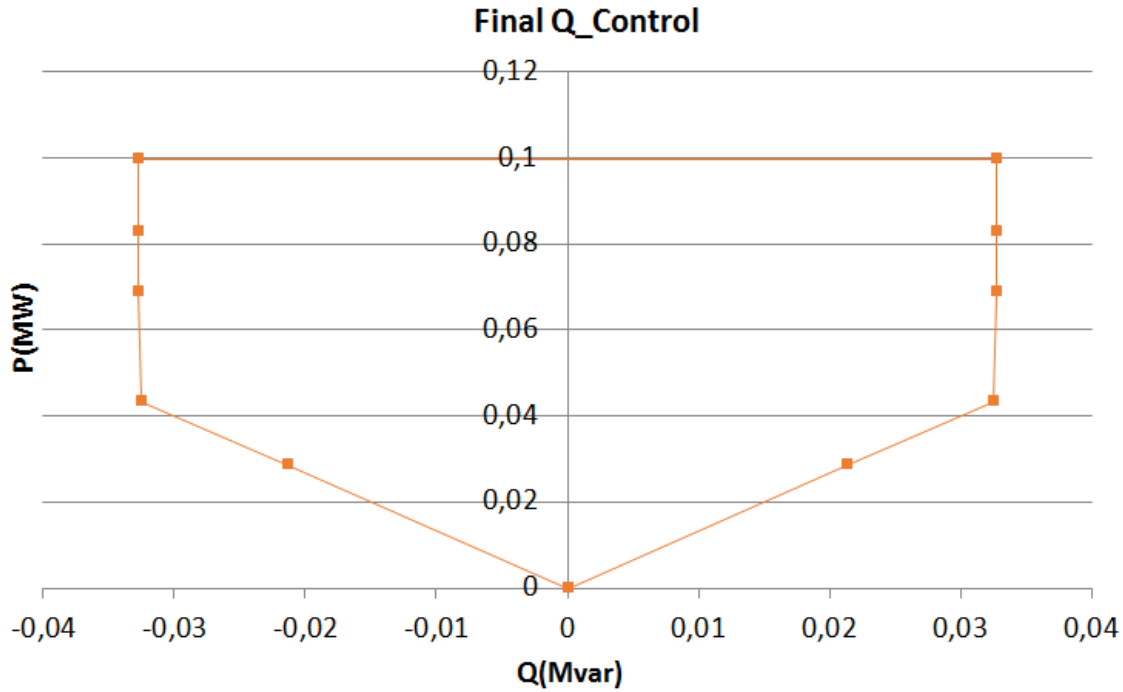
$$Q_{PV} \geq -((SI\_Q\_limit\_epag)) \cdot P_{PVnom} \quad (4.3)$$

- 3) Όριο συντελεστή ισχύος: Ο χρήστης επιλέγει τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος με τον οποίο μπορεί να λειτουργεί το κάθε φωτοβολταϊκό πάρκο. Ομοίως και εδώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δώσει διαφορετικό ΣΙ για επαγωγική και για χωρητική λειτουργία.

$$Q_{pv} \leq (\cos(SI\_operations\_xwrit)) \cdot (P_{pv} - P_{pvcurt}) \quad (4.4)$$

$$Q_{pv} \geq (\cos(SI\_operations\_epag)) \cdot (P_{pv} - P_{pvcurt}) \quad (4.5)$$

Ο τελικός συνδυασμός αέργου και ενεργού ισχύος που σχετίζεται με ένα φωτοβολταϊκό πάρκο φαίνεται στην Εικόνα 21:



Εικόνα 21: Τελικός έλεγχος της ισχύος του αντιστροφέα ενός φωτοβολταϊκού πάρκου

#### 4.3.1.3 Αποθηκευτικές μονάδες

Ο αλγόριθμος μπορεί να χειριστεί δίκτυα με απεριόριστο αριθμό αποθηκευτικών μονάδων. Για κάθε μονάδα, ο χρήστης δηλώνει την ενέργεια και την ισχύ της, καθώς και το κατώτατο όριο, τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος και την ενέργεια που είναι αρχικά αποθηκευμένη στη μπαταρία. Έχουν ορισθεί δύο μεταβλητές: « $P_{stor}$ » και « $Q_{stor}$ ». Η  $P_{stor}$  αντιπροσωπεύει την τιμή της ενεργού ισχύος που προσφέρουν (θετική τιμή) ή απορροφούν (αρνητική τιμή) οι αποθηκευτικές μονάδες ενώ η  $Q_{stor}$  αντιπροσωπεύει την τιμή της αέργου ισχύος που προσφέρουν (θετική τιμή) ή απορροφούν (αρνητική τιμή) οι αποθηκευτικές μονάδες. Τα όρια των δύο μεταβλητών φαίνονται παρακάτω:

$$-P_{stormax} \leq P_{stor} \leq P_{stormax} \quad (4.6)$$

$$-P_{stormax} * \tan(\text{acos}(PFmin_{stor})) \leq Q_{stor} \leq P_{stormax} * \tan(\text{acos}(PFmin_{stor})) \quad (4.7)$$



Ωστόσο για την μοντελοποίηση των απωλειών των αποθηκευτικών μονάδων έπρεπε να διαιρεθεί το  $P_{stor}$  σε δύο μεταβλητές, μία θετική « $P_{stor1}$ » και μία αρνητική « $P_{stor2}$ ». Επομένως:

$$0 \leq P_{stor1} \leq P_{stormax} \quad (4.8)$$

$$-P_{stormax} \leq P_{stor2} \leq 0 \quad (4.9)$$

Θεωρώντας ότι η αποθηκευτική μονάδα είναι ιδανική, η αποθηκευμένη ενέργεια σε αυτή για κάθε ώρα θα είναι :

$$E_{stor,h} = Starting\_Energy - \sum_{i=1}^h P_{stor1,i} - \sum_{i=1}^h P_{stor2,i} \quad (4.10)$$

Αυτή η εξίσωση δίνει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα με τη μία μεταβλητή. Στη συνέχεια προστέθηκε στον κώδικα η αποδοτικότητα της μπαταρίας (Storage\_efficiency). Θεωρήθηκε ότι για να εγχέεται στο δίκτυο  $P_{stor1}$ , θα αφαιρείται από τη μπαταρία  $\frac{P_{stor1}}{Storage\_efficiency}$ . Σε αυτή τη περίπτωση οι απώλειες της μπαταρίας είναι :  $(\frac{1}{Storage\_efficiency} - 1) * P_{stor1}$ . Για την περίπτωση φόρτισης της μπαταρίας από το δίκτυο, θέλουμε να φεύγει από το δίκτυο  $|P_{stor2}|$  και να αποθηκεύεται στη μπαταρία  $Storage\_efficiency * |P_{stor2}|$ . Κατά την φόρτιση της μπαταρίας οι απώλειες ενέργειας είναι:  $(1 - Storage\_efficiency) * P_{stor2}$

Τελικά η αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία θα είναι:

$$E_{stor,h} = Starting\_Energy - \sum_{i=1}^h \frac{P_{stor1,i}}{Storage\_efficiency} - \sum_{i=1}^h Storage\_efficiency * P_{stor2,i} \quad (4.11)$$

Ο περιορισμός που προκύπτει από τη μέγιστη και την ελάχιστη δυνατή αποθηκευμένη ενέργεια φαίνεται παρακάτω:

$$Lower\_Storage\_Capability \leq E_{stor,h} \leq Upper\_Storage\_Capability \quad (4.12)$$

Το πρόβλημα που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, είναι ότι η βελτιστοποίηση μπορεί να δώσει για κάθε ώρα τιμή και στις δύο μεταβλητές της μπαταρίας. Δηλαδή, ενώ χρειάζεται για παράδειγμα η μπαταρία να δώσει 1 MW στο δίκτυο, οι μεταβλητές μπορεί να παίρνουν τις εξής τιμές:  $P_{stor1} = 2$  και  $P_{stor2} = -1$ . Για να αποφευχθεί αυτή τη περίπτωση, εισήχθηκε ένας νέος τετραγωνικός περιορισμός:

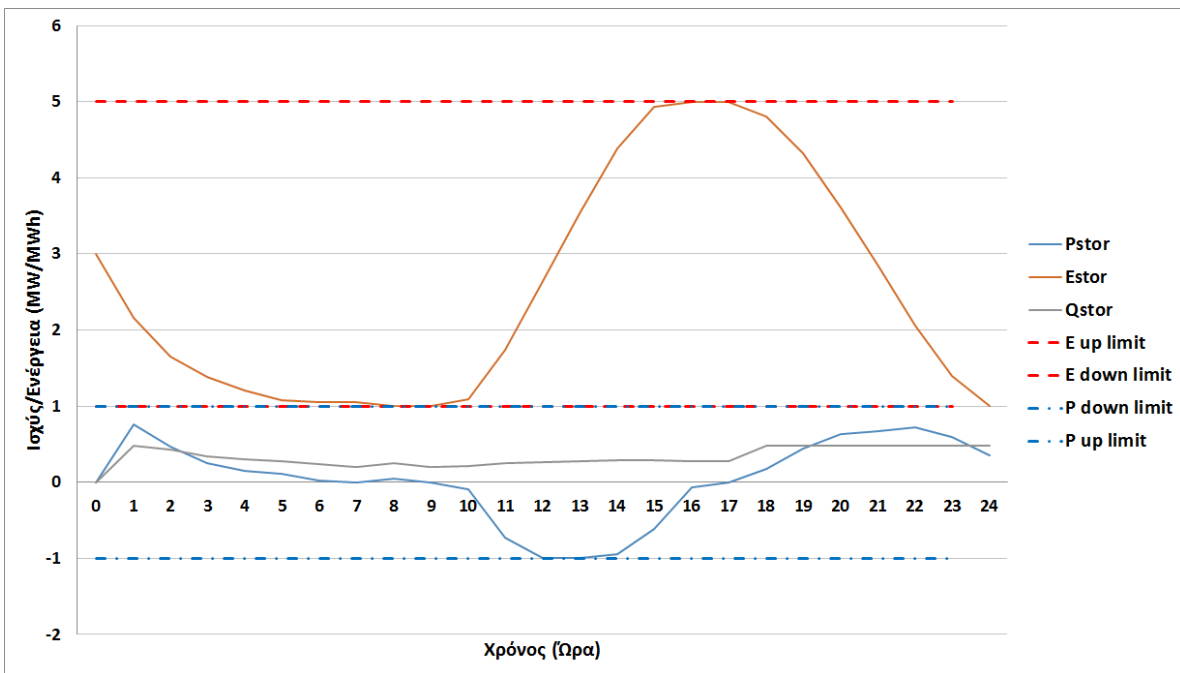
$$P_{stor1} * P_{stor2} = 0. \quad (4.13)$$

Τέλος, προστέθηκε ένας ακόμη περιορισμός, αυτός για τη φαινόμενη ισχύ της μπαταρίας:

$$\sqrt{(P_{stor1} + P_{stor2})^2 + Q_{stor}^2} \leq S_{stor} \quad (4.14)$$

Όπου:  $S_{stor} = P_{max\_stor} / PF_{min\_stor}$

Ο τρόπος λειτουργίας των αποθηκευτικών μονάδων, και οι περιορισμοί που τον διέπουν μπορεί να φανεί στην Εικόνα 22 για μια τυχαία περίπτωση δικτύου:



Εικόνα 22: Λειτουργία της μπαταρίας

Σε αυτή τη περίπτωση η αποθηκευτική μονάδα λειτουργεί με τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- Upper Storage Capability = 5 MWh
- Lower Storage Capability = 1 MWh
- Starting Energy = 3 MWh
- $P_{\max\_stor} = 1 \text{ MW}$
- $PF_{\min\_stor} = 0.9$

#### 4.3.1.4 Πυκνωτής

Ο αλγόριθμος μπορεί να χειριστεί δίκτυα με απεριόριστο αριθμό μονοβάθμιων αποζεύξιμων πυκνωτών κατά μήκος των γραμμών. Ορίστηκε μία παράμετρος που αντιστοιχεί στη σταθερή ισχύ του κάθε πυκνωτή ( $Q_{\text{bankfeeder}}$ ) και μία δυαδική μεταβλητή «**bankfeeder**», η οποία παίρνει την τιμή 1 όταν ο πυκνωτής είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, και τη τιμή 0 όταν βρίσκεται εκτός.

#### 4.3.1.5 Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη

Ο αλγόριθμος μπορεί να χειριστεί δίκτυα με απεριόριστο αριθμό Ηλεκτροπαραγωγών Ζευγών. Για κάθε Η/Ζ ο χρήστης δηλώνει την εγκατεστημένη ισχύ του και την αυτονομία του σε ώρες υπό ονομαστική εγκατεστημένη ισχύ. Ορίστηκε η μεταβλητή «**P<sub>HZ</sub>**», η οποία αντιστοιχεί στην ενεργό ισχύ που παρέχει κάθε ώρα κάθε Η/Ζ. Η μέγιστη τιμή αυτής της μεταβλητής είναι η εγκατεστημένη ισχύς του κάθε Η/Ζ. Ο μόνος περιορισμός στον οποίο περιέχεται η συγκεκριμένη μεταβλητή, για κάθε Η/Ζ είναι ο παρακάτω:

$$\sum_{h=1}^{24} P_{HZ,h} \leq E_{\max HZ} \quad (4.15)$$

όπου  $E_{\max HZ}$  είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παράξει ένα Η.Ζ. και ισούται με την εγκατεστημένη ισχύ κάθε Η/Ζ επί την αυτονομία του.

#### 4.3.1.6 Ελεγχόμενα Φορτία

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, στο συγκεκριμένο μοντέλο τα φορτία διαχωρίζονται σε ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα, ενώ για τα ελεγχόμενα υπάρχουν 3 υποκατηγορίες. Η ισχύς των μη ελεγχόμενων φορτίων είναι γνωστή ( $P_{\text{loaduncontrol}}$ ),

καθώς και η ισχύς των ελεγχόμενων φορτίων πριν την βελτιστοποίηση (Ploadcontrol), η οποία αντιστοιχεί, για κάθε ώρα, σε ένα ποσοστό του συνολικού φορτίου. Το πότε θα συνδεθούν όμως τα φορτία αυτά αποτελεί λύση της βελτιστοποίησης. Για κάθε τύπο ελεγχόμενων φορτίων έχουμε ορίσει τη μεταβλητή «**Pconnect<sub>i</sub>**», με  $i=1,2,3$ , που αντιστοιχεί στην ισχύ των ελεγχόμενων φορτίων που συνδέονται κάθε ώρα.

Για τα ελεγχόμενα φορτία τύπου Α, ο μόνος περιορισμός είναι:

$$\sum_{h=1}^{24} Pconnect1_h = \sum_{h=1}^{24} Controllable1 * Ploadcontrol \quad (4.16)$$

Όπου Controllable1 είναι το ποσοστό των ελεγχόμενων φορτίων που είναι τύπου Α (αν υπάρχουν φορτία μόνο τύπου Α, είναι 100%)

Για τα ελεγχόμενα φορτία τύπου Β, οι περιορισμοί είναι οι εξής:

$$\sum_{h=1}^{24} Pconnect2_h = \sum_{h=1}^{24} Controllable2 * Ploadcontrol_h \quad (4.17)$$

$$Pconnect2_h \leq \sum_{h1=1}^{24} Controllable2 * Ploadcontrol_{h1} - \sum_{h2=1}^{h-1} Pconnect2_{h2} \quad (4.18)$$

$$Pconnect2_h \geq \sum_{h1=1}^h Controllable2 * Ploadcontrol_{h1} - \sum_{h2=1}^{h-1} Pconnect2_{h2} \quad (4.19)$$

όπου Controllable2 είναι το ποσοστό των ελεγχόμενων φορτίων που είναι τύπου Β (αν υπάρχουν φορτία μόνο τύπου Β, είναι 100%).

Για τα ελεγχόμενα φορτία τύπου Γ, ορίσαμε 5 νέες μεταβλητές:

- **Pconnect3\_plin2<sub>h</sub>**: Αντιστοιχεί στα φορτία που συνδέθηκαν στο δίκτυο την ώρα  $h$ , ενώ ήταν κανονικά προγραμματισμένα να συνδεθούν 2 ώρες πριν.
- **Pconnect3\_plin1<sub>h</sub>**: Αντιστοιχεί στα φορτία που συνδέθηκαν στο δίκτυο την ώρα  $h$ , ενώ ήταν κανονικά προγραμματισμένα να συνδεθούν 1 ώρα πριν.

- **Pconnect3\_miden<sub>h</sub>**: Αντιστοιχεί στα φορτία που συνδέθηκαν στο δίκτυο την ώρα h και ήταν προγραμματισμένα να συνδεθούν εκείνη την ώρα.
- **Pconnect3\_sin1<sub>h</sub>**: Αντιστοιχεί στα φορτία που συνδέθηκαν στο δίκτυο την ώρα h, ενώ ήταν κανονικά προγραμματισμένα να συνδεθούν 1 ώρα μετά.
- **Pconnect3\_sin2<sub>h</sub>**: Αντιστοιχεί στα φορτία που συνδέθηκαν στο δίκτυο την ώρα h, ενώ ήταν κανονικά προγραμματισμένα να συνδεθούν 2 ώρες μετά.

Οι περιορισμοί που αφορούν τα φορτία Γ είναι οι εξής:

$$P_{connect3\_plin2_{h+2}} + P_{connect3\_plin1_{h+1}} + P_{connect3\_miden_h} + P_{connect3\_sin1_{h-1}} + P_{connect3\_sin2_{h-2}} = Controllable3 * Ploadcontrol_h \quad (4.20)$$

$$P_{connect3_h} = P_{connect3\_plin2_h} + P_{connect3\_plin1_h} + P_{connect3\_miden_h} + P_{connect3\_sin1_h} + P_{connect3\_sin2_h} \quad (4.21)$$

όπου Controllable3 είναι το ποσοστό των ελεγχόμενων φορτίων που είναι τύπου Γ (αν υπάρχουν φορτία μόνο τύπου Γ, είναι 100%)

#### 4.3.1.7 Ροή φορτίου - Τάση

Η ροή φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο αναδρομικών εξισώσεων που ονομάζεται DistFlow branch equations και περιλαμβάνει την ενεργό ισχύ  $P_i$ , την άεργο ισχύ  $Q_i$  και το μέτρο της τάσης  $V_i$  στο τέλος κάθε κλάδου, για να εκφράσει τις αντίστοιχες ποσότητες στην αρχή του κλάδου. Οι εξισώσεις αυτές είναι οι εξής:

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \quad (4.22)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} \quad (4.23)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (4.24)$$

Έτσι αν είναι γνωστά τα  $P_0$ ,  $Q_0$ ,  $V_0$ , στον πρώτο κόμβο του ακτινικού δικτύου, τότε οι αντίστοιχες ποσότητες μπορούν να υπολογιστούν και για τους υπόλοιπους κόμβους με τις παραπάνω εξισώσεις. [145]

Ωστόσο οι τετραγωνικοί όροι στις εξισώσεις αντιπροσωπεύουν τις απώλειες επάνω στους κλάδους, οι οποίες έχουν πολύ μικρότερη τιμή από τις ισχύεις που ρέουν σε κάθε κλάδο. Για την απλοποίηση του συστήματος, αγνοούμε αυτούς τους όρους και προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} \quad (4.25)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} \quad (4.26)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad (4.27)$$

Επιπλέον, με τη παραδοχή ότι οι τάσεις είναι κοντά στην ονομαστική, ισχύει ότι:

$$(V_i - V_{nom})^2 \approx 0 \rightarrow V_i^2 \approx V_{nom}^2 + 2V_{nom}(V_i - V_{nom}) \quad (4.28)$$

και άρα η τελευταία εξίσωση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$V_{i+1} = V_i - \frac{(r_i P_i + x_i Q_i)}{V_{nom}} \quad (4.29)$$

Με βάση τα παραπάνω, η τάση στον ζυγό για κάθε ώρα προκύπτει από τον τύπο:

$$\begin{aligned} V_b = & 19.1625 + 0.2625 * tap + (R_{transf} \\ & * \sum_{i=1}^{\#lines} \sum_{j=1}^{\#nodes} (P_{pv,ij} + (P_{stor1,ij} + P_{stor2,ij}) - (\sum_{k=1}^3 P_{connect,kij} \\ & + P_{loaduncontrol,ij})) + X_{transf} \\ & * \sum_{i=1}^{\#lines} \sum_{j=1}^{\#nodes} (bankfeeder_{ij} * Q_{bankfeeder_{ij}} + Q_{pv,ij} + Q_{stor,ij} \\ & - \tan(\text{acos}(\text{sintisxios})) * (\sum_{k=1}^3 P_{connect,kij} + P_{loaduncontrol,ij}))) \\ & / V_{nom} \quad (4.30) \end{aligned}$$

όπου  $V_b$  : η τάση στον ζυγό, η οποία θα πρέπει να παραμένει πάνω από την ονομαστική τιμή της τάσης της γραμμής (20kV), δηλαδή:

$$V_z \geq V_{nom} \quad (4.31)$$

ενώ η τάση για κάθε γραμμή, σε κάθε κόμβο  $i$ , για κάθε ώρα δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned}
 V_i = & V_{i-1} + (R_i * \sum_{j=i}^{\#nodes} (P_{pv,j} + (P_{stor1,j} + P_{stor2,j})) - (\sum_{k=1}^3 P_{connect,kj} + P_{loaduncontrol,j})) \\
 & + X_i \\
 & * \sum_{j=i}^{\#nodes} (bankfeeder_j * Q_{bankfeeder_j} + Q_{pvj} + Q_{storj} \\
 & - \tan(\text{acos}(\text{sintisxios})) * (\sum_{k=1}^3 P_{connect,kj} + P_{loaduncontrol,j})) \\
 & / V_{nom} \quad (4.32)
 \end{aligned}$$

Η τιμή της τάσης κάθε κόμβου θα πρέπει να βρίσκεται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους, το οποίο δηλώνεται από τον χρήστη σαν είσοδος, σε ποσοστό επι της ονομαστικής τιμής της τάσης, δηλαδή για 8%:

$$0.92V_{nom} \leq V_i \leq 1.08V_{nom} \quad (4.33)$$

### 4.3.2 Θερμικό όριο γραμμών και μετασχηματιστή

Τόσο για τους αγωγούς, όσο και για τους μετασχηματιστές, υπάρχει μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος που δεν πρέπει να υπερβαίνεται. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στην μέγιστη θερμοκρασία που μπορούν να αντέξουν, χωρίς να προκληθούν ζημιές.

Ο περιορισμός για κάθε κλάδο του δικτύου είναι:

$$I \leq I_{thermal} \rightarrow \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} * V_i} \leq I_{thermal} \quad (4.34)$$

Ενώ για τον Μ/Σ:

$$\sqrt{P^2 + Q^2} \leq P_{nom\_transf} \quad (4.35)$$

όπου P,Q η ενεργός και η άεργος ισχύς που διαρρέουν την γραμμή/ΜΣ.

### 4.3.3 Αντικειμενική Συνάρτηση

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να επιλύσει προβλήματα ελαχιστοποιώντας τις παρακάτω αντικειμενικές συναρτήσεις, είτε ξεχωριστά, είτε συνδυάζοντας τις σε μία πολυαντικειμενική συνάρτηση:

- Απόκλιση της τάσης κάθε κόμβου, κάθε ώρα από την ονομαστική τιμή

$$o.f_1 = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^{\#nodes} (V_{j,i} - V_{nom})^2 \quad (4.36)$$

- Ενεργές απώλειες γραμμής και Μ/Σ

$$o.f_2 = \sum_{i=1}^{\#lines} P_{losses,i} + P_{losses,trans} \quad (4.37)$$

όπου  $P_{losses} = 3 \cdot I^2 \cdot R$

- Περικοπές ενεργού ισχύος από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής

$$o.f_3 = \sum_{i=1}^{\#DG} P_{Gcurt,i} \quad (4.38)$$

- Άεργος ισχύς που παράγεται ή καταναλώνεται από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής

$$o.f_4 = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^{\#DG} Q_{gi,j}^2 \quad (4.39)$$

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα κάθε φορά να επιλέγει τον συνδυασμό των αντικειμενικών συναρτήσεων που θέλει να επιλύσει ο αλγόριθμος, δίνοντας το κατάλληλο βάρος σε κάθε αντικειμενική συνάρτηση, ανάλογα με το τι τον ενδιαφέρει να βελτιστοποιήσει περισσότερο.

$$o.f = \sum_{i=1}^4 w * o.f_i \quad (4.40)$$



#### 4.3.4 Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται σε ψευδοκώδικα ένα δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου, το οποίο παρουσιάζει τα βήματα που εμπεριέχονται στον κώδικα που αναπτύχθηκε. Οι γραμμές κώδικα είναι προσεγγιστικές, καθώς με την εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων μεταβάλλονται.

Γραμμές Κώδικα	Λειτουργία
0-20	Δήλωση και εισαγωγή των συνόλων (sets)
20-60	Δήλωση, εισαγωγή και πράξεις μεταξύ των πινάκων στοιχείου (scalars)
60-130	Δήλωση των παραμέτρων (parameters)
130-350	Εισαγωγή παραμέτρων
350-380	Δήλωση μεταβλητών
380-400	Δήλωση θετικών μεταβλητών
400-415	Δήλωση ακέραιων μεταβλητών
415-430	Δήλωση δυαδικών μεταβλητών
430-450	Εισαγωγή άνω και κάτω ορίων των μεταβλητών όπου χρειάζεται
450-560	Δήλωση των ισοτικών και ανισοτικών περιορισμών
560-690	Εισαγωγή των ισοτικών και ανισοτικών περιορισμών
690-700	Δήλωση του μοντέλου και των ιδιοτήτων του – Δήλωση επίλυσης
700-750	Δήλωση και υπολογισμός παραμέτρων μετά την βελτιστοποίηση
750-800	Εξαγωγή δεδομένων σε υπολογιστικό φύλλο EXCEL

**Πίνακας 5: Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου**

## 4.4 Δείκτες Αξιολόγησης (Key Performance Indicators)

Για την κατανόηση της βελτίωσης της λειτουργίας του δικτύου μέσω του αλγορίθμου, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο από KPIs. Τα KPIs είναι δείκτες που απεικονίζουν τη ποσοστιαία βελτίωση μεταξύ του προτεινόμενου αλγορίθμου και ενός σεναρίου βάσης σε συγκεκριμένους τομείς. Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω:

### 1) KPI 1 – Μείωση των απωλειών

Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό αυτού του δείκτη είναι ο εξής:

$$KPI1 = \frac{Plosses_{SG} - Plosses_{BL}}{Plosses_{BL}} \cdot 100\% \quad (4.41)$$

Όπου:

$Plosses_{SG}$ : Το σύνολο των απωλειών ενέργειας στις γραμμές και στον Μ/Σ, στο προτεινόμενο από τον αλγόριθμο σενάριο.

$Plosses_{BL}$ : Το σύνολο των απωλειών ενέργειας στις γραμμές και στον Μ/Σ, στο βασικό σενάριο.

### 2) KPI 2 – Αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο

Για να υπολογιστεί αυτός ο δείκτης, αυξήθηκε η συνολική ισχύς των ΑΠΕ, μέχρις ότου κάποιος περιορισμός να παραβιαστεί. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του δείκτη είναι ο εξής:

$$KPI2 = \frac{HC_{SG} - HC_{BL}}{HC_{BL}} \cdot 100\% \quad (4.42)$$

Όπου:

$HC_{SG}$ : Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ στο προτεινόμενο από τον αλγόριθμο σενάριο.

$HC_{BL}$ : Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ στο βασικό σενάριο.

### 3) ΚΡΙ 3 – Αύξηση του μεριδίου ενέργειας από ΑΠΕ

Ο συγκεκριμένος δείκτης δεν είναι ανεξάρτητος, αλλά σχετίζεται με το ΚΡΙ 2 και υπολογίζεται ως εξής:

$$KPI3 = \Delta\lambda = \lambda_{SG} - \lambda_{BL} \quad (4.43)$$

Όπου:

$\lambda_{SG}$ : Το ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ στο προτεινόμενο από τον αλγόριθμο σενάριο.

$\lambda_{BL}$ : Το ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ στο βασικό σενάριο.

Το ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ υπολογίζεται ως εξής:

$$\lambda = \frac{E_{RES}}{E_{LOAD}} \quad (4.44)$$

Όπου:

$E_{RES}$ : Το σύνολο της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ

$E_{LOAD}$ : Το σύνολο της ζήτησης των φορτίων

### 4) ΚΡΙ 4 – Ρύθμιση της τάσης

Ο δείκτης αυτός είναι και ο σημαντικότερος. Για τη ποσοτικοποίηση της διακύμανσης της τάσης σε έναν αριθμό, υπολογίστηκε η RMS τιμή της διακύμανσης της τάσης σε όλους τους κόμβους για όλες τις ώρες:

$$d_V = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{24} (\sum_{i=1}^{nodes} (V_{i,t} - V_n)^2)}{V_n^2}} \quad (4.45)$$

Όπου:

$d_V$ : Ο δείκτης της διακύμανσης της τάσης στο δίκτυο για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

$V_{i,t}$ : Η τάση στον κόμβο  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ .

$V_n$ : Η ονομαστική τάση.

Το KPI που αναπαριστά την ρύθμιση της τάσης υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$KPI4 = \frac{dV_{SG} - dV_{BL}}{dV_{BL}} \cdot 100\% \quad (4.46)$$

Όπου:

$dV_{SG}$ : Ο δείκτης της διακύμανσης τάσης στο προτεινόμενο από τον αλγόριθμο σενάριο.

$dV_{BL}$ : Ο δείκτης της διακύμανσης τάσης στο βασικό σενάριο.

## 5) KPI 5 – Μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>

Ο συγκεκριμένος δείκτης επίσης δεν είναι ανεξάρτητος, αλλά σχετίζεται με το KPI 2, αφού η παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ ισοδυναμεί με ενέργεια που δεν παράγεται πλέον από συμβατικές μονάδες. Ο συγκεκριμένος δείκτης υπολογίζεται ως εξής:

$$KPI5 = \frac{CE_{BL} - CE_{SG}}{CE_{BL}} \cdot 100\% = \frac{1}{1 - \lambda_{BL}} \cdot \Delta\lambda \quad (4.47)$$

Όπου:

$CE_{SG}$ : Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> στο προτεινόμενο από τον αλγόριθμο σενάριο.

$CE_{BL}$ : Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> στο βασικό σενάριο.

## 4.5 Baseline Scenario (BL)

Για να γίνουν κατανοητές οι βελτιώσεις που επιφέρει ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε σε αυτή την εργασία, αναπτύχθηκε επίσης ένα υπολογιστικό φύλο excel που αναπαριστά τη κλασική μέθοδο λειτουργίας των δικτύων διανομής. Στο βασικό αυτό σενάριο, οι πυκνωτές είναι μόνιμα συνδεδεμένοι στο δίκτυο, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής λειτουργούν συνεχώς με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και άρα δεν έχουν τη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος. Επιπλέον, οι περικοπές ενεργού ισχύος δεν είναι δυνατές ενώ ο έλεγχος του ΣΑΤΥΦ γίνεται με τη μέθοδο της αντιστάθμισης (LDC) που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.7.2.

Η καμπύλη LDC που επιλέχθηκε στα επόμενα παραδείγματα είναι αρκετά κοντά στη βέλτιστη. Αν επιλεγόταν μία καμπύλη χειρότερης τάξης από αυτή που

χρησιμοποιήθηκε, τα αποτελέσματα θα ήταν πολύ καλύτερα, αλλά θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν πλασματικά. Συγκεκριμένα επιλέξαμε τις κατάλληλες τιμές R,X,b της εξίσωσης:

$$V = b + I_R * R + I_x * X \quad (4.48)$$

με σκοπό η τάση στον ζυγό στις περιπτώσεις μέγιστου και ελαχίστου φορτίου να είναι 21.2 kV και 20.47 kV αντίστοιχα, ενώ ο λόγος R/X να είναι ίσος με τον αντίστοιχο λόγο των γραμμών, για παράδειγμα στην περίπτωση 95 ACSR αγωγού  $0.215/0.334=0.6437$ .

## 4.6 Smart Grid Scenario (SG)

Αυτό το σενάριο αφορά τον προτεινόμενο από τον αλγόριθμο τρόπο λειτουργίας του δικτύου. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν κεντρικό, συντονισμένο έλεγχο, μέσω του οποίου ρυθμίζεται η χρήση όλων των συσκευών που βρίσκονται στο δίκτυο. ΣΑΤΥΦ, πυκνωτές, συσκευές αποθήκευσης, μονάδες διεσπαρμένες παραγωγής, ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη και τα ελεγχόμενα φορτία, χειρίζονται βέλτιστα από τον αλγόριθμο για τις εκάστοτε ανάγκες.

## 4.7 Excel αποτελεσμάτων

Μετά από κάθε προσομοίωση, τόσο οι τιμές των μεταβλητών όσο και τα δεδομένα του προβλήματος εξάγονται σε ένα συγκεντρωτικό αρχείο excel, δημιουργώντας αυτόματα πίνακες, διαγράμματα και λοιπές πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την γρήγορη και ολοκληρωμένη διατύπωση συμπερασμάτων. Κάθε αρχείο εμπεριέχει τη πλήρη πληροφορία που είναι απαραίτητη για την ανάλυση ενός δικτύου. Πιο συγκεκριμένα:

- **Σταθμοί Διεσπαρμένης Παραγωγής**

Για κάθε σταθμό διεσπαρμένης παραγωγής παρουσιάζεται η παραγωγή ενεργού ισχύος, η παραγωγή και η κατανάλωση αέργου ισχύος, ενώ υπολογίζεται αυτόματα και ο συντελεστής ισχύος, ο οποίος χρωματίζεται ανάλογα με το αν είναι επαγωγικός ή χωρητικός. Ο χωρητικός ΣΙ αντιστοιχεί σε έγχυση αέργου ισχύος, η οποία παίρνει θετική τιμή και χρωματίζεται με μπλε χρώμα. Αντίθετα ο επαγωγικός ΣΙ αντιστοιχεί σε απορρόφηση αέργου ισχύος, η οποία παίρνει αρνητική τιμή και χρωματίζεται με πράσινο χρώμα. Όταν ο ΣΙ βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 0.995 και 1, χρωματίζεται με κίτρινο χρώμα. Επίσης παρουσιάζονται οι περικοπές ενεργού ισχύος καθώς και τα διαγράμματα Q-P για κάθε σταθμό διεσπαρμένης παραγωγής. Οι περικοπές χρωματίζονται με πράσινο

χρώμα όταν δεν ξεπερνούν το 10%, κίτρινο όταν δεν ξεπερνούν το 20%, πορτοκαλί το 30%, κόκκινο το 40% και σκούρο κόκκινο όταν οι απώλειες βρίσκονται ανάμεσα στο 40 και 50%.

hour	Pg1	Pg2	Pg3	Pg4	Pg5	Pg6	Pg7	Pg8	Pg9	Pms	Qms
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,34	1,02
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,24	0,55
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0,45
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,98	0,45
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,99	0,45
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0,45
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,46	0,22
8	6,67E-05	0,0002	0,0004	0,000333	6,67E-05	0,002	0,0002	6,67E-05	0	2,00	0,45
9	0,018267	0,0548	0,1096	0,091333	0,018267	0,548	0,0548	0,018267	0	1,63	0,42
10	0,053933	0,1618	0,3236	0,269667	0,053933	1,618	0,1618	0,053933	0	0,91	-0,51
11	0,0792	0,2376	0,4752	0,396	0,0792	2,376	0,2376	0,0792	0	0,30	0,29
12	0,094067	0,2822	0,5644	0,470333	0,094067	2,822	0,2822	0,094067	0	-0,32	0,70
13	0,0996	0,2988	0,5976	0,498	0,0996	2,988	0,2988	0,0996	0	-0,46	0,79
14	0,096133	0,2884	0,5768	0,480667	0,096133	2,884	0,2884	0,096133	0	-0,30	0,72
15	0,084333	0,253	0,506	0,421667	0,084333	2,530	0,253	0,084333	0	0,63	0,12
16	0,0644	0,1932	0,3864	0,322	0,0644	1,932	0,1932	0,0644	0	1,09	0,06
17	0,032067	0,0962	0,1924	0,160333	0,032067	0,962	0,0962	0,032067	0	1,75	0,02
18	0,001933	0,0058	0,0116	0,009667	0,001933	0,058	0,0058	0,001933	0	2,82	0,78
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,84	1,24
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,87	1,25
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,88	1,25
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,89	1,26
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,45	1,07
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,83	1,23

Πίνακας 6: Ενεργός ισχύς σταθμών ΔΠ

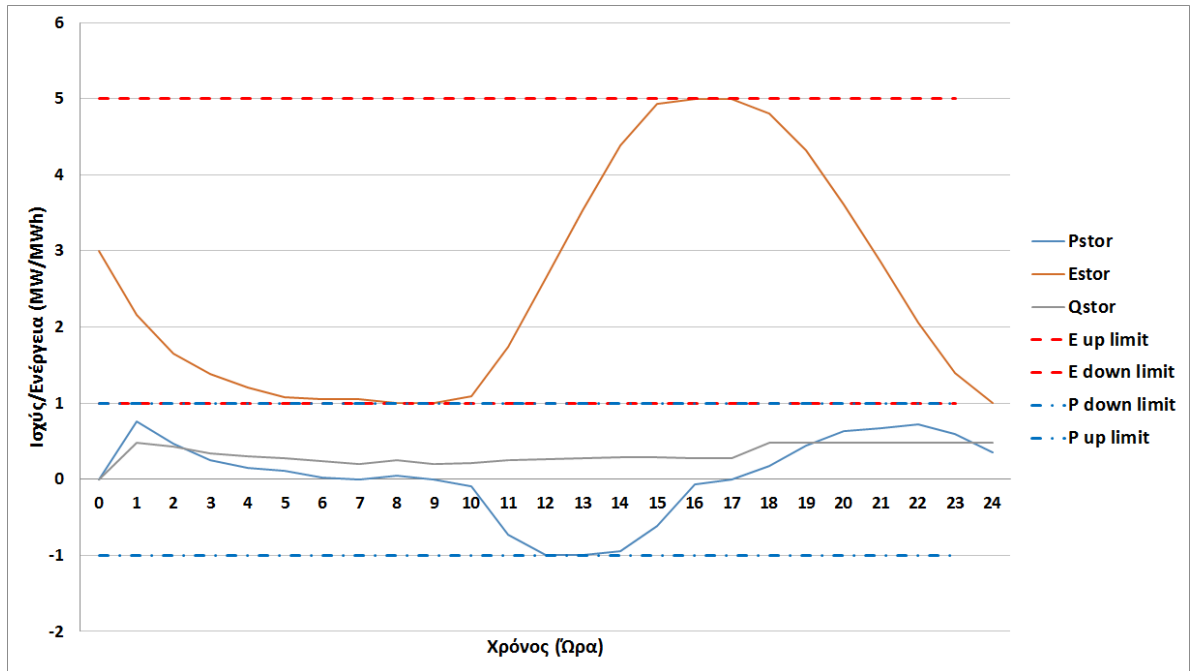
hour	Qg1	Qg2	Qg3	Qg4	Qg5	Qg6	Qg7	Qg8	Qg9	cos1	cos2	cos3	cos4	cos5	cos6	cos7	cos8	cos9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	-5E-05	-0,00015	-0,0003	-0,00025	4,99997E-05	0,0015	0,00015	5E-05	0	0,8	0,8	0,8	0,800001	0,800002	0,8	0,8	0,8	0
9	-0,0137	-0,0411	-0,0822	-0,0685	0,000242406	0,411	0,041099999	0,013699999	0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,999912	0,8	0,8	0,8	0
10	0,032868	0,0986052	0,197210463	0,164342	0,03286841	0,986052	0,098605231	0,03286841	0	0,853921	0,853921	0,853921	0,853921	0,853921	0,853921	0,853921	0,853921	0
11	-0,03287	-0,098605	0,197210453	0,164342	-0,000257388	0,762787	0,098605231	0,03286841	0	0,923621	0,923621	0,923621	0,923621	0,999995	0,952137	0,923621	0,923621	0
12	-0,03287	-0,098605	0,197210452	0,164342	-0,008758659	0,411216	0,098605231	0,03286841	0	0,94403	0,94403	0,94403	0,94403	0,995693	0,989549	0,94403	0,94403	0
13	-0,03287	-0,098605	0,197210453	0,164342	-0,002492448	0,378719	0,098605231	0,03286841	0	0,949627	0,949627	0,949627	0,949627	0,999687	0,992063	0,949627	0,949627	0
14	-0,03287	-0,098605	0,197210453	0,164342	-0,006192106	0,44893	0,098605231	0,03286841	0	0,946222	0,946222	0,946222	0,946222	0,997932	0,9881	0,946222	0,946222	0
15	-0,03287	0,0659068	0,197210462	0,164342	0,032868409	0,986052	0,098605231	0,03286841	0	0,931735	0,967704	0,931735	0,931735	0,931735	0,931735	0,931735	0,931735	0
16	-0,03287	-0,098605	0,197210461	0,164342	0,032868407	0,986052	0,098605231	0,03286841	0	0,890699	0,890699	0,890699	0,890699	0,890699	0,890699	0,890699	0,890699	0
17	-0,02405	-0,07215	0,144299997	0,12025	0,024049996	0,7215	0,072149999	0,02405	0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0
18	-0,00145	-0,00435	0,0087	0,00725	0,00145	0,0435	0,00435	0,00145	0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 7: Άεργος ισχύς και ΣΙ σταθμών ΔΠ



- **Αποθηκευτική μονάδα**

Στο excel παρουσιάζεται επίσης το διάγραμμα λειτουργίας της αποθηκευτικής μονάδας του δικτύου. Περιλαμβάνει την αποθηκευμένη ενέργεια, την ενεργό και άεργο ισχύ καθώς και τα όρια της ενέργειας και της ισχύος.



**Εικόνα 24: Λειτουργίας της αποθηκευτικής μονάδας**

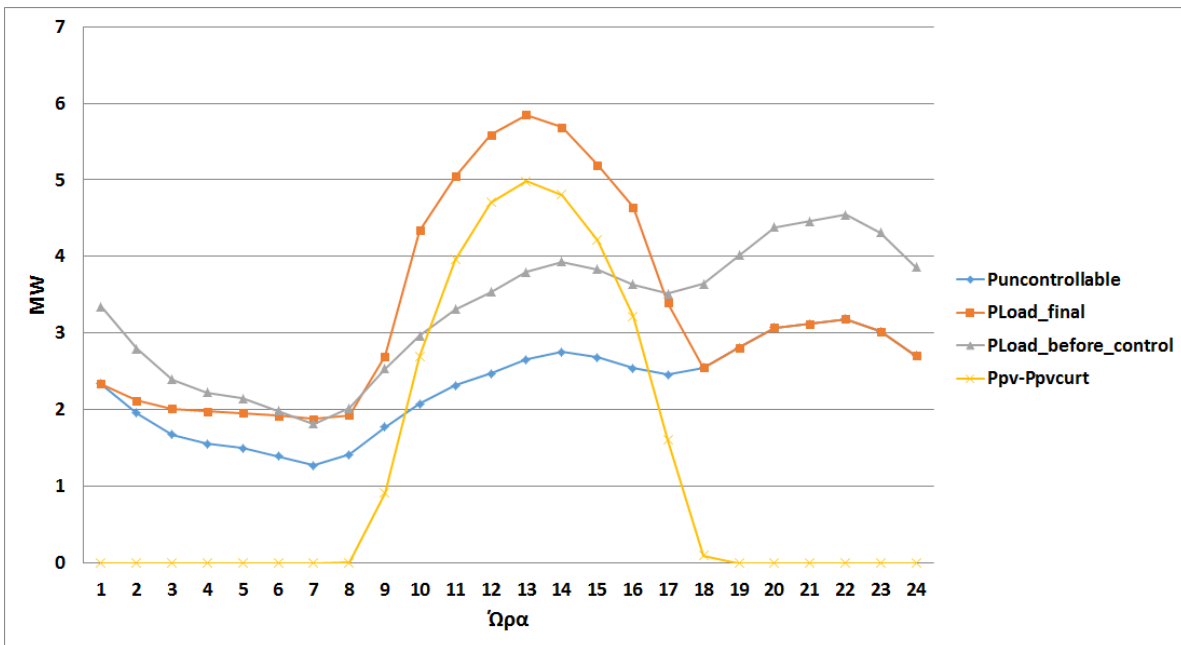
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η μπαταρία παρέχει την αποθηκευμένη της ενέργειας στο δίκτυο κατά τις πρωινές ώρες, μέχρις ότου ξεκινήσει η φωτοβολταϊκή παραγωγή. Τότε ξεκινάει η φόρτιση της μπαταρίας, η οποία συνεχίζεται όσο παράγεται ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πάρκα και μέχρις ότου γεμίσει η μπαταρία. Τέλος η μπαταρία παρέχει την ενέργεια της στο δίκτυο κατά τις βραδινές ώρες, όπου η ζήτηση είναι αυξημένη.

- **Ελεγχόμενα Φορτία**

Όταν στο δίκτυο έχουμε προστεθούν ελεγχόμενα φορτία, παρουσιάζεται σε ένα διάγραμμα το νέο προφίλ ζήτησης ενέργειας όπως προέκυψε μετά τη βελτιστοποίηση. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα αυτό περιλαμβάνει την ενέργεια των μη ελεγχόμενων φορτίων, την ενέργεια όλων των φορτίων πριν τη βελτιστοποίηση, και τη ζήτηση μετά τη βελτιστοποίηση. Επιπλέον δίνεται η πληροφορία της παραγόμενης από τις Μονάδες



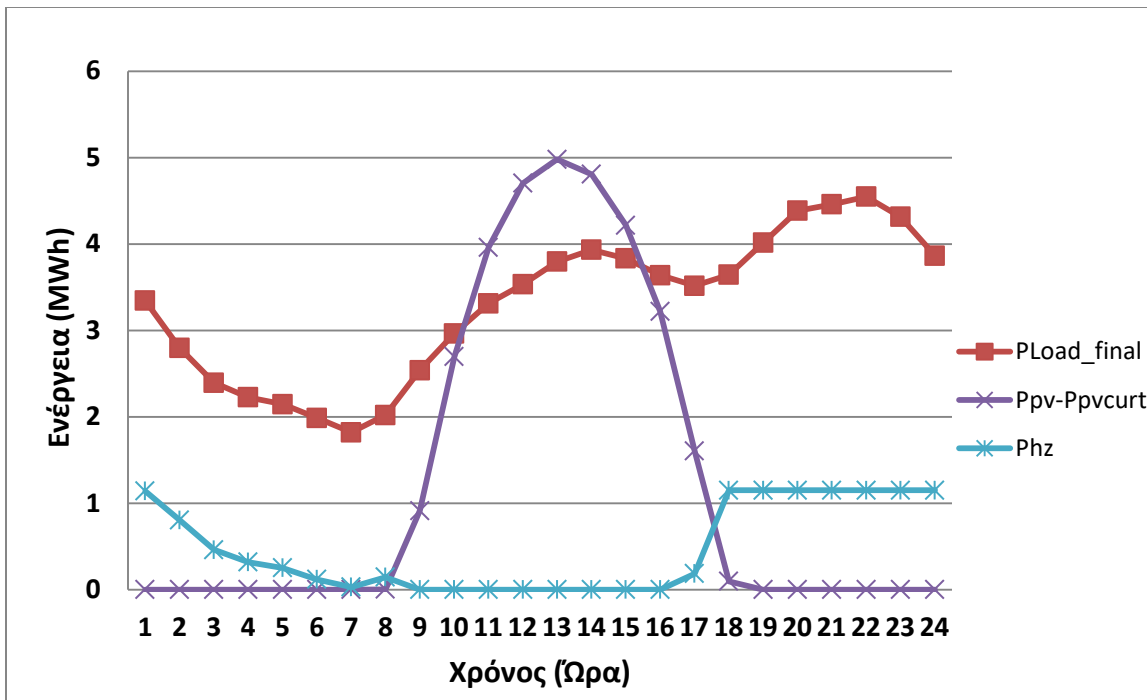
Διεσπαρμένης Παραγωγής ενέργειας, καθώς αυτή παίζει όπως φαίνεται σημαντικό ρόλο στην αναδιανομή των φορτίων.



Εικόνα 25: Προφίλ ζήτησης ενέργειας μετά τη βελτιστοποίηση

- **Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη**

Στις προσομοιώσεις που περιλάμβαναν Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη, παρουσιάζεται στο προφίλ ζήτησης και η ενέργεια που κάθε ώρα προσφέρουν τα Η/Ζ στο δίκτυο.



Εικόνα 26: Παραγωγή ενέργειας από τα Η/Ζ

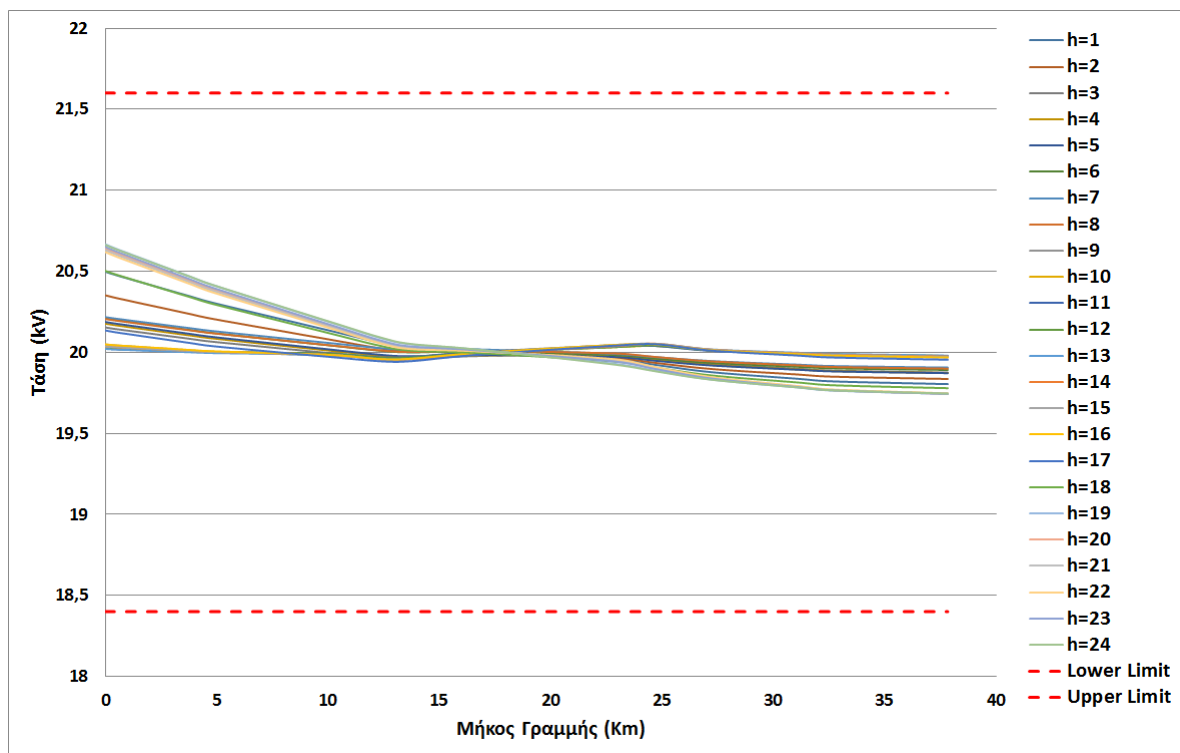
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι τα Η/Ζ συνδέονται μόλις σταματάει η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πάρκα και παραμένουν συνδεδεμένα με μέγιστη ισχύ όλες της βραδινές ώρες όπου η ζήτηση είναι υψηλή. Επίσης τα Η/Ζ συνδέονται και τις πρωινές ώρες ακολουθώντας το προφίλ της ζήτησης.

