



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

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΚΑΙ  
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ  
ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αλέξανδρος Λάσκαρης

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

Αθήνα, Ιούλιος 2018





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

# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Λάσκαρης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11<sup>η</sup> Ιουλίου 2018.

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

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

.....  
Πάυλος Γεωργιλάκης  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2018

.....  
Αλέξανδρος Λάσκαρης

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

Copyright © Αλέξανδρος Λάσκαρης, 2018.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση και ανάλυση της έννοιας των χαρτών γήρανσης των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η ανάπτυξη μιας μεθόδου ενσωμάτωσής τους, στα πλαίσια μιας βέλτιστης διαστασιολόγησης των μονάδων αποθήκευσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας Χ.Τ. με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης.

Αρχικά έγινε μια εκτενής παρουσίαση και ανάλυση της έννοιας των χαρτών γήρανσης των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα των μπαταριών ιόντων λιθίου. Παρουσιάζοντας ένα υφιστάμενο εμπειρικό μοντέλο για το φαινόμενο της γήρανσης των μπαταριών ιόντων λιθίου και συγκεκριμένα των μπαταριών  $\text{LiFePO}_4$  αναλύσαμε τη μέθοδο κανονικοποίησης και παραμετροποίησής του προκειμένου να είναι εφικτό να ενταχθεί στα πλαίσια ενός βέλτιστου προγραμματισμού για την διαστασιολόγηση των μονάδων αποθήκευσης.

Σε δεύτερο στάδιο το πρόβλημα της διαστασιολόγησης προσεγγίστηκε με τη 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 ενέργειας του δικτύου, της συνολικής χωρητικότητας όλων των μονάδων αποθήκευσης, της συνολικής ισχύος των διατάξεων μετατροπής ισχύος καθώς και του παράγοντα της γήρανσης των μπαταριών.

Στο τελικό στάδιο έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης των άνω παραγόντων, καθώς και σύγκριση με χρήση του κριτηρίου του Ετήσιου Ισοδύναμου Κόστους της επένδυσης.

Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB, τόσο για την μοντελοποίηση του φαινομένου γήρανσης των μπαταριών όσο και για την προαναφερόμενη βελτιστοποίηση η οποία εφαρμόστηκε σε ένα δίκτυο διανομής 19 ζυγών επιβεβαιώνοντας την παραπάνω μεθοδολογία. Ο χρονικός ορίζοντας επίλυσης του προβλήματος ήταν οι έξι μήνες, ώστε να ληφθεί υπόψη η στοχαστικότητα της ζήτησης των φορτίων.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μονάδες αποθήκευσης, χάρτες γήρανσης, τριγωνισμός Delaunay, κανονικοποίηση, απώλειες ενέργειας, βέλτιστη ροή φορτίου, βελτιστοποίηση.



## **ABSTRACT**

The purpose of this diploma thesis is to present and analyze the concept of degradation maps of electricity storage units and to develop a method for their integration in the framework of an optimal dimensioning of storage units in electricity distribution networks, for the purpose of regulating the voltage.

Initially, there had been an extensive presentation and analysis of the concept of degradation maps of power storage units, particularly lithium-ion batteries. By presenting an existing empirical model on the phenomenon of degradation of lithium-ion batteries and LiFePO<sub>4</sub> batteries in particular, we have analyzed its normalization and parameterization method in order to be able to fit into an optimal scheduling for unit design.

In a second step the dimensioning problem was approached by the semidefinite programming method because of the non-linearity of the problem of optimal load flow in the distribution networks. An objective function of the dimensioning problem was the minimization of network losses, the total capacity of all storage units, the total power of the power conversion devices and the aging factor of the batteries.

At the final stage, the results of optimization were presented as well as a comparison using the criterion of the Annual Equivalent Cost of the investment.

In the present study, software was developed in MATLAB environment, both for modeling of the degradation phenomenon of the batteries and for optimization which was applied to a distribution network of 19 buses confirming the above methodology. The time horizon for resolving the problem was six months to take account of the stochasticity of the demand.

## **KEY WORDS**

Energy storage systems, Degradation maps, Delaunay triangulation, normalization, energy losses, optimal load flow, optimization.





## **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 άψογη συνεργασία, υπομονή αλλά και καθοδήγησή του σε όλα τα καθοριστικά σημεία της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ουσιαστική στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια και αφιερώνω την εργασία αυτή, στον καθένα ξεχωριστά και ιδιαίτερα στη μητέρα μου Χρυσούλα.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>11</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>13</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>13</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>14</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ</b> .....	<b>17</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>21</b>
1.1. ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	21
1.2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	24
1.3. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	<b>29</b>
2.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ- ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....	29
2.2. ΟΦΕΛΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ.....	30
2.3. ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ.....	32
2.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ .....	37
2.5. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ .....	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	<b>45</b>
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	45
3.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΤΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ</b> .....	<b>51</b>
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	51
4.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	52
4.3. ΧΑΡΤΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ .....	54
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΡΙΓΩΝΙΣΜΟΣ DELAUNAY</b> .....	<b>59</b>
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	59
5.2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI .....	59
5.3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	61
5.4. ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ DELAUNAY ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB .....	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ</b> .....	<b>71</b>
6.1. ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	71
6.2. ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	73

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΟ ΚΥΡΤΟ ΘΕΤΙΚΑ ΗΜΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ 81**

7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	81
7.2. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ .....	82
7.2.1. Ισοτικοί περιορισμοί.....	82
7.2.2. Ανισοτικοί περιορισμοί .....	82
7.3. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ .....	83

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ...87**

8.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	87
8.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	90

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....97**

9.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	97
9.2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CVX .....	97
9.3. ΕΠΙΛΥΤΗΣ SEDUMI.....	100
9.4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	100
9.5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ.....	104
9.6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	112
9.6.1. Περίπτωση I.....	112
9.6.2. Περίπτωση II.....	115
9.6.3. Περίπτωση III.....	117
9.6.4. Περίπτωση IV .....	119

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ..... 125**

10.1. ΤΕΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	125
10.2. ΜΕΣΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	126
10.3. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	127
10.4. ΕΤΗΣΙΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΟΣΤΟΣ .....	130
10.5. ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΚΟΣΤΗ .....	130
10.6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ .....	132

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΣΥΝΟΨΗ..... 139**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12: ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....** 145

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 147**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (6.1) ΓΙΑ ΤΗΝ ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (6.2) ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΟΚΥΚΛΩΣΗΣ .....	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΕΚΦΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.1 ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	125
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.2 ΙΣΧΥΣ .....	125
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.3 ΜΕΣΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ .....	127
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.4 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΖΥΓΟΥ 19 .....	133
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.5 ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΖΥΓΟΥ 19 .....	134
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.7 ΕΤΗΣΙΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΟΣΤΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΖΥΓΟΥ 19.....	135

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	29
ΣΧΗΜΑ 4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΑΡΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	52
ΣΧΗΜΑ 5.1 ΓΡΑΦΟΣ VORONOI ( $VOR(P)$ ).....	60
ΣΧΗΜΑ 5.2 ΓΡΑΦΟΣ DELAUNAY ( $GD(P)$ ).....	60
ΣΧΗΜΑ 5.3 ΤΡΙΓΩΝΟ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ $P$ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ .....	61
ΣΧΗΜΑ 5.4 ΟΙ ΔΥΟ ΔΥΝΑΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΟΥ ΕΝΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ $PR$ .....	62
ΣΧΗΜΑ 5.5 ΓΡΑΦΗΜΑ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ‘ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΑΚΜΗΣ’ .....	63
ΣΧΗΜΑ 5.6 ΟΙ ΑΚΜΕΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΚΑΙ ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΝ ΣΤΟ $PR$ .....	64

ΣΧΗΜΑ 5.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΤΡΙΓΩΝΙΣΜΟΥ DELAUNAY .....	66
ΣΧΗΜΑ 6.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΝΡΑΡ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΙ NSER ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ.....	74
ΣΧΗΜΑ 9.1 ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 19 ΖΥΓΩΝ .....	101

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1 ΧΑΡΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ LIFEP04 .....	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.1 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.2 ΤΡΙΓΩΝΙΣΜΟΣ DELAUNAY ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ .....	77
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.1 ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΗΜΕΡΑ.....	102
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.2 ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΓΙΑ 182 ΗΜΕΡΕΣ.....	102
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.3 ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΘΕ ΖΥΓΟΥ ΓΙΑ 1 ΗΜΕΡΑ.....	103
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.4 ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΘΕ ΖΥΓΟΥ ΓΙΑ 182 ΗΜΕΡΕΣ.....	103
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.5 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΑΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\Sigma$ .....	105
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.6 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ ΣΑΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\Sigma$ .....	105
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.7 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΑΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\Sigma$ .....	106
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.8 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ ΣΑΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\Sigma$ .....	107
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.9 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΑΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\Delta$ .....	108
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.10 ΜΕΣΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΑΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\Delta$ .....	108
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.11 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΑΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\Delta$ .....	109
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.12 ΜΕΣΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΑΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\Delta$ .....	110

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.13 ΆΘΡΟΙΣΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ, ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ Ε.....	111
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.14 ΜΕΣΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ Ε.....	111
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.15 ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ .....	113
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.16 ΤΕΛΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΖΥΓΟ .....	114
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.17 ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΑΠΟΔΩΣΟΥΝ ΟΙ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ.....	114
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.18 ΤΕΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΑ ΖΥΓΟ.....	115
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.19 ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	115
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.20 ΤΕΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΖΥΓΟ.....	116
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.21 ΙΣΧΥΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	116
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.22 ΤΕΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΑ ΖΥΓΟ.....	117
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.23 ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ .....	117
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.24 ΤΕΛΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΖΥΓΟ.....	118
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.25 ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΩΡΑ.....	118
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.26 ΤΕΛΙΚΗ ΤΙΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΑ ΖΥΓΟ .....	119
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.27 ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ .....	119
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.28 ΤΕΛΙΚΗ ΤΙΜΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΖΥΓΟ .....	120
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.29 ΙΣΧΥΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	120
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.30 ΤΕΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΑ ΖΥΓΟ.....	121
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10.1 ΕΝΑΠΟΜΕΝΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΩΡΑ, ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΔΕΚΑ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕ ΣΥΝΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	128
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10.2 ΕΝΑΠΟΜΕΝΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΩΡΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΔΕΚΑ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ	128
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10.3 ΕΝΑΠΟΜΕΝΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΩΡΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕ ΣΥΝΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	129
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10.4 ΕΝΑΠΟΜΕΝΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΑΝΑ ΩΡΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ	129
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ.....	132





## ΛΙΣΤΑ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

SUC	Κόστος Μονάδων Αποθήκευσης
PCS	Κόστος Ηλεκτρονικών Ισχύος
BOP	Κόστος Υπόλοιπων Κατασκευαστικών Μερών
$C_0$	Συνολικό κόστος κεφαλαίου
OC	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
$T, \theta$	Θερμοκρασία της μπαταρίας
$t$	Χρόνος
L	Συντελεστής γήρανσης
$f_d$	Γραμμικοποιημένη συνάρτηση γήρανσης
$f_{cyc}$	Γραμμικοποιημένη συνάρτηση κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης
$f_{cal}$	Γραμμικοποιημένη συνάρτηση φυσικής γήρανσης
$f_{DoD}$	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 $t$
$P_{ijmax}$	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
$\Delta t$	Διακριτό χρονικό βήμα
$E_s$	Χωρητικότητα της μπαταρίας στο ζυγό $s$
$R_{smax}$	Όριο ανταλλασσόμενης ενεργού ισχύος από την μπαταρία στο ζυγό
$B_{smax}$	Όριο ανταλλασσόμενης αέργου ισχύος από την μπαταρία στο ζυγό $s$
$b_s(t)$	Ανταλλασσόμενη άεργος ισχύς από την μπαταρία στο ζυγό $s$ την
$P_k^G(t),$	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
$C_l$	Ενεργές απώλειες του δικτύου
$C_{str}$	Συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης
$C_R$	Συνολική ισχύς μετατροπών
r	Επιτόκιο αναγωγής
$V_{oc}$	Τάση ανοιχτοκύκλωσης
$I_{bat}$	Ρεύμα μπαταρίας
$m_{bd}$	Εύρος ρεύματος μπαταρίας
$n_{bd}$	‘ζώνες’ SoC
$Q_s$	χωρητικότητα απωλειών
$I_s$	πλευρικό ρεύμα
$\rho$	ενέργεια ελέγχου λειτουργίας μπαταρίας
$V_{or}()$	Διάγραμμα Voronoi
$GD()$	Διάγραμμα Delaunay
$J_{deg}$	Ρυθμός γήρανσης μπαταρίας
$\gamma_i$	Βάρη αντικειμενικής συνάρτησης

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

## 1.1. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Ο ηλεκτρικός τομέας αποτελεί την πιο σημαντική υποδομή των σύγχρονων κοινωνιών. Η αξιόπιστη προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την ποιότητα και την ποσότητα, συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία πολλών και ποικίλων τεχνολογικών υποδομών που υπάρχουν σήμερα στην κοινωνία.

Εκτός όμως των γενικών υποδομών, η ζήτηση για συνεχή και υψηλής ποιότητας παροχή ηλεκτρικής ενέργειας καθίσταται επιτακτική και για τους ίδιους τους καταναλωτές. Σημαντικός παράγοντας στην επιτακτικότητά της, είναι το γεγονός ότι η ηλεκτρική είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία μπορεί πολύ εύκολα να μετατραπεί σε άλλες μορφές όπως η μηχανική και πρέπει να είναι διαθέσιμη τη χρονική στιγμή την οποία ζητείται.

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

Όμως, το σύνολο αυτό πρέπει να χαρακτηρίζεται και από την ομαλή λειτουργία του. Για αυτή την ομαλή λειτουργία το ΣΗΕ πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις [1]:

- Προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.
- Το ΣΗΕ πρέπει να είναι δυνατό να ικανοποιεί διαρκώς στο επίπεδο του χρόνου τη μεταβαλλόμενη ζήτηση, με δεδομένο τη συνεχή χρονική μεταβολή της ζήτησης ενεργού και αέργου ισχύος.
- Η παρεχόμενη ενέργεια είναι αναγκαίο να ικανοποιεί συγκεκριμένους όρους και περιορισμούς ποιότητας (σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης).
- Η ενέργεια είναι απαραίτητο να παρέχεται βέλτιστα με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

Εκτός από τα παραπάνω, η προμήθεια των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές διαδικασίες του ΣΗΕ. Αυτές είναι η παραγωγή, η μεταφορά (Υπερυψηλή – Υψηλή Τάση) και η 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 γεγονότος ότι δεν είναι

εφικτό να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με βέλτιστα οικονομικό τρόπο, είναι αναγκαίο να παράγεται και να καταναλώνεται ακριβώς την ίδια χρονική στιγμή [2].

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στους σταθμούς ηλεκτρικής παραγωγής. Συγκεκριμένα, η σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων (θερμικοί σταθμοί), της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών (υδροηλεκτρικοί σταθμοί) και στην μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας (πυρηνικοί σταθμοί) σε ηλεκτρική. Σε συνέχεια, των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, τα τελευταία χρόνια καταγράφεται μια ραγδαία αύξηση στο πεδίο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα (Αιολικά πάρκα – Ανεμογεννήτριες) και της ηλιακής ακτινοβολίας (Φωτοβολταϊκά πάρκα).

Εκτός από το πεδίο της παραγωγής, σημαντικό στοιχείο για να γίνει αναφορά είναι ο τρόπος με τον οποίο διανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια στον τελικό καταναλωτή. Πιο αναλυτικά, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής (150 kV) και υπερυψηλής (400 kV) τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε ορισμένα κεντρικά σημεία του δικτύου (τους υποσταθμούς). Στη συνέχεια, από τους υποσταθμούς ξεκινούν με τη σειρά τους, τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (6,6 – 22 kV), τα οποία και διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές μέσω των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης (220/380 V).

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί, ότι οι εγκαταστάσεις των μονάδων 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 σημαντικό να είναι ενιαίος, με στόχο πάντα την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη βέλτιστη εφικτή αξιοπιστία τροφοδότησης. Σε αντίθεση, 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 την τιμή του μεγέθους της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και από τη χωροταξική της κατανομή.

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 λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής από τους καταναλωτές.

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. 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. Επίσης, ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της διανομής είναι το πλήθος των στοιχείων που την αποτελούν. Παράλληλα, οι 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 είτε ακτινική είτε βροχοειδής. Η ακτινική λειτουργία του δικτύου διανομής έγκειται στο γεγονός ότι όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται από μία μόνο γραμμή του δικτύου. 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 της 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. Στην παρούσα εργασία θα γίνει χρήση ενός ακτινικού δικτύου διανομής.

[25]

## 1.2. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Η αποθήκευση ηλεκτρικής μορφής ενέργειας ορίζεται ως η διαδικασία εκείνη κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια, καθίσταται 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 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 [3].

Γενικότερα, ποικίλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας έχουν προταθεί ως πιθανές λύσεις για έναν αριθμό ζητημάτων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στην συγκεκριμένη εργασία θα εστιάσουμε στους συσσωρευτές – μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion). Αξίζει να τονιστεί, ότι η αποθήκευση, εκτός των άλλων βοηθά ενεργά και στην αύξηση της αξίας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς καθιστά εφικτή την εξομάλυνση της στοχαστικής παραγωγής τους και την καλύτερη διείσδυσή της στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.3. Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Στην παρούσα εργασία μελετάται η βέλτιστη διαστασιολόγηση μέσω της ιδανικότερης επιλογής διακριτών ενεργειών ελέγχου των διεσπαρμένων μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, δίνοντας βάρος στην ελαχιστοποίηση του φαινομένου της γήρανσης των μπαταριών, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η βελτίωση των τάσεων του δικτύου έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας και να μειώνεται το κεφάλαιο επένδυσης που θα διαθέσει ο διαχειριστής. Παράλληλα, διευρύνεται όσο το δυνατόν περισσότερο ο χρόνος ζωής των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, αναλύεται πλήρως ο όρος ‘χάρτες γήρανσης’ των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ενώ παρουσιάζεται αναλυτικά η ένταξη του φαινομένου της γήρανσης των μπαταριών ιόντων λιθίου σε ένα βέλτιστο προγραμματισμό διαστασιολόγησης των μπαταριών ως παράγοντα ελαχιστοποίησης. Αναλυτικότερα η δομή της εργασίας αναλύεται στα παρακάτω κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 2:** Γίνεται ανάλυση του πεδίου της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζονται τα είδη των συσσωρευτών και τα είδη μοντέλων ανάλυσης αυτών.



- **Κεφάλαιο 3:** Αναλύεται το φαινόμενο της γήρανσης των μπαταριών.
- **Κεφάλαιο 4:** Αναλύεται η έννοια των χαρτών γήρανσης των μπαταριών.
- **Κεφάλαιο 5:** Παρουσίαση της μεθόδου του τριγωνισμού Delaunay.
- **Κεφάλαιο 6:** Αναλύεται η μέθοδος κανονικοποίησης των εμπειρικών μοντέλων για την γήρανση των μπαταριών.
- **Κεφάλαιο 7:** Παρουσιάζεται το κυρτό θετικά ημιορισμένο πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου στα δίκτυα διανομής.
- **Κεφάλαιο 8:** Περιγράφεται ο αλγόριθμος βέλτιστης διαστασιολόγησης του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Κεφάλαιο 9:** Παρουσιάζεται η υλοποίηση του τελικού αλγορίθμου και των αποτελεσμάτων της βέλτιστης διαστασιολόγησης.
- **Κεφάλαιο 10:** Υπολογίζονται τα οικονομικά αποτελέσματα και γίνεται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών αποτελεσμάτων.
- **Κεφάλαιο 11:** Παρουσιάζεται η σύνοψη της παρούσας εργασίας και των αποτελεσμάτων της.
- **Κεφάλαιο 12:** Αναφέρονται πιθανές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.



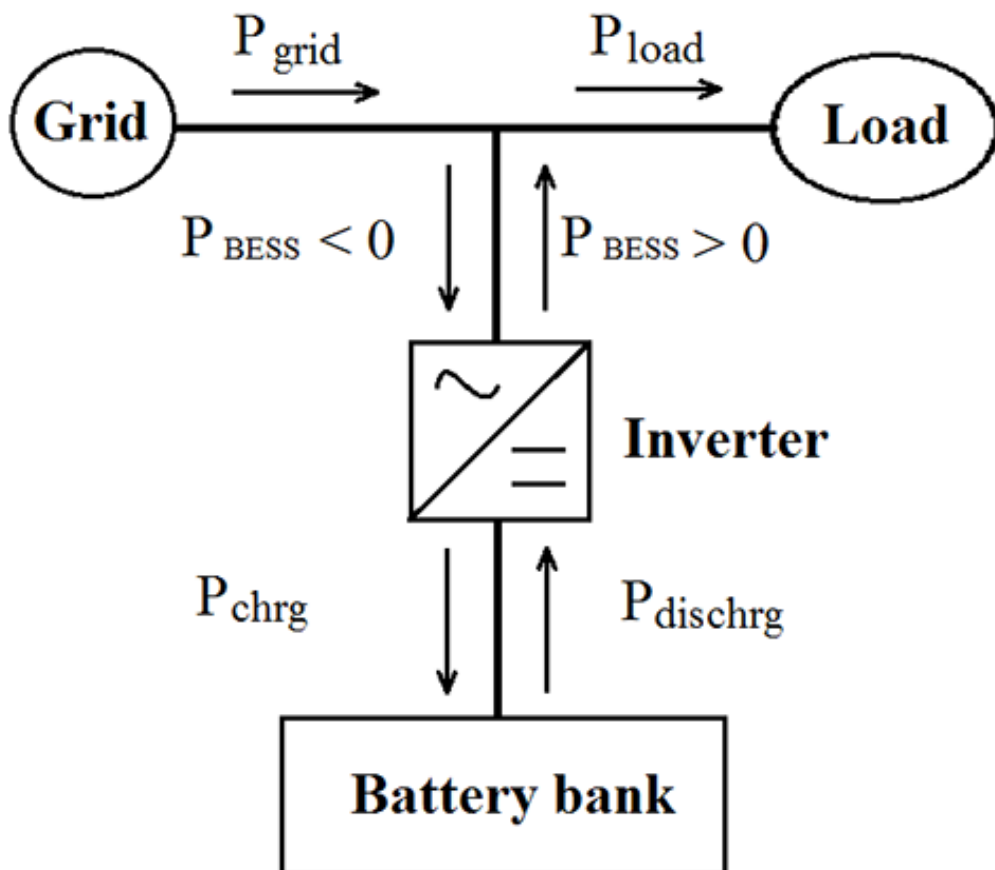
**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:**  
**Αποθήκευση**  
**ηλεκτρικής**  
**ενέργειας**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

### 2.1. Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας-συσσωρευτών

Ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (BESS) συνδέεται με ένα ηλεκτρικό δίκτυο, όπως δείχνει το Σχήμα 2.1. Συγκεκριμένα, αποτελείται από ένα σύστημα μετατροπής ισχύος (inverter - αντιστροφέας ) και τη μονάδα αποθήκευσης (Battery bank). Αναλυτικότερα, ο αντιστροφέας είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος, το οποίο μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα από εναλλασσόμενο (AC) σε συνεχές (DC), για τις μονάδες αποθήκευσης, και αντίστοιχα από συνεχές (DC) σε εναλλασσόμενο (AC) κατά την έγχυση της ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο [5].



Σχήμα 2.1 Σύνδεση συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτρικό δίκτυο

Γενικότερα, υπάρχουν περίπου 90 GW αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας, το 3 % της συνολικής ισχύος που παράγεται και η οποία χρησιμοποιείται σε ολόκληρο τον πλανήτη. Φυσικά, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τοποθετούνται μονάδες αντλιοταμίευσης ως μονάδες αποθήκευσης. Όμως, οι νέες εγκαταστάσεις αντλιοταμίευσης (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 κατανεμημένη αποθήκευση ενέργειας (KAE).

Η KAE, λοιπόν, ενδέχεται στο μέλλον να είναι πιο σημαντική και να καταγράφει πολύ υψηλότερη διείσδυση από ότι η κατανεμημένη παραγωγή ισχύος (Distributed Generation - DG). Αναλυτικότερα, οι τεχνολογίες DES περιλαμβάνουν τις μπαταρίες (batteries), τους σφονδύλους (flywheels), τους υπερπυκνωτές (Supercapacitors) και τα υπεραγωγίμα πηνία (SMES). Από τις συγκεκριμένες τεχνολογίες, οι μπαταρίες και οι σφόνδυλοι είναι εκείνες οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνότερα. Εν αντιθέσει, οι τεχνολογίες αντλιοταμίευσης 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.

## 2.2. Οφέλη αποθήκευσης

Σε ότι αφορά τα οφέλη της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω [5]:

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 ζήτηση είναι αυξημένη.
2. **Αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος:** Η αποθήκευση επιτρέπει την ικανοποίηση της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια, ακόμα και όταν υπάρχει διακοπή στην παραγωγή και τροφοδοσία.

3. **Έλεγχος της άεργης ισχύος, διόρθωση του 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 και συντήρηση των συμβατικών σταθμών παραγωγής ως εφεδρικές μονάδες και άρα μειώνεται το κόστος του συστήματος.
6. **Αναβολή αναβάθμισης ηλεκτρικών γραμμών:** Οι ορθά τοποθετημένες μονάδες αποθήκευσης είναι δυνατό να φορτίζονται σε περιόδους εκτός αιχμής, αποσυμφορίζοντας με αυτό τον τρόπο από μέγιστη φόρτιση τις γραμμές μεταφοράς και αυξάνοντας αποτελεσματικά την ικανότητα τους στη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος.
7. **Αναβολή εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής:** Απαιτούνται λιγότερες μονάδες παραγωγής για την κάλυψη του φορτίου αιχμής, μελλοντικά. Αυτό συμβαίνει, μιας και κατά την εκφόρτιση των αποθηκευτικών μονάδων μειώνεται το φορτίο αιχμής (μέρος του καλύπτεται από την αποθηκευμένη ενέργεια).
8. **Υποστήριξη της κατανεμημένης παραγωγής (DG):** Οι μονάδες αποθήκευσης επιτρέπουν στη DG, να λειτουργεί με σχεδόν σταθερή παραγωγή, μειώνοντας παράλληλα τη χρήση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων. Συγκεκριμένα, η εκφόρτιση των DES συστημάτων τις ώρες αιχμής, μειώνει με τη σειρά της 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 εγγεί 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. Εξαιτίας του ότι οι μονάδες κάλυψης αιχμής χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φυσικό αέριο και σε λίγες περιπτώσεις το πετρέλαιο, 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 και του πετρελαίου, μειώνονται και οι εκπομπές ρύπων. Επίσης, λόγω της βελτίωσης του συντελεστή ισχύος του συστήματος οι απώλειες μειώνονται, με αποτέλεσμα τη μείωση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας.

### 2.3. Συσσωρευτής

Ο συσσωρευτής ή μπαταρία είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια που περιέχεται στο ενεργό υλικό του, απευθείας σε ηλεκτρική, μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η διεργασία αυτή μπορεί να συνεχίζεται έως ότου διακοπεί το κύκλωμα ή κάποιο από τα αντιδρώντα στοιχεία εκλείψει. Καθώς η αντίδραση οξειδοαναγωγής στους συσσωρευτές γίνεται ηλεκτροχημικά, δεν υπόκειται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot, που διέπονται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, με αποτέλεσμα οι μπαταρίες να έχουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση μετατροπής. Στις περιπτώσεις των επαναφορτιζόμενων συστημάτων, οι συσσωρευτές φορτίζονται ξανά, ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία. Οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας καθιστώντας εφικτό να αξιοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να εκτελέσει ορισμένες χρήσιμες λειτουργίες[6].



Οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται ως πρωτογενείς (μη επαναφορτιζόμενοι) και ως δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενοι), ανάλογα με την ικανότητα τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά. Στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα πλαίσια των ηλεκτρικών δικτύων διανομής, μας απασχολούν μόνο οι δευτερογενείς συσσωρευτές οι οποίοι παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω, καθώς και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα αυτών:

1. **Συσσωρευτές μολύβδου – οξέος:** Οι συγκεκριμένες μπαταρίες είναι οι πιο διαδεδομένες παγκοσμίως και ο παλιότερος τύπος επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Η ευρεία χρήση των συγκεκριμένων μπαταριών σε πολλούς σχεδιασμούς, μεγέθη και επίπεδα τάσης, οφείλεται στην χαμηλή τιμή και στην ευκολία της κατασκευής τους σε τοπικό γεωγραφικό επίπεδο. Είναι σχεδόν πάντα η πιο οικονομική επιλογή μπαταρίας για οποιαδήποτε εφαρμογή και παρέχει ταυτόχρονα καλή απόδοση και διάρκεια ζωής. 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).
2. **Συσσωρευτές με ηλεκτρόδια σιδήρου:** Οι συσσωρευτές με ηλεκτρόδια σιδήρου χωρίζονται κυρίως σε τρία είδη. Οι πιο διαδεδομένοι δευτερογενείς συσσωρευτές που χρησιμοποιούν σήμερα ηλεκτρόδια σιδήρου είναι οι συσσωρευτές νικελίου-σιδήρου. Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές σιδήρου-αργύρου δοκιμάζονται για χρήσεις σε ειδικές ηλεκτρονικές εφαρμογές, ενώ οι σιδήρου-αέρα είναι πολλά υποσχόμενοι για χρήση σε συστήματα κινητικής ενέργειας. Οι συσσωρευτές με ηλεκτρόδια σιδήρου εφαρμόζονται καλύτερα όπου απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής (πολλοί κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης) σε επαναλαμβανόμενες μεγάλες εκφορτίσεις, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές κίνησης και ως εφεδρική πηγή ενέργειας με 10-20 χρόνια ζωής. Το κόστος των συσσωρευτών νικελίου-σιδήρου κυμαίνεται ανάμεσα στο κόστος των πιο οικονομικών συσσωρευτών μολύβδου-οξέος και των ακριβότερων συσσωρευτών νικελίου-καδμίου για τις περισσότερες εφαρμογές.

3. **Συσσωρευτές 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. Το κάδμιο είναι τοξικό μέταλλο με αποτέλεσμα να πρέπει οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου να απορρίπτονται σωστά μετά το τέλος της ζωής τους. Στην Αμερική, μέρος της αρχικής τιμής του συσσωρευτή αποτελεί κάποιου είδους «προκαταβολή» για τη σωστή απόρριψή του στο τέλος της χρήσης του. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι πωλήσεις των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου επιτρέπονται μόνο για ιατρική χρήση, για συστήματα συναγερμών, για φωτισμό έκτακτης ανάγκης και για φορητές συσκευές ισχύος. Γενικότερα, οι συγκεκριμένες μπαταρίες βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στις επικοινωνίες και τον ιατρικό εξοπλισμό.
4. **Συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου (NiMH):** 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. Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου (NiMH) είναι ιδιαίτερα εμπορικοί στις μέρες μας για μικρές φορητές συσκευές. Η γρήγορη ανάπτυξη των συσσωρευτών NiMH στην αγορά οφείλεται κυρίως στα περιβαλλοντικά και ενεργειακά πλεονεκτήματά τους έναντι των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου, αλλά και στην εκρηκτική ανάπτυξη των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών όπως είναι τα laptops και οι συσκευές επικοινωνίας. Χάρη στην τεχνολογική υπεροχή των συσσωρευτών νικελίου-μετάλλου υδριδίου σε σχέση με άλλους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές, οι NiMH άρχισαν να κατασκευάζονται και σε μεγαλύτερα μεγέθη για να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικά οχήματα και σε βιομηχανικές εφαρμογές.

5. **Συσσωρευτές νικελίου-ψευδαργύρου:** Η μπαταρία νικελίου-ψευδαργύρου είναι ένας αλκαλικός επαναφορτιζόμενος τύπος συσσωρευτών. Αποτελεί ένα συνδυασμό των τύπων συσσωρευτών που χρησιμοποιούν νικέλιο (νικελίου-καδμίου, νικελίου-σιδήρου κ.λπ.) και των συσσωρευτών που χρησιμοποιούν ψευδάργυρο, όπως οι ψευδαργύρου-αργύρου. Ο στόχος της αρχικής κατασκευής των συσσωρευτών νικελίου-ψευδαργύρου ήταν ακριβώς αυτός, να συνδυάσει δηλαδή, τη μεγάλη διάρκεια ζωής (κύκλοι φόρτισης /εκφόρτισης) που συναντάται στους συσσωρευτές νικελίου-καδμίου με την υψηλή ειδική ενέργεια του ηλεκτροδίου ψευδαργύρου. Οι συσσωρευτές νικελίου-ψευδαργύρου αποτελούν την οικονομικότερη λύση στους επαναφορτιζόμενους αλκαλικούς συσσωρευτές με μεγάλη διάρκεια ζωής. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές κίνησης, δηλαδή σε ηλεκτρικά ποδήλατα και ηλεκτρικά μηχανάκια, και γενικά σε εφαρμογές που απαιτούν βαθιά εκφόρτιση (συχνή πλήρη εκφόρτιση ή φόρτιση). Επίσης, οι μπαταρίες νικελίου-ψευδαργύρου μπορεί να αντικαταστήσουν άλλα συστήματα μπαταριών νικελίου λόγω του χαμηλότερου κόστους τους.
6. **Συσσωρευτές οξειδίου αργύρου:** Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές οξειδίου αργύρου είναι γνωστοί για την υψηλή ειδική τους ενέργεια και την πυκνότητα ισχύος. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους του αργύρου, η χρήση τους δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη αλλά έχει περιοριστεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπου τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι πρωταρχική απαίτηση. Επομένως, ο στόχος στους συγκεκριμένους συσσωρευτές είναι να μπορέσουν να συνδυαστούν η υψηλή ενέργεια και ισχύς με την καλύτερη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος μιας εμπορικά βιώσιμης επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Εξαιτίας του υψηλού κόστους του αργύρου, η πλειοψηφία των εφαρμογών των συγκεκριμένων συσσωρευτών είναι κυρίως κυβερνητικές. Η πρώτη εφαρμογή των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών αργύρου-ψευδαργύρου ήταν σε τορπίλες και αργότερα ακολούθησαν οι εφαρμογές σε βόμβες, πυραύλους, εξοπλισμό καταδύσεων και πρόσφατα σε σωστικά βαθυσκάφη. Οι συσσωρευτές αργύρου-καδμίου βρίσκουν εφαρμογές σε διαστημικό εξοπλισμό όπου απαιτούνται μη μαγνητικές ιδιότητες, αλλά και σε επίγειες εφαρμογές όπως σε τηλεπικοινωνιακό και ιατρικό εξοπλισμό.

