



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Αγαθοκλέους

Επίβλεψη : Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017



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

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Αγαθοκλέους

Επίβλεψη : Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Ιουλίου 2017.

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

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

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

Αθήνα, Ιούλιος 2017

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

Copyright © Χρήστος Αγαθοκλέους, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση και τοποθέτηση των μονάδων αποθήκευσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας Χ.Τ με στόχο την ρύθμιση της τάσης.

Αρχικά έγινε προσπάθεια αποσύμπλεξης των δύο προβλημάτων, της διαστασιολόγησης και της τοποθέτησης, χρησιμοποιώντας τις ευαισθησίες τάσης των ζυγών ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος, επιλέγοντας έτσι για κάθε δυνατό αριθμό μονάδων αποθήκευσης, τις θέσεις εκείνες που ευνοούν περισσότερο την ρύθμιση της τάσης. Το πρόβλημα της διαστασιολόγησης προσεγγίστηκε με την μέθοδο του ημιορισμένου προγραμματισμού, λόγω της μη γραμμικότητας του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου στα δίκτυα διανομής. Ως αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα της διαστασιολόγησης θεωρήθηκε η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου και η συνολική χωρητικότητα όλων των μονάδων αποθήκευσης και λύθηκε για κάθε δυνατό αριθμό μονάδων αποθήκευσης. Ως μονάδες αποθήκευσης επιλέχθηκαν οι μπαταρίες ιόντων λιθίου.

Δεύτερο στάδιο για την επίλυση του προβλήματος ήταν, έχοντας πλέον υπολογίσει τη μικρότερη δυνατή χωρητικότητα των μπαταριών και λαμβάνοντας υπόψη ένα ημιεμπειρικό μοντέλο για το χρόνο ζωής τους, να αποφασιστεί το ακριβές μέγεθος τους ως προς τη χωρητικότητα, αλλά και την ισχύ. Επομένως, πάλι για κάθε δυνατό αριθμό μπαταριών, επιλύθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου και την συνολική ισχύ των μπαταριών, για ένα συγκεκριμένο αριθμό παραγόντων προσαύξησης της χωρητικότητας. Η τελική επιλογή του μεγέθους και της θέσης των μονάδων αποθήκευσης έγινε με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του Καθαρού Παρόντος Κόστους (NPC) της επένδυσης.

Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο εφαρμόστηκε διαδοχικά σε δύο δίκτυα διανομής 17 και 12 ζυγών επιβεβαιώνοντας την παραπάνω μεθοδολογία. Ο χρονικός ορίζοντας επίλυσης του προβλήματος για τα δύο δίκτυα ήταν ο ένας μήνας, ώστε να ληφθεί υπόψη η στοχαστικότητα των φορτίων και της παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μονάδες αποθήκευσης, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μπαταρίες, απώλειες ενέργειας, βέλτιστη ροή φορτίου, βελτιστοποίηση, ημιορισμένος προγραμματισμός.

ABSTRACT

The scope of the diploma thesis is the optimal sizing and siting of the energy storage systems in the distribution networks for voltage control.

First, the two problems of siting and sizing were separated over an iterative procedure, taking into consideration the voltage sensitivities of the buses with respect to active power injection. For every possible number of storage systems the most effective buses were selected in order to maximize the controllability of the voltage in the network. The sizing problem was solved with the semidefinite programming method because of the non-convexity of the optimal power flow problem in the distribution systems. As the objective function of the problem was selected the minimization of power losses and the total storage capacity and it was solved for every possible number of storage systems. As storage systems were considered Lithium-ion batteries.

Secondly, taking into consideration a semi-empirical model of battery degradation and the lower bound of the total capacity of the batteries, as was calculated before, the specific capacity and power of the batteries were determined. So for every possible number of energy storage systems an optimal power flow problem was solved again minimizing the total active power losses and the total power of the batteries over a specific number of increment coefficients of the capacity. The last choice of sizing and siting of the storage systems was done by taking into consideration the Net Present Cost (NPC) of the investment.

In the present diploma thesis a software was developed on MATLAB language, which was applied consecutively in two low voltage networks, one of 17 buses and the other of 12 confirming the above methodology. The time horizon of the problem was one month to take account the stochasticity of the demand and generation from Renewable Energy Sources.

KEY WORDS

Energy storage systems, renewable power sources, batteries, energy losses, optimal power flow, optimization, semidefinite programming.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Ρήγα για την άσογη συνεργασία και την καθοδήγησή του σε όλα τα καθοριστικά σημεία της διπλωματικής μου εργασίας.

Φτάνοντας στο τέλος των σπουδών μου θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ουσιαστική στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια και ιδίως τον αδερφό μου, με τον οποίο περάσαμε μαζί όλες τις δυσκολίες της σχολής, αλλά και της καθημερινότητας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Χρήστο για τις πάρα πολλές επιστημονικές και μη συζητήσεις που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια και την ατέλειωτη υπομονή του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου Ιάσονα, Παναγιώτη, Στέργιο που ήταν δίπλα μου σε όλες τις δύσκολες στιγμές περνώντας αξέχαστες εμπειρίες. Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους γνώρισα στα φοιτητικά μου χρόνια και με βοήθησαν να αναπτυχθώ ως επιστήμονας και ως άνθρωπος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	19
1.2	Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	20
1.3	Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ)	21
1.4	Αντικείμενο και δομή της εργασίας	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Εισαγωγή	23
2.2	Μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	23
2.3	Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών ηλεκτρικών μπαταριών	26
2.4	Κόστος των μπαταριών ιόντων λιθίου (Li-ion)	27
2.5	Χρόνος ζωής των μπαταριών Li-ion	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

3.1	Εισαγωγή	33
3.2	Κατηγορίες του μαθηματικού προγραμματισμού	33
3.2.1	Γραμμικός Προγραμματισμός (LP)	34
3.2.2	Μη γραμμικός προγραμματισμός (NLP)	34
3.2.3	Τετραγωνικός προγραμματισμός (Quadratic programming-QP)	34
3.2.4	Ακέραιος προγραμματισμός (Integer programming-IP)	34
3.2.5	Μεικτός ακέραιος προγραμματισμός (Mixed integer programming-MIP)	35
3.2.6	Κυρτός προγραμματισμός (Convex programming)	35
3.2.7	Θετικά ημιορισμένος προγραμματισμός (Semidefinite programming-SDP)	36
3.3	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση (Multi-objective optimization)	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

4.1	Εξιιώσεις ροής φορτίου	38
4.2	Βέλτιστη ροή φορτίου	40
4.2.1	Κίνητρα	40
4.2.2	Στόχοι της βέλτιστης ροής φορτίου	41
4.2.3	Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου	42
4.3	Ανάλυση ευαισθησίας δικτύων διανομής	42
4.3.1	Ορισμός ευαισθησίας σε ένα σύστημα	42
4.3.2	Κλασική θεωρία ευαισθησίας στα δίκτυα διανομής	43
4.3.3	Αναλυτική περιγραφή της κλασικής θεωρίας ευαισθησίας	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΥΡΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

5.1	Εισαγωγή	46
5.2	Η βέλτιστη ροή φορτίου ως θετικά ημιορισμένο πρόβλημα	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΓΙΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1	Εισαγωγή	51
6.2	Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος	52
6.3	Αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης των μπαταριών	54
6.3.1	Αλγόριθμος συσταδοποίησης (clustering)	54
6.3.2	Επιλογή ζυγών για τοποθέτηση μπαταρίας	57
6.4	Διαστασιολόγηση των μονάδων αποθήκευσης	58
6.4.1	Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της διαστασιολόγησης των μπαταριών	58
6.5	Τελική επιλογή του αριθμού, της θέσης και του μεγέθους των μπαταριών	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1	Εισαγωγή	62
7.2	Το λογισμικό CVX	62
7.2.1	Εισαγωγή	62
7.2.2	Ανάλυση του λογισμικού	63

7.2.3	Επιλογή ημιορισμένου προγραμματισμού	64
7.2.4	Ο επιλυτής SEDUMI	64
7.3	Δίκτυο 17 ζυγών	65
7.3.1	Δεδομένα	65
7.3.2	Πρόβλημα τοποθέτησης	69
7.3.3	Πρόβλημα διαστασιολόγησης	74
7.3.4	Τελική επιλογή του μεγέθους και των θέσεων των μπαταριών	77
7.4	Δίκτυο 12 ζυγών	84
7.4.1	Δεδομένα	84
7.4.2	Πρόβλημα τοποθέτησης	88
7.4.3	Πρόβλημα διαστασιολόγησης	93
7.4.4	Τελική επιλογή του μεγέθους και των θέσεων των μπαταριών	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	105
8.2	Επεκτάσεις της εργασίας	106

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

110

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σχήμα 2.1	Σύνδεση μονάδας αποθήκευσης με το ηλεκτρικό δίκτυο	24
Σχήμα 2.2	Υπηρεσίες που προσφέρουν οι μπαταρίες στο δίκτυο	26
Διάγραμμα 2.3	Καμπύλη πρόβλεψης των μπαταριών ιόντων λιθίου	28
Πίνακας 2.4	Πίνακας των συντελεστών του ημιεμπειρικού μοντέλου	32
Διάγραμμα 2.5	Μείωση της χωρητικότητας με μεταβλητές τιμές της παραμέτρου r_{SEI}	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Σχήμα 3.1	Κυρτό σύνολο	35
-----------	--------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΥΡΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΓΙΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σχήμα 6.1	Αρχικοποίηση του αλγορίθμου	55
Σχήμα 6.2	Πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου	55
Σχήμα 6.3	Δεύτερη επανάληψη του αλγορίθμου	56
Σχήμα 6.4	Τρίτη επανάληψη του αλγορίθμου	56
Σχήμα 6.5	Τέταρτη επανάληψη του αλγορίθμου	56
Σχήμα 6.6	Πέμπτη επανάληψη του αλγορίθμου	57
Σχήμα 6.7	Έκτη επανάληψη του αλγορίθμου	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σχήμα 7.1	Δίκτυο διανομής 17 ζυγών	65
Διάγραμμα 7.2	Συνολικό φορτίο για 1 ημέρα	66
Διάγραμμα 7.3	Συνολικό φορτίο για 1 μήνα	66
Διάγραμμα 7.4	Φορτίο του ζυγού 4 για 1 ημέρα	67
Διάγραμμα 7.5	Φορτίο του ζυγού 4 για 1 μήνα	67
Διάγραμμα 7.6	Συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 ημέρα	68
Διάγραμμα 7.7	Συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 μήνα	68
Διάγραμμα 7.8	Φωτοβολταϊκή παραγωγή του ζυγού 13 για 1 ημέρα	68
Διάγραμμα 7.9	Φωτοβολταϊκή παραγωγή του ζυγού 13 για 1 μήνα	69
Πίνακας 7.10	Ευαισθησίες των τάσεων των ζυγών ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος	70
Σχήμα 7.11	Χρωματική αναπαράσταση των ευαισθησιών	70
Πίνακας 7.12	Αριθμός υποτάσεων σε κάθε ζυγό	71
Πίνακας 7.13	Αριθμός υπερτάσεων σε κάθε ζυγό	71
Πίνακας 7.14	Θέσεις των ESS	72
Πίνακας 7.15	Υποδίκτυα για 6 clusters	72
Πίνακας 7.16	Υποψήφιοι ζυγοί σε κάθε υποδίκτυο	72
Πίνακας 7.17	Θέσεις των ESS για 6 clusters	72
Πίνακας 7.18	Υποδίκτυα για 12 clusters	73
Πίνακας 7.19	Υποψήφιοι ζυγοί σε κάθε υποδίκτυο	73
Πίνακας 7.20	Θέσεις των ESS για 12 clusters	73
Διάγραμμα 7.21	Αριθμός μπαταριών συναρτήσει του αριθμού υποδικτύων	73
Σχήμα 7.22	Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 10, 16	74
Σχήμα 7.23	Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 7, 10, 16	74
Σχήμα 7.24	Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 7, 10, 13, 17	74
Σχήμα 7.25	Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 7, 10, 12, 14, 17	75
Πίνακας 7.26	Δύο μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα W για 1 ημέρα	75
Διάγραμμα 7.27	Συνολική χωρητικότητα σαν συνάρτηση της παραμέτρου γ	76
Διάγραμμα 7.28	Μέσες απώλειες ενέργειας σαν συνάρτηση της παραμέτρου γ	76
Διάγραμμα 7.29	Συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα συνάρτηση του αριθμού των μονάδων	77
Διάγραμμα 7.30	Μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου συνάρτηση του αριθμού των μονάδων	77
Διάγραμμα 7.31	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συναρτήσει του αριθμού μπαταριών για $\alpha=1.25$	78

Διάγραμμα 7.32	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συναρτήσει του αριθμού μπαταριών για $\alpha=1.43$	78
Πίνακας 7.33	Χωρητικότητες των μπαταριών(kWh) για $\alpha=1.25$	79
Πίνακας 7.34	Χωρητικότητες των μπαταριών(kWh) για $\alpha=1.43$	79
Πίνακας 7.35	Ισχύεις των ηλεκτρονικών μετατροπέων(kW) για $\alpha=1.25$	80
Πίνακας 7.36	Ισχύεις των ηλεκτρονικών μετατροπέων(kW) για $\alpha=1.43$	80
Πίνακας 7.37	Χρόνοι ζωής των μπαταριών για $\alpha=1.25$	81
Πίνακας 7.38	Χρόνοι ζωής των μπαταριών για $\alpha=1.43$	81
Πίνακας 7.39	Παράμετροι για τον υπολογισμό του NPC	82
Πίνακας 7.40	Τα Καθαρά Παρόντα Κόστη (€) για όλες τις περιπτώσεις	82
Πίνακας 7.41	Τελική επιλογή του μεγέθους και των θέσεων των μπαταριών	83
Σχήμα 7.42	Δίκτυο διανομής 12 ζυγών	84
Διάγραμμα 7.43	Συνολικό φορτίο για 1 ημέρα	85
Διάγραμμα 7.44	Συνολικό φορτίο για 1 μήνα	85
Διάγραμμα 7.45	Φορτίο του ζυγού 10 για 1 ημέρα	86
Διάγραμμα 7.46	Φορτίο του ζυγού 10 για 1 μήνα	86
Διάγραμμα 7.47	Συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 ημέρα	87
Διάγραμμα 7.48	Συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 μήνα	87
Διάγραμμα 7.49	Φωτοβολταϊκή παραγωγή του ζυγού 9 για 1 ημέρα	88
Διάγραμμα 7.50	Φωτοβολταϊκή παραγωγή του ζυγού 9 για 1 μήνα	88
Πίνακας 7.51	Ευαισθησίες των τάσεων των ζυγών ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος	89
Σχήμα 7.52	Χρωματική αναπαράσταση των ευαισθησιών	89
Πίνακας 7.53	Αριθμός υποτάσεων σε κάθε ζυγό	90
Πίνακας 7.54	Αριθμός υπερτάσεων σε κάθε ζυγό	90
Πίνακας 7.55	Θέσεις των ESS	91
Πίνακας 7.56	Υποδίκτυα για 7 clusters	91
Πίνακας 7.57	Υποψήφιοι ζυγοί σε κάθε υποδίκτυο	92
Πίνακας 7.58	Θέσεις των ESS για 7 clusters	92
Πίνακας 7.59	Υποδίκτυα για 11 clusters	92
Πίνακας 7.60	Υποψήφιοι ζυγοί σε κάθε υποδίκτυο	92
Πίνακας 7.61	Θέσεις των ESS για 11 clusters	92
Διάγραμμα 7.62	Αριθμός μπαταριών ως συνάρτηση του αριθμού υποδικτύων	93
Σχήμα 7.63	Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 6, 8	94
Σχήμα 7.64	Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 4, 6, 8	94
Σχήμα 7.65	Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 4, 6, 9, 10	95

Σχήμα 7.66	Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 4, 6, 9, 11, 12	95
Πίνακας 7.67	Δύο μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα W για 1 ημέρα	96
Διάγραμμα 7.68	Συνολική χωρητικότητα σαν συνάρτηση της παραμέτρου γ	96
Διάγραμμα 7.69	Μέσες απώλειες ενέργειας σαν συνάρτηση της παραμέτρου γ	97
Διάγραμμα 7.70	Συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα ως συνάρτηση του αριθμού των μονάδων	98
Διάγραμμα 7.71	Μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου ως συνάρτηση του αριθμού των μονάδων	98
Διάγραμμα 7.72	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συναρτήσει του αριθμού μπαταριών για $\alpha=1.25$	99
Διάγραμμα 7.73	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συναρτήσει του αριθμού μπαταριών για $\alpha=1.43$	99
Πίνακας 7.74	Χωρητικότητες των μπαταριών(kWh) για $\alpha=1.25$	100
Πίνακας 7.75	Χωρητικότητες των μπαταριών(kWh) για $\alpha=1.43$	100
Πίνακας 7.76	Ισχείς των ηλεκτρονικών μετατροπέων(kW) για $\alpha=1.25$	101
Πίνακας 7.77	Ισχείς των ηλεκτρονικών μετατροπέων(kW) για $\alpha=1.43$	101
Πίνακας 7.78	Χρόνοι ζωής των μπαταριών για $\alpha=1.25$	102
Πίνακας 7.79	Χρόνοι ζωής των μπαταριών για $\alpha=1.43$	102
Πίνακας 7.80	Παράμετροι για τον υπολογισμό του NPC	103
Πίνακας 7.81	Τα Καθαρά Παρόντα Κόστη (€) για όλες τις περιπτώσεις	103
Πίνακας 7.82	Τελική επιλογή του μεγέθους και των θέσεων των μπαταριών	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΛΙΣΤΑ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΥΜΒΩΛΩΝ

SUC	Κόστος Μονάδων Αποθήκευσης
PCS	Κόστος Ηλεκτρονικών Ισχύος
BOP	Κόστος Υπόλοιπων Κατασκευαστικών Μερών
TCC	Συνολικό κόστος κεφαλαίου
OMC	Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης
Q_n, E_n	Ονομαστική χωρητικότητα
Q_r, E_r	Εναπομένουσα χωρητικότητα
Cycle	Κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης
SoC	Επίπεδο φόρτισης
DoD	Βάθος εκφόρτισης
C-Rate	Ρυθμός φόρτισης
T	Θερμοκρασία της μπαταρίας
t	Χρόνος
L	Συντελεστής γήρανσης
f_d	Γραμμικοποιημένη συνάρτηση γήρανσης
n	Πλήρης ή μισός κύκλος
f_{cyc}	Γραμμικοποιημένη συνάρτηση κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης
f_{cal}	Γραμμικοποιημένη συνάρτηση φυσικής γύρανσης
f_{DoD}	Συνάρτηση βαθμού εκφόρτισης
f_{SoC}	Συνάρτηση επιπέδου φόρτισης
f_C	Συνάρτηση ρυθμού φόρτισης
f_T	Συνάρτηση θερμοκρασίας
f_t	Συνάρτηση χρονικής γήρανσης
$V_k(t)$	Τάση του ζυγού k τη χρονική στιγμή t
$I_k(t)$,	Ρεύμα του ζυγού k τη χρονική στιγμή t
$P_k(t)$,	Εγχεόμενη ενεργός ισχύς του ζυγού k τη χρονική στιγμή t
$Q_k(t)$	Εγχεόμενη άεργος ισχύς του ζυγού k τη χρονική στιγμή t
Y	Μήτρα αγωγιμοτήτων
P_{ijmax}	Όρια μεταφερόμενης ενεργού ισχύος
$P_{ij}(t)$	Μεταφερόμενη ενεργός ισχύς από το ζυγό i στον ζυγό j την χρονική
$ V _{max,min}$	Όρια των μέτρων τάσεων των ζυγών
$e_s(t)$	Αποθηκευμένη ενέργεια στο ζυγό s την χρονική στιγμή t
$r_s(t)$	Ανταλλασσόμενη ενεργός ισχύς από την μπαταρία στο ζυγό s την
Δ_t	Διακριτό χρονικό βήμα
E_s	Χωρητικότητα της μπαταρίας στο ζυγό s
R_{smax}	Όριο ανταλλασσόμενης ενεργού ισχύος από την μπαταρία στο ζυγό s
B_{smax}	Όριο ανταλλασσόμενης άεργου ισχύος από την μπαταρία στο ζυγό s
$b_s(t)$	Ανταλλασσόμενη άεργος ισχύς από την μπαταρία στο ζυγό s την χρονική
$P_k^G(t)$,	Παραγόμενη ενεργός ισχύς στον ζυγό k την χρονική στιγμή t

$Q_k^G(t)$	Παραγόμενη άεργος ισχύς στον ζυγό k την χρονική στιγμή t
$P_k^D(t),$	Καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς στον ζυγό k την χρονική στιγμή t
$Q_k^D(t),$	Καταναλισκόμενη άεργος ισχύς στον ζυγό k την χρονική στιγμή t
n_c	Σύνολο υποδικτύων
C_l	Ενεργές απώλειες του δικτύου
γ	Παράμετρος αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος 6.4
$C_{st},$	Συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης
C_o	Αρχικό κόστος επένδυσης
NPC	Καθαρό Παρόν Κόστος
KTP_t	Καθαρές ταμειακές ροές τον χρόνο t
$price_{kwh}$	Κόστος ανά kWh
$price_{kw}$	Κόστος ανά kW
q	Επιτόκιο αναγωγής
E_{snewt}	Χωρητικότητας της νέας μπαταρίας στο ζυγό s το χρόνο t
E_{soldt}	Εναπομένουσα χωρητικότητα της παλαιάς μπαταρίας στο ζυγό s το
$E_s^d,$	Χωρητικότητα της μπαταρίας στο ζυγό s τη μέρα d
R_{smax}^d	Όριο ανταλλασσόμενης ενεργού ισχύος από την μπαταρία στο ζυγό s τη
$SoC_s^d,$	Χρονοσειρά του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας του ζυγού s τη μέρα d
$DoD_s^d,$	Χρονοσειρά του βαθμού εκφόρτισης της μπαταρίας του ζυγού s τη μέρα
$C-rate_s^d$	Χρονοσειρά του ρυθμού φόρτισης της μπαταρίας του ζυγού s τη μέρα d
a	Συντελεστής προσαύξησης της χωρητικότητας
$life_s$	Χρόνος ζωής της μπαταρίας στο ζυγό s
E_s^*	Βέλτιστη χωρητικότητα της μπαταρίας στο ζυγό s
R_{smax}^*	Βέλτιστο όριο ανταλλασσόμενης ενεργού ισχύος από την μπαταρία στο
s^*	Βέλτιστες θέσεις των μπαταριών

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ηλεκτρικός τομέας αποτελεί την πιο κρίσιμη υποδομή των σύγχρονων κοινωνιών, μιας και η αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία ποικίλων τεχνολογικών υποδομών.

Βέβαια, η απαίτηση για αδιάλειπτη και υψηλής ποιότητας παροχή ηλεκτρικής ενέργειας καθίσταται επιτακτική και για τους ίδιους τους καταναλωτές. Άλλωστε, η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία μετατρέπεται εύκολα σε άλλες μορφές και είναι διαθέσιμη τη χρονική στιγμή την οποία ζητείται.

Για να επιτυγχάνεται, λοιπόν, η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης όποτε ζητείται, απαιτούνται ένα σύνολο μέσων και εγκαταστάσεων. Το σύνολο αυτό, των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται, ορίζεται ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ).

Όμως, για την ομαλή λειτουργία του το ΣΗΕ πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.
- Δεδομένης της συνεχούς χρονικής μεταβολής της ζήτησης ενεργού και αέργου ισχύος, το σύστημα πρέπει να είναι δυνατό να ικανοποιεί διαρκώς τη μεταβαλλόμενη ζήτηση.
- Η παρεχόμενη ενέργεια είναι αναγκαίο να ικανοποιεί συγκεκριμένους όρους ποιότητας (σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης).
- Η ενέργεια είναι απαραίτητο να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

Εκτός από τα παραπάνω, η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ: την παραγωγή, τη μεταφορά (Υπερυψηλή – Υψηλή Τάση) και τη διανομή (Μέση – Χαμηλή Τάση). Στην ουσία, η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και εξαιτίας του ότι δεν είναι εφικτό να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με τρόπο οικονομικό, είναι αναγκαίο να παράγεται εκείνη ακριβώς τη χρονική στιγμή που καταναλώνεται.

Βέβαια, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής. Συγκεκριμένα, η σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων (θερμικοί σταθμοί) και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών (υδροηλεκτρικοί σταθμοί) σε ηλεκτρική ενέργεια. Εν αντιθέσει, με τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα τελευταία χρόνια καταγράφεται

μια ραγδαία είσοδος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο τμήμα της παραγωγής, κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας.

Εκτός από το ζητούμενο της παραγωγής, σημαντικό στοιχείο για να αναφερθεί είναι ο τρόπος με τον οποίο διανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια στον τελικό καταναλωτή. Αναλυτικότερα, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου (τους υποσταθμούς). Από τους υποσταθμούς ξεκινούν με τη σειρά τους, τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης, τα οποία και διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές μέσω των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους και για αυτό ακριβώς το λόγο ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός των σταθμών παραγωγής, των κύριων γραμμών μεταφοράς και των κεντρικών υποσταθμών είναι επιτακτικό να είναι ενιαίος, με στόχο πάντα την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη μεγαλύτερη εφικτή αξιοπιστία τροφοδότησης. Από την άλλη, το τμήμα της διανομής αποτελεί τις περισσότερες φορές μια διαφορετική λειτουργία, η οποία σχεδιάζεται και αναπτύσσεται ξεχωριστά, εξαρτώμενη σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τόσο της περιοχής όσο και των καταναλωτών που εξυπηρετεί.

Γενικότερα, η δομή του συστήματος επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή.

Όμως, παρόλο που το μέγεθος των ΣΗΕ διαφέρει, παρατηρούνται και κοινά στοιχεία μεταξύ τους. Όπως για παράδειγμα, το ότι τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz. Υπάρχουν φυσικά και οι περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Σχετικά με την τάση λειτουργίας του συστήματος είναι αναγκαίο να παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή. Ακόμη, οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν έναν επιπλέον αγωγό, τον ουδέτερο αγωγό.

Όσον αφορά τους πελάτες, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης χαρακτηρίζονται στην πλειονότητά τους ως βιομηχανικοί καταναλωτές, ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης.

Τέλος, είναι αναμενόμενο ότι η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει την ποσότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των συμβατικών σταθμών παραγωγής, ενώ η μορφή της καμπύλης ζήτησης περιγράφει χρονικά την απασχόληση των εγκαταστάσεων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής από τους καταναλωτές.

1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας αφορά το σύνολο εκείνων των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου μέσω των οποίων παρέχεται η ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Συγκεκριμένα, τα δίκτυα διανομής είναι τριφασικά και εκτείνονται μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Ύστερα από το μετρητή εκτείνεται η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει με τη σειρά της το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης. Φυσικά, η διάκριση των δικτύων διανομής και μεταφοράς ποικίλει από χώρα σε χώρα. Από τη μια μεριά η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και από την

άλλη η τεχνολογική εξέλιξη, οδήγησαν στη χρήση όλο και υψηλότερης τάσης για το τμήμα της διανομής. Συνεπώς, αυτό με τη σειρά του είχε ως συνέπεια, δίκτυα τα οποία παλιότερα έπαιζαν το ρόλο της μεταφοράς, τώρα να αποτελούν κομμάτι της διανομής.

Βέβαια, στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η αξία των εγκαταστάσεων διανομής κυμαίνεται στο 30% του συνολικού κόστους των εγκαταστάσεων. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της διανομής είναι το πλήθος των στοιχείων που την αποτελούν. Σχετικά με τις απώλειες ενέργειας στο επίπεδο της διανομής είναι περίπου διπλάσιες από ότι στο επίπεδο της μεταφοράς.

Όσον αφορά την κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής σχετίζεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των περιοχών, και γενικότερα, με τη χωροταξική διαμόρφωση κάθε χώρας. Το συγκεκριμένο γεγονός, επιβεβαιώνεται από το ότι τα δίκτυα μεταφοράς κάθε χώρας παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές παρόμοια χαρακτηριστικά, πράγμα που δε συμβαίνει στην περίπτωση των δικτύων διανομής. Επίσης, η χωροταξική διαμόρφωση αποτελεί και το στοιχείο κατηγοριοποίησης των δικτύων διανομής σε εναέρια και υπόγεια. Τα εναέρια δίκτυα είναι φθηνότερα ως προς το κομμάτι της κατασκευής και εμφανίζουν αποκατάσταση βλαβών σε συντομότερο χρόνο σε σχέση με τα υπόγεια. Ωστόσο, στις πυκνοκατοικημένες περιοχές χρησιμοποιούνται κυρίως υπόγεια δίκτυα διανομής, μιας και αφενός ο χώρος είναι περιορισμένος και αφετέρου δεν επιβαρύνουν αισθητικά το περιβάλλον.

Γενικά, η τοπολογία των δικτύων διανομής είναι κατά κανόνα ακτινική ή βροχοειδής. Η ακτινική λειτουργία του δικτύου διανομής έγκειται στο γεγονός ότι όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους. Συνεπώς, οι κλάδοι του δικτύου δε συνδέονται μεταξύ τους. Αντίθετα, στη βροχοειδή λειτουργία, τα δίκτυα διανομής είναι κλειστά, μέσω των βρόχων που σχηματίζουν οι γραμμές. Η συγκεκριμένη μορφή επιτρέπει την οικονομία γραμμών και προσφέρει εναλλακτική τροφοδότηση σε περίπτωση βλαβών, ενώ η ακτινική απλοποιεί και διευκολύνει ζητήματα διανομής προστασίας του δικτύου και ροής ενέργειας. Τέλος, πολλά δίκτυα διανομής έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να μετατρέπονται από ακτινικά σε βροχοειδή και αντίστροφα, μέσω διακοπών ή αποζευκτών.

1.3 ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ΜΔΠ)

Για πολλές δεκαετίες το ηλεκτρικό σύστημα των χωρών βασιζόταν σε ένα κεντρικό σύστημα παραγωγής. Στην ουσία, η ροή της ενέργειας ήταν από τους παραγωγούς προς τους καταναλωτές και για αυτό ακριβώς το λόγο αναπτύχθηκαν μεγάλοι σταθμοί παραγωγής, όπως για παράδειγμα οι θερμικοί και οι πυρηνικοί. Στη λειτουργία αυτού του μοντέλου συμμετείχαν ενεργά και εκτεταμένα δίκτυα μεταφοράς.

Όμως, το σκηνικό πλέον αλλάζει. Εμφανίζεται σημαντικό ενδιαφέρον για τη σύνδεση μονάδων παραγωγής στα δίκτυα διανομής, κάτι που είναι γνωστό ως διεσπαρμένη παραγωγή. Αφενός η αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση, η οποία πλέον επιτάσσει περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και αφετέρου τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής. Αναλυτικότερα, οι καταναλωτές με τη δυνατότητα να συμμετέχουν στην τοπική παραγωγή, θεωρούνται πλέον ενεργές οντότητες στο δίκτυο και όχι απλά παθητικά φορτία. Άλλωστε, λόγω της διεύθυνσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής, τα

συστήματα διανομής παύουν πλέον να είναι παθητικά, να τροφοδοτούν μόνο φορτία, αλλά ενεργά.

Βέβαια, για να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή χρήση των υπάρχουσων υποδομών μέσω της

βέλτιστης κατανομής των ΜΔΠ, πρέπει να συνυπολογιστούν οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου και οικονομικοί παράγοντες. Αναλυτικότερα, το θερμικό όριο των γραμμών, η επαρκής υποστήριξη ως προς την τάση του δικτύου, καθώς και η ποιότητα της τροφοδοτούμενης ισχύος είναι θέματα που είναι απαραίτητο να διερευνηθούν. Όσον αφορά τους οικονομικούς παράγοντες, εμπεριέχουν στοιχεία όπως το κόστος εγκατάστασης, το λειτουργικό κόστος, τα προσδοκώμενα έσοδα κ.α.

Τέλος, σε ένα δίκτυο διανομής για να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία του είναι καθοριστικής σημασίας να εντοπιστούν αφενός οι κατάλληλες θέσης σύνδεσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και αφετέρου το κατάλληλο μέγεθός τους, χωρίς ταυτόχρονα να παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου. Αντίθετα η διασύνδεση των ΜΔΠ, να έχει ως συνέπεια θετικά οφέλη για το δίκτυο, όπως για παράδειγμα τη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος.

1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση των διεσπαρμένων μονάδων αποθήκευσης με σκοπό την βελτίωση των τάσεων του δικτύου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες των γραμμών και το επενδυτικό κεφάλαιο που θα δαπανήσει ο διαχειριστής του δικτύου. Ως μονάδες αποθήκευσης θεωρούνται οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι οποίες έχουν επικρατήσει πλέον ως μέσα αποθήκευσης ενέργειας. Στην εργασία λαμβάνεται επίσης υπόψη και η γήρανση της μπαταρίας, η μείωση δηλαδή της χωρητικότητας της με την πάροδο του χρόνου. Αναλυτικότερα η δομή της εργασίας οργανώνεται στα παρακάτω κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 2**, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των μονάδων αποθήκευσης, εστιάζοντας στις μπαταρίες λιθίου. Μελετάται επίσης το κόστος των μπαταριών ιόντων λιθίου, καθώς και ένα ημιεμπειρικό μοντέλο για την πρόβλεψη του χρόνου ζωής τους.

Στο **Κεφάλαιο 3**, δίνεται εν συντομία η έννοια του μαθηματικού προγραμματισμού και των διαφόρων μοντέλων του.

Στο **Κεφάλαιο 4**, περιγράφεται το πρόβλημα της ροής φορτίου και της βέλτιστης ροής φορτίου και η ανάλυση ευαισθησίας στα δίκτυα διανομής.

Στο **Κεφάλαιο 5**, περιγράφεται η εφαρμογή του θετικά ημιορισμένου προγραμματισμού που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, στο πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου στα δίκτυα διανομής.

Στο **Κεφάλαιο 6**, περιγράφεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος και αναλύονται τα επί μέρους στάδια του.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου του κεφαλαίου 6, ύστερα από την εφαρμογή του σε δύο δίκτυα διανομής 12 και 17 ζυγών.

Στο **Κεφάλαιο 8**, εμπεριέχεται η σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της, για τα δύο δίκτυα διανομής. Επιπλέον, αναφέρονται πιθανές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποθήκευση ενέργειας ορίζεται ως η αποθήκευση κάποιας μορφής ενέργειας, η οποία είναι εφικτό να αξιοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να εκτελέσει ορισμένες χρήσιμες λειτουργίες.

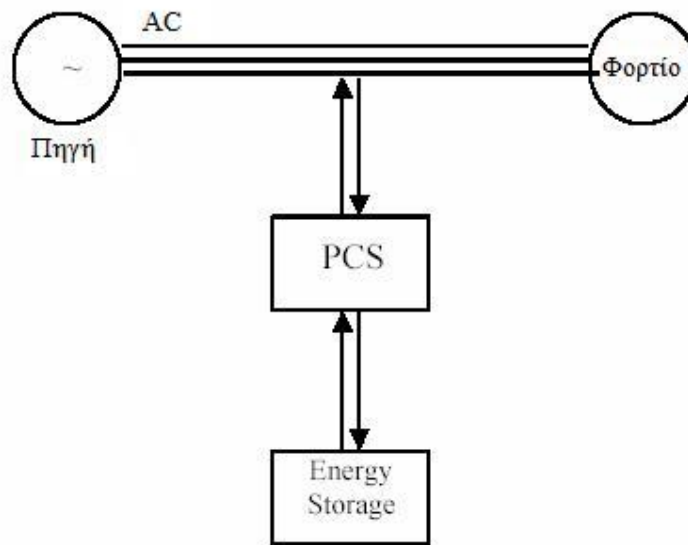
Ένα βασικό χαρακτηριστικό της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι δε μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεσματικά και οικονομικά σε μεγάλες ποσότητες. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια τη χρονική στιγμή που ζητείται. Η συγκεκριμένη αναγκαιότητα οδηγεί σε εξαιρετικά απαιτητικές και σύνθετες λειτουργίες του ηλεκτρικού συστήματος, όπως η εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης, καθώς και η διατήρηση της ασφάλειάς του.

Γενικότερα, ποικίλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας έχουν προταθεί ως πιθανές λύσεις για έναν αριθμό ζητημάτων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να τονιστεί, ότι η αποθήκευση, εκτός των άλλων βοηθά ενεργά και στην αύξηση της αξίας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Τέλος, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύονται οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και απαριθμούνται τα τεχνικά οφέλη που προσφέρει η χρήση τους στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μία οικονομική ανάλυση, η οποία αφορά το κόστος εγκατάστασης μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο και αναλύεται ένα ημιεμπειρικό μοντέλο για την πρόβλεψη του χρόνου ζωής τους.

2.2 ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μονάδα αποθήκευσης συνδέεται με το σύστημα ισχύος, όπως δείχνει το Σχήμα 2.1. Συγκεκριμένα, αποτελείται από ένα σύστημα μετατροπής ισχύος (Power Conditioning System – PCS) και τη μονάδα αποθήκευσης (Storage Unit). Αναλυτικότερα, το PCS είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος, το οποίο μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από AC σε DC για τις μονάδες αποθήκευσης, και αντίστοιχα από AC σε DC κατά την έγχυση της ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο[7].