- **Τιμή των τάσεων**

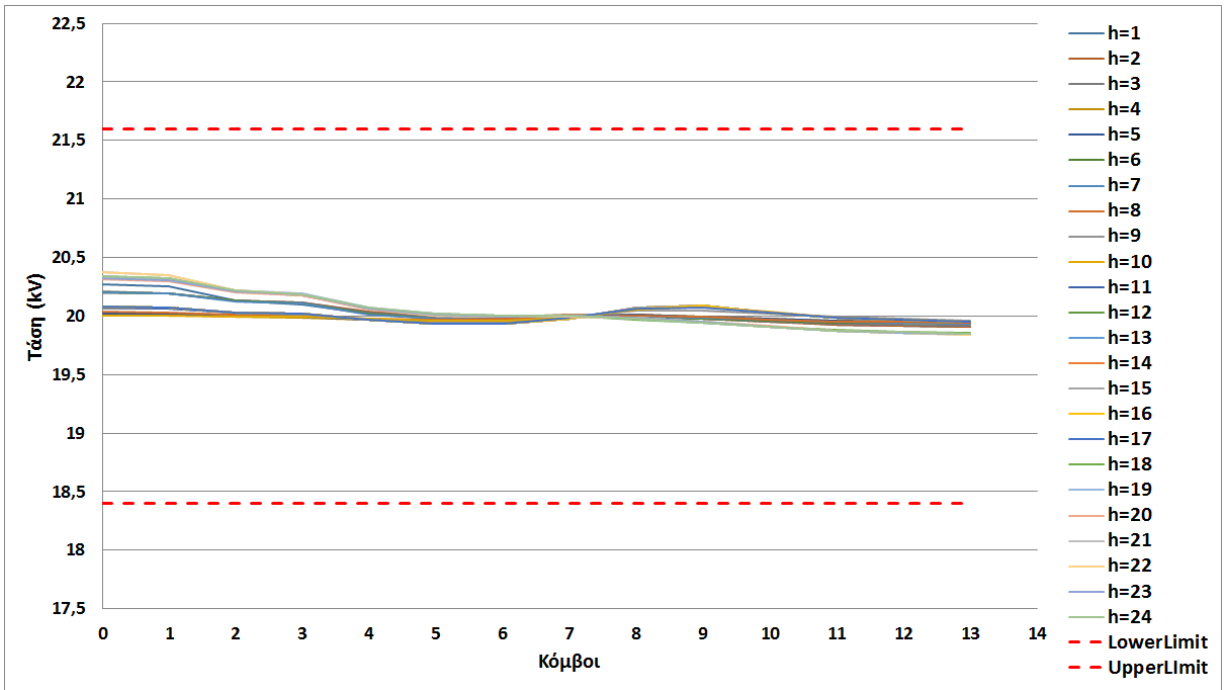
Επίσης παρουσιάζονται σε πίνακα (Πίνακας 9) οι τιμές των τάσεων σε κάθε κόμβο του δικτύου για κάθε ώρα, ενώ ταυτόχρονα απεικονίζονται και στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις Εικόνες 27, 28 και 29.

line(Km)	0	0,555	3,777	4,82567	10,091	12,3975	13,7565	16,5585	22,8155	24,692	27,2525	31,0795	32,7345	37,8315
hour	Vz	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13
1	20,44255	20,42044	20,30393	20,26657	20,11105	20,04413	20,02128	20,01567	19,9778	19,94161	19,89574	19,85548	19,83898	19,82222
2	20,3521	20,33404	20,23906	20,20861	20,08256	20,02836	20,01029	20,00777	19,97408	19,94381	19,90543	19,87175	19,85794	19,84392
3	20,35893	20,34196	20,25189	20,22297	20,10074	20,04806	20,02888	20,01903	19,96702	19,94112	19,9083	19,87949	19,86769	19,8557
4	20,17717	20,16564	20,1066	20,08774	20,01444	19,98313	19,97571	19,98801	19,98464	19,96056	19,93005	19,90328	19,8923	19,88116
5	20,18779	20,17617	20,11627	20,09712	20,02161	19,98931	19,98092	19,99025	19,97986	19,95663	19,92719	19,90135	19,89076	19,88
6	20,20996	20,19845	20,1387	20,11957	20,04263	20,00965	20,00006	20,00496	19,98387	19,96237	19,93511	19,91119	19,90138	19,89143
7	20,21768	20,20675	20,14972	20,13146	20,05724	20,02538	20,01562	20,01809	19,99074	19,97106	19,94611	19,92421	19,91524	19,90612
8	20,20602	20,19473	20,13633	20,11765	20,04326	20,01141	20,00265	20,00967	19,99348	19,97172	19,94403	19,91974	19,90979	19,89967
9	20,04901	20,04238	20,01304	20,00391	19,97967	19,96409	19,96749	20,00005	20,04344	20,0431	20,01285	19,98912	19,97955	19,96911
10	20	19,99681	19,98516	19,98185	19,97588	19,95871	19,96328	19,99512	20,03899	20,05523	20,02541	20,00592	19,9983	19,98891
11	20,02831	20,02403	20,00854	20,00404	19,99115	19,96732	19,96969	19,99609	20,02952	20,04134	20,01085	19,99332	19,98663	19,97748
12	20,02833	20,02397	20,00887	20,00454	19,99205	19,96627	19,96859	19,99536	20,03073	20,04256	20,01073	19,99304	19,98636	19,97693
13	20,03188	20,02663	20,00963	20,00473	19,99094	19,96386	19,96671	19,99704	20,04161	20,04493	20,01011	19,99019	19,9826	19,97217
14	20,03822	20,033	20,01151	20,00517	19,98605	19,95721	19,95969	19,99145	20,03991	20,05169	20,01462	19,99248	19,98398	19,97267
15	20,03964	20,03381	20,01135	20,00467	19,98492	19,95752	19,96037	19,99343	20,04432	20,05117	20,01412	19,99119	19,98231	19,97083
16	20,04219	20,03609	20,0115	20,0041	19,98224	19,95681	19,95984	19,99387	20,04593	20,05164	20,01503	19,9911	19,98173	19,97012
17	20,05799	20,04985	20,0145	20,00357	19,97067	19,9472	19,95079	19,99141	20,05758	20,06085	20,02064	19,9903	19,97813	19,96451
18	20,50708	20,48089	20,34177	20,29709	20,10778	20,02556	19,99516	19,97711	19,91292	19,87636	19,82685	19,78371	19,76604	19,74802
19	20,43706	20,41142	20,27682	20,23368	20,05556	19,97899	19,95376	19,95157	19,92462	19,88118	19,82613	19,77781	19,758	19,7379
20	20,64032	20,60831	20,43797	20,38326	20,15059	20,05026	20,01287	19,99018	19,91928	19,87185	19,81172	19,75895	19,73732	19,71536
21	20,63	20,59808	20,42857	20,37414	20,14362	20,04426	20,0078	19,98801	19,92392	19,87567	19,8145	19,76083	19,73882	19,71648
22	20,61794	20,58613	20,41759	20,36349	20,13547	20,03724	20,00189	19,98546	19,92935	19,88014	19,81776	19,76302	19,74058	19,71779
23	20,64988	20,61777	20,44667	20,39169	20,15705	20,05582	20,01755	19,9922	19,91498	19,86831	19,80914	19,75722	19,73593	19,71432
24	20,67893	20,64783	20,481	20,42734	20,19497	20,09459	20,05458	20,02007	19,9202	19,87839	19,82539	19,77888	19,75981	19,74045

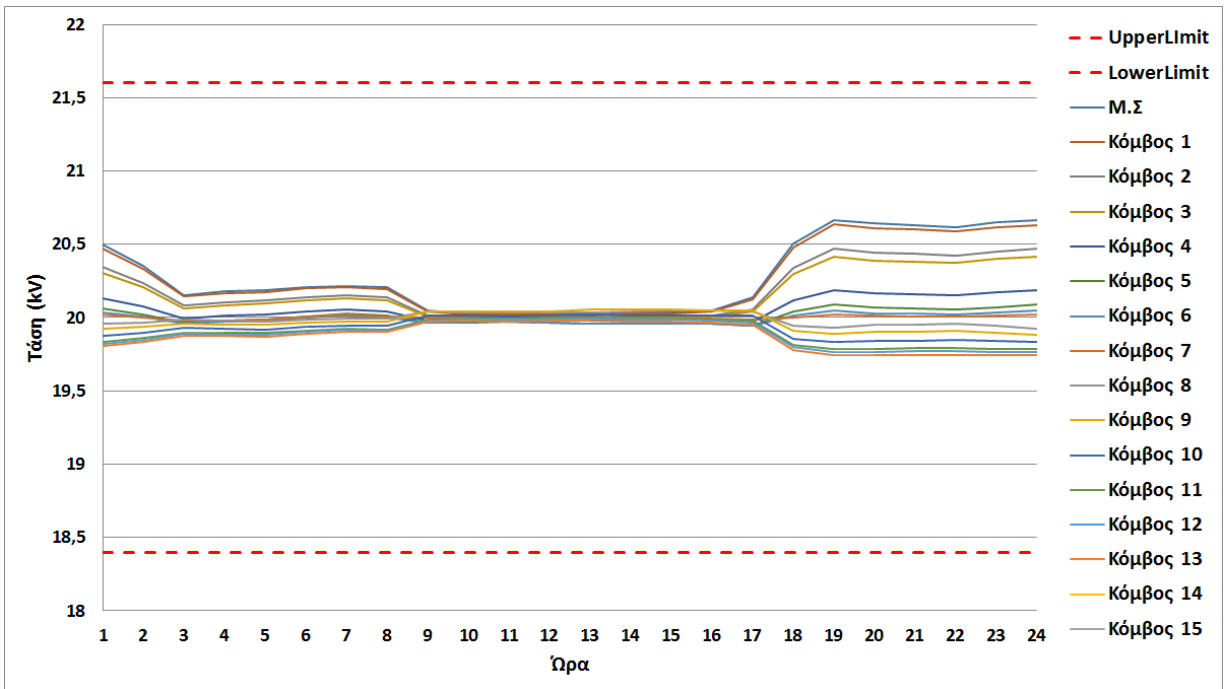
Πίνακας 9: Τιμές των τάσεων



Εικόνα 27: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT

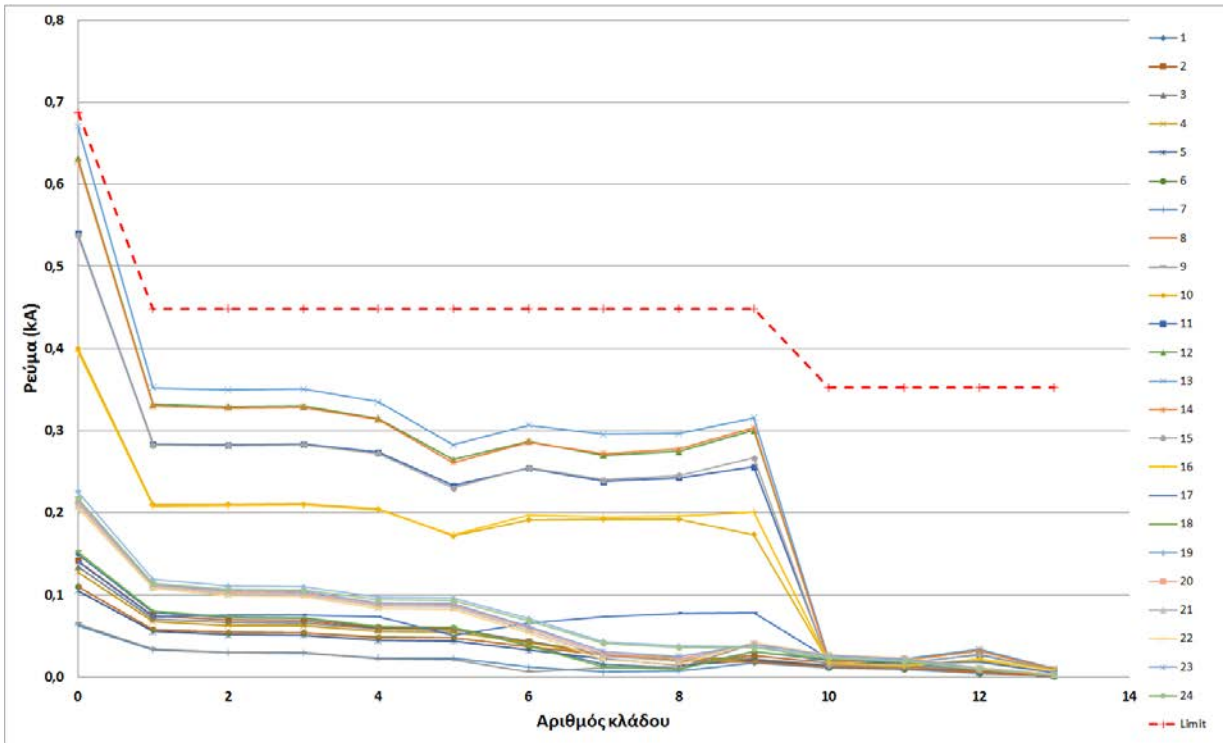


Εικόνα 28: Προφίλ της τάσης για κάθε ώρα ανά κόμβο



Εικόνα 29: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα

- Ρεύμα στους κλάδους



Εικόνα 30: Προφίλ των ρευμάτων για κάθε ώρα ανά κλάδο



## 5 Κεντρικός και συντονισμένος έλεγχος των συσκευών του δικτύου

### 5.1 Βαθμιαία προσθήκη δυνατότητας ελέγχου κάθε συσκευής.

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.5, δημιουργήθηκε ένα αρχείο excel που αναπαριστά την υπάρχουσα λειτουργία των δικτύων διανομής. Για αυτή τη παθητική λειτουργία, δεν πραγματοποιήθηκε κάποια βελτιστοποίηση καθώς η απλοϊκή αυτή περίπτωση δεν περιλαμβάνει κάποια μεταβλητή. Με βάση αυτόν τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου, προστέθηκε σταδιακά η δυνατότητα ελέγχου στις συσκευές του δικτύου όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 4.3. Οι προσθήκες που έγιναν κάθε φορά παρουσιάζονται στον Πίνακα 10 όπου κάθε σενάριο, λειτουργεί προσθετικά του προηγούμενου. Στο σενάριο 4 προστέθηκε στο δίκτυο μία μπαταρία ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και ισχύος 1 MW στον κόμβο 8 του δικτύου που είναι και το σημείο ρύθμισης του. Στο σενάριο 5 θεωρήσαμε την ύπαρξη τεσσάρων Ηλεκτροπαραγωγών Ζευγών, τριών εκ των οποίων είναι ισχύος 250 kW και βρίσκονται στους κόμβους 5, 10, 12 και ένα ισχύος 400 kW στον κόμβο 6. Θεωρήθηκε ότι τα Η/Ζ λειτουργούν συνεχώς με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Στο σενάριο 6 προστέθηκαν 30% ελεγχόμενα φορτία τύπου Β στο δίκτυο. Μία πιο ολοκληρωμένη και στοχευμένη μελέτη που αφορά τα ελεγχόμενα φορτία, παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 8.

Σενάριο 0:	Baseline
Σενάριο 1:	Προσθήκη δυνατότητας ελέγχου ΣΑΤΥΦ
Σενάριο 2:	Προσθήκη δυνατότητας ελέγχου ζεύξης/απόζευξης πυκνωτή
Σενάριο 3:	Προσθήκη δυνατότητας ελέγχου ΣΙ των σταθμών ΔΠ
Σενάριο 4:	Προσθήκη μπαταρίας
Σενάριο 5:	Προσθήκη δυνατότητας ελέγχου Η/Ζ
Σενάριο 6:	Προσθήκη ελεγχόμενων φορτίων

Πίνακας 10: Σενάρια – Προσθήκη δυνατότητας ελέγχου συσκευών

Για να γίνουν κατανοητές οι βελτιώσεις που επιφέρει στη λειτουργία του δικτύου κάθε σενάριο, υπολογίστηκε σε κάθε περίπτωση το Hosting Capacity, η RMS τιμή της διακύμανσης της τάσης σε όλους τους κόμβους για όλες τις ώρες και οι απώλειες ενέργειας του δικτύου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 11, ενώ τα αντίστοιχα KPIs στον Πίνακα 12:

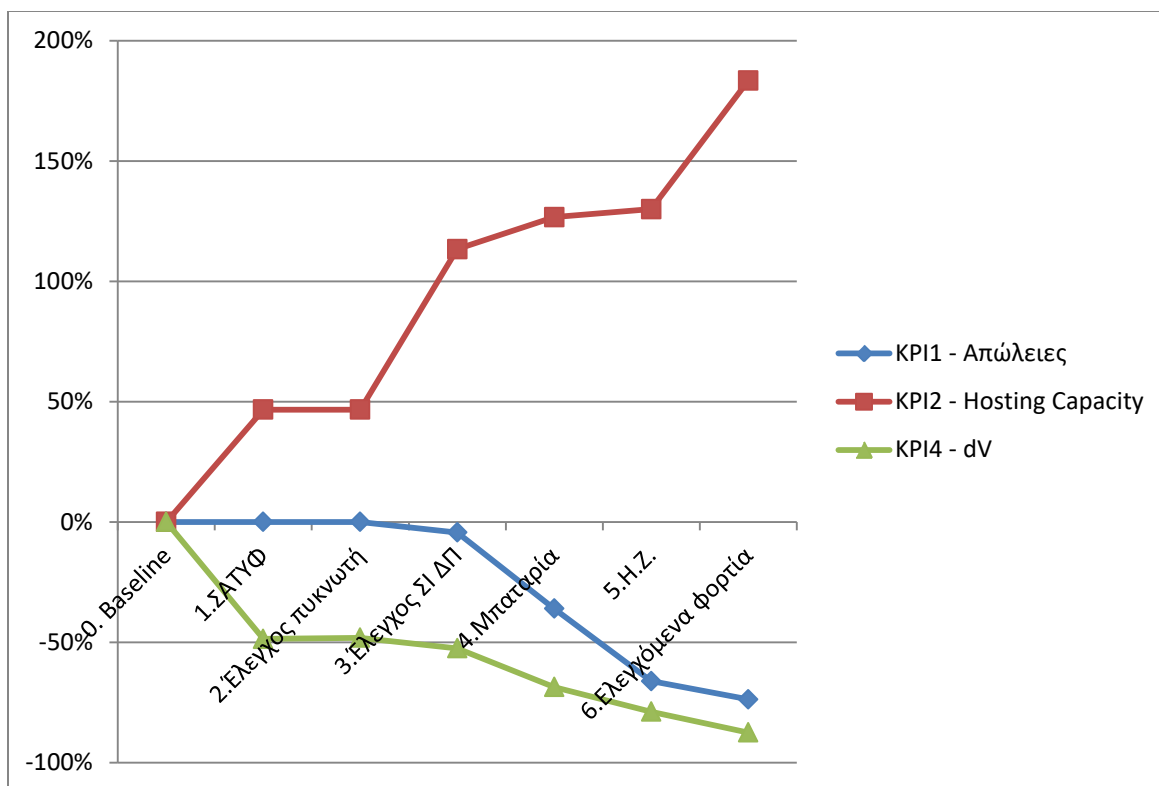
	0.Baseline	1.ΣΑΤΥΦ	2. Έλεγχος πυκνωτή	3.Έλεγχος ΣΙ ΔΠ	4.Μπαταρία	5.Η/Ζ	6.Ελεγχόμενα φορτία
Απώλειες (MWh)	1,56	1,56	1,56	1,49	1,00	0,53	0,41
Hosting Capacity (MW)	7,5	11	11	16	17	17,25	21,25
dV	0,51	0,26	0,27	0,24	0,16	0,11	0,06

**Πίνακας 11: Αποτελέσματα για κάθε σενάριο**

	0.Baseline	1.ΣΑΤΥΦ	2.Έλεγχος πυκνωτή	3.Έλεγχος ΣΙ ΔΠ	4.Μπαταρία	5.Η/Ζ	6.Ελεγχόμενα φορτία
KPI 1 - Απώλειες	0%	0%	0%	-4%	-36%	-66%	-74%
KPI 2 - Hosting Capacity	0%	47%	47%	113%	127%	130%	183%
KPI 4 – Ρύθμιση της τάσης	0%	-49%	-48%	-52%	-69%	-79%	-87%

**Πίνακας 12: KPIs για κάθε σενάριο**





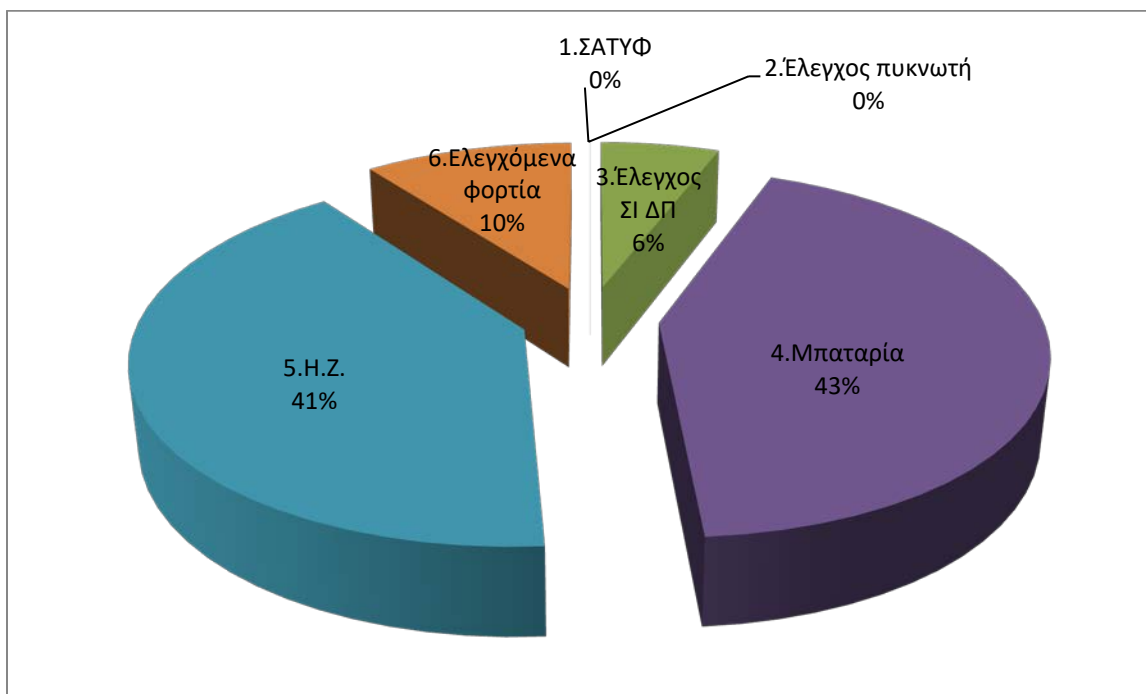
**Εικόνα 31: KPIs για κάθε σενάριο**

Στην Εικόνα 31, παρουσιάζονται τα KPIs για κάθε σενάριο που περιγράφηκε προηγουμένως. Παρατηρήθηκε ότι με τη προσθήκη των ΣΑΤΥΦ βελτιώνονται κατά 50% τόσο το Hosting Capacity όσο και η τάση του δικτύου, ενώ οι απώλειες του παραμένουν σταθερές. Η δυνατότητα ελέγχου της ζεύξης και της απόζευξης του πυκνωτή δεν επιφέρει κάποια βελτίωση σε κανέναν από τους τρεις δείκτες, ενώ ο έλεγχος του ΣΙ των σταθμών ΔΠ βελτίωσε σημαντικά το Hosting Capacity (66%) και σε πολύ μικρότερο βαθμό τους άλλους δύο δείκτες (4%). Στο τέταρτο σενάριο με τη προσθήκη της μπαταρίας, παρατηρείται σημαντική βελτίωση στις απώλειες του δικτύου της τάξεως του 32% και μικρότερη βελτίωση της τάξεως του 14% για το Hosting Capacity και 17% για τη τάση. Η προσθήκη των Η/Ζ, βελτιώνει σημαντικά τις απώλειες του δικτύου καθώς επιφέρει επιπλέον βελτίωση 30%, και σε μικρότερο βαθμό τη τάση (10%), ενώ δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου το Hosting Capacity. Τέλος, η διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β στο σύστημα, βελτιώνει επιπλέον κατά 50% το Hosting Capacity του δικτύου, και σε μικρότερο βαθμό τους άλλους δύο δείκτες.

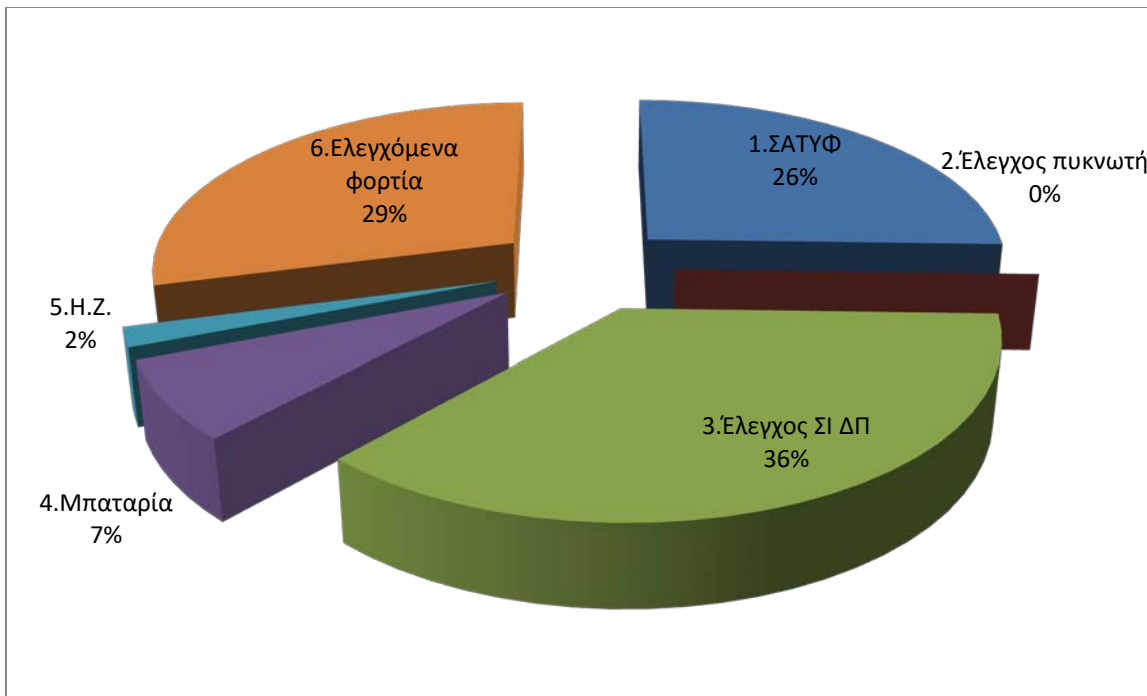
Στον Πίνακα 13, καθώς και στις Εικόνες 32, 33 και 34 παρουσιάζεται η συνεισφορά του κάθε σεναρίου στο τελικό δίκτυο όπως αυτό προέκυψε με την προσθήκη των ελεγχόμενων φορτίων στο σύστημα.

	1.ΣΑΤΥΦ	2.Έλεγχος πυκνωτή	3.Έλεγχος ΣΙ ΔΠ	4.Μπαταρία	5.Η/Ζ	6.Ελεγχόμενα φορτία
KPI 1 - Losses	0%	0%	6%	43%	41%	10%
KPI 2 - Hosting Capacity	25%	0%	36%	7%	2%	29%
KPI 4 - dV	56%	-1%	5%	18%	12%	10%

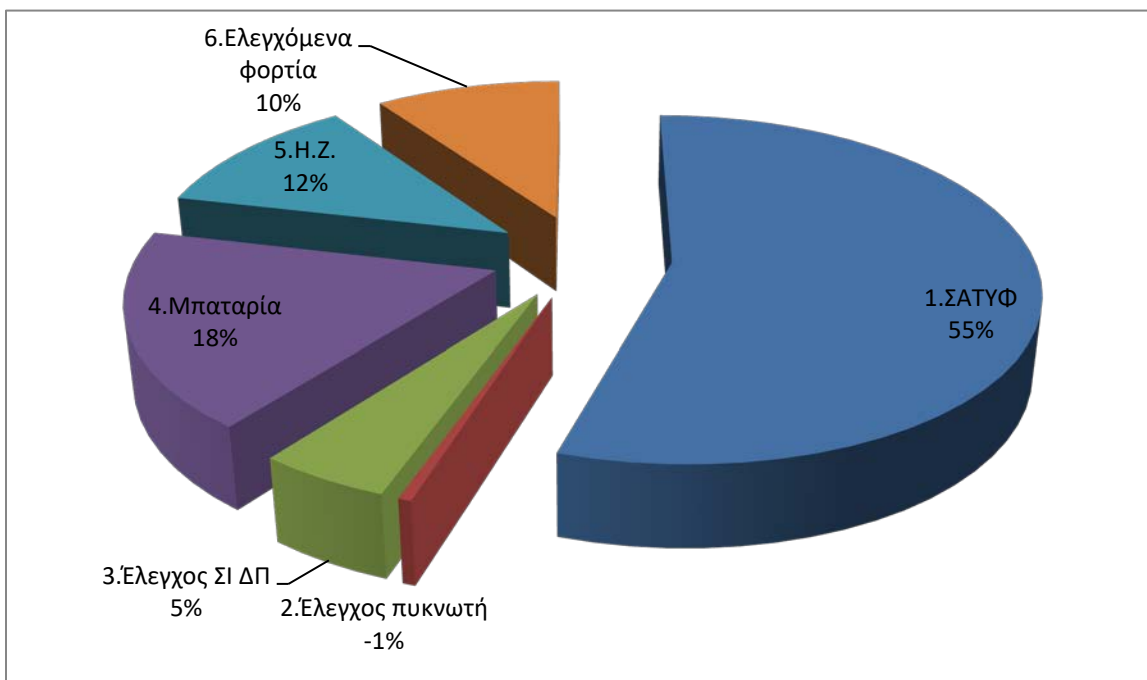
Πίνακας 13: Συνεισφορά κάθε σεναρίου σε κάθε ΚΡΙ



Εικόνα 32: Συνεισφορά κάθε σεναρίου στις απώλειες του δικτύου



Εικόνα 33: Συνεισφορά κάθε σεναρίου στο Hosting Capacity



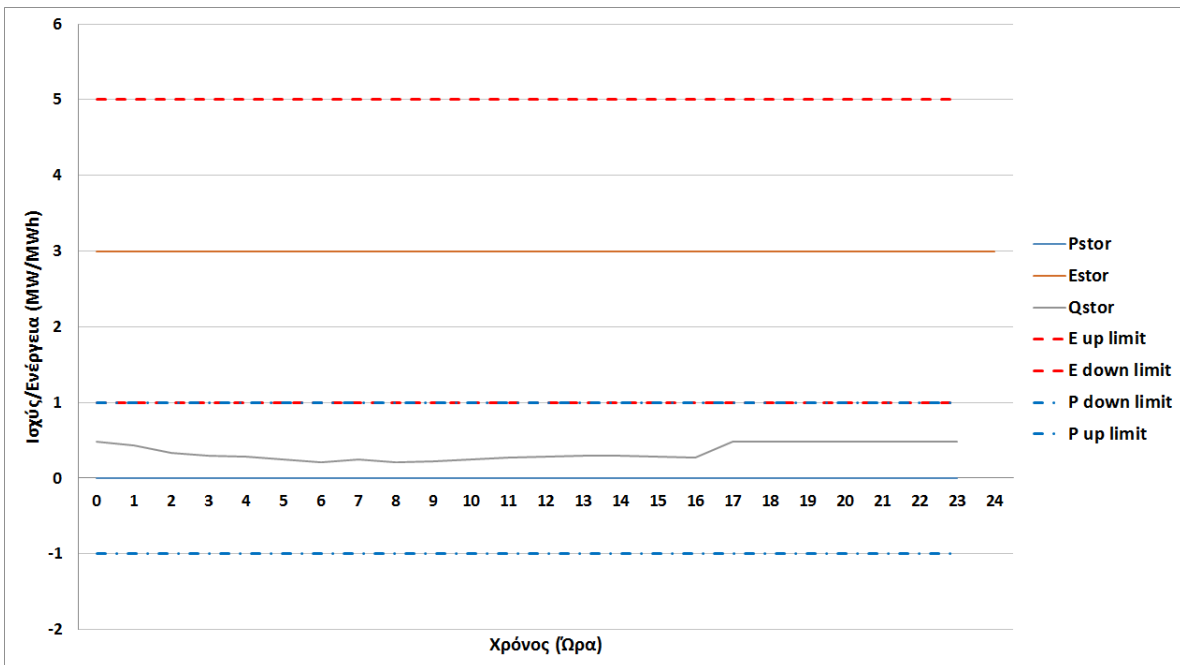
Εικόνα 34: Συνεισφορά κάθε σεναρίου στη ρύθμιση της τάσης

## 5.2 Απώλειες ενέργειας της μπαταρίας

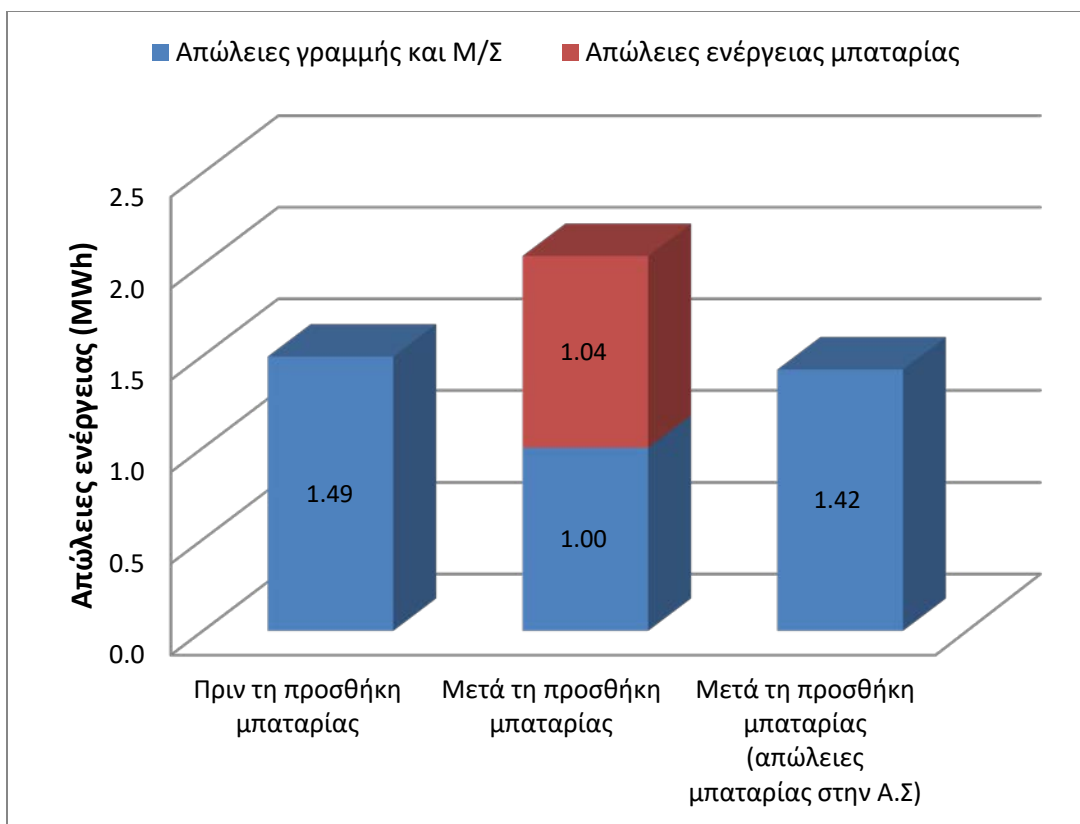
Στη προηγούμενη ενότητα παρατηρήθηκε ότι με τη προσθήκη της μπαταρίας, οι απώλειες ενέργειας στο δίκτυο μειώθηκαν από τις 1,49 MWh στη 1 MWh. Αυτές οι απώλειες αφορούν τις απώλειες στις γραμμές του δικτύου και στον Μ/Σ.

Ωστόσο, η λειτουργία της μπαταρίας συνεπάγεται κάποιες επιπλέον απώλειες ενέργειας, καθώς παρουσιάζει ενδογενώς απώλειες ενέργειας. Θεωρώντας βαθμό απόδοσης της μπαταρίας  $\text{storage efficiency} = 0.9$ , οι απώλειες ενέργειας που οφείλονται στη λειτουργία της μπαταρίας ανέρχονται στις 1.04 MWh, αριθμός υπερδιπλάσιος της βελτίωσης που επιφέρουν στις απώλειες των γραμμών και του Μ/Σ.

Προσθέτοντας τις απώλειες της μπαταρίας στην Α.Σ, παρατηρείται ότι η μπαταρία, διατηρεί σταθερή την αποθηκευμένη της ενέργεια, και άρα η ενεργός ισχύς που παρέχει ή απορροφά κάθε ώρα από το δίκτυο είναι μηδενική. Σε αυτή τη περίπτωση η μπαταρία λειτουργεί μόνο ως πηγή έγχυσης ή απορρόφησης αέργου ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι απώλειες ενέργειας που συνεπάγεται η λειτουργία της μπαταρίας είναι μεγαλύτερες από την εξοικονόμηση ενέργειας εξαιτίας της μείωσης των απωλειών γραμμής και Μ/Σ που επιφέρει. Το διάγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας σε αυτή τη περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 35.



Εικόνα 35: Λειτουργία της μπαταρίας όταν εντάσσονται οι απώλειες της μπαταρίας στην Α.Σ



**Εικόνα 36: Απώλειες ενέργειας πριν και μετά τη προσθήκη της μπαταρίας**

Όσα περιγράφηκαν σε αυτήν την ενότητα, συνοψίζονται στην Εικόνα 36. Παρατηρήθηκε ότι με τη προσθήκη των απωλειών της μπαταρίας στην Α.Σ, παρά την αδράνεια της σε ότι αφορά την ενεργό ισχύ που παρέχει ή απορροφά, παρουσιάζεται μια μικρή βελτίωση στις απώλειες του δικτύου. Αυτή οφείλεται στην άεργο ισχύ που εγχέει στο δίκτυο η μπαταρία.

### 5.3 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση που επιφέρει ο έλεγχος κάθε συσκευής στη λειτουργία του δικτύου. Παρατηρήθηκε ότι ο κεντρικός/συντονισμένος έλεγχος οδήγησε στα εξής αποτελέσματα ως προς τα κριτήρια αξιολόγησης:

- Το ΗC, βελτιώνεται ως προς το Baseline σενάριο κατά 47% με την προσθήκη της δυνατότητας ελέγχου του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ, καθόλου με τον έλεγχο των πυκνωτών, επιπλέον 66% με τον έλεγχο του ΣΙ των σταθμών ΔΠ, 14% με την προσθήκη και τον έλεγχο της μπαταρίας, 3% με την προσθήκη και τον κεντρικό έλεγχο των ΗΖ, τα οποία πλέον δεν λειτουργούν μόνο ως

μονάδες εφεδρείας, και τέλος παρατηρήθηκε μία επιπλέον βελτίωση 53% με την προσθήκη ελεγχόμενων φορτίων. Συνολικά, με τον κεντρικό και συντονισμένο έλεγχο όλων των συσκευών του δικτύου, το HC του δικτύου βελτιώθηκε κατά 183% σε σχέση με το Baseline σενάριο.

- Οι τάσεις του δικτύου βελτιώθηκαν κατά 49% με την προσθήκη της δυνατότητας ελέγχου του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ, καθόλου με τον έλεγχο των πυκνωτών, επιπλέον 3% με τον έλεγχο του ΣΙ των σταθμών ΔΠ, επιπλέον 17% με την προσθήκη και τον έλεγχο της μπαταρίας, 10% με την προσθήκη και τον έλεγχο των ΗΖ, και τέλος παρατηρήθηκε μια μικρή επιπλέον βελτίωση 8% με την προσθήκη και τον έλεγχο των ελεγχόμενων φορτίων. Συνολικά οι τάσεις του δικτύου βελτιώθηκαν κατά 87%.
- Οι απώλειες του δικτύου δεν βελτιώνονται καθόλου με τον έλεγχο του ΣΑΤΥΦ και του πυκνωτή, ενώ βελτιώνονται ελάχιστα (4%) με τον έλεγχο του ΣΙ των σταθμών ΔΠ. Σημαντική βελτίωση παρατηρείται με την προσθήκη και τον έλεγχο τόσο της μπαταρίας (32%) όσο και των ΗΖ (30%). Τέλος, η ύπαρξη ελεγχόμενων φορτίων, βελτιώνουν επιπλέον τις απώλειες του δικτύου κατά 8%.

Επίσης, ο κεντρικός/συντονισμένος έλεγχος οδήγησε στα εξής αποτελέσματα ως προς τις μεταβλητές ελέγχου:

- Ως προς τον έλεγχο του ΣΑΤΥΦ, βελτιώνεται σημαντικά τόσο το HC (47%), όσο και τη τάση του δικτύου (49%), ενώ δεν επηρεάζονται καθόλου οι απώλειες του.
- Ως προς τον έλεγχο του πυκνωτή, δεν παρατηρήθηκε καμία βελτίωση σε κανέναν δείκτη.
- Ως προς τον έλεγχο του ΣΙ ΔΠ, βελτιώθηκε σημαντικά το HC του δικτύου(66%), ενώ μία μικρή βελτίωση 4% παρατηρήθηκε και στους άλλου δύο δείκτες.
- Ως προς την προσθήκη και τον έλεγχο της μπαταρίας, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των απωλειών (32%), ενώ σε ικανοποιητικό βαθμό βελτιώθηκαν και οι άλλοι δύο δείκτες (14% το HC και 17% οι τάσεις του δικτύου).
- Ως προς την προσθήκη και τον έλεγχο των ΗΖ, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στις απώλειες του δικτύου (30%), 10% βελτίωση στις τάσεις του δικτύου, και μηδενική βελτίωση στο HC.

- Ως προς τα ελεγχόμενα φορτία, βελτιώνεται σημαντικά το HC του δικτύου(53%), ενώ μικρότερη βελτίωση της τάξης του 8% παρατηρήθηκε και στους άλλους δύο δείκτες.

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η συνεισφορά των μπαταριών στις απώλειες είναι εικονική, καθώς οι απώλειες ενέργειας που επιφέρει η λειτουργία της μπαταρίας είναι μεγαλύτερες από τις απώλειες γραμμής και Μ/Σ που εξοικονομούνται. Με την εισαγωγή των απωλειών της μπαταρίας στην αντικειμενική συνάρτηση, η μπαταρία λειτουργεί μόνο ως πηγή έγχυσης ή απορρόφησης αέργου ισχύος.





## 6 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την ισχύ και την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 χωρίς τη δυνατότητα ελεγχόμενων φορτίων και χωρίς την ύπαρξη H/Z Τοποθετήθηκαν μπαταρίες διαφορετικής ισχύος και ονομαστικής χωρητικότητας στους κόμβους 2, 6, 8, 12 για να μελετηθεί η επίδραση της μπαταρίας κατά μήκος της γραμμής. Ο κόμβος 2 αντιστοιχεί στην αρχή της γραμμής, ο κόμβος 6 στο σταθμισμένο μήκος της, ο κόμβος 8 στο σημείο ρύθμισης και ο κόμβος 12 στο τέλος της γραμμής. Πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες προσομοιώσεων:

- 1) Τοποθέτηση μπαταρίας σταθερής ισχύος 1 MW και μεταβαλλόμενης ονομαστικής χωρητικότητας από 1 έως 10 MWh κατά μήκος της γραμμής.
- 2) Τοποθέτηση μπαταρίας σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και μεταβλητής ισχύος από 1 έως 5 MW κατά μήκος της γραμμής.

Και οι δύο ομάδες προσομοιώσεων υλοποιήθηκαν με αντικειμενική συνάρτηση είτε την ελαχιστοποίηση της απόκλισης της τάσης, είτε την ελαχιστοποίηση των απωλειών γραμμής και Μ.Σ.

### 6.1 Μπαταρίες σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας

#### 6.1.1 Ρύθμιση της τάσης

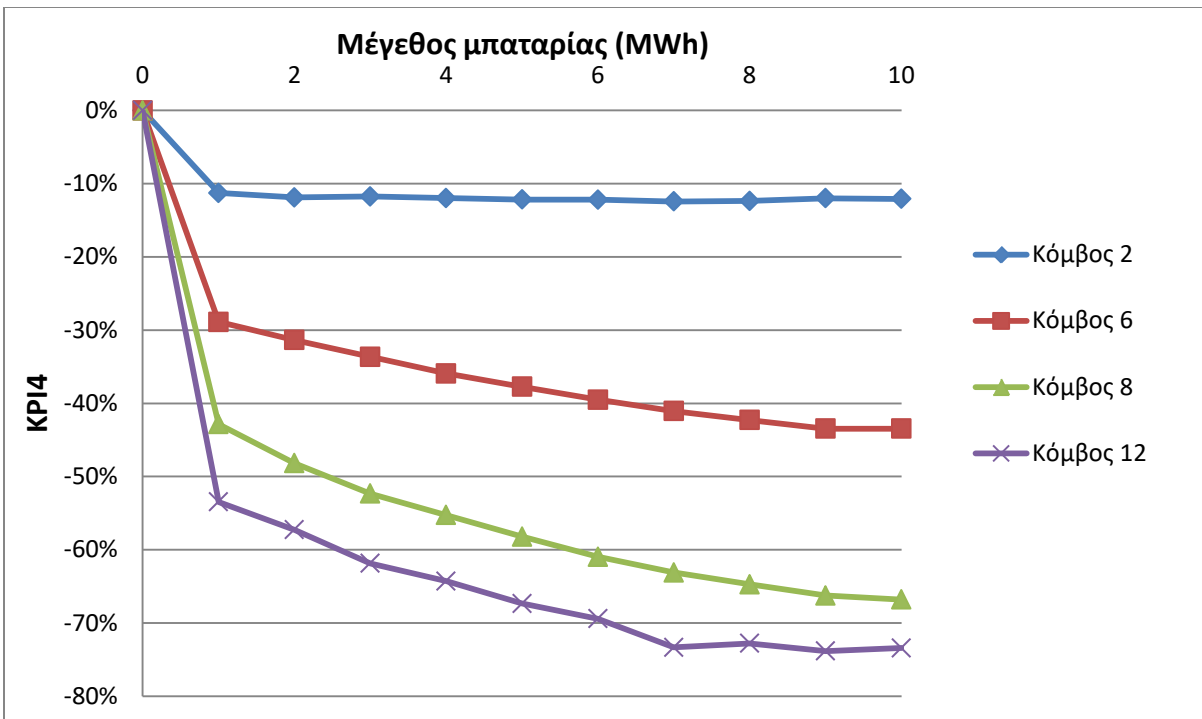
Αρχικά με αντικειμενική συνάρτηση την ρύθμιση της τάσης, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου για κάθε δυνατή θέση και μέγεθος της μπαταρίας και καταγράφηκε η RMS τιμή της διακύμανσης της τάσης σε όλους τους κόμβους για όλες τις ώρες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 14. Στον Πίνακα 15 και στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται το KPI 4 με βασικό σενάριο τη μη ύπαρξη μπαταρίας.

Θέση μπαταρίας	Μέγεθος μπαταρίας (MWh)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Κόμβος 2	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Κόμβος 6	0,24	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18
Κόμβος 8	0,24	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14
Κόμβος 12	0,24	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12

**Πίνακας 14: RMS τιμή της απόκλισης της τάσης με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας**

Θέση μπαταρίας	Μέγεθος μπαταρίας (MWh)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Κόμβος 2	0,0%	-11,3%	-11,9%	-11,8%	-12,0%	-12,2%	-12,2%	-12,4%	-12,4%	-12,0%	-12,1%
Κόμβος 6	0,0%	-28,9%	-31,4%	-33,7%	-35,9%	-37,7%	-39,5%	-41,1%	-42,3%	-43,5%	-43,5%
Κόμβος 8	0,0%	-42,8%	-48,2%	-52,3%	-55,3%	-58,2%	-61,0%	-63,1%	-64,7%	-66,2%	-66,8%
Κόμβος 12	0,0%	-53,5%	-57,3%	-61,9%	-64,3%	-67,3%	-69,4%	-73,3%	-72,8%	-73,8%	-73,4%

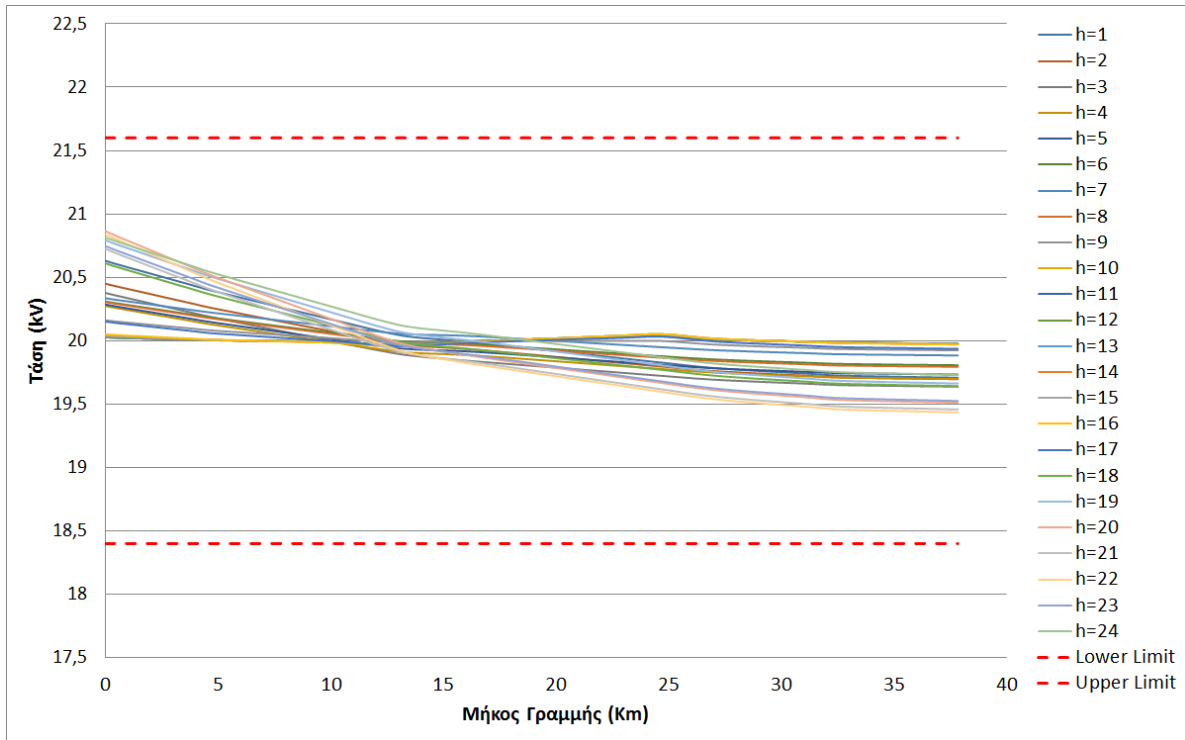
**Πίνακας 15: KPI 4 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας**



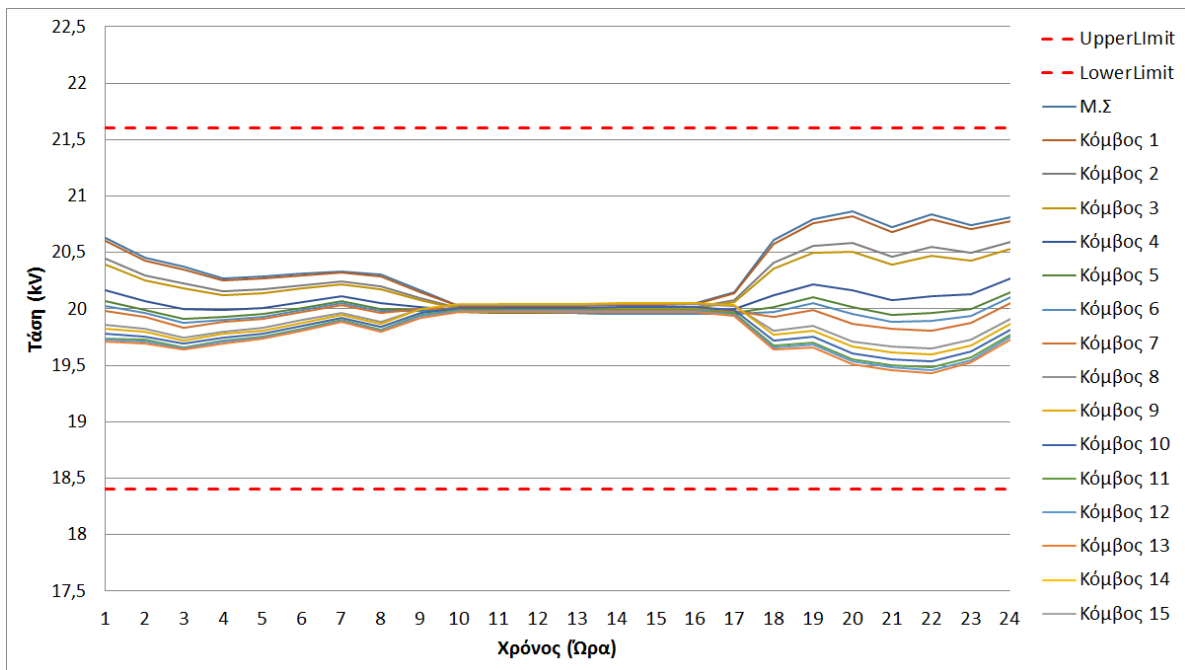
**Εικόνα 37: KPI 4 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας**

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρήθηκε αρχικά ότι η θέση της μπαταρίας διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Η τοποθέτηση της στην αρχή της γραμμής επιφέρει μία μικρή βελτίωση στις τάσεις της τάξεως του 12%, η οποία όμως είναι σταθερή ανεξαρτήτως του μεγέθους της μπαταρίας. Η τάση βελτιώνεται σημαντικά με τη τοποθέτηση της μπαταρίας στο σημείο ρύθμισης, ενώ από εκεί και έπειτα υπάρχει μία διαρκής μικρότερη βελτίωση όσο προχωράμε προς το τέλος της γραμμής. Επομένως η τοποθέτηση της συνίσταται να γίνει προς το τέλος του δικτύου. Η ύπαρξη μιας μπαταρίας 1 MWh /1 MW στον κόμβο 12 επιφέρει βελτίωση 53% στη τάση του δικτύου, ενώ μπαταρίες μεγαλύτερης χωρητικότητας βελτιώνουν επιπλέον την τάση σε αρκετά μικρότερο βαθμό, ίσως μη ικανοποιητικό.