7. **Συσσωρευτές ψευδαργύρου-μαγγανίου:** Οι επαναφορτιζόμενοι αλκαλικοί συσσωρευτές ψευδαργύρου-διοξειδίου μαγγανίου αποτελούν εξέλιξη των πρωτογενών αλκαλικών συσσωρευτών. Ο αρχικός σχεδιασμός τους ακολουθούσε αρκετά πιστά αυτόν των κυλινδρικών πρωτογενών συσσωρευτών ψευδαργύρου-μαγγανίου και διατηρούσε τα πλεονεκτήματά τους, όπως τη μεγάλη διάρκεια ζωής, την καλή πυκνότητα ρεύματος και την ασφάλεια. Τα πλεονεκτήματα αυτών των συσσωρευτών ήταν το χαμηλό κόστος συγκριτικά με τους υπόλοιπους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές και ότι κατασκευάζονται πλήρως φορτισμένοι με αποτέλεσμα να μην απαιτούν φόρτιση πριν από την πρώτη τους χρήση. Το μειονέκτημά τους όμως, το οποίο περιόρισε την εμπορευματοποίησή τους, ήταν ότι τα ηλεκτροχημικά στοιχεία από τα οποία αποτελούνταν οι συσσωρευτές, είχαν ως αποτέλεσμα την ύπαρξη περιπτώσεων κατά τις οποίες έχαναν τη δυνατότητά τους να επαναφορτίζονται.
8. **Μπαταρίες ιόντων λιθίου:** Οι συγκεκριμένες μπαταρίες παρουσιάζουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και ενεργειακή απόδοση, καθώς και μεγαλύτερο κύκλο ζωής, σε σχέση με τις 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). Τα πλεονεκτήματα αυτά, οφείλονται κατά ένα μεγάλο βαθμό στις ηλεκτροχημικές ιδιότητες του λιθίου. Από την άλλη πλευρά, οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές λιθίου δεν έχουν την ίδια ικανότητα σε υψηλά ρεύματα και σε μερικές περιπτώσεις, ούτε τους πολλούς κύκλους ζωής των συμβατικών συσσωρευτών λιθίου. 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 ιόντων λιθίου 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. Στην παρούσα εργασία θα εστιάσουμε πάνω στην συγκεκριμένη τεχνολογία και συγκεκριμένα θα μελετήσουμε τις μπαταρίες ιόντων λιθίου  $\text{LiFePO}_4$ .

9. **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. Τα παραπάνω συστήματα μπαταριών έχουν τη δυνατότητα παροχής μεγάλων ποσών ισχύος, αλλά και τη δυνατότητα συνεχούς απόδοσης ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα έως και 10 ώρες. Δεν υφίστανται αυτοεκφόρτιση καθώς οι ηλεκτρολύτες είναι αποθηκευμένοι χωριστά και δεν μπορούν να αντιδράσουν, ενώ μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν. 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. Η ανάπτυξη μπαταριών ροής με υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας θα αυξήσει την προσαρμοστικότητα και άρα και την πολλαπλή χρήση των συγκεκριμένων συστημάτων. Οι μπαταρίες ροής ίσως να προσφέρουν μια εναλλακτική λύση των κυψελών καυσίμου υδρογόνου στις περιπτώσεις όπου οι κυψέλες υδρογόνου συνδυάζονται με ανεμογεννήτριες σε αυτόνομα συστήματα (off-grid applications).

#### 2.4. Εφαρμογές και μοντέλα μπαταριών ιόντων λιθίου

Από την αρχή της δεκαετίας του 1990, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είχαν καταλάβει πάνω από το 50% της αγοράς σε μικροσυσκευές και έως το 2000 είχαν επιτυχώς εισχωρήσει στην βιομηχανία.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου υπάρχουν σε διαφορετικές χημικές συστάσεις με συγκεκριμένες χαρακτηριστικές ισχύος-ενέργειας. Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των μπαταριών είναι η μεγάλη ευελιξία τους. Μπορούν να προσαρμόσουν την

συμπεριφορά τους σε οποιαδήποτε τάση, ισχύ και ενέργεια που μπορεί να απαιτηθεί κατά την λειτουργία τους.

Το πεδίο εφαρμογής των μπαταριών λιθίου, κυρίως από το 2010 και μετά, έχει αυξηθεί, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην ενσωμάτωση των μπαταριών ιόντων λιθίου στα ηλεκτρικά και στα υβριδικά αυτοκίνητα. Επίσης, εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος που προέρχονται από μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο παρέχοντας μια σειρά από υπηρεσίες. Συστήματα μπαταριών ιόντων λιθίου, σε συνεργασία με διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, από μερικά kW μέχρι δεκάδες MW όπως και για υποστήριξη δικτύου με τάσεις ως και 6kV, έχουν σχεδιαστεί και επιτυχώς δοκιμαστεί.

Τεχνολογικές βελτιώσεις στοχεύουν να αυξήσουν την πυκνότητα ενέργειας, τον αριθμό των κύκλων και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ένας σημαντικός παράγοντας για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας ηλεκτρονικής συσκευής είναι πως γίνεται να επιτευχθεί η ισοκατανομή της ισχύος στα διάφορα στοιχεία της μπαταρίας και να επεκταθεί ο χρόνος ζωής της μπαταρίας. Αυτού του είδους η ηλεκτρονική συσκευή ονομάζεται σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας (BMS) και λειτουργεί, έτσι ώστε να μπορεί να ελεγχθεί αν η μπαταρία βρίσκεται εντός των ασφαλών ορίων λειτουργίας και να υπολογίζει την κατάσταση φόρτισής της, καθώς και τις δευτερογενείς παραμέτρους που επηρεάζουν την λειτουργία της (όπως ο αριθμός των κύκλων της μπαταρίας, ο χρόνος ζωής της, η θερμοκρασία και το επίπεδο ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης). Η συσκευή πρέπει επίσης να μπορεί να ελέγχει την μπαταρία σε καταστάσεις μη ασφαλούς λειτουργίας της.

Το αυξημένο ενδιαφέρον για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου οδήγησε στην ανάγκη υλοποίησης μοντέλων που είναι ικανά να λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία της μπαταρίας και καθορίζουν τη συμπεριφορά της.

Μέχρι τώρα έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες πάνω στην κατάλληλη διαμόρφωση ενός μοντέλου που θα λαμβάνει υπόψιν όλους τους παράγοντες που καθορίζουν την λειτουργία του συγκεκριμένου τύπου μπαταρίας και το κάθε ένα από αυτά έχει διαφορετικό βαθμό πολυπλοκότητας. Υπάρχουν 3 τύποι μοντέλων που μπορούν να προσομοιώσουν την λειτουργία της μπαταρίας: το ηλεκτροχημικό, το μαθηματικό και το ηλεκτρικό μοντέλο[7].

1. **Ηλεκτροχημικό μοντέλο:** Το ηλεκτροχημικό μοντέλο προσομοιώνει την μπαταρία με βάση τους φυσικούς νόμους που τη διέπουν, χαρακτηρίζει τους θεμελιώδεις μηχανισμούς της παραγωγής ενέργειας και συσχετίζει τις παραμέτρους της μπαταρίας με βάση τις μακροσκοπικές (όπως τάση και ρεύμα μπαταρίας) και τις μικροσκοπικές (όπως διασπορά συγκέντρωσης ηλεκτροδίων) πληροφορίες. Παρ' όλο που τα αποτελέσματα της

προσομοίωσης είναι πολύ ακριβή, το μοντέλο παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα και μεγάλο χρόνο κατά την προσομοίωση

2. **Μαθηματικό μοντέλο:** Το μαθηματικό μοντέλο είναι πολύ “αφηρημένο” για να μπορεί να προσομοιώσει την ουσιαστική λειτουργία της μπαταρίας. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με εμπειρικές εξισώσεις και με μαθηματικά μοντέλα, όπως στοχαστική προσέγγιση για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της μπαταρίας, όπως η αποδοτικότητα, η χωρητικότητα και ο χρόνος λειτουργίας της μπαταρίας. Παρ’ όλα αυτά δεν δίνει πληροφορία για την σχέση τάσης-ρεύματος, η οποία είναι πολύ σημαντική κατά την προσομοίωση και την μελέτη της μπαταρίας. Ακόμη το σφάλμα προσομοίωσης είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους μοντέλων, γι’ αυτό δεν συνηθίζεται να προτιμώνται.
3. **Ηλεκτρικό μοντέλο:** Το ηλεκτρικό μοντέλο έχει μικρό σφάλμα περίπου στο 1-5% και υλοποιείται χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά στοιχεία που ανταποκρίνονται στην συμπεριφορά της μπαταρίας. Τα ηλεκτρικά στοιχεία αυτά είναι πηγές τάσεις, αντιστάσεις και χωρητικότητες, τα οποία τοποθετούνται έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό σύστημα που θα προσομοιώνει την λειτουργία της μπαταρίας. Τα περισσότερα ηλεκτρικά μοντέλα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: α) Το μοντέλο Thevenin, β) Το μοντέλο που βασίζεται φασματικό περιεχόμενο της αντίστασης της μπαταρίας και γ) τα μοντέλα που βασίζονται στον χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας.
4. **Μοντέλο Thevenin:** Το μοντέλο Thevenin αποτελείται από μία πηγή τάσης σε σειρά με μία αντίσταση και έναν RC κλάδο (αντίσταση παραλληλισμένη με χωρητικότητα) που προβλέπει την απόκριση της μπαταρίας στις μεταβολές φορτίου σε συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης, θεωρώντας σταθερή την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Δυστυχώς αυτή η υπόθεση αποτρέπει το μοντέλο να απεικονίσει τις μεταβολές της τάσης όπως και την πληροφορία για τον χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα την απόκριση της μπαταρίας σε μεταβολές φορτίου, αυξάνοντας τον αριθμό των RC κλάδων, καθώς και τα επιπρόσθετα

ηλεκτρικά στοιχεία που προβλέπουν τον χρόνο λειτουργίας και την DC απόκριση.

5. **Φασματικό περιεχόμενο της αντίστασης της μπαταρίας:** Τα μοντέλα αυτού του τύπου χρησιμοποιούν τη μέθοδο υπολογισμού του φασματικού περιεχομένου της αντίστασης της μπαταρίας για να αποκτήσουν την ac ισοδύναμη αντίσταση στο πεδίο της συχνότητας και μετά χρησιμοποιούν ένα πολύπλοκο ισοδύναμο για να αντιστοιχίσουν στα ηλεκτρικά στοιχεία το φασματικό περιεχόμενο. Αυτή η αντιστοίχιση είναι δύσκολη και περίπλοκη, καθώς και δύσκολα αντιληπτή.
6. **Τα μοντέλα που βασίζονται στον χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας:** Αυτού του είδους τα μοντέλα χρησιμοποιούν ένα περίπλοκο ηλεκτρικό κύκλωμα που προσομοιώνει τον χρόνο λειτουργίας (εκφόρτιση χωρίς φορτίο και χρόνος ζωής) της μπαταρίας και την dc απόκριση τάσης της μπαταρίας. Το αρνητικό αυτής της κατηγορίας είναι ότι δεν μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τον χρόνο λειτουργίας και την dc απόκριση της τάσης για μεταβαλλόμενο ρεύμα φορτίου.

## 2.5. Προκλήσεις για έρευνα

Η τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου μπορεί να βελτιωθεί, όσον αφορά το κόστος και την διάρκεια ζωής τους, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται σε περισσότερες εφαρμογές, όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και το ηλεκτρικό δίκτυο. Η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής της μπαταρίας είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την επιλογή τους σε αυτές τις εφαρμογές. Οι δύο προκλήσεις των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι:

1. **Μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας:** Τα ανθρακώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν μεγάλη επίδραση στη μείωση της χωρητικότητας για μεγάλα ρεύματα εκφόρτισης. Κατά την λειτουργία η κυψέλη της μπαταρίας υποφέρει από μη αντιστρεπτές χημικές αντιδράσεις, οι οποίες συμβαίνουν στην επιφάνεια του γραφίτη. Τα παράγωγα από αυτές τις χημικές αντιδράσεις δημιουργούν μια επιφάνεια ταινίας πάνω στο ηλεκτρόδιο από άνθρακα που είναι γνωστή ως Solid Electrolyte Interface (SEI). Η μπαταρία σταματά να λειτουργεί αποδοτικά όταν τα ιόντα λιθίου δεν μπορούν να διασχίσουν αυτήν την επιφάνεια εξαιτίας του πάχους της. Έτσι, η διάρκεια ζωής και ο αριθμός κύκλων μιας κυψέλης της μπαταρίας βασίζονται σε αυτήν την επιφάνεια. Ο βαθμός μείωσης της χωρητικότητας της μπαταρίας



εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ο μέσος βαθμός εκφόρτισης της μπαταρίας και η θερμοκρασία υπό την οποία λειτουργεί μία κυψέλη της μπαταρίας. Αν η μπαταρία εκφορτίζεται με μεγάλο ρεύμα τότε η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αυξάνεται, καθώς αυξάνεται και η θερμοκρασία της κυψέλης της μπαταρίας. Υψηλή θερμοκρασία και υψηλό ρεύμα εκφόρτισης μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων και να δημιουργήσει την γνωστή επιφάνεια ταινίας SEI. Οι μπαταρίες λιθίου συμπεριφέρονται καλύτερα σε υψηλές θερμοκρασίες αφού οι χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται ταχύτερα. Το πρόβλημα που δημιουργείται είναι ότι σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

- 2. Απόδοση του μοντέλου προσομοίωσης της μπαταρίας:** Κατά τη λειτουργία της μπαταρίας είναι σημαντικό το μοντέλο να λαμβάνει υπόψη την μεταβολή της λειτουργίας της με βάση την θερμοκρασία, το επίπεδο ρεύματος καθώς και την κατάσταση φόρτισης. Αν το μοντέλο δεν είναι ικανό να προβλέψει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τότε αυτή μπορεί να οδηγηθεί πέρα από την περιοχή ομαλής λειτουργίας (πλήρης αποφόρτιση, υπερφόρτιση). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα που αποδίδει στο δίκτυο ή σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή να είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπτό για την ομαλή λειτουργία της μπαταρίας και αυτή να οδηγείται σε πρόωρη "γήρανση". Έτσι το μοντέλο προσομοίωσης της μπαταρίας πρέπει να είναι σε θέση να προβλέπει το επιτρεπτό ρεύμα που μπορεί να αποδώσει στο δίκτυο ή σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή με βάση τις ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας της. Κατάσταση πέρα της φυσιολογικής λειτουργίας της μπαταρίας όπως είναι η κατάσταση υποφόρτισης, έχουμε όταν το μοντέλο υπερεκτιμά το επιτρεπόμενο ρεύμα εκφόρτισης και έτσι η τάση της μπαταρίας πέφτει κάτω από την ελάχιστη επιτρεπτή τάση με αποτέλεσμα να μην ικανοποιεί τις ανάγκες του δικτύου. Από την άλλη μεριά, κατάσταση υπερφόρτισης, έχουμε όταν το μοντέλο προσομοίωσης υπερεκτιμά το επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης, με αποτέλεσμα η τάση της μπαταρίας να ξεπερνά την μεγαλύτερη επιτρεπόμενη τάση.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:**  
**Φαινόμενο**  
**γήρανσης των**  
**μονάδων**  
**αποθήκευσης**  
**ηλεκτρικής**  
**ενέργειας**



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Φαινόμενο γήρανσης των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

## 3.1. Εισαγωγή

Η γήρανση της μπαταρίας εξαρτάται από τη λειτουργία της και ως εκ τούτου επηρεάζεται από τη λειτουργική διαχείρισή της. Για την ενίσχυση της οικονομικής αποδοτικότητας, είναι σημαντικό να υπάρξουν μοντέλα γήρανσης, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μπαταρίες με στόχο τον υπολογισμό του χρόνου ζωής της μπαταρίας. Οι διεργασίες γήρανσης είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθούν, ακόμη και στον ηλεκτροχημικό τομέα δεν υπάρχει πλήρης κατανόηση του φαινομένου.

Όπως σε όλες τις τεχνολογίες μπαταριών, έτσι και στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, η ονομαστική χωρητικότητα τους φθίνει με τον χρόνο σαν συνάρτηση ορισμένων παραγόντων που σχετίζονται κυρίως με τον τρόπο λειτουργίας της. Οι Darling και Newman [8] έκαναν μια πρώτη προσπάθεια να μοντελοποιήσουν τις παρασιτικές αντιδράσεις στις μπαταρίες λιθίου με την ενσωμάτωση μιας πλευρικής αντίδρασης οξείδωσης διαλυτών σε ένα μοντέλο μπαταρίας ιόντων λιθίου. Το μοντέλο παρουσιάζει την διαδικασία της αυτοεκφόρτισης που συμβαίνει στα κύτταρα Li-ion. Ύστερα, ο Spotnitz [9] ανέπτυξε πολυωνυμικές εκφράσεις για την εκτίμηση των μη αναστρέψιμων και αναστρέψιμων απωλειών χωρητικότητας λόγω της ανάπτυξης και διάλυσης της σταθερής ενδιάμεσης φάσης των ηλεκτρολυτών (SEI). Σύμφωνα με τον συγγραφέα, οι εκφράσεις ήταν δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με υπέρθεση της θερμοκρασίας στο χρόνο. Επίσης το μοντέλο απαιτούσε εκτεταμένα πειραματικά δεδομένα του κύκλου ζωής των μπαταριών για την εύρεση των παραμέτρων. Οι παρενέργειες και οι διεργασίες γήρανσης στις μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να προκαλέσουν ορισμένες ανεπιθύμητες ενέργειες που οδηγούν σε απώλεια χωρητικότητας.

Υπάρχουν σημαντικές πρόσφατες έρευνες που επικεντρώνονται στην ανάπτυξη μοντέλων που αναλύουν την κυκλική λειτουργία της μπαταρίας (cycling aging) αλλά και την ημερολογιακή ζωής της (calendar aging). Αυτά τα μοντέλα είναι ημιεμπειρικά, δηλαδή ταιριάζουν πειραματικά δεδομένα σε αναλυτικές εκφράσεις. Ωστόσο, οι εν λόγω εκφράσεις δεν είναι εφαρμόσιμες σε λειτουργίες ελέγχου των μπαταριών, δεδομένου ότι απαιτούνται εκφράσεις κόστους σε ένα τέτοιο πλαίσιο, στο οποίο μια μεμονωμένη ενέργεια ελέγχου να λαμβάνει υπόψη την αντίστοιχη απώλεια χωρητικότητας. Επιπλέον, αυτά τα μοντέλα δεν είναι σε θέση να συμπεριλάβουν ένα αυθαίρετο μοτίβο χρήσης των αποθηκευτικών μέσων που συναντάται σε ένα ρεαλιστικό σύστημα ισχύος.

### 3.2. Παράγοντες γήρανσης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό γήρανσης της μπαταρίας είναι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (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[10]:

- **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 μισός κύκλος 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 του φορτίου που μπορεί να διαθέσει η μπαταρία σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, προς το συνολικό ονομαστικό της φορτίο. Συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό % και δίνεται από τον τύπο:

$$SoC(t) = \frac{Q_a(t)}{Q_r} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

όπου  $Q_a(t)$  είναι το διαθέσιμο φορτίο τη χρονική στιγμή  $t$ . Όταν το SoC ισούται με 0% σημαίνει πως η μπαταρία είναι άδεια, ενώ όταν ισούται με 100% σημαίνει πως η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη. Για λόγους απλότητας σε παρόμοιες μελέτες με την παρούσα, το επίπεδο φόρτισης συνήθως ταυτίζεται με το επίπεδο διαθέσιμης ενέργειας της μπαταρίας (State of Energy).

- **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:

$$DoD = |SoC(t_{end}) - SoC(t_{start})| \cdot 100\% \quad (3.2)$$

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/εκφόρτισή της. 1C-rate σημαίνει πως το ρεύμα που φορτίζει/εκφορτίζει την μπαταρία είναι τέτοιο, ώστε μια γεμάτη μπαταρία θα αποφορτιστεί σε 1 ώρα. Συγκεκριμένα η τιμή αυτού του παράγοντα δίνεται από τον τύπο:

$$C = \frac{|I_{bat}| \cdot (1h)}{Q_r} \quad (3.3)$$

- **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 μπαταρίας, είναι ο λόγος της εναπομένουσας χωρητικότητας προς την ονομαστική. Φυσικά ο συντελεστής L είναι πάντοτε μικρότερος ή ίσος της μονάδας.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

# Χάρτες γήρανσης



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Χάρτες γήρανσης

### 4.1. Εισαγωγή

Με τον όρο χάρτες γήρανσης, νοείται ότι μπορούμε να συνδέσουμε μια διακεκριμένη δράση ελέγχου στην αντίστοιχη αύξηση της απώλειας της χωρητικότητας. Δείχνουμε ότι οι χάρτες μπορούν να κλιμακωθούν ώστε να αντιπροσωπεύουν οποιοδήποτε σύστημα μπαταριών σε μέγεθος και ισχύ. Οι χάρτες μπορούν γενικά να ενσωματωθούν ως παράγοντες κόστους σε ένα πλαίσιο ελέγχου για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή μελετών που αξιολογούν τις επιπτώσεις στην υποβάθμιση της μπαταρίας για διαφορετικές τεχνολογίες μπαταριών και διαφορετικά πρότυπα χρήσης.

Γενικά, οι χημικές πλευρικές αντιδράσεις ενεργοποιούνται με την εφαρμογή τάσης, τη θερμοκρασία και το μέγεθος των ρευμάτων που διαρρέουν την μπαταρία. Μέχρι στιγμής δεν είναι δυνατόν όλες οι πλευρικές αντιδράσεις και μηχανισμοί γήρανσης να γίνουν κατανοητοί με κάθε λεπτομέρεια, κάτι που κατατάσσει αυτό το κομμάτι πολύ σημαντικό για την διεξαγωγή έρευνας. Από την στιγμή που η υποβάθμιση της χωρητικότητας των μπαταριών είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθεί και μπορεί να διατυπωθεί σωστά μόνο στο πολύπλοκο ηλεκτροχημικό πεδίο, η έρευνα συγκεντρώνεται επίσης στην εύρεση μακροσκοπικών ημιεμπειρικών μοντέλων. Είναι σημαντικό να τονιστεί, ότι μόνο αυτά τα λειτουργικά μοντέλα μπορούν να ενσωματωθούν στο σύστημα ισχύος, σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν τεχνικές βελτιστοποίησης, με κατάλληλη προσαρμογή τους. Όπως θα παρουσιαστεί και παρακάτω, στην παρούσα εργασία έχει αναπτυχθεί και αναλυθεί μια διαδικασία με την οποία τα διαθέσιμα ημιεμπειρικά μοντέλα μπορούν να μετατραπούν σε χάρτες γήρανσης.

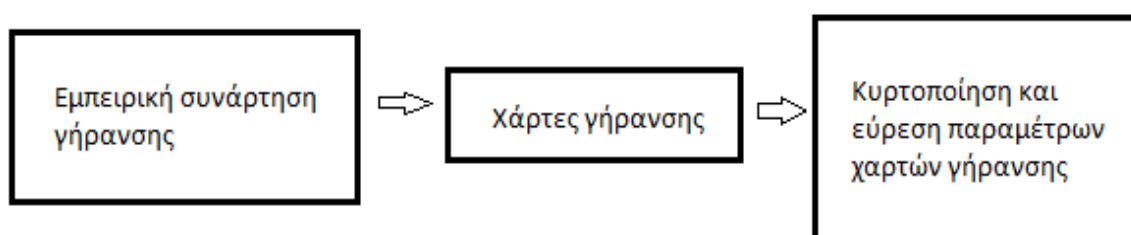
Η έννοια των χαρτών γήρανσης δεν είναι καινοφανής. Ήδη έχει γίνει χρήση αυτής της έννοιας για να προσεγγιστεί η ανάπτυξη του φιλμ που είναι ο παράγοντας για την απώλεια χωρητικότητας των μπαταριών ως συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης (SoC) και του ρεύματος της μπαταρίας ( $I_{bat}$ ). Αυτή η εργασία παρουσιάζει την γενίκευση αυτής της ιδέας στο βαθμό του να γίνει εφικτή η περιγραφή επίσης κρυμμένων και άγνωστων χημικών παράπλευρων αντιδράσεων με τη λογική ενός μοντέλου μαύρου κουτιού.

## 4.2. Περιγραφή παραμετροποίησης

Θεωρείται ως δεδομένο μια στατική διαδικασία υποβάθμισης των μπαταριών. Οι παράπλευρες αντιδράσεις ενεργοποιούνται από δυναμικές διαφορές μεταξύ των διεπαφών του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων, της θερμοκρασίας, και εφαρμοζόμενου ρεύματος που διαρρέει τη μπαταρία ( $I_{bat}$ ). Ο ρυθμός αντίδρασης ( $I_s$ ) που ορίζεται ως ο αριθμός των ιόντων που μετατρέπονται σε στερεό υλικό σε ένα χρονικό διάστημα, σχετίζεται με το πλευρικό ρεύμα ( $I_s$ ). Η εξίσωση 4.1 που περιγράφει το φαινόμενο αυτό είναι[11]:

$$I_s = -C_Q = h(V_{oc}, I_{bat}, \theta) \quad (4.1)$$

όπου  $V_{oc}$  είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος και συνδέεται με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας SoC. Το  $C_Q$  υποδηλώνει τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Από την στιγμή που αυτή η γενικευμένη διαδικασία πραγματοποιείται εσωτερικά, το ρεύμα δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας. Επίσης, η μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης δεν επαρκεί για τον προσδιορισμό της πλήρους διαδικασίας γήρανσης επειδή επηρεάζεται μόνο από την αποσύνθεση του στρώματος της ανόδου. Ουσιαστικά η γενική ιδέα της διαδικασίας που θα ακολουθηθεί για να υπολογιστεί η κανονικοποιημένη μορφή των χαρτών γήρανσης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα[12]:

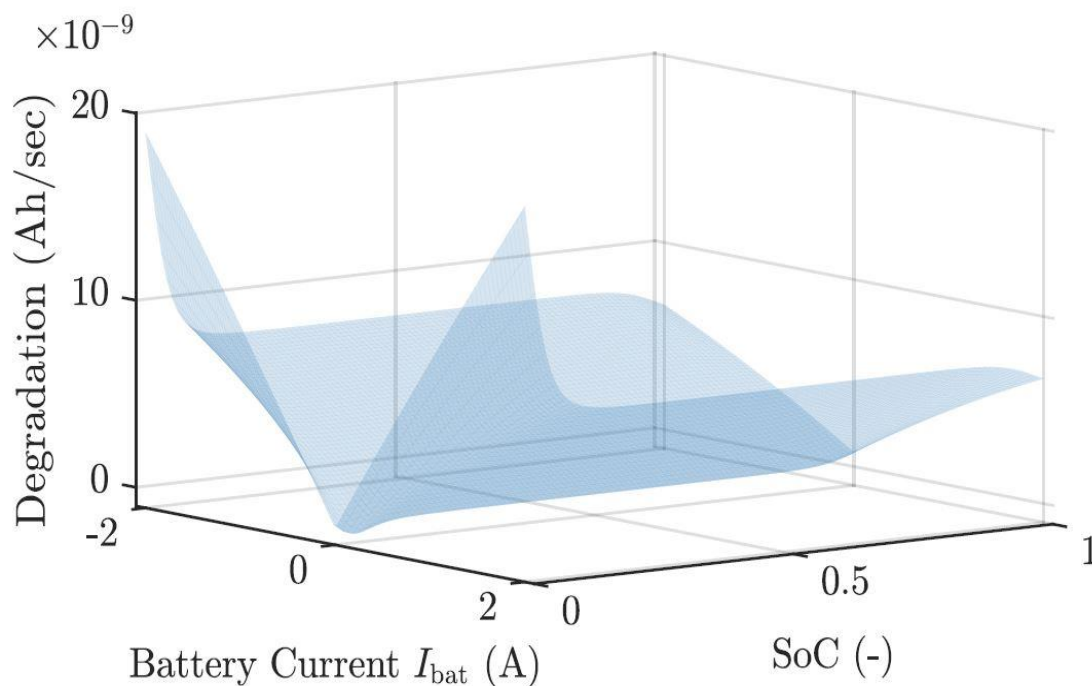


Σχήμα 4.1 Διαδικασία υπολογισμού χαρτών γήρανσης

Η εμπειρική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από την αναφορά [13]. Για την εξαγωγή του εμπειρικού μοντέλου από τους δημιουργούς, πραγματοποιήθηκαν πειράματα πάνω στον κύκλο ζωής μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου ( $\text{LiFePO}_4$ ) που είναι το είδος πάνω στο οποίο πραγματοποιείται η μελέτη της παρούσας εργασίας. Το μοντέλο των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκε για την μπαταρία είναι βέλτιστα σχεδιασμένο ώστε να παράγει τιμές για τις παραμέτρους του, ικανοποιώντας παράλληλα δοσμένους πειραματικούς περιορισμούς. Τα τελικά αποτελέσματα περιγράφουν ένα μοντέλο για την αποδόμηση της χωρητικότητας της

μπαταρίας σε σχέση με την τάση ανοιχτοκύκλωσης και το ρεύμα που διαρρέει την μπαταρία. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με εφαρμογή ποικίλων τάξεων ρεύματος μπαταρίας, βάθη εκφόρτισης (DoD) αλλά και θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα εισάχθηκαν σε ένα μοντέλο για τον χρόνο ζωής των μπαταριών σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, τη θερμοκρασία και το ρυθμό φόρτισης.

Έχοντας την εμπειρική συνάρτηση σε σχέση με την τάση ανοιχτοκύκλωσης και το ρεύμα της μπαταρίας αντικαθιστούμε την μεταβλητή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης με την σχέση που υπολογίσθηκε στη μελέτη [14] και συνδέει την τάση ανοιχτοκύκλωσης με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC). Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε σε ένα αναλυτικό χάρτη γήρανσης που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα 4.1 Χάρτης γήρανσης μπαταρίας LiFePO4

Ο χάρτης γήρανσης που παρουσιάστηκε παραπάνω αναφέρεται σε μία συγκεκριμένη σταθερή χωρητικότητα μπαταριών. Για να υλοποιηθεί η αξιολόγηση των επιπτώσεων της γήρανσης για συστήματα μπαταριών οποιουδήποτε μεγέθους, τα αποτελέσματα από το επίπεδο της μίας μπαταρίας πρέπει να προσαρμοστούν ώστε να μπορούν να αντιπροσωπεύσουν οποιοδήποτε σύστημα μπαταρίας σε μέγεθος και ισχύ. Επιπλέον, για να είναι εφικτή αυτή η μετάβαση είναι σημαντικό οι χάρτες να μεταφερθούν από τους τρέχοντες παράγοντες στους παράγοντες ισχύος των μπαταριών ώστε να μπορούν να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις του συστήματος

παροχής ενέργειας. Η αναλυτική διαδικασία παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο, όπου ουσιαστικά καταλήγουμε να έχουμε μια κανονικοποιημένη έκφραση της γήρανσης που μπορεί να προσαρμοστεί για να εκφράζει οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μέγεθος και ισχύ.

### 4.3. Χάρτες γήρανσης από δεδομένα του κύκλου ζωής των μπαταριών

Εκτός από εμπειρικές συναρτήσεις ως είσοδο για την διαδικασία που θα ακολουθήσουμε, είναι δυνατό να εισαχθούν δεδομένα από πειραματικές μετρήσεις του κύκλου ζωής μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου. Αν και στην συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιήσουμε μόνο μία εμπειρική συνάρτηση ως είσοδο, παρακάτω θα παρουσιαστεί συνοπτικά και η αντίστοιχη μέθοδος με είσοδο, αποτελέσματα από τον κύκλο ζωής μιας μπαταρίας[15].

Αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά στον τρόπο που εισάγουμε τα δεδομένα του κύκλου ζωής μιας μπαταρίας. Η απολεσθείσα χωρητικότητα  $Q_s$  μπορεί να μετρηθεί μόνο από παρατηρήσεις σε περιόδους μεγάλου χρονικού διαστήματος. Ως εκ τούτου, δεν μπορεί να συνδεθεί άμεσα με μεμονωμένες ενέργειες ελέγχου, στα πλαίσια μιας βελτιστοποίησης. Ωστόσο, αν υπάρχουν πολλές μετρήσεις της χωρητικότητας των μπαταριών, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η επιβάρυνση στην απώλεια χωρητικότητας και να συσχετιστεί με διακριτούς τύπους ενεργειών ελέγχου και να προβληθεί η απώλεια της χωρητικότητας των μπαταριών με χρήση του πίνακα  $M_p$  που παρουσιάζεται στην έκφραση (4.2).