Σχήμα 2.1: Σύνδεση μονάδας αποθήκευσης με το ηλεκτρικό δίκτυο

Γενικότερα, υπάρχουν περίπου 90 GW αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας, το 3 % της συνολικής ισχύος που παράγεται, η οποία χρησιμοποιείται σε ολόκληρο τον πλανήτη. Φυσικά, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τοποθετούνται μονάδες αντλησιοταμίευσης ως μονάδες αποθήκευσης. Όμως, οι νέες εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης (Pump - hydro storage) δεν επεκτείνονται, αντίθετα περιορίζονται λόγω της μικρής διαθεσιμότητας χώρων.

Ωστόσο, ο προβληματισμός για τη διαθεσιμότητα χώρων περιορίζεται εάν οι υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης αποτελούνται από μικρότερες μονάδες αποθήκευσης στο σύστημα διανομής. Η συγκεκριμένη έννοια είναι γνωστή ως καταναεμημένη αποθήκευση ενέργειας (Distributed Energy Storage - DES) .

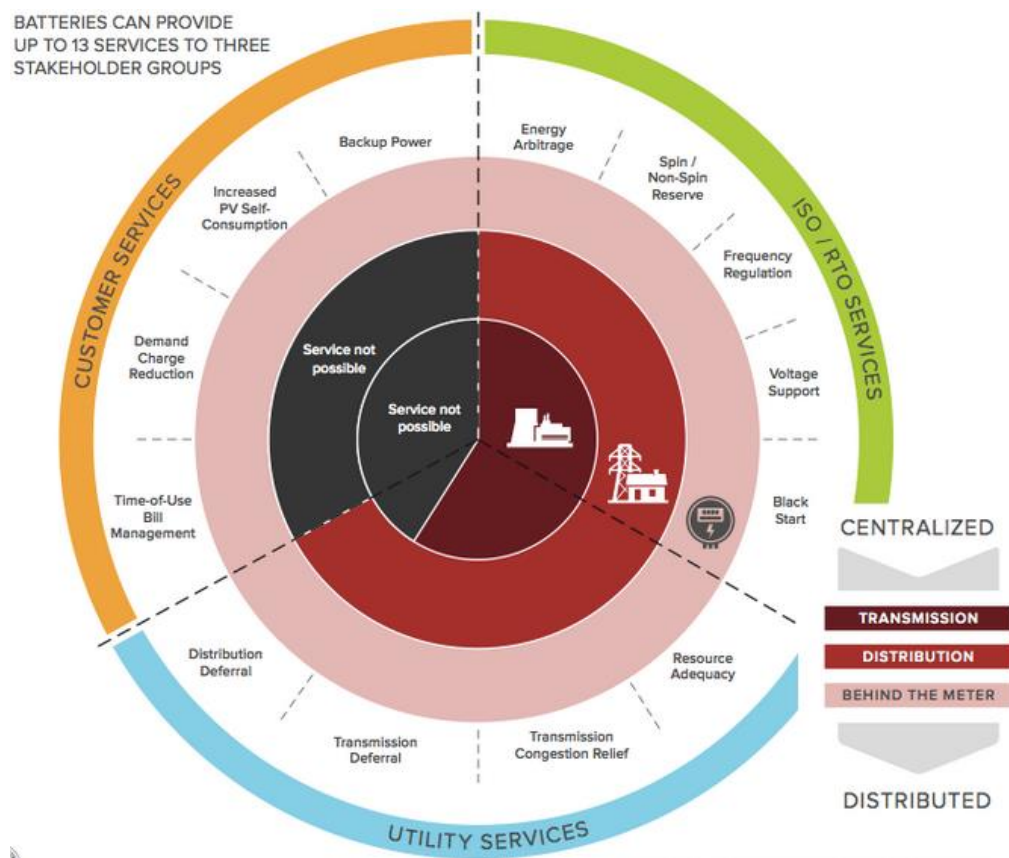
Η DES, λοιπόν, ενδέχεται στο μέλλον να είναι πιο σημαντική και να καταγράφει πολύ υψηλότερη διείσδυση από ότι η καταναεμημένη παραγωγή ισχύος (Distributed Generation - DG). Αναλυτικότερα, οι τεχνολογίες DES περιλαμβάνουν τις μπαταρίες (batteries), τους σφόνδλους (flywheels), τους υπερ-πυκνωτές (Supercapacitors) και τα υπεραγωγία πηνία (SMES). Άλλωστε, από τις συγκεκριμένες τεχνολογίες, οι μπαταρίες και οι σφόνδυλοι είναι εκείνες οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνότερα. Εν αντιθέσει, οι τεχνολογίες αντλησιοταμίευσης και συμπίεσης αέρα (Compressed air system storage) αφενός είναι ογκώδης και αφετέρου απαιτούν συγκεκριμένες ανάγκες χώρου. Για αυτούς ακριβώς τους δύο λόγους, δε χρησιμοποιούνται στο κομμάτι της DES.

Όσον αφορά τα οφέλη της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, είναι τα εξής:

1. **Υποστήριξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας:** Η αποθήκευση μπορεί να μειώσει τις διακυμάνσεις στην παραγόμενη αιολική και ηλιακή ενέργεια. Επίσης, επιτρέπει την πώληση της καθαρής ενέργειας σε περιόδους, όπου η kWh καταγράφει υψηλότερη τιμή.
2. **Αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος:** Η αποθήκευση επιτρέπει στα φορτία να τροφοδοτούνται, ακόμα και όταν υπάρχει διακοπή ρεύματος.

3. **Έλεγχος άεργης ισχύος, διόρθωση συντελεστή ισχύος και της τάσης:** Τα ηλεκτρονικά ισχύος των μονάδων αποθήκευσης παρέχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν γρήγορα την άεργο καθώς και την ενεργό ισχύ.
4. **Ισοστάθμιση φορτίου:** Οι μπαταρίες φορτίζονται την περίοδο όπου η ηλεκτρική ενέργεια έχει χαμηλό κόστος (χαμηλό φορτίο) και εκφορτίζονται τη χρονική περίοδο που συμβαίνει το αντίστροφο (υψηλό φορτίο). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, βελτιωμένο συντελεστή φορτίου, αναβολή της επέκτασης των μονάδων παραγωγής και μειωμένη ανταλλαγή ενέργειας με τους σταθμούς, οι οποίοι καλύπτουν τα φορτία αιχμής (υψηλό κόστος).
5. **Εφεδρεία συστήματος:** Λόγω της ικανότητας των μπαταριών να προσαρμόζουν γρήγορα την ισχύ που εγχέουν στο σύστημα μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος, μπορούν να λειτουργούν και ως εφεδρεία του συστήματος. Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ανάγκη για τη χρήση συμβατικών σταθμών παραγωγής ως εφεδρικές μονάδες.
6. **Αναβολή αναβάθμισης ηλεκτρικών γραμμών:** Οι ορθά τοποθετημένες μονάδες αποθήκευσης είναι δυνατό να φορτίζονται σε περιόδους εκτός αιχμής, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τη μέγιστη φόρτιση των γραμμών μεταφοράς και αυξάνοντας αποτελεσματικά την ικανότητα τους στη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος.
7. **Αναβολή εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής:** Λιγότερες μονάδες παραγωγής για την κάλυψη του φορτίου αιχμής απαιτούνται. Αυτό συμβαίνει, μιας και κατά την αποθήκευση μειώνεται το φορτίο αιχμής (μέρος του καλύπτεται από την αποθηκευμένη ενέργεια).
8. **Υποστήριξη της κατανεμημένης παραγωγής (DG):** Οι μονάδες αποθήκευσης επιτρέπουν στις DG, όπως μικροστρόβιλοι και κυψέλες καυσίμου, να λειτουργούν με σταθερή παραγωγή, μειώνοντας παράλληλα τη χρήση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων. Συγκεκριμένα, η εκφόρτιση των DES συστημάτων τις ώρες της αιχμής, μειώνουν με τη σειρά τους την απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύ σε DG.
9. **Ευστάθεια του συστήματος:** Οι διακυμάνσεις της ισχύος και της συχνότητας μπορεί να μειωθούν, μεταβάλλοντας σε μικρά χρονικά διαστήματα την ενεργό και άεργο ισχύ, που εγχέει η μονάδα αποθήκευσης στο δίκτυο. Βέβαια, το βελτιωμένο όριο ευστάθειας πραγματοποιείται μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος των DES συστημάτων.
10. **Μειωμένη χρήση καυσίμων – Περιβαλλοντικά Οφέλη:** Η χρήση των λιγότερο αποδοτικών μονάδων παραγωγής που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των φορτίων αιχμής, αντικαθίσταται από τις μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες φορτίζονται από τους αποδοτικούς σταθμούς βάσης. Εξαιτίας του ότι οι μονάδες κάλυψης αιχμής χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φυσικό αέριο, η μείωση της χρήσης τους αποφέρει επιπρόσθετα οφέλη, τα οποία αντικατοπτρίζονται στη μείωση της κατανάλωσης του συγκεκριμένου καυσίμου. Πέρα από το όφελος της μείωσης της χρήσης του φυσικού αερίου, μειώνονται και οι εκπομπές ρύπων. Επίσης, μέσω της βελτίωσης του συντελεστή ισχύος του συστήματος οι απώλειες μειώνονται, με αποτέλεσμα τη μείωση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται συγκεκριμένα οι διάφορες υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν οι μπαταρίες ως μονάδες αποθήκευσης στα δίκτυα[19].



Σχήμα 2.2: Υπηρεσίες που προσφέρουν οι μπαταρίες στο δίκτυο.

2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Οι πιο συνηθισμένες τεχνολογίες ηλεκτρικών μπαταριών αναλύονται παρακάτω:

Μπαταρίες μολύβδου – οξέος: Οι συγκεκριμένες μπαταρίες είναι οι πιο διαδεδομένες παγκοσμίως και ο παλιότερος τύπος επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Είναι ιδανικές για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας (μικρό ποσοστό αυτοεκφόρτισης). Όμως, ο βασικός περιοριστικός παράγοντας αυτού του είδους των μπαταριών είναι η μικρή διάρκεια ζωής τους. Βέβαια, ο μικρός κύκλος ζωής τους, εξισορροπείται από το χαμηλό κόστους τους. Για αυτό ακριβώς το λόγο, είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μπαταρίες για φωτοβολταϊκά συστήματα. Τέλος, τα συστήματα μολύβδου – οξέος βελτιώνονται σταδιακά με διάφορους τρόπους (π.χ. μέσω της χρήσης των ηλεκτρολυτών σε μορφή gel).

Μπαταρίες νικελίου – καδμίου: Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου (αλκαλικές μπαταρίες), παρόλο που είναι ακριβότερες από τις παραπάνω έως και τέσσερις φορές, έχουν διπλάσιο χρόνο ζωής. Επίσης, λόγω του ότι δεν απαιτείται παρακολούθηση κατά τη λειτουργία τους, είναι δυνατό να τοποθετηθούν σε απομακρυσμένες περιοχές με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες. Όμως, στα

μειονεκτήματά τους, εκτός από το κόστος τους, συγκαταλέγονται και η μεγάλη διάρκεια ζωής των τοξικών αποβλήτων τους, καθώς και η πεπερασμένη ποσότητα καδμίου στον πλανήτη. Γενικότερα, οι συγκεκριμένες μπαταρίες βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στις επικοινωνίες και τον ιατρικό εξοπλισμό. Μια εναλλακτική πρόταση, η οποία λύνει το πρόβλημα των τοξικών αποβλήτων είναι οι μπαταρίες Ni-MH (nickel – metal hydride), οι οποίες χαρακτηρίζονται από λιγότερη τοξική συμπεριφορά, μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και μεγάλο χρόνο ζωής.

Μπαταρίες ιόντων-λιθίου: Οι συγκεκριμένες μπαταρίες παρουσιάζουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και ενεργειακή απόδοση, καθώς και μεγαλύτερο κύκλο ζωής, σε σχέση με τις δύο κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενώ απαιτούν εξαιρετικά μικρή συντήρηση. Επίσης, οι μπαταρίες αυτές είναι κατά πολύ ελαφρύτερες από τις συνηθισμένες, λόγω του ότι χρησιμοποιούν το στοιχείο λίθιο (το ελαφρύτερο στερεό στοιχείο). Αφενός λόγω του μικρού τους βάρους και αφετέρου λόγω της μεγάλης απόδοσής τους, βρίσκουν πολλές εφαρμογές στα κινητά τηλέφωνα και στους φορητούς υπολογιστές. Βέβαια, έχει αρχίσει και η δυνατότητα επέκτασης της χρήσης μπαταριών λιθίου - ιόντος και σε εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα των μπαταριών λιθίου είναι το υψηλό κόστος τους, λόγω των κυκλωμάτων προστασίας τους, ενώ παρουσιάζουν μειωμένη περιβαλλοντική επίδραση λόγω της ανακυκλωσιμότητας των υλικών που χρησιμοποιούν.

Μπαταρίες Ροής (ZnBr): Οι μπαταρίες ροής αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του συστήματος αποθήκευσης είναι ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης εξαρτάται αποκλειστικά από την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρολυτών, ενώ η ισχύς καθορίζεται από την ενεργό περιοχή της στοιβάς του στοιχείου (cell stack). Αυτό καθιστά την ενέργεια και τη ισχύ ανεξάρτητα μεγέθη και γίνεται λόγω του διαχωρισμού του ηλεκτρολύτη και της cell stack. Σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, είναι πιο αποδοτικές και έχουν μεγαλύτερο χρόνο εκφόρτισης. Επίσης, λόγω της άμεσης ανταπόκρισής τους από τη λειτουργία φόρτισης ή εκφόρτισης, τις καθιστούν κατάλληλες για την εγκατάστασή τους σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

2.4 ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ

Στη συγκεκριμένη υποενότητα θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός του κόστους ένταξης των μπαταριών ως μονάδων αποθήκευσης. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής [16], [18]:

Το συνολικό κόστος κεφαλαίου (Total Capital Cost – TCC) των μονάδων αποθήκευσης (Energy Storage Systems – ESSs) είναι άθροισμα τριών όρων:

- Κόστος Μονάδων Αποθήκευσης (SUC)
- Κόστος Ηλεκτρονικών Ισχύος (PCS)
- Κόστος Υπόλοιπων Κατασκευαστικών Μερών (BOP)

όπου:

$$PCS = \text{Unit Cost of PCS (€/kW)} \cdot \sum P_b (k), \quad P_b \text{ η ονομαστική ισχύς των μπαταριών} \quad (2.1)$$

$$\text{SUC} = \text{Unit Cost of SUC (€/kWh)} \cdot \sum E_{\text{bss}} (k), \quad E_{\text{bss}} \text{ η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών} \quad (2.2)$$

$$\text{BOP} = \text{Unit Cost of BOP (€/kW)} \cdot \sum P_b (k), \quad P_b \text{ η ονομαστική ισχύς των μπαταριών} \quad (2.3)$$

Συνεπώς, το συνολικό κόστος κεφαλαίου (TCC) ισούται με:

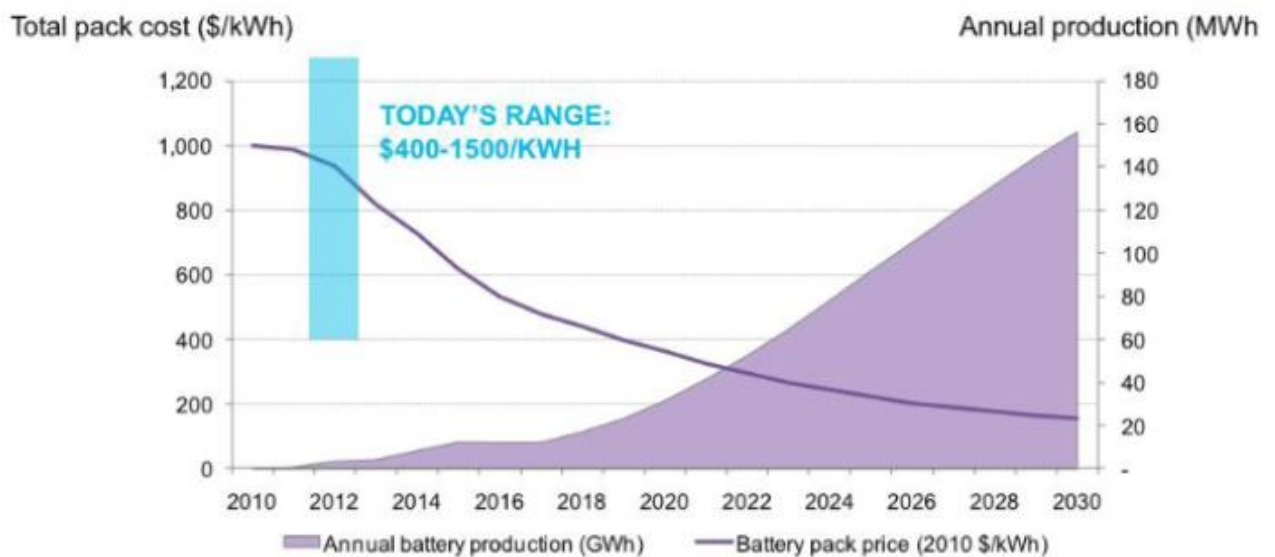
$$\text{TCC} = \text{PCS} + \text{SUC} + \text{BOP} \quad (2.4)$$

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M Cost) ισούται με:

$$\text{OMC} = \text{Unit Cost of OM (€/kW)} \cdot \sum P_b (k) \quad (2.5)$$

Στη συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθούν για τις προσομοιώσεις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Οι μπαταρίες αυτές αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο αποθηκευτικό μέσο και από διάφορες μελέτες προβλέπεται πολύ μεγάλη αύξηση στην ενσωμάτωσή τους στα ηλεκτρικά δίκτυα. Όπως όμως προαναφέρθηκε το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους είναι το πολύ μεγάλο κόστος τους. Επίσης πρέπει να αναφερθεί πως αυτή η τεχνολογία, κυρίως λόγω της μεγάλης πυκνότητας ενέργειας της, χρησιμοποιείται ευρέως στα ηλεκτρικά οχήματα.

Η αύξηση της ζήτησης τους έχει σαν αποτέλεσμα, να καταστούν τα τελευταία χρόνια κύριο αντικείμενο της έρευνας, με σκοπό την βελτίωση της απόδοσής τους, αλλά και την μείωση της τιμής. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα, από το 2010 έως το 2015 η τιμή τους σχεδόν υποδιπλασιάστηκε, ενώ παράλληλα η ετήσια παραγωγή είχε ραγδαία αύξηση. Τα επόμενα χρόνια αναμένεται επίσης σημαντική μείωση στην τιμή τους, γεγονός που δεν μπορεί να αγνοηθεί κατά την μελέτη μιας επένδυσης σε αυτή την τεχνολογία. Στη συνέχεια της εργασίας οι τιμές που φαίνονται στο σχήμα 2.3 λαμβάνονται υπόψη κατά τη λύση του προβλήματος της διαστασιολόγησης και βέλτιστης τοποθέτησης των μπαταριών στο δίκτυο[20].



Διάγραμμα 2.3: Καμπύλη πρόβλεψης των μπαταριών ιόντων λιθίου.

2.5 ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ LI- ION

Όπως σε όλες τις τεχνολογίες μπαταριών, έτσι και στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, η ονομαστική χωρητικότητα τους φθίνει με τον χρόνο σαν συνάρτηση ορισμένων παραγόντων. Αυτοί οι παράγοντες είναι το επίπεδο φόρτισης της (State of charge-SoC), η θερμοκρασία της μπαταρίας, ο χρόνος, ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης (C-rate), ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης της και το βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge- DoD). Παρακάτω αναλύονται οι έννοιες που αναφέρθηκαν[14],[13]:

- **Ονομαστική χωρητικότητα (Q_n ή E_n):** Πρόκειται για την χωρητικότητα που έχει η μπαταρία στην αρχή της ζωής της, δηλαδή όταν κατασκευάστηκε.
- **Εναπομένουσα χωρητικότητα (Q_r ή E_r):** Η εναπομένουσα χωρητικότητα είναι αυτή που έχει η μπαταρία σε κάποια χρονική στιγμή. Προφανώς σε μια καινούρια μπαταρία η εναπομένουσα χωρητικότητα ισούται με την ονομαστική.
- **Κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης (Cycle):** Ένας κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης μπορεί να είναι είτε πλήρης (full-cycle), είτε μισός (half-cycle). Με τον όρο half-cycle εννοούμε την φόρτιση ή εκφόρτιση της μπαταρίας, ξεκινώντας από το σημείο στο οποίο η μπαταρία άλλαξε την λειτουργία της, μέχρι το σημείο στο οποίο η λειτουργία της εναλλάσσεται πάλι. Για παράδειγμα ένας μισός κύκλος θεωρείται ότι ξεκινάει όταν η μπαταρία αρχίζει να φορτίζει, ενώ προηγουμένως εκφορτιζόταν, έως ότου μπει πάλι σε φάση εκφόρτισης και αντίστροφα. Με τον όρο πλήρη κύκλο εννοούμε το άθροισμα δύο συμμετρικών, ίδιου βάθους εκφόρτισης και αντίθετης φοράς μισών κύκλων.
- **Επίπεδο φόρτισης (SoC):** Ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που είναι διαθέσιμη η μπαταρία να δώσει σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, προς την εναπομένουσα χωρητικότητα που έχει εκείνη τη στιγμή. Συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό % και δίνεται από τον τύπο:

$$\text{SoC}(t) = \frac{Q_a(t)}{Q_r} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

όπου $Q_a(t)$ η ενέργεια που έχει διαθέσιμη να δώσει η μπαταρία την χρονική στιγμή t .
0% SoC σημαίνει πως η μπαταρία είναι άδεια, ενώ 100% SoC σημαίνει πως η είναι γεμάτη.

- **Βάθος εκφόρτισης (DoD):** Ορίζεται ως το ποσοστό της ενέργειας που έδωσε ή δέχτηκε η μπαταρία σε κάποια φάση της, προς την εναπομένουσα χωρητικότητα, ή αλλιώς η διαφορά δύο διαδοχικών SOC. Δίνεται από τον τύπο:

$$\text{DoD} = |\text{SoC}(t_{\text{end}}) - \text{SoC}(t_{\text{start}})| \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

όπου t_{end} και t_{start} οι χρόνοι έναρξης και λήξης της φόρτισης/εκφόρτισης.

- **Ρυθμός φόρτισης (C-Rate):** Είναι ένα μέτρο που δείχνει πόσο καταπονείται η μπαταρία κατά την φόρτιση/εκφόρτιση της. 1C-rate σημαίνει πως το ρεύμα που φορτίζει/εκφορτίζει

την μπαταρία είναι τέτοιο, ώστε μια γεμάτη μπαταρία θα ξεφορτιστεί σε 1 ώρα. Συγκεκριμένα η τιμή αυτού του παράγοντα δίνεται από τον τύπο:

$$C = \frac{|I| \cdot (1h)}{Qr}, \quad (2.8)$$

- **Θερμοκρασία της μπαταρίας (T):** Είναι η μέση θερμοκρασία που παρατηρείται στην μπαταρία μετρημένη σε Κέλβιν.
- **Χρόνος (t):** Είναι ο χρόνος, στον οποίο παρατηρούμε την μείωση της χωρητικότητας της και στην παρούσα εργασία μετριέται σε χρόνια.
- **Συντελεστής γήρανσης (L):** Δηλώνει το ποσοστό μείωσης της χωρητικότητάς της, είναι ο λόγος της εναπομένουσας χωρητικότητας προς την ονομαστική. Φυσικά ο συντελεστής L είναι πάντοτε μικρότερος ή ίσος της μονάδας.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο για την πρόβλεψη του χρόνου ζωής της μπαταρίας, δηλαδή ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο προσαρμόζεται έτσι ώστε να ταιριάζει με τις πειραματικές μετρήσεις που πάρθηκαν από συγκεκριμένο μοντέλο μπαταριών. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο ο συντελεστής γήρανσης της μπαταρίας δίνεται από τον παρακάτω τύπο[14]:

$$L = p_{SEI} \cdot e^{-r_{SEI} \cdot f_d(SoC, DoD, C, T, n, N, t)} + (1 - p_{SEI}) \cdot e^{-f_d(SoC, DoD, C, T, n, N, t)}, \quad (2.9)$$

όπου f_d είναι η γραμμικοποιημένη συνάρτηση γήρανσης της μπαταρίας, η οποία θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω, η μεταβλητή n δηλώνει αν ο κύκλος είναι πλήρης ή μισός και παίρνει αντίστοιχα τις τιμές 1 και 0.5 και p_{SEI} , r_{SEI} συντελεστές που υπολογίζονται έτσι ώστε η θεωρητική συνάρτηση να ταιριάζει με τις πειραματικές μετρήσεις.

Η γραμμικοποιημένη συνάρτηση f_d αποτελείται από δύο μέρη, το ένα δίνει την γήρανση της μπαταρίας ως προς τους κύκλους φόρτισης που έχει πραγματοποιήσει και το άλλο δίνει την ‘φυσική’ γήρανση της, δηλαδή την πτώση της χωρητικότητας της που υφίσταται με την πάροδο του χρόνου, ακόμη κι αν η μπαταρία έμεινε αχρησιμοποίητη. Έτσι έχουμε:

$$f_d = f_{cycle}(DoD, SoC, T, n, C, N) + f_{cal}(t, SoC_{avg}, T_{avg}), \quad (2.10)$$

$$DoD = (DoD_1, DoD_2, DoD_3, \dots, DoD_N), \quad (2.11)$$

$$SoC = (SoC_1, SoC_2, SoC_3, \dots, SoC_N), \quad (2.12)$$

$$C = (C_1, C_2, C_3, \dots, C_N), \quad (2.13)$$

$$T = (T_1, T_2, T_3, \dots, T_N), \quad (2.14)$$

$$n=(n_1,n_2,n_3,\dots,n_N), \quad (2.15)$$

$$SoC_{avg}=\frac{\sum_{i=1}^N SoCi}{N}, \quad (2.16)$$

$$T_{avg}=\frac{\sum_{i=1}^N Ti}{N}, \quad (2.17)$$

όπου N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης.

Οι συναρτήσεις f_{cycle} και f_{cal} δίνονται παρακάτω:

$$f_{cyc}(SoC,DoD,C,T,n,N)=\sum_{i=1}^N fSoC(SoCi) \cdot fDoD(DoDi) \cdot fC(Ci) \cdot fT(Ti) \cdot ni, \quad (2.18)$$

$$f_{cal}(t,SoCavg,Tavg) = f_t(t) \cdot f_{SoC}(SoCavg) \cdot f_T(Tavg), \quad (2.19)$$

όπου f_{DoD} , f_{SoC} , f_T , f_C , f_t συναρτήσεις με τους παρακάτω τύπους:

$$f_{DoD}(DoD) = (k_{DoD1} \cdot DoD^{k_{DoD2}} + k_{DoD3})^{-1}, \quad (2.20)$$

$$f_{SoC}(SoC) = e^{k_{SoC}(SoC-SoCref)^2}, \quad (2.21)$$

$$f_C(C) = e^{k_C(C-Cref)}, \quad (2.22)$$

$$f_T(T) = e^{k_T(T-Tref) \cdot Tref/T}, \quad (2.23)$$

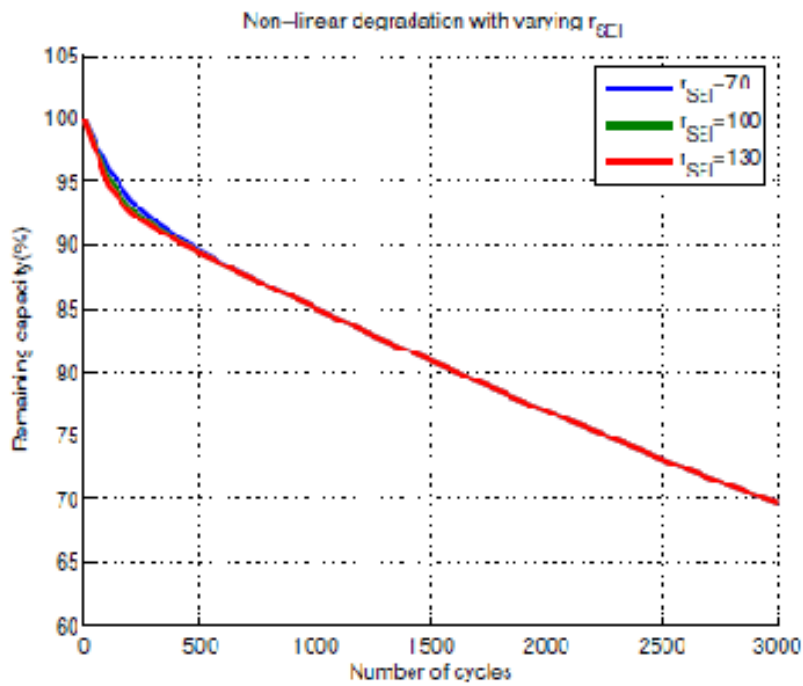
$$f_t(t) = k_t \cdot t, \quad (2.24)$$

T_{ref} , SoC_{ref} , C_{ref} οι τιμές αναφοράς των μεγεθών που στην συγκεκριμένη εργασία παίρνουν τις τιμές 25°C, 0.50, 1 αντίστοιχα και k_{DoD1} , k_{DoD2} , k_{DoD3} , k_{SoC} , k_T , k_C , k_t , σταθερές που υπολογίζονται έτσι ώστε να ταιριάζει το θεωρητικό μοντέλο με τις πειραματικές μετρήσεις.

Οι τιμές όλων των σταθερών του παραπάνω μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα. Επίσης στο διάγραμμα 2.5 φαίνεται η γενική μορφή που έχει η καμπύλη μείωσης της ικανότητας της μπαταρίας με την πάροδο του χρόνου, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου r_{SEI} [14].

Nonlinear Degradation Model
$P_{SEI} = 0.0575, r_{SEI} = 121$
DoD Stress Model
$k_{DoD1} = 8.95 \cdot 10^4, k_{DoD2} = -0.486, k_{DoD3} = -7.28 \cdot 10^4$
SoC Stress Model
$k_{SoC} = 1.04, SoC_{ref} = 0.5$
Temperature Stress Model
$k_T = 0.0693, T_{ref} = 25^\circ C$
C-Rate Stress Model
$k_c = 0.263, C_{ref} = 1$
Calendar Ageing Model
$k_t = 4.14 \cdot 10^{-10}/s$

Πίνακας 2.4: Πίνακας των συντελεστών του ημιεμπειρικού μοντέλου



Διάγραμμα 2.5: Μείωση της χωρητικότητας με μεταβλητές τιμές της παραμέτρου r_{SEI}

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μαθηματικός Προγραμματισμός (mathematical programming) ή αλλιώς μαθηματική βελτιστοποίηση, είναι η επιλογή των κατάλληλων τιμών των μεταβλητών του προβλήματος, μέσα από ένα επιτρεπτό σύνολο, με στόχο την μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας ή περισσότερων συναρτήσεων. Η γενική μορφή ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού είναι η παρακάτω:

Έστω οι πραγματικές συναρτήσεις $g_i, h_i, f: A \rightarrow \mathbb{R}$, όπου A κάποιο σύνολο του \mathbb{R}^n , $i=1,2..k$ και το διάνυσμα $x \in X$ με X υποσύνολο του \mathbb{R}^n .

$$\text{Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης } f(x) \tag{3.1}$$

$$\text{Υπό τους περιορισμούς: } h_i(x) \leq 0, \quad i=1,2..k, \tag{3.2}$$

$$g_i(x) = 0, \quad i=1,2..k, \tag{3.3}$$

$$x \in X, \quad x=(x_1, x_2, \dots, x_n), \tag{3.4}$$

Η σχέση (3.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, δηλαδή την συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Η σχέση (3.2) καλείται περιορισμός ανισότητας, η σχέση (3.3) περιορισμός ισότητας και η σχέση (3.4) περιορίζει το πρόβλημα στο σύνολο των εφικτών τιμών της μεταβλητής-διάνυσμα x .

3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Το γενικό πρόβλημα του μαθηματικού προγραμματισμού, ανάλογα με την μορφή των συναρτήσεων και του συνόλου των εφικτών λύσεων, μπορεί να ταξινομηθεί σε πολλές κατηγορίες. Παρακάτω διατυπώνονται οι μορφές των κυριότερων κατηγοριών του μαθηματικού προγραμματισμού.

3.2.1 Γραμμικός Προγραμματισμός (LP):

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

Υπό τους περιορισμούς: $h_i(x) \leq 0, \quad i=1,2..k$

$g_i(x)=0, \quad i=1,2..m$

$x \in X, \quad x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$

όπου οι συναρτήσεις $h_i(x)$, $g_i(x)$ και $f(x)$ είναι γραμμικές συναρτήσεις της μεταβλητής x .

3.2.2 Μη γραμμικός προγραμματισμός (NLP):

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

Υπό τους περιορισμούς: $h_i(x) \leq 0, \quad i=1,2..k$

$g_i(x)=0, \quad i=1,2..k$

$x \in X, \quad x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$

όπου τουλάχιστον μία από τις συναρτήσεις $h_i(x)$, $g_i(x)$ και $f(x)$ είναι μη γραμμική συνάρτηση της μεταβλητής x .

3.2.3 Τετραγωνικός προγραμματισμός (Quadratic programming-QP):

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

Υπό τους περιορισμούς: $h_i(x) \leq 0, \quad i=1,2..k$

$g_i(x)=0, \quad i=1,2..k$

$x \in X, \quad x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$

όπου η συνάρτηση $f(x)$ είναι τετραγωνική συνάρτηση της μεταβλητής x και οι συναρτήσεις $h_i(x)$, $g_i(x)$ είναι γραμμικές.

3.2.4 Ακέραιος προγραμματισμός (Integer programming-IP):

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

Υπό τους περιορισμούς: $h_i(x) \leq 0, \quad i=1,2..k$

$g_i(x)=0, \quad i=1,2..k$

$x \in X, \quad x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$

όπου μία ή περισσότερες από τις μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n ανήκουν στο σύνολο των ακέραιων.

3.2.5 Μεικτός ακέραιος προγραμματισμός (Mixed integer programming-MIP):

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

Υπό τους περιορισμούς: $h_i(x) \leq 0, \quad i=1,2..k$

$g_i(x)=0, \quad i=1,2..k$

$x \in X, \quad x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$

όπου τουλάχιστον μία από τις μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n ανήκει στο σύνολο των πραγματικών αριθμών και οι υπόλοιπες στο σύνολο των ακέραιων.

3.2.6 Κυρτός προγραμματισμός (Convex programming):

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $f(x)$

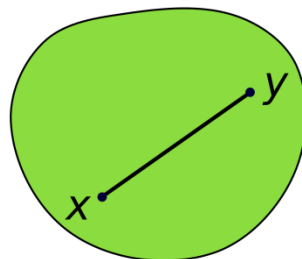
Υπό τους περιορισμούς: $h_i(x) \leq 0, \quad i=1,2..k$

$g_i(x)=0, \quad i=1,2..k$

$x \in X, \quad x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$

όπου οι συναρτήσεις $h_i(x), f(x)$ είναι κυρτές, οι συναρτήσεις $g_i(x)$ είναι αφινικές, καθώς επίσης και το σύνολο X είναι κυρτό σύνολο του Ευκλείδειου χώρου.

Κυρτό σύνολο του Ευκλείδειου χώρου θεωρείται το σύνολο στο οποίο οποιοδήποτε ευθύγραμμο τμήμα ενώνει δύο στοιχεία του συνόλου βρίσκεται εντός αυτού. Παρακάτω φαίνεται γραφικά ο ορισμός του κυρτού συνόλου.



Σχήμα 3.1: Η πράσινη περιοχή αναπαριστά το κυρτό σύνολο.

Κυρτή συνάρτηση καλείται η συνάρτηση στην οποία οποιαδήποτε ευθεία που ενώνει δύο σημεία της γραφικής της παράστασης βρίσκεται πάνω από την συνάρτηση ή πάνω σε αυτήν. Η μαθηματική διατύπωση του παραπάνω ορισμού είναι η εξής:

Έστω X κυρτό σύνολο σε πραγματικό διανυσματικό χώρο και συνάρτηση $f: X \rightarrow \mathbb{R}$.

Η f καλείται κυρτή συνάρτηση αν:

$$\forall x_1, x_2 \in X, \forall t \in [0,1]: f(tx_1 + (1-t)x_2) \leq tf(x_1) + (1-t)f(x_2), \quad (3.5)$$

Η σημαντικότερη ιδιότητα μιας κυρτής συνάρτησης είναι πως κάθε τοπικό ελάχιστο είναι και ολικό. Αυτό μας εξασφαλίζει ότι αν με κάποιο τρόπο βρούμε ένα τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης τότε θα έχουμε βρει και το ολικό επομένως το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει λυθεί.

3.2.7 Θετικά ημιορισμένος προγραμματισμός (Semidefinite programming-SDP)

Έστω $X, C \in S^n$ ή αλλιώς πίνακες μεγέθους $n \times n$

$$\text{Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης } C \cdot X := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

$$\text{Υπό τους περιορισμούς: } A_i \cdot X = b_i, \quad i=1,2..k$$

$$M_i \cdot X \leq q_i, \quad i=1,2..k$$

$$X \geq 0,$$

Ο θετικά ημιορισμένος προγραμματισμός είναι μια υποκατηγορία του κυρτού προγραμματισμού και αποτελεί ένα καινούριο εργαλείο της μαθηματικής βελτιστοποίησης από το 1990. Πήρε το όνομα του από τον περιορισμό που θέτει τον πίνακα των μεταβλητών απόφασης θετικά ημιορισμένο. Ένας πίνακας X θεωρείται θετικά ημιορισμένος αν ισχύει η σχέση:

$$A^* X A \geq 0 \text{ για κάθε } A \in C^n, \text{ όπου } A^* \text{ ο συζυγής του πίνακα } A, \quad (3.6)$$

3.3 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (MULTI OBJECTIVE OPTIMIZATION)

Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι μια κατηγορία της μαθηματικής βελτιστοποίησης, στην οποία καλούνται προς ελαχιστοποίηση (μεγιστοποίηση) περισσότερες από μία συναρτήσεις, οι οποίες πολλές φορές είναι αντικρουόμενες, δηλαδή η ελαχιστοποίηση της μιας μπορεί να απαιτεί την μεγιστοποίηση της άλλης. Σε αντίθεση με την κλασική μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση που παρουσιάστηκε παραπάνω, κατά την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση δεν υπάρχει ένα μοναδικό ολικό ελάχιστο που ελαχιστοποιεί όλες τις συναρτήσεις ταυτόχρονα, αλλά ένα σύνολο από εφικτές λύσεις που αποτελούν το σύνολο Pareto του προβλήματος, ένα σύνολο δηλαδή από λύσεις-trade offs που καμία δεν 'κυριαρχεί' της άλλης.