Στην Εικόνα 38 φαίνεται το ωριαίο προφίλ της τάσης του δικτύου κατά μήκος της γραμμής MT και στην Εικόνα 39 η τάση κάθε κόμβου της γραμμής κατά τη διάρκεια της ημέρας πριν την προσθήκη της μπαταρίας.

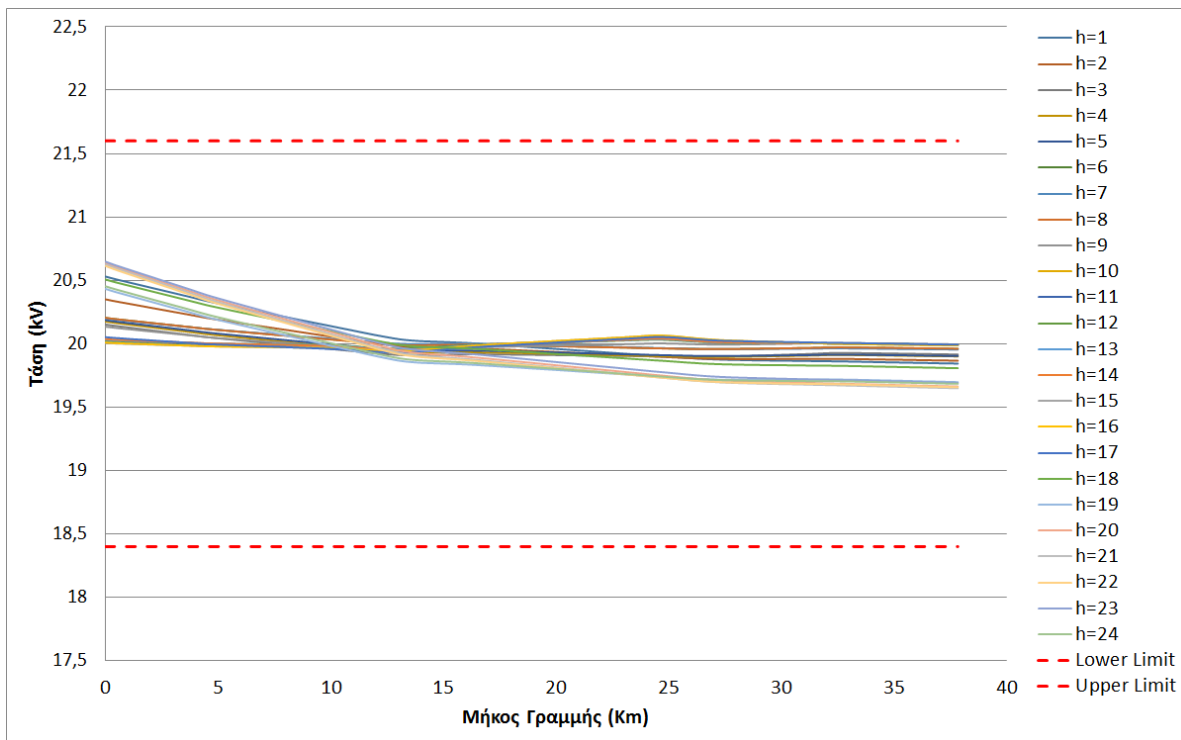


Εικόνα 38: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT πριν την προσθήκη μπαταρίας

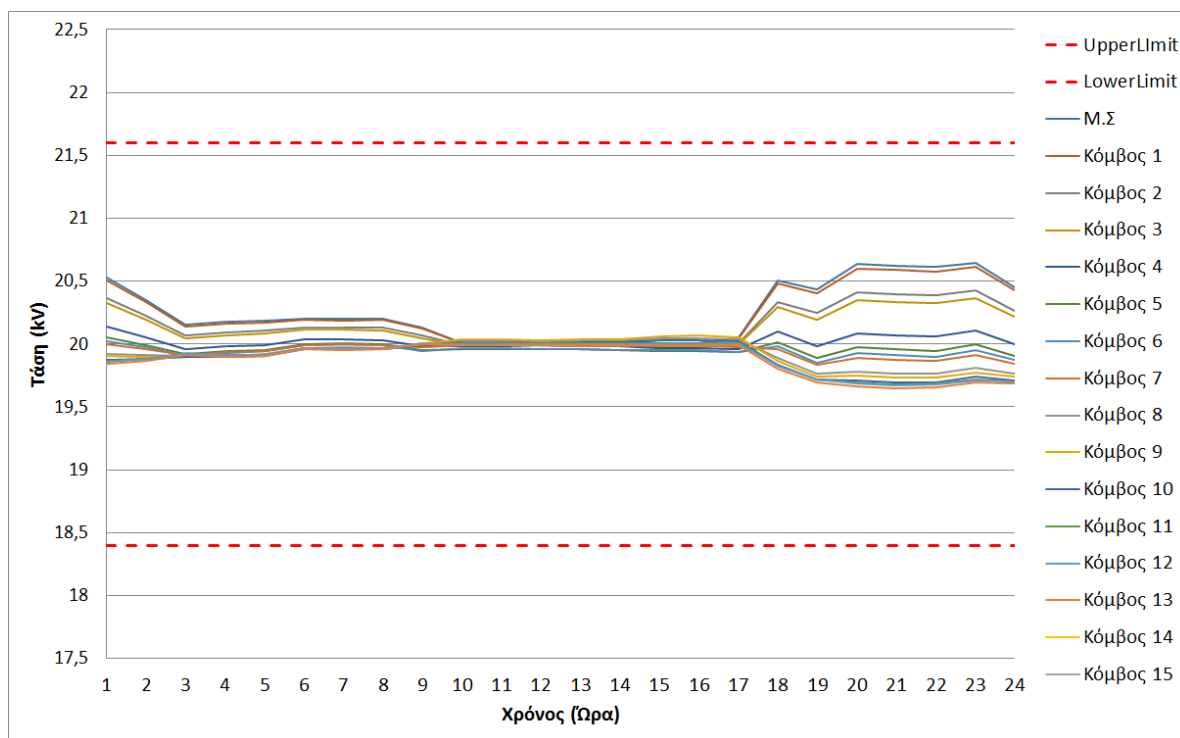


Εικόνα 39: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα πριν την προσθήκη μπαταρίας

Στην Εικόνα 40 και στην Εικόνα 41 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα μετά τη προσθήκη μπαταρίας 1 MWh/1 MW στον δωδέκατο κόμβο.



Εικόνα 40: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT με μπαταρία 1 MWh/1 MW



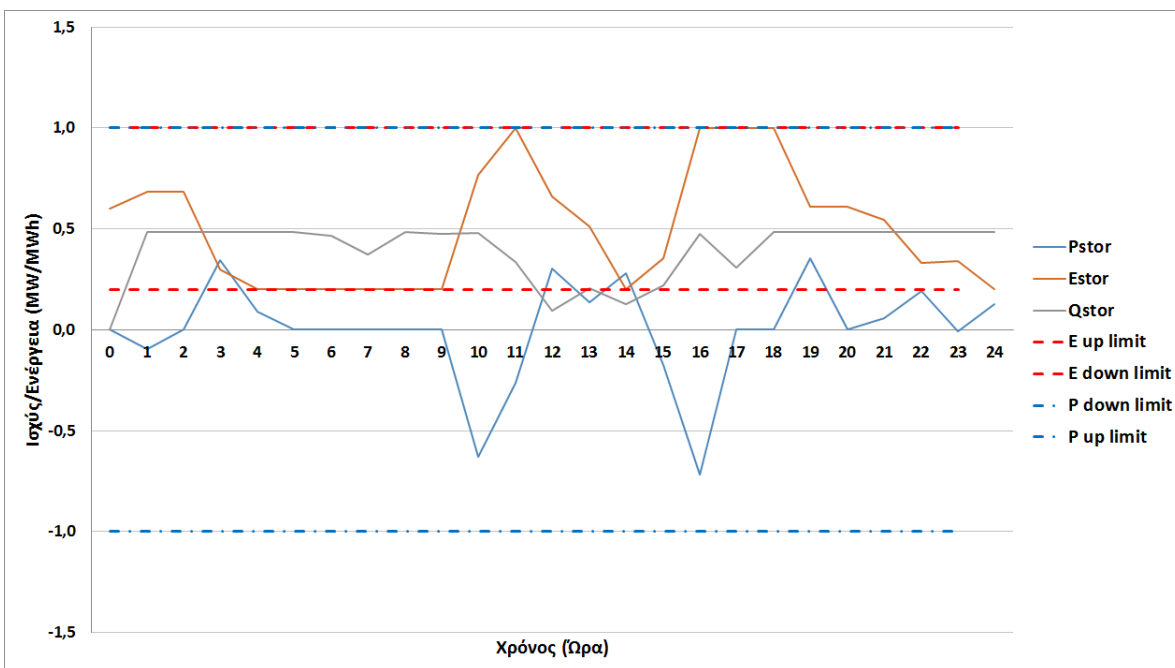
Εικόνα 41: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα με μπαταρία 1 MWh/1 MW

Συγκρίνοντας τα παραπάνω τέσσερα διαγράμματα συμπεραίνεται ότι με τη προσθήκη της μπαταρίας, η τάση βελτιώνεται κατά μήκος όλης της γραμμής και καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας.

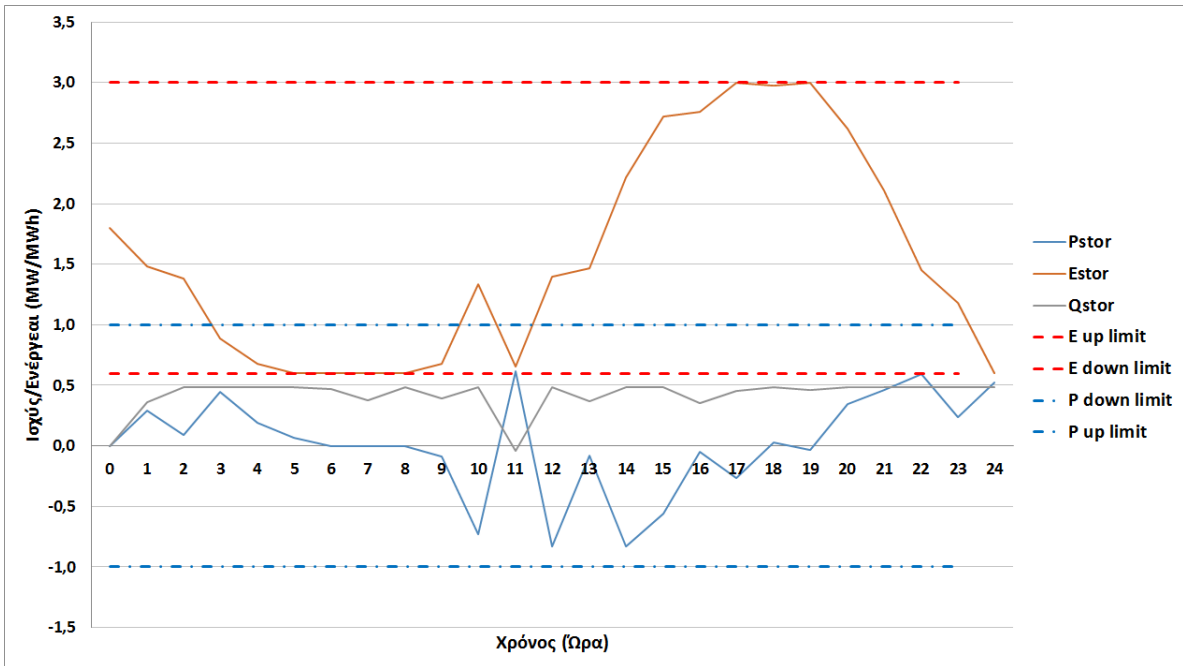
Η μπαταρία εξυπηρετεί τα φορτία προς το τέλος της γραμμής παρέχοντας τους την ενεργό και άεργο ισχύ που χρειάζονται. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση της ροής ισχύος από τον Μ/Σ, και κατά συνέπεια της πτώσης τάσης στο δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να βρίσκεται υψηλά η τάση στην αρχή της γραμμής εξαιτίας των μακρινών καταναλωτών, η οποία πλέον διατηρείται πιο κοντά στην ονομαστική τιμή, ενώ παράλληλα πιο κοντά στην ονομαστική τιμή διατηρείται και η τιμή των τάσεων προς το τέλος της γραμμής.

Σε επίπεδο ημέρας παρατηρείται βελτίωση των τάσεων τόσο κατά τις πρωινές ώρες, όπου η μπαταρία εγχέει στο δίκτυο την αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια της, τόσο και κατά τις βραδινές ώρες, όπου η μπαταρία εγχέει και πάλι ενέργεια στο δίκτυο, έπειτα από την φόρτιση της κατά τη διάρκεια της φωτοβολταϊκής παραγωγής. Κατά τις μεσημεριανές ώρες δεν παρατηρείται κάποια βελτίωση καθώς το υπάρχον έξυπνο δίκτυο (ΣΑΤΥΦ, έλεγχος ΔΠ), σε συνδυασμό με την αυξημένη διεσπαρμένη παραγωγή, επαρκούν για την διατήρηση της τάσης κοντά στην ονομαστική τιμή.

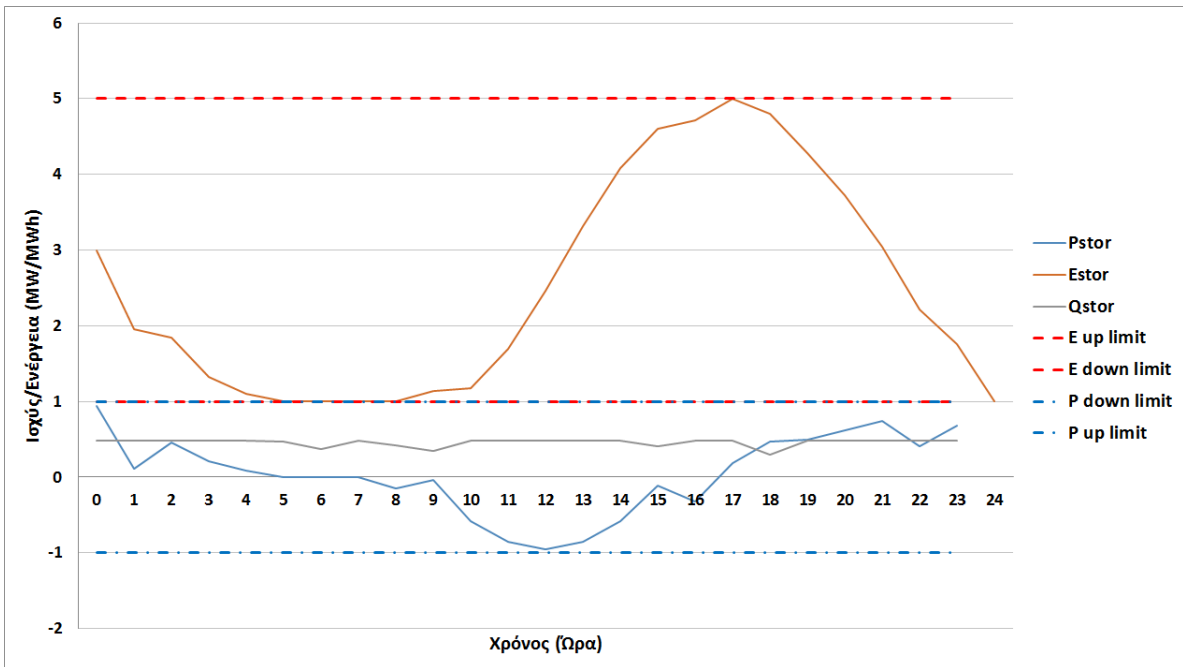
Στις Εικόνες 42, 43 και 44 παρουσιάζονται τα διαγράμματα λειτουργίας της μπαταρίας ονομαστικής χωρητικότητας 1 MWh, 3 MWh και 5 MWh αντίστοιχα, αν τοποθετηθούν στον δωδέκατο κόμβο.



Εικόνα 42: Διάγραμμα λειτουργίας μπαταρίας 1 MWh/1 MW με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



Εικόνα 43: Λειτουργία της μπαταρίας 3 MWh/1 MW με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



Εικόνα 44: Λειτουργία της μπαταρίας 5 MWh/1 MW με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης

Στην πρώτη περίπτωση της 1 MWh, λόγω του μικρού μεγέθους της μπαταρίας, αυτή αποφορτίζεται και επαναφορτίζεται πλήρως δύο φορές κατά τη φωτοβολταϊκή

παραγωγή. Ωστόσο, αυξάνοντας την ονομαστική χωρητικότητα της, παρατηρήθηκε ότι το διάγραμμα λειτουργίας της εξομαλύνεται, με τη μπαταρία να εκχέει στο δίκτυο την αποθηκευμένη της ενέργεια κατά τις πρωινές ώρες, φορτίζεται όταν υπάρχει φωτοβολταϊκή παραγωγή, και αποφορτίζεται πάλι το βράδυ όπου υπάρχει υψηλή ζήτηση.

### 6.1.2 Ελαχιστοποίηση των απωλειών

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε και πάλι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου για κάθε δυνατή θέση και μέγεθος της μπαταρίας, με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών και καταγράφηκαν οι απώλειες γραμμής και Μ/Σ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 16. Στον Πίνακα 17 και στην Εικόνα 45 παρουσιάζεται το KPI 1 με βασικό σενάριο τη μη ύπαρξη μπαταρίας.

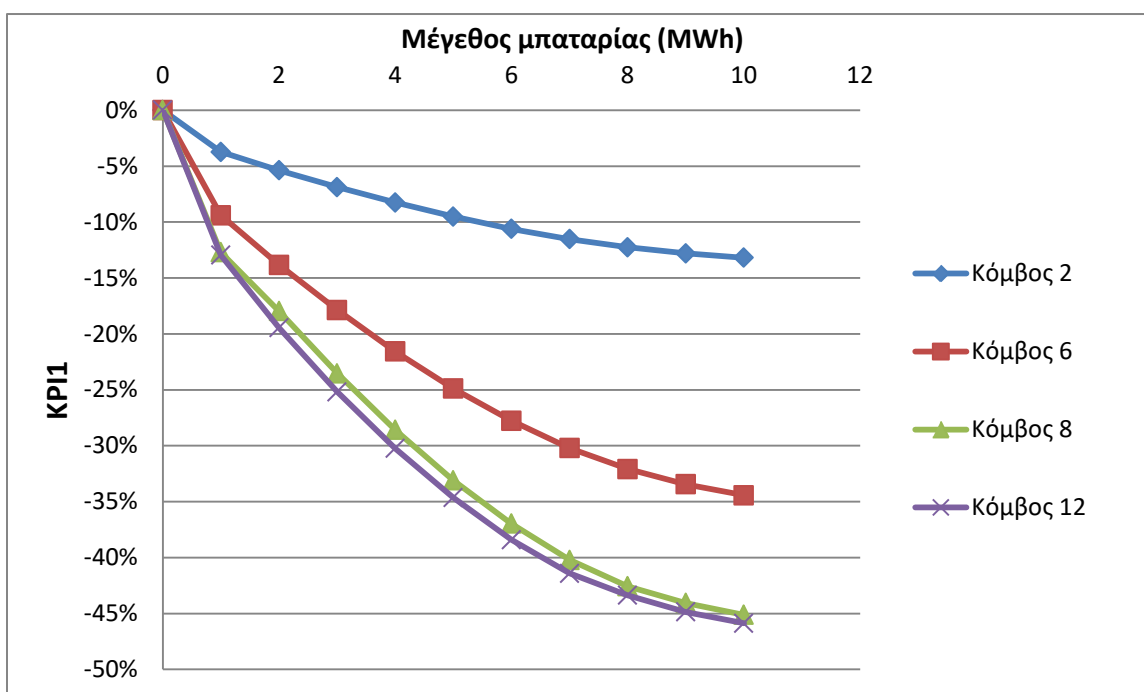
Θέση μπαταρίας	Μέγεθος μπαταρίας (MWh)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Κόμβος 2	1,49	1,44	1,41	1,39	1,37	1,35	1,34	1,32	1,31	1,30	1,30
Κόμβος 6	1,49	1,35	1,29	1,23	1,17	1,12	1,08	1,04	1,01	0,99	0,98
Κόμβος 8	1,49	1,30	1,23	1,14	1,07	1,00	0,94	0,89	0,86	0,84	0,82
Κόμβος 12	1,49	1,30	1,20	1,12	1,04	0,98	0,92	0,88	0,85	0,82	0,81

**Πίνακας 16: Απώλειες ενέργειας (MWh) με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας**



Θέση μπαταρίας	Μέγεθος μπαταρίας (MWh)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Κόμβος 2	0,0%	-3,7%	-5,4%	-6,9%	-8,3%	-9,5%	-10,6%	-11,5%	-12,3%	-12,8%	-13,2%
Κόμβος 6	0,0%	-9,4%	-13,8%	-17,9%	-21,6%	-24,9%	-27,8%	-30,2%	-32,1%	-33,4%	-34,4%
Κόμβος 8	0,0%	-12,7%	-18,0%	-23,5%	-28,6%	-33,1%	-37,0%	-40,2%	-42,6%	-44,1%	-45,1%
Κόμβος 12	0,0%	-13,0%	-19,4%	-25,2%	-30,2%	-34,6%	-38,4%	-41,4%	-43,4%	-44,9%	-45,9%

**Πίνακας 17: ΚΡΙ 1 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής ΜΤ σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας**

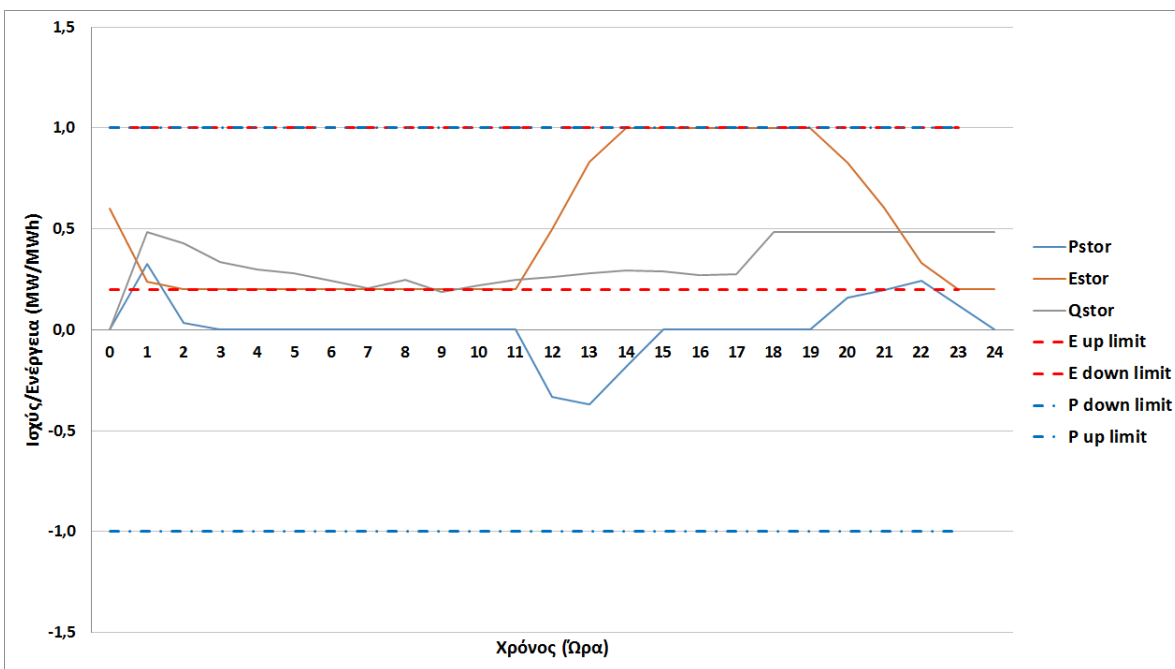


**Εικόνα 45: ΚΡΙ 1 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής ΜΤ διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας**

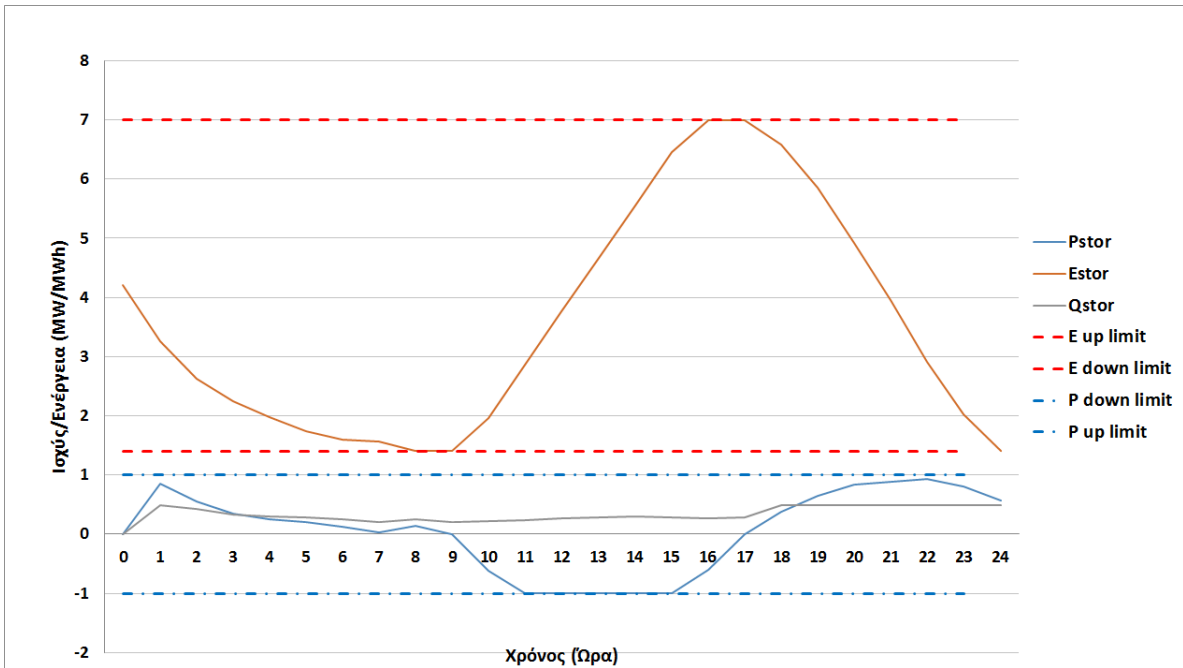
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι απώλειες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τη τάση σε ότι αφορά τη τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής. Και πάλι προτείνεται η τοποθέτηση μπαταρίας μετά το σημείο ρύθμισης και προς το τέλος της γραμμής. Ωστόσο, σε αυτή τη περίπτωση, η τοποθέτηση μπαταρίας

μεγαλύτερης ονομαστικής χωρητικότητας είναι αρκετά πιο αποδοτική. Μία μπαταρία ονομαστικής χωρητικότητας 1 MWh επιφέρει μείωση 13% στις απώλειες ενώ μία μπαταρία ονομαστικής χωρητικότητας 10 MWh επιφέρει μείωση 46%.

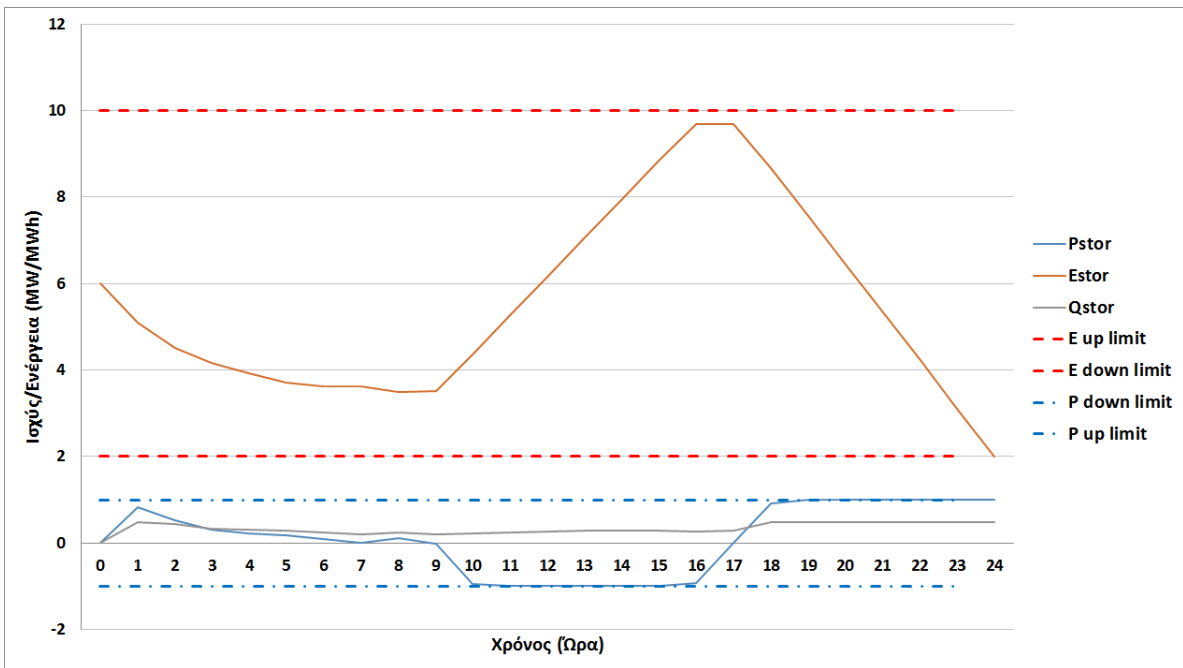
Στις Εικόνες 46, 47 και 48 παρουσιάζονται τα διαγράμματα λειτουργίας της μπαταρίας ονομαστικής χωρητικότητας 1 MWh, 7 MWh και 10 MWh αντίστοιχα (Οι μπαταρίες τοποθετήθηκαν στον δωδέκατο κόμβο).



**Εικόνα 46: Λειτουργία της μπαταρίας 1 MWh/1 MW με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών**



Εικόνα 47: Λειτουργία της μπαταρίας 7 MWh/1 MW με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών



Εικόνα 48: Λειτουργία της μπαταρίας 10 MWh/1 MW με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών

Σε αυτήν την περίπτωση, ακόμα και για μπαταρία μικρής ονομαστικής χωρητικότητας παρατηρείται ότι η μπαταρία παρέχει όση ενέργεια έχει αποθηκευμένη τις πρώτες ώρες, φορτίζεται όταν υπάρχει φωτοβολταϊκή παραγωγή και παρέχει όση ενεργό και άεργο ισχύ μπορεί τις βραδινές ώρες όπου υπάρχει υψηλή ζήτηση. Πιο συγκεκριμένα η μπαταρία 1 MWh/1 MW αποφορτίζεται αμέσως λόγω της μικρής αρχικά αποθηκευμένης ενέργειας, φορτίζεται σε μόλις δύο ώρες το μεσημέρι και το βράδυ παρέχει όση ενεργό ισχύ μπορεί στο δίκτυο κατά τις ώρες με την υψηλότερη ζήτηση, ενώ από τις έξι και μετά που σταματάνε να παράγουν τα φωτοβολταϊκά παρέχει στο δίκτυο τη μέγιστη δυνατή άεργο ισχύ. Η μπαταρία με ονομαστική χωρητικότητα 7 MWh αποφορτίζεται πλήρως λίγο πριν αρχίσουν να παράγουν τα φωτοβολταϊκά πάρκα, ενώ η μπαταρία χωρητικότητας 10 MWh δεν αξιοποιεί πλήρως την αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια. Γι αυτό το λόγο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 45 η βελτίωση των απωλειών του δικτύου μειώνεται σημαντικά για μπαταρίες με ονομαστική χωρητικότητα πάνω από 7 MWh. Ωστόσο κατά τις βραδινές ώρες, παρατηρείται ότι ακόμα και η μπαταρία 10 MWh/1 MW παρέχει τη μέγιστη ενεργό και άεργο ισχύ που μπορεί στο δίκτυο.

## 6.2 Μπαταρίες σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος

### 6.2.1 Ρύθμιση της τάσης

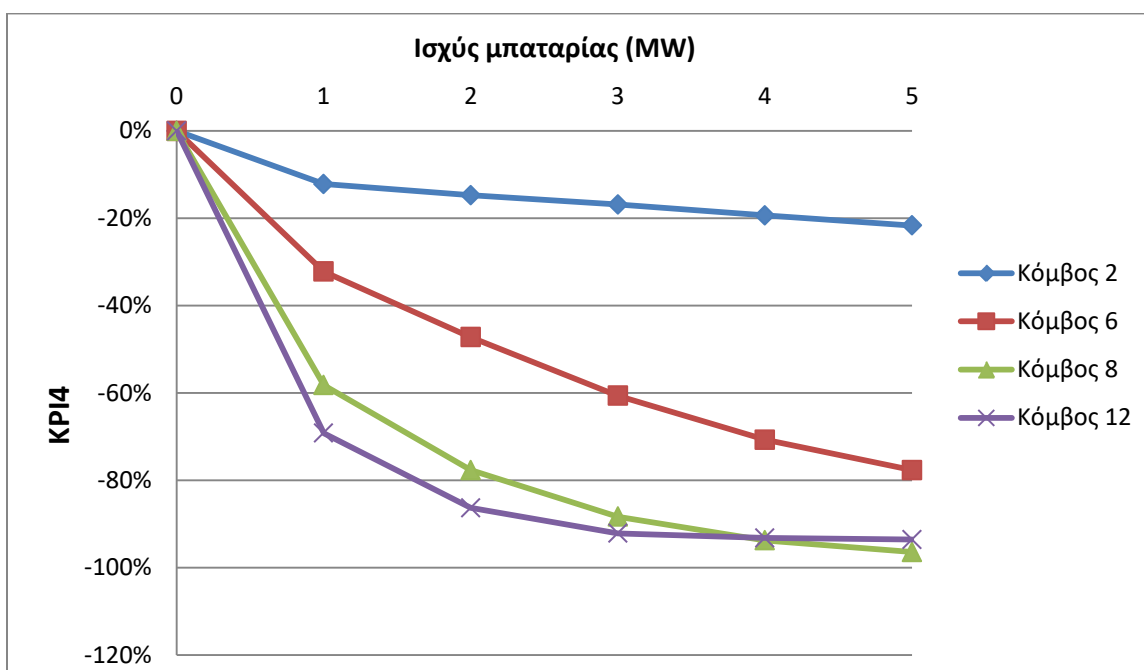
Σε αυτή την ενότητα, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου για κάθε δυνατή θέση και ισχύ της μπαταρίας με αντικειμενική συνάρτηση την ρύθμιση της τάσης, και καταγράφηκε η RMS τιμή της διακύμανσης της τάσης σε όλους τους κόμβους για όλες τις ώρες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 18. Στον Πίνακα 19 και στην Εικόνα 49 παρουσιάζεται το KPI 4 με βασικό σενάριο τη μη ύπαρξη μπαταρίας.

Θέση μπαταρίας	Ισχύς μπαταρίας (MW)					
	0	1	2	3	4	5
Κόμβος 2	0,24	0,23	0,22	0,22	0,22	0,21
Κόμβος 6	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11
Κόμβος 8	0,24	0,16	0,11	0,08	0,06	0,05
Κόμβος 12	0,24	0,13	0,09	0,07	0,06	0,06

**Πίνακας 18: RMS τιμή της απόκλισης της τάσης με μπαταρίες σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος**

Θέση μπαταρίας	Ισχύς μπαταρίας (MW)					
	0	1	2	3	4	5
Κόμβος 2	0,0%	-12,2%	-14,7%	-16,9%	-19,3%	-21,7%
Κόμβος 6	0,0%	-32,2%	-47,2%	-60,6%	-70,7%	-77,7%
Κόμβος 8	0,0%	-58,2%	-77,7%	-88,3%	-93,8%	-96,4%
Κόμβος 12	0,0%	-69,2%	-86,3%	-92,1%	-93,2%	-93,6%

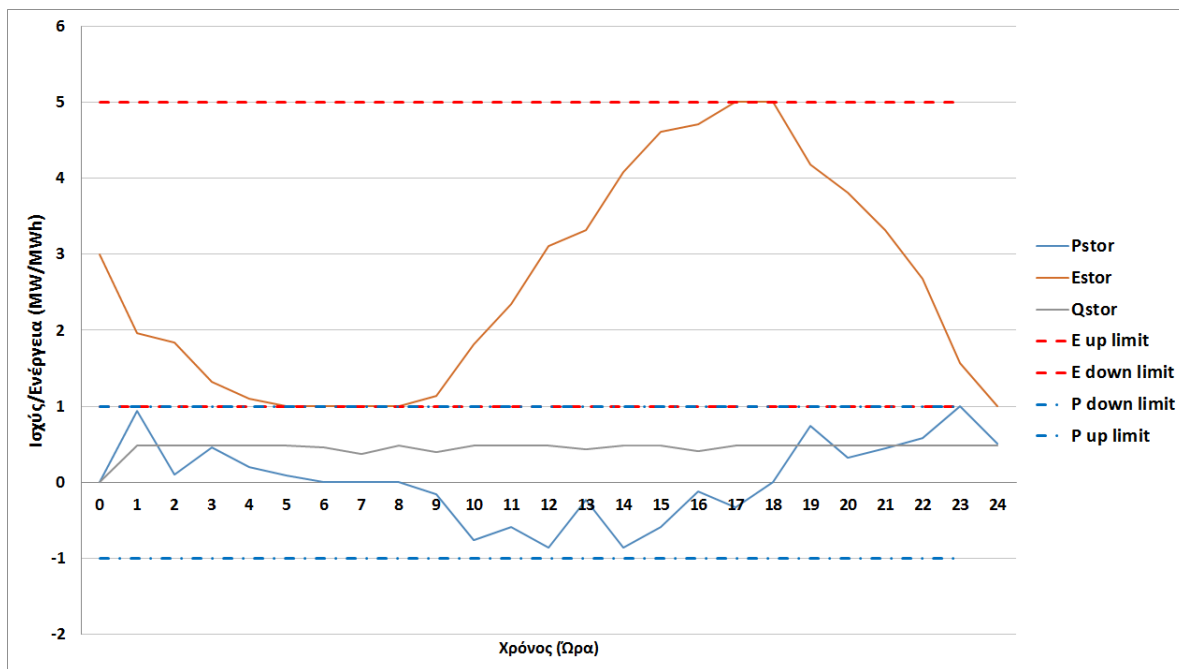
**Πίνακας 19: ΚΡΙ 4 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος**



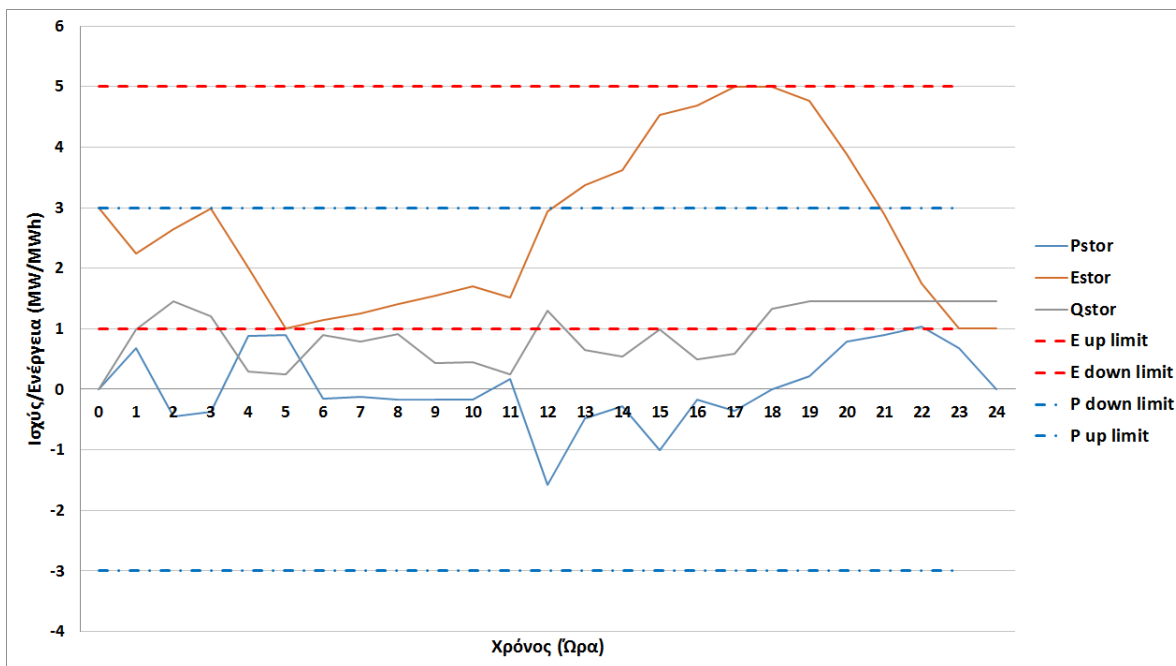
**Εικόνα 49: ΚΡΙ 4 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος**

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται και πάλι ότι η τοποθέτηση της μπαταρίας πρέπει να γίνει μετά το σημείο ρύθμισης και προς το τέλος της γραμμής. Η τοποθέτηση μπαταρίας 5 MWh/1 MW στον κόμβο 12 επιφέρει βελτίωση 69%, η τοποθέτηση μπαταρίας 5 MWh/2 MW 86%, ενώ η τοποθέτηση μπαταρίας μεγαλύτερης ισχύος επιφέρει σχετικά μικρή βελτίωση στη ρύθμιση της τάσης.

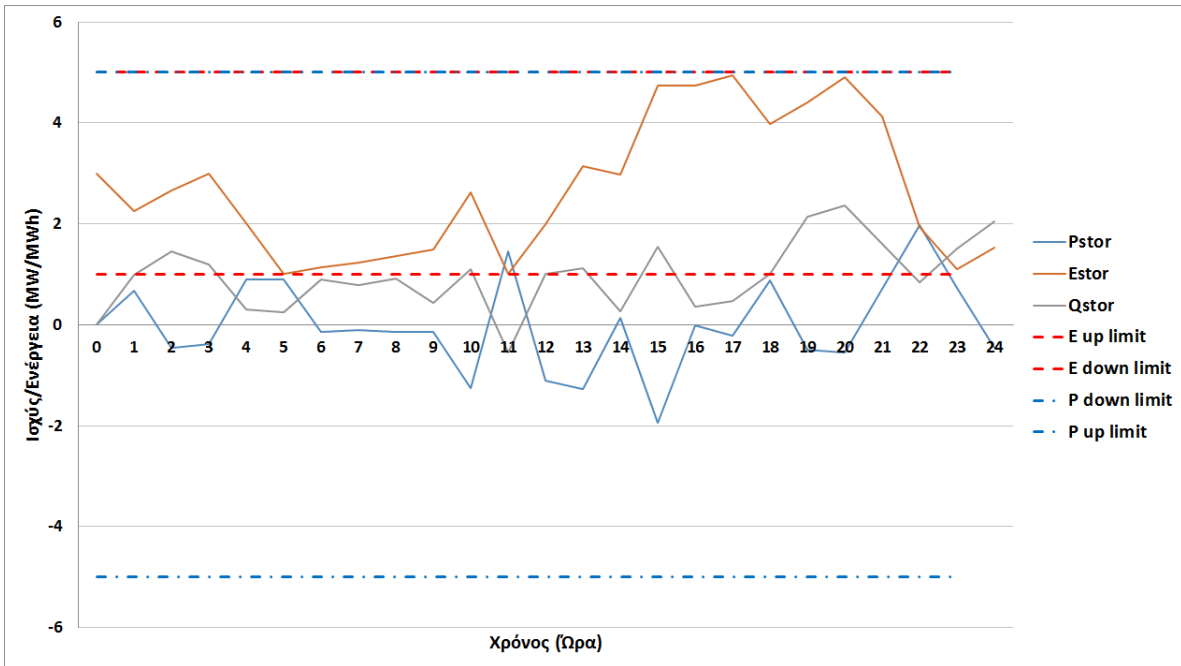
Στις Εικόνες 50, 51 και 52 παρουσιάζονται τα διαγράμματα λειτουργίας της μπαταρίας ισχύος 1 MW, 3 MW και 5 MW αντίστοιχα (Οι μπαταρίες τοποθετήθηκαν στον δωδέκατο κόμβο).



**Εικόνα 50: Λειτουργία της μπαταρίας 5 MWh/1 MW**



**Εικόνα 51: Λειτουργία της μπαταρίας 5 MWh/3 MW**



**Εικόνα 52: Λειτουργία της μπαταρίας 5 MWh/5 MW**

Στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται ότι η μπαταρία παρέχει σχεδόν συνέχεια όση περισσότερη άεργο ισχύ μπορεί στο δίκτυο, ενώ αντίθετα η ενεργός ισχύς μόλις μία φορά φτάνει στο όριο της. Στην δεύτερη περίπτωση όπου αυξήθηκε η ισχύς της μπαταρίας στα 3 MW, η ενεργός ισχύς σπάνια ξεπερνάει το 1 MW και επομένως ούτε που πλησιάζει στο μέγιστο δυνατό όριο, ενώ αντίθετα η μπαταρίας παρέχει τη μέγιστη δυνατή άεργο ισχύ κατά τις βραδινές ώρες. Στην τελευταία περίπτωση, η μπαταρία δεν εκμεταλλεύεται στο μέγιστο ούτε την ενεργό, αλλά ούτε και την άεργο ισχύ. Γι αυτό το λόγο παρατηρείται και ο κορεσμός στην Εικόνα 49 για μπαταρίες με ισχύ μεγαλύτερη των 3 MW. Τέλος συμπεραίνεται ότι η βελτίωση στις τάσεις του δικτύου οφείλεται κυρίως στην άεργο ισχύ της μπαταρίας, καθώς σε κάθε περίπτωση η ενεργός ισχύς σπάνια ξεπερνά το 1 MW.

### 6.2.2 Ελαχιστοποίηση των απωλειών

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου για κάθε δυνατή θέση και ισχύ της μπαταρίας με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών, οι οποίες καταγράφηκαν στον Πίνακα 20. Στον Πίνακα 21 και στην Εικόνα 53 παρουσιάζεται το KPI 1 με βασικό σενάριο τη μη ύπαρξη μπαταρίας.