Μια ενέργεια ελέγχου ορίζεται από το εφαρμοζόμενο ρεύμα μπαταρίας ( $I_{bat}$ ) και το SoC της μπαταρίας, και έτσι οι δύο αυτές τιμές είναι διακριτοποιημένες σε  $n_{bd}$  ζώνες για το SoC και  $m_{bd}$  διαστήματα για το  $I_{bat}$ . Υποτίθεται ότι το πλευρικό ρεύμα είναι συνάρτηση αυτών των τιμών (θεωρείται ισοθερμική η λειτουργία της μπαταρίας έτσι ώστε η άμεση επίδραση της θερμοκρασίας να αμελείται). Για  $n_m$  μετρήσεις της απώλειας χωρητικότητας ( $Q_{s,1}, Q_{s,2}, \dots, Q_{s,n_m}$ ) και τυχαία μοτίβα ενεργειών ελέγχου, μπορούν οι άγνωστες διαχωρισμένες τιμές του πλευρικού ρεύματος ( $I_s$ ) να μοντελοποιηθούν σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Όπως φαίνεται στη σχέση (4.2).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{m_{bd}} \sum_{l=1}^{n_{bd}} p_{1,n_{bd}(j-1)+l} \cdot T_{b,j} \cdot I_s \left( \frac{2l-1}{2n_{bd}}, I_{bat,j} \right) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^{m_{bd}} \sum_{l=1}^{n_{bd}} p_{n_m,n_{bd}(j-1)+l} \cdot T_{b,j} \cdot I_s \left( \frac{2l-1}{2n_{bd}}, I_{bat,j} \right) \end{bmatrix}}_{M_p I_s} = \underbrace{\begin{bmatrix} Q_{s,1} \\ \vdots \\ Q_{s,n_m} \end{bmatrix}}_{Q_s} \quad (4.2)$$

όπου το  $p$  μετρά τις ενέργειες ελέγχου που σχετίζονται με κάθε ζώνη του SoC και το διάστημα ρεύματος που διαρρέει την μπαταρία. Η μεταβλητή  $T_{bj}$  είναι ο χρόνος διάσχισης της αντίστοιχης ζώνης SoC. Για να αποφευχθεί ένα μη επιλύσιμο σύστημα, υποθέτουμε ότι  $n_m > n_{bd} \cdot m_{bd}$ . Το άγνωστο διάνυσμα  $I_s$  μπορεί να εκτιμηθεί με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (4.3).

$$I_s = \underset{\mu \varepsilon I_s > 0}{\operatorname{argmin}} \|M_p I_s - Q_{-s}\|_2^2 \quad (4.3)$$

Δεδομένου ότι ο χάρτης που προκύπτει είναι μη κυρτός, πρέπει να επεξεργαστεί περαιτέρω για να αποκτήσει κυρτή αναπαράσταση ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο μιας βελτιστοποίησης. Σημειώνεται επίσης ότι ο πίνακας  $M_p$  πρέπει να αποτελείται από γραμμικά ανεξάρτητες σειρές, που σημαίνει ότι είναι πίνακας πλήρους τάξης, και μπορεί να βρεθεί μια μοναδική λύση του πλευρικού ρεύματος  $I_s$ .

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογισθούν οι χάρτες γήρανσης των μπαταριών είτε από μοντέλα του κύκλου ζωής της μπαταρίας και της ημερολογιακής ζωής της, είτε από δεδομένα που πάρθηκαν από πειράματα πάνω στον κύκλο ζωής της [16]. Σε κάποιες έρευνες η συνολική απώλεια της χωρητικότητας μιας μπαταρίας ορίζεται ως το άθροισμα των μοντέλων του κύκλου ζωής της και της ημερολογιακής ζωής της και υπολογίζεται μέσα από δεδομένα πειραματικών μετρήσεων για τη θερμοκρασία, τους πλήρεις κύκλους λειτουργίας της και του ρεύματος που τη διαρρέει. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι δεδομένα του κύκλου ζωής της που έχουν δοθεί από τους κατασκευαστές και συσχετίζουν τους κύκλους λειτουργίας της ( $n_{cyc}$ ) με τα διαφορετικά βάθη εκφόρτισης (DoD). Για κάθε διαφορετικό βάθος εκφόρτισης (DoD), χρειάζεται ο αριθμός πλήρων κύκλων που πραγματοποίησε η μπαταρία για να παρθεί ως αποτέλεσμα η απώλεια χωρητικότητας  $Q_{s,i}$ . Εάν υποθεθεί ότι η διακύμανση του DoD έχει ως κεντρική τιμή το επίπεδο φόρτισης (SoC) στο 50% της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας, το ακόλουθο σύστημα γραμμικών εξισώσεων μπορεί να παρουσιαστεί (4.4):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & T_b p_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ T_b p_{n_m} & \dots & T_b p_{n_m} \end{bmatrix}}_{M_p(T_b)} \underbrace{\begin{bmatrix} I_s \left( \frac{1}{2n_{bd}}, I_{bat} \right) \\ \vdots \\ I_s \left( \frac{2k-1}{2n_{bd}}, I_{bat} \right) \\ \vdots \\ I_s \left( \frac{2n_{bd}-1}{2n_{bd}}, I_{bat} \right) \end{bmatrix}}_{I_s(I_{bat})} = \underbrace{\begin{bmatrix} Q_{s,1} \\ \vdots \\ Q_{s,n_m} \end{bmatrix}}_{Q_s(I_{bat})} \quad (4.4)$$

όπου  $n_m \geq n_{bd}$ . Σημειώνεται ότι ο πίνακας  $M_p$  είναι πλήρους τάξεως και ο αριθμός των ενεργειών ελέγχου μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$p_i = 2 \frac{n_{cyc,i}}{DoD_i} \quad (4.5)$$

Ο χρόνος που χρειάζεται για τη διάσχιση μιας ζώνης SoC είναι:

$$T_b = \frac{C_Q}{I_{bat} \cdot n_{bd}} \quad (4.6)$$

Ο χάρτης μπορεί επίσης να παραχθεί για διαφορετικής τάξεως ρεύματα μπαταρίας, όπου  $m_m$  δηλώνει το πλήθος αυτών των ρευμάτων.

$$\begin{bmatrix} M_p(T_{b,1}) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & M_p(T_{b,m_m}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s(I_{bat,1}) \\ \vdots \\ I_s(I_{bat,m_m}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_s(I_{bat,1}) \\ \vdots \\ Q_s(I_{bat,1}) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να εξαχθεί ο χάρτης γήρανσης του διαγράμματος 4.1 που παρουσιάστηκε και παραπάνω. Ομοίως για μοντέλα του κύκλου ζωής των μπαταριών μπορεί να ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία. Η μόνη διαφορά είναι ότι τα δεδομένα που προέκυψαν με πειράματα πάνω στο κύκλο ζωής μιας μπαταρίας για την απώλεια χωρητικότητας, πρέπει να αντικατασταθούν από τις κατάλληλες συναρτήσεις του μοντέλου για τον δοσμένο πίνακα  $M_p$  των τιμών  $p$  των μεμονωμένων ενεργειών ελέγχου της λειτουργίας της μπαταρίας.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:**  
**Τριγωνισμός**  
**Delaunay**



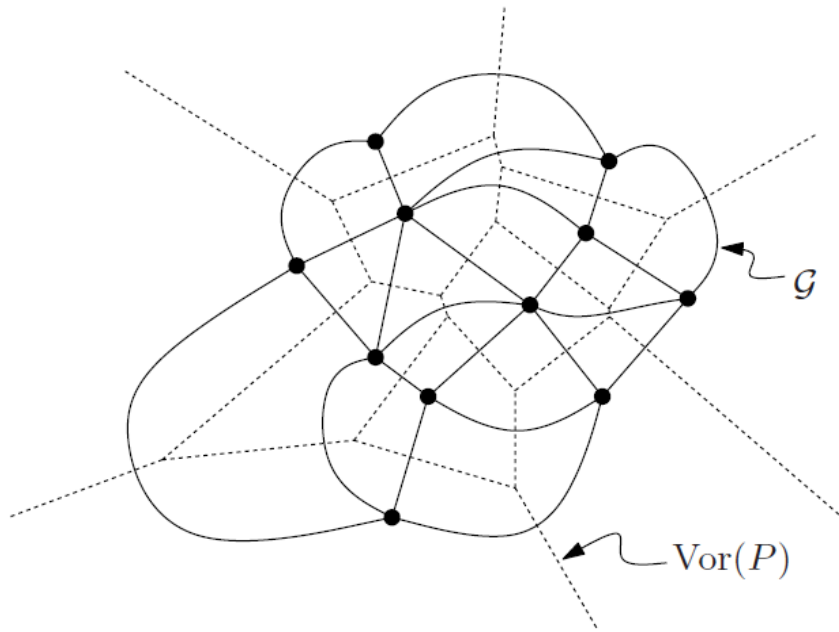
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Τριγωνισμός Delaunay

### 5.1. Εισαγωγή

Δυστυχώς όπως προαναφέρθηκε, οι χάρτες γήρανσης είναι σε γενική περίπτωση μη κυρτοί, έτσι αποδοτικοί επιλυτές κυρτών προβλημάτων δεν μπορούν να εφαρμοστούν στα πλαίσια βελτιστοποιήσεων. Παρά όλα αυτά, υπάρχει μία μέθοδος που μπορεί να υπολογίσει την κυρτότητα του χάρτη γήρανσης που υπολογίσαμε προηγουμένως και να μας δώσει τις παραμέτρους, τις οποίες μπορούμε ύστερα να εισάγουμε σε ένα βέλτιστο προγραμματισμό. Αυτή η μέθοδος είναι ο τριγωνισμός Delaunay. Ο τριγωνισμός Delaunay ορίζεται έτσι ώστε οι περιγεγραμμένες σφαίρες ή κύκλοι κάθε τριγώνου-στοιχείου να μην περιέχουν στο εσωτερικό τους σημεία των υπόλοιπων στοιχείων[17]. Αν και το όνομα ακούγεται γαλλικό, τα γραφήματα Delaunay δεν έχουν καμία σχέση με τον Γάλλο ζωγράφο. Πήραν το όνομά τους από τον ρώσο μαθηματικό Boris Nikolaevich Delone, του οποίου το όνομα γραφόταν στην κυριλική ως «Борис Николаевич Делоне», και θα μεταγραφόταν στα αγγλικά ως «Delone». Ωστόσο, επειδή οι εργασίες του δημοσιεύονταν στα γαλλικά, στην εποχή που οι γλώσσες της επιστήμης ήταν τα γαλλικά και τα γερμανικά, το όνομά του είναι περισσότερο γνωστό με τη γαλλική μεταγραφή.

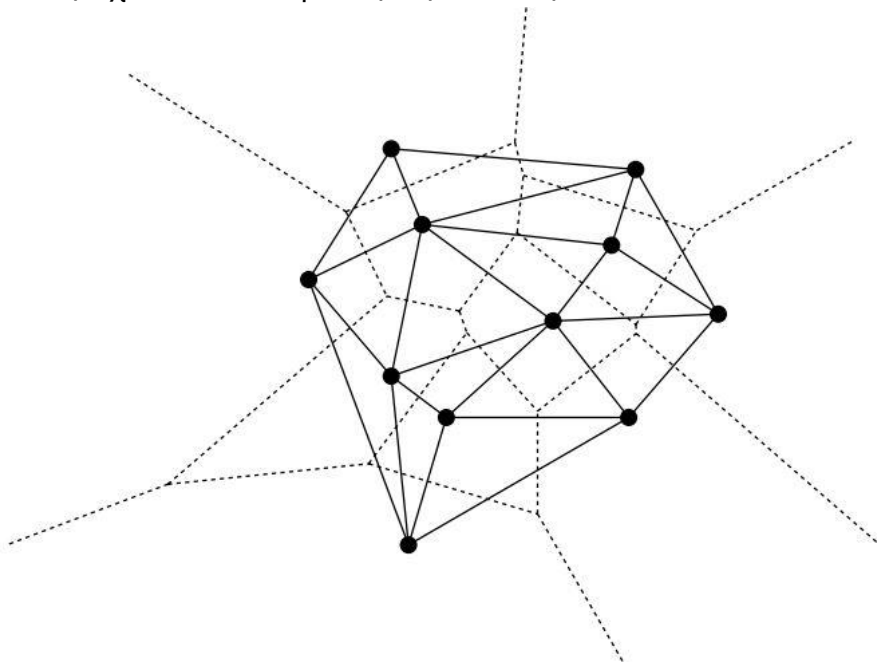
### 5.2. Προσέγγιση μέσω του διαγράμματος Voronoi

Πιο αναλυτικά, για την κατάλληλη προσέγγιση της τρισδιάστατης αναπαράστασης των χαρτών γήρανσης, μέσω της κατασκευής ενός πολυεδρικού ανάγλυφου από ένα σύνολο  $P$  δειγματικών σημείων, ένας τριγωνισμός Delaunay του  $P$  είναι κατάλληλος. Σε αυτό το σημείο χρησιμοποιείται η έννοια του διαγράμματος Voronoi του  $P$  που είναι η υποδιαίρεση του επιπέδου σε  $n$  περιοχές, μία για κάθε εστία του  $P$ , για την οποία ισχύει ότι η περιοχή μιας εστίας  $p \in P$  περιέχει όλα τα σημεία του επιπέδου που έχουν ως πλησιέστερη εστία το  $p$ . Το διάγραμμα Voronoi του  $P$  συμβολίζεται με  $\text{Vor}(P)$  και φαίνεται στο σχήμα 5.1. Η περιοχή μιας εστίας  $p$  λέγεται κυψελίδα Voronoi του  $p$ , και συμβολίζεται με  $V(p)$ . Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο γράφος του διαγράμματος Voronoi. Αυτός ο γράφος  $G$  περιέχει έναν κόμβο για κάθε κυψελίδα Voronoi και ένα τόξο μεταξύ δύο κόμβων, αν οι αντίστοιχες κυψελίδες έχουν μια κοινή ακμή. Παρατηρούμε ότι αυτό σημαίνει πως το  $G$  έχει ένα τόξο για κάθε ακμή του  $\text{Vor}(P)$ . Όπως μπορείτε να δείτε στο παρακάτω σχήμα, υπάρχει μια ένα προς ένα αντιστοιχία ανάμεσα στις φραγμένες έδρες του  $G$  και στις κορυφές του  $\text{Vor}(P)$ [18].



Σχήμα 5.1 Γράφος Voronoi ( $Vor(P)$ )

Ας θεωρήσουμε την ευθύγραμμη εναποτύπωση του  $G$ , όπου ο κόμβος που αντιστοιχεί στην κυψελίδα Voronoi  $V(p)$  είναι το σημείο  $p$ , και το τόξο που συνδέει τους κόμβους των κυψελίδων  $V(p)$  και  $V(q)$  είναι το ευθύγραμμο τμήμα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ονομάζουμε αυτή την εναποτύπωση γράφημα Delaunay του  $P$ , και τη συμβολίζουμε με  $GD(P)$  όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Η κυριότερη ιδιότητα του γραφήματος είναι ότι πρόκειται πάντα για επίπεδο γράφημα, η εναποτύπωση του οποίου δεν περιέχει κανένα ζεύγος τεμνόμενων ακμών.

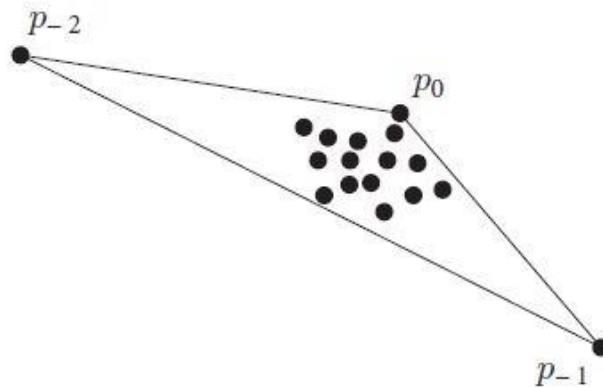


Σχήμα 5.2 Γράφος Delaunay ( $GD(P)$ )

### 5.3. Αλγοριθμική προσέγγιση

Από το  $\text{Vor}(P)$  μπορούμε να προσδιορίσουμε εύκολα το γράφο Delaunay  $\text{GD}(P)$ , και να πάρουμε έναν τριγωνισμό Delaunay τριγωνίζοντας τις έδρες που έχουν περισσότερες από τρεις κορυφές. Εκτός από την προαναφερόμενη διαδικασία, θα περιγράψουμε μια διαφορετική τακτική, θα υπολογίσουμε έναν τριγωνισμό Delaunay άμεσα, χρησιμοποιώντας την τυχαιοκρατική αυξητική τεχνική.

Θα ξεκινήσουμε με ένα μεγάλο τρίγωνο που περιέχει το σύνολο  $P$ . Θα προσθέσουμε δύο επιπλέον σημεία,  $p_{-1}$  και  $p_{-2}$ , τα οποία, μαζί με το υψηλότερο σημείο  $p_0$  του  $P$ , σχηματίζουν ένα τρίγωνο που εμπεριέχει όλα τα σημεία. Αυτό σημαίνει ότι θα υπολογίσουμε έναν τριγωνισμό Delaunay του συνόλου  $P \cup \{p_{-1}, p_{-2}\}$  αντί του  $P$ . Ο μετέπειτα στόχος μας είναι να πάρουμε τον τριγωνισμό Delaunay του  $P$  διαγράφοντας τα  $p_{-1}$  και  $p_{-2}$  μαζί με όλες τις προσπίπτουσες ακμές. Επομένως, θα πρέπει να επιλέξουμε τα  $p_{-1}$  και  $p_{-2}$  αρκετά απομακρυσμένα, έτσι ώστε να μην καταστραφεί κάποιο από τα τρίγωνα του τριγωνισμού Delaunay του  $P$ . Συγκεκριμένα, θα πρέπει να φροντίσουμε να μην βρίσκονται σε κανέναν κύκλο ο οποίος διέρχεται από τρία σημεία του  $P$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.

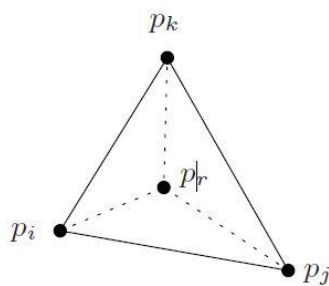


Σχήμα 5.3 Τρίγωνο που περιέχει το σύνολο  $P$  των δειγματικών σημείων

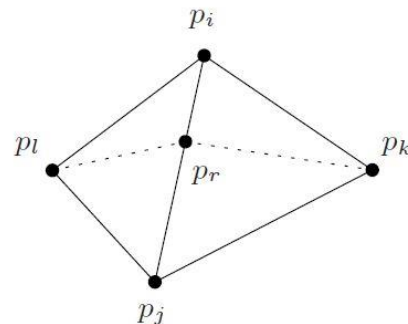
Ο αλγόριθμος είναι τυχαιοκρατικού αυξητικού τύπου, δηλαδή τα σημεία προστίθενται με τυχαία σειρά και τηρείται ένας τριγωνισμός Delaunay του τρέχοντος σημειοσυνόλου. Ας εξετάσουμε την προσθήκη ενός σημείου  $p_r$ . Καταρχάς βρίσκουμε το τρίγωνο του τρέχοντος τριγωνισμού που περιέχει το  $p_r$  και προσθέτουμε ακμές από το  $p_r$  προς τις κορυφές αυτού του τριγώνου. Αν το  $p_r$  τύχει να βρίσκεται πάνω σε κάποια ακμή  $e$  του τριγωνισμού, θα πρέπει να προσθέσουμε ακμές από το  $p_r$  προς τις απέναντι κορυφές στα τρίγωνα που έχουν κοινή πλευρά την  $e$ . Οι δύο αυτές περιπτώσεις απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα. Τώρα έχουμε και πάλι έναν τριγωνισμό, ο οποίος όμως πιθανόν να μην είναι τριγωνισμός Delaunay. Ο λόγος είναι

ότι η προσθήκη του  $p_r$  μπορεί να καταστήσει κάποιες από τις υπάρχουσες ακμές ανεπίτρεπτες. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα, καλούμε μια διαδικασία (Διαδικασία διόρθωσης ακμής) για κάθε ακμή που ενδέχεται να είναι ανεπίτρεπτη. Η διαδικασία αντικαθιστά ανεπίτρεπτες ακμές με επιτρεπτές μέσω μεταστροφής των ακμών.

το  $p_r$  κείται στο εσωτερικό τριγώνου



το  $p_r$  κείται επάνω σε ακμή



Σχήμα 5.4 Οι δύο δυνατές περιπτώσεις κατά την προσθήκη του ενός σημείου  $p_r$

Πριν εξετάσουμε τις λεπτομέρειές της, παραθέτουμε μια πλήρη περιγραφή του κυρίως αλγορίθμου. Για να διευκολύνουμε την ανάλυσή μας, θα θεωρήσουμε ότι το  $P$  είναι ένα σύνολο με  $n + 1$  σημεία[17].

### Αλγόριθμος 'Τριγωνισμός Delaunay'

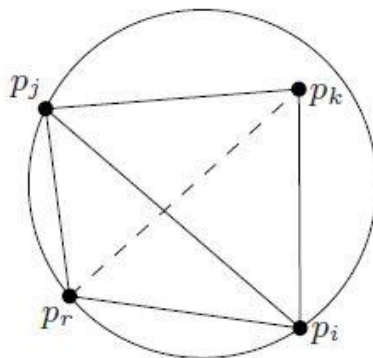
Είσοδος. Ένα σύνολο  $P$  από  $n+1$  σημεία στο επίπεδο.

Έξοδος. Ένας τριγωνισμός Delaunay του  $P$ .

1. Έστω  $p_0$  το υψηλότερο σημείο του  $P$ , δηλαδή το ακραίο δεξί από τα σημεία με τη μεγαλύτερη τεταγμένη.
2. Έστω  $p_{-1}$  και  $p_{-2}$  δύο σημεία στο  $R^2$  σε αρκετά μεγάλη απόσταση και τέτοια ώστε το  $P$  να εμπεριέχεται στο τρίγωνο  $p_0 p_{-1} p_{-2}$ .
3. Δημιουργούμε τον τριγωνισμό  $T$  που αποτελείται από το μοναδικό τρίγωνο  $p_0 p_{-1} p_{-2}$ .
4. Υπολογίζουμε μια τυχαία μετάθεση  $p_1, p_2, \dots, p_n$  του  $P \setminus \{p_0\}$ .
5. Για  $r$  από 1 έως  $n$ :
  6. (Εισάγουμε το  $p_r$  στον  $T$ )
  7. Βρίσκουμε ένα τρίγωνο  $p_i p_j p_k \in T$  που περιέχει το  $p_r$ .
  8. Εάν το  $p_r$  κείται στο εσωτερικό του τριγώνου  $p_i p_j p_k$ :
  9. Τότε προσθέτουμε ακμές από το  $p_r$  προς τις τρεις κορυφές του  $p_i p_j p_k$ , διασπώντας έτσι το  $p_i p_j p_k$  σε τρία τρίγωνα.
  10. Διαδικασία διόρθωσης ακμής( $p_r, p_i p_j, T$ )

11. Διαδικασία διόρθωσης ακμής  $(p_r, p_j p_k, T)$
12. Διαδικασία διόρθωσης ακμής  $(p_r, p_k p_i, T)$
13. Άλλως (το  $p_r$  κείται επάνω σε ακμή του  $p_i p_j p_k$ , έστω στην ακμή  $p_i p_j$ )
14. Προσθέτουμε ακμές από το  $p_r$  προς το  $p_k$  και προς την τρίτη κορυφή  $p_i$  του άλλου τριγώνου που προσπίπτει στην  $p_i p_j$ , διασπώντας έτσι τα δύο τρίγωνα που προσπίπτουν στην  $p_i p_j$  σε τέσσερα τρίγωνα.
15. Διαδικασία διόρθωσης ακμής  $(p_r, p_i p_i, T)$
16. Διαδικασία διόρθωσης ακμής  $(p_r, p_i p_j, T)$
17. Διαδικασία διόρθωσης ακμής  $(p_r, p_j p_k, T)$
18. Διαδικασία διόρθωσης ακμής  $(p_r, p_k p_i, T)$
19. Διαγράφουμε από τον  $T$  τα σημεία  $p_{-1}$  και  $p_{-2}$ , και όλες τις προσπίπτουσες σε αυτά ακμές.
20. Επιστροφή  $T$

Ας δούμε τώρα λεπτομερώς πώς μετατρέπεται ο τριγωνισμός που παίρνουμε μετά τη γραμμή 9 (ή τη γραμμή 14) σε τριγωνισμό Delaunay. Γνωρίζουμε ότι ένας τριγωνισμός είναι Delaunay αν οι ακμές του είναι όλες επιτρεπτές. Στο πνεύμα λοιπόν του αλγορίθμου, μεταστρέφουμε ανεπίτρεπτες ακμές μέχρις ότου ο τριγωνισμός να γίνει ξανά επιτρεπτός. Το ερώτημα που παραμένει είναι ποιες ακμές ενδέχεται να καταστούν ανεπίτρεπτες λόγω της εισαγωγής του  $p_r$ . Παρατηρούμε ότι μια ακμή  $p_i p_j$  που ήταν επιτρεπτή πριν μπορεί να καταστεί ανεπίτρεπτη μόνο αν έχει αλλάξει κάποιο από τα τρίγωνα που προσπίπτουν σε αυτήν. Επομένως, αρκεί να ελεγχθούν οι ακμές των νέων τριγώνων. Αυτό γίνεται μέσω του υποπρογράμματος 'Διαδικασία διόρθωσης ακμής', το οποίο ελέγχει και ενδεχομένως μεταστρέφει μια ακμή. Αν η 'Διαδικασία διόρθωσης ακμής' μεταστρέψει μία ακμή, πιθανόν να καταστούν ανεπίτρεπτες κάποιες άλλες ακμές. Για τον λόγο αυτό, η 'Διαδικασία διόρθωσης ακμής' καλεί τον εαυτό της αναδρομικά με όρισμα τέτοιες ενδεχομένως ανεπίτρεπτες ακμές.

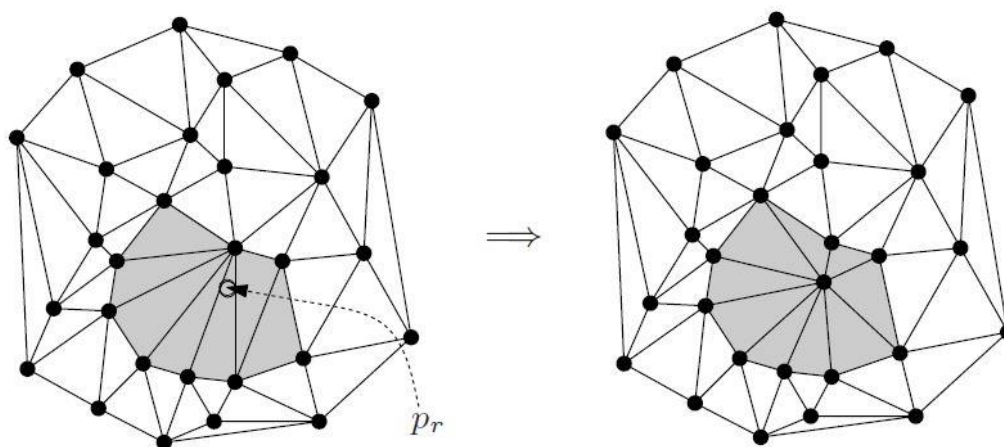


Σχήμα 5.5 Γράφημα του αλγορίθμου 'Διαδικασία διόρθωσης ακμής'

### Αλγόριθμος 'Διαδικασία διόρθωσης ακμής'

1. (Το εισαγόμενο σημείο είναι το  $p_r$ , και η  $p_i p_j$  είναι η ακμή του  $T$  που πιθανόν να πρέπει να μεταστραφεί.)
2. Εάν η  $p_i p_j$  είναι ανεπίτρεπτη
3. Τότε Έστω  $p_i p_j p_k$  το τρίγωνο που είναι παρακείμενο του  $p_i p_j$  με κοινή πλευρά την  $p_i p_j$ .
4. (Μεταστροφή της  $p_i p_j$ ) Αντικαθιστούμε την  $p_i p_j$  με την  $p_i p_k$ .
5. Διαδικασία διόρθωσης ακμής ( $p_r, p_i p_k, T$ )
6. Διαδικασία διόρθωσης ακμής ( $p_r, p_k p_j, T$ )

Για να βεβαιωθούμε για την ορθότητα του αλγορίθμου, θα πρέπει να αποδείξουμε ότι, μετά την εκτέλεση όλων των κλήσεων της 'Διαδικασία διόρθωσης ακμής', δεν απομένει καμία ανεπίτρεπτη ακμή. Από τον κώδικα της 'Διαδικασία διόρθωσης ακμής', είναι εμφανές ότι κάθε νέα ακμή που δημιουργείται λόγω της εισαγωγής του  $p_r$  προσπίπτει στο  $p_r$ . Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 5.6. τα τρίγωνα που καταστρέφονται και τα νέα τρίγωνα αναπαρίστανται με γκριζό χρώμα. Η κρίσιμη παρατήρηση είναι ότι όλες οι νέες ακμές πρέπει να είναι επιτρεπτές, και άρα δεν χρειάζεται να τις ελέγξουμε. Αυτό, σε συνδυασμό με την προηγούμενη παρατήρηση ότι μια ακμή μπορεί να καταστεί ανεπίτρεπτη μόνο αν αλλάξει κάποιο από τα τρίγωνα που προσπίπτουν σε αυτήν, αποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος ελέγχει κάθε ακμή που ενδέχεται να καταστεί ανεπίτρεπτη. Συνεπώς, είναι ορθός.



Σχήμα 5.6 Οι ακμές που δημιουργούνται και προσπίπτουν στο  $p_r$

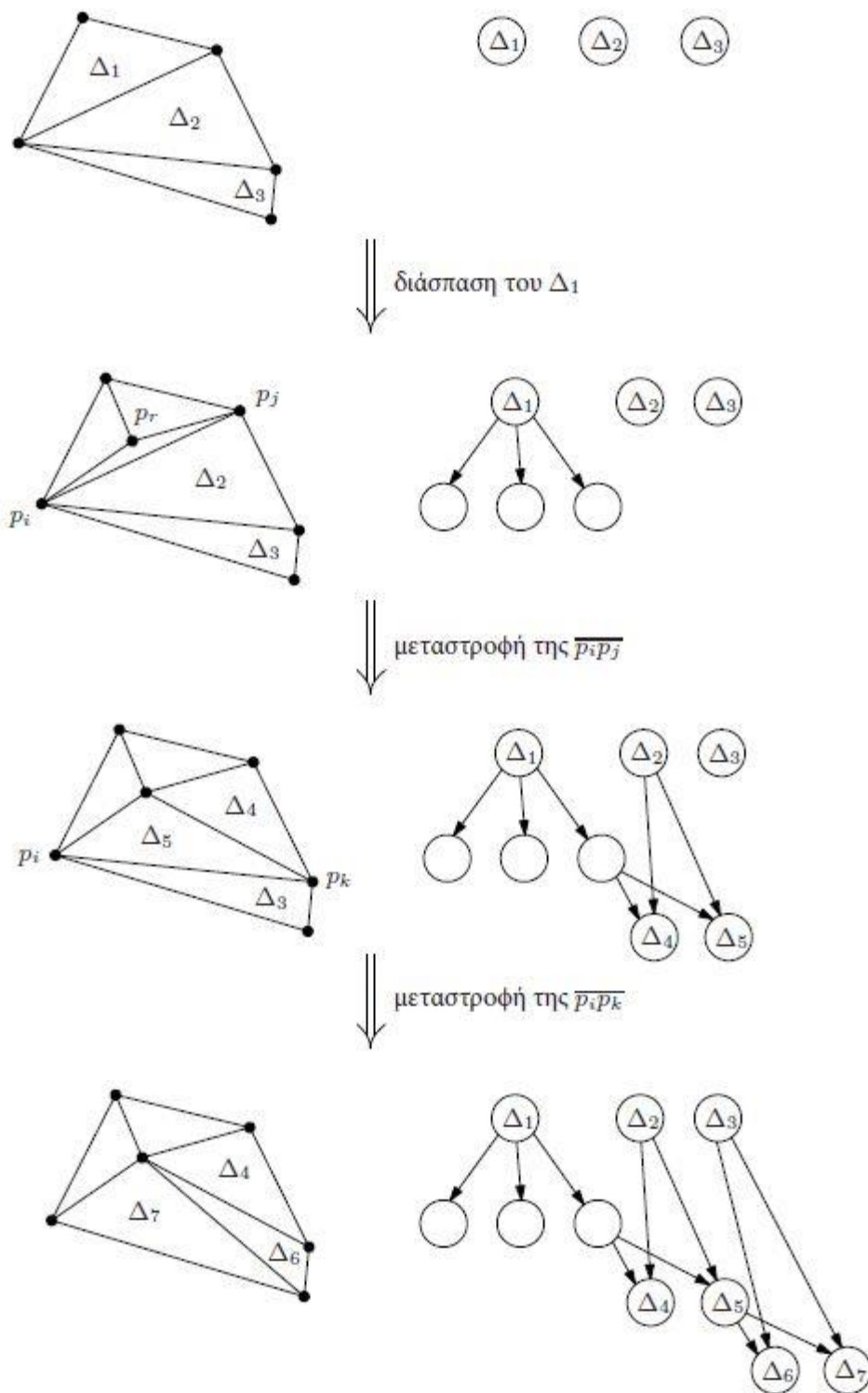
Αποδείξαμε την ορθότητα του αλγορίθμου. Απομένει να περιγράψουμε πώς μπορεί να υλοποιηθεί ένα σημαντικό βήμα, η εύρεση του τριγώνου που περιέχει το σημείο  $p_r$  στην γραμμή 7 του αλγορίθμου 'Τριγωνισμός Delaunay'.



Για να βρούμε το τρίγωνο που περιέχει το  $r_i$  ακολουθούμε μια τακτική στην οποία κατά την κατασκευή του τριγωνισμού Delaunay, κατασκευάζουμε επίσης μια δομή εντοπισμού σημείου  $D$ , που αποτελεί έναν κατευθυνόμενο άκυκλο γράφο. Τα φύλλα του  $D$  αντιστοιχούν στα τρίγωνα του τρέχοντος τριγωνισμού  $T$ , και τηρούμε αμφίδρομους δείκτες μεταξύ αυτών των φύλλων και του τριγωνισμού. Οι εσωτερικοί κόμβοι του  $D$  αντιστοιχούν σε τρίγωνα που περιλαμβάνονταν στον τριγωνισμό σε κάποιο προηγούμενο στάδιο, αλλά έχουν ήδη καταστραφεί. Η δομή εντοπισμού σημείου κατασκευάζεται ως εξής. Στη γραμμή 3 δημιουργούμε τον  $D$  ως κατευθυνόμενο άκυκλο γράφο με ένα μόνο φύλλο, που αντιστοιχεί στο τρίγωνο  $r_0r_{1p-2}$ .