Ας θεωρήσουμε το διάνυσμα των συναρτήσεων προς βελτιστοποίηση ως $f: R^n \rightarrow R^m$ όπου $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ αποτελεί το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης. Ένα διάνυσμα μεταβλητών απόφασης x' λέγεται ότι κυριαρχεί το διάνυσμα x κατά Pareto αν για κάποιες συναρτήσεις f_i ισχύει $f_i(x') < f_i(x)$ και ταυτόχρονα $f_k(x') = f_k(x)$, όπου $i \neq k, i = [1, 2, 3, \dots, m], k = [1, 2, 3, \dots, m]$. Δηλαδή όταν το διάνυσμα x' σε σχέση με το διάνυσμα x , βελτιώνει μια ή περισσότερες συναρτήσεις χωρίς όμως να χειροτερεύει τις υπόλοιπες. Αν για τα δύο διανύσματα δεν ισχύει η παραπάνω σχέση σημαίνει πως καμιά από τα δύο εφικτές λύσεις δεν κυριαρχεί της άλλης και επομένως αποτελούν δύο ισοδύναμες

λύσεις. Το σύνολο που αποτελείται από όλες αυτές τις ισοδύναμες λύσεις λέγεται σύνολο Pareto του προβλήματος.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- **A priori μέθοδοι:**

Κατά τις a priori μεθόδους το trade-off μεταξύ των κριτηρίων γίνεται προτού λυθεί το πρόβλημα. Η πιο σημαντική από αυτές τις μεθόδους είναι η μέθοδος των βαρών (sum-weighted method), κατά την οποία όλες οι συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση αθροίζονται σε μία ενιαία συνάρτηση πολλαπλασιασμένες με έναν κατάλληλο συντελεστή και κατά συνέπεια το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με την βοήθεια των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την κλασική μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Δύο βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι, πως χρειάζεται εκ των προτέρων γνώση για το τι βαρύτητα θα δώσουμε σε κάθε κριτήριο και επίσης για διαφορετικά βάρη θα προκύψει και διαφορετική βέλτιστη λύση κατά Pareto.

- **A posteriori μέθοδοι:**

Κατά τις a posteriori μεθόδους το πρόβλημα λύνεται και παράγεται το σύνολο Pareto από το οποίο μπορεί να επιλεγεί η κατάλληλη λύση του προβλήματος σύμφωνα με την προσωπική εκτίμηση αυτού που καλείται να το λύσει.

- **Διαδραστικές μέθοδοι**

Κατά τις διαδραστικές μεθόδους ο επιλυτής μπορεί να δώσει πληροφορίες για την βαρύτητα μεταξύ των κριτηρίων κατά την διάρκεια επίλυσης του προβλήματος. Σε κάθε βήμα παράγεται ένα σύνολο από εφικτές λύσεις τις οποίες χρησιμοποιεί ο επιλυτής για να κατευθύνει την αναζήτηση προς την τελική λύση.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η συνάρτηση $f(x)$ μπορεί να καλείται να μεγιστοποιηθεί, άρα προφανώς η συνάρτηση $-f(x)$ να ελαχιστοποιηθεί. Έτσι όλα τα προβλήματα μπορούν να αναχθούν στην γενική μορφή που παρουσιάστηκε παραπάνω. Για κάθε κατηγορία έχουν αναπτυχθεί και διαφορετικοί αλγόριθμοι που λύνουν αποδοτικά το πρόβλημα, μερικοί από αυτούς είναι ο αλγόριθμος simplex, αλγόριθμοι εσωτερικών σημείων (interior point algorithms), οι τεχνικές χαλάρωσης κατά Lagrange, ο αλγόριθμος διακλάδωσης και οριοθέτησης (branch & bound), οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι artificial intelligent αλγόριθμοι όπως ο αλγόριθμος PSO (Particle swarm optimization), ο αλγόριθμος bee colony κ.α.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

4.1 ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Τα βασικά στοιχεία ενός διασυνδεδεμένου δικτύου παραγωγής και μεταφοράς είναι οι ζυγοί και οι γραμμές. Η ισχύς διακινείται μεταξύ των διαφόρων ζυγών από τις θέσεις παραγωγής προς τα φορτία, ανάλογα με τις διαθέσιμες γραμμές και τις τάσεις των ζυγών. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης ισχύος, απωλειών και φορτίων και η ισορροπία αυτή διέπεται από σταθερή συχνότητα λειτουργίας και σταθερές τάσεις ζυγών[7].

Για τις μελέτες ροών φορτίου ορίζονται τρεις τύποι ζυγών:

-Ζυγοί Φορτίου (PQ), στους οποίους είναι γνωστές οι ισχείς ζήτησης και άγνωστη είναι η τάση,

-Ζυγοί Παραγωγής (PV), όπου είναι γνωστά η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης και προσδιορίζονται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης,

-Ζυγός Ταλαντώσεως ή Αναφοράς (slack bus), ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής, χρησιμοποιούμενος για να αντισταθμίσει τις απώλειες του δικτύου, που δεν είναι γνωστές από την αρχή και για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Στο ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία και προσδιορίζονται οι ισχείς παραγωγής.

Η μαθηματική ανάλυση του προβλήματος καταλήγει στη διαμόρφωση ενός συστήματος $2N$ μη γραμμικών εξισώσεων, όπου N ο αριθμός των κόμβων-ζυγών του δικτύου. Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το ισοδύναμο Π με ανηγμένες παραμέτρους και τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά. Οι μεταβλητές του προβλήματος είναι δ ανά ζυγό, P_G η παραγόμενη ενεργός ισχύς, Q_G η παραγόμενη άεργος ισχύς, P_D η ενεργός ισχύς φορτίου, Q_D η άεργος ισχύς φορτίου, V το μέτρο της τάσης του ζυγού και δ η γωνία της. Στο σύστημα των N ζυγών υπάρχουν συνολικά $6N$ μεταβλητές. Σε κάθε ζυγό μπορεί να προσδιοριστεί η έγχυση ισχύος στον ζυγό από τη σχέση[2]:

$$\tilde{\mathbf{S}} = \tilde{\mathbf{S}}_G - \tilde{\mathbf{S}}_D = P_G - P_D + j(Q_G - Q_D) = P + jQ, \quad (4.1)$$

Για το ρεύμα του ζυγού ισχύει:

$$\tilde{\mathbf{J}} = \frac{P - jQ}{\tilde{\mathbf{V}}^*}, \quad (4.2)$$

Για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας N ζυγών οι $2N$ εξισώσεις ρών φορτίου έχουν την εξής μορφή:

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| [g_{ji} \cos(\delta_j - \delta_i) - b_{ji} \sin(\delta_j - \delta_i)] \quad (4.3)$$

$$-Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| [g_{ji} \sin(\delta_j - \delta_i) + b_{ji} \cos(\delta_j - \delta_i)] \quad (4.4)$$

όπου $y_{ji} = g_{ji} + jb_{ji}$ είναι η σύνθετη αγωγιμότητα.

Από τις παραπάνω εξισώσεις διαπιστώνετε ότι οι εξισώσεις ρών φορτίου συνδέουν ισχύ, τάση και γωνίες, δηλαδή τις τρεις χαρακτηριστικές μεταβλητές του προβλήματος. Οι εξισώσεις είναι αλγεβρικές και μη γραμμικές, γι' αυτό η αναλυτική επίλυσή τους είναι δύσκολη. Συνήθως χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης με τη βοήθεια υπολογιστή. Η εύρεση της καταλληλότερης λύσης βασίζεται σε ορισμένα κριτήρια και περιορισμούς που πρέπει να τηρηθούν σε κάθε περίπτωση. Συνήθως είναι γνωστή η ζήτηση του φορτίου των ζυγών δηλαδή οι $2N$ μεταβλητές διαταραχής που αποτελούν τα βασικά δεδομένα του προβλήματος. Ορίζονται $2N$ μεταβλητές από τις ισχείς παραγωγής και τις τάσεις και προσδιορίζονται από την επίλυση των εξισώσεων οι υπόλοιπες $2N$ άγνωστες μεταβλητές. Η οικονομική λειτουργία των μονάδων επιβάλλει ορισμένες τιμές της παραγόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων σε κάθε περίπτωση. Για τους ζυγούς φορτίου είναι πάντοτε $P_G = 0$ ενώ η άεργος ισχύς Q_G είναι είτε μηδενική είτε έχει ορισμένη τιμή αν προέρχεται από χωρητική αντιστάθμιση. Τα επίπεδα τάσεως ορισμένων ζυγών έχουν στενά όρια τιμών. Οι διασυνδέσεις με γειτονικά συστήματα επιβάλλουν ορισμένες υποχρεώσεις ανταλλαγών. Από τις τάσεις των ζυγών προδιαγράφονται οι πιο σημαντικές και αφήνονται ως άγνωστες οι λιγότερο περιορισμένες. Οι περισσότερες από τις απομένουσες $2N$ άγνωστες μεταβλητές είναι οι γωνίες δ , οι οποίες προσδιορίζονται από την επίλυση των εξισώσεων. Οι λύσεις που προκύπτουν πρέπει να ικανοποιούν όρια και περιορισμούς όπως :

- Οι τάσεις των ζυγών: $|V_i|_{\min} < |V| < |V_i|_{\max}$, (4.5)

- Οι γωνιακές διαφορές ορισμένων ζυγών: $|\delta_j - \delta_i| < |\delta_j - \delta_i|_{\max}$, (4.6)

- Οι ισχείς παραγωγής: $P_{Gi, \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi, \max}$, (4.7)

$$Q_{Gi, \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, \max}, \quad (4.8)$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη ενδεχόμενες ειδικές συνθήκες. Εάν τελικά η λύση δώσει τιμές μεταβλητών εκτός ορίων, η επίλυση επαναλαμβάνεται, αφού προηγουμένως τροποποιηθούν οι τιμές, προς την κατεύθυνση βελτίωσης των τιμών των αγνώστων. Οι ψηφιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των ρών φορτίου μπορούν να λύσουν τις μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις των ρών για μεγάλα συστήματα με εκατοντάδες ζυγούς με απώλειες, με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι δυο βασικές μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι η μέθοδος Gauss-Seidel και η μέθοδος Newton-Raphson. Και οι δύο μέθοδοι ξεκινούν από μια αρχική λύση και με διαδοχικές ανακυκλώσεις προσεγγίζουν την τελική λύση. Η αρχική λύση χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του προβλήματος για να βρεθεί μια καινούρια καλύτερη λύση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η λύση να είναι απολύτως ικανοποιητική και να επιτευχθεί σύγκλιση.

4.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

4.2.1 Κίνητρα

Σε ολόκληρο τον κόσμο τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται αλλαγές στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας . Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατόν να γίνει από διάφορες μονάδες, κρατικές και ιδιωτικές και το πρόβλημα που ανακύπτει είναι η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας ,ώστε αυτή να διανέμεται με τον βέλτιστο τρόπο και να καλύπτει τη ζήτηση κάθε χρονική στιγμή. Τα επιμέρους προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα ακόλουθα[7], [12]:

Προβλήματα Ελέγχου

- Υπολογισμός της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς σε πραγματικό χρόνο,
- Έλεγχος της ροής φορτίου σε πραγματικό χρόνο,
- Αντιμετώπιση της συμφόρησης του δικτύου με τον πιο οικονομικό τρόπο.

Οικονομικά Προβλήματα

- Τιμολόγηση πραγματικού χρόνου και διαχείριση κινδύνου τιμολόγησης
- Λειτουργία του συστήματος με τον πιο οικονομικό τρόπο
- Καθορισμός της αξίας των βοηθητικών υπηρεσιών για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ευελιξίας.

Προβλήματα Προσομοίωσης

- Ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης,
- Εργαλεία για την ανταλλαγή και παρουσίαση της απαραίτητης πληροφορίας , που επιτρέπουν καλύτερη διαχείριση του συστήματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος της βέλτιστης ροής φορτίου(OPF) ως το εργαλείο για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων. Η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου. Χρησιμοποιεί μεταβλητές ελέγχου για να ελαχιστοποιήσει το κόστος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, παρέχει χρήσιμη πληροφορία για την οικονομική λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η βέλτιστη ροή φορτίου ανταποκρίνεται στην επίλυση των προβλημάτων ελέγχου και οικονομικής λειτουργίας.

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου αρχικά συζητήθηκε από τον Carpentier το 1962. Επειδή πρόκειται για ένα πολύ μεγάλο, μη γραμμικό πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού, χρειάστηκαν δεκαετίες για να αναπτυχθούν αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για την επίλυσή του. Κάποιες από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους είναι οι λ- επαναληπτικές μέθοδοι, η μέθοδος της κλίσης και η μέθοδος Newton. Δύο επιπλέον τεχνικές επίλυσης είναι η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού και η μέθοδος εσωτερικού σημείου.Μια συνοπτική περιγραφή των πλεονεκτημάτων των μεθόδων είναι η ακόλουθη:

Λ-επαναληπτικές μέθοδοι: Οι απώλειες μπορούν να αναπαρασταθούν από έναν πίνακα [B] και οι παράγοντες σφαλμάτων μπορούν να υπολογιστούν εξωτερικά από μια ροή ισχύος. Αυτή η μέθοδος αποτελεί τη βάση για πολλά προγράμματα οικονομικής κατανομής φορτίου on-line.

Gradient methods-Μέθοδοι Κλίσης: Αυτές οι μέθοδοι έχουν αργή απόκριση και είναι δύσκολο να επιλυθούν όταν υπάρχουν ανισοτικοί περιορισμοί.

Μέθοδος Newton : έχει πολύ γρήγορη απόκριση αλλά μπορεί να εμφανίσει πρόβλημα αν υπάρχουν ανισοτικοί περιορισμοί.

Μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού: Είναι μία από τις πλήρως ανεπτυγμένες μεθόδους με ευρεία εφαρμογή και χρήση. Επεξεργάζεται εύκολα περιορισμούς ανισοτήτων. Μη γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί μπορούν να επεξεργαστούν μετά από γραμμικοποίηση.

Μέθοδος εσωτερικού σημείου: Ακόμη μία πλήρως ανεπτυγμένη και με ευρεία εφαρμογή μέθοδος για την επίλυση της βέλτιστης ροής ισχύος. Επεξεργάζεται εύκολα περιορισμούς ανισοτήτων. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η βέλτιστη ροή φορτίου αναφέρεται στη λειτουργία μόνιμης κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

4.2.2 Στόχοι της βέλτιστης ροής φορτίου

Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση της βέλτιστης ροής φορτίου θα αναφερθούμε στους στόχους που πρέπει να επιτύχει . Ο πρωταρχικός στόχος της βέλτιστης ροής φορτίου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους για την κάλυψη της ζήτησης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, διατηρώντας ταυτόχρονα την ασφάλεια του συστήματος. Τα κόστη που συνδέονται με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρουν ανάλογα με την περίπτωση, αλλά γενικά αναφέρονται κυρίως στο κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε γεννήτρια. Από τη σκοπιά της βέλτιστης ροής ισχύος, η διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος απαιτεί κάθε στοιχείο του συστήματος να λειτουργεί στα επιθυμητά όρια ασφαλείας μόνιμης κατάστασης. Αυτό περιλαμβάνει το ελάχιστο και μέγιστο όριο εξόδου της γεννήτριας, τη μέγιστη ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές καθώς και τη διατήρηση των τάσεων των ζυγών του συστήματος στα καθορισμένα όρια.

Για να επιτύχει το στόχο της η βέλτιστη ροή φορτίου πραγματοποιεί όλους τους ελέγχους στις συναρτήσεις μόνιμης κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συναρτήσεις περιλαμβάνουν τον έλεγχο των γεννητριών και της μεταφοράς. Για τις γεννήτριες η OPF ελέγχει τις εξόδους MW και την τάση. Για το σύστημα μεταφοράς, η OPF περιλαμβάνει τον έλεγχο του λόγο λήψεων των μετασχηματιστών ή της γωνία αλλαγής φάσης για μεταβλητούς μετασχηματιστές, τον έλεγχο των μεταβλητών αγωγιμοτήτων και τον έλεγχο όλων των μεταβλητών στοιχείων του εναλλασσόμενου δικτύου μεταφοράς.

Ένας δεύτερος στόχος της OPF είναι ο προσδιορισμός των δεδομένων οριακού κόστους του συστήματος. Τα δεδομένα κόστους αφορούν στην τιμολόγηση των ανταλλαγών MW καθώς και άλλων υπηρεσιών όπως υποστήριξη της τάσης μέσω ελέγχου της άεργου ισχύος. Κατά την επίλυση της OPF με χρήση της μεθόδου Newton, τα δεδομένα οριακού κόστους προκύπτουν ως προϊόν της επίλυσης.

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος αφορά στην επίτευξη του ελάχιστου κόστους παραγωγής. Ταυτόχρονα απαιτείται ο βέλτιστος υπολογισμός να εξισορροπεί ολόκληρη την ροή ισχύος. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να πάρει διάφορες μορφές εκτός από αυτήν της ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής. Συνηθίζεται να εκφράζεται η βέλτιστη ροή ισχύος ως η ελαχιστοποίηση των ηλεκτρικών απωλειών σε ένα σύστημα μεταφοράς ή ως η ελάχιστη απόκλιση

της παραγωγής και άλλων ελέγχων από ένα βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Μπορούμε να επιτρέψουμε την προσαρμογή των φορτίων για να προσδιορίσουμε το πρόγραμμα ελάχιστου φορτίου για συνθήκες εκτάκτου ανάγκης. Ανεξάρτητα από την αντικειμενική συνάρτηση, η βέλτιστη ροή φορτίου πρέπει να λυθεί, ώστε όλοι οι περιορισμοί ισχύος να περιλαμβάνονται και να ικανοποιούνται στη λύση.

4.2.3 Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου

Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται στη βέλτιστη ροή ισχύος συνήθως πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, όπως στη μεταφορά ισχύος μπορεί το πρόβλημα να διατυπωθεί με τέτοιο τρόπο που να απαιτείται μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Συμβολίζουμε την αντικειμενική συνάρτηση με f . Οι εξισώσεις που εξασφαλίζουν ότι ικανοποιούνται οι περιορισμοί συμβολίζονται ως [7]:

$$g(z) = 0, \quad (4.9)$$

Θεωρούμε ότι η μεταβλητή z είναι διάνυσμα. Το διάνυσμα αυτό περιέχει τους ελέγχους, τα μέτρα των τάσεων των ζυγών και τις γωνίες των φάσεων, καθώς και τις σταθερές παραμέτρους του συστήματος. Οι μεταβλητές διακρίνονται σε ομάδες μεταβλητών κατάστασης, μεταβλητών ελέγχου και σταθερών παραμέτρων. Η βέλτιστη ροή ισχύος μπορεί να επιλυθεί για την εύρεση βέλτιστης λύσης με ανισοτικούς περιορισμούς σε εξαρτημένες μεταβλητές, όπως ροή ισχύος στις γραμμές. Οι περιορισμοί μπορούν να αναπαρασταθούν ως εξής:

$$h^- \leq h(z) \leq h^+, \quad (4.10)$$

Επιπλέον τα όρια πρέπει να τοποθετηθούν απευθείας στις μεταβλητές κατάστασης ή τις μεταβλητές ελέγχου:

$$z^- \leq z \leq z^+, \quad (4.11)$$

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση) της αντικειμενικής συνάρτησης, περιλαμβάνει περιορισμούς ισότητας, ανισοτικούς περιορισμούς και όρια των μεταβλητών κατάστασης και των μεταβλητών ελέγχου.

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

4.3.1 Ορισμός ευαισθησίας σε ένα σύστημα

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η μελέτη του πώς αντιδρά ένα συγκεκριμένο σύστημα σε μια μεταβολή των εισόδων του. Πιο συγκεκριμένα, είναι μια τεχνική ανάλυσης των επιδράσεων που έχει η μεταβολή συστηματικά μεταβαλλόμενων μεταβλητών εισόδου ενός μοντέλου στην έξοδο του. Χάρη

στην ανοχή στις τιμές των παθητικών στοιχείων, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία, καθώς και σε επίπεδα αναφοράς τάσεων και ρευμάτων, η ανάλυση ευαισθησίας είναι μια χρήσιμη τεχνική στην

ανάλυση ροής ισχύος σε δίκτυα διανομής. Βοηθά στον προσδιορισμό της επίδρασης κάθε μεταβολής εισόδου εντός ορίου ανοχής στο σύστημα και στο αποτέλεσμα που έχει στη συνολική λειτουργία του μοντέλου.

4.3.2 Κλασική θεωρία ευαισθησίας στα δίκτυα διανομής

Η κλασική θεωρία ευαισθησίας που χρησιμοποιείται στην ανάλυση δικτύων υψηλής τάσης για την εφαρμογή πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης τάσης βασίζεται στον πίνακα Jacobian και φανερώνει τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων των κόμβων(πλάτος και γωνία) και των εγχύσεων ισχύος(ενεργού και αέργου). Οι σχέσεις που αναφέρονται παραπάνω αναπαρίστανται από την ακόλουθη έκφραση πινάκων[6]:

$$\begin{bmatrix} [\Delta E] \\ [\Delta \theta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

όπου τα $[\Delta E]$ και $[\Delta \theta]$ είναι αντίστοιχα, οι πίνακες των μέτρων των τάσεων στους κόμβους (σε ενεργό τιμή) και των μεταβολών στη φάση τους που αντιστοιχούν στις εγχύσεις ενεργού ή αέργου ισχύος στους κόμβους, που εκφράζονται σε μητρική μορφή $[\Delta P^*]$ και $[\Delta Q^*]$. Ο πίνακας $I = \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix}$ είναι ο μοναδιαίος πίνακας.

Η εξίσωση (3.2.1) μπορεί να ξαναγραφτεί ως εξής:

$$\begin{bmatrix} [\Delta E] \\ [\Delta \theta] \end{bmatrix} = [s] \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

όπου:

$$[s] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix}, \quad (4.14)$$

είναι ο πίνακας Ευαισθησίας.

4.3.3 Αναλυτική περιγραφή της κλασικής θεωρίας ευαισθησίας

Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα ευαισθησίας λαμβάνονται από τον αντίστροφο του πίνακα Jacobian που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων των ζυγών του δικτύου με τη μέθοδο ροής φορτίου Newton-Raphson. Η μέθοδος Newton-Raphson είναι μια επαναληπτική μέθοδος προσέγγισης ροής φορτίου, στην οποία οι τάσεις των ζυγών παίρνουν κάποιες αρχικές τιμές και μεταβάλλονται επαναλαμβανόμενα μέχρι η μεταβολή στις μετρούμενες τιμές της τάσης να είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη τάση κατωφλίου. Η επαναληπτική αυτή μέθοδος περιγράφεται από τη σχέση[6]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \vdots \\ \Delta\theta_n \\ \frac{\Delta|E_2|}{|E_2|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta|E_n|}{|E_n|} \end{bmatrix} = [J^{-1}] \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

όπου $\Delta\theta_i$: η απόλυτη τιμή της μεταβολής της φάσης στον ζυγό i
 $\Delta|E_i|/|E_i|$: η απόλυτη τιμή της Εκατοστιαίας Πτώσης Τάσης στον ζυγό i
 $[J^{-1}]$: ο αντίστροφος του πίνακα Jacobian

Σε συμβατικές εφαρμογές ροής ισχύος, οι μεταβολές ισχύος ΔP_j και ΔQ_j δίνονται από τις διαφορές μεταξύ της εγχυόμενης στον ζυγό j ισχύος και των τιμών που υπολογίζονται βάσει των μετρημένων τιμών των τάσεων στην τελευταία επανάληψη και της μήτρας αγωγιμότητας Y . Επίσης, ορίζεται ένας ζυγός αναφοράς η τάση του οποίου ορίζεται σε μια προκαθορισμένη τιμή. Στην περίπτωση ενός δικτύου Μέσης Τάσης ο ζυγός αυτός είναι ο ζυγός του μετασχηματιστή που βρίσκεται στην πλευρά Μέσης Τάσης.

Μόλις η μέθοδος επίλυσης ροής φορτίου συγκλίνει, ο πίνακας Jacobian προσδιορίζει τις μερικές παραγώγους των P_j , Q_j ως προς το μέτρο της τάσης $|E_i|$ και ως προς τη φάση θ_i , σε συνάρτηση με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Μια έκφραση του πίνακα Jacobian είναι η εξής[6]:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} & |E_2| \frac{\partial P_2}{\partial |E_2|} & \dots & |E_n| \frac{\partial P_2}{\partial |E_n|} \\ \vdots & & J_{11} & \vdots & & J_{12} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & |E_2| \frac{\partial P_n}{\partial |E_2|} & \dots & |E_n| \frac{\partial P_n}{\partial |E_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_n} & |E_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |E_2|} & \dots & |E_n| \frac{\partial Q_2}{\partial |E_n|} \\ \vdots & & J_{21} & \vdots & & J_{22} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & |E_2| \frac{\partial Q_n}{\partial |E_2|} & \dots & |E_n| \frac{\partial Q_n}{\partial |E_n|} \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

Από τις σχέσεις (4.15), (4.16) προκύπτει ότι η μεταβολή του μέτρου της τάσης στο ζυγό i είναι[6]:

$$\Delta|E_i| \approx \sum_j \left(\frac{\partial|E_i|}{\partial P_j} \Delta P_j + \frac{\partial|E_i|}{\partial Q_j} \Delta Q_j \right), \quad (4.17)$$

όπου ΔP_j και ΔQ_j είναι οι μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος στον κόμβο j , και οι όροι $\partial|E_i|/\partial P_j$, $\partial|E_i|/\partial Q_j$ δείχνουν πώς μεταβάλλεται η τάση στον ζυγό i λόγω μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος στον κόμβο j . Οι όροι αυτοί ονομάζονται όροι ευαισθησίας.

Από τη ροή φορτίου λαμβάνεται ο πίνακας Jacobian, κι έπειτα υπολογίζεται ο αντίστροφός του:

$$[J^{-1}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_2}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial P_2} & \left| & \frac{\partial \theta_2}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial Q_2} \\ \vdots & J'_{11} & \vdots & & \vdots & J'_{21} & \vdots \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial P_n} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial P_n} & \left| & \frac{\partial \theta_2}{\partial Q_n} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial Q_n} \\ \hline \frac{1}{|E_2|} \frac{\partial |E_2|}{\partial P_2} & \dots & \frac{1}{|E_n|} \frac{\partial |E_n|}{\partial P_2} & \left| & \frac{1}{|E_2|} \frac{\partial |E_2|}{\partial Q_2} & \dots & \frac{1}{|E_n|} \frac{\partial |E_n|}{\partial Q_2} \\ \vdots & J'_{12} & \vdots & & \vdots & J'_{22} & \vdots \\ \frac{1}{|E_2|} \frac{\partial |E_2|}{\partial P_n} & \dots & \frac{1}{|E_n|} \frac{\partial |E_n|}{\partial P_n} & \left| & \frac{1}{|E_2|} \frac{\partial |E_2|}{\partial Q_n} & \dots & \frac{1}{|E_n|} \frac{\partial |E_n|}{\partial Q_n} \right. \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

Για ακτινικά δίκτυα, χρειάζεται μόνο το μέτρο της τάσης για τον έλεγχο των τάσεων στους κόμβους. Επομένως, για ακτινικά δίκτυα, ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, για όλους τους κόμβους του δικτύου, θα προκύπτει από τη ροή φορτίου ως εξής:

$$[s_{P-all}] = [J'_{12}] \begin{bmatrix} |E_2| \\ \vdots \\ |E_n| \end{bmatrix}, \quad (4.19)$$

ενώ ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος θα είναι ίσος με:

$$[s_{Q-all}] = [J'_{22}] \begin{bmatrix} |E_2| \\ \vdots \\ |E_n| \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

Έστω ότι οι κόμβοι του δικτύου, πλην του ζυγού αναφοράς, ανήκουν στο σύνολο $nodes = \{2, \dots, n\}$. Έστω το σύνολο των ζυγών φορτίου $loads$, για το οποίο προφανώς ισχύει ότι: $loads \subset nodes$. Τότε, ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, που αντιστοιχεί στους ζυγούς φορτίου, θα είναι:

$$[s_{P-jac}] = [s_{P-all}(loads, loads)], \quad (4.21)$$

ενώ ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος, που αντιστοιχεί στους ζυγούς φορτίου, θα είναι ίσος με:

$$[s_{Q-jac}] = [s_{Q-all}(loads, loads)], \quad (4.22)$$

Δηλαδή και στις δύο περιπτώσεις λαμβάνονται από τις (4.19), (4.20) μόνον οι γραμμές και στήλες που αντιστοιχούν στους ζυγούς φορτίου.

Πλέον, η σχέση (4.17) γράφεται σε μητρική μορφή για όλους τους ζυγούς φορτίου ($\forall i \in loads$):

$$[\Delta E] \approx [s_{P-jac}][\Delta P] + [s_{Q-jac}][\Delta Q], \quad (4.23)$$

ΚΥΡΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως ήδη έχει ειπωθεί, το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου μπορεί να λυθεί με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Στα δίκτυα υπερυψηλής, υψηλής και μέσης τάσης η γραμμικοποίηση των μη γραμμικών εξισώσεων ροής φορτίου μπορεί να επιτευχθεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, με την βοήθεια της dc ροής φορτίου ή την μέθοδο Newton-Raphson. Το πρόβλημα έγκειται στην γραμμικοποίηση αυτών των εξισώσεων στα δίκτυα διανομής, καθώς η ωμική αντίσταση R των γραμμών, όχι μόνο δεν είναι αμελητέα, αλλά πολλές φορές παίρνει και μεγαλύτερες ανά μονάδα τιμές σε σχέση με τις επαγωγικές αντιδράσεις των κλάδων. Επομένως η dc ροή φορτίου αποτελεί μια κακή προσέγγιση του προβλήματος, ενώ η μέθοδος Newton-Raphson σε πολλές περιπτώσεις δεν συγκλίνει. Ένας τρόπος επίλυσης της βέλτιστης ροής φορτίου είναι με την χρήση μη γραμμικού προγραμματισμού, όμως λόγω της μη κυρτότητας των μη γραμμικών περιορισμών, το πρόβλημα υπάγεται στην κατηγορία των NP-HARD και η λύση του με κάποιον εμπορικό αλγόριθμο (solver) δεν μας εξασφαλίζει πως το τοπικό ελάχιστο που θα πάρουμε ως αποτέλεσμα θα είναι και το ολικό, παρά μόνο αν γνωρίζουμε την γενική κατάσταση του δικτύου και δώσουμε ως είσοδο στον αλγόριθμο ένα κατάλληλο αρχικό διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης.

Την τελευταία δεκαετία εφαρμόστηκε για πρώτη φορά η μέθοδος του θετικά ημιορισμένου προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου, εξασφαλίζοντας με την ικανοποίηση ορισμένων συνθηκών, πως η λύση θα είναι το ολικό ελάχιστο του προβλήματος. Παρακάτω καθορίζεται πλήρως το πρόβλημα [8], [9], [10], [11].

5.2 Η ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΩΣ ΘΕΤΙΚΑ ΗΜΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Αρχικά διατυπώνεται η αρχική μορφή του προβλήματος (πρόβλημα I) και έπειτα καθορίζεται το δυαδικό θετικά ημιορισμένο πρόβλημα (πρόβλημα II), ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η διαδικασία μετασχηματισμού του. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θεωρείται ως αντικειμενική συνάρτηση η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου, αναλόγως μπορεί να θεωρηθεί και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής [8], [9], [10], [11].

Μεταβλητές του προβλήματος I

Έστω N ο αριθμός των ζυγών του προβλήματος, M ο αριθμός των ζυγών φορτίου και $N-M$ ο αριθμός των ζυγών παραγωγής. Οι μεταβλητές απόφασης είναι οι εξής:

$P_i, Q_i, P_{Gi}, Q_{Gi}, V_i,$

όπου είναι αντίστοιχα η έγχυση ενεργού ισχύος, η έγχυση αέργου ισχύος, η ενεργός ισχύς παραγωγής, η αέργος ισχύς παραγωγής και το διάνυσμα τάσης του i ζυγού.

Περιορισμοί του προβλήματος I

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι οι εξής:

Περιορισμοί ισότητας

$$P_i - jQ_i = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^N V_j Y_{ij}, \quad (5.1)$$

$$P_i + jQ_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}), \quad (5.2)$$

οι οποίες εκφράζουν το ισοζύγιο ισχύος στον ζυγό i και αποτελούν την μιγαδική εξίσωση ροής φορτίου.

$$P_{ij} = \text{Re}(V_i[V_i - V_j]^* y_{ij}^*), \quad (5.3)$$

όπου εκφράζει την μεταφερόμενη ισχύ από τον ζυγό i στο ζυγό j , ως συνάρτηση των τάσεων του δικτύου

$$V_{\text{slackbus}} = 1 \text{ p.u.}, \quad (5.4)$$

$$|V_k| = a_1, \quad k \text{ ζυγός παραγωγής} \quad (5.5)$$

$$P_{Gk} = a_2, \quad k \text{ ζυγός παραγωγής} \quad (5.6)$$

$$P_{Gm} = a_3, \quad m \text{ ζυγός φορτίου} \quad (5.7)$$

$$Q_{Gm} = a_4, \quad m \text{ ζυγός φορτίου} \quad (5.8)$$

όπου a_1, a_2, a_3, a_4 γνωστές σταθερές

Περιορισμοί ανισότητας

$$|V|_{\min}^2 \leq |V_i|^2 \leq |V|_{\max}^2, \quad (5.9)$$

$$P_{ij} \leq P_{ij\max}, \quad (5.10)$$

οι οποίες αποτελούν τα όρια των τάσεων και των γραμμών μεταφοράς αντίστοιχα.

Σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί, όπως περιορισμοί στην μεταφορά αέργου ισχύος, περιορισμοί στις γωνίες των τάσεων των ζυγών κλπ, όπως επίσης οι ισχύεις

των ζυγών παραγωγής μπορεί να είναι άγνωστες και να αποτελούν μεταβλητές απόφασης π.χ. στο πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου.

Αντικειμενική Συνάρτηση του προβλήματος I

$$\text{Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης: } \sum_{i=1}^N P_i, \quad (5.11)$$

η οποία εκφράζει τις συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο.

Έστω $V=[V_1 \ V_2 \ V_3 \dots \ V_N]^T$ το διάνυσμα-στήλη μεγέθους N , των τάσεων των ζυγών του δικτύου. Ορίζουμε τον τετραγωνικό πίνακα $W=VV^H$ μεγέθους $N \times N$, όπου V^H το Ερμιτιανό διάνυσμα του V . Είναι σαφές ότι το διαγώνιο στοιχείο του πίνακα W , i -γραμμής και i -στήλης, θα ισούται με το τετράγωνο του μέτρου της τάσης του i -ζυγού και το στοιχείο του πίνακα W , i -γραμμής και j -στήλης, θα ισούται με την τάση του i -ζυγού, πολλαπλασιασμένη με την συζυγή τάση του j -ζυγού. Πιο αναλυτικά ο πίνακας W φαίνεται παρακάτω.

$$\begin{bmatrix} |V_1|^2 & V_1V_2^* & V_1V_3^* & \dots & V_1V_N^* \\ V_2V_1^* & |V_2|^2 & V_2V_3^* & \dots & V_2V_N^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_NV_1^* & V_NV_2^* & V_NV_3^* & \dots & |V_N|^2 \end{bmatrix}, \quad (5.12)$$

Μεταβλητές του προβλήματος II

$$P_i, \ Q_i, \ P_{Gi}, \ Q_{Gi}, \ W,$$

όπου είναι αντίστοιχα η έγχυση ενεργού ισχύος, η έγχυση αέργου ισχύος, η ενεργός ισχύς παραγωγής, η άεργος ισχύς παραγωγής του i ζυγού και ο πίνακας W όπως ορίστηκε παραπάνω.

Περιορισμοί του προβλήματος II

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι οι εξής:

Περιορισμοί ισότητας

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^N W_{ji} Y_{ij}, \quad (5.13)$$

$$P_i + jQ_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}), \quad (5.14)$$

οι οποίες εκφράζουν το ισοζύγιο ισχύος στον ζυγό i και αποτελούν την μιγαδική εξίσωση ροής φορτίου.

$$P_{ij} = \text{Re}(W_{ii} - W_{ij}^* y_{ij}^*), \quad (5.15)$$

όπου εκφράζει την μεταφερόμενη ισχύ από τον ζυγό i στο ζυγό j , ως συνάρτηση των στοιχείων του πίνακα W .

$$W_{11} = 1 \text{ p.u.}, \quad 1\text{-ζυγός ταλάντωσης} \quad (5.16)$$

$$|V_k| = a_1, \quad k \text{ ζυγός παραγωγής} \quad (5.17)$$

$$P_{Gk} = a_2, \quad k \text{ ζυγός παραγωγής} \quad (5.18)$$

$$P_{Gm} = a_3, \quad m \text{ ζυγός φορτίου} \quad (5.19)$$

$$Q_{Gm} = a_4, \quad m \text{ ζυγός φορτίου} \quad (5.20)$$

όπου a_1, a_2, a_3, a_4 γνωστές σταθερές

Περιορισμοί ανισότητας

$$|V_{\min}|^2 \leq |W_{ii}| \leq |V_{\max}|^2, \quad (5.21)$$

$$P_{ij} \leq P_{ij\max}, \quad (5.22)$$

$$W \geq 0, \quad (5.23)$$

οι (5.20), (5.21) αποτελούν τα όρια των τάσεων και των γραμμών μεταφοράς αντίστοιχα, ενώ η σχέση (5.22) δηλώνει πως ο W είναι θετικά ημιορισμένος πίνακας.