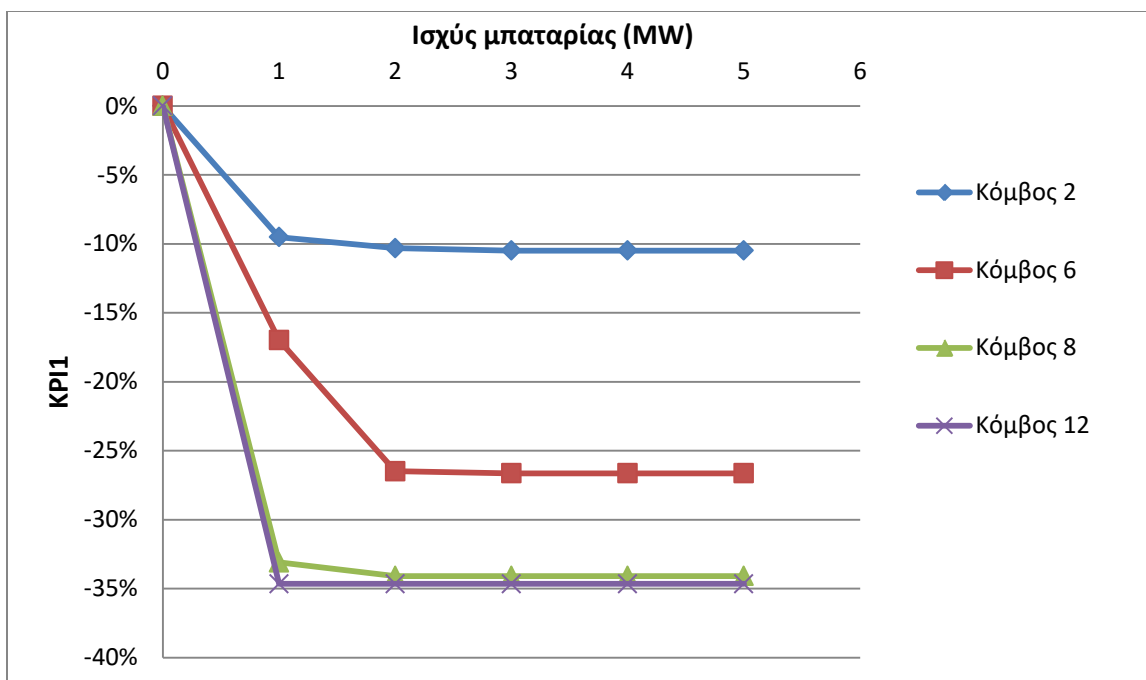
Θέση μπαταρίας	Ισχύς μπαταρίας (MW)					
	0	1	2	3	4	5
Κόμβος 2	1,49	1,35	1,34	1,34	1,34	1,34
Κόμβος 6	1,49	1,24	1,10	1,10	1,10	1,10
Κόμβος 8	1,49	1,00	0,98	0,98	0,98	0,98
Κόμβος 12	1,49	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98

**Πίνακας 20: Απώλειες ενέργειας (MWh) με μπαταρίες σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος**

Θέση μπαταρίας	Ισχύς μπαταρίας (MW)					
	0	1	2	3	4	5
Κόμβος 2	0,0%	-9,5%	-10,3%	-10,5%	-10,5%	-10,5%
Κόμβος 6	0,0%	-17,0%	-26,5%	-26,6%	-26,6%	-26,6%
Κόμβος 8	0,0%	-33,1%	-34,1%	-34,1%	-34,1%	-34,1%
Κόμβος 12	0,0%	-34,6%	-34,7%	-34,7%	-34,7%	-34,7%

**Πίνακας 21: ΚΡΙ 1 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής ΜΤ σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος**





**Εικόνα 53: KPI 1 με τοποθέτηση μπαταριών κατά μήκος της γραμμής MT σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος**

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται και πάλι πως καλύτερη λύση αποτελεί η τοποθέτηση μπαταρίας προς το τέλος της γραμμής. Ωστόσο, μπαταρίες ισχύος μεγαλύτερης της μονάδας, δεν συνεισφέρουν καθόλου στη μείωση των απωλειών. Ανατρέχοντας στην προηγούμενη ενότητα, συμπεραίνεται ότι αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο. Η αύξηση της ισχύος της μπαταρίας δεν επηρεάζει την ενεργό ισχύ που παρέχει στο δίκτυο, αλλά μόνο την άεργο. Η αύξηση της έκχυσης άεργου ισχύος ωστόσο από τη μπαταρία, δεν επηρεάζει καθόλου τις ενεργές απώλειες του δικτύου.

### 6.3 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση της θέσης της μπαταρίας και των χαρακτηριστικών της στη τάση και τις απώλειες του δικτύου. Αρχικά τοποθετήθηκαν μπαταρίες σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας σε διάφορες θέσεις του δικτύου και πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις με αντικειμενική συνάρτηση είτε τη ρύθμιση της τάσης, είτε την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Οι ίδιες προσομοιώσεις επαναλήφθηκαν με την τοποθέτηση μπαταριών σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος. Σε κάθε περίπτωση παρατηρήθηκε ότι η μπαταρία πρέπει να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο μακριά από τον Μ/Σ.

- Μπαταρίες σταθερής ισχύος 1 MW και διαφορετικής ονομαστικής χωρητικότητας από 1 MWh έως 10 MWh:
  - 1) Ως προς τη ρύθμιση της τάσης, η τοποθέτηση μπαταρίας 1 MWh/ 1 MW στον κόμβο 12 επιφέρει βελτίωση 53,5%. Ωστόσο η βελτίωση με τη περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας είναι αρκετά μικρότερη. Ο δεκαπλασιασμός της ενέργειας (δηλαδή μπαταρία 10 MWh/ 1 MW), οδηγεί σε βελτίωση 73,4%.
  - 2) Ως προς τις απώλειες του δικτύου, η τοποθέτηση μπαταρίας 1 MWh/ 1 MW στον κόμβο 12 επιφέρει βελτίωση 13%. Σε αντίθεση με τις τάσεις, η περαιτέρω αύξηση της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας μέχρι ένα σημείο, βελτιώνει σημαντικά τις απώλειες του δικτύου. Η τοποθέτηση μπαταρίας 7 MWh/ 1 MW επιφέρει βελτίωση 41,4%. Ωστόσο μπαταρία μεγαλύτερης ονομαστικής χωρητικότητας από 7 MWh δεν συμβάλει σημαντικά στις απώλειες του δικτύου. Μπαταρία 10 MWh/ 1 MW βελτιώνει τις απώλειες μόνο κατά 45,9%.
- Μπαταρίες σταθερής ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και διαφορετικής ισχύος από 1 MW έως 5 MW:
  - 1) Ως προς τη ρύθμιση της τάσης, η τοποθέτηση μπαταρίας 5 MWh/ 1 MW στον κόμβο 12 επιφέρει βελτίωση 69,2%. Όπως και με τη χωρητικότητα, η περαιτέρω αύξηση της ισχύος της μπαταρίας βελτιώνει σε μικρότερο βαθμό τις τάσεις του δικτύου καθώς για μπαταρία πενταπλάσιας ισχύος (5 MWh/5 MW), η βελτίωση είναι της τάξης του 93,6%
  - 2) Ως προς τις απώλειες του δικτύου, η τοποθέτηση μπαταρίας 1 MWh/ 1 MW στον κόμβο 12 επιφέρει βελτίωση 34,6%. Ωστόσο σε αυτή τη περίπτωση η περαιτέρω αύξηση της ισχύος της μπαταρίας δεν επιφέρει καμία απολύτως αλλαγή στις απώλειες του δικτύου.

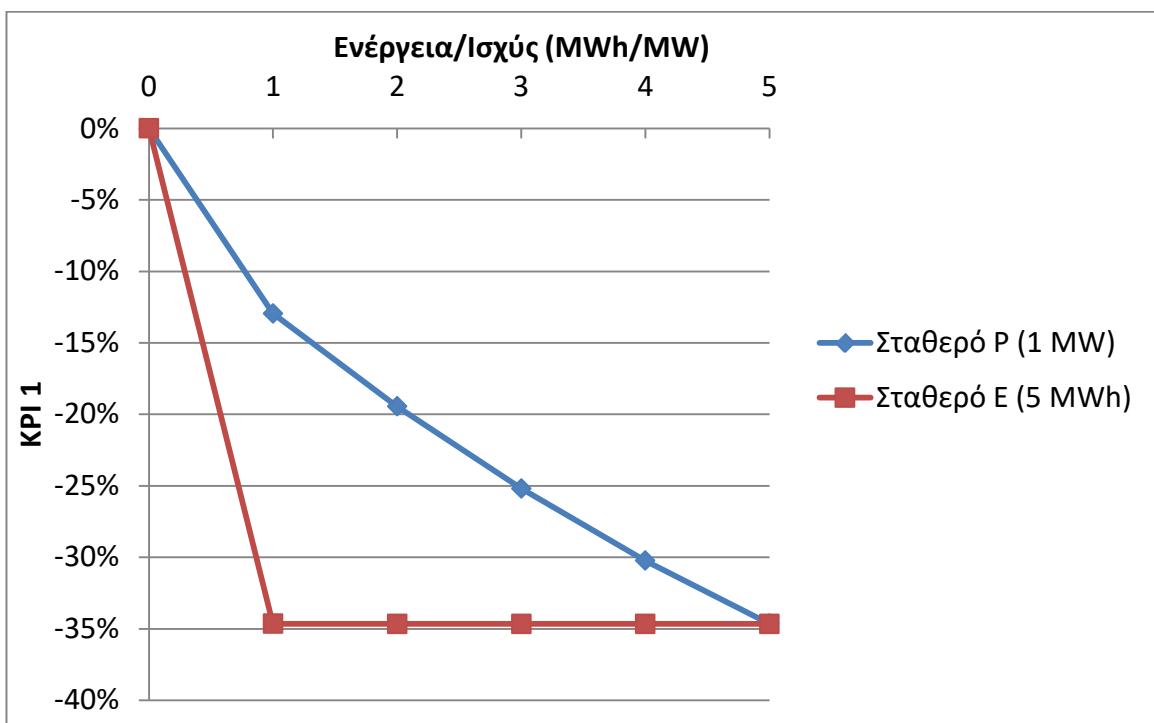
Στους Πίνακες 22 και 23, καθώς και στις Εικόνες 54 και 55 παρουσιάζονται τα KPI 1 και KPI 4 για κάθε περίπτωση (σταθερή ισχύς ή σταθερή ονομαστική χωρητικότητα) αντίστοιχα για τοποθέτηση μπαταρίας στον 12<sup>ο</sup> κόμβο.

	Ενέργεια (MWh)					
	0	1	2	3	4	5
Σταθερό P (1 MW)	0,00%	-12,95%	-19,45%	-25,19%	-30,24%	-34,65%
	Ισχύς (MW)					
	0	1	2	3	4	5
Σταθερό E (5 MWh)	0,00%	-34,65%	-34,66%	-34,66%	-34,66%	-34,66%

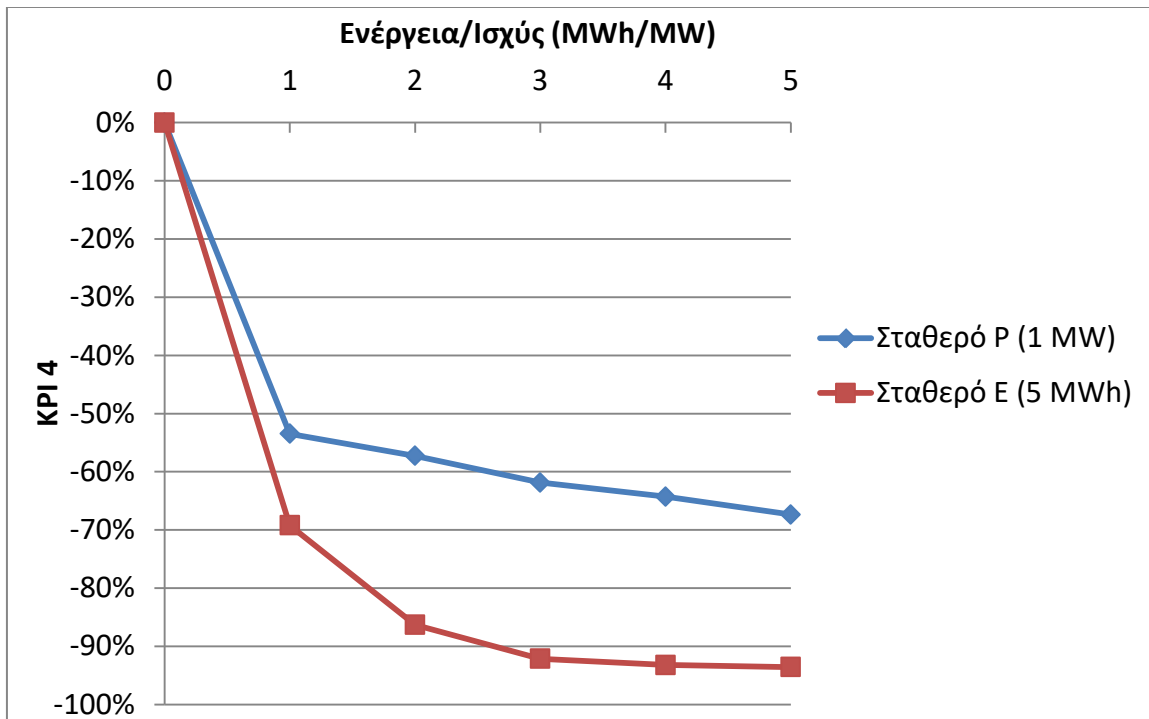
Πίνακας 22: ΚΡΙ 1 για κάθε περίπτωση

	Ενέργεια (MWh)					
	0	1	2	3	4	5
Σταθερό P (1 MW)	0,00%	-53,47%	-57,26%	-61,87%	-64,29%	-67,35%
	Ισχύς (MW)					
	0	1	2	3	4	5
Σταθερό E (5 MWh)	0,00%	-69,21%	-86,30%	-92,14%	-93,20%	-93,55%

Πίνακας 23: ΚΡΙ 4 για κάθε περίπτωση



Εικόνα 54: ΚΡΙ 1 για κάθε περίπτωση



Εικόνα 55: KPI 4 για κάθε περίπτωση

- Ως προς τις απώλειες του δικτύου παρατηρείται σταδιακή βελτίωση με την αύξηση της ονομαστικής χωρητικότητας, ενώ δεν παρατηρείται καμία αλλαγή με την αύξηση της ισχύος
- Ως προς τη ρύθμιση της τάσης παρατηρείται μία μικρή, αλλά σταθερή βελτίωση με την αύξηση της ονομαστικής χωρητικότητας. Με την αύξηση της ισχύος της μπαταρίας παρατηρείται σημαντική βελτίωση όταν η ισχύς γίνεται 2 MW, η οποία όμως φθίνει με την περαιτέρω αύξηση της ισχύος.

Συμπερασματικά, για την βέλτιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων της μπαταρίας, αυτή θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κάθε περίπτωση προς το τέλος της γραμμής. Σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά της, μία μπαταρία ισχύος 1 MW καλύπτει τις ανάγκες του συγκεκριμένου δικτύου, ενώ και η ονομαστική χωρητικότητα της δεν χρειάζεται να είναι μεγαλύτερη από 1 MWh. Μπαταρίες μεγαλύτερης χωρητικότητας εξυπηρετούν κυρίως στην μείωση των απωλειών του δικτύου, η οποία όμως, όπως αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 5.2, αναιρείται λόγω των απωλειών της μπαταρίας. Μπαταρίες μεγαλύτερης ισχύος βελτιώνουν σε κάποιο βαθμό τις τάσεις του δικτύου, ενώ δεν βελτιώνουν καθόλου τις απώλειες του, καθώς για το συγκεκριμένο δίκτυο, αξιοποιείται μόνο η δυνατότητα περαιτέρω έγχυσης αέργου ισχύος της μπαταρίας.

## 7 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον Συντελεστή Ισχύος των σταθμών ΔΠ

Για την ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον ΣΙ των σταθμών Δ.Π στο δίκτυο, χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο που περιγράφηκε στην Ενότητα 5.1 για το σενάριο 4 και μεταβλήθηκε το όριο του ΣΙ από τη μονάδα μέχρι 0.8. Ωστόσο λόγω της δυνατότητας παραγωγής αέργου ισχύος από την μπαταρία, κρίθηκε πως θα ήταν δυνατή η εξαγωγή ορθότερων συμπερασμάτων αν αφαιρεθεί. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με αντικειμενική συνάρτηση είτε την ρύθμιση της τάσης είτε την ελαχιστοποίηση των απωλειών.

### 7.1 Επίδραση του Συντελεστή Ισχύος των σταθμών ΔΠ στις τάσεις του δικτύου

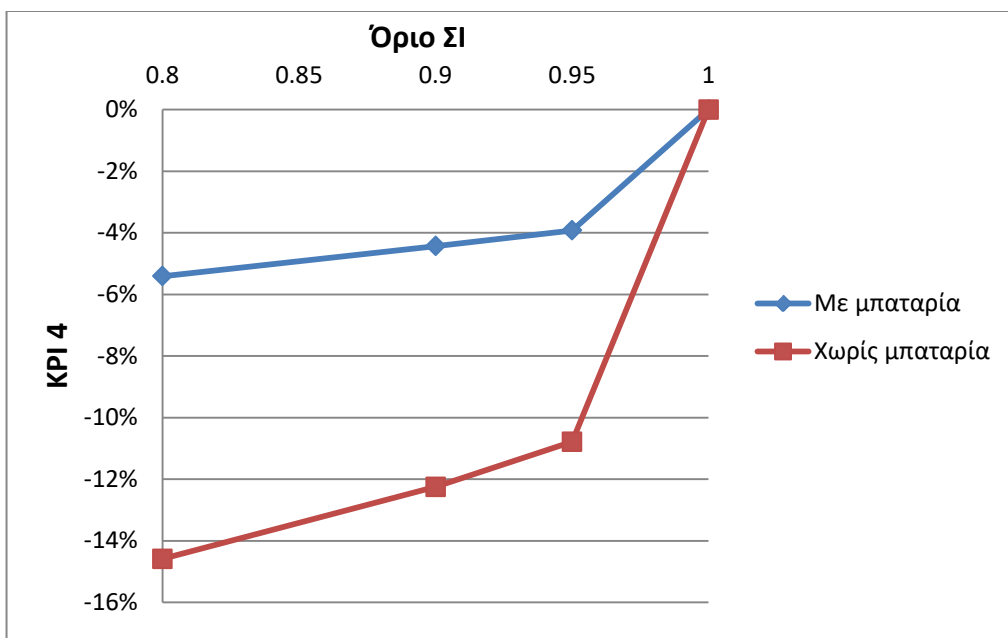
Με αντικειμενική συνάρτηση την ρύθμιση της τάσης, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου για κάθε δυνατή τιμή του ΣΙ των σταθμών ΔΠ και καταγράφηκε η RMS τιμή της διακύμανσης της τάσης σε όλους τους κόμβους για όλες τις ώρες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 24, ενώ στον Πίνακα 25 και στην Εικόνα 56 παρουσιάζεται το KPI 4 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα. Σε κάθε περίπτωση, θεωρήθηκε ότι το όριο της τιμής του επαγωγικού ΣΙ ταυτίζεται με το αντίστοιχο όριο του χωρητικού.

	Όριο ΣΙ			
	1	0,95	0,9	0,8
Με μπαταρία	0,1601	0,1569	0,1565	0,1557
Χωρίς μπαταρία	0,2629	0,2483	0,2462	0,2429

**Πίνακας 24: RMS τιμή της διακύμανσης της τάσης του δικτύου για κάθε περίπτωση ΣΙ**

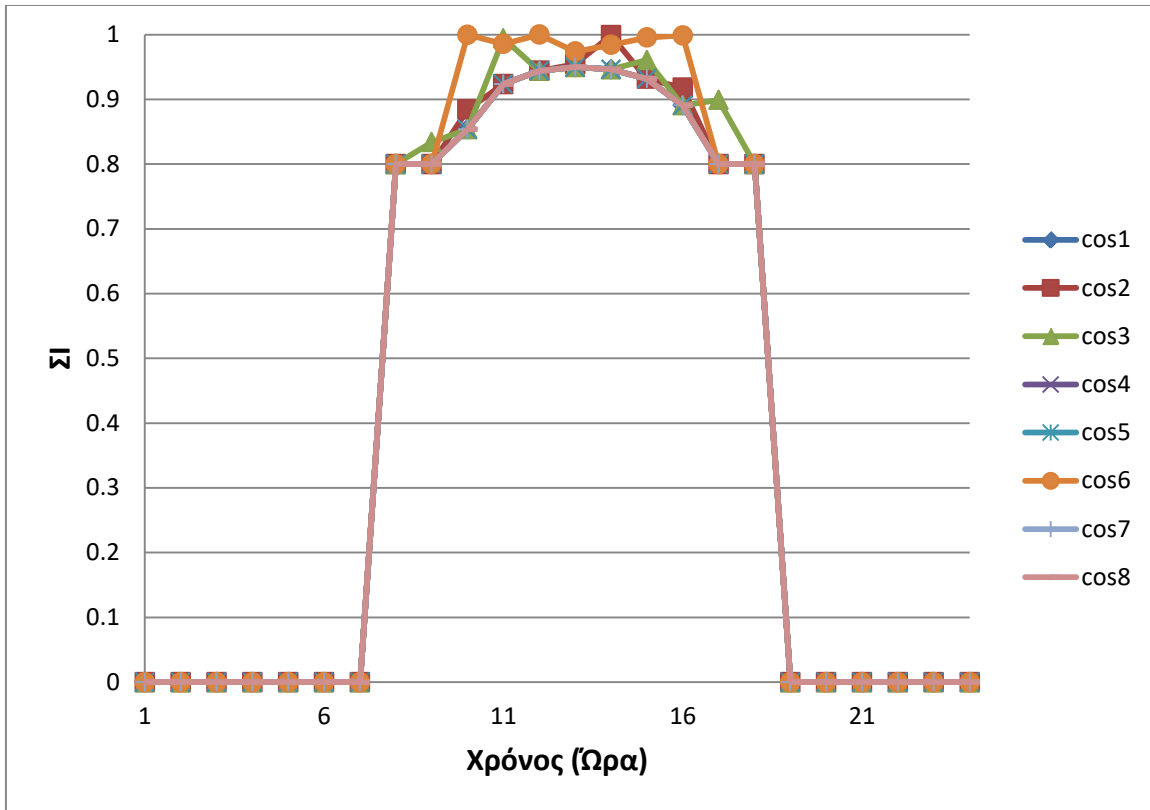
	Όριο ΣΙ			
	1	0,95	0,9	0,8
Με μπαταρία	0,0%	-3,9%	-4,4%	-5,4%
Χωρίς μπαταρία	0,0%	-10,8%	-12,3%	-14,6%

**Πίνακας 25: KPI 4 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα**

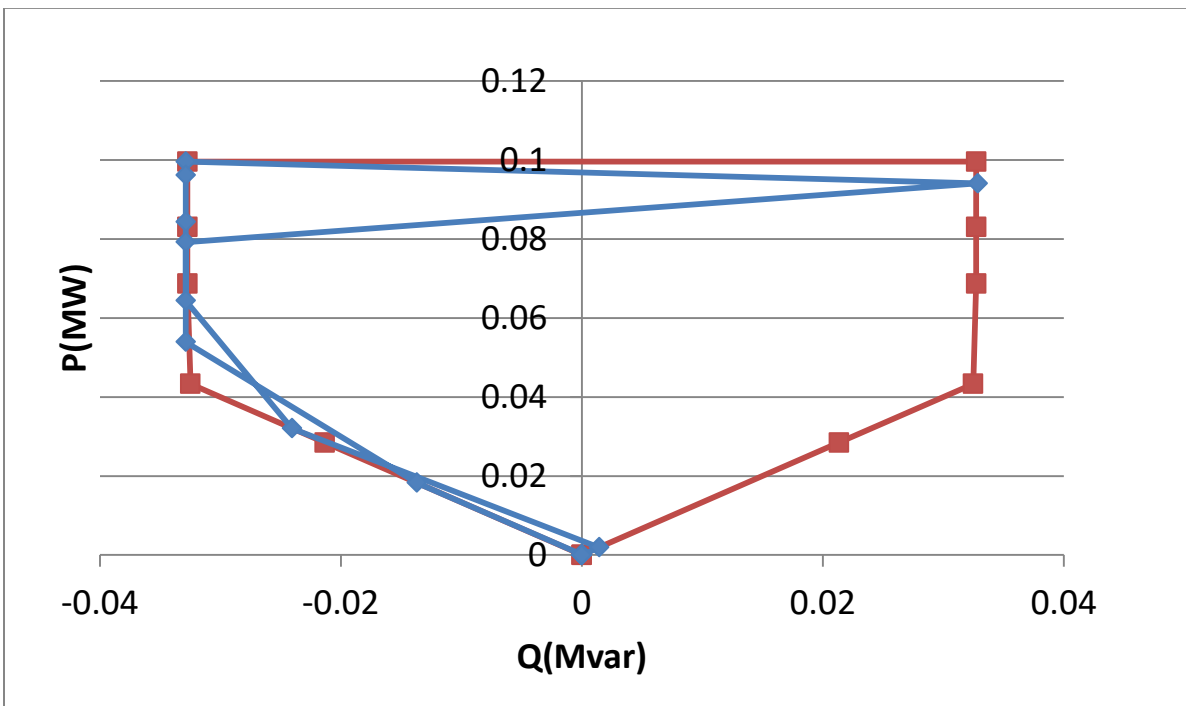


Εικόνα 56: KPI 4 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα

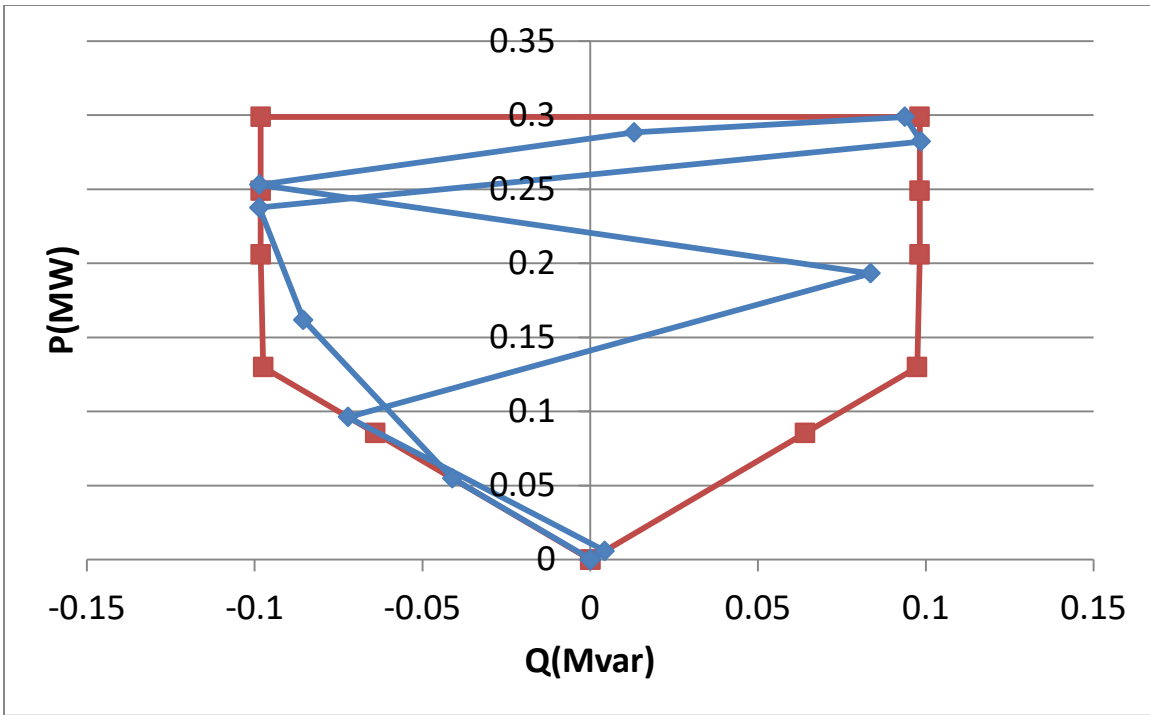
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 56, στο δίκτυο χωρίς τη μπαταρία, ο έλεγχος της αέργου ισχύος στα φωτοβολταϊκά πάρκα, με  $\Sigma I=0.95$ , βελτιώνει την τάση του δικτύου σε ποσοστό 11% σε σχέση με τη λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ωστόσο η περαιτέρω μείωση του ορίου του ΣΙ βελτιώνει λιγότερο τη τάση του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, όταν στο δίκτυο υπάρχει μπαταρία, η βελτίωση της τάσης με  $\Sigma I=0.95$  είναι αρκετά μικρότερη, της τάξεως του 4%, ενώ για  $\Sigma I=0.8$  φτάνει το 5.4%, εξαιτίας της συμβολής της μπαταρίας στην παραγωγή και την κατανάλωση της αέργου ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά πάρκα λειτουργούν με χαμηλό συντελεστή ισχύος όταν η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μικρή, ενώ αντίθετα, κατά τις μεσημεριανές ώρες, όπου η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι μεγάλη, παρατηρήθηκε ότι ο ΣΙ παίρνει μεγαλύτερες τιμές, ανεξαρτήτως του ορίου του ΣΙ, λόγω των περιορισμών του προβλήματος (περιορισμός μεγίστης αέργου ισχύος). Αυτό γίνεται κατανοητό στην Εικόνα 57 όπου παρουσιάζεται γραφικά η τιμή του ΣΙ για κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και στις Εικόνες 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64 και 65, όπου παρουσιάζονται τα διαγράμματα Q-P κάθε πάρκου.



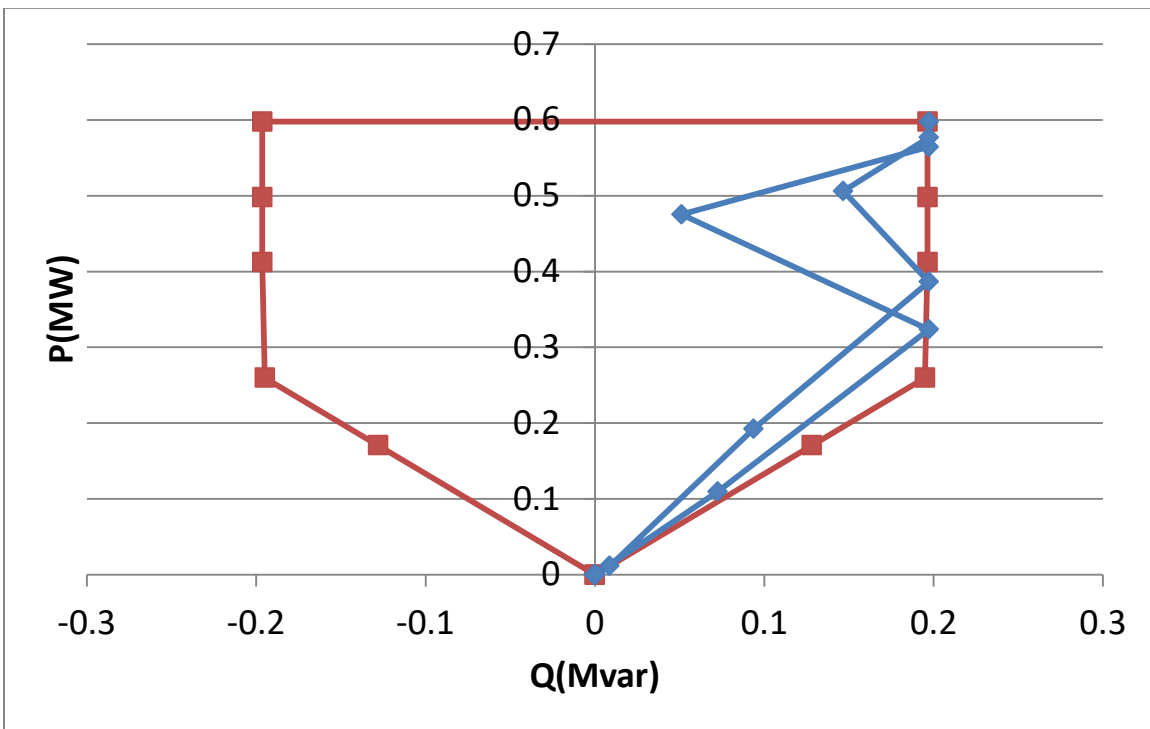
Εικόνα 57: ΣΙ των σταθμών ΔΠ



Εικόνα 58: Άεργος λειτουργία και όρια πρώτου σταθμού ΔΠ

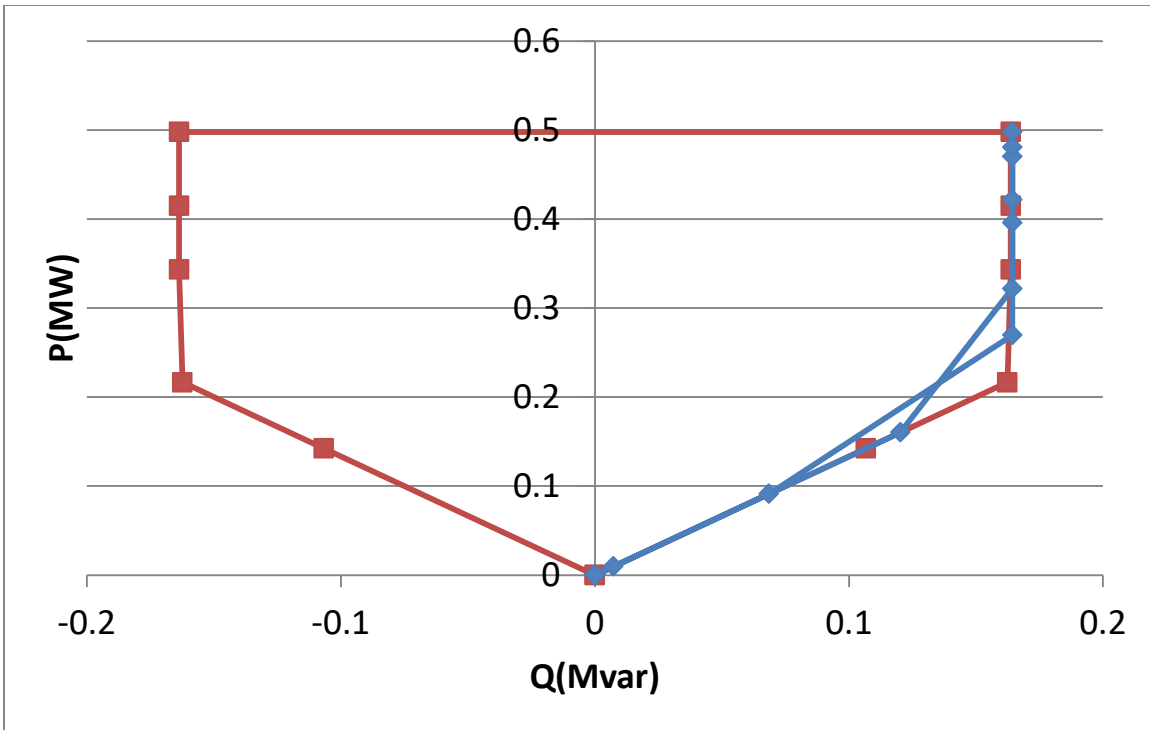


Εικόνα 59: Άεργος λειτουργία και όρια δεύτερου σταθμού ΔΠ

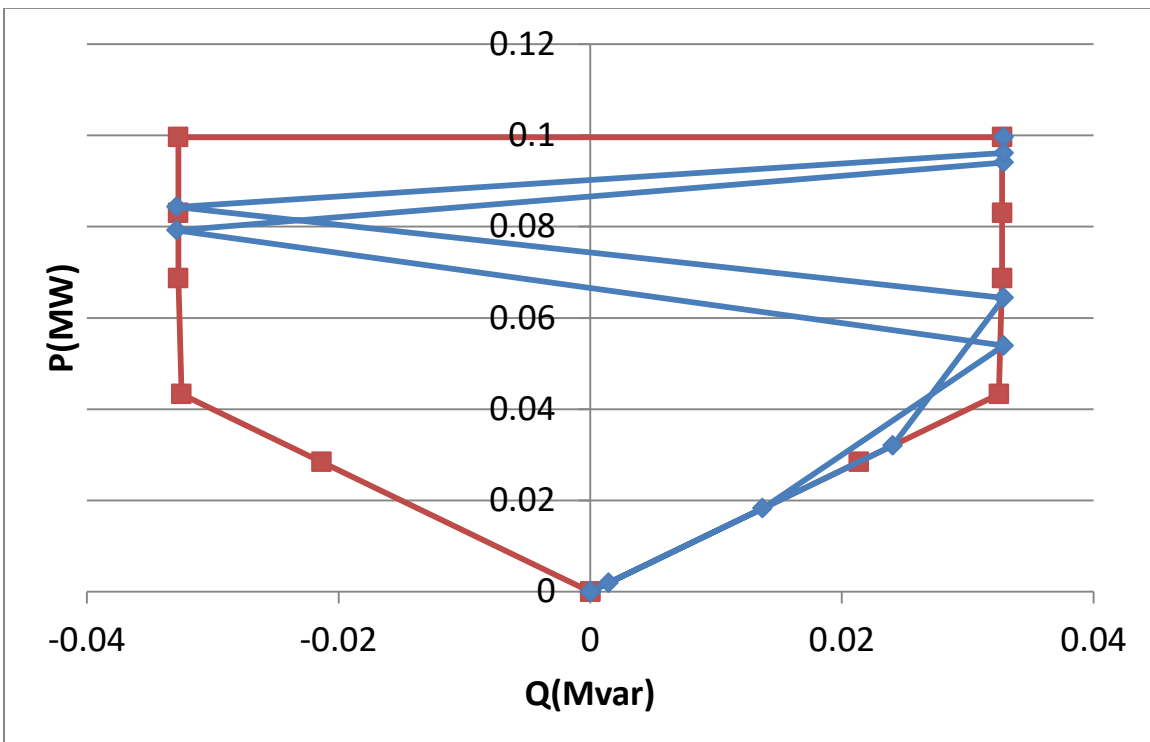


Εικόνα 60: Άεργος λειτουργία και όρια τρίτου σταθμού ΔΠ

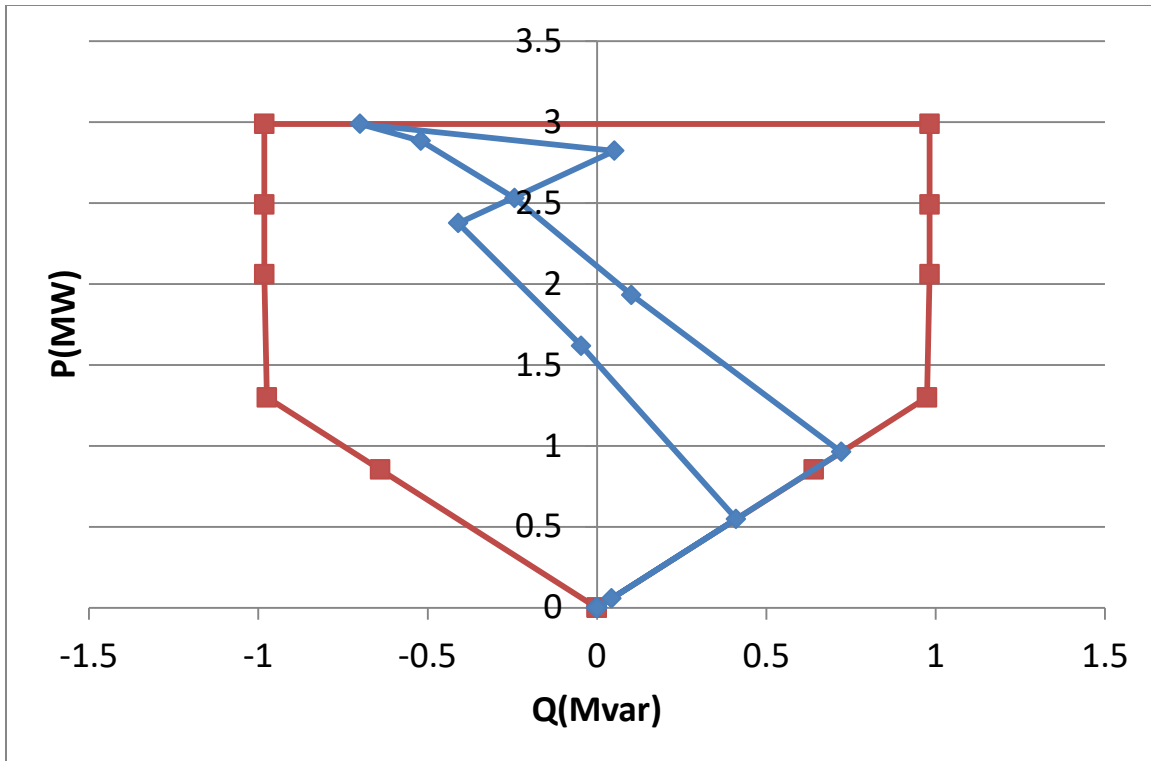




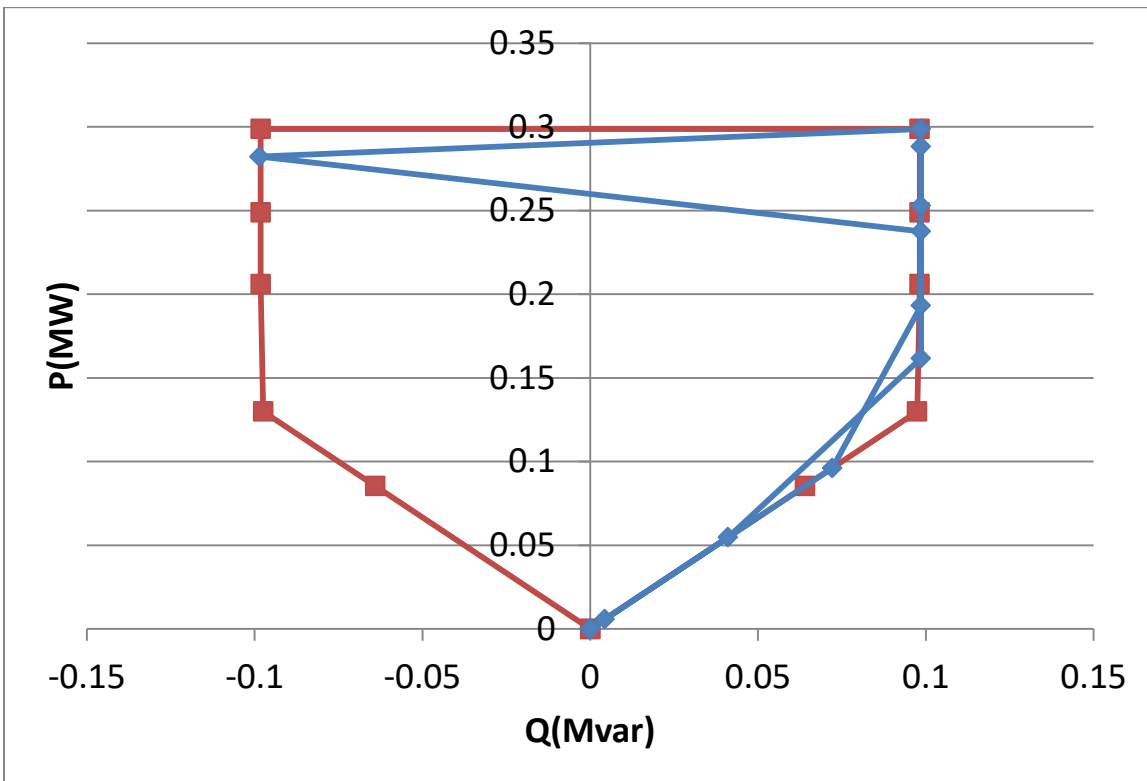
Εικόνα 61: Άεργος λειτουργία και όρια τέταρτου σταθμού ΔΠ



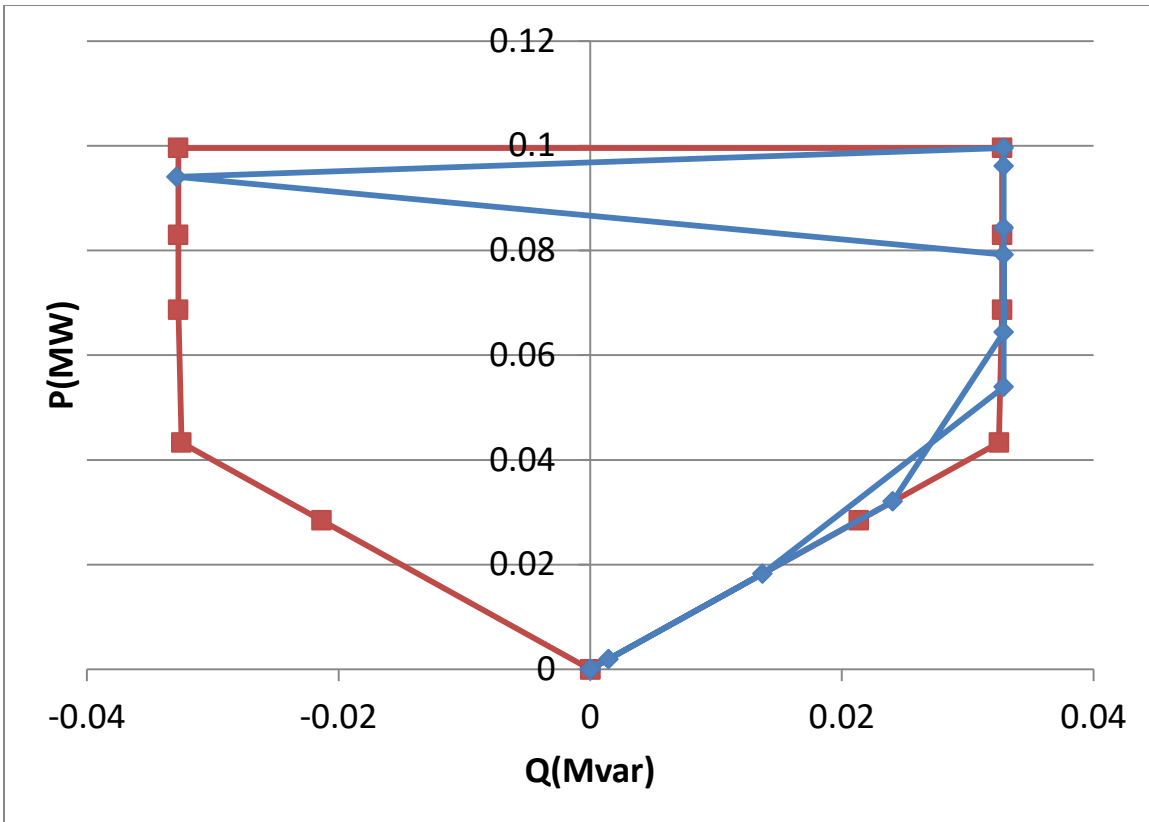
Εικόνα 62: Άεργος λειτουργία και όρια πέμπτου σταθμού ΔΠ



Εικόνα 63: Άεργος λειτουργία και όρια έκτου σταθμού ΔΠ



Εικόνα 64: Άεργος λειτουργία και όρια έβδομου σταθμού ΔΠ



Εικόνα 65: Άεργος λειτουργία και όρια όγδου σταθμού ΔΠ

Από τα διαγράμματα Q-P των πάρκων, παρατηρήθηκε ότι όλα τα πάρκα με εξαίρεση το έκτο που έχει αρκετά μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ συγκριτικά με τα υπόλοιπα, λειτουργούν σχεδόν πάντα στο όριο τους, είτε αυτό καθορίζεται από τον ΣΙ είτε από την μέγιστη άεργο ισχύ. Επίσης τα πάρκα που βρίσκονται στην αρχή της γραμμής παρουσιάζουν επαγωγική συμπεριφορά, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτή, αποκτούν χωρητική συμπεριφορά.

## 7.2 Επίδραση του Συντελεστή Ισχύος των σταθμών ΔΠ στις απώλειες του δικτύου

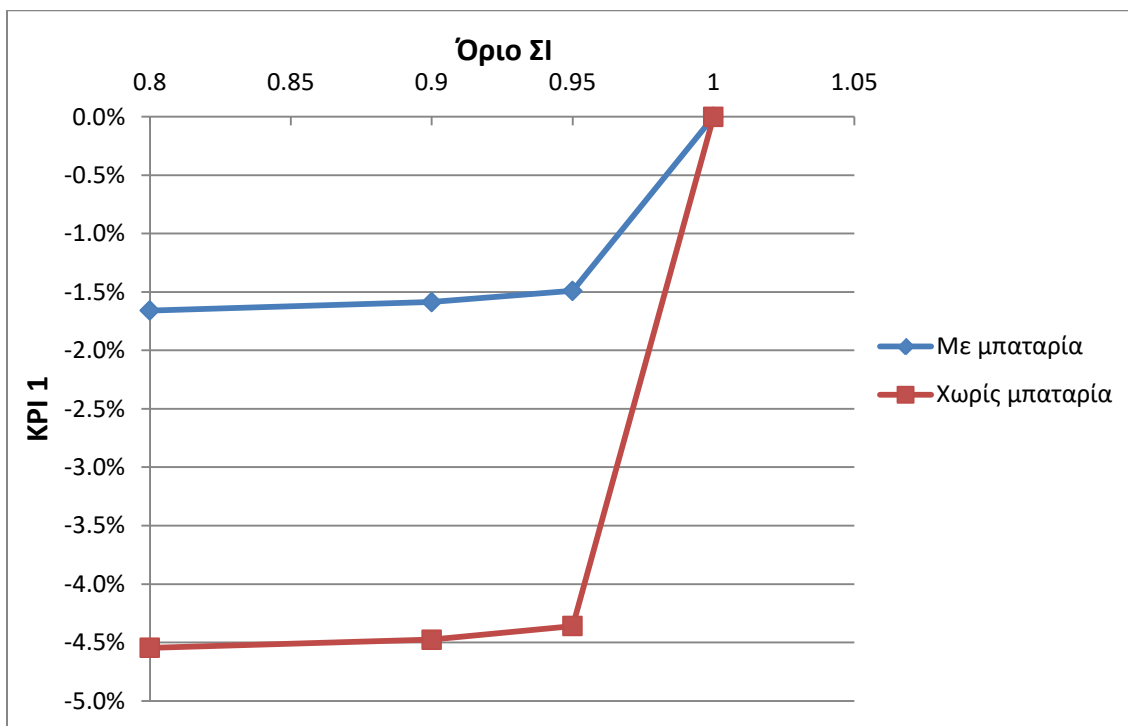
Στη συνέχεια, με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου για κάθε δυνατή τιμή του ΣΙ των σταθμών ΔΠ και καταγράφηκαν οι απώλειες του δικτύου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 26, ενώ στον Πίνακα 27 και στην Εικόνα 66 παρουσιάζεται το KPI 1 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα.