Ας υποθέσουμε τώρα ότι κάποια στιγμή διασπούμε ένα τρίγωνο  $r_i r_j r_k$  του τρέχοντος τριγωνισμού σε τρία (ή δύο) νέα τρίγωνα. Η αντίστοιχη μεταβολή στον  $D$  είναι η προσθήκη σε αυτόν τριών (ή δύο) νέων φύλλων, και η μετατροπή του φύλλου για το  $r_i r_j r_k$  σε εσωτερικό κόμβο με εξερχόμενους δείκτες προς αυτά τα τρία (ή δύο) φύλλα. Αντίστοιχα, όταν αντικαθιστούμε δύο τρίγωνα  $r_k r_i r_j$  και  $r_i r_j r_i$  με τα τρίγωνα  $r_k r_i r_i$  και  $r_k r_i r_j$  μέσω μιας μεταστροφής ακμής, δημιουργούμε φύλλα για τα δύο νέα τρίγωνα, και προσθέτουμε στους κόμβους των  $r_k r_i r_j$  και  $r_i r_j r_i$  δείκτες προς τα δύο νέα φύλλα. Στο παρακάτω σχήμα 5.7 βλέπουμε ένα παράδειγμα των τροποποιήσεων που προκαλεί στον  $D$  η προσθήκη ενός σημείου. Παρατηρούμε ότι όταν μετατρέπουμε ένα φύλλο σε εσωτερικό κόμβο, αυτό αποκτά το πολύ τρεις εξερχόμενους δείκτες.

Μέσω του  $D$  μπορούμε να εντοπίσουμε στον τρέχοντα τριγωνισμό το επόμενο σημείο προς εισαγωγή  $r_i$ , ως εξής. Ξεκινάμε από τη ρίζα του γράφου  $D$ , που αντιστοιχεί στο αρχικό τρίγωνο  $r_0r_{1p-2}$ . Ελέγχουμε τους τρεις θυγατρικούς κόμβους της ρίζας για να δούμε ποιο τρίγωνο περιέχει το  $r_i$ , και μεταβαίνουμε στον αντίστοιχο θυγατρικό. Κατόπιν ελέγχουμε τους θυγατρικούς αυτού του κόμβου, μεταβαίνουμε στον θυγατρικό που αντιστοιχεί στο τρίγωνο που περιέχει το  $r_i$ , κ.ο.κ., μέχρι να φθάσουμε σε φύλλο του  $D$ . Το φύλλο αυτό αντιστοιχεί σε τρίγωνο του τρέχοντος τριγωνισμού που περιέχει το  $r_i$ . Δεδομένου ότι ο βαθμός εξόδου οποιουδήποτε κόμβου είναι το πολύ τρία, η αναζήτηση απαιτεί χρόνο γραμμικό ως προς το πλήθος των κόμβων που βρίσκονται στη διαδρομή αναζήτησης, ή, με άλλα λόγια, ως προς το πλήθος των αποθηκευμένων στην  $D$  τριγώνων που περιέχουν το  $r_i$ .



Σχήμα 5.7 Υπολογισμός του τριγωνισμού Delaunay

#### 5.4. Συνάρτηση Delaunay του λογισμικού MATLAB

Προηγουμένως αναλύσαμε τον αλγόριθμο του τριγωνισμού Dealunay. Στην παρούσα εργασία η χρήση του αλγορίθμου αυτού γίνεται μέσω των συναρτήσεων delaunay() και trimesh() του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB. Η συνάρτηση delaunay() δημιουργεί έναν τριγωνισμό Delaunay των σημείων που εισάγουμε σαν είσοδο, τα οποία στην συγκεκριμένη εργασία είναι το εύρος τιμών της κατάστασης φόρτισης (SoC) μιας μπαταρίας, το εύρος τιμών του ρεύματος που διαρρέει μια μπαταρία ( $I_{bat}$ ) και η έκφραση της γήρανσης των μπαταριών ( $J_{deg}$ ) σε σχέση με το SoC και το  $I_{bat}$ . Το αποτέλεσμα είναι ένας πίνακας διαστάσεων  $A \times 3$  που παρουσιάζει το πλήθος των τριγώνων που αποτελούν τον τριγωνισμό. Το  $A$  είναι ο αριθμός όλων των κορυφών κάθε τριγώνου, και τα 3 στοιχεία κάθε κορυφής  $A$  παρουσιάζουν τις συντεταγμένες των κορυφών κάθε τριγώνου στον τρισδιάστατο χώρο. Η συνάρτηση trimesh() αποτυπώνει σε ένα διάγραμμα την τρισδιάστατη μορφή του παραπάνω τριγωνισμού.

Έχοντας υλοποιήσει των τριγωνισμό Delaunay στο χάρτη γήρανσης που είχαμε διαμορφώσει, μπορούμε και υπολογίζουμε τις γεωμετρικές παραμέτρους των τριγώνων  $\alpha_1, \alpha_2$  και  $\alpha_3$ . Η διαδικασία υπολογισμού τους περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Με αυτή λοιπόν τη διαδικασία καταλήγουμε σε μια έκφραση για τη γήρανση της μπαταρίας από ένα εμπειρικό μη κυρτό μοντέλο, η οποία μπορεί να ενταχθεί ως παράγοντας σε ένα βέλτιστο κυρτό προγραμματισμό διαστασιολόγησης ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ένα δίκτυο διανομής.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:**  
**Κανονικοποίηση**  
**εμπειρικών**  
**μοντέλων**



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Κανονικοποίηση εμπειρικών μοντέλων

## 6.1. Εμπειρικό μοντέλο

Όπως έχει προαναφερθεί, στην παρούσα διαδικασία έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε την ανάλυση των χαρτών γήρανσης για να μοντελοποιήσουμε την απώλεια της χωρητικότητας των μπαταριών, ως συνάρτηση των διακριτών ενεργειών ελέγχου της μπαταρίας και της κατάστασης φόρτισης. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να κλιμακωθούν, ώστε να αντιπροσωπεύουν κατά περίπτωση οποιοδήποτε σύστημα μπαταριών σε μέγεθος και ισχύ. Οι κανονικοποιημένες συναρτήσεις τους, επιτρέπουν βέλτιστες μεμονωμένες ενέργειες ελέγχου των μεταβλητών τους και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με ικανοποιητικά αποτελέσματα σε προσομοιώσεις συστημάτων ηλεκτρικού ρεύματος, μέσω της ενσωμάτωσης της υπολογιζόμενης γήρανσης και της προβλεπόμενης υποβάθμισης των μπαταριών.

Η ζωή της μπαταρίας, δυνητικά, μπορεί να εξαρτηθεί από ποικίλους παράγοντες, όμως στο [13] γίνεται εστίαση σε δύο σημαντικούς παράγοντες που ήδη χρησιμοποιούνται σε συστήματα διαχείρισης μπαταριών, την τάση και το ρεύμα. Ο λόγος που επιλέγεται ο παράγοντας της τάσης είναι διότι με τις μετρήσεις της τάσης καθίσταται εύκολο να εντάξουμε την εκάστοτε κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας σε ένα βέλτιστο κυρτό προγραμματισμό. Καταλήγοντας, για να υπολογίσουμε τις ενδείξεις των χαρτών γήρανσης των μπαταριών ιόντων λιθίου ( $\text{LiFePO}_4$ ), χρησιμοποιούμε την υπάρχουσα εμπειρική συνάρτηση γήρανσης από το άρθρο [13]. Οι συντάκτες της προαναφερόμενης μελέτης, ανέπτυξαν εμπειρικά μια συνάρτηση για τον προσδιορισμό της γήρανσης της μπαταρίας που συνδέει την υποβάθμιση με το ρεύμα της μπαταρίας, αλλά και την τάση ανοιχτοκύκλωσης.

Οι συγγραφείς του [13] χρησιμοποιούν μη γραμμικούς συντελεστές για το ρεύμα της μπαταρίας και την τάση ανοιχτοκύκλωσης στην ακόλουθη αναλυτική έκφραση (6.1):

$$I_s = h(I_{bat}, V_{oc}) = \beta_1 + \beta_2 |I_{bat}| + \beta_3 V_{oc} + \beta_4 |I_{bat}|^2 + \beta_5 V_{oc}^2 + \beta_6 |I_{bat}| \cdot V_{oc} + \beta_7 V_{oc}^3 \quad (6.1)$$

όπου το  $I_s$  είναι η χωρητικότητα που χάνεται ανά δευτερόλεπτο σε Ah/sec,  $I_{bat}$  είναι το ρεύμα της μπαταρίας,  $V_{oc}$  η τάση ανοιχτοκύκλωσης της μπαταρίας και  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7$  οι συντελεστές προσαρμογής του μοντέλου. Οι  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7$  έχουν υπολογισθεί στο άρθρο [13] με τη χρήση πειραματικών δεδομένων και επίλυση της εξίσωσης (6.1) με τη χρήση

της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
$\beta_1$	$1.2126 \times 10^{-7}$	Ah/sec
$\beta_2$	$-3.1430 \times 10^{-8}$	h/sec
$\beta_3$	$-1.3861 \times 10^{-7}$	Ah/(sec x V)
$\beta_4$	$2.5287 \times 10^{-10}$	Ah/(sec x A)
$\beta_5$	$5.2377 \times 10^{-8}$	Ah/(sec x V <sup>2</sup> )
$\beta_6$	$8.2662 \times 10^{-9}$	h/(sec x V)
$\beta_7$	$-6.5166 \times 10^{-9}$	Ah/(sec x V <sup>3</sup> )

Πίνακας 6.1 Παράμετροι του μοντέλου (6.1) για την γήρανση της μπαταρίας

Χρησιμοποιώντας την παρακάτω έκφραση από το άρθρο [14], η τάση ανοιχτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ ) στην συνάρτηση (6.1) μπορεί να αντικατασταθεί από την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC).

$$V_{oc}(SoC) = K_0 + K_1 \frac{1}{1 + e^{a_1(z-b_1)}} + K_2 \frac{1}{1 + e^{a_2(z-b_2)}} + K_3 \frac{1}{1 + e^{a_3(z-1)}} + K_4 \frac{1}{1 + e^{a_4 z}} + K_5 z \quad (6.2)$$

όπου  $z$  είναι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC),  $K_0, K_1, \dots, K_5$  είναι οι γραμμικοί συντελεστές και  $a_1, a_2, a_3, a_4$  καθώς και  $b_1, b_2$  είναι οι μη γραμμικοί συντελεστές. Οι παραπάνω συντελεστές υπολογίστηκαν με χρήση του λογισμικού MATLAB και συγκεκριμένα του curve fitting toolbox. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.



Παράμετροι	Τιμές
K <sub>0</sub>	3.4002
K <sub>1</sub>	0.008
K <sub>2</sub>	0.0785
K <sub>3</sub>	-0.215
K <sub>4</sub>	-1.303
K <sub>5</sub>	0.0891
α <sub>1</sub>	-14
α <sub>2</sub>	-18
α <sub>3</sub>	28
α <sub>4</sub>	40
b <sub>1</sub>	0
b <sub>2</sub>	0

Πίνακας 6.2 Παράμετροι του μοντέλου (6.2) για την τάση ανοιχτοκύκλωσης

Σε αυτό το σημείο αντικαθιστώντας την έκφραση (6.2) στην συνάρτηση (6.1) έχουμε ένα εμπειρικό μοντέλο για την πρόβλεψη της γήρανσης μιας μπαταρίας LiFePO<sub>4</sub> σε Ah/sec συναρτήσεως του SoC και του I<sub>bat</sub>. Η εύρεση των τιμών των παραμέτρων στο μοντέλο αυτό, έχει υλοποιηθεί με δεδομένα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία [13] από δοκιμές σε μια μπαταρία LiFePO<sub>4</sub> χωρητικότητας C<sub>Q</sub> = 1,1 Ah.

## 6.2. Κανονικοποίηση εμπειρικού μοντέλου

Για να μετατρέψουμε το μοντέλο μας, προσδίδοντάς του μια γενικής εφαρμογής κανονικοποιημένη μορφή, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί και σε διαφορετικά μεγέθη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, υλοποιούμε ένα γραμμικό μετασχηματισμό. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το μετασχηματισμό παρουσιάζονται παρακάτω:

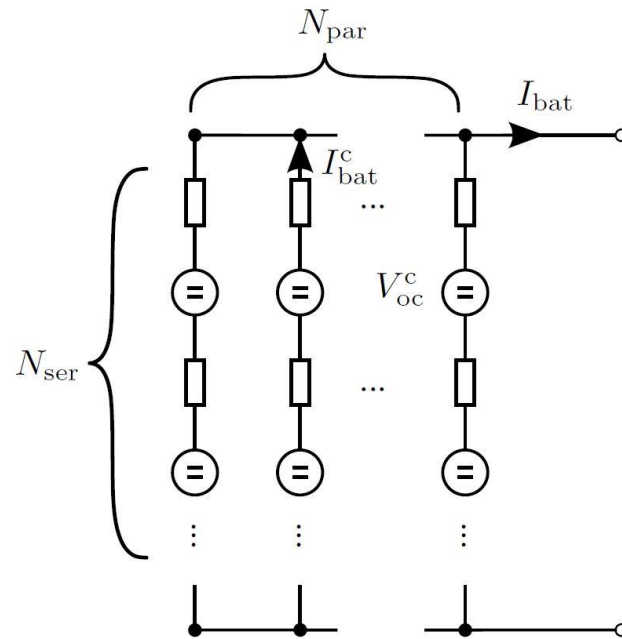
1. Πολλαπλασιάζοντας το μοντέλο μας για το I<sub>s</sub>(SoC, I<sub>bat</sub>) με τη μέση τάση ανοιχτοκύκλωσης V<sub>oc</sub> της μπαταρίας, μπορούμε να εκφράσουμε την γήρανση της μπαταρίας με όρους ενέργειας προς χρόνο, σε Wh/sec.

$$J_s = I_s \cdot V_{oc} \quad (6.3)$$

2. Ένα σύστημα αποτελείται από N<sub>par</sub> παράλληλες συστοιχίες μπαταριών, και κάθε συστοιχία έχει N<sub>ser</sub> σε σειρά μπαταρίες (Σχήμα 6.1). Μπορούμε να

μετατρέψουμε την σχέση (6.3) ώστε να εκφράσουμε την γήρανση για οποιοδήποτε μέγεθος συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, ως εξής:

$$J_s = N_{par} \cdot I_s \cdot N_{ser} \cdot V_{oc} \quad (6.4)$$



Σχήμα 6.1 Σύστημα μπαταριών αποτελούμενο από  $N_{par}$  συστοιχίες μπαταριών και  $N_{ser}$  μπαταρίες

3. Η ενεργή χωρητικότητα ενός συστήματος μπαταριών ορίζεται ως:

$$C_E = N_{par} \cdot C_Q \cdot N_{ser} \cdot V_{oc} \quad (6.5)$$

4. Η συνολική ισχύς της μπαταρίας ορίζεται ως:

$$P_{bat} = I_{bat} \cdot N_{ser} \cdot V_{oc} \quad (6.6)$$

5. Το απόλυτο State of Energy ορίζεται ως:

$$SoE = SoC \cdot N_{ser} \cdot V_{oc} \quad (6.7)$$

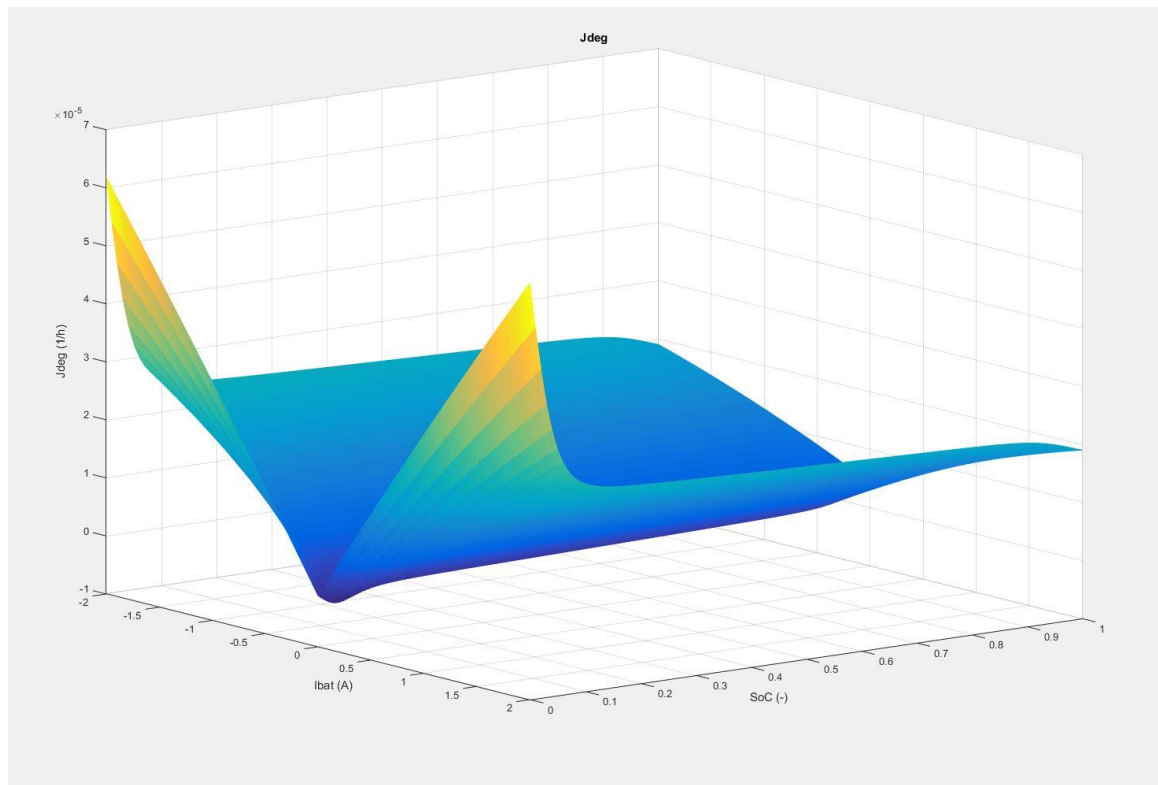
6. Το κανονικοποιημένο State of Energy ορίζεται ως:

$$E_n = \frac{SoE}{C_E} \quad (6.8)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (6.4), (6.5), (6.6), (6.7) και (6.8) στην σχέση (6.3) και πολλαπλασιάζοντας με το 3600 που είναι ο αριθμός των δευτερολέπτων στο διάστημα μιας ώρας καταλήγουμε σε μια κανονικοποιημένη συνάρτηση που μπορεί να εκφράσει την γήρανση οποιουδήποτε συστήματος ως προς το μέγεθος και την ισχύ σε  $h^{-1}$ .

$$J_{deg} = 3600 \frac{h(P_{bat}, SoE)}{C_e} = 3600 \frac{h(I_{bat}, SoC)}{C_q} \quad (6.9)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι το μοντέλο υπολογισμού του χάρτη γήρανσης μιας μπαταρίας μπορεί με κατάλληλους γραμμικούς μετασχηματισμούς να προσαρμοσθεί, έτσι ώστε να έχει εφαρμογή για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας οποιουδήποτε μεγέθους, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι πρέπει να αλλάξει η μορφή του. Η μορφή της συνάρτησης (6.9) παρουσιάζεται στο διάγραμμα 6.1.



Διάγραμμα 6.1 Γραφική αναπαράσταση της γενικής συνάρτησης γήρανσης

Έχοντας πλέον την συνάρτηση γήρανσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, που είναι μη κυρτή εξίσωση των  $I_{bat}$  και  $SoC$ , μπορούμε υπολογίζοντας την τρισδιάστατη αναπαράστασή του συστήματος, να δημιουργήσουμε μία συνάρτηση με γραμμική εξάρτηση από το  $I_{bat}$  και το  $V_{oc}$ , προκειμένου να μπορέσουμε να την εντάξουμε σε μία κυρτή βελτιστοποίηση. Αυτό είναι εφικτό με χρήση του τριγωνισμού Delaunay που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο 5. Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `delaunay()` που διαθέτει το λογισμικό MATLAB μπορούμε και υπολογίζουμε το σύνολο των τριγώνων από το οποίο αποτελείται η τρισδιάστατη αναπαράσταση της συνάρτησης (6.9).

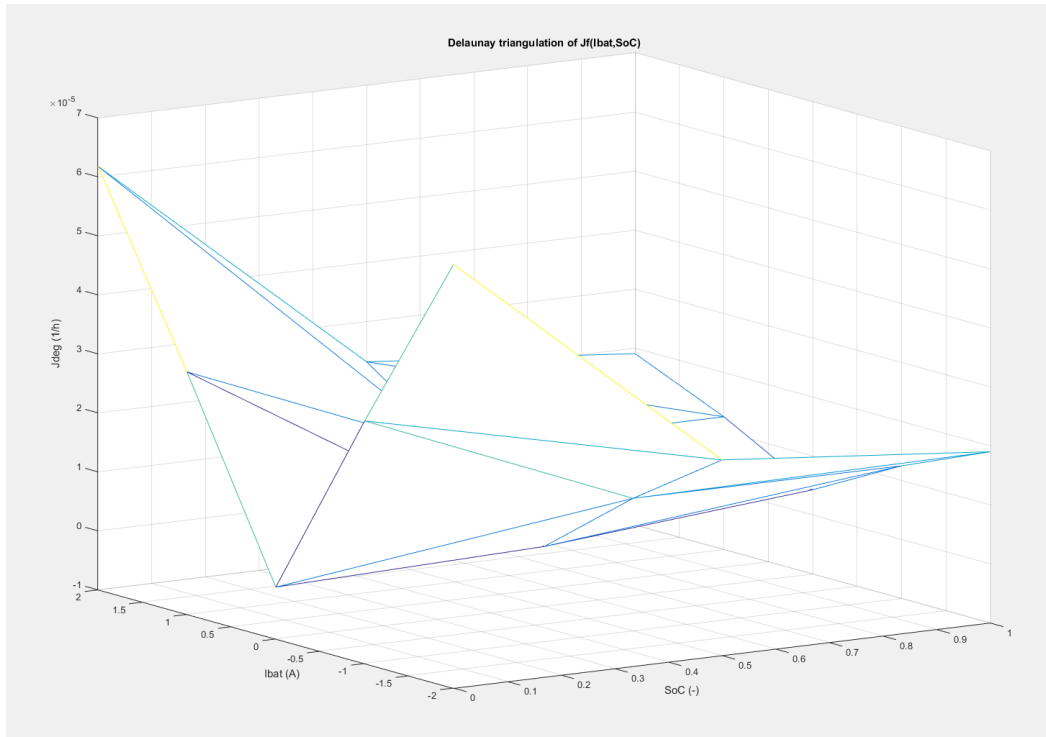
Έχοντας πλέον τον τριγωνισμό της (6.9) απαιτούμε η συνάρτηση γήρανσης να είναι της μορφής:

$$J_{deg} = \alpha_1 I_{bat} + \alpha_2 SoC + \alpha_3 \quad (6.10)$$

Κάθε τρίγωνο που ορίστηκε από τον τριγωνισμό Delaunay αποτελείται από τρεις κορυφές-σημεία στον τρισδιάστατο χώρο. Το διάνυσμα αυτών των σημείων ορίζεται από τρεις τιμές ( $J_{deg}$ ,  $I_{bat}$ ,  $SoC$ ). Αντικαθιστώντας στην (6.10) τις τιμές των σημείων αυτών και επιλύοντας ένα γραμμικό σύστημα  $3 \times 3$  για κάθε τρίγωνο που ορίστηκε από την τριγωνισμό Delaunay ως προς τις παραμέτρους  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  καταλήγουμε με μια ομάδα παραμέτρων ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ) για κάθε διαφορετικό τρίγωνο που είχαμε από τον τριγωνισμό Delaunay. Σε αυτό το σημείο υλοποιώντας τον γραμμικό μετασχηματισμό που παρουσιάστηκε προηγουμένως, με τη χρήση της εξίσωσης (6.9) καταλήγουμε στην παρακάτω γραμμική έκφραση για τη γήρανση των μπαταριών:

$$J_{deg} = \alpha_1 P_{bat} + \alpha_2 SoE + \alpha_3 C_E \quad (6.11)$$

Η σχέση (6.11) ορίζει την γήρανση του συστήματος αποθήκευσης σε Wh/h και με γνωστούς πλέον του συντελεστές  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  μπορεί να ενταχθεί σε μια κυρτή βελτιστοποίηση. Οι προαναφερόμενες διαδικασίες υλοποιήθηκαν για ένα εύρος τιμών  $SoC = [0, 0.5, 1]$  και  $I_{bat} = [-2, -1, 0, 1, 2]$ . Η τριγωνισμός Delaunay της (6.9) αναπαρίσταται στο διάγραμμα 6.2 μέσω της συνάρτησης `trimesh()` του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB και ο πίνακας 6.3 περιέχει τις τιμές για κάθε τριάδα των παραμέτρων  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  που υπολογίσθηκαν. Για τον υπολογισμό των  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  χρησιμοποιήσαμε τρεις καταστάσεις φόρτισης ( $SoC$ ) της μπαταρίας και πέντε τιμές για το ρεύμα της μπαταρίας ( $I_{bat}$ ) οπότε έχουμε ως αποτελέσματα δεκαέξι τριάδες τιμών ( $3 \times 5 + 1$ ) για τις παραμέτρους της εξίσωσης (6.11).



Διάγραμμα 6.2 Τριγωνισμός Delaunay της εμπειρικής συνάρτησης γήρασης της μπαταρίας

$\alpha_1$ (-)	$\alpha_2$ (1/h)	$\alpha_3$ (1/h)
3.23227E-05	3.72365E-05	1.21344E-06
3.06675E-05	7.72415E-05	-4.41709E-07
1.23201E-05	-2.76864E-06	1.21344E-06
-3.23227E-05	-2.76864E-06	1.21344E-06
-1.23201E-05	3.72365E-05	-1.87891E-05
1.0665E-05	8.23095E-06	-5.9415E-06
-3.06675E-05	3.72365E-05	-4.41709E-07
6.55111E-06	3.21799E-09	-5.9415E-06
-1.0665E-05	7.72415E-05	-4.04468E-05
-1.0665E-05	3.21799E-09	-1.82764E-06
-1.23201E-05	-8.22451E-06	3.94138E-06
-6.55111E-06	8.23095E-06	-1.41692E-05
1.0665E-05	3.72365E-05	-2.04443E-05
-8.20626E-06	3.21799E-09	-4.28636E-06
1.23201E-05	3.21799E-09	-1.72489E-07
8.20626E-06	-8.22451E-06	3.94138E-06

Πίνακας 6.3 Παράμετροι της κανονικοποιημένης έκφρασης για την γήραση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:**  
**Το κυρτό θετικά**  
**ημιορισμένο**  
**πρόβλημα της**  
**βέλτιστης ροής**  
**φορτίου**





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Το κυρτό θετικά ημιορισμένο πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου

## 7.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζουμε το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου για ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου μπορεί να λυθεί με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού, με την βοήθεια της dc ροής φορτίου. Στα δίκτυα διανομής 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, οπότε η dc ροή φορτίου αποτελεί μια κακή προσέγγιση του προβλήματος. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί βασίστηκε στο άρθρο [19] και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή 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 παρουσιάζεται το θετικά ημιορισμένο πρόβλημα.

Έστω  $N$  ο αριθμός των ζυγών του προβλήματος,  $M$  ο αριθμός των ζυγών φορτίου και  $NM$  ο αριθμός των ζυγών παραγωγής. Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι οι  $P_i, Q_i, P_{Gi}, Q_{Gi}, W$ , 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 ορίζεται παρακάτω.

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 συζυγές 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[27].

$$W = \begin{bmatrix} |V_1|^2 & V_1 V_2^* & V_1 V_3^* & \dots & V_1 V_N^* \\ V_2 V_1^* & |V_2|^2 & V_2 V_3^* & \dots & V_2 V_N^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_N V_1^* & V_N V_2^* & V_N V_3^* & \dots & |V_N|^2 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

## 7.2. Περιορισμοί και αντικειμενική συνάρτηση

Οι περιορισμοί του προβλήματος χωρίζονται σε περιορισμούς ισότητας και ανισότητας και είναι οι εξής:

### 7.2.1. Ισοτικοί περιορισμοί

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^N W_{ji} \cdot Y_{ij} \quad (7.2)$$

$$P_i + jQ_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (7.3)$$

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

$$P_{ij} = \text{Re}(W_{ii} - W_{ij} \cdot y_{ij}^*) \quad (7.4)$$

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

$$W_{11} = 1 \text{ p.u.}, \text{ όπου } 1 \text{ είναι ο ζυγός ταλάντωσης} \quad (7.5)$$

### 7.2.2. Ανισοτικοί περιορισμοί

$$|V_{min}|^2 \leq |W_{ii}| \leq |V_{max}|^2 \quad (7.6)$$

$$P_{ij} \leq P_{ijmax} \quad (7.7)$$

$$W \geq 0 \quad (7.8)$$

όπου η (7.6) αποτελεί τα όρια των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος διανομής, η (7.7) τα όρια μεταφοράς ισχύος των γραμμών του δικτύου διανομής, ενώ η σχέση (7.8) δηλώνει πως ο  $W$  είναι θετικά ημιορισμένος πίνακας.

### 7.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ορίζεται ως η ελαχιστοποίηση της παρακάτω συνάρτησης:

$$\sum_{i=1}^N P_i \tag{7.9}$$

η οποία εκφράζει τις συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:**  
**Περιγραφή**  
**αλγορίθμου**  
**βέλτιστης**  
**διαστασιολόγη-**  
**σης**



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Περιγραφή αλγορίθμου βέλτιστης διαστασιολόγησης

## 8.1. Περιγραφή των σχέσεων διαστασιολόγησης του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η διαστασιολόγηση των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται λύνοντας ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου, ακολουθώντας την μεθοδολογία που περιεγράφηκε προηγουμένως και τις σχέσεις που ορίστηκαν στην αντίστοιχη ενότητα. Στην παρούσα ενότητα σε πρώτο επίπεδο θα καθοριστεί πλήρως η περιγραφή του προβλήματος της βέλτιστης διαστασιολόγησης των μπαταριών στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (ΧΤ) που βασίστηκε στο άρθρο [28] σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση του φαινομένου της γήρανσης των μπαταριών. Έπειτα, θα παρουσιαστεί ο τελικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε και θα αναλυθούν πλήρως τα επιμέρους στάδια και διαδικασίες του[20].

Αρχικά για την μοντελοποίηση του προβλήματος, θεωρούμε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής ΧΤ, το οποίο συναντάται και στην πραγματικότητα. Το δίκτυο αναπαριστάται ως ένα δέντρο (N,E), όπου N το σύνολο των ζυγών (κόμβων) και E το σύνολο των γραμμών (κλάδων). Η αγωγιμότητα ως προς γη, του ζυγού i συμβολίζεται ως  $y_{ii}$ , η αγωγιμότητα γραμμής μεταξύ των ζυγών i και j συμβολίζεται ως  $y_{ij}$  και φυσικά ισχύει  $y_{ij}=y_{ji}$ . Οπότε τελικά η μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου ορίζεται ως [21]:

$$Y_{ij} = \begin{cases} y_{ii} + \sum_{h \neq i} y_{ih} & \text{εάν } i = j \\ -y_{ij} & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (8.1)$$

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

$$P_k(t) - jQ_k(t) = V_k^*(t) \cdot I_k(t) = V_k^*(t) \cdot \sum_{j=1}^N V_j(t) \cdot Y_{kj} \quad (8.2)$$

Ο ζυγός 1 θεωρείται ο ζυγός ταλάντωσης και αποτελεί διασύνδεση του δικτύου ΧΤ 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 με σχέση[28]:

$$|V|^2_{min} \leq |V_k(t)|^2 \leq |V|^2_{max} \quad (8.3)$$

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:

$$P_{ij}(t) \leq P_{ij}max \quad (8.4)$$

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

$$P_{ij}(t) = Re(V_i(t) \cdot [V_i(t) - V_j(t)] \cdot y_{ij}^*) \quad (8.5)$$

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 κατάσταση της ενέργειας (SoE) που έχει η μπαταρία στον ζυγό  $s$ , την χρονική στιγμή  $t$  και με  $r_s(t)$  η μέση ενεργός ισχύς ( $P_{bat}$ ) που ανταλλάσσει 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:

$$e_s(t + 1) = e_s(t) + r_s(t) \cdot \Delta t \quad (8.6)$$

όπου  $\Delta t$  είναι το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του προβλήματος (π.χ 1 ώρα 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).

Η αρχική κατάσταση των μπαταριών είναι γνωστή και στην παρούσα εργασία την χρονική στιγμή  $t=1$  θεωρούνται αφόρτιστες, συνεπώς ισχύει η σχέση:

$$e_s(1) = 0 \quad (8.7)$$



Στους ζυγούς που δεν συνδέεται μπαταρία ισχύουν οι σχέσεις:

$$r_h(t) = b_h(t) = 0 \quad (8.8)$$

για κάθε χρονική στιγμή όπου  $h \in \mathcal{N}_S$ .

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:

$$|r_s(t)| \leq R_s \max \quad (8.9)$$

$$0 \leq e_s(t) \leq E_s \quad (8.10)$$

όπου  $E_s$  είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας στο ζυγό  $s$  και  $R_{s\max}$  η ονομαστική ισχύς των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση των μπαταριών στο δίκτυο αντίστοιχα. Ουσιαστικά οι μεταβλητές  $E_s$  και  $R_{s\max}$  είναι οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος της διαστασιολόγησης των μπαταριών.

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

$$|b_s(t)| \leq B_s \max \quad (8.11)$$

όπου  $B_{s\max}$  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 από την ονομαστική φαινόμενη ισχύ των μετατροπέων.

Με  $P_k^G(t)$ ,  $Q_k^G(t)$  συμβολίζονται η 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 άεργος ισχύς των φορτίων που συνδέονται στον ζυγό  $k$ , την χρονική στιγμή  $t$ .