Σύμφωνα με το Λήμμα 1 στο Μαθηματικό Παράρτημα ,ο βαθμός του πίνακα W ισούται με την μονάδα. Επομένως ένας ακόμη περιορισμός είναι ο εξής:

$$\text{Rank}(W) = 1, \quad (5.24)$$

Αντικειμενική Συνάρτηση του προβλήματος II

$$\text{Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης: } \sum_{i=1}^N P_i, \quad (5.25)$$

η οποία εκφράζει τις συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο.

Όπως φαίνεται από τις σχέσεις (5.13)-(5.25) οι εξισώσεις του προβλήματος II είναι γραμμικές ως προς τα στοιχεία του πίνακα W , όμως ο περιορισμός (5.24) είναι μη κυρτός και επομένως θέτει το πρόβλημα μη κυρτό και προφανώς ίδιας δυσκολίας με το πρόβλημα I. Για να κυρτοποιήσουμε το πρόβλημα και να μπορέσει να λυθεί με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού, αγνοούμε κατά την λύση του τον περιορισμό. Έτσι κατά την λύση του προβλήματος II, αν ο πίνακας W προκύψει μοναδιαίου βαθμού, τότε η λύση αποτελεί και λύση του προβλήματος II και κατά συνέπεια ολικό ελάχιστο του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου. Αν όμως ο βαθμός του πίνακα W προκύψει μεγαλύτερος της μονάδας, τότε η λύση δεν είναι κατά ανάγκη και ολικό ελάχιστο και έτσι είναι αδύνατον να επιλυθεί το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου με αυτή την μεθοδολογία. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει πως στα ακτινικά δίκτυα διανομής κάτω από ορισμένες συνθήκες ικανοποιείται πάντα η σχέση (5.24), [9].

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΓΙΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω της αυξημένης διείσδυσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και των ηλεκτρικών οχημάτων, το πρόβλημα στις τάσεις των ζυγών γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό. Αρμόδιος για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής (Distribution System Operator-DSO). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να παρέμβει ο Διαχειριστής του Δικτύου, όπως για παράδειγμα να ζητήσει από τους διαχειριστές των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής να ρυθμίζουν την τάση στον ζυγό που είναι συνδεδεμένοι εγχέοντας ή καταναλώνοντας άεργο ισχύ, χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα ΣΑΤΥΦ (συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο) στους υποσταθμούς μέσης τάσης ή ακόμα και επενδύοντας σε ΣΑΤΥΦ εφοδιάζοντας το δίκτυο χαμηλής τάσης. Όμως από την μια μεριά για να μπορέσουν οι διαχειριστές των ΔΜΠ να ρυθμίσουν την τάση, απαιτούνται αυτοματισμοί και μετρητές στο δίκτυο χαμηλής τάσης και από την άλλη η εγκατάσταση και συντήρηση των ΣΑΤΥΦ είναι αρκετά δαπανηρή, για αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη εύρεσης εναλλακτικού τρόπου ρύθμισης της τάσης. Ένας τέτοιος τρόπος είναι η εγκατάσταση και χρησιμοποίηση κατανεμημένων μονάδων αποθήκευσης από τον DSO.

Τα τελευταία χρόνια ως καταλληλότερες μονάδες αποθήκευσης θεωρούνται οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, κυρίως λόγω της μεγάλης πυκνότητας ισχύος τους. Παρόλα αυτά, προς το παρόν το κόστος εγκατάστασης και χρήσης αυτών των μπαταριών στα ηλεκτρικά δίκτυα είναι αρκετά υψηλό, όμως μελέτες έχουν δείξει πως τα επόμενα χρόνια θα μειωθεί με γρήγορους ρυθμούς και έτσι η επένδυση σε τέτοιες μονάδες θα καθίσταται βιώσιμη.

Σε αυτή την ενότητα αρχικά θα καθοριστεί πλήρως η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των μπαταριών στα δίκτυα διανομής. Έπειτα παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε και αναλύονται λεπτομερώς τα επιμέρους στάδια του[1].

6.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Αρχικά για την μοντελοποίηση του προβλήματος [1], θεωρούμε ακτινικό δίκτυο διανομής, το οποίο συναντάται και στην πράξη. Το δίκτυο παριστάνεται ως ένα δέντρο (N,E) , όπου N το σύνολο των ζυγών (κόμβων) και E το σύνολο των γραμμών (κλάδων). Η αγωγιμότητα ως προς τη γη, του ζυγού i συμβολίζεται ως y_{ii} , η αγωγιμότητα γραμμής μεταξύ των ζυγών i και j συμβολίζεται ως y_{ij} και φυσικά ισχύει $y_{ij}=y_{ji}$. Η μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου ορίζεται ως εξής[1]:

$$Y_{ij} = \begin{cases} y_{ii} + \sum_{h \neq i} y_{ih} & \text{if } i = j \\ -y_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.1)$$

Συμβολίζουμε με $t=1, 2, 3, \dots$ διακριτά χρονικά βήματα, έτσι η τάση, το ρεύμα, η ενεργός και άεργος ισχύς του ζυγού k την χρονική στιγμή t συμβολίζονται ως $V_k(t)$, $I_k(t)$, $P_k(t)$, $Q_k(t)$ αντίστοιχα. Η μιγαδική εξίσωση ροής φορτίου στο ζυγό k την χρονική στιγμή t δίνεται από τον τύπο[1]:

$$P_k(t) - jQ_k(t) = V_k^*(t)I_k(t) = V_k^*(t) \cdot \sum_{j=1}^N V_j(t) Y_{kj}, \quad (6.2)$$

Ο ζυγός 1 θεωρείται ο ζυγός ταλάντωσης και αποτελεί διασύνδεση του δικτύου διανομής με το δίκτυο μέσης τάσης. Η τάση του ζυγού ταλάντωσης θεωρείται για όλες τις χρονικές στιγμές ίση με την μονάδα, ενώ όλες οι υπόλοιπες τάσεις του δικτύου ικανοποιούν τα όρια τάσης με σχέση[1]:

$$|V|_{\min}^2 \leq |V_k(t)|^2 \leq |V|_{\max}^2, \quad (6.3)$$

όπου $|V|_{\min}$, $|V|_{\max}$ τα όρια τάσης που ορίζει το Διαχειριστής του δικτύου για την ομαλή λειτουργία του.

Το όριο ως προς την μεταφερόμενη ενεργό ισχύ στην γραμμή που ενώνει τους ζυγούς i και j δίνεται από τον τύπο[1]:

$$P_{ij}(t) \leq P_{ij\max}, \quad (6.4)$$

όπου η μεταφερόμενη ισχύς ως προς τις τάσεις του δικτύου δίνεται από τον τύπο[1]:

$$P_{ij}(t) = \operatorname{Re}(V_i(t)[V_i(t) - V_j(t)]^* y_{ij}^*), \quad (6.5)$$

Η τιμή $P_{ij\max}$ ουσιαστικά ορίζει το θερμικό όριο των γραμμών διανομής.

Το σύνολο των ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθεί μπαταρία συμβολίζεται με $S \subseteq N$. Εκ παραδοχής ο ζυγός ταλάντωσης αποκλείεται από υποψήφιος ζυγός προς τοποθέτηση μπαταρίας.

Για κάποιο $s \in S$, συμβολίζεται με $e_s(t)$ η ενέργεια που έχει η μπαταρία στον ζυγό s , την χρονική στιγμή t και με $r_s(t)$ η μέση ενεργός ισχύς που ανταλλάσει η μπαταρία του ζυγού s με το υπόλοιπο δίκτυο την χρονική στιγμή t . Η δυναμική εξίσωση της μεταβλητής $e_s(t)$ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών πρώτης τάξης[1]:

$$e_s(t+1) = e_s(t) + r_s(t)\Delta_t, \quad (6.6)$$

όπου Δ_t είναι το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του προβλήματος (π.χ 1 ώρα, 15 λεπτά κ.α.)

Η μεταβλητή $r_s(t)$ παίρνει θετικές τιμές τις χρονικές στιγμές που η μπαταρία φορτίζει (δηλαδή έχει το ρόλο του φορτίου) και αρνητικές τιμές όταν αποφορτίζει (δηλαδή όταν έχει το ρόλο της γεννήτριας). Επίσης η αρχική κατάσταση των μπαταριών είναι γνωστή και στην παρούσα εργασία την χρονική στιγμή $t=1$ θεωρούνται αφόρτιστες, συνεπώς ισχύει η σχέση[1]:

$$e_s(1)=0, \quad (6.7)$$

Στους ζυγούς που δεν συνδέεται μπαταρία ισχύουν οι σχέσεις[1]:

$$r_h(t)=b_h(t)=0, \quad (6.8)$$

για κάθε χρονική στιγμή όπου $h \in N \setminus S$.

Οι τιμές των μεταβλητών $e_s(t)$, $r_s(t)$ περιορίζονται από την χωρητικότητα των μπαταριών και την ονομαστική ικανότητα του συστήματος μετατροπής ισχύος αντίστοιχα. Επομένως ισχύουν οι δύο παρακάτω περιορισμοί[1].

$$|r_s(t)| \leq R_{smax}, \quad (6.9)$$

$$0 \leq e_s(t) \leq E_s, \quad (6.10)$$

όπου E_s είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας στο ζυγό s και R_{smax} η ονομαστική ισχύς των ηλεκτρονικών ισχύος. Ουσιαστικά οι μεταβλητές E_s και R_{smax} είναι οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος της διαστασιολόγησης των μπαταριών.

Αντίστοιχα με την μέση ενεργό ισχύ που ανταλλάσει η μπαταρία με το δίκτυο, ορίζεται και η μέση άεργος ισχύς που ανταλλάσει η μπαταρία στο ζυγό s την χρονική στιγμή t , ως $b_s(t)$ και ικανοποιεί τον περιορισμό[1]:

$$|b_s(t)| \leq B_{smax}, \quad (6.11)$$

όπου B_{smax} το όριο της άεργου ισχύος που μπορούν να δώσουν οι μετατροπείς και καθορίζεται είτε από τον Διαχειριστή του Δικτύου, ώστε να διατηρείται η ομαλή λειτουργία του δικτύου, είτε η ονομαστική φαινόμενη ισχύς των μετατροπέων.

Όσον αφορά τις ΑΠΕ που συνδέονται στο δίκτυο διανομής, στην παρούσα εργασία χωρίς να επηρεάζει ιδιαίτερος το αποτέλεσμα, γίνεται η θεώρηση πως συνδέονται μικρά φωτοβολταϊκά, τα

οποία είναι ρυθμισμένα ώστε να παρέχουν ισχύ στο δίκτυο υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Παρόλο που πρόκειται για ζυγούς στους οποίους συνδέονται γεννήτριες, το μέτρο της τάσης αφήνεται άγνωστο έτσι θεωρούνται ζυγοί PQ. Συμβολίζονται με $P_k^G(t)$, $Q_k^G(t)$ ενεργός και η άεργος ισχύς αντίστοιχα που παράγεται στον ζυγό k την χρονική στιγμή t . Επίσης συμβολίζονται με $P_k^D(t)$, $Q_k^D(t)$, η συνολική ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων που συνδέονται στον ζυγό k , την χρονική στιγμή t . Σε κάθε ζυγό, κάθε χρονική στιγμή ισχύει η σχέση του ισοζυγίου ισχύος του ζυγού και δίνεται από τους τύπους[1]:

$$P_k(t) = P_k^G(t) - P_k^D(t) - r_k(t), \quad (6.12)$$

$$Q_k(t) = Q_k^G(t) - Q_k^D(t) - b_k(t), \quad (6.13)$$

Ως αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να οριστεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου και του συνολικού κόστους εγκατάστασης και συντήρησης των μπαταριών.

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, το πρόβλημα που καθορίζει τις βέλτιστες θέσεις των μπαταριών, καθώς και την βέλτιστη χωρητικότητα τους είναι πολύ περίπλοκο. Πέρα από τη μη γραμμικότητα της βέλτιστης ροής φορτίου που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5, το πρόβλημα της τοποθέτησης των μπαταριών στους ζυγούς απαιτεί και ακέραιες μεταβλητές απόφασης, οι οποίες εκφράζουν το σύνολο S . Επίσης θα πρέπει να λυθεί για ένα μεγάλο αριθμό χρονικών στιγμών, έτσι η πολυπλοκότητα και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος καθιστούν το πρόβλημα στην κατηγορία NP-Hard.

Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του, πραγματοποιείται μια αποσύμπλεξη της τοποθέτησης και διαστασιολόγησης και μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία βρίσκεται η λύση του προβλήματος. Για να καθοριστούν οι πιθανές θέσεις των μπαταριών λαμβάνεται υπόψη ο πίνακας ευαισθησιών τάσης του δικτύου όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 4, ώστε να επιλεγούν αυτοί οι ζυγοί, στους οποίους η έγχυση ισχύος έχει την μεγαλύτερη επιρροή στην βελτίωση των τάσεων των ζυγών.

Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά ο αλγόριθμος για την επιλογή των υποψήφιων ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθούν μπαταρίες, έπειτα παρουσιάζεται και αναλύεται η διαδικασία της διαστασιολόγησης των μονάδων και τέλος ο συνολικός αλγόριθμος του προβλήματος.

6.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Όπως αναφέρθηκε η επιλογή των κατάλληλων ζυγών για τοποθέτηση μπαταρίας βασίζεται στις ευαισθησίες των τάσεων των ζυγών ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος και αποτελείται από τρία βήματα. Αρχικά το δίκτυο χωρίζεται σε n_c υποδίκτυα, όπου $n_c \leq N$, έπειτα σε κάθε ένα από αυτά τα υποδίκτυα εντοπίζονται οι υποψήφιοι ζυγοί προς τοποθέτηση μπαταρίας και τέλος γίνεται η τελική επιλογή των ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθούν οι μονάδες αποθήκευσης. Παρακάτω αναλύεται ο αλγόριθμος βήμα – βήμα:

6.3.1 Αλγόριθμος συσταδοποίησης(clustering)

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την τμηματοποίηση του δικτύου βασίζεται στην ιεραρχική συσταδοποίηση. Οι ζυγοί του δικτύου ομαδοποιούνται σε έναν δοσμένο αριθμό ‘υποδικτύων’ με στόχο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των ευαισθησιών τάσης, των συνδέσεων που αφαιρέθηκαν κατά την τμηματοποίηση. Ουσιαστικά με αυτό τον τρόπο κάθε τμήμα

θα αποτελείται από ζυγούς οι οποίοι έχουν μεταξύ τους μεγάλους συντελεστές ευαισθησιών τάσης. Γενικά το πρόβλημα για την ομαδοποίηση στοιχείων με στόχο, την μείωση του άθροισματος των βαρών των συνδέσεων που αφαιρέθηκαν αποκαλείται Max-Cut problem και έχει αποδειχτεί πως ανήκει στην κατηγορία των NP-complete προβλημάτων. Συνεπώς ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε δεν εξασφαλίζει πως θα έχουμε το μικρότερο δυνατό άθροισμα των ευαισθησιών τάσης των συνδέσεων που αφαιρέθηκαν.

Η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής [21], [22]:

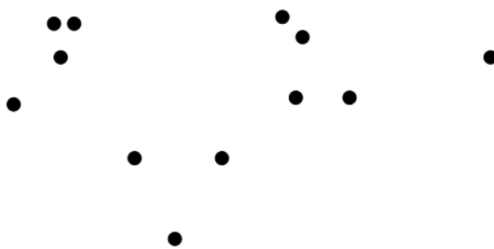
Βήμα 1^ο

Αρχικά κάθε ζυγός του δικτύου αποτελεί και διαφορετικό τμήμα του. Επομένως ο αριθμός των τμημάτων ισούται με τον αριθμό των ζυγών.

Βήμα 2^ο

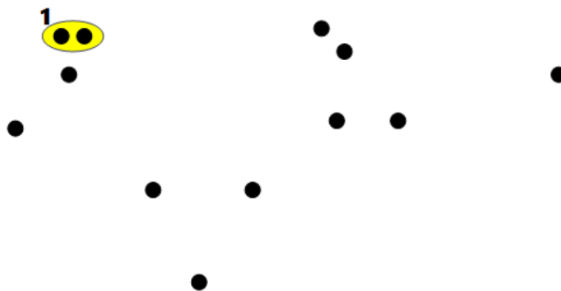
Αναζητείται από τον πίνακα ευαισθησιών του δικτύου η μεγαλύτερη ευαισθησία τάσης. Οι ζυγοί, οι οποίοι έχουν μεταξύ τους αυτή την ευαισθησία τάσης συγχωνεύονται σε ένα τμήμα και έτσι ο αριθμός των τμημάτων ελαττώνεται κατά ένα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου έχουμε τον επιθυμητό αριθμό τμημάτων.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχηματικό παράδειγμα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας.



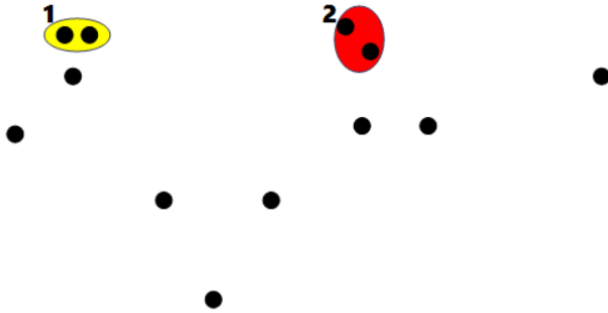
Σχήμα 6.1: Αρχικοποίηση του αλγορίθμου

Οι τελείες αναπαριστούν τους ζυγούς του δικτύου, αρχικά κάθε ζυγός αποτελεί και από ένα τμήμα.

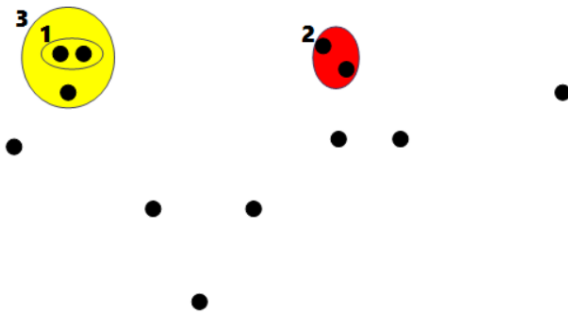


Σχήμα 6.2: Πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου

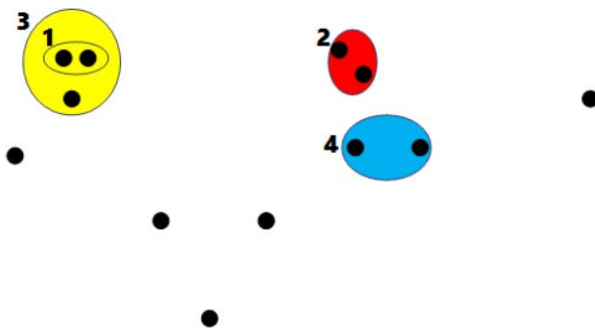
1^η επανάληψη, οι ζυγοί που ομαδοποιήθηκαν στο κίτρινο πλαίσιο έχουν μεταξύ τους την μεγαλύτερη ευαισθησία τάσης.



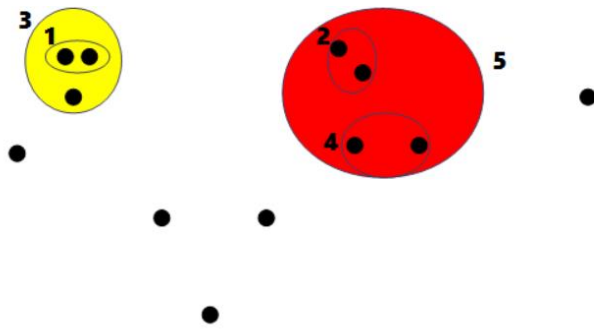
Σχήμα 6.3: Δεύτερη επανάληψη του αλγορίθμου



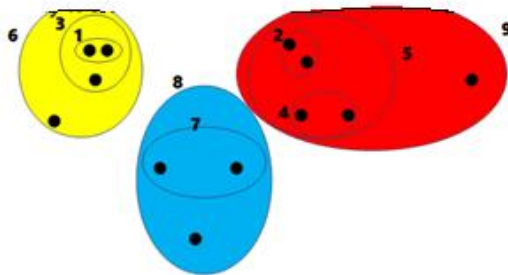
Σχήμα 6.4: Τρίτη επανάληψη του αλγορίθμου



Σχήμα 6.5: Τέταρτη επανάληψη του αλγορίθμου



Σχήμα 6.6: Πέμπτη επανάληψη του αλγορίθμου



Σχήμα 6.7: Έκτη επανάληψη του αλγορίθμου

6.3.2 Επιλογή ζυγών για τοποθέτηση μπαταρίας

Επόμενο βήμα για την επιλογή των κατάλληλων ζυγών προς τοποθέτηση ESS είναι να επιλέξουμε σε κάθε τμήμα τους υποψήφιους ζυγούς, στους οποίους είναι εύλογο να τοποθετήσουμε ένα σύστημα αποθήκευσης. Αρχικά επιλέγονται σε κάθε τμήμα οι κρίσιμοι ζυγοί, δηλαδή ζυγοί που στην πράξη έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανίσουν πρόβλημα στην τάση. Οι ζυγοί αυτοί είναι είτε φύλλα του αρχικού δικτύου-δέντρου, είτε ζυγοί παραγωγής. Η επιλογή αυτή είναι λογική αφού σε μια αυξομείωση της ισχύος που παράγει μια γεννήτρια πρώτα θα δημιουργηθεί πρόβλημα τάσης στον ζυγό στον οποίο συνδέεται. Επίσης στους ζυγούς-φύλλα του δικτύου συνδέονται φορτία άρα η διατήρηση της τάσης εντός ορίων είναι κρίσιμη και εφόσον είναι στο τέλος κάθε κλάδου του δικτύου και όχι σε ενδιάμεση θέση συνήθως ρυθμίζεται πιο δύσκολα η τάση τους.

Το σύνολο των υποψήφιων ζυγών για τοποθέτηση ESS αποτελείται από τους κρίσιμους ζυγούς και τους ζυγούς που περιέχονται σε κάθε μονοπάτι που συνδέει όλα τα πιθανά ζευγάρια κρίσιμων ζυγών. Αν το μονοπάτι που συνδέει ένα ζευγάρι κρίσιμων ζυγών περιέχει έστω και ένα ζυγό εκτός του τμήματος τότε δεν λαμβάνεται υπόψη. Ουσιαστικά έτσι λαμβάνονται ως υποψήφιοι ζυγοί, όσοι μπορούν, τοποθετώντας σε αυτούς ESS, να συμβάλλου στην ρύθμιση της τάσεως των κρίσιμων ζυγών κάθε τμήματος.

Το τελευταίο βήμα είναι να επιλεγεί σε ποιον ζυγό από όλους τους υποψήφιους, σε κάθε τμήμα, θα τοποθετηθεί το ESS. Για την επιλογή αυτή ελέγχεται το άθροισμα των ευαισθησιών κάθε υποψήφιου ζυγού ως προς όλους τους ζυγούς του τμήματος και επιλέγεται αυτός με το μεγαλύτερο άθροισμα, δηλαδή αυτός που τοποθετώντας του ESS θα επηρεάσει περισσότερο το τμήμα, ως προς

την βελτίωση των τάσεων. Φυσικά αν για ολόκληρο το χρονικό διάστημα μελέτης δεν υπάρξει πρόβλημα τάσης σε κάποιο τμήμα, τότε δεν θα τοποθετηθεί σε αυτόν ESS[1].

6.4 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Εφόσον πλέον είναι γνωστός τόσο ο αριθμός των μπαταριών, όσο και οι θέσεις στις οποίες θα τοποθετηθούν, επόμενο βήμα είναι να διαστασιολογηθούν. Η διαστασιολόγηση τους πετυχαίνεται λύνοντας ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίο, ακολουθώντας την μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5 και τις σχέσεις που ορίστηκαν σε αυτή την ενότητα. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται και αναλύεται η διαστασιολόγηση των μονάδων με γνωστές τις θέσεις και τον αριθμό τους[1].

6.4.1 Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της διαστασιολόγησης των μπαταριών

Για δοσμένο σύνολο S , στόχος της διαστασιολόγησης των μονάδων είναι να βρεθεί η συνολική ελάχιστη δυνατή χωρητικότητα, ώστε οι τάσεις του δικτύου να ικανοποιούν τους περιορισμούς σε ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα. Για να ληφθεί υπόψη η περιοδικότητα των φορτίων και της παραγωγής από ΑΠΕ συνήθως λαμβάνεται ως χρονικός ορίζοντας μία μέρα ή μια εβδομάδα. Επομένως οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι οι χωρητικότητες των μπαταριών E_s , η ενεργός και άεργος ισχύς $r_s(t)$, $b_s(t)$ που ανταλλάσει κάθε μπαταρία με το δίκτυο, καθώς και η ενεργός και άεργος ισχύς P_1^G , Q_1^G που δίνει ο ζυγός ταλάντωσης. Επίσης λαμβάνονται υπόψη και οι απώλειες του δικτύου C_1 , οι οποίες ειδικά στα δίκτυα διανομής είναι άξιες υπολογισμού.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η εξής[1]:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης: } C_1 + \gamma C_{st}, \quad (6.14)$$

$$\text{όπου } C_{st} = \sum_{s \in S} E_s, \quad (6.15)$$

η συνολική χωρητικότητα που εγκαθίσταται στο δίκτυο

$$\text{και } C_1 = \frac{1}{|T|} \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} P_k(t) \Delta t, \quad (6.16)$$

οι μέσες συνολικές ενεργές απώλειες του δικτύου.

Η μεταβλητή $\gamma \geq 0$ είναι μια σταθερά – βάρος. Οι συναρτήσεις C_1 και C_{st} αποτελούν αντικρουόμενες συναρτήσεις επομένως το σωστό θα ήταν να ελαχιστοποιηθούν ξεχωριστά, πράγμα όμως που μετατρέπει το πρόβλημα σε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Επομένως επιλέγεται μια παράμετρος γ ώστε με κατάλληλη τιμή να μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα το αποτέλεσμα όπως θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Ομοίως με το κεφάλαιο 5 θέτοντας τον πίνακα $W(t) = V(t)V^H(t)$, $V(t) = [V_1(t) \ V_2(t) \ \dots \ V_N(t)]^T$ για κάποιο t , μπορούμε να κατασκευάσουμε το θετικά ημιορισμένο πρόβλημα της διαστασιολόγησης των μπαταριών. Παρακάτω δίνονται όλοι οι περιορισμοί του θετικά ημιορισμένου προβλήματος[1]:

$$P_k(t) - jQ_k(t) = \sum_{j=1}^N [Wkj(t) Ykj]^*, \quad (6.17)$$

$$|V_{\min}|^2 \leq |W_{kk}(t)| \leq |V_{\max}|^2, \quad (6.18)$$

$$W_{11}(t)=1, \quad (6.19)$$

$$P_{ij}(t) \leq P_{ij\max}, \quad (6.20)$$

$$P_{ij}(t) = \text{Re}([W_{ii}(t) - W_{ij}(t)]y_{ij}^*), \quad (6.21)$$

$$e_s(t+1) = e_s(t) + r_s(t)\Delta t, \quad (6.22)$$

$$e_s(1)=0, \quad (6.23)$$

$$r_h(t)=b_h(t)=0, \quad (6.24)$$

$$|r_s(t)| \leq R_{s\max}, \quad (6.25)$$

$$0 \leq e_s(t) \leq E_s, \quad (6.26)$$

$$|b_s(t)| \leq B_{s\max}, \quad (6.27)$$

$$P_k(t) = P_k^G(t) - P_k^D(t) - r_k(t), \quad (6.28)$$

$$Q_k(t) = Q_k^G(t) - Q_k^D(t) - b_k(t), \quad (6.29)$$

$$W(t) \geq 0, \quad (6.30)$$

Όπως προαναφέρθηκε οι ισχύεις των φορτίων και των ΑΠΕ είναι γνωστές, επομένως οι μόνες άγνωστες ισχύεις που θα καθοριστούν από το πρόβλημα είναι αυτές του ζυγού ταλάντωσης.

6.5 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.3 μας δίνει τους υποψήφιους ζυγούς για τοποθέτηση μπαταρίας, δίνοντας ως είσοδο τον αριθμό των υποδικτύων n_c και το αποτέλεσμα εισέρχεται ως είσοδος στο θετικά ημιορισμένο πρόβλημα που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.4. Επομένως για να ληφθούν υπόψη όλοι οι δυνατοί αριθμοί υποδικτύων και κατά συνέπεια όλοι οι δυνατοί αριθμοί μπαταριών, στην τελική επιλογή η παραπάνω διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά για $1 \leq n_c \leq N$ και επιλέγεται αυτή με το μεγαλύτερο δυνατό όφελος από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τον αλγόριθμο διαστασιολόγησης.

Ένα ακόμη ζήτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η στοχαστικότητα των προφίλ των φορτίων και της παραγωγής από ΑΠΕ. Όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω το πρόβλημα της διαστασιολόγησης λύνεται για χρονικό διάστημα μιας ημέρας ή μιας εβδομάδας, όμως στο διάστημα ενός χρόνου η παραγωγή και η κατανάλωση διαφέρουν από μέρα σε μέρα, άρα είναι εύλογο να λυθεί για έναν μεγάλο αριθμό ημερών ή εβδομάδων. Επειδή η λύση του προβλήματος 6.4 μας δίνει την ελάχιστη δυνατή χωρητικότητα κάθε μπαταρίας, για να εξασφαλιστεί ότι το πρόβλημα θα έχει εφικτή λύση για όλο το χρονικό διάστημα, λαμβάνεται ως τελική επιλογή, η μεγαλύτερη χωρητικότητα κάθε μπαταρίας από όλες τις μέρες- εβδομάδες.

Ένα μέγεθος για τον καθορισμό της διαστασιολόγησης των μπαταριών, το οποίο μέχρι στιγμής δεν έχει ληφθεί υπόψη στην παραπάνω διαδικασία, είναι η τιμή της μεταβλητής R_{smax} , τα όρια δηλαδή της ενεργού ισχύος που ανταλλάσσουν οι μονάδες με το δίκτυο. Ένας λόγος που αυτό το μέγεθος αγνοήθηκε από το πρόβλημα 6.4, είναι πως η πρόσθεση μιας ακόμη συνάρτησης στην αντικειμενική (π.χ. $\sum_{s \in S} R_{smax}$) θα έκανε το πρόβλημα αρκετά πιο περίπλοκο και αδύνατο να βρεθεί η κατά Pareto βέλτιστη λύση. Σε αυτή την κατεύθυνση, ένας τρόπος για τον καθορισμό της ισχύος των μπαταριών και των ηλεκτρονικών μετατροπέων, είναι αφού λυθεί το πρόβλημα 6.4 για όλες τις μέρες και καθοριστεί το τελικό μέγεθος των μπαταριών όπως προαναφέρθηκε, να ξαναλυθεί για γνωστό πλέον μέγεθος ελαχιστοποιώντας τώρα το άθροισμα των ορίων των ενεργών ισχύων που ανταλλάσσουν οι μπαταρίες με το σύστημα (πρόβλημα 6.5).

Στην τελική επιλογή συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος ζωής των μπαταριών. Εφόσον το πρόβλημα 6.4 καθορίζει την ελάχιστη χωρητικότητα, ώστε να παραμένουν όλα τα όρια του δικτύου εντός επιτρεπτών τιμών, μια μείωση της χωρητικότητας των μπαταριών θα δημιουργήσει πρόβλημα σε αυτά τα όρια και κυρίως στα όρια των τάσεων. Συνεπώς η λύση αυτού του προβλήματος ουσιαστικά δίνει ένα κατώτατο όριο για την χωρητικότητα, όχι όμως μια ρεαλιστική τιμή, εφόσον σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα δεν θα αποτελεί πλέον εφικτή λύση. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να βρεθεί μια κατάλληλη αύξηση της υπολογισμένης χωρητικότητας, για την οποία θα έχουμε μέγιστο όφελος στον χρόνο ζωής των μπαταριών και παράλληλα ελάχιστο δυνατό κόστος, ένα trade-off ουσιαστικά κόστους και χρόνους ζωής. Φυσικά δεν μπορεί να αγνοηθεί και η μελλοντική μείωση του κόστους τους, που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2 εφόσον υπάρχει ο παράγοντας του χρόνου. Δεδομένου μάλιστα ότι κάθε πιθανή επιλογή του αριθμού των μπαταριών, μπορεί να δίνει και διαφορετικούς χρόνους ζωής, το trade-off μεταξύ κόστους και χρόνους ζωής πραγματοποιείται για κάθε $1 \leq n_c \leq N$.

Για να επιτευχθεί ο συμβιβασμός κόστους- χρόνους ζωής υπολογίζεται η Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης (NPV), στην συγκεκριμένη περίπτωση φυσικά χρησιμοποιείται το Καθαρό Παρόν Κόστος (NPC) για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, το οποίο καλείται να ελαχιστοποιηθεί. Θα πρέπει να αναφερθεί πως για τον υπολογισμό του NPC, γίνεται η θεώρηση, πως όταν η χωρητικότητα μιας μπαταρίας φθάσει το κατώτατο επιτρεπτό όριο, τότε αγοράζεται μια καινούρια, ενώ η παλιά διατηρεί κάποια υπολειμματική αξία. Παρακάτω φαίνεται ο τύπος που δίνει το Καθαρό Παρόν Κόστος του προβλήματος.

$$NPC = C_0 + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+q)^t}, \quad (6.31)$$

όπου N είναι το χρονικό διάστημα μελέτης της επένδυσης. Στο πρόβλημα αυτής της εργασίας μετρείται σε χρόνια και καθορίζεται από τον Διαχειριστή του Δικτύου Διανομής που θα πραγματοποιήσει την επένδυση, έχοντας κατά νου διάφορα κριτήρια, όπως για παράδειγμα σε πόσο χρόνο προβλέπεται μια πιθανή αύξηση, τόσο του συνολικού φορτίου που συνδέεται στο συγκεκριμένο δίκτυο διανομής, όσο και της διεξόδου ΑΠΕ, καθώς κάτι τέτοιο μπορεί να αλλάξει τελείως την λύση του προβλήματος.

C_0 είναι το αρχικό κόστος της επένδυσης και δίνεται από τον τύπο[15]:

$$C_0 = \text{price}_{kwh}(0) \cdot \sum_{s \in S} E_s + \text{price}_{kw} \cdot \sum_{s \in S} R_{smax}, \quad (6.32)$$

KTP_t είναι οι καθαρές ταμειακές ροές του χρόνου t που δίνονται από τον τύπο[15]:

$$KTP_t = \text{price}_{kwh}(t) \cdot \sum_{s \in S} E_{snewt} - \text{price}_{kwh}(t) \cdot \sum_{s \in S} E_{soldt} + omc \cdot \sum_{s \in S} R_{smax}, \quad (6.33)$$

q είναι το επιτόκιο αναγωγής, $price_{kwh}(t)$ είναι το προβλεπόμενο κόστος των μπαταριών ανά KWh (€/Kwh) την χρονιά t προερχόμενο από το διάγραμμα 2.3, $price_{kw}$ είναι το κόστος ανά Kw (€/KW) των ηλεκτρονικών μετατροπέων, omc είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης των ηλεκτρονικών ισχύος, E_{snewt} είναι η χωρητικότητα της νέας μπαταρίας που θα αγοραστεί για τον ζυγό s τον χρόνο t και E_{soldt} είναι η εναπομένουσα χωρητικότητα της μπαταρίας που αποσύρεται από το ζυγό s τον χρόνο t . Φυσικά αν δεν χρειάζεται τον χρόνο t να αντικατασταθεί η μπαταρία στο ζυγό s , οι τιμές των E_{snewt} E_{soldt} είναι μηδέν.

Οι μπαταρίες που αντικαθίστανται μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάποιο άλλο σημείο του δικτύου, στο οποίο θα απαιτείται μικρότερη χωρητικότητα από την εναπομένουσα της μπαταρίας, για να ικανοποιούνται τα όρια των τάσεων. Από το κεφάλαιο 2 φαίνεται πως κάτω από το 80% της ονομαστικής χωρητικότητας η γήρανση ακολουθεί γραμμική συμπεριφορά, επομένως για έναν τέτοιο ζυγό μπορούν να θεωρηθούν καινούριες, εκτός ίσως από κάποια φυσική υποβάθμιση λόγω της λειτουργίας της τα προηγούμενα χρόνια.