	Όριο ΣΙ			
	1	0,95	0,9	0,8
Με μπαταρία	1,02	1,00	1,00	1,00
Χωρίς μπαταρία	1,57	1,50	1,50	1,49

Πίνακας 26: Απώλειες του δικτύου σε MWh για κάθε περίπτωση ΣΙ

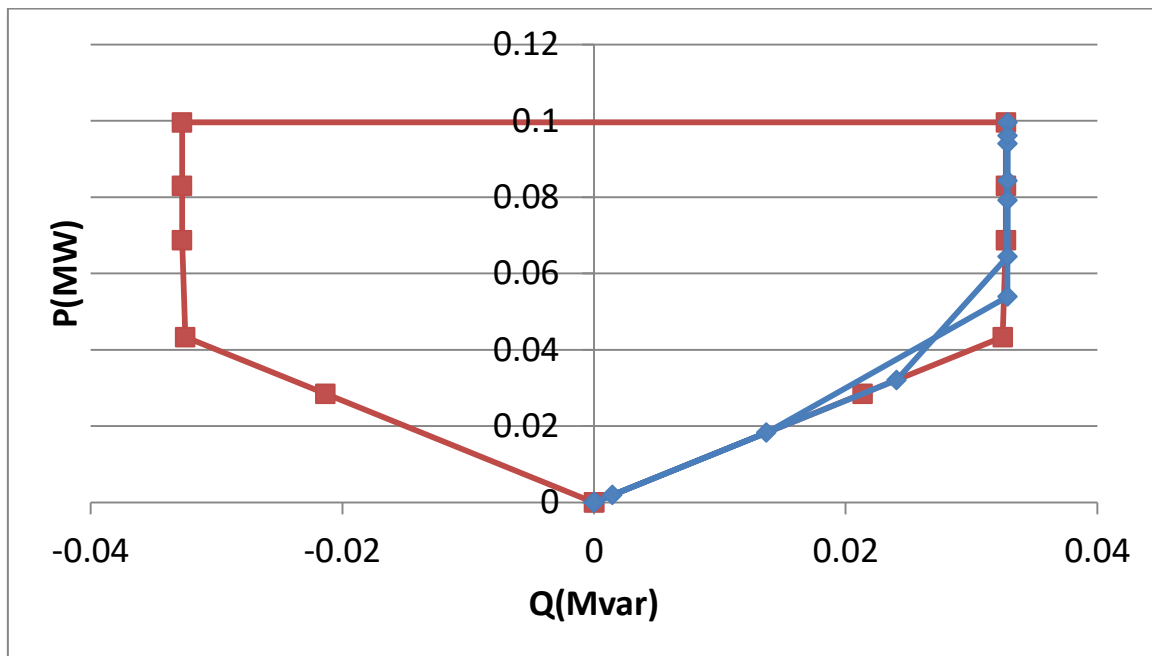
	Όριο ΣΙ			
	1	0,95	0,9	0,8
Με μπαταρία	0,00%	-1,49%	-1,59%	-1,66%
Χωρίς μπαταρία	0,00%	-4,36%	-4,48%	-4,55%

Πίνακας 27: ΚΡΙ 1 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα

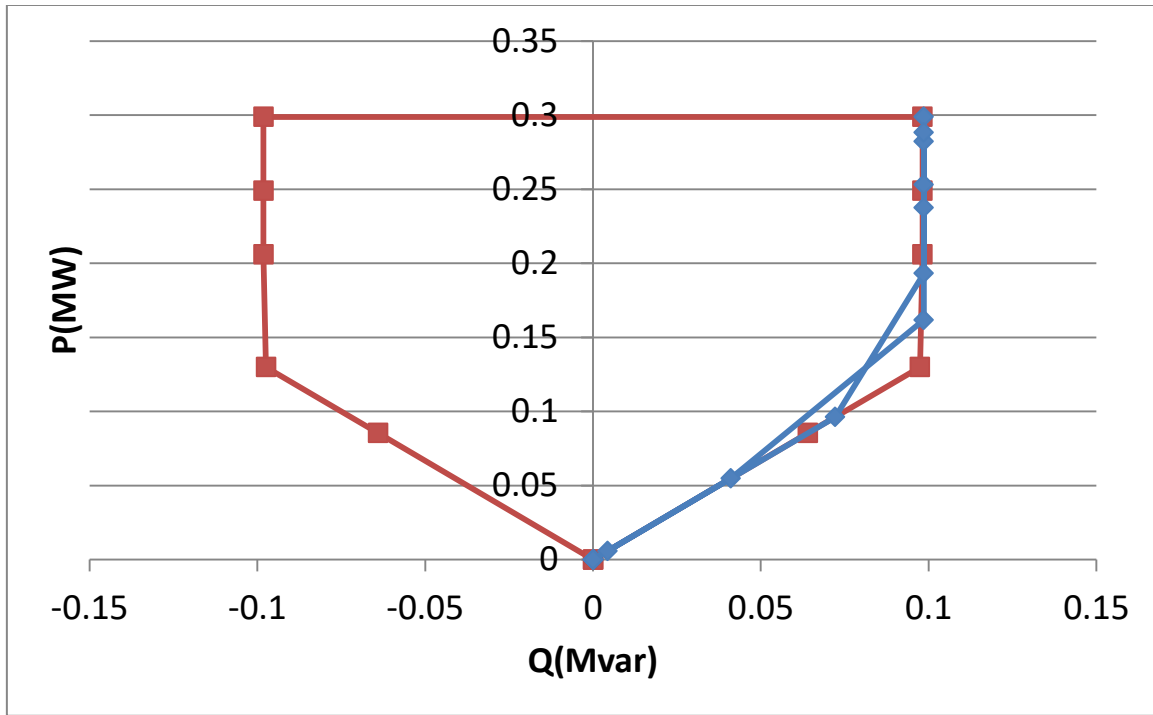


Εικόνα 66: ΚΡΙ 1 με βασικό σενάριο το όριο του ΣΙ να ισούται με τη μονάδα

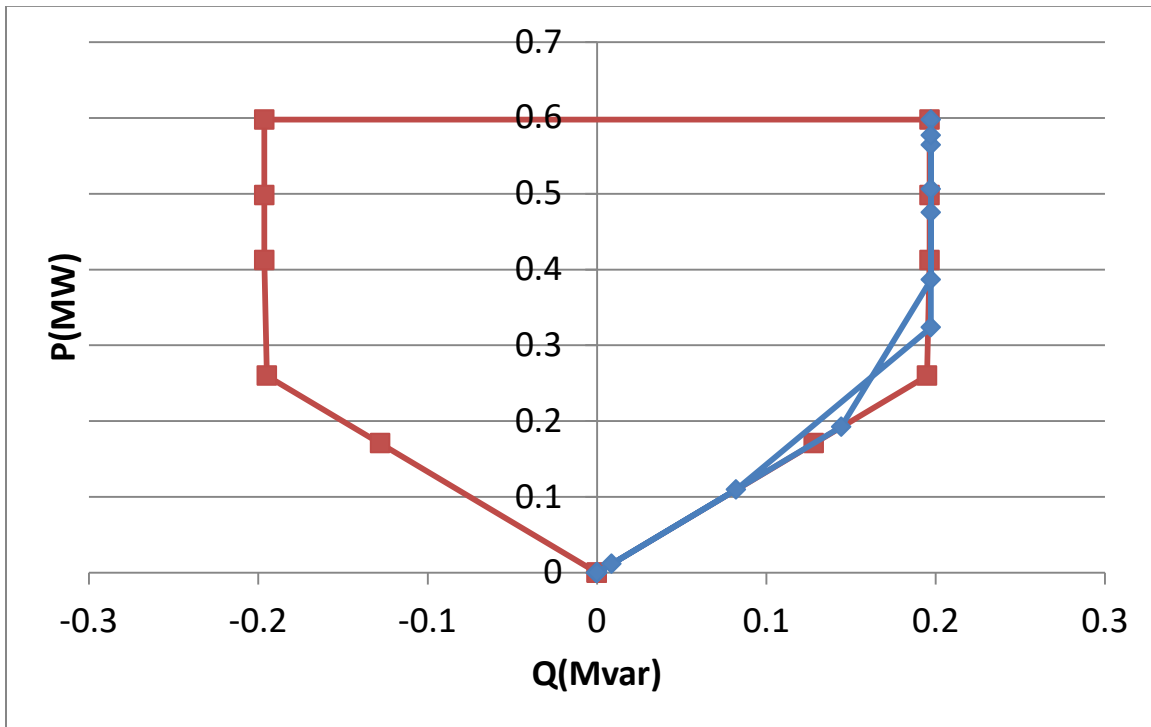
Όμοια συμπεριφορά με τις τάσεις, παρατηρήθηκε και στην μείωση των απωλειών του δικτύου, η οποία ήταν της τάξης του 4,5% όταν δεν υπάρχει μπαταρία στο δίκτυο, και 1,5% με την ύπαρξη μπαταρίας για  $\Sigma I=0,95$ . Η μείωση αυτή παρέμεινε σχεδόν σταθερή για τις διάφορες περιπτώσεις του  $\Sigma I$ . Στις Εικόνες 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73 και 74 παρουσιάζονται τα διαγράμματα Q-P των σταθμών ΔΠ.



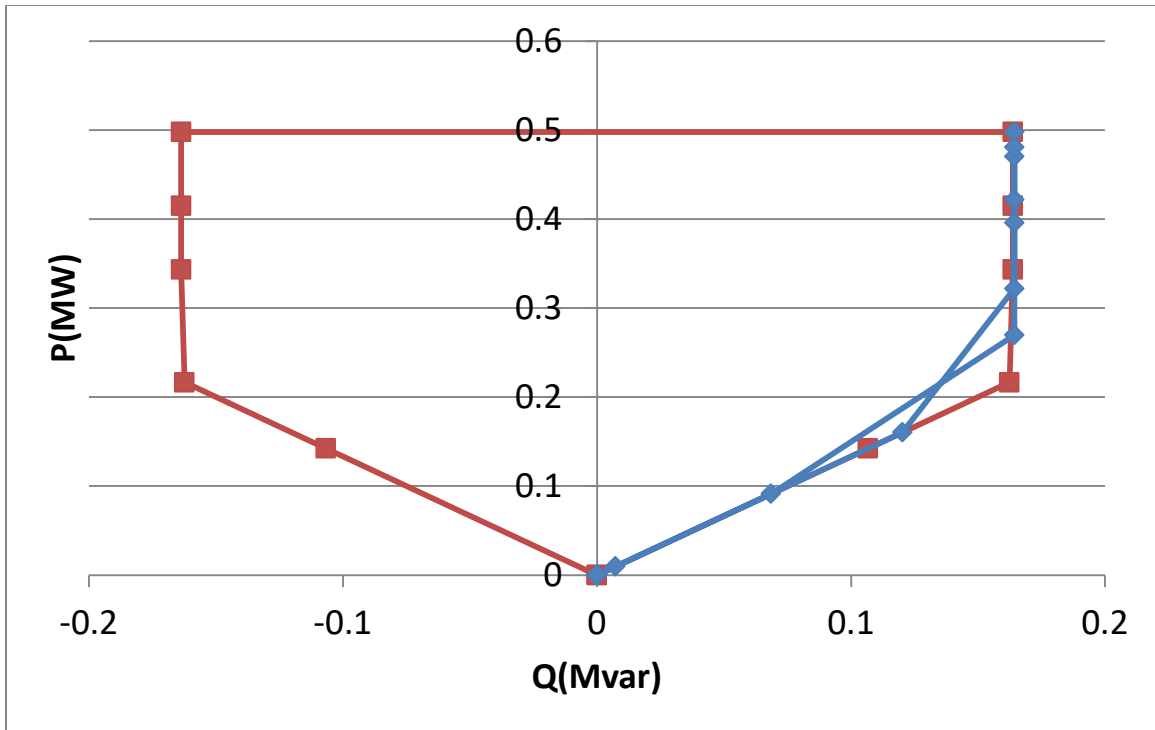
Εικόνα 67: Άεργος λειτουργία και όρια πρώτου σταθμού ΔΠ



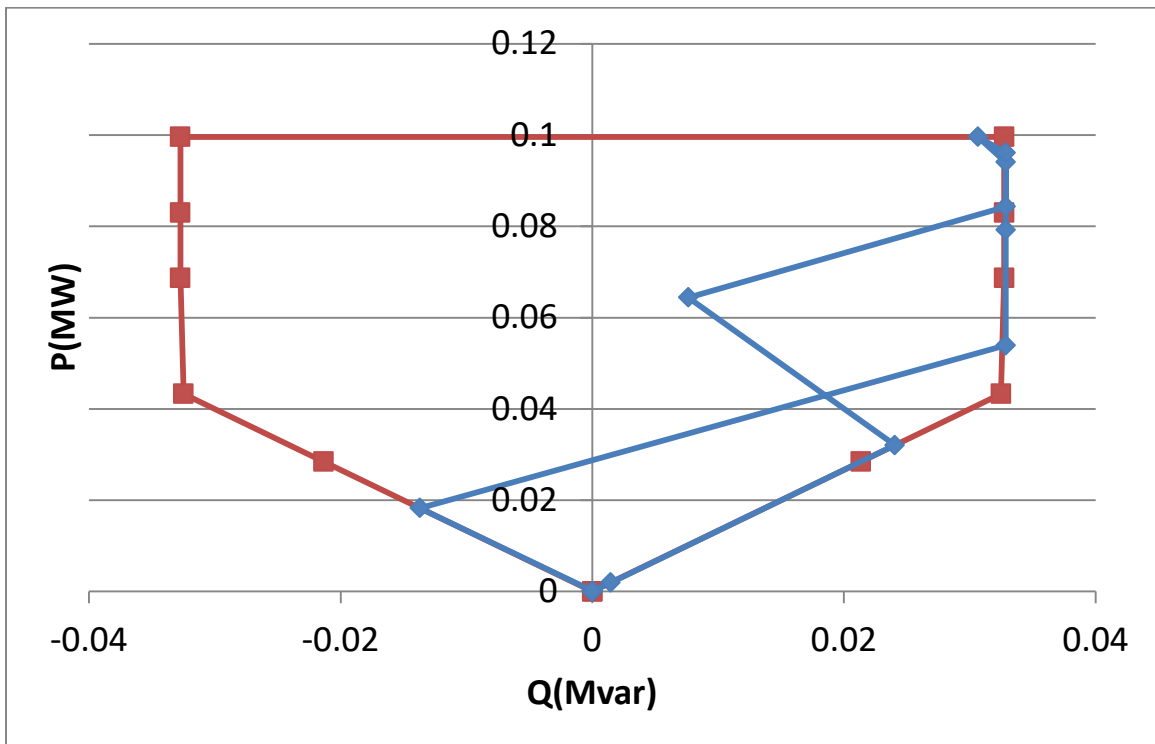
Εικόνα 68: Άεργος λειτουργία και όρια δεύτερου σταθμού ΔΠ



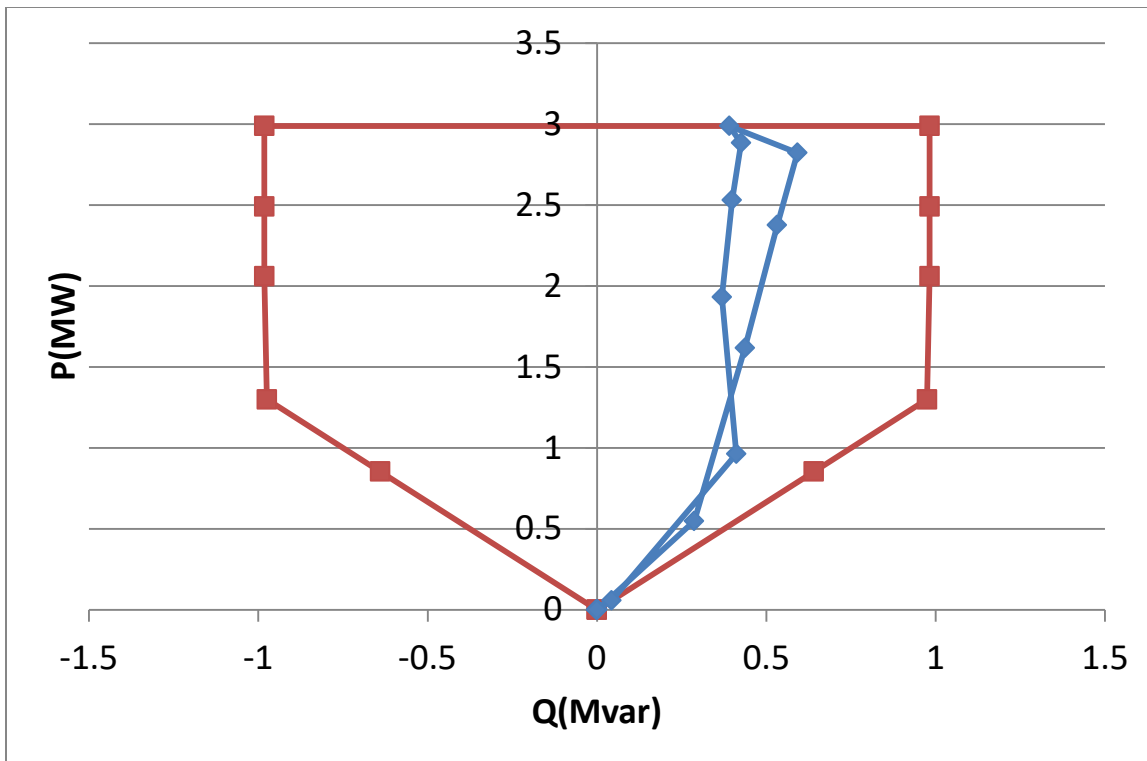
Εικόνα 69: Άεργος λειτουργία και όρια τρίτου σταθμού ΔΠ



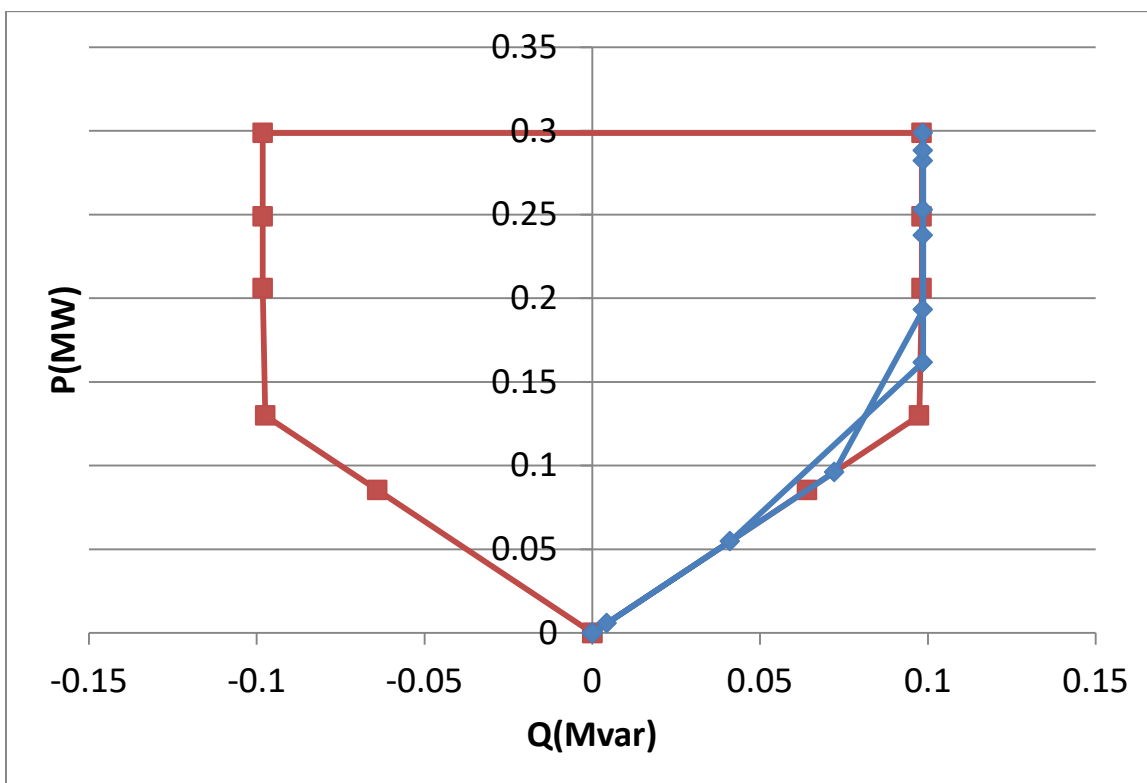
Εικόνα 70: Άεργος λειτουργία και όρια τέταρτου σταθμού ΔΠ



Εικόνα 71: Άεργος λειτουργία και όρια πέμπτου σταθμού ΔΠ

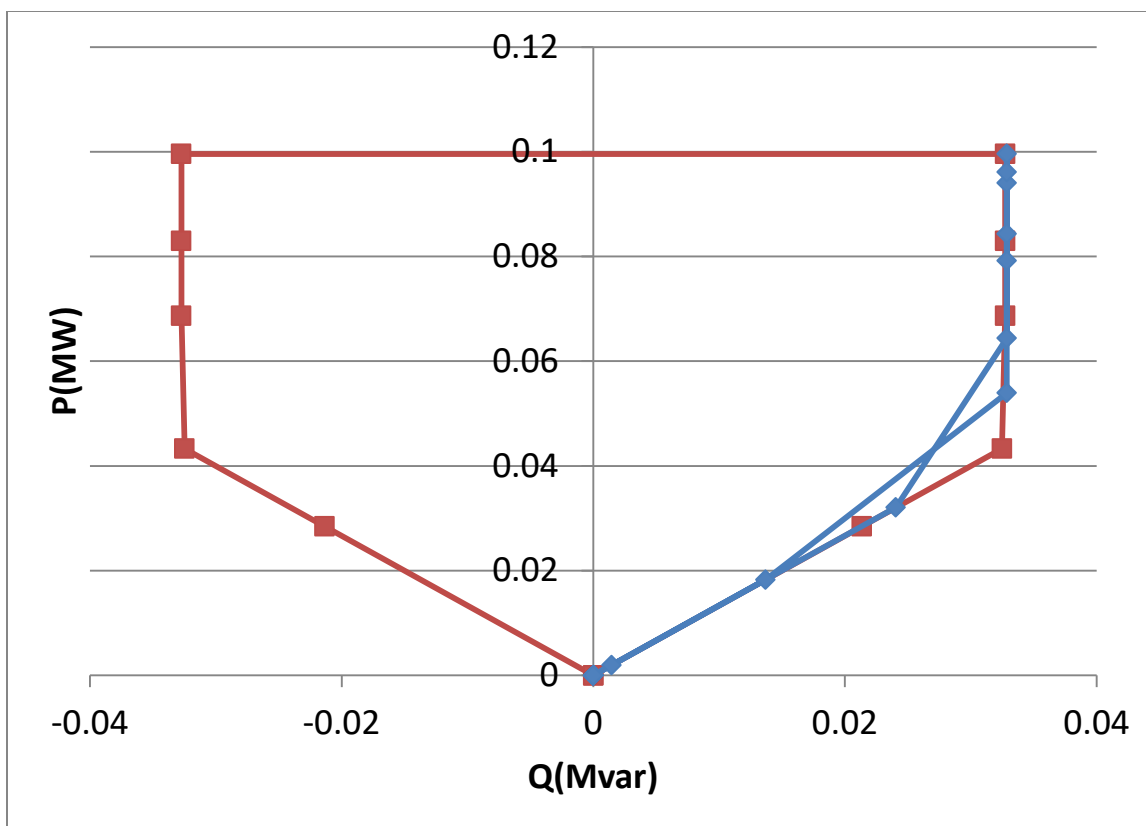


Εικόνα 72: Άεργος λειτουργία και όρια έκτου σταθμού ΔΠ



Εικόνα 73: Άεργος λειτουργία και όρια έβδομου σταθμού ΔΠ





Εικόνα 74: Αεργός λειτουργία και όρια όγδου σταθμού ΔΠ

Όπως και στη περίπτωση της ρύθμισης της τάσης παρατηρήθηκε ότι όλα τα πάρκα με εξαίρεση το έκτο, λειτουργούν πάντα στο όριο τους, είτε αυτό καθορίζεται από τον ΣΙ είτε από την μέγιστη αεργό ισχύ. Σε αντίθεση με πριν όμως, κατά την ελαχιστοποίηση των απωλειών, όλα τα πάρκα λειτουργούν διαρκώς χωρητικά.

### 7.3 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση του ορίου του ΣΙ των σταθμών ΔΠ στις τάσεις και στις απώλειες του δικτύου. Καταρχάς παρατηρήθηκε ότι οι βελτιώσεις που επιφέρει η αύξηση του ορίου του ΣΙ των σταθμών ΔΠ είναι αρκετά μικρότερες όταν στο δίκτυο υπάρχει μπαταρία λόγω της αεργού ισχύος που εγχέει ή απορροφά. Για την εξαγωγή πιο ολοκληρωμένων συμπερασμάτων, αφαιρέθηκε η μπαταρία από το δίκτυο, του οποίου η λειτουργία προσομοιώθηκε.

- Ως προς τις τάσεις του δικτύου, παρατηρήθηκε ότι όταν επιτρέπουμε τη δυνατότητα παραγωγής και απορρόφησης αεργού ισχύος με ΣΙ 0.95, επιτυγχάνεται μία βελτίωση της τάξης του 10,8%. Ωστόσο η περαιτέρω αύξηση του ορίου, βελτιώνει σε μικρότερο βαθμό τις τάσεις του δικτύου καθώς για όριο

ΣΙ 0,9 παρατηρείται βελτίωση 12,3%, ενώ για όριο ΣΙ 0,8 η βελτίωση φτάνει το 14,6%. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό της μέγιστης αέργου ισχύος, ο οποίος όταν υπάρχει μεγάλη φωτοβολταϊκή παραγωγή, δεν επιτρέπει την παραγωγή/κατανάλωση της μέγιστης δυνατής αέργου ισχύος όπως αυτή ορίζεται από τον ΣΙ.

- Ως προς τις απώλειες του δικτύου, παρατηρήθηκε μείωση της τάξης του 4,36% όταν προστίθεται η δυνατότητα παραγωγής/κατανάλωσης αέργου ισχύος με ΣΙ 0.95, η οποία παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως του ορίου του ΣΙ.

## 8 Ανάλυση ευαισθησίας με βάση το ποσοστό διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων

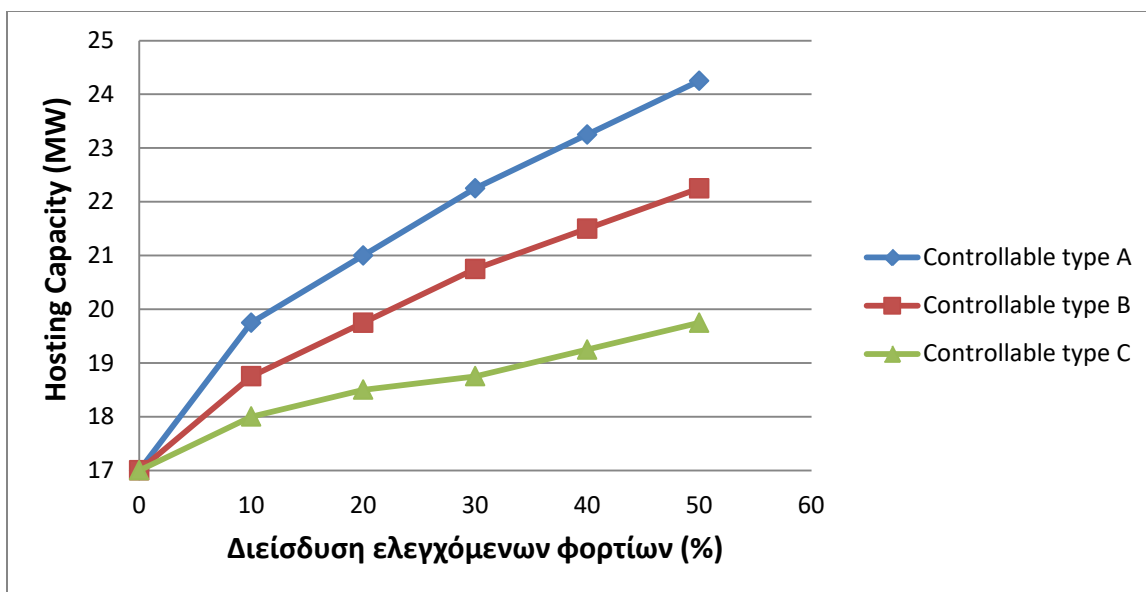
Στη συγκεκριμένη ανάλυση, χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο που περιγράφηκε στο Σενάριο 3 στην Ενότητα 5.1 με τη προσθήκη μπαταρίας στον κόμβο 8, ονομαστικής χωρητικότητας 5 MWh και ισχύος 1 MW. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς ελεγχόμενα φορτία, και για ποσοστό διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων από 0 έως 50 % του συνολικού φορτίου με βήμα 10 για κάθε είδος ελεγχόμενων φορτίων. Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκαν το Hosting Capacity, η τάση, οι απώλειες του δικτύου, καθώς και οι περικοπές της φωτοβολταϊκής παραγωγής.

### 8.1 Hosting Capacity

Με ΑΣ την ρύθμιση της τάσης, αυξήθηκε η εγκατεστημένη ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής με βήμα 0.25 MW μέχρις ότου κάποιος περιορισμός του προβλήματος να παραβιαστεί. Σε κάθε περίπτωση καταγράφηκε το Hosting Capacity του δικτύου, δηλαδή η μέγιστη ισχύς φωτοβολταϊκής παραγωγής που μπορεί να εγκατασταθεί στο δίκτυο πριν κάποιος περιορισμός παραβιαστεί. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 28 και στην Εικόνα 75.

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	17	19,75	21	22,25	23,25	24,25
Controllable type B	17	18,75	19,75	20,75	21,5	22,25
Controllable type C	17	18	18,5	18,75	19,25	19,75

**Πίνακας 28: Επίδραση της διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων στο Hosting Capacity (MW) του δικτύου**



Εικόνα 75: Επίδραση της διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων στο Hosting Capacity (MW) του δικτύου

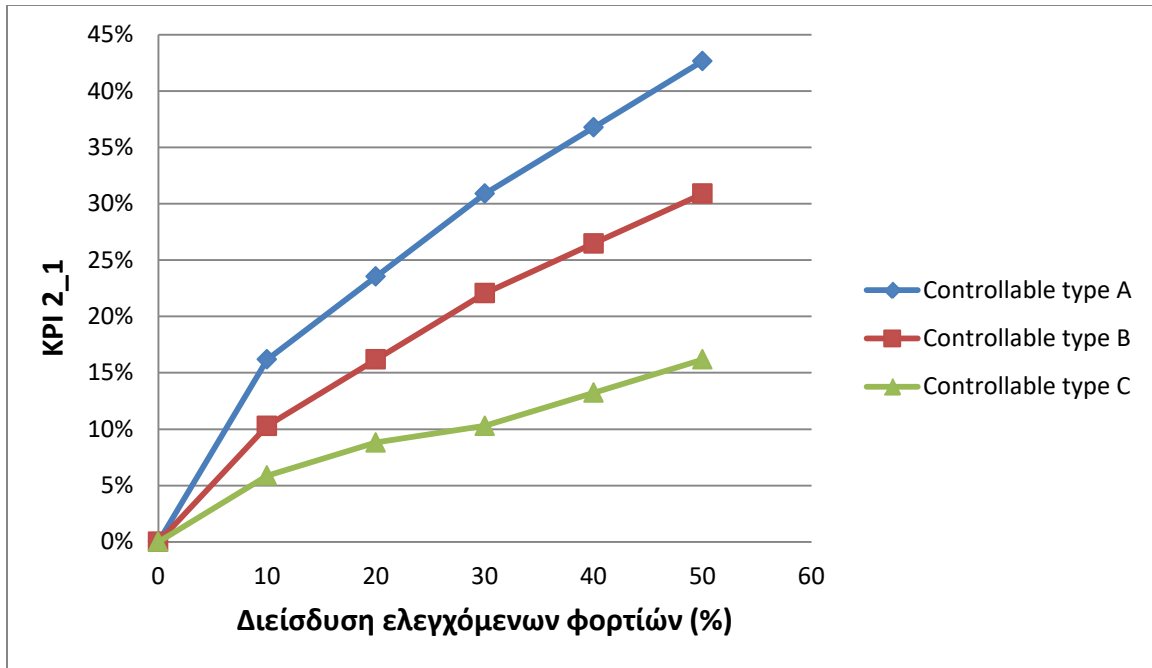
Ταυτόχρονα έγινε υπολογισμός του KPI 2 (Αύξηση διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο). Για τον υπολογισμό αυτού του KPI χρησιμοποιήθηκαν 2 σενάρια αναφοράς:

- 1) Smart grid χωρίς ελεγχόμενα φορτία

$$KPI2\_1 = \frac{HC_{SG} - HC_{SGwithoutcontrollableload}}{HC_{SGwithoutcontrollableload}} \cdot 100\% \quad (8.1)$$

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	0,00%	16,18%	23,53%	30,88%	36,76%	42,65%
Controllable type B	0,00%	10,29%	16,18%	22,06%	26,47%	30,88%
Controllable type C	0,00%	5,88%	8,82%	10,29%	13,24%	16,18%

Πίνακας 29: KPI 2 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία



Εικόνα 76: KPI 2 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι και τα τρία είδη ελεγχόμενων φορτίων βελτιώνουν το Hosting Capacity του δικτύου, με τη σημαντικότερη βελτίωση να επιτυγχάνεται με τα ελεγχόμενα φορτία τύπου A, η οποία ξεπερνά το 40% για ποσοστό διείσδυσης 50%, ενώ ακόμα και για διείσδυση 10% η βελτίωση κυμαίνεται πάνω από το 15%. Αρκετά ικανοποιητική είναι και η βελτίωση των ελεγχόμενων φορτίων τύπου B που αγγίζει το 30% και το 10% στις αντίστοιχες περιπτώσεις. Τέλος και τα φορτία τύπου C επιτυγχάνουν βελτίωση στο Hosting Capacity του δικτύου που κυμαίνεται από 5% έως 15%.

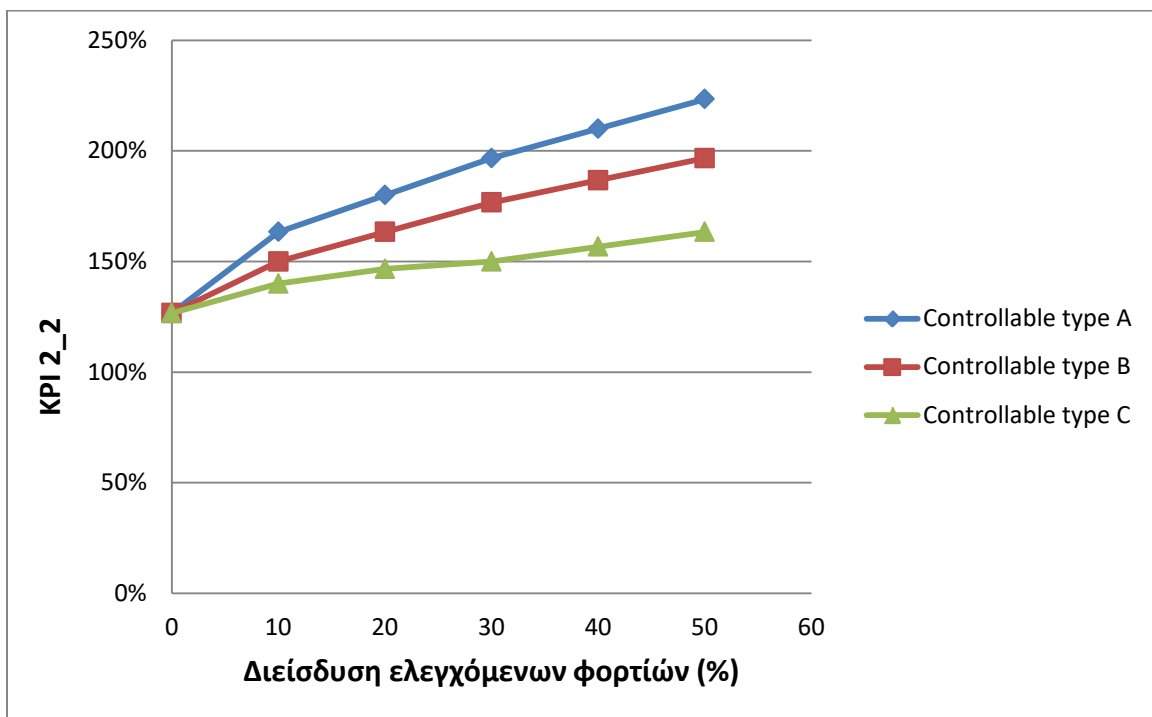
## 2) Παθητικό δίκτυο - BL

$$KPI2_2 = \frac{HC_{SG} - HC_{BL}}{HC_{BL}} \cdot 100\% \quad (8.2)$$

Όπου  $HC_{SG} = 7,5 \text{ MW}$ .

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	126,67%	163,33%	180,00%	196,67%	210,00%	223,33%
Controllable type B	126,67%	150,00%	163,33%	176,67%	186,67%	196,67%
Controllable type C	126,67%	140,00%	146,67%	150,00%	156,67%	163,33%

**Πίνακας 30: KPI 2 με σενάριο αναφοράς το BL**



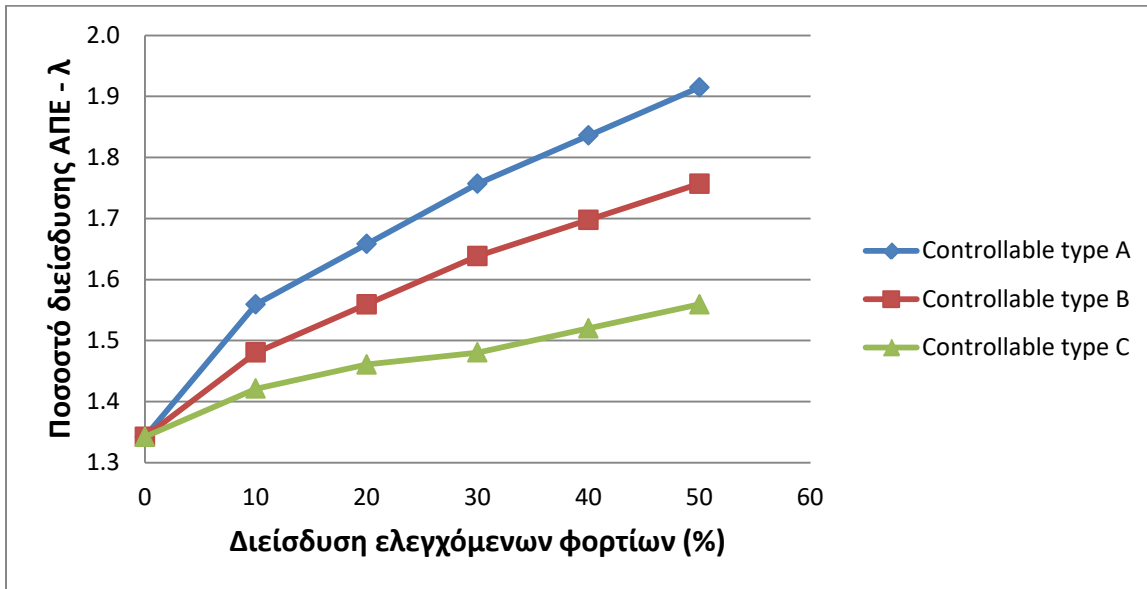
**Εικόνα 77: KPI 2 με σενάριο αναφοράς το BL**

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη του έξυπνου δικτύου, βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό το Hosting Capacity καθώς το υπερδιπλασιάζει, ενώ η εισαγωγή ελεγχόμενων φορτίων επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις, όπως αυτές παρουσιάστηκαν και προηγουμένως.

Ομοίως έγινε υπολογισμός και των KPI 3 (Αύξηση μεριδίου ενέργειας από ΑΠΕ) και KPI 5 (Μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>) που συνδέονται άμεσα με το KPI 2.

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	1,342	1,559	1,658	1,757	1,836	1,915
Controllable type B	1,342	1,480	1,559	1,638	1,698	1,757
Controllable type C	1,342	1,421	1,461	1,480	1,520	1,559

Πίνακας 31: Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ (λ)



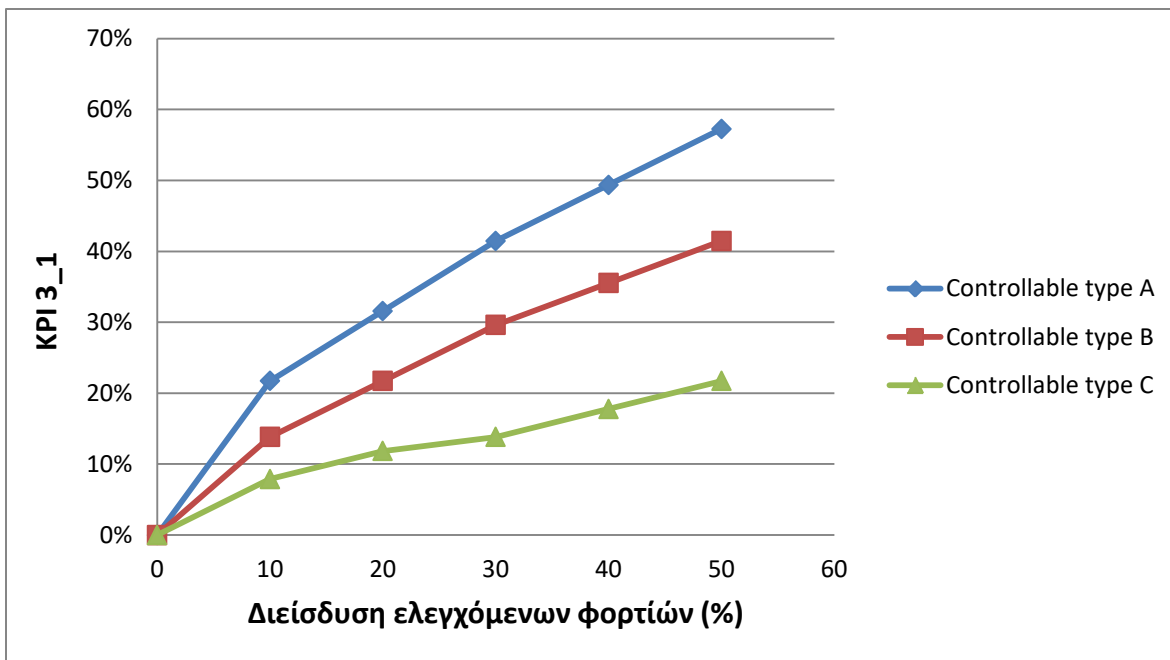
Εικόνα 78: Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ

1) Smart grid χωρίς ελεγχόμενα φορτία

$$KPI3\_1 = (\lambda_{SG} - \lambda_{SG\text{without controllable loads}}) \cdot 100\% \quad (8.3)$$

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	0,00%	21,71%	31,58%	41,45%	49,34%	57,24%
Controllable type B	0,00%	13,81%	21,71%	29,60%	35,53%	41,45%
Controllable type C	0,00%	7,89%	11,84%	13,81%	17,76%	21,71%

**Πίνακας 32: KPI 3 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία**



**Εικόνα 79: KPI 3 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία**

Λόγω της άμεσης συσχέτισης του KPI 3 με τον δείκτη KPI 2, παρατηρούνται παρόμοια χαρακτηριστικά με το προηγούμενο διάγραμμα. Η ύπαρξη 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A αυξάνει το μερίδιο ενέργειας από ΑΠΕ κατά 22%, ενώ η μέγιστη δυνατή διείσδυση που μελετήθηκε (50%), επιφέρει αύξηση της τάξης του 57%. Για τα φορτία τύπου Β η αύξηση ήταν 14% έως 41% ενώ για τα τύπου C άγγιξε το 8% με 22% αντίστοιχα.

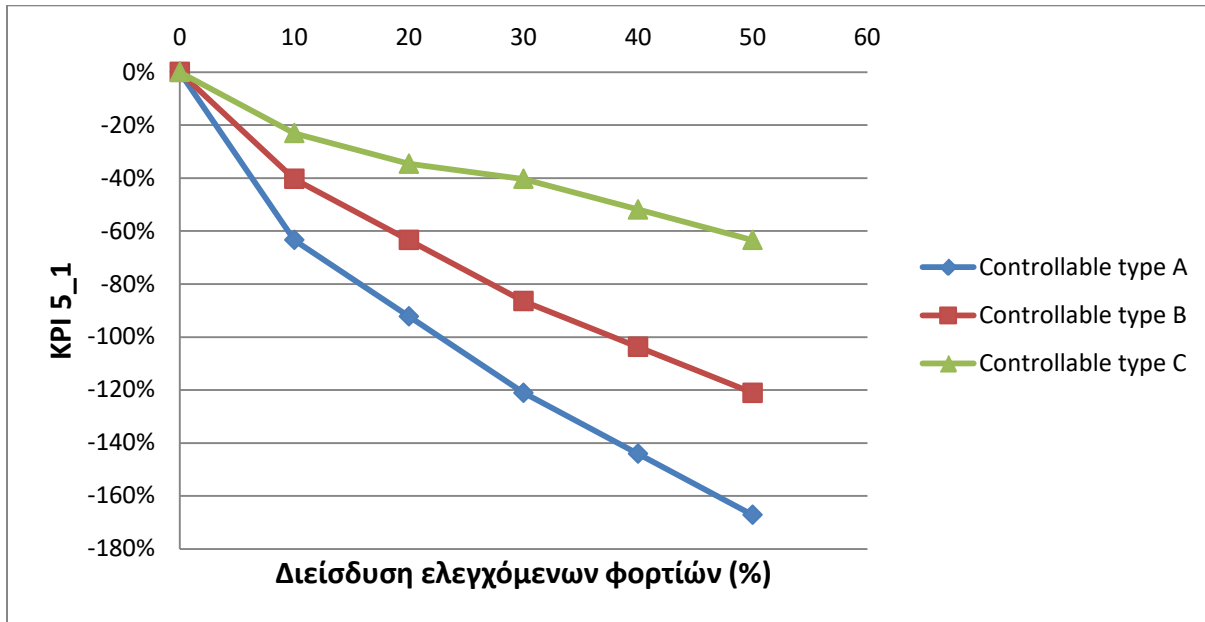


Η μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> (KPI 5) ορίζεται ως εξής:

$$KPI5\_1 = \frac{1}{1 - \lambda_{SG\text{without\_controllable\_load}}} \cdot \Delta\lambda_{SG\text{without\_controllable\_load}} \quad (8.4)$$

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	0,00%	-63,42%	-92,25%	-121,08%	-144,14%	-167,21%
Controllable type B	0,00%	-40,35%	-63,42%	-86,48%	-103,78%	-121,08%
Controllable type C	0,00%	-23,05%	-34,58%	-40,35%	-51,88%	-63,42%

**Πίνακας 33: KPI 5 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία**



**Εικόνα 80: KPI 5 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία**

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 63%, ενώ η μέγιστη δυνατή διείσδυση που

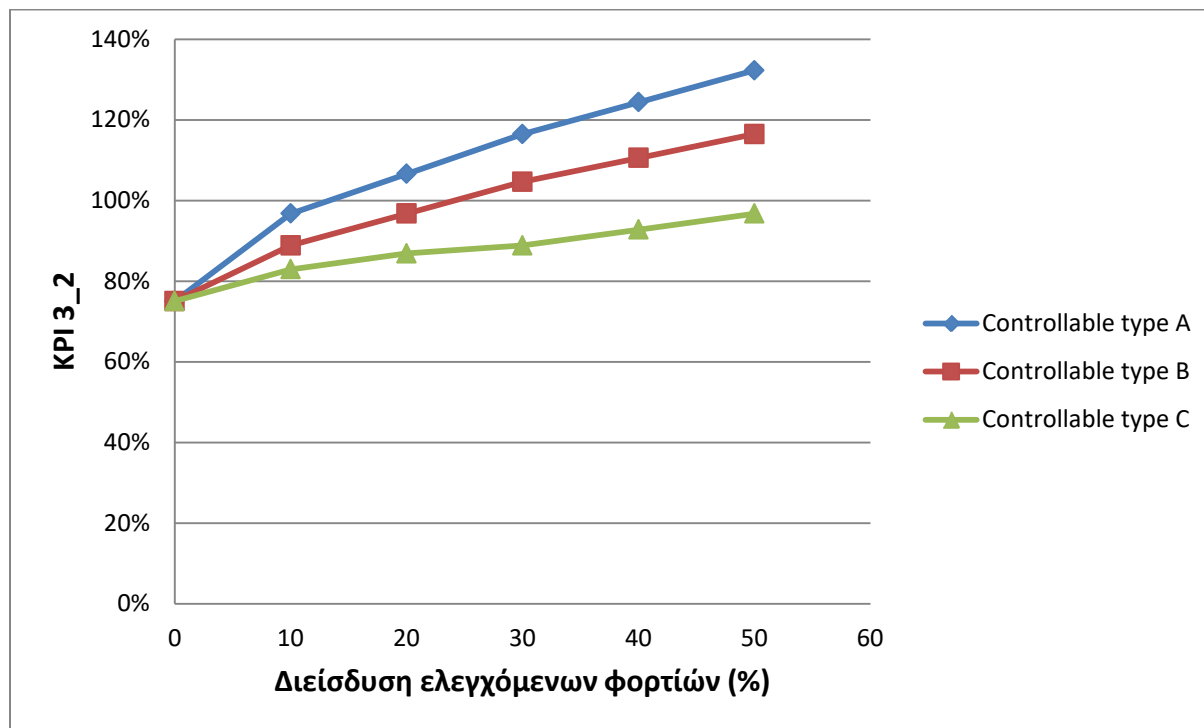
μελετήθηκε (50%), επιφέρει μείωση της τάξης του 167%. Για τα φορτία τύπου Β η μείωση ήταν 40% έως 121% ενώ για τα τύπου C άγγιξε το 23% με 63% αντίστοιχα.