Σε κάθε ζυγό, κάθε χρονική στιγμή  $t$  ισχύει η σχέση του ισοζυγίου ισχύος του ζυγού και δίνεται από τους τύπους :

$$P_k(t) = P_k^G(t) - P_k^D(t) - r_k(t) \quad (8.12)$$

$$Q_k(t) = Q_k^G(t) - Q_k^D(t) - b_k(t) \quad (8.13)$$

Για την ταχύτερη επίλυση της βελτιστοποίησης από το υπολογιστικό σύστημα καθώς και τη δυνατότητα επίλυσης της διαδικασίας για αρκετά μεγάλο χρονικά διάστημα θεωρούμε ότι κάθε μέρα οι μπαταρίες ξεκινούν από την αρχική τους κατάσταση δηλαδή αφόρτιστες. Ορίζοντας ως χρονικό βήμα  $\Delta t$  τη μία μέρα, ορίζουμε την παρακάτω σχέση:

$$e_s(24\Delta t + 1) = 0 \quad (8.14)$$

Η γήρανση των μπαταριών για κάθε χρονική στιγμή  $t$  υπολογίζεται μέσω της (6.11) και ενσωματώνεται στη βελτιστοποίηση με την ακόλουθη σχέση:

$$J_{deg}(t) = \max(\alpha_1 r_s(t) + \alpha_2 e_s(t) + \alpha_3 E_s) \quad (8.15)$$

Ο λόγος που θέλουμε τη μέγιστη τιμή στην έκφραση (8.15) είναι το γεγονός ότι για η τριάδες παραμέτρων  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , η συνάρτηση (8.15) μας δίνει η τιμές για την γήρανση της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή  $t$ . Από αυτές τις τιμές κρατάμε την χειρότερη περίπτωση για την γήρανση της μπαταρίας προκειμένου να συμπεριλάβουμε όλα τα ενδεχόμενα. Η χειρίστη περίπτωση αποτυπώνεται μέσω της μέγιστης τιμής που μπορεί να λάβει η γήρανση κάθε στιγμή  $t$ .

Ως αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να οριστεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου, του συνολικού κόστους εγκατάστασης και συντήρησης των μπαταριών και των μετατροπέων καθώς και η ελαχιστοποίηση του φαινομένου της γήρανσης των μπαταριών. Η αναλυτικότερη περιγραφή της παρουσιάζεται παρακάτω.

## **8.2. Περιγραφή του τελικού αλγορίθμου διαστασιολόγησης του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας**

Η διαστασιολόγηση των μπαταριών επιτυγχάνεται λύνοντας ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που περιεγράφηκαν παραπάνω. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται και αναλύεται η διαστασιολόγηση των μονάδων με γνωστές τις θέσεις και τον αριθμό τους.

Για δεδομένο σύνολο  $S$ , στόχος της διαστασιολόγησης των μονάδων είναι να βρεθεί η συνολική ελάχιστη δυνατή χωρητικότητα ταυτόχρονα με την ελάχιστη δυνατή γήρανση των μπαταριών, ώστε οι περιορισμοί της λειτουργίας του δικτύου

να ικανοποιούνται σε κάθε χρονική στιγμή της βελτιστοποίησης. Για να ληφθεί υπόψη η περιοδικότητα των φορτίων καθώς και η μακροχρόνια φύση του προβλήματος γήρανσης, λαμβάνεται ως χρονικός ορίζοντας οι έξι μήνες. Επομένως οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι οι χωρητικότητες των μπαταριών  $E_s$ , η μέγιστη ισχύς των αντιστροφένων  $R_s$ , η ενεργός και άεργος ισχύς  $r_s(t)$ ,  $b_s(t)$  που ανταλλάσσει κάθε μπαταρία με το δίκτυο, η ενεργός και άεργος ισχύς  $P_1^G$ ,  $Q_1^G$  που δίνει ο ζυγός ταλάντωσης καθώς και η αποσύνθεση  $J_{deg}$  η οποία όμως εξαρτάται από τα μεγέθη  $E_s$ ,  $e_s(t)$  και  $r_s(t)$ . Επίσης λαμβάνονται υπόψη και οι απώλειες του δικτύου  $C_l$ [24].

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος την οποία καλούμαστε να ελαχιστοποιήσουμε είναι η εξής:

$$F = C_l + \gamma_1 C_{st} + \gamma_2 C_R + \gamma_3 D \quad (8.16)$$

Όπου:

$$C_{st} = \sum_{s \in S} E_s \quad (8.17)$$

είναι η συνολική χωρητικότητα του συνόλου των μπαταριών που εγκαθίστανται στο δίκτυο.

$$C_R = \sum_{s \in S} R_s \quad (8.18)$$

είναι το συνολικό μέγεθος των μετατροπέων που εγκαθίσταται στο δίκτυο.

$$C_l = \frac{1}{|T|} \cdot \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} P_k(t) \cdot \Delta t \quad (8.19)$$

είναι οι μέσες συνολικές ενεργές απώλειες του δικτύου.

$$D = \frac{1}{|T|} \cdot \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} Jdeg(t) \cdot \Delta t \quad (8.20)$$

είναι ο μέσος ρυθμός γήρανσης των μπαταριών του δικτύου.

Οι μεταβλητές  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \geq 0$ , είναι σταθερές – βάρη, ενώ οι συναρτήσεις  $C_i, C_R, C_{st}, D$ , ελαχιστοποιούνται για διαφορετικές τιμές των κοινών μεταβλητών τους επομένως το σωστό θα ήταν να ελαχιστοποιηθούν ξεχωριστά, πράγμα όμως που μετατρέπει το πρόβλημα σε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Επομένως επιλέγονται οι παράμετροι  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ , ώστε με αντίστοιχες κατάλληλες σταθερές τιμές να μπορούν να προσαρμόσουν το αποτέλεσμα σε μία βέλτιστη κοινή ελαχιστοποίηση της (8.16), όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

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:

$$P_k(t) - jQ_k(t) = \sum_{j=1}^N [W_{kj}(t) \cdot Y_{kj}]^* \quad (8.21)$$

$$|V_{min}|^2 \leq |W_{kk}(t)| \leq |V_{max}|^2 \quad (8.22)$$

$$W_{11}(t) = 1 \quad (8.23)$$

$$P_{ij}(t) \leq P_{ij}max \quad (8.24)$$

$$P_{ij}(t) = Re([W_{ii}(t) - W_{ij}(t)] \cdot y_{ij}^*) \quad (8.25)$$

$$e_s(t+1) = e_s(t) + r_s(t) \cdot \Delta t \quad (8.26)$$

$$e_s(1) = 0 \quad (8.27)$$

$$r_h(t) = b_h(t) = 0 \quad (8.28)$$

$$|r_s(t)| \leq R_smax \quad (8.29)$$

$$0 \leq e_s(t) \leq E_s \quad (8.30)$$

$$|b_s(t)| \leq B_smax \quad (8.31)$$

$$P_k(t) = P_k^G(t) - P_k^D(t) - r_k(t) \quad (8.32)$$

$$Q_k(t) = Q_k^G(t) - Q_k^D(t) - b_k(t) \quad (8.33)$$

$$W(t) \geq 0 \quad (8.34)$$

$$e_s(24\Delta t + 1) = 0 \quad (8.35)$$

$$J_{deg}(t) = \max(\alpha_1 r_s(t) + \alpha_2 e_s(t) + \alpha_3 E_s) \quad (8.36)$$



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9:**  
**Υλοποίηση**  
**αλγορίθμου**  
**βέλτιστης**  
**διαστασιολόγη-**  
**σης και**  
**αποτελέσματα**





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Υλοποίηση αλγορίθμου βέλτιστης διαστασιολόγησης και αποτελέσματα

## 9.1. Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εφαρμόζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, σε ένα δίκτυο διανομής ΧΤ 19 ζυγών.

Αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε για να επιλυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου ως θετικά ημιορισμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του φαινομένου της γήρανσης των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση που έγινε στο δίκτυο διανομής 19 ζυγών, με την χρήση πινάκων και διαγραμμάτων και γίνεται λεπτομερής σχολιασμός και επεξήγηση αυτών, καθώς και σύγκριση με αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου, χωρίς την ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών.

Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με την χρήση του επιλυτή SEDUMI, ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω. Οι υπολογισμοί έγιναν με την βοήθεια ενός υπολογιστικού συστήματος (H/Y) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής :	Intel® Core™ i7-4710MQ CPU @ 2.40GHz
Μνήμη RAM :	8.00 GB
Λειτουργικό Σύστημα :	Microsoft Windows 10 Edu. Edition

## 9.2. Λογισμικό CVX

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται το λογισμικό CVX καθώς και ο επιλυτής SEDUMI που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του προαναφερόμενου προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου ως θετικά ημιορισμένου προβλήματος με ενσωμάτωση της γήρανσης των αποθηκευτικών μέσων. Το λογισμικό CVX παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης και επίλυσης κυρτών ορισμένων προβλημάτων. Υποστηρίζει ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού, όπως γραμμικά και τετραγωνικά προβλήματα (LPs/QPs), δεύτερης τάξεως κωνικά προβλήματα (SOCPs), μεικτά ακέραια κυρτά προβλήματα (MICPs) και ημιορισμένα

προβλήματα (SDPs). Γενικά το λογισμικό CVX είναι σχεδιασμένο για να μοντελοποιεί σχεδόν οποιοδήποτε κυρτό πρόβλημα[22].

Το λογισμικό CVX είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να ενσωματώνεται στο περιβάλλον της MATLAB (Matrix Laboratory), μετατρέποντας την σε μια ισχυρή γλώσσα μαθηματικού προγραμματισμού.

Συνδυάζοντας ορισμένους συντακτικούς κανόνες και το κώδικα MATLAB, καθιστά αρκετά εύκολη την διαδικασία μοντελοποίησης και επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως αυτό που θέλουμε να επιλύσουμε.

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 τέτοιο τρόπο ώστε να καθιστά πιο εύκολη την αναπαράσταση ενός ημιορισμένου προβλήματος. Παράλληλα 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 επιλύτες, τους οποίους και έχει ενσωματωμένους, τον επιλύτη SEDUMI που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία και τον επιλύτη SDPT3. Επίσης υποστηρίζει και δύο εμπορικούς επιλύτες, τον GUROBI και τον MOSEK.

Η βασική δομή ενός προγράμματος στο λογισμικό CVX έχει την παρακάτω μορφή, η οποία είναι και η γενική μορφή ενός οποιοδήποτε προβλήματος βελτιστοποίησης:

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

Η εντολή `cvx_begin` προετοιμάζει τη MATLAB να αποδεχτεί την δήλωση των μεταβλητών, των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης (δηλαδή του συνόλου του προβλήματος που θέλουμε να επιλύσουμε). 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 ή μεγιστοποιηθεί αναλόγως του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε. Η εντολή `subject to`

δηλώνει πως αρχίζει η δήλωση όλων των περιορισμών του προβλήματος. Τέλος, η εντολή `cvx_end` δηλώνει στη MATLAB πως η καταγραφή του προβλήματος τελείωσε και καλεί κάποιον επιλύτη για την επίλυση του.

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

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

Για να επιλέξει κάποιος την επιλογή του ημιορισμένου προγραμματισμού (SDP) 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:

- Οι περιορισμοί ισότητας δηλώνονται όπως και στη MATLAB (στοιχείο προς στοιχείο).
- Οι περιορισμοί ανισότητας που αφορούν διανύσματα και βαθμωτές μεταβλητές δηλώνονται όπως και στη 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.

### 9.3. Επιλύτης SEDUMI

Σε αυτό το σημείο θα περιγραφεί με λίγα στοιχεία ο επιλύτης SEDUMI. Ο προαναφερόμενος επιλύτης 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 δειχθεί 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 επιλύτη SEDUMI μόλις καθοριστεί πλήρως το πρόβλημα .

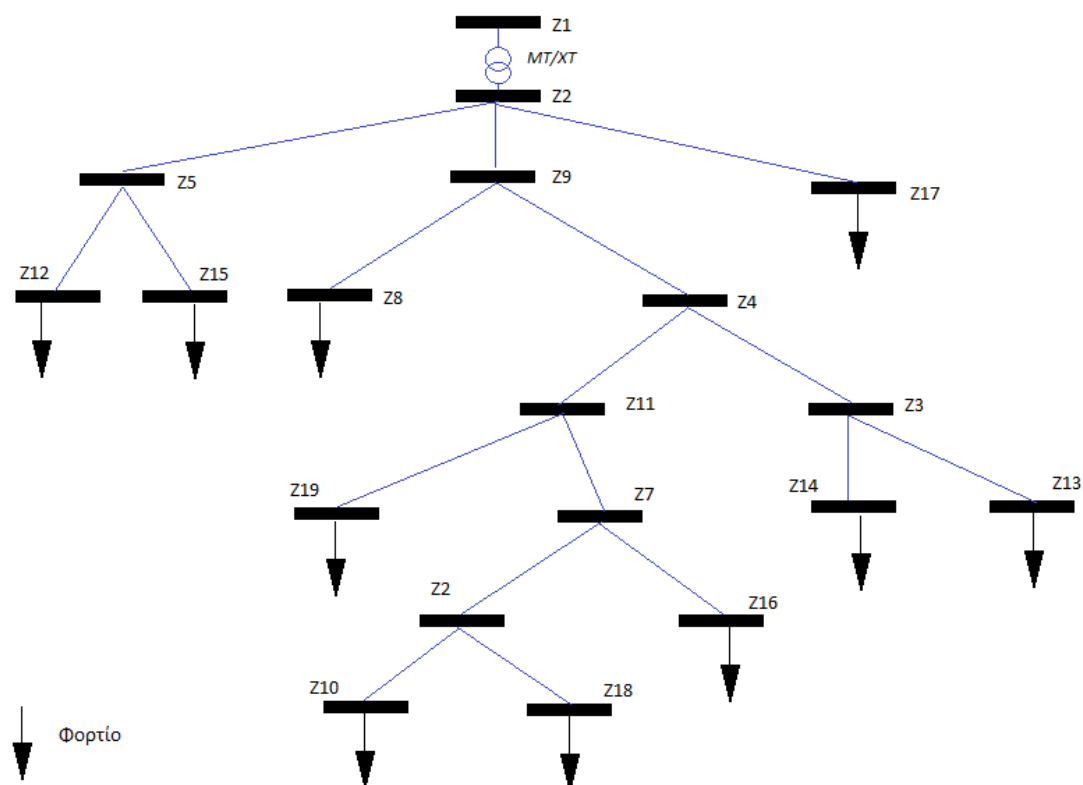
### 9.4. Δεδομένα προβλήματος

Αφού έχει δηλωθεί το προγραμματιστικό περιβάλλον καθώς και τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν, θα γίνει μια παρουσίαση των παραμέτρων του προβλήματος καθώς και η λεπτομερής ανάλυσή τους.

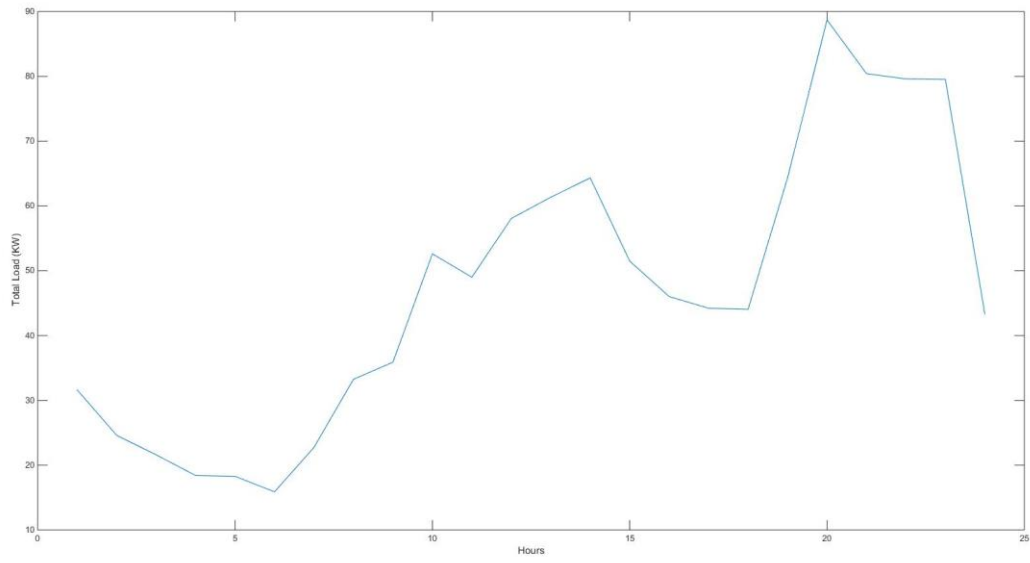
Αρχικά θα παρουσιαστεί το δίκτυο διανομής πάνω στο οποίο εργαστήκαμε και φαίνεται στο Σχήμα 9.1, καθώς και τα δεδομένα του δικτύου τα οποία χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση που υλοποιήσαμε. Πρόκειται για ένα ακτινικό δίκτυο διανομής τάσης 400V (Χαμηλή Τάση), το οποίο αποτελείται από 18 γραμμές και 19 ζυγούς και έχει συνδεδεμένα φορτία ισχύος στα φύλλα του. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός MT/XT και για αυτόν ακριβώς το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης του συστήματος. Θεωρούμε ότι δεν μπορούν να συνδεθούν σε αυτόν τον ζυγό μονάδες αποθήκευσης. Το συγκεκριμένο δίκτυο το οποίο θα αναλύσουμε

δεν έχει άλλου είδους παραγωγές ισχύος και τροφοδοτείται αποκλειστικά από το ζυγό ταλάντωσης.

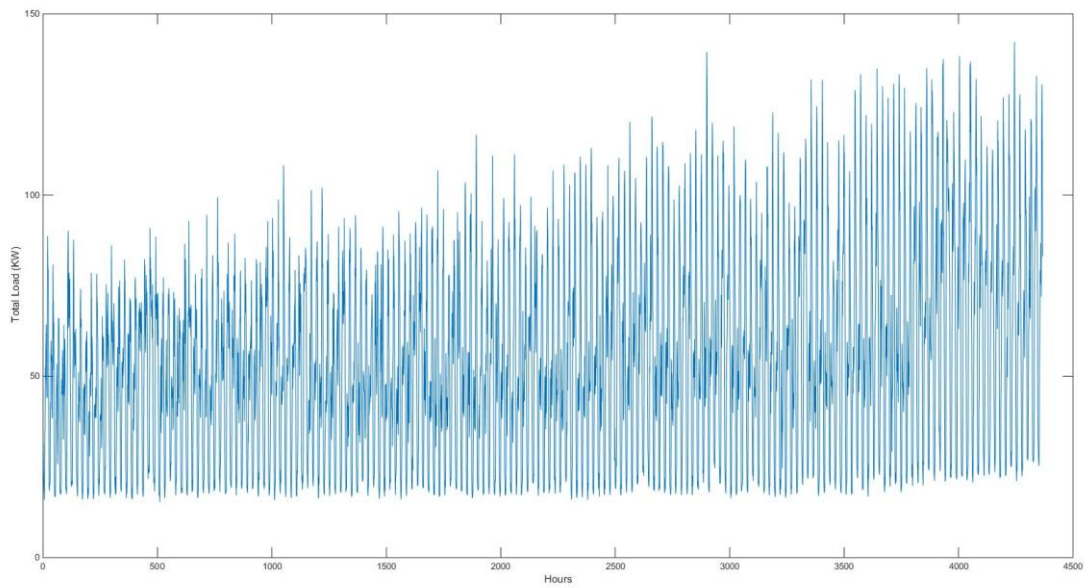
Ως χρονικός ορίζοντας επίλυσης του προβλήματος επιλέχθηκαν οι 6 μήνες (182 ημέρες – 4368 ώρες) με διακριτό βήμα της μίας ώρας. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε αυτός ο χρονικός ορίζοντας είναι διότι μας δίνεται η δυνατότητα να αναλύσουμε το μακροχρόνιο φαινόμενο της γήρανσης των μπαταριών λαμβάνοντας υπόψη και τη στοχαστικότητα ζήτησης ενώ παράλληλα δεν ξεπερνάμε τα όρια του υπολογιστικού συστήματος που διαθέτουμε για την υλοποίηση της ανάλυσης. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χρονοσειρές του συνολικού φορτίου καθώς και των επιμέρους φορτίων των ζυγών του δικτύου για το προαναφερόμενο χρονικό διάστημα. Επίσης παρουσιάζεται το συνολικό φορτίο αλλά και τα φορτία κάθε ζυγού του συστήματος για μία ημέρα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, ότι τα φορτία επιλέχθηκαν έτσι ώστε να παρουσιάζονται προβλήματα υπότασης στο δίκτυο των 19 ζυγών για κάποιες χρονικές στιγμές μέσα στο χρονικό ορίζοντα επίλυσης. Η βάση ισχύος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ανά μονάδα μεγεθών είναι τα 50kW και για τάση βάσεως τα 400V.



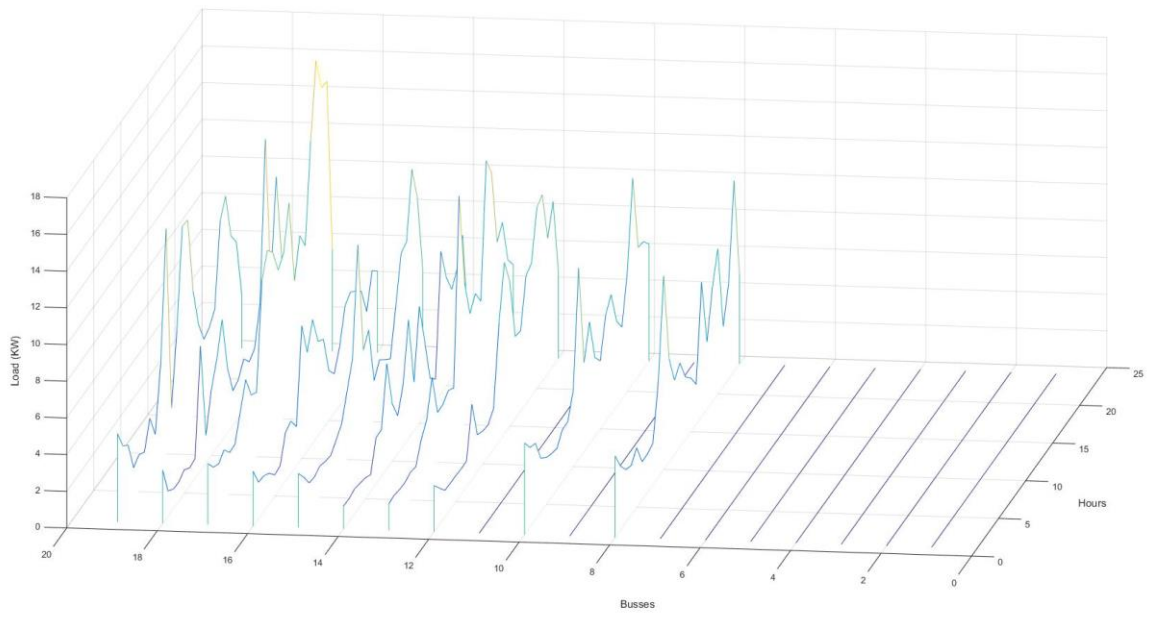
Σχήμα 9.1 Δίκτυο διανομής 19 ζυγών



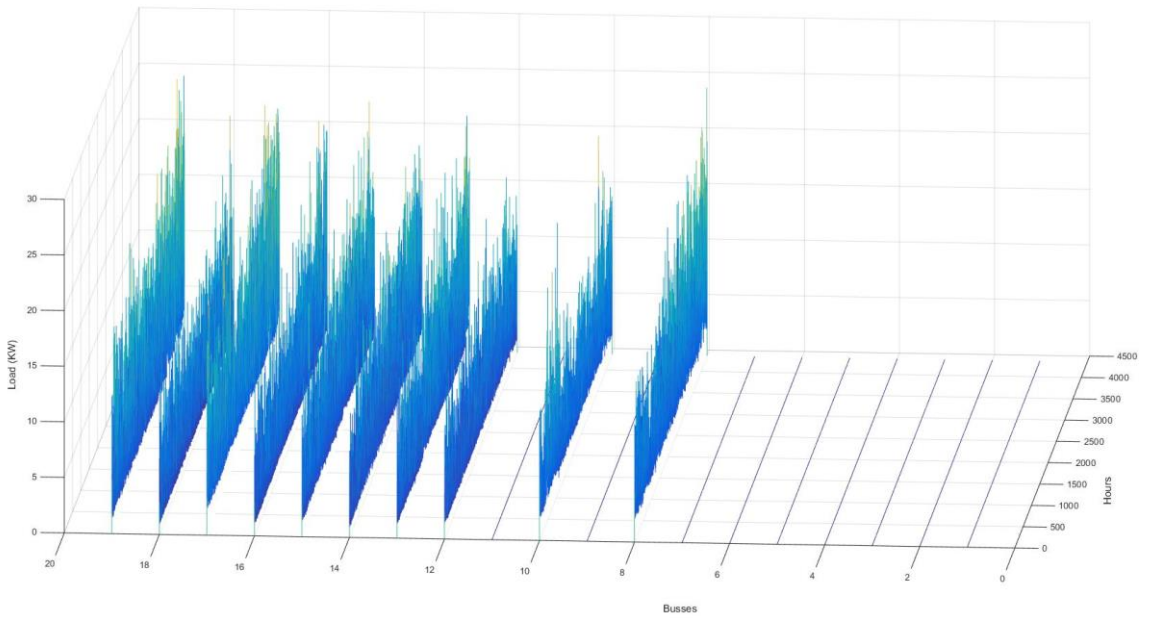
*Διάγραμμα 9.1 Συνολικό φορτίο δικτύου διανομής για μία ημέρα*



*Διάγραμμα 9.2 Συνολικό φορτίο δικτύου διανομής για 182 ημέρες*



*Διάγραμμα 9.3 Φορτίο κάθε ζυγού για 1 ημέρα*



*Διάγραμμα 9.4 Φορτίο κάθε ζυγού για 182 ημέρες*

Έχοντας πλέον γνωστά τα φορτία καθώς και την τοπολογία του δικτύου πάνω στο οποίο θα εργαστούμε, πρέπει να αποφανθούμε για την τοποθέτηση των μπαταριών στο δίκτυο. Η βέλτιστη τοποθέτηση των μπαταριών μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους αλγορίθμους, όμως στην παρούσα εργασία δεν θα εξεταστεί και για αυτό δεν γίνεται ανάλυση ούτε επίλυση αντίστοιχων βελτιστοποιήσεων. Η υλοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης θα γίνει για δύο περιπτώσεις τοποθέτησης μπαταριών. Στην πρώτη περίπτωση θα αποτελεί δεδομένο ότι μπαταρίες βρίσκονται σε όλα τα φύλλα του ακτινικού δικτύου διανομής (ζυγοί 8,10,12,13,14,15,16,17, 8,19), και στην δεύτερη περίπτωση θα τοποθετηθούν σε 3 από τα φύλλα του δικτύου (ζυγοί 15,17,19).

Έχοντας πλέον γνωστά τα φορτία, την τοπολογία του δικτύου πάνω στο οποίο θα εργαστούμε, καθώς και την τοπολογία των μπαταριών, κάνουμε κατάλληλους υπολογισμούς ώστε να αποφανθούμε για τις τιμές των παραμέτρων  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  και  $\gamma_3$  της αντικειμενικής συνάρτησης (8.16), που παρουσιάστηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο 8. Τα βήματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

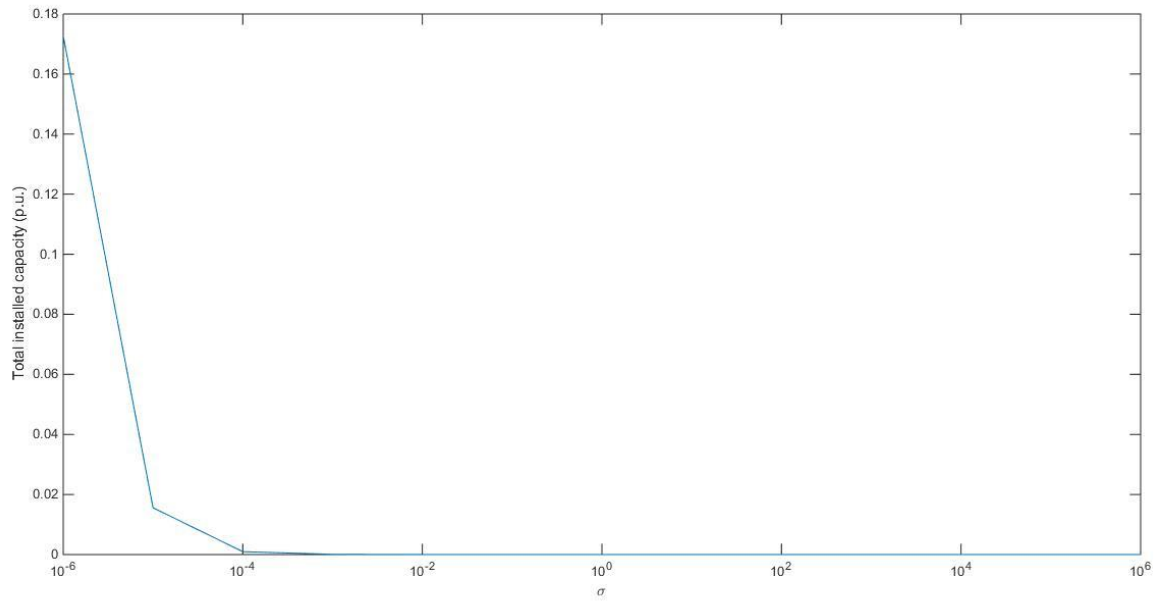
## 9.5. Υπολογισμός βαρών αντικειμενικής συνάρτησης

Η αντικειμενική συνάρτηση που ορίσαμε αποτελείται από τέσσερις όρους για τους οποίους θέλουμε να υπολογίσουμε τα αντίστοιχα βάρη. Στη διαδικασία που υλοποιήσαμε αρχικά υπολογίζουμε το βάρος για το κόστος της συνολικής εγκατεστημένης χωρητικότητας των μπαταριών ( $C_{st}$ ) σε σχέση με το κόστος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των αντιστροφών ( $C_R$ ) του συστήματος. Ουσιαστικά επιλύουμε τη βελτιστοποίηση, θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την παρακάτω σχέση:

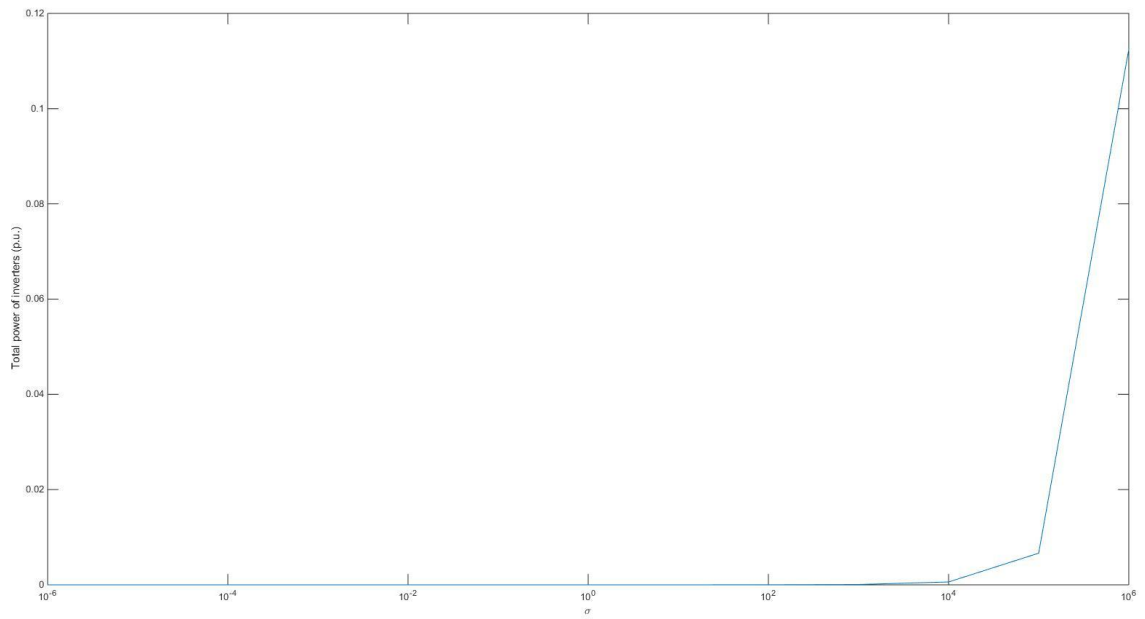
$$\sigma C_{st} + C_R \quad (9.1)$$

Ο αλγόριθμός εκτελέστηκε για ένα μεγάλο αριθμό ημερών και για διάφορες τιμές του συντελεστή  $\sigma$ . Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται οι τιμές που παίρνουν τα κόστη σε ανά μονάδα σύστημα, για τις διάφορες τιμές του βάρους  $\sigma$ .