Συμβολίζοντας με E_s^d , R_{smax}^d την χωρητικότητα της μπαταρίας και την ικανότητα των ηλεκτρονικών ισχύος στο ζυγό s την ημέρα d , SoC_s^d , DoD_s^d , $C-rate_s^d$ οι χρονοσειρές του επίπεδου φόρτισης, του βαθμού εκφόρτισης και του ρυθμού φόρτισης στο ζυγό s την ημέρα d , a τον συντελεστή αύξησης της κατώτατης χωρητικότητας, $life_s(i,a)$ το χρόνο ζωής της μπαταρίας στο ζυγό s μέχρι να φτάσει συντελεστή γήρανσης $L=\frac{1}{a}$, δηλαδή στο κατώτερο όριο της και $NPC(i,a)$ το Καθαρό Παρόν Κόστος για $n_c=i$ και συντελεστή αύξησης a , ο τελικός αλγόριθμος παίρνει την παρακάτω μορφή:

```

for  $i=1$  to  $N-1$ 
   $S(i) \leftarrow$  run clustering algorithm with  $n_c=i$ 
  for  $d=1$  to  $D$ 
     $E_s^d \leftarrow$  solve problem 6.4 with  $S=S(i)$ 
  end for
   $E_s^*(i) \leftarrow \max\{E_s^d\}, d=1, 2\dots D$ 
end for
for  $a=a_1$  to  $a_k$ 
  for  $i=1$  to  $N-1$ 
    for  $d=1$  to  $D$ 
       $R_{smax}^d, SoC_s^d, DoD_s^d, C-rate_s^d \leftarrow$  solve problem 6.5 with  $S=S(i), E_s^*(i,a)=a \cdot E_s^*(i)$ 
    end for
     $R_{smax}^*(i,a) \leftarrow \max\{R_{smax}^d\}, d=1, 2\dots D$ 
     $life_s(i,a) \leftarrow$  from  $SoC_s^d, DoD_s^d, C-rate_s^d$  profiles,  $L=1/a$ 
  end for
end for
   $NPC(i,a) \leftarrow$  from  $E_s^*(i,a), R_{smax}^*(i,a), life_s(i,a)$ 
   $E_s^*, R_{smax}^*, s \leftarrow \min\{ NPC(i,a) \}$ 

```

Για να λυθεί ομαλά το πρόβλημα για όλες τις ημέρες τέθηκε ο παρακάτω περιορισμός:

$$\sum_{t \in T} rs(t) = 0 \quad 6.34$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εφαρμόζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6, σε δύο δίκτυα διανομής, ένα δίκτυο 17 ζυγών και ένα δίκτυο 12 ζυγών αντίστοιχα.

Αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε για να επιλυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου ως θετικά ημιορισμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα δύο δίκτυα παρουσιάζονται με την χρήση πινάκων και διαγραμμάτων και γίνεται λεπτομερής σχολιασμός και επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με την χρήση του επιλυτή SEDUMI, ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω. Οι υπολογισμοί έγιναν με την βοήθεια Η/Υ με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής : Intel® Core™ i7-5500U CPU @ 2.40GHz
- Μνήμη RAM : 8.00 GB
- Λειτουργικό Σύστημα : Microsoft Windows 10 Edu. Edition

7.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CVX

7.2.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό CVX είναι ένα σύστημα μοντελοποίησης και επίλυσης κυρτών προβλημάτων. Υποστηρίζει έναν μεγάλο αριθμό προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού, όπως γραμμικά και τετραγωνικά προβλήματα(LPs/QPs), δεύτερης τάξεως κωνικά προβλήματα (SOCPs), μεικτού ακέραιου κυρτά προβλήματα(MICPs) και ημιορισμένα προβλήματα (SDPs). Γενικά το λογισμικό CVX είναι σχεδιασμένο για να λύνει σχεδόν οποιοδήποτε κυρτό πρόβλημα.

Το λογισμικό CVX είναι σχεδιασμένο για να ενσωματώνεται στο περιβάλλον της MATLAB (Matrix Laboratory), μετατρέποντας την σε μια ισχυρή γλώσσα μαθηματικού προγραμματισμού[5].

Συνδυάζοντας ορισμένους συντακτικούς κανόνες και το κώδικα MATLAB, καθιστά αρκετά εύκολη την διαδικασία μοντελοποίησης και επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Επιπροσθέτως παρέχει δύο ειδικές επιλογές, για την απλούστευση των προβλημάτων από δύο συγκεκριμένες κατηγορίες.

Στην επιλογή του ημιορισμένου προγραμματισμού (Semidefinite Programming (SDP) mode) το CVX διαχειρίζεται τις ανισότητες των πινάκων (linear matrix inequalities) με έναν πιο εύκολο τρόπο ώστε να καθιστά πιο εύκολη την αναπαράσταση ενός ημιορισμένου προβλήματος. Η δεύτερη επιλογή αφορά τον Γεωμετρικό προγραμματισμό (Geometric Programming-GP), όπου στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν θα μας απασχολήσει επομένως δεν θα αναλυθεί.

Το λογισμικό CVX υποστηρίζει δύο δωρεάν επιλυτές, τους οποίους και έχει ενσωματωμένους, τον επιλυτή SEDUMI και τον επιλυτή SDPT3. Επίσης υποστηρίζει και δύο εμπορικούς επιλυτές, τον GUROBI και τον MOSEK[5].

7.2.2 Ανάλυση του λογισμικού

Η βασική δομή ενός προγράμματος στο λογισμικό CVX έχει την παρακάτω μορφή[5]:

```
cvx_begin
    variable x(n)
    minimize f(x)
    subject to
        gi(x) <= or >= or == 0
cvx_end
```

Η εντολή `cvx_begin` προετοιμάζει το MATLAB να αποδεχτεί την δήλωση των μεταβλητών, των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η εντολή `variable x(n)` δηλώνει πως η μεταβλητή x θα είναι η μεταβλητή βελτιστοποίησης μεγέθους n . Φυσικά η μεταβλητή x μπορεί να είναι κάποιος πίνακας, διάνυσμα κλπ. Για να δηλώσουμε το είδος της μεταβλητής x γράφουμε δίπλα από την μεταβλητή την κατάλληλη εντολή π.χ `complex` αν η μεταβλητή είναι μιγαδικό διάνυσμα-πίνακας, `Hermitian` αν ο πίνακας είναι Ερμιτιανός κ.α.

Η εντολή `minimize f(x)` δηλώνει την αντικειμενική συνάρτηση που καλείται να ελαχιστοποιηθεί.

Η εντολή `subject to` δηλώνει πως αρχίζει η δήλωση όλων των περιορισμών του προβλήματος

Τέλος η εντολή `cvx_end` δηλώνει στο MATLAB πως η δήλωση του προβλήματος τελείωσε και καλεί κάποιον επιλυτή για την επίλυση του.

Μόλις τελειώσει η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος από τον επιλυτή η μεταβλητή x παίρνει αριθμητική τιμή, ίση με την τιμή που αποφάνθηκε ο επιλυτής πως ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Επίσης δημιουργούνται άλλες δύο μεταβλητές, η `cvx_optval` που δίνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και η `cvx_status` που περιέχει λεπτομέρειες για την επίλυση του προβλήματος.

Όπως προαναφέρθηκε το λογισμικό CVX υποστηρίζει όλες τις έτοιμες κυρτές/κοίλες συναρτήσεις της MATLAB, για παράδειγμα `sum()`, `abs()`, `sqrt()`, `norm()` κλπ, οι οποίες βοηθούν στην εύκολη μοντελοποίηση οποιοδήποτε προβλήματος.

7.2.3 Επιλογή ημιορισμένου προγραμματισμού

Για να επιλέξει κάποιος την επιλογή του ημιορισμένου προγραμματισμού αρκεί να αντικαταστήσει την εντολή `cvx_begin` με την εντολή `cvx_begin SDP`. Όταν χρησιμοποιείται η εν λόγω επιλογή το λογισμικό CVX διαχειρίζεται τις ανισότητες με διαφορετικό τρόπο από ότι το MATLAB. Για την ακρίβεια η διαχείριση των ανισοτήτων με αυτή την επιλογή φαίνεται παρακάτω[5]:

- Οι περιορισμοί ισότητας δηλώνονται όπως και στο MATLAB (στοιχείο προς στοιχείο).
- Οι περιορισμοί ανισότητας που αφορούν διανύσματα και βαθμωτές μεταβλητές δηλώνονται οόπως και στο MATLAB (στοιχείο προς στοιχείο).
- Οι περιορισμοί ανισότητας που αφορούν τετραγωνικούς πίνακες δηλώνονται όπως παρακάτω:

$X \geq Y$, το οποίο είναι ισοδύναμο με την σχέση $X - Y == \text{semidefinite}(n)$

$X \leq Y$, το οποίο είναι ισοδύναμο με την σχέση $Y - X == \text{semidefinite}(n)$

Αν ένας από τους δύο πίνακες είναι μιγαδικός οι ανισότητες δηλώνονται με τις εκφράσεις:

$X \geq Y$, το οποίο είναι ισοδύναμο με την σχέση $X - Y == \text{hermitian_semidefinite}(n)$

$X \leq Y$, το οποίο είναι ισοδύναμο με την σχέση $Y - X == \text{hermitian_semidefinite}(n)$

Και οι δύο πίνακες θα πρέπει να είναι ίδιου μεγέθους ή ένας από τους δύο ο μηδενικός πίνακας. Επίσης ανισότητες μεταξύ μη τετραγωνικών πινάκων απαγορεύονται. Για την σύγκριση δύο πινάκων στοιχείο προς στοιχείο, όπως δηλαδή πραγματοποιεί ο κώδικας MATLAB κανονικά, θα πρέπει να εκφράζονται υπό την μορφή διανύσματος π.χ $X(:) \leq Y(:)$.

Να σημειωθεί πως για να πραγματοποιηθούν οι ανισότητες μεταξύ πινάκων θα πρέπει να δηλώνονται και οι κατάλληλες συμμετρίες, αλλιώς το λογισμικό θα προειδοποιήσει το χρήστη. πχ η ανίσωση $X \geq 0$ προϋποθέτει πως κατά την δήλωση των μεταβλητών ο πίνακας X θα έχει δηλωθεί ως συμμετρικός ή Ερμιτιανός.

7.2.4 Ο επιλυτής SEDUMI

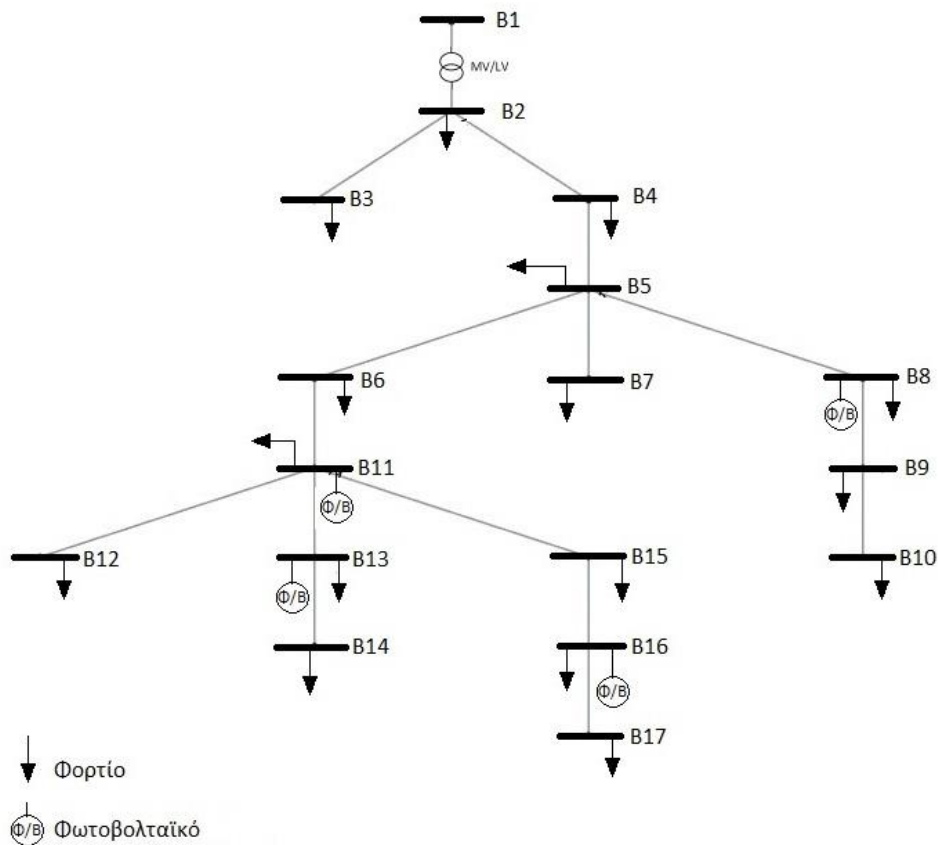
Ο επιλυτής SEDUMI αναπτύχθηκε από τον F. Sturm. Πρόκειται για ένα λογισμικό που επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης με εφικτό πεδίο λύσεων συμμετρικούς κώνους, η κύρια όμως εφαρμογή του είναι για την επίλυση γραμμικών προβλημάτων και προβλημάτων ημιορισμένου προγραμματισμού. Για την επίλυση των προβλημάτων χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο εσωτερικών σημείων (interior point algorithm), η οποία είναι κατηγορία αλγορίθμων ιδιαίτερα αποτελεσματική ειδικά για προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Όπως έχει δείχθει πολλές φορές μπορεί να είναι αποδοτικότεροι και από τον γνωστό αλγόριθμο SIMPLEX επιλύοντας το πρόβλημα σε πολυωνυμικό

χρόνο. Όπως αναφέρθηκε το περιβάλλον CVX καλεί αυτόματα τον επιλυτή SEDUMI μόλις καθοριστεί πλήρως το πρόβλημα[4].

7.3 ΔΙΚΤΥΟ 17 ΖΥΓΩΝ

7.3.1 Δεδομένα

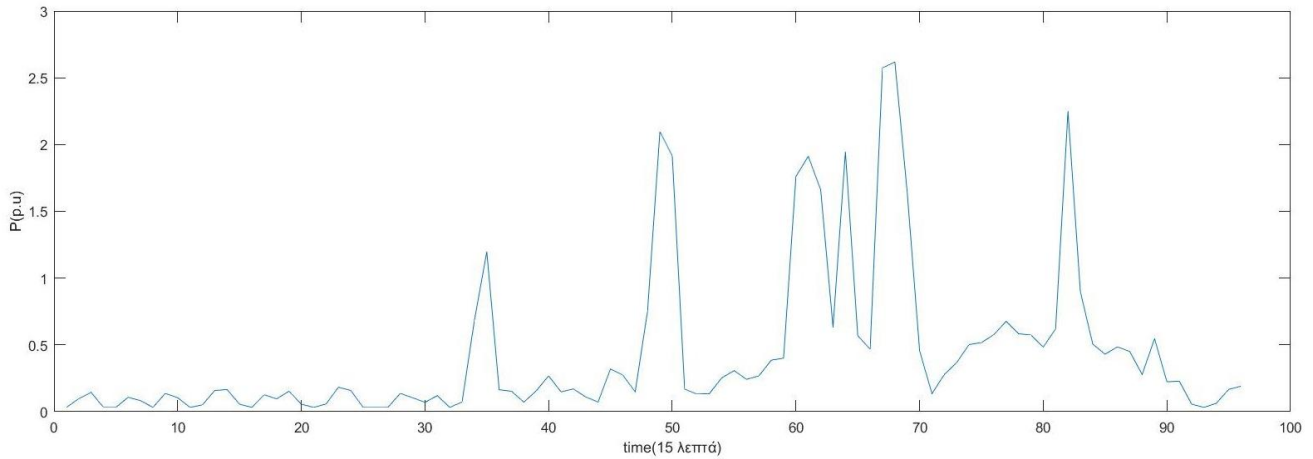
Η τοπολογία του δικτύου των 17 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Πρόκειται για ακτινικό δίκτυο διανομής τάσης 400V (Χαμηλή Τάση), το οποίο αποτελείται από 16 γραμμές και έχει συνδεδεμένα φορτία σταθερής ισχύος καθώς επίσης και φωτοβολταϊκά. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΜΤ/ΧΤ και για αυτόν ακριβώς το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης του συστήματος. Αυτή η θεώρηση έχει ως συνέπεια να μη μπορούν να συνδεθούν σε αυτόν τον ζυγό μονάδες αποθήκευσης.



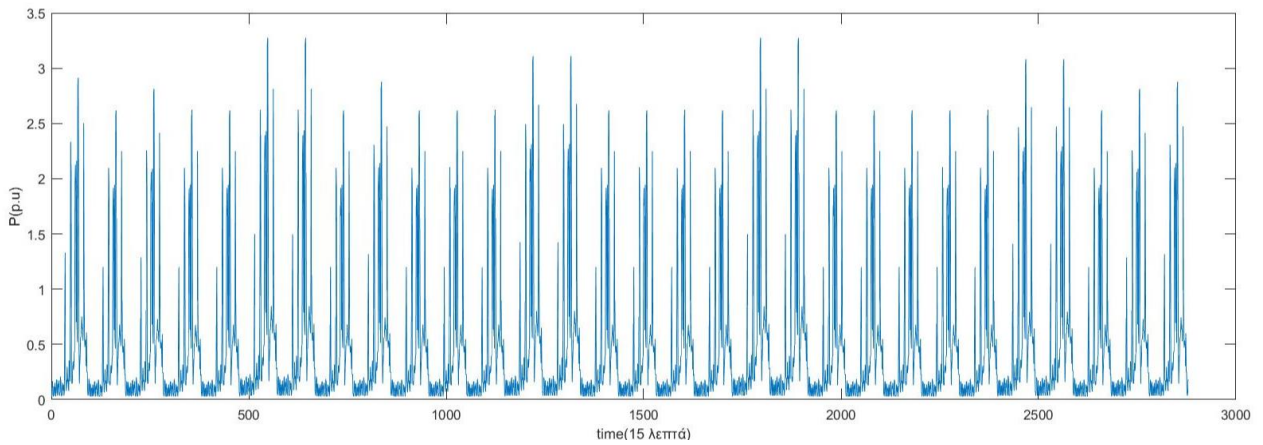
Σχήμα 7.1: Δίκτυο διανομής 17 ζυγών

Ως χρονικός ορίζοντας επίλυσης του προβλήματος επιλέχθηκε ο ένας μήνας (30 ημέρες) με διακριτό βήμα των 15 λεπτών. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χρονοσειρές του συνολικού φορτίου και της συνολικής φωτοβολταϊκής παραγωγής του δικτύου σε αυτό το χρονικό διάστημα

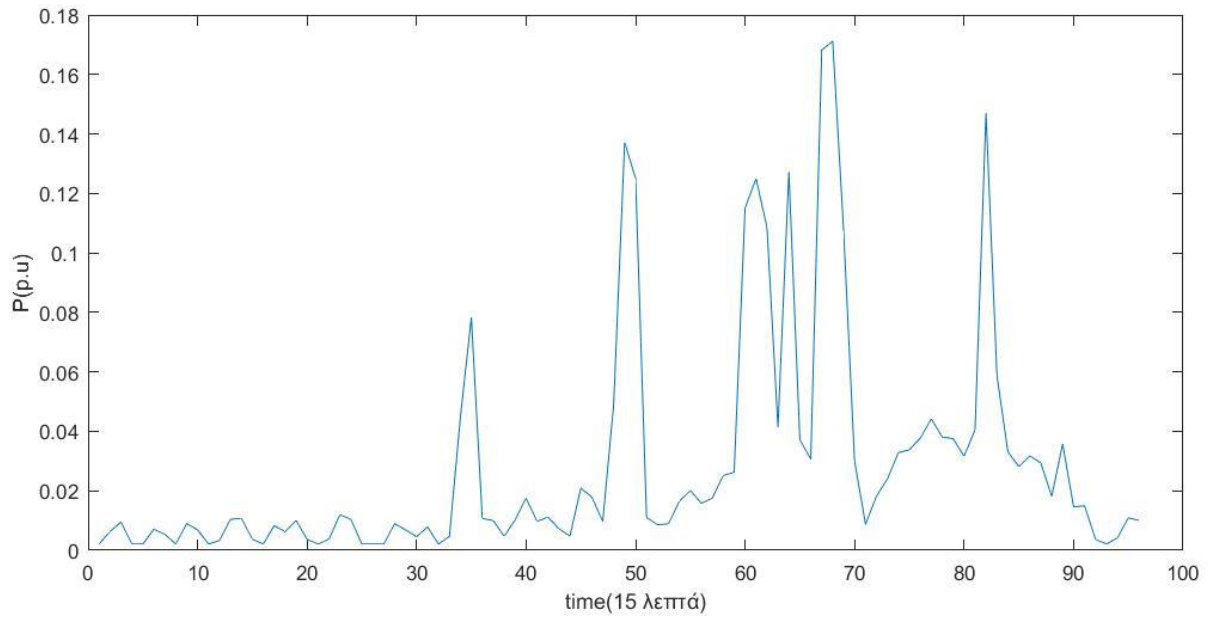
αντίστοιχα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται για έναν ζυγό η κατανάλωση και η παραγωγή του, στο διάστημα μιας ημέρας, αλλά και ολόκληρου του μήνα. Η βάση ισχύος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ανά μονάδα μεγεθών είναι τα 50kW. Επίσης στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής η άεργος που εγγέουν τα φωτοβολταϊκά είναι μηδέν, δηλαδή έγινε η θεώρηση πως λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.



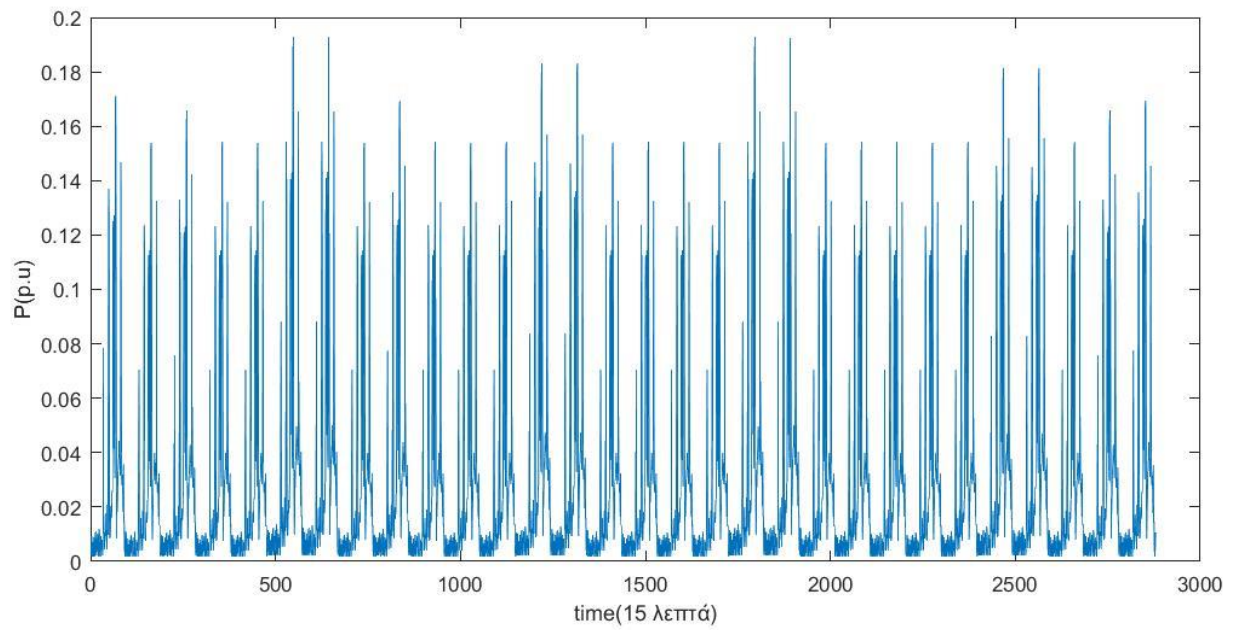
Διάγραμμα 7.2: Συνολικό φορτίο για 1 ημέρα



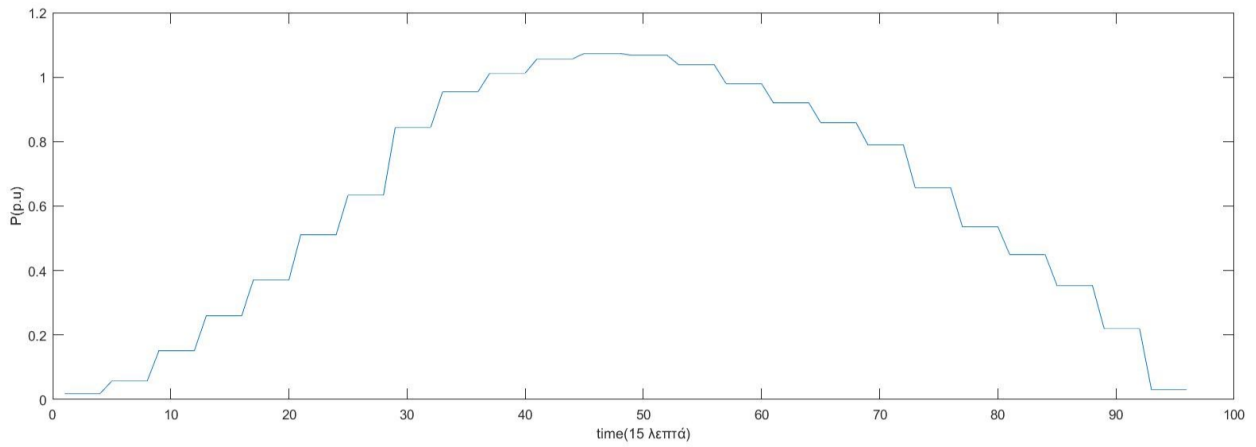
Διάγραμμα 7.3: Συνολικό φορτίο για 1 μήνα



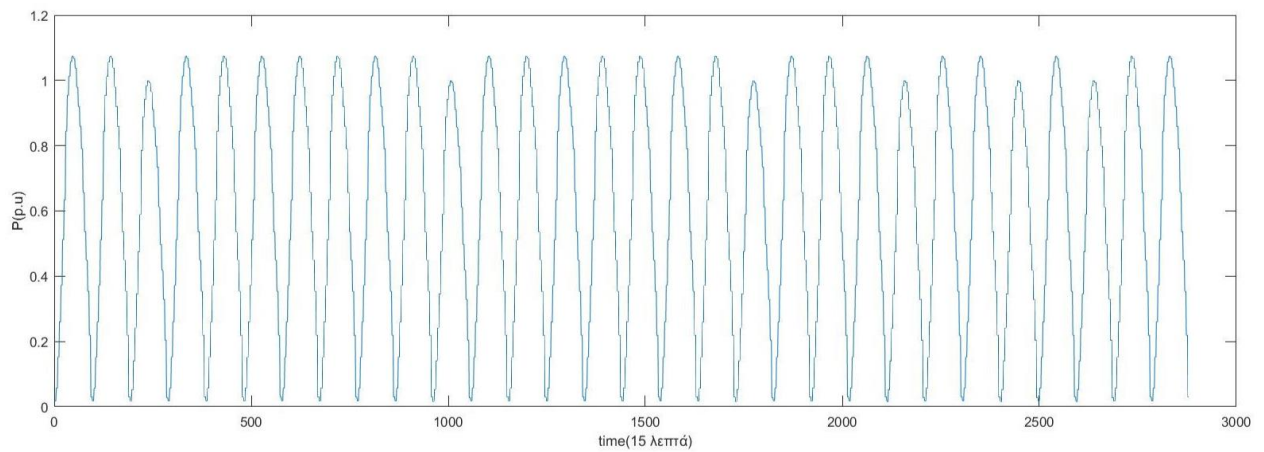
Διάγραμμα 7.4: Φορτίο του ζυγού 4 για 1 ημέρα



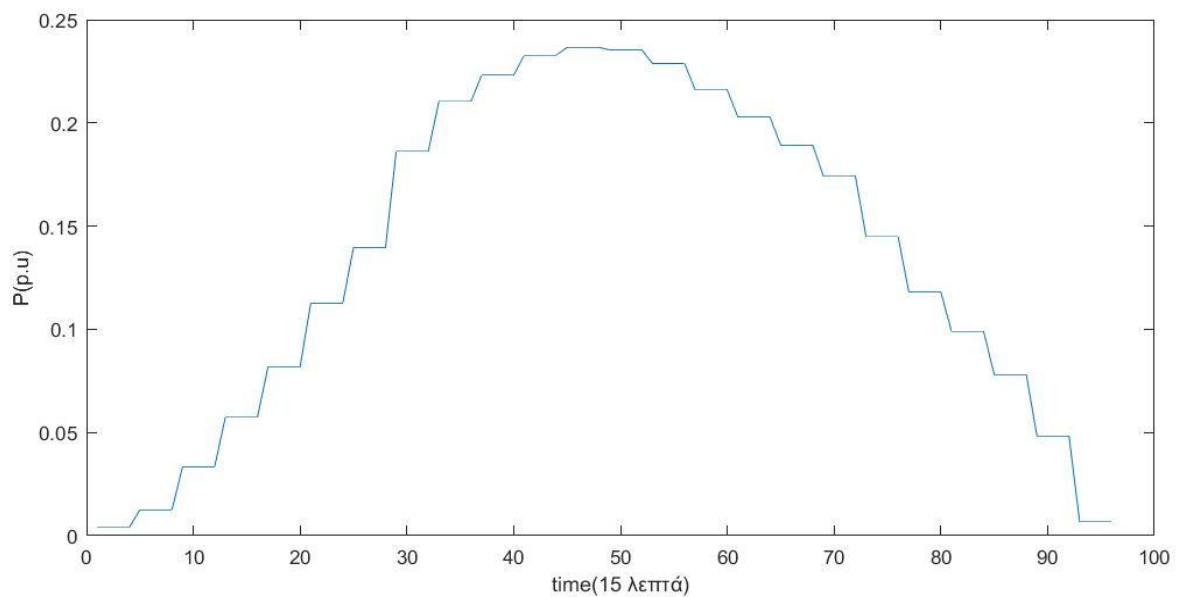
Διάγραμμα 7.5: Φορτίο του ζυγού 4 για 1 μήνα



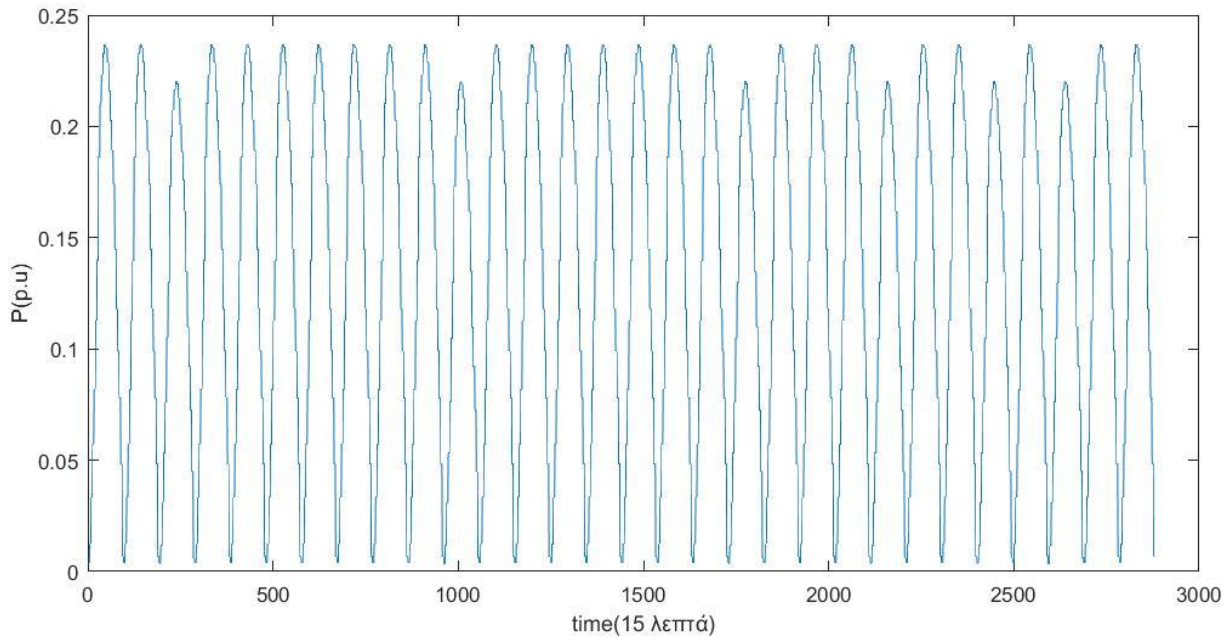
Διάγραμμα 7.6: Συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 ημέρα



Διάγραμμα 7.7: Συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 μήνα



Διάγραμμα 7.8: Φωτοβολταϊκή παραγωγή του ζυγού 13 για 1 ημέρα



Διάγραμμα 7.9: Φωτοβολταϊκή παραγωγή του ζυγού 13 για 1 μήνα

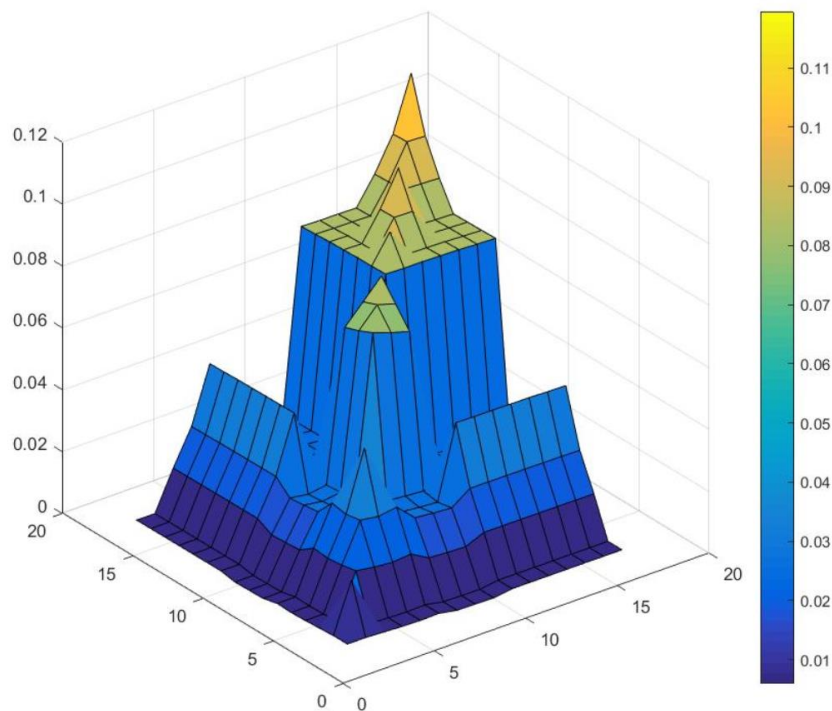
7.3.2 Πρόβλημα τοποθέτησης

Οι πιθανές θέσεις των μπαταριών στο δίκτυο είναι όλοι οι ζυγοί εκτός του ζυγού ταλάντωσης, επομένως ο μέγιστος αριθμός υποδικτύων είναι 16. Ο αλγόριθμος συσταδοποίησης εκτελέστηκε 16 φορές ($n_c=1\dots 16$), ξεκινώντας από την περίπτωση όπου το δίκτυο λαμβάνεται ως ένα, έως την περίπτωση όπου κάθε ζυγός αποτελεί και διαφορετικό κομμάτι του.

Στον πίνακα 7.10 και στο σχήμα 7.11 φαίνονται οι ευαισθησίες τάσης των ζυγών ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος, οι οποίες πάρθηκαν ακολουθώντας την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιώντας την μέση παραγωγή από ΑΠΕ και το μέσο φορτίο των 30 ημερών. Εφόσον οι ευαισθησίες τάσης είναι χαρακτηριστικό της τοπολογίας του δικτύου η επιλογή αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Η ευαισθησία των τάσεων των ζυγών ως προς την έγχυση αέργου ισχύος αγνοήθηκε καθώς στα δίκτυα διανομής Χ.Τ είναι πολύ μικρότερη από αυτή ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	0.007924	0.007917	0.007609	0.0073	0.007123	0.007297	0.006191	0.006072	0.00598	0.006829	0.006817	0.006812	0.006802	0.006791	0.006769	0.006755
3	0.007917	0.023734	0.007603	0.007294	0.007117	0.007291	0.006185	0.006065	0.005974	0.006823	0.006811	0.006806	0.006795	0.006785	0.006763	0.006749
4	0.007609	0.007603	0.021884	0.020958	0.020426	0.020947	0.01763	0.017271	0.016998	0.019545	0.019509	0.019493	0.019461	0.01943	0.019364	0.019322
5	0.0073	0.007294	0.020958	0.033387	0.032501	0.033369	0.02784	0.027242	0.026786	0.031032	0.030972	0.030946	0.030892	0.030841	0.030731	0.030661
6	0.007123	0.007117	0.020426	0.032501	0.051847	0.032483	0.026954	0.026356	0.0259	0.049439	0.04934	0.049298	0.049209	0.049125	0.048946	0.048831
7	0.007297	0.007291	0.020947	0.033369	0.032483	0.036019	0.027822	0.027224	0.026768	0.031014	0.030954	0.030928	0.030874	0.030823	0.030713	0.030643
8	0.006191	0.006185	0.01763	0.02784	0.026954	0.027822	0.079366	0.077236	0.075614	0.025485	0.025425	0.025399	0.025346	0.025294	0.025185	0.025115
9	0.006072	0.006065	0.017271	0.027242	0.026356	0.027224	0.077236	0.083546	0.08174	0.024887	0.024827	0.024801	0.024747	0.024696	0.024586	0.024516
10	0.00598	0.005974	0.016998	0.026786	0.0259	0.026768	0.075614	0.08174	0.08801	0.024431	0.024371	0.024345	0.024291	0.02424	0.024131	0.024061
11	0.006829	0.006823	0.019545	0.031032	0.049439	0.031014	0.025485	0.024887	0.024431	0.083736	0.083561	0.083486	0.083328	0.083178	0.082858	0.082654
12	0.006817	0.006811	0.019509	0.030972	0.04934	0.030954	0.025425	0.024827	0.024371	0.083561	0.092524	0.08331	0.083153	0.083003	0.082683	0.082478
13	0.006812	0.006806	0.019493	0.030946	0.049298	0.030928	0.025399	0.024801	0.024345	0.083486	0.08331	0.092356	0.092182	0.082927	0.082608	0.082403
14	0.006802	0.006795	0.019461	0.030892	0.049209	0.030874	0.025346	0.024747	0.024291	0.083328	0.083153	0.092182	0.103366	0.08277	0.08245	0.082246
15	0.006791	0.006785	0.01943	0.030841	0.049125	0.030823	0.025294	0.024696	0.02424	0.083178	0.083003	0.082927	0.08277	0.091674	0.091319	0.091092
16	0.006769	0.006763	0.019364	0.030731	0.048946	0.030713	0.025185	0.024586	0.024131	0.082858	0.082683	0.082608	0.08245	0.091319	0.102195	0.10194
17	0.006755	0.006749	0.019322	0.030661	0.048831	0.030643	0.025115	0.024516	0.024061	0.082654	0.082478	0.082403	0.082246	0.091092	0.10194	0.119563

Πίνακας 7.10: Ευαισθησίες των τάσεων των ζυγών ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος



Σχήμα 7.11: Χρωματική αναπαράσταση των ευαισθησιών

Στο χρονικό διάστημα αυτού του μήνα οι υπερτάσεις και υποτάσεις που δημιουργούνται στους ζυγούς φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Το πλήθος των υπερτάσεων/υποτάσεων δηλώνει πόσα 15λεπτα μέσα στο μήνα οι τάσεις βρίσκονται εκτός των επιτρεπτών ορίων. Τα όρια των τάσεων για τους ζυγούς είναι όπως ορίζει ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός 50160 $\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης, δηλαδή το κατώτερο όριο είναι 0.9 p.u και ανώτερο 1.1 p.u .