## 2) Παθητικό δίκτυο – BL

$$KPI3\_2 = (\lambda_{SG} - \lambda_{BL}) \cdot 100\% \quad (8.5)$$

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	75,01%	96,72%	106,59%	116,46%	124,36%	132,25%
Controllable type B	75,01%	88,82%	96,72%	104,62%	110,54%	116,46%
Controllable type C	75,01%	82,90%	86,85%	88,82%	92,77%	96,72%

Πίνακας 34: KPI 3 με σενάριο αναφοράς το BL



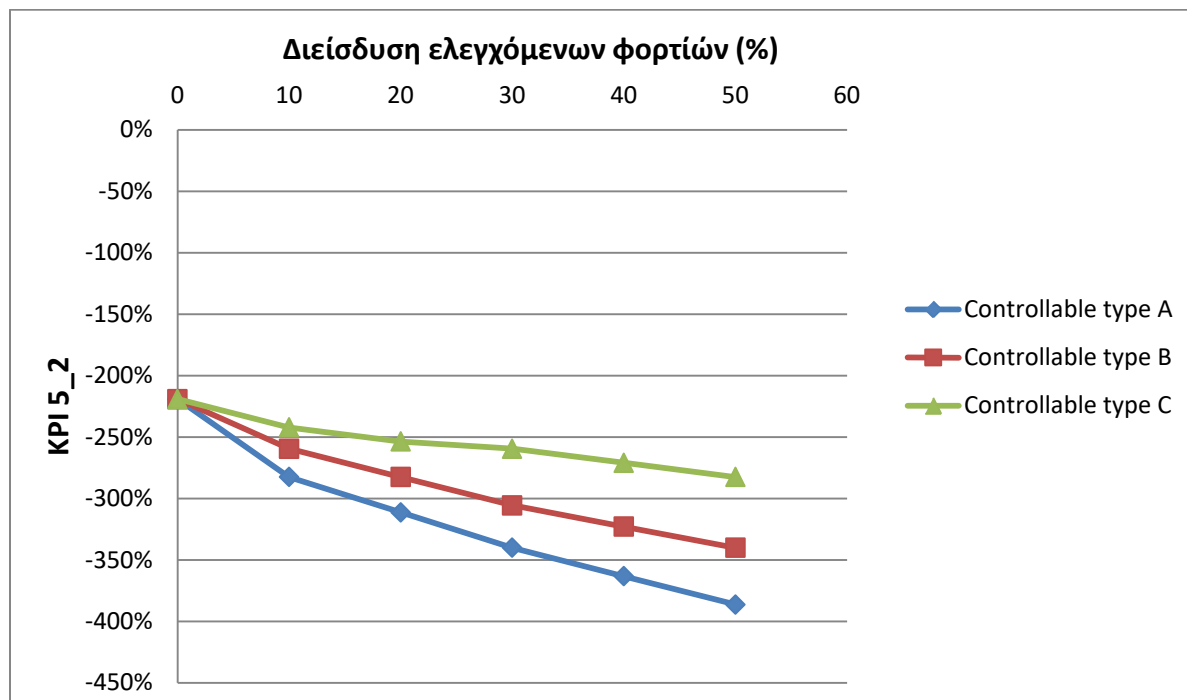
Εικόνα 81: KPI 3 με σενάριο αναφοράς το BL

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη του έξυπνου δικτύου, αυξάνει το μερίδιο ενέργειας από ΑΠΕ κατά 75%, ενώ η εισαγωγή ελεγχόμενων φορτίων επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις, όπως αυτές παρουσιάστηκαν και προηγουμένως.

$$KPI5\_2 = \frac{1}{1 - \lambda_{BL}} \cdot \Delta\lambda_{BL} \quad (8.6)$$

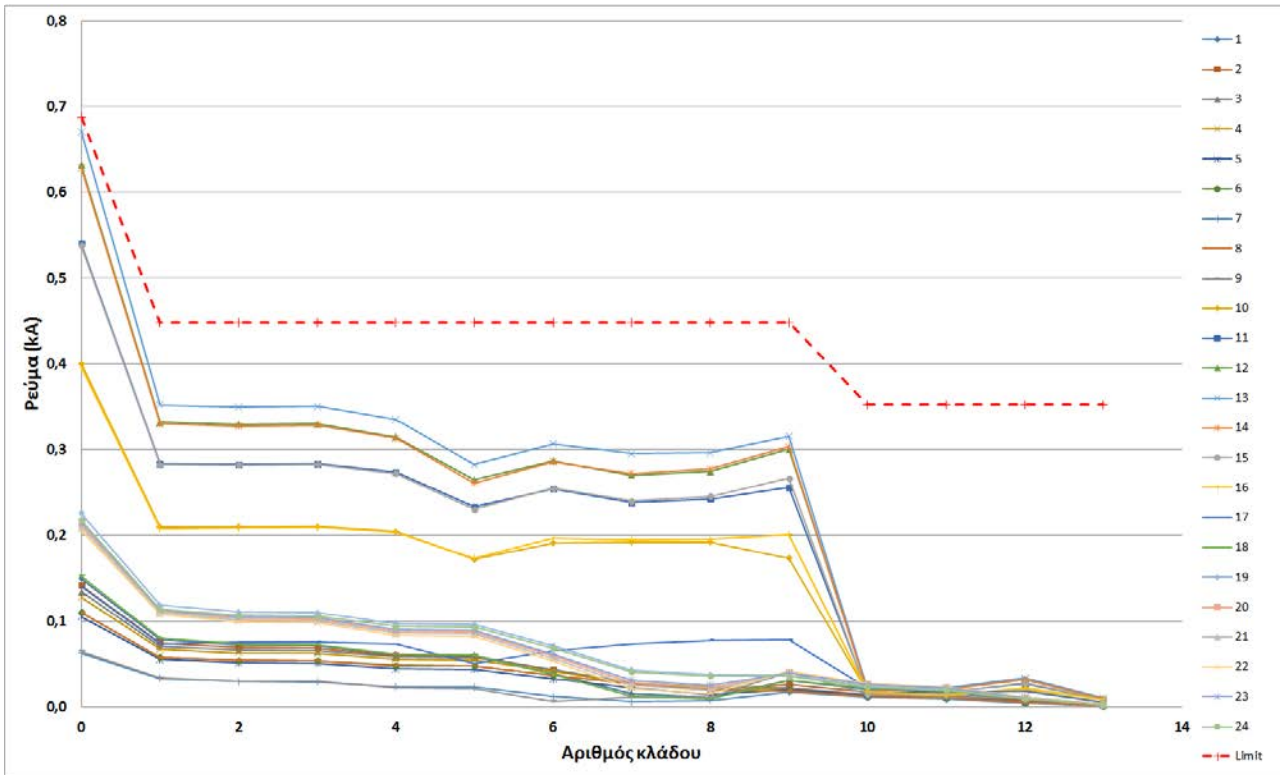
Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	-219,13%	-282,54%	-311,37%	-340,20%	-363,27%	-386,34%
Controllable type B	-219,13%	-259,48%	-282,54%	-305,61%	-322,91%	-340,20%
Controllable type C	-219,13%	-242,18%	-253,71%	-259,48%	-271,01%	-282,54%

Πίνακας 35: KPI 5 με σενάριο αναφοράς το BL

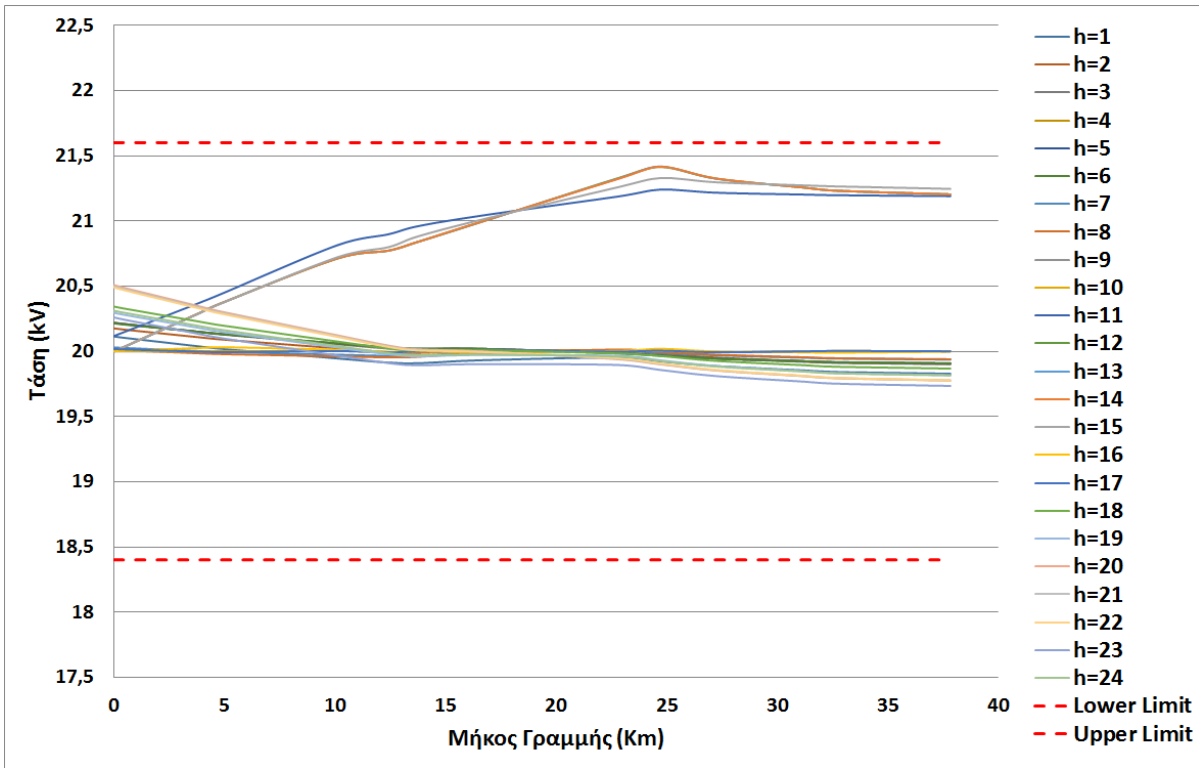


Εικόνα 82: KPI 5 με σενάριο αναφοράς το BL

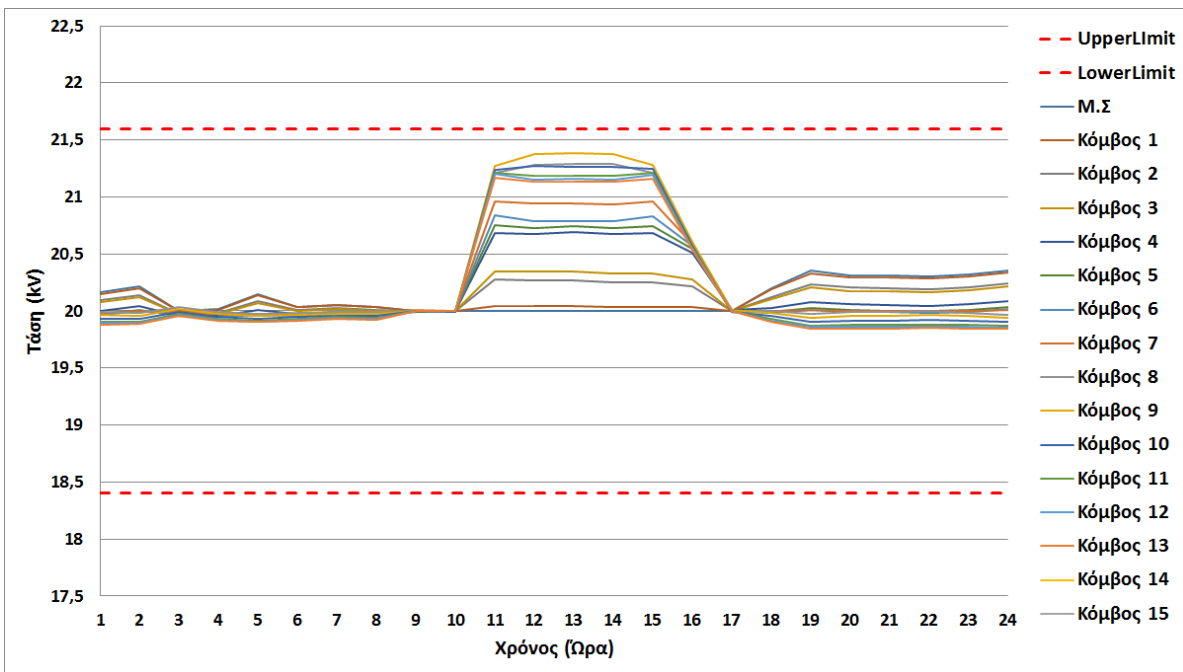
Σε κάθε περίπτωση ο περιορισμός που παραβιαζόταν ήταν το θερμικό όριο του Μ/Σ, λόγω των δύο πανομοιότυπων γραμμών που ξεκινούν από αυτόν (Εικόνα 83). Ωστόσο αρκετά κοντά στο όριο κυμαινόταν και η τάση σε μερικούς κόμβους προς το τέλος της γραμμής κατά τις μεσημεριανές ώρες (Εικόνα 84 και Εικόνα 85).



Εικόνα 83: Προφίλ των ρευμάτων για κάθε ώρα ανά κλάδο

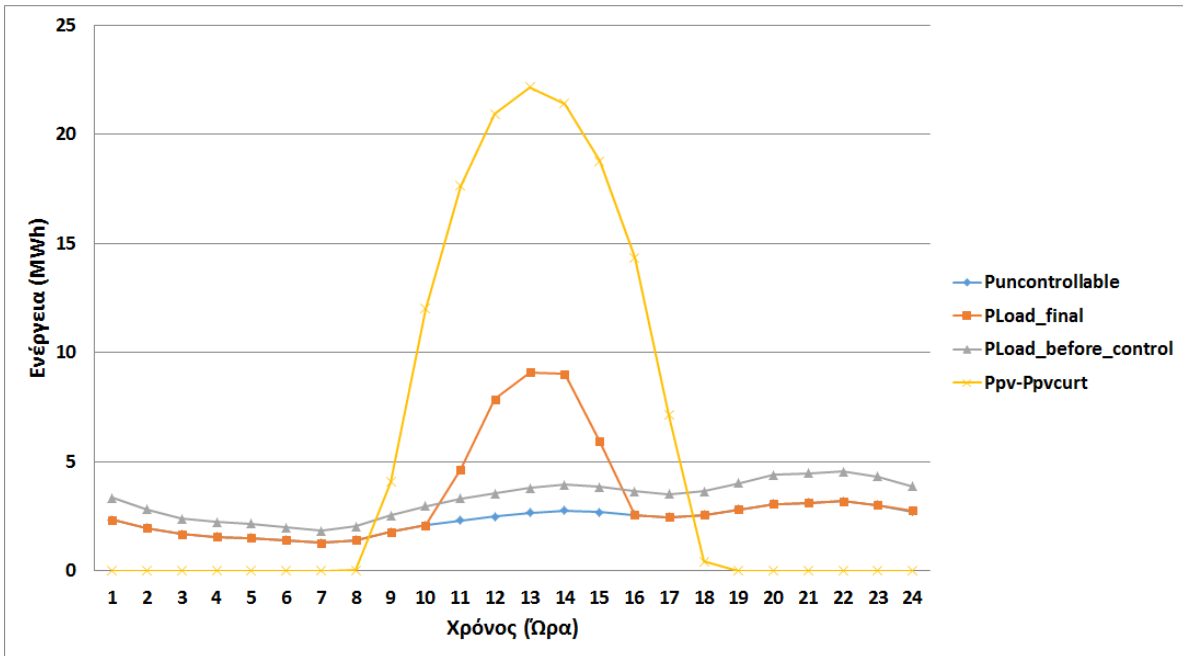


Εικόνα 84: Ωριαίο προφίλ της τάσης κατά μήκος της γραμμής ΜΤ

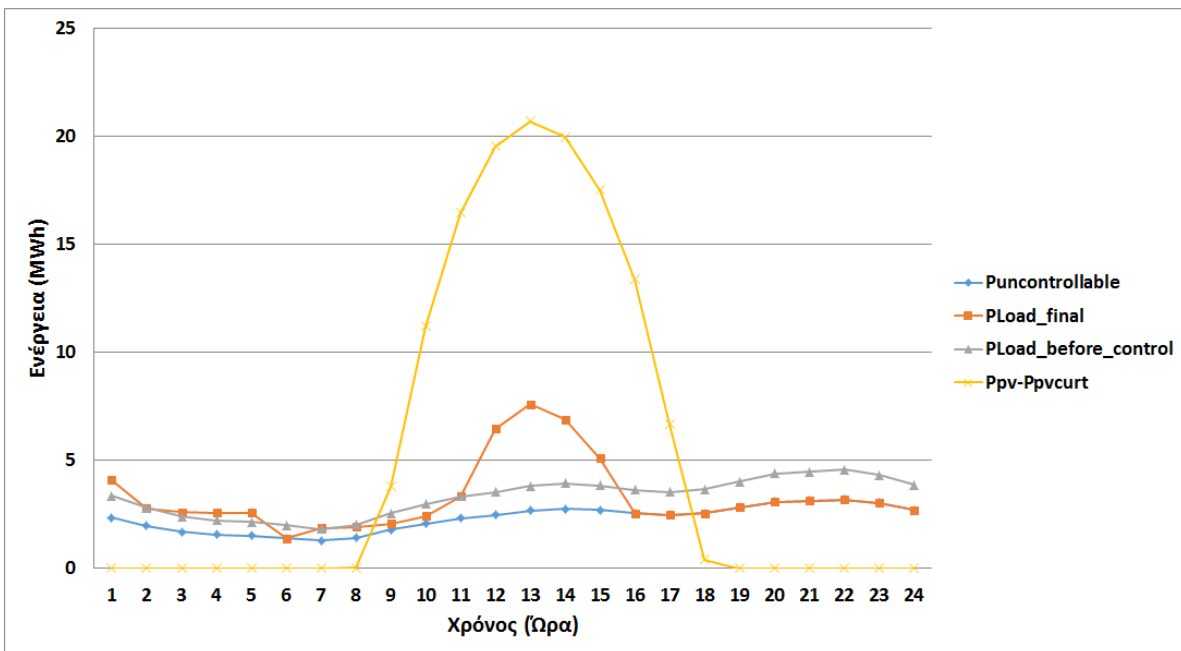


Εικόνα 85: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα

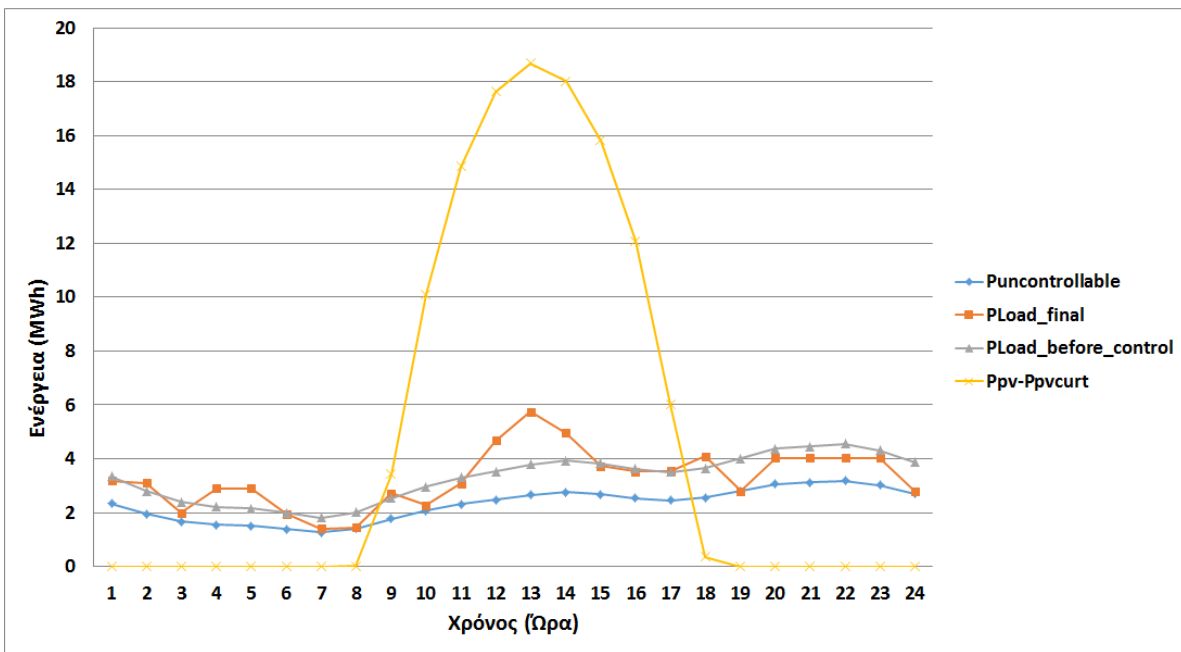
Στις Εικόνες 86, 87 και 88 παρουσιάζεται η νέα καμπύλη ζήτησης, όπως αυτή διαμορφώνεται μετά την ανακατανομή των φορτίων, για 30% ποσοστό διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων κάθε τύπου. Παρατηρείται ότι τα φορτία μεταφέρονται όσο είναι δυνατόν στις ώρες όπου υπάρχει μεγάλη φωτοβολταϊκή παραγωγή.



Εικόνα 86: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A



Εικόνα 87: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β



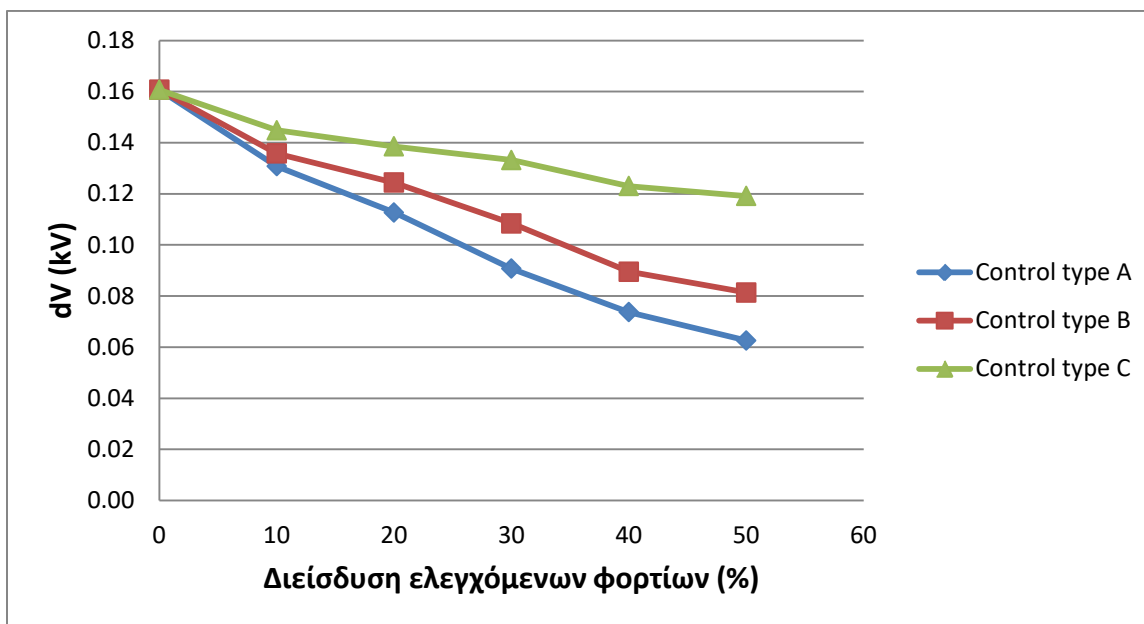
Εικόνα 88: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C

## 8.2 Ρύθμιση της τάσης

Με ΑΣ την ελαχιστοποίηση της απόκλισης της τάσης (και με αύξηση του χρόνου εκτέλεσης της βελτιστοποίησης ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια), υπολογίστηκε η RMS τιμή της απόκλισης της τάσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 36 και στην Εικόνα 89. Τέλος υπολογίστηκε το ΚΡΙ 4 (Ρύθμιση της τάσης) για τα δύο σενάρια αναφοράς.

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Control type A	0,161	0,131	0,113	0,091	0,074	0,063
Control type B	0,161	0,136	0,124	0,108	0,090	0,081
Control type C	0,161	0,145	0,139	0,133	0,123	0,119

Πίνακας 36: RMS τιμή της απόκλισης της τάσης ανάλογα με τη διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων



Εικόνα 89: Επίδραση της διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων στην τάση



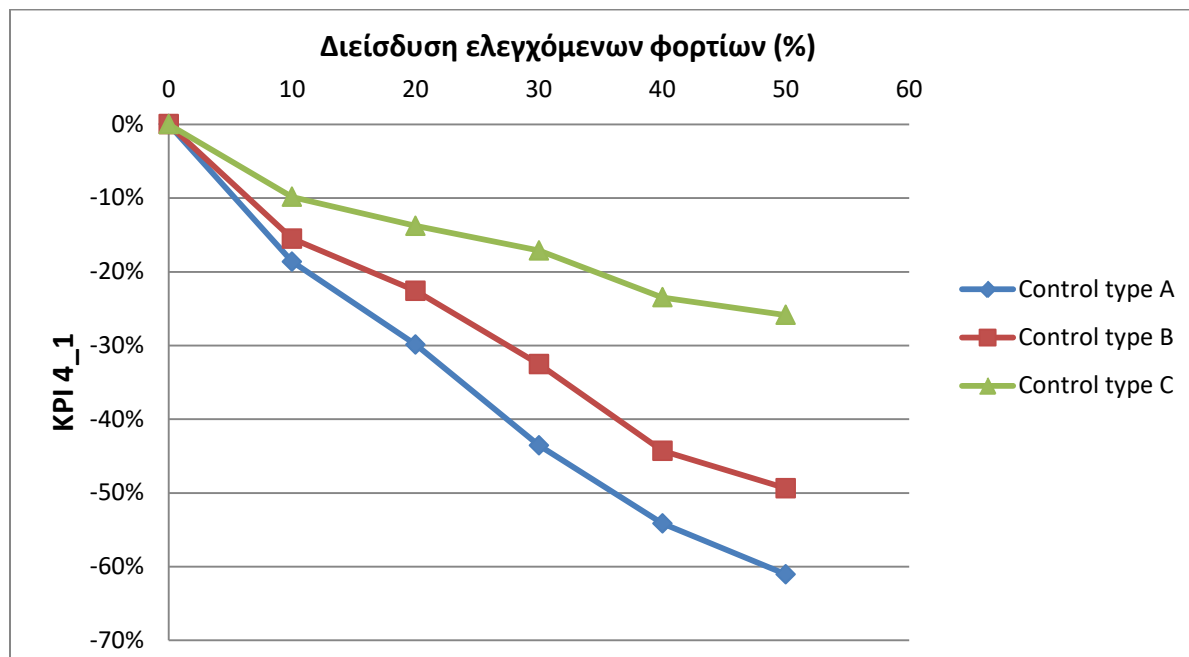
Ομοίως με προηγουμένως, έγινε υπολογισμός του KPI 4 χρησιμοποιώντας 2 σενάρια αναφοράς:

1) Smart grid χωρίς ελεγχόμενα φορτία

$$KPI4_1 = \frac{dV_{SG} - dV_{SG\text{without}\text{controllable}\text{load}}}{dV_{SG\text{without}\text{controllable}\text{load}}} \cdot 100\% \quad (8.7)$$

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Control type A	0,0%	-18,6%	-29,9%	-43,6%	-54,2%	-61,1%
Control type B	0,0%	-15,5%	-22,6%	-32,5%	-44,3%	-49,4%
Control type C	0,0%	-9,8%	-13,8%	-17,1%	-23,5%	-25,9%

Πίνακας 37: KPI 4 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία



Εικόνα 90: KPI 4 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία

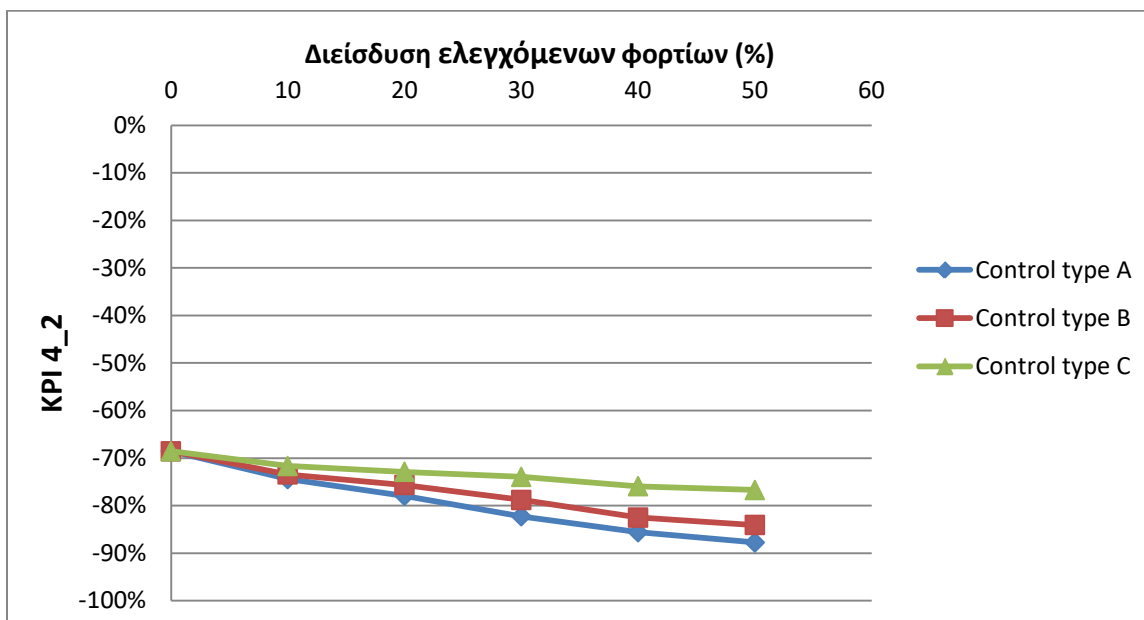
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A βελτιώνει την τάση κατά 19%, ενώ η μέγιστη δυνατή διεύθυνση που μελετήθηκε (50%), επιφέρει βελτίωση της τάξης του 61%. Για τα φορτία τύπου B η βελτίωση ήταν 15% έως 49% ενώ για τα τύπου C άγγιξε το 10% με 26% αντίστοιχα.

## 2) Παθητικό δίκτυο - BL

$$KPI4_2 = \frac{dV_{SG} - dV_{BL}}{dV_{BL}} \cdot 100\% \quad (8.8)$$

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διεύθυνση ελεγχόμενων φορτίων (%)					
	0	10	20	30	40	50
Control type A	-68,6%	-74,4%	-78,0%	-82,3%	-85,6%	-87,8%
Control type B	-68,6%	-73,4%	-75,7%	-78,8%	-82,5%	-84,1%
Control type C	-68,6%	-71,7%	-72,9%	-73,9%	-75,9%	-76,7%

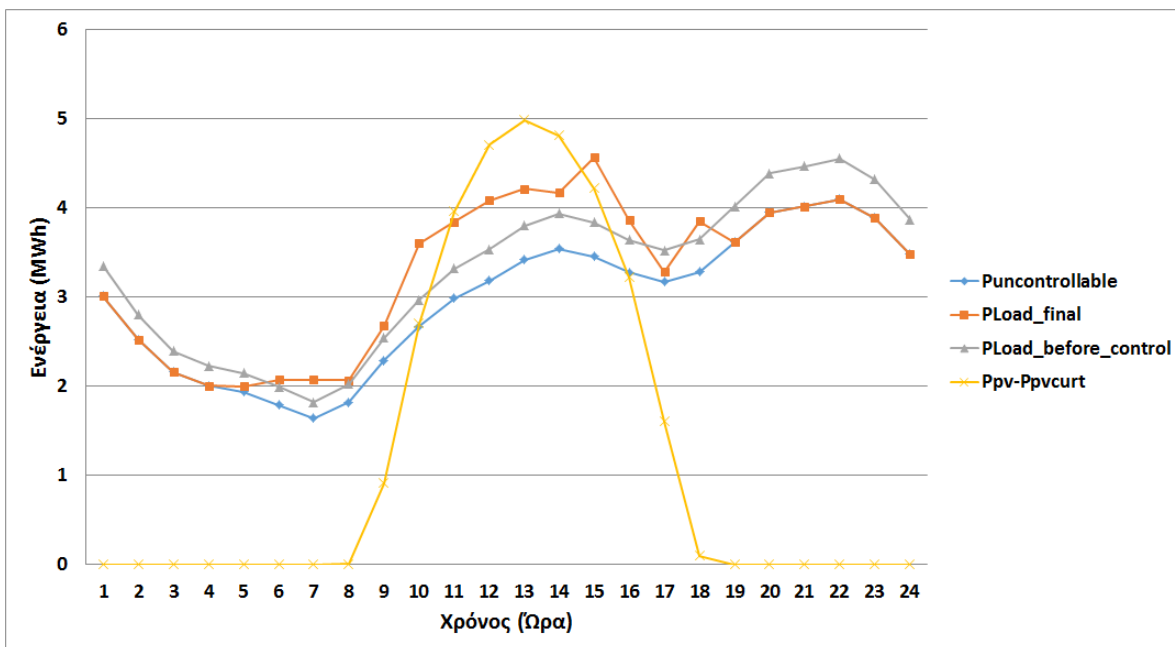
Πίνακας 38: KPI 4 με σενάριο αναφοράς το BL



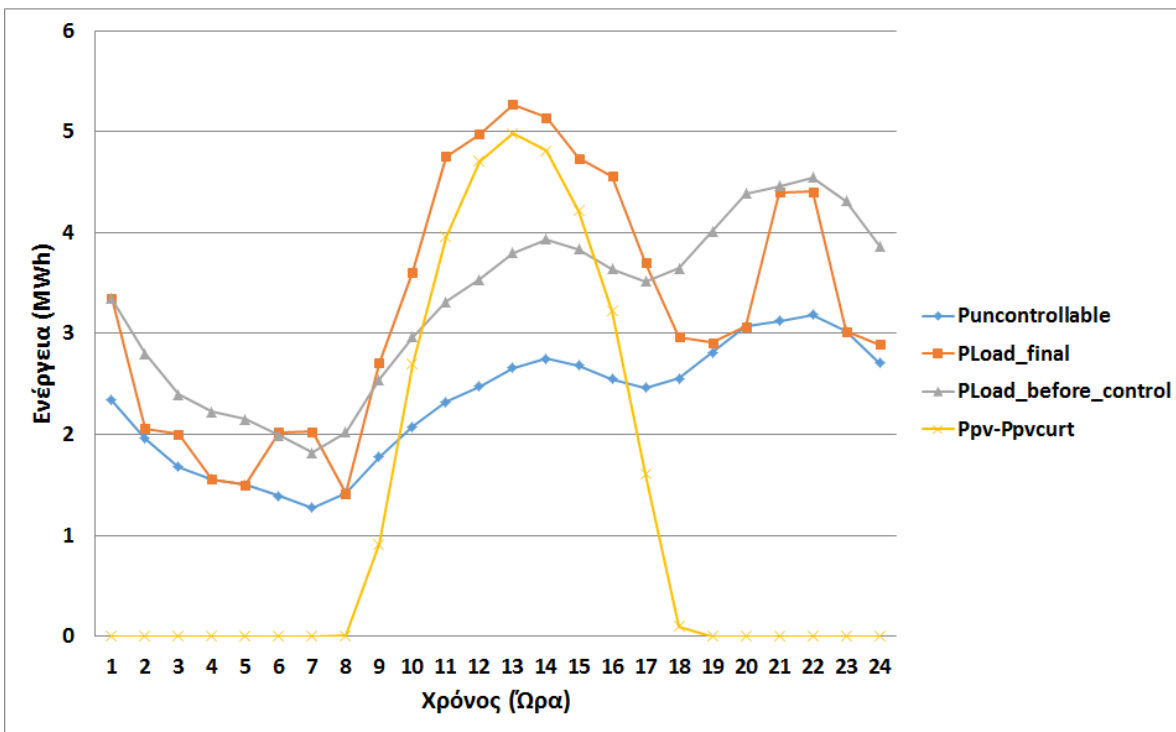
Εικόνα 91: KPI 4 με σενάριο αναφοράς το BL

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη του έξυπνου δικτύου, βελτιώνει την τάση κατά 69%, ενώ η εισαγωγή ελεγχόμενων φορτίων επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις, όπως αυτές παρουσιάστηκαν και προηγουμένως.

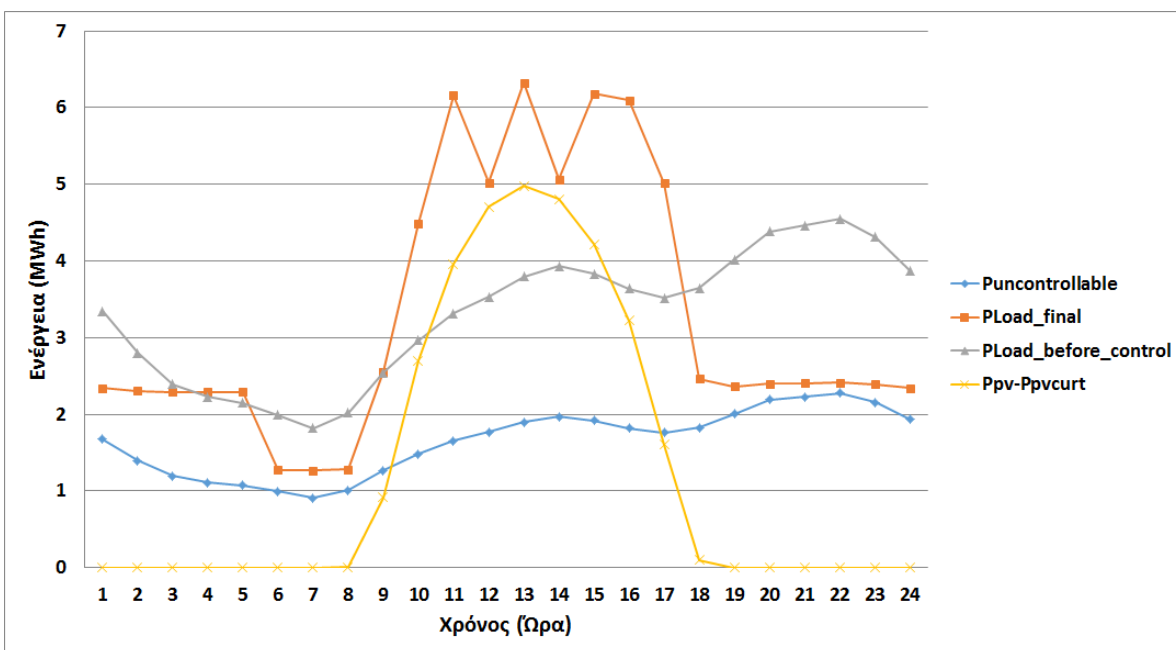
Στις Εικόνες 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99 και 100 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αναδιανέμονται τα ελεγχόμενα φορτία:



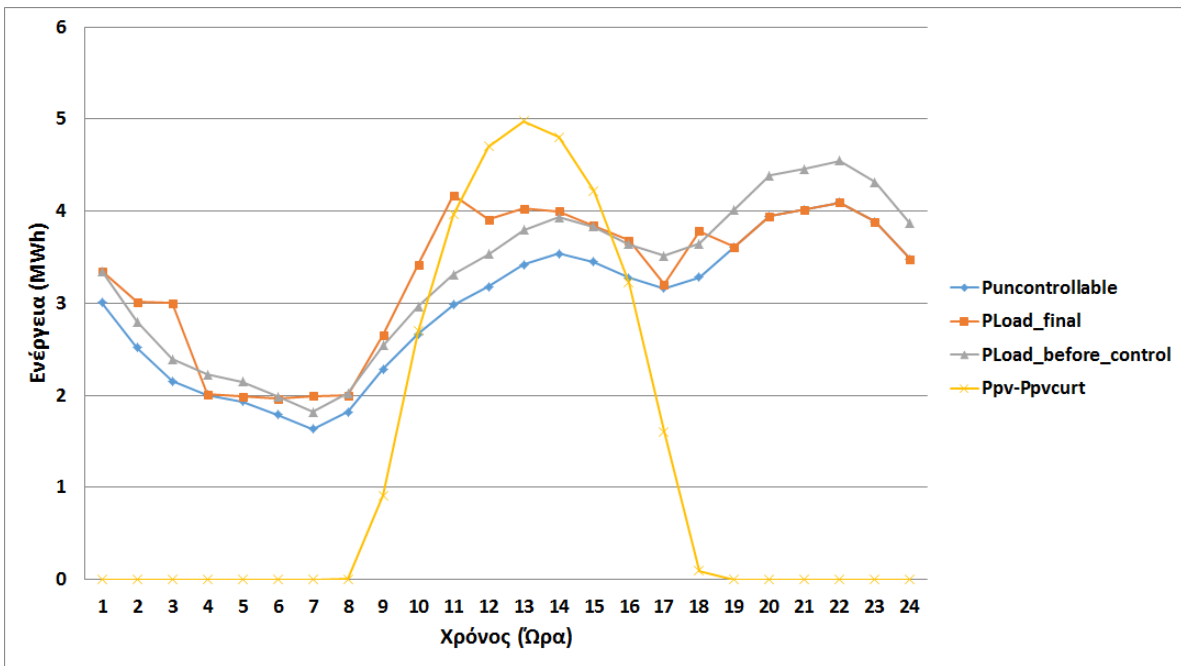
**Εικόνα 92: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης**



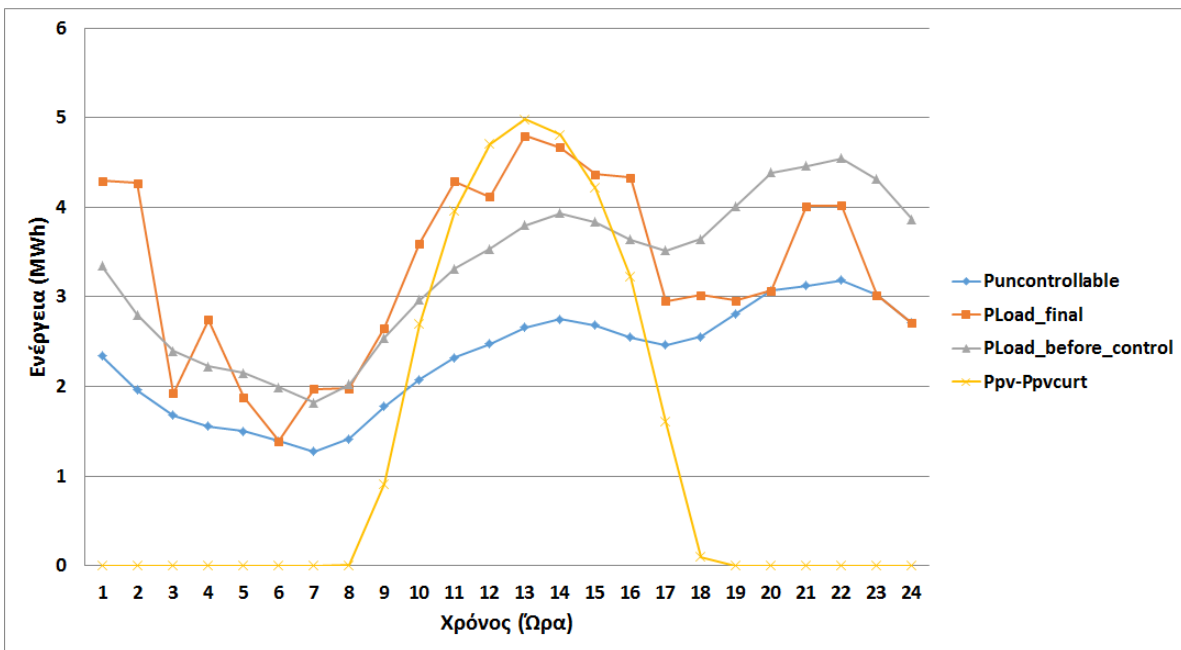
Εικόνα 93: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



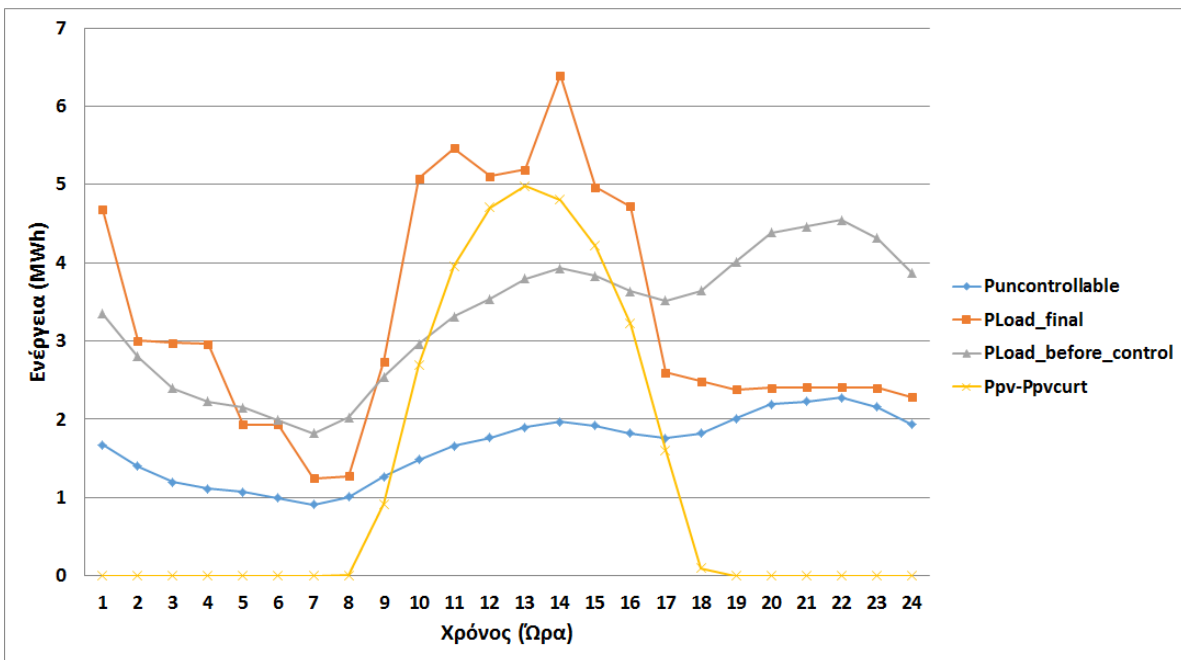
Εικόνα 94: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 50% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



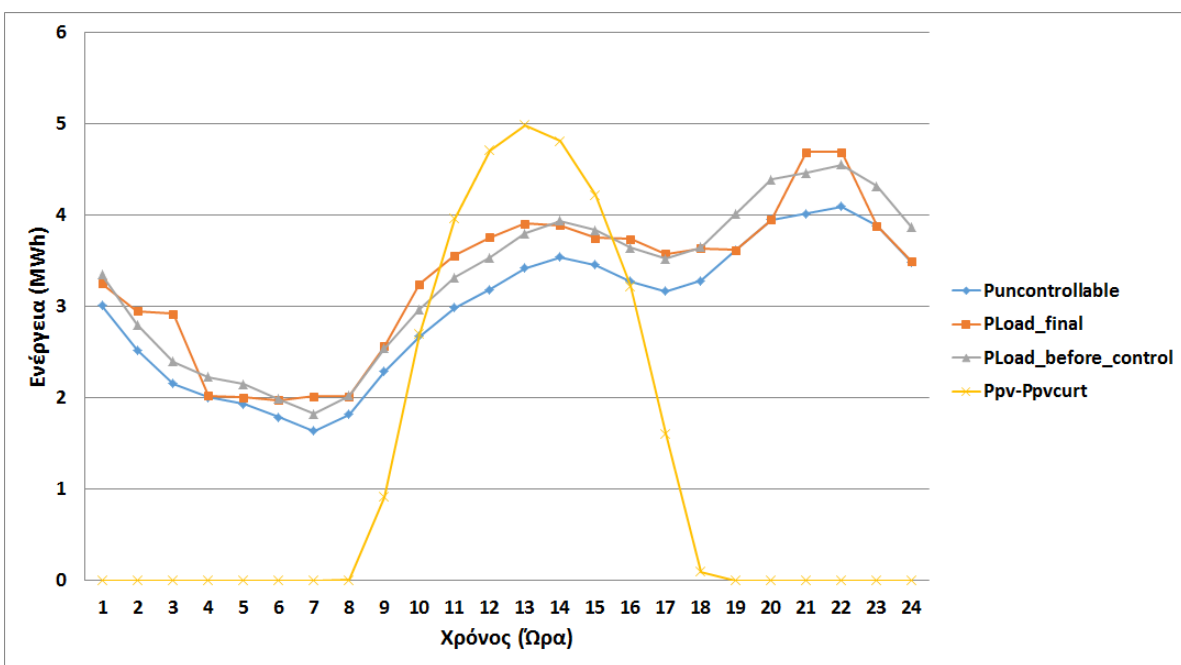
Εικόνα 95: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



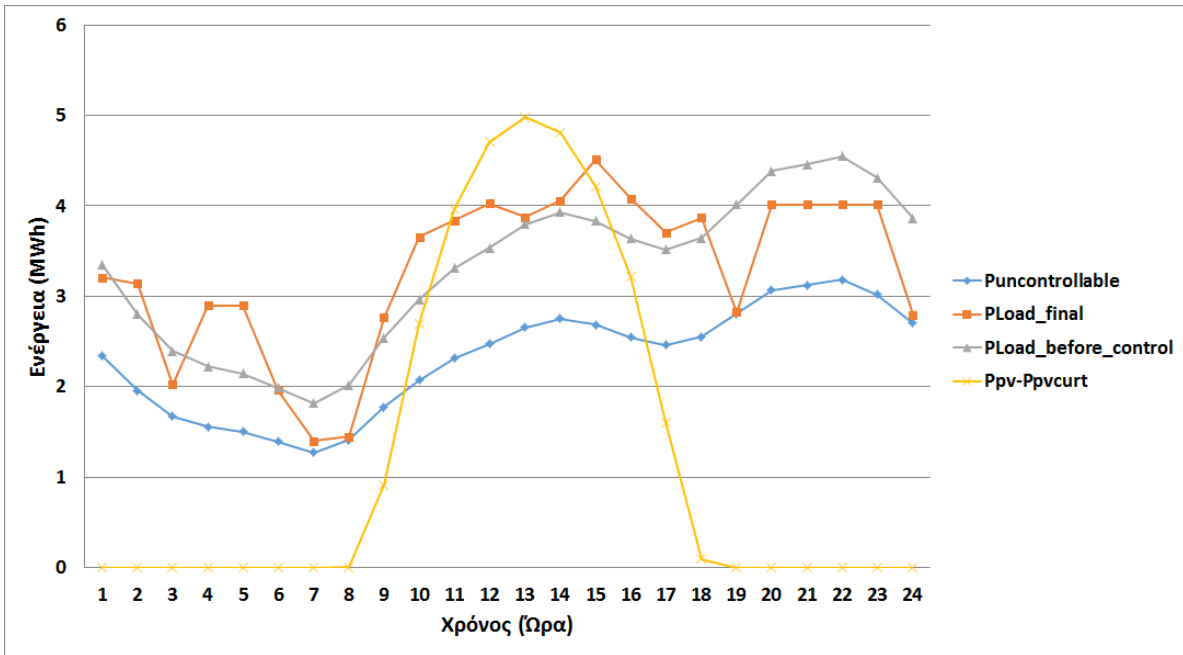
Εικόνα 96: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



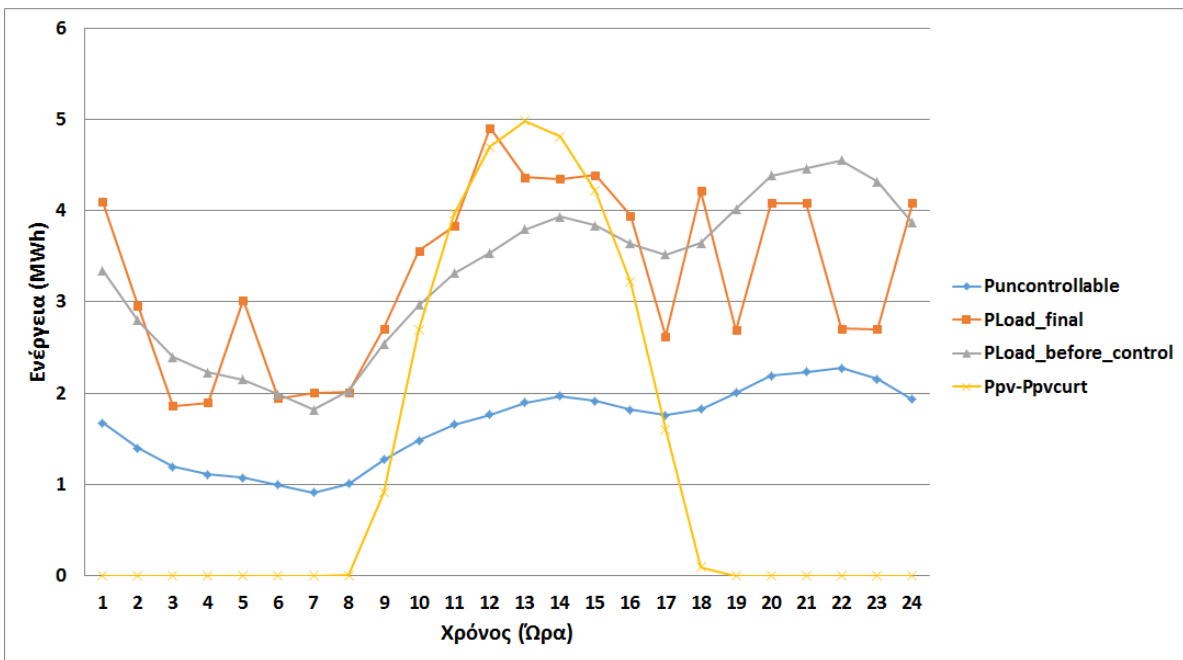
Εικόνα 97: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 50% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



Εικόνα 98: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης

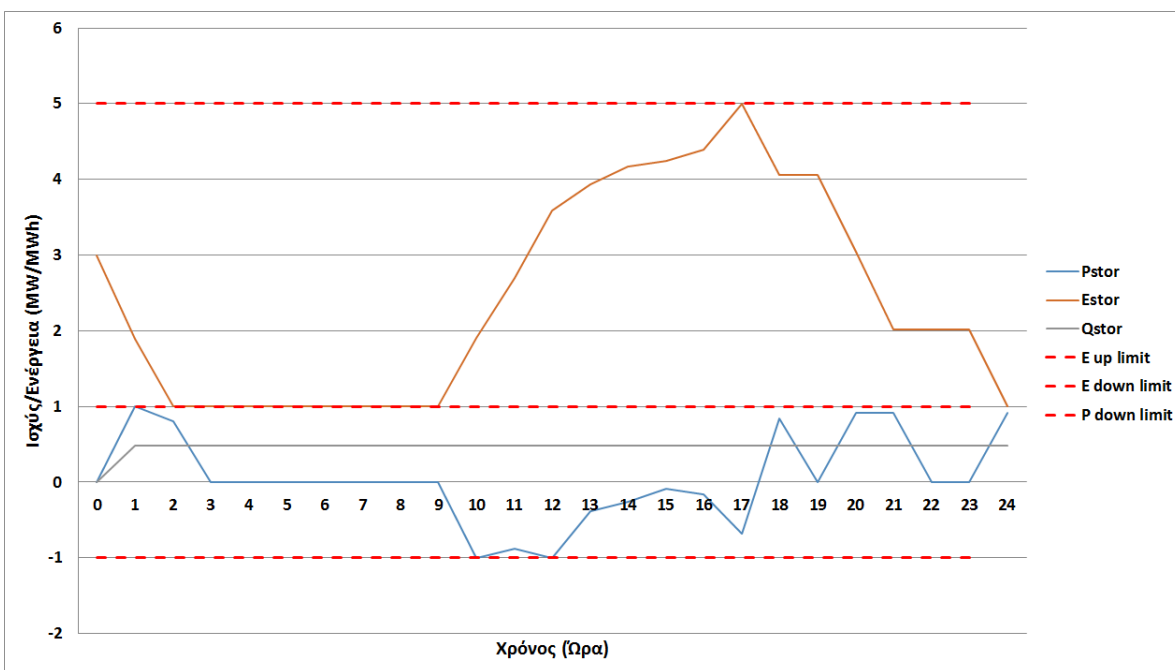


Εικόνα 99: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



Εικόνα 100: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 50% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι τα ελεγχόμενα φορτία συγκεντρώνονται όσο είναι δυνατόν κατά τις μεσημεριανές ώρες όπου υπάρχει φωτοβολταϊκή παραγωγή. Ωστόσο, συχνά παρατηρείται η συγκέντρωση των φορτίων και σε συγκεκριμένες ώρες είτε το πρωί είτε το βράδυ. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στη λειτουργία της μπαταρίας, η οποία εκχέει την αποθηκευμένη της ενέργεια στο δίκτυο αυτές τις ώρες. Παρατίθεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 101 το διάγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας στη περίπτωση της 50% διείσδυσης ελεγχόμενων φορτίων τύπου C.