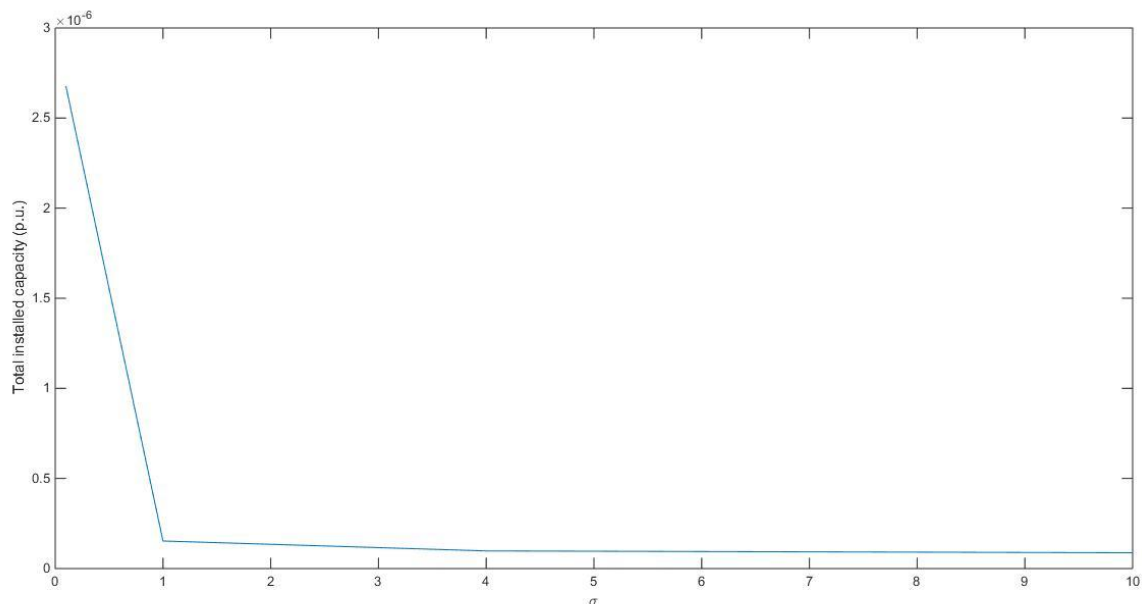


Διάγραμμα 9.5 Συνολική χωρητικότητα σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $\sigma$

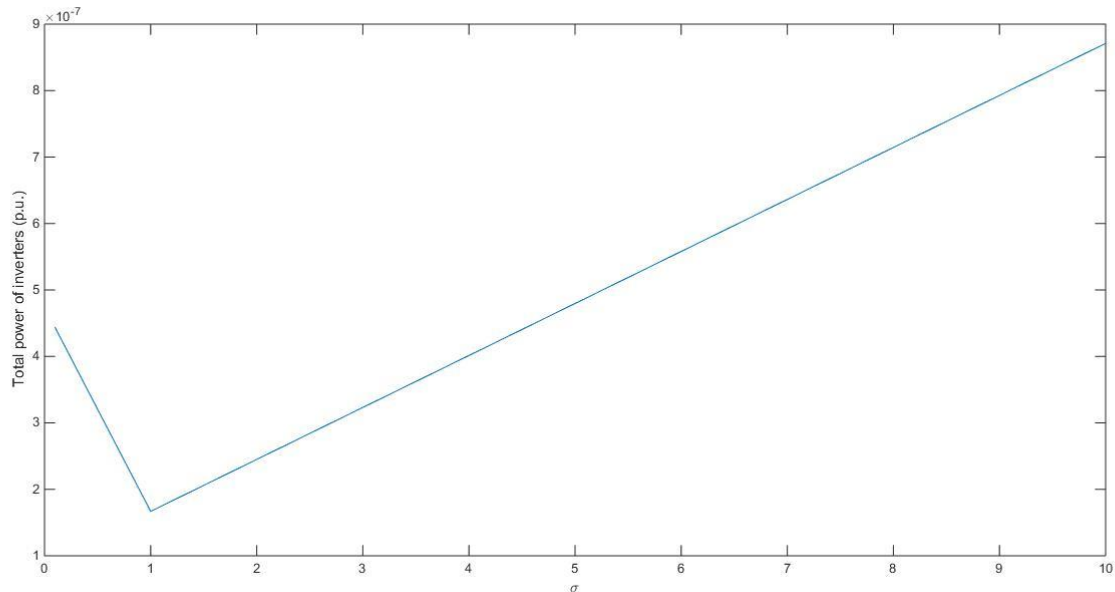


Διάγραμμα 9.6 Συνολική εγκατεστημένη ισχύς αντιστροφών σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $\sigma$

Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η τιμή του βάρους  $\sigma$ , η τιμή της συνολικής χωρητικότητας των μπαταριών μειώνεται και συγκλίνει σε μία ελάχιστη τιμή. Αυτό συμβαίνει διότι για τιμές κάτω από αυτό το ελάχιστο δεν θα ήταν δυνατό να ικανοποιούνται τα όρια των τάσεων που έχουμε θέσει στον αλγόριθμο. Αντίστοιχα καθώς μειώνεται η τιμή του συντελεστή  $\sigma$ , παρατηρείται ότι η τιμή της συνολικής ισχύος των αντιστροφών συγκλίνει σε ένα κατώτατο όριο. Οι τιμές του συντελεστή  $\sigma$  που θα επιλέξουμε, λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω αποτελέσματα, κυμαίνονται κοντά στη μονάδα. Για να αποφασίσουμε αποτελεσματικότερα για την τιμή που θα πάρει ο συντελεστής  $\sigma$ , πραγματοποιούμε ξανά την παραπάνω διαδικασία για μικρότερο εύρος τιμών του βάρους  $\sigma$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:



*Διάγραμμα 9.7 Συνολική χωρητικότητα σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $\sigma$*



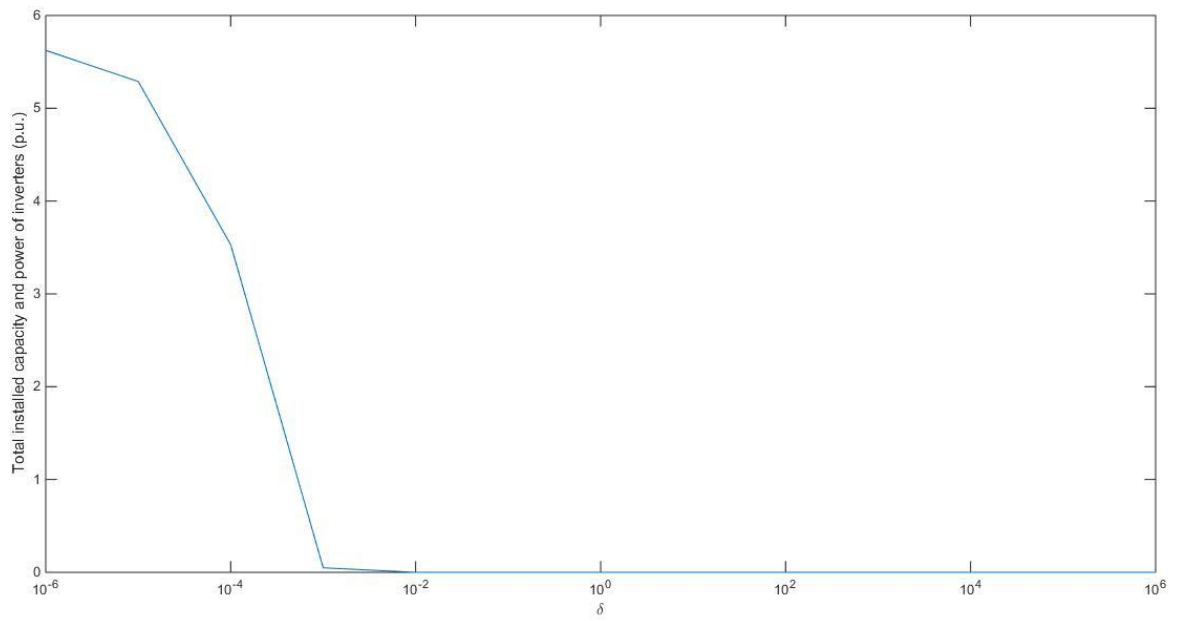
Διάγραμμα 9.8 Συνολική εγκατεστημένη ισχύς αντιστροφών σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $\sigma$

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέγουμε την τιμή  $\sigma = 4$ . Γιατί παρατηρείται ότι η συνολική χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης αν και μειώνεται σημαντικά στην τιμή  $\sigma=1$ , συνεχίζει και ακολουθεί μια σχετικά σημαντική φθίνουσα πορεία σε σχέση με την τιμή της συνολικής ισχύος των αντιστροφών μέχρι την τιμή  $\sigma=4$  όπου αρχίζει και συγκλίνει σε μία ελάχιστη τιμή.

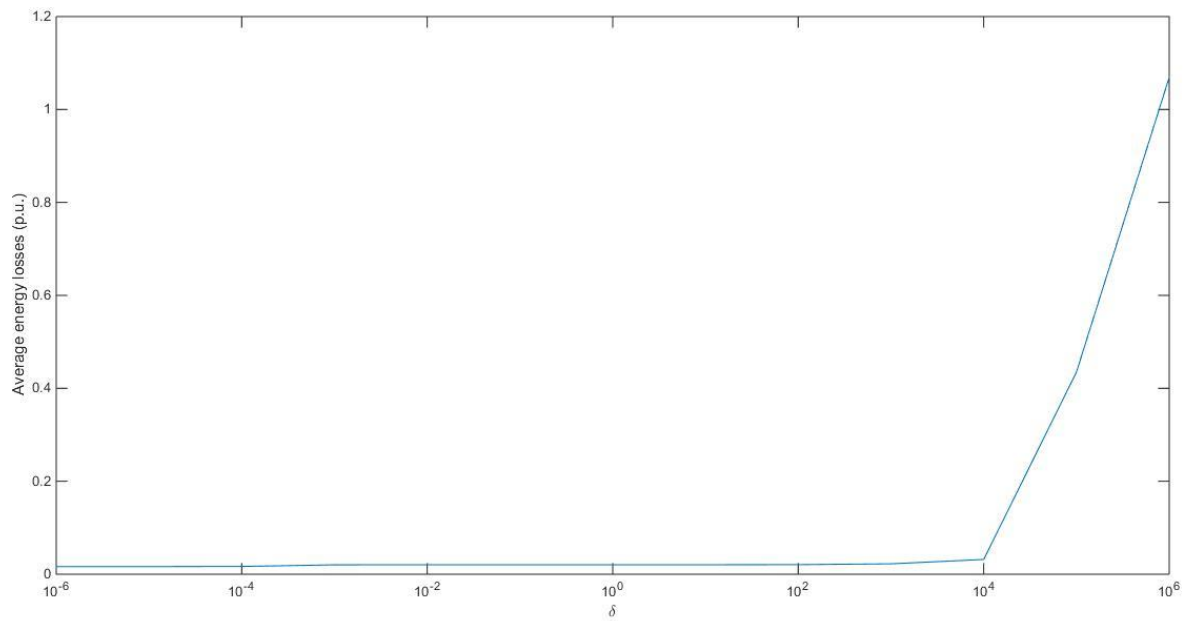
Έχοντας υπολογίσει την τιμή του βάρους  $\sigma$  για το κόστος της συνολικής χωρητικότητας των μπαταριών σε σχέση με τη συνολική ισχύ των μετατροπών, ακολουθούμε την προηγούμενη διαδικασία μόνο που στην συγκεκριμένη περίπτωση θέτουμε ως αντικειμενική συνάρτηση την παρακάτω:

$$(\sigma C_{st} + C_R) \cdot \delta + C_l \quad (9.2)$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε ξανά τη διαδικασία προκειμένου να βρούμε το βάρος  $\delta$  του κόστους των συνολικών απωλειών του δικτύου σε σχέση με τα κόστη της συνολικής χωρητικότητας των μπαταριών και της συνολικής ισχύος των μετατροπών, έχοντας ως δεδομένο ότι  $\sigma = 4$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

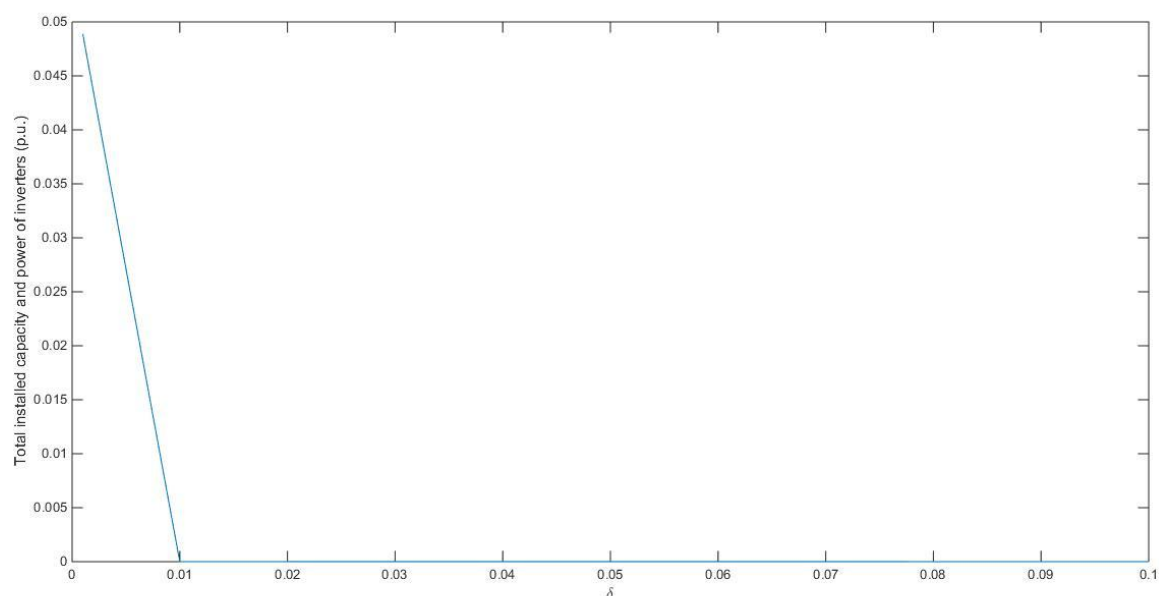


Διάγραμμα 9.9 Συνολική χωρητικότητα των μπαταριών και ισχύς των μετατροπέων σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $\delta$

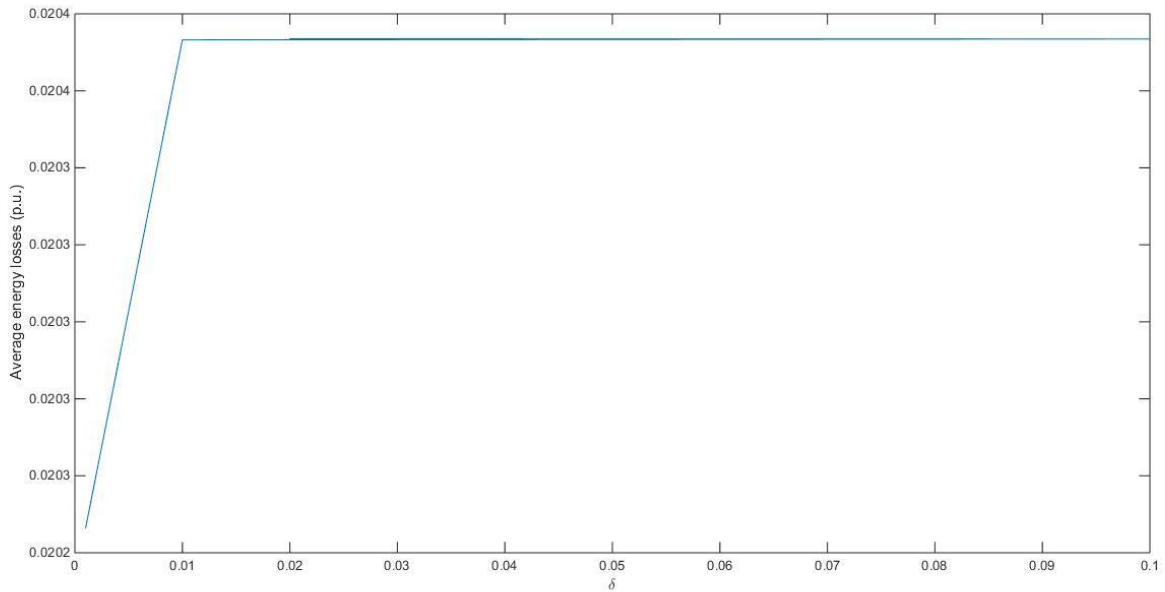


Διάγραμμα 9.10 Μέσες απώλειες ενέργειας σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $\delta$

Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η τιμή του βάρους  $\delta$ , η τιμή του αθροίσματος της συνολικής χωρητικότητας των μπαταριών με τη συνολική ισχύ των μετατροπέων μειώνεται και συγκλίνει σε μία ελάχιστη τιμή. Αυτό, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως συμβαίνει διότι για τιμές κάτω από αυτό το ελάχιστο δεν θα ήταν δυνατό να ικανοποιούνται τα όρια των τάσεων που έχουμε θέσει στον αλγόριθμο. Αντίστοιχα καθώς μειώνεται η τιμή του συντελεστή  $\delta$ , παρατηρείται ότι η τιμή των συνολικών απωλειών του συστήματος συγκλίνει σε ένα κατώτατο όριο. Οι τιμές του συντελεστή  $\delta$ , λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα, θα είναι της τάξεως του  $10^{-2}$ . Για να αποφασίσουμε αποτελεσματικότερα για την τιμή που θα πάρει ο συντελεστής  $\delta$ , πραγματοποιούμε ξανά την παραπάνω διαδικασία για μικρότερο εύρος των τιμών του βάρους  $\delta$ , όπως και προηγουμένως. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:



*Διάγραμμα 9.11 Συνολική χωρητικότητα των μπαταριών και ισχύς των μετατροπέων σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $\delta$*



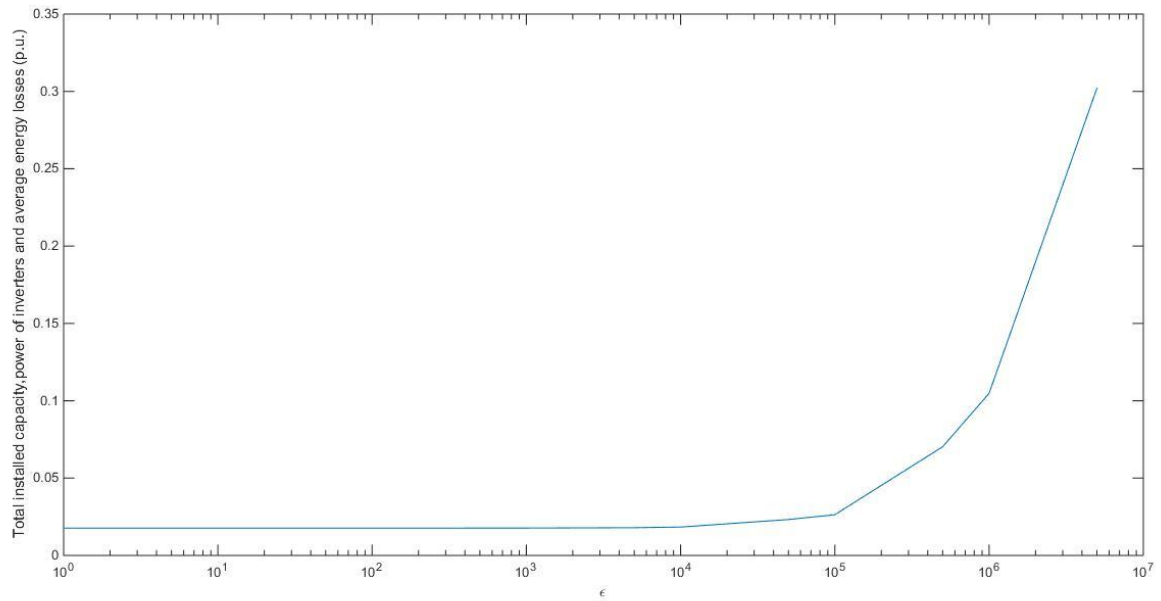
Διάγραμμα 9.12 Μέσες απώλειες ενέργειας σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $\delta$

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέγουμε την τιμή  $\delta = 0,02$ .

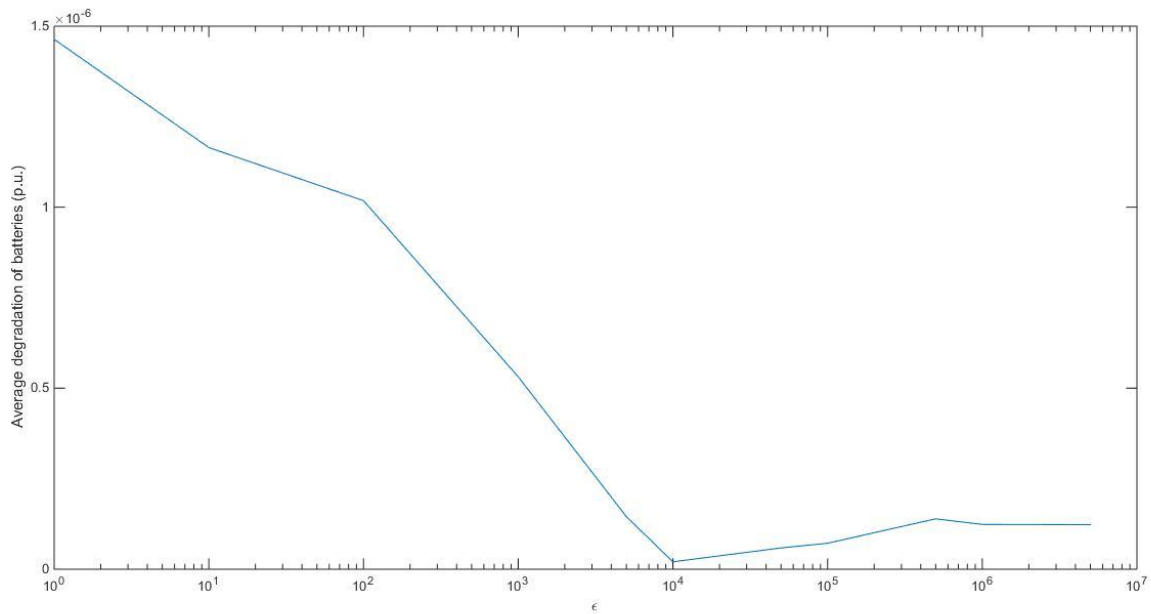
Έχοντας υπολογίσει την τιμή του βάρους  $\delta$  για το κόστος του αθροίσματος της συνολικής χωρητικότητας των μπαταριών και της συνολικής ισχύος των αντιστροφών σε σχέση με τις μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου, ακολουθούμε την προηγούμενη διαδικασία μόνο που στην συγκεκριμένη περίπτωση θέτουμε ως αντικειμενική συνάρτηση την παρακάτω:

$$(\sigma C_{st} + C_R) \cdot \delta + C_l + \varepsilon D \quad (9.3)$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε ξανά τη διαδικασία προκειμένου να βρούμε το βάρος  $\varepsilon$  του παράγοντα της γήρανσης των μπαταριών του δικτύου σε σχέση με τα υπόλοιπα κόστη, έχοντας ως δεδομένο ότι  $\sigma = 4$  και  $\delta = 0,02$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 9.13 Άθροισμα συνολικής χωρητικότητας μπαταριών, συνολικής ισχύος αντιστροφέων και απωλειών ενέργειας δικτύου ως συνάρτηση του  $\epsilon$



Διάγραμμα 9.14 Μέσος ρυθμός γήρανσης των μπαταριών ως συνάρτηση του  $\epsilon$

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέγουμε την τιμή  $\epsilon = 10000$ .

Έχοντας υπολογίσει την τιμή του βάρους  $\varepsilon$  για το κόστος του αθροίσματος της συνολικής χωρητικότητας των μπαταριών και της συνολικής ισχύος των αντιστροφών σε σχέση με τις μέσες απώλειες ενέργειας του δικτύου, καταλήγουμε στις τελικές τιμές των παραμέτρων  $\gamma_1, \gamma_2$  και  $\gamma_3$  για τα βάρη της αντικειμενικής συνάρτησης, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

$$\gamma_1 = \sigma \cdot \delta = 4 \cdot 0,02 = 0,08 \quad (9.4)$$

$$\gamma_2 = \delta = 0,02 \quad (9.5)$$

$$\gamma_3 = \varepsilon = 10000 \quad (9.6)$$

Τελικά, η αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιήσουμε στον αλγόριθμο είναι η παρακάτω:

$$F = C_l + 0,08C_{st} + 0,02C_R + 10000D \quad (9.7)$$

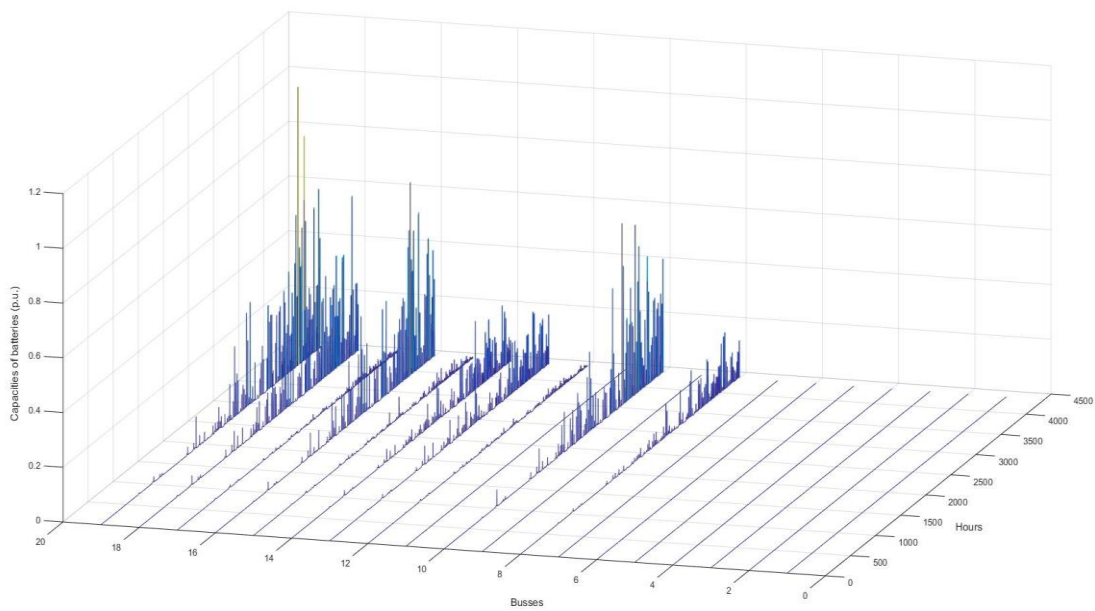
## 9.6. Αποτελέσματα

Με γνωστή πλέον την τοπολογία του δικτύου διανομής, τα φορτία, τον αριθμό των μπαταριών αλλά και την αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης, επιλύουμε την διαδικασία για δύο διαφορετικές περιπτώσεις τοποθετημένων μπαταριών στο δίκτυο. Επίσης επιλύουμε την βελτιστοποίηση μία φορά συνυπολογίζοντας τη γήρανση των μπαταριών και μία φορά χωρίς να την εντάξουμε, για την κάθε περίπτωση των μπαταριών και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

### 9.6.1. Περίπτωση I

Στην περίπτωση I οι μπαταρίες τοποθετούνται στους ζυγούς 8,10,12,13,14,15,16,17,18,19, με συνυπολογισμό της γήρανσης των μπαταριών. Όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο ώρας. Οι χωρητικότητες των μπαταριών για κάθε ώρα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

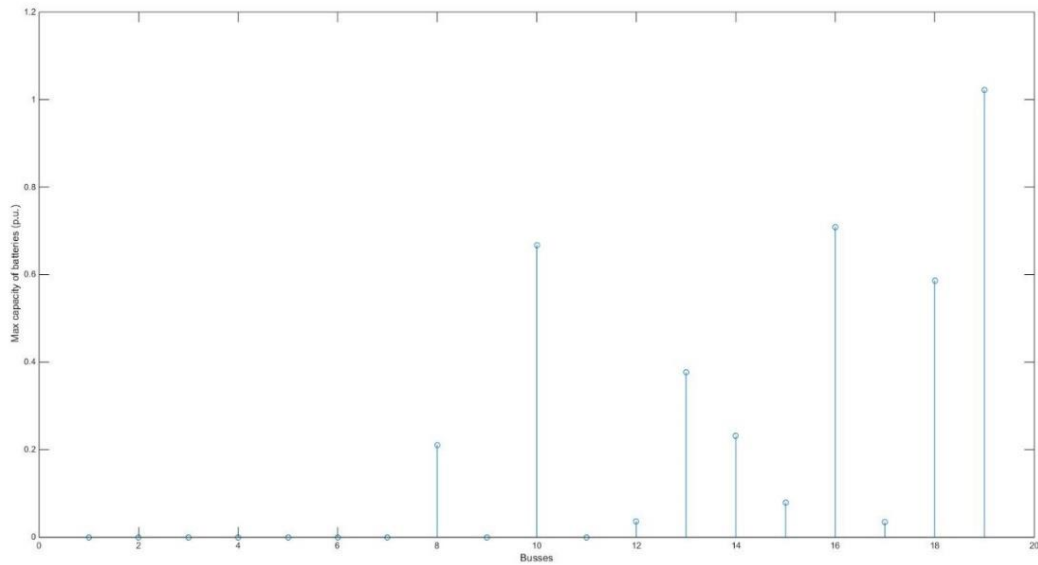




*Διάγραμμα 9.15 Χωρητικότητες μπαταριών*

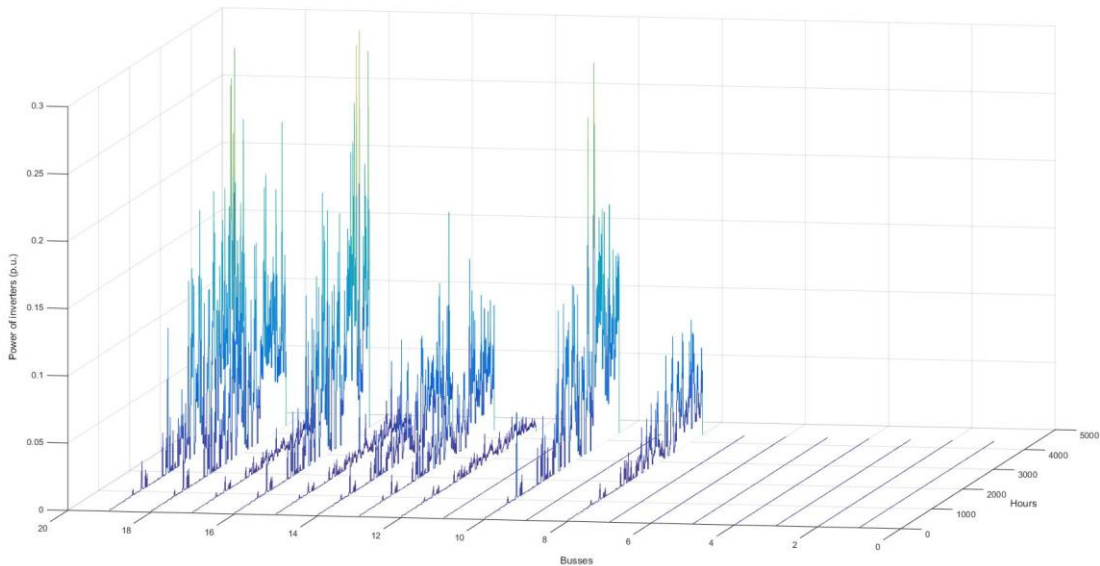
Όπως είναι λογικό την τελευταία περίοδο του χρονικού διαστήματος για το οποίο επιλύσαμε την βελτιστοποίηση, οι τιμές των χωρητικότητων των μονάδων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες, το οποίο είναι φυσιολογικό αφού και η ζήτηση των φορτίων του συστήματος είναι αυξημένη, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 9.4. Η αυξημένη ζήτηση των φορτίων, προκειμένου πάντα να ικανοποιείται, οδηγεί σε παραβάσεις των ορίων των τάσεων των ζυγών κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των χωρητικότητων των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα. Οι τελικές χωρητικότητες των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας επιλέγονται ως οι μέγιστες τιμές των αποτελεσμάτων, προκειμένου να ικανοποιούνται όλες οι ανάγκες του δικτύου για όλο το χρονικό διάστημα στο οποίο εργαστήκαμε.