Πίνακας 7.12: Αριθμός υποτάσεων σε κάθε ζυγό

1	0
2	0
3	0
4	0
5	24
6	90
7	24
8	96
9	103
10	106
11	115
12	116
13	115
14	116
15	116
16	116
17	123

Πίνακας 7.13: Αριθμός υπερτάσεων σε κάθε ζυγό

1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	23
9	0
10	0
11	0
12	0
13	16
14	0
15	0
16	0
17	0

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6, οι ζυγοί 1, 2, 3, 4 δεν συμπεριλαμβάνονται στους υποψήφιους ζυγούς για τοποθέτηση συστήματος αποθήκευσης, καθώς δεν παρατηρούνται σε αυτούς αποκλίσεις από τα όρια των τάσεων. Για λόγους συντομίας στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται για τρεις αριθμούς υποδικτύων, οι υποψήφιοι ζυγοί για τοποθέτηση μπαταριών και η τελική επιλογή των ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθούν οι μπαταρίες. Στον τελικό διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των μπαταριών ως συνάρτηση του αριθμού των υποδικτύων, όπως υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο.

- 1 cluster

Πίνακας 7.14: Θέσεις των ESS

1ο
16

- 6 clusters

Πίνακας 7.15: Υποδίκτυα για 6 clusters

1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο
2	3	4	5	8	6
-	-	-	7	9	11
-	-	-	-	10	12
-	-	-	-	-	13
-	-	-	-	-	14
-	-	-	-	-	15
-	-	-	-	-	16
-	-	-	-	-	17

Πίνακας 7.16: Υποψήφιοι ζυγοί σε κάθε υποδίκτυο

1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο
-	-	-	7	10	11
-	-	-	-	-	12
-	-	-	-	-	13
-	-	-	-	-	14
-	-	-	-	-	15
-	-	-	-	-	16
-	-	-	-	-	17

Πίνακας 7.17: Θέσεις των ESS για 6 clusters

4ο	5ο	6ο
7	10	16

- 12 clusters

Πίνακας 7.18: Υποδίκτυα για 12 clusters

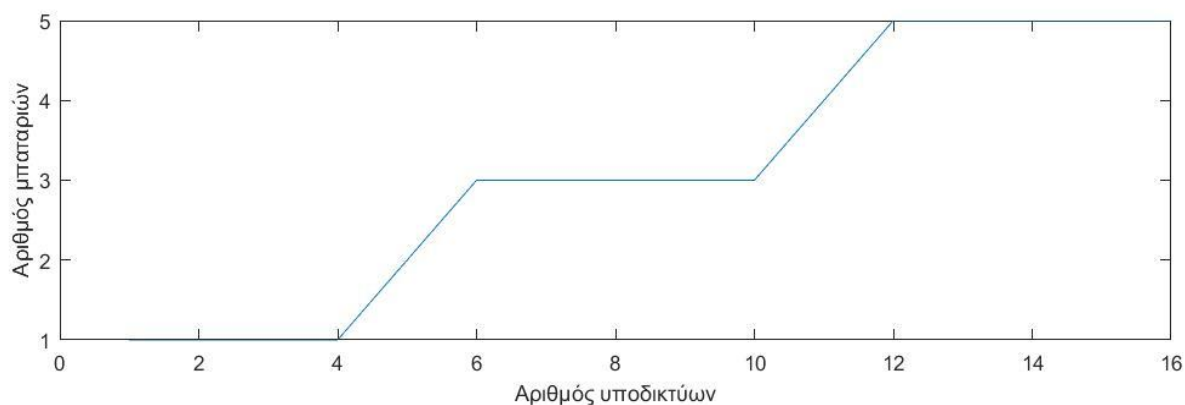
1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο	8ο	9ο	10ο	11ο	12ο
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15
-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	14	16
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17

Πίνακας 7.19: Υπογήφιοι ζυγοί σε κάθε υποδίκτυο

1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο	8ο	9ο	10ο	11ο	12ο
-	-	-	-	-	7	-	-	10	12	14	17

Πίνακας 7.20: Θέσεις των ESS για 12 clusters

6ο	9ο	10ο	11ο	12ο
7	10	12	14	17

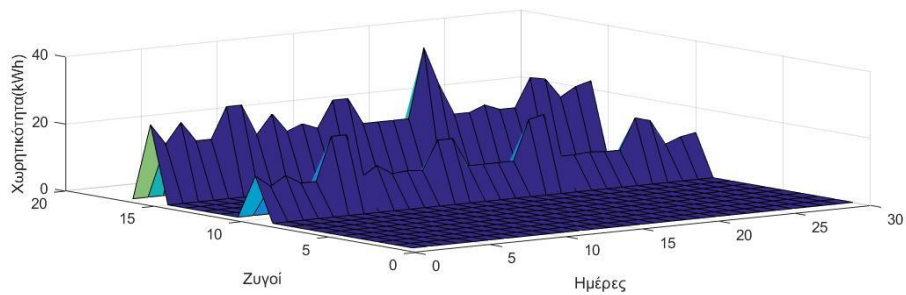


Διάγραμμα 7.21: Αριθμός μπαταριών ως συνάρτηση του αριθμού υποδικτύων

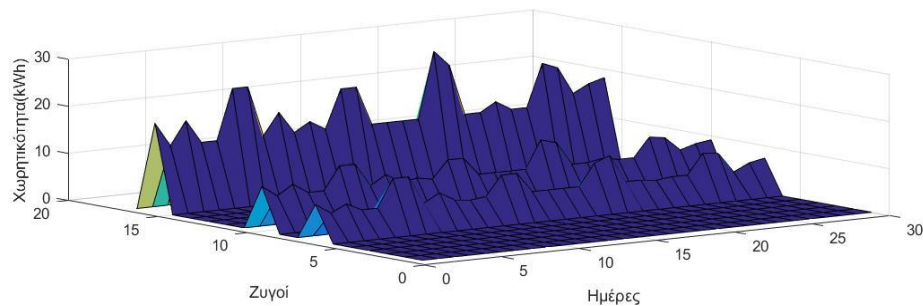
7.3.3 Πρόβλημα διαστασιολόγησης

Αρχικά λύθηκε το πρόβλημα 6.4 και για τις 30 ημέρες του μήνα, με γνωστές τις θέσεις των μπαταριών, όπως προέκυψαν από τον αλγόριθμο συσταδοποίησης. Τα όρια της αέργου ισχύος που ανταλλάσει το σύστημα αποθήκευσης με το δίκτυο (B_{smax}), όπως ορίζονται από την εξίσωση 6.25, τέθηκαν τέτοια, ώστε ο συνολικός συντελεστής ισχύος των ηλεκτρονικών μετατροπέων να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 0.97. Τα όρια των γραμμών μεταφοράς (P_{ijmax}), όπως ορίζονται από την εξίσωση 6.20, τέθηκαν ίσα με 35kW. Ως αρχική συνθήκη για το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών επιλέχτηκε το 0 SoC (αρχικά αφόρτιστες).

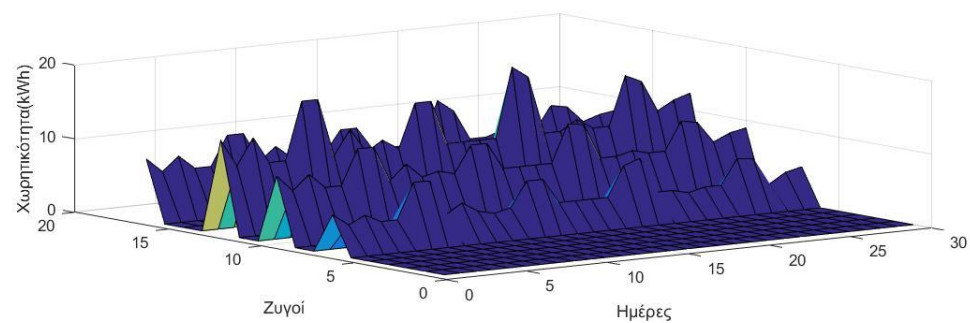
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χωρητικότητες κάθε μπαταρίας για όλες τις ημέρες του μήνα και για κάθε δυνατό αριθμό.



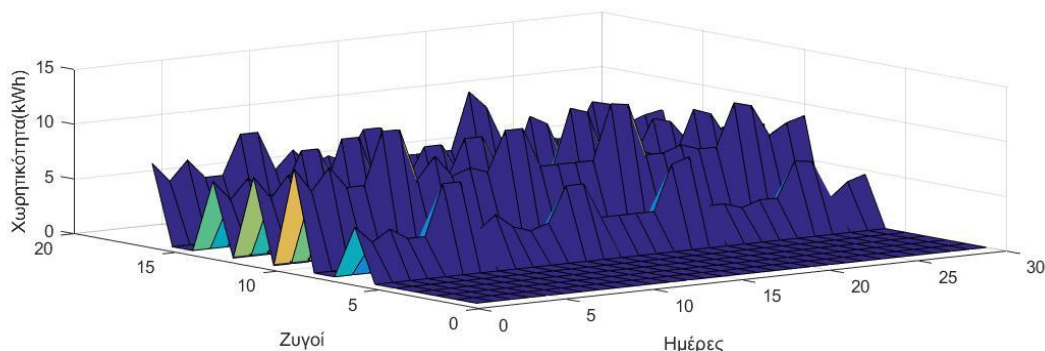
Σχήμα 7.22: Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 10, 16



Σχήμα 7.23: Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 7, 10, 16



Σχήμα 7.24: Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 7, 10, 13, 17



Σχήμα 7.25: Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 7, 10, 12, 14, 17

Στην περίπτωση όπου τοποθετείται στο δίκτυο μία μπαταρία το πρόβλημα είναι αδύνατο να λυθεί χωρίς να παραβιαστούν οι περιορισμοί των τάσεων, για αυτό αυτή η περίπτωση απορρίπτεται.

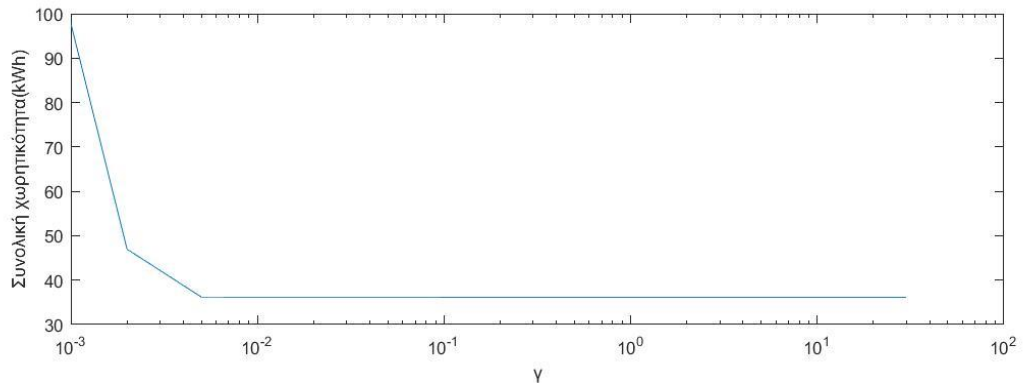
Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5 για να θεωρείται το πρόβλημα του ημιορισμένου προγραμματισμού δυαδικό του μη γραμμικού προβλήματος θα πρέπει να τηρείται ο περιορισμός 5.24. Σύμφωνα με το Λήμμα 2 για να τηρείται η δυαδικότητα αρκεί ο αριθμός των μη μηδενικών ιδιοτιμών του πίνακα W να ισούται με την μονάδα. Πράγματι όπως ήταν αναμενόμενο ο βαθμός του πίνακα W ισούται με την μονάδα για κάθε ημέρα του μήνα. Παρακάτω φαίνονται οι δύο μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα για 1 χαρακτηριστική ημέρα και για τους τέσσερεις πιθανούς αριθμούς μπαταριών.

2 μπαταρίες	3 μπαταρίες	4 μπαταρίες	5 μπαταρίες
16.9663	16.9719	16.9754	16.9760
1.0691e-07	1.0687e-07	1.0357e-07	3.0801e-07

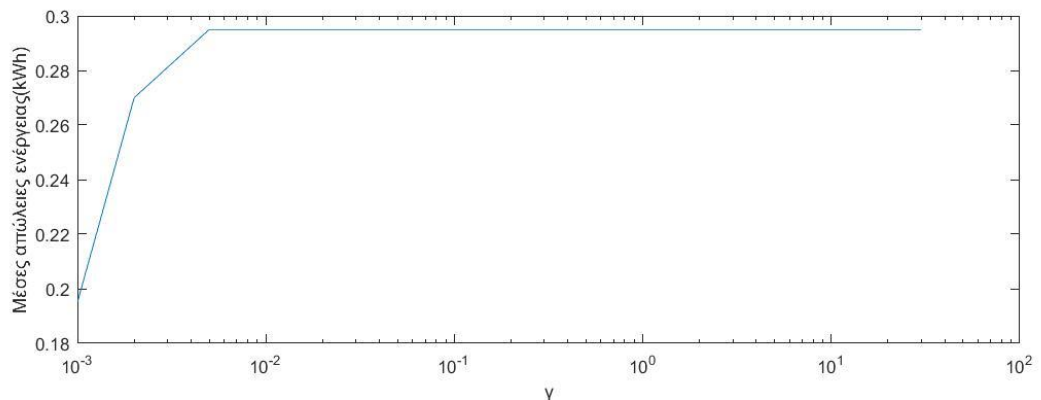
Πίνακας 7.26: Δύο μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα W για 1 ημέρα

Από τον πίνακα είναι φανερό πως ο λόγος των δύο μεγαλύτερων ιδιοτιμών του πίνακα είναι της τάξης 10^{-9} επομένως μπορεί να θεωρηθεί πίνακας μοναδιαίου βαθμού.

Για την επιλογή της κατάλληλης τιμής της παραμέτρου γ της εξίσωσης 6.14 ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για ένα μεγάλο αριθμό ημερών και για όλες τις πιθανές τοποθεσίες, ώστε να βρεθεί η τιμή της παραμέτρου που θα δίνει τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ απωλειών δικτύου και συνολικής εγκατεστημένης χωρητικότητας. Τελικά επιλέχτηκε η τιμή $\gamma=0.1$. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται για μια χαρακτηριστική ημέρα και για την περίπτωση που τοποθετούνται οι μπαταρίες στους ζυγούς 10, 16, οι απώλειες του δικτύου και η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών σαν συναρτήσεις της παραμέτρου.



Διάγραμμα 7.27: Συνολική χωρητικότητα σαν συνάρτηση της παραμέτρου γ

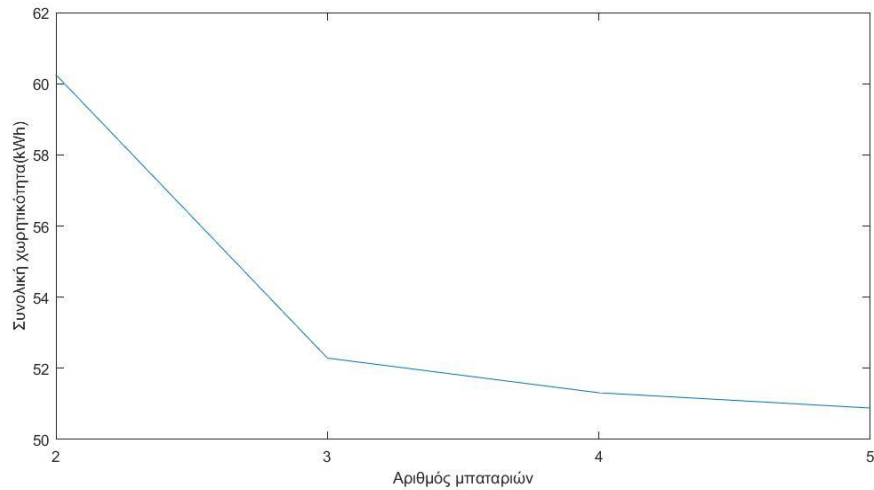


Διάγραμμα 7.28: Μέσες απώλειες ενέργειας σαν συνάρτηση της παραμέτρου γ

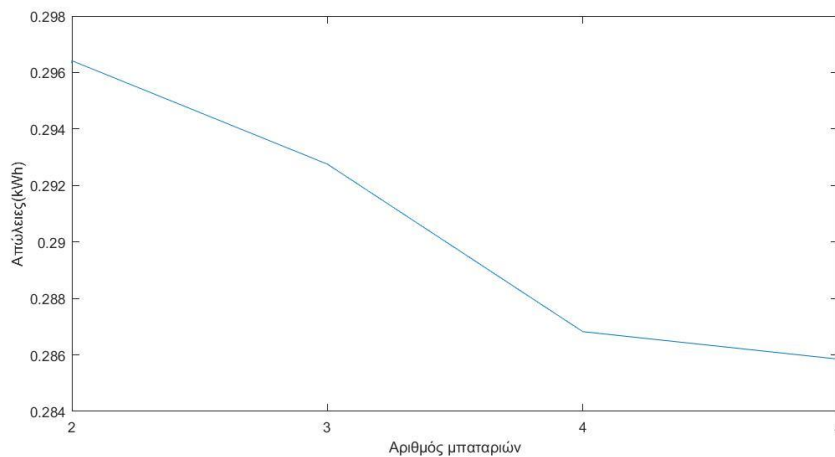
Παρατηρείται ότι καθώς μεγαλώνει η τιμή της παραμέτρου η χωρητικότητα συγκλίνει σε ένα κατώτερο όριο, καθώς για χωρητικότητες κάτω από αυτό το όριο, θα ήταν αδύνατον για την τοπολογία του δικτύου να ισχύουν τα όρια των τάσεων. Αντίστοιχα όπως φαίνεται συμβαίνει το ίδιο και με τις μέσες απώλειες του δικτύου.

Για να επαληθευθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου της εύρεσης των βέλτιστων θέσεων των μπαταριών, λύνοντας το πρόβλημα 6.4 για μια ημέρα, για δύο μπαταρίες και για όλες τις πιθανές θέσεις που μπορούν αυτές να πάρουν στο δίκτυο (σύνολο 120 πιθανοί συνδυασμοί) βρέθηκε πως η βέλτιστη λύση από όλους τους συνδυασμούς ήταν όταν οι μπαταρίες τοποθετούνταν στους ζυγούς 8 και 16 και η συνολική χωρητικότητα ήταν 33,74kWh. Ο αλγόριθμος τοποθέτησης έχει σαν αποτέλεσμα την τοποθέτηση των μπαταριών στους ζυγούς 10 και 16 με συνολική χωρητικότητα 36,165kWh. Το σφάλμα σε αυτή την περίπτωση είναι 7,2% όπου αν συγκριθεί με την μείωση της πολυπλοκότητας που προσφέρει ο αλγόριθμος συσταδοποίησης, εφόσον αποτρέπει τον υπολογισμό 120 διαφορετικών περιπτώσεων, είναι μια καλή προσέγγιση. Επίσης δεδομένου ότι οι μπαταρίες που υπάρχουν στο εμπόριο μπορούν να πάρουν συγκεκριμένες τιμές χωρητικότητας, το σφάλμα στην πράξη μπορεί να γίνει ακόμη μικρότερο.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι χωρητικότητες των μπαταριών που επιλέχθηκαν σε κάθε περίπτωση, λαμβάνοντας για κάθε μια την μέγιστη τιμή της από όλες τις ημέρες του μήνα, καθώς και οι μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου στην διάρκεια του μήνα.



Διάγραμμα 7.29: Συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα ως συνάρτηση του αριθμού των μονάδων



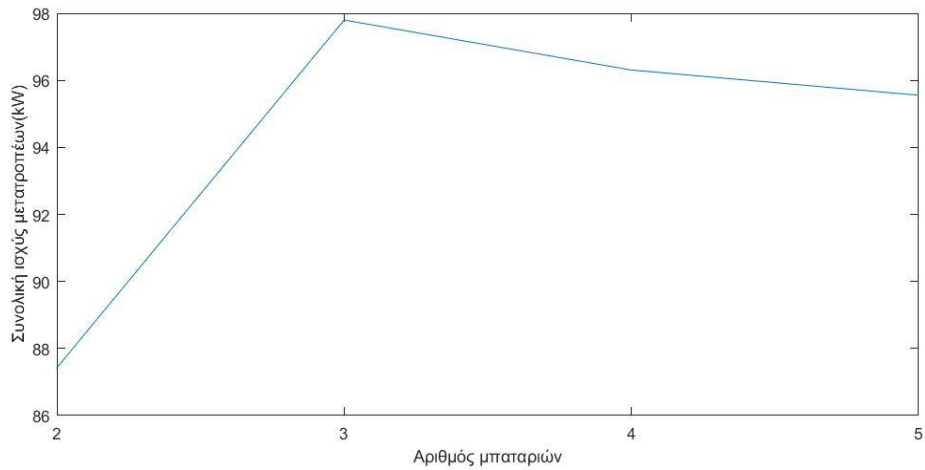
Διάγραμμα 7.30: Μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου ως συνάρτηση του αριθμού των μονάδων

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα μεγαλύτερος αριθμός μπαταριών, απαιτεί λιγότερη συνολική χωρητικότητα για την επίλυση του προβλήματος.

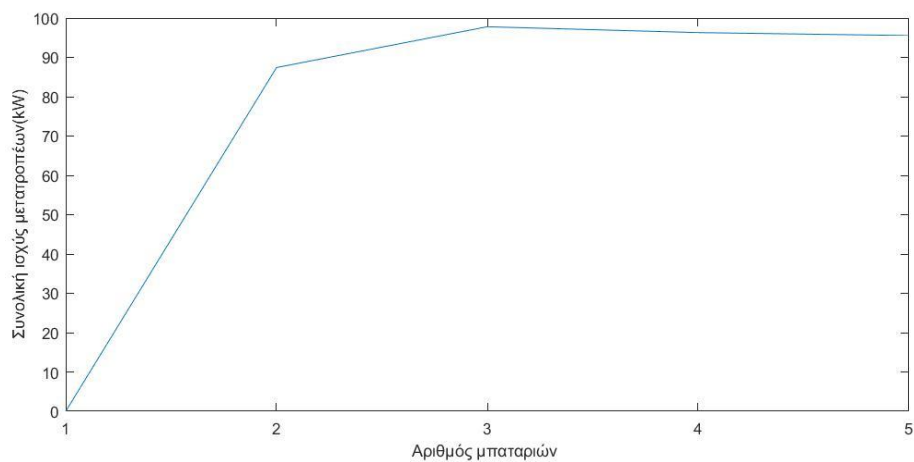
7.3.4 Τελική επιλογή του μεγέθους και των θέσεων των μπαταριών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι χωρητικότητες που προέκυψαν παραπάνω αποτελούν το κατώτερο όριο ώστε να τηρούνται οι περιορισμοί στις τάσεις των ζυγών, όχι όμως ρεαλιστικές τιμές, καθώς οι μπαταρίες χάνουν μέρος της χωρητικότητας τους με την πάροδο του χρόνου. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο του Κεφαλαίου 6, σαν συντελεστές προσαύξησης των μπαταριών χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 1.25, 1.43. Έτσι έχουμε αντίστοιχα τους συντελεστές γήρανσης $L=0.8$, $L=0.7$ τους οποίους μόλις φτάσουν οι μπαταρίες θεωρούνται πλέον μη ικανές για τον ζυγό και αντικαθίστανται. Επίσης όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα παραπάνω, οι διαφορές στις μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου είναι ασήμαντες για όλες τις περιπτώσεις, για αυτό το λόγω δεν λαμβάνονται υπόψη στην τελική επιλογή.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται η συνολική ισχύς των ηλεκτρικών μετατροπέων, όπως υπολογίστηκαν λύνοντας το πρόβλημα 6.5 για όλες τις ημέρες του μήνα, για κάθε αριθμό μπαταριών και κάθε συντελεστή προσαύξησης.



Διάγραμμα 7.31: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συναρτήσει του αριθμού μπαταριών για $\alpha=1.25$



Διάγραμμα 7.32: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συναρτήσει του αριθμού μπαταριών για $\alpha=1.43$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	14.34	10.76	9.97
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	28.33	16.32	15.20	14.95
11	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	13.58
13	0.00	0.00	23.07	0.00
14	0.00	0.00	0.00	11.80
15	0.00	0.00	0.00	0.00
16	46.99	34.70	0.00	0.00
17	0.00	0.00	15.11	13.31

Πίνακας 7.33: Χωρητικότητες των μπαταριών(kWh) για $\alpha=1.25$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	16.41	12.31	11.41
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	32.41	18.67	17.39	17.10
11	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	15.53
13	0.00	0.00	26.39	0.00
14	0.00	0.00	0.00	13.50
15	0.00	0.00	0.00	0.00
16	53.75	39.70	0.00	0.00
17	0.00	0.00	17.29	15.22

Πίνακας 7.34: Χωρητικότητες των μπαταριών(kWh) για $\alpha=1.43$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	35.37	29.24	27.89
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	44.63	22.04	20.72	20.48
11	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	19.14
13	0.00	0.00	31.86	0.00
14	0.00	0.00	0.00	15.78
15	0.00	0.00	0.00	0.00
16	46.40	44.43	0.00	0.00
17	0.00	0.00	18.45	16.22

Πίνακας 7.35: Ισχύεις των ηλεκτρονικών μετατροπέων(kW) για $\alpha=1.25$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	36.33	29.12	27.35
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	43.23	22.12	20.10	20.48
11	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	20.15
13	0.00	0.00	31.86	0.00
14	0.00	0.00	0.00	15.78
15	0.00	0.00	0.00	0.00
16	46.40	44.28	0.00	0.00
17	0.00	0.00	17.97	16.18

Πίνακας 7.36: Ισχύεις των ηλεκτρονικών μετατροπέων(kW) για $\alpha=1.43$

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι χρόνοι ζωής των μπαταριών για τους δύο συντελεστές γήρανσης. Μονάδα μέτρησης των χρόνων ζωής είναι το έτος, οι μηδενικοί χρόνοι ζωής δηλώνουν

πως σε αυτό το ζυγό δεν τοποθετείται μπαταρία. Επίσης στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγινε η θεώρηση πως όλοι οι μήνες του χρόνου καταπονούν το ίδιο τις μπαταρίες. Το μοντέλο γήρανσης αφορά συγκεκριμένες μπαταρίες τύπου lithium iron phosphate (LiFePO4).

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	4	3.9	3.9
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	5.8	5.2	5	4.9
11	0	0	0	0
12	0	0	0	4.8
13	0	0	5	0
14	0	0	0	5
15	0	0	0	0
16	5.2	5	0	0
17	0	0	5.5	5.5

Πίνακας 7.37: Χρόνοι ζωής των μπαταριών για $\alpha=1.25$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	7.6	7.4	7.3
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	11.2	9.1	8.9	8.7
11	0	0	0	0
12	0	0	0	8.4
13	0	0	8.7	0
14	0	0	0	8.8
15	0	0	0	0
16	10.3	9.1	0	0
17	0	0	9.4	9.4

Πίνακας 7.38: Χρόνοι ζωής των μπαταριών για $\alpha=1.43$

Όπως ήταν αναμενόμενο καθώς μειώνεται ο συντελεστής γήρανσης που πρέπει να φτάσουν οι μπαταρίες για να αντικατασταθούν, αυξάνεται ο χρόνος ζωής τους. Όπως έχει αναφερθεί όμως αυξάνεται και η συνολική χωρητικότητα, άρα και το κόστος αγοράς και συντήρησης τους. Παρατηρείται επίσης, πως για διαφορετικό αριθμό και θέσεις των μπαταριών, αυτές καταπονούνται με διαφορετικό τρόπο, με αποτέλεσμα να προκύπτουν και διαφορετικοί χρόνοι ζωής.

Η τελική επιλογή του αριθμού και της χωρητικότητάς τους γίνεται με την χρήση του κριτηρίου του NPC. Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται όλες οι τιμές και τα κόστη που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του NPC, καθώς και τα NPC για όλους τους αριθμούς μπαταριών και συντελεστές γήρανσης[18].

Χρονιά	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PCS (€/kW)	220	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BOP (€/kW)	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O&M fixed \$/kW-year	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
r(επιτόκιο αναγωγής)	5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N(χρόνος επένδυσης)	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Battery Capital cost €/kWh	500	450	400	360	320	300	280	240	220	200

Πίνακας 7.39: Παράμετροι για τον υπολογισμό του NPC

	L=0.8	L=0.7
2 μπατ.	66518.37	68569.00
3 μπατ.	64601.91	68846.99
4 μπατ.	63525.20	67865.59
5 μπατ.	63830.66	67319.83

Πίνακας 7.40: Τα Καθαρά Παρόντα Κόστη (€) για όλες τις περιπτώσεις

Για τον υπολογισμό της υπολειμματικής αξίας των μπαταριών, θεωρήθηκε πως η εναπομένουσα χωρητικότητά τους κοστολογείται με βάση το κόστος ανά kWh της εκάστοτε χρονιάς που αντικαθίστανται. Μετά το πέρας των 10 χρόνων η υπολειμματική αξία των μπαταριών θεωρήθηκε μηδενική. Επίσης ακόμη μια θεώρηση που έγινε, ήταν πως οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς δεν αντικαθίστανται μέσα στην δεκαετία.

Με βάση τον Πίνακα 7.40 το μικρότερο Καθαρό Παρόν Κόστος έχει η περίπτωση, που τοποθετούνται τέσσερις μπαταρίες, για συντελεστή προσαύξησης $\alpha=125$. Σε αυτή την περίπτωση η τελική επιλογή των θέσεων, των χωρητικοτήτων των μπαταριών και των ισχύων των μετατροπέων φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Ζυγός	Χωρητικότητα(kWh)	Ισχύς(kW)
1.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00
6.00	0.00	0.00
7.00	10.76	29.24
8.00	0.00	0.00
9.00	0.00	0.00
10.00	15.20	20.72
11.00	0.00	0.00
12.00	0.00	0.00
13.00	23.07	31.86
14.00	0.00	0.00
15.00	0.00	0.00
16.00	0.00	0.00
17.00	15.11	18.45

Πίνακας 7.41: Τελική επιλογή του μεγέθους και των θέσεων των μπαταριών

Παρατηρείται πως με μεγαλύτερο αριθμό μπαταριών προκύπτει μικρότερο NPC, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού μεγαλύτερος αριθμός μπαταριών απαιτεί μικρότερη συνολική χωρητικότητα.

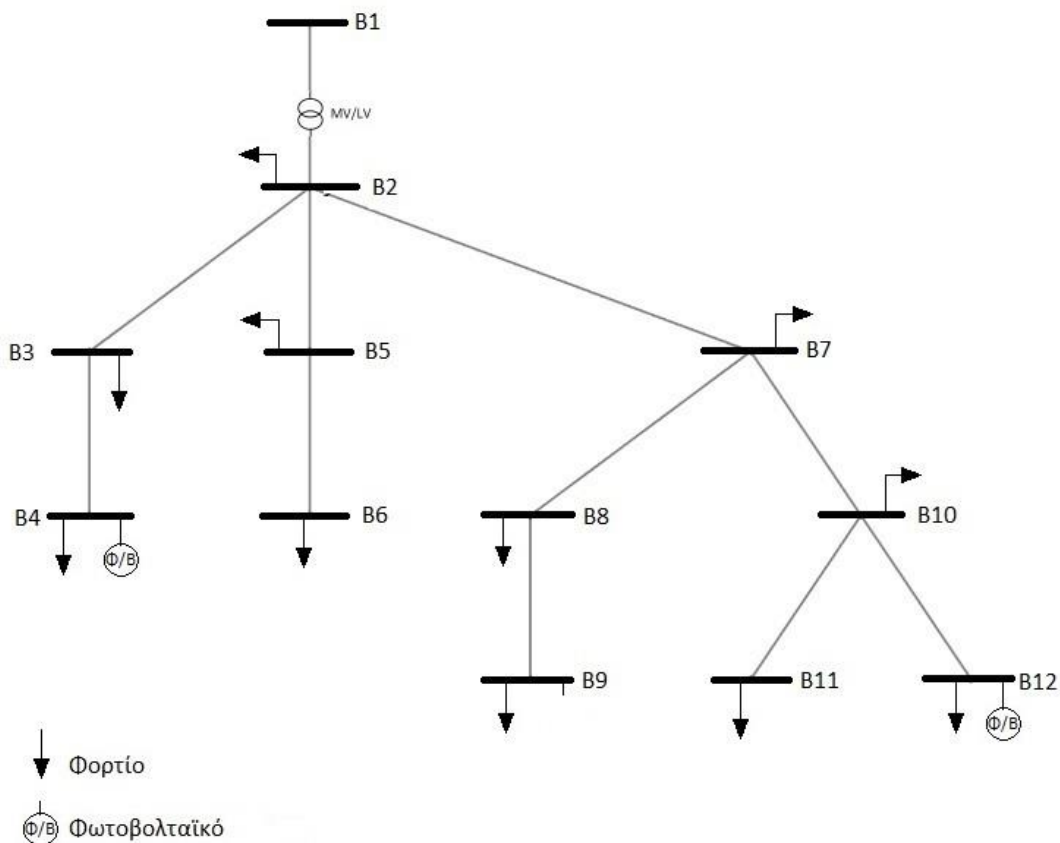
Παρόλο που ο συντελεστής προσαύξησης $\alpha=1.43$ σχεδόν διπλασιάζει τους χρόνους ζωής σε σύγκριση με τον συντελεστή $\alpha=1.25$, τα Καθαρά Παρόν Κόστη του προκύπτουν μεγαλύτερα. Σε αυτό οφείλεται ίσως το γεγονός πως με την πάροδο του χρόνου, οι τιμές των μπαταριών μειώνονται σημαντικά, έτσι παρόλη την αύξηση του χρόνου ζωής της επένδυσης, προτιμάτε η λύση που απαιτεί μικρότερο αρχικό κεφάλαιο αλλά και μικρότερες Καθαρές Ταμειακές Ροές.

Μια σημαντική παρατήρηση επί τω αποτελεσμάτων είναι πως, στην περίπτωση του συντελεστή $\alpha=1.43$ οι χρόνοι ζωής των μπαταριών είναι λίγο μικρότεροι από 10 έτη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, μέσα στην χρονική περίοδο της δεκαετίας που μελετήθηκε το πρόβλημα, να αντικατασταθούν μία φορά, αλλά στο τέλος της χρονικής περιόδου να έχουν σχεδόν μηδενική γήρανση, σε αντίθεση με την περίπτωση του συντελεστή $\alpha=1.25$, που αγοράζονται περίπου στο πέμπτο έτος. Όπως προαναφέρθηκε όμως λήφθηκε υπόψη η παραδοχή, πως μετά την δεκαετία οι μπαταρίες έχουν μηδενική υπολειμματική αξία. Αν αυτή η παραδοχή δεν λαμβανόταν υπόψη, από τα αποτελέσματα φαίνεται πως υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να προτιμηθεί η περίπτωση του συντελεστή $\alpha=1.43$.