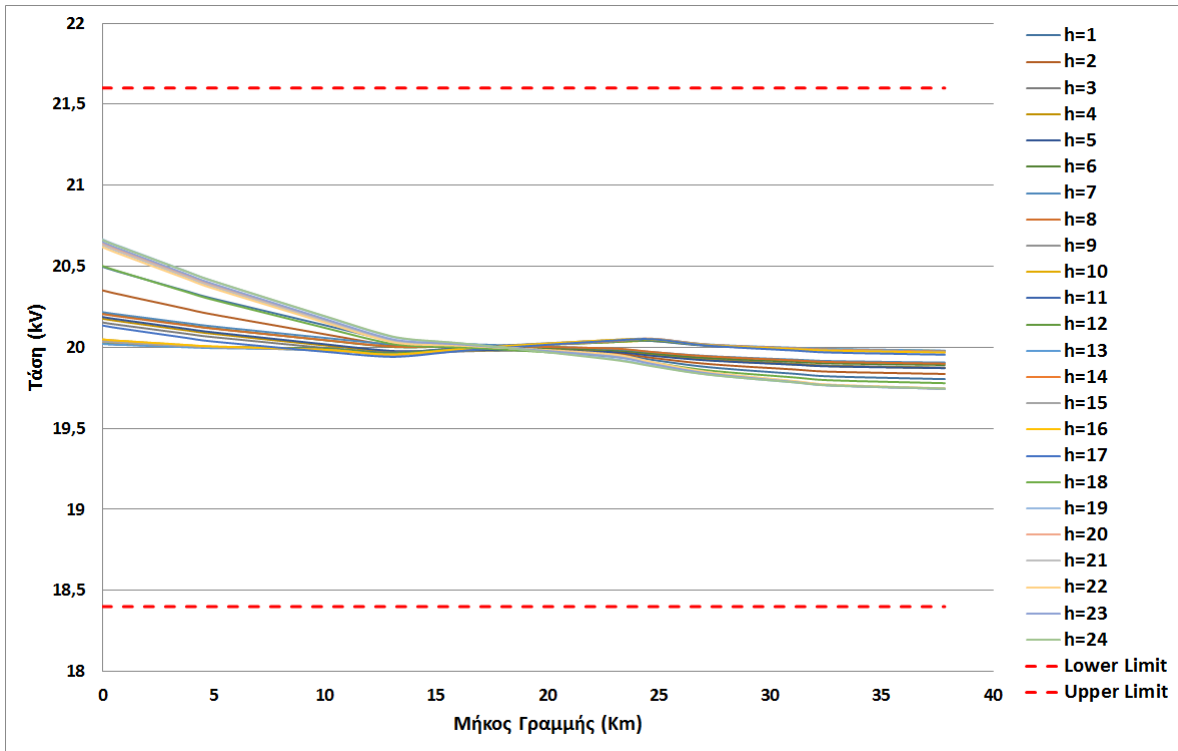


**Εικόνα 101: Λειτουργία της μπαταρίας για διείσδυση 50% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης**

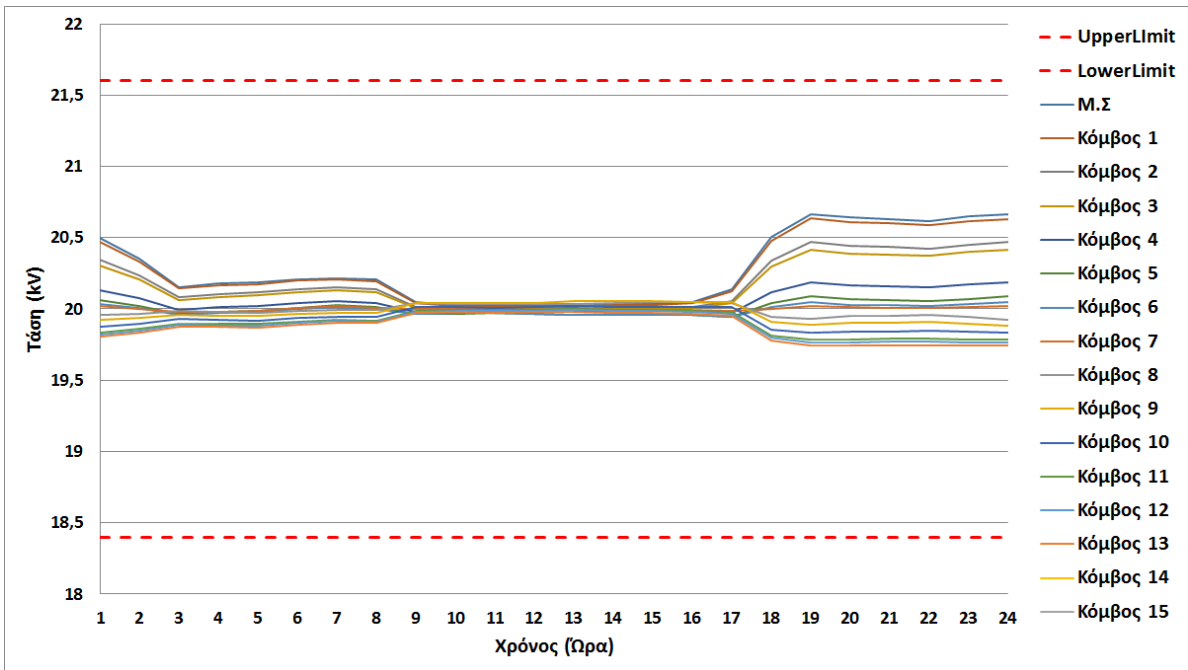
Συνδυάζοντας τις Εικόνες 100 και 101, παρατηρείται ότι η μπαταρία αποφορτίζεται κατά τις ώρες 1 και 2 όπου έχουν συγκεντρωθεί τα φορτία, ενώ το ίδιο συμβαίνει και κατά τις ώρες 20 και 21. Αντίθετα τις ώρες 22 και 23, η μπαταρία δεν εκχέει ενέργεια στο δίκτυο, ενώ το φορτίο διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

Στις Εικόνες 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108 και 109 παρουσιάζεται η τάση του δικτύου πριν την προσθήκη ελεγχόμενων φορτίων και για ποσοστό διείσδυσης 30% για κάθε τύπο φορτίου.

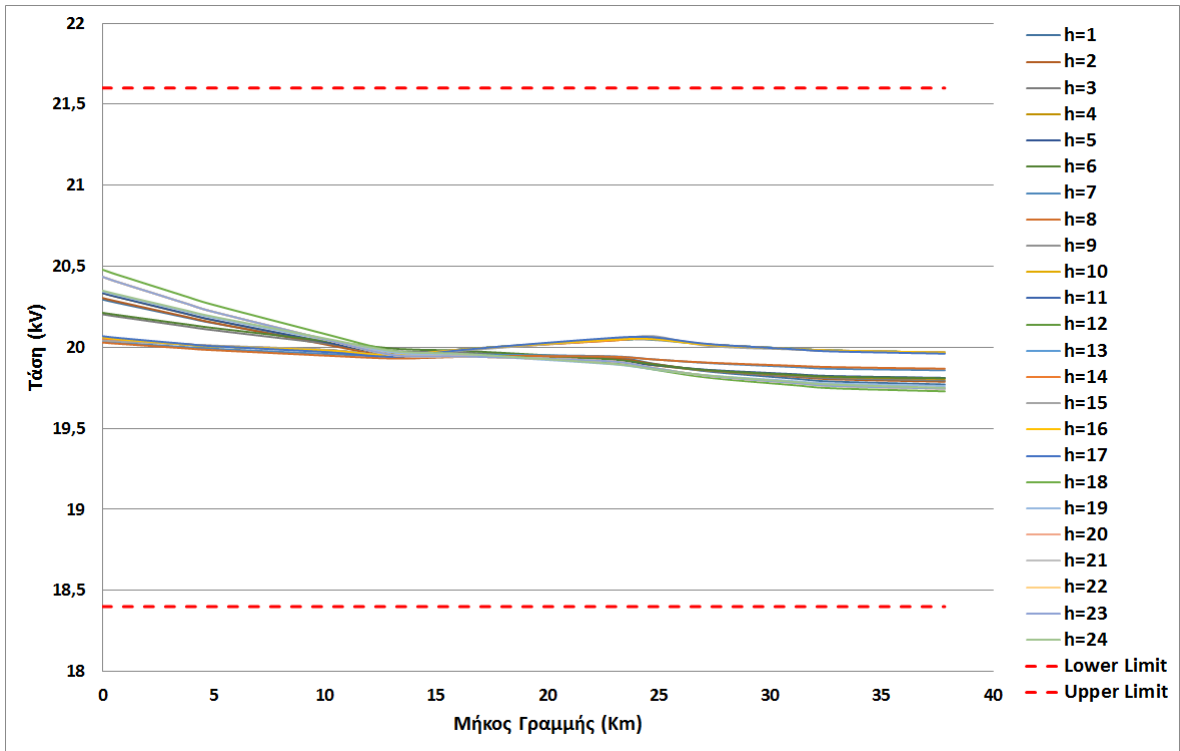




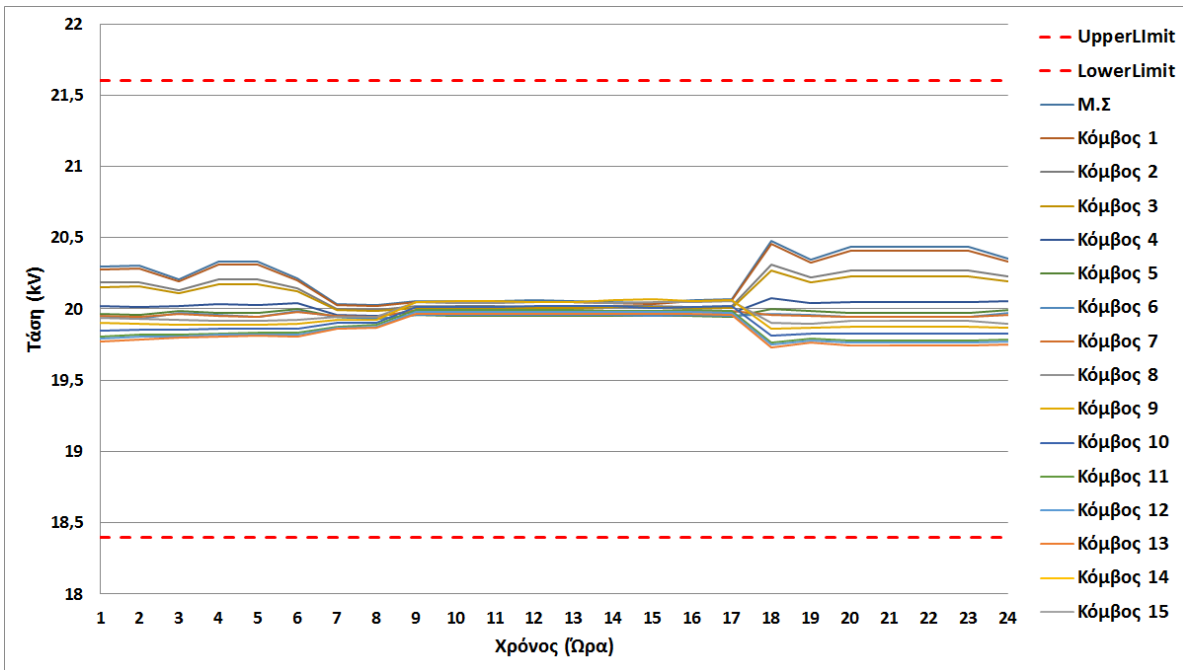
Εικόνα 102: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT χωρίς ελεγχόμενα φορτία με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



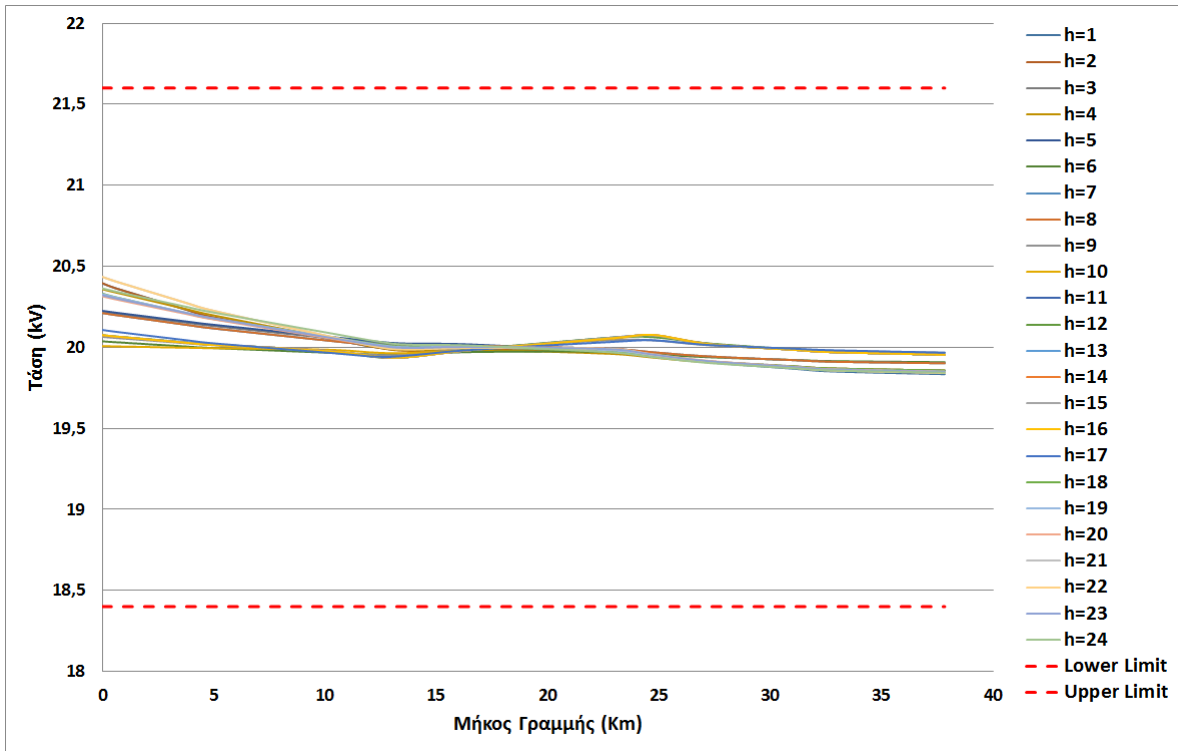
Εικόνα 103: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα χωρίς ελεγχόμενα φορτία με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



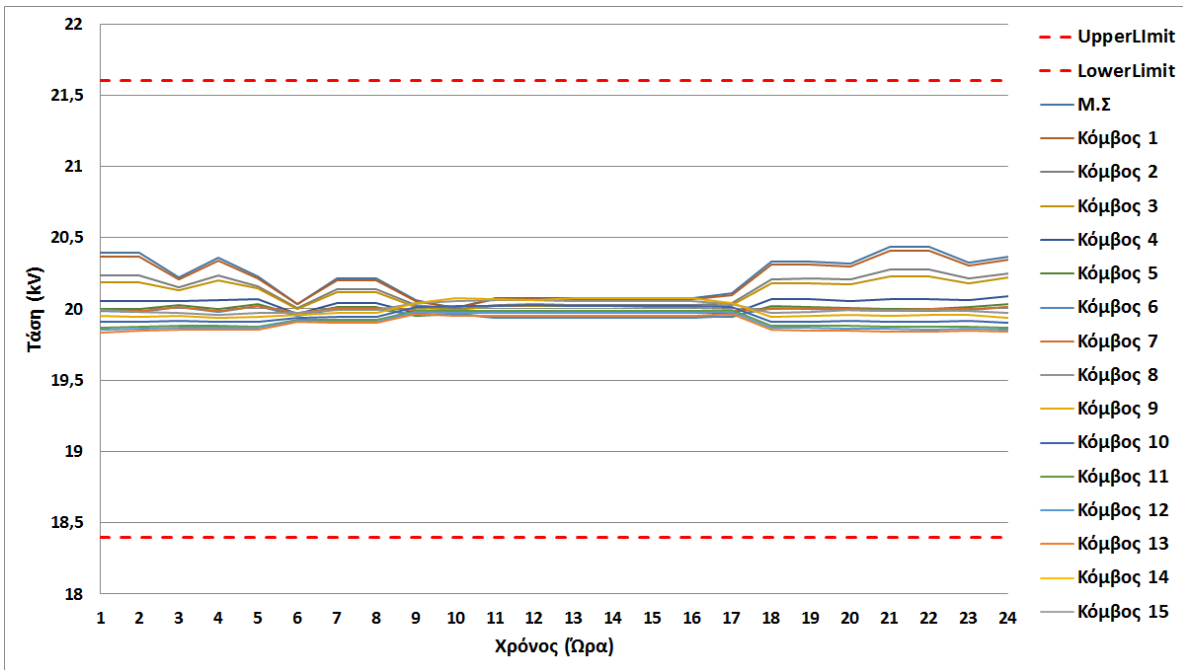
Εικόνα 104: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



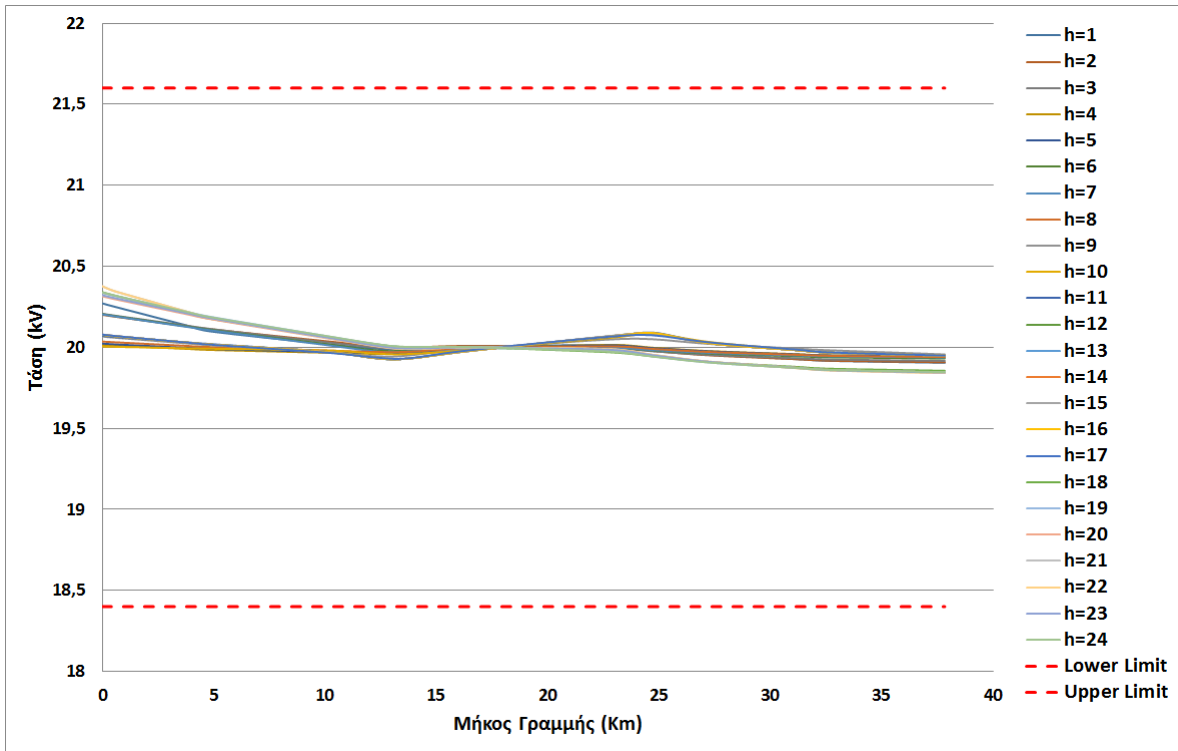
Εικόνα 105: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



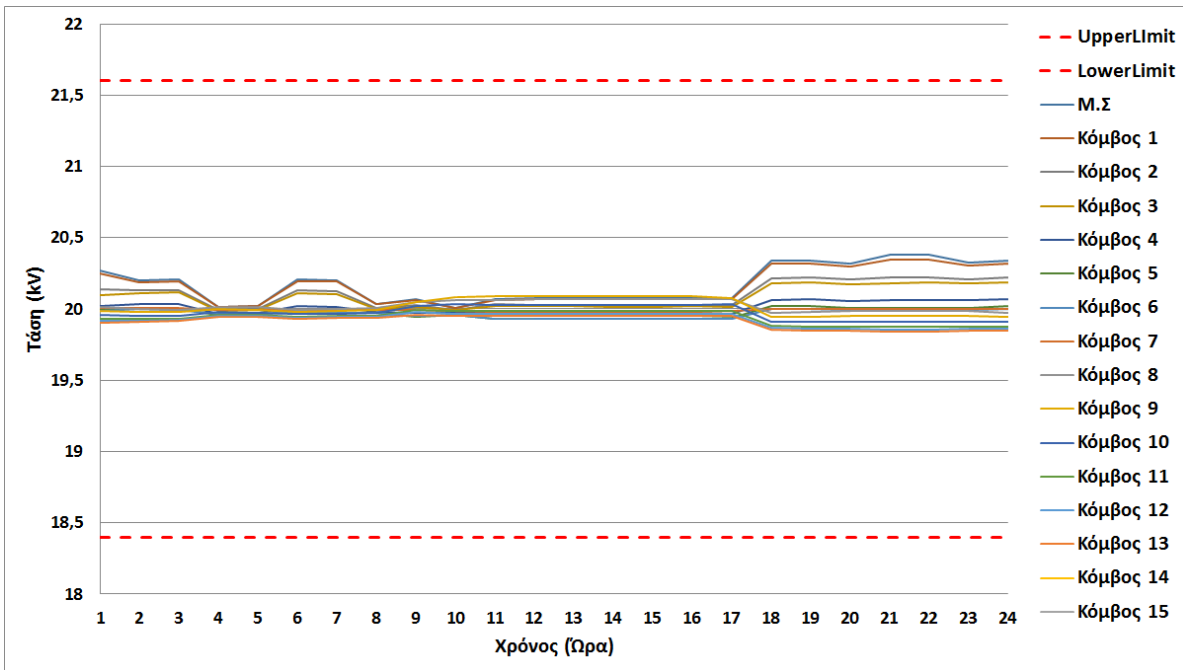
Εικόνα 106: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



Εικόνα 107: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



Εικόνα 108: Ωριαίο προφίλ τάσης κατά μήκος της γραμμής MT για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης



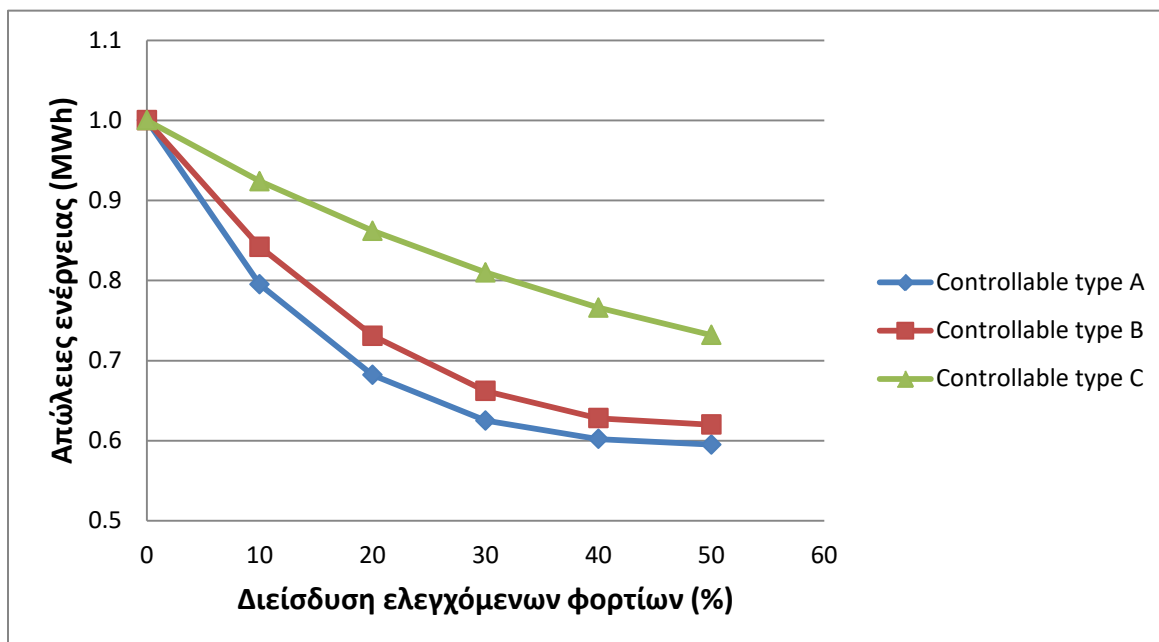
Εικόνα 109: Προφίλ της τάσης για κάθε κόμβο ανά ώρα για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ τη ρύθμιση της τάσης

### 8.3 Απώλειες ενεργούς ισχύος

Με Α.Σ την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, έγινε καταγραφή των απωλειών για κάθε περίπτωση ελεγχόμενων φορτίων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 39 και στην Εικόνα 110, ενώ έγινε και υπολογισμός του ΚΡΙ 1 (Μείωση των απωλειών) και για τα δυο σενάρια αναφοράς.

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	1,000	0,795	0,682	0,625	0,602	0,595
Controllable type B	1,000	0,842	0,731	0,662	0,628	0,620
Controllable type C	1,000	0,924	0,862	0,810	0,766	0,732

**Πίνακας 39: Επίδραση της διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων στις απώλειες ενεργού ισχύος (MWh)**



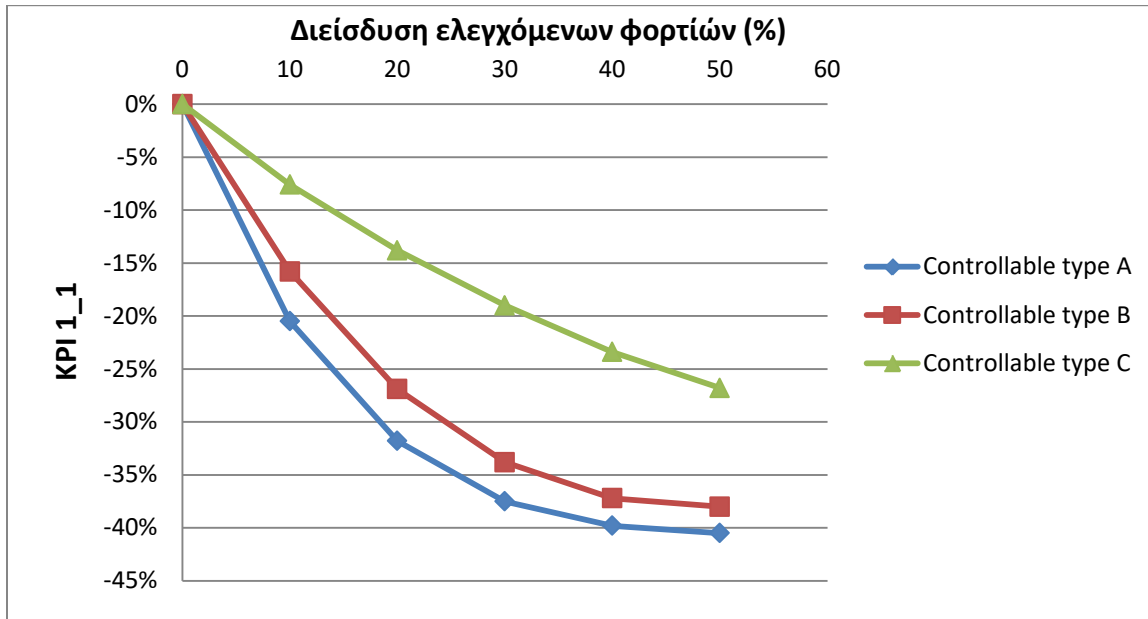
**Εικόνα 110: Επίδραση της διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων στις απώλειες ενεργού ισχύος**

1) Smart grid χωρίς ελεγχόμενα φορτία

$$KPI1_1 = \frac{Plosses_{SG} - Plosses_{SGwithout_{controllableload}}}{Plosses_{SGwithout_{controllableload}}} \cdot 100\% \quad (8.9)$$

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	0,00%	-20,50%	-31,80%	-37,50%	-39,80%	-40,50%
Controllable type B	0,00%	-15,80%	-26,90%	-33,80%	-37,20%	-38,00%
Controllable type C	0,00%	-7,60%	-13,80%	-19,00%	-23,40%	-26,80%

Πίνακας 40: KPI 1 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία



Εικόνα 111: KPI 1 με σενάριο αναφοράς το SG χωρίς ελεγχόμενα φορτία

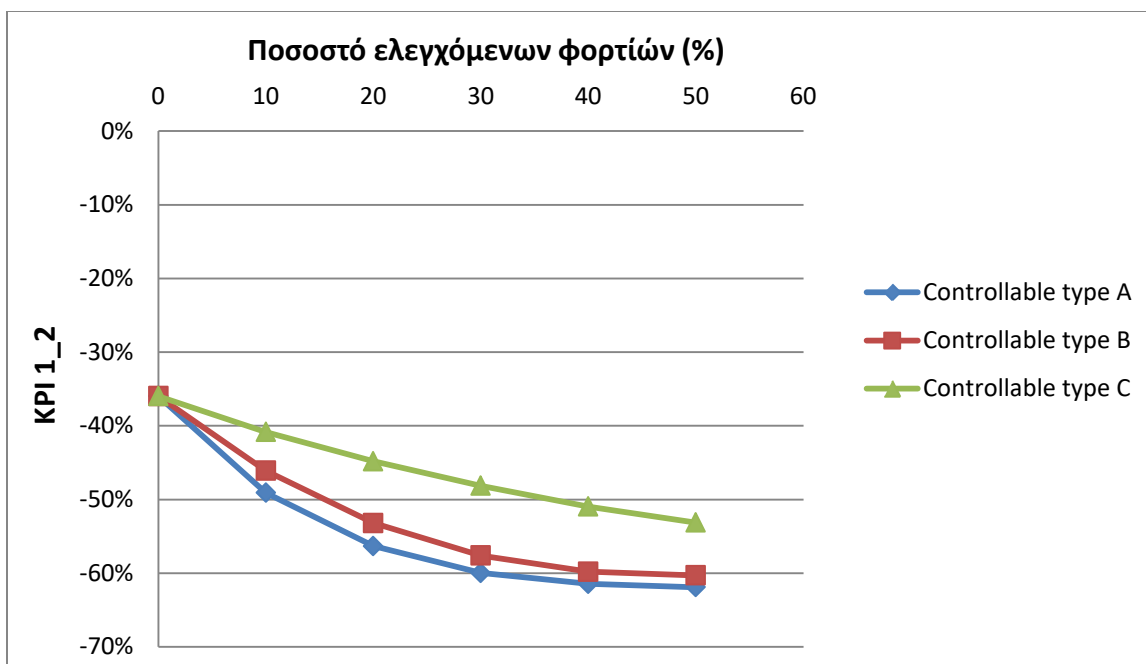
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α μειώνει τις απώλειες κατά 21%, ενώ η μέγιστη δυνατή διείσδυση που μελετήθηκε (50%), επιφέρει μείωση της τάξης του 40%. Για τα φορτία τύπου Β η βελτίωση ήταν 16% έως 38% ενώ για τα τύπου C άγγιξε το 8% με 27% αντίστοιχα. Επίσης παρατηρείται κορεσμός τόσο για τα φορτία τύπου Α, όσο και για τα τύπου Β για ποσοστά διείσδυσης μεγαλύτερα του 40%.

## 2) Παθητικό δίκτυο – BL

$$KPI1_2 = \frac{Plosses_{SG} - Plosses_{BL}}{Plosses_{BL}} \cdot 100\% \quad (8.10)$$

Είδος ελεγχόμενων φορτίων	Διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων					
	0	10	20	30	40	50
Controllable type A	-35,97%	-49,09%	-56,33%	-59,98%	-61,45%	-61,90%
Controllable type B	-35,97%	-46,09%	-53,19%	-57,61%	-59,79%	-60,30%
Controllable type C	-35,97%	-40,83%	-44,80%	-48,13%	-50,95%	-53,13%

**Πίνακας 41: KPI 1 με σενάριο αναφοράς το BL**

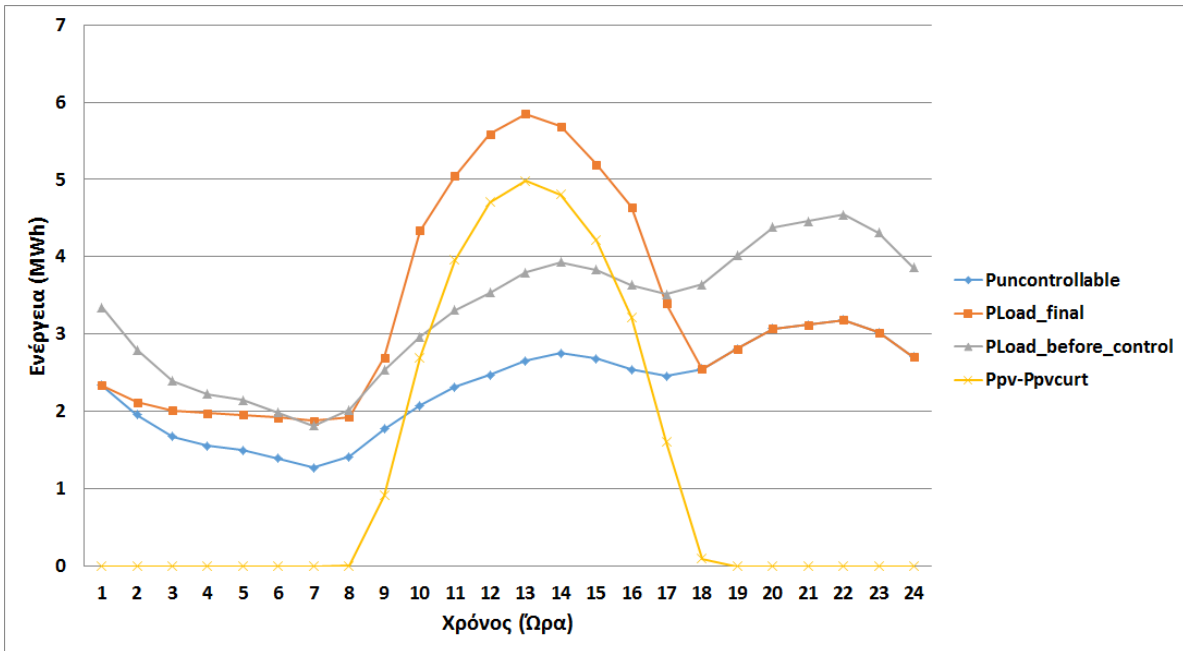


Εικόνα 112: KPI 1 με σενάριο αναφοράς το BL

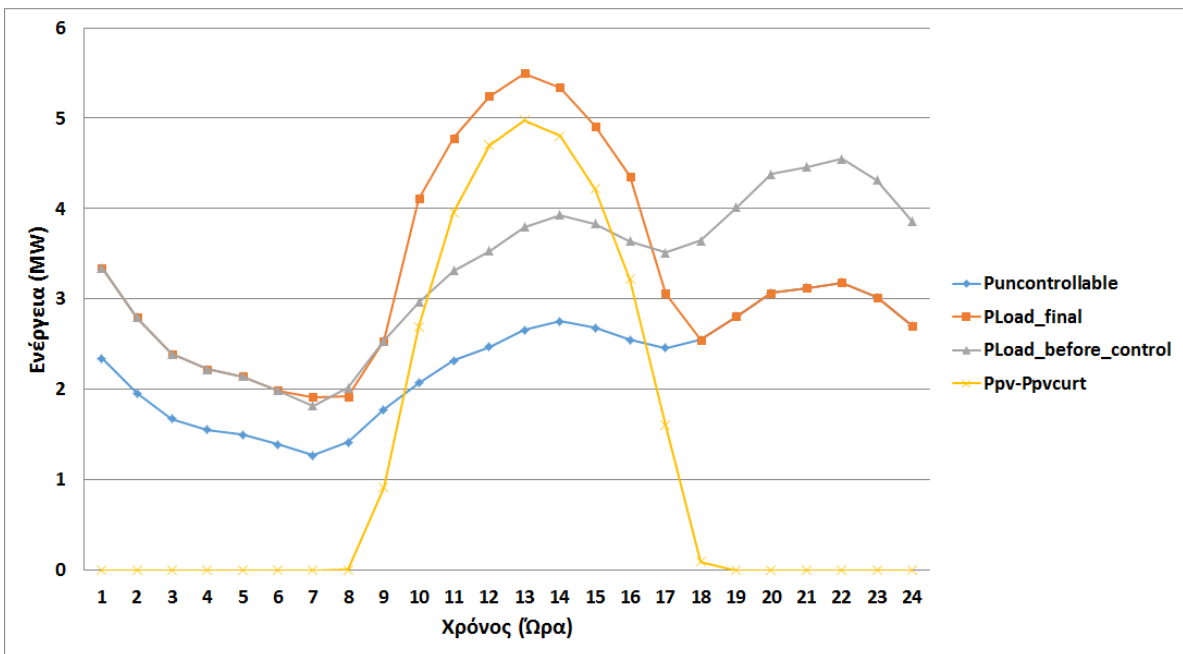
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη του έξυπνου δικτύου, μειώνει τις απώλειες του δικτύου κατά 36%, ενώ η εισαγωγή ελεγχόμενων φορτίων επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις, όπως αυτές παρουσιάστηκαν και προηγουμένως.

Στις Εικόνες 113, 114 και 115 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αναδιανέμονται τα ελεγχόμενα φορτία:

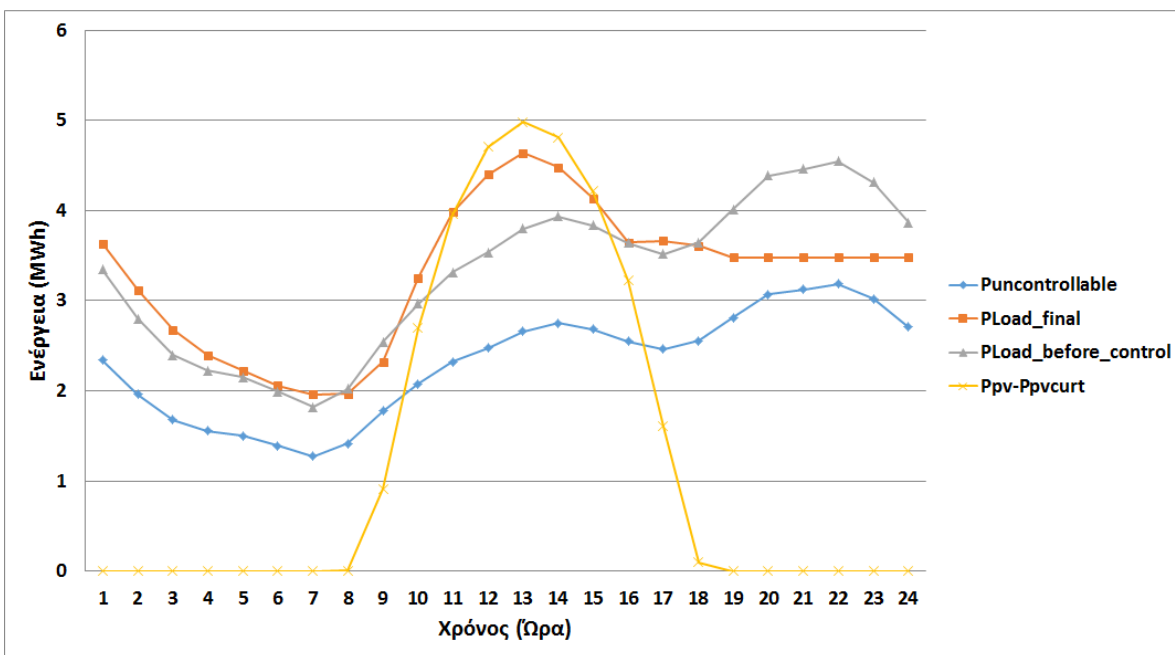




Εικόνα 113: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Α με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών



Εικόνα 114: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου Β με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών



Εικόνα 115: Καμπύλη ζήτησης φορτίου για διείσδυση 30% ελεγχόμενων φορτίων τύπου C με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των απωλειών

## 8.4 Περικοπή παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ

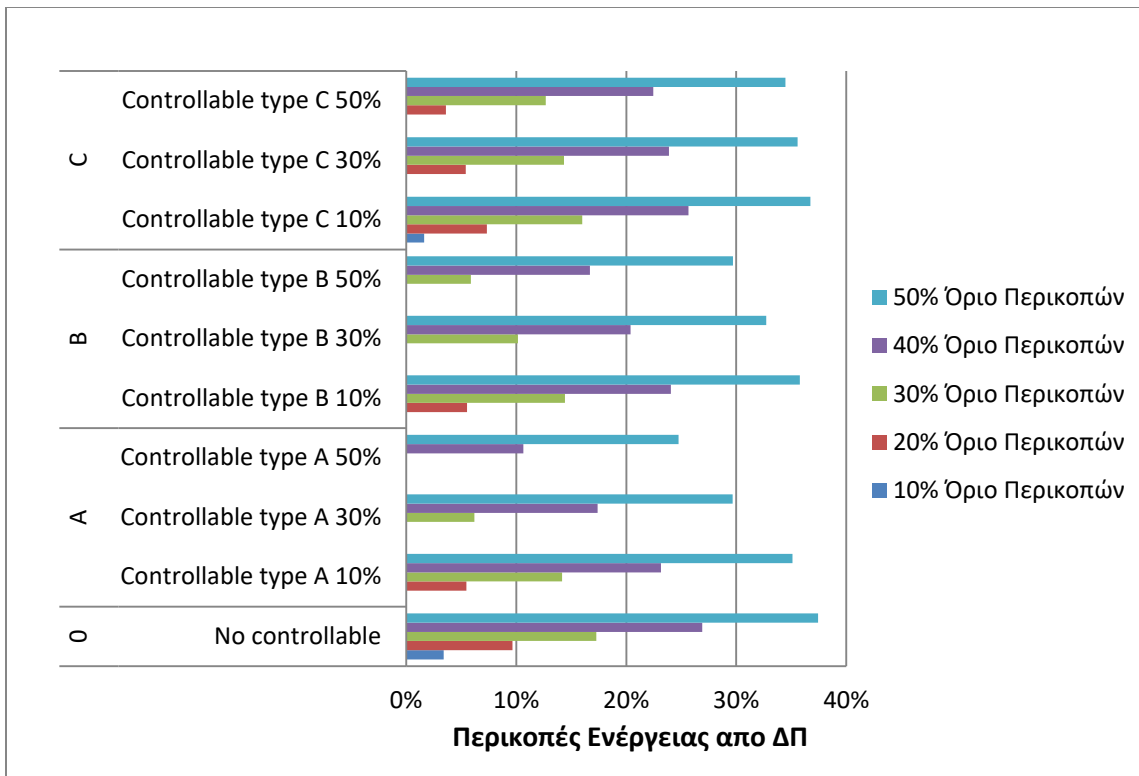
Για να εξετασθεί η συνεισφορά των ελεγχόμενων φορτίων στις περικοπές της ενέργειας που παράγεται από τους σταθμούς ΔΠ, υπολογίστηκε το HC για το Smart Grid χωρίς ελεγχόμενα φορτία για κάθε όριο περικοπών (10 έως 50%) και διατηρήθηκε σταθερή αυτή η εγκατεστημένη ισχύς ανά περίπτωση, προσθέτοντας τα ελεγχόμενα φορτία. Για κάθε τύπο ελεγχόμενων φορτίων θεωρήθηκε διείσδυση 10%, 30% και 50% και πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση λειτουργίας του δικτύου με ΑΣ την ελαχιστοποίηση των περικοπών ενέργειας, οι οποίες καταγράφηκαν ως ποσοστό ως προς τη συνολική παραγόμενη ενέργεια από τους σταθμούς ΔΠ. Οι μετρήσεις ομαδοποιήθηκαν τόσο ως προς το είδος των ελεγχόμενων φορτίων, όσο και ως προς το ποσοστό διείσδυσης για την εξαγωγή ολοκληρωμένων συμπερασμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 42 και 43 και στις Εικόνες 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122 και 123.