Οι μέγιστες τελικές τιμές των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.16 Τελικές τιμές χωρητικότητας των μπαταριών ανά ζυγό

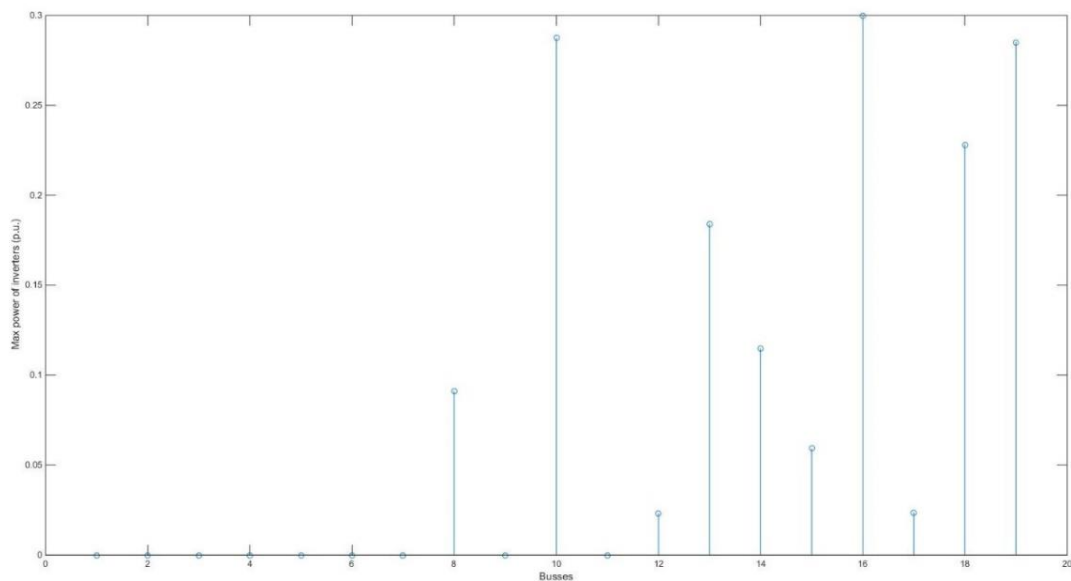
Η ισχύς που πρέπει να μπορούν να αποδώσουν οι μπαταρίες στο δίκτυο σε επίπεδο ώρας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.17 Ισχύς που μπορούν να αποδώσουν οι μπαταρίες

Η ισχύς των μπαταριών σε αυτό το διάστημα, θα είναι η ονομαστική των ηλεκτρονικών ισχύος που θα εγκατασταθούν σε κάθε μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Για να καλύπτουμε όλες τις περιπτώσεις μέσα στο χρονικό διάστημα των

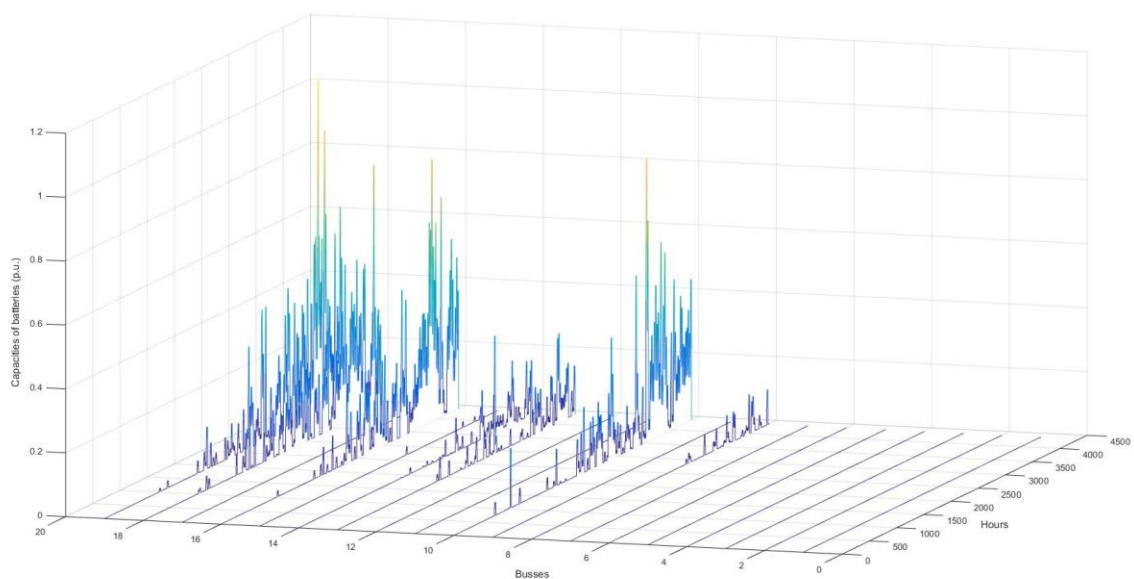
έξι μηνών, ως τελικές τιμές επιλέγονται οι μέγιστες τιμές των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.18 Τελική ισχύς μετατροπέων ισχύος ανά ζυγό

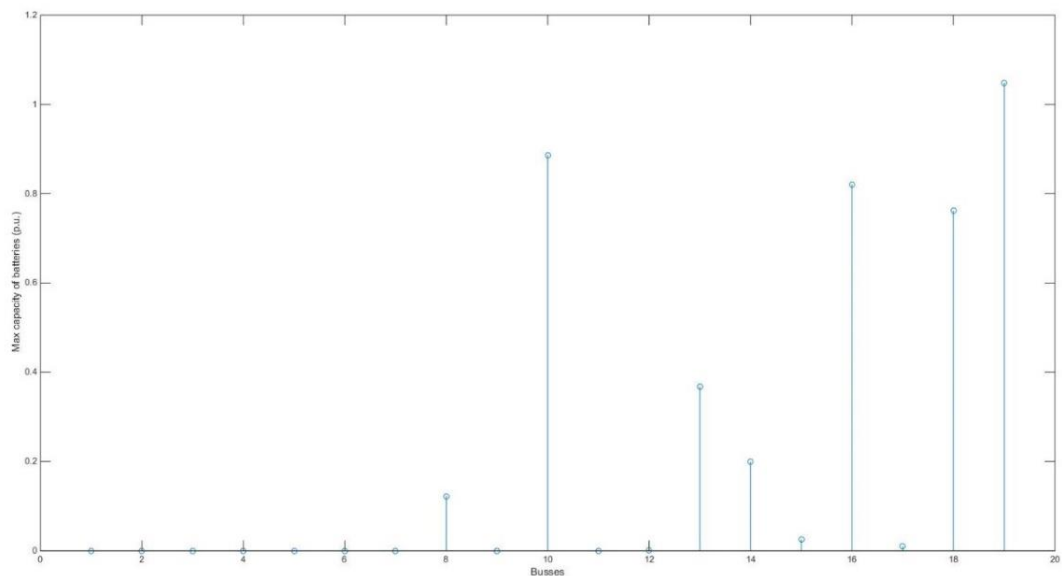
### 9.6.2. Περίπτωση II

Στην περίπτωση II οι μπαταρίες τοποθετούνται στους ζυγούς 8,10,12,13,14,15,16,17,18,19, χωρίς συνυπολογισμό της γήρανσης των μπαταριών. Οι χωρητικότητες των μπαταριών για κάθε ώρα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



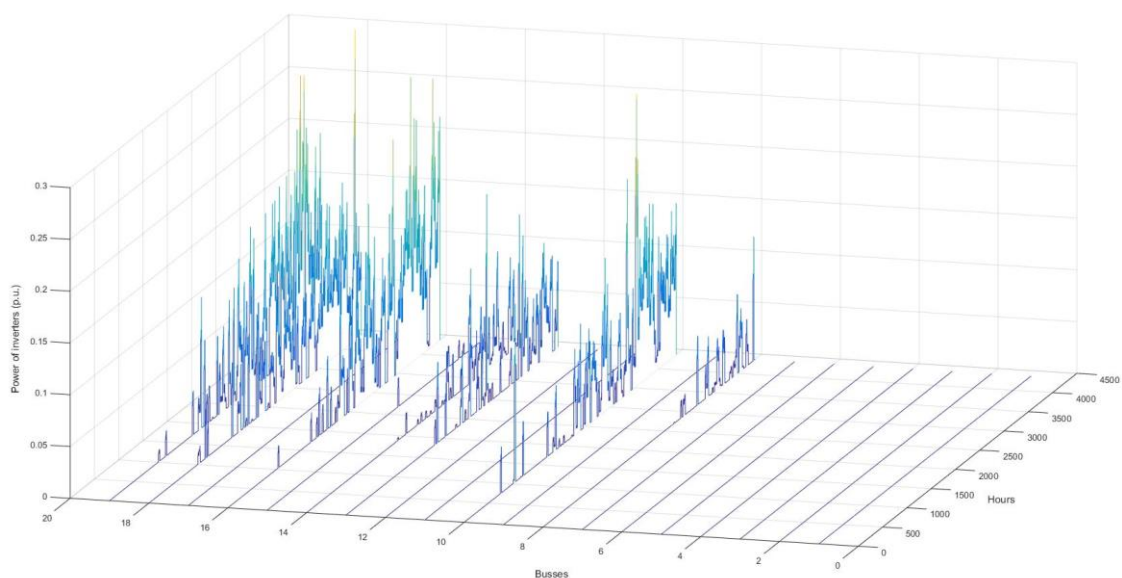
Διάγραμμα 9.19 Χωρητικότητα των μπαταριών

Οι μέγιστες τελικές τιμές των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



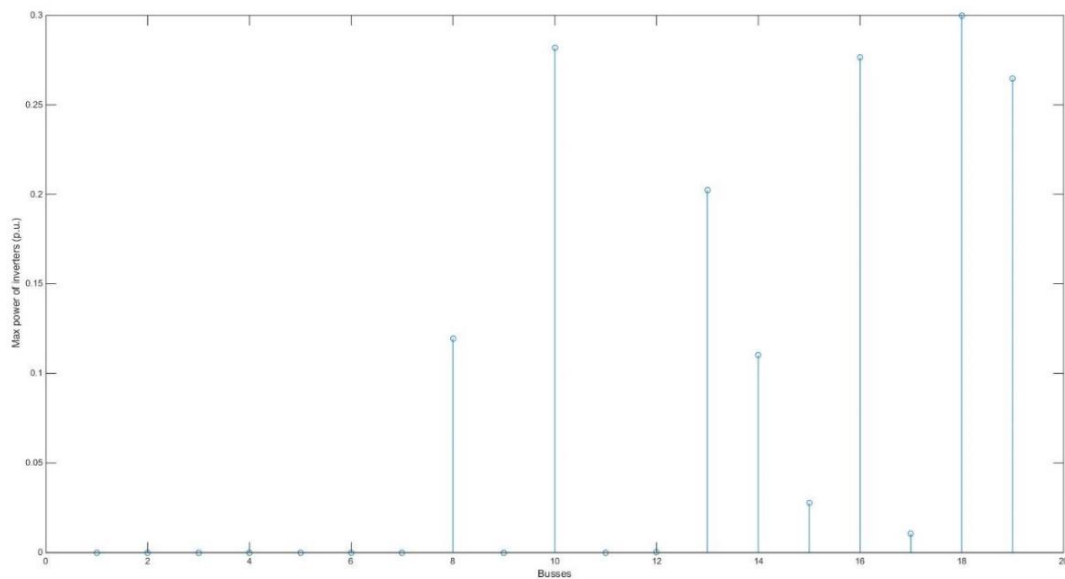
Διάγραμμα 9.20 Τελική χωρητικότητα των μπαταριών ανά ζυγό

Η ισχύς που πρέπει να μπορούν να αποδώσουν οι μπαταρίες στο δίκτυο σε επίπεδο ώρας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.21 Ισχύς μπαταριών

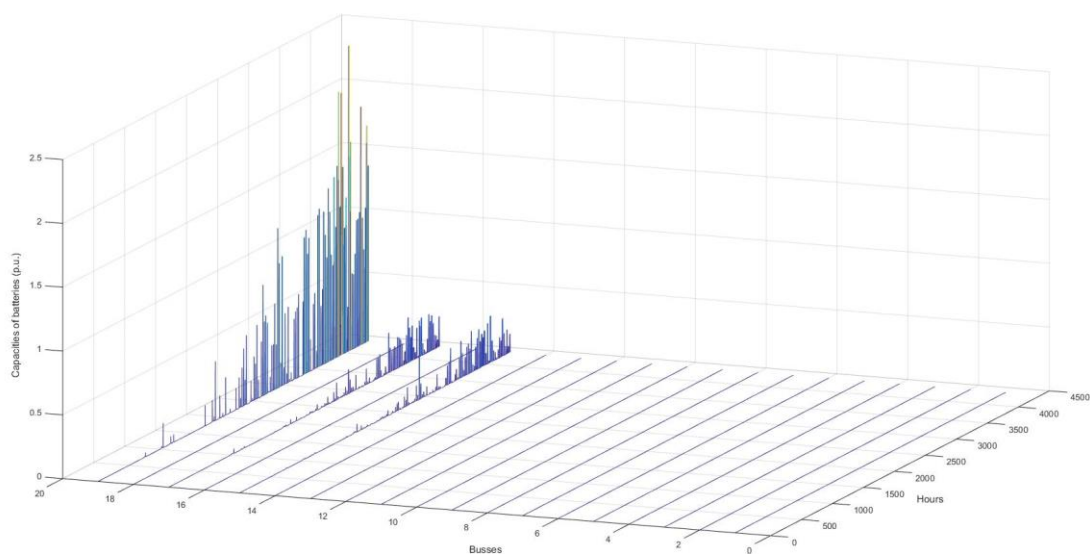
Οι μέγιστες τιμές των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης για την ισχύ των μετατροπέων παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.22 Τελική ισχύς μετατροπέων ισχύος ανά ζυγό

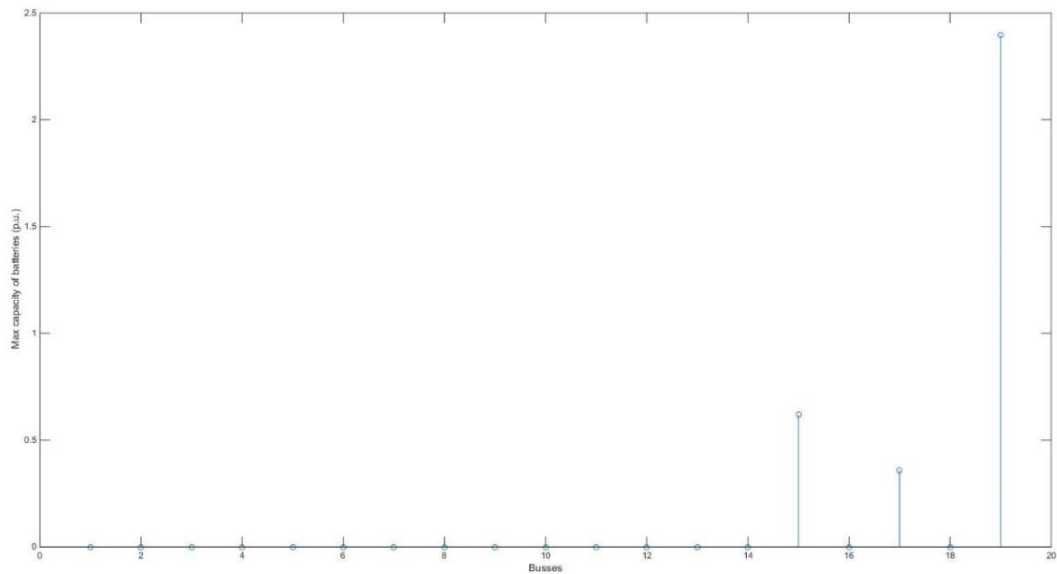
### 9.6.3. Περίπτωση III

Στην περίπτωση III οι μπαταρίες τοποθετούνται στους ζυγούς 15,17,19, με συνυπολογισμό της γήρανσης των μπαταριών. Οι χωρητικότητες των μπαταριών για κάθε ώρα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



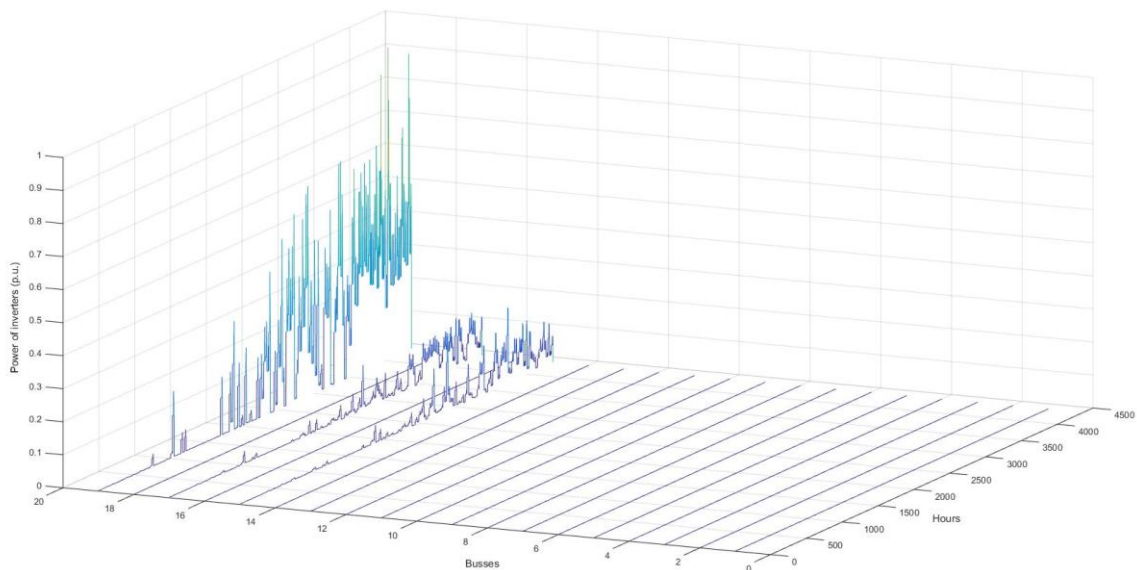
Διάγραμμα 9.23 Χωρητικότητα μπαταριών

Οι μέγιστες τελικές τιμές των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



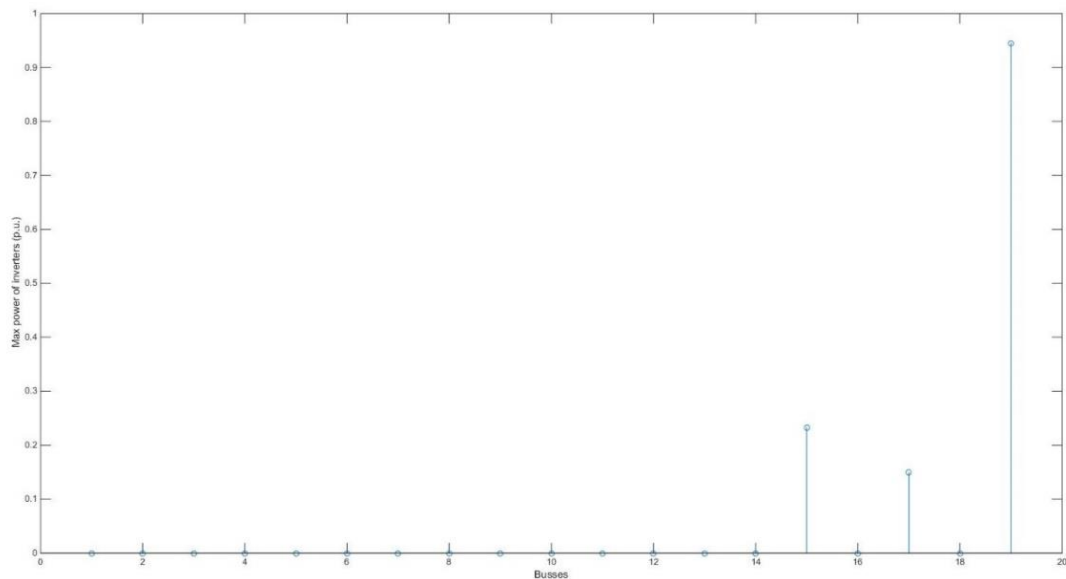
Διάγραμμα 9.24 Τελικές τιμές χωρητικότητας μπαταριών ανά ζυγό

Η ισχύς που πρέπει να μπορούν να αποδώσουν οι μπαταρίες στο δίκτυο σε επίπεδο ώρας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.25 Αποδιδόμενη ισχύς μπαταριών ανά ώρα

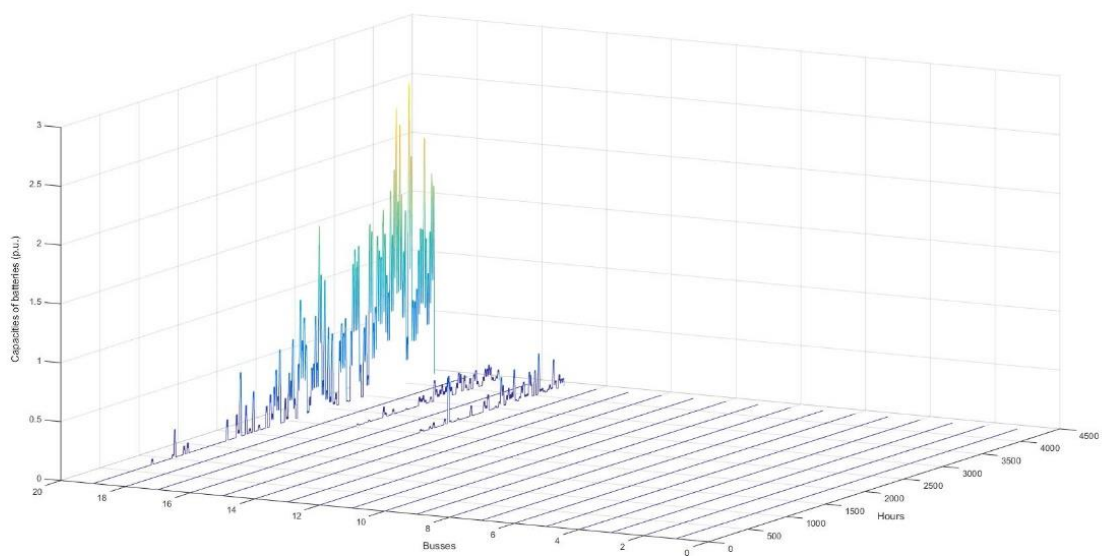
Οι μέγιστες τιμές των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης για την ισχύ των μετατροπέων παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.26 Τελική τιμή ισχύος μετατροπέων ισχύος ανά ζυγό

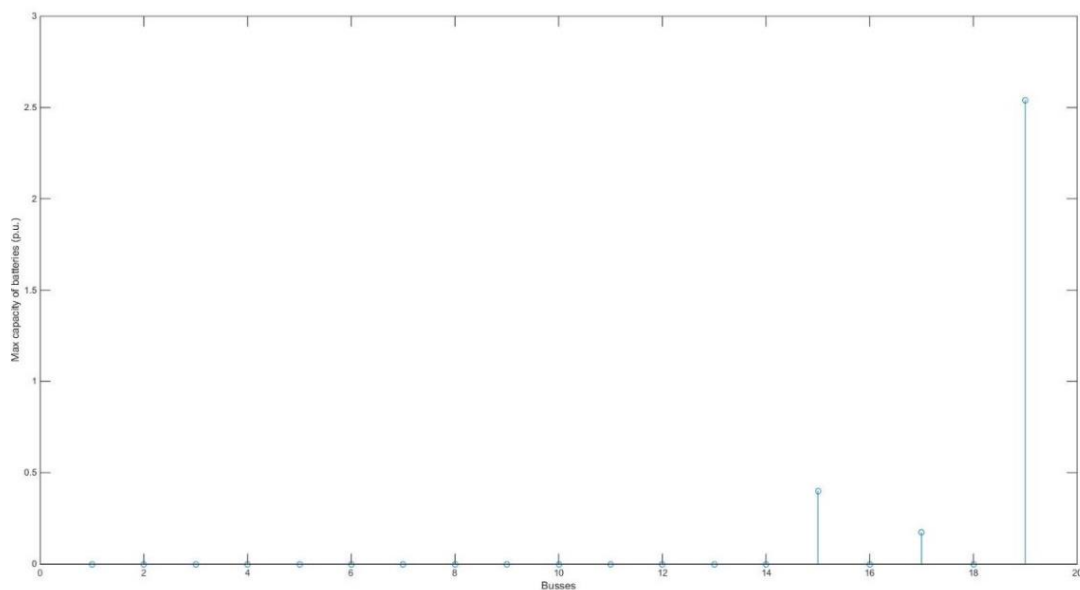
#### 9.6.4. Περίπτωση IV

Στην περίπτωση IV οι μπαταρίες τοποθετούνται στους ζυγούς 15,17,19, χωρίς συνυπολογισμό της γήρανσης των μπαταριών. Οι χωρητικότητες των μπαταριών για κάθε ώρα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



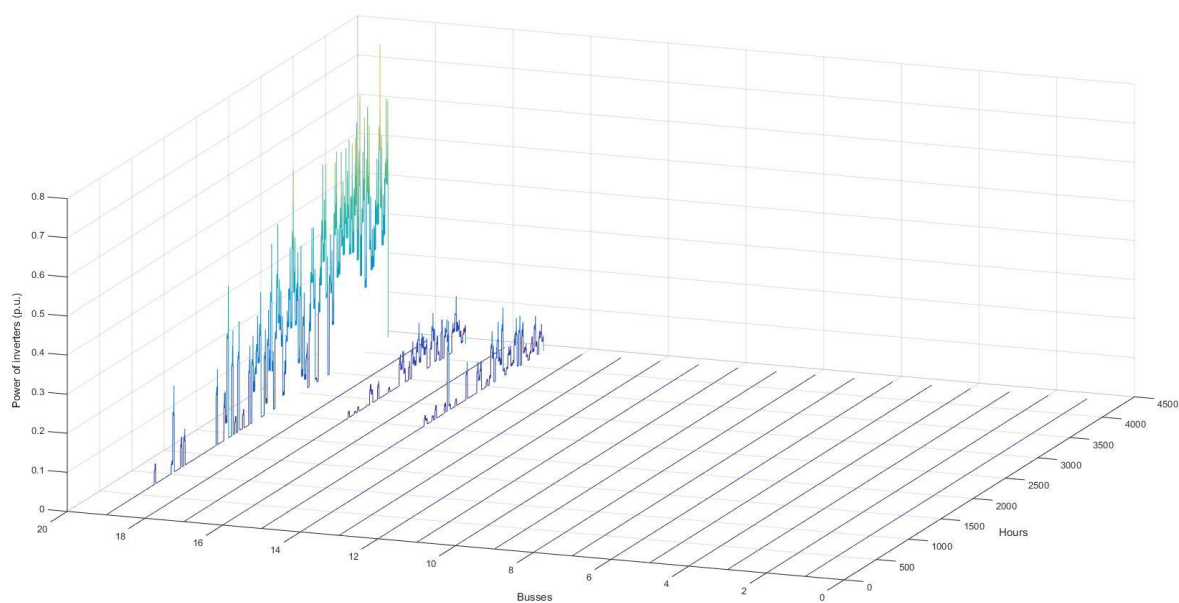
Διάγραμμα 9.27 Χωρητικότητα μπαταριών

Οι μέγιστες τελικές τιμές των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.28 Τελική τιμή χωρητικότητας μπαταριών ανά ζυγό

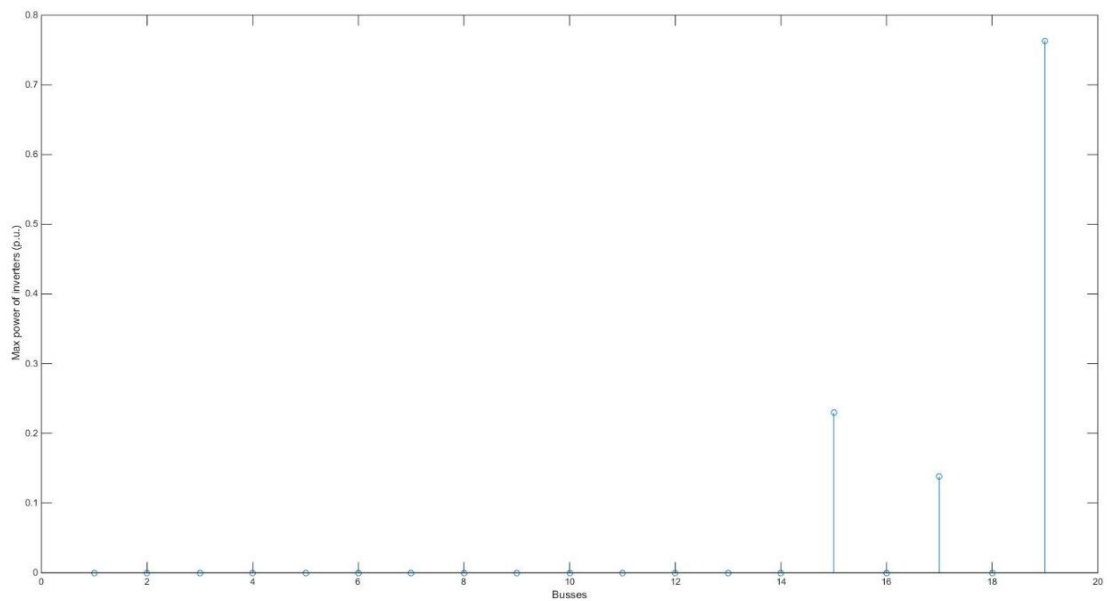
Η ισχύς που πρέπει να μπορούν να αποδώσουν οι μπαταρίες στο δίκτυο σε επίπεδο ώρας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.29 Ισχύς μπαταριών



Οι μέγιστες τιμές των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης για την ισχύ των μετατροπέων παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.30 Τελική ισχύς μετατροπέων ισχύος ανά ζυγό



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10:**  
**Οικονομικά**  
**αποτελέσματα**  
**και ανάλυση**



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Οικονομικά αποτελέσματα και ανάλυση

## 10.1. Τελική χωρητικότητα

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της εγκατεστημένης χωρητικότητας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας για κάθε περίπτωση, καθώς και του ζυγού 19 ο οποίος διαθέτει τη μεγαλύτερη χωρητικότητα και για τις τέσσερις περιπτώσεις.

Περίπτωση	Εγκατεστημένη χωρητικότητα μπαταριών ζυγού 19 (Es <sub>19</sub> )(KWh)	Συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα (Es)(KWh)
10 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	51,12	212,01
10 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	52,39	197,68
3 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	119,77	168,53
3 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	127,00	155,74

*Πίνακας 10.1 Εγκατεστημένη χωρητικότητα*

Περίπτωση	Ισχύς μετατροπών ζυγού 19 (Rs <sub>19</sub> ) (KW)	Συνολική ισχύς μετατροπών (Rs)(KW)
10 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	14,25	79,85
10 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	13,23	79,64
3 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	47,25	66,38
3 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	38,14	56,52

*Πίνακας 10.2 Ισχύς μετατροπών*

Παρατηρείται από τα παραπάνω αποτελέσματα ότι στην περίπτωση των δέκα αλλά και των τριών μονάδων, η επίλυση της βελτιστοποίησης χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μονάδων αποθήκευσης καταλήγει σε μεγαλύτερη τιμή για την εγκατεστημένη χωρητικότητα του ζυγού 19. Αυτό είναι λογικό, όπως θα παρουσιάσουμε και παρακάτω, ο ζυγός 19 έχει μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με τους υπόλοιπους ζυγούς, κάτι το οποίο μπορεί να γίνει αντιληπτό και από τις χρονοσειρές των φορτίων. Όταν δεν λαμβάνεται ως παράγοντας ελαχιστοποίησης η γήρανση των μπαταριών, ο αλγόριθμος λόγω του πλήθους των ζυγών που διαθέτουν μονάδες αποθήκευσης, επιλέγει να τοποθετήσει μεγαλύτερες μονάδες σε ορισμένους ζυγούς στους οποίους η ζήτηση είναι αυξημένη και το πρόβλημα ελέγχου των τάσεων είναι εντονότερο, και να μειώσει με αυτό τον τρόπο τις απώλειες του δικτύου. Αντίθετα όταν πρωταρχικό ρόλο παίζει η ελαχιστοποίηση του φαινομένου της γήρανσης των μπαταριών, τότε ο αλγόριθμος κάνει επιλογές έτσι ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η καταπόνηση των μπαταριών και αυτό οδηγεί σε πιο ισορροπημένη ταξινόμηση του συνόλου της εγκατεστημένης χωρητικότητας του δικτύου και άρα μπαταρίες μικρότερης χωρητικότητας για τον συγκεκριμένο ζυγό (ζυγό 19).

Επίσης στην περίπτωση των τριών εγκατεστημένων μονάδων αποθήκευσης, παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα του ζυγού 19 είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την περίπτωση των δέκα εγκατεστημένων μονάδων. Αυτό συμβαίνει γιατί, καθώς το δίκτυο πρέπει να ικανοποιήσει τα ίδια επίπεδα ζήτησης των φορτίων που οδηγούν σε παραβιάσεις των ορίων των τάσεων, έχοντας στην περίπτωση των τριών μονάδων λιγότερα αποθηκευτικά μέσα.

Σε ότι αφορά τη συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα, παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις που συνυπολογίζεται το φαινόμενο της γήρανσης των μπαταριών, η τιμή της είναι μεγαλύτερη σε αντίθεση με την περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη η γήρανση. Αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί στα πλαίσια της εξομάλυνσης της λειτουργίας των μπαταριών, θα πρέπει να υφίσταται μεγαλύτερης χωρητικότητας σύστημα μπαταριών, ώστε να προσφέρεται η ίδια ενέργεια στο δίκτυο μέσα σε μία μέρα με μικρότερο ρεύμα και άρα πιο αργούς κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης.

## **10.2. Μέσος ρυθμός γήρανσης**

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο μέσος ρυθμός γήρανσης των μπαταριών του ζυγού 19, καθώς και ο συνολικός μέσος ρυθμός γήρανσης για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις.

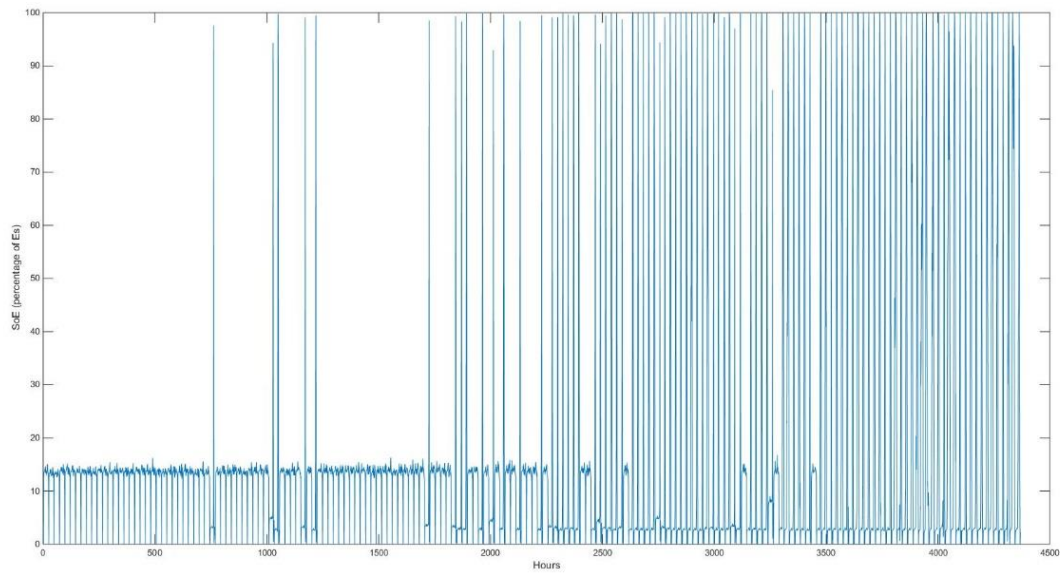
Περίπτωση	Μέσος συνολικός ρυθμός γήρανσης μπαταριών του ζυγού 19 (kWh/h)	Μέσος συνολικός ρυθμός γήρανσης μπαταριών
10 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	6,85E-05	3,04E-04
10 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	2,30E-04	9,70E-04
3 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	2,59E-04	3,17E-04
3 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	9,22E-04	1,01E-03

*Πίνακας 10.3 Μέσος ρυθμός γήρανσης των μπαταριών*

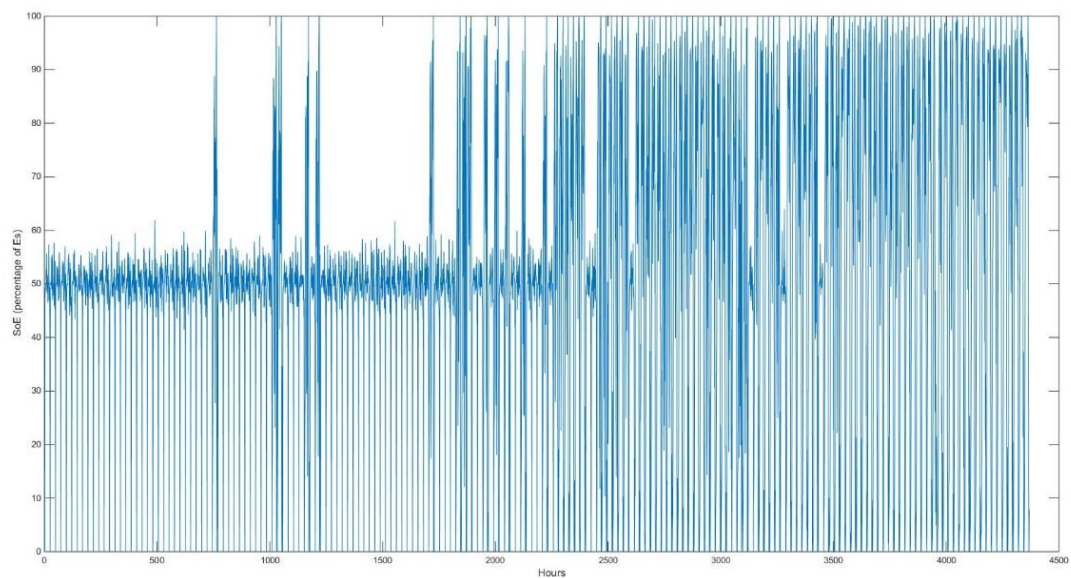
Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις που δεν εντάσσουμε την γήρανση των μονάδων ως παράγοντα βελτιστοποίησης, η τιμή του μέσου ρυθμού γήρανσης είναι μεγαλύτερη αντίστοιχα. Αυτό είναι φυσιολογικό, διότι οι επιλογές για τη βέλτιστη ροή φορτίου που γίνονται από τον αλγόριθμο, δεν λαμβάνουν υπόψη καθόλου το φαινόμενο της γήρανσης. Επίσης παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις με τις τρεις μπαταρίες τα αποτελέσματα για την τιμή της γήρανσης είναι μεγαλύτερα, αφού με διάθεση λιγότερων μονάδων αποθήκευσης, κάθε μονάδα καταπονείται περισσότερο στα πλαίσια της βέλτιστης ροής φορτίου του δικτύου και του ελέγχου των τάσεων.