7.4 ΔΙΚΤΥΟ 12 ΖΥΓΩΝ

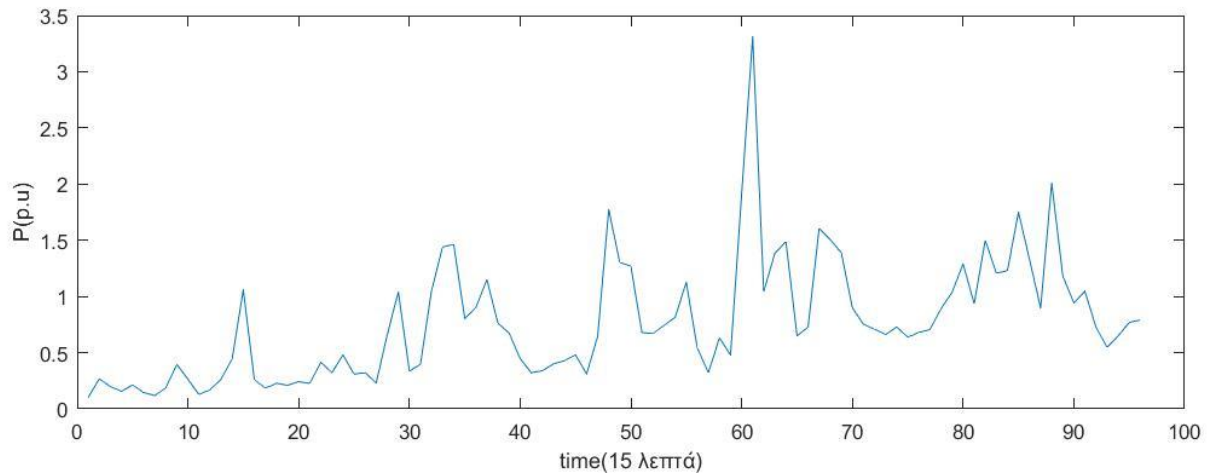
7.4.1 Δεδομένα

Η τοπολογία του δικτύου των 12 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 7.42. Πρόκειται για ακτινικό δίκτυο διανομής τάσης 400V (Χαμηλή Τάση), το οποίο αποτελείται από 11 γραμμές και έχει συνδεδεμένα φορτία σταθερής ισχύος καθώς επίσης και φωτοβολταϊκά πάρκα. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΜΤ/ΧΤ και για αυτόν ακριβώς το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης του συστήματος. Αυτή η θεώρηση έχει ως συνέπεια να μη μπορούν να συνδεθούν σε αυτόν τον ζυγό μονάδες αποθήκευσης.

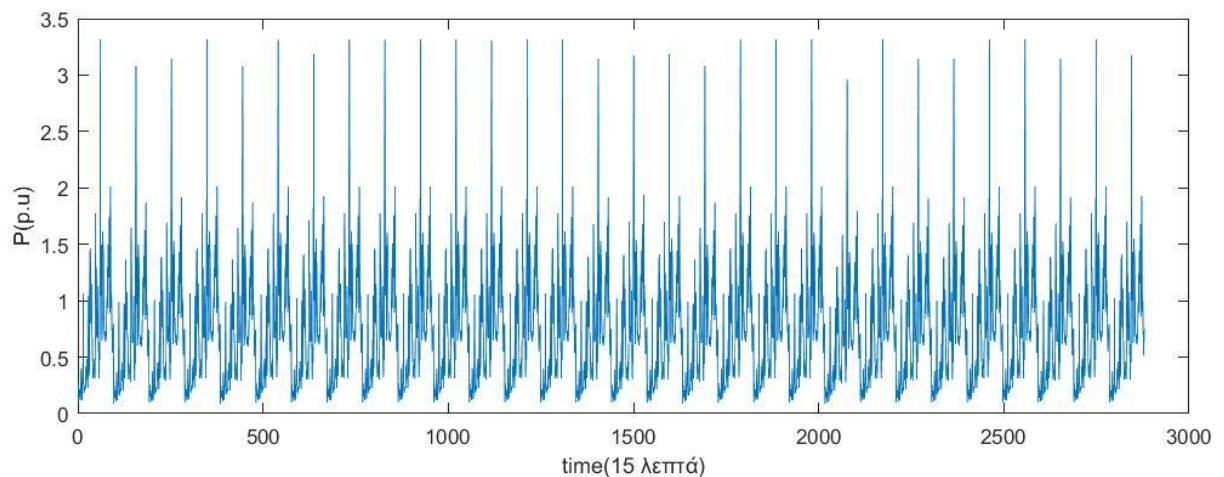


Σχήμα 7.42: Δίκτυο διανομής 12 ζυγών

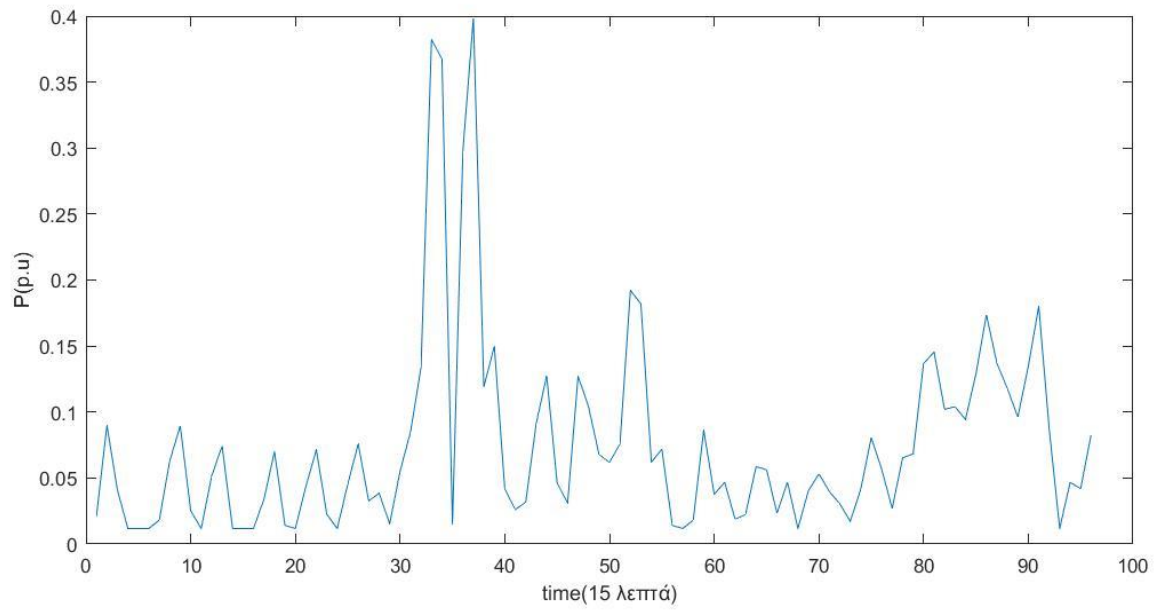
Ως χρονικός ορίζοντας επίλυσης του προβλήματος επιλέχθηκε και σε αυτή την περίπτωση ο ένας μήνας (30 ημέρες) με διακριτό βήμα των 15 λεπτών. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χρονοσειρές του συνολικού φορτίου και της συνολικής φωτοβολταϊκής παραγωγής του δικτύου σε αυτό το χρονικό διάστημα αντίστοιχα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται για έναν ζυγό η κατανάλωση και η παραγωγή του, στο διάστημα μιας ημέρας, αλλά και ολόκληρου του μήνα Η βάση ισχύος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ανά μονάδα μεγεθών είναι τα 50kW, η άεργος που εγχέουν τα φωτοβολταϊκά είναι μηδέν, δηλαδή έγινε η θεώρηση πως λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.



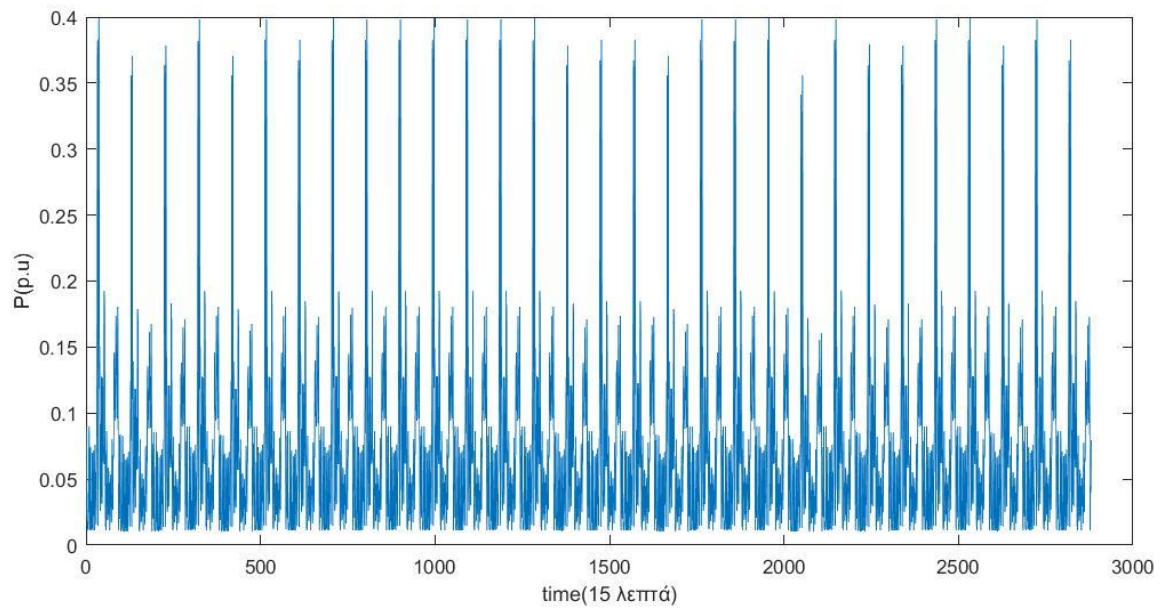
Διάγραμμα 7.43: Συνολικό φορτίο για 1 ημέρα



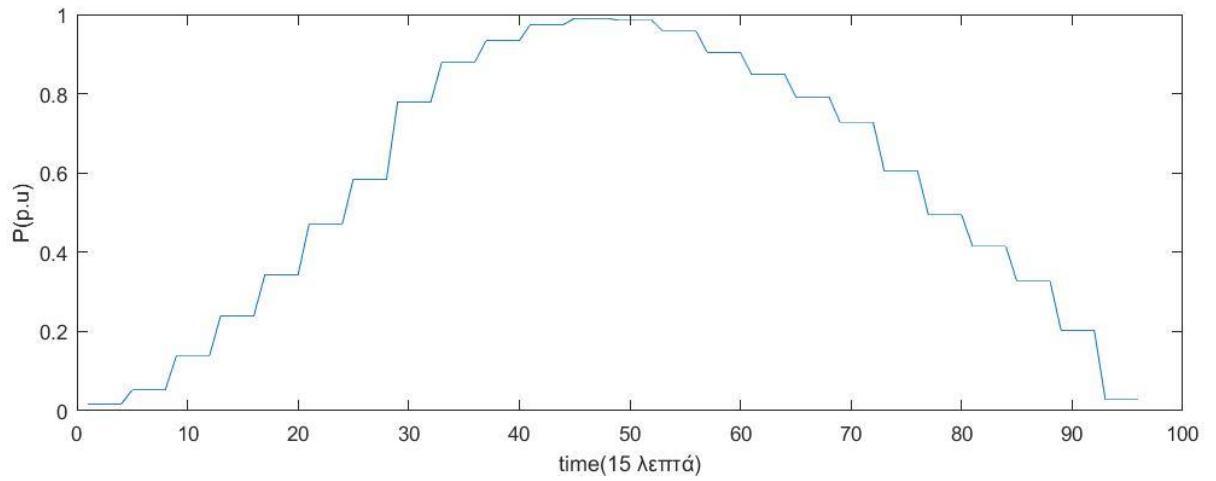
Διάγραμμα 7.44: Συνολικό φορτίο για 1 μήνα



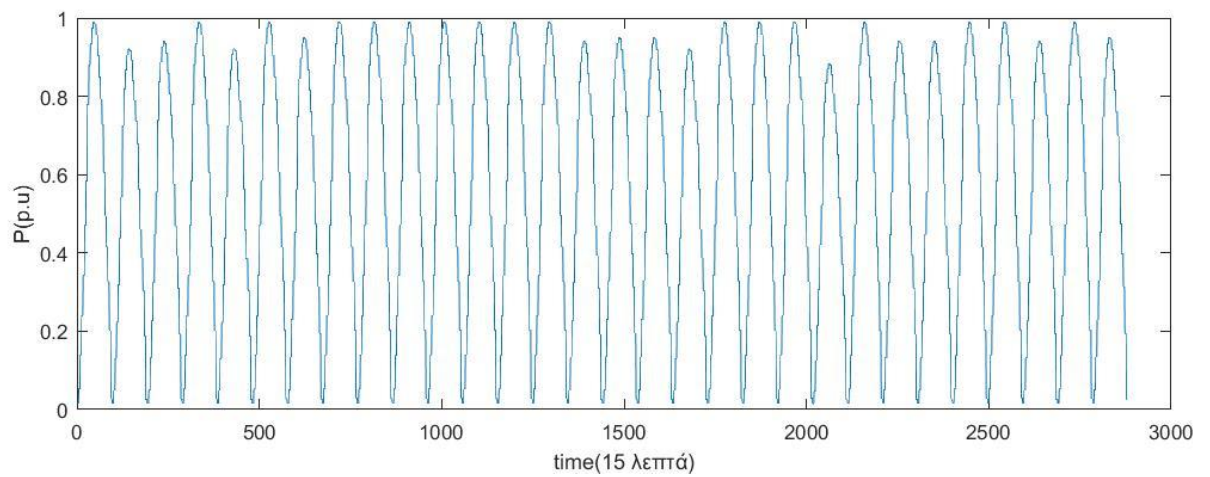
Διάγραμμα 7.45: Φορτίο του ζυγού 10 για 1 ημέρα



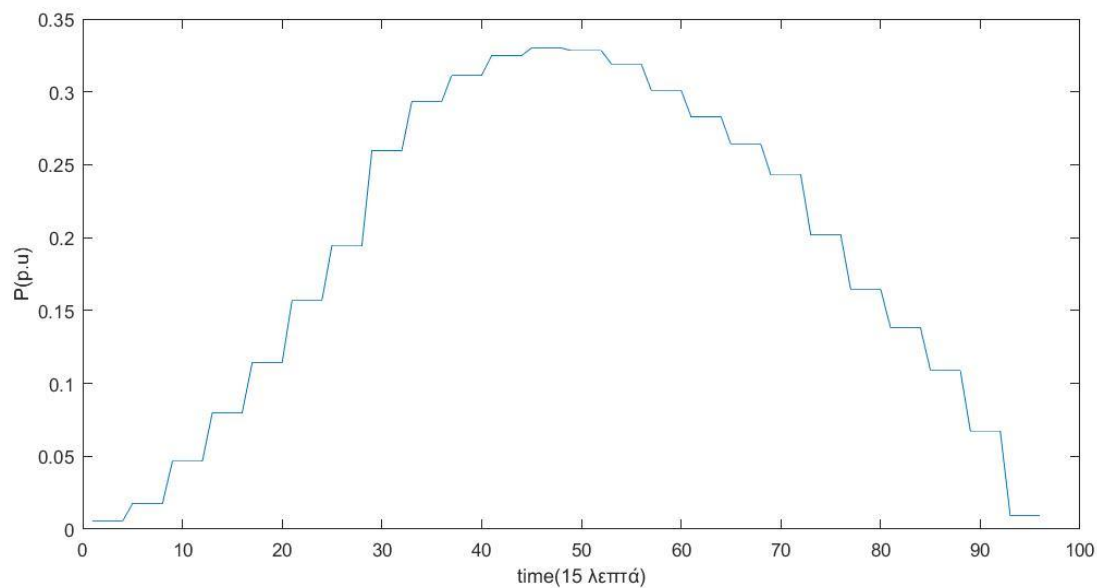
Διάγραμμα 7.46: Φορτίο του ζυγού 10 για 1 μήνα



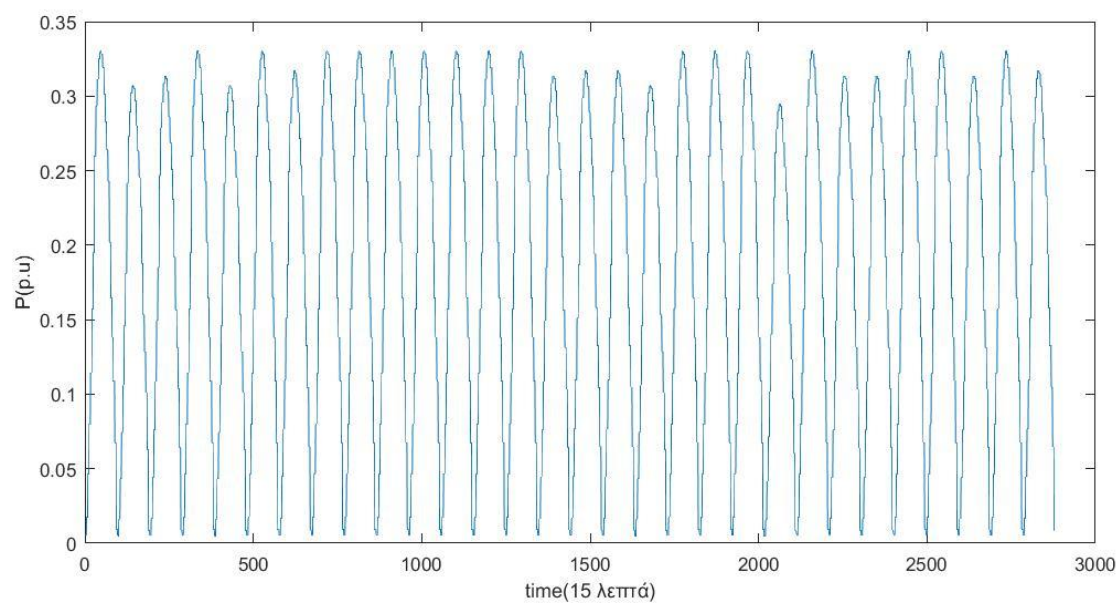
Διάγραμμα 7.47: Συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 ημέρα



Διάγραμμα 7.48: Συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 μήνα



Διάγραμμα 7.49: Φωτοβολταϊκή παραγωγή του ζυγού 9 για 1 ημέρα



Διάγραμμα 7.50: Φωτοβολταϊκή παραγωγή του ζυγού 9 για 1 μήνα

7.4.2 Πρόβλημα τοποθέτησης

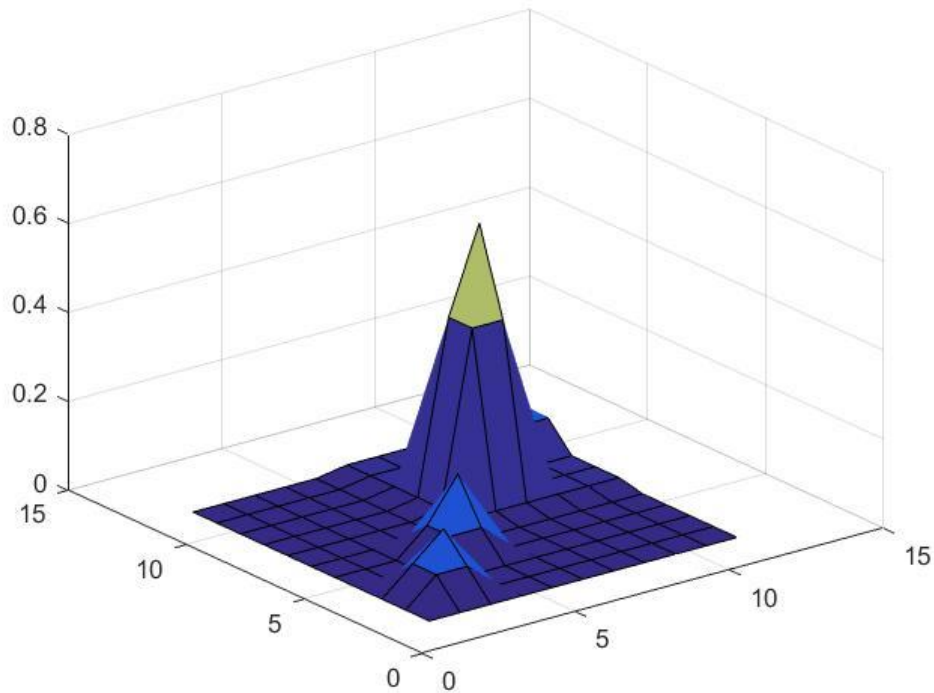
Οι πιθανές θέσεις των μπαταριών στο δίκτυο είναι όλοι οι ζυγοί εκτός του ζυγού ταλάντωσης, επομένως ο μέγιστος αριθμός υποδικτύων είναι 11. Ο αλγόριθμος συσταδοποίησης εκτελέστηκε 11

φορές ($n_c=1...11$), ξεκινώντας από την περίπτωση όπου το δίκτυο λαμβάνεται ως ένα, έως την περίπτωση όπου κάθε ζυγός αποτελεί και διαφορετικό κομμάτι του.

Στον πίνακα 7.51 και στο σχήμα 7.52 φαίνονται οι ευαισθησίες τάσης των ζυγών ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος, οι οποίες πάρθηκαν χρησιμοποιώντας την μέση παραγωγή από ΑΠΕ και το μέσο φορτίο των 30 ημερών

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	0.030232	0.03023	0.030228	0.030227	0.030224	0.030229	0.030198	0.030182	0.030226	0.030224	0.030225
3	0.03023	0.090685	0.09068	0.030226	0.030222	0.030228	0.030196	0.03018	0.030224	0.030223	0.030223
4	0.030228	0.09068	0.151124	0.030224	0.03022	0.030226	0.030194	0.030178	0.030223	0.030221	0.030222
5	0.030227	0.030226	0.030224	0.090669	0.090658	0.030225	0.030193	0.030178	0.030222	0.03022	0.030221
6	0.030224	0.030222	0.03022	0.090658	0.187335	0.030221	0.03019	0.030174	0.030218	0.030216	0.030217
7	0.030229	0.030228	0.030226	0.030225	0.030221	0.042318	0.042273	0.042251	0.042313	0.042311	0.042312
8	0.030198	0.030196	0.030194	0.030193	0.03019	0.042273	0.428325	0.428101	0.042269	0.042267	0.042267
9	0.030182	0.03018	0.030178	0.030178	0.030174	0.042251	0.428101	0.620722	0.042247	0.042244	0.042245
10	0.030226	0.030224	0.030223	0.030222	0.030218	0.042313	0.042269	0.042247	0.10275	0.102744	0.102746
11	0.030224	0.030223	0.030221	0.03022	0.030216	0.042311	0.042267	0.042244	0.102744	0.163172	0.10274
12	0.030225	0.030223	0.030222	0.030221	0.030217	0.042312	0.042267	0.042245	0.102746	0.10274	0.151092

Πίνακας 7.51: Ευαισθησίες των τάσεων των ζυγών ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος



Σχήμα 7.52: Χρωματική αναπαράσταση των ευαισθησιών

Στο χρονικό διάστημα αυτού του μήνα οι υπερτάσεις και υποτάσεις που δημιουργούνται στους ζυγούς φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Το πλήθος των υπερτάσεων/υποτάσεων δηλώνει πόσα 15λεπτα μέσα στο μήνα οι τάσεις βρίσκονται εκτός των επιτρεπτών ορίων. Τα όρια των τάσεων για τους ζυγούς είναι όπως ορίζει ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός 50160 $\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης, δηλαδή το κατώτερο όριο είναι 0.9 p.u και ανώτερο 1.1 p.u .

Πίνακας 7.53: Αριθμός υποτάσεων σε κάθε ζυγό

1	0
2	27
3	48
4	53
5	52
6	117
7	44
8	616
9	592
10	74
11	108
12	86

Πίνακας 7.54: Αριθμός υπερτάσεων σε κάθε ζυγό

1	0
2	3
3	3
4	3
5	8
6	8

7	3
8	25
9	471
10	3
11	3
12	3

. Για λόγους συντομίας στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται για τρεις αριθμούς υποδικτύων, οι υποψήφιοι ζυγοί για τοποθέτηση μπαταριών και η τελική επιλογή των ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθούν οι μπαταρίες. Στον τελικό διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των μπαταριών ως συνάρτηση του αριθμού των υποδικτύων, όπως υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο.

- **1 cluster**

Πίνακας 7.55: Θέσεις των ESS

1ο
8

- **7 clusters**

Πίνακας 7.56: Υποδίκτυα για 7 clusters

1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο
2	3	5	6	7	8	10
-	4	-	-	-	9	11
-	-	-	-	-	-	12

Πίνακας 7.57: Υποψήφιοι ζυγοί σε κάθε υποδίκτυο

1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο
-	4	-	6	-	9	10
-	-	-	-	-	-	11
-	-	-	-	-	-	12

Πίνακας 7.58: Θέσεις των ESS για 7 clusters

2ο	4ο	6ο	7ο
4	6	9	10

- **11 clusters**

Πίνακας 7.59: Υποδίκτυα για 11 clusters

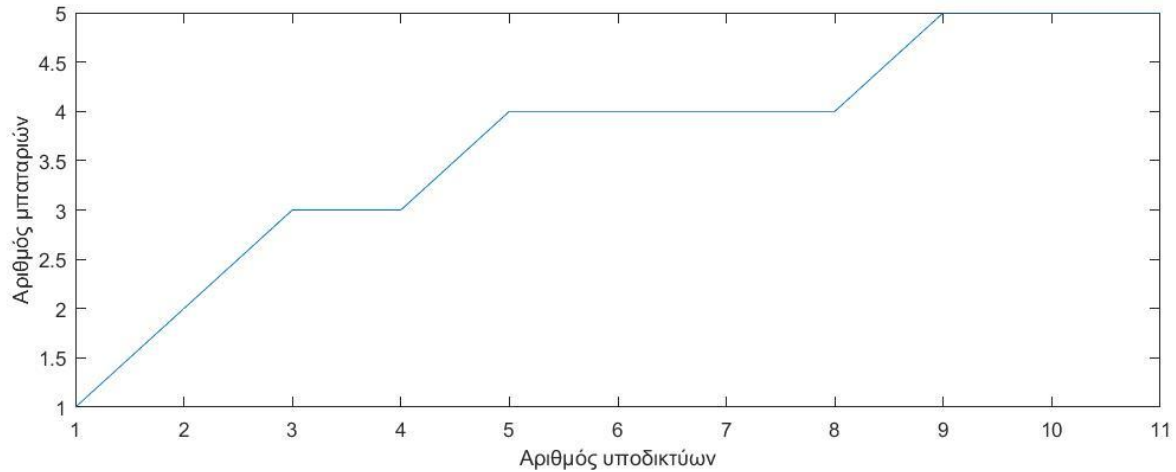
1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο	8ο	9ο	10ο	11ο
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Πίνακας 7.60: Υποψήφιοι ζυγοί σε κάθε υποδίκτυο

1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο	8ο	9ο	10ο	11ο
-	-	4	-	6	-	-	9	-	11	12

Πίνακας 7.61: Θέσεις των ESS για 11 clusters

3ο	5ο	8ο	10ο	11ο
4	6	9	11	12

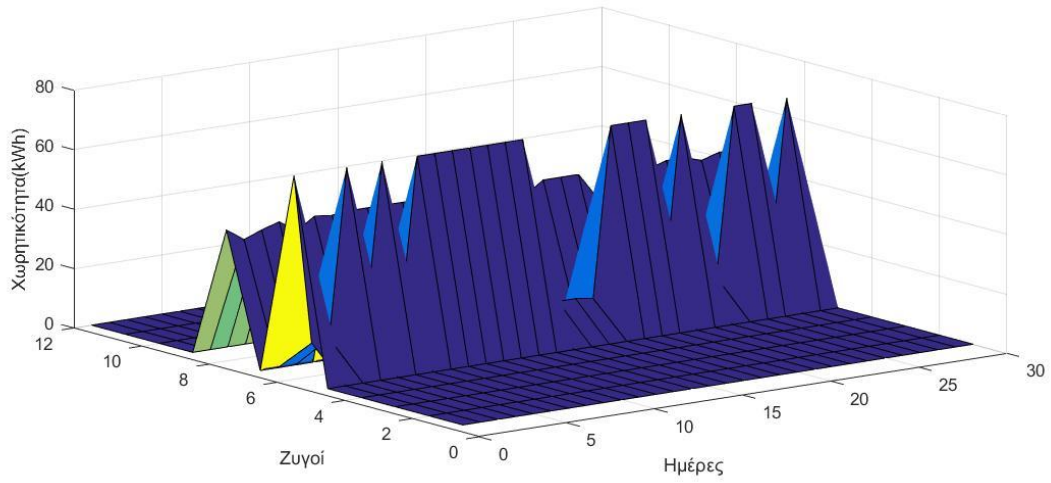


Διάγραμμα 7.62: Αριθμός μπαταριών ως συνάρτηση του αριθμού υποδικτύων

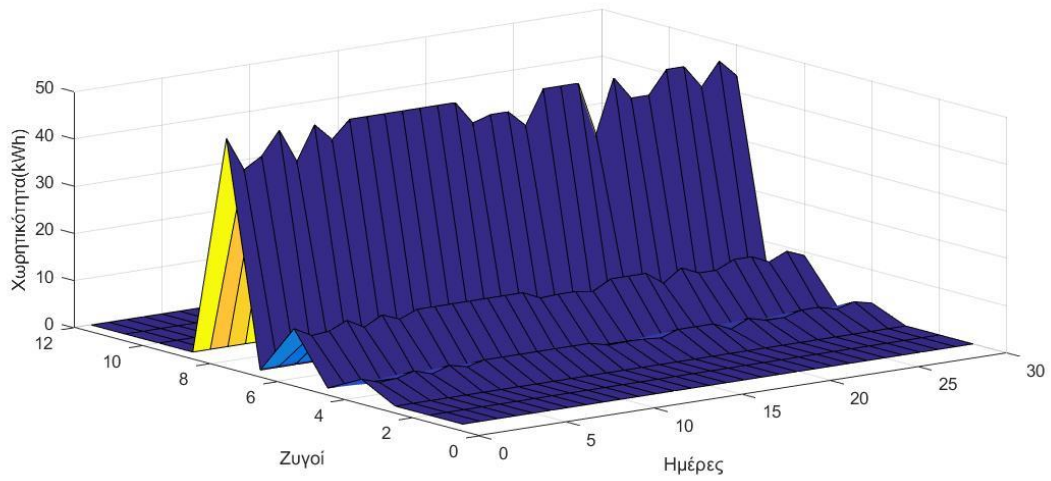
7.4.3 Πρόβλημα διαστασιολόγησης

Αρχικά λύθηκε το πρόβλημα 6.4 και για τις 30 ημέρες του μήνα, με γνωστές τις θέσεις των μπαταριών, όπως προέκυψαν παραπάνω. Τα όρια της αέργου ισχύος που ανταλλάσει το σύστημα αποθήκευσης με το δίκτυο (B_{smax}), όπως ορίζονται από την εξίσωση 6.25, τέθηκαν τέτοια, ώστε ο συνολικός συντελεστής ισχύος των ηλεκτρονικών μετατροπέων να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 0.97. Τα όρια των γραμμών μεταφοράς (P_{ijmax}), όπως ορίζονται από την εξίσωση 6.20, τέθηκαν ίσα με 35kW. Ως αρχική συνθήκη για το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών επιλέχτηκε το 0 SoC (αρχικά αφόρτιστες).

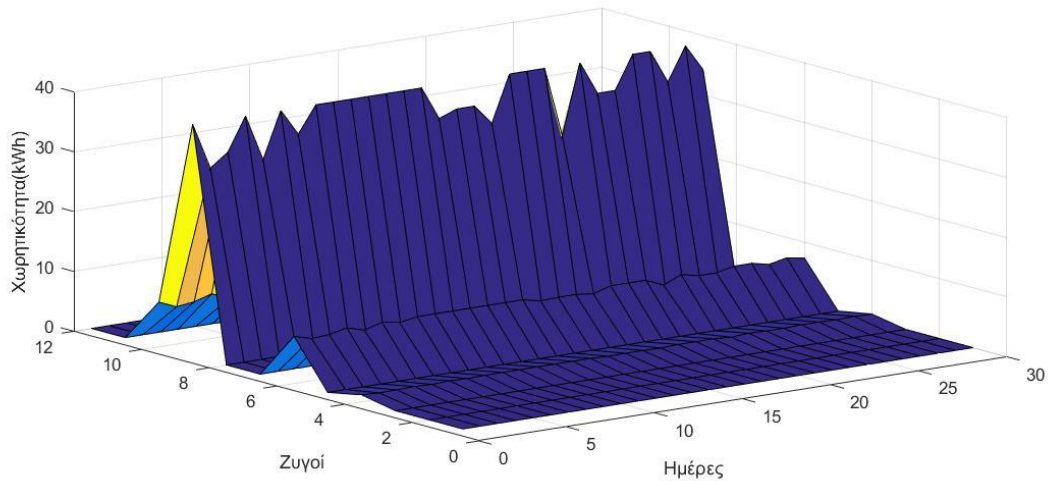
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χωρητικότητες κάθε μπαταρίας για όλες τις ημέρες του μήνα και για κάθε δυνατό αριθμό.



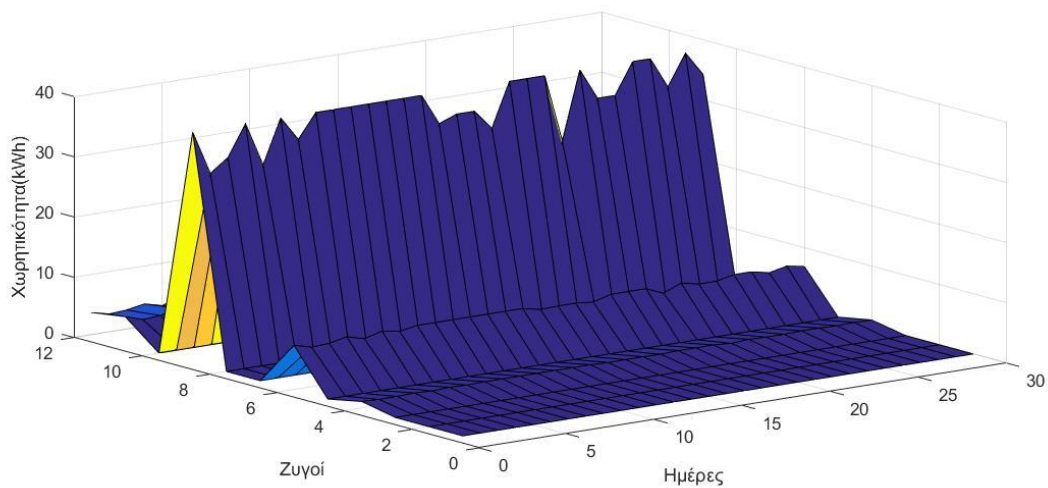
Σχήμα 7.63: Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 6, 8



Σχήμα 7.64: Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 4, 6, 8



Σχήμα 7.65: Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 4, 6, 9, 10



Σχήμα 7.66: Χωρητικότητες των μπαταριών στους ζυγούς 4, 6, 9, 11, 12

Στην περίπτωση όπου τοποθετείται στο δίκτυο μία μπαταρία το πρόβλημα είναι αδύνατο να λυθεί χωρίς να παραβιαστούν οι περιορισμοί των τάσεων, για αυτό αυτή η περίπτωση απορρίπτεται.

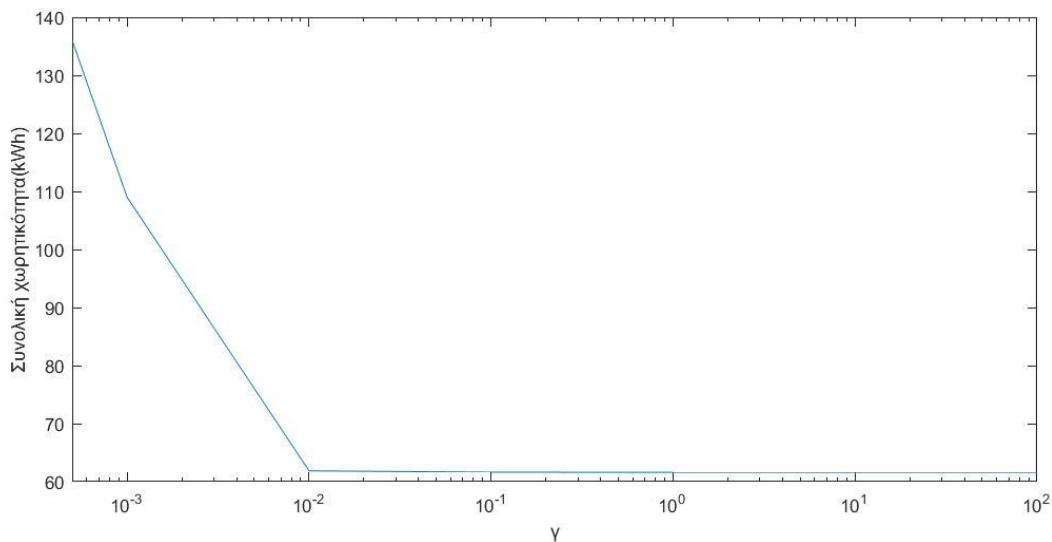
Προς επαλήθευση του περιορισμού 5.24, υπολογίστηκαν και σε αυτή την περίπτωση οι δύο μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα W για 1 χαρακτηριστική ημέρα και για τους τέσσερις πιθανούς αριθμούς μπαταριών.

2 μπαταρίες	3 μπαταρίες	4 μπαταρίες	5 μπαταρίες
11.6579	11.6898	11.7237	11.7224
9.3856e-06	7.8725e-05	3.8490e-05	5.2823e-05

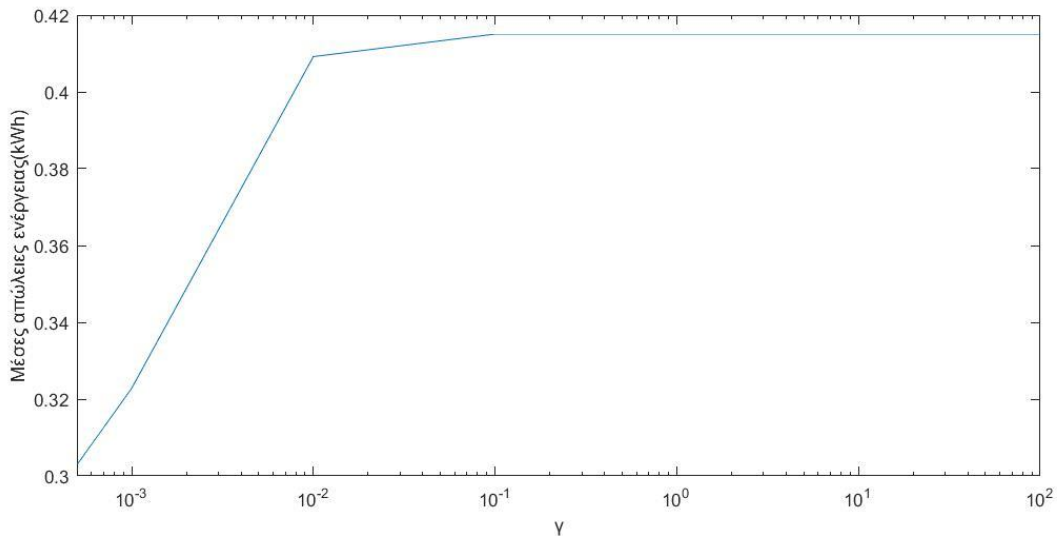
Πίνακας 7.67: Δύο μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα W για 1 ημέρα

Οι λόγοι αυτών των ιδιοτιμών είναι της τάξης του 10^{-6} , άρα μπορεί να θεωρηθεί με ικανοποιητική προσέγγιση πίνακας μοναδιαίου βαθμού.