		Εγκατεστημένη ισχύς (MW)				
		19	21,5	24,75	28,75	34,5
		P <sub>gcurt</sub> limit (%)				
		10	20	30	40	50
<b>O</b>	No controllable	3,40%	9,65%	17,29%	26,91%	37,44%
<b>A</b>	Controllable type A 10%	0,00%	5,48%	14,17%	23,15%	35,12%
	Controllable type A 30%	0,00%	0,00%	6,19%	17,39%	29,67%
	Controllable type A 50%	0,00%	0,00%	0,00%	10,66%	24,74%
<b>B</b>	Controllable type B 10%	0,00%	5,54%	14,44%	24,06%	35,77%
	Controllable type B 30%	0,00%	0,05%	10,16%	20,38%	32,72%
	Controllable type B 50%	0,00%	0,00%	5,88%	16,70%	29,69%
<b>C</b>	Controllable type C 10%	1,62%	7,33%	15,99%	25,64%	36,74%
	Controllable type C 30%	0,00%	5,42%	14,34%	23,87%	35,57%
	Controllable type C 50%	0,00%	3,62%	12,68%	22,45%	34,48%

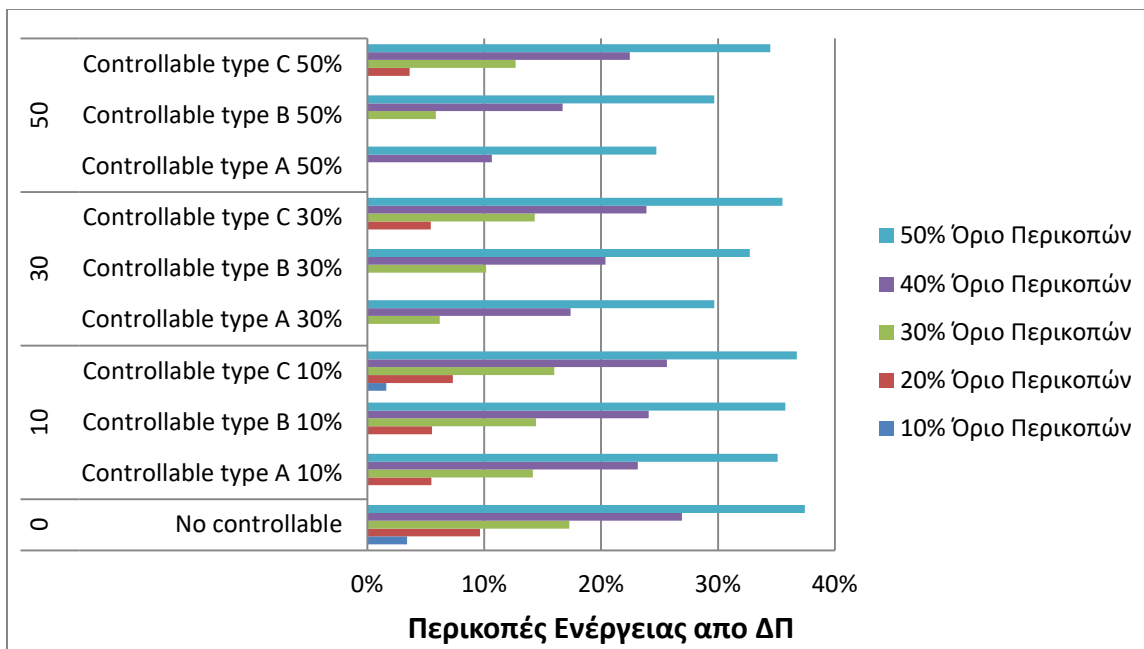
Πίνακας 42: Περικοπές ενέργειας ομαδοποιημένες με βάση το είδος των ελεγχόμενων φορτίων

		Εγκατεστημένη ισχύς (MW)				
		19	21,5	24,75	28,75	34,5
		P <sub>g</sub> curt limit (%)				
		10	20	30	40	50
<b>0</b>	No controllable	3,40%	9,65%	17,29%	26,91%	37,44%
<b>10</b>	Controllable type A 10%	0,00%	5,48%	14,17%	23,15%	35,12%
	Controllable type B 10%	0,00%	5,54%	14,44%	24,06%	35,77%
	Controllable type C 10%	1,62%	7,33%	15,99%	25,64%	36,74%
<b>30</b>	Controllable type A 30%	0,00%	0,00%	6,19%	17,39%	29,67%
	Controllable type B 30%	0,00%	0,05%	10,16%	20,38%	32,72%
	Controllable type C 30%	0,00%	5,42%	14,34%	23,87%	35,52%
<b>50</b>	Controllable type A 50%	0,00%	0,00%	0,00%	10,66%	24,74%
	Controllable type B 50%	0,00%	0,00%	5,88%	16,70%	29,69%
	Controllable type C 50%	0,00%	3,62%	12,68%	22,45%	34,48%

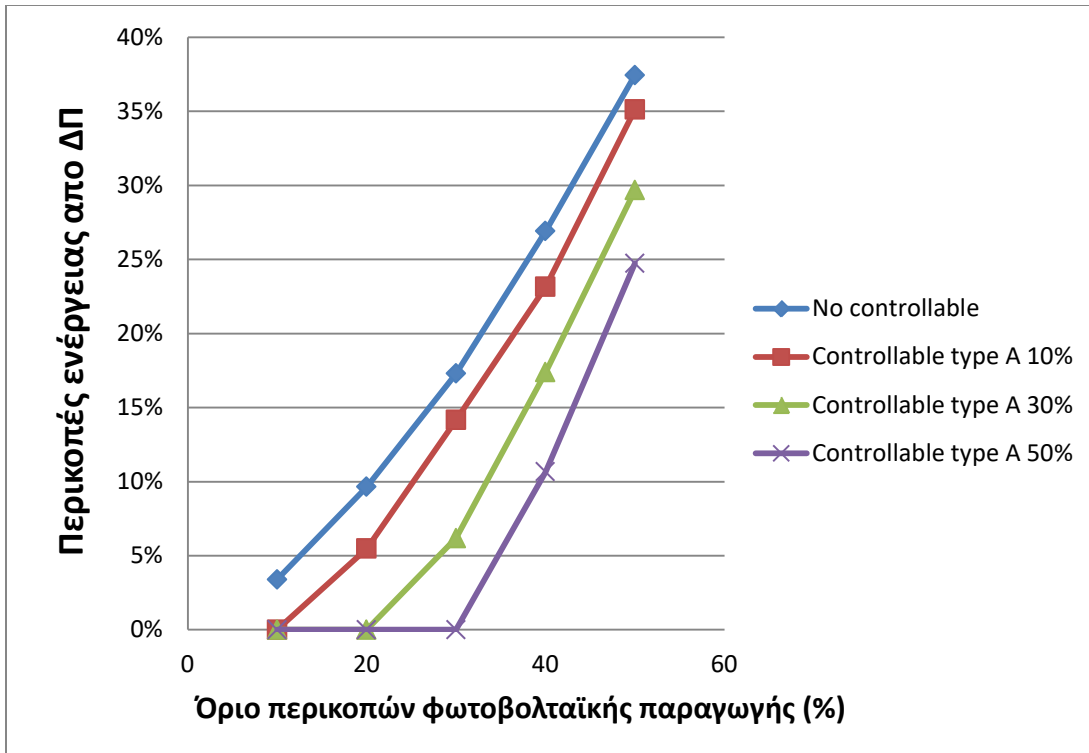
**Πίνακας 43: Περικοπές ενέργειας ομαδοποιημένες με βάση το ποσοστό διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων**



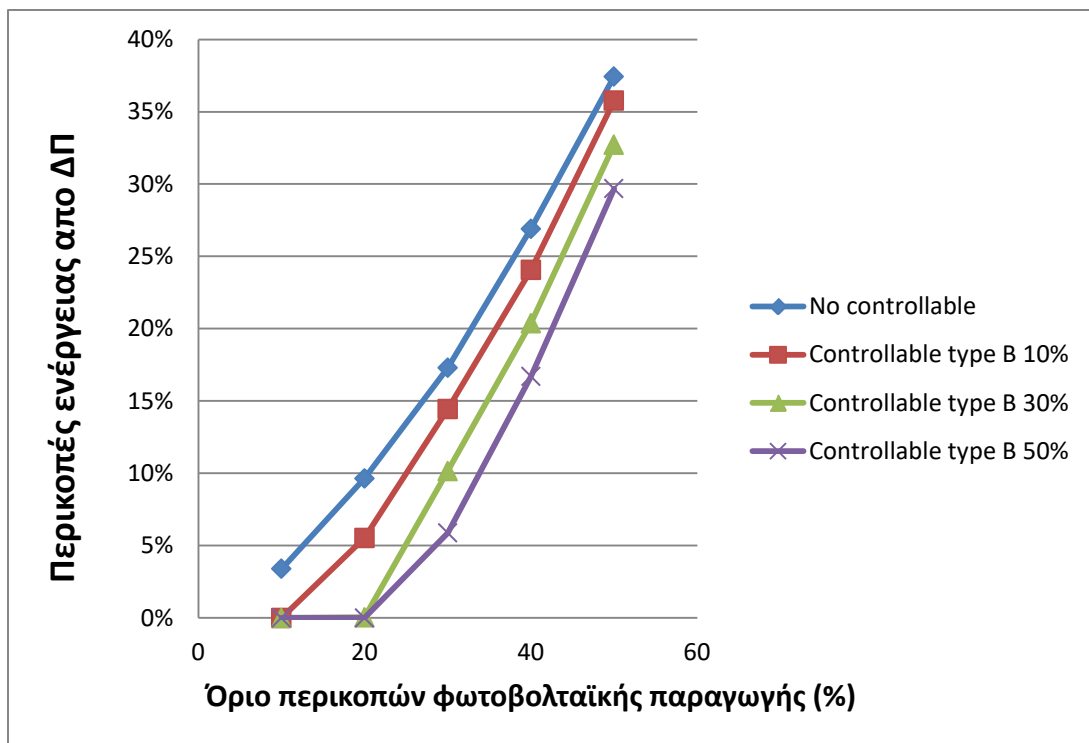
Εικόνα 116: Συγκεντρωτικό διάγραμμα περικοπών, ομαδοποιημένες με βάση το είδος των ελεγχόμενων φορτίων



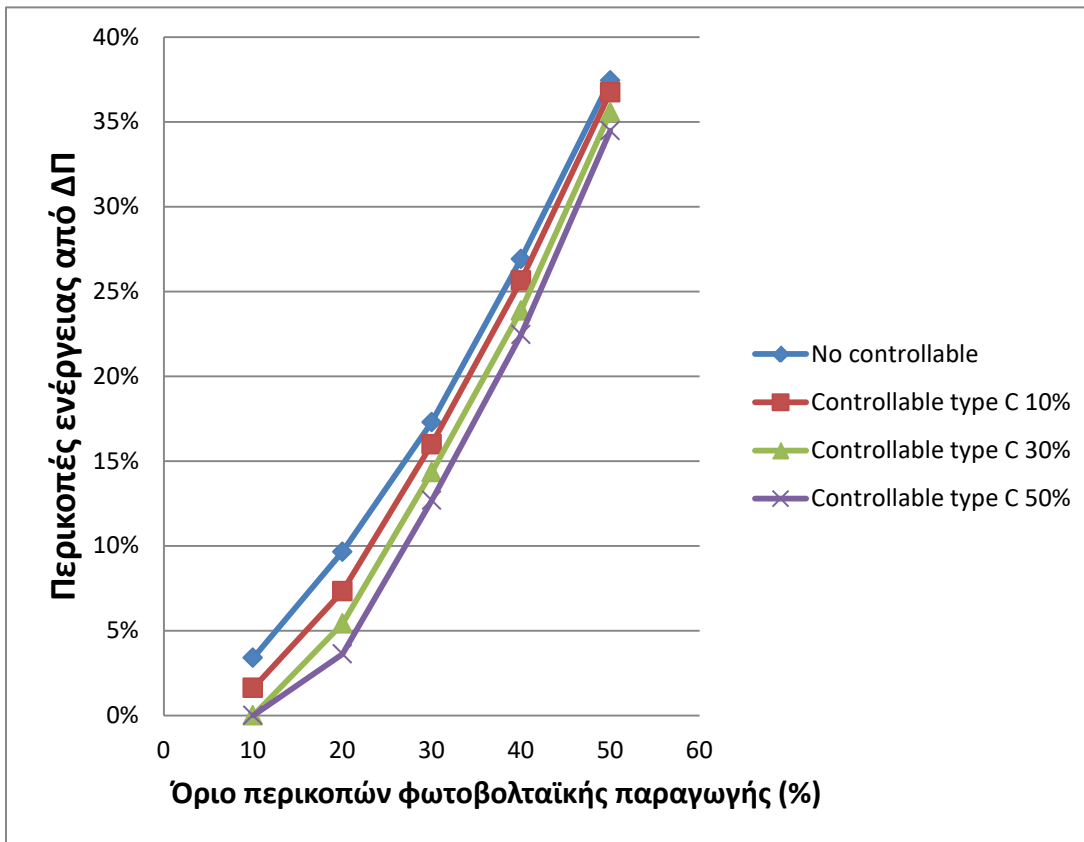
Εικόνα 117: Συγκεντρωτικό διάγραμμα περικοπών, ομαδοποιημένες με βάση το ποσοστό διείσδυσης των ελεγχόμενων φορτίων



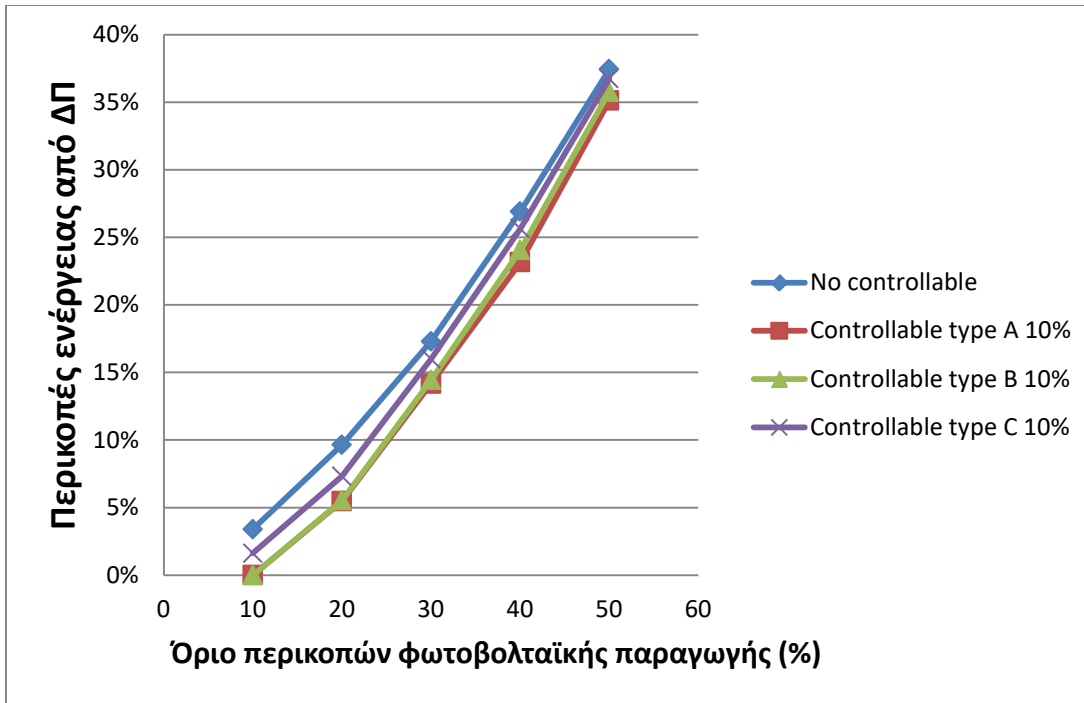
Εικόνα 118: Περικοπές για ελεγχόμενα φορτία τύπου Α



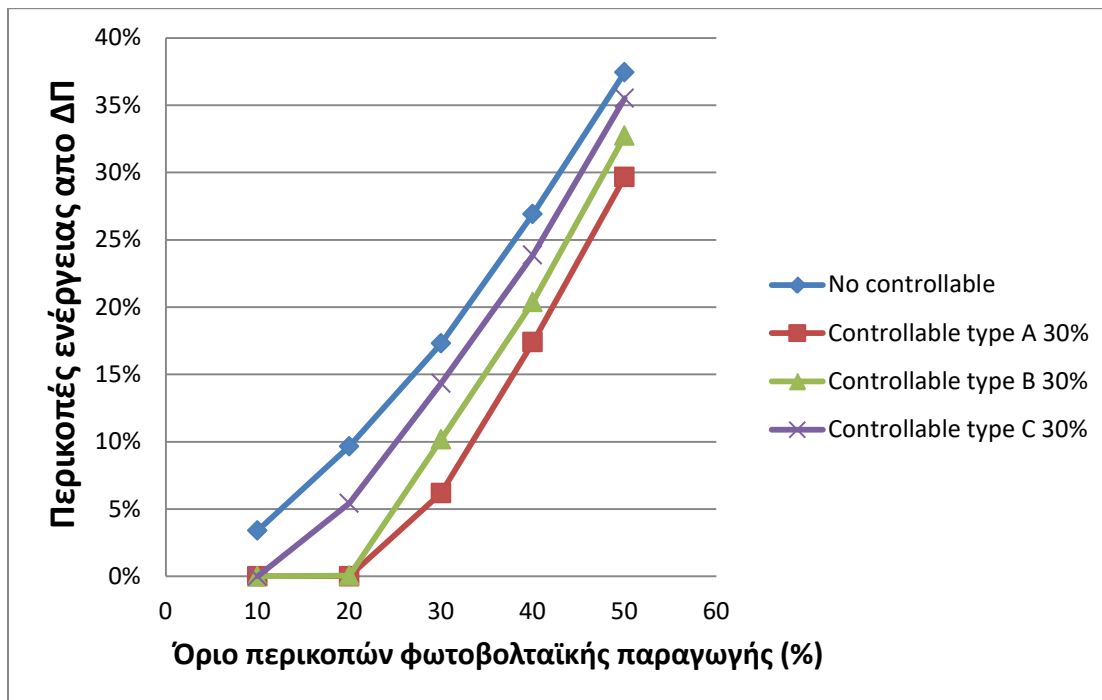
Εικόνα 119: Περικοπές για ελεγχόμενα φορτία τύπου Β



Εικόνα 120: Περικοπές για ελεγχόμενα φορτία τύπου C

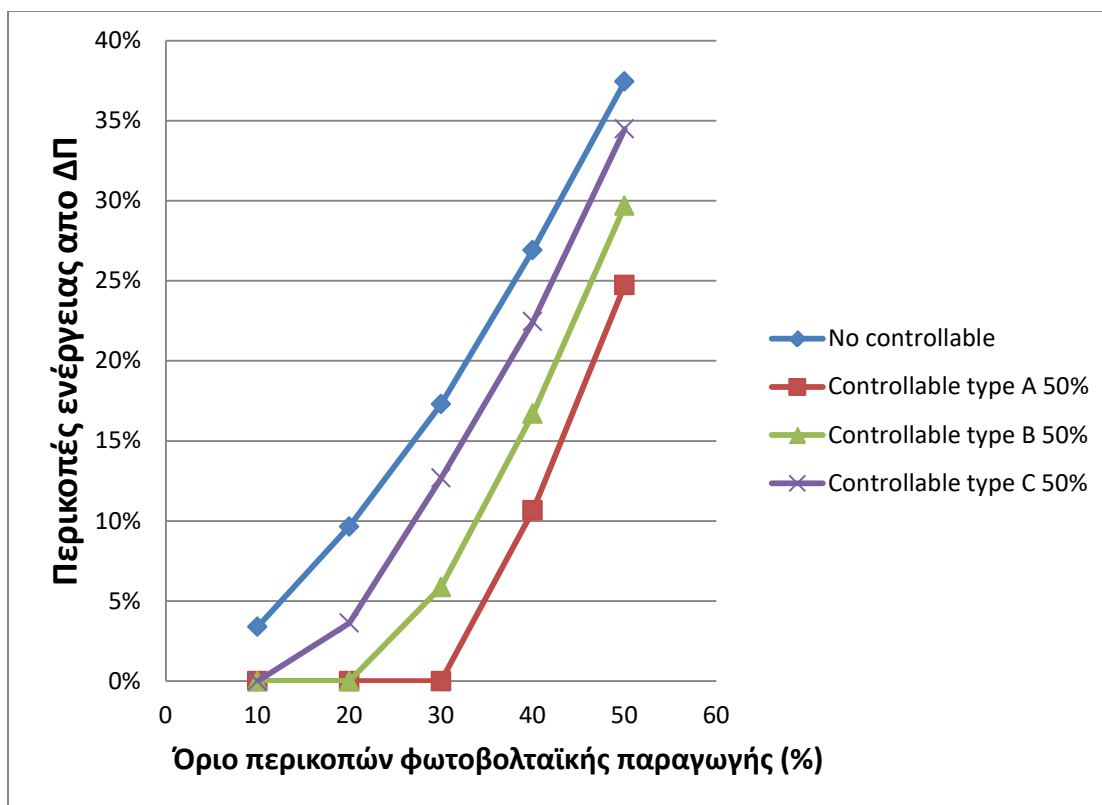


Εικόνα 121: Περιεκτές για 10% διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων



Εικόνα 122: Περιεκτές για 30% διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων





**Εικόνα 123: Περικοπές για 50% διείσδυση ελεγχόμενων φορτίων**

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρήθηκε ότι για σταθερή εγκατεστημένη ισχύ, όσο πιο «έξυπνο» γίνεται το δίκτυο, δηλαδή με την αύξηση του ποσοστού των ελεγχόμενων φορτίων ή την αντικατάσταση με πιο "έξυπνα φορτία" (ελεγχόμενα φορτία τύπου A έναντι τύπου B και C και φορτία τύπου B έναντι τύπου C), τότε οι περικοπές της παραγόμενης από ΑΠΕ ενέργειας μειώνονται ανάλογα.

## 8.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση που επιφέρει η διείσδυση των ελεγχόμενων φορτίων στο δίκτυο. Οι βελτιώσεις που επιφέρουν τα ελεγχόμενα φορτία ως προς τα κριτήρια αξιολόγησης με βάση το Baseline σενάριο είναι οι εξής:

- Ως προς το HC παρατηρούνται σημαντικές βελτιώσεις, με τη σημαντικότερη να επιτυγχάνεται με τα ελεγχόμενα φορτία τύπου A, η οποία ξεπερνά το 40% για ποσοστό διείσδυσης 50%, ενώ ακόμα και για διείσδυση 10% η βελτίωση κυμαίνεται πάνω από το 15%. Αρκετά ικανοποιητική είναι και η βελτίωση των ελεγχόμενων φορτίων τύπου B που αγγίζει το 30% και το 10% στις αντίστοιχες περιπτώσεις. Τέλος και τα φορτία τύπου C

επιτυγχάνουν βελτίωση στο Hosting Capacity του δικτύου που κυμαίνεται από 5% έως 15%.

- Ως προς την αύξηση του μεριδίου ενέργειας από ΑΠΕ στο δίκτυο, λόγω της άμεσης συσχέτισης αυτού του δείκτη με το HC, παρατηρούνται παρόμοια χαρακτηριστικά. Η ύπαρξη 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A αυξάνει το μερίδιο ενέργειας από ΑΠΕ κατά 22%, ενώ η μέγιστη δυνατή διεύθυνση που μελετήθηκε (50%), επιφέρει αύξηση της τάξης του 57%. Για τα φορτία τύπου B η αύξηση ήταν 14% έως 41% ενώ για τα τύπου C άγγιξε το 8% με 22% αντίστοιχα.
- Ως προς τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, η ύπαρξη 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A επιφέρει βελτίωση 63%, ενώ η μέγιστη δυνατή διεύθυνση που μελετήθηκε (50%), επιφέρει μείωση της τάξης του 167%. Για τα φορτία τύπου B η μείωση ήταν 40% έως 121% ενώ για τα τύπου C άγγιξε το 23% με 63% αντίστοιχα.
- Ως προς τη ρύθμιση της τάσης, η ύπαρξη 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A επιφέρει βελτίωση κατά 19%, ενώ η μέγιστη δυνατή διεύθυνση που μελετήθηκε (50%), βελτιώνει τις τάσεις κατά 61%. Για τα φορτία τύπου B η βελτίωση ήταν 15% έως 49% ενώ για τα τύπου C άγγιξε το 10% με 26% αντίστοιχα.
- Ως προς τις απώλειες του δικτύου, η ύπαρξη 10% ελεγχόμενων φορτίων τύπου A επιφέρει βελτίωση 21%, ενώ η μέγιστη δυνατή διεύθυνση που μελετήθηκε (50%), μειώνει τις απώλειες κατά 40%. Για τα φορτία τύπου B η βελτίωση ήταν 16% έως 38% ενώ για τα τύπου C άγγιξε το 8% με 27% αντίστοιχα. Τέλος παρατηρείται κορεσμός τόσο για τα φορτία τύπου A, όσο και για τα τύπου B για ποσοστά διεύθυνσης μεγαλύτερα του 40%.
- Ως προς τις περικοπές της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, παρατηρήθηκε ότι για σταθερή εγκατεστημένη ισχύ, όσο πιο «έξυπνο» γίνεται το δίκτυο, δηλαδή όταν αυξάνουμε το ποσοστό των ελεγχόμενων φορτίων ή βάζουμε πιο "έξυπνα φορτία" (ελεγχόμενα φορτία τύπου A έναντι τύπου B και C και φορτία τύπου B έναντι τύπου C), τότε οι περικοπές της παραγόμενης από ΑΠΕ ενέργειας μειώνονται ανάλογα.

Συνολικά παρατηρήθηκε ότι τα φορτία τείνουν να μετατοπίζονται από ώρες υψηλής ζήτησης στις μεσημεριανές ώρες, όπου υπάρχει μεγάλη φωτοβολταϊκή παραγωγή. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται διπλό κέρδος για το δίκτυο, καθώς αποσυμφορίζεται τις ώρες υψηλής ζήτησης εξαλείφοντας τις αιχμές, και αξιοποιείται

πλήρως και άμεσα η ενέργεια που παράγεται από τα ΑΠΕ, μειώνοντας έτσι την αντίστροφη ροή ισχύος προς τον μετασχηματιστή.



## 9 Συμπεράσματα

Το αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή ενός κεντρικού και συντονισμένου ελέγχου στις συσκευές των δικτύων διανομής, και η αξιολόγηση της επίδρασης της μεταβολής των βασικών χαρακτηριστικών των συσκευών αυτών στη λειτουργία του δικτύου.

Για να γίνουν κατανοητές οι βελτιώσεις του κεντρικού και συντονισμένου ελέγχου που εφαρμόστηκε με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε αρχικά ένα υπολογιστικό φύλλο excel που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός παθητικού δικτύου. Στη συνέχεια, προστέθηκε σταδιακά στον αλγόριθμο η δυνατότητα ελέγχου κάθε συσκευής που είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο και καταγράφηκε η βελτίωση που επιφέρει ο έλεγχος της κάθε συσκευής στο Hosting Capacity, στη τάση και στις απώλειες του δικτύου. Το Hosting Capacity βελτιώθηκε σημαντικά μέσω του ελέγχου του ΣΙ των σταθμών ΔΠ, του ΣΑΤΥΦ και των ελεγχόμενων φορτίων, ενώ ικανοποιητική ήταν και η βελτίωση με τη προσθήκη μπαταρίας στο δίκτυο. Σε ότι αφορά τη τάση του δικτύου, πολύ σημαντικός παράγοντας ήταν ο κεντρικός έλεγχος του ΣΑΤΥΦ του Μ.Σ, ενώ μικρότερη βελτίωση επιτεύχθηκε και με τη προσθήκη μπαταρίας, Η/Ζ και ελεγχόμενων φορτίων. Τέλος, οι απώλειες του δικτύου περιορίστηκαν σημαντικά μόνο με τη προσθήκη μπαταρίας και Η/Ζ., αν και όπως αποδείχθηκε στη συνέχεια η συνεισφορά των μπαταριών στις απώλειες είναι εικονική, καθώς οι απώλειες ενέργειας που επιφέρει η λειτουργία της μπαταρίας είναι μεγαλύτερες από τις απώλειες γραμμής και Μ/Σ που εξοικονομούνται. Μικρή συνεισφορά στην μείωση των απωλειών παρατηρήθηκε με την εισαγωγή ελέγχου του ΣΙ της ΔΠ και την διεύθυνση των ελεγχόμενων φορτίων.

Στη συνέχεια υλοποιήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με την θέση και το μέγεθος της μπαταρίας. Παρατηρήθηκε ότι η αξιοποίηση των δυνατοτήτων της μπαταρίας μεγιστοποιείται όταν αυτή τοποθετείται προς το τέλος της γραμμής. Σε ότι αφορά το μέγεθος της μπαταρίας παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη μίας μπαταρίας μικρής χωρητικότητας και ισχύος, βελτιώνει σημαντικά τη λειτουργία του δικτύου, ενώ η περαιτέρω αύξηση του μεγέθους της, είτε αυτή αφορά την ονομαστική χωρητικότητα, είτε την ισχύ της, επιφέρει εκ νέου επιπλέον βελτιώσεις αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μία μελέτη σχετικά με την επίδραση της μεταβολής του ορίου του Σ.Ι. των σταθμών ΔΠ. Παρατηρήθηκε ότι όταν είναι δυνατή η παραγωγή και η κατανάλωση αέργου ισχύος με ΣΙ 0.95, η τάση του δικτύου βελτιώνεται σημαντικά. Ωστόσο η περαιτέρω μείωση του ορίου του ΣΙ επιφέρει μικρότερες επιπλέον βελτιώσεις στο δίκτυο.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας με βάση το ποσοστό διεύθυνσης ελεγχόμενων από τον διαχειριστή φορτίων στο δίκτυο. Παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη τέτοιου είδους φορτίων βελτιώνουν σημαντικά όλους τους δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της λειτουργίας του δικτύου. Η βελτίωση αυτή μάλιστα γίνεται μεγαλύτερη είτε αυξάνοντας τη διεύθυνση αυτών των φορτίων, είτε μετατρέποντας τα φορτία αυτά σε πιο «έξυπνα», αυξάνοντας τον έλεγχο που έχει ο διαχειριστής σε αυτά.



## 10 Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς και Β. Παππαδιάς , Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας - Έλεγχος και Ευστάθεια συστήματος, Αθήνα: Σ. Αθανασόπουλος & ΣΙΑ Ο.Ε, 2010.
- [2] «ΑΔΜΗΕ,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [www.admie.gr](http://www.admie.gr). [Πρόσβαση 26 5 2018].
- [3] Μ. Π. Παπαδόπουλος, Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Μόνιμη Κατάσταση λειτουργίας, τόμ. 1, Αθήνα: ΕΜΠ, 1985.
- [4] T. Ackerman, G. Andersson και L. Soder, «Distributed generation: A definition, Electric Power Systems Research,» τόμ. 57, pp. 195 - 204, 2001.
- [5] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans και W. D'haeseleer, «Distributed generation: Definition, benefits and issues, Energy Policy,» τόμ. 33, pp. 787 - 798, April 2005.
- [6] W. El-Khattam και M. M. A. Salama, «Distributed generation technologies, definitions and benefits,» *Electric Power Systems Research*, τόμ. 71, pp. 119 - 128, 2004.
- [7] Σ. Παπαθανασίου, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές, Αθήνα: ΕΜΠ, 2014.
- [8] E. Janaka, L. Kithsiri και W. Jianzhong, SMART GRID Technology And Applications, United Kingdom: WILEY, 2012.
- [9] Σ. Ζ. Σωκράτης, Έξυπνα Δίκτυα Ενέργειας, 2015.
- [10] E. C. a. Brussels, «Smart Grids: from innovation to deployment,» *COM(2011)*, 2011.
- [11] E. C. T. F. f. S. Grids, «Functionalities of smart grids and smart meters Final Deliverable,» pp. 1 - 64, December 2010.
- [12] «Policy Division, International Energy Agency. Technology Roadmap. Smart Grids,» 2011.
- [13] A. B. M. Shawkat Ali, «Smart Grids. Opportunities, Developments, and Trends.,» *Springer*, 2013.

- [14] U. D. O. Energy, «The Smart Grid: An Introduction.,» 2008.
- [15] Π. Ν. Λεάνδρου, Έξυπνα Ενεργειακά Δίκτυα: Διαχείριση και Εφαρμογές, 2016.
- [16] E. P. R. Institute., «Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap,» 2009.
- [17] Θ. Δ. Μπαμπαρούτσης, Βέλτιστη λειτουργία γραμμών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, 2015.
- [18] S. Borlase, «Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions.,» *CRC Press*, 2013.
- [19] Y. Xiao, «Security and Privacy in Smart Grids,» *CRC Press*, 2014.
- [20] Tony Flick και Justin Morehouse, «Securing the Smart Grid: Next Generation Power Grid Security.,» *Syngres*, 2010.
- [21] J. Stidham, «Can Hackers Turn Your Lights Off? The Vulnerability of the US Power Grid to Electronic Attack,» *SANS Institute InfoSec Reading Room*, 2001.
- [22] J. C. Stephens, E. J. Wilson και T. R. Peterson, «Smart Grid (R)Evolution. Electric Power Struggles,» *Cambridge University Press*, 2015.
- [23] W. Heck, «Smart energy meter will not be compulsory,» 2009.
- [24] B. Robyns, «Energy Storage in Electric Power Grids,» *Wiley*, 2015.
- [25] Khosrow Moslehi και Ranjit Kumar, «A Reliability Perspective of the Smart Grid,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, June 2010.
- [26] B. Roberts, «Capturing grid power,» *IEEE Power & Energy Magazine*, αρ. 7, April 2009.
- [27] «Energy Storage Association,» Energy Storage Technologies, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-technologies>. [Πρόσβαση 14 April 2018].
- [28] R. Carbone, «Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids,» *InTech*, 2011.



- [29] A.A. Solomon, D. Faiman και G. Meron, «Properties and uses of storage for enhancing the grid penetration of very large photovoltaic systems,» *Energy Policy*, αρ. 38, 2010.
- [30] Y. Makarov, «Optimal size of energy storage to accommodate high penetration of renewable resources in WECC system,» *Innovative Smart Grid Technologies.IEEE*, 2010.
- [31] S. Vazquez, «Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, αρ. 57, 12 2010.
- [32] Alexandre Oudalov, Tilo Buehler και Daniel Chartouni, «Utility Scale Applications of Energy Storage,» *Energy 2030 Conference IEEE. 2008*, 2008.
- [33] Π. Αναγνωστόπουλος, Τεχνικά ζητήματα και περιορισμοί για την επίτευξη υψηλής διείσδυσης φωτοβολταϊκής ισχύος σε δίκτυα MT, ΕΜΠ, Ιούλιος 2011.
- [34] B. Bersenef, Le réglage de tension dans les reseaux de Distribution, Nov 1959.
- [35] R. B. J. H. M. Davis, «Modeling and Testing of Unbalanced Loading and Voltage Regulation,» July 2007.
- [36] Reginald Comfort, Manuel Gonzalez, Arshad Mansoor, Phil Barker και Tom Short, «Power Quality Impact of Distributed Generation: Effect on Steady State Voltage Regulation, Electrical Power Quality and Utilisation,» July 2001.
- [37] J. J. Grainger και W. D. Stevenson JR., *Power System Analysis*, McGraw-HILL International Editions, 1994.
- [38] Β. Δ. Κάλλος, Συμβολή Τεχνικών Διαχείρισης Ζήτησης Στη Μείωση Του Κόστους Λειτουργίας Των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2015.
- [39] «Wikipedia,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Demand\\_response](https://en.wikipedia.org/wiki/Demand_response). [Πρόσβαση 19 Μαρτίου 2018].
- [40] *Primer on Demand-Side Management With an Emphasis on Price-Responsive Programs.*, Oakland, California, 2005.
- [41] Δήμητρα Κουπριτζιώτη και Δημήτριος Μουσενίκας, Μοντελοποίηση ομάδων καταναλωτών στην πλατφόρμα Cassandra, 2015.

- [42] S. S. Sumankumar, «Review of Voltage Control Technique of Grid Connected Distributed Generation,» *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, αρ. 3.
- [43] A. M. H. S. T. J. T. Hashim, A review on voltage control methods for active distribution networks, *Przeglad Elektrotechniczny: Universiti Kebangsaan Malaysia*, 2012.
- [44] T. P. Taylor, «Voltage Control Techniques for Electrical Distribution Networks including Distributed Generation,» σε *The International Federation of Automatic Control 17th World Congress*, 2008.
- [45] M. J., «Benefits of Active Management of Distribution Networks with Distributed Generation,» *Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES*, pp. 601-606, 2006.
- [46] U. D. o. Energy, *Energy Efficiency in Distribution Systems - Impact Analysis Approach*, 2011.
- [47] P. A. J. a. D. D. Devaraj, «Optimal Reactive Power Dispatch for Voltage Stability Enhancement Using Real Coded Genetic Algorithm,» *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, αρ. 2, August 2010.
- [48] R. R. a. K. G., «A Comparative Analysis on Reactive Power,» σε *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference*, Nagercoil.
- [49] D. F. G. a. S. H. L. H.-G. Yeh, «Adaptive VAR Control for Distribution Circuits With Photovoltaic Generators,» *Power Systems, IEEE Transactions*, αρ. 27, pp. 1656-1663, 2012.
- [50] D. GEIBEL, «Active intelligent distribution networks — Coordinated voltage regulation methods for networks with high share of decentralised generation, Integration of Renewables into the Distribution Grid,» *CIREN 2012 Workshop*, pp. 1-4.
- [51] S.-R. N. a. J.-K. P. J.-Y. Park, «Real-Time Volt/VAr Control Based on the Difference between the Measured and Forecasted Loads in Distribution Systems,» *Journal of Electrical Engineering & Technology*, αρ. 2, p. 152~156, 2007.
- [52] E. M. S. a. G. R. M. d. Costa, «Optimal Adjustment of continuous and discrete

- variables in the Optimal Reactive Power Flow Problem,» σε *2nd International Conference on Engineering Optimization*, Lisbon, 2010.
- [53] D. X. F. E. C. R. Engnee, «Understanding Volt/Var Control (VVC) and. Volt/Var Optimization (VVO),» σε *Smart Grid Distribution Automation Conference*, Raleigh, NC, ABB, 2011.
- [54] Y. S. a. D. B. J. Rahul, «A New Attempt to Optimize Optimal Power Flow based Transmission Losses using Genetic,» σε *2012 Fourth International Conference*, Mathura.
- [55] H. A. a. J. R. Martí, «Distribution System Optimization Based on a Linear Power-Flow Formulation,» *Power Delivery, IEEE Transactions*, αρ. 30, pp. 25 - 33, 2015.
- [56] Munirpallam Venkataramanan και Wayne Winston, *Introduction to Mathematical Programming*, 2003.
- [57] Α. Σπυρίδων, Εφαρμογές Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού με τη χρήση της γλώσσας μοντελοποίησης GAMS, 2011.
- [58] Enrique Castillo, Antonio J. Gonejo, Pablo Pedregal, Ricardo Garcia και Natalia Alguacil, «Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science,» *Wiley-Interscience*, pp. 285-310, 2001.
- [59] B. A. McCarl, *McCarl GAMS User Guide*, Texas, 2008.
- [60] Zhaoyu Wang, Hao Chen και Jianhui Wang, «Inverter-Less Hybrid Voltage/Var Control for Distribution Circuits With Photovoltaic Generators,» *IEEE Transactions*, pp. 2718 - 2728, 2014.
- [61] Konstantin Turitsyn, Petr Sulc, Scott Backhaus και Michael Chertkov, «Distributed control of reactive power flow in a radial distribution circuit with high photovoltaic penetration,» σε *Proceedings of IEEE PES General Meeting*, 2010.
- [62] Hen-Geul Yeh, Dennice F. Gayme και Steven H. Low, «Adaptive VAR Control for Distribution Circuits With Photovoltaic Generators,» *IEEE Transactions*, αρ. 27, pp. 1656-1663, 2012.
- [63] Ljubomir A. KOJOVIC και Daniel ARDEN, «Centralized voltage-var regulation in distribution network,» σε *CIREN 2012 Workshop: Integration of Renewables into the*

*Distribution Grid*, 2012.

- [64] J.-H. Park και Young-Sik Baek, «Coordination Control of Voltage Between STATCOM and Reactive Power Compensation Devices in Steady-State,» *Journal of Electrical Engineering & Technology*, αρ. 7, pp. 689-697.
- [65] Ferry A. Viawan και Daniel Karlsson, «Coordinated Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Distributed Generation,» *Power Engineering Society, IEEE General Meeting - PES*, pp. 1-6, 2008.
- [66] Mesut E. Baran και Felix F. Wu, «Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing,» *Power Engineering Review, IEEE*, αρ. 9, pp. 101 - 102, 1989.
- [67] H. Saadat, *Power System Analysis*, New York, 1999.
- [68] «IEA(International Energy Agency),» 2002. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.iea.org/>.
- [69] An ABB Company Ventyx, *Model-Based volt/VAR Optimization: An Introduction - Enabling Smart Grid volt/VAR Control for Distribution Organizations*, 2012.
- [70] D. GEIBEL, «Active intelligent distribution networks — Coordinated voltage regulation methods for networks with high share of decentralised generation, Integration of Renewables into the Distribution Grid,» σε *CIREN 2012 Workshop*, Lisbon, 2012.
- [71] R. AZIMI και Saeid ESMAEILI, «Multiobjective daily Volt/VAr control in distribution systems with distributed generation using binary ant colony optimization,» *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, αρ. 21, p. 613, 2013.
- [72] Marko Kolenc, Igor Papič και Boštjan Blažič, «Minimization of Losses in Smart Grids Using Coordinated Voltage Control,» *Energies 2012*, pp. 3768-3787, 2012.
- [73] Hans Glavitsch και Rainer Bacher, «OPTIMAL POWER FLOW ALGORITHMS». *Swiss Federal Institute of Technology*.
- [74] Bob Ulski, «Volt - VAR Control & Optimization,» *Quanta Technology*, 2011.

- [75] Jong-Young Park, Soon-Ryul Nam και Jong-Keun Park, «Real-Time Volt/VAR Control Based on the Difference between the Measured and Forecasted Loads in Distribution Systems,» *Journal of Electrical Engineering & Technology*, αρ. 2, p. 152~156, 2007.
- [76] Edilaine M. Soler και Geraldo R. M. da Costa, «Optimal Adjustment of continuous and discrete variables in the Optimal Reactive Power Flow Problem,» σε *2nd International Conference on Engineering Optimization*, Lisbon, 2010.
- [77] D. X. Feng, «Understanding Volt/Var Control (VVC) and. Volt/Var Optimization (VVO),» σε *Smart Grid Distribution Automation Conference*, Raleigh, NC, ABB Corporate Research, 2011.
- [78] C. Liu, Jianhui Wang και Jiaxin Ning, «Optimal Power Flow (OPF) in Large-scale Power Grid Simulation,» σε *Argonne National Laboratory*, 2010.
- [79] B. Uluski, «Smart Distribution Applications & Their Integration In A Smart Grid Environment,» σε *Electric Power Research Institute, IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2011.
- [80] G. P. Harrison και A. R. Wallace, «Optimal power flow evaluation of distribution network capacity for the connection of distributed generation, Generation, Transmission and Distribution,» *IEEE Proceedings*, pp. 115-122, 2005.
- [81] Bob Uluski, «Volt/VAR Control and Optimization Concepts and Issues».ERPI, *Electric Power Research Institute*.
- [82] Hao Liang, «Stochastic information management for voltage regulation in smart distribution systems,» *INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE*, pp. 2652 - 2660.
- [83] K. Rayudu, G. Yesuratnam, Askani Jayalaxmi και Y. Dedeepya Kumar, «Multi Objective Comparison of GA and LP Techniques for Generator Reactive Power Optimization,» *Power India Conference*, pp. 1 - 5, 2012.
- [84] Taher Niknam, Mohammad Rasoul Narimani, Rasoul Azizipanah-Abarghooee και Bahman Bahmani-Firouzi, «Multiobjective Optimal Reactive Power Dispatch and Voltage Control: A New Opposition-Based Self-Adaptive Modified Gravitational Search Algorithm,» *Systems Journal, IEEE*, αρ. 7, pp. 742 - 753, 2013.
- [85] M.O.W. Grond, N.H. Luong, J. Morren και J.G. Slootweg, «Multi-Objective

- Optimization Techniques and Applications in Electric Power Systems,» *Universities Power Engineering Conference (UPEC) - 47th International*, pp. 1 - 6, 2012.
- [86] Himmat Singh και Laxmi Srivastava, «Multi-objective Reactive Power Management using Differential Evolution,» σε *IEEE 5th India International Conference*, Delhi, 2012.
- [87] HE Xiao, PANG Xia, ZHU Da-ruì και LIU Chong-xin, «Multi-Objective Reactive Power Optimization Based on Chaos Particle Swarm Optimization Algorithm, Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA),» σε *2013 2nd International Symposium*.
- [88] PG Scholar, Rekha R και Kannan G, «A Comparative Analysis on Reactive Power Optimization Using Various Techniques in Deregulated Power System, Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS),» σε *2013 International Conference*, Nagercoil.
- [89] Maurizio Delfanti, Davide Falabretti, Marco Merlo και Diana Moneta, «Mv networks reconfiguration for losses reduction, Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON),» σε *2012 IEEE International*, Florence.
- [90] Jinendra Rahul, Yagvalkya Sharma και Dinesh Birla, «A New Attempt to Optimize Optimal Power Flow based Transmission Losses using Genetic Algorithm, Computational Intelligence and Communication Networks (CICN),» σε *2012 Fourth International Conference*, Mathura.
- [91] Feng Zhao, Lian Ge και Wenxiang Li, «Application of Ant-genetic Algorithm in Reactive Power Optimization of Distribution Network, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),» σε *2012 Asia-Pacific*, Shanghai.
- [92] Hamed Ahmadi και José R. Martí, «Distribution System Optimization Based on a Linear Power-Flow Formulation,» *Power Delivery, IEEE Transactions*, αρ. 30, pp. 25 - 33, 2015.
- [93] Wen Fan, «Distribution System Voltage and Var Optimization,» σε *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, San Diego, CA.
- [94] Soumya Kundu, Scott Backhaus και Ian A. Hiskens, «Distributed Control of Reactive Power from Photovoltaic Inverters, Circuits and Systems (ISCAS),» σε *2013 IEEE International Symposium*, Beijing.

- [95] S. Rahimi, M. Marinelli και F. Silvestro, «Evaluation of requirements for Volt/Var Control and Optimization function in Distribution Management Systems,» σε *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International*, Florence.
- [96] Xiyi Lin, Jiangang Yao, Tian Mao και Lei Gong, «Inductive Reactive Power Compensation Optimization for 10kV Distribution,» σε *Chinese Automation Congress (CAC)*, Changsha, 2013.
- [97] N. Ameir Ahmad, Ismail Musirin και S. I. Sulaiman, «Loss Minimization of Distribution System with Photovoltaic Injection Using Swarm Evolutionary Programming,» σε *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013 IEEE 7th International*, Langkawi.
- [98] Tianpei Zhou και Wei Sun, «Optimization of Wind-PV Hybrid Power System based on Interactive Multi-objective Optimization Algorithm, Measurement, Information and Control (MIC),» σε *2012 International Conference*, Harbin.
- [99] Ahmad Reza Malekpour και Anil Pahwa, «Reactive Power and Voltage Control in Distribution Systems with Photovoltaic Generation,» σε *North American Power Symposium (NAPS)*, Champaign, IL, 2012.
- [100] Pooja Sharma και D Thukaram, «Reactive power and voltage control in grid connected wind farms, Industrial and Information Systems (ICIIS),» σε *2012 7th IEEE International Conference*, Chennai.
- [101] MAO Hang-yin, YU Shao-feng, SHEN Pei-qi, CAO Song-wei και JIN Yong-tao, «Reactive Power Optimization in Distribution Network Considering Seasonal Load Changing, Electricity Distribution (CICED),» σε *2012 China International Conference*, Shanghai.
- [102] Mohammad Yunus Ali και Kaamran Raahemifar, «Reactive Power Optimization Based on Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm, Electrical & Computer Engineering (CCECE),» σε *2012 25th IEEE Canadian Conference*, Montreal, QC.
- [103] Francesca Possemato, Gian Luca Storti και Maurizio Paschero, «Two Evolutionary Computational Approaches for Active Power Losses Minimization in Smart Grids,» σε *IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)*, Edmonton, AB, 2013.
- [104] Mostafa Nick, Rachid Cherkaoui και Mario Paolone, «Optimal siting and sizing of

- distributed energy storage systems via alternating direction method of multipliers,» Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2015.
- [105] Yanzhi Wang, Xue Lin και Massoud Pedram, «Adaptive Control for Energy Storage Systems in Households With Photovoltaic Modules,» *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, αρ. 5, MARCH 2014.
- [106] C. N. Kurucz, D. Brandt και S. Sim, «A Linear Programming Model for Reducing System Peak Through Customer Load Control Programs,» *IEEE Transactions on Power Systems*, αρ. 11, November 1996.
- [107] Johanna L. Mathieu, Maryam Kamgarpour, John Lygeros και Duncan S. Callaway, «Energy Arbitrage with Thermostatically Controlled Loads,» *European Control Conference (ECC)*, 2013.
- [108] Thillainathan Logenthiran, Dipti Srinivasan και Tan Zong Shun, «Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization,» *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, αρ. 3, SEPTEMBER 2012.
- [109] A.S. Masoum, S. Deilami, P.S. Moses, M.A.S. Masoum και A. Abu-Siada, «Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimization considering voltage regulation,» *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2011.
- [110] H. M. Costa, J. Sumaili, A. G. Madureira και C. Gouveia, «A Multi-Temporal Optimal Power Flow for Managing Storage and Demand Flexibility in LV Networks».
- [111] A. Fattahi Meyabadi και M.H. Deihimi, «A review of demand-side management: Reconsidering theoretical framework,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, p. 367–379, 2017.
- [112] Duncan S. Callaway και Ian A. Hiskens, «Achieving Controllability of Electric Loads,» *Proceedings of the IEEE*, αρ. 99, January 2011.
- [113] G.R. Bharati και S. Paudyal, «Coordinated control of distribution grid and electric vehicle loads,» *Electr. Power Syst. Res.*, 2016.
- [114] S. Rauf, S. Rasool, M. Rizwan, M. Yousaf και N. Khan, «Domestic electrical load management using smart grid,» *3rd International Conference on Power an Energy*



*Systems Engineering, CPESE 2016*, September 2016.

- [115] R. Tulabing, «Modeling study on flexible load's demand response potentials for providing ancillary services at the substation level,» *Electr. Power Syst. Res.*, 2016.
- [116] Yue Song, Yu Zheng και David J. Hill, «Optimal Scheduling for EV Charging Stations in Distribution Networks: A Convexified Model».
- [117] Chongxin Huang, Dong Yue, Song Deng και Jun Xie, «Optimal Scheduling of Microgrid with Multiple Using DR,» 2017.
- [118] A.S. Masoum, S. Deilami, P.S. Moses, M.A.S. Masoum και A. Abu-Siada, «Smart load management of plug-in electric vehicles in DN with charging stations for peak shaving and loss minimization,» 2011.
- [119] Zohaib Akhtar, Balarko Chaudhuri και Shu Yuen Ron Hui, «Smart Loads for Voltage Control in Distribution Networks».
- [120] P. Balakumar και S. Sathiya, «Demand Side Management in Smart Grid Using Load Shifting Technique».2017 *International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE2017)*.
- [121] Chin Choy Chai, «Distributed Discrete Level Energy Scheduling for Residential Load Control in Smart Grids,» σε *Proc. of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Malaysia, 2017.
- [122] Sibon Nan, Ming Zhou και Gengyin Li, «Optimal residential community demand response scheduling in smart grid,» σε *Applied Energy* 2017.
- [123] Cesare Quinteiro Pica και Nilo Rodrigues, «A New Topology for Load Management in Smart Grid Residences,» 2017.
- [124] Chin Choy Chai και Liu Xiang, «Adaptable Load Scheduling for Smart Grids,» σε *Proc. of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Malaysia.
- [125] M. R. Aghaebrahimi και M. Amiri, «Power Consumption Management and Control for Peak Load Reduction in Smart Grids Using UPFC,» σε *IEEE Electrical Power and Energy Conference*, 2011.
- [126] Mir Muntasir Hossain, Kazi Rehnema Zafreen, Abidur Rahman, Muhammad Ahsan Zamee και Tareq Aziz, «An Effective Algorithm for Demand Side Management in

Smart Grid for Residential Load,» 2017.

- [127] Juan C. Munoz, Jefferson F. Ordonez, Victor Gutierrez, Claudio A. Canizares, Kankar Bhattacharya και Sumit Paudyal, «Applications of Optimal Industrial Load Management Modeling in Smart Grids,» *IEEE POWERTECH*, JUNE 2017.
- [128] Naveed Ul Hassan, Yawar I. Khalid, Chau Yuen και Wayes Tushar, «Customer Engagement Plans for Peak Load Reduction in Residential Smart Grids,» *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, αρ. 6, NOVEMBER 2015.
- [129] Shichao Liu και Peter Xiaoping Liu, «Distributed Model-Based Control and Scheduling for Load Frequency Regulation of Smart Grids over Limited Bandwidth Networks,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*.
- [130] Nilotpal Chakraborty, Arijit Mondal και Samrat Mondal, «Efficient Scheduling of Non-Preemptive Appliances for Peak Load Optimization in Smart Grid,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*.
- [131] Hamed Mortaji, Siew Hock Ow, Mahmoud Moghavvemi και Haider Abbas F. Almurib, «Load Shedding and Smart-Direct Load Control Using Internet of Things in Smart Grid Demand Response Management,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, αρ. 53, NOVEMBER/DECEMBER 2017.
- [132] Yunpeng Wang, Walid Saad, Narayan B. Mandayam και H. Vincent Poor, «Load Shifting in the Smart Grid: To Participate or Not?,» *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, αρ. 7, NOVEMBER 2016.
- [133] Fady Y. Melhem, Olivier Grunder, Zakaria Hammoudan και Nazih Moubayed, Optimal Residential Load Scheduling Model in Smart Grid Environment, 2017.
- [134] Sandeep Kakran και Saurabh Chanana, «Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review,» 2017.
- [135] C. N. Kurucz, D. Brandt και S. Sim, «A Linear Programming Model for Reducing System Peak Through Customer Load Control Programs,» *IEEE Transactions on Power Systems*, αρ. 11, November 1996.
- [136] Kun-Yuan Huang, Hong-Chan Chin και Yann-Chang Huang, «A Model Reference Adaptive Control Strategy for Interruptible Load Management,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, αρ. 19, FEBRUARY 2004.

- [137] Tsair-Fwu Lee, Ming-Yuan Cho, Ying-Chang Hsiao, Pei-Ju Chao και Fu-Min Fang, «Optimization and Implementation of a Load Control Scheduler Using Relaxed Dynamic Programming for Large Air Conditioner Loads,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, αρ. 23, MAY 2008.
- [138] Leehter Yao και Hau-Ren Lu, «A Two-Way Direct Control of Central Air-Conditioning Load Via the Internet,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, αρ. 24, JANUARY 2009.
- [139] Stanton W. Hadley, «Impact of Plug-in Hybrid Vehicles on the Electric Grid,» October 2006.
- [140] Masoud Esmaili και Mohsen Rajabi, «Optimal charging of plug-in electric vehicles observing power grid constraints,» 2013.
- [141] Henrik Lund και Willett Kempton, «Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G,» *Energy Policy* 36, 2008.
- [142] Xiaojun Geng και Pramod P. Khargonekar, «Electric Vehicles as Flexible Loads: Algorithms to Optimize Aggregate Behavior». *IEEE SmartGridComm 2012 Symposium - Smart Grid Services and Management Models*.
- [143] Metody Georgiev, Rad Stanev και Anastassia Krusteva, «Flexible load control in electric power systems with distributed energy resources and electric vehicle charging».
- [144] Sekyung Han, Soohye Han και Kaoru Sezaki, «Estimation of Achievable Power Capacity From Plug-in Electric Vehicles for V2G Frequency Regulation: Case Studies for Market Participation,» *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, αρ. 2, DECEMBER 2011.
- [145] Mesut E. Baran και Felix F. Wu, «Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing, Power Engineering Review,» *IEEE*, αρ. 9, pp. 101 - 102, 1989.
- [146] Schleicher-Tappeser και Ruggero, «How renewables will change electricity markets in the next five years,» *Energy Policy*, τόμ. 48, pp. 64-75, 2012.
- [147] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.transmission-line.net>. [Πρόσβαση 21 April 2018].

[148] M.W. Davis, R. Broadwater και J. Hambrick, Modeling and Testing of Unbalanced Loading and Voltage Regulation, 2007.