### **10.3. Κατάσταση φόρτισης**

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της εναπομένουσας ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο ώρας, ως ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας των μπαταριών.

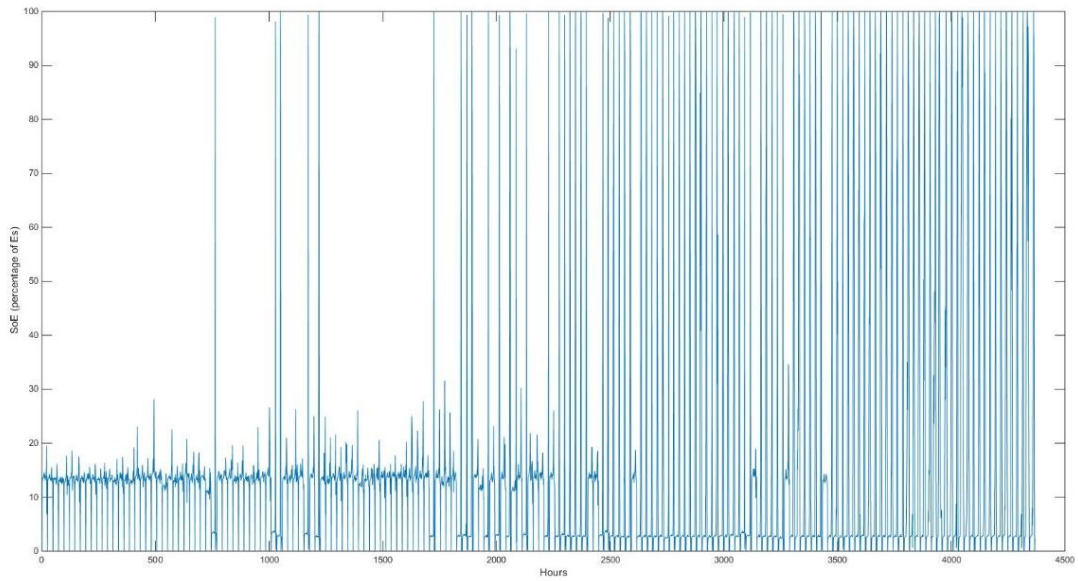


Διάγραμμα 10.1 Εναπομένουσα ενέργεια μπαταριών ανά ώρα, στην περίπτωση των δέκα εγκατεστημένων μονάδων με συνυπολογισμό του φαινομένου της γήρανσης

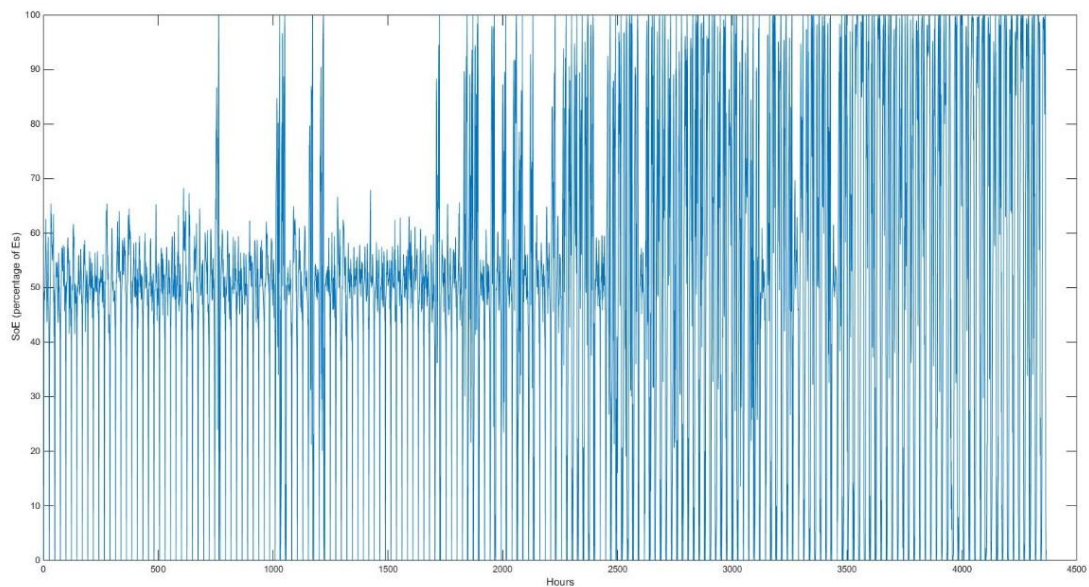


Διάγραμμα 10.2 Εναπομένουσα ενέργεια μπαταριών ανά ώρα στην περίπτωση των δέκα εγκατεστημένων μονάδων χωρίς συνυπολογισμό του φαινομένου της γήρανσης





*Διάγραμμα 10.3 Εναπομένουσα ενέργεια μπαταριών ανά ώρα στην περίπτωση των τριών εγκατεστημένων μονάδων με συνυπολογισμό του φαινομένου της γήρανσης*



*Διάγραμμα 10.4 Εναπομένουσα ενέργεια μπαταριών ανά ώρα στην περίπτωση των τριών εγκατεστημένων μονάδων χωρίς συνυπολογισμό του φαινομένου της γήρανσης*

Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις που δεν συνυπολογίζεται η γήρανση των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας η εναπομένουσα ενέργεια των μπαταριών (SoE) παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις με μεγάλες διαφορές στην τιμή της σε επίπεδο ώρας, σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Αντίθετα στα αποτελέσματα με ενσωμάτωση του φαινομένου της γήρανσης, η χρονοσειρά της εναπομένουσας

ενέργειας των μονάδων είναι πιο ομαλή, με μικρότερες διαφοροποιήσεις από ώρα σε ώρα. Αυτό είναι λογικό, καθώς στα πλαίσια της ελαχιστοποίησης του παράγοντα της γήρανσης, οι έντονες διαφοροποιήσεις των τιμών της εναπομένουσας ενέργειας των μπαταριών, έχουν ως αποτέλεσμα την έντονη διαφοροποίηση των τιμών της προσφερόμενης ισχύος από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο και άρα την μεγαλύτερη καταπόνησή του αντίστοιχα. Σύμφωνα με τον χάρτη γήρανσης με τον οποίο τροφοδοτήσαμε την βελτιστοποίηση, το γεγονός αυτό θα αύξανε κατά πολύ το ρυθμό γήρανσης των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 10.4. Ετήσιο ισοδύναμο κόστος

Είναι φυσιολογικό με την μεγαλύτερη τιμή της εγκατεστημένης χωρητικότητας των μονάδων αποθήκευσης που απαιτείται, αλλά και την μεγαλύτερη τιμή της ισχύος των αντιστροφών, να αυξάνεται το κόστος. Όμως ο παράγοντας της γήρανσης είναι πολύ σημαντικός γιατί καθορίζει το χρόνο ζωής των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας καθώς και την χωρητικότητά τους. Για την τελική επιλογή ως προς τον αριθμό των μπαταριών, το μέγεθος της χωρητικότητάς τους, καθώς και για το μέγεθος των αντιστροφών, γίνεται χρήση του κριτηρίου του Ομοιόμορφου Ετήσιου Ισοδύναμου Κόστους. Για την εφαρμογή του κριτηρίου απαιτείται η αναγωγή όλων των σταθερών και μεταβλητών δαπανών, συμπεριλαμβανομένων των επενδυτικών, σε ετήσια βάση. Για τον υπολογισμό του Ετήσιου Ισοδύναμου Κόστους, χρησιμοποιείται η παρακάτω προσέγγιση.

$$\text{Συνολικό ετήσιο κόστος} = C_0 * \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + OC \quad (10.1)$$

όπου:  $C_0$  = η επένδυση το έτος 0 (έτος αναφοράς)

$OC$  = συνολικά καθαρά κόστη λειτουργίας και συντήρησης (σταθερά)

$r$  = το επιτόκιο προεξόφλησης

$n$  = η εκτιμωμένη διάρκεια ζωής του έργου σε έτη

#### 10.5. Επιμέρους κόστη

Για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών λαμβάνεται ως δεδομένο ότι το μοντέλο συντήρησης που θα ακολουθήσει ο διαχειριστής του δικτύου, που θα είναι υπεύθυνος και για την εγκατάσταση αλλά και διαχείριση του συστήματος αποθήκευσης, προϋποθέτει την αντικατάσταση τις εκάστοτε μονάδας αποθήκευσης

ενέργειας, όταν φτάσει σε ένα κατώτατο όριο χωρητικότητας στο οποίο πλέον δεν θα μπορέσει να ικανοποιεί τις ανάγκες του δικτύου (80% της ονομαστικής χωρητικότητας). Επειδή ένας από τους στόχους της συγκεκριμένης εργασίας είναι να αποδειχθεί εποπτικά ότι είναι συμφέρον να εντάξουμε τα εμπειρικά μοντέλα γήρανσης στις τεχνικές βελτιστοποίησης για την διαστασιολόγηση των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, διαδικασίες όπως η αντικατάσταση της μπαταρίας ενός ζυγού και η τοποθέτηση της αντικαθιστάμενης μπαταρίας σε ένα ζυγό του δικτύου που οι ανάγκες σε χωρητικότητα αποθηκευμένης ενέργειας είναι μικρότερες, δεν λαμβάνονται υπόψη και άρα η υπολειμματική αξία των μπαταριών μετά το πέρας του χρόνου ζωής τους, θεωρείται μηδενική. Το συνολικό κόστος επένδυσης το έτος 0 ( $C_0$ ) των μονάδων αποθήκευσης είναι άθροισμα τριών όρων:

1. Κόστος Μονάδων Αποθήκευσης (SUC)
2. Κόστος Ηλεκτρονικών Ισχύος (PCS)
3. Κόστος Υπόλοιπων Κατασκευαστικών Μερών (BOP)

Όπου:

$$PCS = \text{Κόστος μονάδας ηλ. ισχύος (€/kW)} \cdot \sum Rs(k) \quad (10.2)$$

όπου  $R_s(k)$  η ονομαστική ισχύς των μπαταριών του ζυγού  $k$ .

$$SUC = \text{Κόστος μονάδας αποθήκευσης (€/kWh)} \cdot \sum ES(k) \quad (10.3)$$

όπου  $E_s(k)$  η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών του ζυγού  $k$ .

$$BOP = \text{Κόστος εγκατάστασης (€/kW)} \cdot \sum Rs(k) \quad (10.4)$$

όπου  $R_s(k)$  η ονομαστική ισχύς των μπαταριών του ζυγού  $k$ .

Οπότε το συνολικό αρχικό κόστος κεφαλαίου επένδυσης ( $C_0$ ) ισούται με:

$$C_0 = SUC + PCS + BOP \quad (10.5)$$

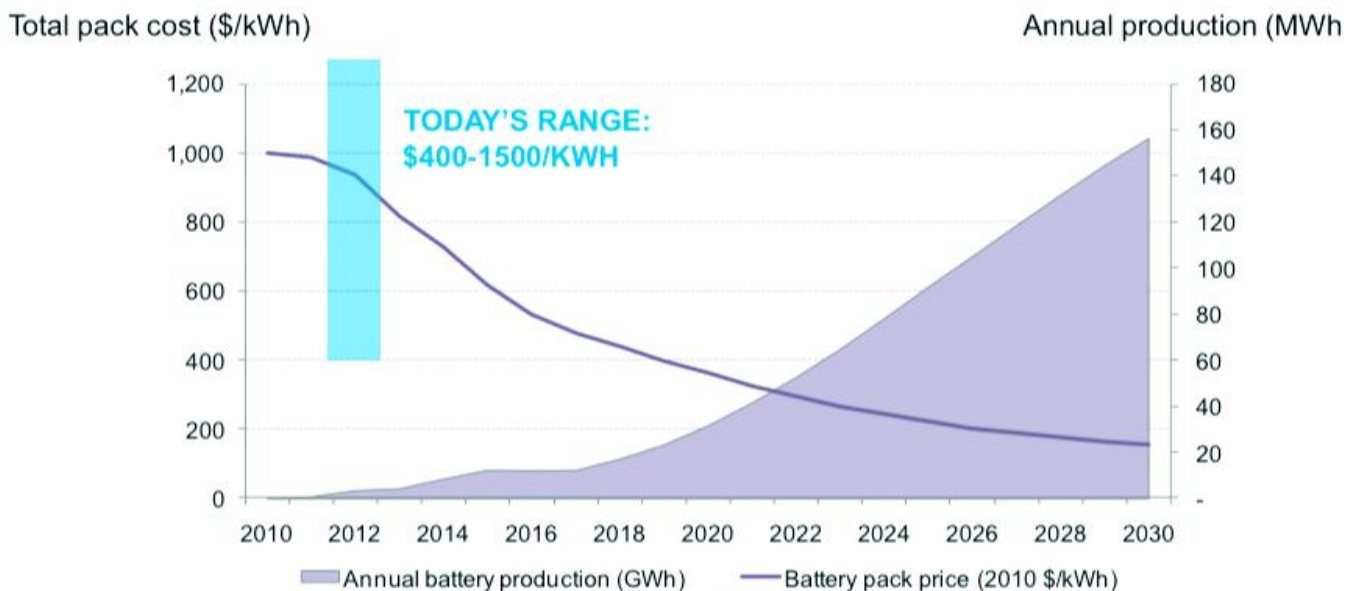
Αφού μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό αρχικό κόστος κεφαλαίου της επένδυσης, με τον παρακάτω τύπο υπολογίζουμε και τα ετήσια κόστη λειτουργίας και συντήρησης (OMC) τα οποία θεωρούνται και σταθερά για κάθε έτος:

$$OC = \text{Λ\&Σ κόστος μονάδας (€/kW)} \sum R_s(k) \quad (10.6)$$

όπου  $R_s(k)$  η ονομαστική ισχύς των μπαταριών του ζυγού  $k$ .

## 10.6. Οικονομικό αποτέλεσμα

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση της ζήτησης των μπαταριών ιόντων λιθίου, που από διάφορες μελέτες οφείλεται στην αύξηση της ενσωμάτωσής τους στα ηλεκτρικά δίκτυα και της ευρείας χρήσης στα ηλεκτρικά οχήματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να καταστούν τα τελευταία χρόνια κύριο αντικείμενο της έρευνας, με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης 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 παρακάτω διάγραμμα λαμβάνονται υπόψη κατά τη λύση του προβλήματος της διαστασιολόγησης των μπαταριών στο δίκτυο.



Διάγραμμα 10.5 Διάγραμμα κόστους και παραγωγής μονάδων ιόντων λιθίου

Για να υπολογίσουμε το χρόνο ζωής των μπαταριών λαμβάνουμε ως δεδομένο ότι όταν η χωρητικότητα της εκάστοτε μπαταρίας ενός ζυγού  $k$  μειωθεί και φτάσει στο 80% της ονομαστικής της χωρητικότητας, πραγματοποιείται αντικατάστασή της, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Γνωρίζοντας την

εγκατεστημένη χωρητικότητα των μπαταριών ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης που υλοποιήσαμε αλλά και τον μέσο ρυθμό γήρανσης των μπαταριών του ζυγού 19 μπορούμε και υπολογίζουμε το χρόνο ζωής με χρήση του παρακάτω τύπου:

$$\text{Χρόνος ζωής (έτη)} = \text{int} \left( \frac{E_{s,19} \cdot 20\%}{2 \cdot D_{19}} \right) \quad (10.7)$$

όπου  $E_{s,19}$  (kWh) είναι η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών στο ζυγό 19 και  $D_{19}$  (kWh/h) η συνολική γήρανση των μπαταριών του ζυγού 19 σε χρονικό ορίζοντα 6 μηνών. Η συνάρτηση int() υποδηλώνει ότι επειδή το αποτέλεσμα θα είναι δεκαδικός αριθμός μας ενδιαφέρει να κρατήσουμε μόνο το ακέραιο μέρος του, διότι η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί σε ακέραια έτη. Ο πολλαπλασιασμός του  $D_{19}$  με το 2 γίνεται προκειμένου να προσεγγίσουμε τη συνολική γήρανση της μπαταρίας σε ένα χρόνο. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για τη συνολική γήρανση των μπαταριών του ζυγού 19 στη διάρκεια ενός χρόνου.

Περίπτωση	Συνολική γήρανση του ζυγού 19 σε ένα έτος (kWh)
10 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	0,5986
10 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	2,0104
3 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	2,2634
3 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	8,0518

Πίνακας 10.4 Συνολική γήρανση μπαταριών ζυγού 19

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (10.7) αλλά και τα αποτελέσματα για συνολική γήρανση των μπαταριών που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 10.4 καθώς και για την χωρητικότητα των αντίστοιχων μπαταριών του πίνακα 10.1 καταλήγουμε σε μία εκτίμηση του χρόνου ζωής των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας του ζυγού 19 που εγκαταστάθηκε σε κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Περίπτωση	Χρόνος ζωής μπαταριών του ζυγού 19 (έτη)
10 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	17
10 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	5
3 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	10
3 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	3

*Πίνακας 10.5 Χρόνος ζωής μπαταριών ζυγού 19*

Από αυτό το σημείο παρατηρείται ότι εντάσσοντας την γήρανση των μονάδων ως παράγοντα βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο χρόνος ζωής των μπαταριών επεκτείνεται σημαντικά σε σχέση με την περίπτωση που δεν εντάσσουμε την γήρανση των μονάδων. Σε μια ρεαλιστική εφαρμογή οι μπαταρίες αυτές δεν θα παρείχαν μόνο αυτή την υπηρεσία. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και για πολλές ακόμα ταυτόχρονα (σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μόνο παρέχοντας πολλαπλές υπηρεσίες η μπαταρία μπορεί να αποδειχτεί οικονομικά αποδοτική για χρήση στα ηλεκτρικά δίκτυα), για κερδοσκοπία ή/και εξομάλυνση ΑΠΕ από τους ιδιοκτήτες τους. Αν λαμβάναμε υπόψη αυτές τις πολλαπλές υπηρεσίες ακόμα και με ενσωμάτωση της γήρανσης τα αποτελέσματα δεν θα είχαν τόσο μεγάλη διαφορά. Παρόλα αυτά αν και όχι τόσο ρεαλιστικό, το αποτέλεσμα είναι σημαντικό γιατί δείχνει τη σημασία της ενσωμάτωσης ενός μοντέλου γήρανσης σε προβλήματα βελτιστοποίησης με μπαταρίες στα ηλεκτρικά δίκτυα.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για το αρχικό επενδυτικό κόστος των μπαταριών (SUC), το αρχικό κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος (PCS), το κόστος των υπόλοιπων κατασκευαστικών μερών (BOP) αλλά και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (OMC) παρουσιάζονται παρακάτω:

- SUC = 500 €/kWh
- PCS = 220 €/kW
- BOP = 60 €/kW

- OMC = 0 €/kW

Ως ετήσιο επιτόκιο αναγωγής επιλέχτηκε το 5% και τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται παρακάτω:

Περίπτωση	Ετήσια ισοδύναμα κόστη (€)
10 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	2620,9
10 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	6906,2
3 μπαταρίες με ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	9468,7
3 μπαταρίες χωρίς ενσωμάτωση της γήρανσης των μπαταριών	27239,9

*Πίνακας 10.6 Ετήσιο ισοδύναμο κόστος μονάδων αποθήκευσης ζυγού 19*

Όπως ήταν αναμενόμενο στις περιπτώσεις που η γήρανση των μπαταριών ενσωματώνεται ως παράγοντας βελτιστοποίησης στην προσομοίωση, το Ετήσιο Ισοδύναμο Κόστος είναι μικρότερο. Αυτό οφείλεται στην σημαντική επέκταση του χρόνου ζωής του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω του τρόπου λειτουργίας του για την επίτευξη της βέλτιστης ροής φορτίου και τον έλεγχο των ορίων των τάσεων, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την γήρανση των μονάδων σε επίπεδο ώρας. Όμως τα αποτελέσματα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως δεν είναι ρεαλιστικά καθώς στην πραγματικότητα μια τέτοια μπαταρία θα πρόσφερε και άλλες υπηρεσίες στο δίκτυο με αποτέλεσμα να έχει διαφορετικό προφίλ φόρτισης και άρα χρόνο ζωής.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: Σύνοψη



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: Σύνοψη

Ο ηλεκτρικός τομέας αποτελεί την πιο σημαντική υποδομή των σύγχρονων κοινωνιών, η αξιόπιστη προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την ποιότητα και ποσότητα, συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία πολλών και ποικίλων τεχνολογικών υποδομών που υπάρχουν σήμερα στην κοινωνία. Οι διαχειριστές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν μια σειρά από περίπλοκα ζητήματα, προκειμένου να μπορούν να εξασφαλίζουν την προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση, ικανοποιώντας την έντονη μεταβλητότητα της οποιαδήποτε στιγμή, ενώ παράλληλα πρέπει να διατηρούν την ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και το οικονομικό και οικολογικό κόστος, στα βέλτιστα επίπεδα.

Η σωστή διαχείριση των ζητημάτων που συσχετίζονται με το δίκτυο διανομής αποτελεί κύριο παράγοντα της προαναφερόμενης διαδικασίας των διαχειριστών. Οι απώλειες ενέργειας στο επίπεδο της διανομής είναι περίπου διπλάσιες από ότι στο επίπεδο της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, επειδή η ιδέα της αποθήκευσης ενέργειας στα δίκτυα διανομής είναι σε πρώιμο στάδιο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ζήτηση. Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να αντιμετωπίσει ο διαχειριστής του δικτύου, είναι η στοχαστική παραγωγή των Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ιδέα ότι για παράδειγμα η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο εγγύς μέλλον είναι πιο υπαρκτή από ποτέ και για αυτούς τους λόγους έχουν προταθεί μια σειρά από λύσεις που βελτιώνουν την διαδικασία επίλυσης των προαναφερθέντων ζητημάτων.

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 όμως, η συγκεκριμένη τεχνολογία αποθήκευσης είναι σχετικά ακριβή, με αποτέλεσμα πολλές έρευνες να έχουν διεξαχθεί, έτσι ώστε να αναλυθεί το κόστος και τα οφέλη της χρήσης της. Παρόλο όμως το υψηλό κόστος εγκατάστασης, αποφέρει πολλά τεχνικά και οικονομικά οφέλη στο εκάστοτε δίκτυο.

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της διαστασιολόγησης των μπαταριών στα δίκτυα διανομής Χ.Τ, δηλαδή το πόση πρέπει να είναι η ελάχιστη χωρητικότητα τους, με σκοπό την ρύθμιση της τάσης των ζυγών, στο πλαίσιο της βέλτιστης ροής φορτίου. Σε αντίθεση με άλλες μελέτες που έχουν γίνει πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, στην παρούσα εργασία δόθηκε βάρος στο φαινόμενο της γήρανσης των μπαταριών και αναπτύχθηκε μια μέθοδος ανάλυσης και ένταξης του

φαινομένου, σε ένα βέλτιστο κυρτό προγραμματισμό διαστασιολόγησης των μονάδων. Η ανάλυση χωρίστηκε σε δύο κύρια μέρη.

Στο πρώτο μέρος, παρουσιάστηκε ένα εμπειρικό μοντέλο για την γήρανση των μπαταριών ιόντων λιθίου και μια μέθοδος παραμετροποίησης και κανονικοποίησης των συναρτήσεων του, ώστε να είναι δυνατό να ενταχθούν σε μία κυρτή βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης των μπαταριών. Κύριο σημείο της παραπάνω διαδικασίας ήταν ο τριγωνισμός Delaunay των τριασδιάστατων αναπαραστάσεων των εμπειρικών μοντέλων της γήρανσης, με των οποίου καταφέραμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους που απαιτεί η μελέτη.

Στο δεύτερο μέρος, αναπτύχθηκε ένα αλγόριθμος βέλτιστης διαστασιολόγησης των μπαταριών αλλά και εύρεσης ενός βέλτιστου προφίλ λειτουργίας των αποθηκευτικών μέσων, εντάσσοντας το μοντέλο της γήρανσης των μπαταριών ως παράγοντα ελαχιστοποίησης κόστους. Ο αλγόριθμος είχε ως περιορισμό τη βέλτιστη ροή φορτίου και μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας λύθηκε το πρόβλημα της διαστασιολόγησης, με τη βοήθεια του ημιορισμένου προγραμματισμού για την αποφυγή της μη γραμμικότητας, αλλά και μη κυρτότητας του προβλήματος, έχοντας σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου και της εγκατεστημένης ενέργειας των αποθηκευτικών μονάδων, της εγκατεστημένης ισχύος των μετατροπέων ισχύος, αλλά και του παράγοντα της γήρανσης των μπαταριών.

Στην συνέχεια, έχοντας κατά νου την σταδιακή μείωση της ικανότητας των μπαταριών ιόντων λιθίου να αποθηκεύουν ενέργεια, δηλαδή ότι 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. Παράλληλα για να παρουσιαστεί η χρησιμότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε για την γήρανση των μπαταριών έγινε σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων με και χωρίς ένταξη του μοντέλου στον αλγόριθμο βέλτιστης διαστασιολόγησης.

Για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB και εφαρμόστηκε σε ένα δίκτυο διανομής XT 19 ζυγών.

Από τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι η τοποθέτηση των μπαταριών στα δίκτυα διανομής Χ.Τ., μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα της απόκλισης των τάσεων των ζυγών από τα καθορισμένα όρια. Επίσης, προκύπτει το γεγονός ότι η ένταξη του παράγοντα της γήρανσης των μπαταριών στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, μπορεί να οδηγήσει σε βέλτιστες τεχνικές ελέγχου των μονάδων με αποτέλεσμα την σημαντική επέκταση του χρόνου ζωής τους και άρα του μακροπρόθεσμου κόστους τους.

Το κύριο όμως αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας είναι ότι παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση των χαρτών γήρανσης των εμπειρικών μοντέλων, που αποτελούν βάση για την κανονικοποίηση και παραμετροποίηση του φαινομένου. Τα τελικά αποτελέσματα έδειξαν τη σημασία της ενσωμάτωσης του παράγοντα της γήρανσης σε προβλήματα βελτιστοποίησης με μπαταρίες στα ηλεκτρικά δίκτυα και ως εκ τούτου αναπτύχθηκε μια μέθοδος ένταξής τους στο πλαίσιο μια κυρτής βελτιστοποίησης για τη διαστασιολόγηση των αποθηκευτικών μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταριών ιόντων λιθίου). Τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να αποτελέσουν μια σημαντική βάση για μεταγενέστερες μελέτες.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12:**  
**Επεκτάσεις της**  
**εργασίας**





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12: Επεκτάσεις της εργασίας

Μια πιθανή επέκταση της συγκεκριμένης εργασίας θα μπορούσε να είναι η ένταξη ενός αλγορίθμου βέλτιστης τοποθέτησης των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε τα αποτελέσματα ως προς την τοποθέτηση, τη χωρητικότητα και το κόστος των μονάδων αποθήκευσης να είναι ακόμα πιο ολοκληρωμένα. Όπως επίσης και η εφαρμογή των διαδικασιών που αναπτύχθηκαν, σε δίκτυα Μέσης Τάσης.

Μια ακόμα επέκταση, θα μπορούσε να είναι η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση των μονάδων αποθήκευσης, 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 για μπαταρίες που παρέχουν πολλαπλές υπηρεσίες στο δίκτυο αυξάνοντας την οικονομικότητα τους

Τέλος, σημαντικό είναι το γεγονός ότι με την ανάπτυξη μιας μεθόδου ένταξης του φαινομένου της γήρανσης των μπαταριών σε μια κυρτή βελτιστοποίηση ως παράγοντα κόστους αλλά και την παρουσίαση των κανονικοποιημένου μοντέλου για τη γήρανση της μπαταρίας, δημιουργείται μια βάση η οποία μπορεί να ενταχθεί σε ποικίλες εφαρμογές και έρευνες στον τομέα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βοβός, Νικόλαος Α. "Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας." *Πανεπιστήμιο Πατρών*(2004).
- [2] Βουρνάς, Κ., and Γ. Κονταξής. "Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας." *έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα* (2001).
- [3] Linden, David, and Thomas B. Reddy. "Handbook of Batteries. 3rd." *McGraw-Hill* (2002).
- [4] Πετρόπουλος, Απόστολος. "Βελτιστη Ροη Ενεργου Και Αεργου Ισχυος Σε Δικτυο Διανομης Με Μοναδες Διεσπαρμενης Παραγωγης Και Μοναδες Αποθηκευσης Ενεργειας." (2014).
- [5] Bussar, Rainer, et al. "Battery energy storage for smart grid applications." *EuroBat, May* (2013).
- [6] Whitaker, Jerry C. *The electronics handbook*. CRC press, 2005.
- [7] Ter-Gazarian, Andrei G. *Energy storage for power systems*. No. 6. let, 1994.
- [8] Darling, Robert, and John Newman. "Modeling side reactions in composite li y mn2 o 4 electrodes." *Journal of The Electrochemical Society* 145.3 (1998): 990-998.
- [9] Spotnitz, R., and J. Franklin. "Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells." *Journal of Power Sources* 113.1 (2003): 81-100.
- [10] Xu, Bolun. "Degradation-limiting optimization of battery energy storage systems operation." (2013).
- [11] Ramadass, P., et al. "Development of first principles capacity fade model for Li-ion cells." *Journal of the Electrochemical Society* 151.2 (2004): A196-A203.

- [12] Fortenbacher, Philipp, and Göran Andersson. "Battery degradation maps for power system optimization and as a benchmark reference." *PowerTech, 2017 IEEE Manchester*. IEEE, 2017.
- [13] Forman, Joel C., et al. "Optimal experimental design for modeling battery degradation." *ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [14] Weng, Caihao, Jing Sun, and Huei Peng. "An open-circuit-voltage model of lithium-ion batteries for effective incremental capacity analysis." *ASME 2013 dynamic systems and control conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [15] Fortenbacher, Philipp, Johanna L. Mathieu, and Göran Andersson. "Modeling, identification, and optimal control of batteries for power system applications." *Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014*. IEEE, 2014.
- [16] Plett, Gregory L. "Recursive approximate weighted total least squares estimation of battery cell total capacity." *Journal of Power Sources* 196.4 (2011): 2319-2331.
- [17] Lee, Der-Tsai, and Bruce J. Schachter. "Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation." *International Journal of Computer & Information Sciences* 9.3 (1980): 219-242.
- [18] Βασιλείου, Πέτρος. *Τριγωνοποίηση Delaunay: μία υλοποίηση βασισμένη στη GPU και η χρήση της σε προβλήματα πραγματικού χρόνου της υπολογιστικής όρασης και της γραφικής*. Diss. 2012.
- [19] Bai, Xiaoping, and Hua Wei. "A semidefinite programming method with graph partitioning technique for optimal power flow problems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 33.7 (2011): 1309-1314..
- [20] Giannitrapani, Antonio, et al. "Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks." *IEEE Transactions on Smart Grid* (2016): 1-12.

- [21] Xia, Yan, and Ka Wing Chan. "Dynamic constrained optimal power flow using semi-infinite programming." *IEEE transactions on power systems* 21.3 (2006): 1455-1457.
- [22] Grant, Michael, Stephen Boyd, and Yinyu Ye. "CVX: Matlab software for disciplined convex programming." (2008).
- [23] Fortenbacher, Philipp, Andreas Ulbig, and Göran Andersson. "Optimal placement and sizing of distributed battery storage in low voltage grids using receding horizon control strategies." *IEEE Transactions on Power Systems* 33.3 (2018): 2383-2394.
- [24] Σουμαλάς, Κωνσταντίνος. "Μελέτη τοπολογίας Δικτύων Διανομής με χρήση δεδομένων έξυπνων μετρητών." (2016).
- [25] Πετρόπουλος, Απόστολος. "Βελτιστη Ροη Ενεργου Και Αεργου Ισχυος Σε Δικτυο Διανομης Με Μοναδες Διεσπαρμενης Παραγωγης Και Μοναδες Αποθηκευσης Ενεργειας." (2014).
- [26] Freund, Robert M. "Introduction to semidefinite programming (SDP)." *Massachusetts Institute of Technology* (2004)..
- [27] Xia, Yan, and Ka Wing Chan. "Dynamic constrained optimal power flow using semi-infinite programming." *IEEE transactions on power systems* 21.3 (2006): 1455-1457.
- [28] Coffrin, Carleton, Hassan L. Hijazi, and Pascal Van Hentenryck. "Strengthening convex relaxations with bound tightening for power network optimization." *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*. Springer, Cham, 2015.