Όπως και στο προηγούμενο δίκτυο, για την επιλογή της κατάλληλης τιμής της παραμέτρου γ της εξίσωσης 6.14 ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για ένα μεγάλο αριθμό ημερών, ώστε να βρεθεί η τιμή της παραμέτρου που θα δίνει τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ απωλειών δικτύου και συνολικής εγκατεστημένης χωρητικότητας. Τελικά επιλέχτηκε η τιμή $\gamma=1$. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται για μια χαρακτηριστική ημέρα και την περίπτωση που τοποθετούνται οι μπαταρίες στους ζυγούς 4, 6 και 8, οι απώλειες του δικτύου και η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών σαν συναρτήσεις της παραμέτρου.



Διάγραμμα 7.68: Συνολική χωρητικότητα σαν συνάρτηση της παραμέτρου γ

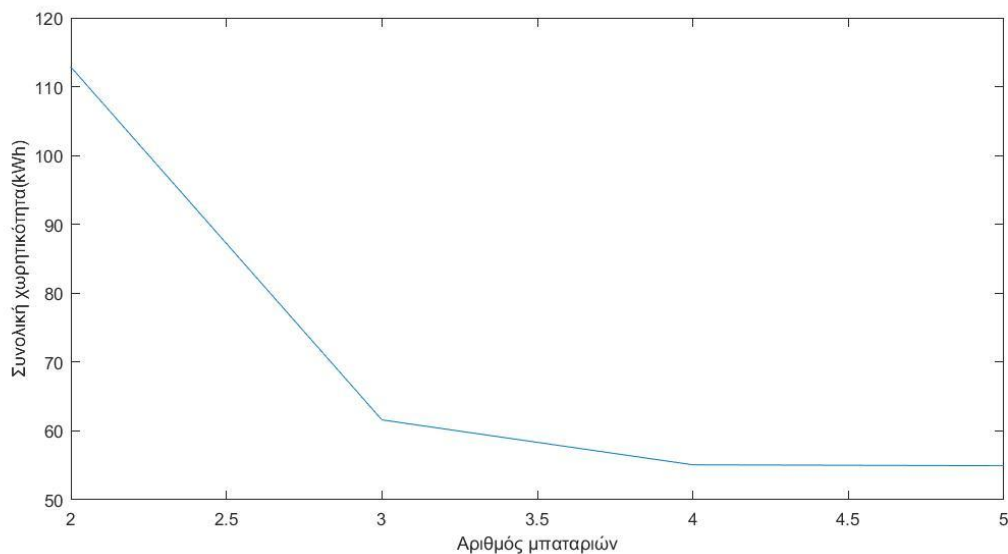


Διάγραμμα 7.69: Μέσες απώλειες ενέργειας σαν συνάρτηση της παραμέτρου γ

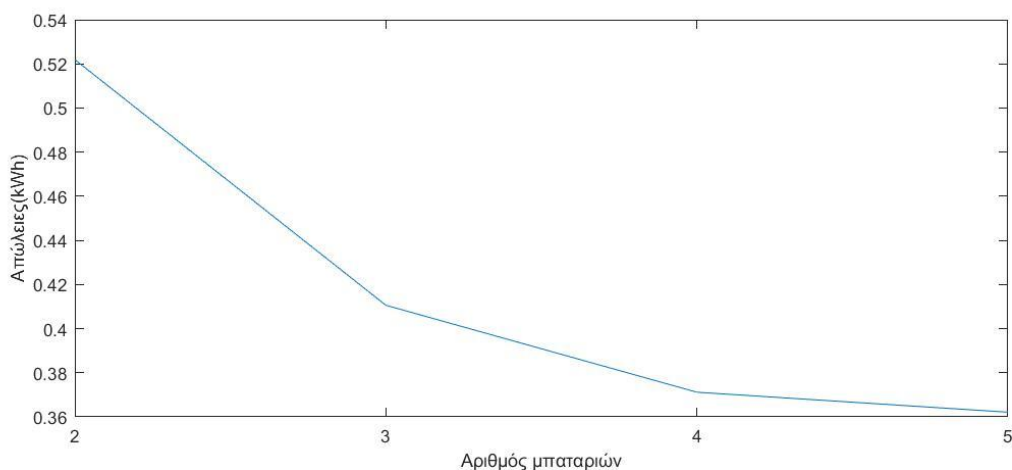
Παρατηρείται όπως και στο δίκτυο 17 ζυγών, ότι καθώς μεγαλώνει η τιμή της παραμέτρου η χωρητικότητα συγκλίνει σε ένα κατώτερο όριο, καθώς για χωρητικότητες κάτω από αυτό το όριο, θα ήταν αδύνατον για την τοπολογία του δικτύου να ισχύουν τα όρια των τάσεων. Αντίστοιχα όπως φαίνεται συμβαίνει το ίδιο και με τις μέσες απώλειες του δικτύου.

Για να επαληθευθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου της εύρεσης των βέλτιστων θέσεων των μπαταριών, λύνοντας το πρόβλημα 6.4 για μια ημέρα, για δύο μπαταρίες και για όλες τις πιθανές θέσεις που μπορούν αυτές να πάρουν στο δίκτυο (σύνολο 55 πιθανοί συνδυασμοί) βρέθηκε πως η βέλτιστη λύση από όλους τους συνδυασμούς ήταν όταν οι μπαταρίες τοποθετούνταν στους ζυγούς 5 και 8 και η συνολική χωρητικότητα ήταν 105,8kWh. Ο αλγόριθμος τοποθέτησης έχει σαν αποτέλεσμα την τοποθέτηση των μπαταριών στους ζυγούς 6 και 8 με συνολική χωρητικότητα 112,86kWh. Το σφάλμα σε αυτή την περίπτωση είναι 6,67% όπου αν συγκριθεί με την μείωση της πολυπλοκότητας που προσφέρει ο αλγόριθμος συσταδοποίησης, εφόσον αποτρέπει τον υπολογισμό 120 διαφορετικών περιπτώσεων, είναι μια καλή προσέγγιση. Επίσης δεδομένου ότι οι μπαταρίες που υπάρχουν στο εμπόριο μπορούν να πάρουν συγκεκριμένες τιμές χωρητικότητας, το σφάλμα στην πράξη μπορεί να γίνει ακόμη μικρότερο.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι χωρητικότητες των μπαταριών που επιλέχθηκαν σε κάθε περίπτωση, λαμβάνοντας για κάθε μια την μέγιστη τιμή της από όλες τις ημέρες του μήνα, καθώς και οι μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου στην διάρκεια του μήνα.



Διάγραμμα 7.70 Συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα ως συνάρτηση του αριθμού των μονάδων



Διάγραμμα 7.71: Μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου συνάρτηση του αριθμού των μονάδων

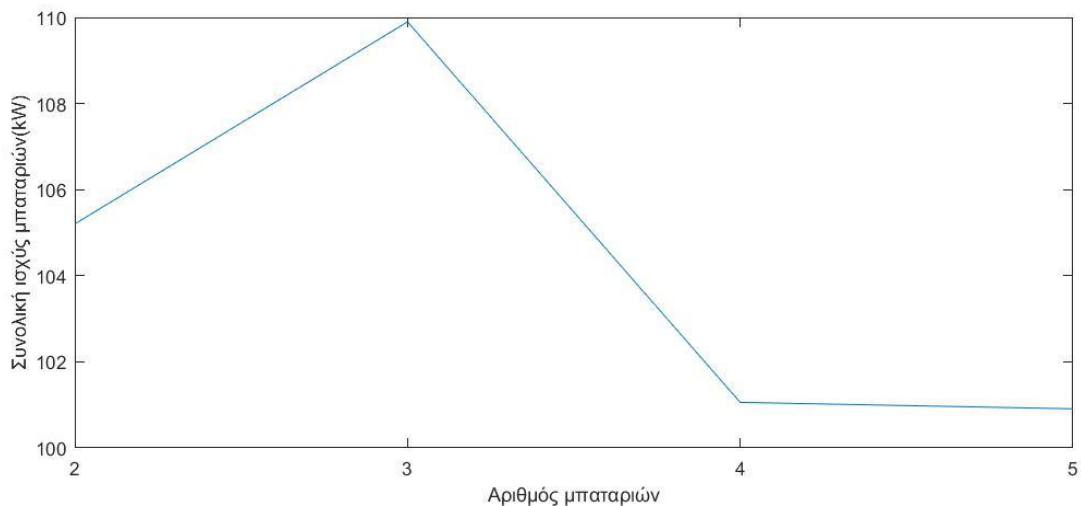
Φαίνεται πως η συνολική χωρητικότητα που πρέπει να εγκατασταθεί σε αυτό το δίκτυο είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με το δίκτυο των 17 ζυγών. Αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς παρατηρώντας τον αριθμό των υπερτάσεων και υποτάσεων γίνεται αντιληπτό πως σε αυτό το δίκτυο τα προβλήματα στις τάσεις των ζυγών είναι συχνότερα.

7.4.4 Τελική επιλογή του μεγέθους και των θέσεων των μπαταριών

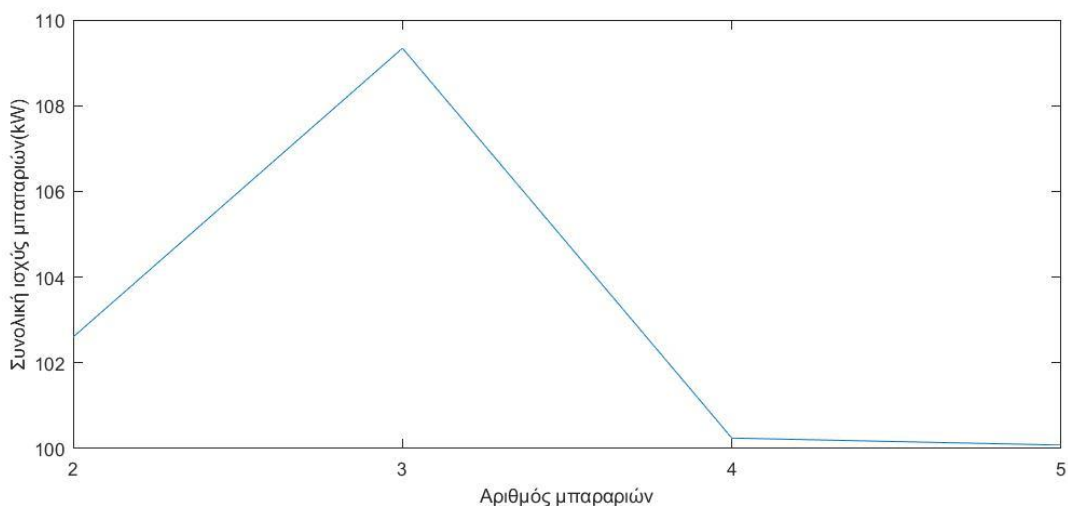
Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι χωρητικότητες που προέκυψαν παραπάνω αποτελούν το κατώτερο όριο ώστε να τηρούνται οι περιορισμοί στις τάσεις των ζυγών, όχι όμως ρεαλιστικές τιμές, καθώς οι μπαταρίες χάνουν μέρος της χωρητικότητας τους με την πάροδο του χρόνου. Σαν

συντελεστές προσαύξησης των μπαταριών χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 1.25, 1.43. Έτσι έχουμε αντίστοιχα τους συντελεστές γήρανσης $L=0.8$, $L=0.7$ τους οποίους μόλις φτάσουν οι μπαταρίες θεωρούνται πλέον μη ικανές για τον ζυγό και αντικαθίστανται. Και σε αυτή την περίπτωση οι διαφορές στις μέσες απώλειες ενέργειας είναι ασήμαντες για αυτό δεν θα ληφθούν υπόψη στην τελική επιλογή των ζυγών.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται η συνολική ισχύς των ηλεκτρικών μετατροπέων, όπως υπολογίστηκαν λύνοντας το πρόβλημα 6.5 για όλες τις ημέρες του μήνα, για κάθε αριθμό μπαταριών και κάθε συντελεστή προσαύξησης.



Διάγραμμα 7.72: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συναρτήσει του αριθμού μπαταριών για $\alpha=1.25$



Διάγραμμα 7.73: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συναρτήσει του αριθμού μπαταριών για $\alpha=1.43$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	4.75	1.39	1.42
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	85.78	13.35	9.82	9.27
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	55.28	58.91	0.00	0.00
9	0.00	0.00	48.34	47.73
10	0.00	0.00	9.30	0.00
11	0.00	0.00	0.00	5.65
12	0.00	0.00	0.00	4.61

Πίνακας 7.74: Χωρητικότητες των μπαταριών(kWh) για $\alpha=1.25$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	5.43	1.59	1.62
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	98.14	15.27	11.23	10.60
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	63.24	67.40	0.00	0.00
9	0.00	0.00	55.30	54.61
10	0.00	0.00	10.64	0.00
11	0.00	0.00	0.00	6.46
12	0.00	0.00	0.00	5.28

Πίνακας 7.75: Χωρητικότητες των μπαταριών(kWh) για $\alpha=1.43$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	17.73	5.35	5.67
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	53.80	41.08	33.28	34.62
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	51.40	51.09	0.00	0.00
9	0.00	0.00	25.22	25.35
10	0.00	0.00	37.21	0.00
11	0.00	0.00	0.00	21.02
12	0.00	0.00	0.00	14.25

Πίνακας 7.76: Ισχείς των ηλεκτρονικών μετατροπέων(kW) για $\alpha=1.25$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	17.75	4.84	6.49
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	53.80	41.23	32.88	34.31
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	48.80	50.36	0.00	0.00
9	0.00	0.00	24.43	24.61
10	0.00	0.00	38.10	0.00
11	0.00	0.00	0.00	20.76
12	0.00	0.00	0.00	13.92

Πίνακας 7.77: Ισχείς των ηλεκτρονικών μετατροπέων(kW) για $\alpha=1.43$

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι χρόνοι ζωής των μπαταριών για τους δύο συντελεστές γήρανσης. Μονάδα μέτρησης των χρόνων ζωής είναι το έτος, οι μηδενικοί χρόνοι ζωής δηλώνουν πως σε αυτό το ζυγό δεν τοποθετείται μπαταρία. Επίσης στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγινε η θεώρηση πως όλοι οι μήνες του χρόνου καταπονούν το ίδιο τις μπαταρίες. Το μοντέλο γήρανσης αφορά συγκεκριμένες μπαταρίες τύπου lithium iron phosphate (LiFePO4).

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	1.6	0.9	1.1
5	0	0	0	0
6	6.3	3	2.7	2.5
7	0	0	0	0
8	5.1	5.2	0	0
9	0	0	5.2	5.2
10	0	0	1.8	0
11	0	0	0	2
12	0	0	0	1.9

Πίνακας 7.78: Χρόνοι ζωής των μπαταριών για $\alpha=1.25$

	2 μπατ.	3 μπατ.	4 μπατ.	5 μπατ.
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	3.2	1.9	1.7
5	0	0	0	0
6	12.4	6.2	5.4	5.3
7	0	0	0	0
8	9.7	10	0	0
9	0	0	9.8	9.7
10	0	0	3.7	0
11	0	0	0	3.8
12	0	0	0	3.9

Πίνακας 7.79: Χρόνοι ζωής των μπαταριών για $\alpha=1.43$

Όπως ήταν αναμενόμενο καθώς μειώνεται ο συντελεστής γήρανσης που πρέπει να φτάσουν οι μπαταρίες για να αντικατασταθούν, αυξάνεται ο χρόνος ζωής τους. Παρατηρείται επίσης, πως για διαφορετικό αριθμό και θέσεις των μπαταριών, αυτές καταπονούνται με διαφορετικό τρόπο, με αποτέλεσμα να προκύπτουν και διαφορετικοί χρόνοι ζωής.

Η τελική επιλογή του αριθμού και της χωρητικότητάς τους γίνεται με την χρήση του κριτηρίου του NPC. Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται όλες οι τιμές και τα κόστη που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του NPC, καθώς και τα NPC για όλους τους αριθμούς μπαταριών και συντελεστές γήρανσης.

Χρονιά	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PCS (€/kW)	220	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BOP (€/kW)	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O&M fixed \$/kW-year	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
r(επιτόκιο αναγωγής)	5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N(χρόνος επένδυσης)	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Battery Capital cost €/kWh	500	450	400	360	320	300	280	240	220	200

Πίνακας 7.80: Παράμετροι για τον υπολογισμό του NPC

	L=0.8	L=0.7
2 μπατ.	105880.06	111748.64
3 μπατ.	74907.99	76580.63
4 μπατ.	69269.42	72284.67
5 μπατ.	68874.56	72262.18

Πίνακας 7.81: Τα Καθαρά Παρόντα Κόστη (€) για όλες τις περιπτώσεις

Για τον υπολογισμό της υπολειμματικής αξίας των μπαταριών, θεωρήθηκε πως η εναπομένουσα χωρητικότητά τους κοστολογείται με βάση το κόστος ανά kWh της εκάστοτε χρονιάς που αντικαθίστανται. Μετά το πέρας των 10 χρόνων η υπολειμματική αξία των μπαταριών θεωρήθηκε μηδενική. Επίσης ακόμη μια θεώρηση που έγινε, ήταν πως οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς δεν αντικαθίστανται μέσα στην δεκαετία.

Με βάση τον Πίνακα 7.81 το μικρότερο Καθαρό Παρόν Κόστος έχει η περίπτωση, που τοποθετούνται πέντε μπαταρίες, για συντελεστή προσαύξησης $\alpha=1.25$. Σε αυτή την περίπτωση η τελική επιλογή των θέσεων, των χωρητικοτήτων των μπαταριών και των ισχύων των μετατροπέων φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Ζυγός	Χωρητικότητα(kWh)	Ισχύς(kW)
1	0.00	0.00
2	0.00	0.00
3	0.00	0.00
4	1.42	5.67
5	0.00	0.00
6	9.27	34.62
7	0.00	0.00
8	0.00	0.00
9	47.73	25.35
10	0.00	0.00
11	5.65	21.02
12	4.61	14.25

Πίνακας 7.82: Τελική επιλογή του μεγέθους και των θέσεων των μπαταριών

Και σε αυτή την περίπτωση με βάση την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, προτιμήθηκαν μπαταρίες μικρότερης χωρητικότητας και μικρότερου χρόνου ζωής. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί πως μπαταρίες μικρότερης χωρητικότητας (π.χ. η μπαταρία που εγκαθίσταται στο ζυγό 4) , καταπονούνται περισσότερο με αποτέλεσμα να έχουν και μικρότερους χρόνους ζωής.

Μια σημαντική παρατήρηση επί των αποτελεσμάτων είναι, πως στην περίπτωση που τοποθετούνται πέντε μπαταρίες, η χωρητικότητα της μπαταρίας στο ζυγό 4 είναι αρκετά μικρή και ταυτόχρονα καταπονείται περισσότερο από τις άλλες, με αποτέλεσμα ο χρόνος ζωής της να είναι περίπου ο ένας χρόνος. Για αυτό το λόγο εξετάστηκε η περίπτωση να μην τοποθετηθεί μπαταρία σε αυτό το ζυγό, και τα αποτελέσματα που προέκυψα ήταν παρόμοια με την περίπτωση που εγκαθίστανται τέσσερις μπαταρίες στους ζυγούς 4, 6, 9 και 10. Επομένως στην πράξη θα ήταν προτιμότερο να παραληφθεί η μπαταρία του ζυγού 4.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Η αντίληψη ότι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, για παράδειγμα η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο εγγύς μέλλον είναι πιο υπαρκτή από ποτέ. Αυτό οφείλεται, κυρίως, στην υπεροχή τους σε σύγκριση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας στο κομμάτι της περιβαλλοντικής τους λειτουργίας. Ωστόσο, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας εμφανίζουν εξαιρετικά κυμαινόμενη παραγωγή και δεν καλύπτουν το φορτίο όλο το 24ωρο. Για αυτούς ακριβώς τους λόγους, έχουν προταθεί μια σειρά από λύσεις έτσι ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις της διακύμανσης, καθώς και για να βελτιωθεί η επάρκεια του ΣΗΕ.

Μία από τις πολλά υποσχόμενες λύσεις, η οποία μελετάται για τα μελλοντικά συστήματα ισχύος, είναι οι μπαταρίες. Τα συγκεκριμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ενσωματωθούν είτε σε δίκτυα διανομής μέσης τάσης είτε σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. Επί του παρόντος, η συγκεκριμένη τεχνολογία αποθήκευσης είναι σχετικά ακριβή, με αποτέλεσμα πολλές έρευνες να έχουν διεξαχθεί, έτσι ώστε αναλυθεί το κόστος και τα οφέλη της χρήσης της. Παρόλο όμως το υψηλό της κόστος, αποφέρει πολλά τεχνικά και οικονομικά οφέλη στο εκάστοτε δίκτυο.

Για παράδειγμα, η υψηλή διείσδυση ΑΠΕ στα υφιστάμενα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί μεγάλα προβλήματα, ένα από τα οποία είναι η απόκλιση των τάσεων των ζυγών από τις προτεινόμενες τιμές. Η μεγάλη διακύμανση της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, καθώς και το όλο ένα αυξανόμενο φορτίο προκαλούν πολλές φορές υπερτάσεις ή υποτάσεις στους ζυγούς λόγω της μεγάλης διαφοράς παραγωγής-κατανάλωσης. Μια λύση για την μείωση αυτής της διαφοράς είναι να παράγεται ή να καταναλώνεται η ισχύς ακριβώς όταν και όπου χρειάζεται, για παράδειγμα όταν η παραγωγή από ΑΠΕ είναι χαμηλή να παράγεται ισχύς και παράλληλα όσο πιο κοντά γίνεται στον τελικό καταναλωτή.

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της διαστασιολόγησης και τοποθέτησης των μπαταριών στα δίκτυα διανομής Χ.Τ, δηλαδή το που θα τοποθετηθούν και πόση πρέπει να είναι η χωρητικότητά τους, με σκοπό την ρύθμιση της τάσης των ζυγών, αλλά με όσο το δυνατόν βέλτιστο τρόπο. Τα δύο προβλήματα αποσυμπλέχθηκαν χρησιμοποιώντας τις ευαισθησίες των τάσεων ως προς την έγχυση ενεργού ισχύος, βρίσκοντας έτσι τους κατάλληλους ζυγούς που μεγιστοποιούν την ρύθμιση της τάσης, έγινε μια πρώτη εκτίμηση για την τοποθεσία των μπαταριών. Με αυτή την εκτίμηση και μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας λύθηκε το πρόβλημα της διαστασιολόγησης, με την βοήθεια του ημιορισμένου προγραμματισμού για την αποφυγή της μη

γραμμικότητας, αλλά και μη κυρτότητας του προβλήματος, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου και της εγκατεστημένης ενέργειας των αποθηκευτικών μονάδων. Από αυτή την επαναληπτική διαδικασία προέκυψαν όλες οι πιθανές θέσεις των μπαταριών και οι βέλτιστες χωρητικότητες τους σε κάθε περίπτωση.

Στην συνέχεια έχοντας κατά νου την σταδιακή μείωση της ικανότητας των μπαταριών ιόντων λιθίου να αποθηκεύουν ενέργεια, δηλαδή πως οι μπαταρίες έχουν κάποιο χρόνο ζωής που επηρεάζεται από την χωρητικότητά τους, έπρεπε να γίνει κάποιος συμβιβασμός μεταξύ του χρόνου ζωής τους και του κόστους τους. Αυτό επιτεύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη το Καθαρό Παρόν Κόστος της επένδυσης, ένα μέγεθος που μπορεί να καθορίσει την βέλτιστη επιλογή από πολλές εναλλακτικές, όταν πρόκειται για συμβιβασμό κόστους-χρόνου. Η εκτίμηση του χρόνου ζωής τους έγινε με ένα ημιεμπειρικό μοντέλο, υπολογίζοντας τα κατάλληλα μεγέθη μέσω του προβλήματος που ορίστηκε για την διαστασιολόγηση, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου και της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτρικών μετατροπέων των μπαταριών. Αυτό το πρόβλημα λύθηκε ξεχωριστά για συγκεκριμένο αριθμό συντελεστών προσαύξησης της συνολικής χωρητικότητας τους, όπως προέκυψε από το προηγούμενο στάδιο.

Γνωρίζοντας πλέον, τις πιθανές θέσεις των μπαταριών, τους χρόνους ζωής τους σε κάθε περίπτωση και την χωρητικότητά τους, για κάθε συντελεστή προσαύξησης της, υπολογίστηκαν όλα τα Καθαρά Παρόν Κόστη και επιλέχτηκε το μικρότερο. Έτσι καθορίστηκε η ακριβής τοποθεσία, ο αριθμός και το μέγεθος των μπαταριών.

Για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB και εφαρμόστηκε σε δύο δίκτυα διανομής 17 και 12 ζυγών, αντίστοιχα.

Από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 7, προκύπτει πως η χρήση μπαταριών στα δίκτυα διανομής Χ.Τ, μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα της απόκλισης των τάσεων των ζυγών από τα καθορισμένα όρια. Επιβεβαιώνεται πως η χρήση του ημιορισμένου προγραμματισμού για την επίλυση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου, οδηγεί σε ένα δυαδικό πρόβλημα εύκολα επιλύσιμο. Επίσης από τα αποτελέσματα φαίνεται πως μεγαλύτερες αποκλίσεις στις τάσεις απαιτούν και μεγαλύτερες χωρητικότητες μπαταριών.

Και στα δύο δίκτυα που μελετήθηκαν προέκυψε ως αποτέλεσμα η τοποθέτηση μπαταριών μικρότερης χωρητικότητας, έναντι άλλων μεγαλύτερης αλλά και μεγαλύτερου χρόνου ζωής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα το κόστος τους να μειώνεται σημαντικά.

8.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μια σημαντική επέκταση της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να ήταν η μελέτη της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των μονάδων αποθήκευσης στα δίκτυα διανομής Χ.Τ λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλές υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν. Συγκεκριμένα θα μπορούσε να μελετηθεί η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση τους με στόχο την ρύθμιση της τάσης και ταυτόχρονα την μείωση των αιχμών του φορτίου και των διακυμάνσεων της παραγωγής από ΑΠΕ., ουσιαστικά να προσεγγιστεί το πρόβλημα με την βοήθεια της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.

Μια ακόμη επέκταση της εργασίας θα ήταν η επίλυση του προβλήματος για παραπάνω από ένα μήνα, ώστε να προκύψει ένα σωστότερο αποτέλεσμα. Η επιλογή συγκεκριμένων μηνών ή και ολόκληρου έτους θα βοηθούσε στο να ληφθεί υπόψη η εποχικότητα τόσο των φορτίων όσο και της παραγωγής, καθώς επίσης θα οδηγούσε και σε πιο ακριβή υπολογισμό της γήρανσης των μπαταριών.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1) Ιδιοαποσύνθεση πίνακα

Αν το σύνολο γ_A της γεωμετρικής πολλαπλότητας όλων των ιδιοτιμών είναι ακριβώς n , τότε ο A έχει ένα σύνολο n γραμμικά ανεξάρτητων ιδιοδιανυσμάτων. Ας είναι Q ένας τετράγωνικός πίνακας του οποίου οι στήλες είναι αυτά τα ιδιοδιανύσματα, σε οποιαδήποτε σειρά. Έπειτα θα έχουμε $AQ=Q\Lambda$, όπου Λ είναι ο διαγώνιος πίνακας τέτοιος ώστε Λ_{ii} να είναι η ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στη στήλη i του Q . Εφόσον οι στήλες του Q είναι γραμμικά ανεξάρτητες, ο πίνακας Q είναι αντιστρέψιμος. Πολλαπλασιάζοντας και από τις δύο πλευρές με Q^{-1} παίρνουμε $Q^{-1}AQ=\Lambda$. Εξ' ορισμού, ο πίνακας A είναι διαγωνιοποιήσιμος.

Αντίστροφα, αν ο A είναι διαγωνιοποιήσιμος, ας είναι Q ένας μη μοναδιαίος τετραγωνικός πίνακας, τέτοιος ώστε ο $Q^{-1}AQ$ να είναι κάποιος διαγώνιος πίνακας D . Πολλαπλασιάζοντας και από τις δύο πλευρές, στα αριστερά με τον Q παίρνουμε $AQ=QD$. Έτσι, κάθε στήλη του Q είναι ένα ιδιοδιάνυσμα του A , του οποίου η ιδιοτιμή είναι το αντίστοιχο στοιχείο του διαγώνιου D . Εφόσον οι στήλες του Q πρέπει να είναι γραμμικά ανεξάρτητες, έπεται ότι $\gamma_A=n$. Προκύπτει λοιπόν πως γ_A είναι ίσο με n αν και μόνο αν A είναι διαγωνιοποιήσιμος.

Αν A είναι διαγωνιοποιήσιμος, ο χώρος όλων των n -στοιχείων διανυσμάτων μπορεί να αποσυντεθεί στο ευθύ άθροισμα των ιδιοχώρων του A . Αυτή η αποσύνθεση καλείται ιδιοαποσύνθεση ενός πίνακα A , και μένει αναλλοίωτη στις αλλαγές συντεταγμένων[23].

2) Θετικά ημιορισμένος πίνακας

ΟΡΙΣΜΟΣ

- 1) Ένας συμμετρικός $n \times n$ πίνακας ονομάζεται *θετικά ορισμένος* (αντιστοίχως *αρνητικά ορισμένος*), Εάν για όλα τα μη μηδενικά διανύσματα $x \in \mathbf{R}^n$ οι συνδεδεμένες δευτεροβάθμιες μορφές δίνονται από $Q(x) = x^T A x$ και παίρνει μόνο θετικές τιμές (αντιστοίχως μόνο αρνητικές τιμές). Εάν η τετραγωνική μορφή παίρνει μόνο θετικές (αντίστοιχα μόνο αρνητικές) τιμές, ο συμμετρικός πίνακας ονομάζεται *γνησίως-θετικός* (αντίστοιχα *γνησίως-αρνητικός*); ως εκ τούτου ο πίνακας είναι *αόριστος* όταν δεν είναι ούτε θετικά ούτε αρνητικά-ημιορισμένος[24].
- 2) Ένας συμμετρικός πίνακας είναι *θετικά ορισμένος* αν και μόνο αν όλες οι ιδιοτιμές του είναι θετικές. Ας θεωρήσουμε την ιδιοαποσύνθεση ενός $n \times n$ Ερμιτιανού πίνακα M ως $P^{-1}DP$, όπου P είναι μοναδιαίος μιγαδικός πίνακας του οποίου οι σειρές αποτελούν μια ορθοκανονική βάση των ιδιοδιανυσμάτων του M και D ένας πραγματικός διαγώνιος πίνακας, του οποίου η κύρια διαγώνιος περιέχει τις αντίστοιχες ιδιοτιμές του M . Ο πίνακας M μπορεί να θεωρηθεί τώρα ως ένας διαγώνιος πίνακας D , ο οποίος έχει εκφραστεί στις συντεταγμένες της βάσης του P . Συγκεκριμένα, η ένα προς ένα αλλαγή της μεταβλητής $y=Pz$ δείχνει ότι $z^* M z$ είναι πραγματικό και θετικό για κάθε μιγαδικό διάνυσμα z , αν και μόνο αν $y^* D y$ είναι θετικό και πραγματικό για κάθε y , με άλλα λόγια, αν D είναι θετικά ορισμένος. Για έναν διαγώνιο πίνακα αυτό ισχύει αν κάθε στοιχείο της κύριας διαγώνιου του είναι θετικό, στην προκειμένη περίπτωση του πίνακα D , κάθε ιδιοτιμή του πίνακα M να είναι θετικός αριθμός. Το θεώρημα της ιδιοαποσύνθεσης εξασφαλίζει επίσης πως κάθε Ερμιτιανός πίνακας έχει πραγματικές ιδιοτιμές[24].

ΛΗΜΜΑ 1

Για έναν πίνακα A , ο πίνακας A^*A είναι θετικά ημιορισμένος και ο βαθμός του είναι $\text{rank}(A)=\text{rank}(A^*A)$. Αντιστρόφως, κάθε Ερμιτιανός θετικά ημιορισμένος πίνακας A μπορεί να γραφτεί ως $A=LL^*$, όπου L κάτω τριγωνικός[24].

ΛΗΜΜΑ 2

Ο βαθμός ενός συμμετρικού $n \times n$ πίνακα A ισούται με τον αριθμό των μη μηδενικών ιδιοτιμών του. Αν ο πίνακας A δεν έχει καμία μηδενική ιδιοτιμή τότε λέγεται ότι έχει πλήρες βαθμό ίσο με n [24].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Antonio Giannitrapani, Simone Paoletti, Antonio Vicino, Donato Zarrilli, “Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks,” *IEEE Trans. On Smart Grid*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, Aug. 2016.
- [2] Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 2010
- [3] S. Low, “Convex relaxation of optimal power flow – Part I: Formulations and equivalence,” *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 15–27, 2014.
- [4] J. Sturm, “Using SeDuMi 1.02, A Matlab toolbox for optimization over symmetric cones,” *Optimization Methods & Software*, vol. 11, no. 1-4, pp. 625–653, 1999.
- [5] M. Grant and S. Boyd, “CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1,” [Online]. Available: <http://cvxr.com/cvx> (accessed Apr. 27, 2016).
- [6] Κωνσταντίνος Σουμαλάς, “Μελέτη τοπολογίας Δικτύων Διανομής με χρήση δεδομένων έξυπνων μετρητών”, Οκτώβριος 2016.
- [7] Απόστολος Πετρόπουλος , “Βέλτιστη ροή ενεργού και αέργου ισχύος σε δίκτυο διανομής με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας ”, Φεβρουάριος 2014
- [8] Lingwen Gan, Na Li, Ufuk Topcu, and Steven H. Low. “On the exactness of convex relaxation for optimal power flow in tree networks. ” In 51st IEEE Conference on Decision and Control, Maui, HI, December 2012.
- [9] J. Lavaei and S. Low, “Zero duality gap in optimal power flow problem,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 92 –107, feb.2012.
- [10] C. Coffrin, H. Hijazi, and P. Van Hentenryck, “Strengthening convex relaxations with bound tightening for power network optimization,” in *Principles and Practice of Constraint Programming*, ser. Lecture Notes in Computer Science, G. Pesant, Ed. Springer International Publishing, 2015, vol. 9255, pp. 39–57.
- [11] X. Bai and H. Wei. “A semidefinite programming method with graph partitioning technique for optimal power flow problems.” *Int’l J. of Electrical Power & Energy Systems*, 33(7):1309–1314, 2011.
- [12] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Gerald B. Sheblé, “Power Generation, Operation, and Control”, 3rd Edition
- [13] Stavros Karagiannopoulos, Alexandros Rigas, Nikos Hatziargyriou, Gebriela Hug, Alexandre Oudalov, “Battery energy storage capacity fading and control strategies for deterministic and stochastic power profiles”, *On Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Genoa 2016, June. 2016.

- [14] B. Xu, “Degradation-limiting optimization of battery energy storage systems operation,” Master’s thesis, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 9 2013, Available: [http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/Xu MA 2013.pdf](http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/Xu_MA_2013.pdf)
- [15] Equivalent annual costs and benefits, Ανάκτηση από <http://www.accaglobal.com/gb/en/student/exam-support-resources/fundamentals-exams-study-resources/f9/technical-articles/eac.html>
- [16] Economic Analysis Case Studies of Battery Energy Storage with SAM, Ανάκτηση από <http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/64987.pdf>
- [17] Distribution Test Feeders, Ανάκτηση από <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders>
- [18] National Assessment of Energy Storage for Grid Balancing and Arbitrage Phase II Volume 2: Cost and Performance Characterization, Ανάκτηση από http://energyenvironment.pnnl.gov/pdf/National_Assessment_Storage_PHASE_II_vol_2_final.pdf
- [19] EUROBAT, Battery Energy Storage for Smart Grid Applications, Ανάκτηση από https://eurobat.org/sites/default/files/eurobat_smartgrid_publication_may_2013_0.pdf
- [20] Citigroup Report: 240 GW Global Battery Storage Market By 2030, Ανάκτηση από <https://cleantechnica.com/2015/02/05/citigroup-report-240-gw-global-battery-storage-market-2030/>
- [21] Ryan Tibshirani, Hierarchical clustering, Ανάκτηση από <http://www.stat.cmu.edu/~ryantibs/datamining/lectures/05-clus2-marked.pdf>
- [22] Δημήτρης Φωτάκης, Βασικές Έννοιες Θεωρίας Γραφημάτων, Ανάκτηση από <https://corelab.ntua.gr/courses/algorithms/slides/Graphs.pdf>
- [23] Eigendecomposition of a matrix, Πηγή Wikipedia.
- [24] Positive-Definite matrix, Πηγή Wikipedia.